

การพัฒนาาระบบควบคุมของอุปกรณ์ตัดต่อสำหรับ  
แหล่งกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กและไมโครกริด

DEVELOPMENT OF CONTROL SYSTEM FOR SEPARATION DEVICE  
FOR DISTRIBUTED ENERGY RESOURCE AND MICROGRID



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ.2557

KMITL-2014-EN-M-020-115

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DEVELOPMENT OF CONTROL SYSTEM FOR SEPARATION DEVICE  
FOR DISTRIBUTED ENERGY RESOURCE AND MICROGRID



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2014

KMITL-2014-EN-M-020-115

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2014

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การพัฒนาระบบควบคุมของอุปกรณ์ตัดต่อสำหรับแหล่งกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก  
และไมโครกริด  
Thesis Title Development of Control System for Separation Device for Distributed  
Energy Resource and Microgrid  
นักศึกษา นายสุรจิต แสนทวีสุข  
รหัสประจำตัว 52610428  
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ดร.สมภพ ผลไม้  
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2014-EN-M-020-115

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
รศ.ดร.สุพัฒน์ กิตติรัตน์สัจจา	
ผศ.ดร.ชัยยันต์ เจตนาเสน	
ผศ.ดร.สุเมธ เนติสัตตตานนท์	
ผศ.ดร.สมยศ เกียรติวนิชวิไล	
ดร.สมภพ ผลไม้	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันศุกร์ที่ 23 พฤษภาคม พ.ศ. 2557 เวลา 15.00-17.00 น.  
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 4

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(ศาสตราจารย์ ดร.สุชวีร์ สุวรรณสวัสดิ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้ประโยชน์ทางการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิง คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์ นำไปใช้

วันที่ 23 พฤษภาคม พ.ศ. 2557

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาระบบควบคุมของอุปกรณ์ตัดต่อสำหรับแหล่งกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กและไมโครกริด
นักศึกษา	นายสุรจิต แสนทวีสุข
รหัสประจำตัว	52610428
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2557
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ดร.สมภาพ ผลไม้

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการพัฒนาระบบควบคุมของอุปกรณ์ตัดต่อสำหรับแหล่งกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กและไมโครกริด อุปกรณ์ตัดต่อนี้เชื่อมต่อกับกริดและไมโครกริดเข้าด้วยกันที่สภาวะปกติ และตัดสองระบบออกจากกันเมื่อเกิดสภาวะผิดปกติ โดยศึกษาการออกแบบชุดควบคุมดิจิทัลซึ่งทำหน้าที่ตรวจสอบเงื่อนไขปกติและผิดปกติ อัลกอริทึมของการตรวจสอบความผิดปกติได้ถูกนำเสนอ และถูกนำไปใช้บนชุดพัฒนาระบบควบคุมฝังตัวเวลาจริงของบริษัทเนชั่นแนลอินทราเม้นท์ส์ ซึ่งสามารถโปรแกรมได้จากซอฟต์แวร์ LabVIEW โดยมีเงื่อนไขในการทำงานของอุปกรณ์ตัดต่อ คือ ตรวจสอบแรงดันเกินและแรงดันต่ำ, ตรวจสอบความถี่สูงและความถี่ต่ำ, ตรวจสอบกระแสเกิน, ตรวจสอบกำลังไฟฟ้าไหลย้อนกลับ, ตรวจสอบการชิงโครไนซ์ โดยข้อกำหนดที่ใช้ตรวจจับนั้นอ้างอิงมาตรฐานต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น มาตรฐาน IEEE 1547, ระเบียบการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำหรับผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมาก (VSPP), มาตรฐาน SEMI F47, มาตรฐานเส้นโค้ง ITIC ในการทดลองได้ใช้ชุดจำลองระบบไฟฟ้า 3 เฟสจำลองความผิดปกติต่าง ๆ ทางไฟฟ้า เพื่อทดสอบการทำงานของชุดควบคุมดิจิทัล จากผลการทดลองพบว่าชุดควบคุมดิจิทัล สามารถตรวจสอบความผิดปกติทางไฟฟ้าต่างๆ ได้ทุกกรณี แต่ความเร็วในการตรวจจับความผิดปกติของขนาดแรงดันนั้นมีความผันผวนมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งกรณีแรงดันไฟฟ้าตกต่ำกว่า 50% ซึ่งพบว่าระบบควบคุมมีผลตอบสนองที่ช้ามากจนไม่สามารถปลดวงจรกริดและไมโครกริดออกจากกันได้ทันเวลาตามมาตรฐานที่กำหนด การแก้ไขข้อจำกัดนี้จะต้องได้รับการแก้ไขในการวิจัยต่อไปในอนาคต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต่ออ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Thesis</b>	Development of Control System for Separation Device for Distributed Energy Resource and Microgrid
<b>Student</b>	Mr.Surajit Santaveesuk
<b>Student ID.</b>	52610428
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Program</b>	Electrical Engineering
<b>Year</b>	2014
<b>Thesis Advisor</b>	Dr. Sompob Polmai

## ABSTRACT

This thesis presents development of control system for separating device for microgrid and distributed energy resource. The separating device connects grid and microgrid together at normal operating conditions and separates them during abnormal conditions. In this thesis, abnormal condition detection algorithm is proposed and implemented using National Instrument's Real-Time Embedded Controller Development System, which can be programmed by LabVIEW software suit. The algorithm is designed to detect abnormality such as overvoltage, undervoltage, overfrequency, underfrequency, overcurrent, reverse power flow and sychronization, according to the selected standards including the IEEE 1547, the regulations for synchronization of generators for very small power producers (VSPP), SEMI F47 and ITIC curves. The experiments using three-phase power system simulator for abnormality generation with the proposed control system are carried out for each requirement in the mentioned standards. The experimental results show that the proposed control system can detect the abnormalities correctly. However, the detection times for undervoltage detection are severely deviate, especially for the undervoltage with magnitude less than 50% where the response to this abnormality is very slow and the trip time does not meet the standards. This limitation has to be addressed in the future research.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้อย่างดีด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาจาก ดร.สมภพ ผลไม้ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ที่คอยแนะนำแนวทางในการทำวิจัย และการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้น ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุก ๆ ท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้กับข้าพเจ้า

ขอขอบคุณศูนย์นวัตกรรมระบบพลังงาน (Center of Excellence for Innovative Energy System : CInES) ที่ได้สนับสนุนทุน ที่ใช้ในการทำวิจัย

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ในสาขาวิศวกรรมไฟฟ้าและห้อง PEARL LAB ทุกๆ คนที่ให้คำแนะนำต่างๆ และคอยให้กำลังใจเสมอมา

ขอขอบคุณ นายปฐมพงศ์ วิจิตร เพื่อนนักศึกษาปริญญาโทที่คอยช่วยเหลือเสมอมา ขอขอบคุณมากๆ เพื่อน

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวของข้าพเจ้าที่เป็นกำลังใจ และให้การสนับสนุนในทุกเรื่องๆ ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จคล่องตัวดี

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

สุรจิต แสนทวีสุข

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ	
ภาษาไทย .....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป .....	X
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์.....	3
1.3 ทฤษฎีหรือแนวคิดในการวิจัย.....	3
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับการจากวิจัย.....	4
1.6 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์.....	4
1.7 ขั้นตอนการศึกษา.....	5
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 ระบบไฟฟ้ากำลังหลัก (กริด).....	6
2.2 ระบบผลิตไฟฟ้าแบบกระจายศูนย์ (Distributed Generation: DG).....	7
2.2.1 ข้อดีของระบบผลิตไฟฟ้าแบบกระจายศูนย์ (Distributed Generation: DG)....	7
2.3 แหล่งกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก (Distributed Energy Resource:DER).....	8
2.3.1 แหล่งพลังงานในไมโครกริด.....	9
2.4 ไมโครกริด .....	10
2.4.1 องค์ประกอบทั่วไปของไมโครกริด .....	12
2.5 โครงสร้างของอุปกรณ์ตัดต่อ.....	14
2.6 มาตรฐานที่เกี่ยวข้องสำหรับอุปกรณ์ตัดต่อ .....	15
2.6.1 มาตรฐาน IEEE 1547 .....	15
2.6.2 ตรวจสอบกำลังไฟฟ้าไหลย้อนกลับ.....	16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.6.3	ระเบียบการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำหรับผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมาก .....	16
2.6.4	มาตรฐาน SEMI-F47.....	17
2.6.5	เส้นโค้ง ITIC (ITIC Curve).....	18
2.6.6	การตรวจสอบกระแสเกิน .....	19
2.7	วิธีตรวจจับทางไฟฟ้า.....	20
2.7.1	การตรวจจับแรงดันและกระแส.....	21
2.7.2	การตรวจจับความถี่และแรงดันอาร์เอ็มเอส.....	21
2.7.3	การตรวจสอบกำลังไฟฟ้าไหลย้อนกลับ .....	21
2.7.4	การตรวจสอบการชิงโครไนซ์.....	21
2.7.5	เฟสล็อกกลุ๊ป.....	21
บทที่ 3	การออกแบบและสร้างระบบควบคุมของอุปกรณ์ตัดต่อ.....	23
3.1	โครงสร้างโดยรวมของอุปกรณ์ตัดต่อและชุดควบคุมดิจิทัล.....	23
3.2	โครงสร้างของชุดควบคุมดิจิทัล .....	23
3.2.1	ส่วนประมวลผลจริงแบบฝังตัว (Realtime Embedded Controller) .....	24
3.2.2	FPGA อินพุตเอาต์พุตแบบปรับเปลี่ยนได้ (Reconfigurable I/O FPGA).....	24
3.2.3	โมดูลอินพุตเอาต์พุต (I/O Modules).....	25
3.3	ซอฟต์แวร์ LabVIEW.....	26
3.4	State Machine ของชุดควบคุมดิจิทัล .....	27
3.5	การออกแบบส่วนซอฟต์แวร์ของชุดควบคุมดิจิทัล .....	28
3.5.1	การออกแบบในส่วนของ Field Programmable Gate Array (FPGA).....	29
3.5.2	การออกแบบในส่วนของ Realtime Embedded Controller.....	30
3.5.3	มาตรฐาน IEEE 1547 – ตรวจสอบแรงดัน.....	32
3.5.4	มาตรฐาน IEEE 1547 – ตรวจสอบความถี่.....	33
3.5.5	มาตรฐาน IEEE 1547 – ตรวจสอบการชิงโครไนซ์ .....	34
3.5.6	ตรวจสอบกำลังไฟฟ้าไหลย้อนกลับ.....	35
3.5.7	ตรวจสอบความถี่ตามมาตรฐาน VSPP .....	36
3.5.8	มาตรฐาน SEMI F47.....	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.5.9 เส้นโค้ง ITIC.....	38
3.5.10 ตรวจสอบกระแสเกิน.....	39
3.6 การออกแบบด้านฮาร์ดแวร์.....	40
3.6.1 อุปกรณ์ตัดต่อชนิดโซลิตเซตท.....	40
3.6.2 วงจรตรวจจับแรงดัน.....	41
3.6.3 วงจรตรวจจับกระแส.....	42
3.6.4 วงจรไฟเลี้ยง.....	43
3.6.5 วงจรทริป.....	43
3.7 ส่วนคอมพิวเตอร์โฮสต์สำหรับติดต่อผู้ใช้งานกับชุดควบคุมดิจิทัล.....	44
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	46
4.1 การเตรียมการทดลองและอุปกรณ์ในการทดลอง.....	46
4.2 ตัวอย่างสัญญาณที่ได้จากชุดควบคุมดิจิทัล.....	50
4.3 ผลการทดลองมาตรฐาน IEEE 1547.....	52
4.3.1 ผลการทดลองตรวจสอบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำ.....	53
4.3.2 ผลการทดลองตรวจสอบความถี่สูง/ความถี่ต่ำ.....	57
4.3.3 ผลการทดลองตรวจสอบการชิงโครโนซ์.....	59
4.4 ผลการทดลองตรวจสอบกำลังไฟฟ้าไหลย้อนกลับ.....	62
4.5 ผลการทดสอบตรวจสอบกระแสเกิน.....	64
4.6 ผลการทดลองมาตรฐาน VSPP.....	67
4.6.1 ผลการทดลองตรวจสอบความถี่สูง/ความถี่ต่ำ.....	67
4.7 ผลการทดลองมาตรฐาน SEMI F47.....	70
4.8 ผลการทดลองมาตรฐานเส้นโค้ง ITIC.....	74
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ.....	78
5.1 สรุป.....	78
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	80
เอกสารอ้างอิง.....	81

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก ก. โปรแกรม LabVIEW ในส่วน FPGA และ Realtime Embedded Controller .....	83
ภาคผนวก ข. ข้อมูลผลการทดลอง.....	89
ภาคผนวก ค. ผลงานเกี่ยวกับวิทยานิพนธ์ที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	100
ประวัติผู้เขียน.....	106



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตัดใจอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 2.1 มาตรฐานการตรวจสอบแรงดันเกินและแรงดันต่ำ.....	15
ตารางที่ 2.2 มาตรฐานการตรวจสอบความถี่เกินและความถี่ต่ำ.....	15
ตารางที่ 2.3 ค่าพารามิเตอร์ในการตรวจสอบการชิงโครไนซ์.....	16
ตารางที่ 2.4 เพอร์เซ็นต์การเกิดแรงดันชั่วขณะจากแรงดันพิกัดใช้งาน และระยะเวลาการเกิดแรงดันตกชั่วขณะ .....	17
ตารางที่ 4.1 ค่าพิกัดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง .....	49
ตารางที่ 4.2 รายการทดลอง .....	49
ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองตรวจสอบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำ (Magnitude Test) ตามมาตรฐาน IEEE 1547 .....	54
ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองตรวจจับแรงดันเกิน/แรงดันต่ำ (Time Test) ตามมาตรฐาน IEEE 1547.....	56
ตารางที่ 4.5 ผลการทดลองตรวจสอบความถี่สูง/ความถี่ต่ำ (Magnitude Test) ตามมาตรฐาน IEEE 1547.....	58
ตารางที่ 4.6 ผลการทดลองตรวจสอบความถี่สูง/ความถี่ต่ำ (Time Test) ตามมาตรฐาน IEEE 1547.....	58
ตารางที่ 4.7 ผลการทดลองตรวจสอบการชิงโครไนซ์เมื่อความถี่ของกริดและไม่โครกริด มีค่าเกินมาตรฐานกำหนด.....	60
ตารางที่ 4.8 ผลการทดลองตรวจสอบการชิงโครไนซ์เมื่อความถี่ของกริดและไม่โครกริด มีค่าต่ำมาตรฐานกำหนด.....	60
ตารางที่ 4.9 ผลการทดลองตรวจสอบการชิงโครไนซ์เมื่อแรงดันของกริดและไม่โครกริด มีค่าเกินมาตรฐานกำหนด .....	61
ตารางที่ 4.10 ผลการทดลองตรวจสอบการชิงโครไนซ์เมื่อแรงดันของกริดและไม่โครกริด มีค่าต่ำมาตรฐานกำหนด.....	61
ตารางที่ 4.11 ผลการทดลองตรวจสอบกำลังไฟฟ้าไหลย้อนกลับ (Magnitude Test).....	63
ตารางที่ 4.12 ผลการทดลองตรวจสอบกำลังไฟฟ้าไหลย้อนกลับ (Time Test).....	63
ตารางที่ 4.13 ผลการทดลองตรวจสอบกระแสเกินแบบทำงานทันที และแบบเวลาผกผันมาก (Very Inverse) .....	65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และตั้งชื่ออ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 4.14 ผลการทดลองตรวจสอบความถี่สูง/ความถี่ต่ำ (Magnitude Test) ตามมาตรฐาน VSPP .....	68
ตารางที่ 4.15 ผลการทดลองตรวจสอบความถี่สูง/ความถี่ต่ำ (Time Test) ตามมาตรฐาน VSPP .....	68
ตารางที่ 4.16 ผลการทดลองตรวจสอบแรงดันตกชั่วขณะตามมาตรฐาน SEMI F47 ด้วยวิธีจำลองการเกิดแรงดันตกชั่วขณะที่ละเฟส.....	72
ตารางที่ 4.17 ผลการทดลองแรงดันตกชั่วขณะตามมาตรฐาน SEMI F47 ด้วยวิธีจำลองการเกิดแรงดันตกชั่วขณะโดยการเลื่อนมุมเฟส.....	74
ตารางที่ 4.18 ผลการทดลองตรวจสอบแรงดันตกชั่วขณะตามมาตรฐานเส้นโค้ง ITIC.....	75



# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
รูปที่ 1.1 ขั้นตอนในการทำวิจัย .....	5
รูปที่ 2.1 ระบบไฟฟ้ากำลังในปัจจุบันหรือระบบไฟฟ้ากำลังแบบรวมศูนย์ .....	6
รูปที่ 2.2 ระบบไฟฟ้ากำลังในอนาคตหรือระบบไฟฟ้ากำลังแบบแยกศูนย์.....	11
รูปที่ 2.3 องค์ประกอบทั่วไปของไมโครกริด.....	13
รูปที่ 2.4 โครงสร้างของอุปกรณ์ตัดต่อ.....	14
รูปที่ 2.5 ข้อกำหนดอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เพื่อให้สามารถทำงานได้อย่างปลอดภัย เมื่อเกิดแรงดันตกชั่วขณะตามมาตรฐาน SEMI F47 .....	18
รูปที่ 2.6 ข้อกำหนดสำหรับอุปกรณ์คอมพิวเตอร์และอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อให้สามารถทำงานได้อย่างปลอดภัยเมื่อเกิดแรงดันตกชั่วขณะ (เส้นโค้ง ITIC) .....	19
รูปที่ 2.7 ส่วนประกอบต่างๆของวงจรเฟสล็อกลูป.....	22
รูปที่ 3.1 โครงสร้างโดยรวมของอุปกรณ์ตัดต่อและชุดควบคุมดิจิทัล .....	23
รูปที่ 3.2 โครงสร้างของ NI CompactRIO.....	24
รูปที่ 3.3 ส่วนประมวลผลจริงแบบฝังตัวรุ่น NI cRIO-9002.....	24
รูปที่ 3.4 FPGA อินพุตเอาต์พุตแบบปรับเปลี่ยนได้ .....	25
รูปที่ 3.5 โมดูลอนาล็อกอินพุตรุ่น NI 9201.....	25
รูปที่ 3.6 โมดูลอนาล็อกเอาต์พุตรุ่น NI 9263.....	26
รูปที่ 3.7 โมดูลดิจิทัลอินพุตเอาต์พุตรุ่น NI 9401 .....	26
รูปที่ 3.8 State Machine ของชุดควบคุมดิจิทัล.....	27
รูปที่ 3.9 โพล์ชาร์ตการทำงานในส่วน FPGA.....	29
รูปที่ 3.10 โพล์ชาร์ตการทำงานในส่วนของ Realtime Embedded Controller.....	31
รูปที่ 3.11 โพล์ชาร์ตการตรวจสอบแรงดันที่อ้างอิงจากมาตรฐาน IEEE1547.....	32
รูปที่ 3.12 โพล์ชาร์ตการตรวจสอบความถี่ที่อ้างอิงจากมาตรฐาน IEEE 1547 .....	33
รูปที่ 3.13 โพล์ชาร์ตการตรวจสอบการชิงโครโนซ์ที่อ้างอิงจากมาตรฐาน IEEE1547 .....	34
รูปที่ 3.14 โพล์ชาร์ตการตรวจสอบกำลังไฟฟ้าไหลย้อนกลับ .....	35
รูปที่ 3.15 โพล์ชาร์ตการตรวจสอบความถี่ที่อ้างอิงจากมาตรฐาน VSPP .....	36
รูปที่ 3.16 โพล์ชาร์ตการตรวจสอบแรงดันตกที่อ้างอิงจากมาตรฐาน SEMI F-47 .....	37
รูปที่ 3.17 โพล์ชาร์ตการตรวจจับแรงดันที่อ้างอิงจากมาตรฐานเส้นโค้ง ITIC.....	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 3.18 โฟลว์ชาร์ตการตรวจสอบกระแสเกิน.....	39
รูปที่ 3.19 เซอร์กิตเบรกเกอร์ชนิดโซลิดสเตทของบริษัท Crydom.....	40
รูปที่ 3.20 วงจรวัดแรงดัน.....	41
รูปที่ 3.21 ตัววัดกระแสเบอร์ ACS754SCB-200.....	42
รูปที่ 3.22 วงจรวัดกระแส.....	42
รูปที่ 3.23 วงจรไฟเลี้ยง.....	43
รูปที่ 3.24 วงจรทริป.....	43
รูปที่ 3.25 หน้าต่างแสดงผลสำหรับผู้ใช้งานติดต่อกับชุดควบคุมดิจิทัล.....	44
รูปที่ 3.26 หน้าต่างแสดงผลในส่วนการสั่งงาน Start, Stop, Reset และส่วนการตั้งค่ามาตรฐานตรวจจับฟอลต์.....	44
รูปที่ 3.27 หน้าต่างแสดงสถานะของอุปกรณ์ตัดต่อและหน้าต่างแสดงค่าของกริด.....	45
รูปที่ 3.28 หน้าต่างแสดงสถานะการตรวจจับฟอลต์.....	45
รูปที่ 4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	46
รูปที่ 4.2 แผนผังการทดลอง.....	47
รูปที่ 4.3 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าจากวงจรวัดแรงดัน.....	50
รูปที่ 4.4 สัญญาณของแรงดัน $V_d$ , $V_q$ จากการแปลงกรอบอ้างอิงซิงโครนัส ของระบบไฟฟ้าในสภาวะคงตัว.....	51
รูปที่ 4.5 สัญญาณแรงดันไฟฟ้า $V_A$ (เส้นสีเหลือง) เทียบกับ ขนาดของแรงดันไฟฟ้า $V_A$ เวลาใดๆ (เส้นสีฟ้า).....	51
รูปที่ 4.6 สัญญาณแรงดันไฟฟ้า $V_A$ เมื่อเกิดแรงดันตก.....	52
รูปที่ 4.7 แผนผังการทดลองตรวจสอบการซิงโครไนซ์.....	60
รูปที่ 4.8 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าของกริดและไม่โครกริดเมื่อความถี่เท่ากัน.....	62
รูปที่ 4.9 สัญญาณตรวจสอบกำลังไฟฟ้าไหลย้อนกลับแบบ Time Test.....	64
รูปที่ 4.10 สัญญาณการทดลองตรวจสอบกระแสเกินแบบทำงานทันที.....	66
รูปที่ 4.11 สัญญาณการทดลองตรวจสอบกระแสเกินแบบเวลาผกผันมาก (Very Inverse).....	67
รูปที่ 4.12 สัญญาณ Time Test ของการตรวจสอบความถี่ต่ำตามมาตรฐาน VSPP.....	69
รูปที่ 4.13 สัญญาณ Magnitude Test ของการตรวจสอบความถี่สูงตามมาตรฐาน VSPP.....	70
รูปที่ 4.14 การทดสอบแรงดันตกชั่วขณะเมื่อแรงดันระหว่างเฟส B และเฟส C ลดลง 50%.....	71

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 4.15 สัญญาณแรงดันตกชั่วขณะ 50% ที่มุม 90 องศาตามมาตรฐาน SEMI F47.....	73
รูปที่ 4.16 สัญญาณแรงดันตกชั่วขณะ 80% ตามมาตรฐานเส้นโค้ง ITIC.....	76
รูปที่ 4.17 สัญญาณแรงดันตกชั่วขณะ 0% ตามมาตรฐานเส้นโค้ง ITIC.....	77



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การผลิตไฟฟ้าในประเทศไทยเป็นการผลิตแบบรวมศูนย์โดยใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล เช่น ถ่านหิน และก๊าซธรรมชาติเป็นหลัก ถ้าไม่คำนึงถึงข้อเสียด้านมลภาวะจากเชื้อเพลิงฟอสซิล ข้อดีของการผลิตไฟฟ้าแบบรวมศูนย์ คือ การผลิตไฟฟ้าปริมาณมากจากโรงไฟฟ้าขนาดใหญ่ทำให้มีความคุ้มทุนเชิงเศรษฐศาสตร์และมีเสถียรภาพการผลิตไฟฟ้าสูง การจ่ายพลังงานไฟฟ้าไปสู่ผู้บริโภคนั้นจะส่งพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ผ่านโครงข่ายไฟฟ้าที่แรงดันไฟฟ้าระดับต่าง ๆ คือโรงไฟฟ้าย่อยขนาดใหญ่อะไรจะผลิตไฟฟ้าแรงดันสูงส่งเข้าระบบสายส่งของการไฟฟ้าฝ่ายผลิต และส่งเข้าสู่สถานีไฟฟ้าย่อยเพื่อทำการลดแรงดันไฟฟ้าลงเพื่อจ่ายไฟฟ้าเข้าระบบสายส่งของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคและการไฟฟ้านครหลวงในระดับแรงดันที่ต่ำลง ท้ายที่สุดผ่านหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กเพื่อลดแรงดันไฟฟ้าให้กับผู้ใช้ไฟฟ้าขนาดเล็กที่สุดตามบ้านเรือนต่าง ๆ

การผลิตและจ่ายไฟฟ้าแบบรวมศูนย์เป็นการจ่ายไฟฟ้าแบบทางเดียวจากผู้ผลิตสู่ผู้บริโภค ดังนั้นปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตจะต้องสัมพันธ์กับภาระความต้องการไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้า ซึ่งมีความหลากหลายทั้งในแง่ของช่วงเวลาของความต้องการไฟฟ้า หรือตำแหน่งที่อยู่ของผู้ใช้ซึ่งกระจายอยู่ทั่วประเทศ ดังนั้นข้อเสียของการส่งพลังงานไฟฟ้าผ่านเครือข่ายจากโรงจักรไฟฟ้าขนาดใหญ่คือการสูญเสียพลังงานตามสายส่ง ในกรณีที่ผู้บริโภคอยู่ไกลจากโรงไฟฟ้าจะยังมีการสูญเสียพลังงานตามสายส่งมากขึ้น เนื่องจากเป็นระบบผลิตขนาดใหญ่จึงมีปัญหาด้านอัตราการตอบสนองต่อความต้องการกำลังไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงของผู้ใช้ โดยปกติมีลักษณะการใช้งานที่หลากหลายและบ่อยครั้งมักมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วในบางช่วงเวลา เนื่องจากระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดใหญ่ไม่สามารถกักเก็บพลังงานไฟฟ้าได้ ดังนั้นระบบส่งพลังงานไฟฟ้าขนาดใหญ่จึงไม่มีการบริหารจัดการด้านพลังงานสะสมเพื่อรองรับ หรือชดเชยอัตราการเปลี่ยนแปลงภาระทางไฟฟ้าของผู้ใช้ และข้อเสียประการสุดท้ายที่เห็นได้ชัดคือ ข้อจำกัดด้านประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าขนาดใหญ่จะสูงนัก เนื่องจากพลังงานส่วนใหญ่ของเชื้อเพลิงที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้าจะเปลี่ยนรูปไปเป็นความร้อนปล่อยทิ้งออกสู่บรรยากาศโดยไม่ได้นำกลับมาใช้แต่อย่างใด

ในปัจจุบันเทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าได้พัฒนาจนมีขนาดของระบบเล็กมาก และราคาก็ต่ำลงกว่าในอดีต เช่น กังหันก๊าซขนาดเล็กมากหรือเครื่องยนต์สเตอร์ริง ซึ่งสามารถเลือกใช้เชื้อเพลิงได้หลากหลายในการผลิตไฟฟ้า เนื่องจากระบบมีขนาดเล็กทำให้ผู้ใช้มีอิสระที่จะเลือกตำแหน่งการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าที่ใกล้กับภาระความต้องการไฟฟ้า ด้วยการพัฒนาเทคโนโลยีด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลัง (Power Electronics) ทำให้เทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กเปิดโอกาสในการ

เชื่อมต่อกับระบบกริดไฟฟ้า ด้วยเทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กเหล่านี้สามารถทำให้เกิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไมโครกริด (Micro Grid) ซึ่งหมายถึงระบบไฟฟ้าที่มีแหล่งกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก (Distribution Energy Resource : DER) [1] เป็นของตัวเอง เช่น แหล่งกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์, แหล่งกำเนิดพลังงานไฟฟ้า, พลังงานลม เป็นต้น โดยโหนดภายในพื้นที่นั้นจะเป็นอิสระจากระบบไฟฟ้าหลักแต่ไมโครกริดนั้นก็ยังคงต่อกับกริดด้วย เนื่องจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กอาจจะไม่สามารถจ่ายพลังงานได้เพียงพอให้กับความต้องการของโหนดในไมโครกริด ดังนั้นถ้าหากกริดเกิดปัญหา เช่น เมื่อเกิดแรงดันตกไมโครกริดจะปลดตัวเองออกจากกริดได้ และทำงานโดยการผลิตและส่งจ่ายภายในพื้นที่ และสามารถที่จะเชื่อมต่อกลับเข้าไปในกริดได้เมื่อความผิดปกติภายในกริดนั้นหมดลงไปแล้ว

จากที่กล่าวข้างต้น ไมโครกริดต้องสามารถต่อเข้าหรือปลดออกจากกริดได้เมื่อเกิดปัญหา เพื่อป้องกันการรบกวนกันระหว่างกริดและไมโครกริด ดังนั้นจำเป็นต้องมีอุปกรณ์ที่จะเข้ามาทำหน้าที่นี้ เรียกว่าอุปกรณ์ตัดต่อ (Separation Device: SD) ซึ่งการทำงานของอุปกรณ์ตัดต่อนี้จะต้องเป็นไปตามมาตรฐานของภูมิภาคนั้นๆ เช่น

- มาตรฐาน IEEE 1547
- ระเบียบการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำหรับผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมาก (VSPP) ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคและการไฟฟ้านครหลวง
- มาตรฐานเส้นโค้ง ITIC (ITIC Curve)
- มาตรฐาน SEMI-F47

และกำหนดการตัดต่อของอุปกรณ์เมื่อเกิดสภาวะต่างๆขึ้น โดยปกติเซอร์กิตเบรกเกอร์จะใช้ชุดรีเลย์หลายชุดในการตรวจจับค่าความผิดปกติต่างๆ เพื่อป้องกันค่าสัญญาณเข้าไปในเซอร์กิตเบรกเกอร์ให้ทำการตัดต่อ ซึ่งเวลาในการเคลียร์ความผิดปกตินั้นจะช้า อาจส่งผลแม้ความผิดปกติถูกเคลียร์ไปแล้วแต่ผลของความผิดปกตินั้นได้ส่งผลเสียไปก่อนหน้านี้แล้ว

ในกรณีมาตรฐาน IEEE 1547 และระเบียบการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำหรับผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมาก (VSPP) ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคและการไฟฟ้านครหลวง สามารถเลือกใช้เซอร์กิตเบรกเกอร์แบบทั่วไปได้ แต่ในกรณีมาตรฐานเส้นโค้ง ITIC และมาตรฐาน SEMI-F47 ต้องการเวลาในการตัดต่อที่เร็วมาก (น้อยกว่า 20 ms) ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้เซอร์กิตเบรกเกอร์ชนิดโซลิดสเตทที่สามารถแก้ปัญหาในเรื่องของเวลาการทำงานของอุปกรณ์ตัดต่อได้ เนื่องจากการทำงานของอุปกรณ์สวิตช์เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ซึ่งจะสามารถตัดต่อได้เร็วกว่า และมุ่งศึกษาพัฒนาออกแบบชุดควบคุมดิจิทัลซึ่งทำหน้าที่เป็นรีเลย์ตรวจสอบสภาวะความผิดปกติต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้าและไมโครกริด เพื่อควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ตัดต่อโดยพัฒนาจากโปรแกรม LabVIEW

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มุ่งหวังเพื่อศึกษาและออกแบบชุดควบคุมดิจิทัล ซึ่งทำหน้าที่เป็นรีเลย์ตรวจจับสถานะของระบบไฟฟ้าและไมโครกริด เพื่อควบคุมอุปกรณ์ตัดต่อให้ทำงานเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนดใช้ในภูมิภาคนั้นๆ เช่น ระเบียบการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำหรับผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมาก (VSPP) ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคหรือการไฟฟ้านครหลวง, มาตรฐาน IEEE 1547, มาตรฐานเส้นโค้ง ITIC และมาตรฐาน SEMI-F47 เป็นต้น

## 1.3 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

อุปกรณ์ตัดต่อเป็นอุปกรณ์สำคัญซึ่งทำหน้าที่ในการตัดต่อระหว่างระบบไฟฟ้าและไมโครกริดให้เป็นไปอย่างราบรื่น โดยมีชุดควบคุมดิจิทัลทำหน้าที่เป็นรีเลย์ตรวจจับสถานะของระบบไฟฟ้าและไมโครกริดแล้วส่งการไปยังตัวเซอร์กิตเบรกเกอร์ชนิดโซลิดสเตท เพื่อทำการปลดออกหรือต่อกลับไมโครกริดกับระบบไฟฟ้า ซึ่งเป็นการนำเอาฟังก์ชันของรีเลย์แต่ละแบบมารวมไว้เป็นชุดเดียวทำให้ประหยัดและมีความยืดหยุ่นในการปรับปรุงแก้ไข เนื่องจากสามารถปรับเปลี่ยนจากการโปรแกรมในชุดควบคุมดิจิทัล

## 1.4 ขอบเขตการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการพัฒนาระบบควบคุมของอุปกรณ์ตัดต่อสำหรับแหล่งกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กและไมโครกริดซึ่งมีขอบเขตดังนี้

1. ศึกษาการทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์ชนิดโซลิดสเตทที่ใช้เป็นอุปกรณ์ตัดต่อ
2. ออกแบบและสร้างอัลกอริทึมในการคำนวณและตรวจจับความผิดปกติต่างๆ สำหรับชุดควบคุมดิจิทัลที่ทำหน้าที่เป็นระบบควบคุมอุปกรณ์ตัดต่อโดยโปรแกรมจาก LabVIEW
3. ทดสอบการทำงานของชุดควบคุมดิจิทัลและอุปกรณ์ตัดต่อ โดยจำลองการเกิดความผิดปกติต่างๆ เช่น
  - ตรวจสอบแรงดันเกิน แรงดันต่ำ (Over/Under Voltage Protection)
  - ตรวจสอบกระแสเกิน (Overcurrent Protection)
  - ตรวจสอบค่าความถี่ (Frequency Protection)
  - ตรวจสอบกำลังไฟฟ้าไหลย้อนกลับ (Reverse Power Protection)
  - ตรวจสอบการซิงโครไนซ์ (Synchronize Protection)

ให้เป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนดไว้ได้แก่ มาตรฐาน IEEE 1547, ระเบียบการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำหรับผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมาก (VSPP), มาตรฐานเส้นโค้ง ITIC, มาตรฐาน SEMI F47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1. งานวิจัยนี้ทำให้เกิดความรู้ ความเข้าใจเกี่ยวกับหลักการการทำงานของอุปกรณ์ตัดต่อและความสำคัญของเวลาในการตัดต่อของอุปกรณ์
2. ความรู้เกี่ยวกับระบบไฟฟ้ากำลังหลัก, ไมโครกริด และแหล่งกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก
3. ความรู้เรื่องมาตรฐาน เช่น มาตรฐาน IEEE1547, มาตรฐาน SEMI F47, ระเบียบการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำหรับผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมาก (VSPP), มาตรฐานเส้นโค้ง ITIC ที่เกี่ยวข้องสำหรับออกแบบระบบควบคุมของอุปกรณ์ตัดต่อ
4. ข้อมูลและความรู้ที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถนำไปเป็นข้อมูลพื้นฐานให้แก่ผู้วิจัยอื่นๆ ที่สามารถนำไปพัฒนาต่อยอดเพื่อองค์ความรู้ใหม่ ๆ

## 1.6 โครงสร้างวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบไปด้วยเนื้อหาภายในวิทยานิพนธ์ ทั้งหมด 5 บท ซึ่งเนื้อหาในแต่ละบทประกอบไปด้วยเนื้อหา ดังนี้

บทที่ 1 บทนำ กล่าวถึงความเป็นมาของงานวิจัย ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ สมมติฐาน ทฤษฎีที่ใช้ ขอบเขตของการวิจัย และขั้นตอนการทำวิจัย

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง กล่าวถึงความหมายของกริดและไมโครกริด, โครงสร้างของอุปกรณ์ตัดต่อ, มาตรฐานที่เกี่ยวข้อง, วิธีตรวจจับทางไฟฟ้าและเฟสล็อกกลูบ

บทที่ 3 การออกแบบและสร้างระบบควบคุมของอุปกรณ์ตัดต่อ ในบทนี้จะกล่าวถึงโครงสร้างโดยรวมของระบบควบคุมอุปกรณ์ตัดต่อ ทั้งในส่วนการออกแบบทางด้านซอฟต์แวร์และส่วนฮาร์ดแวร์ เช่น แผนผังการทำงานของชุดควบคุมดิจิทัล, วงจรตรวจจับแรงดัน, วงจรตรวจจับกระแส และส่วนอุปกรณ์ตัดต่อ เป็นต้น

บทที่ 4 ผลการทดลอง ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีทดลองและผลการทดลองของระบบควบคุมที่ทำงานร่วมกับอุปกรณ์ตัดต่อในสภาวะการเกิดความผิดปกติต่างๆ ตามมาตรฐานที่ทดสอบ

บทที่ 5 สรุป ในบทนี้จะกล่าวถึงบทสรุปที่ได้จากการศึกษาค้นคว้าวิจัย สรุปผลการทดลองที่ได้ตลอดจนข้อเสนอแนะ และแนวทางการพัฒนาที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้

ภาคผนวก ก. โปรแกรม LabVIEW สำหรับควบคุมการทำงานของ Realtime Embedded controller และ FPGA

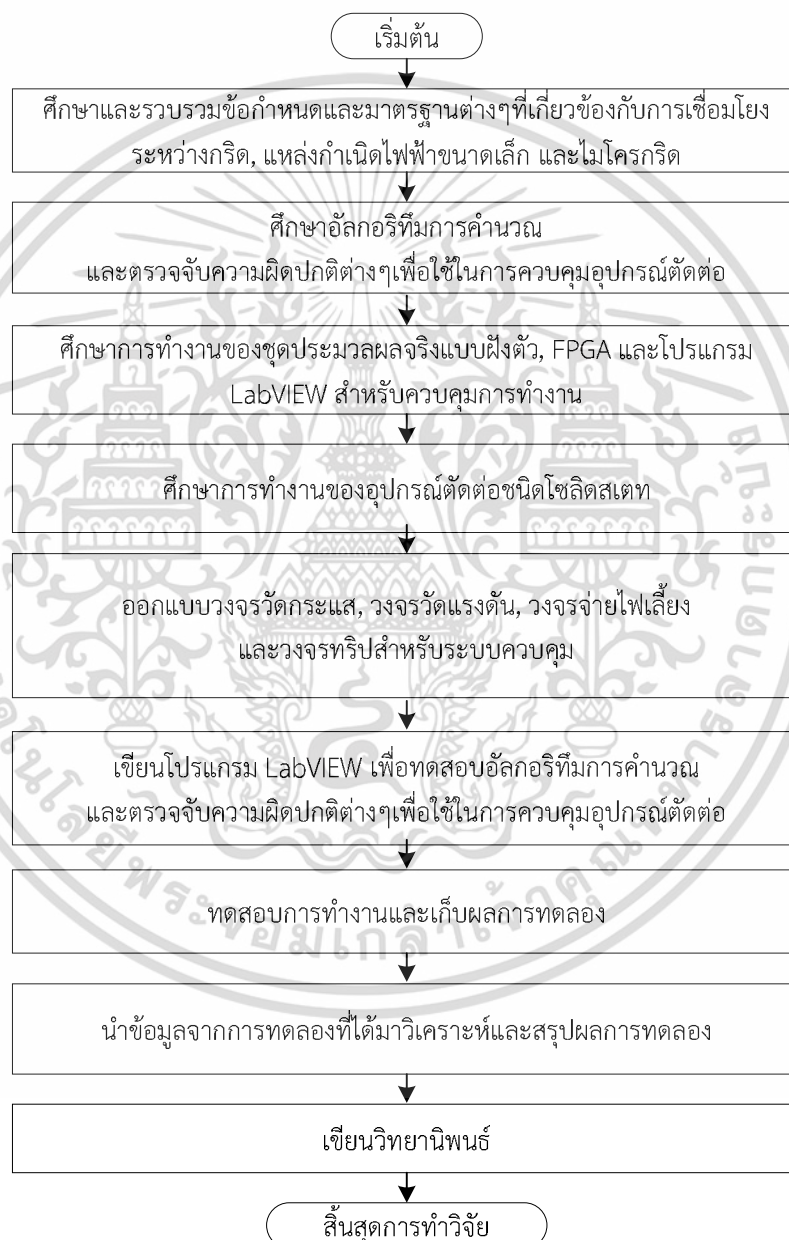
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข. ข้อมูลผลการทดลอง

ภาคผนวก ค. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์, ประวัติผู้เขียน

## 1.7 ขั้นตอนของการศึกษา

ขั้นตอนในการทำงานวิจัยเรื่องการพัฒนาระบบควบคุมของอุปกรณ์ตัดต่อสำหรับแหล่งกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กและไมโครกริดนั้นได้แสดงรายละเอียดไว้ในรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 ขั้นตอนในการทำวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ระบบไฟฟ้ากำลังหลัก (กริด)

ระบบไฟฟ้ากำลังหลักในปัจจุบันหรือระบบไฟฟ้ากำลังแบบรวมศูนย์ [2] ดังรูปที่ 2.1 ซึ่งประกอบด้วยโรงจํกรกำลังต่างๆ เช่น โรงจํกรพลังงานความร้อน, โรงจํกรพลังงานน้ำ ซึ่งส่งพลังงานผ่านทางสายส่งไปสู่อู่ใช้งาน เช่น โรงงาน, บ้านเรือนต่างๆ เป็นต้น แต่เนื่องด้วยโรงจํกรกำลังในระบบไฟฟ้ากำลังนั้นต้องใช้พื้นที่ในการสร้างมากและต้องใกล้กับแหล่งพลังงานเพื่อประหยัดค่าขนส่งเชื้อเพลิง ทำให้โรงจํกรมีความห่างไกลจากอู่ใช้พลังงานซึ่งต้องใช้สายส่งที่มีความยาวมากจึงส่งผลให้มีความสูญเสียเกิดขึ้นในระบบมากขึ้น เนื่องด้วยปัญหาทางด้านทรัพยากรธรรมชาติและปัญหาทางด้านมลพิษส่งผลต่อโลกในปัจจุบันมากขึ้น ทำให้การขยายโรงจํกรเพื่อเพิ่มกำลังการผลิตไฟฟ้าให้เพียงพอกับความต้องการของอู่บริโภคในประเทศนั้นทำได้ยากขึ้น จึงได้เกิดการพัฒนาระบบผลิตไฟฟ้าแบบกระจายศูนย์และไม่โครกริดเข้ามาช่วยแก้ปัญหา



รูปที่ 2.1 ระบบไฟฟ้ากำลังในปัจจุบันหรือระบบไฟฟ้ากำลังแบบรวมศูนย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 ระบบผลิตไฟฟ้าแบบกระจายศูนย์ (Distributed Generation: DG) [3]

ระบบไฟฟ้าทั่วโลกเริ่มตระหนักถึงปัญหาการลดลงของปริมาณของทรัพยากรเชื้อเพลิงฟอสซิล และทำให้พลังงานและสภาพแวดล้อมต่างๆ ค่อยๆ ทรุคโทรมลงไป ปัญหาเหล่านี้ได้นำไปสู่แนวความคิดใหม่ในการผลิตพลังงานภายในพื้นที่ ณ ระดับการกระจายแรงดันต่างๆ โดยการใช้พลังงานทดแทนและพลังงานหมุนเวียน เช่น ก๊าซธรรมชาติ, ก๊าซชีวภาพ, พลังงานลม, เซลล์แสงอาทิตย์, เซลล์เชื้อเพลิงความร้อนร่วม (Combined Heat and Power: CHP) ระบบไมโครเทอร์ไบน์ และเครื่องยนต์สเตอร์ลิง (Stirling Engine) ซึ่งแหล่งพลังงานเหล่านี้จะเป็นประโยชน์ต่อเครือข่ายการจำหน่าย การผลิตไฟฟ้าในรูปแบบนี้จะเรียกว่า ระบบผลิตไฟฟ้าแบบกระจายศูนย์หรือ Distributed Generation (DG) และแหล่งพลังงานเหล่านี้จะเรียกว่า แหล่งกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กหรือ Distributed Energy Resources (DER) โดยการผลิตแบบกระจายศูนย์นี้ได้รับการออกแบบให้มีความแตกต่างจากการผลิตไฟฟ้าจากส่วนกลาง (Centralized Conventional Generation) ในสมัยก่อน และการใช้ระบบจำหน่ายร่วมกับการรวมตัวของ DG จะทำให้ระบบดังกล่าวเป็นระบบที่มีความรวดเร็วในการจำหน่ายไฟฟ้าไปยังส่วนต่างๆ

ในปลายปี 1990 ได้มีการให้ความสำคัญกับการศึกษาประเด็นหลักที่เกี่ยวข้องกับ DG โดยคณะทำงานของ International Council on Large Electric Systems (CIGRE) และการประชุมนานาชาติและ Exhibition on Electricity Distribution (CIRED) และนำเสนออยู่ในรายงานการประชุม ข้อกำหนดเกี่ยวกับ DG ที่พบในหลายๆ ประเทศนั้นส่วนใหญ่นั้นจะขึ้นอยู่กับขนาดพิกัดของโรงจักรไฟฟ้า ระดับแรงดันไฟฟ้าในการผลิต ฯลฯ จากการศึกษาและวิจัยได้ข้อสรุปลักษณะทั่วไปของ DG ได้ดังต่อไปนี้

- ไม่เป็นศูนย์กลางของระบบไฟฟ้าหรือศูนย์กลางการจำหน่ายไฟฟ้า
- มีขนาดเล็กกว่า 50 เมกะวัตต์
- แหล่งกำเนิดกำลังไฟฟ้าหรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายศูนย์มักจะเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายที่มีขนาดของแรงดัน 230/415 V ถึง 145 kV

### 2.2.1 ข้อดีของระบบผลิตไฟฟ้าแบบกระจายศูนย์ (Distributed Generation: DG)

แม้ว่าระบบไฟฟ้าแบบธรรมดาจะมีข้อดีหลายประการ ทั้งข้อดีทางด้านเทคนิค เศรษฐกิจและสิ่งแวดล้อม แต่ก็ยังมีการพัฒนาอย่างค่อยเป็นค่อยไปในการนำการผลิตแบบกระจายศูนย์เข้ากับระบบ ทั้งนี้ด้วยสาเหตุ

1) เนื่องจากภาระทางไฟฟ้ามีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว ความจำเป็นในความต้องการของพลังงานทั่วไปก็เพิ่มขึ้นทำให้เพลิงเชื้อที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้าลดลง ด้วยเหตุนี้เราจึงต้องหาพลังงานทดแทนและพลังงานหมุนเวียนมาเพื่อเป็นพลังงานสำรอง

2) การลดมลภาวะทางสิ่งแวดล้อมและสภาวะโลกร้อนถือเป็นปัจจัยที่ให้ความสำคัญเป็นอันดับแรก ซึ่งเป็นที่น่าสนใจในการใช้ทรัพยากรหมุนเวียนมากกว่าเชื้อเพลิงฟอสซิล ในสนธิสัญญาเกียวโต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ยืมได้เห็นว่าเอกสารนี้มีความสำคัญและไม่ควรเผยแพร่ให้ผู้อื่นได้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากผู้จัดทำ เอกสารนี้จะไม่มีการเผยแพร่ให้ผู้อื่นได้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากผู้จัดทำ

(Kyoto Protocol), สหภาพยุโรป (EU), สหราชอาณาจักร (UK) และประเทศอื่นๆ ได้มีการวางแผนเพื่อลดก๊าซเรือนกระจก (คาร์บอนและไนโตรเจน) ที่ปล่อยสู่อากาศ เพื่อให้ต่อต้านการเปลี่ยนแปลงของสภาพอากาศรวมถึงภาวะโลกร้อน ดังนั้นพวกเขาจะสร้างพลังงานรูปแบบใหม่และการใช้นโยบายเพื่อสนับสนุนการใช้พลังงานที่เหมาะสมเหล่านี้ คาดว่าประโยชน์ของแหล่งพลังงานแบบกระจายศูนย์จะช่วยสร้างสิ่งที่ไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมซึ่งเป็นพลังงานสะอาดที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยมาก

3) ระบบผลิตไฟฟ้าแบบกระจายศูนย์จะเป็นแนวทางสำหรับการติดตั้งการร่วมกันผลิต (Co – Generation) การผลิตพลังงานร่วม (Tri-Generation หรือ CHP) ซึ่งใช้ประโยชน์จากความร้อนเสียของโรงงานอุตสาหกรรมในประเทศการค้าเชิงพาณิชย์ได้ดีกว่า ซึ่งจะเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้พลังงานทั้งหมดของโรงจักรไฟฟ้าและยังช่วยลดมลพิษทางความร้อนของสภาพแวดล้อมอีกด้วย

4) เนื่องจากความหนาแน่นทางพลังงานที่ต่ำกว่าและขึ้นกับเงื่อนไขทางกายภาพของภูมิภาคประเทศ ซึ่งมี DER เป็นหน่วยโมดูล (Modular Unit) พื้นฐานโดยส่วนมากมีกำลังการผลิตที่ไม่มากนัก โดย DER จะกระจายอยู่ทั่วไปตามพื้นที่และควรอยู่ใกล้กับโหลด จึงกลายมาเป็นข้อกำหนดสำหรับการทำงานของโรงจักรไฟฟ้าให้มีเสถียรภาพและมีความคุ้มทุนเชิงเศรษฐศาสตร์ ตัวอย่างเช่น CHP ต้องอยู่ใกล้กับโหลดเนื่องจากการส่งระยะไกลทำให้เกิดความสิ้นเปลือง ซึ่งจะทำได้ง่ายในการหาค้นหาและช่วยลดในเรื่องของการก่อสร้างและเงินทุน ด้วยระยะทางที่ตั้งจากโหลดถึงแหล่งจ่ายที่ไม่ไกลกันยังช่วยลดการสูญเสียในการส่งจ่าย และเนื่องจากกำลังไฟฟ้านั้นถูกผลิตด้วยแรงดันไฟฟ้าต่ำจึงสามารถที่จะเชื่อมต่อ DER โดยให้แยกจากเครือข่ายการจำหน่ายระบบสาธารณูปโภคหรืออาจมีการเชื่อมต่อภายในเป็นรูปแบบของไมโครกริดได้ โดยไมโครกริดนั้นยังสามารถที่จะกลับมาเชื่อมต่อเข้ากับระบบที่แยกออกไปในลักษณะกึ่งอิสระ (Semi-Autonomous) ได้อีกครั้ง

5) การดำเนินงานในโหมดแยกอิสระ (Stand-Alone) และโหมดเชื่อมต่อกับกริด (Grid-Connect) ของ DER จะช่วยในการขยายการผลิตและนับเป็นการช่วยปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าและความน่าเชื่อถือโดยรวม นอกจากนี้การที่มันไม่อยู่ภายใต้กฎของสภาวะแวดล้อมรวมถึงการเข้าถึงเครือข่ายการจำหน่ายนั้นนับว่าเป็นการเพิ่มโอกาสสำหรับการรวมระบบเข้ากับ DG

## 2.3 แหล่งกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก (Distributed Energy Resource: DER) [3-4]

Distributed Energy Resource (DER) เป็นแหล่งพลังงานขนาดเล็กที่เป็นแหล่งกำเนิด ณ จุดใช้งาน ตามรูปแบบของระบบ DG ที่มีขนาดตั้งแต่ 3 กิโลวัตต์ ถึง 10,000 กิโลวัตต์ อาจติดตั้งขนานกับระบบจำหน่าย (Local Distribution Network) หรือติดตั้งแยกจากระบบจำหน่ายไฟฟ้าทั่วไป (Stand Alone) แบ่งออกเป็น 3 ประเภทใหญ่ ได้แก่

- 1) Combine Heat and Power (CHP)
- 2) Non – Combine Heat and Power (Non-CHP)
- 3) Storage Device

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.1 แหล่งพลังงานในไมโครกริด

พลังงานทดแทนหรือแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแบบใหม่ๆ ได้ถูกนำมาใช้ในไมโครกริดซึ่งถูกเรียกว่า แหล่งกำเนิดขนาดเล็ก มีวัตถุประสงค์เพื่อรวมนำข้อดีของแหล่งกำเนิดพลังงานที่ทำให้ คาร์บอนไดออกไซด์ต่ำและแหล่งกำเนิดพลังงานไฟฟ้าร่วมกับความร้อน (Combined Heat and Power: CHP) ที่มีประสิทธิภาพสูง และ DER ที่ใช้ในไมโครกริดมีดังนี้

#### 1) Combined Heat and Power (CHP)

CHP นั้นเป็นแหล่งผลิตที่เป็นการผลิตพลังงานร่วม (Co-Generation) ที่ผลิตทั้งพลังงานไฟฟ้า และพลังงานความร้อน ซึ่งมีแนวโน้มอย่างมากที่จะนำมาใช้กับไมโครกริด ข้อดีก็คือมีประสิทธิภาพทาง พลังงานโดยการใช้ความร้อนทิ้งที่ได้จากคริวรีนหรือกระบวนการทางอุตสาหกรรมนอกจากนี้ยังสามารถใช้ในการซิลเลอร์สำหรับระบายความร้อนการดูดซึม พร้อมกันของการผลิตไฟฟ้าความร้อน และระบายความร้อนเป็นที่รู้จักกันเป็น Trigeneration หรือ Polygeneration ระบบ CHP ช่วยให้การ ใช้พลังงานที่ดีขึ้นกว่ารุ่นเดิมที่อาจถึงประสิทธิภาพมากกว่า 80% เมื่อเทียบกับที่ ประมาณ 35% สำหรับโรงไฟฟ้าแบบเดิมสำหรับการผลิตความร้อนร่วมขนาดเล็ก (Micro - CHP) จะ ถูกติดตั้งในสถานที่ที่มีขนาดเล็กเช่น บ้านหรืออาคารขนาดเล็ก ส่วนใหญ่หน่วย CHP ในอุตสาหกรรม การผลิตไฟฟ้าเป็นผลิตภัณฑ์หลักส่วนความร้อนเป็นผลพลอยได้ ในขณะที่ระบบ Micro CHP การ สร้างความร้อนเป็นผลิตภัณฑ์หลักส่วนไฟฟ้าเป็นผลพลอยได้ Micro - CHP มีความเชื่อถือได้ แข็งแกร่งและราคาถูก มีกำลังการผลิตในช่วง 10-100 กิโลวัตต์

Micro CHP สามารถพัฒนาจากเทคโนโลยีหลายเทคโนโลยี เช่น เครื่องยนต์สเตอร์ลิง (Stirling Engines) Reciprocating Engines (เครื่องยนต์สันดาปภายใน, Internal Combustion Engine) และเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel Cell) โดยที่เทคโนโลยีที่กล่าวถึงจะทำหน้าที่ในการผลิตกระแสไฟฟ้าและนำ ความร้อนเหลือใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าไปใช้ในการทำความร้อน และถ้าจะผลิตความเย็นก็จะใช้ ความร้อนที่ได้นี้ไปเป็นพลังงานสำหรับเครื่องทำความเย็นแบบดูดซึม (Absorbtion) เพื่อผลิตความ เย็นต่อไป

#### 2) Wind Energy Conversion

เป็นการเปลี่ยนรูปพลังงานลมเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยมีหลักการพื้นฐานโดยใช้กังหันลมต่อควบกับ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าผ่านระบบเกียร์ (Gearbox) ซึ่งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้จะเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เหนี่ยวนา กังหันลมจะจับพลังงานจลน์จากการไหลของลมผ่านใบพัดโรเตอร์และส่งพลังงานไปยัง เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนาผ่านระบบเกียร์เพลลาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะถูกขับเคลื่อนด้วยกังหัน เปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้า สำหรับระบบเกียร์นั้นมิไ่ว่เพื่อช่วยปรับระดับความเร็วของโรเตอร์ก่อนที่จะ เข้าไปยังเครื่องกำเนิดไฟฟ้า กังหันลมที่ใช้มีทั้งแบบลักษณะการหมุนแนวตั้ง (Horizontal Axis) และ หมุนในแนวนอน (Vertical Axis) ขนาดกำลังการผลิตนั้นปัจจุบันสามารถผลิตได้สูงถึง 5 เมกะวัตต์ กำลังการผลิตนั้นมีปัจจัยขึ้นอยู่กับสภาพอากาศ โดยจะแปรผันตรงกับความเร็วลม ขนาดใบพัด และ

ความหนาแน่นของอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3) Solar Photovoltaic

พลังงานแสงอาทิตย์ เกิดจากปฏิกิริยาฟิวชั่นของดวงอาทิตย์ จะปล่อยพลังงานออกมาในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ที่เรียกว่า รังสีแสงอาทิตย์ (Solar Radiation) รังสีนี้จะแพร่กระจายออกทุกทิศทางของโลกของเราก็ได้รับอิทธิพลของรังสีนี้ โดยมีความเข้มของรังสีที่ตกลงบนผิวโลกประมาณ 961-1,191 วัตต์ต่อตารางเมตร หรือคิดเป็นพลังงานประมาณ 2,000-2,500 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อตารางเมตรต่อปี สำหรับประเทศไทย พื้นที่เกือบทั้งหมดสามารถรับพลังงานจากแสงอาทิตย์เฉลี่ยประมาณ 4.5 กิโลวัตต์-ชั่วโมง/ตารางเมตร/วัน ดังนั้นในพื้นที่ 1 ตารางกิโลเมตร สามารถติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 33 เมกะวัตต์ หรือ 165,000 กิโลวัตต์-ชั่วโมง/ตารางเมตร/วัน ในปัจจุบันความต้องการพลังงานไฟฟ้าของประเทศประมาณวันละ 250 ล้านกิโลวัตต์-ชั่วโมง ถ้าต้องการผลิตจากพลังงานแสงอาทิตย์ทั้งหมด จำเป็นต้องใช้พื้นที่ประมาณ 1,500 ตารางกิโลเมตร หรือคิดเป็นพื้นที่ประมาณ 0.3% ของประเทศเท่านั้น ในอดีตการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์มีราคาแพงมาก แต่เนื่องจากปัจจุบันราคาของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ลดลงมาอย่างมาก และมีแนวโน้มว่าจะลดลงอีกเรื่อยๆ เพราะประชาชนโดยทั่วไปได้ตระหนักถึงสถานะแวดล้อมเป็นพิษ เนื่องจากการใช้ เชื้อเพลิงฟอสซิล ในการผลิตพลังงาน จึงหันมาใช้เซลล์แสงอาทิตย์เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ

### 4) Small-Scale Hydroelectric

เป็นการกำเนิดไฟฟ้าโดยใช้กังหันน้ำขนาดเล็กในการขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยมีหลักการโดยใช้ประโยชน์จากการไหลของน้ำจากแหล่งน้ำขนาดเล็กในการขับเคลื่อนกังหัน กำลังการผลิตนั้นแปรผันโดยตรงกับอัตราการไหลของน้ำ ความหนาแน่นของน้ำ และระดับความสูงของหัวน้ำ

### 5) Storage Device

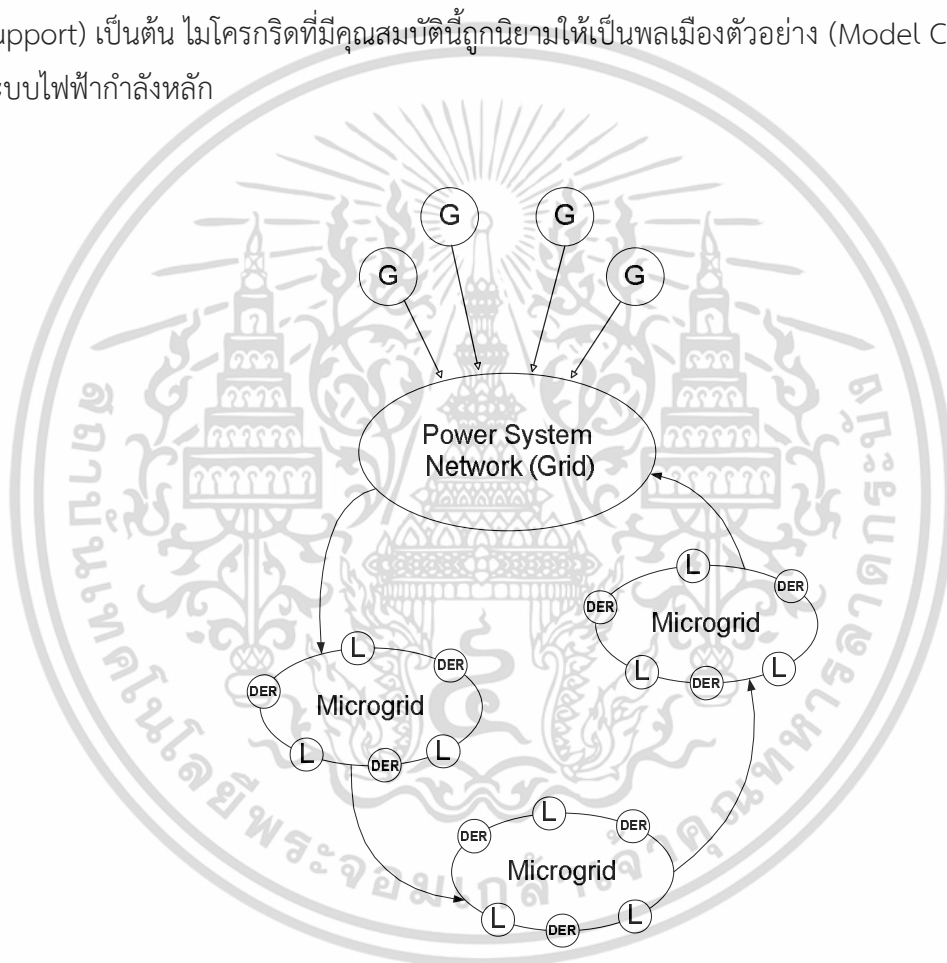
เป็นอุปกรณ์ในการเก็บสะสมพลังงานสำหรับจ่ายพลังงานฉุกเฉินในไมโครกริด ซึ่งสามารถจ่ายพลังงานในช่วงเวลาสั้นๆ อุปกรณ์ในการเก็บพลังงาน เช่น Storage Battery, Flywheels, Ultra Capacitor

## 2.4 ไมโครกริด [3]

ไมโครกริด คือ ระบบไฟฟ้ากำลังขนาดเล็กโดยใช้แหล่งกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก เช่น ไมโครเทอร์ไบน์หรือเซลล์เชื้อเพลิง รวมทั้งการผลิตไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานหมุนเวียน เพื่อปรับปรุงความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้าและตอบสนองการเปลี่ยนแปลงที่ตามมาจากการเปิดเสรีด้านพลังงานไฟฟ้า เรียกว่าแนวคิดไมโครกริด หรือ MicroGrid Concept โดยถูกนำเสนอ ภายใต้โครงการ CERTS (Consortium for Electric Reliability Technology Solutions) ในสหรัฐอเมริกา ในปี 2002 ภายใต้แนวคิดนี้ทั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กและโหลดภายในพื้นที่จะถูกมองรวมเป็นระบบอิสระขนาดเล็กระบบหนึ่งซึ่งให้ทั้งกำลังไฟฟ้าและความร้อน แหล่งกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กส่วนใหญ่ในระบบนี้จะต้องประกอบขึ้นจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังเพื่อความยืดหยุ่นในการทำงานและการควบคุม

ในสถานะที่เกิดความผิดปกติขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังหลัก (กริด) ไมโครกริดจะสามารถปลดตัวเองออก เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากระบบไฟฟ้ากำลังหลักและทำงานในแบบไอส์แลนด์ (ผลิตและส่งกำลังไฟฟ้าภายในพื้นที่) ได้อย่างอัตโนมัติ และสามารถเชื่อมต่อกลับเข้าไปกับระบบไฟฟ้ากำลังหลักได้เมื่อความผิดปกติในระบบไฟฟ้ากำลังหลักได้รับการแก้ไขไปแล้ว โดยแนวคิดนี้ไมโครกริดจะถูกมองเป็นระบบควบคุมหน่วยหนึ่งจากระบบไฟฟ้ากำลังหลัก และจะไม่สร้างปัญหาเช่นการกระเพื่อมของแรงดันไฟฟ้า การแกว่งไกวของความเร็วไฟฟ้าให้กับระบบไฟฟ้ากำลังหลักเป็นต้น ไมโครกริดที่มีคุณสมบัตินี้ถูกนิยามให้เป็นพลเมืองดี (Good Citizen) ของระบบกำลังไฟฟ้าหลัก ในขณะที่ไมโครกริดยังสามารถช่วยสนับสนุนการทำงานของระบบไฟฟ้ากำลังหลักได้ในลักษณะของบริการเสริม (Ancillary Service) เช่น การให้บริการคุณภาพไฟฟ้าชั้นเยี่ยม (Premium Power) การรักษาระดับแรงดันไฟฟ้า (Voltage Support) เป็นต้น ไมโครกริดที่มีคุณสมบัตินี้ถูกนิยามให้เป็นพลเมืองตัวอย่าง (Model Citizen) ของระบบไฟฟ้ากำลังหลัก



รูปที่ 2.2 ระบบไฟฟ้ากำลังในอนาคตหรือระบบไฟฟ้ากำลังแบบแยกศูนย์

จากรูปที่ 2.2 ระบบไฟฟ้ากำลังในอนาคตหรือระบบไฟฟ้ากำลังแบบแยกศูนย์โดยยังคงมีระบบไฟฟ้ากำลังหลักเป็นแกนหลัก และมีไมโครกริดเป็นระบบไฟฟ้ากำลังย่อยในแต่ละพื้นที่ที่เชื่อมต่ออยู่

ไมโครกริดนั้นจะมีพิกัดกำลังที่สูงมากนักและเป็นระบบแรงดันต่ำโดยที่โครงข่ายการรองรับการจ่ายโหลดด้วยระบบการผลิตไฟฟ้าและความร้อนร่วม (CHP) ได้ถูกออกแบบมาเพื่อผลิตไฟฟ้าและเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ขึ้นด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โหลดความร้อนสำหรับพื้นที่ขนาดเล็ก เช่น บ้านจัดสรร, ชานเมืองท้องถิ่น, หรือพื้นที่สาธารณะ เช่น มหาวิทยาลัยหรือโรงเรียน เขตการค้า อุตสาหกรรมด้านการค้าหรือพื้นที่เทศบาล โดยส่วนใหญ่แล้ว ไมโครกริดจะเป็นโครงข่ายระบบจำหน่ายแบบแอกทีฟเสียส่วนใหญ่ ทั้งนี้เนื่องจากแนวคิดของ ไมโครกริดนั้นได้รวมเอาระบบผลิตไฟฟ้าแบบกระจายศูนย์ (DG) และโหลดที่แตกต่างกัน ณ ระดับแรงดันไฟฟ้าในการจำหน่ายเข้าไว้ด้วยกัน เครื่องกำเนิดไฟฟ้าหรือแหล่งจ่ายขนาดเล็กที่ใช้ในระบบไมโครกริดส่วนมากเป็นพลังงานหมุนเวียนและพลังงานทดแทน ซึ่งแหล่งกำเนิดไฟฟ้า ณ จุดใช้งาน (DER) จะรวมเอาแหล่งพลังงานทั้ง 2 เข้าด้วยกันเพื่อผลิตกำลังไฟฟ้าที่แรงดันของระบบจำหน่าย

ความแตกต่างระหว่างไมโครกริด และโรงไฟฟ้าทั่วไปมีดังต่อไปนี้

- 1) แหล่งจ่ายขนาดเล็กนั้นมีพิกัดกำลังการผลิตที่เล็กมากถ้าเทียบกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดใหญ่ในโรงไฟฟ้าทั่วไป
- 2) กำลังไฟฟ้าที่ถูกสร้างขึ้นที่ระดับแรงดันของระบบจำหน่ายนั้นสามารถที่จะป้อนให้กับระบบจำหน่ายของสาธารณูปโภคได้โดยตรง
- 3) แหล่งจ่ายขนาดเล็กโดยปกติจะติดตั้งใกล้กับสถานที่ของลูกค้าเพื่อจ่ายไฟฟ้าให้แก่ผู้บริโภคได้อย่างมีประสิทธิภาพด้วยระดับแรงดันไฟฟ้าและความถี่ที่มีเสถียรภาพและยังเป็นการลดการสูญเสียในสายส่งให้มีความน้อยลงด้วย

ในมุมมองของกริดหลัก (Main Grid) ข้อดีหลักของไมโครกริดคือการทำหน้าที่สามารถควบคุมตัวเองได้ภายในระบบไฟฟ้า จึงสามารถมองรวมเป็นภาระทางไฟฟ้าได้เลย ซึ่งจะทำให้ง่ายต่อการควบคุมและปฏิบัติตามกฎของกริดหลักรวมถึงสามารถรักษาระดับแรงดันโดยไม่ส่งผลกระทบต่อความน่าเชื่อถือและความปลอดภัยในการใช้ประโยชน์จากกำลังไฟฟ้า

ในมุมมองจากผู้บริโภค ไมโครกริดนั้นจะมีประโยชน์มากในด้านการรองรับในช่วงไฟดับ ปรับปรุงความน่าเชื่อถือของระบบไฟฟ้า ช่วยลดกำลังสูญเสียบนสายส่งและมีการรองรับระดับแรงดันภายในพื้นที่อีกด้วย

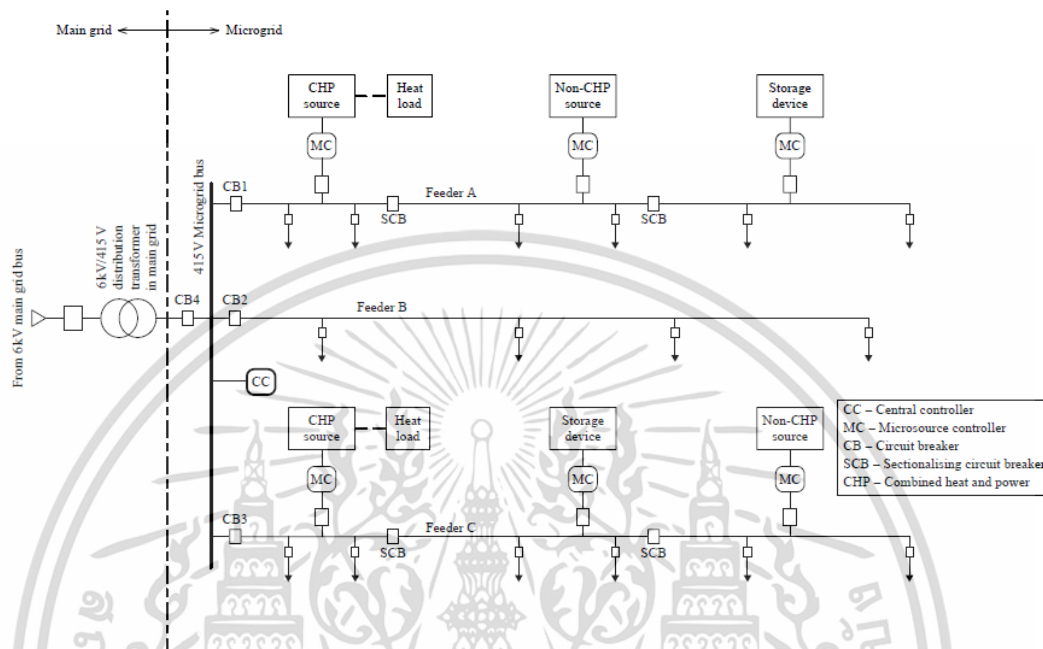
ในมุมมองทางด้านสิ่งแวดล้อม ไมโครกริดนั้นจะลดมลภาวะทางสิ่งแวดล้อมและภาวะโลกร้อนผ่านการใช้ประโยชน์จากเทคโนโลยีการลดคาร์บอน (Low-Carbon Technology)

#### 2.4.1 องค์ประกอบทั่วไปของไมโครกริด

องค์ประกอบทั่วไปของไมโครกริดเป็นไปตามรูปที่ 2.3 ประกอบด้วยภาระทางไฟฟ้าหรือความร้อนรวมทั้งแหล่งจ่ายขนาดเล็ก (Microsource) โดยมีการเชื่อมต่อในโครงข่ายระบบจำหน่ายแรงดันต่ำ จะสังเกตว่าภาระ (โดยเฉพาะภาระทางความร้อน) จะถูกวางไว้ใกล้กับแหล่งจ่ายเพื่อลดการสูญเสีย ไมโครกริดประกอบด้วยสายป้อนตามแนวรัศมีสามตัว คือ A B และ C เพื่อจ่ายให้กับภาระ นอกจากนี้ยังมี CHP 2 ตัว แหล่งจ่ายขนาดเล็กที่ไม่เป็น CHP 2 ตัวและอุปกรณ์กักเก็บพลังงานโดยแหล่งจ่ายขนาดเล็กและอุปกรณ์กักเก็บพลังงานจะเชื่อมต่ออยู่ที่สายป้อน A และ C ผ่านตัวควบคุม

แหล่งจ่าย (Microsource Controller : MC ) โดยที่ต่อเข้ากับสายป้อน A และ C เท่านั้นเนื่องจากบางเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาระบนสายป้อน A และ C นั้นสมมติให้เป็นโหลดที่มีความสำคัญ (ต้องจ่ายไฟเลี้ยงตลอดเวลา อาทิ เช่นระบบแจ้งเหตุเพลิงไหม้) และบางส่วนอาจเป็นภาระที่ไม่ใช้ตัวที่ต้องให้ความสำคัญสามารถตัดออกจากระบบได้ซึ่งสมมติให้ภาระชนิดนี้อยู่บนสายป้อน B



รูปที่ 2.3 องค์ประกอบทั่วไปของไมโครกริด

ไมโครกริดนั้นจะเชื่อมต่อกับกริดหลัก (Main Grid) แรงดันระดับกลางผ่านเซอร์กิตเบรกเกอร์ ซึ่งเป็นจุดต่อร่วม (Point of Common Coupling : PCC) หรือ CB4 ซึ่งทำหน้าที่เชื่อมต่อและตัดตอนไมโครกริด ทั้งหมดจากกริดหลักตามโหมดที่เลือกการดำเนินงานนั้นคือถ้า CB4 ปิดแสดงว่าไมโครกริดทำงานอยู่ในโหมดเชื่อมต่อกับกริด (Grid Connect) แต่ถ้า CB4 เปิดแสดงว่าไมโครกริดทำงานอยู่ในโหมดแยกอิสระ (Stand-Alone)

ไมโครกริดดำเนินการในสองโหมด : (1) เชื่อมต่อกับกริด และ (2) โหมดแยกอิสระ โดยในโหมดเชื่อมต่อกับกริดนั้นไมโครกริดจะยังคงเชื่อมต่อกับกริดหลักทั้งหมดหรือบางส่วนและนำเข้าหรือส่งกำลังไปยังกริดหลัก ในกรณีที่เกิดสัญญาณรบกวนในกริดหลัก ไมโครกริดจะสลับไปยังโหมดแยกอิสระ ในขณะที่ยังคงจ่ายกำลังให้กับภาระที่สำคัญเหมือนเดิม โหมดแยกอิสระนี้สามารถทำได้โดย

(i) ตัดการเชื่อมต่อ Microgrid ทั้งหมดโดยเปิด CB4

(ii) ตัดการเชื่อมต่อ สายป้อน A และ C โดยเปิด CB1 และ CB3

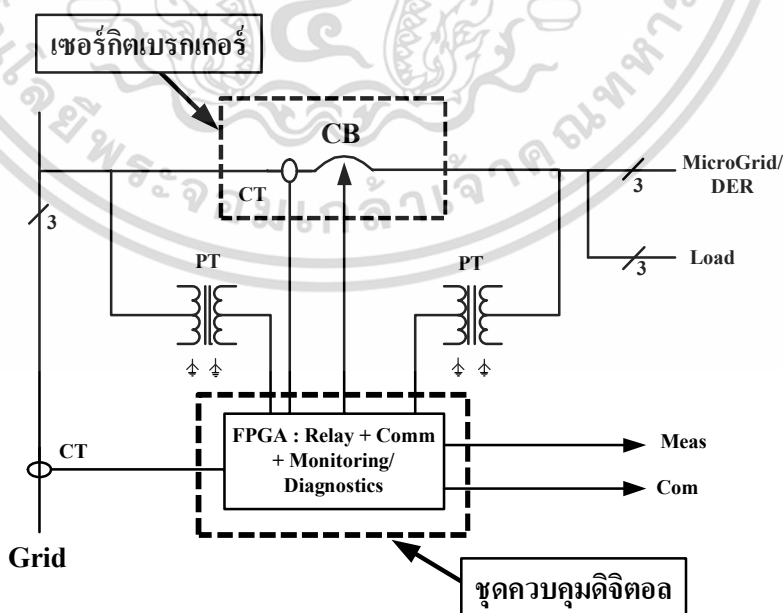
สำหรับตัวเลือก (i) ไมโครกริดจะทำงานเป็นระบบอัตโนมัติที่มีทั้งหมดแหล่งจ่ายขนาดเล็กจะจ่ายกำลังให้กับภาระทั้งหมดในสายป้อน A, B และ C ในขณะที่ตัวเลือก (ii) สายป้อน A และ C จะจ่ายเพียงโหลดสำคัญในขณะที่สายป้อน B จะถูกตัดทิ้งไปเนื่องจากเป็นโหลดไม่สำคัญ

## 2.5 โครงสร้างของอุปกรณ์ตัดต่อ

ในสภาวะปกติกริดและไมโครกริดจะเชื่อมต่อกัน แต่เมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังหลัก ไมโครกริดจะสามารถปลดตัวเองออกจากระบบไฟฟ้ากำลังหลัก และทำงานในแบบไอส์แลนด์ (ผลิตและส่งกำลังไฟฟ้าภายในพื้นที่) ได้อย่างอัตโนมัติและสามารถเชื่อมต่อกลับเข้าไปกับระบบไฟฟ้ากำลังหลักได้เมื่อความผิดปกติในระบบไฟฟ้ากำลังหลักได้รับการแก้ไขไปแล้ว โดยอุปกรณ์ที่จะเข้ามาทำหน้าที่นี้เรียกว่าอุปกรณ์ตัดต่อ (Separation Device: SD) ซึ่งการทำงานถูกออกแบบให้เป็นไปตามมาตรฐาน

รูปที่ 2.4 โครงสร้างของอุปกรณ์ตัดต่อประกอบไปด้วยส่วนควบคุมและส่วนสวิตช์ ซึ่งอาจเป็นเบรกเกอร์แบบแม่เหล็กไฟฟ้าหรือแบบโซลิดสเตทก็ได้ โดยในการควบคุมการตัดต่อของอุปกรณ์ตัดต่อนั้น ตัวควบคุมจะทำการตรวจวัดปริมาณไฟฟ้าต่างๆ คือ แรงดันของระบบไฟฟ้า, ไมโครกริด และกระแสที่ไหลผ่านอุปกรณ์ตัดต่อ โดยชุดควบคุมดิจิทัลจะทำหน้าที่เป็นรีเลย์เพื่อตรวจสอบสถานะต่างๆ ตามมาตรฐานที่กำหนดไว้สำหรับการออกแบบอุปกรณ์ตัดต่อ ซึ่งทำหน้าที่ในการตัดต่อระหว่างระบบไฟฟ้าและไมโครกริดให้เป็นไปอย่างราบรื่น [5] โดยมีเงื่อนไขในการทำงานของอุปกรณ์ตัดตอดังนี้

1. ตรวจสอบแรงดันเกิน แรงดันต่ำ (Over/Under Voltage Protection)
2. ตรวจสอบกระแสเกิน (Overcurrent Protection)
3. ตรวจสอบค่าความถี่สูง ความถี่ต่ำ (Frequency Protection)
4. ตรวจสอบกำลังไฟฟ้าไหลย้อนกลับ (Reverse Power Protection)
5. ตรวจสอบการซิงโครไนซ์ (Synchronize Protection)



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของอุปกรณ์ตัดต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.6 มาตรฐานที่เกี่ยวข้องสำหรับอุปกรณ์ตัดต่อ

### 2.6.1 มาตรฐาน IEEE 1547 [6]

IEEE 1547 คือมาตรฐานการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าแบบกระจายศูนย์หรือ Distributed Generation (DG) เข้ากับระบบไฟฟ้ากำลังหลัก โดยมีหลักเกณฑ์และข้อกำหนดที่เกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพ, การทำงาน, การทดสอบ, การพิจารณาความปลอดภัย และการบำรุงรักษาของการเชื่อมต่อ จากการที่ระบบไมโครกริดนั้นได้พัฒนาพิกัดแรงดันใกล้เคียงกับ DG จึงอนุโลมใช้มาตรฐานนี้ในการออกแบบการทำงานของอุปกรณ์ตัดต่อสำหรับไมโครกริดด้วย ซึ่งมาตรฐาน IEEE 1547 กำหนดไว้มีรายละเอียดต่างๆ ดังนี้

#### 1) ตรวจสอบแรงดันเกินและแรงดันต่ำ (Over/Under Voltage Protection)

การทำงานของระบบเชื่อมต่อในการตรวจสอบแรงดันนั้น จะตรวจจับแรงดันเฟสที่ฝั่งไมโครกริดและฝั่งระบบไฟฟ้าถ้าแรงดันที่เกิดขึ้นอยู่ในช่วงกำหนดไว้ดังตารางที่ 2.1 ไมโครกริดจะต้องปลดตัวเองออกจากระบบไฟฟ้าภายในระยะเวลาที่กำหนด ซึ่งเวลาในการทริปคือเวลาเริ่มจากแรงดันระดับปกติ จนถึงช่วงไมโครกริดปลดตัวเองออกจากระบบไฟฟ้าถ้าเวลาทริปเกินกว่าที่กำหนดอาจส่งผลเสียหายต่อฝั่งไมโครกริดและระบบไฟฟ้าได้ ซึ่งรายละเอียดของการตรวจสอบแรงดันมีดังนี้

ตารางที่ 2.1 มาตรฐานการตรวจสอบแรงดันเกินและแรงดันต่ำ

ระดับ	ระดับแรงดัน (V) (% จากแรงดันปกติ)	เวลาในการทริป (s)
1	แรงดัน < 50	0.16
2	$50 \leq$ แรงดัน < 88	2.00
3	$110 <$ แรงดัน < 120	1.00
4	แรงดัน $\geq$ 120	0.16

#### 2) ตรวจสอบค่าความถี่ (Frequency Protection)

การตรวจสอบค่าความถี่จะทำการวัดจากฝั่งไมโครกริดและระบบไฟฟ้า เมื่อความถี่ที่ตรวจจับได้มีค่ามากกว่าระดับความถี่ปกติ หรือความถี่ที่ตรวจจับได้มีค่าน้อยระดับความถี่ปกติ ระบบเชื่อมต่อต้องปลดไมโครกริดออกจากระบบไฟฟ้าภายในเวลาที่กำหนด ซึ่งรายละเอียดในการตรวจสอบความถี่แสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 มาตรฐานการตรวจสอบความถี่เกินและความถี่ต่ำ

ระดับ	ระดับความถี่ที่กำหนด	เวลาในการทริป (s)
1	$f > 50.5$	0.16
2	$f < 47$	0.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3) ตรวจสอบการซิงโครไนซ์ (Synchronize Protection)

การซิงโครไนซ์จะตรวจสอบขนาดของแรงดัน มุมเฟส และความถี่ของไมโครกริดกับระบบไฟฟ้ากำลังหลัก ให้เข้ากันเพื่อที่จะเชื่อมต่อระบบทั้งสองเข้าด้วยกัน โดยให้ค่าพารามิเตอร์ที่กล่าวมาอยู่ในค่าที่กำหนดในตารางที่ 2.3 ถ้าค่าพารามิเตอร์ต่างๆอยู่นอกช่วงที่กำหนดไว้ จะต้องไม่มีการเชื่อมต่อระบบ

**ตารางที่ 2.3** ค่าพารามิเตอร์ในการตรวจสอบการซิงโครไนซ์

ระดับ (KVA)	ความแตกต่างของความถี่ ( $\Delta f$ , Hz)	ความแตกต่างของแรงดัน ( $\Delta V$ , %)	ความแตกต่างของมุมเฟส ( $\Delta \theta$ , องศา)
0-500	0.3	10	20
500-1500	0.2	5	15
1500-10000	0.1	3	10

#### 2.6.2 ตรวจสอบกำลังไฟฟ้าไหลย้อนกลับ

เนื่องจากไมโครกริดสามารถรับและจ่ายพลังงานให้กับระบบไฟฟ้ากำลังหลักได้ จึงต้องมีการตรวจสอบการไหลกลับของกำลังไฟฟ้า ทำได้โดยตรวจจับกำลังไฟฟ้าที่ไหลผ่านระบบเชื่อมต่อ โดยค่ากำลังไฟฟ้าที่วัดได้ จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับค่ากำลังไฟฟ้าที่ตั้งไว้เริ่มต้นเพื่อดูว่าขณะนี้ ไมโครกริดรับหรือจ่ายพลังงานให้ระบบไฟฟ้า ถ้ากำลังไฟฟ้าที่วัดได้มีทิศทางไหลกลับจากที่ตั้งไว้ ระบบเชื่อมต่อต้องปลดไมโครกริดออกจากระบบไฟฟ้าภายใน 2 วินาที เพื่อป้องกันอันตรายที่จะเกิดขึ้นแก่อุปกรณ์ต่างๆในระบบ

#### 2.6.3 ระเบียบการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำหรับผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมาก (VSPP)

ตามระเบียบการไฟฟ้าฝ่ายจำหน่ายว่าด้วยการเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนานกับระบบของการไฟฟ้าฝ่ายจำหน่ายสำหรับผู้ผลิตไฟฟ้าที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ หรือที่มีอินเวอร์เตอร์แบบสามเฟสสำหรับผู้เชื่อมต่อกับระบบ 380/220 โวลต์ของ กฟภ. และกฟน. มีรายละเอียดต่างๆ สำหรับการออกแบบการทำงานของอุปกรณ์ตัดต่อดังนี้ [7-8]

- สำหรับคุณสมบัติทางเทคนิคของเซอร์กิตเบรกเกอร์พิกัดแรงดันต่ำ (380/220 โวลต์) ให้สอดคล้องตามมาตรฐานการติดตั้งทางไฟฟ้าสำหรับประเทศไทยของสมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย (วสท.)
- ส่วนของรีเลย์ป้องกันจะประกอบไปด้วย
  - รีเลย์ป้องกันแรงดันต่ำ / ป้องกันแรงดันเกิน
  - รีเลย์ป้องกันความถี่ต่ำ / ป้องกันความถี่เกิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- รีเลย์ป้องกันกระแสเกินด้านเฟส
- ซิงโครไนซ์
- ป้องกันการจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระ (Anti-Islanding Protection)

โดยในงานวิจัยนี้จะเลือกการออกแบบรีเลย์ป้องกันความถี่ซึ่งมีรายละเอียดตามมาตรฐานกำหนด คือ ผู้ให้สัญญาจะต้องรักษาความถี่ไฟฟ้าให้อยู่ในระดับ 48.00-51.00 รอบต่อวินาที หากไม่สามารถรักษาระดับความถี่นี้ได้ จะต้องมียุทธศาสตร์ตัดตอนอัตโนมัติตัดการจ่ายไฟฟ้าของผู้ให้สัญญาออกจากระบบของการไฟฟ้าฝ่ายจำหน่ายภายใน 0.1 วินาที ทั้งนี้จะมีการพิจารณาทบทวนใหม่ตามความเหมาะสมเป็นครั้งคราวไป หรือในกรณีที่มีปัญหาการตัดไฟบ่อยครั้ง (Nuisance Tripping) อันเนื่องมาจากความผันผวนของแรงดันระบบ

#### 2.6.4 มาตรฐาน SEMI - F47 [9]

SEMI-F47 คือมาตรฐานจากกลุ่มผู้ผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ (The Semiconductor Equipment and Materials International Group) เพื่อใช้ประเมินผลกระทบเฉพาะปัญหาแรงดันตกชั่วขณะของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เพื่อให้สามารถทำงานได้อย่างปลอดภัยเมื่อเกิดแรงดันตกชั่วขณะดังนี้ คือ

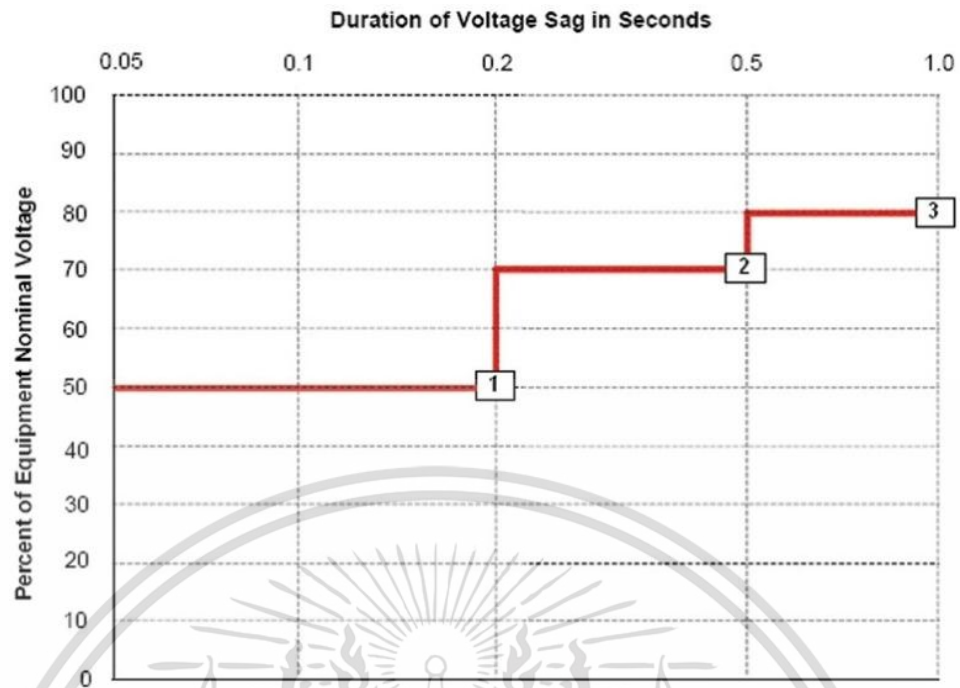
- 1) เมื่อเกิดแรงดันตกชั่วขณะที่ลดลงเหลือ 50% ต้องทนได้นาน 0.2 วินาที
- 2) เมื่อเกิดแรงดันตกชั่วขณะที่ลดลงเหลือ 70% ทนได้นาน 0.5 วินาที
- 3) เมื่อเกิดแรงดันตกชั่วขณะที่ลดลงเหลือ 80% ต้องทนได้นาน 1 วินาที

ซึ่งอุปกรณ์จะต้องสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องโดยไม่หยุดชะงักในระหว่างเงื่อนไขที่ระบุไว้ในพื้นที่เหนือเส้นที่สีแดงที่กำหนดไว้ ดังแสดงในตารางที่ 2.4 และรูปที่ 2.5

ตารางที่ 2.4 เปอร์เซ็นต์การเกิดแรงดันตกชั่วขณะจากแรงดันปกติใช้งานและระยะเวลาการเกิดแรงดันตกชั่วขณะ

ระดับที่	ระดับแรงดันตกชั่วขณะจากแรงดันปกติ (%)	ช่วงเวลาที่อุปกรณ์ต้องทนได้ (s)
1	50%	0.2
2	70%	0.5
3	80%	1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



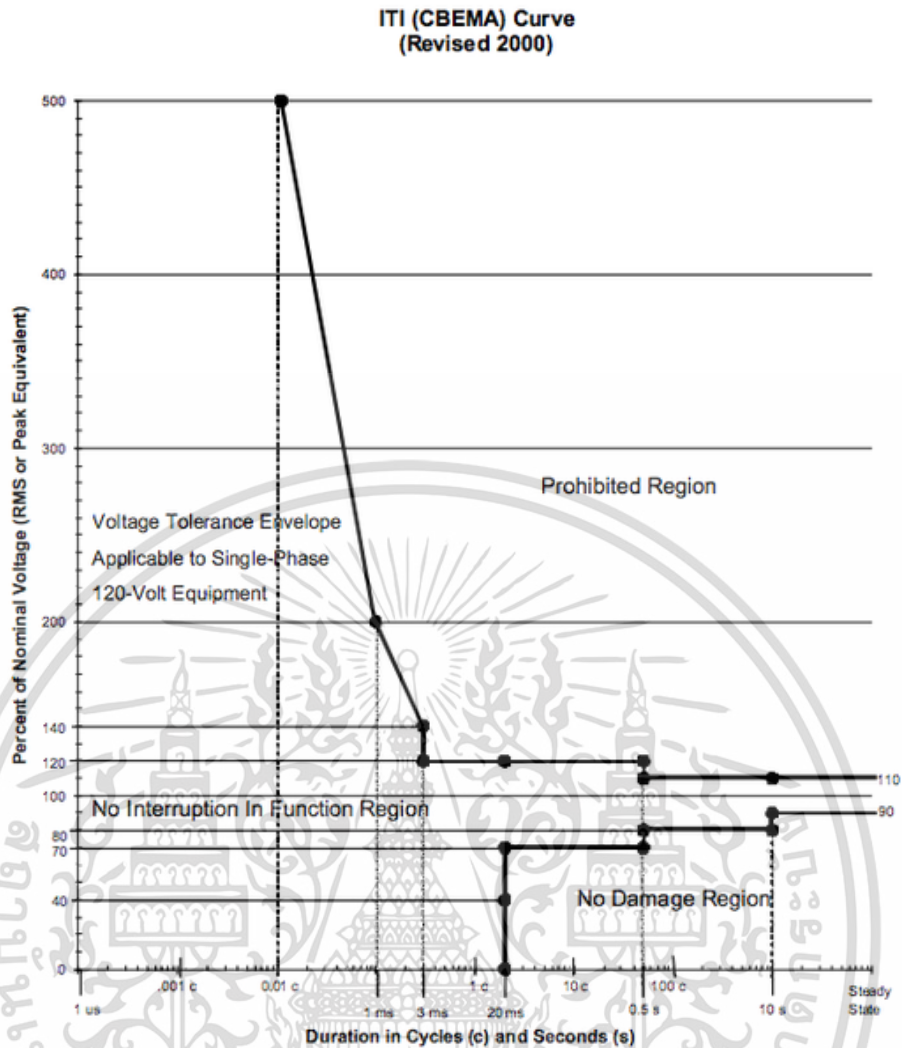
รูปที่ 2.5 ข้อกำหนดอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เพื่อให้สามารถทำงานได้อย่างปลอดภัย  
เมื่อเกิดแรงดันตกชั่วขณะตามมาตรฐาน SEMI – F47

### 2.6.5 เส้นโค้ง ITIC (ITIC Curve) [10]

เส้นโค้ง ITIC คือมาตรฐานจากองค์กรทางด้านเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Information Technology Industry Council) ซึ่งได้กำหนดมาตรฐานสำหรับอุปกรณ์คอมพิวเตอร์และอิเล็กทรอนิกส์โดยที่อุปกรณ์เหล่านี้สามารถทำงานได้อย่างปลอดภัยเมื่อเกิดแรงดันตกชั่วขณะดังนี้ คือ

- 1) เมื่อเกิดแรงดันตกชั่วขณะที่ลดลงเหลือ 70% ต้องทนได้นาน 0.5 s
- 2) เมื่อเกิดแรงดันตกชั่วขณะที่ลดลงเหลือ 80% ต้องทนได้นาน 10 s
- 3) เมื่อเกิดแรงดันตกชั่วขณะที่ลดลงเหลือ 0% ต้องทนได้นาน 20 ms
- 4) เมื่อเกิดแรงดันเกินชั่วขณะที่เพิ่มขึ้น 120% ต้องทนได้นาน 0.5 s

แสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ข้อกำหนดสำหรับอุปกรณ์คอมพิวเตอร์และอิเล็กทรอนิกส์เพื่อให้อุปกรณ์สามารถทำงานได้อย่างปลอดภัยเมื่อเกิดแรงดันตกชั่วขณะ (เส้นโค้ง ITIC)

### 2.6.6 การตรวจสอบกระแสเกิน

การตรวจสอบกระแสเกิน เมื่อกระแสที่ตรวจจับได้มีค่ามากกว่ากระแสที่กำหนด ระบบเชื่อมต่อต้องปลดไมโครกริดออกจากระบบไฟฟ้าทันที โดยการกำหนดเวลาทำงานของรีเลย์สามารถเลือกได้ 2 รูปแบบคือ แบบทำงานทันทีและแบบเวลาผกผัน [11] นอกจากนี้ลักษณะของแบบเวลาผกผัน ยังแบ่งออกได้หลายชนิด คือ Long Inverse Time, Standard Inverse Time, Very Inverse Time และ Extremely Inverse Time โดยช่วงเวลาการทำงานจะเป็นส่วนกลับกับค่ากระแสพิกัด เมื่อมีกระแสฟลัดรีเลย์จะทำงานตามสมการต่างๆตามสูตรของ Time Current Characteristic นั้นมีดังนี้

$$1. \text{ Long time Inverse} : t = \frac{120}{\left(\frac{I_F}{I_P}\right)^1 - 1} TMS \quad (2.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$2. \text{ Normaly Inverse} \quad : t = \frac{0.14}{\left(\frac{I_F}{I_P}\right)^{0.02} - 1} TMS \quad (2.2)$$

$$3. \text{ Very Inverse} \quad : t = \frac{13.5}{\left(\frac{I_F}{I_P}\right)^1 - 1} TMS \quad (2.3)$$

$$4. \text{ Extremely Inverse} \quad : t = \frac{80}{\left(\frac{I_F}{I_P}\right)^2 - 1} TMS \quad (2.4)$$

โดย  $t$  = เวลาในการทำงาน (Operation Time, sec)

$I_F$  = ค่ากระแสเกิน (Fault Current, A)

$I_P$  = ค่ากระแสเริ่มทำงาน (Pick Up Current, A)

$TMS$  = ค่าเซตตั้งตัวคูณเวลา (Time Multiplier Setting)

เป็นตัวกำหนดค่าหน่วยเวลาให้ Output ของรีเลย์ มีค่า 0.1-1

## 2.7 วิธีการตรวจจับทางไฟฟ้า

ในการตรวจจับสภาวะทางไฟฟ้า หรือความผิดปกติต่างๆ อาศัยหลักการแปลงโคออร์ดิเนตของปริมาณทางไฟฟ้าและเฟสล็อกลูป (Phase-locked Loop) โดยแรงดันและกระแสของระบบไฟฟ้าและของ ไมโครกริดจะถูกแปลงให้อยู่ในกรอบอ้างอิง d-q (Synchronous Reference Frame) [12] ตามสมการที่ (2.5) และ (2.6)

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \sin \theta & \sin(\theta - 2\pi/3) & \sin(\theta + 2\pi/3) \\ \cos \theta & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \end{bmatrix} [v_a \ v_b \ v_c]^T \quad (2.5)$$

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \sin \theta & \sin(\theta - 2\pi/3) & \sin(\theta + 2\pi/3) \\ \cos \theta & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \end{bmatrix} [i_a \ i_b \ i_c]^T \quad (2.6)$$

โดยสัญญาณเฟส  $\theta = \int \omega_s dt$  ของการแปลงได้มาจากส่วนเฟสล็อกลูป ซึ่งทำหน้าที่ซิงโครไนซ์กับความถี่ของระบบไฟฟ้า โดยปริมาณที่ได้ในแกน d-q จะนำไปใช้ในการตรวจจับสภาวะทางไฟฟ้าต่อไป

### 2.7.1 การตรวจจับแรงดัน และกระแส

จากสมการที่ (2.7) ขนาดของแรงดันไฟฟ้า ณ เวลาใดๆ คำนวณจาก

$$V = \sqrt{v_d^2 + v_q^2} \quad (2.7)$$

จากสมการที่ (2.8) ขนาดของกระแสไฟฟ้า ณ เวลาใดๆ คำนวณจาก

$$I = \sqrt{i_d^2 + i_q^2} \quad (2.8)$$

### 2.7.2 การตรวจจับความถี่ และแรงดันอาร์เอ็มเอส

ความถี่และค่าแรงดันอาร์เอ็มเอสแต่ละเฟสของระบบไฟฟ้า สามารถตรวจวัดได้จากส่วน FPGA ของชุดควบคุมดิจิทัลโดยบล็อกโปรแกรมสำเร็จรูปจาก LabVIEW ซึ่งรายละเอียดของโปรแกรมอยู่ในส่วนภาคผนวก ก.

### 2.7.3 การตรวจสอบกำลังไฟฟ้าไหลย้อนกลับ

กำลังไฟฟ้าที่ไหลผ่านเซอร์กิตเบรกเกอร์สามารถคำนวณได้จากสมการที่

$$P = v_{ds} i_d + v_{qs} i_q \quad (2.9)$$

ซึ่งขนาดและเครื่องหมายของกำลังไฟฟ้าจะแสดงทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้า

### 2.7.4 การตรวจสอบการชิงโครไนซ์

เมื่อระบบไฟฟ้าและไมโครกริดชิงโครไนซ์กัน ขนาดของแรงดันไฟฟ้า, ความถี่ และลำดับเฟส จะต้องตรงกัน สถานะนี้สามารถสังเกตได้จากปริมาณไฟฟ้าในแกน d-q กล่าวคือเมื่อ

$$v_{ds} = v_{dm} \text{ และ } v_{qs} = v_{qm}$$

โดย  $v_{ds}, v_{qs}$  เป็นปริมาณฝั่งระบบไฟฟ้าและ  $v_{dm}, v_{qm}$  เป็นปริมาณของฝั่งไมโครกริดตามลำดับ แสดงว่าระบบไฟฟ้าและไมโครกริดชิงโครไนซ์กันโดยสมบูรณ์

### 2.7.5 เฟสล็อกกลูบ

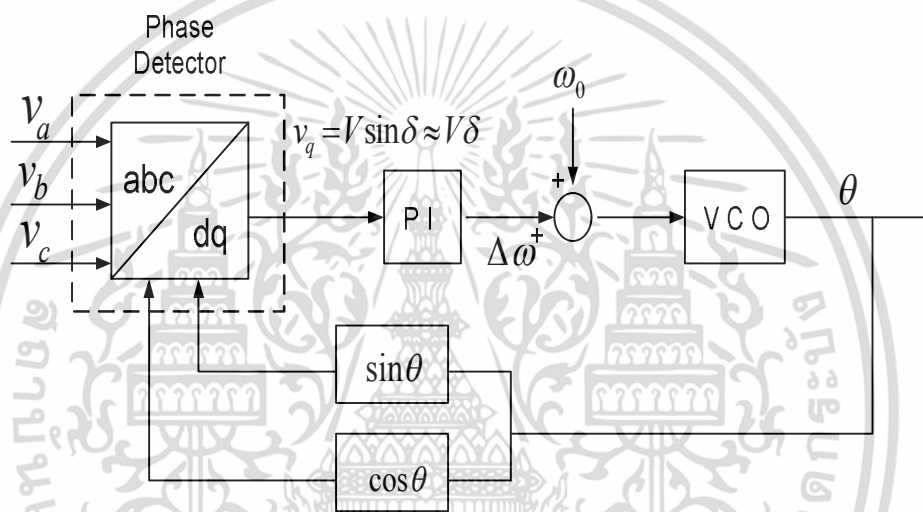
จากรูปที่ 2.7 บล็อกไดอะแกรมของเฟสล็อกกลูบประกอบด้วยส่วนการตรวจจับความผิดพลาดเฟส (Phase Error Detector) จะใช้การแปลงโคออร์ดิเนตแบบกรอบอ้างอิงชิงโครไนซ์ ทำให้ค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันในแกน  $q$  แปรผันตามค่าความต่างเฟสระหว่างอินพุตและส่วนกำเนิดสัญญาณ ในกรณีที่ความผิดพลาดเฟสมีค่าน้อยอาจประมาณได้ว่า

$$v_q = V \sin \delta \approx V \delta \quad (2.10)$$

เมื่อ  $\delta$  เป็นค่าความผิดพลาดเฟสและ  $V$  คือขนาดแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการนอร์มัลไลซ์สมการที่ (2.10) ด้วยขนาดของแรงดันไฟฟ้า จะได้ค่าความผิดพลาดเฟส  $\delta$  เป็นตัวอินพุตของตัวควบคุมเพื่อรักษาค่าความผิดพลาดเฟสให้เป็นศูนย์ จะทำให้ความถี่และเฟสเอาต์พุต  $\theta$  ของ VCO เท่ากับระบบไฟฟ้าตลอดเวลา และอินพุตของ VCO จะค่าเท่ากับความถี่ของระบบไฟฟ้า

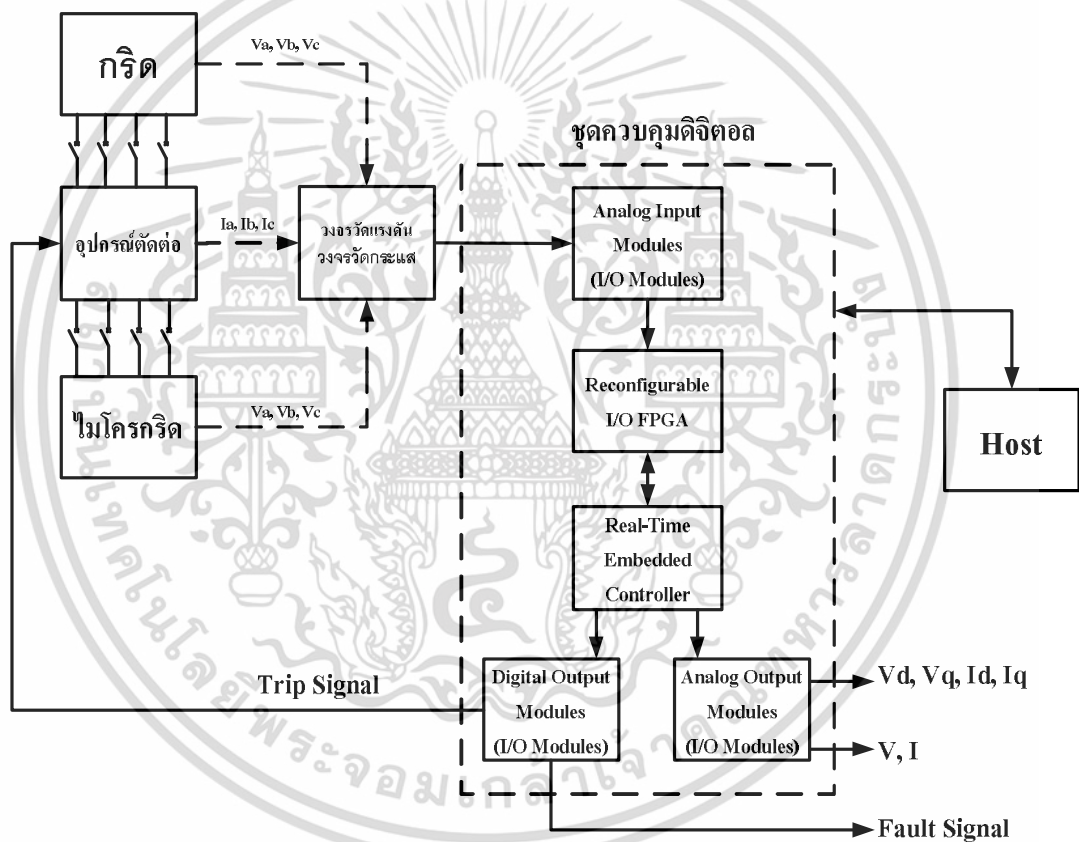


รูปที่ 2.7 ส่วนประกอบต่างๆ ของวงจรเฟสล็อกกลูป

## การออกแบบและสร้างระบบควบคุมของอุปกรณ์ตัดต่อ

### 3.1 โครงสร้างโดยรวมของอุปกรณ์ตัดต่อและชุดควบคุมดิจิทัล

บทนี้จะกล่าวถึงลักษณะโครงสร้างของอุปกรณ์ตัดต่อและชุดควบคุมดิจิทัล ซึ่งประกอบด้วย วงจรวัดแรงดันและกระแส, อุปกรณ์ตัดต่อ, และชุดควบคุมดิจิทัล โครงสร้างโดยรวมดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.1

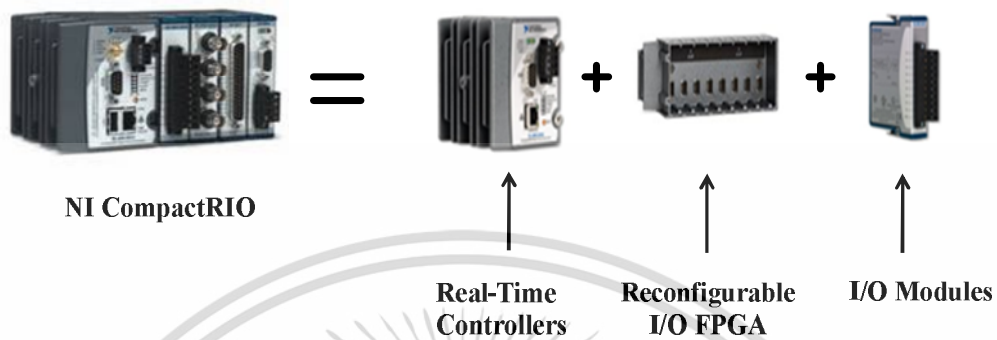


รูปที่ 3.1 โครงสร้างโดยรวมของอุปกรณ์ตัดต่อและชุดควบคุมดิจิทัล

### 3.2 โครงสร้างของชุดควบคุมดิจิทัล

ในงานวิจัยได้ใช้ชุดควบคุมดิจิทัลซึ่งพัฒนาบนแพลตฟอร์มคอมพิวเตอร์ไอโอของ NI (NI Compact RIO) โดยมีโครงสร้างของระบบดังรูปที่ 3.2 ซึ่งประกอบไปด้วยส่วน FPGA อินพุตเอาต์พุต

แบบปรับเปลี่ยนได้ (Reconfigurable I/O FPGA), โมดูลอินพุตเอาต์พุต (I/O Modules) และส่วนประมวลผลจริงแบบฝังตัว (Real-Time Embedded Controller) [13]



รูปที่ 3.2 โครงสร้างของ NI CompactRIO

### 3.2.1 ส่วนประมวลผลจริงแบบฝังตัว (Realtime Embedded Controller)

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ส่วนประมวลผลจริงแบบฝังตัวรุ่น NI cRIO-9002 ของบริษัทเนชั่นแนลอินสตรูเมนต์ ดังรูปที่ 3.3 ซึ่งมีรายละเอียดต่างๆ ดังนี้คือ ความเร็วของตัวประมวลผล 195 MHz, หน่วยความจำถาวร 64 MB, หน่วยความจำชั่วคราว 32 MB, เชื่อมต่อผ่านพอร์ต RS 232 และ Ethernet Lan, ใช้แหล่งจ่ายไฟดีซี 9 ถึง 35 โวลต์



รูปที่ 3.3 ส่วนประมวลผลจริงแบบฝังตัวรุ่น NI cRIO-9002

### 3.2.2 FPGA อินพุตเอาต์พุตแบบปรับเปลี่ยนได้ (Reconfigurable I/O FPGA)

มีทั้งหมด 8 สล็อตใช้เชื่อมต่อกับโมดูลอินพุต-เอาต์พุต, 1M Gate, ควบคุมการทำงานและป้อนโปรแกรมโดยใช้ LabVIEW

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 FPGA อินพุตเอาต์พุตแบบปรับเปลี่ยนได้

### 3.2.3 โมดูลอินพุตเอาต์พุต (I/O Modules)

โมดูลอินพุตเอาต์พุตที่ใช้ในงานวิจัยมีรูปแบบการใช้งานและรายละเอียดต่างๆดังนี้

#### 1) โมดูลอนาล็อกอินพุตรุ่น NI 9201

โมดูลนี้ใช้ในการรับสัญญาณที่ได้จากวงจรตรวจจับสนและความแรงดันเข้ามาประมวลผลในระบบควบคุมโดยมีรายละเอียดดังนี้คือ รับสัญญาณอินพุตได้ 8 แชนแนล ช่วงแรงดันระหว่าง  $\pm 10$  โวลต์, ความละเอียด 12 บิต, 500ks/s Sampling Rate



รูปที่ 3.5 โมดูลอนาล็อกอินพุตรุ่น NI 9201

#### 2) โมดูลอนาล็อกเอาต์พุตรุ่น NI 9263

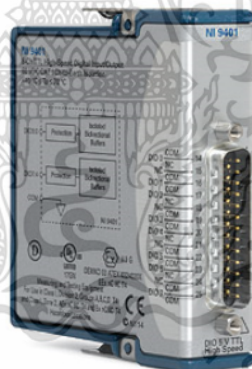
เป็นโมดูลอนาล็อกเอาต์พุตมี 4 แชนแนล, ความละเอียด 16 บิต, 100ks/s ทำหน้าที่เพื่อแปลงสัญญาณ  $V_d, V_q, V, I_d, I_q, I$  ที่ได้จากการแปลงโคออดิเนตว่าเป็นไปตามที่โปรแกรมหรือไม่ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 โมดูลอนาล็อกเอาต์พุตรุ่น NI 9263

### 3) โมดูลดิจิตอลอินพุตเอาต์พุตรุ่น NI 9401

เป็นโมดูลที่ใช้สำหรับส่งสัญญาณฟลตและสัญญาณทริบ ที่ส่งมาจากส่วนประมวลผลมีรายละเอียดดังนี้คือ มีทั้งหมด 8 แชนแนล สามารถตั้งค่าแต่ละแชนแนลให้ทำหน้าที่รับสัญญาณดิจิตอล หรือส่งสัญญาณดิจิตอลออกมา ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ตั้งค่าแต่ละแชนแนลส่งค่าดิจิตอลออกมาโดยให้ค่า 1 เท่ากับ 5 V และค่า 0 คือ 0 V การเชื่อมต่อแบบ 25-pin D-SUB



รูปที่ 3.7 โมดูลดิจิตอลอินพุตเอาต์พุตรุ่น NI 9401

## 3.3 ซอฟต์แวร์ LabVIEW

LabVIEW คือ ชุดพัฒนาแอปพลิเคชัน (Development Environment) จากบริษัทเนชั่นแนลอินสตรูเมนต์ส์เพื่อใช้ในการสร้างระบบการวัด, ทดสอบ, และควบคุม โดยการใช้การเขียนโปรแกรมด้วยภาษาโคัดรูปภาพ (Graphical Programming) และมีการต่อสายส่งค่าข้อมูลคล้ายกับการวาดโพลชาร์ตที่เข้าใจง่ายซึ่งชุดพัฒนาจะมาพร้อมกับชุดฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์และวิศวกรรมนับ

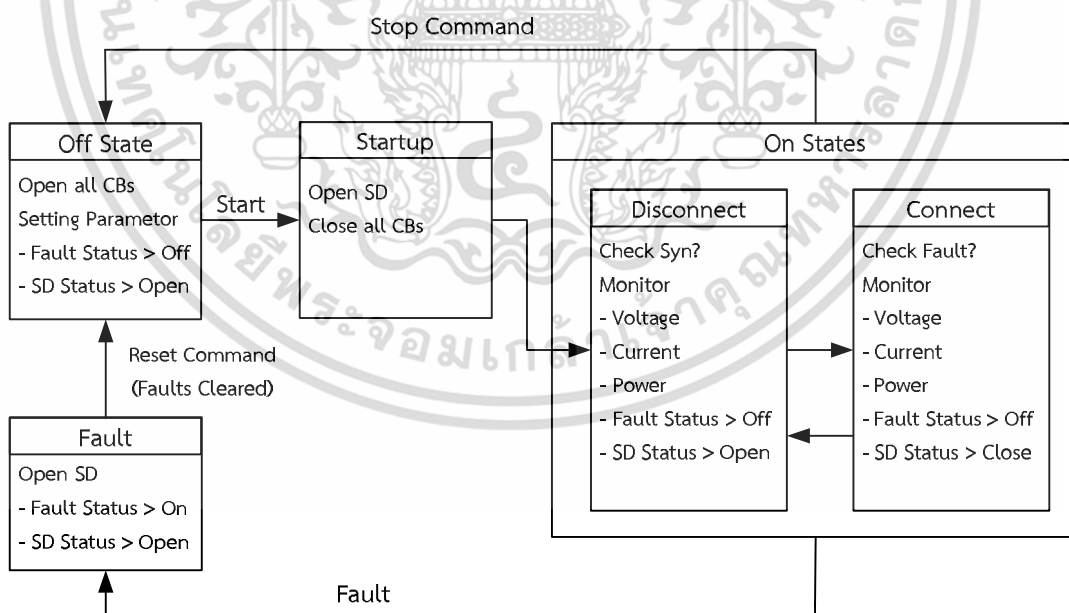
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ร้อยแบบสำหรับการวิเคราะห์, ประมวลผล, และแสดงข้อมูล รวมถึงความสามารถต่างๆ ในการใช้งานร่วมกับฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์อื่นๆ ได้ดี [14-15]

ในส่วนของการใช้งาน LabVIEW โปรแกรมที่ถูกสร้างขึ้นโดย LabVIEW จะเรียกว่า Virtual Instrument หรือ VI ซึ่งหมายถึงเครื่องมือวัดเสมือน โดยใน LabVIEW จะมี Front Panel ซึ่งจะมีไว้เพื่อแสดงและควบคุมการทำงาน ซึ่งจะมีส่วนประกอบต่างๆไว้สำหรับออกแบบหน้าจอ เช่น จอแสดงผลแบบออสซิลโลสโคป, สวิตช์ เป็นต้น ซึ่งทั้งหมดนี้จะทำงานผ่านจอคอมพิวเตอร์ และในส่วนสำหรับเขียนโปรแกรมเรียกว่า Block Diagram ซึ่งจะเป็นการเขียนโปรแกรมด้วยรูปภาพ หลักการในการทำงานจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนใหญ่ๆ คือ

1. Acquisition เป็นส่วนที่รับข้อมูล (Input) จากภายนอกเข้าสู่ระบบซึ่งข้อมูลเหล่านี้สามารถรับมาได้จาก DAQ (สำหรับสัญญาณทางไฟฟ้า), IMAQ (สำหรับข้อมูลประเภท-รูป) หรือ GPIB (สำหรับควบคุมเครื่องมือวัด)
2. เมื่อได้รับข้อมูลแล้วจะผ่านการวิเคราะห์ข้อมูล
3. Presentation คือ การแสดงผลโดยอาจแสดงผลบนหน้าจอคอมพิวเตอร์ เช่น Digital Multimeter หรือ Oscilloscope

### 3.4 State Machine ของชุดควบคุมดิจิทัล



รูปที่ 3.8 State Machine ของชุดควบคุมดิจิทัล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Off State:** รอรับคำสั่ง Start, อุปกรณ์ตัดต่อเปิดวงจร, เซอร์กิตเบรกเกอร์ทุกตัวเปิดวงจร

**Startup:** เมื่อรับคำสั่ง Start ระบบจะเช็คค่า  $V_d$ ,  $V_q$  ของกริดและไมโครกริดเพื่อเข้าสู่โหมดเตรียมการซิงโครไนซ์, เซอร์กิตเบรกเกอร์ทุกตัวปิดวงจร ส่วนอุปกรณ์ตัดต่อรอรับคำสั่งจากการตรวจสอบซิงโครไนซ์

**Disconnect:** ชุดควบคุมดิจิทัลจะทำการตรวจสอบการซิงโครไนซ์ระหว่างกริดและไมโครกริด เมื่อสถานะทั้งสองระบบพร้อมซิงโครไนซ์ สามารถเลือกได้ว่าจะกดคำสั่งเชื่อมต่อเอง หรือเชื่อมต่อแบบอัตโนมัติ

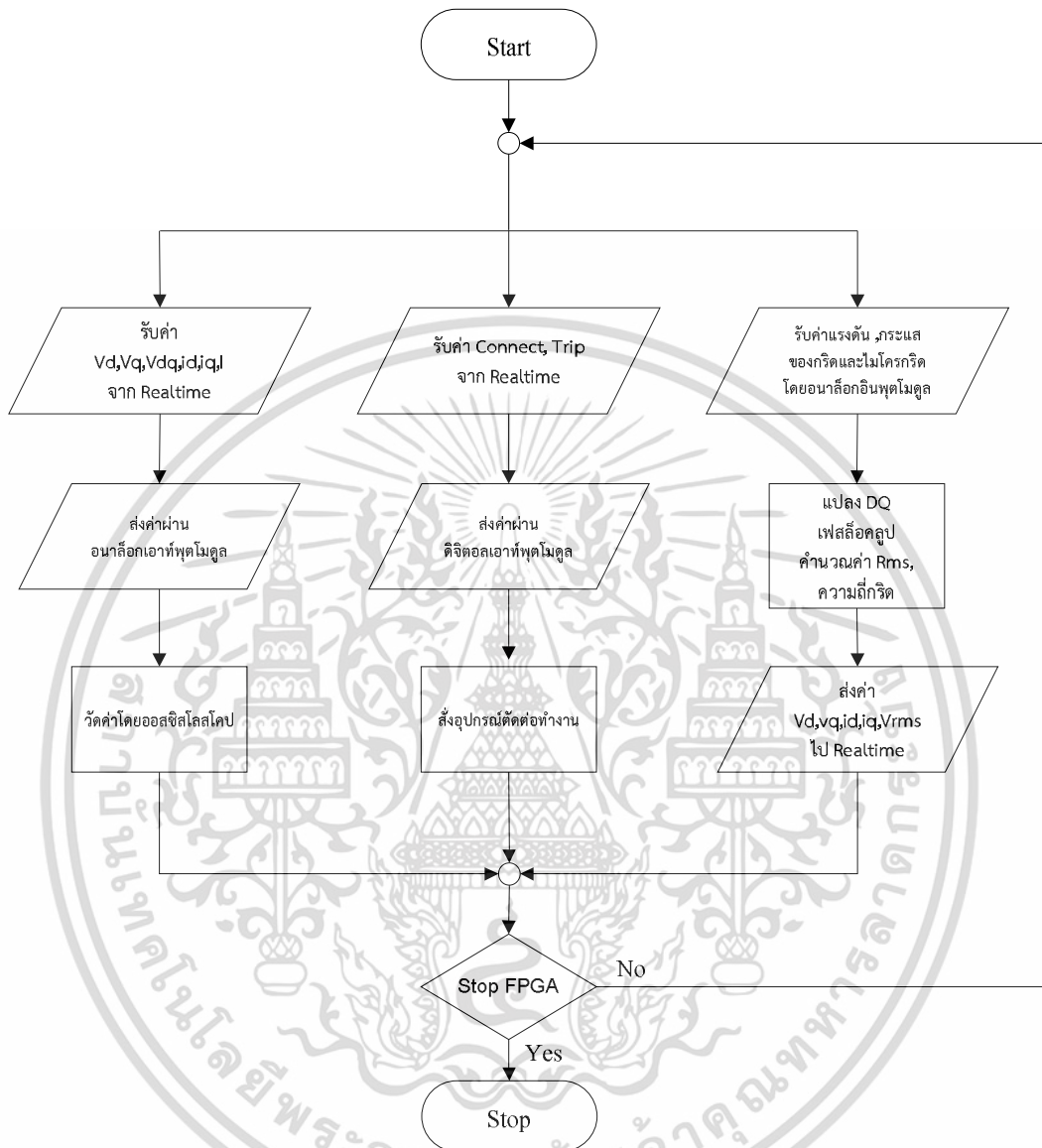
**Connect:** เมื่อกริดและไมโครกริดซิงโครไนซ์กัน (อุปกรณ์ตัดต่อทำการปิดวงจร) ชุดควบคุมดิจิทัลจะเข้าสู่โหมดตรวจจับฟอลต์

**Fault:** เมื่อฟอลต์เกิดขึ้นในระบบ ชุดควบคุมดิจิทัลจะทำการตรวจสอบฟอลต์ที่เกิดขึ้น ว่ามาจากสาเหตุใด และจะทำการปลดวงจรกริดและไมโครกริดออกจากกัน ตามมาตรฐานการตรวจจับฟอลต์นั้นๆ กำหนดเวลาไว้ (อุปกรณ์ตัดต่อเปิดวงจร, ไฟแสดงสถานะฟอลต์) เมื่อฟอลต์ในระบบหายไปจะ รีเซ็ตคำสั่งเพื่อเตรียมกลับเข้าสู่โหมด Off State อีกครั้ง

### 3.5 การออกแบบส่วนซอฟต์แวร์ของชุดควบคุมดิจิทัล

การทำงานของชุดควบคุมดิจิทัลและส่วนตรวจวัดปริมาณทางไฟฟ้าทั้งหมดจะอยู่ที่ส่วน CompactRIO โดยงานที่สำคัญได้แก่ เฟสล็อกกลุ๊ป, การแปลงกรอบอ้างอิงซิงโครไนส์, ตรวจจับความถี่ และตรวจจับแรงดันอาร์เอ็มเอส จะโปรแกรมให้วิ่งบน FPGA ส่วนการตรวจจับความผิดปกติทางไฟฟ้า และติดต่อสื่อสารจะวิ่งบนตัวประมวลผลจริงแบบฝังตัว อุปกรณ์แต่ละชนิดจะถูกโปรแกรมด้วยโปรแกรมสำหรับตัวเองเรียกว่า VI (Virtual Instrument) การออกแบบในส่วนซอฟต์แวร์นั้นมี 2 ส่วนหลักๆ คือ FPGA และตัวประมวลผลจริงแบบฝังตัว โดยมีรายละเอียดการออกแบบโปรแกรมเป็นโพล์ชาร์ตการทำงานในแต่ละส่วนดังต่อไปนี้

### 3.5.1 การออกแบบในส่วนของ Field Programmable Gate Array (FPGA)



รูปที่ 3.9 โฟลว์ชาร์ตการทำงานในส่วน FPGA

จากรูปที่ 3.9 เมื่อเริ่มต้นโปรแกรมในส่วน FPGA โมดูลอนุาล็อกอินพุดจะรับสัญญาณของ กระแสและแรงดันที่วัดได้จากวงจรวัดกระแสและแรงดัน โดยสัญญาณที่รับเข้ามาคือ  $V_A$ ,  $V_B$ ,  $V_C$  ของกริดและ  $V_A$ ,  $V_B$ ,  $V_C$  ของไมโครกริด จากนั้นจะถูกส่งไปยังส่วนของการแปลงกรอบอ้างอิง ซิงโครนัสและเฟสสี่ขั้วคู่ อีกทั้งยังคำนวณหาค่าแรงดันอาร์เอ็มเอสแต่ละเฟสของกริดและค่าความถี่ ของกริด โดยสัญญาณที่ออกจากส่วนนี้คือ  $V_d$ ,  $V_q$ , ความถี่, แรงดันอาร์เอ็มเอสแต่ละเฟสของกริด

และ  $V_d$ ,  $V_q$  ของไมโครกริด ต่อจากนั้นสัญญาณจะถูกส่งออกไปยัง Realtime Embedded Controller เพื่อใช้ในการตรวจจับฟอลต์และแสดงค่าต่อไป

นอกจากรับค่าจากวงจรวัดกระแสและแรงดัน FPGA ยังทำหน้าที่รับค่าที่ส่งมาจากส่วน Realtime ได้แก่ สัญญาณเชื่อมต่อ (Connect) และสัญญาณทริป (Trip) เพื่อสั่งให้อุปกรณ์ตัดต่อทำงานผ่านทางโมดูลดิจิทัลเอาต์พุต อีกส่วนหนึ่งคือรับค่าที่ได้จากการประมวลผลส่วน Realtime เช่น ค่า  $V_d$ ,  $V_q$ ,  $I_d$ ,  $I_q$ ,  $V$ ,  $I$  เพื่อส่งค่าที่ได้มาแสดงยังออสซิลโลสโคปผ่านทางโมดูลอนาล็อกเอาต์พุต โดยโปรแกรมในส่วนนี้จะทำงานเป็นลูปจนกว่าจะมีการหยุดโปรแกรม

### 3.5.2 การออกแบบในส่วนของ Realtime Embedded Controller

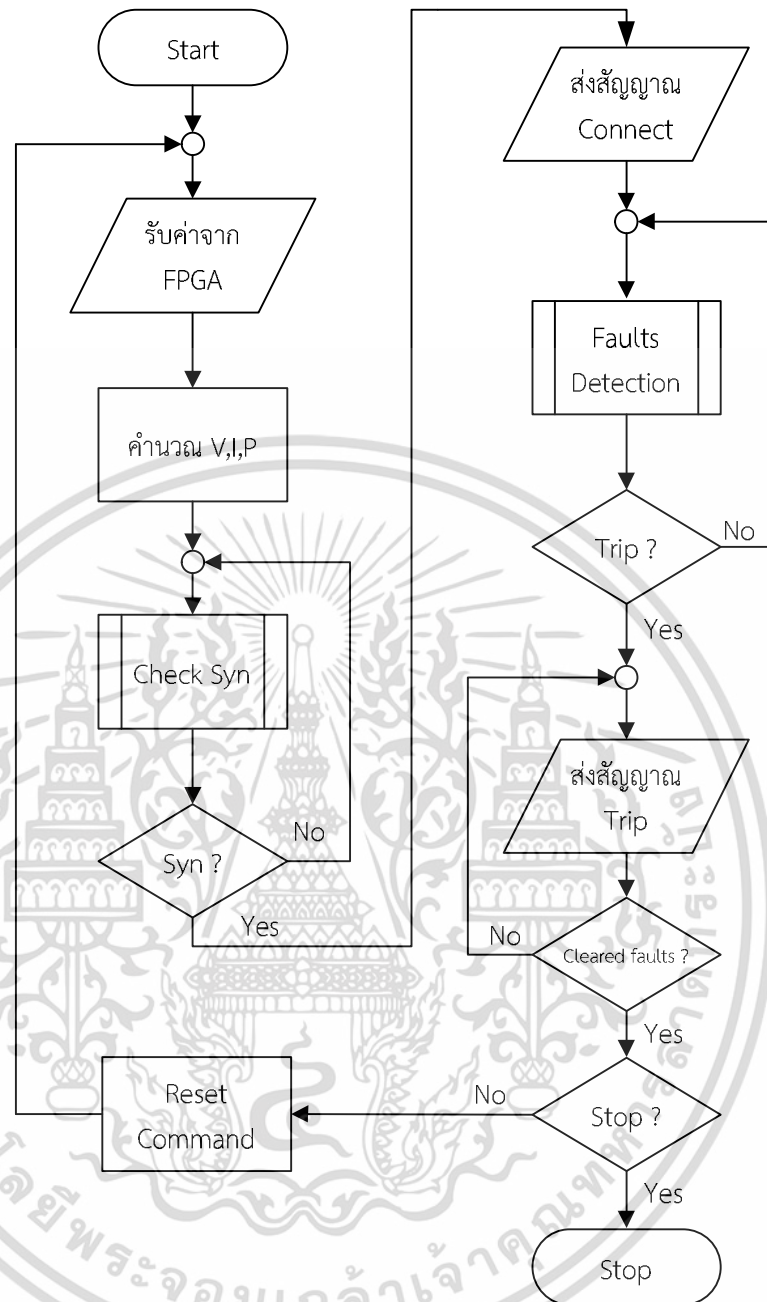
การทำงานจะเริ่มต้นจากการรับค่าที่ส่งมาจาก FPGA ได้แก่ ค่า  $V_d$ ,  $V_q$ ,  $F$ ,  $V_{rms}$  ของกริด และ  $V_d$ ,  $V_q$  ของไมโครกริด จากนั้นจะคำนวณค่า

$$V = \sqrt{v_d^2 + v_q^2}, I = \sqrt{i_d^2 + i_q^2}, P = v_{ds}i_d + v_{qs}i_q$$

เพื่อเตรียมที่จะส่งไปคำนวณยังฟังก์ชันการตรวจจับฟอลต์ ชั้นแรกโปรแกรมจะเข้าสู่ฟังก์ชันการตรวจสอบการซิงโครไนซ์ เมื่อระบบตรวจสอบแล้วสามารถซิงโครไนส์กันได้ ชุดควบคุมดิจิทัลจะส่งสัญญาณเชื่อมต่อไปยังอุปกรณ์ตัดต่อให้ทำการซิงโครไนส์กริดและไมโครกริดเข้าด้วยกัน พอระบบทั้งสองซิงโครไนส์กันอย่างสมบูรณ์ โปรแกรมก็จะเข้าสู่ฟังก์ชันการตรวจจับฟอลต์ซึ่งได้แก่

- 1) ตรวจสอบแรงดันเกิน แรงดันต่ำ (Over/Under Voltage Protection)
- 2) ตรวจสอบกระแสเกิน (Overcurrent Protection)
- 3) ตรวจสอบค่าความถี่ (Frequency Protection)
- 4) ตรวจสอบการไหลกลับของกำลังไฟฟ้า (Reverse Power Protection)
- 5) ตรวจสอบการซิงโครไนซ์ (Synchronize Protection)

หากเกิดความผิดปกติทางไฟฟ้าจากที่กล่าวมาข้างต้นชุด Realtime Embedded Controller จะส่งสัญญาณทริปไปยัง FPGA และส่งผ่านไปยังโมดูลดิจิทัลเอาต์พุตสั่งให้อุปกรณ์ตัดต่อทำการปลดกริดและไมโครกริดออกจากกัน และส่งค่าความผิดปกติทางไฟฟ้าไปยังคอมพิวเตอร์ของผู้ใช้งาน (Host) ดังแสดงในรูปที่ 3.10 เพื่อให้ผู้ใช้งานตรวจสอบฟอลต์ที่เกิดขึ้นและทำการแก้ไข หากฟอลต์ได้รับการแก้ไขและเข้าสู่สภาวะปกติ ผู้ใช้งานสั่ง Reset และเริ่มต้นโปรแกรมใหม่

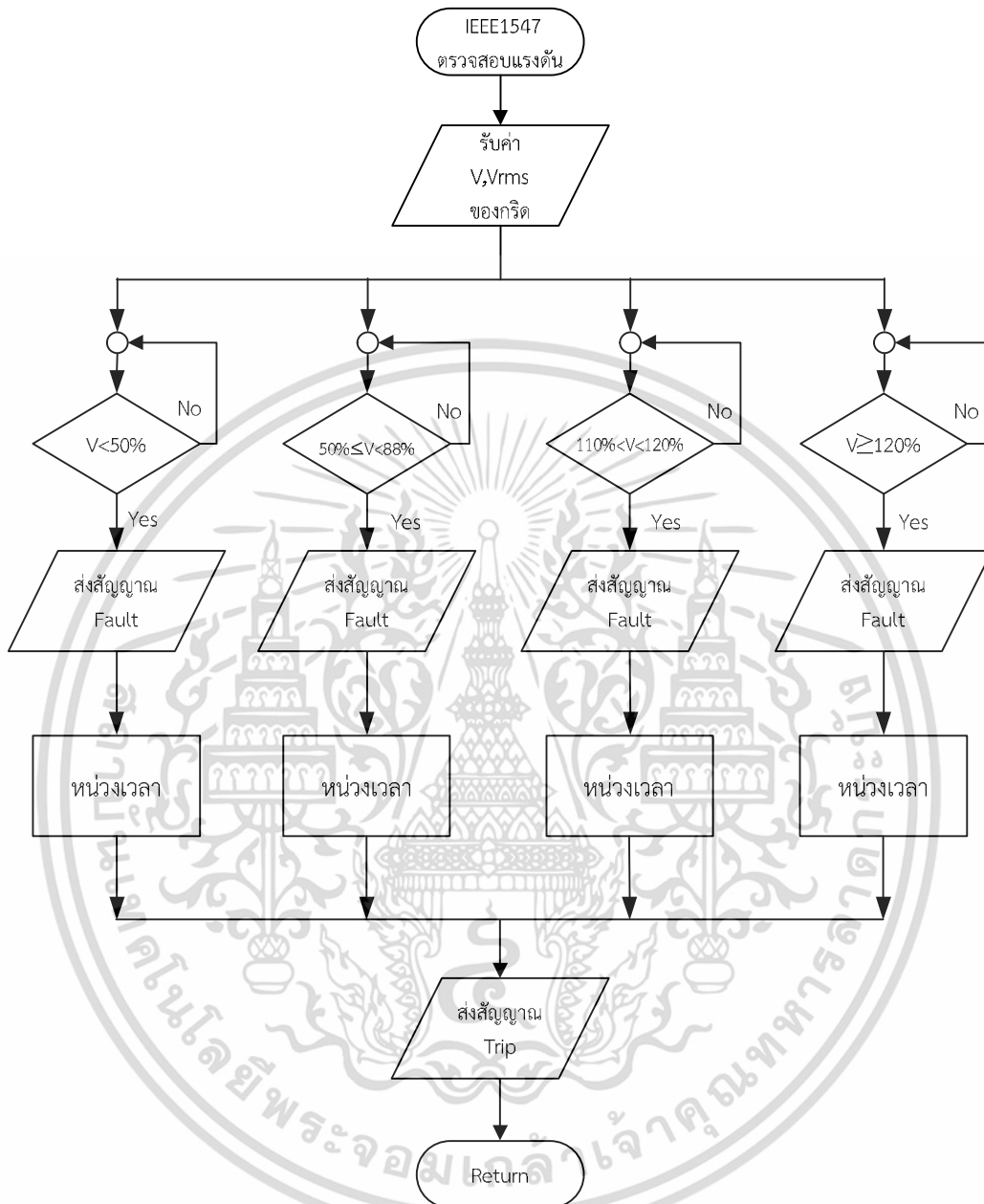


รูปที่ 3.10 โพล์ชาร์ตการทำงานในส่วนของ Realtime Embedded Controller

ข้อกำหนดที่ใช้ตรวจสอบนั้นอ้างอิงตามมาตรฐาน IEEE 1547, VSPP, SEMI-F47, เส้นโค้ง ITIC โดยผู้ใช้งานสามารถเลือกใช้ได้จากโปรแกรมในส่วนของ Realtime Embedded Controller ซึ่งมีรายละเอียดการทำงานดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5.3 มาตรฐาน IEEE 1547 – ตรวจสอบแรงดัน



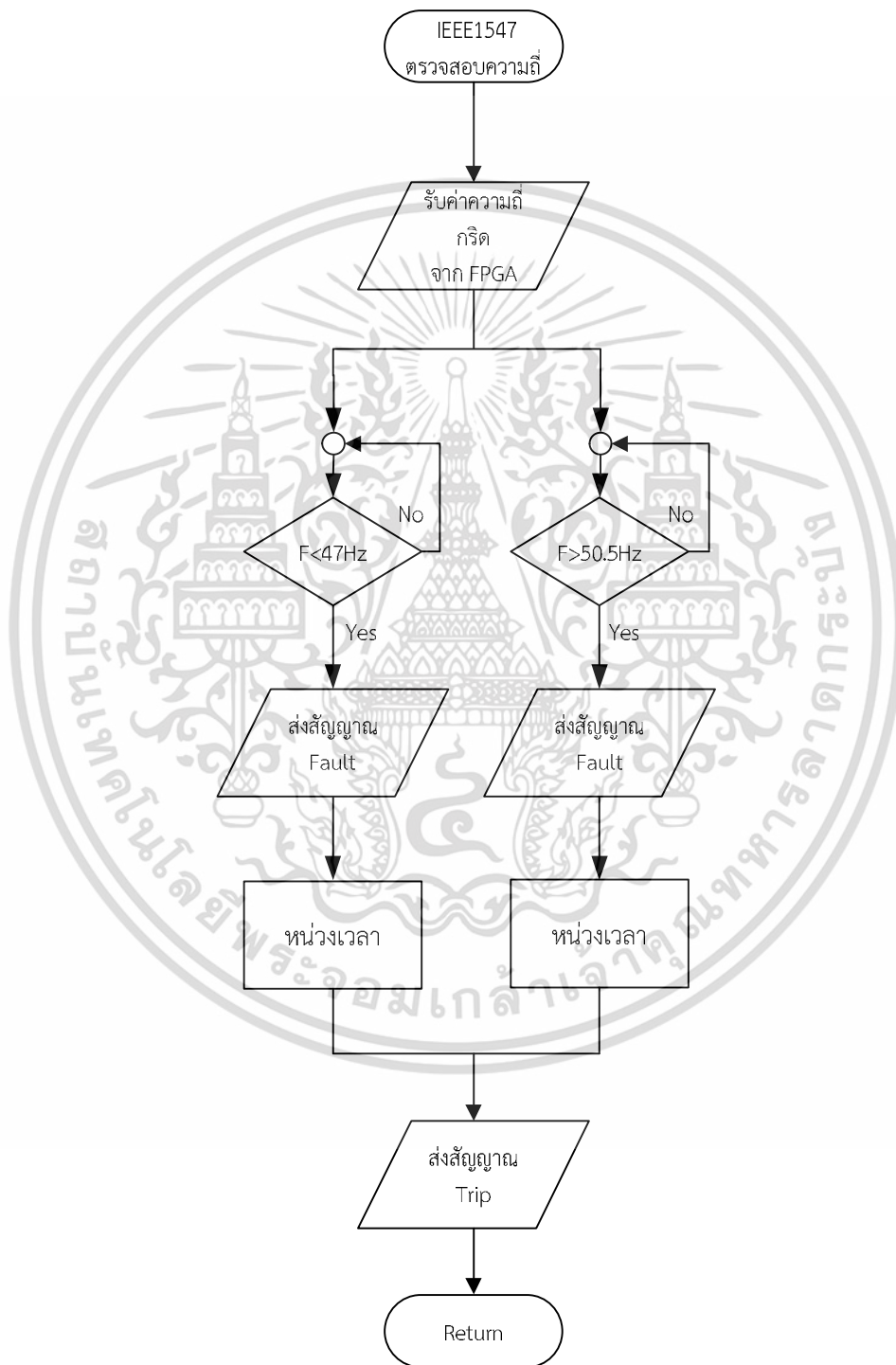
รูปที่ 3.11 โพล์ชาร์ตการตรวจสอบแรงดันที่อ้างอิงจากมาตรฐาน IEEE1547

จากรูปที่ 3.11 เริ่มต้นโปรแกรมส่วนนี้จะรับค่า  $V$  และค่า  $V_{rms}$  แต่ละเฟสของกริด จากนั้นส่งต่อไปยังฟังก์ชันตรวจสอบแรงดันแต่ละระดับ โดย  $V$  จะเป็นตัวตรวจสอบแรงดันผิดปกติในกรณีเกิดแบบ 3 เฟสสมดุล และ  $V_{rms}$  จะเป็นตัวตรวจสอบแรงดันผิดปกติแบบไม่สมดุล หากฟังก์ชันตรวจสอบใดเป็นจริงชุดควบคุมดิจิทัลจะส่งสัญญาณพอลต์จากนั้นจะหน่วงเวลาที่โปรแกรมไว้ และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่งสัญญาณทริปกลับไปยังส่วนโปรแกรมหลักของ Realtime Embedded Controller เพื่อให้สั่งทริปอุปกรณ์ตัดต่อเป็นลำดับต่อไป

### 3.5.4 มาตรฐาน IEEE 1547 - ตรวจสอบความถี่

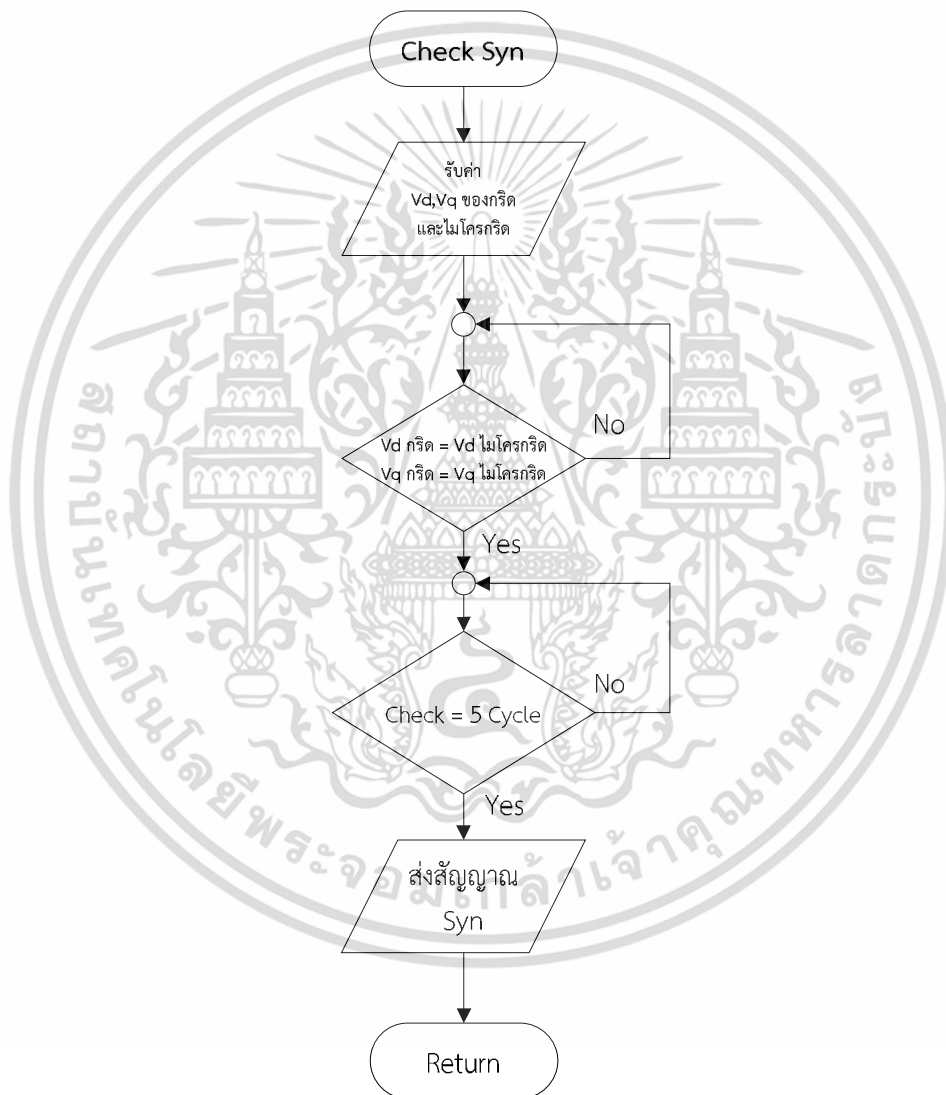


รูปที่ 3.12 โฟลว์ชาร์ตการตรวจสอบความถี่ที่อ้างอิงจากมาตรฐาน IEEE 1547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.12 เริ่มต้นโปรแกรมส่วนนี้จะรับค่าความถี่ของกริดที่ส่งมาจากส่วน FPGA จากนั้นส่งต่อไปยังฟังก์ชันตรวจสอบความถี่แต่ละระดับ หากฟังก์ชันตรวจสอบใดเป็นจริงชุดควบคุมดิจิทัลจะส่งสัญญาณฟลลต์และจะหน่วงเวลาตามที่โปรแกรมไว้ ก่อนจะส่งสัญญาณทริบกลับไปยังส่วนโปรแกรมหลักของ Realtime Embedded Controller เพื่อให้สั่งทริบอุปกรณ์ตัดต่อเป็นลำดับต่อไป

### 3.5.5 มาตรฐาน IEEE 1547 - ตรวจสอบการซิงโครไนซ์



รูปที่ 3.13 โฟลว์ชาร์ตการตรวจสอบการซิงโครไนซ์ที่อ้างอิงจากมาตรฐาน IEEE1547

จากรูปที่ 3.13 เมื่อโปรแกรมเข้าสู่โหมดเตรียมการซิงโครไนซ์ เริ่มต้นจะรับค่า  $V_d$ ,  $V_q$  ของกริดและไมโครกริด จากนั้นเข้าสู่เงื่อนไขตรวจสอบว่าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$V_d$  กริด =  $V_d$  ไมโครกริด และ  $V_q$  กริด =  $V_q$  ไมโครกริด หรือไม่

หากเท่ากันแล้วจะตรวจสอบต่อว่า ค่าทั้งหมดเท่ากันเป็นเวลอย่างน้อย 5 Cycle หรือ 100ms เพื่อให้แน่ใจว่ากริดและไมโครกริดพร้อมซิงโครไนซ์จริง หากเป็นจริงจะส่งสัญญาณ Syn กลับไปยังส่วนโปรแกรมหลักของ Realtime Embedded Controller ให้ทำการสั่งเชื่อมต่อบัสทั้งสองเข้าด้วยกัน

### 3.5.6 ตรวจสอบกำลังไฟฟ้าไหลย้อนกลับ

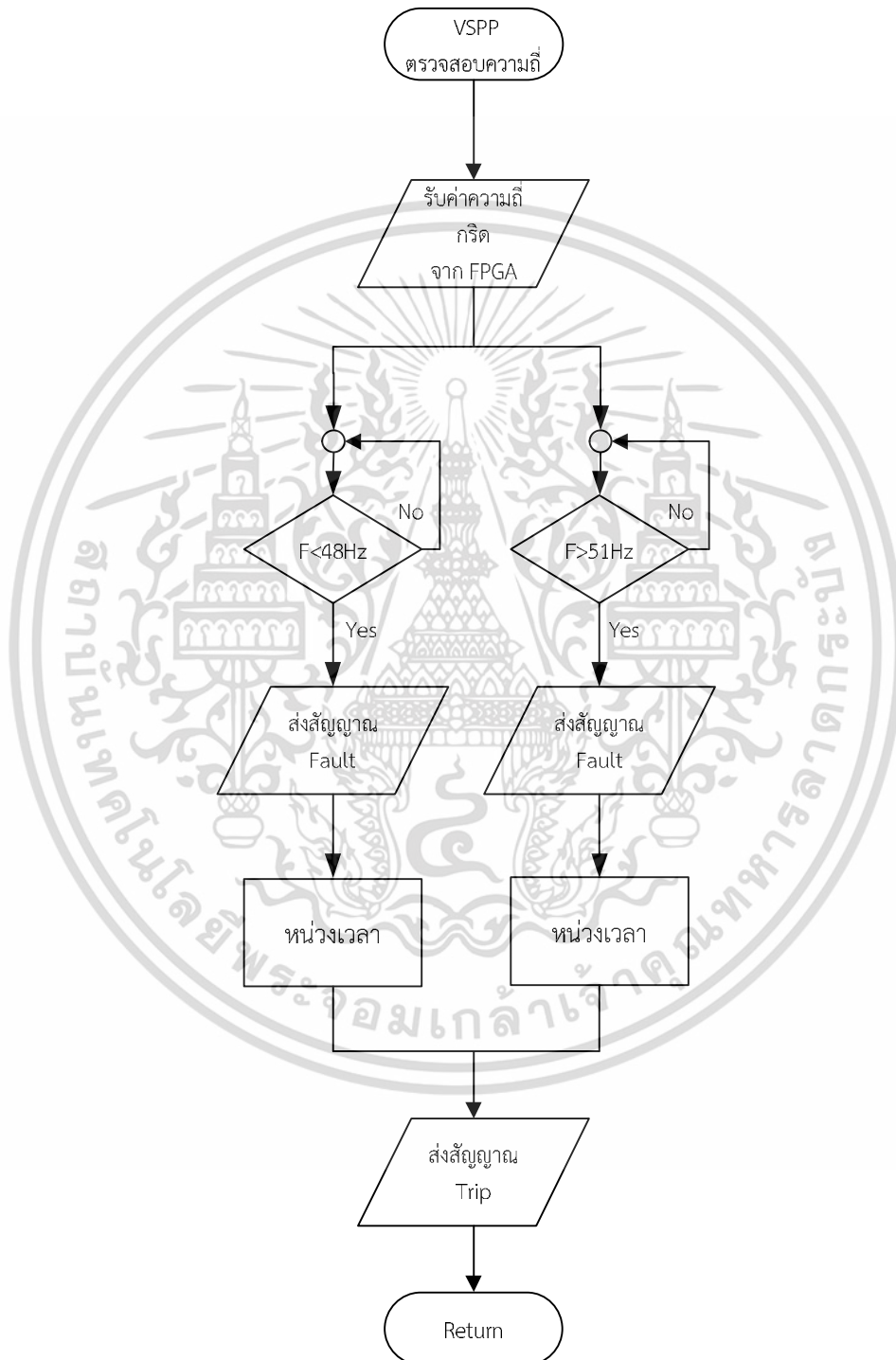


รูปที่ 3.14 โฟลว์ชาร์ตการตรวจสอบกำลังไฟฟ้าไหลย้อนกลับ

จากรูปที่ 3.14 เริ่มต้นโปรแกรมส่วนนี้จะรับค่ากำลังไฟฟ้าที่คำนวณมาจากส่วนโปรแกรมหลัก จากนั้นจะเข้าสู่เงื่อนไขการตรวจสอบกำลังไฟฟ้าไหลกลับ ถ้าค่ากำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้ามามีค่ามากกว่าค่าเซตตั้งและกระแสมีการไหลกลับทิศทาง จากนั้นจะส่งสัญญาณฟอลต์ออกมาและจะเฝ้าระวังค่ากำลังย้อนกลับที่เกินขีดจำกัดที่กำหนดไว้ หากพบค่าเกินขีดจำกัดที่กำหนดไว้จะส่งสัญญาณฟอลต์ออกมาและจะส่งสัญญาณ Trip ออกมาทันที และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน่วงเวลาตามโปรแกรมที่ตั้งไว้ และส่งสัญญาณทริปกลับไปยังส่วนโปรแกรมหลักของ Realtime Embedded Controller ต่อไป

### 3.5.7 ตรวจสอบความถี่ตามมาตรฐาน VSPP

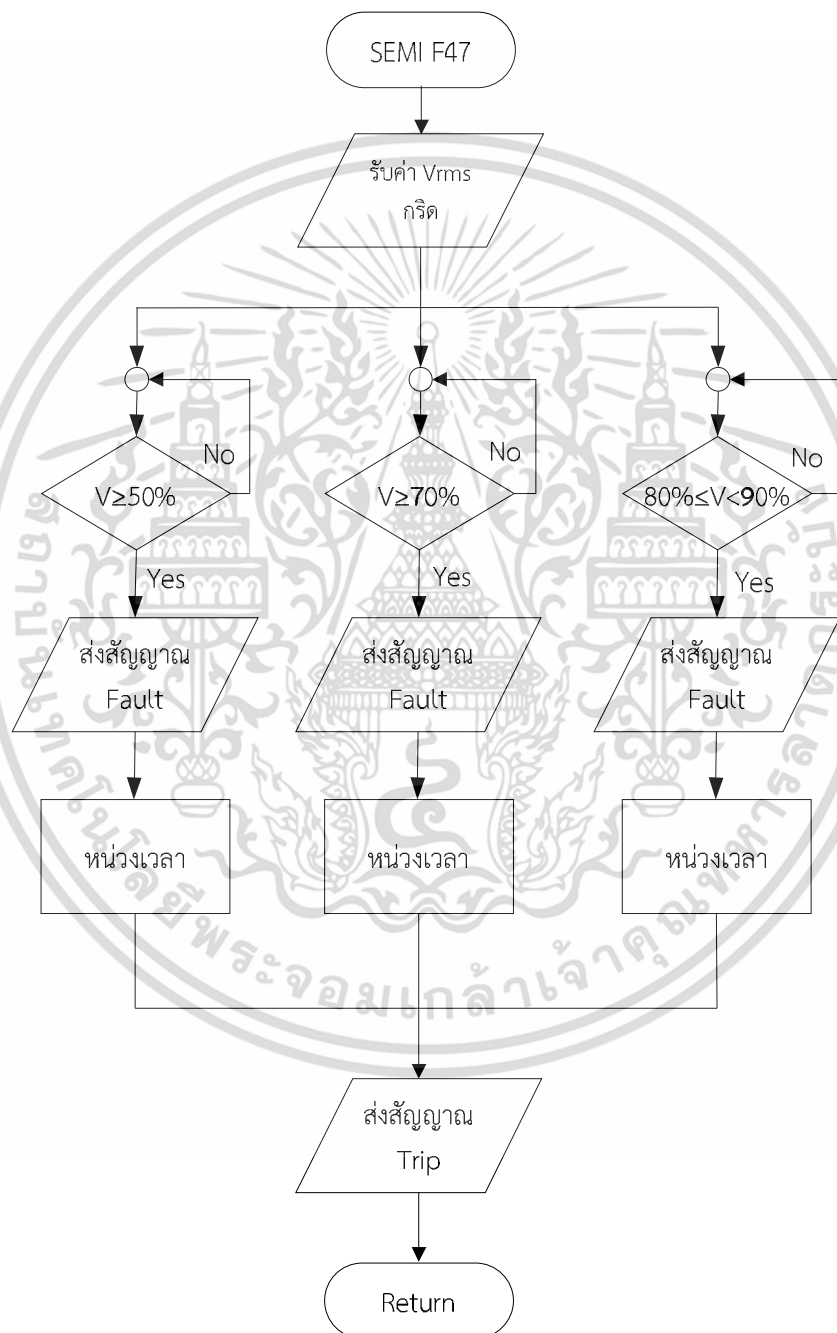


ภาพที่ 3.15 โฟลว์ชาร์ตการตรวจสอบความถี่ที่อ้างอิงจากมาตรฐาน VSPP

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.15 เริ่มต้นโปรแกรมส่วนนี้จะรับค่าความถี่ของกริดที่ส่งมาจากส่วน FPGA จากนั้นส่งต่อไปยังฟังก์ชันตรวจสอบความถี่แต่ละระดับ หากฟังก์ชันตรวจสอบใดเป็นจริงชุดควบคุมดิจิทัล ส่งสัญญาณฟอลต์และจะหน่วงเวลาตามที่โปรแกรมไว้ ก่อนจะส่งสัญญาณทริปกลับไปยังส่วนโปรแกรมหลักของ Realtime Embedded Controller เพื่อให้สิ่งทริปอุปกรณ์ตัดต่อเป็นลำดับต่อไป

### 3.5.8 มาตรฐาน SEMI – F47

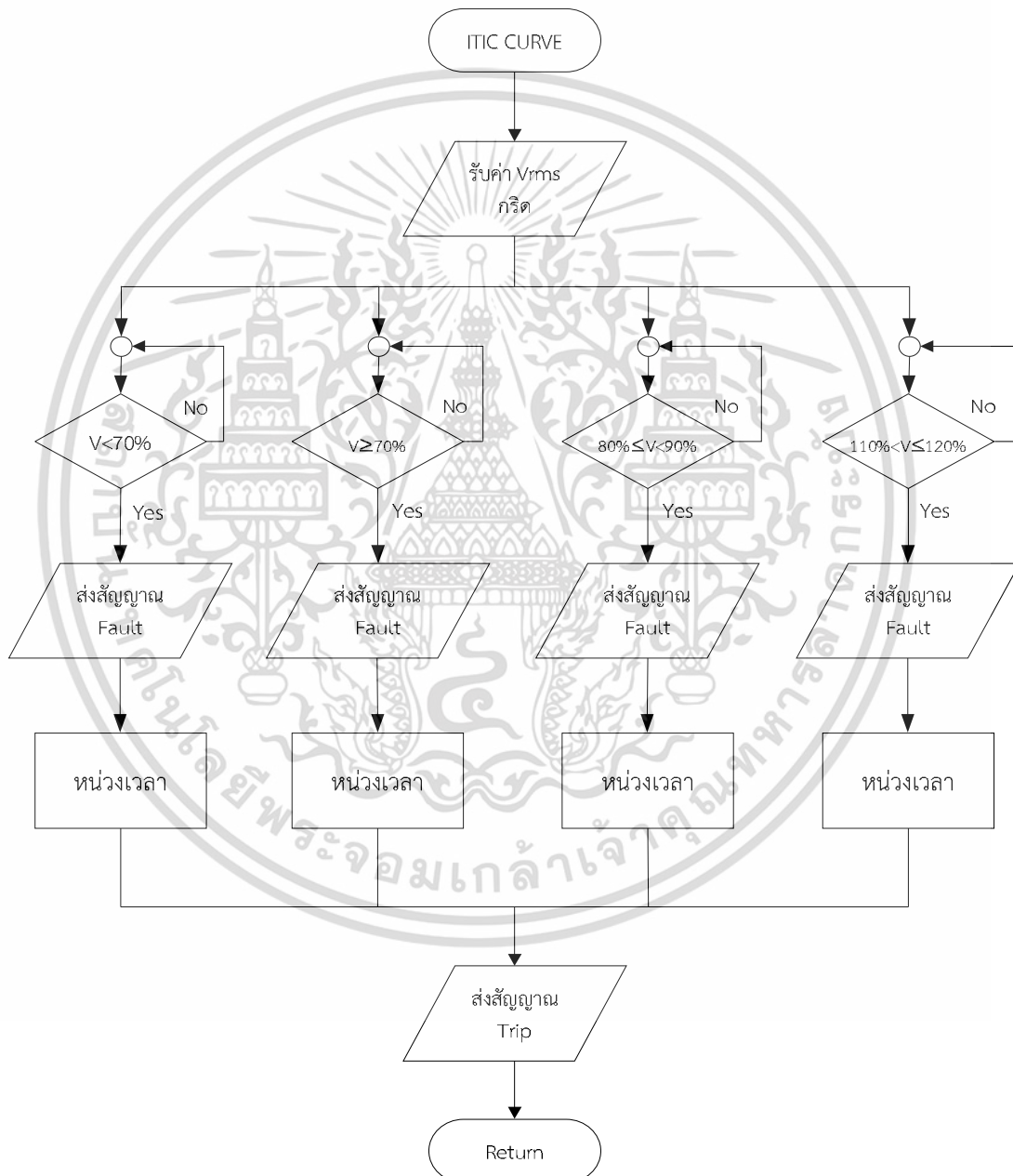


ภาพที่ 3.16 โพล์ชาร์ตการตรวจสอบแรงดันตกที่อ้างอิงจากมาตรฐาน SEMI F-47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.16 เริ่มต้นโปรแกรมจะรับค่า  $V_{rms}$  แต่ละเฟสของกริด จากนั้นส่งต่อไปยังฟังก์ชันตรวจสอบแรงดันแต่ละระดับ โดย  $V_{rms}$  จะเป็นตัวตรวจสอบแรงดันผิดปกติแบบไม่สมดุล หากฟังก์ชันตรวจสอบใดเป็นจริงชุดควบคุมดิจิทัลจะส่งสัญญาณฟอลต์ จากนั้นจะหน่วงเวลาที่โปรแกรมไว้ และส่งสัญญาณทริป กลับไปยังส่วนโปรแกรมหลักของ Realtime Embedded Controller เพื่อให้สั่งทริปอุปกรณ์ตัดต่อเป็นลำดับต่อไป

### 3.5.9 เส้นโค้ง ITIC

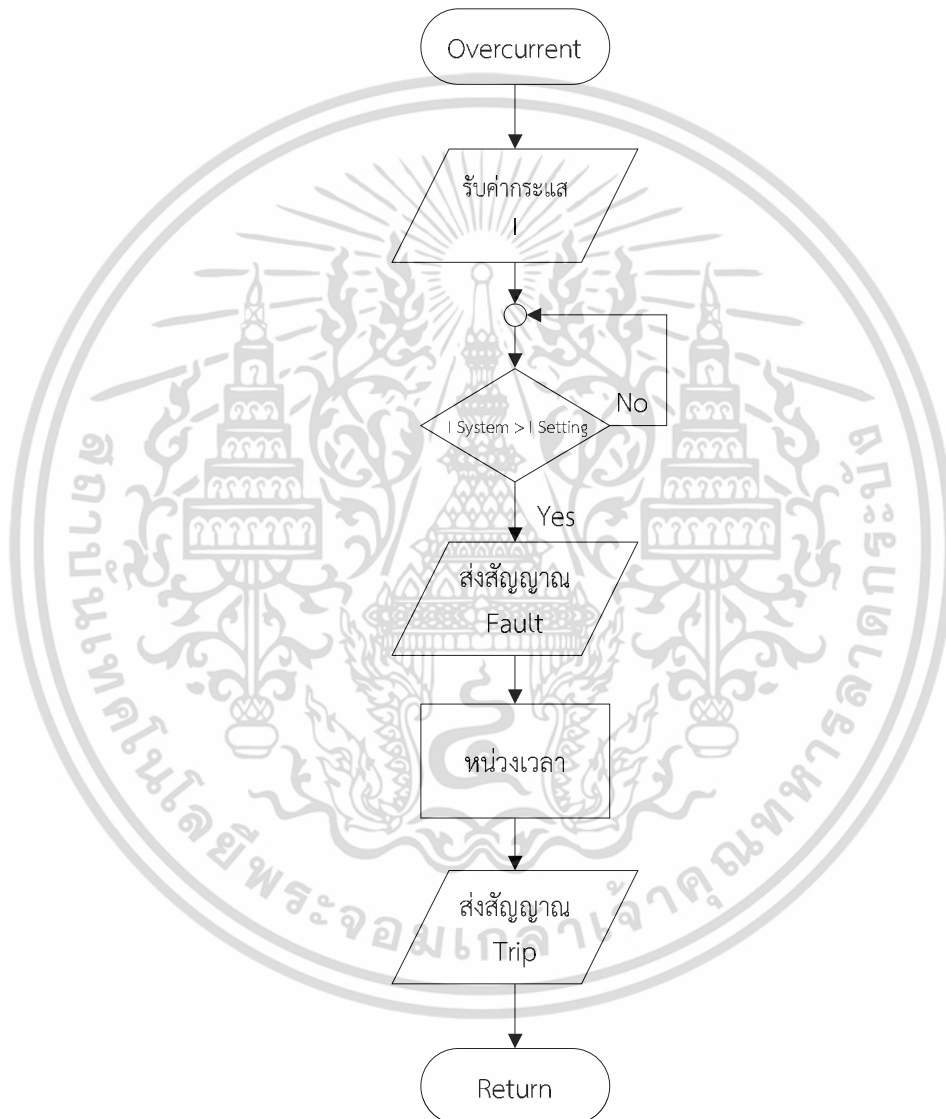


รูปที่ 3.17 โพลีชาร์ตการตรวจจับแรงดันที่อ้างอิงจากมาตรฐานเส้นโค้ง ITIC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.17 เริ่มต้นโปรแกรมส่วนนี้จะรับค่า  $V_{rms}$  แต่ละเฟสของกริด จากนั้นส่งต่อไปยังฟังก์ชันตรวจสอบแรงดันแต่ละระดับ โดย  $V_{rms}$  จะเป็นตัวตรวจสอบแรงดันผิดปกติแบบไม่สมดุล หากฟังก์ชันตรวจสอบใดเป็นจริงชุดควบคุมดิจิทัลจะส่งสัญญาณฟอลต์จากนั้นจะหน่วงเวลาที่โปรแกรมไว้และส่งสัญญาณทริปกลับไปยังส่วนโปรแกรมหลักของ Realtime Embedded Controller เพื่อให้สั่งทริปอุปกรณ์ตัดต่อเป็นลำดับต่อไป

### 3.5.10 ตรวจสอบกระแสเกิน



รูปที่ 3.18 โฟลว์ชาร์ตการตรวจสอบกระแสเกิน

จากรูปที่ 3.18 เริ่มต้นโปรแกรมส่วนนี้จะรับค่า  $I$  ซึ่งเป็นขนาดของกระแส ณ เวลาใด ๆ ที่ไหลผ่านอุปกรณ์ตัดต่อ จากนั้นส่งต่อไปยังฟังก์ชันตรวจสอบกระแสเกิน โดยฟังก์ชันนี้จะตรวจสอบว่าค่า  $I$  ที่ตรวจจับเข้ามามีค่ามากกว่าที่โปรแกรมตั้งไว้หรือไม่ ถ้ามีค่ามากกว่าจะส่งสัญญาณฟอลต์และจะหน่วงเวลาตามที่ตั้งไว้ ซึ่งจะมีการหน่วงเวลาอยู่ 2 แบบ คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การเขียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

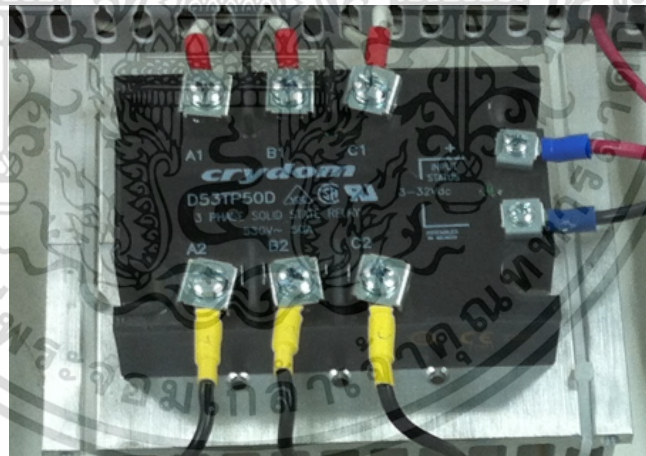
- 1) แบบทำงานทันทีไม่ต้องมีหน่วงเวลา
- 2) แบบเวลาผกผัน โดยขึ้นอยู่กับผู้ใช้งานว่าต้องการจะเลือกผกผันตามการใช้งาน เช่น Long Inverse Time, Standard Inverse Time, Very Inverse Time และ Extremely Inverse Time

จากนั้นเมื่อหน่วงเวลาตามลักษณะการใช้งานที่เลือกแล้ว จะส่งสัญญาณทริกลับไปยังส่วนโปรแกรมหลักของ Realtime Embedded Controller เพื่อให้สั่งทริอุปกรณ์ตัดต่อเป็นลำดับต่อไป

### 3.6 การออกแบบด้านฮาร์ดแวร์

#### 3.6.1 อุปกรณ์ตัดต่อชนิดโซลิดสเตท

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้อุปกรณ์ตัดต่อเป็นเซอร์กิตเบรกเกอร์ชนิดโซลิดสเตท ของบริษัท Crydom มีรายละเอียดดังนี้คือ เป็นชนิด 3 เฟส, แรงดันใช้งานในช่วง 48-530 โวลต์, กระแส 50 แอมป์, ควบคุมการตัดต่อโดยป้อนแรงดันดีซี 3-32 โวลต์, มีความเร็วในการตัดต่อที่ 10 ms ซึ่งอุปกรณ์ตัดต่อนี้แสดงดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 เซอร์กิตเบรกเกอร์ชนิดโซลิดสเตท ของบริษัท Crydom

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.6.2 วงจรตรวจจับแรงดัน

วงจรตรวจจับแรงดันจะทำหน้าที่รับสัญญาณอินพุตจากไฟ 3 เฟสของกริดและไมโครกริด โดยวงจรจะวัดแรงดันผ่านทางหม้อแปลงเพื่อลดระดับแรงดันลงมา จากนั้นจะถูกปรับระดับแรงดันให้เหมาะสมกับโมดูลอนาล็อกอินพุต

ซึ่งพอร์ทโมดูลอนาล็อกอินพุตนั้นสามารถรับแรงดันได้ในช่วงแรงดัน  $-10\text{ V}$  ถึง  $+10\text{ V}$  ดังนั้นค่าแรงดันเฟสที่วัดได้จากหม้อแปลง  $9\text{ V}_{\text{rms}}$  นั้น ปรากฏว่าเป็นแรงดันที่มีค่าเกิน  $10\text{ V}$  จึงต้องลดทอนสัญญาณแรงดันให้อยู่ในย่านที่อุปกรณ์สามารถรับได้โดยใช้อปแอมป์เข้ามาช่วยโดยต่อเป็นวงจรขยายผลต่างดังนี้

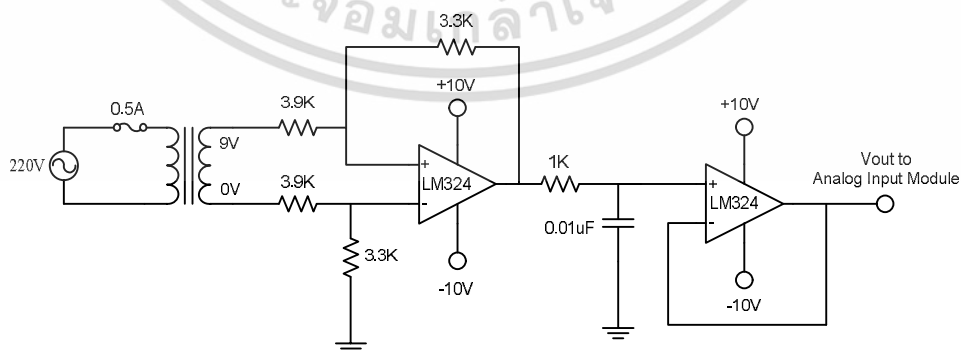
วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส (Inverter Amplifier) จะได้สมการ ดังนี้

$$V_o = -\frac{R_2}{R_1}(V_1 - V_2) \quad (3.1)$$

จากการออกแบบจะได้แรงดันขาออกเท่ากับ

$$V_o = -\frac{3.3k}{3.9k}(9 - 0) = -7.6V_{\text{max}}$$

แรงดันเอาต์พุตสูงสุดที่ออกจากหม้อแปลงปกติคือ  $310V_{\text{max}}$  โดยค่านั้นจะเป็นแรงดันสูงสุดที่จ่ายให้กับ  $V_2$  ของวงจรขยายผลต่าง แต่ในการใช้งานจริงจะเผื่อแรงดันเอาไว้ที่  $1.5$  เท่าของแรงดันปกติ เพราะฉะนั้นค่าแรงดันสูงสุดที่จ่ายให้หม้อแปลงคือ  $465V_{\text{max}}$  เมื่อผ่านวงจรขยายผลต่าง สัญญาณจะถูกปรับระดับแรงดันเหลือ  $7.6V_{\text{max}}$  หรือ  $-7.6\text{ V}$  ถึง  $+7.6\text{ V}$  และกลับเฟส ซึ่งสัญญาณที่ได้นี้ จะเป็นสัญญาณด้านขาเข้าให้กับ Real time Controller ที่มีพอร์ทอินพุตที่สามารถรับแรงดันได้ในช่วงแรงดัน  $-10\text{ V}$  ถึง  $+10\text{ V}$  ดังนั้นแรงดันด้านขาเข้าที่ป้อนให้โมดูลอนาล็อกอินพุตอยู่ในย่านที่อุปกรณ์สามารถรับได้ โดยวงจรแสดงดังรูปที่ 3.20



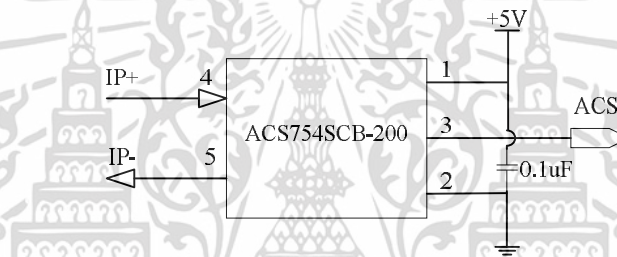
รูปที่ 3.20 วงจรวัดแรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

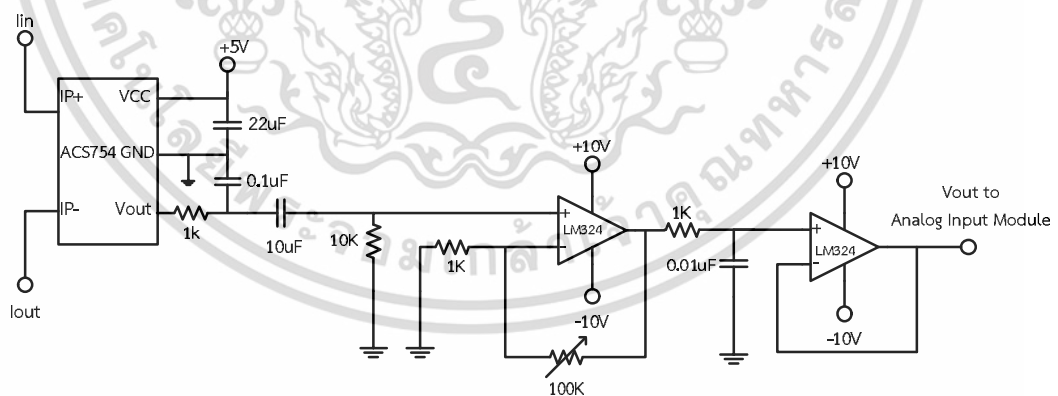
### 3.6.3 วงจรตรวจจับกระแส

วงจรวัดกระแสที่ใช้นั้นได้ใช้ตัววัดกระแสของบริษัท Allegro เบอร์ ACS754SCB-200 ขนาดพิกัด 200 แอมแปร์ ซึ่งในการทำงานต้องใช้แหล่งจ่ายขนาด +5 โวลต์ และแรงดันเอาต์พุตขณะที่ไม่มีกระแสไหลจะอยู่ที่  $VCC/2$  หรือเท่ากับ 2.5 โวลต์ และมีอัตราส่วนของกระแสอินพุตกับแรงดันเอาต์พุตหรือความไว (Sensitivity) ในการวัดกระแสเท่ากับ 10 mV/A วงจรของตัววัดกระแสดังแสดงในรูปที่ 3.21

เนื่องจาก Analog Input Module รับสัญญาณแรงดันได้ในช่วง  $\pm 10$  โวลต์ ดังนั้นจึงต้องสร้าง วงจรลดทอนแรงดันเพื่อจะตัดแรงดัน 2.5 โวลต์ดีซีที่มาจากตัววัดกระแส เพื่อให้เหลือแค่สัญญาณเอซีเท่านั้นและขยายสัญญาณขึ้นโดยใช้วงจรขยายสัญญาณ ดังแสดงในรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.21 ตัววัดกระแสเบอร์ ACS754SCB-200

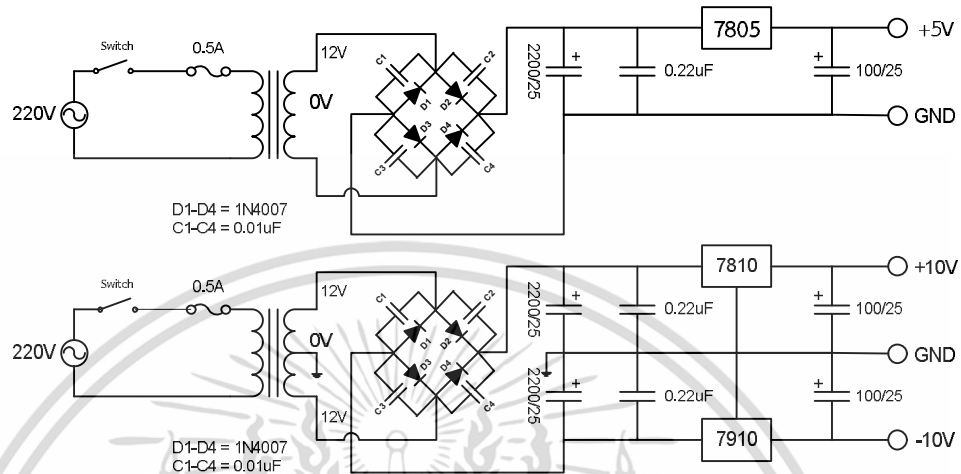


รูปที่ 3.22 วงจรวัดกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.6.4 วงจรไฟเลี้ยง

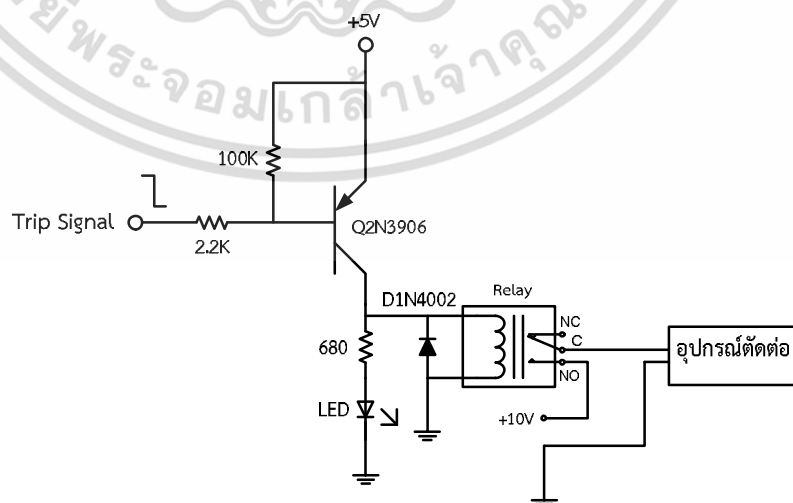
ในส่วนของวงจรไฟเลี้ยงจะจ่ายให้แก่วงจรวัดแรงดัน, วงจรวัดกระแส และวงจรทริป โดยใช้แรงดัน  $\pm 10$  โวลต์ดีซีและ 5 โวลต์ดีซี โดยวงจรที่ใช้แสดงดังรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.23 วงจรไฟเลี้ยง

### 3.6.5 วงจรทริป

วงจรทริปจะทำหน้าที่รับสัญญาณทริปที่ส่งออกมาจากชุดควบคุมดิจิทัลผ่านทางโมดูลดิจิทัลเอาต์พุต เพื่อสั่งให้อุปกรณ์ตัดต่อทำงาน โดยการทำงานของวงจรคือ ถ้ามีสัญญาณทริปส่งออกมาเป็นลอจิก “1” (แรงดัน 5Vdc) ชุดวงจรทริปจะสั่งให้อุปกรณ์ตัดต่อทำงานปิดวงจร (กริดและไมโครกริดเชื่อมต่อกัน) ถ้าสัญญาณทริปส่งออกมาเป็นลอจิก “0” (แรงดัน 0Vdc) อุปกรณ์ตัดต่อจะเปิดวงจร (กริดและไมโครกริดปลดออกจากกัน) วงจรที่ใช้แสดงดังรูปที่ 3.24

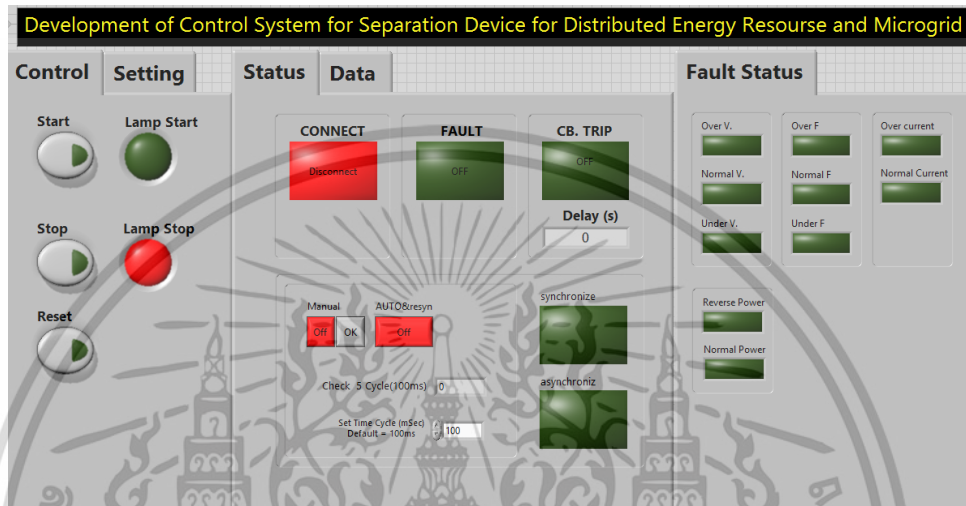


รูปที่ 3.24 วงจรทริป

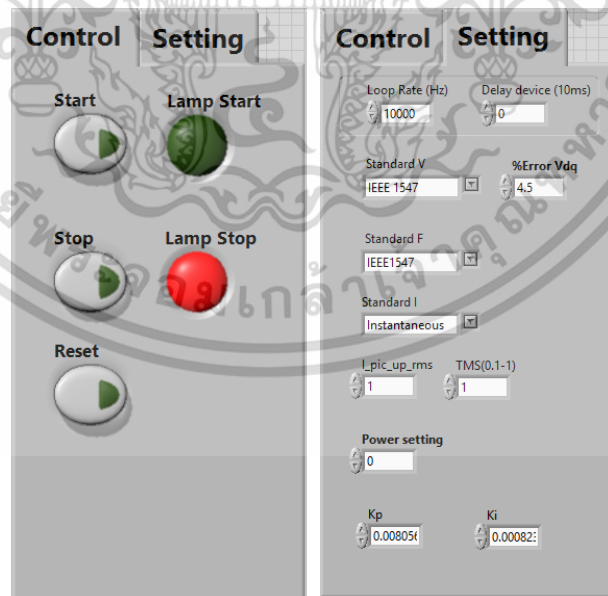
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.7 ส่วนคอมพิวเตอร์โฮสต์สำหรับติดต่อผู้ใช้งานกับชุดควบคุมดิจิทัล

ผู้ใช้งานสามารถติดต่อกับชุดควบคุมดิจิทัลโดยใช้คอมพิวเตอร์โฮสต์ที่มีโปรแกรม LabVIEW เชื่อมต่อกันผ่านทาง Ethernet Lan โดยโปรแกรมนี้จะทำหน้าที่รันโปรแกรมส่วน FPGA และส่วน Realtime Embedded Controller อีกทั้งมีหน้าต่างอินเตอร์เฟสให้ผู้ใช้งานตั้งค่าของระบบควบคุม แสดงดังรูปที่ 3.25



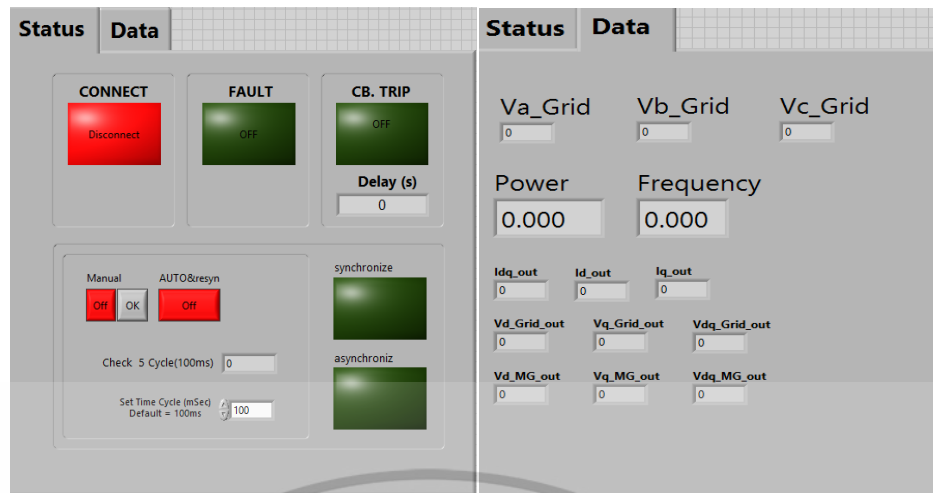
รูปที่ 3.25 หน้าต่างแสดงผลสำหรับผู้ใช้งานติดต่อกับชุดควบคุมดิจิทัล



รูปที่ 3.26 หน้าต่างแสดงผลในส่วนการสั่งงาน Start, Stop, Reset และส่วนการตั้งค่ามาตรฐาน

#### ตรวจจับฟอลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.27 หน้าต่างแสดงสถานะของอุปกรณ์ติดต่อและหน้าต่างแสดงค่าของกริด



รูปที่ 3.28 หน้าต่างแสดงสถานะการตรวจจับฟอลต์

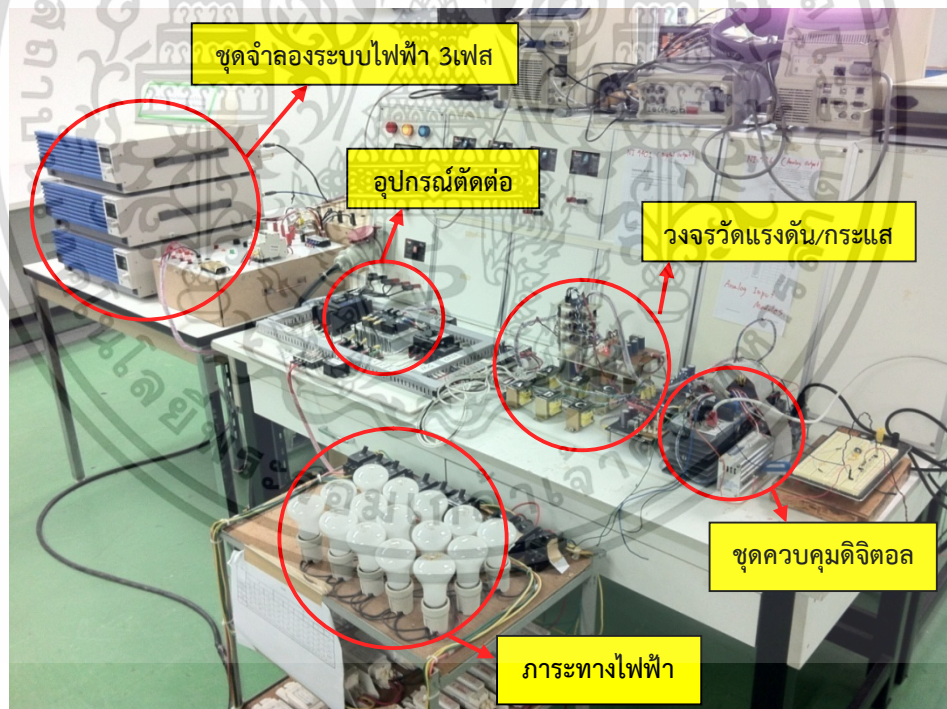
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

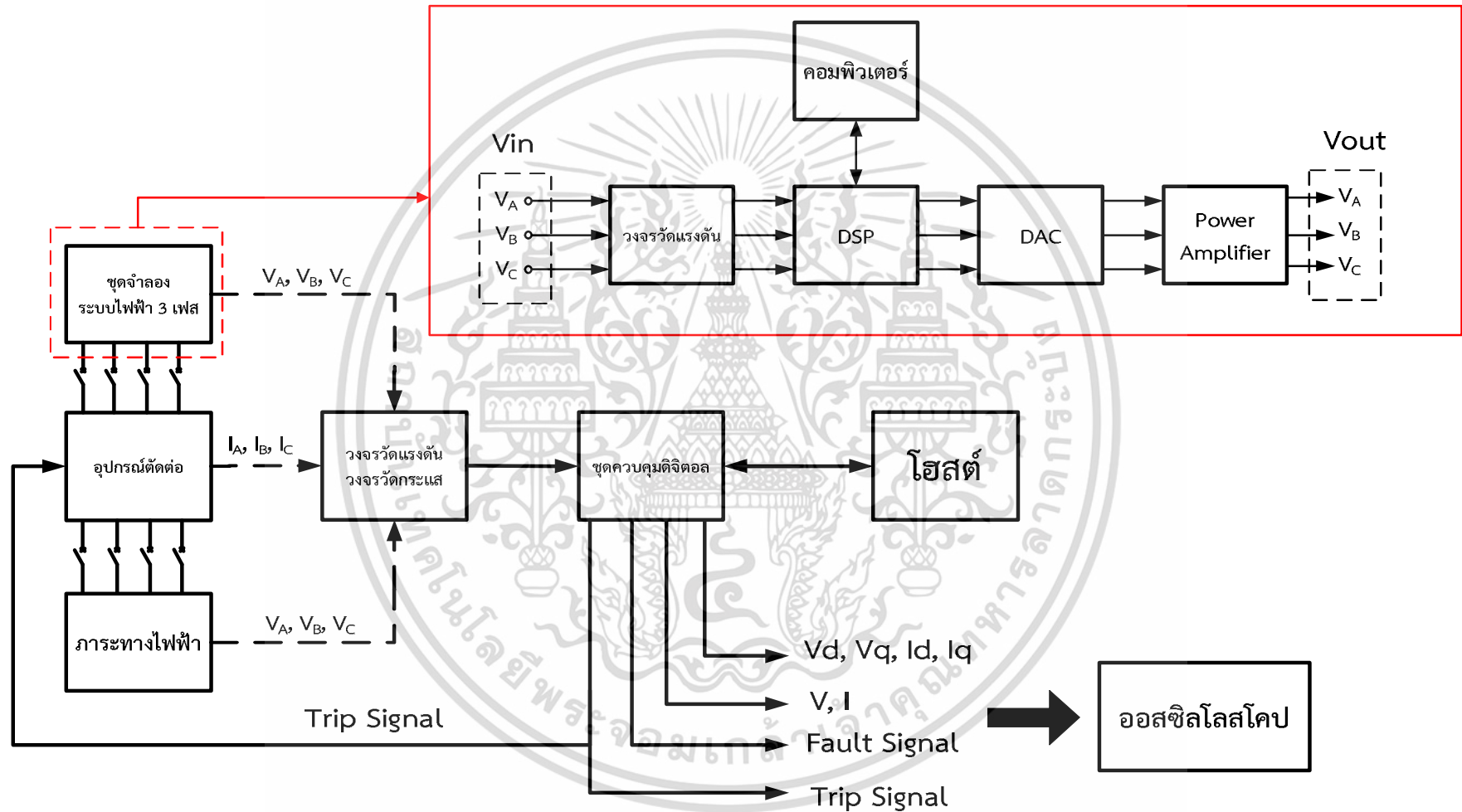
#### 4.1 การเตรียมการทดลองและอุปกรณ์ในการทดลอง

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองประกอบไปด้วย ชุดจำลองระบบไฟฟ้า 3 เฟส, อุปกรณ์ตัดต่อ ชุดควบคุมดิจิทัล, วงจรตรวจจับแรงดันและกระแส, ภาระทางไฟฟ้า, โฮสต์ (Host) ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ในการทดสอบชุดจำลองระบบไฟฟ้า 3 เฟสทำหน้าที่จ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับภาระทางไฟฟ้าผ่านอุปกรณ์ตัดต่อ จากนั้นชุดจำลองระบบไฟฟ้า 3 เฟสจะจำลองการเกิดฟอลต์ตามมาตรฐานที่ต้องการทดสอบ โดยค่าแรงดันและกระแสในระบบถูกวัดโดยวงจรวัดกระแสและวงจรวัดแรงดัน ค่าที่ได้จาก 2 วงจรนี้ส่งไปยังชุดควบคุมดิจิทัล เพื่อทำการตรวจจับฟอลต์ที่เกิดขึ้น และส่งสัญญาณทริปไปยังอุปกรณ์ตัดต่อ โดยเวลาในการทริปต้องเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด โดยค่าที่คำนวณจากชุดควบคุมดิจิทัลถูกส่งออกมาวัดแสดงค่าโดยใช้ออสซิลโลสโคป เพื่อตรวจสอบการทำงานว่าเป็นไปตามที่โปรแกรมไว้หรือไม่ แผนผังการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 แผนผังการทดลอง

จากรูปที่ 4.2 การทำงานของชุดจำลองระบบไฟฟ้า 3 เฟส คือ เริ่มต้นวงจรวัดแรงดันจะรับสัญญาณแรงดันไฟฟ้า  $V_A$ ,  $V_B$ ,  $V_C$  จากกริดหลัก ค่าที่ได้จากวงจรวัดแรงดันจะถูกปรับทอนและยกระดับแรงดันเพื่อป้อนสัญญาณต่อไปยังหน่วยประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DSP) ในส่วนนี้ DSP ทำหน้าที่คำนวณผลในส่วนของเฟสล็อกและทำการจำลองสัญญาณทางไฟฟ้าต่างๆ สัญญาณที่ออกจาก DSP ถูกส่งออกไปยัง DAC ที่ทำหน้าที่แปลงสัญญาณดิจิทัลที่คำนวณจาก DSP แปลงเป็นสัญญาณอนาล็อก โดยสัญญาณที่ออกจาก DAC เป็นสัญญาณแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสที่มีความถี่เดียวกับกริดหลักและมีขนาดสูงสุดที่ 10 โวลต์ จากนั้นสัญญาณถูกส่งต่อไปยังชุดขยายสัญญาณ (Power Amplifier) ที่ทำหน้าที่ขยายสัญญาณ 3 เฟสให้มีขนาดสูงสุดแต่ละเฟสที่ 270 โวลต์ โดย DSP จะถูกควบคุมจากคอมพิวเตอร์ที่ทำหน้าที่โปรแกรมการจำลองสัญญาณทางไฟฟ้าที่ต้องการเช่น ควบคุมระดับแรงดันของแต่ละเฟส, ควบคุมความถี่ เป็นต้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าพิกัดต่างๆของอุปกรณ์ทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.1 และรายการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.2

**ตารางที่ 4.1** ค่าพิกัดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

ชุดจำลองระบบไฟฟ้า 3 เฟส	แรงดันไฟฟ้า	0-270 V
	กระแสไฟฟ้า	8 A
	ความถี่	40-60 Hz
ภาระทางไฟฟ้าแบบตัวต้านทาน	โหลดไฟ 15 หลอด/100 W (3 เฟสต่อแบบ Y)	

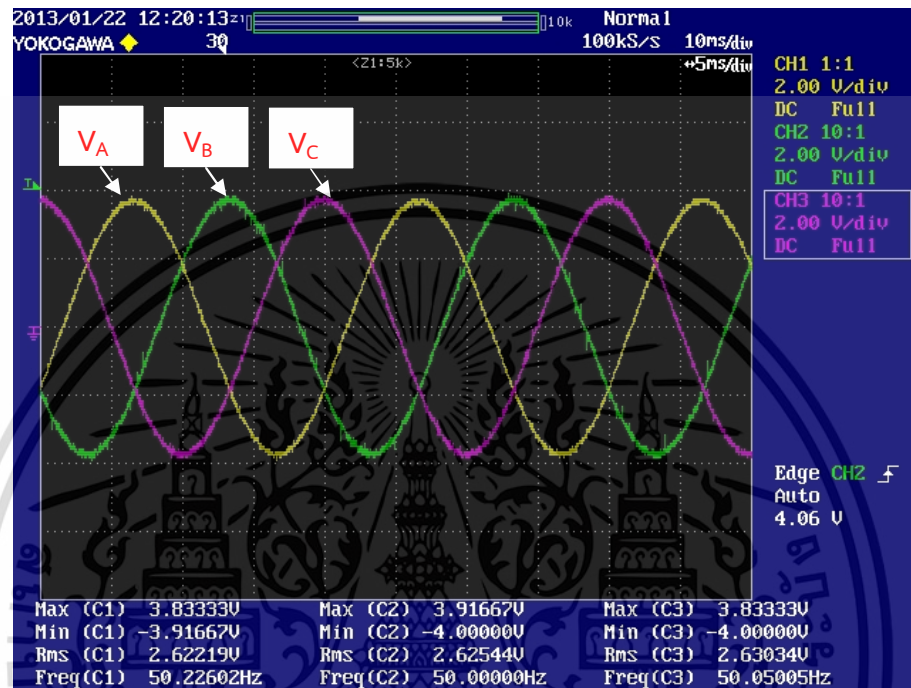
**ตารางที่ 4.2** รายการทดลอง

มาตรฐาน	รายการทดลอง
IEEE 1547	ตรวจสอบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำ
	ตรวจสอบความถี่สูง/ความถี่ต่ำ
	ตรวจสอบการซิงโครไนซ์
Reverse Power	ตรวจสอบกำลังไฟฟ้าไหลกลับ
Overcurrent	ตรวจสอบกระแสเกินแบบทำงานทันที
	ตรวจสอบกระแสเกินแบบเวลาผกผันมาก (Very Inverse)
SEMI F47	ตรวจสอบแรงดันตกชั่วขณะแบบ 3 เฟสสมดุล
	ตรวจสอบแรงดันตกชั่วขณะแบบ 3 เฟสไม่สมดุล
	ตรวจสอบแรงดันตกชั่วขณะแบบ เฟส - เฟส
ITIC Curve	ตรวจสอบแรงดันตกชั่วขณะแบบ 3 เฟสไม่สมดุล
VSPP	ตรวจสอบความถี่สูง/ความถี่ต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

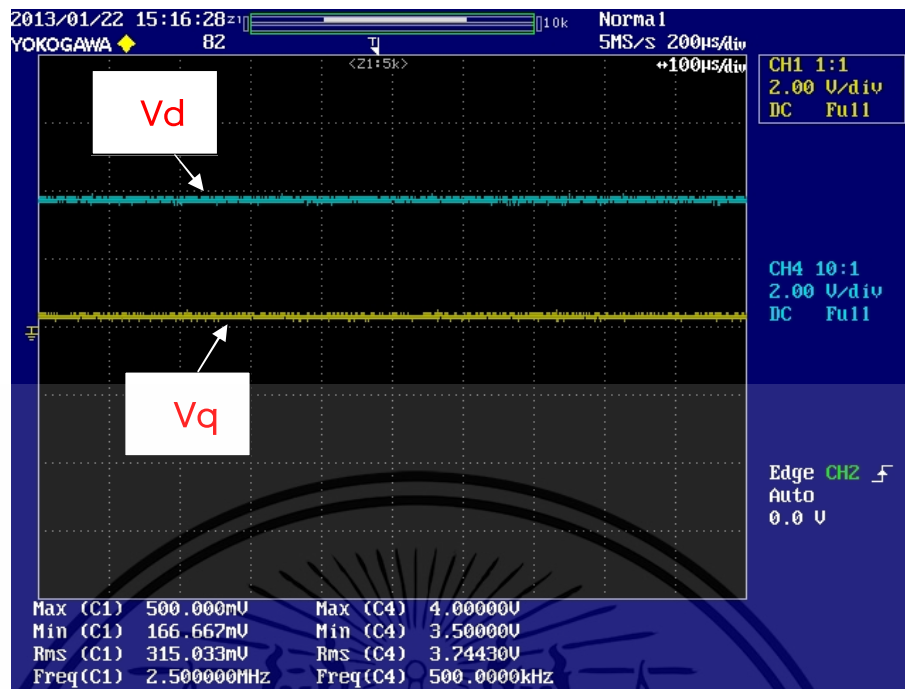
## 4.2 ตัวอย่างสัญญาณที่ได้จากชุดควบคุมดิจิทัล

สัญญาณที่จะแสดงต่อไปนี้เป็นตัวอย่างสัญญาณที่ได้จากการประมวลผลของชุดควบคุมดิจิทัล โดยจะส่งสัญญาณผ่านทางโมดูลอนาล็อกเอาต์พุตและโมดูลดิจิทัลเอาต์พุต และวัดสัญญาณที่ได้โดยใช้ออสซิลโลสโคปแสดงดังรูปที่ 4.3 - 4.6

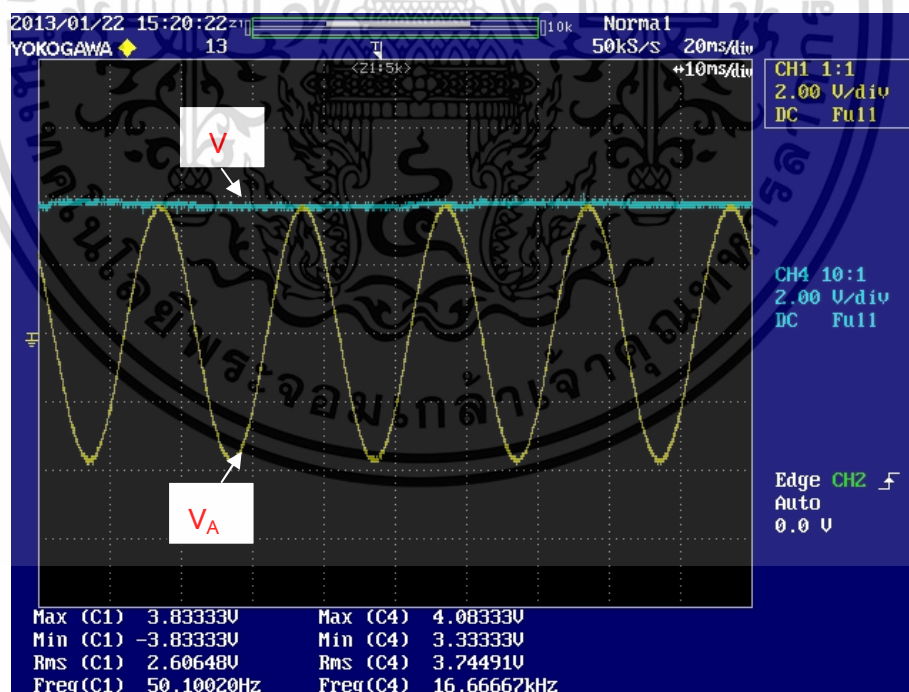


รูปที่ 4.3 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าจากวงจรวัดแรงดัน

จากรูปที่ 4.3 สัญญาณแรงดันไฟฟ้า  $V_A$  (เส้นสีเหลือง),  $V_B$  (เส้นสีเขียว) และ  $V_C$  (เส้นสีชมพู) จากวงจรวัดแรงดันที่จะส่งไปยังโมดูลอนาล็อกอินพุต

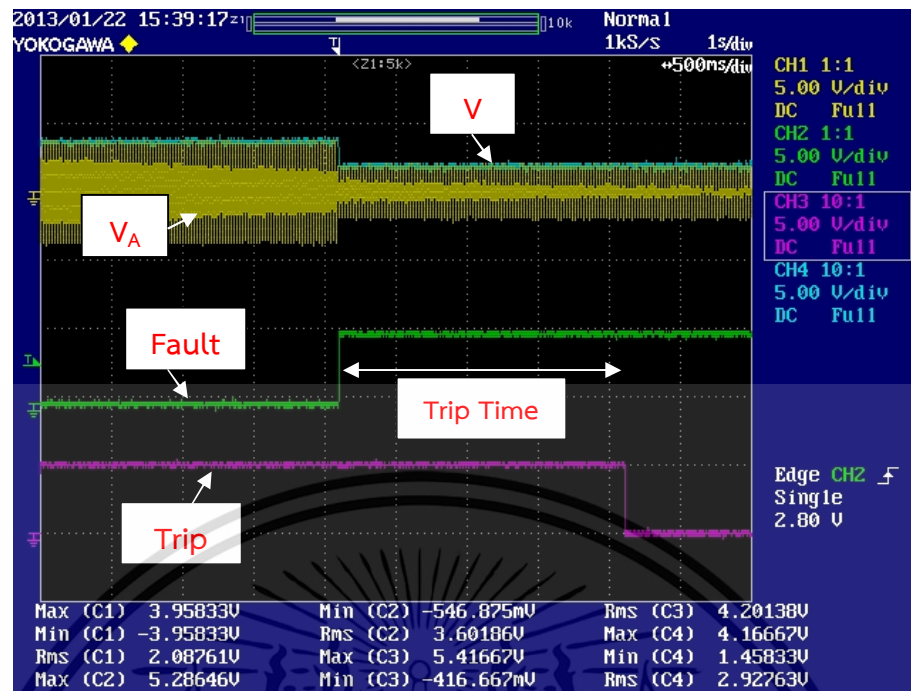


รูปที่ 4.4 สัญญาณของแรงดัน  $V_d$ ,  $V_q$  จากการแปลงกรอบอ้างอิงซิงโครนัสของระบบไฟฟ้าในสภาวะคงตัว



รูปที่ 4.5 สัญญาณแรงดันไฟฟ้า  $V_A$  (เส้นสีเหลือง) เทียบกับขนาดของแรงดันไฟฟ้า ณ เวลาใดๆ (เส้นสีฟ้า)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 สัญญาณแรงดันไฟฟ้า  $V_A$  เมื่อเกิดแรงดันตก

จากรูปที่ 4.6 สัญญาณแรงดันไฟฟ้า  $V_A$  เมื่อเกิดแรงดันตก (เส้นสีเหลือง) เทียบกับขนาดของแรงดันไฟฟ้า ณ เวลาใดๆ (เส้นสีฟ้า), สัญญาณฟอลต์ (เส้นสีเขียว), สัญญาณทริป (เส้นสีชมพู)

#### 4.3 ผลการทดลองมาตรฐาน IEEE 1547

ในมาตรฐานนี้จะมีการทดลองตรวจสอบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำ, ความถี่เกิน/ความถี่ต่ำ และตรวจสอบการซิงโครไนซ์ โดยวิธีการทดลองจะอ้างอิงกับมาตรฐาน IEEE1547.1 [16] ซึ่งเป็นมาตรฐานสำหรับกำหนดขั้นตอนการทดสอบอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เชื่อมต่อ DG เข้ากับระบบไฟฟ้า มีการทดสอบ 2 ส่วนคือ

##### 1) Magnitude Test

เป็นการทดสอบหาค่าขนาดแรงดันหรือความถี่ ณ จุดที่ตั้งค่าไว้แต่ระดับที่ทดสอบ เพื่อดูว่าชุดควบคุมดิจิทัลสามารถสั่งทริป ณ จุดที่ตั้งค่าไว้ได้หรือไม่ เช่น ถ้าแรงดันระดับปกติที่ 220 โวลต์ เมื่อค่อยๆ เพิ่มระดับแรงดันไปจนถึง 242 โวลต์ (จุดที่ตั้งค่าไว้ 110 % จากระดับปกติ) ชุดควบคุมดิจิทัลต้องตรวจจับขนาดแรงดันที่จุดนี้ได้และสั่งทริป โดยจะพิจารณาผลการทดลองจากค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนหาได้จากสมการ (4.1)

$$\%Error = \frac{|X_t - X_m|}{X_t} \times 100\% \quad (4.1)$$

เมื่อ  $X_t$  คือ ค่าจริง (Magnitude setting ของชุดควบคุมดิจิทัลที่ตั้งไว้)

$X_m$  คือ ค่าที่วัดได้ (Magnitude Trip จากการทดลองที่ชุดควบคุมดิจิทัลตรวจจับได้)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ล้าสมัยที่ควรหลีกเลี่ยงในการใช้งาน เมื่อผู้เขียนได้ทราบถึงข้อผิดพลาดในการคำนวณค่าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2) Time Test

เป็นการทดสอบชุดควบคุมดิจิทัลเมื่อแรงดันหรือความถี่เกิดความผิดปกติขึ้น ณ ระดับที่ทำการทดสอบ ชุดควบคุมดิจิทัลต้องสามารถตรวจจับความผิดปกตินั้นได้ และหน่วงเวลาก่อนจะสั่งให้อุปกรณ์ตัดต่อทำงานเป็นไปตามเวลาทริปที่มาตรฐานกำหนด

โดยค่าแรงดันและความถี่ที่จะทดลองจะถูกป้อนด้วยชุดจำลองระบบไฟฟ้า 3 เฟส ที่สามารถจำลองให้เกิดแรงดันเกิน/แรงดันต่ำ หรือความถี่สูงและความถี่ต่ำแบบต่างๆ ได้

### 4.3.1 ผลการทดลองตรวจสอบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำ

การทดลองตรวจสอบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำ (Magnitude Test) มีขั้นตอนดังนี้  
เชื่อมต่อชุดจำลองระบบไฟฟ้า 3 เฟส, อุปกรณ์ตัดต่อพร้อมชุดควบคุมดิจิทัลและภาระทางไฟฟ้า (Load) ดังรูปที่ 4.2

1) กำหนดค่าพารามิเตอร์ของชุดจำลองระบบไฟฟ้า 3 เฟส โดยให้แต่ละเฟสมีแรงดันประมาณ 224 V (แรงดันขณะทดลองจริง) ความถี่ที่ 50 Hz

2) ชุดควบคุมดิจิทัลสั่งให้อุปกรณ์ตัดต่อทำการเชื่อมต่อชุดจำลองระบบไฟฟ้า 3 เฟสเข้ากับภาระทางไฟฟ้า

3) เริ่มต้นชุดจำลองระบบไฟฟ้า 3 เฟส จะมีแรงดันแต่ละเฟสประมาณ 224 V จากนั้นปรับค่าแรงดันให้อยู่ภายใน 10% ของแรงดันจุดที่ทดสอบ ดังนี้

3.1) กรณีแรงดันต่ำ 50% (Magnitude Setting = 112 V) ปรับค่าแรงดันเริ่มต้นไปที่ 60% จากระดับแรงดันปกติ จากนั้นเริ่มลดแรงดันลงครั้งละ 0.11 V ลดลงไปเรื่อยๆ จนกระทั่งอุปกรณ์ตัดต่อทำการทริป

3.2) กรณีแรงดันต่ำ 88% (Magnitude Setting = 193.6 V) ปรับค่าแรงดันเริ่มต้นไปที่ 90% จากระดับแรงดันปกติ จากนั้นเริ่มลดแรงดันลงครั้งละ 0.11 V ลดลงไปเรื่อยๆ จนกระทั่งอุปกรณ์ตัดต่อทำการทริป

3.3) กรณีแรงดันเกิน 110% (Magnitude Setting = 246.4 V) ปรับค่าแรงดันเริ่มต้นที่ 100% จากนั้นเริ่มเพิ่มแรงดันขึ้นครั้งละ 0.11 V เพิ่มขึ้นไปเรื่อยๆ จนกระทั่งอุปกรณ์ตัดต่อทำการทริป

3.4) กรณีแรงดันเกิน 120% (ทดสอบที่ 115%, Magnitude Setting = 257.6 V) ปรับค่าแรงดันเริ่มต้นที่ 90% จากระดับแรงดันปกติ จากนั้นเริ่มเพิ่มแรงดันขึ้นครั้งละ 0.11 V ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งอุปกรณ์ตัดต่อทำการทริป

4) บันทึกค่าแรงดัน ณ จุดที่อุปกรณ์ตัดต่อทริป

5) ตั้งค่าชุดจำลองระบบไฟฟ้า 3 เฟส กลับมายังปกติ จากนั้นทำซ้ำขั้นตอนที่ 2-5 เป็นจำนวนทั้งหมด 5 ครั้ง สำหรับการทดลองแต่ละระดับ

6) ในกรณีทดสอบแบบ 3 เฟสไม่สมดุล ให้ทำซ้ำขั้นตอนที่ 2-5 โดยทดสอบที่ละเฟสจาก เฟส A, B, C ตามลำดับ โดยผลการทดลองทั้งหมดแสดงดังตารางที่ 4.3

**ตารางที่ 4.3** ผลการทดลองตรวจสอบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำ (Magnitude Test)  
ตามมาตรฐาน IEEE 1547

การทดลอง	Magnitude Setting (V)	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (ค่าเปอร์เซ็นต์สูงสุดจากการทดลอง 5 ครั้ง)
แรงดันต่ำ 50%, 3 เฟสสมดุล	112.00	7.41
แรงดันต่ำ 88%, 3 เฟสสมดุล	193.60	2.17
แรงดันเกิน 110%, 3 เฟสสมดุล	246.40	1.46
แรงดันเกิน 120%, 3 เฟสสมดุล	257.60	3.22
แรงดันต่ำ 50%, 3 เฟสไม่สมดุล	112.00	4.55
แรงดันต่ำ 88%, 3 เฟสไม่สมดุล	193.60	2.53
แรงดันเกิน 110%, 3 เฟสไม่สมดุล	246.40	1.14
แรงดันเกิน 120%, 3 เฟสไม่สมดุล	257.60	1.79

\*การทดลอง 3 เฟสไม่สมดุล คือ การทดสอบที่ละเฟสจาก เฟส A, เฟส B, เฟส C ตามลำดับ

จากตารางที่ 4.3 ผลการทดลองตรวจสอบ Magnitude Test ของแรงดันแต่ละระดับ โดยแสดงเป็นเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนที่มีค่าสูงสุดจากการทดลอง 5 ครั้งในแต่ละระดับที่ทดสอบ เพื่อดูว่าในแต่ละระดับที่ทดสอบนั้นจะมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนมากที่สุดเป็นเท่าไร โดยได้ผลดังนี้

ที่ระดับแรงดันต่ำ 50% แบบ 3 เฟสสมดุล มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่ 7.41 เมื่อเปรียบเทียบกับแบบ 3 เฟสไม่สมดุลที่มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่ 4.55 เห็นได้ว่าแบบ 3 เฟสสมดุลจะมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนมากกว่าเกือบ 3 เปอร์เซ็นต์ สาเหตุอาจมาจากวิธีที่ใช้หาขนาดแรงดันซึ่งแบบ 3 เฟสสมดุลใช้ค่า  $V_d$ ,  $V_q$  ในการหาขนาดแรงดัน โดยวิธีนี้มีจุดอ่อนคือ ถ้าแรงดัน 3 เฟสตรวจจับเข้ามาไม่สมดุลกันทำให้ค่าขนาดของแรงดันเกิดการแกว่ง ส่งผลให้ค่า Magnitude Trip เกิดความคลาดเคลื่อนมากไปด้วย

ดังนั้นแนวทางแก้ไขคือต้องตรวจสอบให้แรงดัน 3 เฟสที่จำลองขึ้นให้มีขนาดแรงดันที่สมดุลกัน ซึ่งจะทำให้การตรวจสอบมีความแม่นยำมากขึ้น ส่วนกรณีแบบ 3 เฟสไม่สมดุลใช้การหาค่าแรงดัน rms โดยใช้บล็อกสำเร็จรูปซึ่งผลที่ได้คือ มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่ 4.55 ถ้าต้องการให้ให้มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนลดน้อยลงกว่านี้มีแนวทางแก้ไขคือ ตรวจสอบแรงดัน 3 เฟสที่จำลองขึ้นให้มีขนาดแรงดันที่สมดุลกัน, ปรับแต่งวงจรตรวจจับแรงดันให้มีความแม่นยำมากขึ้น, แก้ไขโปรแกรมการตรวจจับแรงดันให้มีความแม่นยำมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีแรงดันต่ำ 88% แบบ 3 เฟสสมดุลมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่ 2.17 และแบบ 3 เฟสไม่สมดุลมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่ 2.53 ซึ่งค่าที่ได้ใกล้เคียงกัน

กรณีแรงดันต่ำ 110% แบบ 3 เฟสสมดุลมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่ 1.46 และแบบ 3 เฟสไม่สมดุลมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่ 1.14 ซึ่งค่าที่ได้ใกล้เคียงกัน

กรณีแรงดันเกิน 120% ที่ระดับนี้ได้มีการลดระดับแรงดันเกินมาที่ 115% เพราะข้อจำกัดของชุดจำลองระบบไฟฟ้า 3 เฟส ผลที่ได้คือแบบ 3 เฟสสมดุลมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่ 3.22 และแบบ 3 เฟสไม่สมดุลมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่ 1.79

เมื่อวิเคราะห์ผลการทดลองระดับแรงดันที่มีปัญหามากที่สุดคือระดับแรงดันต่ำ 50% ทั้งแบบ 3 เฟสสมดุลและแบบ 3 เฟสไม่สมดุลที่มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนมาก อาจเกิดจากสาเหตุเหล่านี้ เช่น

1) ชุดจำลองระบบไฟฟ้า 3 เฟส จ่ายแรงดันออกมาไม่สมดุลกันในแต่ละเฟส ส่งผลให้การคำนวณโดยใช้การแปลง DQ มีปัญหา แนวทางแก้ไข คือ ต้องมีการปรับจูนสัญญาณขาออกจากชุดจำลองระบบไฟฟ้า 3 เฟส ให้มีค่าแรงดันแต่ละเฟสที่ออกมาใกล้เคียงกันมากที่สุด

2) วงจรวัดแรงดัน เมื่อแรงดันที่วัดมีค่าน้อยลงกว่า 50% จากระดับปกติ ทำให้ค่าที่วัดมีความคลาดเคลื่อนมากขึ้น ส่งผลให้สัญญาณที่ออกจากวงจรวัดแรงดันที่ส่งต่อไปยังชุดควบคุมดิจิทัลคลาดเคลื่อนไปด้วย แนวทางแก้ไข คือ พัฒนางจรวัดแรงดันให้มีความแม่นยำมากขึ้น

3) โปรแกรมการตรวจจับแรงดันเกิน,แรงดันต่ำ ต้องพัฒนาอัลกอริทึมในการคำนวณให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

#### ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองตรวจสอบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำ (Time Test)

ตามมาตรฐาน IEEE 1547

การทดลอง	Trip Time (ms)	delay time setting (ms)	Trip Time (ms) ที่มีค่ามากที่สุดจากการทดลอง 5 ครั้ง
	มาตรฐาน	ช่วงเวลาใน ชุดควบคุมดิจิทัล	
V<50% 3 เฟสสมดุล	160	140	173.3
50%≤V<88% 3 เฟสสมดุล	2000	1850	2040.0
110%<V<120% 3 เฟสสมดุล	1000	800	1190.0
V≥120% 3 เฟสสมดุล	160	120	181.0
V<50% 3 เฟสไม่สมดุล	160	40	223.3
50%≤V<88% 3 เฟสไม่สมดุล	2000	1900	2100.0
110%<V<120% 3 เฟสไม่สมดุล	1000	1000	1210.0
V≥120% 3 เฟสไม่สมดุล	160	40	214.8

จากตารางที่ 4.4 เป็นผลการทดลองตรวจสอบแรงดันแต่ละระดับแบบ Time Test เมื่อจำลองให้เกิดแรงดันผิดปกติที่แต่ละระดับจะทดสอบอย่างละ 5 ครั้ง โดยชุดควบคุมดิจิทัลต้องสามารถตรวจจับความผิดปกตินั้น และสั่งทริปภายในเวลาที่มาตรฐานกำหนดไว้ได้หรือไม่ จากผลการทดลองชุดควบคุมดิจิทัลสามารถตรวจจับความผิดปกติที่ระดับต่างๆ ได้ดังนี้

กรณีการเกิดฟอลต์แบบ 3 เฟสสมดุลที่ระดับแรงดัน < 50% (ทดสอบที่ 40%) ต้องทริปก่อนเวลา 160 ms และตั้งช่วงเวลาทริปที่ 140 ms โดยผลที่ได้คือมีค่า Trip Time มากสุดที่ 173.3 ms

ที่ระดับ 50% ≤ แรงดัน < 88% (ทดสอบที่ 75%) ต้องทริปก่อนเวลา 2000 ms และตั้งช่วงเวลาทริปที่ 1850 ms โดยผลที่ได้คือมีค่า Trip Time มากสุดที่ 2040 ms

ที่ระดับ 110% < แรงดัน < 120% (ทดสอบที่ 113%) ต้องทริปก่อนเวลา 1000 ms และตั้งช่วงเวลาทริปที่ 800 ms โดยผลที่ได้คือมีค่า Trip Time มากสุดที่ 1190 ms

ที่ระดับแรงดัน ≥ 120% (เนื่องจากข้อจำกัดของชุดจำลองระบบไฟฟ้า 3 เฟสที่จ่ายแรงดันได้สูงสุดที่ 120% ดังนั้นจึงเปลี่ยนระดับแรงดันเป็น ≥ 115%) เมื่อทดสอบที่ 120% ต้องทริปก่อนเวลา 160 ms และตั้งช่วงเวลาทริปที่ 120 ms โดยผลที่ได้คือมีค่า Trip Time มากสุดที่ 181 ms

จากผลการทดลองเกิดฟอลต์แบบ 3 เฟสสมดุลที่ระดับต่างๆ เห็นได้ว่า Trip Time ที่ได้เกินเวลาตามมาตรฐานกำหนด ในส่วนนี้สามารถแก้ไขได้โดยลดการหน่วงเวลาลงเท่านั้น เพราะเวลาที่หน่วงไว้แต่ละระดับได้เพื่อสำหรับเวลาทริปมากที่สุดที่จะผ่านมาตรฐาน ดังนั้นเพียงแค่ลดการหน่วงเวลาลงจะสามารถผ่านมาตรฐานที่กำหนดได้

วิเคราะห์ผลการทดลอง กรณีการเกิดฟลัดแบบ 3 เฟสไม่สมดุลจะมีปัญหาที่ชุดควบคุมดิจิทัลตรวจจับไม่ทัน คือ ที่ระดับแรงดัน  $< 50\%$  มีค่า Trip Time มากสุดที่ 223.3 ms และที่ระดับแรงดัน  $\geq 120\%$  มีค่า Trip Time มากสุดที่ 214.8 ms โดยมีการหน่วงเวลาที่ 40 ms แสดงว่าถึงไม่มีการหน่วงเวลาชุดควบคุมดิจิทัลต้องใช้เวลามากกว่า 160 ms (เวลาทริปมากที่สุดตามมาตรฐานกำหนด) แสดงให้เห็นว่าการใช้บล็อกสำเร็จรูปจากโปรแกรม LabVIEW ในการหาค่า rms ของแรงดันแต่ละเฟสยังมีจุดอ่อนในการคำนวณที่ใช้เวลามากเกินไป หรืออีกสาเหตุมาจากฟังก์ชันการตรวจจับฟลัดทั้งหมดที่ประมวลผลบน Realtime Embedded Controller ใช้เวลาการคำนวณช้าเมื่อเทียบกับการคำนวณบน FPGA แต่ FPGA เองมีทรัพยากรที่จำกัดในการโปรแกรม ดังนั้นถ้านำฟังก์ชันการตรวจจับฟลัดทั้งหมดไปประมวลผลที่ FPGA อาจทำได้ยาก แนวทางแก้ไขคือพยายามนำฟังก์ชันการตรวจจับฟลัดที่ตรวจจับไม่ทันบน Realtime Embedded Controller ไปใส่ใน FPGA อาจจะช่วยในการตรวจจับได้เร็วมากยิ่งขึ้นเพื่อจะผ่านการทดสอบที่ระดับแรงดัน  $< 50\%$  และที่ระดับแรงดัน  $\geq 120\%$

นอกนั้นที่ระดับ  $50\% \leq$  แรงดัน  $< 88\%$  และ  $110\% <$  แรงดัน  $< 120\%$  ถึงค่า Trip Time จะมีค่ามากเกินเวลาที่มาตรฐานกำหนด แต่สามารถแก้ไขได้โดยลดการหน่วงเวลาลงทำให้ผ่านมาตรฐานที่กำหนดได้

#### 4.3.2 ผลการทดลองตรวจสอบความถี่สูง/ความถี่ต่ำ

เพื่อทดสอบการทำงานของชุดควบคุมดิจิทัลให้สามารถสั่งงานอุปกรณ์ตัดต่อเพื่อปลดวงจรออกจากระบบไฟฟ้าได้ เมื่อตรวจสอบพบการเกิดความถี่สูงหรือความถี่ต่ำที่ผิดปกติ

Magnitude Test จะทำการเพิ่มความถี่ครั้งละ 0.125 Hz เมื่อถึงระดับ Magnitude Setting ที่ 50.50 Hz (กรณีตรวจสอบความถี่สูง) และลดความถี่ไปยัง 47.00 Hz (กรณีตรวจสอบความถี่ต่ำ) จากระดับความถี่ปกติที่ 50 Hz ในการทดลองชุดควบคุมดิจิทัลต้องสั่งทริปที่ระดับ Magnitude Setting ตั้งค่าไว้ โดยทดลองที่ความถี่สูง 5 ครั้งและที่ความถี่ต่ำ 5 ครั้ง ซึ่งผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.5

Time Test กรณีตรวจสอบความถี่สูงจะจำลองเปลี่ยนความถี่จาก 50 Hz ไปที่ 52 Hz โดยมาตรฐานกำหนดว่าถ้าความถี่สูงมากกว่า 50.50 Hz ต้องสั่งทริปภายใน 160 ms และกรณีตรวจสอบความถี่ต่ำจะจำลองเปลี่ยนความถี่จาก 50 Hz ไปที่ 45 Hz โดยมาตรฐานกำหนดว่าถ้าความถี่ต่ำน้อยกว่า 47.00 Hz ต้องสั่งทริปภายใน 160 ms โดยทดลองที่ความถี่สูง 5 ครั้ง และที่ความถี่ต่ำ 5 ครั้ง ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.6

#### ตารางที่ 4.5 ผลการทดลองตรวจสอบความถี่สูง/ความถี่ต่ำ (Magnitude Test)

ตามมาตรฐาน IEEE 1547

การทดลอง	Magnitude Setting (Hz)	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (ค่าเปอร์เซ็นต์สูงสุดจากการทดลอง 5 ครั้ง)
ความถี่สูง	50.50	0.28
ความถี่ต่ำ	47.00	1.51

จากตารางที่ 4.5 ผลการทดลอง Magnitude Test เห็นได้ว่าชุดควบคุมดิจิทัลสามารถตรวจสอบความถี่สูงได้อย่างแม่นยำและมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่ 0.28 จากการทดลอง 5 ครั้ง และกรณีตรวจสอบความถี่ต่ำมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่ 1.51 จากการทดลอง 5 ครั้งเช่นเดียวกัน จากผลการทดลองเห็นได้ว่าบล็อกสำเร็จรูปในการตรวจจับความถี่ของ LabVIEW สามารถตรวจจับได้

#### ตารางที่ 4.6 ผลการทดลองตรวจสอบความถี่สูง/ความถี่ต่ำ (Time Test)

ตามมาตรฐาน IEEE 1547

การทดลอง	Trip Time (ms)	delay time setting (ms)	Trip Time (ms) ที่มีค่ามากที่สุดจากการทดลอง 5 ครั้ง
	มาตรฐาน	หน่วยเวลาในชุดควบคุมดิจิทัล	
ความถี่สูง > 50.50 Hz	160	109	175.1
ความถี่ต่ำ < 47.00 Hz	160	109	183.5

จากตารางที่ 4.6 ผลการทดลอง Time Test โดยกำหนดให้สิ่งทริปภายในเวลาที่มาตรฐานกำหนดไว้คือ 160 ms เมื่อตรวจจับเจอความถี่สูงและความถี่ต่ำ ในการทดลองจะมีการหน่วงเวลาไว้ที่ 109 ms ก่อนจะสั่งให้อุปกรณ์ทริป ผลการทดลองที่ได้คือเมื่อตรวจสอบความถี่สูง ชุดควบคุมดิจิทัลใช้ Trip Time มากที่สุดคือ 175.1ms จากการทดลอง 5 ครั้ง และเมื่อตรวจสอบความถี่ต่ำชุดควบคุมดิจิทัลใช้ Trip Time มากที่สุดคือ 183.5 ms จากการทดลอง 5 ครั้งจากผลที่ได้แสดงว่าค่าหน่วงเวลาที่ตั้งไว้มีค่ามากเกินไป ดังนั้นหากต้องการให้ผ่านมาตรฐานนี้สามารถแก้ไขได้โดยลดการหน่วงเวลาลง เพราะจากผลที่ได้กรณีตรวจสอบความถี่สูงใช้เวลาทริปมากที่สุดคือ 175.1 ms เมื่อลบกับเวลาที่หน่วงไว้คือ 109 ms แสดงว่าชุดควบคุมดิจิทัลใช้เวลาในการตรวจจับประมาณ 66.10 ms ซึ่งเร็วกว่าเวลามาตรฐานกำหนดที่ 160 ms ดังนั้นเพียงแค่ลดการหน่วงเวลาลงให้เหลือประมาณ 50 ms ทำให้สามารถทริปก่อนเวลาที่มาตรฐานกำหนดได้ กรณีตรวจสอบความถี่ต่ำเช่นเดียวกัน เพียงลดการหน่วงเวลาลงทำให้สามารถทริปก่อนเวลาที่มาตรฐานกำหนดได้ จากผลการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

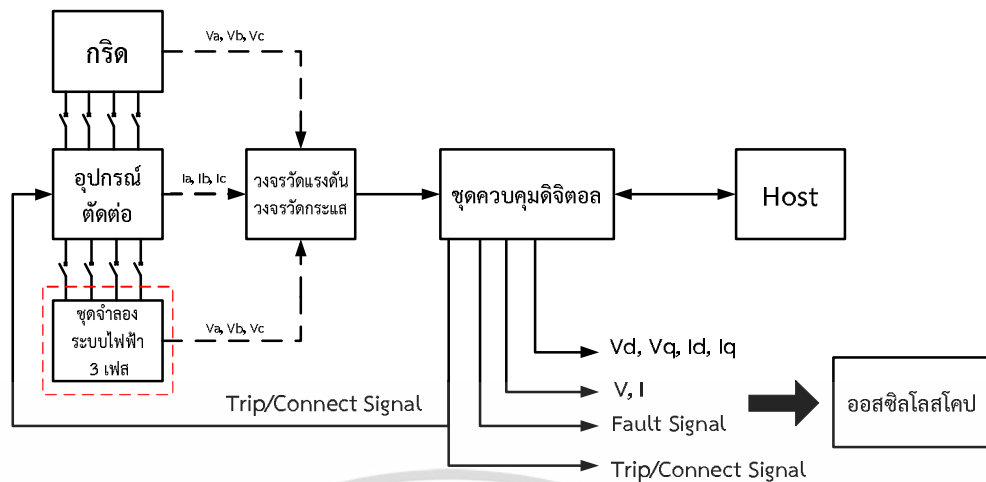
ทดลองเห็นได้ว่าบล็อกสำเร็จรูปในการตรวจจับความถี่ของ LabVIEW สามารถตรวจจับได้อย่างแม่นยำและใช้เวลาในการตรวจจับที่รวดเร็วสามารถใช้งานได้จริง

### 4.3.3 ผลการทดลองตรวจสอบการซิงโครไนซ์

การซิงโครไนซ์จะตรวจสอบขนาดของแรงดัน มุมเฟส และความถี่ของไมโครกริดกับกริดให้เข้ากัน เพื่อที่จะเชื่อมต่อระบบทั้งสองเข้าด้วยกัน โดยให้ค่าพารามิเตอร์ที่กล่าวมาอยู่ภายในค่าที่กำหนด ถ้าค่าพารามิเตอร์ต่างๆอยู่นอกช่วงที่กำหนดไว้ จะต้องไม่มีการเชื่อมต่อระบบ โดยการทดลองจะเปลี่ยนค่า 2 ตัวแปรคือ ค่าแรงดันไฟฟ้าและค่าความถี่ มีขั้นตอนการทดลองดังนี้

ขั้นตอนการทดสอบ คือ

- 1) เชื่อมต่อระบบตามรูปที่ 4.7
- 2) ตั้งค่าโปรแกรมเริ่มต้นของชุดจำลองระบบไฟฟ้า 3 เฟส (จำลองเป็นไมโครกริด) ดังนี้
  - แรงดัน = 220 V
  - ความถี่ = 50 Hz
  - มุมเฟสต่างกับกริด 0 องศา
- 3) จะทดสอบพารามิเตอร์ 2 อย่าง คือ ความถี่และแรงดัน
  - 3.1) เมื่อความถี่ของทั้งสองระบบอยู่ในช่วง 49.70 Hz ถึง 50.30 Hz โดยจะเลือกค่ามา 10 จุด ถ้าความถี่ทั้งสองระบบเท่ากันเป็นเวลา 5 ไซเคิล (100 ms) ชุดควบคุมดิจิทัลต้องสั่งทั้งกริดและไมโครกริดเชื่อมต่อกัน
  - 3.2) เมื่อความถี่ของทั้งสองระบบไม่อยู่ในช่วง 49.70 Hz ถึง 50.30 Hz โดยจะเลือกค่ามา 10 จุด และค่างค่าพารามิเตอร์นั้นไว้ 3 นาที ชุดควบคุมดิจิทัลจะต้องไม่สั่งทั้งกริดและไมโครกริดเชื่อมต่อกัน
  - 3.3) เมื่อแรงดันของทั้งสองระบบอยู่ในช่วง 198 V ถึง 242 V โดยจะเลือกค่ามา 10 จุด ถ้าแรงดันทั้งสองระบบเท่ากันเป็นเวลา 5 ไซเคิล (100 ms) ชุดควบคุมดิจิทัลต้องสั่งทั้งกริดและไมโครกริดเชื่อมต่อกัน
  - 3.4) เมื่อแรงดันของทั้งสองระบบไม่อยู่ในช่วง 198 V ถึง 242 V โดยจะเลือกค่ามา 10 จุด และค่างค่าพารามิเตอร์นั้นไว้ 3 นาที ชุดควบคุมดิจิทัลจะต้องไม่สั่งทั้งกริดและไมโครกริดเชื่อมต่อกัน



รูปที่ 4.7 แผนผังการทดลองตรวจสอบการชิงโครไนซ์

ตารางที่ 4.7 ผลการทดลองตรวจสอบการชิงโครไนซ์เมื่อความถี่ของกริดและไมโครกริด

มีค่าเกินมาตรฐานกำหนด

ทดสอบ ครั้งที่	ความถี่ (Hz) ตามมาตรฐาน	อยู่ในพิกัด (ค้ำ 5 ไซเคิล จิ้งส่งชิงโครไนซ์)		อยู่นอกพิกัด (ค้ำไว้ 3 นาทีห้ามส่งชิงโครไนซ์)	
		ความถี่ (Hz) ที่ทดสอบ	ผ่าน/ไม่ผ่าน	ความถี่ (Hz) ที่ทดสอบ	ผ่าน/ไม่ผ่าน
1	50.30	50.25	ผ่าน	50.47	ผ่าน
2		50.17	ผ่าน	50.83	ผ่าน
3		50.02	ผ่าน	51.00	ผ่าน
4		50.10	ผ่าน	52.11	ผ่าน
5		50.00	ผ่าน	53.05	ผ่าน

ตารางที่ 4.8 ผลการทดลองตรวจสอบการชิงโครไนซ์เมื่อความถี่ของกริดและไมโครกริด

มีค่าต่ำมาตรฐานกำหนด

ทดสอบ ครั้งที่	ความถี่ (Hz) ตามมาตรฐาน	อยู่ในพิกัด (ค้ำ 5 ไซเคิล จิ้งส่งชิงโครไนซ์)		อยู่นอกพิกัด (ค้ำไว้ 3 นาทีห้ามส่งชิงโครไนซ์)	
		ความถี่ (Hz) ที่ทดสอบ	ผ่าน/ไม่ผ่าน	ความถี่ (Hz) ที่ทดสอบ	ผ่าน/ไม่ผ่าน
1	49.70	49.93	ผ่าน	47.93	ผ่าน
2		49.90	ผ่าน	45.80	ผ่าน
3		49.82	ผ่าน	44.90	ผ่าน
4		49.80	ผ่าน	44.22	ผ่าน
5		49.75	ผ่าน	41.93	ผ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.7 และตารางที่ 4.8 ชุดควบคุมดิจิทัลสามารถตรวจสอบความถี่ของกริดและไมโครกริดได้ เมื่อความถี่ของทั้ง 2 ระบบอยู่ในมาตรฐานที่กำหนด ชุดควบคุมดิจิทัลจะสั่งเชื่อมต่อเพื่อให้กริดและไมโครกริดซิงโครไนซ์กัน และเมื่อจำลองความถี่ของไมโครกริดให้มีความถี่อยู่นอกมาตรฐานที่กำหนด ชุดควบคุมดิจิทัลสามารถห้ามสั่งเชื่อมต่อกริดและไมโครกริด ซึ่งผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานกำหนด

**ตารางที่ 4.9** ผลการทดลองตรวจสอบการซิงโครไนซ์เมื่อแรงดันของกริดและไมโครกริด

มีค่าเกินมาตรฐานกำหนด

ทดสอบครั้งที่	แรงดัน (V) ตามมาตรฐาน	อยู่ในพิกัด (ค้ำ 5 ไซเคิล จีงสั่งซิงโครไนซ์)		อยู่นอกพิกัด (ค้ำไว้ 3 นาทีห้ามสั่งซิงโครไนซ์)	
		แรงดัน (V) ที่ทดสอบ	ผ่าน/ไม่ผ่าน	แรงดัน (V) ที่ทดสอบ	ผ่าน/ไม่ผ่าน
1	242.00	231.00	ผ่าน	249.53	ผ่าน
2		239.57	ผ่าน	257.40	ผ่าน
3		224.47	ผ่าน	260.10	ผ่าน
4		215.47	ผ่าน	262.43	ผ่าน
5		210.17	ผ่าน	262.60	ผ่าน

**ตารางที่ 4.10** ผลการทดลองตรวจสอบการซิงโครไนซ์เมื่อแรงดันของกริดและไมโครกริด

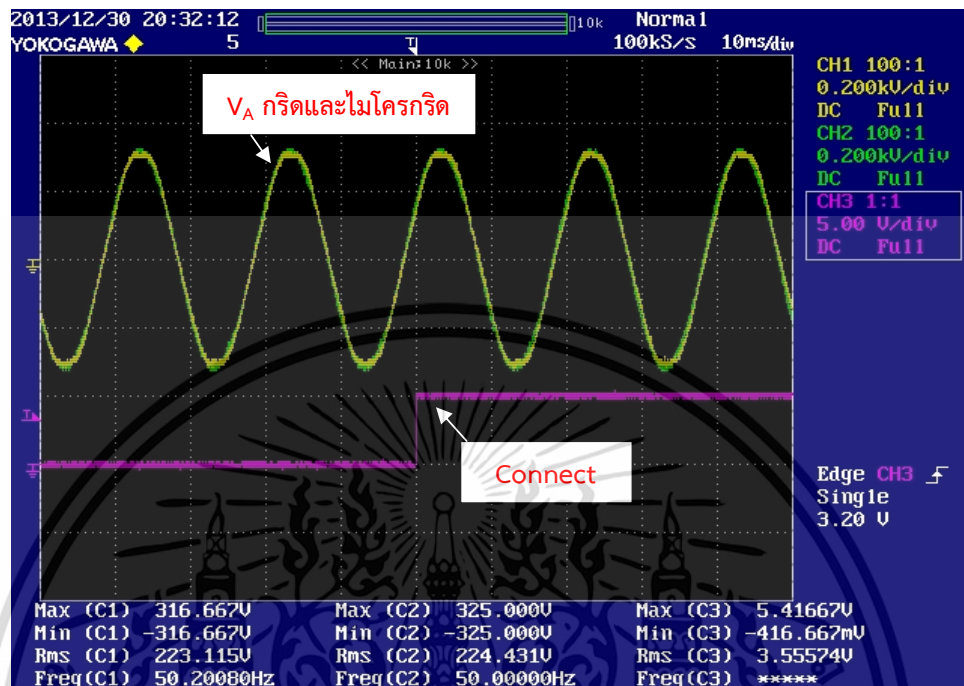
มีค่าต่ำกว่ามาตรฐานกำหนด

ทดสอบครั้งที่	แรงดัน (V) ตามมาตรฐาน	อยู่ในพิกัด (ค้ำ 5 ไซเคิล จีงสั่งซิงโครไนซ์)		อยู่นอกพิกัด (ค้ำไว้ 3 นาทีห้ามสั่งซิงโครไนซ์)	
		แรงดัน (V) ที่ทดสอบ	ผ่าน/ไม่ผ่าน	แรงดัน (V) ที่ทดสอบ	ผ่าน/ไม่ผ่าน
1	198.00	207.60	ผ่าน	191.00	ผ่าน
2		204.73	ผ่าน	178.03	ผ่าน
3		201.80	ผ่าน	166.97	ผ่าน
4		199.03	ผ่าน	161.97	ผ่าน
5		198.20	ผ่าน	150.90	ผ่าน

จากตารางที่ 4.9 และตารางที่ 4.10 ชุดควบคุมดิจิทัลสามารถตรวจสอบแรงดันของกริดและไมโครกริดได้เมื่อแรงดันของทั้ง 2 ระบบอยู่ในมาตรฐานที่กำหนด ชุดควบคุมดิจิทัลจะสั่งเชื่อมต่อเพื่อให้กริดและไมโครกริดซิงโครไนซ์กัน และเมื่อจำลองแรงดันของไมโครกริดให้อยู่นอกมาตรฐานที่กำหนด ชุดควบคุมดิจิทัลสามารถห้ามสั่งเชื่อมต่อกริดและไมโครกริด ซึ่งผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานกำหนด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปการตรวจสอบการซิงโครไนซ์สามารถยืนยันได้ว่าฟังก์ชันการตรวจสอบการซิงโครไนซ์ทำงานได้ตามที่โปรแกรมไว้



รูปที่ 4.8 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าของกริดและไมโครกริดเมื่อความถี่เท่ากัน

จากรูปที่ 4.8 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าเฟส A ของกริด (เส้นสีเหลือง), สัญญาณแรงดันไฟฟ้าเฟส A ของไมโครกริด (เส้นสีเขียว) เมื่อความถี่ทั้งสองระบบอยู่ในช่วง 49.7 Hz ถึง 50.3 และสัญญาณสั่งเชื่อมต่อเพื่อซิงโครไนซ์ (เส้นสีชมพู)

#### 4.4 ผลการทดลองตรวจสอบกำลังไฟฟ้าไหลย้อนกลับ

ทำได้โดยตรวจสอบกำลังไฟฟ้าที่ไหลผ่านระบบเชื่อมต่อ โดยค่ากำลังไฟฟ้าที่วัดได้ จะนำมาเปรียบเทียบกับค่ากำลังไฟฟ้าที่ตั้งไว้เริ่มต้น ถ้ากำลังไฟฟ้าที่วัดได้มีทิศทางไหลกลับจากที่ตั้งไว้ ระบบเชื่อมต่อต้องปลดไมโครกริดออกจากระบบไฟฟ้า เพื่อป้องกันอันตรายที่จะเกิดขึ้นแก่อุปกรณ์ต่างๆในระบบ จะมีการทดลอง 2 อย่างคือ Magnitude Test และ Time Test

Magnitude Test ทำได้โดยจำลองค่ากระแสเพื่อให้สามารถปรับค่ากำลังไฟฟ้าได้จาก สมการ  $P = v_{ds}i_d + v_{qs}i_q$  โดยค่า  $v_{ds}, v_{qs}$  ได้จากการแปลง DQ ของแรงดันกริด และ  $i_d, i_q$  จะได้จากการแปลง DQ ของสัญญาณกระแสที่จำลองขึ้น ในการทดลองจะตั้งค่า Magnitude Setting ของกำลังไฟฟ้าที่ -10 kW (เครื่องหมายติดลบคือกำลังไฟฟ้าไหลย้อนกลับที่ 10 kW) โดยตั้งค่ากำลังไฟฟ้าปกติที่ 1 kW จากนั้นทำการกลับเฟสของสัญญาณกระแสให้กลับเฟส 180 องศา ส่งผลให้ค่า  $i_d$  ที่ได้

จากการแปลง DQ จะติดลบทำให้ค่ากำลังไฟฟ้า ณ ตอนนั้นคือ -1 kW จากนั้นเพิ่มค่ากำลังไฟฟ้า 2 kW เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่จะอิงราคาไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จนถึงระดับ Magnitude Setting ของกำลังไฟฟ้าที่ -10 kW ชุดควบคุมดิจิทัลต้องสั่งทริบ โดยจะทดลองทั้งหมด 5 ครั้ง ซึ่งผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.11

Time Test จะจำลองเปลี่ยนค่ากำลังไฟฟ้าจาก 10 kW ไปที่ -10 kW โดยมาตรฐานกำหนดว่า ถ้ากำลังไฟฟ้าไหลย้อนกลับเกินค่าที่กำหนดไว้ (การทดลองคือ 10 kW) ต้องสั่งทริบภายใน 2 s โดยจะทดลอง 5 ครั้ง ซึ่งผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.12

**ตารางที่ 4.11** ผลการทดลองตรวจสอบกำลังไฟฟ้าไหลย้อนกลับ (Magnitude Test)

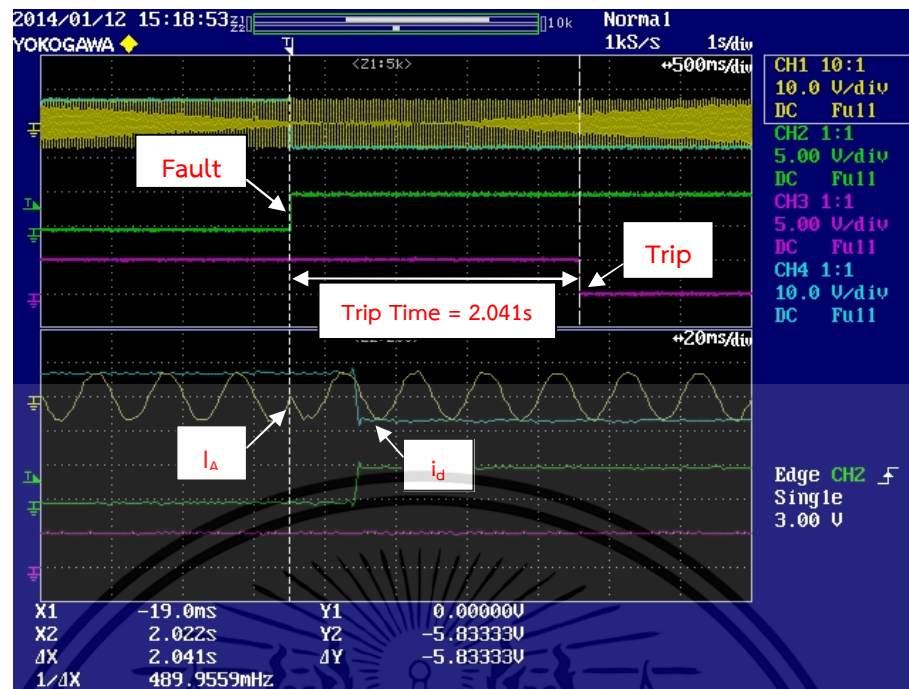
การทดลอง	Magnitude Setting (kW)	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (ค่าเปอร์เซ็นต์สูงสุดจากการทดลอง 5 ครั้ง)
กำลังไฟฟ้าไหลย้อนกลับ	-10.00	1.26

จากตารางที่ 4.11 เป็นผลการทดลองตรวจสอบกำลังไฟฟ้าไหลย้อนกลับแบบ Magnitude Test มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่ 1.26 จากการทดลอง 5 ครั้ง แสดงให้เห็นว่าฟังก์ชันการตรวจสอบกำลังไฟฟ้าไหลย้อนกลับ สามารถตรวจจับได้จริงตามที่ออกแบบโปรแกรมไว้

**ตารางที่ 4.12** ผลการทดลองตรวจสอบกำลังไฟฟ้าไหลย้อนกลับ (Time Test)

การทดลอง	Trip Time (s)	delay time setting (s)	Trip Time (s) ที่มีค่ามากที่สุดจากการทดลอง 5 ครั้ง
	มาตรฐาน	หน่วงเวลาในชุดควบคุมดิจิทัล	
กำลังไฟฟ้าไหลย้อนกลับ	2	2	2.051

จากตารางที่ 4.12 เป็นผลการทดลองตรวจสอบกำลังไฟฟ้าไหลย้อนกลับแบบ Time Test Test เมื่อเกิดกำลังไฟฟ้าไหลย้อนกลับเกินค่าที่กำหนดต้องสั่งทริบภายใน 2 s ได้ตั้งหน่วงเวลาไว้ที่ 2 s เวลา Trip Time ที่ได้มากที่สุดคือ 2.051 s เห็นได้ว่าชุดควบคุมสามารถตรวจจับได้เร็วกว่าที่มาตรฐานกำหนดอยู่แล้ว ดังนั้นหากต้องการให้ทริบภายใน 2 s ตามมาตรฐานกำหนดเพียงแคลดค่าหน่วงเวลาลง ทำให้สามารถผ่านการทดลองมาตรฐานนี้ได้



รูปที่ 4.9 สัญญาณตรวจสอบกำลังไฟฟ้าไหลย้อนกลับแบบ Time Test

จากรูปที่ 4.9 เมื่อสัญญาณของกระแสไฟฟ้า ( $i_A$ ) มีการกลับเฟส 180 องศา (เส้นสีเขียว) ส่งผลให้สัญญาณกระแส  $i_d$  (เส้นสีฟ้า) มีการกลับทิศทางจากบวกเป็นลบ ทำให้ค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้ไหลกลับทิศทาง ชุดควบคุมดิจิทัลจึงสั่งฟลัด (เส้นสีเขียว) และหน่วงเวลาไว้จนกระทั่งส่งสัญญาณทริป ใช้เวลาในการตรวจจับตั้งแต่เกิดฟลัดจนกระทั่งส่งสัญญาณทริปใช้เวลาไป 2.041 s เมื่อรวมกับเวลาที่อุปกรณ์ติดต่อทำงานคือ 10 ms เพราะฉะนั้นใช้ Trip Time จริงเท่ากับ 2.051 s

#### 4.5 ผลการทดสอบตรวจสอบกระแสเกิน

การทดลองตรวจสอบกระแสเกินจะใช้วิธีจำลองสัญญาณของกระแสไฟฟ้าขึ้นมาโดยใช้ชุดจำลองระบบไฟฟ้า 3 เฟส มีการทดลอง 2 อย่าง คือ

- 1) ตรวจสอบกระแสเกินแบบทำงานทันที

ทดสอบโดยป้อนค่ากระแสจำลองที่ระดับปกติ 12 แอมป์ จากนั้นทำให้เกิดกระแสเกิน ( $I_F$ ) ที่ระดับ 30 แอมป์, กระแสเริ่มทำงาน ( $I_p$ ) ที่ 15 แอมป์ เมื่อเกิดกระแสเกินที่ตั้งค่าไว้ชุดควบคุมต้องตรวจจับฟลัดนี้ให้ได้และสั่งทริปทันที

- 2) ตรวจสอบกระแสเกินแบบเวลาผกผันมาก (Very Inverse)

ทดสอบโดยป้อนค่ากระแสจำลองที่ระดับปกติ 12 แอมป์ จากนั้นทำให้เกิดกระแสเกิน ( $I_F$ ) ที่ระดับ 30 แอมป์, กระแสเริ่มทำงาน ( $I_p$ ) ที่ 15 แอมป์, TMS = 1

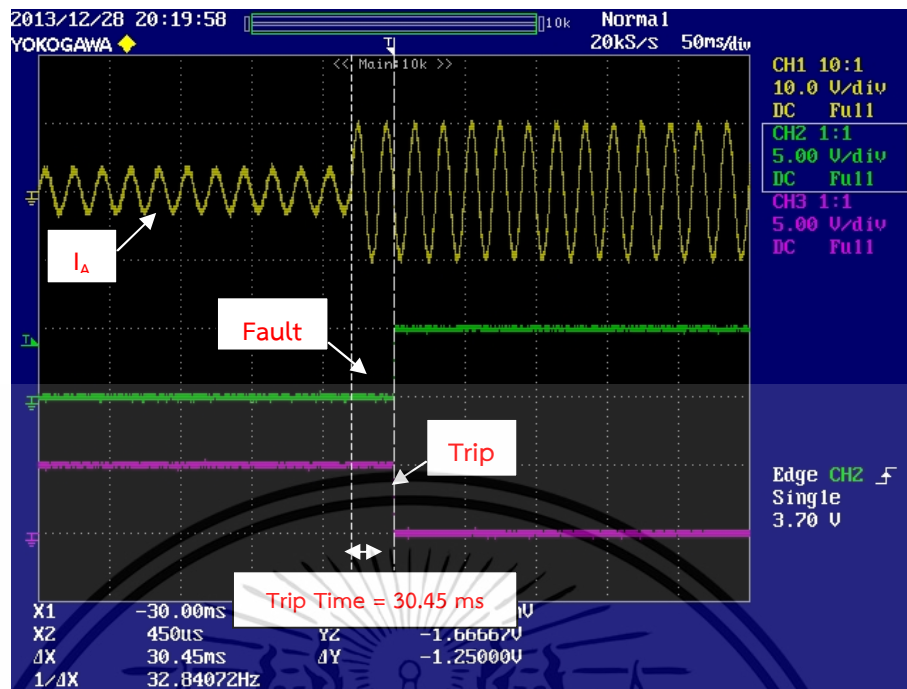
เลือกการหน่วงเวลาแบบ Very Inverse เมื่อแทนค่าในสมการ  $t = \frac{13.5}{\left(\frac{I_F}{I_P}\right)^1 - 1} TMS$

จะได้  $t = 13.5$  s ดังนั้นเมื่อเกิดกระแสเกินที่ตั้งค่าไว้ชุดควบคุมต้องตรวจจับฟอลต์นี้ให้ได้และหน่วงเวลาตามที่กำหนดจึงส่งสัญญาณทริป ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.13 ดังนี้

**ตารางที่ 4.13** ผลการทดลองตรวจสอบกระแสเกินแบบทำงานทันทีและแบบเวลาผกผันมาก (Very Inverse)

การทดลอง	Trip Time (s)	delay time setting (s)	Trip Time (s) ที่มีค่ามากที่สุดจากการทดลอง 5 ครั้ง
	มาตรฐาน	หน่วงเวลาในชุดควบคุมดิจิทัล	
กระแสเกินแบบทำงานทันที	-	-	0.046
กระแสเกินแบบเวลาผกผันมาก (Very Inverse)	13.5	13.5	14.19

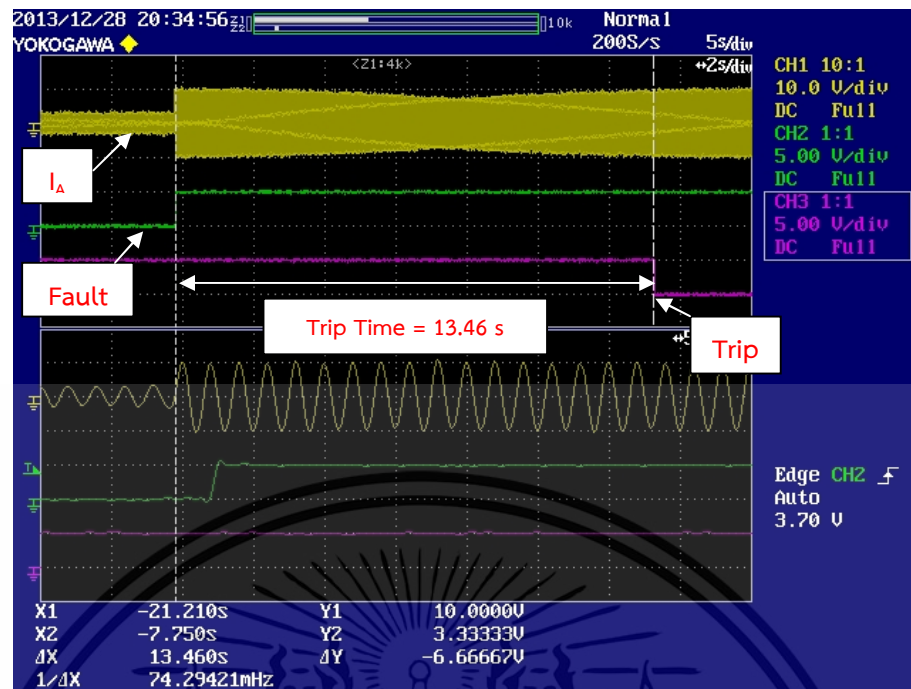
จากตารางที่ 4.13 ในการทดลองตรวจสอบกระแสเกินแบบทำงานทันทีเมื่อกระแสเกินจากที่ตั้งไว้ ชุดควบคุมดิจิทัลใช้เวลาประมวลผลและส่งทริปมากที่สุดที่ 0.046 s หรือ 46 ms โดยการทดสอบนี้ไม่ได้มีการหน่วงเวลาไว้ นั่นแสดงว่าชุดควบคุมดิจิทัลจะใช้เวลาในการตรวจจับประมาณ 2 ไมโครวินาที และส่งทริปทันที กรณีตรวจสอบกระแสเกินแบบเวลาผกผันมาก (Very Inverse) ค่าหน่วงเวลาจากการคำนวณคือ 13.5 s ผลที่ได้คือชุดควบคุมดิจิทัลสามารถตรวจจับและหน่วงเวลาก่อนจะส่งทริปใช้เวลารวมทั้งสิ้น คือ 14.19 s ซึ่งเป็นค่ามากที่สุดจากการทดลอง 5 ครั้ง แสดงให้เห็นว่าฟังก์ชันตรวจสอบกระแสเกินแบบเวลาผกผันมาก สามารถตรวจจับได้จริงและคำนวณค่าหน่วงเวลาได้ตามสมการที่โปรแกรมไว้ โดยค่า Trip Time อาจไม่เท่าที่คำนวณเพราะต้องบวกเวลาการทำงานของอุปกรณ์ตัดต่ออีกทั้งต้องบวกเวลาในการตรวจจับ ดังนั้นหากต้องการเวลาที่เท่ากับการคำนวณต้องเผื่อเวลาในส่วนเหล่านี้ไปด้วย



รูปที่ 4.10 สัญญาณการทดลองตรวจสอบกระแสเกินแบบทำงานทันที

จากรูปที่ 4.10 เมื่อสัญญาณกระแสไฟฟ้า  $I_A$  (เส้นสีเหลือง) มีค่าเกินจากปกติที่ตั้งไว้ ทำให้สัญญาณฟอลต์ (เส้นสีเขียว) เปลี่ยนสถานะจาก 0 เป็น 1 นั่นคือเกิดฟอลต์ขึ้น และชุดควบคุมดิจิทัลสั่งทริปทันที (เส้นสีชมพู) โดยชุดควบคุมดิจิทัลใช้เวลาตรวจจับฟอลต์ที่เกิดขึ้นจนกระทั่งสั่งทริปประมาณ 30.45 ms เมื่อรวมกับเวลาที่อุปกรณ์ติดต่อทำงานอีก 10 ms เพราะฉะนั้นใช้เวลาในการทริปรวมทั้งสิ้น 40.45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 สัญญาณการทดลองตรวจสอบกระแสเกินแบบเวลาผกผันมาก (Very Inverse)

จากรูปที่ 4.11 เมื่อสัญญาณกระแสไฟฟ้า  $I_A$  (เส้นสีเหลือง) มีค่าเกินจากปกติที่ตั้งไว้ ทำให้สัญญาณฟอลต์ (เส้นสีเขียว) เปลี่ยนสถานะจาก 0 เป็น 1 นั่นคือเกิดฟอลต์ขึ้น และชุดควบคุมดิจิทัลหน่วงเวลาจากนั้นจึงสั่งทริป (เส้นสีชมพู) โดยใช้เวลาในการทริปที่ 13.46 s เมื่อรวมกับเวลาที่อุปกรณ์ตัดต่อทำงาน 10 ms ดังนั้นเวลาทริปจริงคือ 13.47 s

## 4.6 ผลการทดลองมาตรฐาน VSP

### 4.6.1 ผลการทดลองตรวจสอบความถี่สูง/ความถี่ต่ำ

เพื่อทดสอบการทำงานของชุดควบคุมดิจิทัลให้สามารถสั่งงานอุปกรณ์ตัดต่อเพื่อปลดวงจรออกจากระบบไฟฟ้าได้ เมื่อตรวจสอบพบการเกิดความถี่สูงหรือความถี่ต่ำที่ผิดปกติ

Magnitude Test จะทำการเพิ่มความถี่ครั้งละ 0.125 Hz เมื่อถึงระดับ Magnitude Setting ที่ 50.50 Hz (กรณีตรวจสอบความถี่สูง) และลดความถี่จาก 50 Hz ครั้งละ 0.125 Hz จนถึงระดับความถี่ที่ 47.00 Hz (กรณีตรวจสอบความถี่ต่ำ) ชุดควบคุมดิจิทัลต้องสั่งทริปที่ระดับ Magnitude Setting ตั้งค่าไว้ โดยจะทดลองที่ความถี่สูง 5 ครั้ง และที่ความถี่ต่ำ 5 ครั้ง โดยผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.14

Time Test กรณีตรวจสอบความถี่สูงจะจำลองเปลี่ยนความถี่จาก 50 Hz ไปที่ 52 Hz โดยมาตรฐานกำหนดว่าถ้าความถี่สูงมากกว่า 51 Hz ต้องสั่งทริปภายใน 100 ms และกรณีตรวจสอบความถี่ต่ำจะจำลองเปลี่ยนความถี่จาก 50 Hz ไปที่ 45 Hz โดยมาตรฐานกำหนดว่าถ้าความถี่ต่ำน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กว่า 48 Hz ต้องสั่งทริปภายใน 100 ms โดยจะทดลองที่ความถี่สูง 5 ครั้ง และที่ความถี่ต่ำ 5 ครั้งโดยผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.15

#### ตารางที่ 4.14 ผลการทดลองตรวจสอบความถี่สูง/ความถี่ต่ำ (Magnitude Test)

ตามมาตรฐาน VSPP

การทดลอง	Magnitude Setting (Hz)	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (ค่าเปอร์เซ็นต์สูงสุดจากการทดลอง 5 ครั้ง)
ความถี่สูง	51.00	1.06
ความถี่ต่ำ	48.00	1.92

จากตารางที่ 4.14 ผลการทดลอง Magnitude Test เห็นได้ว่าชุดควบคุมดิจิทัลสามารถตรวจสอบความถี่ได้อย่างแม่นยำและมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่ 1.06 สำหรับการตรวจสอบความถี่สูงจากการทดลอง 5 ครั้ง และกรณีความถี่ต่ำมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่ 1.92 จากการทดลอง 5 ครั้ง เช่นเดียวกัน เมื่อวิเคราะห์ผลการทดลองที่ความถี่สูงเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนจะน้อยกว่าความถี่ต่ำเกือบ 1 เปอร์เซ็นต์ สาเหตุอาจเกิดจากวิธีการตรวจจับความถี่โดยใช้บล็อกสำเร็จรูป เมื่อความถี่ที่ตรวจจับยิ่งน้อยลงจากปกติ (50 Hz) ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนยิ่งเพิ่มขึ้น แนวทางแก้ไข คือ ปรับปรุงวิธีการตรวจจับความถี่ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นบางครั้งค่า Setting ของบล็อกสำเร็จรูปที่ใช้ในการตรวจจับความถี่อาจตั้งไว้ไม่เหมาะสม หรือการใช้อัลกอริทึมแบบอื่นๆ ในการตรวจจับความถี่

#### ตารางที่ 4.15 ผลการทดลองตรวจสอบความถี่สูง/ความถี่ต่ำ (Time Test) ตามมาตรฐาน VSPP

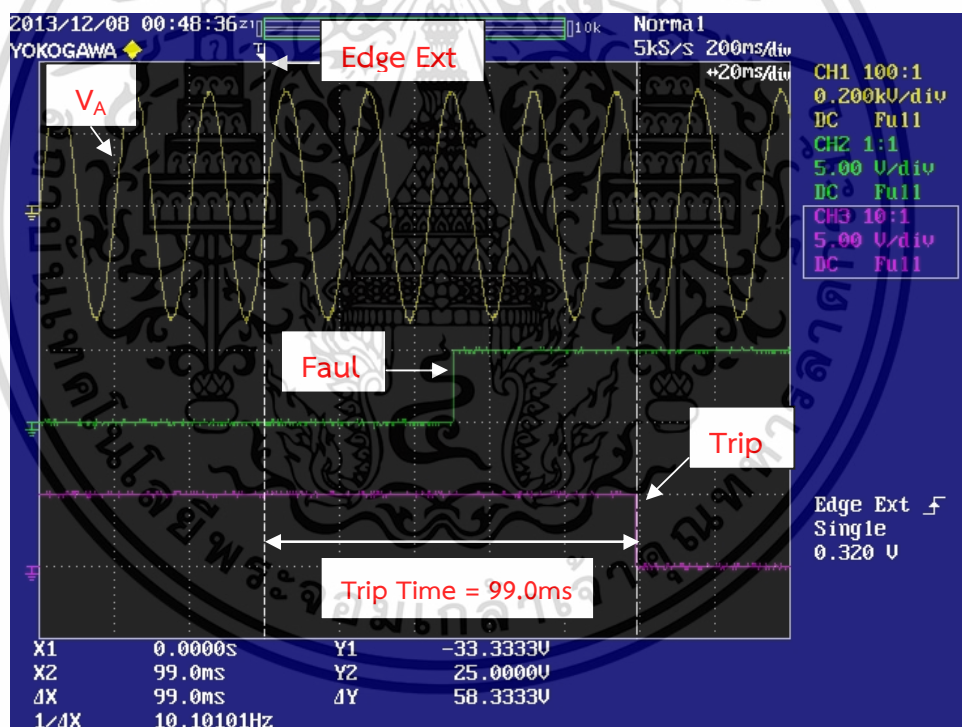
การทดลอง	Trip Time (ms)	delay time setting (ms)	Trip Time (ms) ที่มีค่ามากที่สุดจากการทดลอง 5 ครั้ง
	มาตรฐาน	หน่วยเวลาในชุดควบคุมดิจิทัล	
ความถี่สูง > 51.00 Hz	100	38.5	111.60
แรงดันต่ำ < 48.00 Hz	100	38.5	118.80

จากตารางที่ 4.15 ผลการทดลอง Time Test โดยกำหนดให้สั่งทริปภายในเวลาที่มาตรฐานกำหนดไว้คือ 100 ms เมื่อตรวจจับเจอความถี่สูงและความถี่ต่ำ ในการทดลองจะมีการหน่วงเวลาไว้ที่ 109 ms ก่อนจะสั่งให้อุปกรณ์ทริป ผลการทดลองที่ได้คือเมื่อตรวจสอบความถี่สูง ชุดควบคุมดิจิทัลใช้ Trip Time มากที่สุดคือ 111.60ms จากการทดลอง 5 ครั้ง และเมื่อตรวจสอบความถี่ต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชุดควบคุมดิจิทัลใช้ Trip Time มากที่สุดคือ 118.80 ms จากการทดลอง 5 ครั้ง ผลที่ได้แสดงว่าค่า  
 หน่วงเวลาที่ตั้งไว้มีค่ามากเกินไป ดังนั้นหากต้องการให้ผ่านมาตรฐานนี้สามารถแก้ไขได้โดยการ  
 หน่วงเวลาลงหรือไม่ต้องมีการหน่วงเวลาให้สั่งทริปทันทีเมื่อตรวจจับเจอความถี่สูงหรือความถี่ต่ำ  
 เพราะจากผลที่ได้กรณีตรวจสอบความถี่สูงใช้เวลาทริปมากที่สุดคือ 111.60 ms เมื่อลบกับเวลาที่  
 หน่วงไว้คือ 38.5 ms แสดงว่าชุดควบคุมดิจิทัลใช้เวลาในการตรวจจับประมาณ 73.10 ms ซึ่งเร็ว  
 กว่าเวลามาตรฐานกำหนดที่ 100 ms กรณีตรวจสอบความถี่ต่ำเช่นเดียวกัน เพียงลดการหน่วงเวลา  
 ลงหรือไม่ต้องมีการหน่วงเวลา จะทำให้สามารถทริปก่อนเวลาที่มาตรฐานกำหนดได้

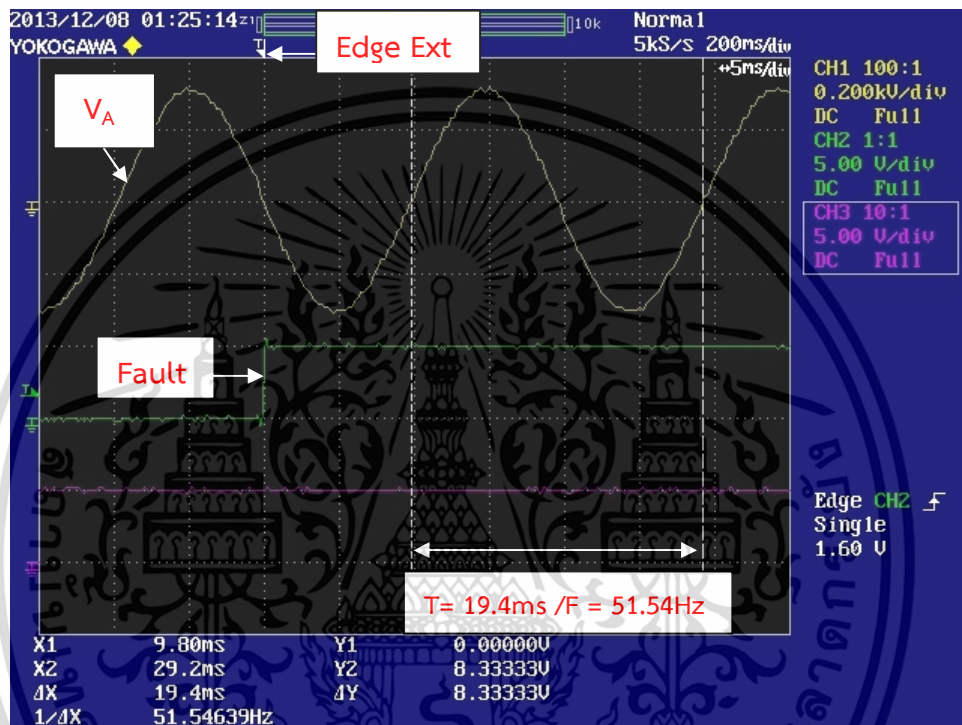
จากผลการทดลองเห็นได้ชัดว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ การตรวจจับความถี่ของมาตรฐาน IEEE1547  
 กรณีมาตรฐาน VSPP ชุดควบคุมดิจิทัลใช้เวลาในการตรวจจับมากกว่า แต่ไม่เป็นปัญหาในการใช้งาน  
 เพราะผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าชุดควบคุมดิจิทัลสามารถตรวจจับได้เร็วกว่ามาตรฐานกำหนดและ  
 เหลือเวลาที่สั่งงานให้อุปกรณ์ตัดต่อทำงานเพื่อให้ Trip Time ผ่านมาตรฐานกำหนดไว้



รูปที่ 4.12 สัญญาณ Time Test ของการตรวจสอบความถี่ต่ำตามมาตรฐาน VSPP

จากรูปที่ 4.12 สัญญาณแรงดันไฟฟ้า V<sub>A</sub> (เส้นสีเหลือง) เมื่อเกิดการทริกจากภายนอก  
 (Edge Ext) นั่นคือมีการเปลี่ยนแปลงความถี่จากความถี่ปกติที่ 50.00 Hz ลดลงเหลือ 45.00 Hz ชุด  
 ควบคุมดิจิทัลจะตรวจจับความถี่ต่ำนี้ได้และส่งสัญญาณฟอลต์ออกมา (เส้นสีเขียว) จากนั้นจะหน่วง  
 เวลาไว้และส่งสัญญาณทริป (เส้นสีชมพู) โดยระยะเวลาตั้งแต่เริ่มการเกิดความถี่ต่ำ (ณ จุด Edge Ext)  
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จนสัญญาณทริปส่งออกมาต้องไม่เกิน 100 ms ตามที่มาตรฐานกำหนดไว้ จากรูปการทดลองเห็นได้ว่าชุดควบคุมดิจิทัลสามารถตรวจจับความถี่ต่ำและส่งสัญญาณทริปเป็นเวลา 99 ms เมื่อรวมกับเวลาการทำงานของอุปกรณ์ตัดต่อที่ 10 ms ดังนั้นค่าเวลาในการทริปทั้งหมดรวมเป็น 109 ms ซึ่งจะเกินเวลาที่มาตรฐานกำหนดแนวทางแก้ไขคือ ลดการหน่วงเวลาลงหรือไม่ต้องหน่วงเวลาให้สั่งทริปทันทีเมื่อตรวจจับเจอฟอลต์ จะสามารถใช้เวลา Trip Time ผ่านมาตรฐานได้



รูปที่ 4.13 สัญญาณ Magnitude Test ของการตรวจสอบความถี่สูงตามมาตรฐาน VSP

จากรูปที่ 4.13 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าเฟส A (เส้นสีเหลือง) จะค่อยๆเพิ่มความถี่จาก 50.00 Hz ขึ้นทีละ 0.125 Hz เมื่อถึงจุดที่ความถี่ที่กำหนดไว้คือ 51.00 Hz ชุดควบคุมดิจิทัลจะส่งสัญญาณฟอลต์ (เส้นสีเขียว) นั่นคือสามารถตรวจจับความถี่ที่สูงกว่ากำหนดไว้ได้และส่งสัญญาณฟอลต์นี้ไปสั่งให้ชุดจำลองระบบไฟฟ้า 3 เฟส ทำการคงค่าความถี่นี้ไว้ (Edge Ext) เมื่อใช้ออสซิลโลสโคปวัดคาบของสัญญาณจะเห็นได้ว่าความถี่จุดที่ทริปนั้นคือ 51.54 Hz นั้นเอง

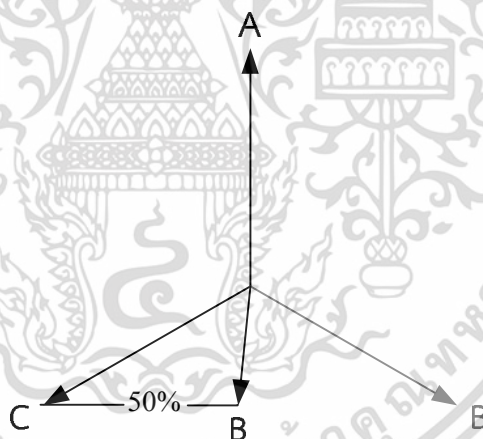
#### 4.7 ผลการทดลองมาตรฐาน SEMI F47

ในการทดลองนี้จะใช้วิธีทดลองอ้างอิงตามมาตรฐาน IEC 61000-4-34 [17] ซึ่งเป็นวิธีการทดลองแรงดันตกชั่วขณะสำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟส จะต้องทดสอบ 2 วิธี คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1) ทดสอบแรงดันตกชั่วขณะทีละเฟสเริ่มจากเฟส A, B, C ที่ระดับแรงดัน 50% ,70%, 80% โดยแต่ละระดับแรงดันที่ทดสอบจะกำหนดจุดเกิดแรงดันตกชั่วขณะทีละเฟสตามลำดับต่อไปนี้ คือ มุม 0, 45, 90, 135, 180, 225, 270, 315 โดยแต่ละมุมทดลอง 5 ครั้ง ดังนั้นต้องทดลองรวมทั้งสิ้น 120 ครั้ง ในการทดลองเมื่อชุดควบคุมดิจิทัลตรวจจับเจอแรงดันตกชั่วขณะต้องหน่วงเวลาให้นานที่สุดและทริปก่อนเวลามาตรฐานกำหนดเพื่อทดสอบว่าชุดควบคุมดิจิทัลสามารถทริปภายในเวลาที่มาตรฐานกำหนดหรือไม่ ผลการทดลองสรุปแสดงดังตารางที่ 4.16 ซึ่งแสดงค่า Trip Time ที่ใช้เวลาทริปมากที่สุด (max) และค่าเวลาที่ทริปน้อยที่สุด (min) จากการทดลองทั้งหมดของเฟส A, B และเฟส C

2) วิธีการทดสอบแรงดันตกชั่วขณะโดยการเลื่อนเฟสจาก  $A \gg B$ ,  $A \gg C$ ,  $B \gg A$ ,  $B \gg C$ ,  $C \gg A$ ,  $C \gg B$  เพื่อให้แรงดันเฟสต่อเฟสมีค่าลดลงตามระดับแรงดันตกชั่วขณะที่จะทดสอบโดยจะทดลองการเลื่อนเฟสจุดละ 5 รอบ ในการทดลองเมื่อชุดควบคุมดิจิทัลตรวจจับเจอแรงดันตกชั่วขณะแบบแรงดันเฟสต่อเฟสลดลงต้องหน่วงเวลาให้นานที่สุดและทริปก่อนเวลามาตรฐานกำหนด เพื่อทดสอบว่าชุดควบคุมดิจิทัลสามารถทนต่อแรงดันตกชั่วขณะได้ตามที่มาตรฐานกำหนดหรือไม่ ผลการทดลองสรุปแสดงดังตารางที่ 4.17 ซึ่งแสดง Trip Time ที่ใช้เวลาทริปมากที่สุด (max) และค่าเวลาที่ทริปน้อยที่สุด (min) จากการทดลองทั้งหมด



รูปที่ 4.14 การทดสอบแรงดันตกชั่วขณะเมื่อแรงดันระหว่างเฟส B และเฟส C ลดลง 50%

จากรูปที่ 4.14 แสดงตัวอย่างแรงดันตกชั่วขณะเมื่อแรงดันระหว่างเฟส B และเฟส C ลดลง 50% ด้วยวิธีตรึงเฟส A และเฟส C ไว้ จากนั้นเลื่อนเฟสจากเฟส B ไปหาเฟส C ทำให้แรงดันระหว่างเฟส B และเฟส C ลดลง 50% โดยชุดควบคุมดิจิทัลต้องสามารถตรวจจับแรงดันตกชั่วขณะที่เกิดในลักษณะนี้ให้ได้ และสั่งทริปภายในเวลาตามมาตรฐานกำหนดในแต่ละระดับแรงดันตกชั่วขณะที่ทดสอบ

#### ตารางที่ 4.16 ผลการทดลองตรวจสอบแรงดันตกชั่วขณะตามมาตรฐาน SEMI F47

ด้วยวิธีจำลองการเกิดแรงดันตกชั่วขณะทีละเฟส

ระดับแรงดันตก	Trip Time (ms)	delay time setting (ms)	Trip Time (ms)	
			ค่า max และ min จากการทดลองของเฟส A, B, C	
มาตรฐาน	มาตรฐาน	ช่วงเวลาในชุดควบคุมดิจิทัล	Max (เวลาในการทริปมากที่สุด)	Min (เวลาในการทริปน้อยที่สุด)
50%	200	-	208.00	85.60
70%	500	200	507.00	323.40
80%	1000	700	1057.00	842.00

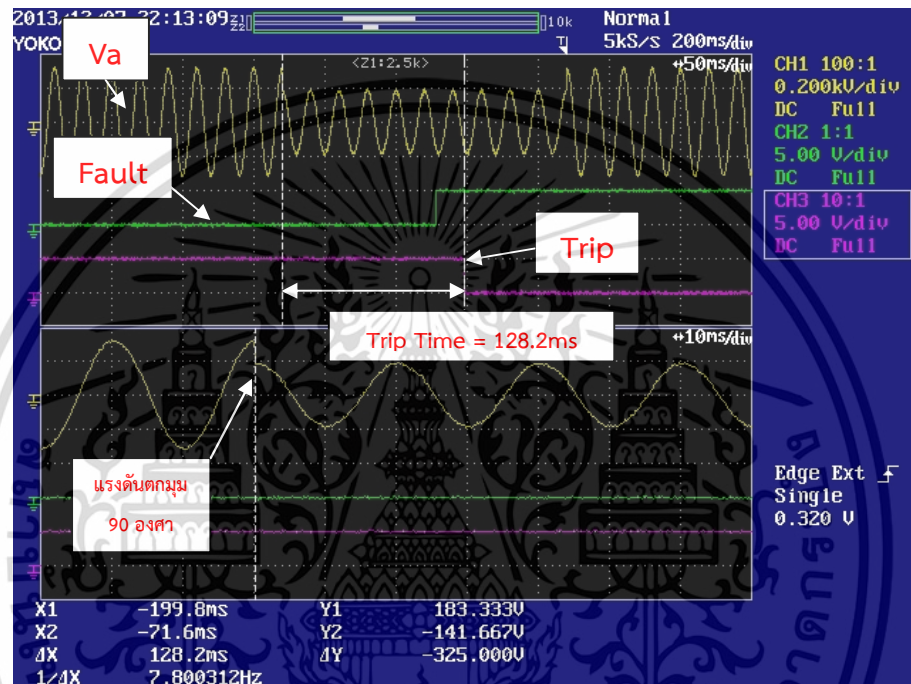
จากตารางที่ 4.16 แสดงผลการทดลองตรวจสอบแรงดันตกชั่วขณะตามมาตรฐาน SEMI F47 ด้วยวิธีจำลองการเกิดแรงดันตกชั่วขณะทีละเฟส ซึ่งได้ผลสรุปดังนี้คือ

จากการทดลองแรงดันตกชั่วขณะ 50% ที่ระดับนี้ไม่ได้มีการตั้งช่วงเวลาไว้ เพราะเวลาที่ใช้ในการตรวจจับพอลต์ใช้เวลานานเกือบเท่าเวลาทริปที่มาตรฐานที่กำหนด คือ 200 ms ดังนั้นจึงไม่ได้ตั้งค่าช่วงเวลาไว้ ทำให้ต้องใช้วิธีตรวจจับเจอพอลต์แล้วสั่งทริปทันทีไม่ต้องช่วงเวลา ผลที่ได้คือมีค่า Trip Time มากสุดที่ 208.00 ms และค่า Trip Time น้อยสุดที่ 85.60 ms จากการทดลองทั้งหมดของเฟส A, B, C ตามลำดับ ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าชุดควบคุมดิจิทัลใช้เวลาตรวจจับและสั่งทริปมากกว่าเวลามาตรฐานกำหนด และค่าเวลาในการทริปน้อยที่สุดใช้เวลาทริปเร็วเกินไป ในส่วนนี้ต้องมีการพัฒนาอัลกอริทึมในการตรวจจับให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

การทดลองแรงดันตก 70% ต้องทริปก่อนเวลา 500 ms ได้ตั้งช่วงเวลาไว้ที่ 200 ms เพื่อให้ชุดควบคุมดิจิทัลหน่วงเวลาให้นานตามที่มาตรฐานกำหนดก่อนจะสั่งทริป โดยผลที่ได้คือมีค่า Trip Time มากสุดที่ 507.00 ms และค่า Trip Time น้อยสุดที่ 323.40 ms จากการทดลองทั้งหมดของเฟส A, B, C ตามลำดับ ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าชุดควบคุมดิจิทัลใช้เวลาตรวจจับและสั่งทริปมากกว่าเวลามาตรฐานกำหนด ดังนั้นต้องมีการลดหน่วงเวลาลงเพื่อให้ชุดควบคุมดิจิทัลสั่งทริปก่อนเกินเวลาที่มาตรฐานกำหนด และค่าเวลาในการทริปน้อยที่สุดใช้เวลาทริปเร็วเกินไป อาจจะเป็นผลจากเวลาในตรวจจับที่ไม่สม่ำเสมอทำให้ค่าช่วงเวลาทำงานผิดพลาดด้วย ในส่วนนี้ต้องมีการพัฒนาอัลกอริทึมในการตรวจจับให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

การทดลองแรงดันตก 80% ต้องทริปก่อนเวลา 1000 ms ได้ตั้งช่วงเวลาไว้ที่ 700 ms โดยผลที่ได้คือมีค่า Trip Time มากสุดที่ 1057.00 ms และค่า Trip Time น้อยสุดที่ 842.00 ms จากการทดลองทั้งหมดของเฟส A, B, C ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า Trip Time ที่ได้จากการทดลองใช้เวลาเกินมาตรฐานกำหนดจากเวลาในการทริปมากที่สุดที่ 1057.00 ms ในส่วนนี้สามารถแก้ไขได้โดยลดการหน่วงเวลาลง

วิเคราะห์การทดลองตรวจสอบแรงดันตกชั่วขณะตามมาตรฐาน SEMI F47 ด้วยวิธีจำลอง การเกิดแรงดันตกชั่วขณะที่ละเฟส ชุดควบคุมดิจิทัลสามารถตรวจจับได้ทุกระดับที่ทดสอบ แต่จะมี กรณีแรงดันตกชั่วขณะ 50% ที่ชุดควบคุมดิจิทัลตรวจจับไม่ทันอีกทั้งไม่มีความสม่ำเสมอของเวลาในการ ทริบ จากผลเห็นได้ว่าเวลาในการทริบน้อยที่สุดเท่ากับ 85.60 ms (ทริบเร็วเกินไป) ในส่วนนี้ต้อง มีการพัฒนาอัลกอริทึมในการตรวจจับให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น ส่วนกรณีแรงดันตกชั่วขณะที่ระดับ 70% และ 80% ต้องมีการปรับปรุงโปรแกรมการตรวจจับเช่นเดียวกัน



รูปที่ 4.15 สัญญาณแรงดันตกชั่วขณะ 50% ที่มุม 90 องศาตามมาตรฐาน SEMI F47

จากรูปที่ 4.15 สัญญาณแรงดันไฟฟ้า  $V_A$  (เส้นสีเหลือง) เมื่อเกิดแรงดันตกชั่วขณะ 50% ที่ มุม 90 องศา ส่งผลให้ชุดควบคุมดิจิทัลส่งสัญญาณฟอลต์ (เส้นสีเขียว) และสั่งทริบ (เส้นสีชมพู) ไม่ให้เกิน 200 ms ตามที่มาตรฐานกำหนดไว้ จากโปรแกรมที่ตั้งไว้คือไม่ต้องหน่วงเวลาให้สั่งทริบ ทันทีเมื่อตรวจจับเจอฟอลต์ โดยจากรูปใช้เวลาในการทริบ คือ 128.2 ms เมื่อรวมเวลาอุปกรณ์ติดต่อ ทำงานอีก 10 ms รวมเวลาในการทริบจริงที่ 138.2 ms เมื่อสังเกตสัญญาณทริบเห็นได้ว่า แรงดันไฟฟ้า  $V_A$  ได้เกิดแรงดันตกชั่วขณะ 50% ประมาณ 5 ไซเคิล ชุดควบคุมดิจิทัลถึงจะตรวจจับ และส่งสัญญาณทริบออกมาได้ อีกทั้งการหน่วงเวลาไม่ได้มีการตั้งไว้แต่จากรูปเห็นได้ว่าการหน่วง เวลาก่อนที่จะทริบ นี่เป็นปัญหาอีกอย่างหนึ่งที่ต้องแก้ไขโปรแกรมให้มีประสิทธิภาพมากกว่านี้

#### ตารางที่ 4.17 ผลการทดลองแรงดันตกชั่วขณะตามมาตรฐาน SEMI F47 ด้วยวิธีจำลอง

การเกิดแรงดันตกชั่วขณะโดยการเลื่อนเฟส

ระดับ	Trip Time (ms)	delay time setting (ms)	Trip Time (ms) จากการทดลอง	
			ค่า max และ min จากการทดลองของเฟส A, B, C	
แรงดันตก	มาตรฐาน	ช่วงเวลาในชุดควบคุมดิจิทัล	Max (เวลาในการทริปมากที่สุด)	Min (เวลาในการทริปน้อยที่สุด)
50%	200	-	208.50	94.50
70%	500	200	508.50	398.00
80%	1000	700	1010.00	818.50

จากตารางที่ 4.17 ผลการทดลองที่ได้ชุดควบคุมดิจิทัลสามารถตรวจจับแรงดันตกชั่วขณะที่เกิดขึ้นโดยการเลื่อนเฟสตามระดับความรุนแรงได้ จากการทดลองแรงดันตกชั่วขณะ 50% ที่ระดับนี้ไม่ได้มีการตั้งช่วงเวลา เพราะเวลาที่ใช้ในการตรวจจับฟอลต์ใช้เวลานานเกือบเท่าเวลามาตรฐานที่กำหนดคือ 200 ms ดังนั้นจึงไม่ได้ตั้งค่าช่วงเวลาไว้ จึงใช้วิธีตรวจจับเจอฟอลต์แล้วสั่งทริปทันที ผลที่ได้คือมีค่า Trip Time มากสุดที่ 208.50 ms และค่า Trip Time น้อยสุดที่ 94.50 ms

การทดลองแรงดันตก 70% ต้องทริปก่อนเวลา 500 ms ได้ตั้งช่วงเวลาไว้ที่ 200 ms โดยผลที่ได้คือมีค่า Trip Time มากสุดที่ 508.50 ms และค่า Trip Time น้อยสุดที่ 398.00 ms

การทดลองแรงดันตก 80% ต้องทริปก่อนเวลา 1000 ms ได้ตั้งช่วงเวลาไว้ที่ 700 ms โดยผลที่ได้คือมีค่า Trip Time มากสุดที่ 1010.00 ms และค่า Trip Time น้อยสุดที่ 818.50 ms

เมื่อวิเคราะห์จากผลการทดลองกรณีแรงดันตกชั่วขณะ 50% ชุดควบคุมดิจิทัลตรวจจับไม่ทันอีกทั้งไม่มีความสม่ำเสมอของเวลาในการทริป จากผลเห็นได้ว่าเวลาในการทริปน้อยที่สุดเท่ากับ 85.60 ms (ทริปเร็วเกินไป) แนวทางแก้ไขคือต้องพัฒนาอัลกอริทึมในการตรวจจับให้เร็วและมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น ส่วนกรณีแรงดันตกชั่วขณะที่ระดับ 70% และ 80% ค่า Trip Time มากที่สุดเกินเวลามาตรฐานกำหนดเพียงเล็กน้อย สามารถแก้ไขได้โดยลดการหน่วงเวลา

#### 4.8 ผลการทดลองมาตรฐานเส้นโค้ง ITIC

เป็นการทดสอบแรงดันตกชั่วขณะแต่ละเฟสที่ระดับ 0%, 70%, 80%, 120% ตามลำดับจะทดลองแต่ละระดับอย่างละ 5 รอบต่อเฟส A, B, C เพื่อดูค่า Trip Time ให้ผ่านมาตรฐานกำหนดโดยผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.18

**ตารางที่ 4.18** ผลการทดลองตรวจสอบแรงดันตกชั่วขณะตามมาตรฐานเส้นโค้ง ITIC

การทดลอง	Trip Time (ms)	delay time setting (ms)	Trip Time จากการทดลอง (ms)	
	มาตรฐาน	หน่วงเวลาใน ชุดควบคุมดิจิทัล	MAX	MIN
แรงดันตก 0% 3 เฟสไม่สมดุล	20	-	263.30	151.30
แรงดันตก 70% 3 เฟสไม่สมดุล	500	200	483.00	333.00
แรงดันตก 80% 3 เฟสไม่สมดุล	10000	9000	9305.00	9185.00
แรงดันเกิน 120% 3 เฟสไม่สมดุล	500	150	495.80	326.60

จากตารางที่ 4.18 ผลการทดลองตรวจสอบแรงดันตกชั่วขณะตามมาตรฐานเส้นโค้ง ITIC โดยแบ่งการทดลองเป็น 4 ระดับ คือ จำลองแรงดันตก 0%, 70%, 80% และแรงดันเกินที่ 120% แบบที่ละเฟส A, B, C ตามลำดับ ได้ผลการทดลองดังนี้ คือ ที่ระดับแรงดันตก 0% ที่ระดับนี้ไม่ได้มีการตั้งหน่วงเวลาไว้ เพราะเวลาที่ใช้ในการตรวจจับฟอลต์ใช้เวลานานเกินมาตรฐานที่กำหนดคือ 20 ms ดังนั้นจึงไม่ได้ตั้งค่าหน่วงเวลาไว้ จึงใช้วิธีตรวจจับเจอฟอลต์แล้วสั่งทริบทันที ไม่ต้องหน่วงเวลา ผลที่ได้คือมีค่า Trip Time มากสุดที่ 263.30 ms และค่า Trip Time น้อยสุดที่ 151.30 ms จะเห็นได้ว่า Trip Time น้อยที่สุดยังใช้เวลาเกินมาตรฐานกำหนดประมาณ 130 ms (จากที่ควรทริบก่อน 20 ms) ในส่วนนี้ต้องมีการแก้ไขการตรวจจับให้เร็วยิ่งขึ้นถึงจะผ่านมาตรฐานการทดสอบที่ระดับ 0% นี้

การทดลองแรงดันตก 70% ต้องทริบก่อนเวลา 500 ms ได้ตั้งหน่วงเวลาไว้ที่ 200 ms โดยผลที่ได้คือมีค่า Trip Time มากสุดที่ 483.00 ms และค่า Trip Time น้อยสุดที่ 333.00 ms เห็นได้ว่าการทดลองที่ระดับนี้สามารถสั่งทริบได้ก่อนเวลาตามมาตรฐานกำหนด

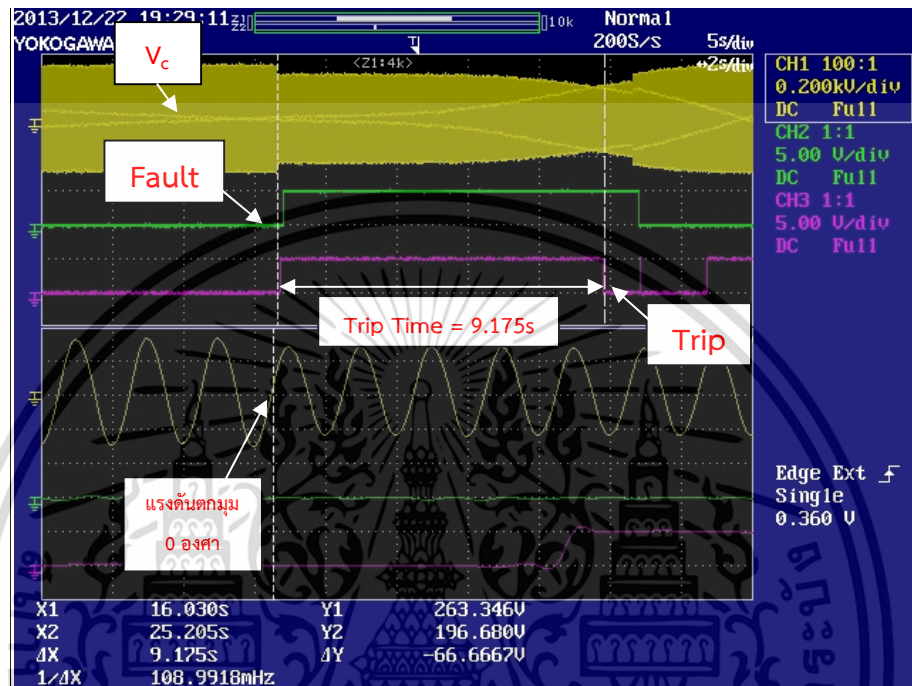
การทดลองแรงดันตก 80% ต้องทริบก่อนเวลา 10000 ms ได้ตั้งหน่วงเวลาไว้ที่ 9000 ms โดยผลที่ได้คือมีค่า Trip Time มากสุดที่ 9305 ms และค่า Trip Time น้อยสุดที่ 9185 ms ที่ระดับนี้ทดลองเพียงเฟสละ 1 ครั้งเท่านั้นเพราะค่า Trip Time การทดลองที่ได้ผ่านมาตรฐานกำหนด

และสุดท้ายที่การทดลองแรงดันเกิน 120% ต้องทริบก่อนเวลา 500 ms ได้ตั้งหน่วงเวลาไว้ที่ 150ms โดยผลที่ได้คือมีค่า Trip Time มากสุดที่ 495.80 ms และค่า Trip Time น้อยสุดที่ 326.60 ms จะเห็นได้ว่าการทดลองที่ระดับนี้สามารถสั่งทริบได้ก่อนเวลาตามมาตรฐานกำหนดเช่นเดียวกัน

วิเคราะห์ผลการทดลองตรวจสอบแรงดันตกชั่วขณะตามมาตรฐานเส้นโค้ง ITIC มีปัญหาที่ชุดควบคุมดิจิทัลตรวจจับไม่ทันคือ ที่ระดับแรงดัน 0% มีค่า Trip Time มากสุดที่ 263.30 ms และน้อยสุดที่ 151.30 ms ซึ่งชุดควบคุมดิจิทัลใช้เวลามากกว่า 20 ms ในการตรวจจับเจอ ซึ่งใช้เวลานานเกินมาตรฐานกำหนดและเป็นปัญหาเดียวกันเหมือนการตรวจจับแรงดันตก < 50% ของมาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

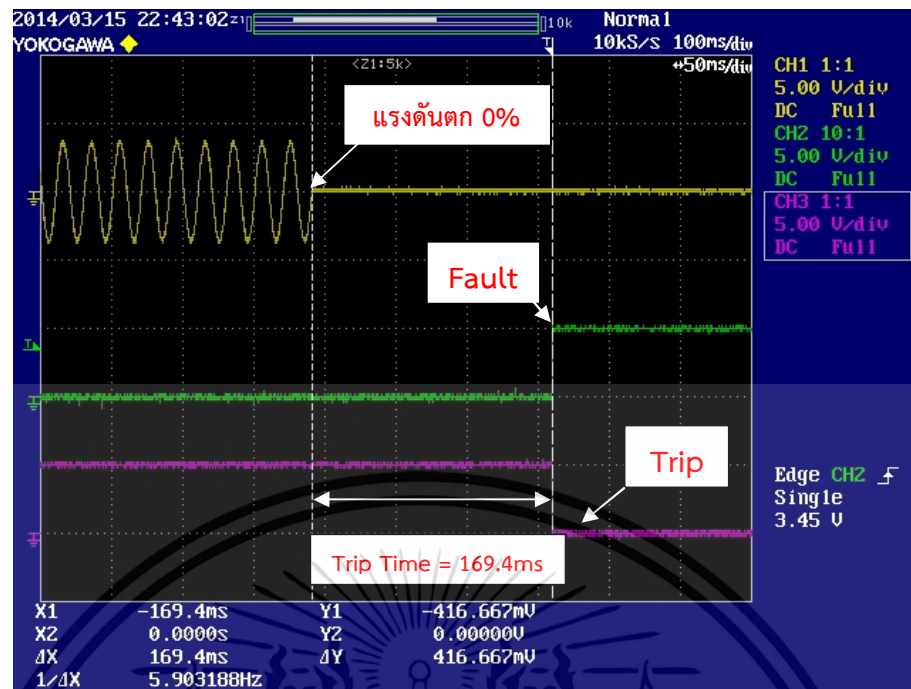
IEEE 1547 ดังนั้นแนวทางแก้ไขคือพยายามนำฟังก์ชันการตรวจจับฟอลต์ที่ตรวจจับไม่ทันบน Realtime Embedded Controller ไปใส่ใน FPGA อาจจะช่วยในการตรวจจับได้เร็วมากยิ่งขึ้นเพื่อจะผ่านการทดสอบที่ระดับแรงดันต่ำกว่า 50% และ 0%



รูปที่ 4.16 สัญญาณแรงดันตกชั่วขณะ 80% ตามมาตรฐานเส้นโค้ง ITIC

จากรูปที่ 4.16 สัญญาณแรงดันไฟฟ้า  $V_c$  (เส้นสีเหลือง) เมื่อเกิดแรงดันตกชั่วขณะ 80% ส่งผลให้ชุดควบคุมดิจิทัลส่งสัญญาณทริป (เส้นสีเขียว) และจะหน่วงเวลาไว้ก่อนจะสั่งทริป (เส้นสีชมพู) ไม่ให้เกิน 10 s ตามที่มาตรฐานกำหนดไว้ โดยจากรูปใช้เวลาในการทริปคือ 9.175 s เมื่อรวมกับเวลาการทำงานของอุปกรณ์ตัดต่อคือ 10 ms ดังนั้นใช้เวลารวมในการทริปทั้งหมดเป็นเวลา 9.185 s ผ่านมาตรฐานกำหนดคือ 10 s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 สัญญาณแรงดันตกชั่วขณะ 0% ตามมาตรฐานเส้นโค้ง ITIC

จากรูปที่ 4.17 สัญญาณแรงดันไฟฟ้า  $V_A$  (เส้นสีเหลือง) เมื่อเกิดแรงดันตกชั่วขณะ 0% ส่งผลให้ชุดควบคุมดิจิทัลส่งสัญญาณทริป (เส้นสีเขียว) และสั่งทริป (เส้นสีชมพู) โดยจากรูปใช้เวลาในการทริปคือ 169.4 ms เมื่อรวมกับเวลาการทำงานของอุปกรณ์ตัดต่อคือ 10 ms ดังนั้นใช้เวลารวมในการทริปทั้งหมดเป็นเวลา 179.4 ms จะเห็นได้ว่าที่ระดับแรงดันตกชั่วขณะ 0% Trip Time ตามมาตรฐานคือ 20 ms แต่ค่าที่ได้จากการทดลองชุดควบคุมดิจิทัลใช้เวลาในการตรวจจับเกินมาตรฐานกำหนด แนวทางแก้ไข คือ อาจต้องใช้อุปกรณ์โปรแกรมตรวจจับใส่ใน FPGA เพื่อให้การตรวจจับรวดเร็วยิ่งขึ้น ถึงจะผ่านมาตรฐานการทดสอบที่ระดับ 0% นี้

## บทที่ 5

### สรุปและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุป

งานวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นศึกษาการออกแบบชุดควบคุมดิจิทัล ซึ่งทำหน้าที่เป็นรีเลย์ตรวจสอบสถานะความผิดปกติต่าง ๆ ของกริดและไมโครกริด เพื่อควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ตัดต่อซึ่งถูกโปรแกรมจาก LabVIEW โดยใช้ชุดจำลองระบบไฟฟ้า 3 เฟสจำลองความผิดปกติต่าง ๆ ทางไฟฟ้า เพื่อทดสอบการทำงานของชุดควบคุมดิจิทัล จากผลการทดลองในบทที่ 4 จะเห็นได้ว่าชุดควบคุมดิจิทัลสามารถตรวจสอบความผิดปกติทางไฟฟ้าต่างๆ ได้ตามที่โปรแกรมไว้ ซึ่งสามารถสรุปผลการทดลองตามมาตรฐานต่างๆ ได้ดังนี้

การทดลองมาตรฐาน IEEE 1547 ในส่วนของการตรวจสอบแรงดันเกินและแรงดันต่ำ (Magnitude Test) มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่ 7.41 จากการทดลองตรวจสอบแรงดันเกินและแรงดันต่ำทั้งหมด แนวทางแก้ไขเพื่อให้การทดลอง Magnitude Test มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนลดน้อยลง คือ ปรับแต่งวงจรส่วนวัดแรงดันและพัฒนาในส่วนของโปรแกรมการตรวจจับให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น ในส่วนของการตรวจสอบแรงดันเกินและแรงดันต่ำ (Time Test) จะมีอยู่ 2 กรณีที่ชุดควบคุมดิจิทัลตรวจจับไม่ทัน คือ กรณีแรงดัน  $< 50\%$ , 3 เฟสไม่สมดุล และกรณีแรงดัน  $\geq 120\%$ , 3 เฟสไม่สมดุล ซึ่งใช้เวลา Trip Time มากกว่ามาตรฐานกำหนด โดยที่ระดับแรงดัน  $< 50\%$  มีค่า Trip Time มากสุดที่ 223.3 ms และระดับแรงดัน  $\geq 120\%$  มีค่า Trip Time มากสุดที่ 214.8 ms โดยมีการหน่วงเวลาที่ 40 ms แสดงว่าถึงไม่มีการหน่วงเวลาชุดควบคุมดิจิทัลต้องใช้เวลามากกว่า 160 ms (เวลาทริปมากที่สุดตามมาตรฐานกำหนด) ในส่วนนี้ต้องมีการแก้ไขการตรวจจับให้มีความเร็วมากยิ่งขึ้นเพื่อจะผ่านมาตรฐาน

กรณีตรวจสอบความถี่สูงและความถี่ต่ำทั้งมาตรฐาน IEEE 1547 และ VSPP ต้องปรับปรุงแก้ไขในส่วนการหน่วงเวลาเท่านั้น เพราะเวลาในการตรวจจับพอลต์ของความถี่ ชุดควบคุมดิจิทัลใช้เวลาตรวจจับพอลต์น้อยกว่าเวลาทริปที่มาตรฐานกำหนด ดังนั้นการแก้ไขการหน่วงเวลาจะได้ผลมากกว่า เช่น ถ้าเวลาทริปเกินเวลาที่กำหนด แก้ไขโดยลดเวลาหน่วงการทริปลงซึ่งอาจต้องใช้เวลาในการปรับแก้ให้ได้ค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับความถี่ที่ต้องการทดสอบ เพื่อให้ผ่านมาตรฐานที่กำหนด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีตรวจสอบการชิงโครโนซ์ ชุดควบคุมดิจิทัลสามารถตรวจสอบขนาดของแรงดัน และความถี่ของไมโครกริดกับกริดเพื่อที่จะเชื่อมต่อระบบทั้งสองเข้าด้วยกัน เมื่อค่าพารามิเตอร์ที่กล่าวมา อยู่ภายในค่าที่กำหนด ถ้าค่าพารามิเตอร์ต่างๆอยู่นอกช่วงที่กำหนดไว้ต้องไม่มีการเชื่อมต่อระบบ ซึ่ง ชุดควบคุมดิจิทัลสามารถตรวจสอบผ่านทุกพารามิเตอร์ที่ทดลอง

กรณีตรวจสอบกำลังไฟฟ้าไหลย้อนกลับ ชุดควบคุมดิจิทัลสามารถเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้า ที่ตั้งไว้เริ่มต้น ถ้ากำลังไฟฟ้าที่วัดได้มีทิศทางไหลกลับจากที่ตั้งไว้ ระบบเชื่อมต่อสามารถปลดไมโครกริด ออกจากระบบไฟฟ้าได้ตามที่โปรแกรมไว้

กรณีตรวจสอบกระแสเกินแบบทำงานทันทีและแบบผกผันเวลามาก ชุดควบคุมดิจิทัลสามารถ ตรวจจับและสั่งทริปได้ และการทดลอง Time Test ของการตรวจสอบกระแสเกินแบบผกผันเวลา มาก ชุดควบคุมดิจิทัลสามารถคำนวณค่าการหน่วงเวลาตามกระแสฟลัดด์ที่เกิดขึ้นได้ และการ พัฒนาต่อไปคือทดลองตรวจสอบกระแสเกินแบบผกผันเวลาอื่นๆ เพิ่มเติม

ในส่วนของมาตรฐาน SEMI F47 และเส้นโค้ง ITIC ไม่ได้ทดลอง Magnitude Test เพราะมีการ ทดลองเฉพาะการตอบสนองเวลาในการทริป (Time Test) เท่านั้น เมื่อดูผลการทดลอง Time Test ในกรณีตรวจสอบแรงดันตกชั่วขณะในระดับความรุนแรงต่างๆ เห็นได้ว่าชุดควบคุมดิจิทัลใช้เวลาใน การตรวจจับฟลัดด์และสั่งทริปภายในเวลาที่กำหนด อาจมีบางกรณีที่ชุดควบคุมดิจิทัลใช้เวลาใน การทริปมากกว่ามาตรฐานกำหนดแต่สามารถแก้ไขได้โดยการหน่วงเวลาลงเท่านั้น แต่มี 2 กรณีที่ไม่ สามารถลดการหน่วงเวลาได้ คือ หากเป็นการตรวจจับแรงดันตกชั่วขณะที่ 0%, 50% แบบสามเฟส ไม่สมดุล ชุดควบคุมดิจิทัลจะใช้เวลาในการตรวจจับฟลัดด์เกินมาตรฐานที่กำหนด ส่งผลให้เวลาใน การทริปเกินมาตรฐานกำหนด แนวทางแก้ไขคือหากมีมาตรฐานที่กำหนดเวลาในการทริปน้อยมากๆ เช่น 20 ms ควรโปรแกรมการตรวจจับลงในส่วน FPGA และปรับปรุงอัลกอริทึมให้มีประสิทธิภาพ มากขึ้น อาจช่วยเรื่องเวลาในการตรวจจับให้เร็วขึ้นได้

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

### 5.2.1 ด้านฮาร์ดแวร์

- ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่สามารถวัดค่าแรงดัน 220 V โดยตรง เพื่อลดวงจรส่วน วัดแรงดันกริดและไมโครกริด
- ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่สามารถวัดค่ากระแส เพื่อลดวงจรส่วนวัดกระแสของ กริดและไมโครกริด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ปรับปรุงความสามารถของชุดจำลองระบบไฟฟ้า 3 เฟสให้มากขึ้น เช่น เพิ่มโปรแกรมการจำลองความผิดปกติแบบอื่นๆ

### 5.2.2 ด้านซอฟต์แวร์

- ปรับปรุงโปรแกรมในส่วนของ FPGA ให้สามารถเพิ่มการคำนวณหาค่าแรงดัน RMS และความถี่ของไมโครกริด
- พัฒนาในส่วนของการแสดงสถานะของกริดและไมโครกริด เช่น ค่าแรงดัน, ความถี่ กำลังไฟฟ้า, มุมเฟส อาจแบ่งหน้าที่ส่วนนี้ไปยังชุดควบคุมดิจิทัลอีกหนึ่งตัว และอีกหนึ่งตัวทำหน้าที่ตรวจสอบพอลต์เพียงอย่างเดียว ซึ่งวิธีนี้จะใช้ค่าใช้จ่ายมากเพราะอุปกรณ์มีราคาแพง
- พัฒนาอัลกอริทึมในการตรวจจับแรงดันที่ต่ำกว่า 50% จากผลการทดลองเห็นได้ว่า เวลาในการตรวจจับแรงดันต่ำจะใช้เวลาตรวจจับมากกว่าเวลาหริบขึ้นต่ำที่มาตรฐานระบุไว้ ทำให้การทดลองในบางมาตรฐานไม่ผ่าน อาจเพิ่มโปรแกรมตรวจจับลงใน ส่วน FPGA เพราะทำงานเร็วกว่าส่วน Real Time มาก แต่ข้อควรระวังคือ พื้นที่โปรแกรม FPGA อาจไม่พอหากป้อนโปรแกรมมากเกินไป
- พัฒนาด้านการเก็บข้อมูลของแรงดัน, ความถี่, กระแส, หรือจำนวนเหตุการณ์เมื่อเกิดความผิดปกติเกิดขึ้นและสั่งหริบ เพื่อใช้เป็นข้อมูลสถิติในการวิเคราะห์ต่อไป

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Joham Driesen, Farid Katiraei. “Design for Distributed Energy Resources.” **IEEEpower & energy**, Vol.6, No.3, May/June 2008. pp.30-40
- [2] ศูนย์นวัตกรรมระบบพลังงาน. “ไมโครกริดคืออะไร” [Online]. Available : <http://www.kmitl.ac.th/cines/>. 2010.
- [3] S. Chowdhury, S.P. Chowdhury, P. Crossley. **Microgrids and Active Distribution Networks**. London : The Institution of Engineering and Technology, Inc. 2009.
- [4] N. R. Friedman. “Technology Review and Research Needs.” **Distributed Energy Resources Interconnection Systems**, September 2002. pp.1-6
- [5] J. Lynch, V. John, S.M. Danial, E. Benedict, I. Vihinen, B. Kroposki, C. Pink . “Final Report September 2004 - May 2006.” **Flexible DER Utility Interface System**, August 2006. pp. 12-13
- [6] IEEE Std 1547™-2003, **IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems**. 2009
- [7] การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค. ระเบียบการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ว่าด้วยข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้า, 2551.
- [8] การไฟฟ้านครหลวง. ระเบียบการไฟฟ้านครหลวง ว่าด้วยข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้า, 2551.
- [9] Electric Power Research Institute. “SEMI F47-0706 Abstract” [Online]. Available : <http://f47testing.epri.com/f47abstract.html>. 2014.
- [10] Information Technology Industry Council (ITIC), ITI (CBEMA) **Application Note**. 2000.
- [11] IEC 60255-3. **Electrical Relays - Part 3: Single input energizing quantity measuring relays with dependent or independent time**. 1989.
- [12] Akagi, Hirofumi. **Instantaneous power theory and applications to power conditioning**. Hoboken, NJ, John Wiley, 2007.
- [13] National Instruments Corporation. “NI CompactRIO” [Online]. Available : <http://www.ni.com/compactrio/>. 2012.
- [14] Bishop, Robert H. **LabVIEW 7 express**. New JERSEY: Prentice-Hall, Inc. 2006.
- [15] Gary W. Johnson, Richard Jennings. **LabVIEW Graphical Programming**. Fourth Edition, McGraw Hill, Inc. 2009.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

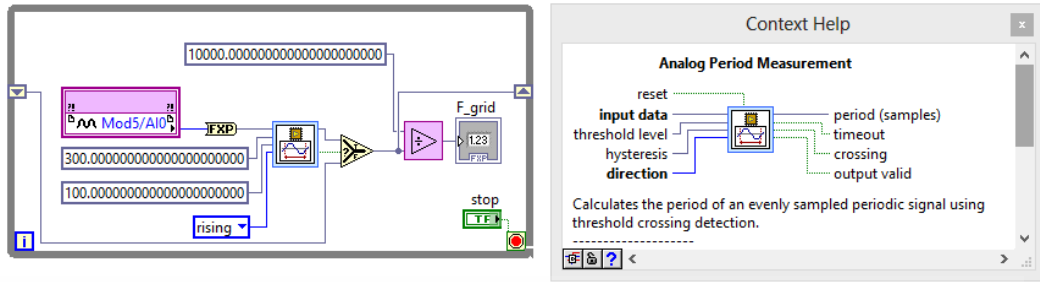
- [16] IEEE Std 1547.1™, IEEE Standard Conformance Test Procedures for Equipment Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems. 2009.
- [17] IEC 61000-4-11, Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-11: Testing and measurement techniques - Voltage dips, short interruptions and voltage variations immunity tests. 2004.



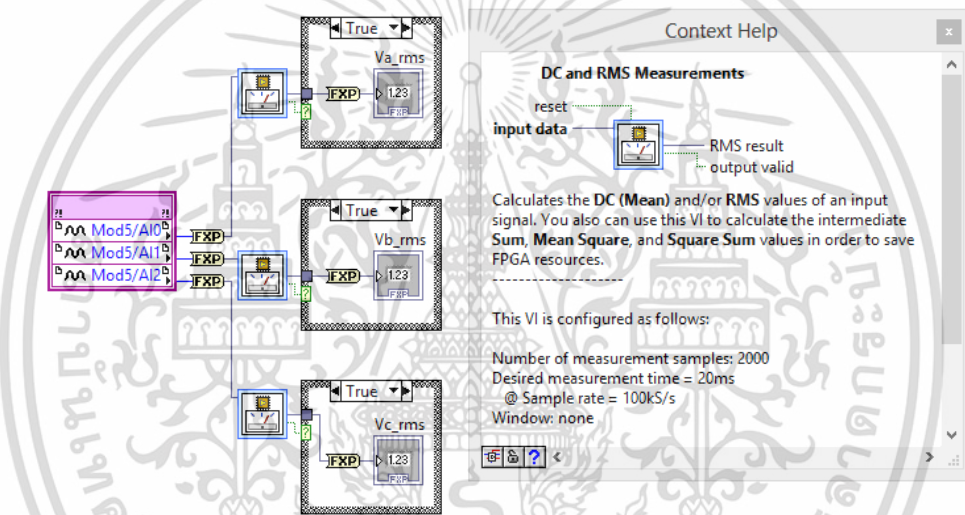
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



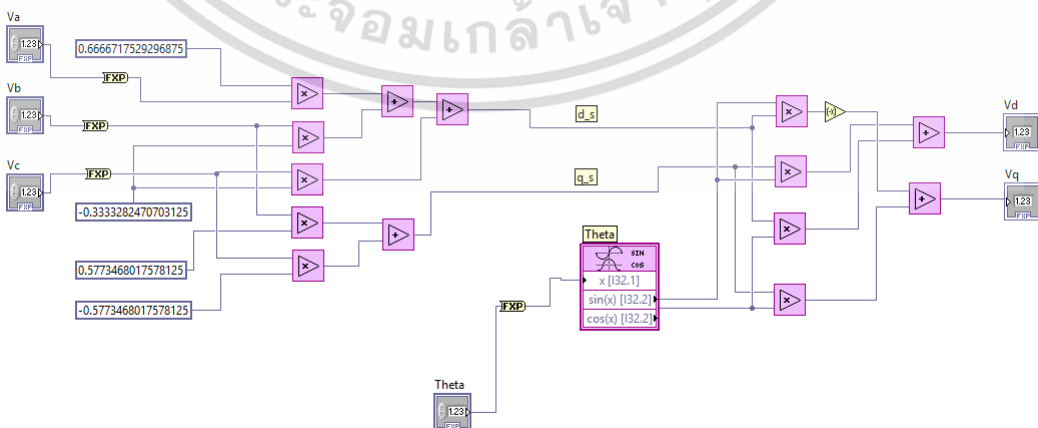
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



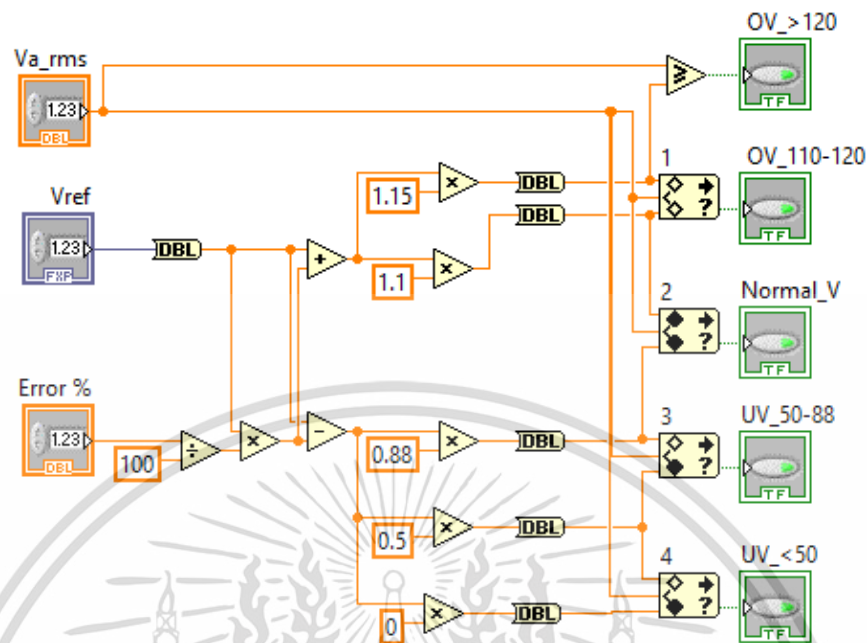
รูปที่ ก.1 โปรแกรมตรวจจับความถี่ในส่วน FPGA



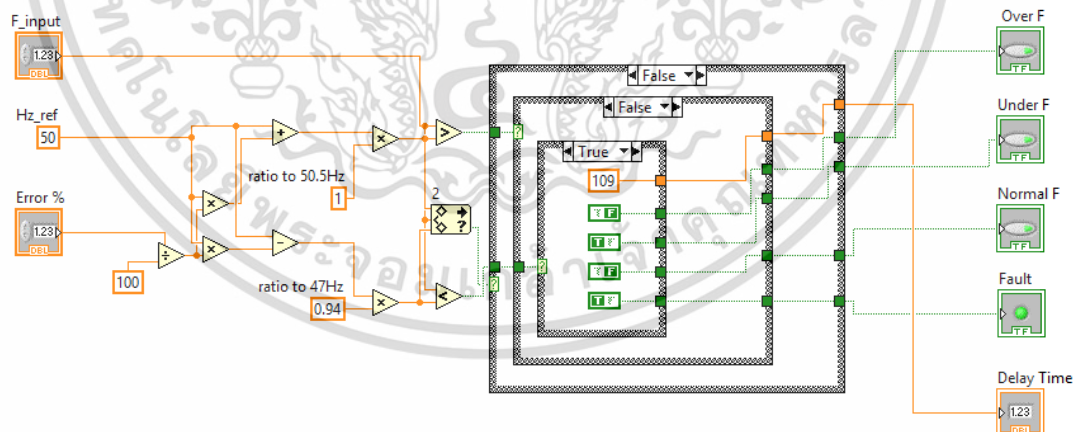
รูปที่ ก.2 โปรแกรมตรวจจับแรงดันอาร์เอ็มเอสในส่วน FPGA



รูปที่ ก.3 โปรแกรมแปลงสัญญาณสามเฟสเป็นสัญญาณ dq ในกรอบอ้างอิงซิงโครนัสในส่วน FPGA เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวอนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



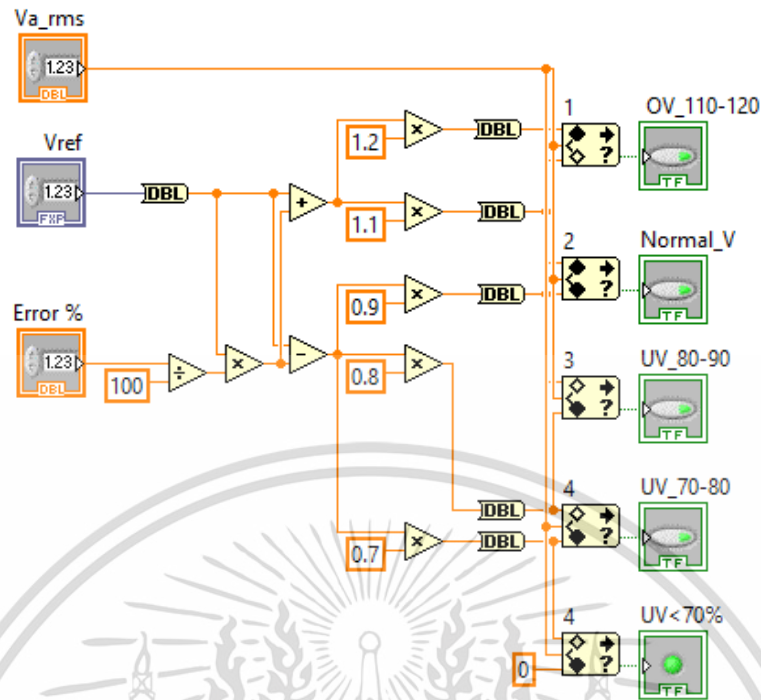
รูปที่ ก.4 โปรแกรมตรวจสอบแรงดันที่อ้างอิงจากมาตรฐาน IEEE1547 ในส่วน Realtime Embedded Controller



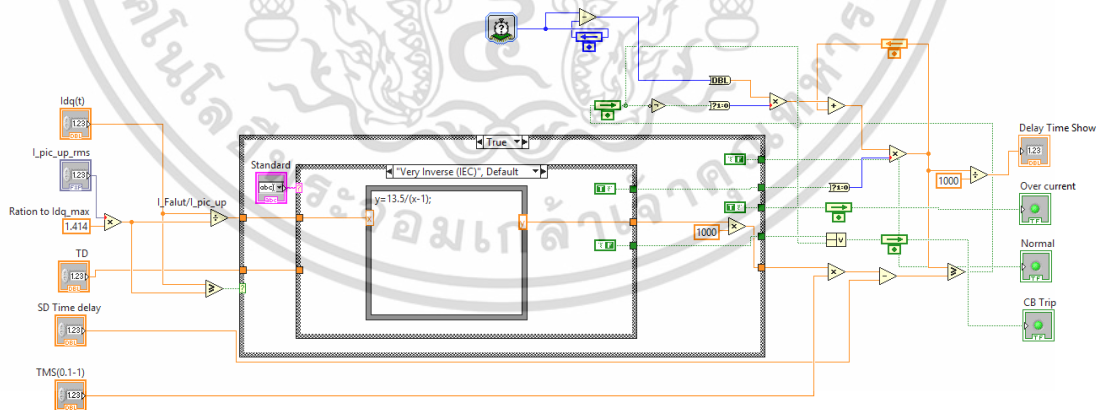
รูปที่ ก.5 โปรแกรมตรวจสอบความถี่ที่อ้างอิงจากมาตรฐาน IEEE 1547 ในส่วน Realtime Embedded Controller

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



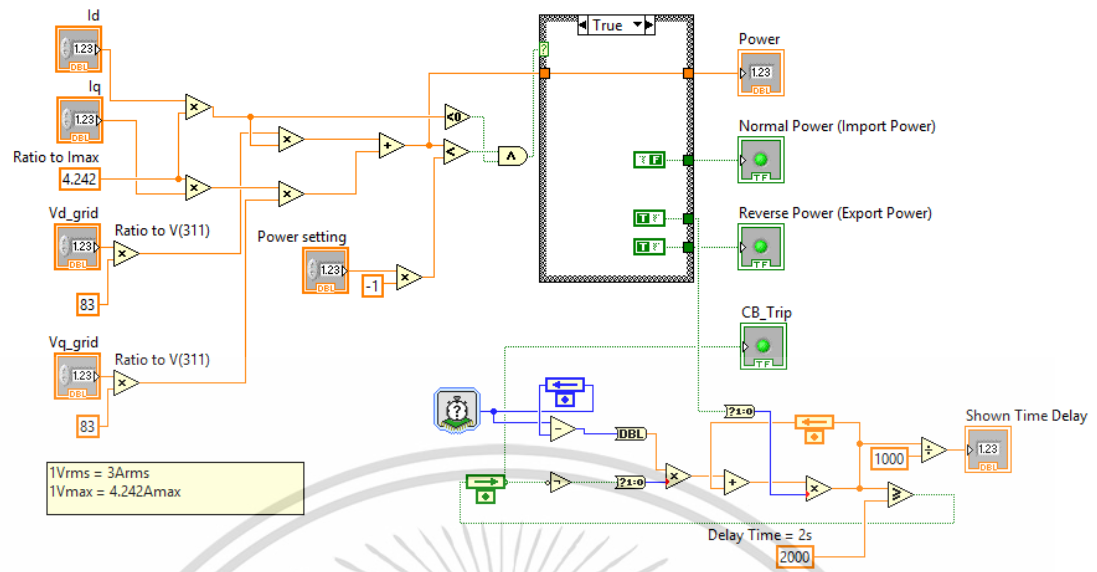


รูปที่ ก.8 โปรแกรมตรวจจับแรงดันที่อ้างอิงจากมาตรฐานเส้นโค้ง ITIC ในส่วน Realtime Embedded Controller



รูปที่ ก.9 โปรแกรมตรวจสอบกระแสเกินในส่วน Realtime Embedded Controller

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.10 โปรแกรมตรวจสอบกำลังไฟฟ้าไหลย้อนกลับในส่วน Realtime Embedded Controller

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 ผลการทดลองตรวจสอบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำ (Magnitude Test)

ตามมาตรฐาน IEEE 1547

การทดลอง	Magnitude Setting (V)	Magnitude Trip (V)				
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5
แรงดันต่ำ 50% 3 เฟสสมดุล	112.00	120.27	<b><u>120.30</u></b>	114.80	116.97	117.07
แรงดันต่ำ 50% เฟส A	112.00	110.70	<b><u>113.80</u></b>	110.80	110.80	110.80
แรงดันต่ำ 50% เฟส B	112.00	110.80	110.80	<b><u>110.30</u></b>	110.80	110.80
แรงดันต่ำ 50% เฟส C	112.00	<b><u>106.90</u></b>	110.30	110.70	110.40	108.30
แรงดันต่ำ 88% 3 เฟสสมดุล	193.60	<b><u>201.40</u></b>	200.37	200.37	201.40	201.40
แรงดันต่ำ 88% เฟส A	193.60	198.00	197.00	198.20	197.30	<b><u>198.40</u></b>
แรงดันต่ำ 88% เฟส B	193.60	197.50	197.00	197.40	197.40	<b><u>198.00</u></b>
แรงดันต่ำ 88% เฟส C	193.60	197.70	196.20	198.30	<b><u>198.50</u></b>	197.80
แรงดันเกิน 110% 3 เฟสสมดุล	246.40	<b><u>242.80</u></b>	244.07	244.07	243.00	242.97
แรงดันเกิน 110% เฟส A	246.40	248.80	248.60	248.60	<b><u>249.00</u></b>	248.90
แรงดันเกิน 110% เฟส B	246.40	248.20	<b><u>248.90</u></b>	248.20	248.20	247.90
แรงดันเกิน 110% เฟส C	246.40	248.40	248.40	<b><u>249.20</u></b>	248.10	248.30
แรงดันเกิน 120% 3 เฟสสมดุล	257.60	252.70	256.02	253.17	253.93	<b><u>249.30</u></b>
แรงดันเกิน 120% เฟส A	257.60	256.20	<b><u>261.00</u></b>	260.80	261.00	260.90
แรงดันเกิน 120% เฟส B	257.60	<b><u>261.90</u></b>	261.50	260.50	261.70	261.80
แรงดันสูง 120% เฟส C	257.60	261.30	261.30	261.60	<b><u>262.20</u></b>	262.20

\*ระดับแรงดันปกติที่ 224 โวลต์, เพิ่ม/ลด แรงดันครั้งละ 0.11 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.2 ผลการทดลองตรวจสอบแรงดันเกิน/แรงดันต่ำ (Time Test)

ตามมาตรฐาน IEEE 1547

การทดลอง	Trip Time (ms)	delay time setting (ms)	Trip Time จากการทดลอง (ms)				
	มาตรฐาน	ช่วงเวลาใน ชุดควบคุมดิจิทัล	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5
V<50% 3 เฟสสมดุล	160	140	170.8	<b><u>173.3</u></b>	173.2	164.5	172.4
50%≤V<88% 3 เฟสสมดุล	2000	1850	2030.0	2030.0	2030.0	<b><u>2040.0</u></b>	2030.0
110%<V<120% 3 เฟสสมดุล	1000	800	1050.0	1150.0	1100.0	1090.0	<b><u>1190.0</u></b>
V≥120% 3 เฟสสมดุล	160	120	173.9	179.7	179.7	177.2	<b><u>181.0</u></b>
V<50% เฟส A	160	40	177.2	177.2	192.9	143.9	179.7
V<50% เฟส B			205.3	215.0	221.3	189.7	201.1
V<50% เฟส C			146.8	148.2	207.0	<b><u>223.3</u></b>	170.7
50%≤V<88% เฟส A	2000	1900	2020.0	<b><u>2100.0</u></b>	2020.0	2050.0	2080.0
50%≤V<88% เฟส B			2070.0	2020.0	2070.0	2000.0	1990.0
50%≤V<88% เฟส C			2020.0	2060.0	2070.0	2080.0	2010.0
110%<V<120% เฟส A	1000	1000	1130.0	1170.0	1200.0	1160.0	1110.0
110%<V<120% เฟส B			1140.0	1200.0	1190.0	1120.0	1150.0
110%<V<120% เฟส C			1150.0	1110.0	<b><u>1210.0</u></b>	1170.0	1180.0
V≥120% เฟส A	160	40	160.1	206.7	158.0	166.8	167.6
V≥120% เฟส B			177.1	208.3	207.5	169.9	202.6
V≥120% เฟส C			179.2	202.3	195.4	149.8	<b><u>214.8</u></b>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ตารางที่ ข.3 ผลการทดลองตรวจสอบความถี่สูง/ความถี่ต่ำ (Magnitude Test)

ตามมาตรฐาน IEEE 1547

การทดลอง	Magnitude Setting (Hz)	Magnitude Trip (Hz)				
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5
ความถี่สูง	50.50	50.51	50.54	50.53	50.55	<b>50.64</b>
ความถี่ต่ำ	47.00	<b>46.29</b>	46.95	46.95	46.73	47.17

### ตารางที่ ข.4 ผลการทดลองตรวจสอบความถี่สูง/ความถี่ต่ำ (Time Test) ตามมาตรฐาน IEEE 1547

การทดลอง	Trip Time (ms)	delay time setting (ms)	Trip Time จากการทดลอง (ms)				
	มาตรฐาน	ช่วงเวลาในชุดควบคุมดิจิทัล	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5
ความถี่สูง > 50.50 Hz	160	109	169.3	169.3	166.5	171.6	<b>175.1</b>
ความถี่ต่ำ < 47.00 Hz	160	109	169.1	179.9	<b>183.5</b>	167.1	174.3

\*ความถี่สูงทดสอบที่ 52 Hz, ความถี่ต่ำทดสอบที่ 45 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ ข.5** ผลการทดลองตรวจสอบการชิงโครโนซ์เมื่อความถี่ของกริดและไมโครกริด

มีค่าเกินมาตรฐานกำหนด

ทดสอบ ครั้งที่	ความถี่ (Hz) ตามมาตรฐาน	อยู่ในพิกัด (ค้ำง 5 Cycle จิ่งสั่งชิงโครโนซ์)		อยู่นอกพิกัด (ค้ำงไว้ 3 นาทีห้ามสั่งชิงโครโนซ์)	
		ความถี่ (Hz) ที่ทดสอบ	ผ่าน/ไม่ผ่าน	ความถี่ (Hz) ที่ทดสอบ	ผ่าน/ไม่ผ่าน
1	50.30	50.25	ผ่าน	50.47	ผ่าน
2		50.17	ผ่าน	50.83	ผ่าน
3		50.02	ผ่าน	51.00	ผ่าน
4		50.10	ผ่าน	52.11	ผ่าน
5		50.00	ผ่าน	53.05	ผ่าน

**ตารางที่ ข.6** ผลการทดลองตรวจสอบการชิงโครโนซ์เมื่อความถี่ของกริดและไมโครกริด

มีค่าต่ำมาตรฐานกำหนด

ทดสอบ ครั้งที่	ความถี่ (Hz) ตามมาตรฐาน	อยู่ในพิกัด (ค้ำง 5 Cycle จิ่งสั่งชิงโครโนซ์)		อยู่นอกพิกัด (ค้ำงไว้ 3 นาทีห้ามสั่งชิงโครโนซ์)	
		ความถี่ (Hz) ที่ทดสอบ	ผ่าน/ไม่ผ่าน	ความถี่ (Hz) ที่ทดสอบ	ผ่าน/ไม่ผ่าน
1	49.70	49.93	ผ่าน	47.93	ผ่าน
2		49.90	ผ่าน	45.80	ผ่าน
3		49.82	ผ่าน	44.90	ผ่าน
4		49.80	ผ่าน	44.22	ผ่าน
5		49.75	ผ่าน	41.93	ผ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ ข.7** ผลการทดลองตรวจสอบการชิงโครโนซ์เมื่อแรงดันของกริดและไมโครกริด

มีค่าเกินมาตรฐานกำหนด

ทดสอบ ครั้งที่	แรงดัน (V) ตามมาตรฐาน	อยู่ในพิกัด (ค่า 5 Cycle จีงส์ชิงโครโนซ์)		อยู่นอกพิกัด (ค่าไว้ 3 นาทีห้ามส่งชิงโครโนซ์)	
		แรงดัน (V) ที่ทดสอบ	ผ่าน/ไม่ผ่าน	แรงดัน (V) ที่ทดสอบ	ผ่าน/ไม่ผ่าน
1	242.00	231.00	ผ่าน	249.53	ผ่าน
2		239.57	ผ่าน	257.40	ผ่าน
3		224.47	ผ่าน	260.10	ผ่าน
4		215.47	ผ่าน	262.43	ผ่าน
5		210.17	ผ่าน	262.60	ผ่าน

**ตารางที่ ข.8** ผลการทดลองตรวจสอบการชิงโครโนซ์เมื่อแรงดันของกริดและไมโครกริด

มีค่าต่ำมาตรฐานกำหนด

ทดสอบ ครั้งที่	แรงดัน (V) ตามมาตรฐาน	อยู่ในพิกัด (ค่า 5 Cycle จีงส์ชิงโครโนซ์)		อยู่นอกพิกัด (ค่าไว้ 3 นาทีห้ามส่งชิงโครโนซ์)	
		แรงดัน (V) ที่ทดสอบ	ผ่าน/ไม่ผ่าน	แรงดัน (V) ที่ทดสอบ	ผ่าน/ไม่ผ่าน
1	198.00	207.60	ผ่าน	191.00	ผ่าน
2		204.73	ผ่าน	178.03	ผ่าน
3		201.80	ผ่าน	166.97	ผ่าน
4		199.03	ผ่าน	161.97	ผ่าน
5		198.20	ผ่าน	150.90	ผ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.9 ผลการทดลองตรวจสอบกำลังไฟฟ้าไหลย้อนกลับ (Magnitude Test)

การทดลอง	Magnitude Setting (kW)	Magnitude Trip (kW)				
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5
กำลังไฟฟ้าไหลย้อนกลับ	-10.00	-10.002	-10.126	-10.003	-10.040	-10.067

ตารางที่ ข.10 ผลการทดลองตรวจสอบกำลังไฟฟ้าไหลย้อนกลับ (Time Test)

การทดลอง	Trip Time (s)	delay time setting (s)	Trip Time จากการทดลอง (s)				
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5
กำลังไฟฟ้าไหลย้อนกลับ	2	2	2.005	2.005	2.047	2.037	2.051

ตารางที่ ข.11 ผลการทดลองตรวจสอบกระแสเกินแบบทำงานทันทีและแบบเวลาผกผันมาก (Very Inverse)

การทดลอง	Trip Time (s)	delay time setting (s)	Trip Time จากการทดลอง (s)				
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5
กระแสเกินแบบทำงานทันที	-	-	0.040	0.040	0.039	0.039	0.046
กระแสเกินแบบเวลาผกผันมาก (Very Inverse)	13.5	13.5	13.47	13.61	14.19	13.70	12.38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ ข.12** ผลการทดลองตรวจสอบความถี่สูง/ความถี่ต่ำ (Magnitude Test)

ตามมาตรฐาน VSPP

การทดลอง	Magnitude Setting (Hz)	Magnitude Trip (Hz)				
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5
ความถี่สูง	51.00	51.02	51.02	51.54	51.02	51.41
ความถี่ต่ำ	48.00	47.08	47.89	47.84	47.80	47.57

**ตารางที่ ข.13** ผลการทดลองตรวจสอบความถี่สูง/ความถี่ต่ำ (Time Test) ตามมาตรฐาน VSPP

การทดลอง	Trip Time (ms)	delay time setting (ms)	Trip Time จากการทดลอง (ms)				
	มาตรฐาน	หน่วงเวลาในชุดควบคุมดิจิทัล	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5
ความถี่สูง > 51.00 Hz	100	38.5	110.00	111.60	108.80	110.00	106.60
แรงดันต่ำ < 48.00 Hz	100	38.5	113.40	111.40	118.80	110.80	109.00

\*ความถี่สูงทดสอบที่ 52 Hz, ความถี่ต่ำทดสอบที่ 45 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.14 ผลการทดลองตรวจสอบแรงดันตกชั่วขณะตามมาตรฐาน SEMI F47 ด้วยวิธีจำลอง  
การเกิดแรงดันตกชั่วขณะที่ละเฟส

ระดับแรงดันตก	Trip Time (ms)	delay time setting (ms)	มุม	Trip Time จากการทดลอง (ms)					
				เฟส A		เฟส B		เฟส C	
	มาตรฐาน	หน่วงเวลาในชุดควบคุมดิจิทัล		max	min	max	min	max	min
50%	200	-	0°	198.60	115.80	207.60	105.20	196.00	140.20
			45°	172.40	115.40	179.20	111.80	195.80	118.80
			90°	184.60	138.20	188.60	96.60	182.00	<b>85.60</b>
			135°	204.00	106.00	146.40	107.00	179.60	92.20
			180°	207.40	120.00	<b>208.00</b>	100.80	189.80	96.00
			225°	200.20	112.80	201.00	118.20	179.60	93.40
			270°	163.80	125.80	205.00	99.80	191.40	87.00
			315°	155.80	103.60	189.20	115.00	178.40	95.40
70%	500	200	0°	501.80	456.20	469.80	342.40	437.00	<b>323.40</b>
			45°	492.40	426.20	450.20	325.60	500.60	428.20
			90°	505.60	436.80	492.00	327.40	459.00	325.40
			135°	494.40	437.60	505.20	329.20	434.40	375.50
			180°	503.60	389.40	437.40	338.80	479.60	331.60
			225°	501.20	396.20	496.80	319.00	491.60	361.20
			270°	481.40	433.40	477.40	385.80	410.60	319.00
			315°	469.80	402.20	465.20	382.00	<b>507.00</b>	347.40
80%	1000	700	0°	1015.50	870.50	1022.00	856.50	993.50	850.50
			45°	996.00	879.00	978.50	943.00	965.00	876.50
			90°	<b>1057.00</b>	855.50	985.00	855.50	923.00	855.00
			135°	985.50	894.00	962.50	859.00	970.00	872.00
			180°	935.50	856.00	1032.50	906.00	979.50	869.50
			225°	982.00	892.00	936.00	<b>842.00</b>	973.00	869.00
			270°	1017.00	863.00	990.50	889.00	991.50	883.50
			315°	998.00	894.00	952.50	860.00	966.00	896.50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.15 ผลการทดลองแรงดันตกชั่วขณะตามมาตรฐาน SEMI F47 ด้วยวิธีจำลองการเกิดแรงดันตกชั่วขณะโดยการเลื่อนเฟส

ระดับแรงดันตก	Trip Time (ms)	delay time setting (ms)	เลื่อนเฟส	Trip Time จากการทดลอง (ms)	
	มาตรฐาน	ช่วงเวลาในชุดควบคุมดิจิทัล		max	min
50%	200	-	A>>B	194.50	96.00
		-	A>>C	<u>208.50</u>	99.50
		-	B>>A	167.00	96.50
		-	B>>C	193.00	<u>94.50</u>
		-	C>>A	204.00	120.00
		-	C>>B	170.50	70.00
70%	500	200	A>>B	475.50	403.50
			A>>C	506.00	404.00
			B>>A	<u>508.50</u>	420.00
			B>>C	477.00	432.50
			C>>A	491.50	401.50
			C>>B	505.00	<u>398.00</u>
80%	1000	700	A>>B	999.00	879.00
			A>>C	1007.50	877.00
			B>>A	<u>1010.00</u>	956.00
			B>>C	1003.50	<u>818.50</u>
			C>>A	1005.00	894.00
			C>>B	926.00	818.50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.16 ผลการทดลองตรวจสอบแรงดันตกชั่วขณะตามมาตรฐานเส้นโค้ง ITIC

การทดลอง	Trip Time (ms)	delay time setting (ms)	Trip Time จากการทดลอง (ms)				
	มาตรฐาน	หน่วยเวลาใน ชุดควบคุมดิจิทัล	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5
แรงดันตก 0% เฟส A	20	-	179.40	172.40	186.40	227.40	181.40
แรงดันตก 0% เฟส B		-	167.40	174.40	199.40	238.10	224.30
แรงดันตก 0% เฟส C		-	189.30	218.30	234.30	<u>263.30</u>	<u>151.30</u>
แรงดันตก 70% เฟส A	500	200	<u>483.00</u>	395.50	458.00	396.50	457.00
แรงดันตก 70% เฟส B			411.50	473.00	<u>333.00</u>	356.50	466.50
แรงดันตก 70% เฟส C			472.50	447.50	340.00	376.50	476.50
แรงดันตก 80% เฟส A	10000	9000	9220.00	-	-	-	-
แรงดันตก 80% เฟส B			<u>9305.00</u>	-	-	-	-
แรงดันตก 80% เฟส C			<u>9185.00</u>	-	-	-	-
แรงดันเกิน 120% เฟส A	500	150	373.00	451.00	472.60	364.80	410.40
แรงดันเกิน 120% เฟส B			405.20	<u>326.60</u>	461.40	<u>495.80</u>	424.00
แรงดันเกิน 120% เฟส C			438.80	422.80	436.00	377.20	388.60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

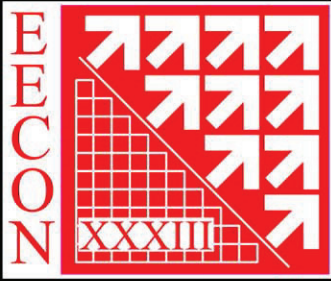


ภาคผนวก ค

ผลงานเกี่ยวกับวิทยานิพนธ์ที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

สุรจิต แสนทวีสุข และ สมภพ ผลไม้ “การพัฒนาระบบควบคุมของอุปกรณ์ตัดต่อสำหรับ  
แหล่งกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กและไมโครกริด”, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 33  
(EECON33), 1-3 ธันวาคม 2553

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



# การประชุมวิชาการ ทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ ๓๓

33<sup>rd</sup> Electrical Engineering Conference (EECON-33)

คำนำ

Keynote Speakers

บทความรับเชิญ

บทความดีเด่น

ดัชนีผู้เขียนบทความ Vol.1 (Author Index Vol.1)

ดัชนีผู้เขียนบทความ Vol.2 (Author Index Vol.2)

ดัชนีคำสำคัญ Vol.1 (Keyword Index Vol.1)

ดัชนีคำสำคัญ Vol.2 (Keyword Index Vol.2)

กำหนดการ

Sponsor

หน้าปก Proceedings

Proceeding Vol.1

Proceeding Vol.2

Abstract Program

บทความทางวิศวกรรมไฟฟ้า

ไฟฟ้ากำลัง (PW)

อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (PE)

ไฟฟ้าสื่อสาร (CM)

อิเล็กทรอนิกส์ (EL)

การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DS)

ระบบควบคุมและการวัดคุม (CT)

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า (GN)

ไฟโตนิกส์ (PH)

คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ (CP)

วิศวกรรมชีวการแพทย์ (BE)

ร่วมจัดโดย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร



111 Years Engineering  
Innovation

# การพัฒนาระบบควบคุมของอุปกรณ์ตัดต่อสำหรับแหล่งกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กและไมโครกริด

## Development of Control System for Separation Device for Distributed Energy Resource and Microgrid

สุรจิต แสนทวีสุข และ สมภพ ผลไม้

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ถนนฉลองกรุง แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร

Email: surajit\_s@hotmail.com, kpsompob@kmitl.ac.th

### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการพัฒนาระบบควบคุมของอุปกรณ์ตัดต่อของไมโครกริดและแหล่งกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก อุปกรณ์ตัดต่อนี้เชื่อมต่อกับกริดและไมโครกริดเข้าด้วยกันที่สภาวะปกติ และตัดสองระบบออกจากกันเมื่อเกิดสภาวะผิดปกติ โดยศึกษาการออกแบบชุดควบคุมดิจิทัลซึ่งทำหน้าที่ในการตรวจจับเงื่อนไขปกติและผิดปกติ จากการควบคุมของ Embedded Controller ซึ่งถูกโปรแกรมจาก LabVIEW โดยข้อกำหนดที่ใช้ตรวจจับนั้นอ้างอิงตามมาตรฐาน IEEE 1547 จากผลการทดลองการตรวจจับความผิดปกติ เมื่อมีการจำลองความผิดปกติต่างๆ พบว่าระบบสามารถตรวจจับความผิดปกติได้อย่างถูกต้อง

คำสำคัญ: อุปกรณ์ตัดต่อ, แหล่งกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก, กริด, ไมโครกริด

### Abstract

This paper presented development of a control system separating device for microgrid bases or distributed energy resource. The separating device connects both grid and microgrid together at normal operating conditions and disconnects both of them during abnormal conditions. The normal and abnormal condition of detection is operated on the embedded controller programmed by LabVIEW. The detection criteria are complied with IEEE 1547 standard. In this paper only the control system is presented. The controller has been developed using National Instrument's real-time embedded controller development system. The control program is developed on LabVIEW program suite. The experimental results obtained from simulated fault conditions confirm the validation of the developed control system.

Keywords: Separation Device, Distributed Energy Resource, Grid, Microgrid

### 1. คำนำ

เนื่องจากปัจจุบันการผลิตไฟฟ้าในประเทศไทยเป็นการผลิตแบบรวมศูนย์โดยใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล เช่น ถ่านหินและก๊าซธรรมชาติ

เป็นหลัก หากไม่คำนึงถึงข้อเสียด้านมลภาวะจากเชื้อเพลิงฟอสซิลแล้ว ข้อดีของการผลิตไฟฟ้าแบบรวมศูนย์นี้คือ การผลิตไฟฟ้าได้ปริมาณมากจากโรงไฟฟ้าขนาดใหญ่ ทำให้มีความคุ้มทุนเชิงเศรษฐศาสตร์และมีเสถียรภาพการผลิตไฟฟ้าสูง ซึ่งการจ่ายพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ไปสู่ผู้บริโภคนั้น จะส่งผ่านโครงข่ายไฟฟ้าที่แรงดันไฟฟ้าระดับต่างๆคือ โรงไฟฟ้าวัดรวมศูนย์ขนาดใหญ่จะผลิตไฟฟ้าแรงดันสูงเข้าระบบสายส่งหรือกริดของการไฟฟ้าฝ่ายผลิต [1] และเข้าสู่สถานีไฟฟ้าย่อยเพื่อทำการลดแรงดันไฟฟ้าลงให้กับผู้ใช้ไฟฟ้าขนาดเล็กตามบ้านเรือนต่อไป

อีกทั้งวิวัฒนาการเทคโนโลยีด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลัง (Power Electronics) ส่งผลให้เทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าได้พัฒนาจนมีขนาดของระบบเล็กลงมาก ซึ่งเทคโนโลยีเหล่านี้ส่งผลให้เกิดระบบไฟฟ้าที่มีแหล่งกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กเป็นของตัวเองได้เรียกว่า ไมโครกริด (Micro Grid) [1] โดยที่โหนดภายในพื้นที่นั้นจะเป็นอิสระจากระบบไฟฟ้าหลัก (Grid) และ ไมโครกริดยังสามารถต่อเข้ากับกริดได้ด้วย เนื่องจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้ามีขนาดเล็ก (Distributed Energy Resource : DER) [2] บางครั้งอาจจ่ายพลังงานได้ไม่พอกับกับความต้องการของโหนดในไมโครกริด ดังนั้นหากกริดเกิดปัญหาเช่น เมื่อเกิดแรงดันตก ไมโครกริดจะปลดตัวเองออกจากกริด และทำงานโดยการผลิตส่งจ่ายภายในพื้นที่ทันทีเมื่อความผิดปกติภายในกริดนั้นหมดลง ไมโครกริดก็จะเชื่อมกลับเข้ากับกริดอีกครั้งหนึ่ง

อุปกรณ์ที่จะเข้ามาทำหน้าที่นี้เรียกว่าอุปกรณ์ตัดต่อ (Separation Device:SD) ซึ่งการทำงานถูกออกแบบให้เป็นไปตามมาตรฐาน IEEE 1547 [3] โดยในเบื้องต้นได้มุ่งศึกษาการออกแบบชุดควบคุมดิจิทัลซึ่งทำหน้าที่ตรวจสอบสถานะของระบบไฟฟ้าและไมโครกริด และควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ตัดต่อ

### 2. โครงสร้างของอุปกรณ์ตัดต่อ

รูปที่ 1 โครงสร้างของอุปกรณ์ตัดต่อประกอบไปด้วยส่วนควบคุม และส่วนสวิตช์ซึ่งอาจเป็นเบรกเกอร์แบบแม่เหล็กไฟฟ้า หรือแบบโซลิดสเตทก็ได้ โดยในการควบคุมการตัดต่อของเซอร์กิตเบรกเกอร์นั้น ตัวควบคุมจะทำการตรวจวัดปริมาณไฟฟ้าต่างๆ คือ แรงดันของระบบไฟฟ้า, ไมโครกริด และกระแสที่ไหลผ่านเซอร์กิตเบรกเกอร์ โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

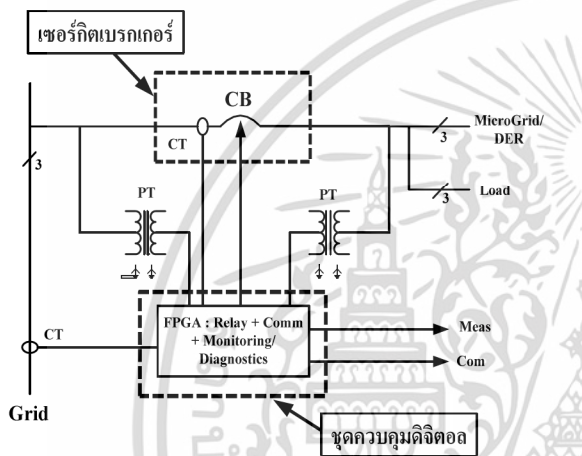
ไม่มีการเสีย | ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเนื้อหาที่เปลี่ยนแปลง และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 33 (ECON-33) 1-3 ธันวาคม 2553 จังหวัดเชียงใหม่ จัดโดย สจล. มห. มทม.

The 33<sup>rd</sup> Electrical Engineering Conference, 1-3 December 2010, Organized by KMITL, CMU, MUT

ชุดควบคุมดิจิทัลจะทำหน้าที่เป็นรีเลย์เพื่อตรวจสอบสถานะต่างๆ ตามมาตรฐานที่กำหนดไว้สำหรับการออกแบบอุปกรณ์ตัดต่อ ซึ่งทำหน้าที่ในการตัดต่อระหว่างระบบไฟฟ้าและไมโครกริด ให้เป็นไปอย่างราบรื่น โดยมีเงื่อนไขในการทำงานของอุปกรณ์ตัดตอดังนี้

1. ตรวจสอบแรงดันเกิน แรงดันต่ำ (Over/Under Voltage Protection)
2. ตรวจสอบกระแสเกิน (Overcurrent Protection)
3. ตรวจสอบค่าความถี่ (frequency Protection)
4. ตรวจสอบการไหลกลับของกำลังไฟฟ้า (Reverse Power Protection)
5. ตรวจสอบการซิงโครไนส์ (Synchronize Protection)



รูปที่ 1 โครงสร้างของอุปกรณ์ตัดต่อ

### 3. วิธีการตรวจจับทางไฟฟ้า

ในการตรวจจับสถานะทางไฟฟ้า หรือความผิดปกติต่างๆ อาศัยหลักการแปลงโคออร์ดิเนตของปริมาณทางไฟฟ้าและเฟสล็อกลูป (Phase-locked Loop) โดยแรงดันและกระแสของระบบไฟฟ้าและของไมโครกริดจะถูกแปลงให้อยู่ในกรอบอ้างอิง d-q (Synchronous Reference Frame) ตามสมการที่ (1) และ (2)

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \sin \theta & \sin(\theta-2\pi/3) & \sin(\theta+2\pi/3) \\ \cos \theta & \cos(\theta-2\pi/3) & \cos(\theta+2\pi/3) \end{bmatrix} [v_a \ v_b \ v_c]^T \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \sin \theta & \sin(\theta-2\pi/3) & \sin(\theta+2\pi/3) \\ \cos \theta & \cos(\theta-2\pi/3) & \cos(\theta+2\pi/3) \end{bmatrix} [i_a \ i_b \ i_c]^T \quad (2)$$

โดยสัญญาณเฟส  $\theta = \int \omega_s dt$  ของการแปลงได้มาจากส่วนเฟสล็อกลูป ซึ่งทำหน้าที่ซิงโครไนส์กับความถี่ของระบบไฟฟ้า โดยปริมาณที่ได้ในแกน d-q จะนำไปใช้ในการตรวจจับสถานะทางไฟฟ้าต่อไป

### 3.1 การตรวจจับแรงดัน และกระแส

จากสมการที่ (1) ขนาดของแรงดันไฟฟ้า ณ เวลาใดๆ คำนวณจาก

$$V = \sqrt{v_d^2 + v_q^2} \quad (3)$$

จากสมการที่ (2) ขนาดของกระแสไฟฟ้า ณ เวลาใดๆ คำนวณจาก

$$I = \sqrt{i_d^2 + i_q^2} \quad (4)$$

### 3.2 การตรวจจับความถี่

ความถี่ของระบบไฟฟ้าสามารถตรวจวัดจากส่วนเฟสล็อกลูป จะได้ว่าในส่วนต่อไป

### 3.3 การตรวจสอบการไหลของกำลังไฟฟ้า

กำลังไฟฟ้าที่ไหลผ่านเซอร์กิตเบรกเกอร์สามารถคำนวณได้จากสมการที่

$$P = v_{ds} i_d + v_{qs} i_q \quad (5)$$

ซึ่งขนาดและเครื่องหมายของกำลังไฟฟ้าจะแสดงทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้า

### 3.4 การตรวจสอบการซิงโครไนส์

เมื่อระบบไฟฟ้าและไมโครกริดซิงโครไนส์กัน ขนาดของแรงดันไฟฟ้า, ความถี่ และลำดับเฟสจะต้องตรงกัน สถานะนี้สามารถสังเกตได้จากปริมาณไฟฟ้าในแกน d-q กล่าวคือเมื่อ

$$v_{ds} = v_{dm} \quad \text{และ} \quad v_{qs} = v_{qm}$$

โดย  $v_{ds}, v_{qs}$  เป็นปริมาณฝั่งระบบไฟฟ้า และ  $v_{dm}, v_{qm}$  เป็นปริมาณของฝั่งไมโครกริดตามลำดับ แสดงว่าระบบไฟฟ้าและไมโครกริดซิงโครไนส์กันโดยสมบูรณ์

### 3.5 เฟสล็อกลูป

จากรูปที่ 2 บล็อกไดอะแกรมของเฟสล็อกลูปประกอบด้วย ส่วนการตรวจจับความผิดพลาดเฟส (Phase Error Detector) จะใช้การแปลงโคออร์ดิเนตแบบกรอบอ้างอิงซิงโครไนส์ ทำให้ค่าแรงดันในแกน q แปรผันตามค่าความต่างเฟสระหว่างอินพุตและส่วนกำเนิดสัญญาณ ในกรณีที่ความผิดพลาดเฟสมีค่าน้อยอาจประมาณได้ว่า

$$v_q = V \sin \delta \approx V \delta \quad (6)$$

เมื่อ  $\delta$  เป็นค่าความผิดพลาดเฟสและ  $V$  คือขนาดแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการนอร์มัลไลซ์สมการที่ (6) ด้วยขนาดของ

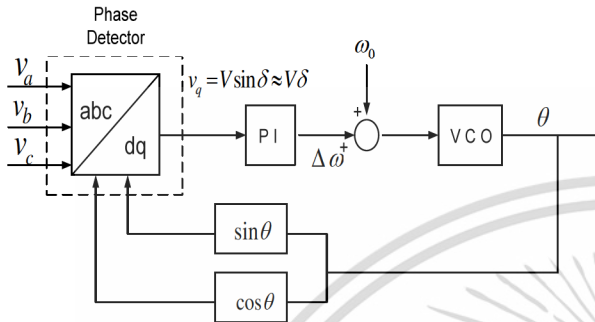
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่มีการเสีย | ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ที่เปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 33 (ECON-33) 1-3 ธันวาคม 2553 จังหวัดเชียงใหม่ จัดโดย สจล. มห. มทม.



The 33<sup>rd</sup> Electrical Engineering Conference, 1-3 December 2010, Organized by KMITL, CMU, MUT

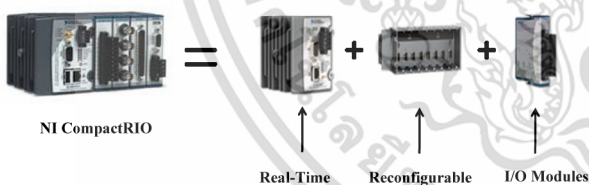
แรงดันไฟฟ้า จะได้ค่าความผิดพลาดเฟส  $\delta$  เป็นตัวอินพุตของตัวควบคุม เพื่อรักษาค่าความผิดพลาดเฟสให้เป็นศูนย์ จะทำให้ความถี่และเฟสเอาต์พุต  $\theta$  ของ VCO เท่ากับระบบไฟฟ้าตลอดเวลา และอินพุตของ VCO จะค่าเท่ากับค่าของระบบไฟฟ้าซึ่งนำไปใช้ตรวจจับความถี่ได้ต่อไป



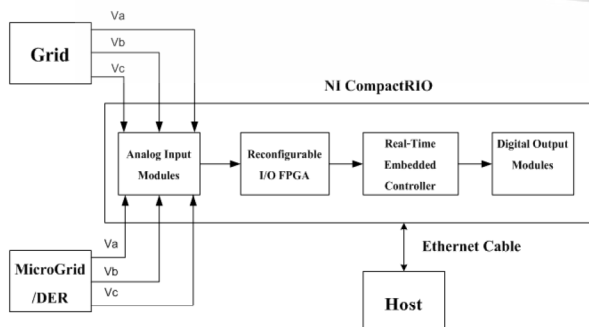
รูปที่ 2 ส่วนประกอบต่างๆของวงจรเฟสล็อก

#### 4. การสร้างชุดควบคุมดิจิทัล

ในบทความนี้ได้ใช้ชุดควบคุมดิจิทัลซึ่งพัฒนาบนแพลตฟอร์มคอมพิวเตอร์ไอโอของ NI (NI CompactRIO) โดยมีโครงสร้างของระบบดังรูปที่ 3 ซึ่งประกอบไปด้วยส่วน FPGA อินพุตเอาต์พุตแบบปรับเปลี่ยนได้ (Reconfigurable I/O FPGA), โมดูลอินพุตเอาต์พุต (I/O Modules) และส่วนประมวลผลจริงแบบฝังตัว (Real-Time Embedded Controller)



รูปที่ 3 โครงสร้างของ NI CompactRIO



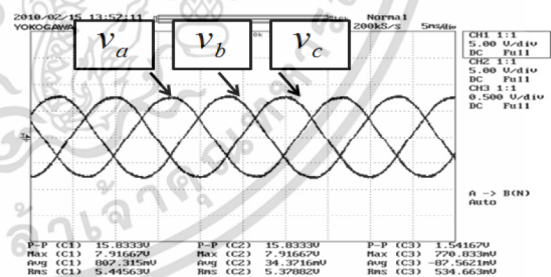
รูปที่ 4 โค้ดแกรมการทำงานของชุดควบคุมดิจิทัล

จากรูปที่ 4 โค้ดแกรมการทำงานของชุดควบคุมดิจิทัลคือการตรวจวัดปริมาณทางไฟฟ้าทั้งหมดจะอยู่ในส่วน CompactRIO ซึ่งรับสัญญาณแรงดันของระบบไฟฟ้าและโมโครกริดผ่านทางโมดูลตัวแปลงอนาล็อกเป็นดิจิทัล (I/O Module) และส่งต่อไปยังส่วน FPGA เพื่อคำนวณเฟสล็อกและการแปลงโคออร์ดิเนต จากนั้นค่าที่คำนวณได้ในส่วน FPGA ได้แก่ ค่าแรงดันไฟฟ้าในกรอบอ้างอิงซิงโครนัส, ค่าความถี่และเฟสจะถูกส่งไปยังตัวประมวลผลจริงแบบฝังตัว (Real-Time Embedded Controller) ให้คำนวณตรวจจับความผิดปกติ และส่งสัญญาณ Fault, Trip ผ่านทางโมดูลดิจิทัลเอาต์พุตเพื่อนำไปใช้งานต่อไป และคอมพิวเตอร์ (Host) จะทำหน้าที่แสดงผลและติดต่อกับผู้ใช้ CompactRIO ซึ่งสื่อสารกันผ่านอินเทอร์เน็ต TCP/IP โดยตัวอุปกรณ์แต่ละชนิดจะต้องถูกโปรแกรมที่เรียกว่า VI ผ่านทางโปรแกรม LabVIEW เพื่อทดสอบการทำงานของเฟสล็อกและการตรวจจับความผิดปกติของระบบไฟฟ้า

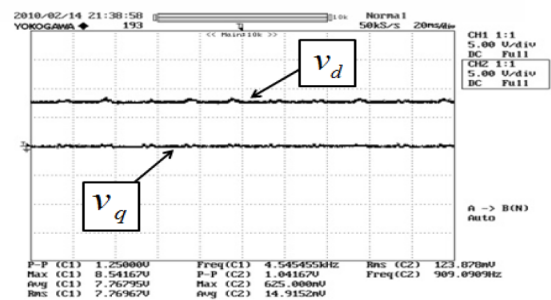
#### 3. ผลการทดลอง

เนื่องจากข้อจำกัดทางด้านอินพุตสัญญาณอนาล็อก (I/O Modules) จึงได้ทำการทดลองเฉพาะการตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าเท่านั้น และผลการทดลองต่อไปนี้จะแสดงสัญญาณที่ได้จากการทำงานใน 2 ส่วนคือ ส่วนแรกสัญญาณที่ได้จากการประมวลผลในส่วน FPGA และส่วนที่สองได้จากการประมวลผลในส่วน Real-Time Controller ซึ่งใช้ในการตรวจจับความผิดปกติทางไฟฟ้าคือ แรงดันเกิน และแรงดันต่ำที่จำลองขึ้นมา

##### 3.1 สัญญาณจากการประมวลผลในส่วน FPGA



รูปที่ 5 สัญญาณอนาล็อกอินพุตของแรงดันสามเฟส



รูปที่ 6 สัญญาณของแรงดัน  $v_d, v_q$  ในกรอบอ้างอิงซิงโครนัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

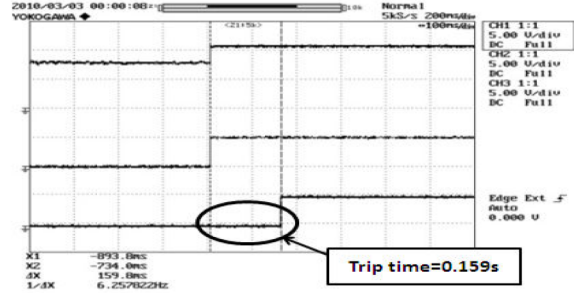
ไม่มีการเสีย | ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเนื้อหาที่เปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอัปเดตถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการแก้ไข การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 33 (ECON-33) 1-3 ธันวาคม 2553 จังหวัดเชียงใหม่ จัดโดย สจล. มห. มทม.



### 3.2 สัญญาณจากการประมวลผลในส่วน Real-Time

#### Controller

แสดงสัญญาณที่จำลองการเกิดสภาวะความผิดปกติของแรงดันไฟฟ้า เช่นแรงดันเกิน (Over voltage) แรงดันต่ำ (Under voltage) ซึ่งการเกิดความผิดปกตินี้ ได้ถูกแบ่งย่อยตามระดับความรุนแรง 4 กรณี เพื่อตรวจสอบระยะเวลาเกิดความผิดปกติให้เป็นไปตามที่มาตรฐาน IEEE1547 กำหนดไว้

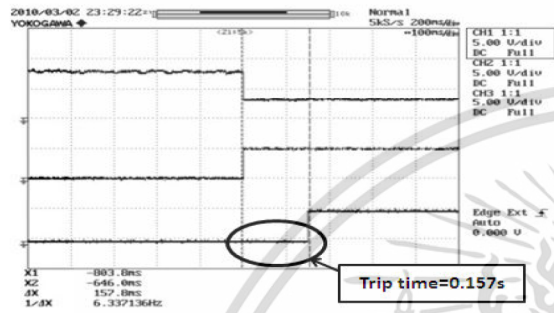


รูปที่ 10 สัญญาณแรงดันเกินกรณีที่  $V \geq 1.2V_{ref}$  (รูปบน)

สัญญาณ Fault (รูปกลาง) และสัญญาณ Trip (รูปล่าง)

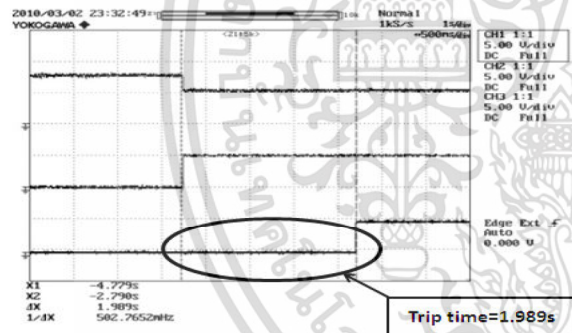
ตารางที่ 1 ผลที่ได้จากการตรวจจับความผิดปกติของแรงดันไฟฟ้า เปรียบเทียบระหว่างมาตรฐาน IEEE 1547 กับชุดควบคุมดิจิทัล

มาตรฐาน IEEE1547			ชุดควบคุมดิจิทัล
ระดับ	ระดับแรงดัน (V) (% จากแรงดันปกติ)	เวลาในการทริป (s)	เวลาในการทริป (s)
1	แรงดัน < 50	0.16	0.157
2	$50 \leq$ แรงดัน < 88	2	1.989
3	$110 <$ แรงดัน < 120	1	0.99
4	แรงดัน $\geq 120$	0.16	0.159



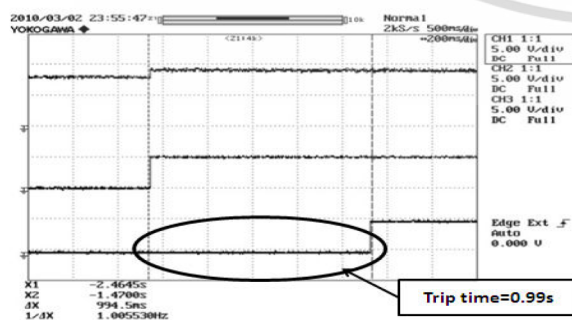
รูปที่ 7 สัญญาณแรงดันต่ำกรณีที่  $V < 0.5V_{ref}$  (รูปบน)

สัญญาณ Fault (รูปกลาง) และสัญญาณ Trip (รูปล่าง)



รูปที่ 8 สัญญาณแรงดันต่ำกรณีที่  $0.5V_{ref} \leq V < 0.88V_{ref}$  (รูปบน)

สัญญาณ Fault (รูปกลาง) และสัญญาณ Trip (รูปล่าง)



รูปที่ 9 สัญญาณแรงดันเกินกรณีที่  $1.1V_{ref} < V < 1.2V_{ref}$  (รูปบน)

สัญญาณ Fault (รูปกลาง) และสัญญาณ Trip (รูปล่าง)

#### 4. บทสรุป

จากการทดลองออกแบบชุดควบคุมดิจิทัลเพื่อทำหน้าที่ตรวจจับสภาวะทางไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าและไมโครกริด โดยทดลองการตรวจวัดแรงดันเกินและแรงดันต่ำ พบว่าระบบสามารถตรวจจับความผิดปกติได้อย่างถูกต้องตามมาตรฐานที่ IEEE 1547 กำหนดไว้

ในขั้นต่อไปจะได้พัฒนาในส่วนของการตรวจจับเงื่อนไขอื่นๆ เพื่อทดสอบการทำงานของระบบควบคุมต่อไป

#### 5. เอกสารอ้างอิง

- [1] Akagi, Hirofumi, Instantaneous power theory and applications to power conditioning, Hoboken, NJ, John Wiley, 2007. NJ, Prentice Hall, 2006.
- [2] Joham Driesen, Farid Katiraei, "Design for Distributed Energy Resources," IEEE power & energy, Vol.6, No.3 May/June 2008.
- [3] IEEE Std 1547 TM-2003, IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่มีการผลิต | ทั้งสิ้น อีกทั้งที่ให้มีที่ที่เปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารที่แท้จริงที่มีกรรมสิทธิ์ไปใช้  
การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 33 (ECON-33) 1-3 ธันวาคม 2553 จังหวัดเชียงใหม่ จัดโดย สจล. มห. มทม.



The 33<sup>rd</sup> Electrical Engineering Conference, 1-3 December 2010, Organized by KMITL, CMU, MUT

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายสุรจิต แสนทวีสุข  
 วัน เดือน ปีเกิด 8 พฤษภาคม 2529 ที่อุบลราชธานี  
 ที่อยู่ 18/29 ถนนประชาชื่น แขวงทุ่งสองห้อง เขตหลักสี่ กรุงเทพมหานคร 10210  
 ประวัติการศึกษา 2551 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า  
 มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

### ผลงานทางวิชาการ

1. S.Santaveesuk, S.Polmai, “Development of Control System for Separation Device for Distributed Energy Resource and Microgrid” Electrical Engineering Conference (EECON-33), Chiang Mai, Thailand, December 1-3, 2010



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้