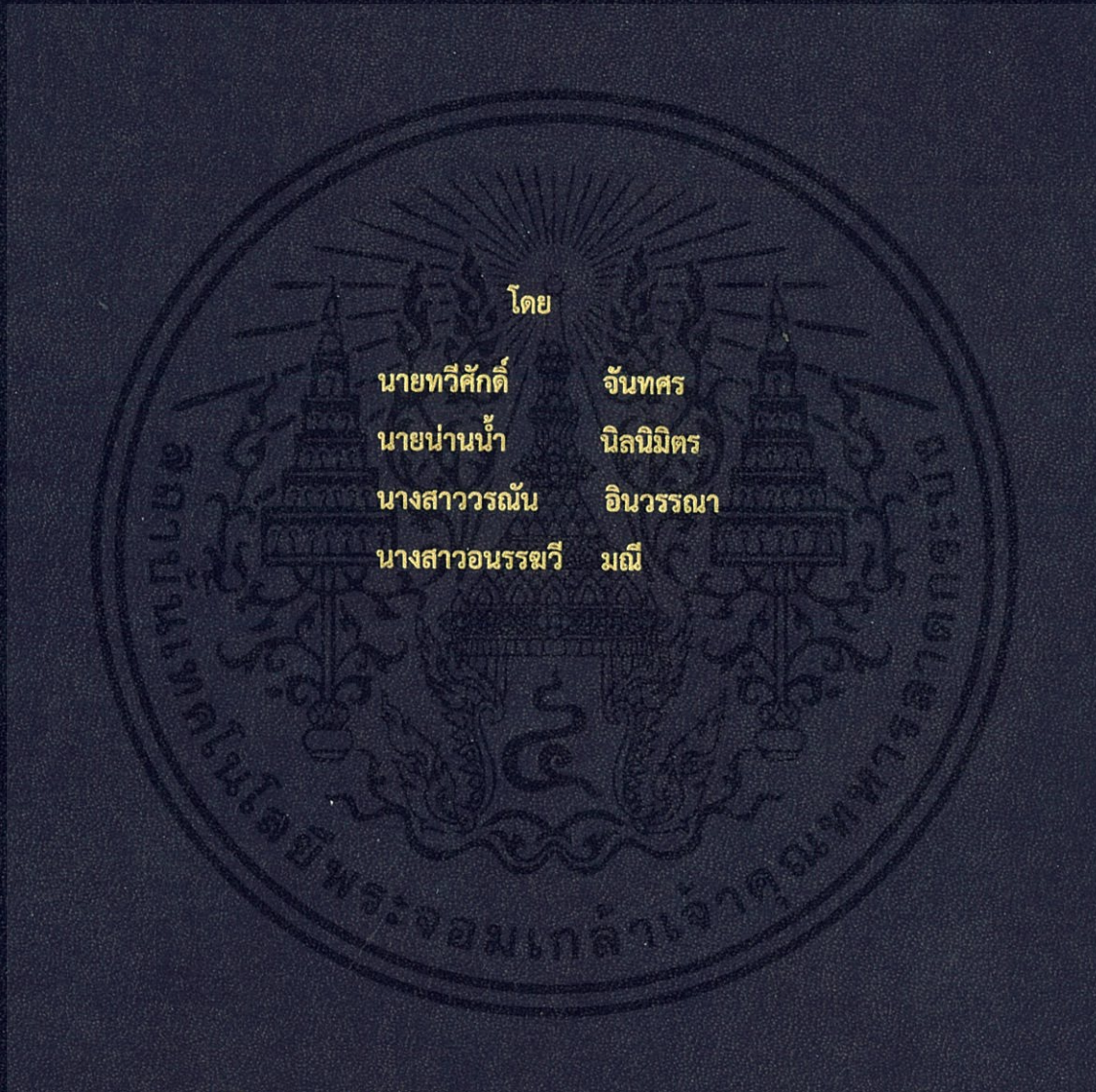


การวิเคราะห์ผลของระบบควบคุมป้องกันการล่มสลายของระบบโครงข่ายไฟฟ้าขนาด
เล็กและแหล่งจ่ายไฟฟ้าภายในโรงงานอุตสาหกรรม

ANALYSIS OF CONTROL SYSTEM TO PREVENT COLLAPSE OF
MIXED-SOURCE MICROGRID FOR INDUSTRY



โดย

นายทวีศักดิ์	จันทศร
นายนำนน้ำ	นิลนิมิตร
นางสาววรรณัน	อินวรรณา
นางสาวอนรรชวี	มณี

ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2561

การวิเคราะห์ผลของระบบควบคุมป้องกันการล่มสลายของระบบโครงข่ายไฟฟ้าขนาด
เล็กและแหล่งจ่ายไฟฟ้าภายในโรงงานอุตสาหกรรม
ANALYSIS OF CONTROL SYSTEM TO PREVENT COLLAPSE OF
MIXED-SOURCE MICROGRID FOR INDUSTRY



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ANALYSIS OF CONTROL SYSTEM TO PREVENT COLLAPSE OF
MIXED-SOURCE MICROGRID FOR INDUSTRY



THIS PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT
FOR THE BACHELOR DEGREE IN ELECTRICAL ENGINEERING
DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2018

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2561

การวิเคราะห์ผลของระบบควบคุมป้องกันการล่มสลายของระบบโครงข่ายไฟฟ้าขนาด

เล็กและแหล่งจ่ายไฟฟ้าภายในโรงงานอุตสาหกรรม

ANALYSIS OF CONTROL SYSTEM TO PREVENT COLLAPSE OF
MIXED-SOURCE MICROGRID FOR INDUSTRY



อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ. จงรักษ์ บุญเลี้ยง

ผศ.ดร.ชาย ชมภูอินไหว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาบัตรปีการศึกษา 2561

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

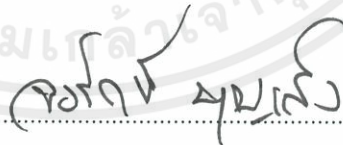
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การวิเคราะห์ผลของระบบควบคุมป้องกันการล่มสลายของระบบโครงข่ายไฟฟ้าขนาดเล็กและ
แหล่งจ่ายไฟฟ้าภายในโรงงานอุตสาหกรรม

ผู้จัดทำ

1. นายทวีศักดิ์ จันทสร
2. นายน่านน้ำ นิลนิมิตร
3. นางสาวรณัน อिनวรรณ
4. นางสาวอนรรฆวี มณี





..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์จรัล บุญเส็ง)



..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ดร.ชาย ชมภูอินไหว)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์ผลของระบบควบคุมป้องกันการล่มสลายของระบบโครงข่ายไฟฟ้าขนาด
เล็กและแหล่งจ่ายไฟฟ้าภายในโรงงานอุตสาหกรรม

นาย ทวีศักดิ์ จันทสร

นาย น่านน้ำ นิลนิมิตร

นางสาว วรณัน อินวรรณ

นางสาว อนรรชวี มณี

รศ. จงรักษ์ บุญเลี้ยง อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร.ชาย ชมภูอินไหว อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2561

บทคัดย่อ

โครงงานนี้นำเสนอการออกแบบอุปกรณ์ควบคุมและป้องกันการล่มสลายของระบบ
ไมโครกริดที่มีแหล่งกำเนิดไฟฟ้าหลายแหล่งจ่าย เช่น โซลาร์เซลล์ แบตเตอรี่ และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
ดีเซล เป็นต้น ซึ่งแต่ละแหล่งจ่ายจะเชื่อมต่อเข้ากับบัสกระแสตรง โดยโครงงานนี้ต้องการรักษาระบบ
การทำงานของโหลดวิกฤตที่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้า ทางกลุ่มนักศึกษาจึงได้จำลองการ
จ่ายกำลังไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟฟ้าเป็นไปตามระบบควบคุม Lookup Table โดยใช้โปรแกรม
MATLAB เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแหล่งจ่ายไฟฟ้าจะต้องมีอุปกรณ์เชื่อมต่อที่สามารถตอบสนองความ
ไวได้อย่างรวดเร็ว ในการทดลองนี้ได้แสดงผลการเปรียบเทียบเวลาตอบสนองการทำงานของสวิตช์
โดยแบ่งสวิตช์ออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ รีเลย์, โซลิดสเตทรีเลย์ และมอทเฟส โดยสวิตช์ทั้ง 3
ประเภทนี้สามารถรักษาและมีผลตอบสนองในการทำงานเพื่อรักษาแรงดันบัสกระแสตรงให้อยู่ภายใน
ในช่วงที่กำหนด และไม่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของโหลดวิกฤต จากผลการจำลองจากโปรแกรม
MATLAB ได้นำมาสร้างเป็นชุดควบคุมเพื่อนำไปใช้งานจริงในอุตสาหกรรมที่มีอยู่ในปัจจุบัน

Analysis of control system to prevent collapse of mix-source microgrid for industry

Taweesak Juntasorn

Nannam Nilnimitr

Woranan Inwanna

Anakavee Manee

Assist.prof. Chongrak boonseng

Assist.prof. Chai Chonpooiwai

Abstract

This project presents the control of power sources by lookup table controller to maintain the voltage of critical load and to prevent collapse of mixed-source microgrid which consist of solar cells, batteries and diesel generators that connect to DC bus. MATLAB is used to simulation of microgrid system. The experiment presents the time comparison of four types of switches including magnetic contactor, relay, solid state relay and MOSFET which can maintain DC bus voltage in specified range which least effect to critical load operation. Based on the simulation results from the MATLAB program, controller is set to use in industries.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้จะไม่สำเร็จได้ถ้าไม่ได้รับการสนับสนุนทางด้านต่างๆจากหลายท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งต้องขอขอบพระคุณ รศ.จรงค์ ณ บุษบง อาจารย์ที่ปรึกษาที่ได้มีความกรุณาให้ความรู้ คำแนะนำและข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ในการทำโครงการจนการจัดทำปริญญานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ ผศ.ดร.ชาย ชมพูอินทว อาจารย์ที่ปรึกษาที่ได้กรุณาให้ความรู้และคำแนะนำในการจัดทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้

ขอขอบคุณ ศ.ดร.วันชัย ธีระรุจา อาจารย์ผู้ให้คำปรึกษาและความรู้ เรื่องการออกแบบระบบควบคุม

นอกจากนี้ผู้จัดทำต้องขอขอบคุณ คุณนครศักดิ์ แสงศรี และ คุณณัฐพันธ์ บุญเสนอ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการที่คอยอำนวยความสะดวกเกี่ยวกับอุปกรณ์และเครื่องมือวัดต่างๆทั้งยังคอยช่วยเหลือในเรื่องของการทำชิ้นงานทดลอง

ท้ายนี้คณะผู้จัดทำ ขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดา และครอบครัวซึ่งให้การสนับสนุนในด้านการเงินและให้กำลังใจอีกทั้งเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านการจัดหาอุปกรณ์ต่างๆ ในการทำโครงการครั้งนี้จนสำเร็จได้ด้วยดี จึงขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

คณะผู้จัดทำ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ.....	I
ABSTRACT.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญรูปภาพ.....	VIII
สารบัญตาราง.....	XI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	2
1.3 ขอบเขตของโครงการ.....	2
1.4 แผนการปฏิบัติงาน.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ระบบไมโครกริด (Microgrid system).....	4
2.1.1 ความหมายของระบบไมโครกริด.....	4
2.1.2 แหล่งพลังงานไมโครกริด.....	4
2.1.3 ประเภทของระบบไมโครกริด.....	8
2.1.4 สาเหตุหลักในการล่มของระบบไมโครกริด.....	9
2.1.5 การทำงานของระบบไมโครกริด.....	9

2.1.6	โครงสร้างระบบไมโครกริด.....	10
2.2	ระบบควบคุม (Control System).....	11
2.2.1	ความสำคัญของแรงดันบัส.....	11
2.2.2	หลักการควบคุมแรงดันบัส.....	12
2.2.3	อุปกรณ์การควบคุมแรงดันบัส.....	16
2.2.4	เหตุการณ์ที่มีผลต่อแรงดันบัสอันเนื่องมาจากโซล่าเซลล์.....	17
บทที่ 3	การออกแบบและจำลองการทดลอง.....	19
3.1	การออกแบบการทำงานระบบไมโครกริด.....	19
3.1.1	การคำนวณขนาดของแหล่งจ่ายไฟฟ้า.....	20
3.1.2	โหมดเชื่อมต่อโครงข่ายไฟฟ้าหลัก (Grid connected mode).....	21
3.1.3	โหมดแยกตัวอิสระ (Standalone mode).....	23
3.2	ผลการจำลอง.....	27
3.2.1	โหมดเชื่อมต่อโครงข่ายไฟฟ้าหลัก.....	27
3.2.2	โหมดแยกตัวอิสระ.....	33
บทที่ 4	การทดลองและผลการทดลอง.....	40
4.1	การทดสอบความเร็วของสวิตช์.....	40
4.1.1	แมกเนติกคอนแทคเตอร์ (Magnetic Contactor).....	40
4.1.2	รีเลย์ (Relay).....	41
4.1.3	โซลิดสเตตรีเลย์ (Solid State Relay: SSR).....	41
4.1.4	มอสเฟต (MOSFET).....	42
4.2	การทดลองการทำงานของระบบไมโครกริด 1 เฟส.....	43

4.3	แผนผังแสดงการรับค่าข้อมูลและการทำงานของระบบควบคุม.....	45
4.4	ผลการทดลองการทำงานของระบบไมโครกริด 1 เฟส.....	49
4.4.1	รีเลย์ (Relay).....	49
4.4.2	โซลิดสเตตรีเลย์ (Solid State Relay: SSR).....	51
4.4.3	มอสเฟต (MOSFET).....	54
4.5	การเพิ่มแหล่งจ่ายไฟฟ้าพลังงานทดแทน.....	56
4.5.1	การทดลองด้วยโซล่าเซลล์ (แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง).....	56
4.5.2	การจำลองด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้าพลังงานทดแทนอื่น ๆ (แหล่งจ่ายไฟฟ้า กระแสสลับ).....	57
บทที่ 5	สรุปผลการทดลอง.....	58
5.1	สรุปผลการทดลอง.....	58
5.1.1	ผลการจำลองระบบจากโปรแกรมกับการจำลองระบบจริง.....	58
5.1.2	ผลการทดลองของอุปกรณ์สวิตซ์.....	58
5.1.3	ผลการทดลองการเชื่อมต่อแหล่งจ่ายพลังงานทดแทนกับระบบจำลอง.....	59
5.2	ปัญหาและอุปสรรค.....	59
5.3	ข้อเสนอแนะในการพัฒนาต่อไป.....	59
	เอกสารอ้างอิง.....	60
	ภาคผนวก.....	63
	ภาคผนวก ก บทความเชิงวิชาการ.....	63
	ภาคผนวก ข การห้วงเวลาของอุปกรณ์.....	78
	ภาคผนวก ค โปรแกรม Ladder และการแสดงผลของ HMI.....	82
	ภาคผนวก ง โพสต์อร์.....	89
	ภาคผนวก จ โครงสร้างการจำลองผลทาง MATLAB.....	91

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ฉ ข้อมูลสวิตซ์แต่ละตัว.....95

ประวัติผู้เขียน.....109



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แผนที่ความเข้มแสงในประเทศไทย.....	5
2.2 กราฟค่าพลังงานโซล่าเซลล์.....	6
2.3 ความสัมพันธ์ของความเข้มแสงและอุณหภูมิกับคุณลักษณะ ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์.....	6
2.4 โครงสร้างของระบบไมโครกริด.....	10
2.5 วงจรสมมูลของบัส DC.....	11
2.6 Block-diagram ควบคุมการเปิด/ปิดสวิตช์ของแหล่งจ่ายไฟฟ้าในระบบไมโครกริด.....	15
2.7 สัญญาณดิจิทัล (Digital Signal).....	16
3.1 เปรียบเทียบค่า V_{DC} และกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากโซล่าเซลล์ และกำลังไฟฟ้าที่โหลดต้องการ.....	19
3.2 กราฟ Characteristics of CS and PS type lead acid storage.....	20
3.3 ระบบไมโครกริดที่เชื่อมต่อโครงข่ายไฟฟ้าหลัก.....	21
3.4 กราฟความสัมพันธ์การทำงานของกริด แบตเตอรี่และโซล่าเซลล์ ในโหมดเชื่อมต่อโครงข่ายไฟฟ้าหลัก.....	22
3.5 ค่าเปอร์เซ็นต์การจ่ายไฟฟ้าของกริดกับโซล่าเซลล์ต่อความต้องการของโหลด ขนาด 400 kW ถึง 600 kW.....	23
3.6 ระบบไมโครกริดแบบแยกตัวเป็นอิสระ ในช่วงที่ 1.....	24
3.7 ระบบไมโครกริดแบบแยกตัวเป็นอิสระ ในช่วงที่ 2.....	24
3.8 กราฟความสัมพันธ์การทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซล แบตเตอรี่	

และโซล่าเซลล์ กรณีโหมดแยกตัวอิสระในช่วงเวลากลางวัน.....	25
3.9 ค่าเปอร์เซ็นต์การจ่ายไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซลกับโซล่าเซลล์	
ต่อความต้องการของโหลดขนาด 400 kW.....	26
3.10 กราฟความสัมพันธ์การทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซล แบตเตอรี่	
และโซล่าเซลล์ กรณีโหมดแยกตัวอิสระในช่วงเวลากลางคืน.....	27
3.11 โหมดเชื่อมต่อโครงข่ายไฟฟ้าหลักในช่วงเวลากลางวัน.....	29
3.12 โหมดเชื่อมต่อโครงข่ายไฟฟ้าหลักในช่วงเวลากลางคืน.....	32
3.13 โหมดแยกตัวอิสระในช่วงเวลากลางวัน	35
3.14 โหมดแยกตัวอิสระในช่วงเวลากลางคืน.....	38
4.1 การทำงานของแมกเนติกคอนแทคเตอร์	40
4.2 การทำงานของรีเลย์.....	41
4.3 การทำงานของโซลิดสเตทรีเลย์.....	42
4.4 การทำงานของมอสเฟต.....	42
4.5 แผนผังการควบคุมสวิตช์ด้วยระบบควบคุมอัจฉริยะ.....	43
4.6 Flowchart การทำงานของชุดควบคุมระบบไมโครกริดโดยการสื่อสารแบบ RTU.....	47
4.7 ผลการทำงานของสวิตช์ ค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้า	
(วัตกริดและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซลทางด้าน DC) โดยใช้รีเลย์.....	50
4.8 ผลการทำงานของสวิตช์ ค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้า	
(วัตกริดและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซลทางด้าน AC) โดยใช้รีเลย์.....	51
4.9 ผลการทำงานของสวิตช์ ค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้า	
(วัตกริดและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซลทางด้าน DC) โดยใช้โซลิดสเตทรีเลย์.....	52
4.10 ผลการทำงานของสวิตช์ ค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้า (วัตกริดและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซล	

ทางด้าน AC) โดยใช้โซลิดสเตทรีเลย์.....	54
4.11 ผลการทำงานของสวิตช์ ค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้า (วัตต์กริดและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซล ทางด้าน DC) โดยใช้หม้อสเฟด.....	54
4.12 ผลการทำงานของสวิตช์ ค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้า (วัตต์กริดและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซล ทางด้าน AC) โดยใช้หม้อสเฟด.....	55
4.13 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองการเพิ่มแหล่งจ่ายไฟฟ้าด้วยโซล่าเซลล์.....	56
4.14 ค่ากระแสไฟฟ้ากระแสตรงของระบบไมโครกริดเมื่อเพิ่มโซล่าเซลล์ในสถานะเชื่อมต่อกกริด	56
4.15 ค่ากระแสไฟฟ้ากระแสตรงของระบบไมโครกริดเมื่อจำลองการเพิ่มพลังงานทดแทนกระแสสลับ	57
ข1 แสดงแรงดันขาเข้า(กระแสสลับ) กระแสขาเข้า(กระแสสลับ) แรงดันขาออก(กระแสตรง) กระแสขาออก(กระแสตรง).....	79
ข.2 แสดงระยะเวลาในการเริ่มจ่ายกระแสไฟฟ้าเมื่อมีการจ่ายแรงดันไฟฟ้าขาเข้า.....	79
ข.3 แสดงระยะเวลาในการจ่ายแรงดันไฟฟ้าขาออก.....	80
ข.4 แสดงระยะเวลาที่สวิตซ์ชิงเพาเวอร์ซัพพลายเริ่มการลดลงของแรงดันไฟฟ้าขาออก.....	80
ข.5 แสดงระยะเวลาการคายประจุของตัวเก็บประจุในสวิตซ์ชิงเพาเวอร์ซัพพลาย.....	80
ค.1 หน้าจอแสดงผล HMI หน้าหลัก.....	87
ค.2 หน้าจอแสดงผล HMI แสดงปริมาณทางไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟฟ้า.....	87
ค.3 หน้าจอแสดงผล HMI แสดงสถานะของสวิตซ์.....	88

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 การออกแบบควบคุมระบบไมโครกริดที่เชื่อมต่อกับโครงข่ายไฟฟ้าหลัก.....	22
3.2 การออกแบบควบคุมระบบไมโครกริดแบบแยกตัวเป็นอิสระ.....	25
4.1 การทดสอบการทำงานแต่ละแหล่งจ่ายไฟฟ้าและโหลดของระบบไมโครกริด.....	44
4.2 การทำงานของแหล่งจ่ายพลังงานทดแทน.....	44
4.3 การทำงานแต่ละแหล่งจ่ายไฟฟ้าและโหลดของระบบไมโครกริดร่วมกับพลังงานทดแทน....	48
5.1 เปรียบเทียบเวลาในการทำงานของสวิตช์แต่ละประเภท.....	58
จ.1 พิกัดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการจำลองระบบไมโครกริดในโปรแกรม MATLAB.....	92



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ในปัจจุบันเทคโนโลยีและการใช้ชีวิตประจำวันของประชากรที่เพิ่มจำนวนขึ้น ส่งผลให้มีการใช้พลังงานไฟฟ้ามากขึ้นตามไปด้วยทั้งในภาคครัวเรือน ภาคธุรกิจเชิงพาณิชย์ และโดยเฉพาะอย่างยิ่งในภาคอุตสาหกรรม การเพิ่มแหล่งผลิตหรือแหล่งเก็บสำรองพลังงานไฟฟ้าเพื่อใช้เป็นตัวรองรับความต้องการใช้ไฟฟ้าที่มีจำนวนมากขึ้น นอกจากการจ่ายไฟฟ้าจากระบบโครงข่ายไฟฟ้าหลัก (Main grid) ยังมีแหล่งผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานธรรมชาติ หรือ พลังงานหมุนเวียน (Renewable Energy Resources) เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งเป็นแหล่งจ่ายที่น่าสนใจในปัจจุบัน นอกจากนี้การรักษาเสถียรภาพของค่าพลังงานไฟฟ้าในระบบที่มีแหล่งจ่ายหลายแหล่งเป็นสิ่งที่ควรคำนึงถึง เพื่อป้องกันการล่มของระบบไมโครกริด ซึ่งอาจส่งผลให้อุปกรณ์ในระบบได้รับความเสียหาย

ระบบไมโครกริด (Microgrid) คือ ระบบผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กที่มีการรวมระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้า (Energy storage) ระบบควบคุมอัตโนมัติ และระบบผลิตไฟฟ้าหลายแหล่ง หรือเรียกว่า แหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบกระจาย (Distributed Generation: DG) โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซล โซลาร์เซลล์ และแบตเตอรี่ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้าหลัก (Main grid) นอกจากนี้ระบบไมโครกริดสามารถแยกตัวออกมาเป็นอิสระ (Standalone mode) เมื่อเกิดสถานะผิดปกติกับระบบโครงข่ายไฟฟ้าหลัก หลักการสำคัญของระบบไมโครกริดคือต้องการผลิตไฟฟ้าให้เพียงพอต่อความต้องการใช้ไฟฟ้าในระบบโดยเฉพาะโหลดวิกฤตที่ประกอบไปด้วยโหลดที่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงแรงดัน ปริมาณนิพนธ์ฉบับนี้จะให้ความสำคัญในการควบคุมแรงดันไฟฟ้าของระบบไมโครกริดที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงแรงดันของโหลด รวมถึงรักษาเสถียรภาพของระบบไมโครกริด ซึ่งการเปลี่ยนแปลงแรงดันในระบบอาจเกิดจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าไม่สามารถผลิตไฟฟ้าให้เพียงพอต่อความต้องการโหลด การเปลี่ยนแปลงแหล่งจ่ายและการล่มของโครงข่ายไฟฟ้าหลัก

ดังนั้นหัวใจหลักสำคัญ คือระบบควบคุมแหล่งจ่ายอัตโนมัติในการรักษาสมดุลแรงดันของระบบ เพื่อป้องกันความเสียหายของอุปกรณ์ที่อาจเกิดได้ในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. จำลององค์ประกอบและการทำงานของระบบไมโครกริด
2. เพื่อจำลองวิธีการรักษาเสถียรภาพแรงดันของบัส
3. เพื่อจำลองวิธีการรักษาเสถียรภาพแรงดันของโหลดที่ไวต่อการเปลี่ยนแปลง
4. เพื่อจำลองวิธีการควบคุมแหล่งจ่ายของระบบไมโครกริด
5. เพื่อนำแหล่งจ่ายพลังงานทดแทนมาช่วยประหยัดพลังงานในระบบไมโครกริด

1.3 ขอบเขตของโครงการ

1. สามารถเข้าใจองค์ประกอบและการทำงานของระบบไมโครกริด
2. สามารถวิเคราะห์การทำงานของและคาดการณ์การล่มของระบบไมโครกริดได้
3. สามารถป้องกันการล่มสลายของระบบไมโครกริดได้
4. สามารถควบคุมเสถียรภาพของระบบไมโครกริดให้คงที่ได้

1.4 แผนการปฏิบัติงาน

การดำเนินงาน	พ.ศ.2561					พ.ศ.2562			
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.
1. วัดค่าพลังงานที่ได้จากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อดูความสัมพันธ์ของค่าพลังงาน									
2. ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยในต่างประเทศเกี่ยวกับระบบการทำงานของไมโครกริด									
3. ศึกษาการออกแบบควบคุมระบบไมโครกริดแบบ Table									
4. เขียนโปรแกรมแบบจำลองระบบควบคุมไมโครกริดโดยใช้ MATLAB									

5. ออกแบบระบบจำลองไมโครกริดและจัดหาอุปกรณ์									
6. ทดลองเชื่อมต่ออุปกรณ์ในระบบไมโครกริดเข้ากับโหลด									
7. ประกอบตู้อุปกรณ์ทดลองและชุดควบคุม									
8. สรุปผลและประเมินผล									
9. จัดทำเอกสารปริญญานิพนธ์และเตรียมตัวนำเสนอ									

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ความรู้ ความเข้าใจหลักการพื้นฐานการทำงานของระบบไมโครกริด
2. สามารถปรับปรุงระบบไฟฟ้าระบบไมโครกริดให้มีความเสถียรมากยิ่งขึ้นให้เหมาะสมกับการใช้งานต่อไปในอนาคต
3. สามารถออกแบบระบบควบคุมไมโครกริด ให้ดำเนินการได้อย่างมีประสิทธิภาพและป้องกันการล่มสลายของระบบไมโครกริดได้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ระบบไมโครกริด (Microgrid system)

2.1.1 ความหมายของระบบไมโครกริด [1], [5-7]

ไมโครกริด คือระบบไฟฟ้าขนาดเล็กที่มีการรวมระบบผลิตไฟฟ้า ระบบส่งจ่ายไฟฟ้า ระบบกักเก็บพลังงาน และระบบควบคุมเข้าด้วยกัน โดยพลังงานไฟฟ้าไฟฟ้าได้จากแหล่งผลิตไฟฟ้าที่กระจายตัวอยู่ทั่วไป (Distributed Generation: DG) เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม เครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซล เป็นต้น ซึ่งสามารถทำงานร่วมกับระบบโครงข่ายไฟฟ้าหลัก (Main grid) ได้เมื่อระบบโครงข่ายไฟฟ้าหลักมีปัญหาเกิดขึ้น ระบบไมโครกริดสามารถปลดตัวเองจากระบบไฟฟ้าหลักอัตโนมัติและสามารถแยกตัวออกมาทำงานอิสระได้ (Standalone mode)

ในภาคอุตสาหกรรมทั่วไปมีอุปกรณ์ไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ เช่น คอมพิวเตอร์, โปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ (Programmable Logic Control: PLC) และ ชุดขับเคลื่อนปรับความเร็วได้ (Variable Speed Drives: VSD) ที่ทำงานร่วมกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ เป็นต้น ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้เป็นโหลดวิกฤต (Critical load) ที่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้า ดังนั้นการควบคุมแรงดันของโหลดประเภทนี้เป็นสิ่งสำคัญ ปัจจุบันได้มีการสังเกตเห็นศักยภาพของพลังงานหมุนเวียนที่สามารถทำงานร่วมกันกับโครงข่ายไฟฟ้าหลักในการช่วยจ่ายไฟฟ้าให้โหลดเพื่อช่วยในการประหยัดพลังงาน อีกทั้งในกรณีที่โครงข่ายไฟฟ้าหลักมีปัญหา ระบบไมโครกริดสามารถแยกตัวออกมาทำงานได้โดยใช้แหล่งผลิตไฟฟ้าที่กระจายตัวอยู่ทั่วไป (Distributed Generation: DG) ร่วมกับระบบกักเก็บพลังงานในการจ่ายไฟฟ้าให้กับโหลดวิกฤต แต่เนื่องจากปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากพลังงานแสงอาทิตย์มีความไม่สม่ำเสมอและไม่เพียงพอในบางช่วงเวลา รวมถึงการล่มของระบบโครงข่ายไฟฟ้าหลักส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าของระบบไมโครกริดมีความผันผวนทำให้โหลดวิกฤตไม่สามารถทนการเปลี่ยนแปลงแรงดันได้ส่งผลให้ระบบไมโครกริดล่ม ดังนั้นความเสถียรของแหล่งจ่ายไฟฟ้าและการเลือกแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่เหมาะสมเป็นปัจจัยที่สำคัญในการรักษาแรงดันของโหลดวิกฤต จึงได้มีแนวคิดการป้องกันการล่มของระบบไมโครกริดเพื่อได้ไฟฟ้าที่เสถียรในการใช้มากขึ้น

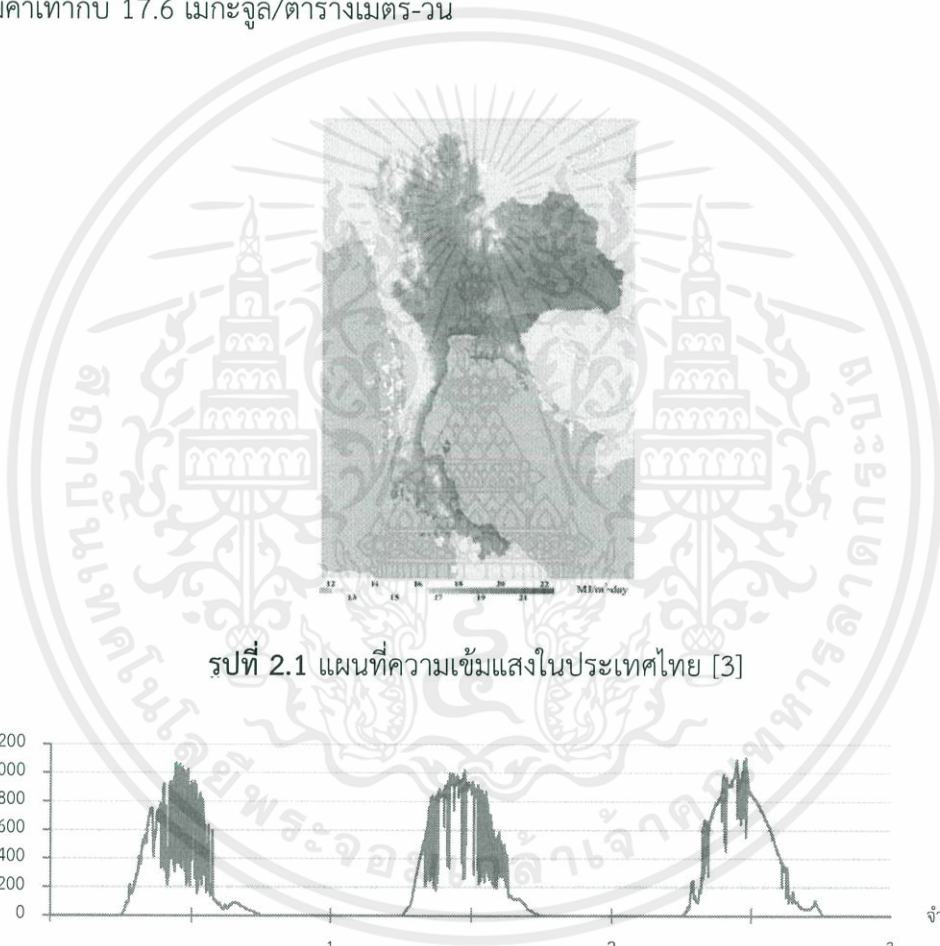
2.1.2 แหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าในระบบไมโครกริด

นอกจากโครงข่ายไฟฟ้าหลักหรือกริดทำหน้าที่ในการจ่ายไฟฟ้าให้กับระบบแล้ว ยังมีแหล่งผลิตไฟฟ้าที่กระจายตัวอยู่ทั่วไป (Distributed Generation: DG) ในระบบไมโครกริดที่นิยมใช้เป็นแหล่งจ่ายขนาดเล็กในไมโครกริด คือ

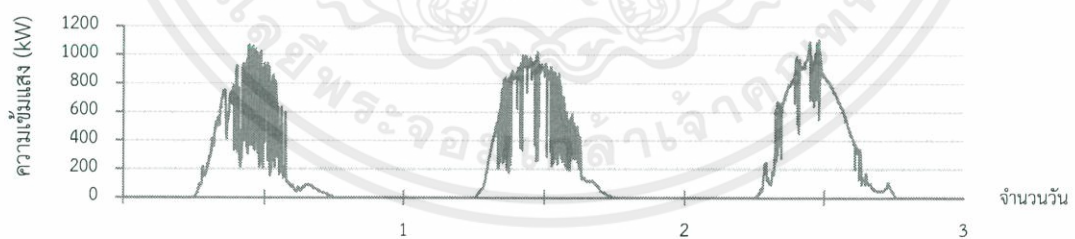
- พลังงานจากแสงอาทิตย์ (Solar energy)
- เครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซล (Diesel generator)
- ระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้า (Energy storage system)

2.1.2.1 พลังงานแสงอาทิตย์ (Solar energy)

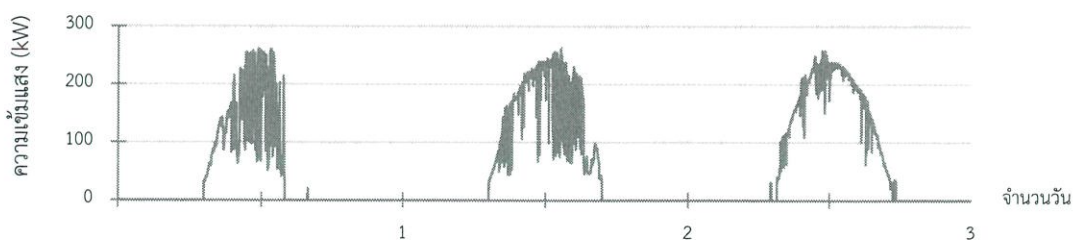
จากแผนที่ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ในรูปที่ 2.1 พบว่าประเทศไทยเป็นประเทศที่มีศักยภาพในการผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์พื้นที่ส่วนใหญ่ของประเทศได้รับรังสีดวงอาทิตย์สูงสุดระหว่างเดือนเมษายนและพฤษภาคม และความเข้มรังสีรวมของดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อปีของพื้นที่ทั่วประเทศพบว่ามีค่าเท่ากับ 17.6 เมกะจูล/ตารางเมตร-วัน



รูปที่ 2.1 แผนที่ความเข้มแสงในประเทศไทย [3]

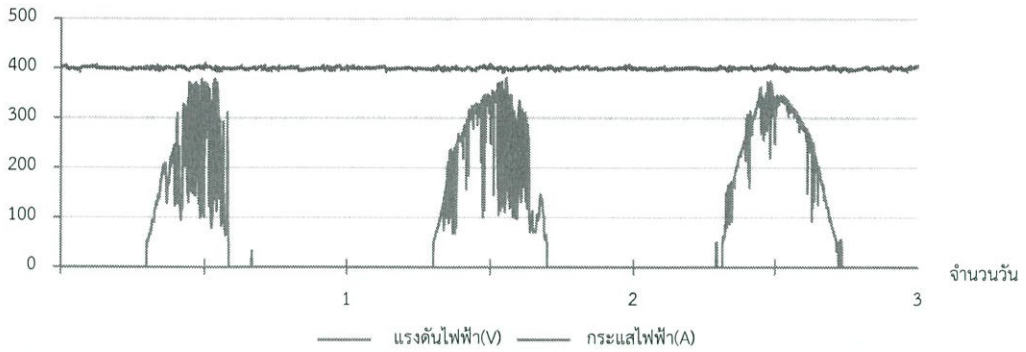


a) กราฟความเข้มแสง



b) กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากโซลาร์เซลล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



c) แรงดันและกระแสไฟฟ้าจากโซลาร์อินเวอร์เตอร์

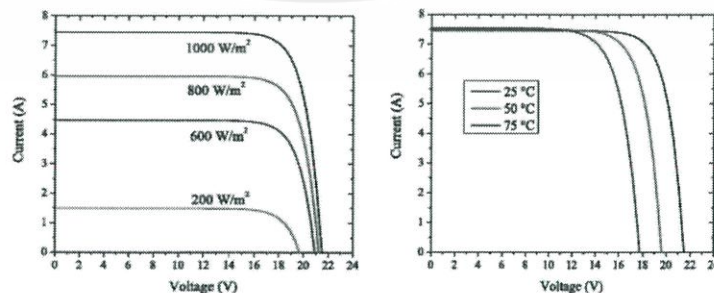
รูปที่ 2.2 กราฟค่าพลังงานโซลาร์เซลล์

ที่มา: ตู MDB7 ณ โรงงานยูนิคอุตสาหกรรมพลาสติก วันที่ 30 กันยายน 2561

เนื่องจากพลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์เป็นพลังงานที่ไม่เสถียร ซึ่งจากรูป 2.2 แสดงถึงค่าความเข้มแสงที่วัดจากอุปกรณ์ Solar meter และค่าพลังงานจากโซลาร์เซลล์ที่ผลิตได้ผ่านอุปกรณ์อินเวอร์เตอร์ โดยวัดได้จากอุปกรณ์ NANOVIP QUADRA จะเห็นว่า เมื่อมีปริมาณแสงมากเพียงพอ แผงโซลาร์เซลล์จะสามารถผลิตไฟฟ้าออกมาได้

ปัจจัยภายนอกที่ส่งผลต่อการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์คือความเข้มแสงและอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม จากรูปที่ 2.3 จะเห็นว่าความเข้มแสงมีผลกับกระแสไฟฟ้าโดยเมื่อมีความเข้มแสงสูงขึ้น กระแสไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ก็จะสูงขึ้นเช่นกัน ในขณะที่แรงดันไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงน้อยมาก และอีกปัจจัยหนึ่งคืออุณหภูมิ โดยแรงดันไฟฟ้าจะแปรผกผันกับอุณหภูมิ ซึ่งเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น แรงดันไฟฟ้าที่ได้จะมีค่าลดลง แต่อุณหภูมิไม่ส่งผลกับกระแสไฟฟ้า จากการกราฟในรูปที่ 2.2 พบว่าในช่วงเวลาปริมาณความเข้มแสงมีค่าไม่สม่ำเสมอ ส่งผลให้ค่ากำลังไฟฟ้าที่ออกมาได้ไม่สม่ำเสมอ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากพลังงานแสงอาทิตย์ไม่มีความเสถียร

2.1.2.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซล (Diesel Generator) [4]



รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ของความเข้มแสงและอุณหภูมิกับคุณลักษณะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ [3]

แหล่งกำเนิดไฟฟ้าดีเซลเป็นอุปกรณ์ผลิตไฟฟ้าด้วยการเปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า ซึ่งมีเชื้อเพลิงหลักคือน้ำมันดีเซล โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซลเป็นแหล่งสำรองในการจ่ายไฟฟ้าได้ดีในกรณีฉุกเฉินเพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นได้ในระบบไฟฟ้า อีกทั้งยังมีกำลังการผลิตที่สูง โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซลไม่สามารถสตาร์ทเครื่องยนต์ได้ทันที ต้องใช้เวลาประมาณ 30 วินาทีในการสตาร์ทเครื่องยนต์ดีเซลเพื่อให้เครื่องยนต์มีอุณหภูมิคงที่

โดยกระบวนการในการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซลมีดังนี้

1. เครื่องยนต์ดีเซลขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้มีความเร็วสูงสุดที่กำหนด ใช้เวลา 8-10 วินาที
2. มอเตอร์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำงานได้เต็มกำลังใช้เวลา 12-15 วินาที
3. เครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซลอาจไม่สามารถสตาร์ทเครื่องยนต์ได้ในครั้งแรก จึงต้องมีการสตาร์ทอีก

2.1.2.3 ระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้า (Energy Storage System) [1,5]

ระบบกักเก็บพลังงานถือเป็นส่วนหนึ่งของระบบไมโครกริดที่สำคัญมากโดยเฉพาะการทำงานของระบบไมโครกริดโหมดแยกตัวอิสระ (Standalone Mode) ซึ่งจะช่วยจ่ายไฟฟ้าให้ไหลลื่นในขณะที่รอเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซลอุ่นเครื่องเพื่อเริ่มทำงาน เป็นผลทำให้ระบบสามารถจ่ายไฟฟ้าให้ไหลลื่นได้อย่างมีประสิทธิภาพและเสถียร ตัวอย่างของระบบกักเก็บพลังงาน เช่น ตัวเก็บประจุยิ่งยวด (Ultra capacitors), ตัวนำยิ่งยวดแบบแม่เหล็ก (Superconducting Magnetic), ล้อตุนกำลัง (Flywheels) และแบตเตอรี่ (Battery) ซึ่งเทคโนโลยีที่นิยมใช้กับระบบไมโครกริดคือแบตเตอรี่เนื่องจากสามารถชาร์จไฟและจ่ายไฟฟ้าได้ดี โดยแบตเตอรี่มีชนิดลิเทียมไอออน ชนิดตะกั่ว และชนิดนิเกิลเมทัลไฮไดร (NiMH) แต่เนื่องจากแบตเตอรี่ชนิดนิเกิลสร้างมลพิษจึงไม่เป็นที่นิยม แบตเตอรี่แบบตะกั่วมีราคาถูก ค่าความต้านทานภายในต่ำ และสามารถจ่ายไฟได้สูง โดยจะเหมาะกับการใช้งานที่ต้องการค่า DOD ต่ำและคายประจุในระยะเวลายาวๆ ส่วนแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน การใช้งานเหมาะสำหรับงานที่ต้องการกำลังไฟสูงเนื่องจากมีความหนาแน่นของพลังงานมาก

ระยะเวลาในการจ่ายไฟฟ้าของแบตเตอรี่เป็นสิ่งที่ควรพิจารณา โดยไม่ควรให้ระยะเวลาในการจ่ายไฟฟ้าสั้นเกินไปเพื่อป้องกันการสตาร์ทเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซลบ่อยครั้ง อีกทั้งควรคำนึงถึงระยะเวลาในการจ่ายไฟฟ้าของแบตเตอรี่เพื่อให้เครื่องกำเนิดดีเซลมีระยะเวลาในการสตาร์ทเครื่องยนต์ ดังนั้นระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าควรมีระยะเวลาในการจ่ายไฟฟ้าสำรองประมาณ 5-10 นาทีซึ่งประกอบด้วย

1. ใช้ระยะเวลาอย่างน้อย 3 นาที เพื่อให้มั่นใจว่ากริดไม่สามารถจ่ายไฟฟ้าให้กับระบบได้ และจำเป็นที่จะต้องใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซล
2. ใช้ระยะเวลา 30 วินาที ในการสตาร์ทเครื่องยนต์ดีเซลเพื่อให้อุณหภูมิของเครื่องยนต์คงที่

2.1.3 ประเภทของระบบไมโครกริด

ระบบไมโครกริดแบ่งออกเป็น 3 ประเภท [6] คือ

1. ไมโครกริดแบบไฟฟ้ากระแสสลับ (AC micro-grid: ACMG): อุปกรณ์ที่นำมาเชื่อมต่อเข้ากับระบบไมโครกริดชนิดนี้ทั้งที่ใช้และไม่ใช้คอนเวอร์เตอร์ในการแปลงสัญญาณจะต้องมีการซิงค์ความถี่ของอุปกรณ์ให้เท่ากับระบบหรือความถี่ของระบบโครงข่ายไฟฟ้าหลัก โดยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ เช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซล สามารถเชื่อมต่อเข้ากับบัสกระแสสลับได้โดยตรง โดยไม่ต้องใช้คอนเวอร์เตอร์เป็นตัวกลางในการแปลงสัญญาณ แต่แหล่งจ่ายกระแสตรง เช่น แผงโซลาร์เซลล์ ต้องเชื่อมต่อเข้ากับระบบผ่าน DC-AC คอนเวอร์เตอร์ในการแปลงสัญญาณ ซึ่งปัญหาส่วนใหญ่ที่พบในระบบไมโครกริดชนิดนี้คือ ความยากในการซิงโครไนซ์ความถี่ของแต่ละอุปกรณ์ให้เข้ากับระบบไมโครกริด
2. ไมโครกริดแบบไฟฟ้ากระแสตรง (DC micro-grid: DCMG): เนื่องจากบัสเป็นแบบกระแสตรง ซึ่งระบบไมโครกริดชนิดนี้จะช่วยลดการใช้คอนเวอร์เตอร์เพื่อแปลงสัญญาณระหว่างกระแสตรงของแหล่งจ่ายและกระแสสลับของบัส ดังนั้นจึงลดค่าความสูญเสียในระบบ อีกทั้งอุปกรณ์ที่จะนำมาใช้กับระบบไมโครกริดชนิดนี้สามารถเชื่อมต่อเข้ากับระบบได้ง่ายเนื่องจากไม่จำเป็นต้องซิงโครไนซ์ความถี่ของอุปกรณ์เข้ากับระบบไมโครกริด และสามารถควบคุมแรงดันบัสกระแสตรงได้โดยตรง
3. ไมโครกริดแบบไฮบริด (Hybrid AC-DC micro-grid): ประกอบด้วยวงจรกระแสสลับและวงจรกระแสตรงเชื่อมต่อเข้าด้วยกันผ่านคอนเวอร์เตอร์แปลงกระแสไฟฟ้าสองทิศทาง (bidirectional converters) ซึ่งช่วยลดการแปลงกระแสไฟฟ้าโดยสามารถต่ออุปกรณ์กระแสสลับเข้ากับบัสกระแสสลับ โดยตรงและต่ออุปกรณ์กระแสตรงเข้ากับบัสกระแสตรงได้โดยตรงเช่นกัน

ข้อดีของระบบไมโครกริดแบบไฟฟ้ากระแสตรง มีดังนี้ [6]

1. ไม่มีการควบคุมความถี่และมุมเฟส จึงง่ายต่อการต่ออุปกรณ์เข้ากับระบบเนื่องจากไม่จำเป็นต้องมีการซิงโครไนซ์ความถี่และมุมเฟสของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงและแบตเตอรี่เข้ากับระบบ
2. ระบบไมโครกริดแบบกระแสตรงใช้จำนวน AC-DC คอนเวอร์เตอร์น้อยลงสำหรับอุปกรณ์กระแสตรงและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เป็นผลให้ระบบมีประสิทธิภาพมากขึ้น เนื่องจากความสูญเสียจากการแปลงสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงของแหล่งจ่ายไปยังโหลดกระแสตรงมีค่าลดลงถึง 10-15% [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ลดความสูญเสียจากการแปลงสัญญาณไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง กับระบบ
4. สามารถทำงานร่วมกับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ได้ง่าย เช่น แผงโซลาร์เซลล์ แบตเตอรี่

2.1.4 สาเหตุหลักในการล่มของระบบไมโครกริด [7]

สาเหตุหลักในการล่มของระบบไมโครกริดมี 3 ประเภท คือ

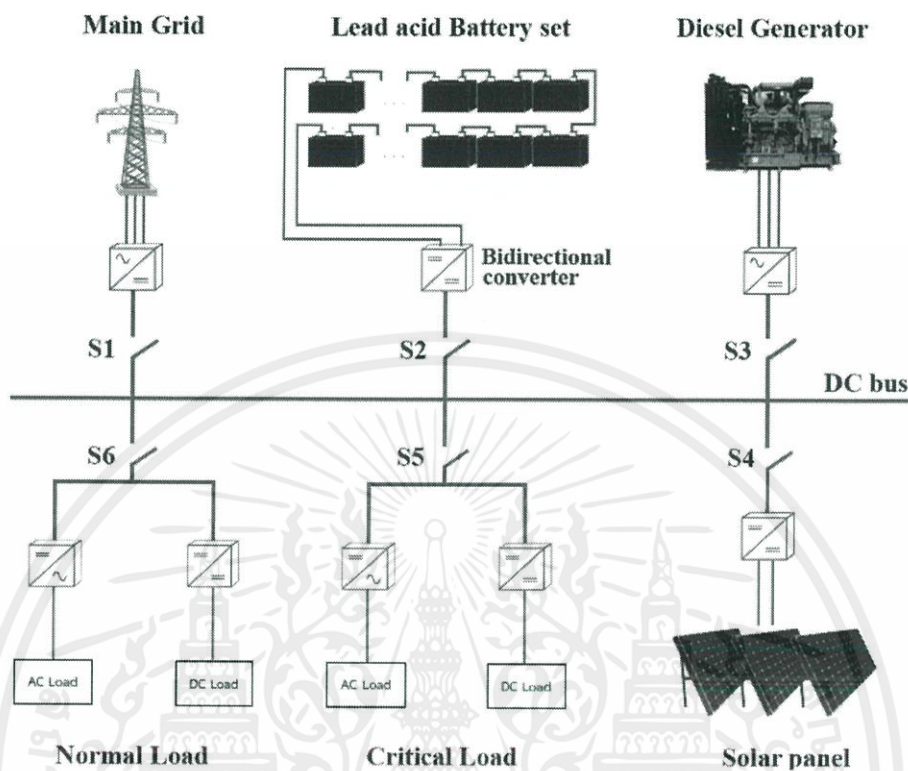
1. พลังงานไฟฟ้าจากกริดที่จ่ายให้ระบบไมโครกริดมีผันผวน
2. พลังงานไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าพลังงานทดแทนมีความผันผวน
3. โหลดเปลี่ยนแปลงอย่างกะทันหัน

2.1.5 การทำงานของระบบไมโครกริด

ในสภาวะปกติการทำงานจะอยู่ในโหมดต่อกริด (Grid-connected mode) โดยกริด (Main grid) จะทำงานร่วมกับโซลาร์เซลล์เพื่อผลิตไฟฟ้าจ่ายให้โหลดทั้งหมดและชาร์จแบตเตอรี่ โดยเมื่อมีความเข้มแสงไม่เพียงพอต่อการผลิตไฟฟ้าเช่นในช่วงกลางคืน กริดจะทำหน้าที่ในการผลิตไฟฟ้าเพื่อจ่ายให้โหลดทั้งหมด และเมื่อความเข้มแสงมีมากพอที่จะสามารถผลิตไฟฟ้าได้ โซลาร์เซลล์จะทำงานร่วมกับ กริดในการจ่ายไฟฟ้าให้กับโหลดทั้งหมดเพื่อช่วยเรื่องประหยัดพลังงานและค่าใช้จ่าย โดยทั้ง 2 กรณีนอกจากแหล่งผลิตไฟฟ้าจะจ่ายไฟฟ้าให้โหลดทั้งหมดแล้ว ยังต้องมีการชาร์จไฟฟ้าให้กับแบตเตอรี่ให้มีความจุเต็มอยู่เสมอ เพื่อนำไปเป็นแหล่งพลังงานสำรองเมื่อมีการล่มของระบบกริด

เมื่อมีการล่มของระบบกริด (Main grid) ระบบไมโครกริดจะทำงานในโหมดแยกตัวอิสระ (standalone mode) ซึ่งในโหมดนี้แหล่งจ่ายไฟฟ้าจะจ่ายไฟฟ้าให้กับโหลดวิกฤต (Critical load) เท่านั้น โดยมีแหล่งจ่ายไฟฟ้าเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซลที่ทำงานร่วมกับโซลาร์เซลล์ ซึ่งการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซลคล้ายกับกริดในการเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าหลัก แต่ต่างตรงที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซลไม่สามารถเริ่มการทำงานได้ทันที ต้องมีระยะเวลาในการสตาร์ทเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซล ซึ่งในช่วงที่รอเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซลสตาร์ท แบตเตอรี่จะทำหน้าที่ในการจ่ายไฟฟ้าให้กับโหลดวิกฤตเพื่อเป็นการรักษาแรงดันบัสและแรงดันของโหลดวิกฤตอีกด้วย และเมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซลพร้อมทำงาน สวิตช์ของโหลดปกติจะสับกลับมาโดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซล และโซลาร์เซลล์ก็จะทำงานร่วมกันในการจ่ายไฟฟ้าให้กับโหลดทั้งหมดและชาร์จแบตเตอรี่ให้เต็มอยู่เสมอเพื่อป้องกันการล่มของระบบกริดในครั้งต่อไป

2.1.6 โครงสร้างระบบไมโครกริด



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของระบบไมโครกริด

ส่วนประกอบของไมโครกริดแสดงให้เห็นดังรูปที่ 2.4 โดยประกอบไปด้วย

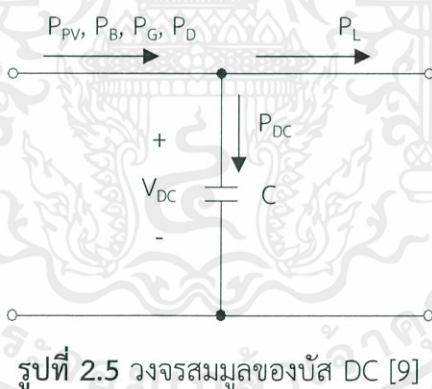
1. แหล่งจ่ายโซลาร์เซลล์ (Photovoltaic: PV): เชื่อมต่อกับบัสกระแสตรงผ่านทาง DC-DC คอนเวอร์เตอร์
2. เครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซล (Diesel generator): เชื่อมต่อกับบัสกระแสตรงผ่าน AC-DC คอนเวอร์เตอร์
3. แบตเตอรี่ (Battery): เป็นตัวกักเก็บพลังงาน โดยต่อเข้ากับบัสกระแสตรงผ่านคอนเวอร์เตอร์แปลงกระแสไฟฟ้าสองทิศทาง (bidirectional converter)
4. ระบบโครงข่ายไฟฟ้าหลัก (Main grid): ระบบโครงข่ายไฟฟ้าหลักหรือกริดทำหน้าที่จ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ (AC grid) โดยเชื่อมต่อเข้ากับบัสกระแสตรงผ่าน AC-DC คอนเวอร์เตอร์
5. ภาระทางไฟฟ้า (Load): โหลดจะแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ดังนี้ [8]

- โหลดวิกฤต (Critical load) โหลดชนิดนี้เป็นโหลดที่มีความสำคัญมากซึ่งไม่ยินยอมให้การจ่ายไฟฟ้าหยุดชะงักนานเกินครึ่งคาบ (10 มิลลิวินาที) เช่น ระบบคอมพิวเตอร์, ระบบสื่อสาร, ระบบ SCADA, Programmable Logic Controllers (PLCs) และ ชุดขับเคลื่อนปรับความเร็วได้ (Variable Speed Drives: VSD) เป็นต้น
- โหลดปกติ (Normal load) โหลดชนิดนี้เป็นโหลดที่ยินยอมให้การจ่ายไฟฟ้าหยุดชะงักได้นาน เช่น ระบบแสงสว่างทั่วไป ระบบปรับอากาศ เป็นต้น

2.2 ระบบควบคุม (Control System)

2.2.1 ความสำคัญของแรงดันบัล

หน้าที่ของบัลกระแสตรงคือสะสมและจ่ายพลังงานไฟฟ้า โดยจำเป็นที่จะต้องรักษาระดับแรงดันบัลกระแสตรงไว้ เนื่องจากระดับแรงดันบัลจะบอกถึงความสมดุลของพลังงานในระบบ ดังนั้นเมื่อแรงดันบัลคงที่หมายความว่าระบบมีความสมดุลกันระหว่างไฟฟ้าที่ผลิตออกมาจากแหล่งจ่าย (supply) และโหลดหรือความต้องการใช้ไฟ (demand) สมดุลกัน โดยรูปที่ 2.5 แสดงให้เห็นถึงวงจรสมมูลของบัลกระแสตรง [9]



รูปที่ 2.5 วงจรสมมูลของบัล DC [9]

โดย P_{PV} : พลังงานไฟฟ้าที่ได้จากแผงโซลาร์เซลล์

P_B : พลังงานไฟฟ้าที่ได้จากแบตเตอรี่

P_G : พลังงานไฟฟ้าที่ได้จากกริด

P_D : พลังงานไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซล

P_L : พลังงานไฟฟ้าที่จ่ายให้โหลด

V_{DC} : แรงดันบัส

C : ผลรวมของตัวเก็บประจุในบัสกระแสตรงหรือเรียกว่า DC link

P_{DC} : พลังงานไฟฟ้าที่เก็บสะสมในบัสกระแสตรง ซึ่งแสดงให้เห็นดังสมการที่ 2.1

$$P_{DC} = V_{DC}C \frac{dV_{DC}}{dt} = \Sigma P - P_L \quad (2.1)$$

โดยที่ $\Sigma P = P_{PV} + P_B + P_G + P_D$ โดยเมื่อ พลังงานที่เก็บสะสมในบัสกระแสตรงเป็นศูนย์ หมายความว่าพลังงานที่เหลือจากไมโครกริดไปสู่โหลดมีความสมดุลกัน หรือพูดอีกนัยหนึ่งคือ แรงดันบัสมีค่าคงที่

2.2.2 หลักการควบคุมแรงดันบัส

หลักในการควบคุมแรงดันบัส คือ การควบคุมการทำงานของแต่ละแหล่งจ่ายไฟฟ้า โดยมีคอนเวอร์เตอร์ควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้า

2.2.2.1 ระบบควบคุมสวิตช์แหล่งจ่ายไฟฟ้า

ระบบควบคุมสวิตช์แหล่งจ่ายไฟฟ้ามีหลายวิธียกตัวอย่าง เช่น lookup table, Proportional Integral Derivative control (PID), Fuzzy control และ Neural network ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้ [10-13]

1. Lookup table

Lookup table คือ ตารางโครงสร้างของข้อมูล เป็นวิธีการอ่านค่าข้อมูลแบบเรียงลำดับของ array โดยสามารถเข้าถึงข้อมูลในแบบสุ่มได้ตามสถานการณ์ที่เกิดขึ้นในระบบไมโครกริดโดยดูสถานะแรงดันของแหล่งจ่าย

การใช้ lookup table จะช่วยลดเวลาการคำนวณฟังก์ชันที่มีความซับซ้อนต่าง ๆ เนื่องจากการอ่านค่าจากหน่วยความจำของโปรแกรมจะเร็วกว่าการที่โปรแกรมต้องทำกระบวนการคำนวณกระบวนการทำงานของวิธีนี้ใช้หลักการ If-Else ในการกำหนดตัวแปรและสถานการณ์ต่างๆ ที่สามารถเกิดขึ้นได้และใส่ลงตาราง ในการจำลองการดำเนินการจะใส่ค่าอินพุตเข้าไปประมวลผลเพื่อให้ได้ค่าเอาต์พุตที่ส่งกลับออกมาสอดคล้องกับในตาราง ถ้าค่าอินพุตไม่ได้ถูกกำหนดไว้ในตาราง การใช้วิธีนี้ความถูกต้องแม่นยำอาจจะไม่สามารถทำได้ในระดับที่มีความละเอียดสูง

2. Proportional Integral Derivative control (PID)

PID คือระบบควบคุมแบบป้อนกลับ โดยนำค่าความผิดพลาดมาคำนวณทางคณิตศาสตร์ ซึ่งตัวควบคุมจะพยายามลดค่าผิดพลาดให้เหลือน้อยที่สุด โดยการปรับค่าสัญญาณขาเข้าของกระบวนการให้ค่าเอาต์พุตที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับค่าอ้างอิงที่ต้องการ การควบคุมนี้จะควบคุมระบบให้มีประสิทธิภาพที่สุดโดยการใช้สมการคณิตศาสตร์ที่ตายตัวเข้ามาช่วย ซึ่งส่งผลให้ระบบนี้ทำให้ไม่มีความยืดหยุ่นพอที่จะควบคุมบางระบบที่มีความซับซ้อนหรือมีการกวนบ่อย

3. Fuzzy logic

ฟัซซีลอจิกเป็นเทคนิคการควบคุมขั้นสูงในระบบอัตโนมัติ ซึ่งทางวิศวกรรมนั้น นิยมใช้ Fuzzy Logic ช่วยในการวิเคราะห์เหตุการณ์ต่างๆ ที่มีความคลุมเครือ หรือ มีความไม่แน่นอนสูง โดยสัญญาณที่นำมาวิเคราะห์มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1 ซึ่งแตกต่างจากการควบคุมแบบ lookup table ที่มีสัญญาณเพียง 1 และ 0 เท่านั้น กระบวนการการทำงานของฟัซซีลอจิกจึงเป็นการเลียนแบบการคิด การหาเหตุผล การตัดสินใจ และการกระทำของมนุษย์ โดยจะใช้กฎฟัซซีในการนิยามพฤติกรรมต่าง ๆ ของระบบแทนที่จะใช้สมการทางคณิตศาสตร์ ดังนั้นจึงเหมาะกับระบบที่มีความซับซ้อน และมีค่าข้อมูลที่ไม่แน่ชัด

4. Neural network

การควบคุมนี้เหมาะกับงานที่มีความซับซ้อนมากๆ โดยการทำงานของระบบควบคุมนี้จะนำหลายๆอินพุตมารวมกันเพื่อนำไปสร้างเป็นระบบและสุดท้ายนำแต่ละระบบมาทำงานร่วมกันเป็นระบบโครงข่าย

2.2.2.2 ประเภทของสวิตช์ควบคุม

สวิตช์ควบคุมมีหลายประเภทดังเช่น [14-16]

1. แมกเนติกคอนแทคเตอร์ (Magnetic Contactor)

แมกเนติกคอนแทคเตอร์ ทำงานโดยอาศัยอำนาจแม่เหล็กไฟฟ้าช่วยในการเปิด-ปิดหน้าสัมผัส ในการตัด-ต่อวงจรกำลัง เช่น การเปิด-ปิดการทำงานของมอเตอร์ ซึ่งเวลาในการเปิด-ปิดสวิตช์ประเภทนี้ช้ากว่าสวิตช์แบบอื่นเล็กน้อย แต่ข้อดีของการใช้งานคือ ปลอดภัยต่อผู้ควบคุมมอเตอร์จากอันตรายในการตัดต่อวงจรกำลัง ซึ่งมีกระแสไฟฟ้าค่อนข้างสูง, ควบคุมง่าย และ สามารถต่อร่วมกับอุปกรณ์อื่นได้

2. รีเลย์ (Relay)

รีเลย์ประกอบไปด้วยหน้าสัมผัสที่มีชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่ได้ การทำงานของสวิตช์ประเภทนี้ อาศัยหลักการของแม่เหล็กไฟฟ้า โดยการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานแม่เหล็ก เพื่อใช้ในการ

ดึงดูหน้าสัมผัสของคอนแทกให้เปลี่ยนสถานะ โดยการป้อนกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดเพื่อทำการปิดหรือเปิดหน้าสัมผัสของรีเลย์นี้อาจมีข้อเสียอยู่บ้างดังนี้ การกระชากของไฟรุนแรง ตอบสนองช้า

3. โซลิดสเตทรีเลย์ (Solid State Relay: SSR)

Solid state relay ทำงานคล้ายกับรีเลย์ แต่ต่างที่ Solid state relay ไม่มีชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่ดังนั้นจึงช่วยลดเสียงรบกวนในการเปิด-ปิดสวิตช์ โดย Solid state relay ทำมาจากสารกึ่งตัวนำซึ่งสามารถเปิด-ปิดสวิตช์ได้ในย่านแรงดันสูงในขณะที่ให้สัญญาณไฟฟ้าแรงดันต่ำได้ โดยเวลาในการเปิดปิดสวิตช์ (switching time: trr) เร็วกว่ารีเลย์ นอกจากนี้ยังใช้ไฟฟ้าน้อยกว่ารีเลย์ และสามารถควบคุมไฟฟ้าได้มากกว่า

4. มอสเฟต (MOSFET)

การทำงานของสวิตช์มอสเฟตอาศัยสนามไฟฟ้าในการเปิดปิดสวิตช์ โดยเวลาในการเปิดปิดสวิตช์ (switching time: trr) มีการตอบสนองเร็วมากที่สุดเมื่อเทียบกับสวิตช์ประเภทอื่นๆ

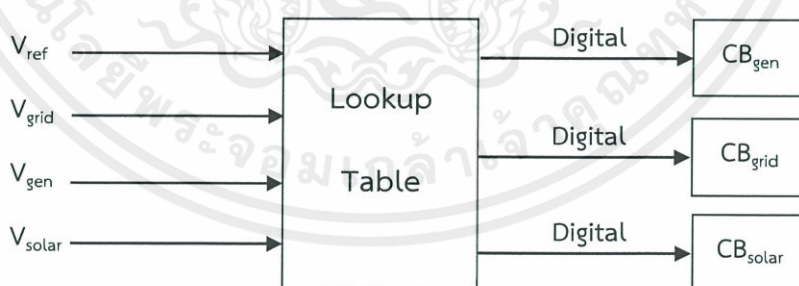
การควบคุมแบบ lookup table เป็นวิธีพื้นฐานที่ใช้หลักการว่า ถ้าเกิดเหตุการณ์เช่นนี้ แล้วผลจะเป็นเช่นไร ซึ่งสามารถทำความเข้าใจได้ง่าย ประกอบกับการควบคุมสวิตช์แหล่งจ่ายนั้นไม่ได้มีความซับซ้อนมากนัก จึงไม่จำเป็นต้องใช้การควบคุมแบบ Fuzzy หรือ Neural ที่มีเงื่อนไขในการควบคุมที่ละเอียด เนื่องด้วยหลักการของ Fuzzy และ Neural เป็นความรู้ใหม่ที่ต้องใช้เวลาในการศึกษาค้นคว้า

2.2.2.3 การควบคุมสวิตช์ด้วยวิธี lookup table

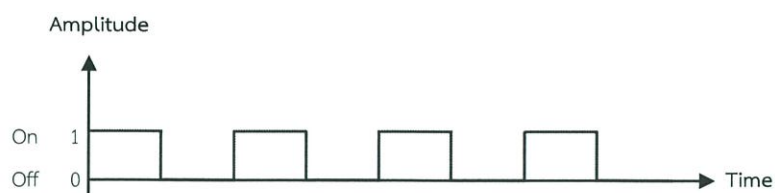
การรักษาระดับแรงดันที่บัสกระแสตรงของระบบไมโครกริดให้มีค่าใกล้เคียงกับแรงดันอ้างอิงเพื่อรักษาเสถียรภาพของการจ่ายโหลด อีกทั้งเพื่อรักษาแรงดันของโหลดวิกฤตที่มีโหลดที่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงแรงดันรวมอยู่ด้วย ซึ่งจากมาตรฐานคุณภาพไฟฟ้าที่การไฟฟ้าฝ่ายผลิต (กฟผ.) กำหนดคือ ในสภาวะปกติแรงดันจะถูกควบคุมไว้ไม่เกิน $\pm 5\%$ ของแรงดันอ้างอิง [17] ดังนั้นระบบควบคุมชนิดนี้จะรักษาแรงดันบัสโดยการเลือกแหล่งจ่ายด้วยการเปิด/ปิดสวิตช์ของแหล่งจ่ายไฟฟ้า ระบบจะดูสถานะความพร้อมในการจ่ายไฟฟ้าของกริด แล้วทำการประมวลผลข้อมูลที่ได้รับและเลือกแหล่งจ่ายที่เหมาะสมกับสถานะการณั้ น ๆ ก่อนจะส่งสัญญาณขาออกเป็นสัญญาณแบบดิจิทัลเป็นค่า 0 หรือ 1 แทนการเปิดและปิดวงจรของสวิตช์ ตามลำดับ โดยระบบควบคุมจะส่งสัญญาณดิจิทัลไปยังสวิตช์ของแต่ละแหล่งจ่าย

การทำงานของระบบควบคุม lookup table มีดังนี้

1. ระบบควบคุมจะตรวจสอบการทำงานของกริดและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซลว่าอยู่ในสถานะที่จ่ายได้หรือไม่ โดยมีเซนเซอร์หน้าคอนเวอร์เตอร์ของแหล่งจ่ายเพื่อวัดค่าแรงดันของแหล่งจ่ายแต่ละตัว แล้วส่งค่าแรงดันที่ได้ไปยังหน่วยประมวลผล lookup table
2. การทำงานของ look up table สามารถแบ่งได้ 3 กรณี
 - a. กรณีกริดสามารถจ่ายไฟฟ้าได้ ระบบควบคุม lookup table จะส่งสัญญาณดิจิทัล 0 ให้กับสวิตช์ควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซลเพื่อเปิดวงจรของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซล และส่งสัญญาณดิจิทัล 1 ให้กับสวิตช์ควบคุมกริดเพื่อปิดวงจรกริด ซึ่งจะสามารถรับไฟฟ้าจากกริดได้
 - b. กรณีที่แรงดันบัลลดลงจากแรงดันอ้างอิง และแรงดันกริดหายไปเป็นระยะเวลา 3 นาที เนื่องจากกริดไม่สามารถจ่ายไฟฟ้าได้ ระบบควบคุมจะตรวจสอบความพร้อมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซล เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซลพร้อมจ่ายไฟฟ้า ระบบควบคุม lookup table จะส่งสัญญาณดิจิทัล 1 ให้กับสวิตช์ควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซลเพื่อเปิดวงจรของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซล เพื่อที่จะสามารถรับไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซลได้ และส่งสัญญาณดิจิทัล 0 ให้กับสวิตช์ควบคุมกริดเพื่อเปิดวงจรกริด
 - c. ในช่วงเวลากลางวัน ระบบควบคุมจะส่งสัญญาณ 1 ให้กับสวิตช์แหล่งจ่ายโซล่าเซลล์เพื่อเปิดวงจร เนื่องจากให้โซล่าเซลล์สามารถผลิตและจ่ายไฟฟ้าได้ และในช่วงเวลากลางคืน ระบบควบคุมจะส่งสัญญาณ 0 ให้กับสวิตช์แหล่งจ่ายโซล่าเซลล์เพื่อเปิดวงจร เนื่องจากโซล่าเซลล์ไม่สามารถผลิตไฟฟ้าได้ในเวลานี้



รูปที่ 2.6 Block-diagram ควบคุมการเปิด/ปิดสวิตช์ของแหล่งจ่ายไฟฟ้าในระบบไมโครกริด



รูปที่ 2.7 สัญญาณดิจิทัล (Digital Signal)

2.2.3 อุปกรณ์ในการควบคุมแรงดันบัส

ตัวเก็บประจุที่บัสกระแสตรงทำหน้าที่เก็บสะสมพลังงานที่ได้จากแหล่งจ่ายไฟฟ้าและทำหน้าที่จ่ายไฟฟ้าให้โหลดรวมถึงการชาร์จแบตเตอรี่ โดยอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมแรงดันบัสด้วยการปรับขนาดแรงดันคือ วงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์ (boost converter), คอนเวอร์เตอร์แปลงกระแสไฟฟ้าสองทิศทาง (bidirectional converter) และวงจรอินเวอร์เตอร์ (inverter unit) [18]

2.2.3.1 DC-DC boost converter control

เนื่องจากแรงดันที่ได้จากโซล่าเซลล์มีค่าน้อยกว่าแรงดันบัสอยู่มาก ดังนั้นระบบจะใช้ boost converter ในการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าเพื่อที่จะเชื่อมต่อเข้ากับระบบกระแสตรง ซึ่งในวงจร boost converter จะใช้สวิตช์ Isolate Gate Bipolar Transistor (IGBT) โดย IGBT จะรับสัญญาณ Pulse Width Modulation (PWM) เพื่อควบคุมการจ่ายแรงดันและกระแสของคอนเวอร์เตอร์

2.2.3.2 คอนเวอร์เตอร์แปลงสัญญาณสองทิศทาง (Bidirectional converter) [19]

คอนเวอร์เตอร์ชนิดนี้จะควบคุมการไหลของไฟฟ้าได้ 2 ทางทั้งจากแบตเตอรี่จ่ายไฟฟ้าให้บัสกระแสตรง และจากบัสกระแสตรงชาร์จให้แบตเตอรี่ นอกจากนี้ช่วยให้การชาร์จและการคายประจุของแบตเตอรี่เป็นไปอย่างเหมาะสม รวมถึงป้องกันการ overcharge และ deep discharge ของแบตเตอรี่

ในการทำงานแบบชาร์จไฟให้กับแบตเตอรี่ bidirectional converter จะทำหน้าที่เป็น buck converter เพื่อลดกระแสและแรงดันจากบัสกระแสตรงเข้าสู่แบตเตอรี่ และเมื่อแหล่งจ่ายไฟฟ้าผลิตไฟฟ้าไม่เพียงพอต่อความต้องการโหลด แบตเตอรี่จะคายประจุเพื่อช่วยจ่ายไฟฟ้าให้โหลด เนื่องจากแรงดันจากแบตเตอรี่มีค่าน้อยกว่าแรงดันบัส ดังนั้น bidirectional converter จะทำหน้าที่เป็น boost converter เพื่อเพิ่มแรงดันและกระแสในการจ่ายไฟฟ้าให้กับบัส

2.2.3.3 อินเวอร์เตอร์ (Inverter control)

อินเวอร์เตอร์ทำหน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงจากบัสกระแสตรง เป็นไฟฟ้ากระแสสลับที่สามารถปรับค่าได้ให้เหมาะกับโหลดกระแสสลับ ด้วยความถี่และแอมพลิจูดที่เหมาะสม โดยจะใช้เทคนิค PWM ในการสร้าง switching pulse เพื่อควบคุมการเปิด-ปิดสวิตช์

2.2.3.4 คอนเวอร์เตอร์แปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรง (AC-DC converter)

เนื่องจากกริดและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซลผลิตไฟฟ้ากระแสสลับ ดังนั้นจึงต้องมีการแปลงไฟฟ้าเป็นกระแสตรงเพื่อที่จะจ่ายไฟฟ้ารักษาบัสกระแสตรง โดยกรณีที่แรงดันบัสมีค่าน้อยกว่าแรงดันอ้างอิง AC-DC converter จะจ่ายไฟฟ้าจากกริดสู่ระบบไมโครกริด และในกรณีที่แรงดันบัสมีค่ามากกว่าแรงดันอ้างอิง AC-DC converter จะลดปริมาณไฟฟ้าจากกริดที่จ่ายไฟฟ้าให้กับระบบไมโครกริดเป็นผลให้แรงดันบัสกลับมาที่ค่าอ้างอิงเดิม

2.2.4 เหตุการณ์ที่มีผลต่อแรงดันบัสอันเนื่องมาจากโซล่าเซลล์

แรงดันบัสบ่งบอกถึงความสมดุลของพลังงานในระบบ และยังช่วยรักษาช่วยรักษาแรงดันของโหลดที่ไวต่อการเปลี่ยนแปลง ซึ่งเหตุการณ์ที่ส่งผลกระทบต่อกริดที่เปลี่ยนแปลงของแรงดันบัสคือ แหล่งจ่ายไฟฟ้าโซล่าเซลล์ซึ่งไฟฟ้ามีความไม่แน่นอน โดยสามารถแบ่งได้ 2 กรณี

1. แหล่งจ่ายไฟฟ้าโซล่าเซลล์ผลิตไฟฟ้าออกมามาก

เมื่อแหล่งจ่ายโซล่าเซลล์ผลิตไฟฟ้าออกมาในปริมาณที่เพิ่มขึ้น เป็นผลทำให้พลังงานไฟฟ้ารวมจากแหล่งจ่ายโซล่าเซลล์และกริดมีค่ามากขึ้นในขณะหนึ่งและเกินความต้องการของโหลด ส่งผลให้พลังงานไฟฟ้าในช่วงเวลานี้ของระบบนี้ไม่มีความสมดุลกัน (Power unbalance) ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้แรงดันบัสมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงนั้น

2. แหล่งจ่ายไฟฟ้าโซล่าเซลล์ผลิตไฟฟ้าออกมาน้อย

เมื่อแหล่งจ่ายโซล่าเซลล์ผลิตไฟฟ้าออกมาในปริมาณที่ลดลง เป็นผลทำให้พลังงานไฟฟ้ารวมจากแหล่งจ่ายโซล่าเซลล์และกริดมีค่าลดลงในขณะหนึ่งและไม่เพียงพอต่อความต้องการของโหลด ส่งผลให้พลังงานไฟฟ้าในช่วงเวลานี้ของระบบนี้ไม่มีความสมดุลกัน (Power unbalance) ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้แรงดันบัสมีค่าลดลงในช่วงนั้น

ดังนั้นแรงดันบัสที่คงที่เป็นตัวแปรที่สำคัญเนื่องจากแรงดันบัสบ่งบอกถึงประสิทธิภาพการทำงานของระบบ เนื่องจากถ้าแหล่งจ่ายตอบสนองช้าเกินไป จะทำให้แรงดันบัสลดลงอย่างรวดเร็วเป็นผลให้ระบบไมโครกริดล่ม

การควบคุมแรงดันบัสด้านสามารถแบ่งได้เป็น 3 กรณี คือ [9], [20]

1. ควบคุมแรงดันบัสดโดยกริด เมื่อทำงานในโหมดเชื่อมต่อโครงข่ายไฟฟ้าหลัก (grid-connected mode)

ในสภาวะปกติกริดจะเป็นตัวจ่ายไฟฟ้าให้กับโหลดทั้งหมด และเมื่อแหล่งจ่ายโซลาร์เซลล์สามารถผลิตไฟฟ้าออกมาได้มาก จะส่งผลให้แรงดันบัสดในขณะนั้นมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งคอนเวอร์เตอร์ของกริดจะทำหน้าที่ในการควบคุมแรงดันบัสดโดยการลดการจ่ายไฟฟ้าลงผ่านการควบคุมของ AC-DC converter เป็นผลทำให้แรงดันบัสดกลับมาอยู่ในค่าอ้างอิงเดิมได้ และเมื่อแหล่งจ่ายโซลาร์เซลล์ผลิตไฟฟ้าได้ลดลงจากเดิมจะส่งผลให้แรงดันบัสดในขณะนั้นมีค่าลดลง ซึ่งคอนเวอร์เตอร์ของกริดจะทำหน้าที่ควบคุมแรงดันบัสดให้กลับมาอยู่ในค่าอ้างอิงเดิมได้โดยการดึงไฟฟ้าผ่าน AC-DC converter ให้มากขึ้นดังนั้นเราสามารถรักษาระดับแรงดันบัสดให้คงที่ได้โดยการทำงานของ AC-DC converter

2. ควบคุมแรงดันบัสดด้วยแบตเตอรี่ เมื่อมีการเปลี่ยนโหมดการทำงานเป็นแยกตัวอิสระ (standalone mode)

ในสภาวะที่กริดมีปัญหาเกิดขึ้น ระบบไมโครกริดจะทำงานในโหมดแยกตัวอิสระและในระหว่างที่ระบบไมโครกริดเปลี่ยนโหมดจากต่อกริดเป็นโหมดแยกตัวอิสระจะส่งผลให้แรงดันบัสดจะลดลงในขณะหนึ่ง โดยแบตเตอรี่จะรักษาแรงดันบัสดให้กลับมาที่ค่าอ้างอิงเดิมซึ่งแบตเตอรี่จะทำหน้าที่ในการจ่ายไฟฟ้าให้กับโหลดวิกฤตเพื่อรอให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซลเริ่มทำงาน

3. ควบคุมแรงดันบัสดด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซล

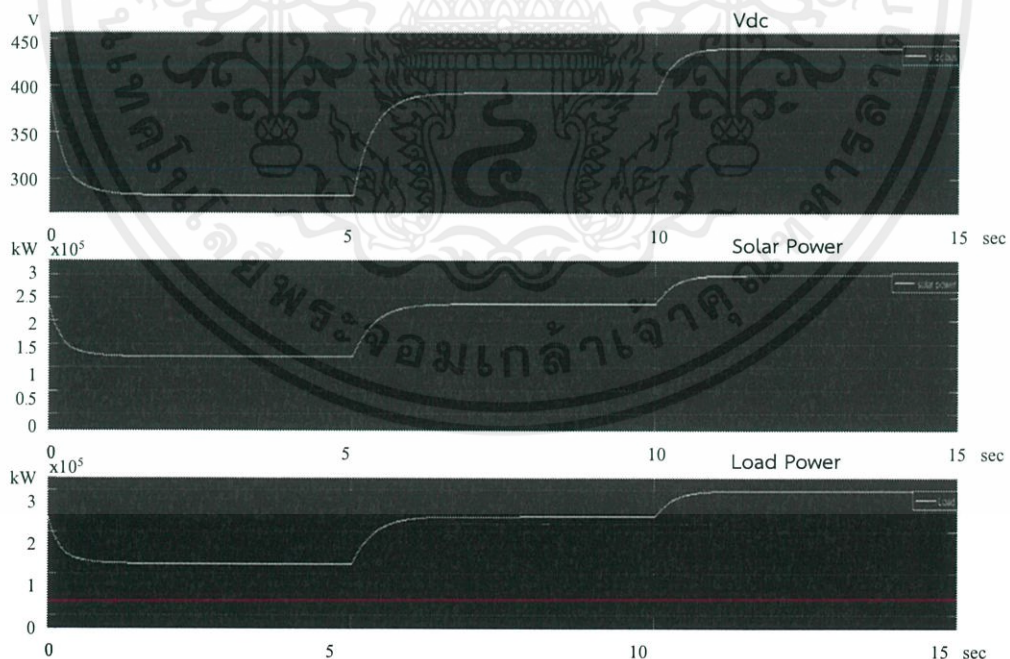
การควบคุมแรงดันด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซล เป็นการควบคุมแรงดันจ่ายที่ออกมาผ่าน AC-DC converter ซึ่งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซลจะควบคุมแรงดันบัสดเมื่อระบบไมโครกริดอยู่ในโหมดแยกตัวอิสระ

บทที่ 3

การออกแบบและจำลองการทดลอง

3.1 การออกแบบการทำงานระบบไมโครกริด[21]

ระบบไมโครกริดในโครงการจะมีแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าหลักให้กับโหลด คือ โครงข่ายไฟฟ้า และมีแหล่งจ่ายสำรอง 3 แหล่งคือ 1. โซลาร์เซลล์ 2. แบตเตอรี่ 3. เครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซล โดยแหล่งจ่ายสำรองนี้จะนำมาเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าให้กับโหลดวิกฤต (Critical load) ในกรณีที่กริดเกิดความขัดข้องหรือไม่สามารถจ่ายไฟฟ้าให้กับโหลดได้ จุดที่เชื่อมต่อของแต่ละแหล่งจ่ายเข้ากับภาระโหลดจะอยู่ที่บัส DC มีค่าแรงดันอ้างอิงอยู่ที่ 400 v ซึ่งจะต้องรักษาระดับแรงดันนี้ไว้ไม่ให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเกินกว่า 5% ของแรงดันอ้างอิง (อยู่ในช่วง 380-420 v) แต่เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของโหลดหรือแหล่งจ่าย แรงดันบัส DC ก็เปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ตามรูปที่ 3.1 เป็นกราฟเปรียบเทียบค่าแรงดันบัส DC และกำลังไฟฟ้าที่ผลิตจากโซลาร์เซลล์ แสดงให้เห็นว่าหากกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของแหล่งจ่ายมีค่าน้อยกว่าความต้องการของโหลด แล้วแรงดันบัส DC ก็จะลดลงเพราะถูกโหลดดึงไปใช้ แต่ถ้ากำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายมีค่ามากกว่าความต้องการของโหลดแล้วแรงดันไฟฟ้าบัส DC ก็จะเพิ่มขึ้น



รูปที่ 3.1 เปรียบเทียบค่า V_{DC} และกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากโซลาร์เซลล์ และกำลังไฟฟ้าที่โหลดต้องการ

ซึ่งวิธีที่ใช้ในการรักษาเสถียรภาพของแรงดันบัส DC คือการควบคุมแหล่งจ่ายในระบบให้สามารถจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับบัส เพื่อแก้ไขปัญหาแรงดันที่ตกลงหรือเพิ่มมากเกินไปให้ทันเวลาที่ โดยมีการออกแบบระบบควบคุมแหล่งจ่ายโดยใช้การควบคุมแบบ Lookup table

3.1.1 การคำนวณขนาดของแหล่งจ่ายไฟฟ้า

a) ระบบโซลาร์เซลล์

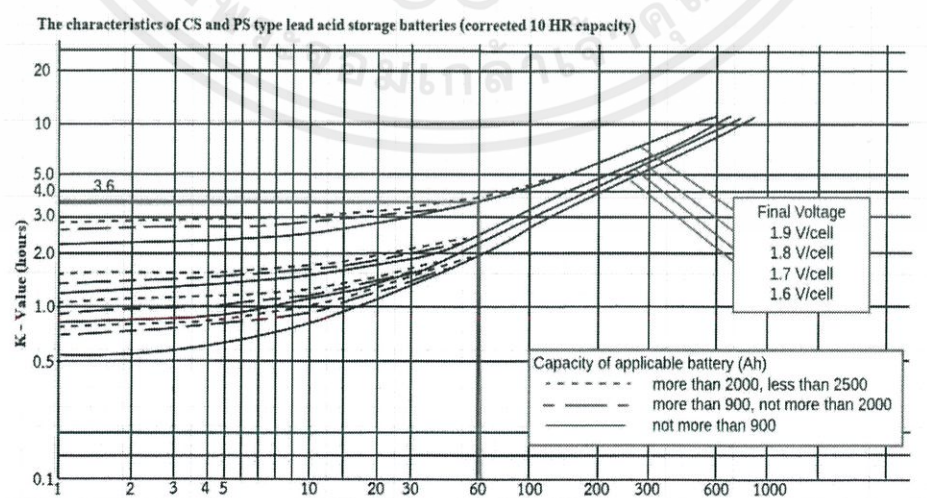
ระบบโซลาร์เซลล์มีขนาด 500 kW โดยใช้แผงโซลาร์เซลล์ยี่ห้อ SunPower มีขนาด $P_{max} = 414.8 \text{ W}$, $V_{oc} = 85.3 \text{ V}$ และ $I_{sc} = 6.09 \text{ A}$ (จากข้อมูลของ Standard Test Conditions , STC เป็นการทดสอบแผงโซลาร์เซลล์ที่ความเข้มแสง $1,000 \text{ W/m}^2$ และอุณหภูมิ $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$) เนื่องจากโครงการนี้อ้างอิงจากโรงงานที่ตั้งอยู่ในภาคกลางของประเทศไทยที่มีอุณหภูมิเฉลี่ยตลอดปีอยู่ที่ 36 องศาเซลเซียส [22] ทำให้ระบบของโซลาร์เซลล์สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าออกมามากที่สุดได้เพียง 350 kW ที่ความเข้มแสง 1000 W/m^2 หากความเข้มแสงมีค่าลดลงก็จะทำให้กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ลดลงเช่นกัน

b) แบตเตอรี่ Lead acid

$$C = \frac{1}{L} [K_1 I_1] \quad (3.1)$$

ใช้ขนาด 500 Ah/hr สามารถจ่ายไฟฟ้าได้ภายใน 1 ชั่วโมงคำนวณจากสมการที่ 3.1

โดย $L = 0.8$ [23], Final voltage 1.9 V/cell หาค่า K ได้จากกราฟ Characteristic ของแบตเตอรี่ Lead acid แสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 กราฟ Characteristics of CS and PS type lead acid storage

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟสามารถหาค่า K ออกมาได้เท่ากับ 3.6 ค่ากระแสไฟฟ้า(I) คัดจาก $I = \frac{S}{V}$ โดย $S = 450 \text{ kVA}$ และ $V = 400 \text{ V}$ จะได้ค่า $I = 1,125 \text{ A}$ นำพารามิเตอร์ที่ได้แทนในสมการที่ 1 จะได้ค่าออกมาดังนี้

$$C = (1/0.8)(3.6 * 1,125) = 5,062.5 \text{ Ah}/10\text{hr} = 506.25 \text{ Ah}/\text{hr}$$

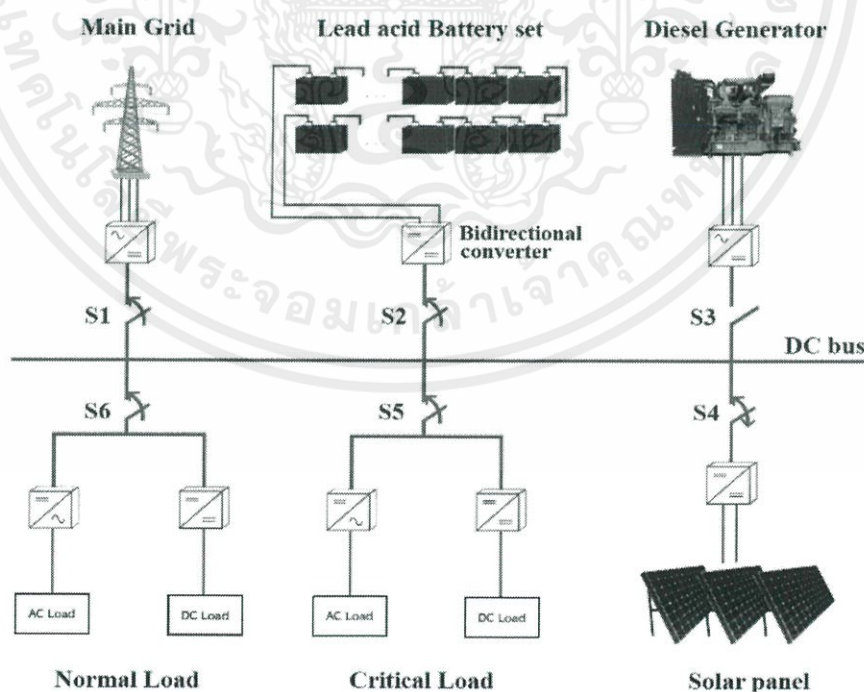
ดังนั้นจึงเลือกใช้แบตเตอรี่ขนาด 500 Ah/hr

C) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซล

ใช้ขนาด 2 MW เนื่องจากโหลดวิกฤตมีขนาด 400 kW และต้องเผื่อค่าตัวประกอบความปลอดภัยจากการเกิดฮาร์มอนิกในระบบประมาณ 5 เท่า [24-25]

ภาระโหลดทั้งหมดของระบบนี้มีขนาด 600 kW จะเป็นโหลดวิกฤต 400 kW และเป็นโหลดทั่วไป 200 kW โดยโหลดวิกฤตจะทำงานต่อเนื่อง 24 ชั่วโมง จึงต้องมีแหล่งจ่ายที่เสถียรจ่ายไฟฟ้าให้เสมอ เพราะเป็นโหลดที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสและแรงดัน อาจเกิดความขัดข้องหรือเสียหายหากได้รับค่ากระแสและแรงดันที่ผิดเพี้ยนไปจากปกติหรือไม่คงที่ ดังนั้นในระบบนี้จะมีปริมาณความต้องการของโหลดอยู่ที่ 400 kW ถึง 600 kW เปลี่ยนแปลงไปตามการใช้งาน

3.1.2 โหมดเชื่อมต่อโครงข่ายไฟฟ้าหลัก (Grid connected mode)



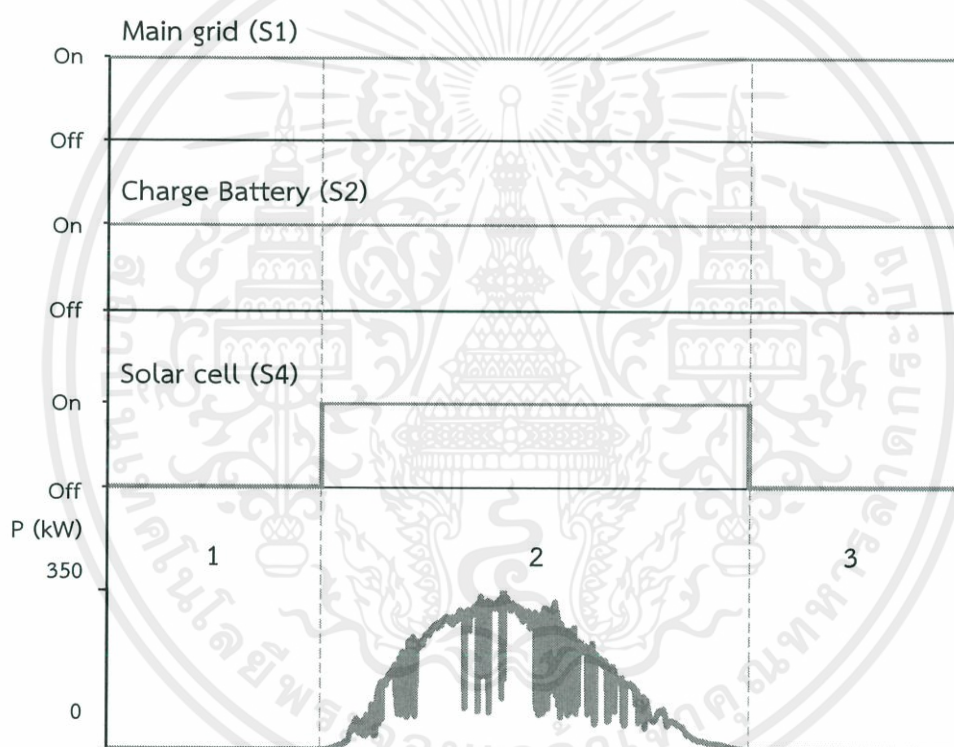
รูปที่ 3.3 ระบบไมโครกริดที่เชื่อมต่อโครงข่ายไฟฟ้าหลัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบการควบคุมสวิตช์ด้วยตาราง Lookup table ดังนี้

ตารางที่ 3.1 การออกแบบควบคุมระบบไมโครกริดที่เชื่อมต่อกับโครงข่ายไฟฟ้าหลัก

Grid connected Mode		
Solar cell	Charge Battery	Discharge Battery
Day	Solar cell → Load Main grid → Battery	Nothing
Night	Main grid → Load Main grid → Battery	Nothing

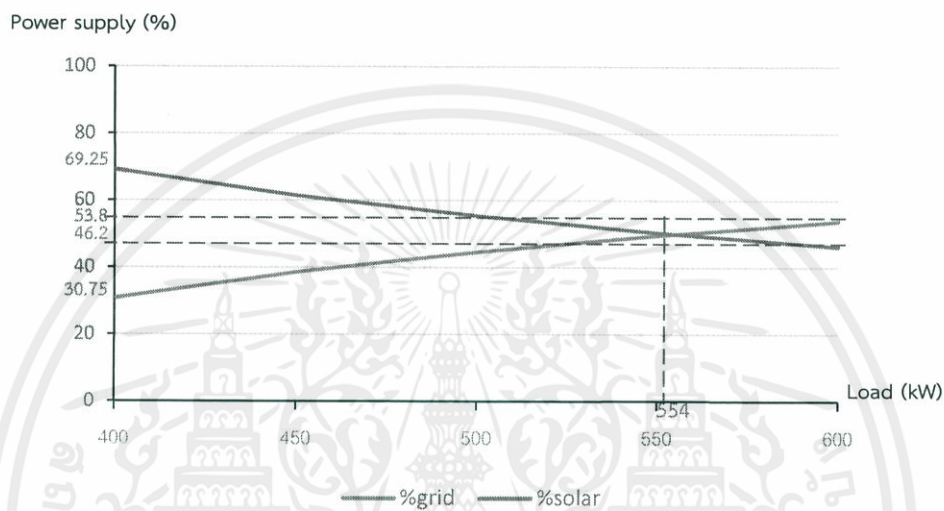


รูปที่ 3.4 กราฟความสัมพันธ์การทำงานของกริด แบตเตอรี่และโซลาร์เซลล์
ในโหมดเชื่อมต่อโครงข่ายไฟฟ้าหลัก

จากรูปที่ 3.4 ในช่วงที่ 1 และ 3 เป็นช่วงเวลากลางคืน โซลาร์เซลล์ไม่สามารถผลิตไฟฟ้าได้ กริดจึงเป็นแหล่งจ่าย 100 % ที่จ่ายไฟฟ้าให้กับโหลด และสำหรับชาร์จแบตเตอรี่เมื่อมี %SoC < 90 เมื่อแบตเตอรี่ถูกชาร์จจน %SoC = 90 แล้วก็จะหยุดการชาร์จเพื่อยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ ในช่วงที่ 2 เป็นช่วงเวลากลางวัน โซลาร์เซลล์สามารถผลิตไฟฟ้าร่วมกับกริดได้ สามารถประหยัดการใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลังงานไฟฟ้าจากกริด หรือก็คือช่วยในการลดค่าไฟฟ้า ซึ่งจะสามารถช่วยลดได้มากน้อยแค่ไหน ก็ขึ้นอยู่กับว่าในช่วงนั้นโซลาร์เซลล์สามารถผลิตพลังงานได้เท่าไร มีการใช้โหลดในปริมาณเท่าไร ยกตัวอย่าง หากมีความเข้มแสง 800 W/m^2 และมีการใช้ปริมาณโหลดอยู่ที่ 400 kW ถึง 600 kW โซลาร์เซลล์จะสามารถช่วยประหยัดพลังงานได้ตามรูปที่ 3.5 แสดงความสัมพันธ์เป็นค่าเปอร์เซ็นต์ การจ่ายไฟฟ้าของกริดกับโซลาร์เซลล์ต่อความต้องการของโหลดที่มีการเปลี่ยนแปลง



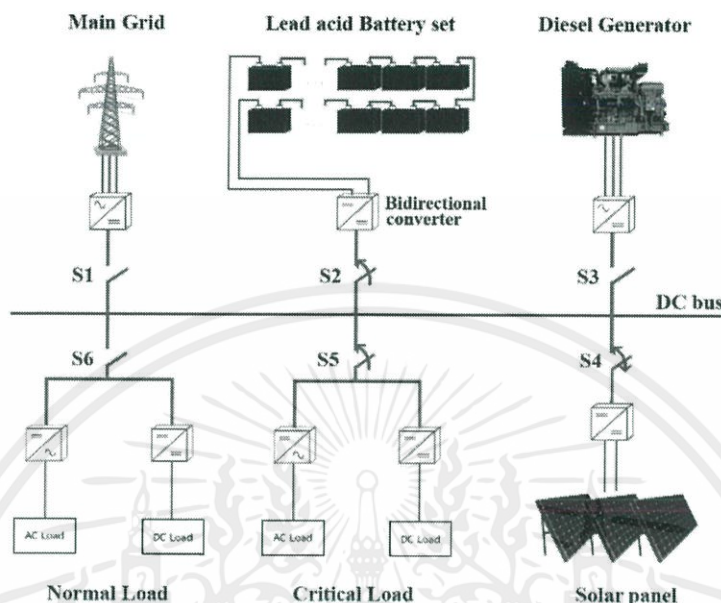
รูปที่ 3.5 ค่าเปอร์เซ็นต์การจ่ายไฟฟ้าของกริดกับโซลาร์เซลล์ต่อความต้องการของโหลด ขนาด 400 kW ถึง 600 kW

จากรูปที่ 3.5 โซลาร์เซลล์สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าออกมาได้ประมาณ 277 kW ที่ความเข้มแสง 800 W/m^2 เมื่อมีการใช้โหลดขนาด 400 kW โซลาร์เซลล์จะช่วยจ่ายไฟฟ้าได้เป็น 69.25% ของขนาดการใช้โหลด โดยกริดจะจ่ายไฟฟ้าในส่วนที่เหลือเพียง 30.75% หากมีการใช้โหลดมากขึ้น เปอร์เซ็นต์การช่วยจ่ายไฟฟ้าของโซลาร์เซลล์จะลดลง และกริดต้องจ่ายไฟฟ้ามากขึ้น จุดตัดของกราฟกริดกับโซลาร์เซลล์คือช่วงที่มีการใช้โหลดขนาด 554 kW ซึ่งการจ่ายไฟฟ้าของโซลาร์เซลล์จะเป็น 50% เท่ากับการจ่ายไฟฟ้าของกริด เมื่อมีการใช้โหลดรวมทั้งหมดขนาด 600 kW โซลาร์เซลล์จะช่วยจ่ายได้เพียง 46.2% ส่วนกริดจะจ่ายไฟฟ้าเป็น 53.8%

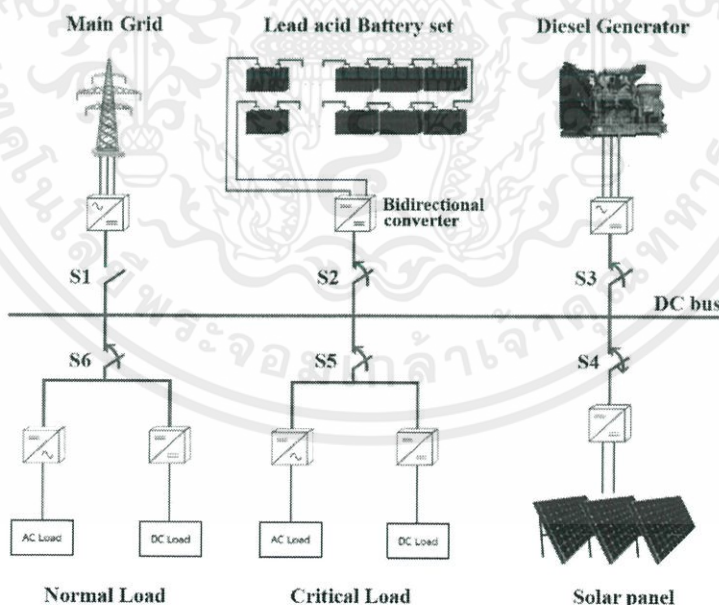
3.1.3 โหมดแยกตัวอิสระ (Standalone mode)

ในกรณีที่โครงข่ายไฟฟ้าหลักเกิดความขัดข้องไม่สามารถที่จะจ่ายไฟฟ้าได้ ระบบไมโครกริดจะแยกตัวออกมาเป็นอิสระหรืออยู่ในโหมด Standalone แสดงให้เห็นดังรูปที่ 3.5 โดยจะมีแหล่งจ่าย

ไฟฟ้า คือ โซลาร์เซลล์ แบตเตอรี่และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซล ในการเปลี่ยนสถานะจากโหมดเชื่อมต่อกริดไปเป็นโหมดแยกตัวอิสระนั้นมีอยู่ 2 ขั้นตอนในการเปลี่ยนโหมดโดยดูได้จากรูปที่ 3.6 และ 3.7



รูปที่ 3.6 ระบบไมโครกริดแบบแยกตัวเป็นอิสระ ในช่วงที่ 1



รูปที่ 3.7 ระบบไมโครกริดแบบแยกตัวเป็นอิสระ ในช่วงที่ 2

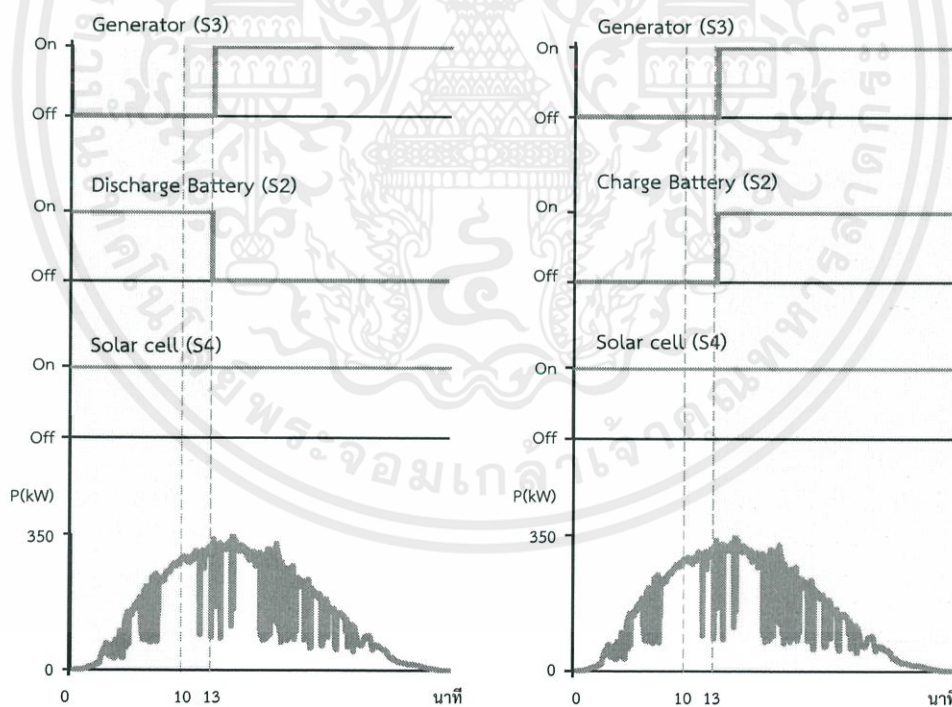
จากรูปที่ 3.6 เมื่อกริดกริดได้ตัดออกไปจากระบบ แบตเตอรี่จะเปลี่ยนจากโหมดการอัดประจุเป็นแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับโหลดวิกฤตอย่างเดียว เนื่องจากโหลดปกติได้ถูกตัดออกไปพร้อมกับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กริด (เพื่อไม่ให้เป็นการของแบตเตอรี่มากเกินไป) เมื่อผ่านไประยะเวลาหนึ่งแล้วกริดยังไม่สามารถจ่ายกระแสได้จะเริ่มทำการเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซลแล้วเชื่อมต่อเข้ากับระบบ ดังเช่นรูปภาพที่ 3.7 มีการออกแบบการควบคุมสวิตช์ด้วยตาราง Lookup table ดังนี้

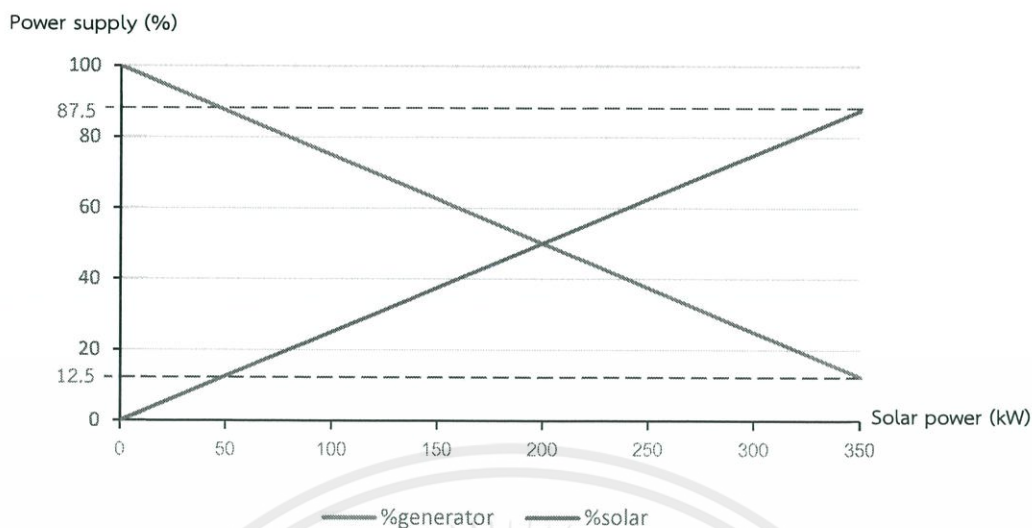
ตารางที่ 3.2 การออกแบบควบคุมระบบไมโครกริดแบบแยกตัวเป็นอิสระ

Standalone Mode			
Solar cell	Discharge Battery		Charge Battery
	0-10 Min.	10-13 Min	13 Minutes after
Day	Solar cell Battery → Load	Solar cell Battery → Load Generator	Solar cell → Load Generator → Battery
Night	Battery → Load	Battery → Load Generator	Generator → Load Battery



รูปที่ 3.8 กราฟความสัมพันธ์การทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซล แบตเตอรี่ และโซลาร์เซลล์ กรณีโหมดแยกตัวอิสระในช่วงเวลากลางวัน

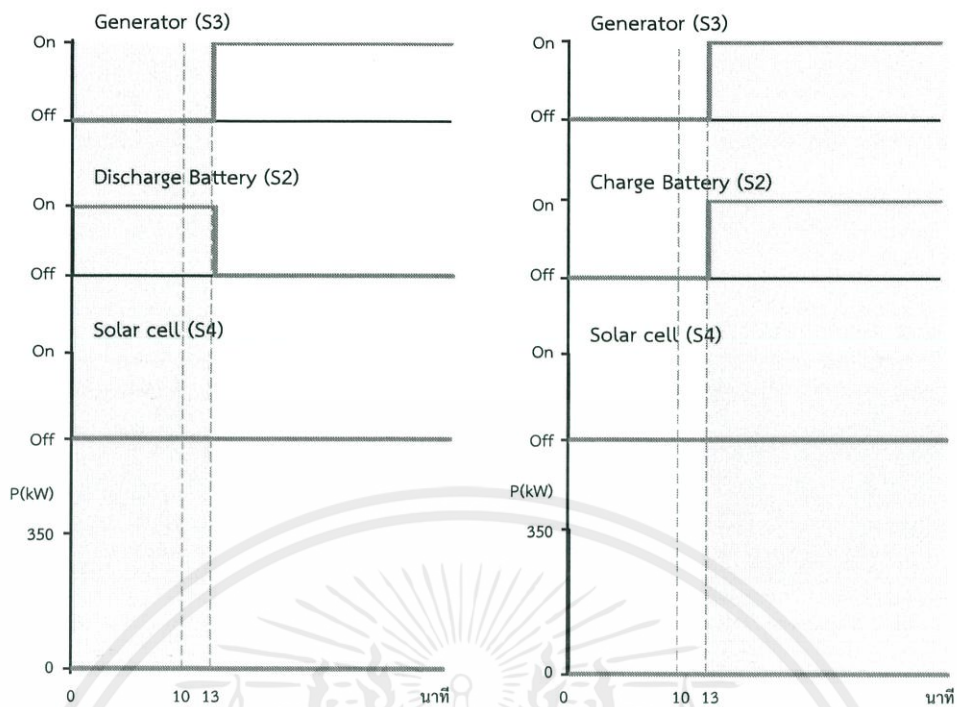
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 ค่าเปอร์เซ็นต์การจ่ายไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซลกับโซล่าเซลล์

ต่อความต้องการของโหลดขนาด 400 kW

จากรูปที่ 3.9 เข้าสู่โหมด Standalone ในช่วงเวลากลางวัน โซล่าเซลล์สามารถผลิตไฟฟ้าได้ แต่เนื่องจากกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้มีค่าน้อยกว่ากำลังไฟฟ้าของความต้องการโหลด โดยในเวลา 10 นาทีแรก จะให้แบตเตอรี่เป็นแหล่งจ่ายร่วมกับโซล่าเซลล์ แต่ถ้าหากผ่าน 10 นาทีไปแล้วก็ยังไม่สามารถกลับมาเชื่อมต่อกับระบบได้ จะทำการสั่งเริ่มการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซล โดยในการสตาร์ทเครื่องยนต์จะใช้เวลาไม่น้อยกว่า 10 วินาที [4] ช่วงนี้แบตเตอรี่จะยังช่วยในการจ่ายไฟฟ้าอยู่ เพราะ เมื่อเครื่องยนต์เดินเครื่องเรียบร้อยแล้ว และความเร็วรอบพร้อมแรงดันได้ตามเกณฑ์ เครื่องยนต์จะวิ่งตัวเปล่าในระยะเวลาหนึ่ง โดยในที่นี้จำลองเป็น 3 นาที จึงจะจ่ายไฟฟ้าให้กับโหลด เมื่อผ่านไป 13 นาที จะหยุดการคายประจุของแบตเตอรี่และเปลี่ยนโหมดมาเป็นการชาร์จแทน ในช่วงนี้จะให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซลเป็นแหล่งจ่ายร่วมกับโซล่าเซลล์ โดยความสัมพันธ์ในการจ่ายไฟฟ้าของทั้งสองแหล่งจะเป็นไปตามรูปที่ 3.9 เนื่องจากโซล่าเซลล์มีการผลิตกำลังไฟฟ้าออกมาได้ไม่สม่ำเสมอ จะมีการเปลี่ยนแปลงไปตามความเข้มแสง โดยความสามารถในการผลิตกำลังไฟฟ้าสูงสุดของระบบนี้เท่ากับ 350 kW ซึ่งจ่ายไฟฟ้าให้กับโหลดขนาด 400 kW ได้มากที่สุดคิดเป็น 87.5% ดังนั้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซลจะช่วยจ่ายไฟฟ้าในส่วนที่ขาดหายไปอีก 12.5% หากโซล่าเซลล์สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าออกมาได้มาก ก็จะช่วยลดการดึงกำลังไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซล



รูปที่ 3.10 กราฟความสัมพันธ์การทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซล แบตเตอรี่ และโซลาร์เซลล์ กรณีโหมดแยกตัวอิสระในช่วงเวลากลางคืน

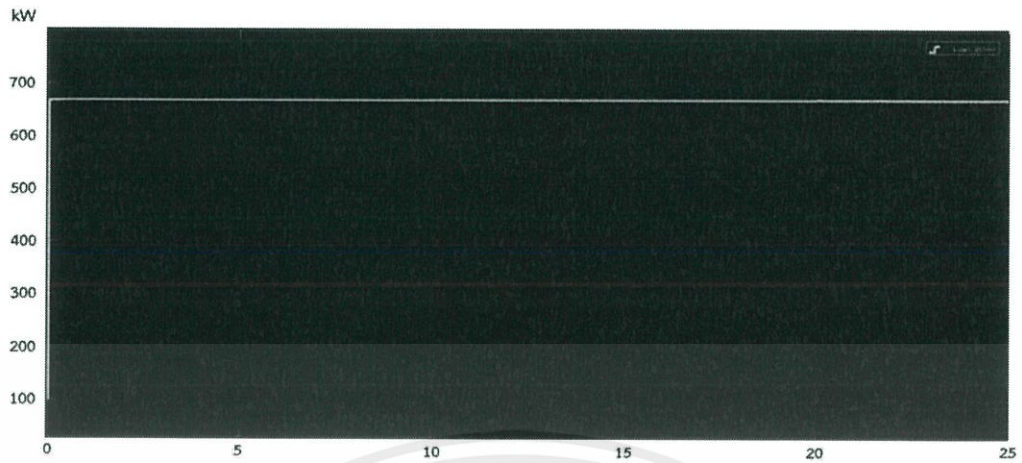
จากรูปที่ 3.10 เข้าสู่โหมด Standalone ในช่วงเวลากลางคืน โซลาร์เซลล์ไม่สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้ เหตุการณ์จะเหมือนตอนกลางวันแต่ไม่มีโซลาร์เซลล์มาแบ่งเบาภาระโหลด

3.2 ผลการจำลอง

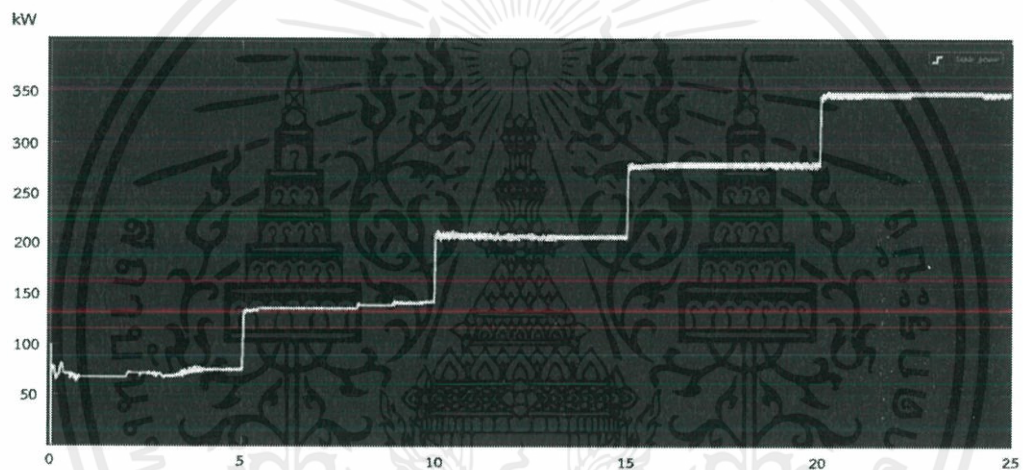
ใช้วิธีการ Simulink ในโปรแกรม Matlab ของแต่ละเหตุการณ์ที่สามารถเกิดขึ้น โดยจะแบ่งออกเป็นสองกรณี คือ 1. โหมดเชื่อมต่อโครงข่ายไฟฟ้าหลัก และ 2. โหมดแยกตัวอิสระ

3.2.1 โหมดเชื่อมต่อโครงข่ายไฟฟ้าหลัก

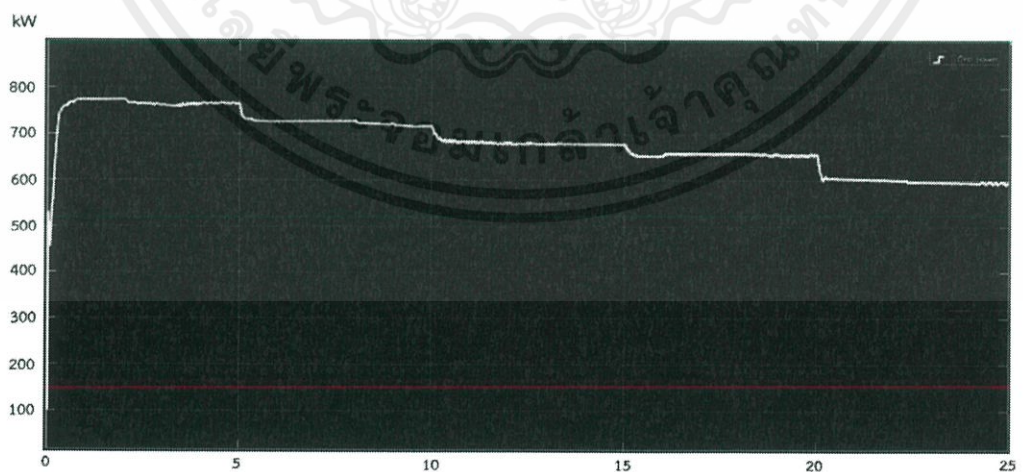
ในการจำลองช่วงเวลากลางวัน ตั้งค่าให้ค่าความเข้มแสงเท่ากับ 200, 400, 600, 800 และ 1000 W/m² โดยจะเปลี่ยนค่าความเข้มแสงทุก 5 วินาที มีการใช้กำลังไฟฟ้าจริง (Active Power) อยู่ที่ 670kW จะได้ผลการจำลองแสดงในรูปที่ 3.11



(a) Load Power

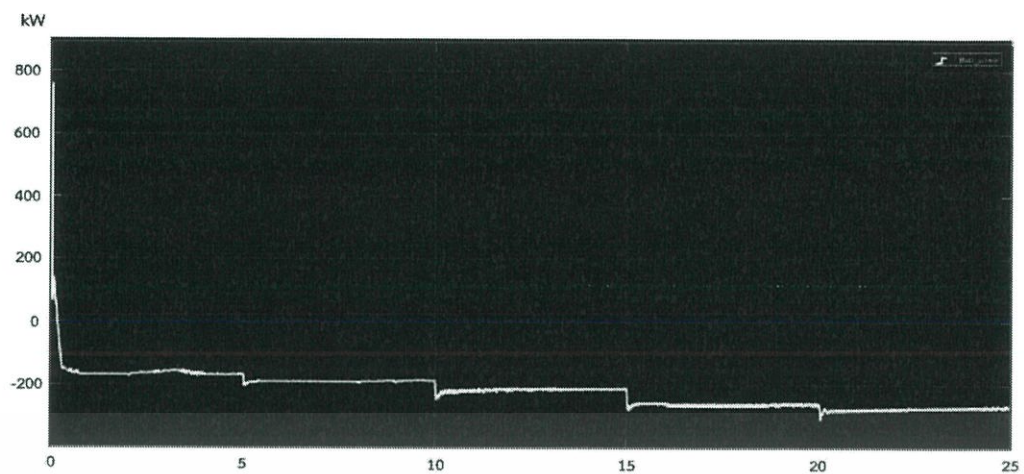


(b) Solar Power

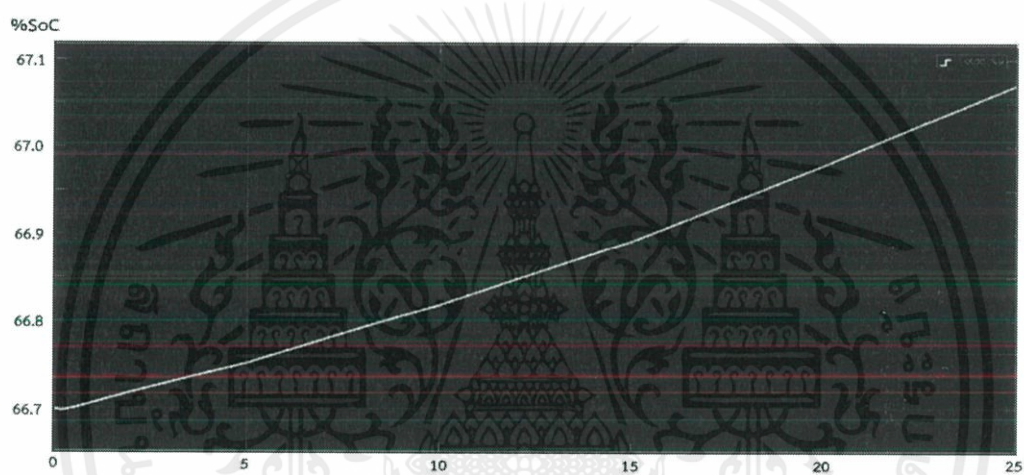


(c) Grid Power

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(d) Battery Power



(e) %SoC battery

(f) V_{DC} bus

รูปที่ 3.11 โหมดเชื่อมต่อโครงข่ายไฟฟ้าหลักในช่วงเวลากลางวัน (a) Load Power
(b) Solar Power (c) Grid Power (d) Battery Power (e) %SoC battery (f) V_{DC} bus

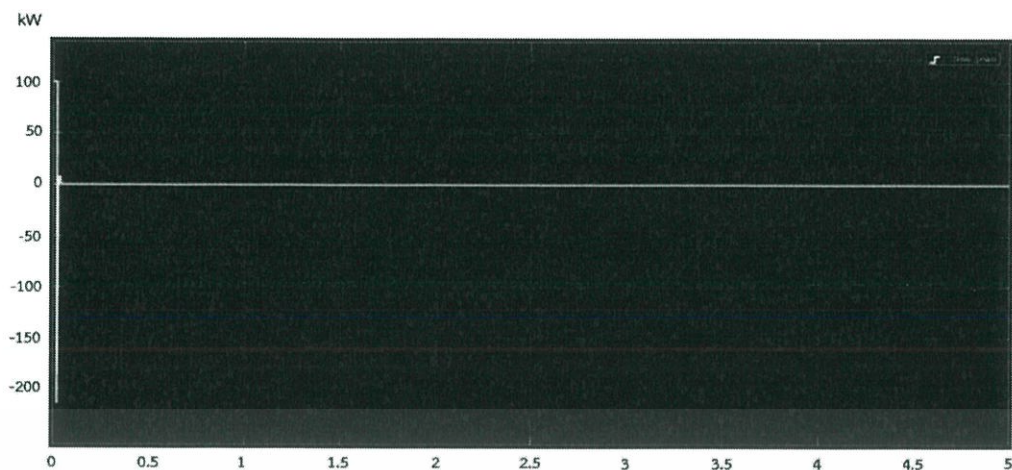
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.11 (b) และ (c) แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของการจ่ายไฟฟ้าของกริดกับโซลาร์เซลล์ในด้านการช่วยประหยัดพลังงาน ที่ความต้องการโหลดขนาด 670 kW แต่เนื่องจากโซลาร์เซลล์มีการผลิตกำลังไฟฟ้าได้ไม่สม่ำเสมอ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่าความเข้มแสง ในช่วงแรกที่มีความเข้มแสงน้อย โซลาร์เซลล์จะผลิตกำลังไฟฟ้าได้ไม่มากนัก ในช่วงนี้ระบบจะดึงไฟฟ้าจากกริดมาใช้เยอะ แต่ช่วงหลังที่ค่าความเข้มแสงเพิ่มมากขึ้นจนโซลาร์เซลล์สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด ในช่วงนี้จะดึงไฟฟ้าจากกริดมาใช้น้อยลง ดังเช่น ในช่วงเวลาที่ 10-15 วินาที โซลาร์เซลล์สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้ประมาณ 210 kW มีการดึงไฟฟ้าจากกริดประมาณ 680 kW ดังนั้นแหล่งจ่ายทั้งสองสามารถผลิตไฟฟ้าออกมาได้ประมาณ 890 kW กำลังไฟฟ้าในส่วนที่เหลือจากการจ่ายโหลดอีก 220 kW คือส่วนที่แบตเตอรี่ดึงไปชาร์จนั่นเอง แสดงให้เป็นในรูป 3.11 (d) จะเห็นได้ว่ากราฟกำลังไฟฟ้าของแบตเตอรี่เป็น -220 kW ในส่วนของแรงดันแบตเตอรี่สามารถรักษาไว้ได้ที่ประมาณ 408 V ซึ่งเป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนดไว้ (แรงดันเปลี่ยนแปลงได้ไม่เกิน 5%)

ในการจำลองช่วงเวลากลางคืน ความเข้มแสงเท่ากับ 0 W/m^2 จะได้ผลการจำลองดังนี้



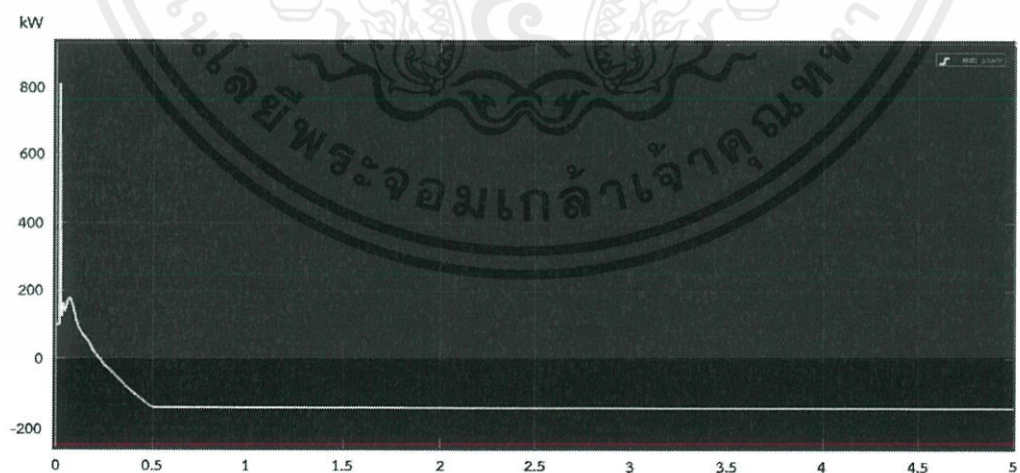
(a) Load Power



(b) Solar Power

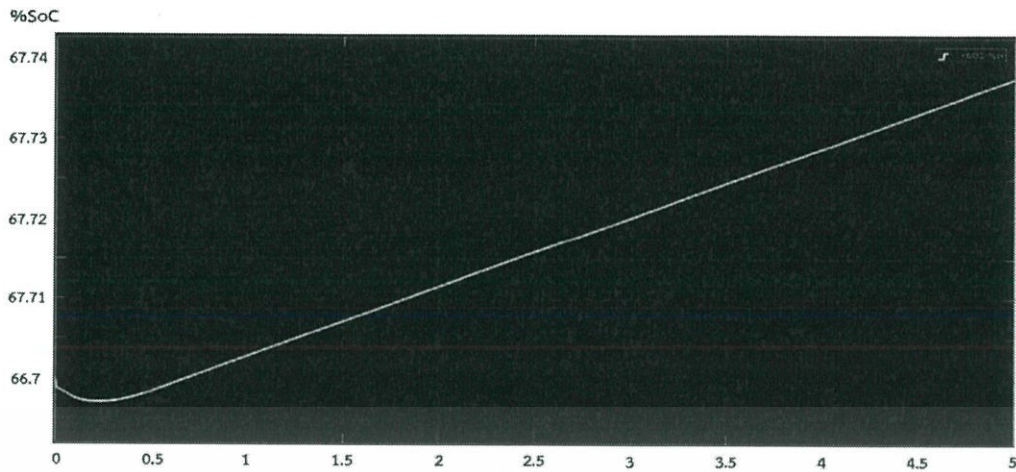


(c) Grid Power



(d) Battery Power

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(e) %SoC battery

(f) V_{DC} bus

รูปที่ 3.12 โหมดเชื่อมต่อโครงข่ายไฟฟ้าหลักในช่วงเวลากลางคืน (a) Load Power (b) Solar Power (c) Grid Power (d) Battery Power (e) %SoC battery (f) V_{DC} bus

จากรูปที่ 3.12 มีความต้องการโหลดขนาด 670 kW เนื่องจากในช่วงนี้ความเข้มแสงมีค่าเป็น 0 W/m^2 ทำให้โซลาร์เซลล์ไม่สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าออกมาได้ การจ่ายไฟฟ้าให้กับโหลดทั้งหมดจึงเป็นหน้าที่ของกริดเท่านั้น ยกตัวอย่างช่วง 1-2 วินาที มีการดึงไฟฟ้าจากกริดออกมาประมาณ 810 kW กำลังไฟฟ้าในส่วนที่เหลือจากการจ่ายโหลดอีก 140 kW คือส่วนที่แบตเตอรี่ดึงไปชาร์จนั่นเอง แสดงให้เห็นในรูป 3.12 (d) จะเห็นได้ว่ากราฟกำลังไฟฟ้าของแบตเตอรี่เป็น -140 kW ในส่วนของแรงดันบัส DC สามารถรักษาไว้ได้ที่ประมาณ 408 V

3.2.2 โหมดแยกตัวอิสระ

ในการจำลองช่วงเวลากลางวัน ตั้งค่าให้ค่าความเข้มแสงเท่ากับ 1000 W/m^2 ในช่วงแรกจะมีความต้องการโหลดขนาด 600 kW เนื่องจากกริดยังจ่ายไฟฟ้าได้ปกติ แต่ในช่วงเวลาต่อมากริดเกิดความขัดข้อง ระบบไมโครกริดจะเข้าสู่โหมด Standalone ซึ่งจะมีการจำลองดังนี้

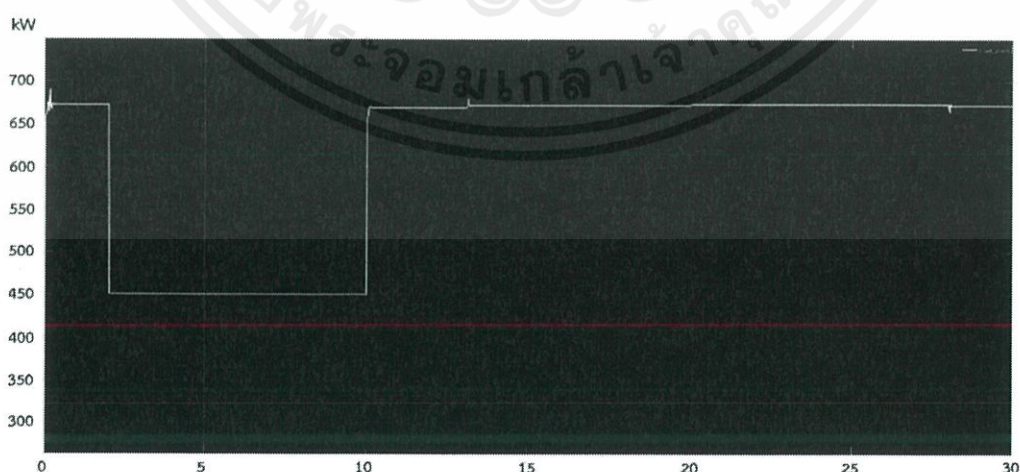
เวลาที่ 0-2 วินาที: โซลาร์เซลล์ผลิตกำลังไฟฟ้าในการช่วยจ่ายไฟฟ้าให้กับโหลดร่วมกับกริดเป็นปกติ หลังจากผ่านวินาทีที่ 2 กริดจะไม่สามารถจ่ายไฟฟ้าได้

เวลาที่ 2-7 วินาที: จะมีเพียงโซลาร์เซลล์จ่ายไฟฟ้าซึ่งไม่สามารถมีกำลังไฟฟ้ามากพอต่อความต้องการโหลด แบตเตอรี่จะทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายร่วมกับโซลาร์เซลล์ให้กับโหลดวิกฤต

เวลาที่ 7-10 วินาที: ช่วงนี้เป็นเวลาที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซลเริ่มการทำงานแต่ยังไม่สามารถจ่ายไฟฟ้าให้กับโหลดได้ เมื่อผ่านวินาทีที่ 10 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซลสามารถจ่ายไฟฟ้าให้กับโหลดได้ แบตเตอรี่จะหยุดการคายประจุและเปลี่ยนเป็นโหมดการชาร์จแทนและจะมีการเชื่อมต่อโหลดปกติกลับมา

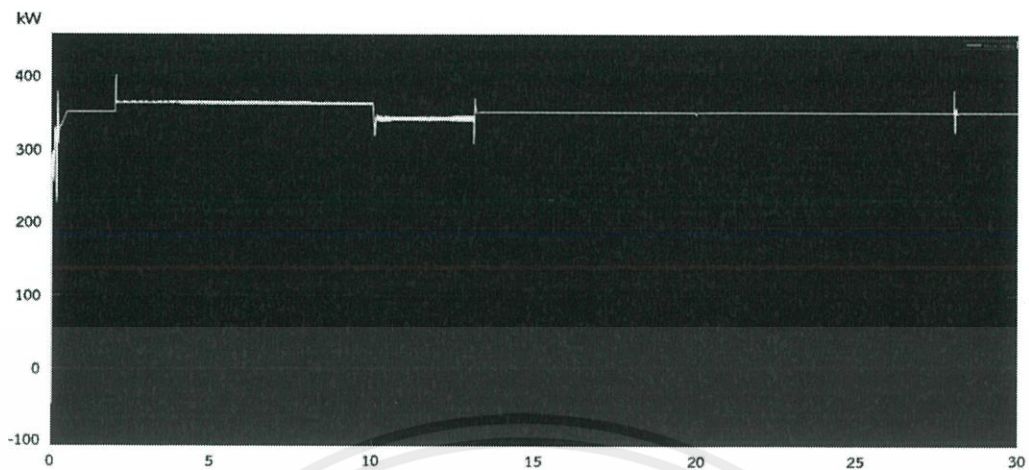
เวลาที่ 10-20 วินาที: ในช่วงนี้กริดยังไม่สามารถกลับมาเชื่อมต่อ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซลจะทำหน้าที่จ่ายไฟฟ้าร่วมกับโซลาร์เซลล์ให้กับโหลดและชาร์จแบตเตอรี่

เวลาที่ 20-30 วินาที: กริดสามารถกลับมาเชื่อมต่อระบบได้อีกครั้ง เครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซลจะลดกำลังการจ่ายไฟฟ้าแต่ยังทำงานอยู่ เพื่อให้มั่นใจว่าไฟฟ้าจากกริดสามารถกลับมาใช้งานได้อย่างสมบูรณ์ หลังจากผ่านวินาทีที่ 28 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซลจะตัดออกไปจากระบบแล้วหยุดการทำงานและกริดจะทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายร่วมกับโซลาร์เซลล์เหมือนเดิม จะได้ผลการจำลองแสดงใน รูปที่ 3.13



(a) Load Power

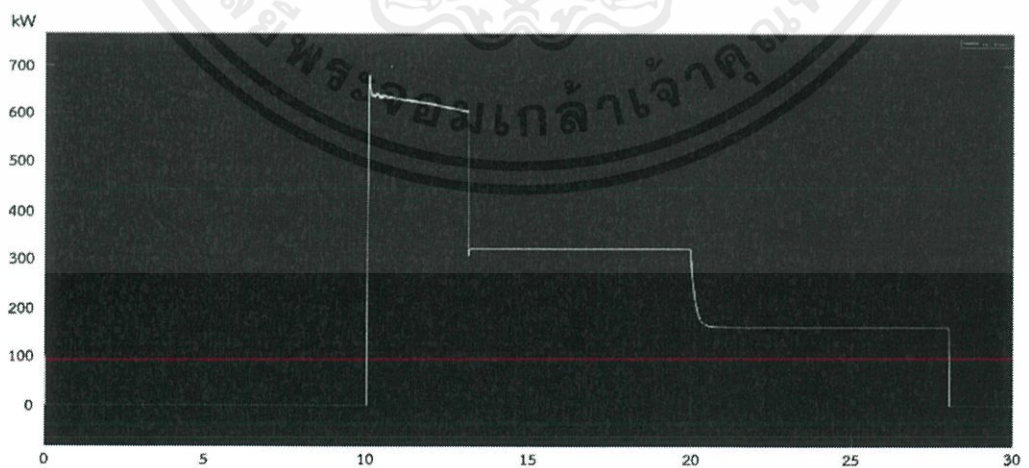
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(b) Solar Power

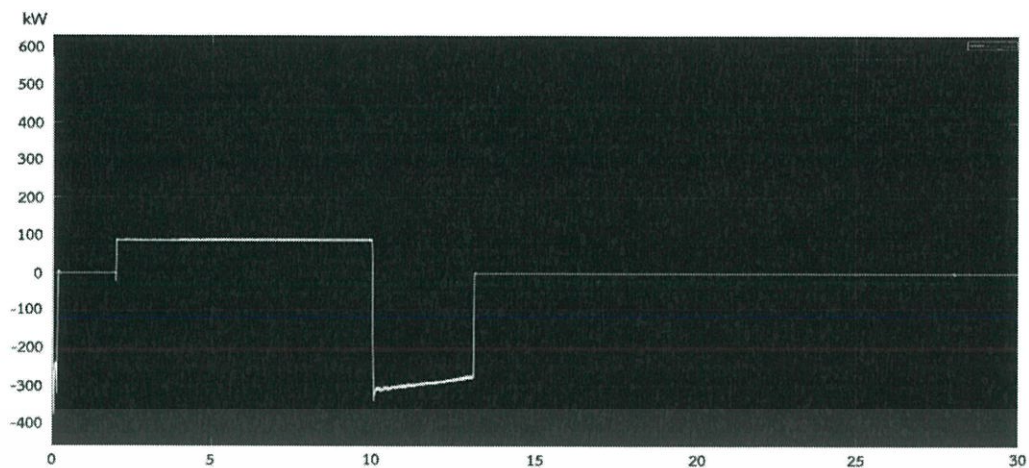


(c) Grid Power



(d) Generator Power

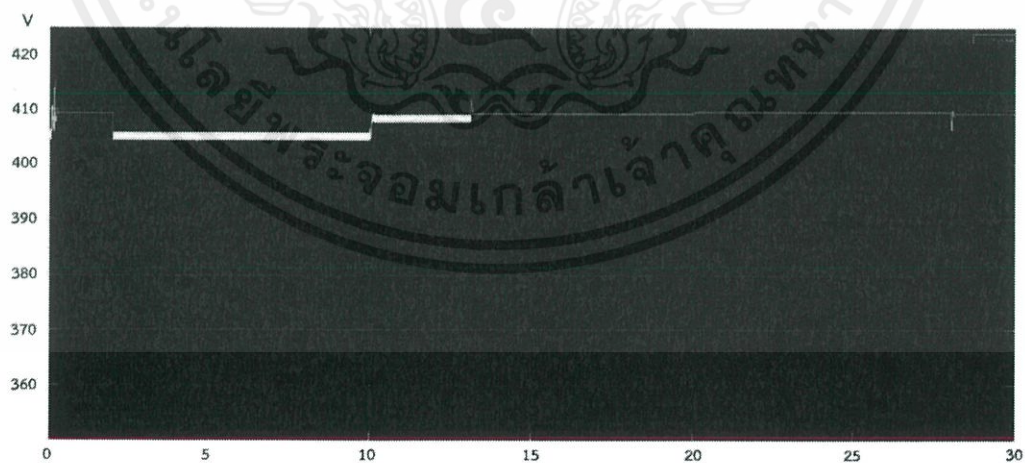
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(e) Battery Power



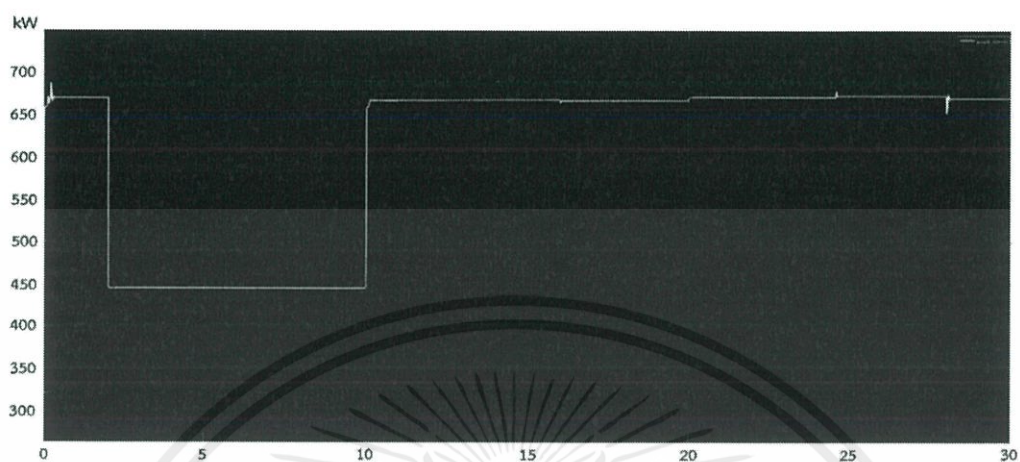
(f) %SoC battery

(g) V_{DC} bus

รูปที่ 3.13 โหมตแยกตัวอิสระในช่วงเวลากลางวัน (a) Load Power (b) Solar Power
(c) Grid Power (d) Generator Power (e) Battery Power (f) %SoC battery (g) V_{DC} bus

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการจำลองช่วงเวลากลางคืน ตั้งค่าให้ค่าความเข้มแสงเท่ากับ 0 W/m^2 จะได้ผลการจำลองแสดงในรูปที่ 3.14

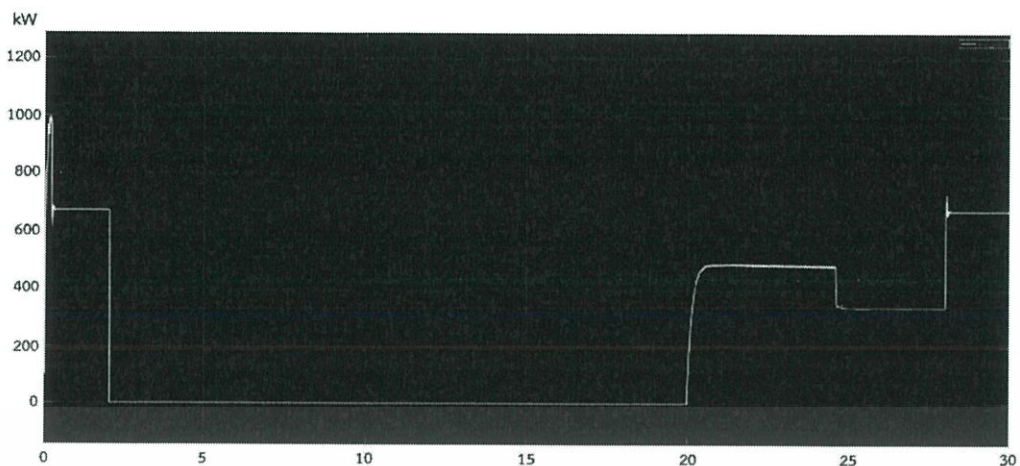


(a) Load Power

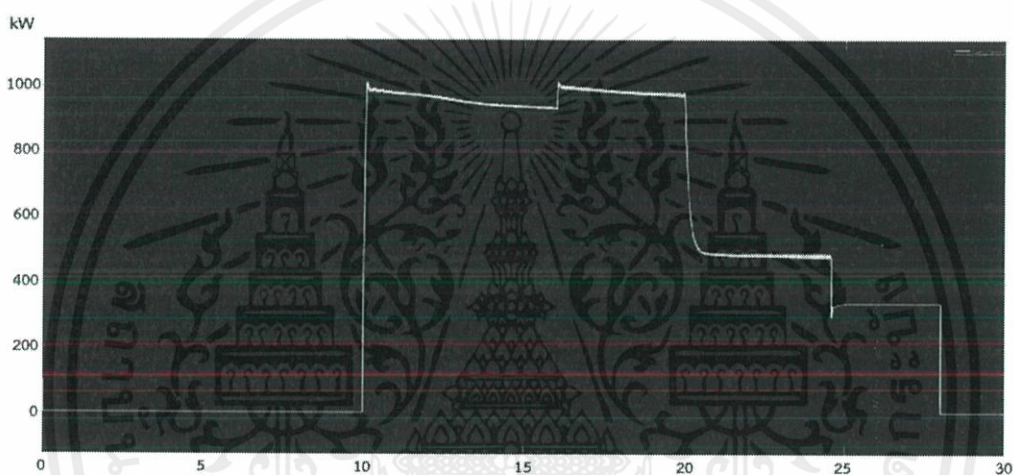


(b) Solar Power

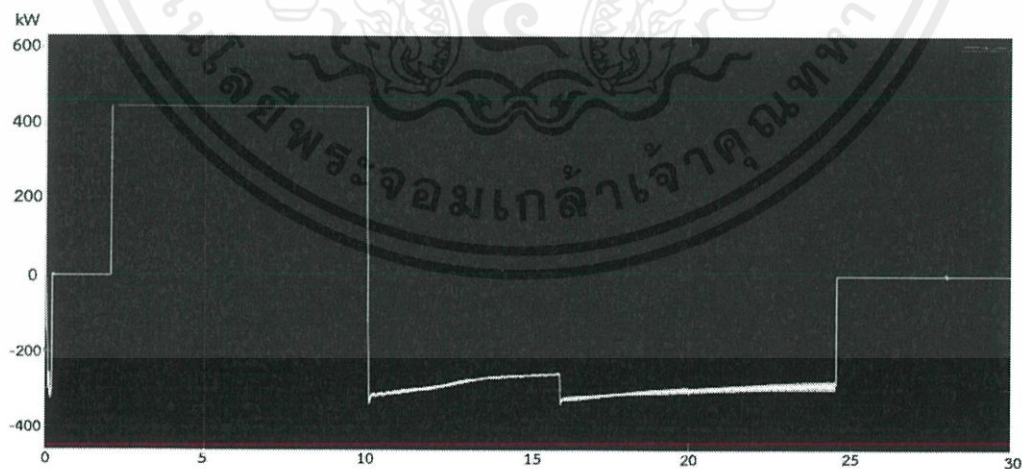
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(c) Grid Power

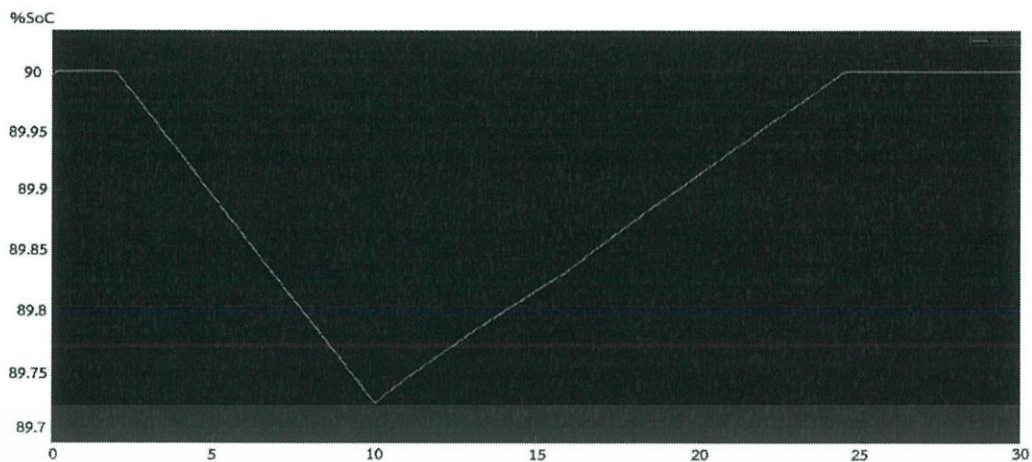


(d) Generator Power

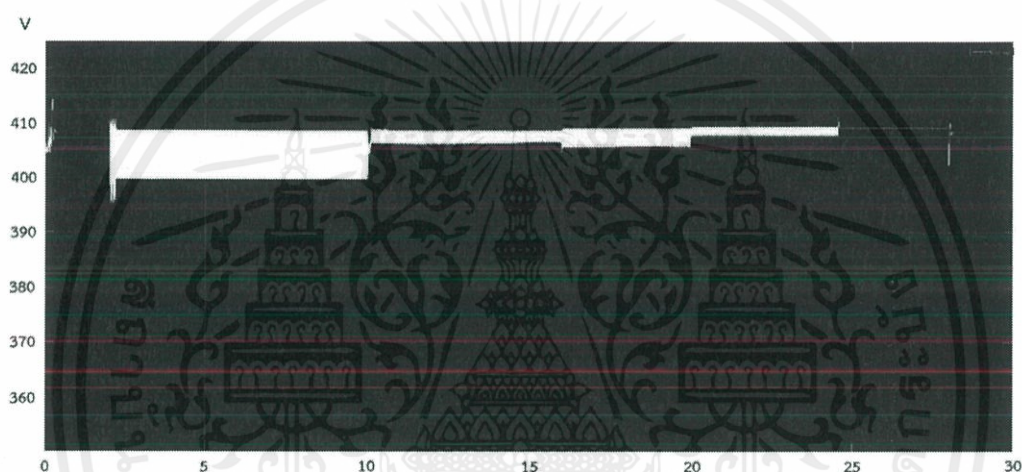


(e) Battery Power

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(f) %SoC battery

(g) V_{DC bus}

รูปที่ 3.14 โหมดแยกตัวอิสระในช่วงเวลากลางคืน (a) Load Power (b) Solar Power (c) Grid Power (d) Generator Power (e) Battery Power (f) %SoC battery (g) V_{DC bus}

ในแง่ของภาคอุตสาหกรรม เมื่อมองในด้านของระบบไฟฟ้าที่ต้องมีเสถียรภาพ และด้านการประหยัดพลังงาน จึงมีความต้องการให้ระบบไมโครกริดอยู่ในโหมดการเชื่อมต่อโครงข่ายไฟฟ้าหลักมากที่สุด แต่บางกรณีอาจเกิดเหตุโครงข่ายไฟฟ้าขัดข้อง หากไม่มีการแก้ไขปัญหาก็ส่งผลกระทบต่อเครื่องจักรไฟฟ้า หรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ ที่มีความสำคัญและไวต่อการเปลี่ยนแปลง ทำให้เกิดความสูญเสียเป็นมูลค่ามาก ดังนั้นจะต้องมีการวางแผนรองรับเหตุการณ์นี้ที่อาจเกิดขึ้นได้ โดยการนำแหล่งจ่ายสำรองมาช่วยในการจ่ายไฟฟ้า หรือเรียกว่าโหมดแยกตัวอิสระ ซึ่งสิ่งที่สำคัญที่สุดของโหมดแยกตัวอิสระคือเมื่อเกิดความขัดข้องกับโครงข่ายไฟฟ้าหลัก โหลดวิกฤตจะต้องสามารถทำงานได้ต่อ โดยการใช้แหล่งจ่ายสำรองที่มีอยู่ในระบบไมโครกริดจ่ายไฟฟ้าเพื่อควบคุมแรงดันบัสดีซี

จากผลการจำลองพบว่าแหล่งจ่ายสามารถทำงานได้ตามเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นและสามารถรักษาแรงดันบัสไว้ได้ตามที่กำหนดแสดงดังรูปที่ 3.13 (g) และ 3.14 (g) เมื่อรักษาแรงดันบัสได้ ก็จะสามารถรักษาแรงดันที่โหลดวิกฤติให้อยู่ในระดับที่ปกติ โหลดวิกฤติจึงสามารถทำงานได้อย่างเป็นปกติ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

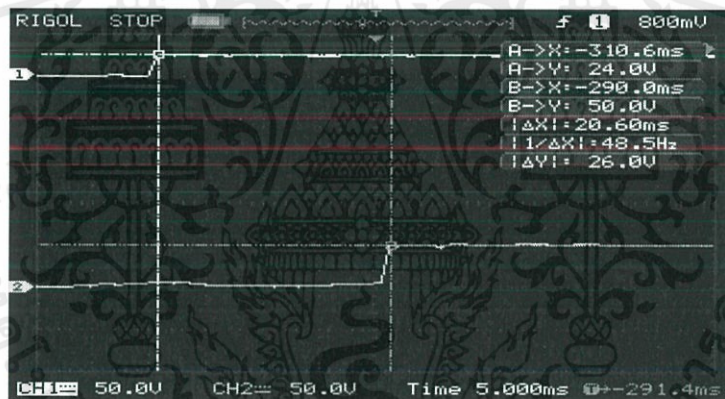
บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

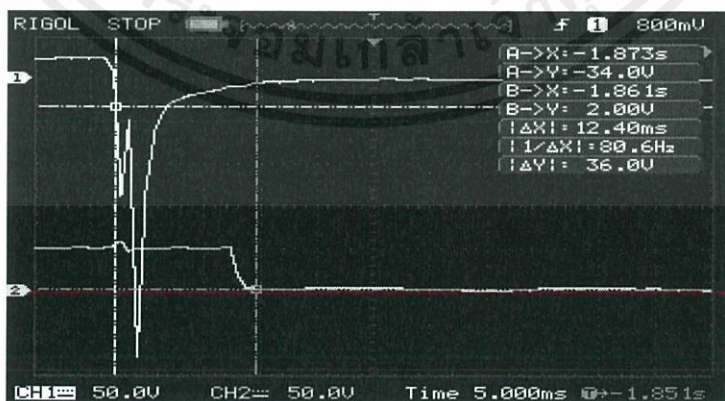
4.1 การทดสอบความเร็วของสวิตช์

การเลือกใช้สวิตช์ให้เหมาะสมจะต้องสามารถทำงานร่วมกับระบบไมโครกริด (Microgrid) ได้ และมีความเร็วในการทำงานไม่เกิน 10 ms เพื่อรักษาการทำงานของโหลดวิกฤตไว้ โดยจะวัดแรงดันไฟฟ้าทางด้านหน้าสวิตช์และที่ DC bus เพื่อเปรียบเทียบความเร็วของการทำงานตามคำสั่ง PLC ที่ส่งออกด้วยสัญญาณแรงดันไฟฟ้า 24 V_{dc} ไปยังสวิตช์เพื่อจ่ายไฟฟ้าให้ DC bus สวิตช์ที่นำมาทดสอบแบ่งออกเป็น 4 ตัว คือ 1. แมกเนติกคอนแทคเตอร์ (Magnetic Contactor) 2. รีเลย์ (Relay) 3. โซลิดสเตทรีเลย์ (Solid State Relay: SSR) 4. มอสเฟต (MOSFET) ได้ผลการทดสอบดังนี้

4.1.1 แมกเนติกคอนแทคเตอร์ (Magnetic Contactor)



(a) Switch on CH1; V_{dc} PLC, CH2; V_{dc} bus

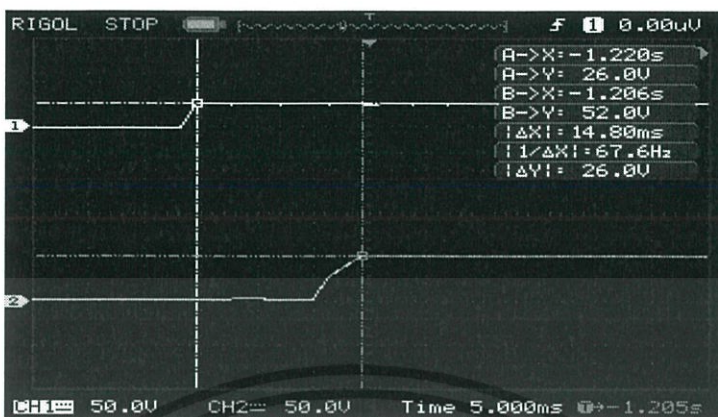


(b) Switch off CH1; V_{dc} PLC, CH2; V_{dc} bus

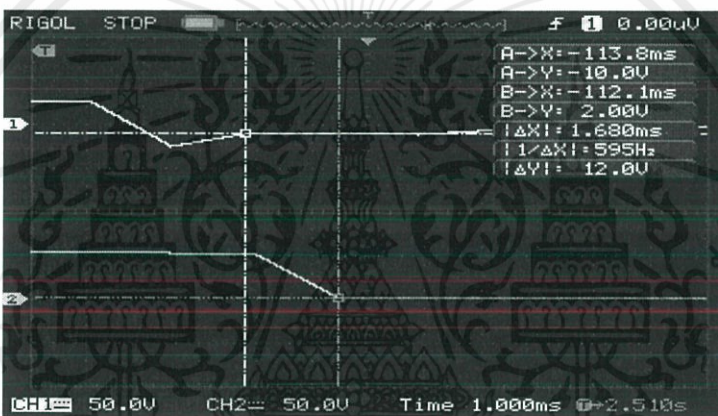
รูปที่ 4.1 การทำงานของแมกเนติกคอนแทคเตอร์ (a) Switch on (b) Switch off

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 รีเลย์ (Relay)



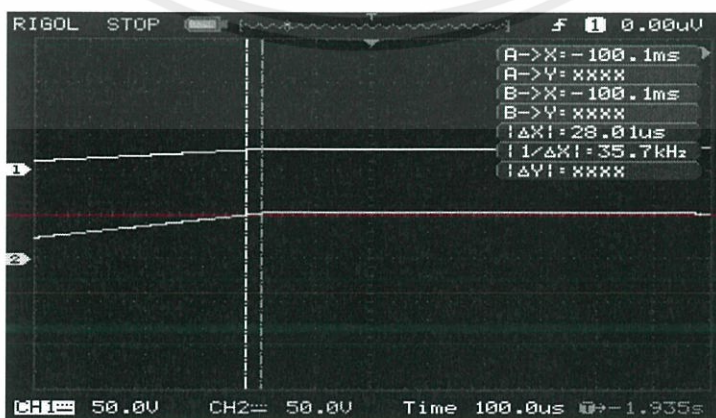
(a) Switch on CH1; V_{dc} PLC, CH2; V_{dc} bus



(b) Switch off CH1; V_{dc} PLC, CH2; V_{dc} bus

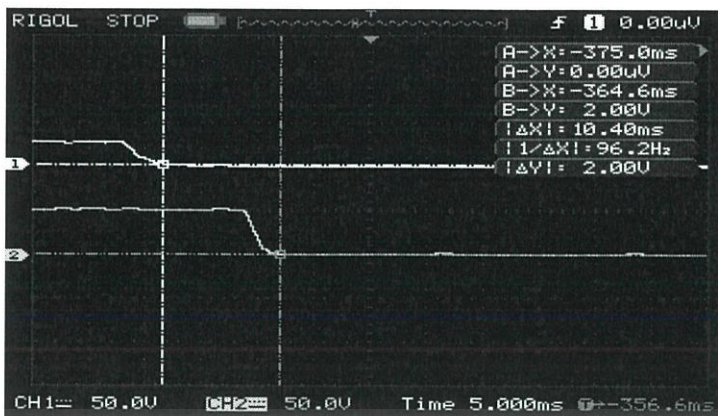
รูปที่ 4.2 การทำงานของรีเลย์ (a) Switch on (b) Switch off

4.1.3 โซลิดสเตตรีเลย์ (Solid State Relay: SSR)



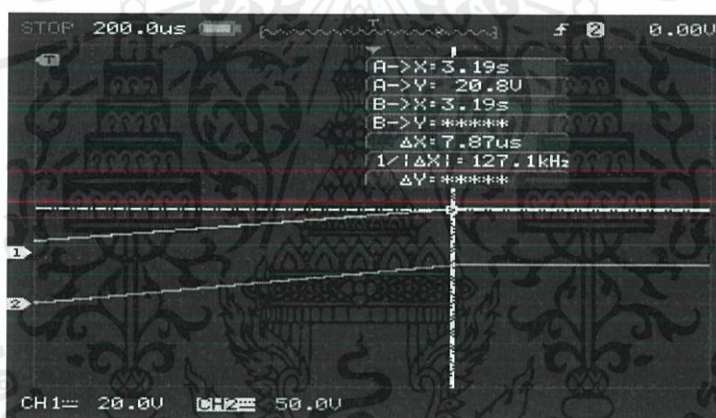
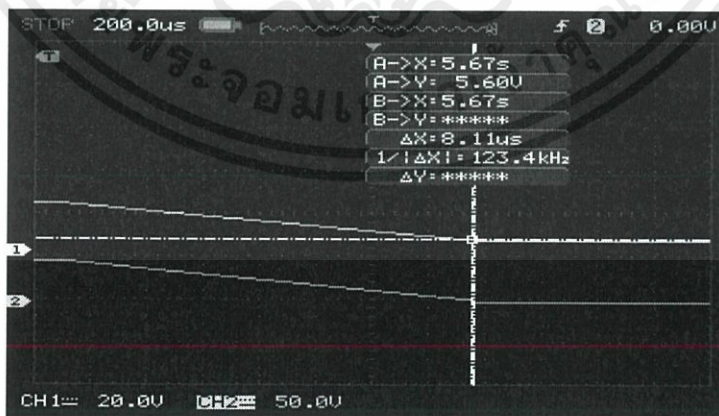
(a) Switch on CH1; V_{dc} PLC, CH2; V_{dc} bus

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(b) Switch off CH1; V_{dc} PLC, CH2; V_{dc} bus

รูปที่ 4.3 การทำงานของไซลิสเตอร์ (a) Switch on (b) Switch off

4.1.4 มอสเฟต (MOSFET)

(a) Switch on CH1; V_{dc} PLC, CH2; V_{dc} bus(b) Switch off CH1; V_{dc} PLC, CH2; V_{dc} bus

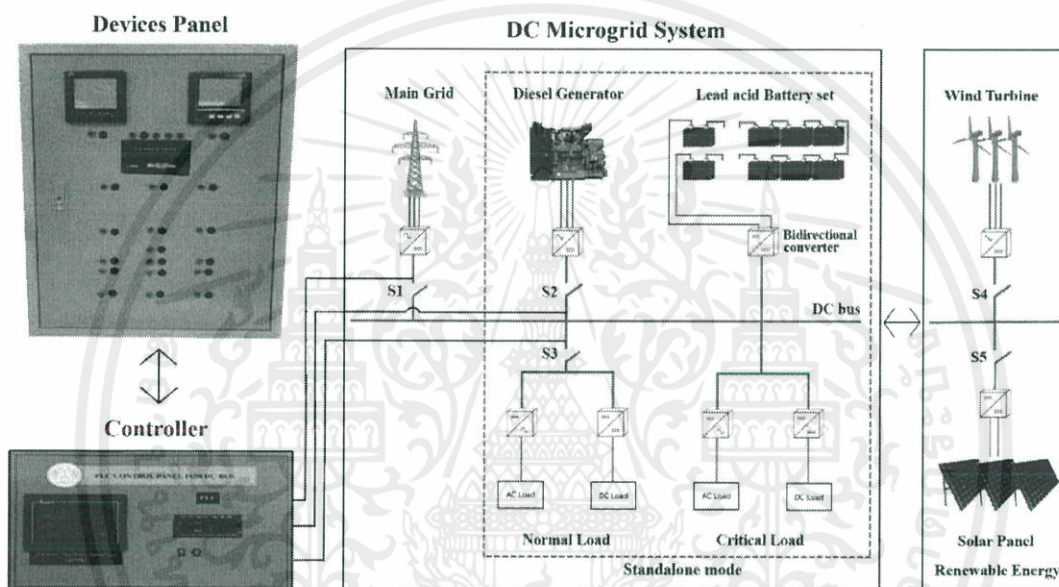
รูปที่ 4.4 การทำงานของมอสเฟต (a) Switch on (b) Switch off

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สวิตช์ประเภทแมกเนติกคอนแทคเตอร์ ไม่ได้ถูกนำมาใช้ในการทดสอบระบบเนื่องจากเวลาในการทำงานมากกว่า 10 ms และเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดกระแสกระชาก (Inrush current) ซึ่งจะส่งผลต่ออุปกรณ์ที่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงค่าทางไฟฟ้า

4.2 การทดลองการทำงานของระบบไมโครกริด 1 เฟส

โครงการนี้ได้ทดสอบการทำงานของระบบไมโครกริดที่สามารถทำงานได้ทั้งในโหมดต่อกริดและโหมดแยกตัวอิสระ โดยให้แรงดันบัสมีค่าเป็น 48 V แสดงบล็อกไดอะแกรมดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 แผนผังการควบคุมสวิตช์ด้วยระบบควบคุมอัจฉริยะ

จากรูปที่ 4.5 มีการควบคุมสวิตช์ 3 ตัวคือกริด (S1) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซล (S2) และโหลดปกติ (Normal load) (S3) ในส่วนสวิตช์ของแบตเตอรี่และโหลดวิกฤตจะมีสถานะ ON เท่านั้นเพราะเชื่อมต่อกับ DC bus ไว้ตลอดเวลา นอกจากนี้แหล่งจ่ายไฟฟ้าพลังงานทดแทน (Renewable energy) เช่น โซลาร์เซลล์ (Solar cell) หรือกังหันลม (Wind turbine) สามารถนำมาประยุกต์ใช้เข้ากับระบบไมโครกริดเพื่อนำมาเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่ช่วยประหยัดพลังงานจากกริดได้ ในส่วนของการจำลองแหล่งจ่ายไฟฟ้ากริด เครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซลและแบตเตอรี่ได้มีการใช้อุปกรณ์หม้อแปลงปรับแรงดันไฟฟ้า (Variable transformer) ไฟฟ้าจากการไฟฟ้า และเครื่องสำรองไฟฟ้า (Uninterruptible Power Supply, UPS) ตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 การทดสอบการทำงานแต่ละแหล่งจ่ายไฟฟ้าและโหลดของระบบไมโครกริด

Devices	Operation of Switches			
	1 st	2 nd	3 rd	4 th
Grid (S1)	ON	OFF	OFF	ON
Generator (S2)	OFF	OFF	ON	ON
Battery	Charge	Discharge	Charge	Charge
Normal Load (S3)	ON	OFF	ON	ON
Critical Load	ON	ON	ON	ON

การทดสอบการทำงานของระบบไมโครกริด จะถูกแบ่งออกเป็น 4 ช่วง ตามตารางที่ 4.1 ดังนี้

ช่วงที่ 1 : กริดมีการทำงานปกติ (S1 และ S2 อยู่ในสถานะ on) และแบตเตอรี่ถูกอัดประจุ (Charge) ในส่วนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซล, S3 จะอยู่ในสถานะ off

ช่วงที่ 2 : กริดเกิดการขัดข้อง ระบบจะตัดการเชื่อมต่อของกริดและโหลดปกติออก เช่นเดียวกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซล (S1 S2 และ S3 อยู่ในสถานะ off) เพราะในช่วงนี้แบตเตอรี่จะคายประจุ (Discharge) ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าหลักแทนในระยะเวลาหนึ่ง

ช่วงที่ 3 : กริดยังไม่สามารถจ่ายไฟฟ้าได้ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซลจะเป็นแหล่งจ่ายแทน (S3 อยู่ในสถานะ on) แบตเตอรี่จะกลับไปอยู่ในสถานะชาร์จ สวิตช์ของโหลดปกติ, S2 จะเปลี่ยนเป็น on

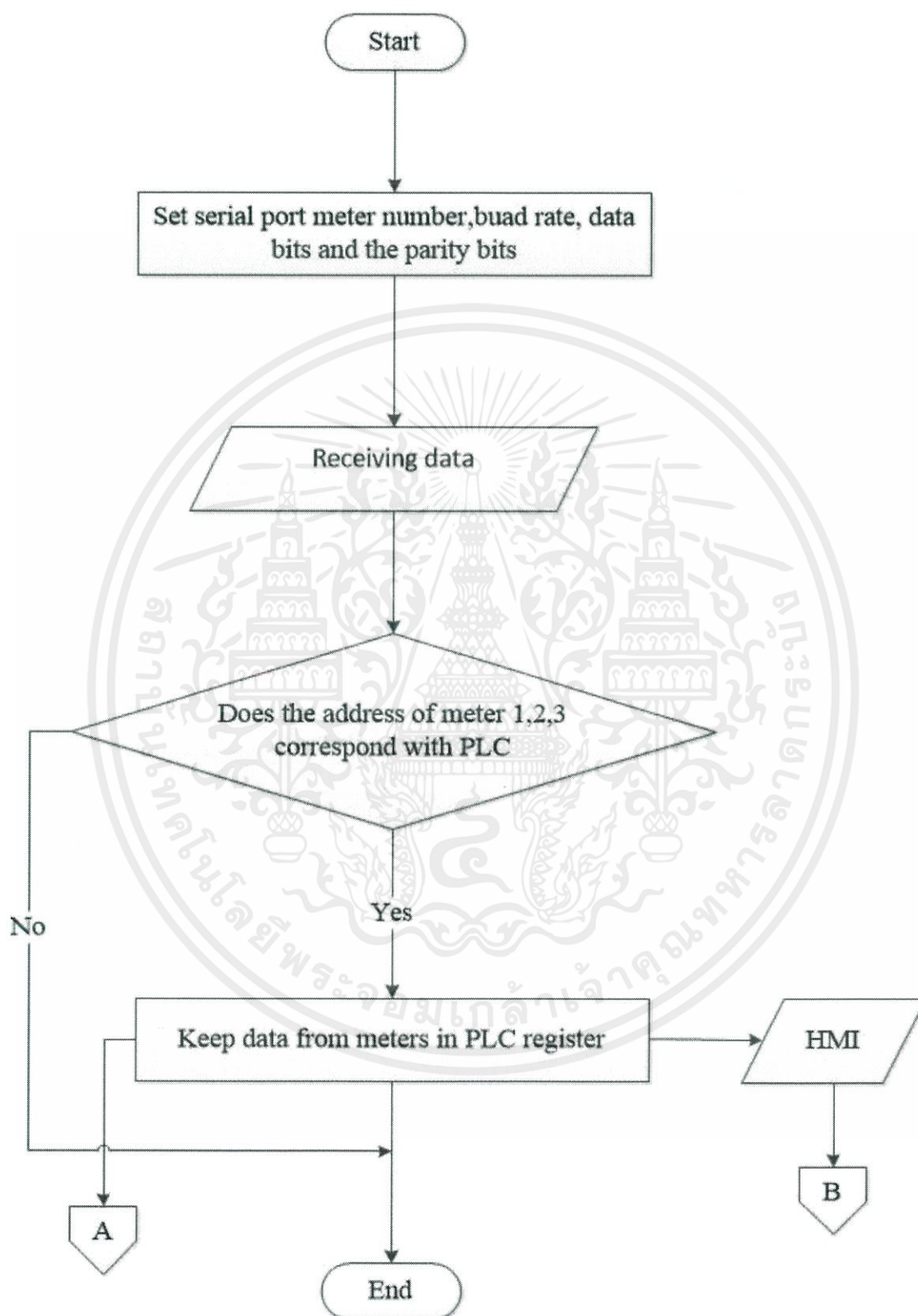
ช่วงที่ 4 : กริดสามารถจ่ายไฟฟ้าได้ปกติ สวิตช์ของกริดกับโหลดปกติจะอยู่ในสถานะ on และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซลจะทำงานต่อไปอีกระยะเวลาหนึ่งก่อนจะตัดการเชื่อมต่อจากระบบ

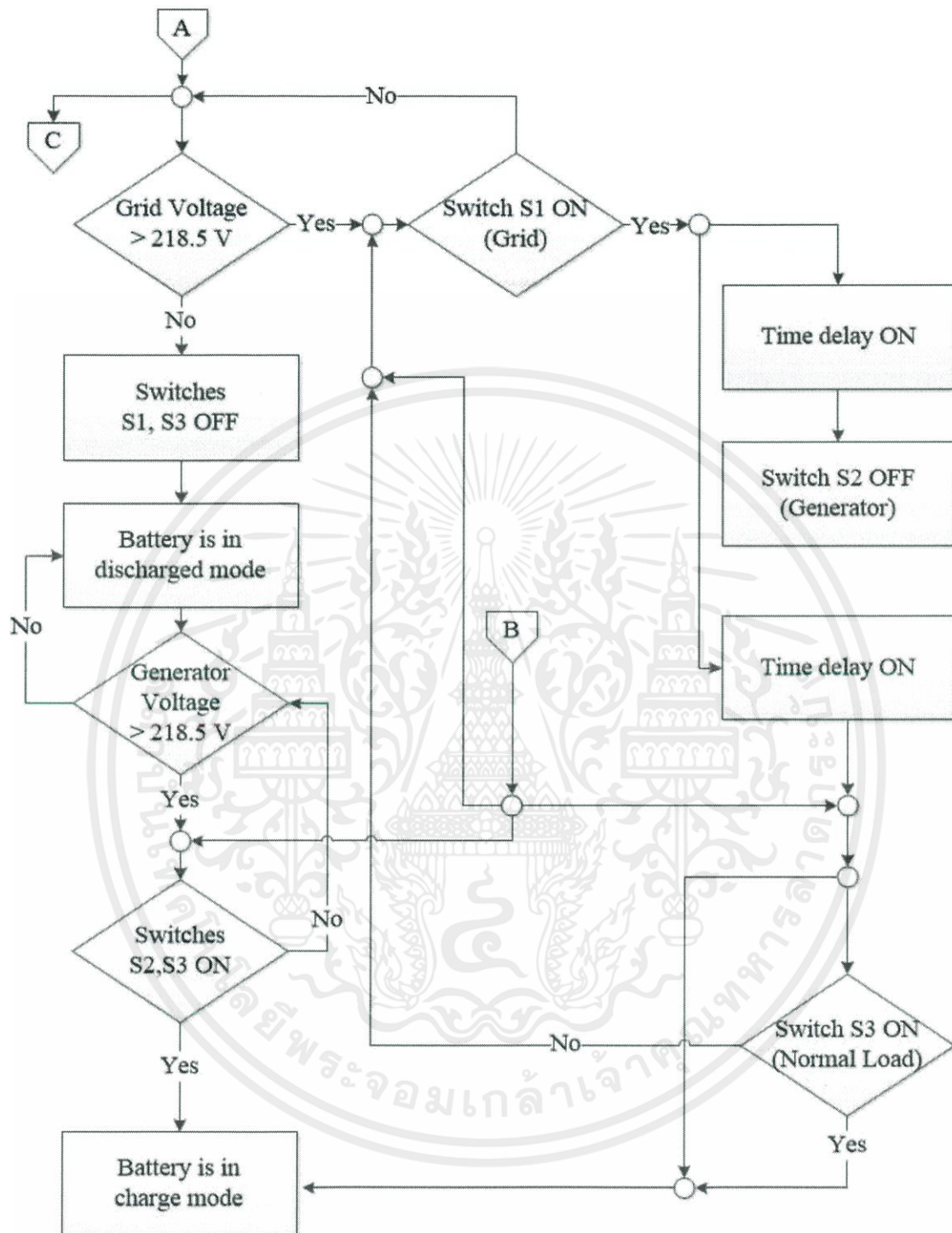
หากระบบไมโครกริดมีแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่เป็นโซลาร์เซลล์ หรือกังหันลมเพิ่มเข้ามา การทำงานของแหล่งจ่ายไฟฟ้าพลังงานทดแทนจะเป็นไปตามตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 การทำงานของแหล่งจ่ายพลังงานทดแทน

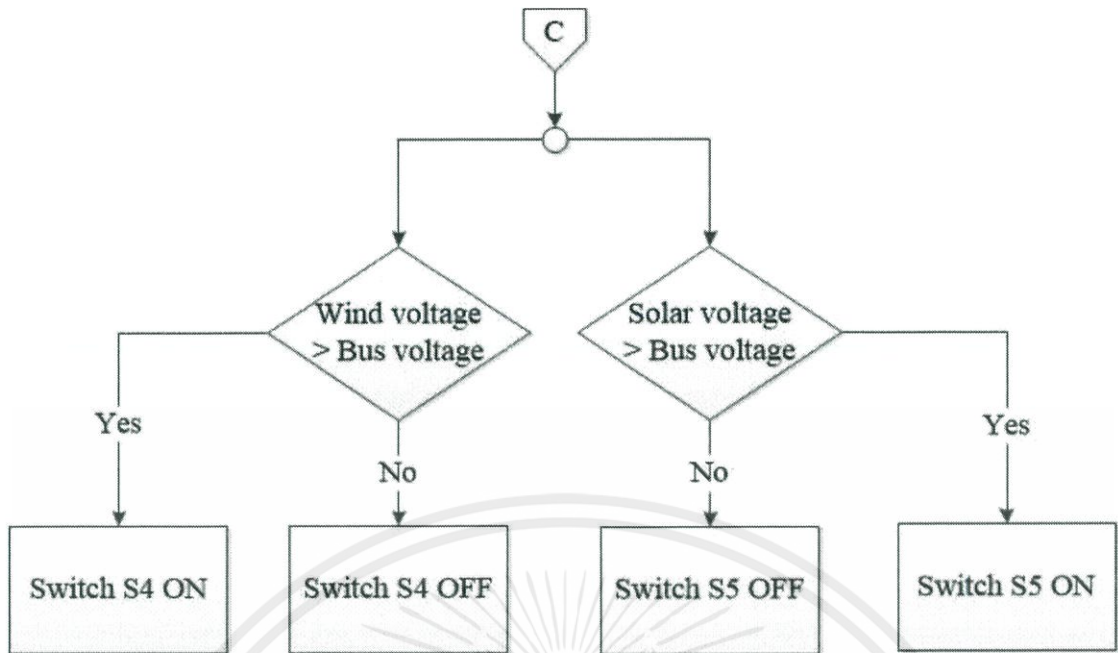
Renewable Energy	
Power	No power
ON	OFF

4.3 แผนผังแสดงการรับค่าข้อมูลและการทำงานของระบบควบคุม





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 Flow chart การทำงานของชุดควบคุมระบบไมโครกริดโดยการสื่อสารแบบ RTU

กระบวนการแรก จะมีการตั้งค่า baud rate, data bits และ parity bits ของพาวเวอร์มิเตอร์ให้ตรงกับ PLC จากนั้น PLC จะรับค่าข้อมูลจากพาวเวอร์มิเตอร์ตามลำดับตำแหน่ง (Station) ซึ่งพาวเวอร์มิเตอร์แต่ละตัวก็จะมีตำแหน่งเป็นของตนเอง หลังจากนั้น PLC จะทำการตรวจสอบข้อมูลว่าที่อยู่ (Address) ที่ป้อนกับที่อยู่ของพาวเวอร์มิเตอร์ตรงกันหรือไม่ เพื่อรับค่าข้อมูลของกระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า หรือ กำลังไฟฟ้า เป็นต้น ซึ่งแต่ละตัวแปรก็จะมีที่อยู่เป็นของตนเองแตกต่างกันไป เมื่อ PLC ตรวจสอบค่าได้แล้วว่าตรงกัน ระบบจะเก็บข้อมูลลงในรีจิสเตอร์ (Register) ซึ่งสามารถดึงค่าในรีจิสเตอร์นี้ไปแสดงบนจอ Human Machine Interface (HMI) ได้ ซึ่งจะแสดงค่ากระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (Power Factor, PF) ของแหล่งจ่ายไฟฟ้าแต่ละแหล่ง อีกทั้ง HMI ยังสามารถควบคุมการเปิดสวิตช์ของแต่ละแหล่งจ่ายได้เช่นกัน

เมื่อแรงดันกริดมีค่ามากกว่า 218.5 V ($230 \pm 5\%$) สวิตช์ S1 จะทำงาน กริดจึงสามารถจ่ายไฟฟ้าให้กับระบบได้ และมีการหน่วงเวลาสักพักเพื่อมั่นใจว่าไฟฟ้าจากกริดเสถียรแล้วจึงสั่งการให้สวิตช์ S3 ซึ่งเป็นสวิตช์ของโหลดปกติทำงาน และแบตเตอรี่จะทำงานในโหมดชาร์จ เมื่อกริดมีปัญหา แบตเตอรี่จะอยู่ในโหมดดีชาร์จทำหน้าที่จ่ายไฟฟ้าให้กับระบบทันที โดยระบบจะมีการหน่วงเวลาไว้ตรวจสอบว่าไฟฟ้าจากกริดได้หายไป เพื่อให้ให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซลเริ่มทำงาน โดยแหล่งจ่ายไฟฟ้าดีเซลต้องมีแรงดันไฟฟ้ามากกว่า 218.5 V ขึ้นไป ระบบควบคุมจึงจะสั่งสวิตช์ S2 ทำงาน แบตเตอรี่จะกลับไปอยู่ในโหมดชาร์จเช่นเดิมและสวิตช์ S3 ของโหลดปกติจะกลับมาทำงาน โดยเครื่องกำเนิด

ไฟฟ้าดีเซลทำหน้าที่จ่ายไฟฟ้าให้โหลดทั้งหมด หลังจากที่เกิดสามารถกลับมาทำงานได้ดั้งเดิม เครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซลจะยังคงทำงานไปสักพักเพื่อมั่นใจว่าไฟฟ้าจากกริดเสถียรแล้วสวิตช์ S2 จึงหยุดการทำงาน และกริดจะทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าให้โหลดเพียงผู้เดียว

ตารางที่ 4.3 การทำงานแต่ละแหล่งจ่ายไฟฟ้าและโหลดของระบบไมโครกริดร่วมกับพลังงานทดแทน

Devices	Operation of Switches			
	1 st	2 nd	3 rd	4 th
Grid (S1)	ON	OFF	OFF	ON
Generator (S2)	OFF	OFF	ON	ON
Battery	Charge	Discharge	Charge	Charge
Normal Load (S3)	ON	OFF	ON	ON
Critical Load	ON	ON	ON	ON
Wind Turbine	$V_{wind} > V_{dc\ bus} \rightarrow ON$			
Solar Cell	$V_{solar\ cell} > V_{dc\ bus} \rightarrow ON$			

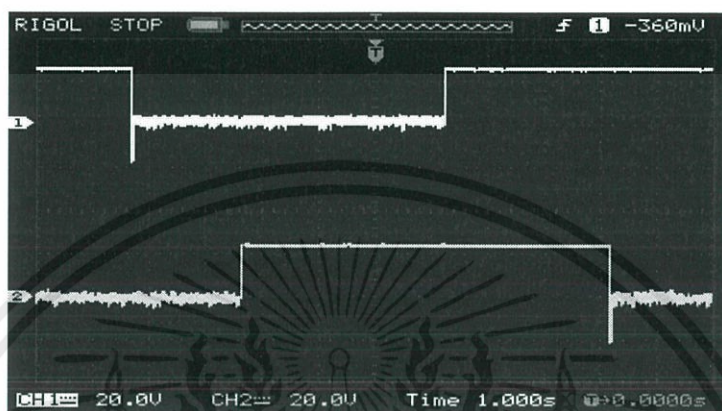
หากในระบบมีการนำพลังงานทดแทนเข้ามาเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าเพิ่มเติม เช่น โซลาร์เซลล์ กังหันลม เป็นต้น โดยระบบควบคุมจะตรวจวัดค่าแรงดันไฟฟ้าของพลังงานทดแทนและทำการส่งข้อมูลไปยัง PLC เพื่อทำการประมวลผล ซึ่งสามารถอธิบายหลักการทำงานของระบบไมโครกริดร่วมกับแหล่งจ่ายไฟฟ้าพลังงานทดแทนตามตารางที่ 4.3 ได้ดังนี้

ในช่วงที่ กริดทำงานปกติ (S1 และ S3 อยู่ในสถานะ ON) หากแรงดันจากพลังงานทดแทน (โซลาร์เซลล์และกังหันลม) มีค่ามากกว่าแรงดันที่บัสกระแสตรง สวิตช์ S4 และ S5 จะทำงาน แหล่งจ่ายไฟฟ้าพลังงานทดแทนจึงสามารถจ่ายไฟฟ้าให้กับระบบได้ จึงเป็นการช่วยลดความต้องการใช้ไฟฟ้าจากกริด ต่อมาหากกริดขัดข้องระบบจะทำการตัดแหล่งจ่ายไฟฟ้าจากกริดและโหลดปกติ และแบตเตอรี่จะทำงานในโหมดดีจชาร์จเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าหลักแทนกริดทันที (S1 และ S3 อยู่ในสถานะ OFF) หลักจากนั้นหากกริดยังขัดข้องอยู่ ระบบจะทำการเชื่อมต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซลเข้ามาเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าหลักแทนแบตเตอรี่ ในช่วงนี้พลังงานทดแทนจะช่วยลดภาระการทำงานของแบตเตอรี่และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซล แต่เนื่องจากอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำการทดสอบมีไม่เพียงพอทางนักศึกษาจึงไม่สามารถนำผลการทดสอบมาแสดงได้ในที่นี้

4.4 ผลการทดลองการทำงานของระบบไมโครกริด 1 เฟส

ในการทดสอบระบบไมโครกริด 1 เฟส ได้นำสวิตช์มาทำการทดสอบทั้งหมด 3 ประเภท คือ รีเลย์ (Relay), โซลิดสเตทรีเลย์ (Solid State Relay: SSR) และ มอสเฟต (MOSFET)

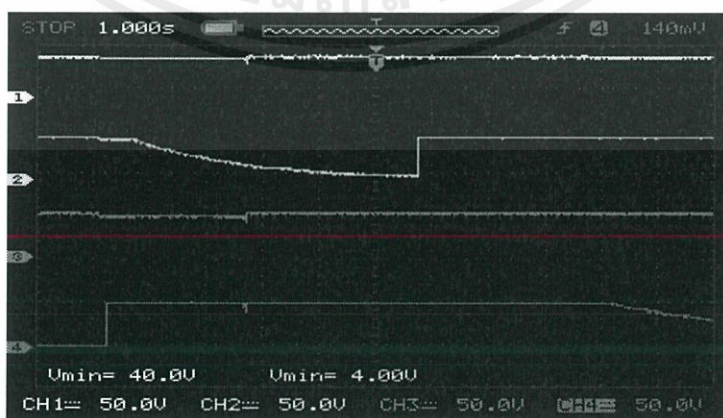
4.4.1 รีเลย์ (Relay)



(a) สัญญาณการทำงานสวิตช์ของกริดและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซล ตามลำดับ

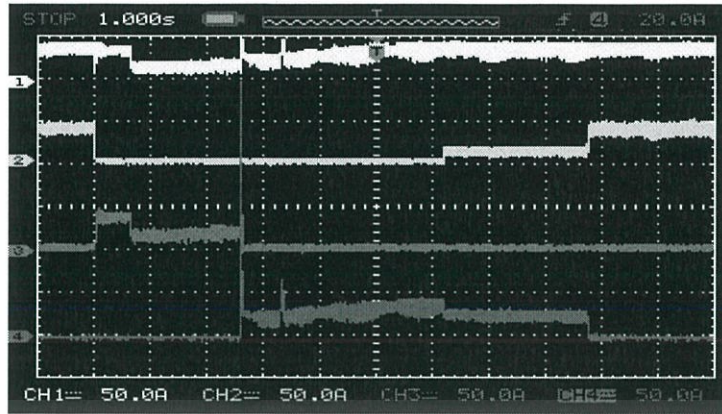


(b) สัญญาณการทำงานสวิตช์ของโหลดปกติ



(c) CH1; $V_{dc \text{ bus}}$, CH2; $V_{dc \text{ grid}}$, CH3; $V_{dc \text{ batt}}$ และ CH4; $V_{dc \text{ gen}}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

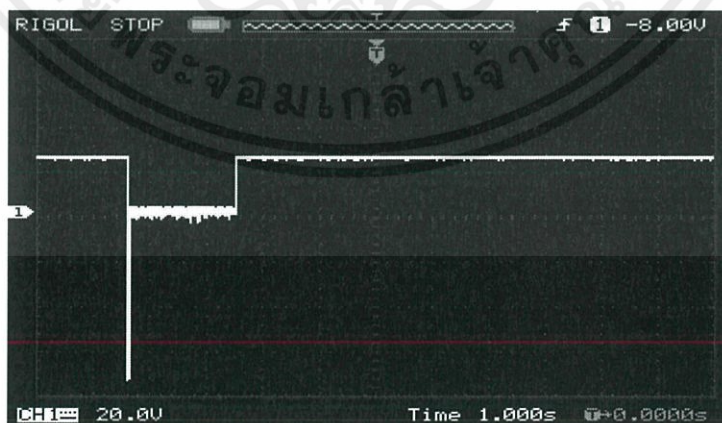


(d) CH1; I_{dc} bus, CH2; I_{dc} grid, CH3; I_{dc} batt และ CH4; I_{dc} gen

รูปที่ 4.7 ผลการทำงานของสวิตช์ ค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้า (วัตกริดและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ดีเซลทางด้าน DC) โดยใช้รีเลย์

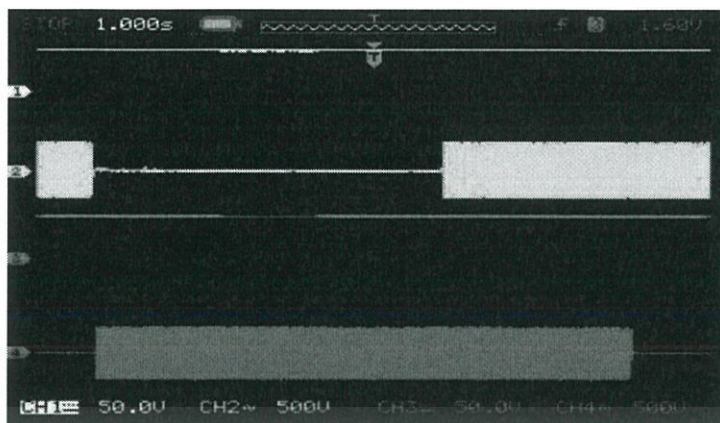


(a) สัญญาณการทำงานของสวิตช์ของกริดและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซล ตามลำดับ

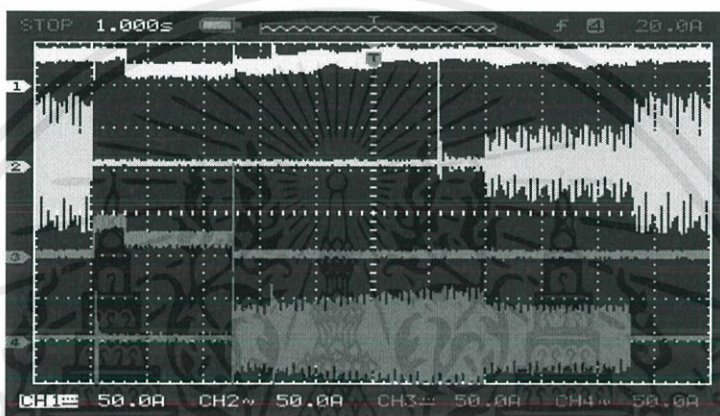


(b) สัญญาณการทำงานของสวิตช์ของโหลดปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



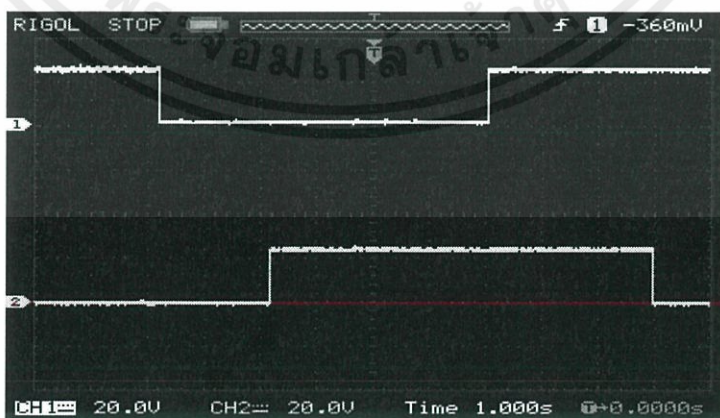
(c) CH1; $V_{dc\ bus}$, CH2; $V_{ac\ grid}$, CH3; $V_{dc\ batt}$ และ CH4; $V_{ac\ gen}$



(d) CH1; $I_{dc\ bus}$, CH2; $I_{ac\ grid}$, CH3; $I_{dc\ batt}$ และ CH4; $I_{ac\ gen}$

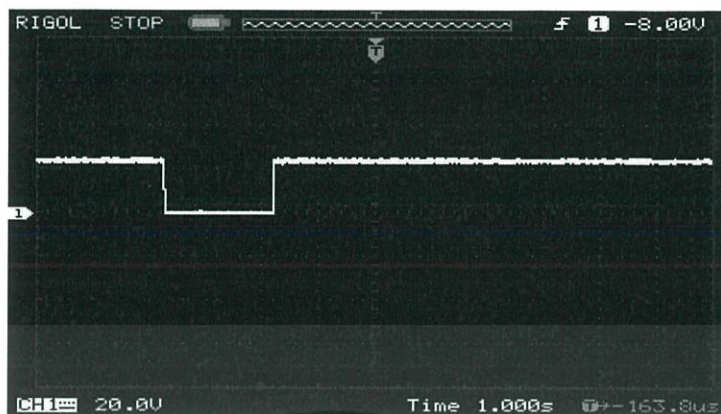
รูปที่ 4.8 ผลการทำงานของสวิตช์ ค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้า (วัตกริดและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ดีเซลทางด้าน AC) โดยใช้รีเลย์

4.4.2 โซลิตสเททรีเลย์ (Solid State Relay: SSR)

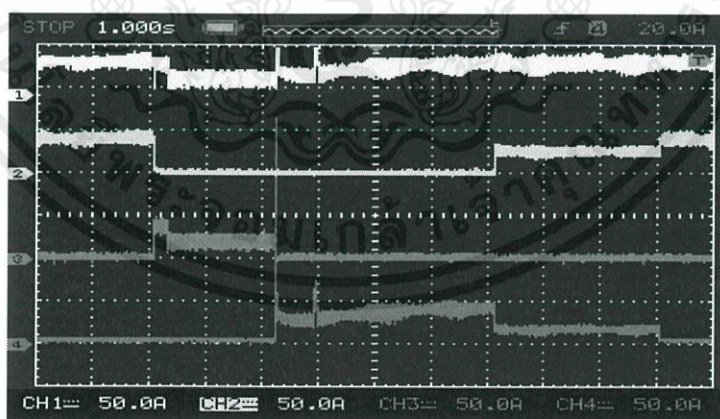


(a) สัญญาณการทำงานสวิตช์ของกริดและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซล ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



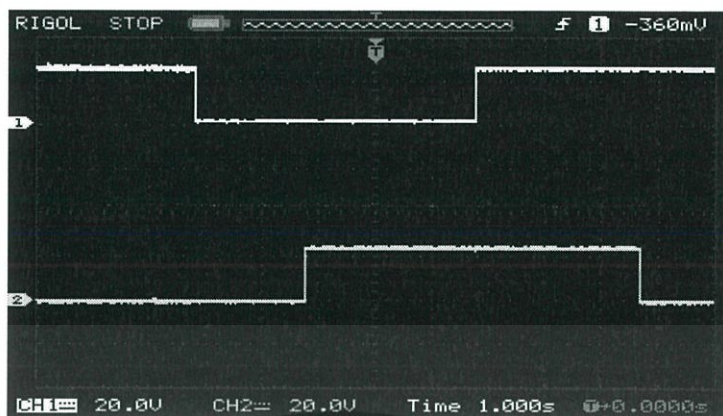
(b) สัญญาณการทำงานสวิตช์ของโหลดปกติ

(c) CH1; $V_{dc\ bus}$, CH2; $V_{dc\ grid}$, CH3; $V_{dc\ batt}$ และ CH4; $V_{dc\ gen}$ (d) CH1; $I_{dc\ bus}$, CH2; $I_{dc\ grid}$, CH3; $I_{dc\ batt}$ และ CH4; $I_{dc\ gen}$

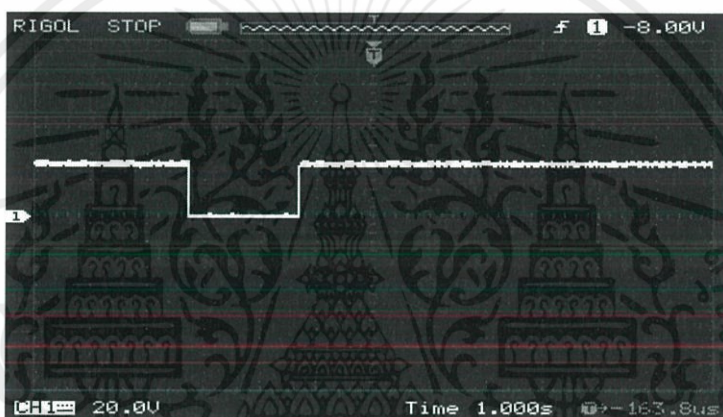
รูปที่ 4.9 ผลการทำงานของสวิตช์ ค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้า (วัดกริดและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ดีเซลทางด้าน DC) โดยใช้โซลิตสเตทรีเลย์

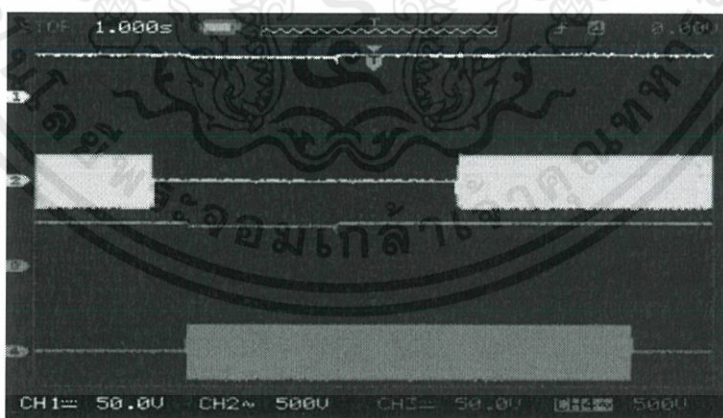
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a) สัญญาณการทำงานสวิตช์ของกริดและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซล ตามลำดับ

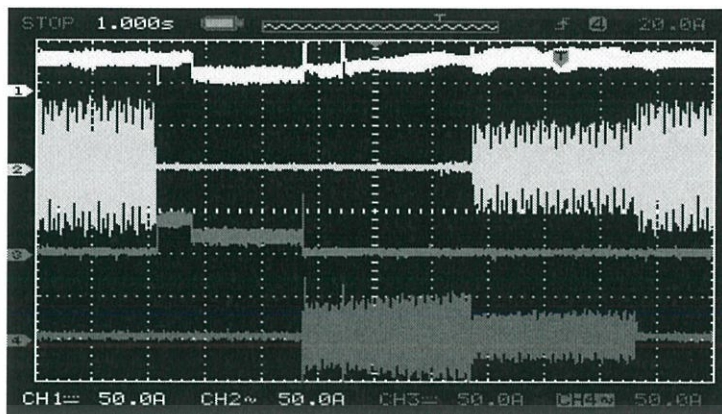


(b) สัญญาณการทำงานสวิตช์ของโหลดปกติ



(c) CH1; V_{dc} bus, CH2; V_{ac} grid, CH3; V_{dc} batt และ CH4; V_{ac} gen

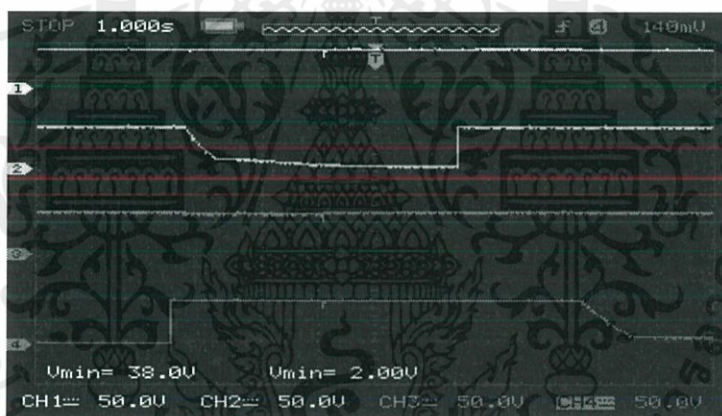
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



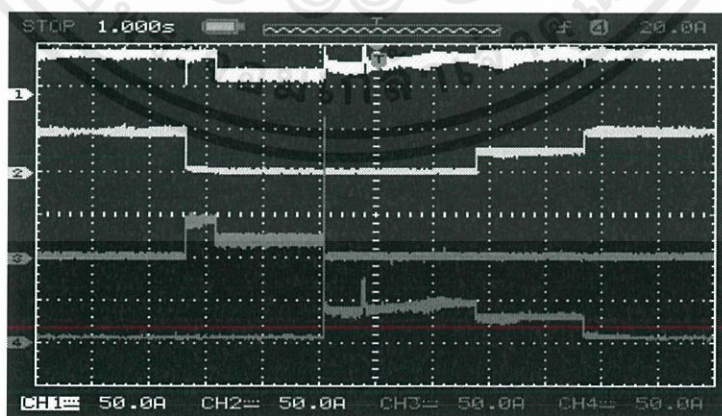
(d) CH1; $I_{dc\ bus}$, CH2; $I_{ac\ grid}$, CH3; $I_{dc\ batt}$ และ CH4; $I_{ac\ gen}$

รูปที่ 4.10 ผลการทำงานของสวิตช์ ค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้า (วัดกริดและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซลทางด้าน AC) โดยใช้โซลิตสเตทรีลีย์

4.4.3 มอสเฟต (MOSFET)



(a) CH1; $V_{dc\ bus}$, CH2; $V_{dc\ grid}$, CH3; $V_{dc\ batt}$ และ CH4; $V_{dc\ gen}$

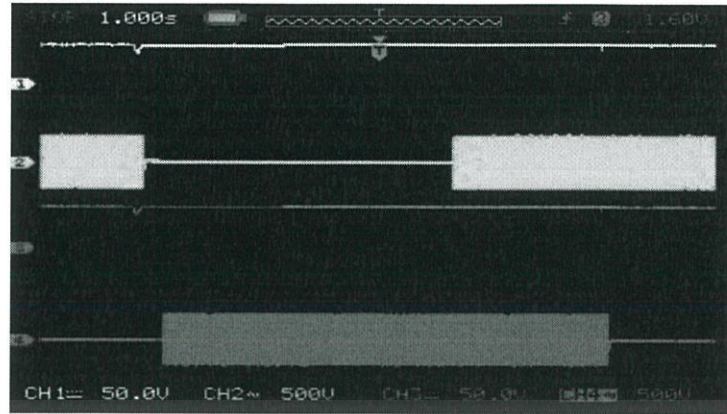


(b) CH1; $I_{dc\ bus}$, CH2; $I_{dc\ grid}$, CH3; $I_{dc\ batt}$ และ CH4; $I_{dc\ gen}$

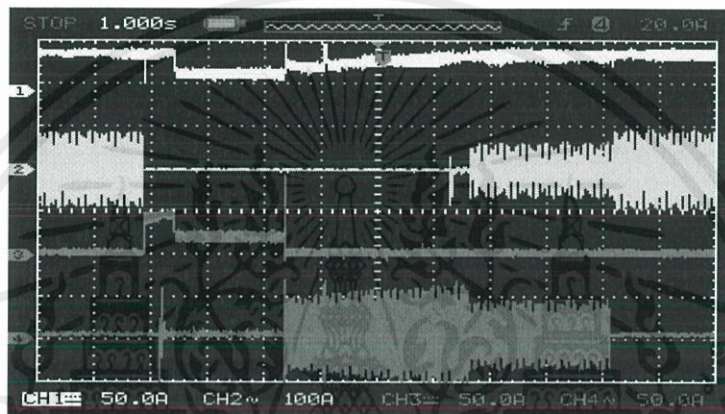
รูปที่ 4.11 ค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้า (วัดกริดและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซลทางด้าน DC)

โดยใช้มอสเฟต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a) CH1; V_{dc} bus, CH2; V_{ac} grid, CH3; V_{dc} batt และ CH4; V_{ac} gen



(b) CH1; dc bus, CH2; I_{ac} grid, CH3; I_{dc} batt และ CH4; I_{ac} gen

รูปที่ 4.12 ค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้า (วัตกริดและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซลทางด้าน AC)
โดยใช้มอสเฟต

จากรูปที่ 4.7, 4.8, 4.9, 4.10, 4.11 และ 4.12 จะพบว่าลำดับการจ่ายไฟฟ้าอันดับแรกคือการไฟฟ้าหรือกริด ลำดับที่สองคือแบตเตอรี่ และอันดับที่สามคือเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซล โดยในช่วงที่ 2 แบตเตอรี่มีการจ่ายกระแสไฟฟ้า และเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีการจ่ายแรงดันไฟฟ้า แต่ไม่มีการจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ระบบ เป็นเพราะว่าในช่วงนี้เป็นการเตรียมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซลให้พร้อมจ่ายไฟฟ้าในช่วงที่ 3 และถัดมาในช่วงที่ 4 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซลยังคงทำงานเป็นเวลาระยะหนึ่งเพื่อมั่นใจว่ากริดกลับมาเป็นปกติแล้ว ทำให้กระแสไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซลลดลงครึ่งหนึ่ง เพราะเป็นการช่วยกริดจ่ายไฟฟ้า

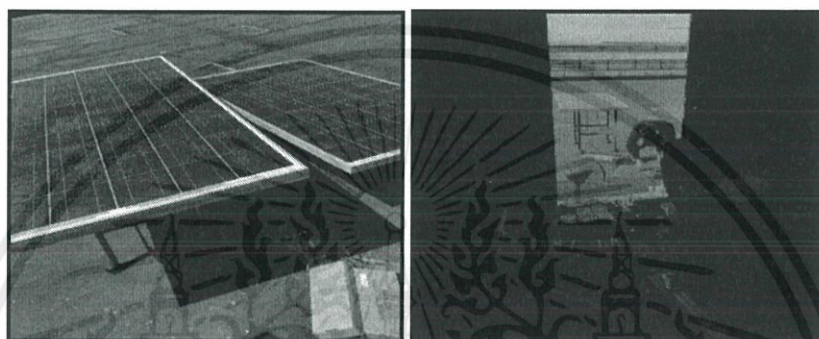
จากกราฟค่าแรงดันแบตเตอรี่จะเท่ากับบัสดีซีตลอดเวลา เพราะสวิตช์แบตเตอรี่จะมีสถานะ on เสมอ แต่การทำงานของแบตเตอรี่จะแบ่งเป็น 2 โหมดคือชาร์จและดิสชาร์จ ซึ่งสามารถดูได้จากกราฟกระแสของแบตเตอรี่ (ในการทดลองวัดกระแสแบตเตอรี่ด้านกายประจุ) ช่วงที่มีค่ากระแสไฟฟ้า คือช่วงที่แบตเตอรี่มีการคายประจุ ในช่วงที่ค่าเป็น 0 คือแบตเตอรี่ถูกอัดประจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

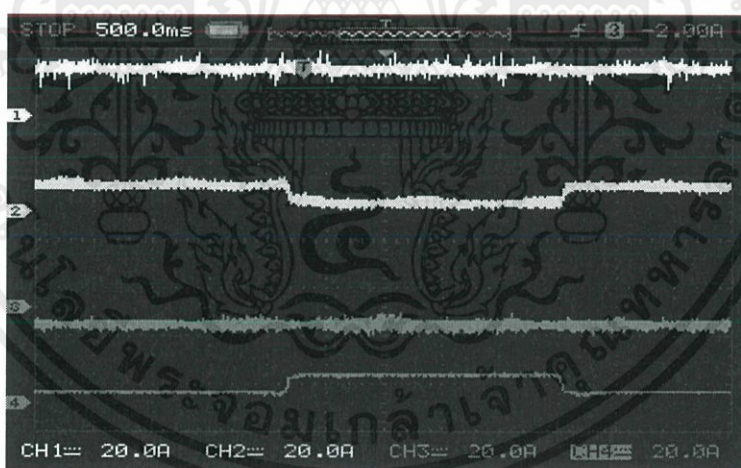
4.5 การเพิ่มแหล่งจ่ายไฟฟ้าพลังงานทดแทน

ระบบไมโครกริดสามารถนำแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่เป็นพลังงานทดแทนมาประยุกต์ใช้เข้ากับระบบได้ เพื่อเป็นทางเลือกหนึ่งที่จะช่วยประหยัดพลังงานจากการใช้ไฟฟ้าจากกริดหรือแหล่งจ่ายไฟฟ้าสำรองอื่น ๆ จากการจำลองไปในบทที่ 3 มีการใช้โซลาร์เซลล์เข้ามาจำลองด้วย ดังนั้นทางผู้จัดทำจึงเลือกใช้โซลาร์เซลล์ในการทดลอง

4.5.1 การทดลองด้วยโซลาร์เซลล์ (แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง)



รูปที่ 4.13 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองการเพิ่มแหล่งจ่ายไฟฟ้าด้วยโซลาร์เซลล์



รูปที่ 4.14 ค่ากระแสไฟฟ้ากระแสตรงของระบบไมโครกริดเมื่อเพิ่มโซลาร์เซลล์ในสถานะเชื่อมต่อกับกริด

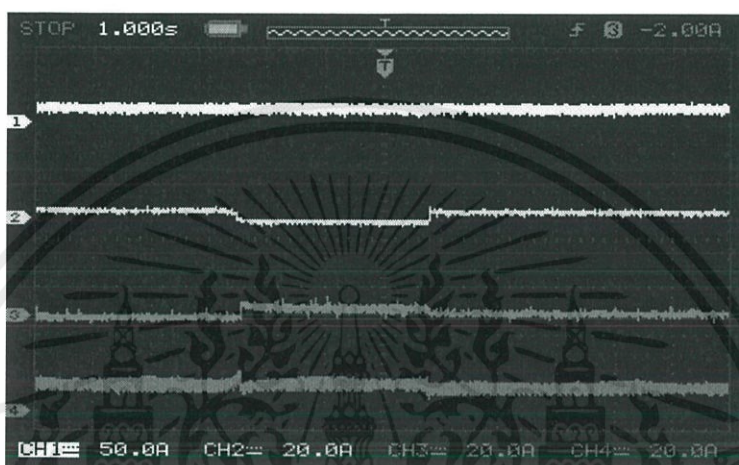
CH1; $I_{dc \text{ bus}}$, CH2; $I_{dc \text{ grid}}$, CH3; $I_{dc \text{ batt}}$ และ CH4; $I_{dc \text{ solar cell}}$

จากรูปที่ 4.14 จะสังเกตได้ว่า เมื่อโซลาร์เซลล์มีการผลิตไฟฟ้าที่มากขึ้น (เส้นสีน้ำเงิน) กริดจะจ่ายกระแสไฟฟ้าน้อยลง (เส้นสีฟ้า) ซึ่งเป็นการช่วยเหลือในการลดการใช้จ่ายในการซื้อไฟฟ้าช่วงค่าไฟฟ้าราคาสูง (On Peak)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.2 การจำลองด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้าพลังงานทดแทนอื่น ๆ (แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ)

นอกจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าพลังงานทดแทนที่นิยมใช้กัน คือ โซลาร์เซลล์ ยังมีแหล่งพลังงานอื่นๆ ที่สามารถนำมาประยุกต์เข้ากับระบบไมโครกริดได้อีกและเนื่องจากเป็นระบบกระแสตรง จึงง่ายต่อการเชื่อมต่อแหล่งจ่ายอื่นๆ ซึ่งในหัวข้อนี้จะจำลองระบบไฟฟ้าพลังงานทดแทนที่เป็นกระแสสลับ (กังหันลม) เข้ามาเชื่อมต่อกับระบบ



รูปที่ 4.15 ค่ากระแสไฟฟ้ากระแสตรงของระบบไมโครกริดเมื่อจำลองการเพิ่มพลังงานทดแทนกระแสสลับ CH1; I_{dc} bus, CH2; I_{dc} grid, CH3; I_{dc} batt และ CH4; I_{dc} renewable energy

จากผลการจำลองแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับจากพลังงานทดแทน ในรูปที่ 4.15 พบว่าระบบไมโครกริดสามารถทำงานได้ตามปกติและสามารถช่วยลดพลังงานการใช้ไฟฟ้าจากกริดในช่วงปกติ อีกทั้งยังเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าร่วมกับแบตเตอรี่ในช่วงที่กริดขัดข้อง สังเกตได้จากกราฟสีฟ้าหรือเส้นที่ 2 นับจากบนลงล่าง (ช่วงตรงกลางที่ตกลงเป็นสภาวะกริดหยุดจ่ายกระแส) แบตเตอรี่มีการจ่ายกระแสออกมาเพื่อแทนส่วนที่ขาดหายไปในช่วงตรงกลางของรูป (กราฟสีชมพูมีการเพิ่มสูงขึ้นแทนส่วนที่หายไปของกริด) เนื่องจากการจำลองนี้ไม่ได้ต่อโหลดส่วนที่จำเป็นกราฟสีเหลืองจึงไม่มีการเปลี่ยนแปลง

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์และการคงอยู่ของ DC Microgrid ในสถานการณ์จำลองการทำงานในช่วงต่าง ๆ ของแต่ละแหล่งจ่าย รวมถึงสัญญาณที่ส่งมาเพื่อควบคุมการทำงานของอุปกรณ์เพื่อทำการตัดต่อแหล่งจ่ายและโหลดที่ไม่จำเป็นกับระบบไฟฟ้ากระแสตรง และทำการเปรียบเทียบความสามารถของอุปกรณ์ที่จะนำมาใช้ในการตัดต่อแหล่งจ่ายหรือภาระทางไฟฟ้าเข้าสู่ระบบไฟฟ้ากำลัง โดยในงานวิจัยชิ้นนี้ได้จำลองระบบไฟฟ้ากระแสตรงที่ $48\text{ V} \pm 5\%$ เท่านั้นเพื่อไม่ให้เกิดอันตรายต่ออุปกรณ์ในห้องทดลอง รวมถึงตัวผู้ทำการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 ผลการจำลองระบบจากโปรแกรมกับการจำลองระบบจริง

จากการจำลองทางคอมพิวเตอร์และการทดลองในระบบจริงสามารถสรุปผลการทดลองได้คือระบบ DC Microgrid สามารถคงอยู่ได้ในระดับที่ตั้งไว้แม้ว่าแหล่งจ่ายไฟฟ้าหลักเกิดการขัดข้อง ซึ่งรูปกราฟไฟฟ้ากำลังที่ได้ทำการวัดค่าจากสโคปได้มีความสอดคล้องกันกับผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ แต่มีความแตกต่างกันเนื่องจากการจำลองทางคอมพิวเตอร์อุปกรณ์ตัดต่อเป็นอุปกรณ์แบบอุดมคติ จึงมีการทำงานที่รวดเร็วกว่าระบบที่ทำการทดสอบจริง

5.1.2 ผลการทดลองของอุปกรณ์สวิตซ์ชนิดต่าง ๆ

จากการทดสอบความเร็วสวิตซ์ในการทำงานตามคำสั่งชุดควบคุม PLC ในการเชื่อมต่อเข้ากับแบตเตอรี่เพื่อจ่ายไฟฟ้าให้กับระบบ สามารถนำมาเปรียบเทียบความเร็วการทำงานของสวิตซ์แต่ละประเภทได้ตามตารางที่ 5.1 ดังนี้

ตารางที่ 5.1 เปรียบเทียบเวลาในการทำงานของสวิตซ์แต่ละชนิด

Type of switches	Turn ON time respond	Turn OFF time respond
Magnetic Contactor	20.60 ms	12.40 ms
Relay	14.80 ms	1.68 ms
Solid State Relay	28.01 us	10.40 ms
MOSFET	7.87 us	8.11 us

เมื่อพิจารณาข้อมูลการทดสอบจากความเร็ว, ความเสถียร และการกระชากของรูปสัญญาณแล้ว พบว่าโซลิตสเตทรีเลย์มีความเหมาะสมที่จะใช้ในระบบงานจริงมากกว่าสวิตช์ประเภทอื่น ๆ เนื่องจากมีความเร็วในการตอบสนองและรูปสัญญาณที่เสถียร และไม่มีกระชากของสัญญาณ

5.1.3 ผลการทดลองการเชื่อมต่อแหล่งจ่ายพลังงานทดแทนกับระบบจำลอง

จากผลการทดลอง เมื่อนำแหล่งจ่ายไฟฟ้าโซลาร์เซลล์มาประยุกต์ใช้เข้ากับระบบไมโครกริด ทั้งในช่วงที่กริดจ่ายไฟฟ้าได้ปกติแล้วสามารถช่วยลดพลังงานการใช้ไฟฟ้าจากกริดได้จริง ซึ่งสังเกตจากกราฟสีฟ้าและสีน้ำเงิน เมื่อโซลาร์เซลล์ได้รับแสงแดดไม่เต็มที่ จะมีการผลิตกำลังไฟฟ้าออกมาน้อย ทำให้มีการดึงไฟฟ้าของกริดเพิ่มขึ้นมา แต่ถ้าโซลาร์เซลล์ผลิตไฟฟ้าออกมาเยอะจะเป็นการลดปริมาณการดึงไฟฟ้าของกริดให้น้อยลง จากการทดลองสรุปได้ว่าสามารถนำระบบไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนเข้ามาต่อกับระบบได้โดยไม่ส่งผลกระทบต่อระบบและไม่มีผลต่อเสถียรภาพของระบบ

5.2 ปัญหาและอุปสรรค

1. การออกแบบวงจร MOSFET ที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นเพียงการออกแบบคร่าวๆ จึงส่งผลให้เกิดความร้อนสูงเมื่อใช้งาน
2. การ delay ของสัญญาณจาก PLC เนื่องจากใช้อุปกรณ์ที่ไม่ได้มีคุณภาพสูงจึงทำให้มีการสั่งงานที่ช้า
3. ความหน่วงของการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าอันเนื่องมาจากอุปกรณ์ อาทิ Switching เป็นต้น ส่งผลให้ไม่สามารถตอบสนองต่อสัญญาณที่ส่งมาได้รวดเร็วพอ

5.3 ข้อเสนอแนะในการพัฒนาต่อไป

1. เนื่องจากในงานวิจัยชิ้นนี้ไม่ได้มีการออกแบบตัวกรองสัญญาณจึงส่งผลให้วงจร MOSFET มีความร้อน จึงสามารถทำการออกแบบ MOSFET ให้ทนต่อกระแสได้ในอนาคต
2. เปลี่ยนรุ่นของ PLC ให้มีความฉลาดและรวดเร็วในการตอบสนองมากยิ่งขึ้น
3. ทำการปรับปรุงตัวอุปกรณ์ในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น
4. การนำ HMI มาใช้กับโครงงานเพื่อเพิ่มทางเลือกในการสั่งงานเพื่อติดต่อแหล่งจ่ายได้
5. ในอนาคตหากมีการนำแหล่งจ่ายไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนเข้ามาเสริมเข้ากับระบบ

จะต้องมีการเพิ่มอัลกอริทึมของระบบควบคุมให้สอดคล้องต่อการใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน (สนพ.) กระทรวงพลังงาน “เสาหลักที่ 3: ระบบไมโครกริดและระบบกักเก็บพลังงาน” รายงานเผยแพร่ความก้าวหน้าในการดำเนินงานด้านสมรรถกิริยาของไทย พ.ย.2559 หน้า 3-3
- [2] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.) กระทรวงพลังงาน “รูปแผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์เฉลี่ยตลอดปี” โครงการจัดทำแผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์จากข้อมูลดาวเทียมสำหรับประเทศไทย พ.ย.2561 หน้า 3
- [3] Subhadeep Bhattacharjeea and Barnam Jyoti Saharia, 2014. “comparative study on converter topologies for maximum power point tracking application in photovoltaic generation” . *Journal of Renewable and Sustainable Energy* 6: 1-21
- [4] Power Continuity Systems. “UPS and Generators – How Long Can They Run For?.” [Online]. Available: <https://powercontinuity.co.uk/knowledge-base/ups-and-generators-how-long-can-they-run-for/>. 2018
- [5] Simrandeep Kaur and Tarandeep Kaur. 2016. “A Review of Microgrid Concept.” *International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology*. 3(2): 2350-0328
- [6] Manoj Lonkar and Srinivas Ponnaluri. 2015. “An Overview of DC Microgrid Operation and Control.” *IREC2015 The Sixth International Renewable Energy Congress*. 6. 1-5
- [7] Paul Savage, Robert R. Nordhaus, and Sean P. Jamieson. 2018 “DC Microgrids: Benefits and Barriers.” *Yale school of forestry & environmental studies*. 50-6
- [8] ถาวร อมตกตต. 2013. “เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำหรับโหลดไม่เชิงเส้นและโหลดเชิงเส้น.” *วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา*. 24(3): 23-31
- [9] Zhongtian Zhao, Jian Hu and Hongtao Chen. 2017. “Bus Voltage Control Strategy for Low Voltage DC Microgrid Based on AC Power Grid and Battery.” *2017 IEEE International Conference on Energy Internet (ICEI)*: 349-354

- [10] P. Jardin, G. Baudoin, “Filter Look Up Table method for Power Amplifiers Linearization.”, IEEE TRANSACTIONS ON VEHICULAR TECHNOLOGY., JUNE 2007
- [11] CHUEN CHIEN LEE. “Fuzzy Logic in Control System: Fuzzy Logic Controller, Part II.” IEEE TRANSACTIONS ON SYSTEM, MAN. AND CYBERNETICS., VOL. 20, NO. 2, APRIL 1990
- [12] Kiam Heong Ang, Gregory Chong and Yun Li, “PID Control System Analysis, Design, and Technology,” IEEE TRANSACTIONS ON CONTROL SYSTEMS TECHNOLOGY. VOL. 13, NO.4, JULY 2005 [15] Martin T. Hagan, Howard B. Demuth and Orlando De Jesus. “AN INTRODUCTION TO THE USE OF NEURAL NETWORKS IN CONTROL SYSTEMS.” **International Journal of Robust and Non-linear control**: 1-23
- [13] Martin T. Hagan, Howard B. Demuth and Orlando De Jesus. “AN INTRODUCTION TO THE USE OF NEURAL NETWORKS IN CONTROL SYSTEMS.” **International Journal of Robust and Non-linear control**, 2015, pp.1-23
- [14] Areej. “What is the function of Magnetic Contactors.” [Online]. Available: <https://automationforum.co/magnetic-contactors/>. 2018
- [15] กฤษ เฉยไสย, (ผู้รวบรวม) 2547. **Power Electronics**. ขอนแก่น: ภาควิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- [16] Omron industrial automation. “Solid-state Relays” [Online]. Available: <https://www.ia.omron.com/support/guide/18/overview.html> . 2018
- [17] การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. “ข้อกำหนดเกี่ยวกับการปฏิบัติการระบบโครงข่ายไฟฟ้า (Operation Code).”, การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2560
- [18] K. N. Hasan, M. E. Haque and M. Negnevitsky. “Control of Energy Storage Interface with a Bidirectional Converter for Photovoltaic Systems.” **2008 Australasian Universities Power Engineering Conference**, 2008, pp.1-6
- [19] T.-F. Wu, C.-L. Kuo, K.-H. Sun, and Y.-C. Chang. 2011. “DC-Bus Voltage Regulation and Power Compensation with Bi-directional Inverter in DC-

Microgrid Applications. ” 2011 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition

- [20] Mahmoud M. Amin and Student Member. “ DC Bus Voltage Control for PV Sources in a DC Distribution System Infrastructure. ” IEEE PES General Meeting, 2010
- [21] Mansour Alramlawi. . “ Optimal Operation of PV-Battery-Diesel MicroGrid for Industrial Loads Under Grid Blackouts.” IEEEIC / I&CPS Europe, 2018, pp. 1-5
- [22] กระทรวงดิจิทัลเพื่อเศรษฐกิจและสังคมกรมอุตุนิยมวิทยา. “การคาดหมายลักษณะอากาศช่วงฤดูร้อนของประเทศไทย พ.ศ.2561”. 2561; 3.
- [23] อาจารย์สุรินทร์. (ผู้รวบรวม). “Battery design”. ภาควิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2561
- [24] คณะกรรมการปรับปรุงความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า, ข้อกำหนดคกฏเกณฑ์ฮาร์มอนิกเกี่ยวกับไฟฟ้าประเภทธุรกิจและอุตสาหกรรม, การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, การไฟฟ้านครหลวง, การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, 2541
- [25] Abdul H. Samra and Khankader M. Islam. “ Harmonic effects on synchronous generators voltage regulation” . Proceedings IEEE Southeastcon '9 5 . Visualize the Future, 1995, pp. 379



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Analysis of Control system to Prevent Collapse of Mixed-Source Microgrid for Industry

T. JUNTASORN¹, N. NINNIMIT², W. INWANNA³, A. MANEE⁴, C. BOONSENG⁵ and C. CHONPOINWAI⁶
 Dept. Electrical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand
 58010462@kmitl.ac.th¹, 58010673@kmitl.ac.th², 58010462@kmitl.ac.th³ and 58011392@kmitl.ac.th⁴,
 chongrag.bo@kmitl.ac.th⁵ and chai.ch@kmitl.ac.th⁶

Abstract — This project presents the control of power sources by lookup table controller to maintain the voltage of critical load and to prevent collapse of mixed-source microgrid which consist of solar cells, batteries and diesel generators that connect to DC bus. MATLAB is used to simulation of microgrid system. The experiment presents the time comparison of four types of switches including magnetic contactor, relay, solid state relay and MOSFET which can maintain DC bus voltage in specified range which least effect to critical load operation. Based on the simulation results from the MATLAB program, controller is set to use in industries.

I. INTRODUCTION

Nowadays there is increasing of renewable energy such as solar generator, wind generator and fuel cell which integrated with energy storage for example battery, flywheels and supercapacitor.

Microgrid is a small-scale power grid which consists of distributed generation, control system and energy storage. It can operate in 2 modes which is grid connected mode and standalone mode supported by distributed energy resources (DERs) such as diesel generator, solar cells and battery. [1]

There are three types of microgrid including alternating current microgrid (ACMG), direct current microgrid (DCMG) and hybrid microgrid.

DC microgrid is preferred over other types because it can reduce AC-DC power conversion loss between DC sources and DC bus. A DC microgrid can optimize the use of electronic devices, electrical storage and distributed generation. Moreover, A DC microgrid does not need of synchronization of phase angle and frequency with the AC power utility grid [2-3], [5].

There are 3 main cause of collapse in microgrid system are the fluctuations of main grid, renewable energy and loads which effect to bus voltage change. In the DC microgrid, the balance of power is indicated by the DC bus voltage thus keeping DC bus voltage constant is the key to maintain power balance in the system. The operation control strategy for DC microgrid can make by controlling switches of each sources in time.

II. DC MICROGRID CONFIGURATION

A. Structure of DC microgrid

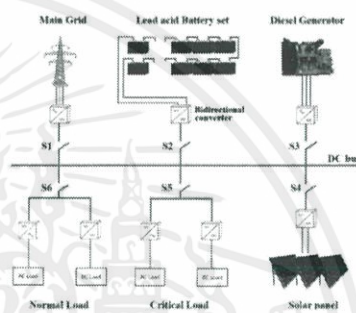


Fig. 1 DC microgrid structure

The components of DCMG from figure 1 are as follows:

1. Photovoltaic(PV): solar panels which connect with bus through DC-DC converter generate unstable power since it depends on intensity and ambient temperature
2. Diesel generators: connect with bus through AC-DC converter. This is the best backup source in emergency situation to prevent the damage. They can supply high power working with battery since they cannot start immediately. Diesel generators take time at least 30 seconds to start diesel engines.
3. Battery: one of energy storage which connect with bus through bidirectional converter
4. Main grid: supply AC power to system which connect with bus through AC-DC converter
5. Load: there are 2 types of load which is critical loads and normal loads. critical load, Computer, communication system, SCADA, Programmable Logic Controllers(PLCs) and Variable Speed Drives(VSD), is important load which does not allow power interrupt exceed 10 ms. In the other hand, normal load, lightning system and air conditioning system, allows power interrupt for a long time. [4]

B. Operation of microgrid

In normal situation microgrid system work in grid-connected mode, main grid and solar panels work together to generate power to all load and to charge battery to maintain

voltage of system. In this mode batteries are charged to full capacity to use as a backup source in standalone mode.

When grid is interrupted from blackout or brownout. Microgrid system will cut off normal load and isolate themselves to work in standalone mode which supported by diesel generator, battery and solar panels. At the beginning of changing mode, battery discharge power to critical load instead of diesel generator for at least 5-10 minutes to ensure that power from grid is truly gone and leave enough time to start diesel generator. When diesel generator is ready to supply power, it will supply power to a critical load and charges batteries. When grid can function as usual, diesel generator will supply power for a while to make sure that power from grid is really gone and then switch of grid will on and switch of generator which the only supply source in the system will off.

III. DC BUS IN MICROGRID SYSTEM

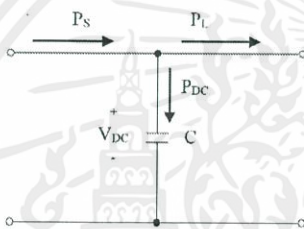


Fig 2 DC bus equivalent circuit [6]

The balance of power is only reflected by the DC bus voltage, thus keeping DC bus voltage constant is the key to indicate power balance in the system. P_s , P_L , P_{DC} , V_{DC} and C is represented by supply power, load power, storage power in DC bus, bus voltage and capacitor for DC bus respectively.

$$P_{DC} = V_{DC}C \frac{dV_{DC}}{dt} = \Sigma P - P_L \quad (1)$$

From equation 1 shows the DC bus charging power, the DC bus charging power is zero when it is instantaneous balanced for the power flowed into DC microgrid between load power and supply power which mean DC bus voltage is constant. Thus the power balance of the DC microgrid system should be considered for controlling and keeping DC bus voltage constant. [6]

IV. CONTROL DC BUS BY SWITCHES

Devices	Operation of Switches			
	1 st	2 nd	3 rd	4 th
Grid (S1)	ON	OFF	OFF	ON
Generator (S2)	OFF	OFF	ON	ON
Battery	Charge	Discharge	Charge	Charge
Normal Load (S3)	ON	OFF	ON	ON
Critical Load	ON	ON	ON	ON

Table 1 Operation of switches of each power supplies and each loads in microgrid systems

Simulation of microgrid systems is divided into 4 sections as follow:

Section 1: Grid is functioning and supply power to all types of load. Batteries are in charge mode.

Section 2: Grid is collapsed causing voltage swing at DC bus, so batteries are in discharged mode to maintain DC system. Power are supplied to critical load only.

Section 3: Generator is started and synchronized with DC system. Batteries are in charge mode.

Section 4: Grid is back, generator will continue to work for a period before disconnecting from the system and microgrid system is functioning as section 1.

To control power flow of microgrid system analyzing each types of switch are important. This paper focus on 4 switches which are magnetic contactor, relay, solid state relay and MOSFET. The details of each switches are described as follow:

A. Magnetic contactor

Magnetic contactor uses basic of electromagnetic principles to control switch ON and OFF. This switch suit with high power operation. The limitation of this switch is the longer response time compared with other types of switches.

B. Relay

Relay consists of two metal plates. When these plates touch each other flow of current takes places while on the other hand when these plates get separated from each other, current get interrupted. So, it has mechanical loss while switching and slower switching time compared with solid state relay.

C. Solid state relay

Solid state relay does not have moving part which helps to reduce the switching noise. Solid state relay is made from semiconductor devices which can operate in high voltage range but it can generate low voltage output. Switching time is faster than relay. Moreover, it is easy to control power input compared with relay.

D. MOSFET

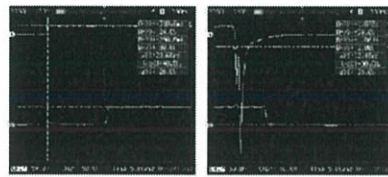
MOSFET which is made from semiconductor use electric field to switch on and off. They have fastest switching time compared with others.

V. EXPERIMENTS AND RESULTS

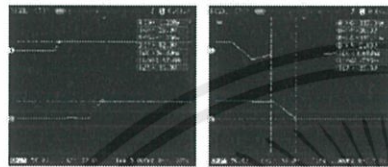
This section describes the comparison results including switches speed test and operation of microgrid system test among each switches. Also the operation of microgrid system with renewable energy test are shown.

A. Switches speed test

Measuring the voltage to compare the speed of switches according to the PLC command. The comparison between 4 switches including magnetic contactor, relay, solid state relay and MOSFET are shown by oscilloscope graph as shown in figure 3.



(a) Magnetic contactor



(b) Relay



(c) Solid state relay



(d) MOSFET

Fig. 3 ON and OFF time respond of each switches
Remark : CH1 - V_a of PLC and CH2 - V_a bus

The results of time response of each switches speed test are shown in table 2

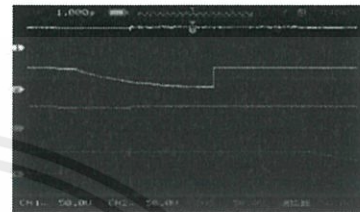
Type of switches	Turn ON time respond	Turn OFF time respond
Magnetic contactor	20 ms	12.4 ms
Relay	14 ms	1.68 ms
Solid State Relay	28 us	10.4 ms
MOSFET	7.87 us	8.1 us

Table 2 Response time of each switches

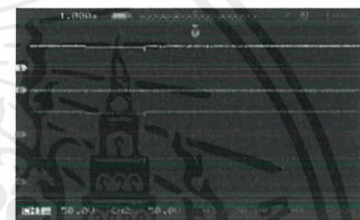
From table 2 can explain that magnetic contactor is not appropriate with this project because its respond time is more than 10 ms which affect to critical load operation, the fastest of response time is MOSFET but it is sensitive to signal interference. Therefore, solid state relay appropriate in this project because it has the response time in specified range and stable signal.

B. Operation of microgrid system test

Experimental design for a 1-phase system. The measurement of each switches including relay, solid state relay and MOSFET is divided into 2 parameters which are voltage and power flow as shown in figure 4 and 5 respectively.



(a) Relay

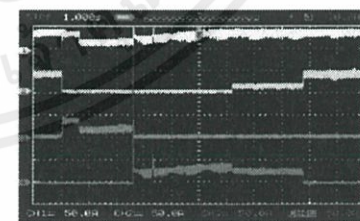


(b) Solid state relay

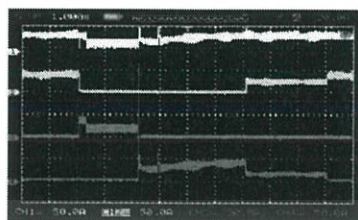


(c) MOSFET

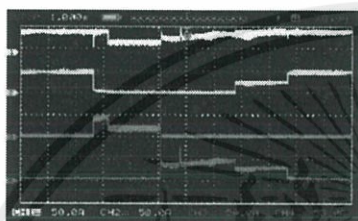
Fig.4 Voltage of each type of switches in microgrid system
Remark: CH1- V_a bus; CH2- V_a grid; CH3- V_a battery; CH4- V_a generator



(a) Relay



(a) Solid state relay



(b) MOSFET

Fig.5 Power flow of each type of switches in microgrid system
Remark: CH1- I_a bus; CH2- I_a grid; CH3- I_a battery; CH4- I_a generator

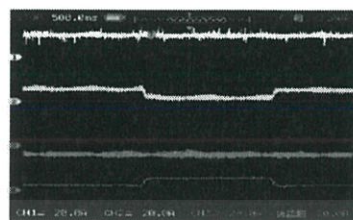
In figure 4 and 5 represent the operation of 1 phase microgrid system. First grid is only supply power. Second grid failure, batteries are supplied and prepare the diesel generator to ready to supply electricity in third period. Forth grid is back, diesel generator is still working for a period of time to ensure that grid is working normally so the power of diesel generator is decrease by a half because diesel generator is compatible with grid to supply power to microgrid system together.

C. Operation of microgrid system with renewable energy test

The microgrid system can apply with renewable energy alternative to save electricity consumption from the grid or other backup power sources. Based on the simulation from MATLAB that solar cells are renewable energy sources in microgrid system. Therefore, solar cells are used in this experiment.



(a) Practical test with solar cells



(b) Grid is functioning

Fig. 6 Power flow of microgrid system with solar cell
Remark: CH1- I_a bus; CH2- I_a grid; CH3- I_a battery; CH4- I_a solar cell

In figure 6 present an application of solar cells to the microgrid system found that it can reduce electricity consumption from the grid during grid-functioning. Solar cells and batteries are also the power source when the grid failure. Moreover, solar cell does not affect the stability of the microgrid system.

VI. CONCLUSION

From the experiment results of the time comparison of each types of switches including magnetic contactor, relay, solid state relay and MOSFET found that solid state relay is the best choice for this project which has good time response in specified range to maintain and bus voltage and least affect to critical load operation. Moreover, microgrid system can operate with renewable energy which help to reduce electricity consumption and save cost.

References

- [1] Simrandeep Kaur and Tarandeep Kaur. 2016. "A Review of Microgrid Concept." *International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology*. 3(2): 2350-0328
- [2] Manoj Lonkar and Srinivas Ponnaluri. 2015. "An Overview of DC Microgrid Operation and Control." *IREC2015 The Sixth International Renewable Energy Congress*. 6. 1-5
- [3] Paul Savage, Robert R. Nordhaus, and Sean P. Jamieson. 2018 "DC Microgrids: Benefits and Barriers." *Yale school of forestry & environmental studies*. 50-66
- [4] Thavorn Amatakit. 2013. "Generator for Nonlinear load and Linear load." *RESEARCH AND DEVELOPMENT JOURNAL*. 24(3): 23-31
- [5] Zhongtian Zhao, Jian Hu and Hongtao Chen. 2017. "Bus Voltage Control Strategy for Low Voltage DC Microgrid Based on AC Power Grid and Battery." *2017 IEEE International Conference on Energy Internet (ICEI)*. 349-354

IEEE

IEEE PES
Power & Energy Society*
Thailand Chapter

**BIG SHIFT
IN POWER
& ENERGY**

**IEEE PES
2019
GTD
CONFERENCE
& EXPOSITION**

IEEE PES GTD 2019
Grand International Conference & Exposition Asia
Conference: March 19-23 | Exposition: March 21-23
Bangkok International Trade & Exhibition Centre (BITEC)
Bangkok, Thailand

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

WED - 20 MAR 2019 TUTORIALS (Requires Advance Registration & Payment)									
Session	Venue →	CONVENTION CENTRE - GROUND FLOOR LOBBY							
All Day		Registration: Opens 07:30; Closes 17:30							
Session	Venue →	SILK-1	SILK-2	SILK-3	SILK-4	NILE-1	NILE-2	NILE-3	NILE-4
Early AM 08.30 - 10:00		TU01: Power System Reliability Evaluation - Basic Models, Methods and Applications	TU02: Infrastructure Asset Management with Power System Applications	TU03: Next Generation Synchronous Systems	TU04: Advanced Modeling of Smart Distribution Network using OpenDSS	TU05: Energy Management and Operation Control for Smart Grid with Source-Grid-Demand Synergy	TU06: Impact of IEC 61850 Edition 2 on the Smart Grid	TU07: Microgrids, Current Enabling Technologies and Future Research Trends	TU08: The Benefits of Digitalization for Power Plants, Industrial and Commercial Sites
Late AM 10:30 - 12:30									
Session	Venue →	SILK-1	SILK-2	SILK-3	SILK-4	NILE-1	NILE-2	NILE-3	NILE-4
Early PM 13:30 - 15:00		TU01: Continued	TU02: Continued	TU03: Continued	TU09: Big Data for Power & Energy	TU10: Diagnostic Measurements on High Voltage Assets	TU11: Renewable Energy Harvesting and Control of Distributed Renewable Energy Generation	TU12: Increasing the PV Hosting Capacity of Distribution Network	
Late PM 15:30 - 17:30									
Session	Venue →	BHIRAJ HALL							
Eve 17:30 - 19:00		GTD Asia 2019 Welcome Reception							

Session	Venue →	SILK	NILE-1	NILE-2	NILE-3	NILE-4	AMBER-1			
Session Chair →			Chau YUEN	Thair Ibrahim Abdel Hamid Mustata						
Early PM 14:00 - 14:30		Keynote 7: Sustainable Power Systems - Challenge of Improved Flexibility <i>Jovica V. MILANOVIĆ, Deputy Head of School and Head, Electrical Energy and Power Systems Group University of Manchester, United Kingdom</i>	TD02-P009 TD02-P011 TD02-P013	TD03-P005 TD03-P021 TD03-P025	Panel 9 TD-RE: Local Energy Systems & Grid Automation: Building the Grid from the Bottom	Panel 10 PG-TD-RE: National Energy Trading Platform (English)	Panel 11 PG-TD-RE: Real Time Power System Simulation Application			
Early PM 14:30 - 15:30	Super Session 3: Grid in the Future	TD02-P015 TD02-P016 TD08-P011	TD03-P027 TD03-P004 TD03-P037 TD05-P022							
		Forum 10 Energy Management in Smart Cities I	Forum 11 Protection & Real-Time Monitoring & Emergency Control I							
Session	Venue →	EXHIBITION HALL 98 -100								
15:30 - 16:00		PM Break								
Poster Session 15:30 - 17:00		E-Poster upload by authors: latest by 21 Mar 2019								
		PG01-P002	RE01-P002	RE02-P023	RE05-P009	TD01-P002	TD02-P017	TD03-P033	TD05-P015	TD06-P018
		PG01-P003	RE01-P004	RE02-P024	RE07-P004	TD01-P012	TD03-P001	TD03-P034	TD05-P021	TD06-P021
		PG01-P007	RE02-P005	RE03-P003	RE07-P007	TD01-P013	TD03-P003	TD03-P035	TD05-P001	TD06-P029
		PG02-P003	RE02-P011	RE03-P004	RE08-P010	TD01-P016	TD03-P009	TD03-P038	TD05-P002	TD06-P032
		PG03-P003	RE02-P012	RE05-P005	RE08-P011	TD01-P017	TD03-P011	TD03-P047	TD05-P004	TD06-P035
		PG06-P007	RE02-P017	RE05-P014	RE08-P013	TD02-P001	TD03-P017	TD04-P003	TD06-P007	TD06-P036
		PG07-P001	RE02-P019	RE06-P002	RE08-P014	TD02-P004	TD03-P026	TD04-P006	TD06-P008	TD08-P009
		PG08-P002	RE02-P020	RE06-P007		TD02-P005	TD03-P031	TD05-P007	TD06-P013	
			RE02-P021	RE06-P008		TD02-P014	TD03-P032	TD05-P012	TD06-P016	
Session	Venue →	SILK								
Late PM 16:00 - 17:00		Women in Power: Grid Edge Technologies								
Session	Venue →	BHIRAJ HALL								
EVE 18:00 - 21:00		Gala Dinner								

Expo
10:00 - 18:00

RE02-P017: Power Voltage Transformers for Renewable Energy Substations Auxiliary Services Supply

Roberto SASTRE¹, R. DEMES², J. GARCIA³

¹Artech Group, Spain

²Artech North America, Mexico

³Artech Gas Insulated Transformers, Spain

RE02-P019: A Gradient based Decentralized Volt/Var Optimization Scheme for Distribution Systems with High DFR Penetration

Yue SHI¹, Mesut BARAN²

¹ABB, United States

²North Carolina State University, United States

RE02-P020: Solar Powered Irrigation Pumps with Optimum Power Transfer

Suruchi SHARMA, S. RAJENDRAN

Indian Institute of Technology Gandhinagar, India

RE02-P021: Large-scale PV Voltage Regulation: Survey of Recent Practice

Saeed ALZAHIRAN¹, Md Rakibuzzaman SHAH², Nadarajah

MITHULANATHAN³, Arthit SODE-YOME³

¹The University of Queensland, Australia

²CQUUniversity, Australia

³Electricity Generating Authority Thailand, Thailand

RE02-P023: Evaluation of DC Link Capacitor for Solar Fed Dual Inverter with Zero Sequence Elimination PWM

Amol Ishwarrao GEDAM, Baibhav Kumar GUPTA, Ramachandra

Sekhar K.

Indian Institute of Technology Ropar, India

RE02-P024: Estimation based Maximum Power Point Control of DFIC based Wind Turbine Systems

Ganesh P. PRAJAPATI¹, Pratyasa BHUI², Pawan KUMAR³, Shriram

VARMA⁴

¹Government Engineering College Bikaner, India

²Indian Institute of Technology Dharwad, India

RE03-P003: A Novel Uncertainty Budget Optimization Method for Hybrid AC/DC Microgrids with High-penetration Renewable Generation

Zipeng LIANG, Haoyong CHEN, Simin CHEN, Yumang LIU

South China University of Technology, China

TD03-P003: Development of an Approach to Verify, Calculate and Optimise Protection Settings in a DSO Electrical Network

Manuel CASTILLO¹, Daniel GMEINER¹, Suttichai

PREMRUDEEPREECHACHARN², Narong TANTICHAYAKORN³

¹DIGSILENT GmbH, Germany

²Chiang Mai University, Thailand

³Provincial Electricity Authority, Thailand

RE05-P005: Optimal Capacity Design for Solar-assisted CCHP System Integrated with Energy Storage

C.H. ZHOU¹, Huansheng ZHOU¹, Jiehui ZHENG¹, Q.H. WU¹, X.X. ZHOU²

¹South China University of Technology, China

²State Grid Corporation of China, China

RE05-P014: Study of Energy Storage System: Concept of Using ESS in EV Charging Stations in MEA

Varawut KORNSIRILUK

Metropolitan Electricity Authority, Thailand

RE06-P002: An Interval Unit Commitment with Wind Power Integrated Using Interval Optimization

Danling YOU¹, Hanbing QU², Fei JIN³, Xijuan LI⁴, Shuai DONG⁴, Zhe LI⁴,

Chengfu WANG¹

¹State Grid Shandong Electric Power Company Limited, China

²State Grid Jinan Electric Power Company Limited, China

³State Grid Weifang Electric Power Company Limited, China

⁴Shandong University, China

RE06-P007: Lyapunov Optimization Based Online Energy Flow Control for Multi-energy Community Microgrids

Guofeng WANG, Wenhui CAI, Youbing ZHANG, Kangui ZHAO,

Xiangzhi XU

Zhejiang University of Technology, China

RE06-P008: Controller Hardware-in-the-loop

Implementation for Agent-based Distributed Optimal

Power Flow Using ADMM on Cyber-physical Microgrids

Tung-Lam NGUYEN, Quoc Tuan TRAN¹, Raphael CAIRE², Ngoc-An

LUU³, Yvon BESANGER⁴

¹University Grenoble Alpes, France

²Alternative Energies and Energy Atomic Energy Commission,

France

³University of Science and Technology-The University of Danang,

Viet Nam

RE06-P009: A Review of Low Voltage Ride Through in DFIC under Unbalanced Grid Faults

Jie LUO¹, Haoran ZHAO¹, Xiaochen LU¹, Shuning GAO¹, Qiang MA²,

Vladimir TERZIJIA³

¹Shandong University, China

²State Grid Shandong Electric Power Company, China

³The University of Manchester, United Kingdom

RE07-P004: Design and Installation of Passive Power Filter for Grid-connected Solar Rooftop Applications at Industrial Plants

Chongrag BOONSENG, Boonseng RAPEEPORNPAT, Dusit

SUKSAWAT, N. NILNIMITR, W. INWANNA, A. MANEE, T. JUNTASOM,

Vijit KINNARES, Chai CHOMPPOO-INWAI, Chow CHOMPPOO-INWAI

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand

RE07-P007: Analysis of Harmonic Hosting Capacity of IEEE Std. 519 with IEC 61000-3-6 in Distribution Systems

Nam-Hun CHO¹, Hyungchan LEE², Rajatha BHAT³, Kangjoon HED⁴

¹Korea Electric Power Corporation Research Institute, South Korea

²Hongik University, South Korea

³Georgia Institute of Technology, United States

⁴Ajou University, South Korea

RE08-P010: Solving Unit Commitment and Security Problems by Particle Swarm Optimization Technique

Venkata Silpa BORRA, Kamal DEBNATH

Charles Darwin University, Australia

WOMEN IN POWER

Grid Edge Technologies

16:00 - 17:00; SILK ROOM

Moderator: **Zuhaina ZAKARIA**

Universiti Teknologi MARA, Malaysia

Panelists: **Nirupa CHANDER**

ABB Limited, Singapore

Lina Bertling TJERNBERG

KTH Royal Institute of Technology,

Stockholm, Sweden

Oratal SUWANWILAIKUL

Siemens Limited, Thailand

Shay BAHRAMIRAD

Commonwealth Edison Company, United States

GALA DINNER

18:00 - 21:00; BHIRAJ HALL

Design and Installation of Passive Power Filter for Grid-Connected Solar Rooftop Applications at Industrial Plants

C. Boonseng¹, B. Rapeepornpat², D. Suksawat³, N. Nilnimitr⁴, W. Inwanna⁵, A. Manee⁶,
T. Juntasorn⁷, V. Kinnaree⁸, Chai Chompo-Inwai⁹ and Chow Chompo-Inwai¹⁰

Dept. Electrical Engineering, Faculty of Engineering,

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand

chongrag.bo@kmitl.ac.th¹, 59011122@kmitl.ac.th², ksdusit@yahoo.com³, 58010673@kmitl.ac.th⁴, 58011091@kmitl.ac.th⁵,
58011392@kmitl.ac.th⁶, 58010462@kmitl.ac.th⁷, vijit.ki@kmitl.ac.th⁸, chai.ch@kmitl.ac.th⁹ and chow.ch@kmitl.ac.th¹⁰

Abstract - This paper presents a study of harmonic filters design to minimize harmonic distortion caused by a harmonic source such as ac drives and solar rooftop inverters. To avoid a problem caused by the harmonics which is produced from ac drives and solar inverters, the Passive Power Filters System (PPFs) are presented. The analysis includes the basic principles, the KMITL Program and economic aspects of the harmonic filter design. The major objectives in the study are to improve the power factor, to reduce current and voltage distortion and to reduce resonance problems at a system. Practically, it is ensured that the PPFs is the best solution applied for grid-connected system. The results show that the 5th harmonic filters are a very appropriate solution for most typical harmonic problems.

Keywords - solar rooftop, passive filter and power quality

I. INTRODUCTION

Renewable energy source and distributed generation resources are mostly connected to the utility grid through a grid-connected inverter. The solar inverter and power electronic loads can be generated harmonic current, and flow into the system. In order to limit the excessive current harmonics, which are mostly produced by all of ac drive, solar inverter and switching mode power supply (SMPS) etc., a passive power filter usually put in the system at main distribution board (MDB). The usability of the Passive Power Filter System (PPFs) is to limit the grid-injected current harmonic, in order to satisfy the IEEE 1547-2008 and IEEE 519-1992 or IEEE 519-2014 standards. The system of industrial plants can be three-phase four-wire to feed of variety of nonlinear loads such as solar inverter, ac motor drive and SMPS as shown in Fig. 1. In this paper, passive power filter is the combination of the three single tuned circuits, which can be very easy for limit harmonic currents and control system [1].

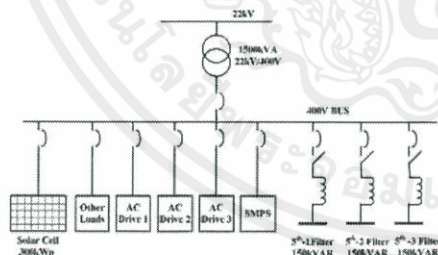


Fig. 1 Single line diagram of solar power system and PPFs

This research presents about the power quality that caused by non-linear loads and increase of the solar inverters which affect to sensitive equipment. However, this problem can be solved by PPFs. Harmonic analysis is important to determine level of harmonic distortion. In order to design PPFs, the measurement of harmonic distortion should be identified.

II. SOLAR ROOFTOP DESIGN

There is an increasing need of solar energy system with ancillary features particularly in low voltage distribution systems [2]. This is due to the fact that there is an increased penetration of solar inverters into the systems which have ac drives and non-linear loads. These power electronic loads through energy efficient, inject harmonic currents and unbalanced loads into the grid, which cause distortion at the point of common coupling (PCC) particularly in weak grid systems. The voltage distortion can affect sensitive power electronic loads such as ac drives and solar inverters, etc., which can lead to frequent tripping, maloperation and thus leading to increased maintenance costs [3].

When installing the solar rooftop, the system consist of six 50kWp solar inverters and 300kWp PV solar panels as shown in Fig. 2 and the solar power generated as shown in Fig. 3. The solar inverter waveform and spectrum of current as shown in Fig. 4. The solar rooftop is connected to the 1500kVA transformer, which has all of power electronic loads leading to increase harmonic currents in the system. Harmonic currents are produced by electronic loads. For example, power electronic loads can be amplified up to 10-15 times in parallel resonance circuit formed by the capacitance of the capacitor bank and network inductance. To avoid parallel resonance at low voltage level the PPFs should be used.

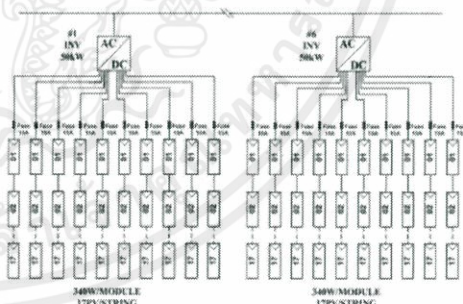


Fig. 2 The example of single line diagram of solar rooftop

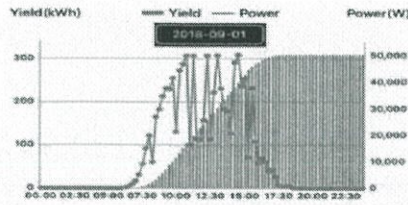


Fig. 3 The power curve of solar inverter at No. #1 INV 50kW

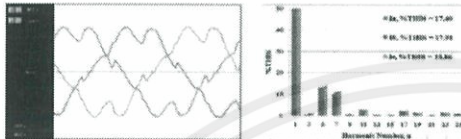


Fig. 4 The waveform and spectrum current at No. #1 INV 50kW

III. HARMONICS RESONANCE

Power quality in the existing electrical power system has been already good. Because of the installation of solar rooftop, abnormality occurred in the electric system causing the damage of fuse, SMPS and HMI (Human Machine Interface). Finally, the circuit breaker is trip leading to unusable electric systems. Fig. 5 and Fig. 6 show that %THD is increased which effects to manufacturing. The factory has to urgent solve this problem. After adding the solar rooftop in the system, unfortunately, the application of these capacitor banks on the existing power system causes the harmonics resonance problems. According to phase A %THDv and %THDi increased from 5.34% and 29.29% to 5.56% and 43.10% respectively which show the existence of resonance in electric system [3-5] and need to solve. So, the solution of this problem is the installation of PPFs which is cheaper than another solution.

IV. PASSIVE POWER FILTER CHARACTERISTICS

The function of a harmonic filter is to eliminate harmonics appearing in a network and to produce capacitive reactive power at the fundamental frequency. By frequency tuning, filters present a low impedance between phase and star point or between phases, so that the frequency tuned harmonic flows into the filter and the feeding network. Harmonic filters are connected in an appropriate voltage level in each network. According to requirements, harmonic filters consist of one or more branches. Each of branches is tuned to harmonic frequencies appearing in the network in question. The PPFs are able to reduce harmonics to 60-90%. Filtering results depend on the relation between the impedance of the supply network and performance of the filter. The filter component may be tuned to provide a low impedance shunt path to a specific frequency. A single tuned filter is the most commonly used filter. It reduces harmonic currents and supplies some or all of the fundamental frequency reactive power required for power factor correction. The quality factor of the inductor determines the sharpness of tuning.

For major disadvantage of using single tuned shunt filters is the resonance problem that is often present when the filter is placed in systems [4]. This problem can be solved and be able to correct power factor approach to unity [5-6]. The power quality enhancing system such an active filter is very expensive and it has a problem about reliability.

V. FILTER DESIGNS

A. Passive Filter Designs Considerations

For the compensation of the grid-connected solar rooftop system, the most recommended topologies are the single tuned filter. The usability of the single tuned filter must be considered carefully because high inrush current generated and increased risk of having resonance frequencies below the tuned value occur [7].

Fig.1 shows a simple system, where the three six-pulse ac drive loads (AC drive 1-3) and solar inverter are 50% of the transformer loading. The six-pulse current converters and solar inverter may give an entirely different harmonic spectrum. The typical values of 5th and 7th harmonic currents are shown in Fig. 5 at fundamental current (I_p) of 894 A and Fig. 6 at fundamental current of 723 A.

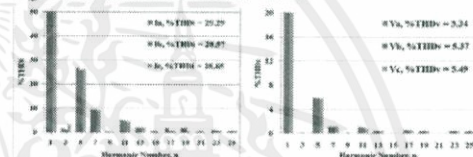


Fig. 5 Spectrum of current and voltage under a general case condition ($I_p = 849A$) at MDB

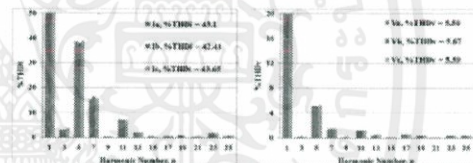


Fig. 6 Spectrum of current and voltage under a worst case condition ($I_p = 723A$) at MDB

The PPFs design criteria must be respected from reactive power demand of the system [8].

$$Q_{System} = Q_{Filter} \quad (1)$$

Q_{System} : Total reactive power from measurement

Q_{Filter} : Total reactive power to be supplied by the filter

$$Q_{System} = Q_{F1} + Q_{F2} + Q_{F3} + \dots + Q_{Fn} \quad (2)$$

n : branch of filter

$$Q_{F1} = Q_{F2} = Q_{F3} = Q_{Fn} \quad (3)$$

Q_{F1}, Q_{F2}, Q_{F3} and Q_{Fn} : Reactive power of each branch

Fig. 7 and Fig. 8 show that the 5th harmonic current can produce the %THDi around 26-27% and 37-38% for general and worst case conditions, respectively. Moreover, the 5th

harmonic currents can increase the 5th harmonic voltage or %Hv5 around 4-5% has to use the 5th harmonic filter. For the 7th harmonic current and the others harmonic cannot increase the 7th harmonic voltage or %Hv7 and the others, the value of %Hv is very low level. However, the values of %Hv7 and the others order should not exceed limits.

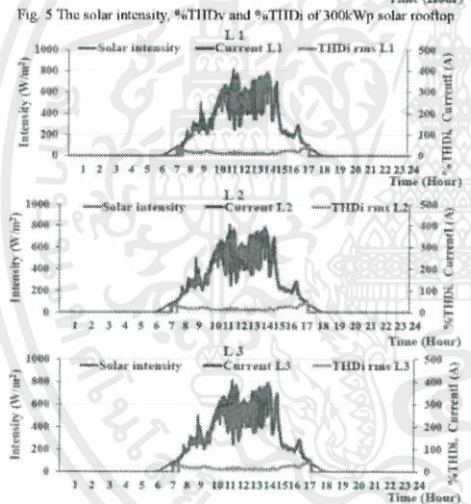
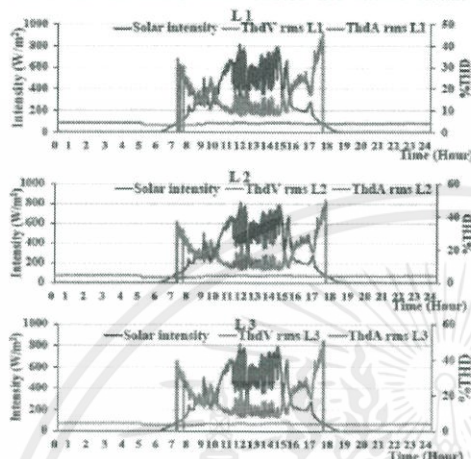
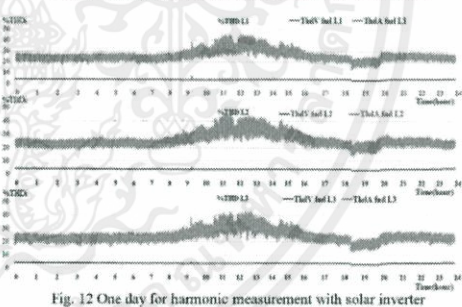
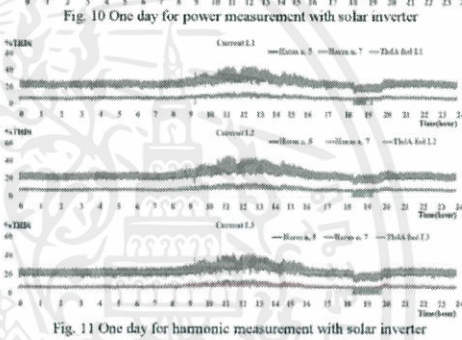
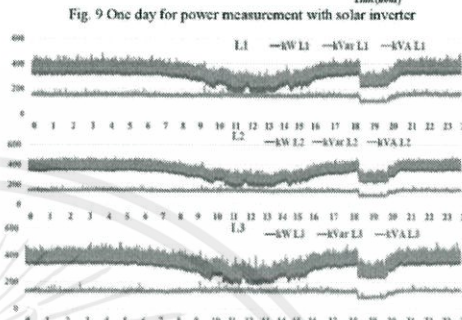
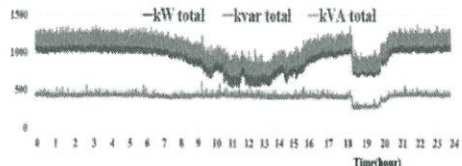


Fig. 9 shows the value of total kVA, kW and kVAR at ACB of the transformer. The total reactive power is approximately 420-560 kVAR and the average is 460 kVAR. It is found that the 450 kVAR for power factor correction is applied and the capacitor units are general standard units. Hence, it is easy and saving cost.



B. Choice of Passive Power Filter

The PPFs is designed based on reactive power and harmonic contents of voltage and current obtained from actual measurement data at harmonic source as shown in Fig.10, Fig.11 and Fig. 12. In designing of a filter, the

simplest possible construction is aimed at which will satisfy the requirements for reactive power compensation and filtering and will be economically priced. Fig. 13 shows a typical impedance of the filter, the comparison of expected reactive power between 150 and 450 kVAR 5th filter. The 150 kVAR 5th filter tuning is more accurate [8,9]. The most of data has large percentage of distortion at fifth harmonics frequency. Therefore, the 5th filters are designed to eliminate these harmonics only. This paper may mean that the lower 5th harmonics may be filtered by filters tuned to 250 Hz, which consists of three branches of 150 kVAR for reactive compensation. The number of filter branches can be selected based on the percentage of the harmonic of voltage, the harmonic of current and current value. For low voltage, it is recommended to use single tuned filters because of low cost and high reliability.

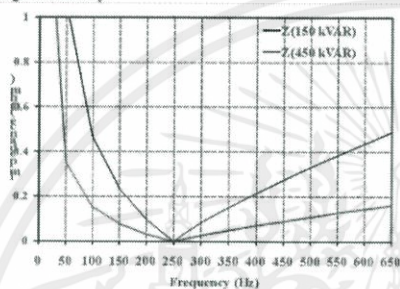


Fig. 13 The impedance of 150kVAR and 450 kVAR-5th filter

C. Passive Power Filter Designs

A number of configurations discussed earlier have been investigated, but could not be developed commercially because of cost and complexity. The PPFs which consist of capacitor, inductor and resistor have a simple structure, low cost and high reliability. In addition to absorb harmonic basis, they can also compensate for reactive power, improve power factor. In addition, the frequency of a short-capacity power supply is sensitive and influenced by load fluctuations. The property of a filter depends on grid parameter, which changes along with the impedance and resonant frequency of short-capacity operation condition. Thus, it is difficult to design an LC network for short-capacity grid. This problem can be solved and designed the power factor approach to unity. Its expression of the impedance for the n-th harmonic is [8]:

$$Z_n = R + j(\omega_n L - \frac{1}{\omega_n C}) \quad (4)$$

This paper uses the PPF as independent short-capacity grid filtering which keep power factor approach to unity. The steady state analysis of the PPFs is performed using KMITL programs, which was developed by Department of Electrical Engineering, KMITL.[8-9]. The resultant harmonic filter parameter in terms of fundamental is shown in Fig. 14 and Table I. A single line diagram for this system with PPFs is shown in Fig 15.

Filter Performance			
Filter Design	kVAR	kV	%
Filter	Resistor	150	0.4 4.0%
	Inductance	280	
	n	5.00	
	k	1.04	
	Capac	2,864.79	
	Losses(mW)	0.14	

Reactive System								
Hz	Ih(A)	Xc	Xl	Xtot	Uth	Ireact(mA)	Ucomp(V)	Uhand(V)
50	217	1.11	0.04	1.07	241	217	241	417
150	0	0.37	0.13	0.24	0	0	0	0
250	150	0.22	0.09	0.33	150	44	44	58
350	0	0.16	0.21	0.15	0	0	0	0
450	0	0.10	0.49	0.39	0	0	0	0
						268	274	478

Capacitor Bank		
Qc 3ph	Qc 3ph	Selected Uc
kVAR	kVAR	V
32.68	248.66	525

Fig. 14 The 150kVAR 5th filter design for PPFs[8, 9]

TABLE I
HARMONIC ANALYSIS AND PPFs DESIGN RESULTS

Filter	R(Ω)	C(kVAR)	Vrated of C(V)	L(mH)	Vrated of L(V)
5th-1	0.000468	248	525	0.14	525
5th-2	0.000468	248	525	0.14	525
5th-3	0.000468	248	525	0.14	525

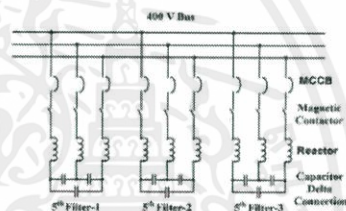


Fig. 15 The PPFs configuration

VI. FILTER INSTALLATION AND CONTROL

The practical examples of PPFs compensation in ceramic factory distribution systems are reported. The ceramic systems have AC drives, SMPS and solar inverter. The PPFs consists of a power factor controller, which the controller's algorithm tries to reach the target power factor. The others components can be configured in accordance with the owners' requirement in the actual application. The PPFs can be used to compensate network harmonic and fundamental reactive current. The 3 x 150 kVAR 5th Filters are designed especially to be used in industrial plants system for eliminating the 5th harmonic current and anti-resonance. The capacitors produce reactive power at the filter's fundamental frequency and the circuit is designed to achieve unity power factor as required. The inductance of the reactor is chosen so that the filter forms a very low impedance series resonant circuit at the harmonics entering the filter. The degree of protection is normally IP30 in filter capacitor banks. The equipment is designed for indoor applications, in dry, dust-free conditions as shown in Fig. 16.

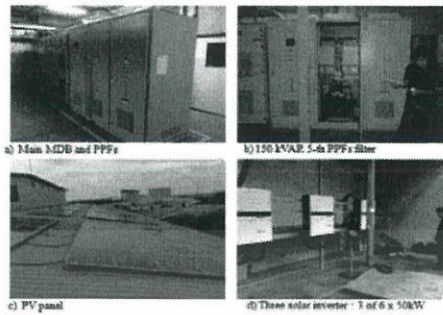


Fig. 16 The solar rooftop and PPFs

VII. RESULTS

The proposed harmonic filters were implemented and tested. The equipment has been inspected and tested in accordance with the technical specifications and they were found to meet all requirements stated. The PPFs passed the test and inspection without remark. In this case, the I_{sc} and I_L are equal to 25kA and 900A respectively. Consequently, the value of $I_{sc}/I_L = 27.78$, corresponding to limits at 8%. The PPFs that designed filter configuration complies with the IEEE 519-1992 standard is shown in Table II and Table III. The comparison of the %THDv and %THDi with and without the PPFs is shown in Fig. 17.

TABLE II
CURRENT DISTORTION LIMITS FOR GENERAL DISTRIBUTION SYSTEM
IN IEEE 519-1992 STANDARD (120V THROUGH 69,000V)

I_{sc}/I_L	≤ 11	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$h \leq 35$	TDD
< 20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20 < 50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50 < 100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100 < 1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
> 1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

Where:

I_{sc} = maximum short-circuit current at PCC.

I_L = maximum demand load current (fundamental frequency component) at PCC.

TABLE III
EVALUATION HARMONIC AND PPFs DESIGN RESULTS (%)

Harmonic Order	% Harmonic Current without PPFs			% Harmonic Current with PPFs			IEEE 519 %harmonic current
	A	B	C	A	B	C	
3rd	1.51	1.07	3.27	1.10	1.20	1.20	7.0
5th	26.86	23.94	26.21	6.30	6.00	6.10	7.0
7th	9.45	9.41	9.04	2.20	2.30	2.20	7.0
11th	5.16	4.82	4.71	2.60	2.40	2.50	3.5
13th	1.89	2.00	2.05	0.70	0.55	0.67	3.5
17th	1.90	0.57	0.53	0.50	0.50	0.60	2.5
19th	1.83	2.06	0.42	0.20	0.10	0.10	2.5
23rd	1.10	0.82	0.98	0.20	0.20	0.20	1.0
25th	0.56	0.58	0.63	0.30	0.30	0.40	1.0
TDD	29.29	28.57	28.65	7.3	7.1	7.3	8.0

A. Increasing Power Factor

Solving the power factor is very delicate. In case that the reactive power measurement fails or loads extremely change

and the reactive power value of PPFs is proper, the power factor will be unity. In case of slight increase of reactive power can be seen in Fig. 18a). The lack of reactive power or loads increase can be seen in Fig. 18b). The designer has set the target at minimum around 0.98L. On the other hand, if the load decreases, the reactive power will decrease but the PPFs are still working on system at least 20sec causing exceeded reactive power from the demand. The result of power factor is shown in Fig. 18c). In case of having excess of reactive power about 20 sec, the system is leading. The designer is set at maximum around 0.98C and then the PPFs will be isolated and the system power factor turns to lagging. The PPFs have abundant problem in case of extremely fluctuation in loads. So system that has a lot of change cannot keep power factor at unity all the time. The fluctuation of power factor cannot affect the electrical system, so the PPFs can be used.

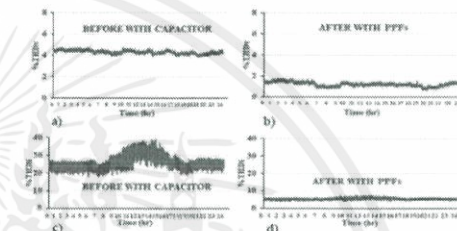


Fig. 17 The %THDv and %THDi with capacitor and with PPFs



Fig. 18 Power factor and reactive power factor controller

B. Reduction in Harmonics Distortion

In this case, measurements were made to determine what kind of reactive power compensation system would be needed to improve harmonic and power factor up to penalty limit. The waveforms of current before and after the PPFs installing can be shown in Fig. 19. In normal case, we will compare the %THDi and %THDv with and without the PPFs also shown in Fig. 20.

C. Reduction in Harmonics Resonance

Harmonic measurements were made to find out the reason for damaging electronic equipment. In Fig. 21 a) and Fig. 21c) there are measured fundamental and harmonic currents of the supplying transformer as well as measured %THD of the voltage and current. As can be seen there is resonance at 5th harmonic when the solar inverter operates, causing the increase of 5th current from 212 A to 274 A. In Fig. 21b) and Fig. 21d) there are measurement results of %THD of voltage and current when the PPFs was commissioned. With proper design, resonance situations can

be avoided and possible emission limits imposed by the utility and IEEE 519-1992 or IEEE 519-2014 standards can be met. When the harmonic current and the harmonic resonance are controlled, it can maintain the power factor close to unity and when the harmonic current from the solar inverter is increased, it cannot damage the system because the system can maintain the level of %THDv to a low level, which is the advantage of the PPFs. Another way to solve the problem is very difficult, unsteadiness and not worth to do in the industrial system.

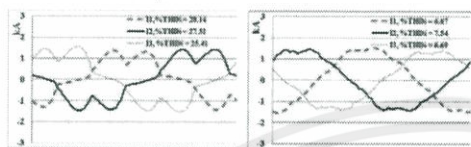


Fig. 19 The waveform of current (kA) without and with the PPFs

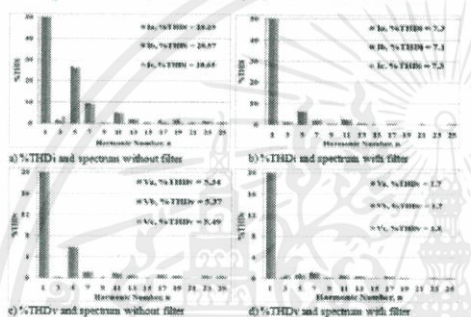


Fig. 20 The %THDi and %THDv without and with the PPFs in normal case condition

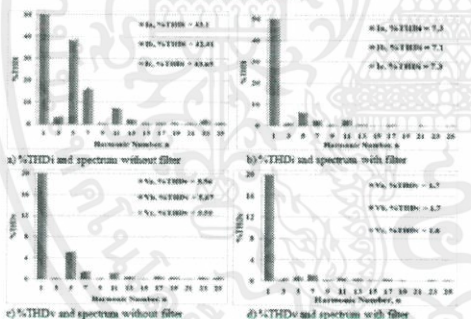


Fig. 21 The %THDi and %THDv without and with the PPFs in worst case condition

VIII CONCLUSION

From the main finding of this work, when all the PPFs were connected, the THD of voltage and current are decreased to 1.7% and 7.3%, respectively and power factor approaches to 1 at maximum loads which are considered to

be very good value for a low voltage supply system and the final comments could be drawn as follows:

- The solar rooftop installations should be considered the %THDi and %THDv of the solar inverter line input. Also, the suitable transformer rating should be determined.
- Practical solar inverter can generate reactive power (kVAR) into systems so to get an accuracy data, the delicate reactive power measurement is important.
- The harmonic and power quality problems can be controlled using a number of different methods. However, the PPFs are preferable in terms of convenience, flexibility, highly reliability, low cost and low maintenance. It can be easily integrated in to the systems of solar rooftop power systems.
- The PPFs installation has constraint. If load system is constantly, the system can operate in high efficiency. to maintain power factor, close to unity and filter harmonic so well because there is connected with PPFs. So when loads change, the filtering will have a good operation as design. If the power load changes frequently, the operation of PPFs will cut off. Filtering will be ineffective.
- Power factor is a term familiar to all power engineering as a measure of the use of the capability of an ac circuit to supply active power. In the area of revenue, metering power factor is important as a measure of system losses.

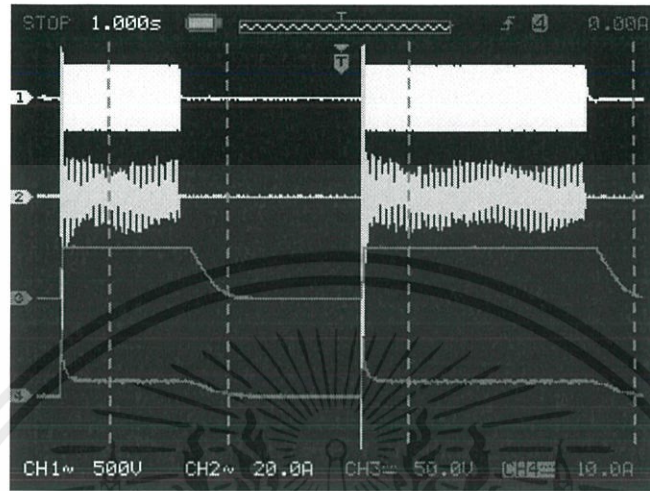
REFERENCES

- [1] C. Boonseng, V. Kimmares and W. Khan-ngan, "An Implementation of Harmonic Filter Installations for Improved Quality and Reduced Voltage and Current Distortion in UPS System", *IPEC'99 International Power Engineering Conference, Vol II, May 24-26, 1999*.
- [2] A. Anzalchi, M. Moghaddam, A. Moghadasi, M. M. Four and A.I. Sarwat, "Design and analysis of a High order Power Filter of Grid-Connected Renewable Energy Systems", *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol.53, No 5., Sep/Oct, 2017.
- [3] S. Devassy and B. Singh, "Modified pq-Theroy-Based Control of Solar-PV-Integrated UPOC-S", *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 53, No 5., pp. 5031-5040, Sep/Oct, 2017.
- [4] E. B. Makram, E.V. Subramaniam, A.A. Girgis and R. C. Catoe, "Harmonic Filter Design Using Actual Record Data", *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol.29, No 6., Nov/Dec, 1993.
- [5] C. Boonseng, "Harmonic Filter Designs for AC Drive and Applications", *SCG for Paper Report 2015*.
- [6] C. Boonseng, "Harmonic Filter Designs for DC Drive and Applications", *SCG for Paper Report 2015*.
- [7] L. Moran, C. A. Albistur and R. Burgos, "Multimega VAR Passive Filters for Mining Applications: Practical Limitations and Technical Considerations", *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 52, No 6., pp. 5310-5317, Nov/Dec, 2016.
- [8] J. C. Das, "Passive Filters-Potentialities and Limitations", *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol40, no 1, Jan/Feb, 2004.
- [9] A. B. Nassif, W. Xu and W. Freitas, "An Investigation on the section of Filter Topologies for Passive Filter Applications", *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 24, No 3, pp. 1710-1718, Jul, 2009.

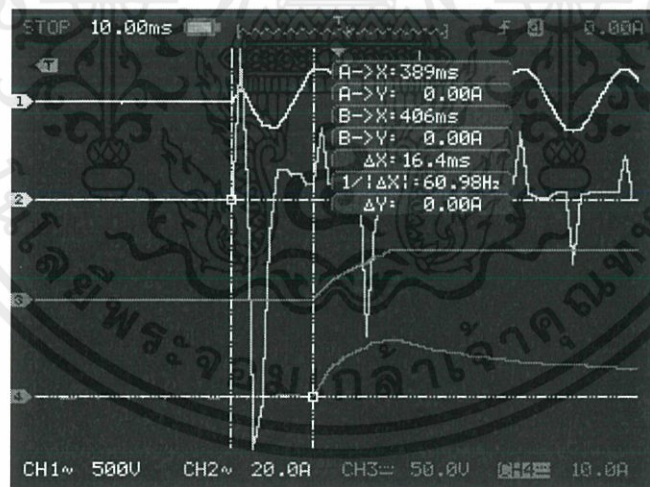


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

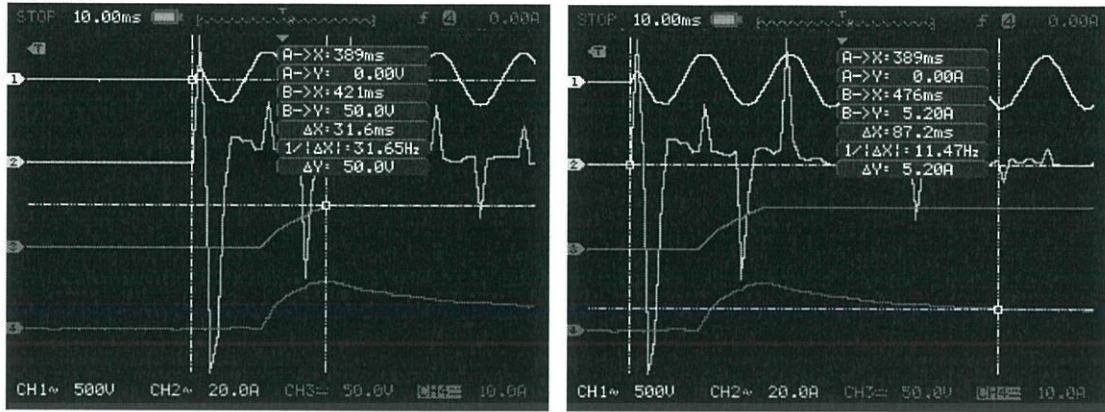
การดีเลย์ของการทำงานในสวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลาย (Switching Power Supply)



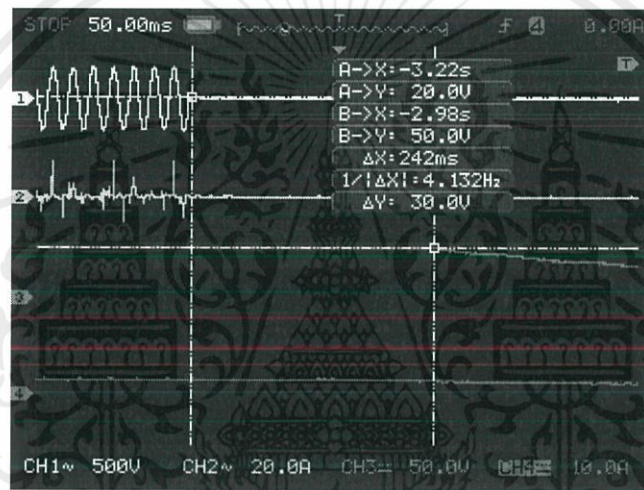
รูปที่ ข1 แสดงแรงดันขาเข้า(กระแสสลับ) กระแสขาเข้า(กระแสสลับ) แรงดันขาออก(กระแสตรง) กระแสขาออก(กระแสตรง) เรียงลำดับจากบนลงล่าง



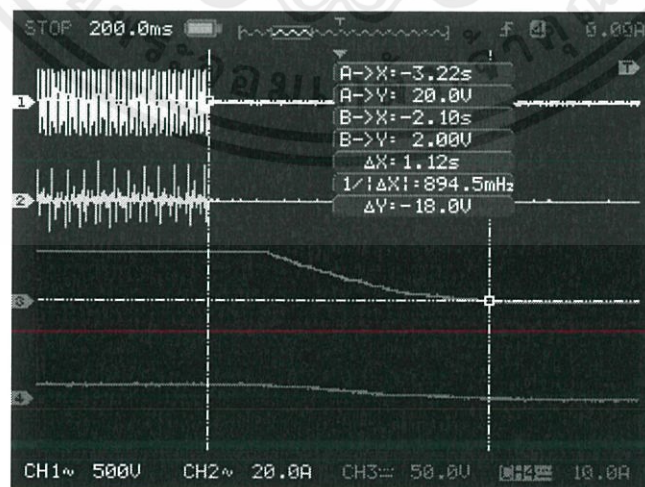
รูปที่ ข.2 แสดงระยะเวลาในการเริ่มจ่ายกระแสไฟฟ้าเมื่อมีการจ่ายแรงดันไฟฟ้าขาเข้า



รูปที่ ข.3 แสดงระยะเวลาในการจ่ายแรงดันไฟฟ้าขาออก



รูปที่ ข.4 แสดงระยะเวลาที่สวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลายเริ่มการลดลงของแรงดันไฟฟ้าขาออก



รูปที่ ข.5 แสดงระยะเวลาการคายประจุของตัวเก็บประจุในสวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

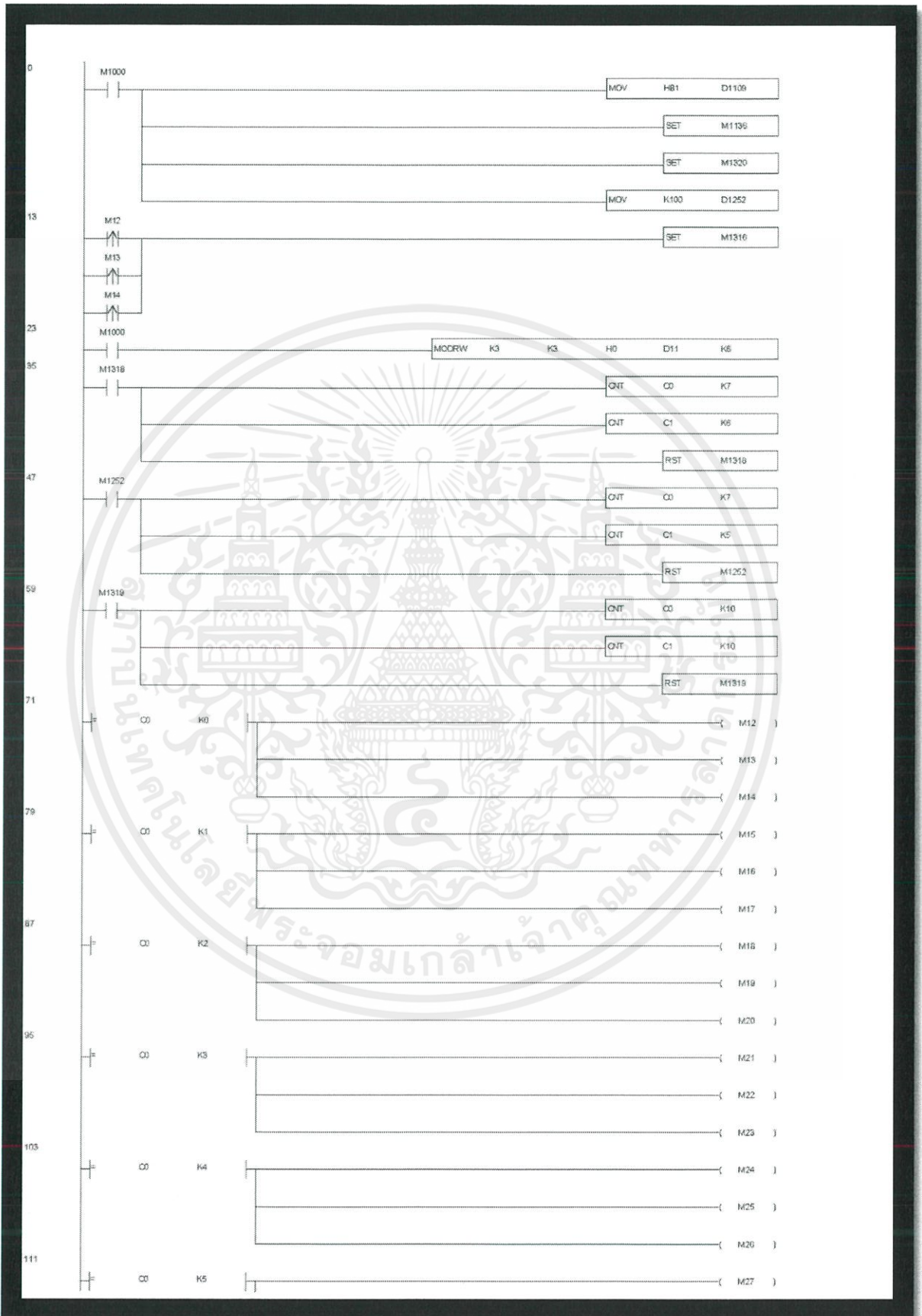
จากรูปที่ ข.2 แสดงระยะเวลาในการเริ่มจ่ายกระแสไฟฟ้าเมื่อมีการจ่ายแรงดันไฟฟ้าขาเข้า โดยจะเห็นได้ว่าสวิตชิ่งเพาเวอร์ซัพพลายใช้เวลา 16.4×10^{-3} วินาที เพื่อที่จะเริ่มจ่ายกระแสไฟฟ้านับตั้งแต่มีกระแสไฟฟ้าเริ่มจ่ายเข้ามา ซึ่งจะเท่ากับระยะเวลาในการเพิ่มขึ้นของแรงดันไฟฟ้าขาออก ซึ่งใช้เวลา 31.6×10^{-3} วินาทีในการทำให้แรงดันไฟฟ้าคงที่(นับตั้งแต่เริ่มมีการจ่ายกระแสไฟฟ้า) และใช้เวลา 87.2×10^{-3} วินาที เพื่อที่จะจ่ายกระแสไฟฟ้าให้คงที่

จากรูปที่ ข.4 แสดงระยะเวลาที่สวิตชิ่งเพาเวอร์ซัพพลายเริ่มลดแรงดันไฟฟ้าขาออก โดยจะใช้เวลา 242×10^{-3} วินาที ในการทำให้แรงดันขาออกลดลงจนเท่ากับศูนย์ นับตั้งแต่แรงดันขาเข้าหาย และใช้เวลา 1.12 วินาที ในการทำให้แรงดันขาออกลดลงจนเท่ากับศูนย์ นับตั้งแต่แรงดันขาเข้าหายไป

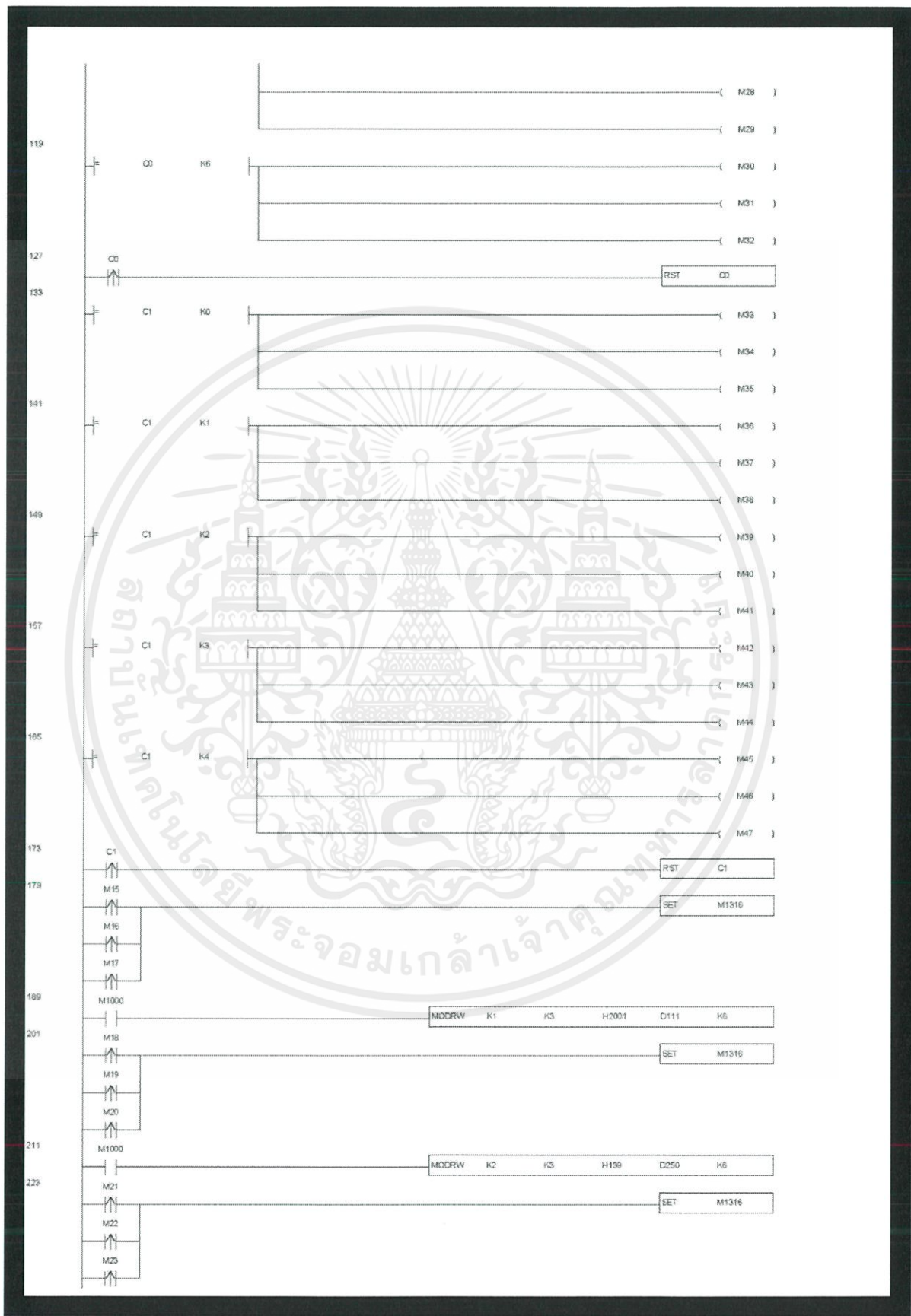




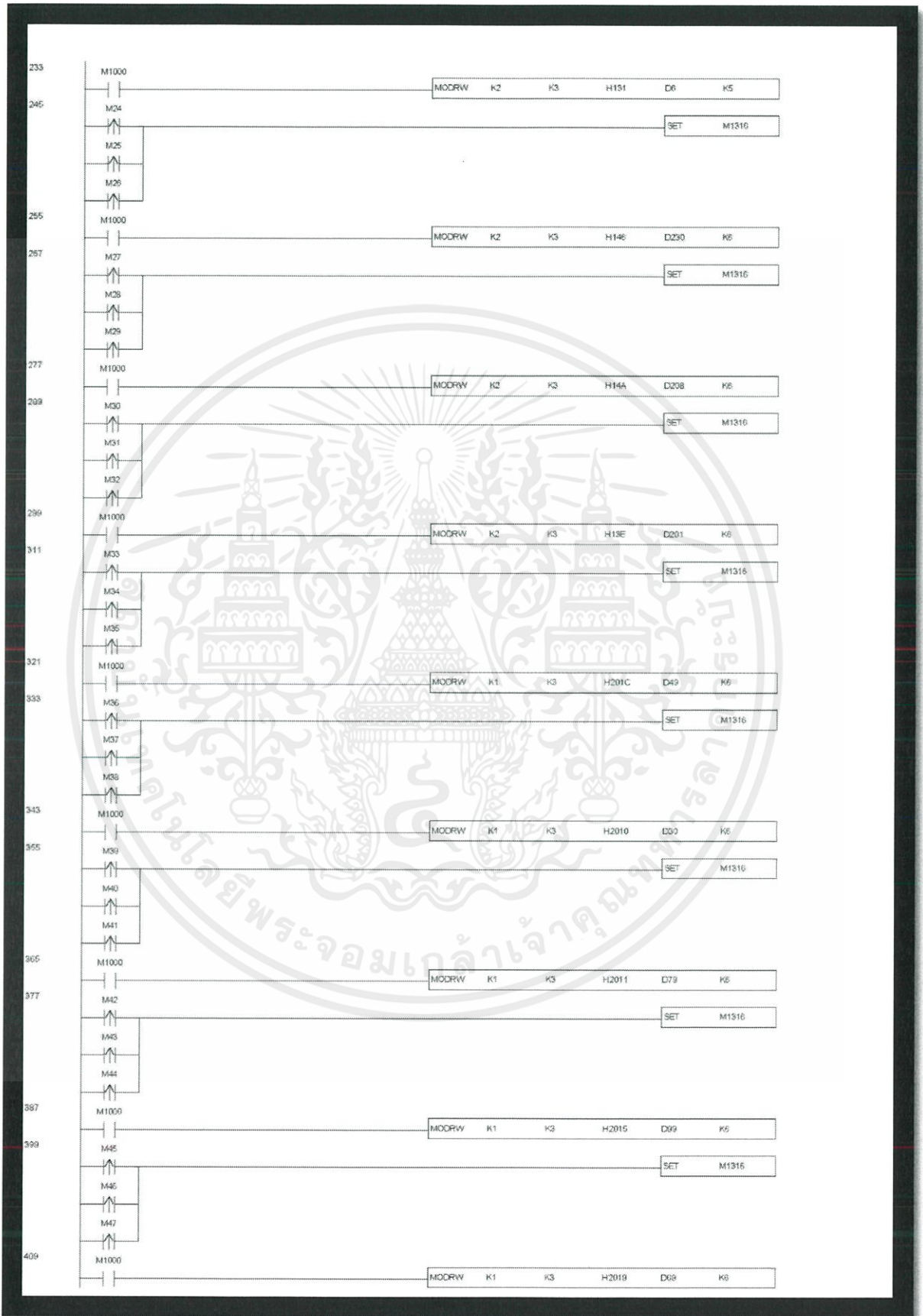
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



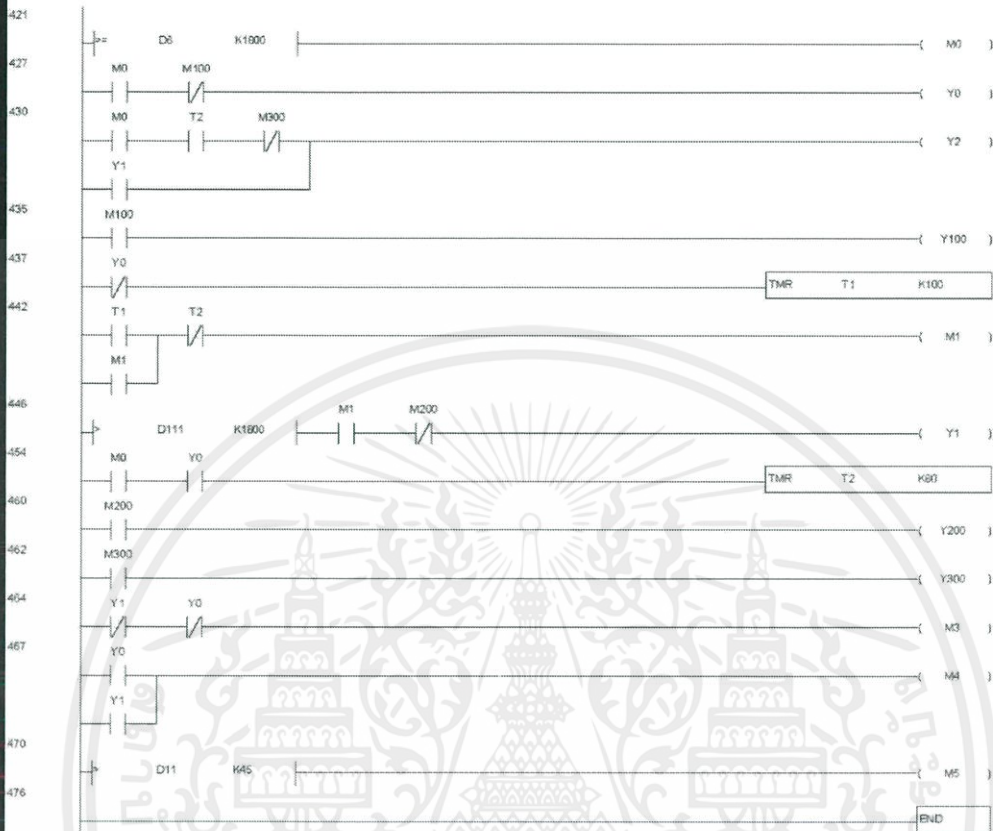
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



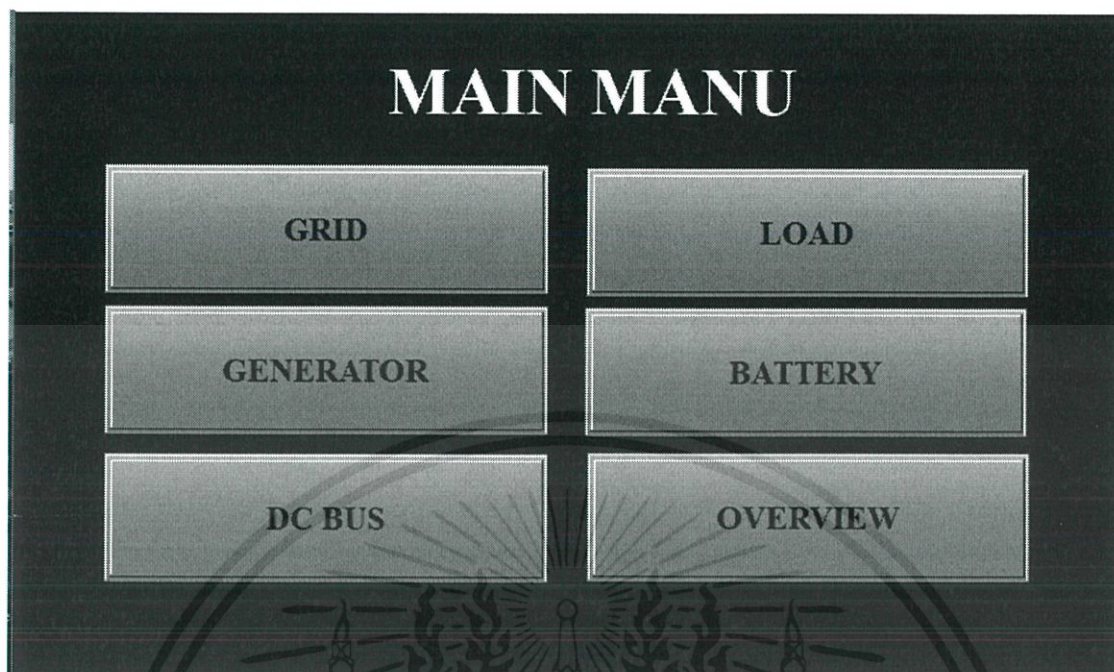
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



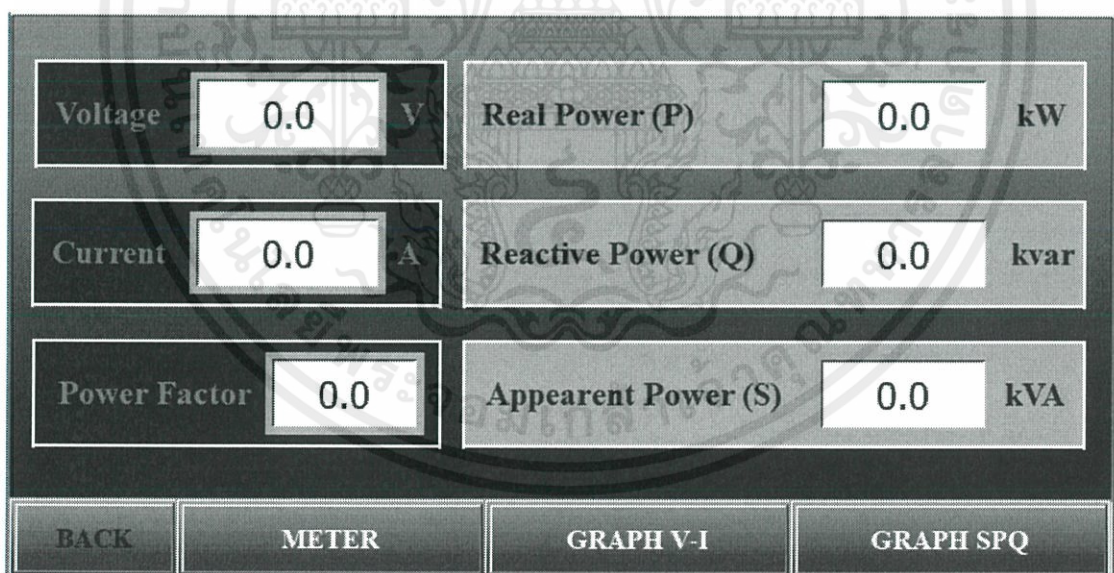
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



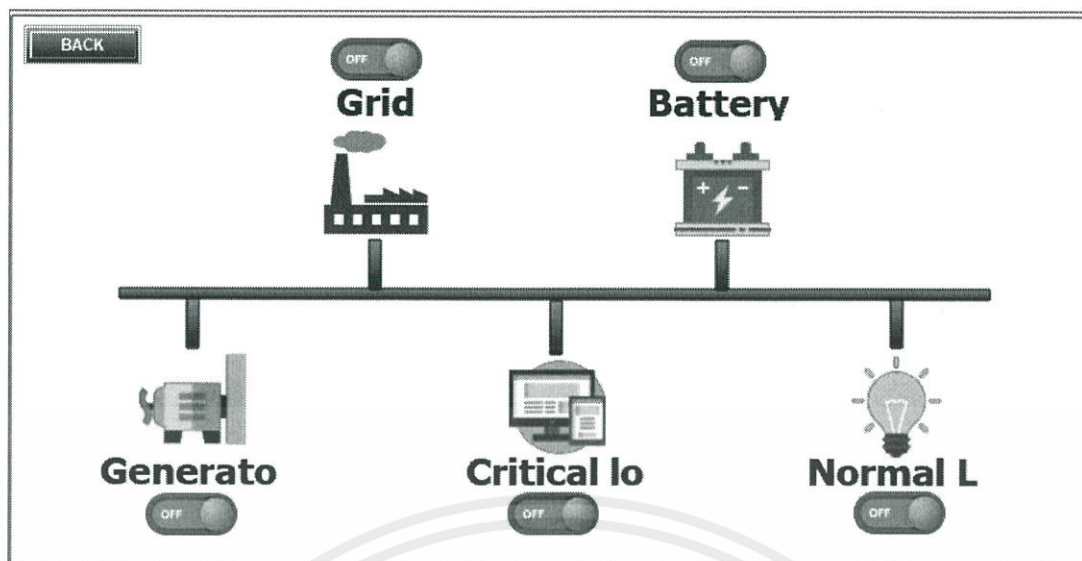
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค.1 หน้าจอแสดงผล HMI หน้าหลัก



รูปที่ ค.2 หน้าจอแสดงผล HMI แสดงปริมาณทางไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟฟ้า



รูปที่ ค.3 หน้าจอแสดงผล HMI แสดงสถานะของสวิตช์





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Analysis of Control System to Prevent Collapse of Mixed-Sources Microgrid for Industry

T. JUNTASORN¹, N. NILNIMITR², W. INWANNA³, A. MANEE⁴,
C. BOONSENG⁵ and C. CHONPOOINWAI⁶

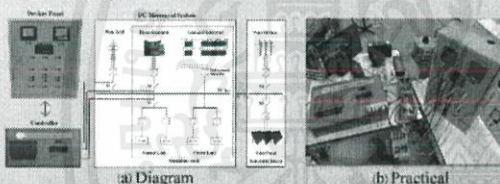
Abstract

This project presents the control of power sources by lookup table controller to maintain the voltage of critical load and to prevent collapse of mixed-sources microgrid which consist of grid, batteries and diesel generators that connect to DC bus. The system can apply with renewable energy such as solar cell and wind turbine. The experiment presents the time comparison of three types of switches including relay, solid state relay and mosfet which can maintain DC bus voltage in specified range which the least effect to critical load operation.

Introduction

DC Microgrid is small-scale power grid which consist of distributed generation, control system and energy storage. It can operate in 2 modes which is grid connected mode and standalone mode which supported by Distributed Energy Resources (DER) such as diesel generator, solar cells and battery[1].

Fig.1 DC Microgrid system, Controller and Switches control panel



Methodology

Table 1 : Operation of switches of devices in microgrid systems

Devices	Operation of Switches			
	1 st	2 nd	3 rd	4 th
Grid (S1)	ON	OFF	OFF	ON
Generator (S2)	OFF	OFF	ON	ON
Battery	Charge	Discharge	Charge	Charge
Normal Load (S3)	ON	OFF	ON	ON
Critical Load	ON	ON	ON	ON

Table 2 : Operation of switches of renewable energy

Renewable Energy	
Power	No power
ON	OFF

Results

Table 3 : Response time of each switches

Type of switches	Turn ON time respond	Turn OFF time respond
Magnetic contactor	20.06 ms	12.40 ms
Relay	14.80 ms	1.68 ms
Solid State Relay	28.01 μ s	10.40 ms
Mosfet	7.87 μ s	8.11 μ s

Fig.2 Power flow of each type of switches in microgrid system

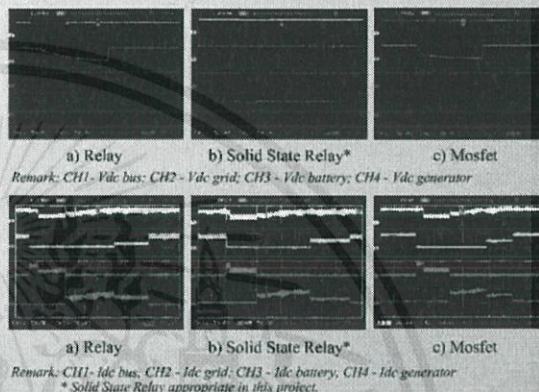
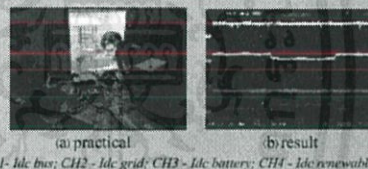


Fig.3 Power flow of microgrid system with renewable energy in grid connected mode



Conclusion

DC Microgrid can maintain voltage as determined which does not exceed 230-5% 50Hz[2] even if grid is interrupted. Considering from time of operation of switch and the stability found that solid state relay is suitable with practical over other switches since it can endure high current and stable signal which is necessary for lifetime of equipment. Moreover, it has good time respond, which lower than 10 ms, for supply power from each sources to critical load in time which necessary for maintaining bus voltage.

References

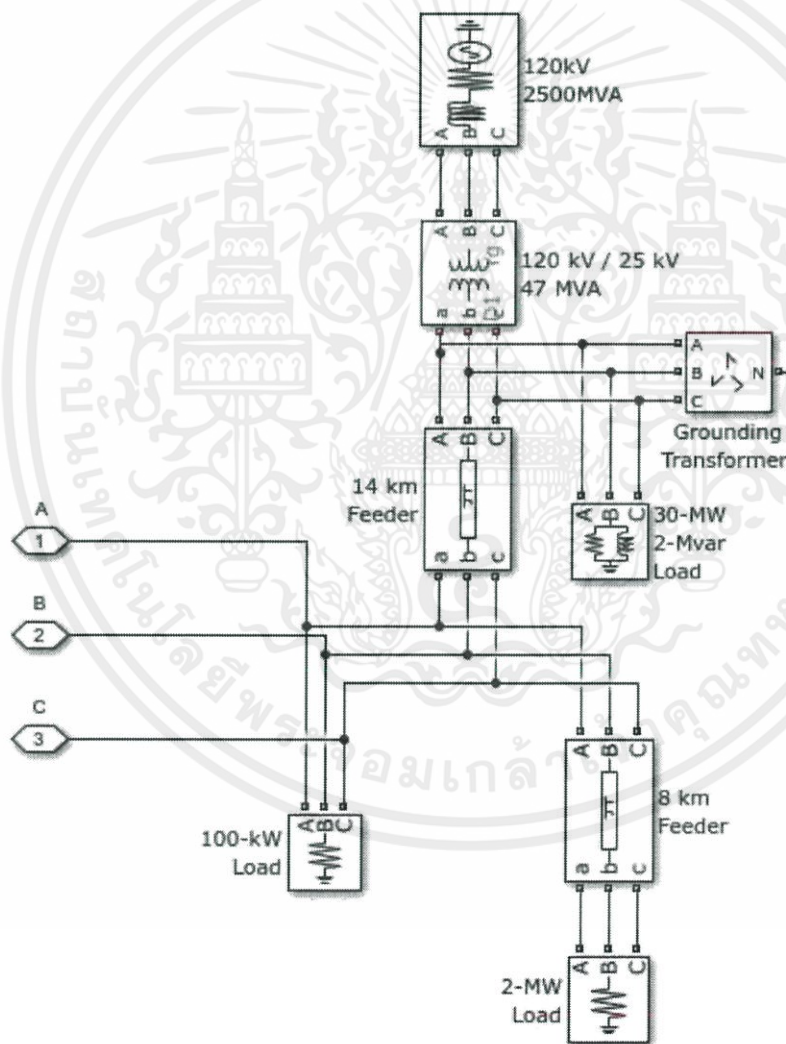
- [1] Zhongtian Zhao, Jian Hu and Hongtao Chen. 2017. "Bus Voltage Control Strategy for Low Voltage DC Microgrid Based on AC Power Grid and Battery," 2017 IEEE International Conference on Energy Internet (ICEI): 349-354
- [2] Electricity Generating Authority of Thailand. "Operation Code." Electricity Generating Authority of Thailand, 2560



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

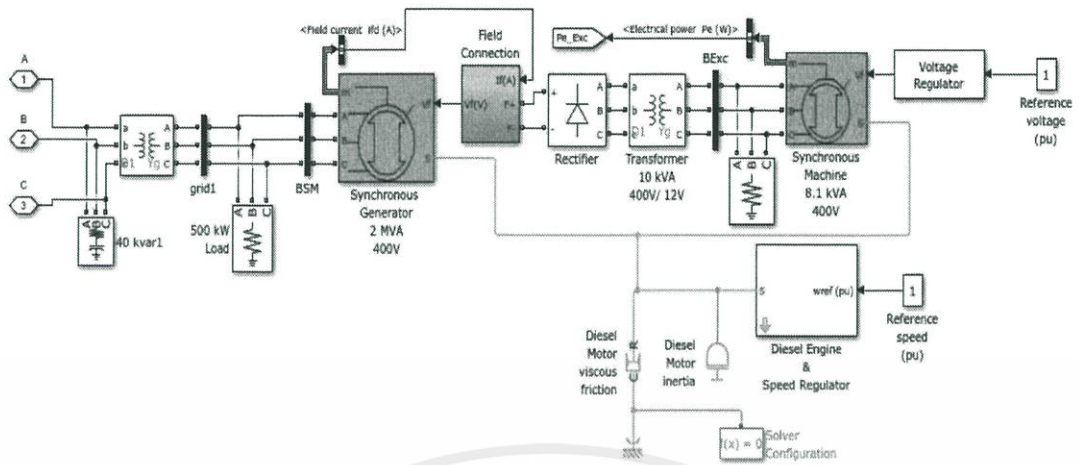
ตารางที่ จ.1 พิกัดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการจำลองระบบไมโครกริดในโปรแกรม MATLAB

อุปกรณ์	พิกัด
การไฟฟ้า (กริด)	2 MVA
แบตเตอรี่	500 Ah
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซล	2 MW
โหลดปกติ	200 kW
โหลดวิกฤต	400 kW
โซลาร์เซลล์	500 kW



รูปที่ จ.1 การจำลองแหล่งจ่ายจากการไฟฟ้า (กริด)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ จ.3 การจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซล



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

GENERAL PURPOSE RELAYS LY2N Series



FEATURES:

- High switching power
- Compact size
- 10A switching capacity
- 2 pole configuration
- DC or AC coils
- High sensitivity

DESCRIPTION:

The LY2N series industrial relays in conjunction with the PTF08A0E base can be used for a wide range of commercial or industrial applications.

The LY2N has a 2 pole change-over configuration. It's wide terminals allow reliability at large currents.

GENERAL SPECIFICATIONS:

Contact Configuration	2 change over (DPDT) -2 form C 10A	Ambient Humidity	35% to 85%
Nominal Coil Power	0.9 W DC - 1.2VA AC	Vibration resistance	10 to 55Hz, 1mm (0.04") double amplitude
Operating Time (at nominal voltage)	≤25ms	Shock resistance	200m/s ² (200G) (Functional)
Release Time (at nominal voltage)	≤25ms	Termination (Relay)	Flanges (blades) 5 mm (0.20")
Ambient Temperature	-25°C to 55°C (-13°F to 131°F)	Construction	Duct Cover
		Weight	40g (1.41oz)

Coil Characteristics, DC @ +23°C (+73°F), coil power 900mW

Coil Code	Nominal Voltage Vdc	Pick-up Voltage Vdc	Drop-out Voltage Vdc	Max. Allowed Voltage Vdc	Coil Current mA	Coil Resistance Ω
12	12	9.6	1.2	13.2	75	160
24	24	19.2	2.4	26.4	36.9	650

Coil Characteristics, AC @ +23°C (+73°F), coil power 1.2VA

Coil Code	Nominal Voltage Vac	Pick-up Voltage Vac	Drop-out Voltage Vac	Max. Allowed Voltage VAC	Coil Current mA		Coil Resistance Ω
					50Hz	60Hz	
A24	24	22.4	7.2	26.4	53.8	46	180
A120	120	96	36.0	132	10.8	9.2	4430

PRODUCT ORDERING INFORMATION:

SERIES	DESCRIPTION
LY2N	10 amp contacts, DPDT w/ Neon Light

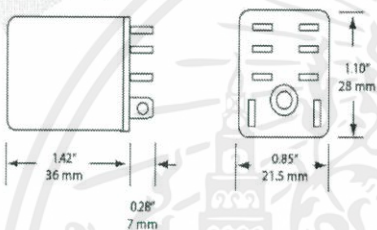
CODE	COIL VOLTAGE
12VDC	Low voltage DC, 12 VDC
24VDC	Low voltage DC, 24 VDC
24VAC	Low Voltage AC, 24 VAC
120VAC	High voltage AC, 120 VAC

LY2N	24VDC
------	-------

Greystone Energy Systems, Inc. reserves the right to make design modifications without prior notice.

DIMENSIONS:

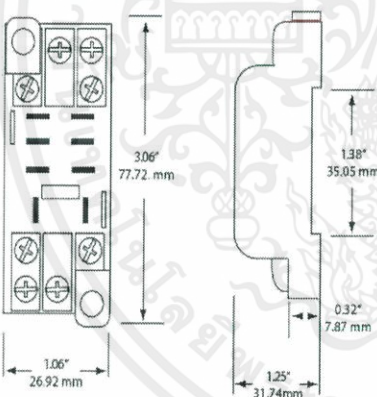
LY2 Relay - Omron



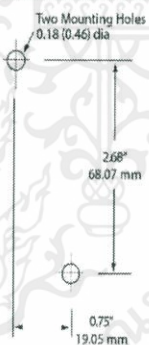
WIRING DIAGRAM:



PTF08A-E Base



DRILLING PATTERN:



GREYSTONE

ENERGY SYSTEMS INC

Greystone Energy Systems, Inc.
150 English Drive, Moncton, NB
Canada E1E 4G7

(506) 853-3057 Fax: (506) 853-6014
North America: 1-800-561-5611
e-mail: mail@greystoneenergy.com
www.greystoneenergy.com

RoHS COMPLIANT



Greystone Energy Systems Inc. is one of North America's largest ISO registered manufacturers of HVAC sensors and transducers for Building Automation Management Systems.

We have conscientiously established a worldwide reputation as an industry leader by maintaining leading-edge design technology, prompt technical support, and a commitment to on-time deliveries. We take pride in our Quality Management System which is ISO 9001 certified, assuring our customers of consistent product reliability.

GREYSTONE HAS AN ISO 9001 REGISTERED QUALITY SYSTEM

03/13

LY2NPT-001

Copyright © Greystone Energy Systems Inc. All Rights Reserved

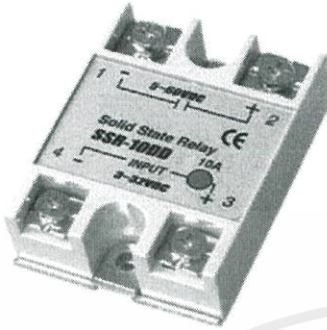
PRINTED IN CANADA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

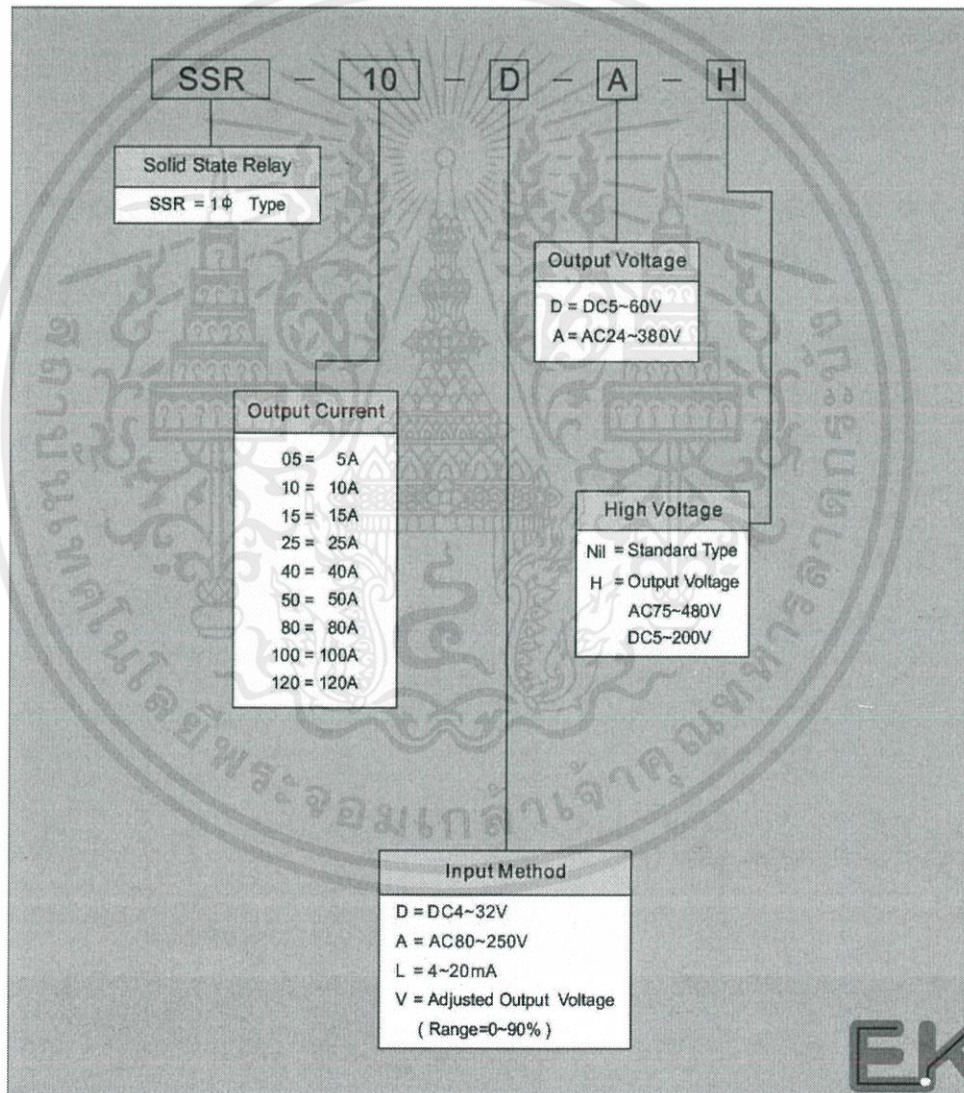
SOLID STATE SSR-10DD

SOLID STATE RELAY

SSR Series



- Built-in operation indicator
- High isolation over than 50MΩ (500VDC)
- High dielectric over than 2.5KV
- Low EMI / EFI & surge by zero cross trigger method
- Output snubber circuit protection



EKT
Electronics Katrangi Trading

www.ekt2.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MODEL	SSR-10DD
LOAD CURRENT	10A
INPUT DATA	
OPERATING VOLTAGE	3~32VDC
TRIGGER CURRENT	7.5mA/12VDC max
CONTROL METHOD	Isolated by Photocouple
OUTPUT DATA	
OPERATING VOLTAGE	5~60VDC
VOLTAGE DROP	1.6V
LEAKAGE CURRENT	<0.8mA
RESPONSE TIME	1ms <ON+OFF>
GENERAL DATA	
INSULATION RESISTANCE	Min. 50M Ω (500VDC)
DIELECTRIC STRENGTH	2500VAC 50/60 Hz for 1 min
AMBIENT TEMPERATURE	-20 $^{\circ}$ C ~+80 $^{\circ}$ C
AMBIENT HUMIDITY	45%~85%RH
WEIGHT	Apr. 110g
CONNECTOR DIAGRAM	

EKT
Electronics Katrangi Trading

www.ekt2.com

Made in China

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



IRF9540, SiHF9540

Vishay Siliconix

Power MOSFET

PRODUCT SUMMARY		
V_{DS} (V)	- 100	
$R_{DS(on)}$ (Ω)	$V_{GS} = -10$ V	0.20
Q_g (Max.) (nC)	61	
Q_{gs} (nC)	14	
Q_{gd} (nC)	29	
Configuration	Single	

FEATURES

- Dynamic dV/dt Rating
- Repetitive Avalanche Rated
- P-Channel
- 175 °C Operating Temperature
- Fast Switching
- Ease of Paralleling
- Simple Drive Requirements
- Compliant to RoHS Directive 2002/95/EC

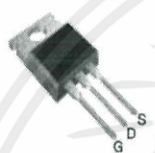
RoHS*
COMPLIANT

DESCRIPTION

Third generation Power MOSFETs from Vishay provide the designer with the best combination of fast switching, ruggedized device design, low on-resistance and cost-effectiveness.

The TO-220AB package is universally preferred for all commercial-industrial applications at power dissipation levels to approximately 50 W. The low thermal resistance and low package cost of the TO-220AB contribute to its wide acceptance throughout the industry.

TO-220AB



P-Channel MOSFET

ORDERING INFORMATION	
Package	TO-220AB
Lead (Pb)-free	IRF9540PbF SiHF9540-E3
SnPb	IRF9540 SiHF9540

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS ($T_C = 25$ °C, unless otherwise noted)					
PARAMETER		SYMBOL	LIMIT	UNIT	
Drain-Source Voltage		V_{DS}	- 100	V	
Gate-Source Voltage		V_{GS}	± 20		
Continuous Drain Current	V_{GS} at - 10 V	$T_C = 25$ °C	I_D	- 19	A
			$T_C = 100$ °C	- 13	
Pulsed Drain Current ^a		I_{DM}	- 72		
Linear Derating Factor			1.0	W/°C	
Single Pulse Avalanche Energy ^b		E_{AS}	640	mJ	
Repetitive Avalanche Current ^a		I_{AR}	- 19	A	
Repetitive Avalanche Energy ^a		E_{AR}	15	mJ	
Maximum Power Dissipation	$T_C = 25$ °C	P_D	150	W	
Peak Diode Recovery dV/dt ^c		dV/dt	- 5.5	V/ns	
Operating Junction and Storage Temperature Range		T_J, T_{stg}	- 55 to + 175	°C	
Soldering Recommendations (Peak Temperature)	for 10 s		300 ^d		
Mounting Torque	6-32 or M3 screw		10	lbf · in	
			1.1	N · m	

Notes

- Repetitive rating; pulse width limited by maximum junction temperature (see fig. 11).
- $V_{DS} = -25$ V, starting $T_J = 25$ °C, $L = 2.7$ mH, $R_{\theta} = 25$ Ω , $I_{AS} = -19$ A (see fig. 12).
- $I_{SD} \leq -19$ A, $dI/dt \leq 200$ A/ μ s, $V_{DS} \leq V_{DS}$, $T_J \leq 175$ °C.
- 1.6 mm from case.

* Pb containing terminations are not RoHS compliant, exemptions may apply

Document Number: 91078
S11-0512-Rev. B, 21-Mar-11

www.vishay.com

1

This datasheet is subject to change without notice.



THE PRODUCT DESCRIBED HEREIN AND THIS DATASHEET ARE SUBJECT TO SPECIFIC DISCLAIMERS, SET FORTH AT www.vishay.com/doc?91000

IRF9540, SiHF9540



Vishay Siliconix

THERMAL RESISTANCE RATINGS				
PARAMETER	SYMBOL	TYP.	MAX.	UNIT
Maximum Junction-to-Ambient	$R_{\theta JA}$	-	62	°C/W
Case-to-Sink, Flat, Greased Surface	$R_{\theta CS}$	0.50	-	
Maximum Junction-to-Case (Drain)	$R_{\theta JC}$	-	1.0	

SPECIFICATIONS ($T_J = 25^\circ\text{C}$, unless otherwise noted)						
PARAMETER	SYMBOL	TEST CONDITIONS	MIN.	TYP.	MAX.	UNIT
Static						
Drain-Source Breakdown Voltage	V_{DS}	$V_{GS} = 0\text{ V}, I_D = -250\ \mu\text{A}$	-100	-	-	V
V_{DS} Temperature Coefficient	$\Delta V_{DS}/T_J$	Reference to $25^\circ\text{C}, I_D = -1\text{ mA}$	-	-0.087	-	V/°C
Gate-Source Threshold Voltage	$V_{GS(th)}$	$V_{DS} = V_{GS}, I_D = -250\ \mu\text{A}$	-2.0	-	-4.0	V
Gate-Source Leakage	I_{GSS}	$V_{GS} = \pm 20\text{ V}$	-	-	± 100	nA
Zero Gate Voltage Drain Current	I_{DSS}	$V_{DS} = -100\text{ V}, V_{GS} = 0\text{ V}$	-	-	-100	μA
		$V_{DS} = -80\text{ V}, V_{GS} = 0\text{ V}, T_J = 150^\circ\text{C}$	-	-	-500	
Drain-Source On-State Resistance	$R_{DS(on)}$	$V_{GS} = -10\text{ V}, I_D = -11\text{ A}^b$	-	-	0.20	Ω
Forward Transconductance	g_{fs}	$V_{DS} = -50\text{ V}, I_D = -11\text{ A}^b$	6.2	-	-	S
Dynamic						
Input Capacitance	C_{iss}	$V_{GS} = 0\text{ V},$ $V_{DS} = -25\text{ V},$ $f = 1.0\text{ MHz, see fig. 5}$	-	1400	-	pF
Output Capacitance	C_{oss}		-	590	-	
Reverse Transfer Capacitance	C_{riss}		-	140	-	
Total Gate Charge	Q_g	$V_{GS} = -10\text{ V},$ $I_D = -19\text{ A}, V_{DS} = -80\text{ V},$ see fig. 6 and 13 ^b	-	-	61	nC
Gate-Source Charge	Q_{gs}		-	-	14	
Gate-Drain Charge	Q_{gd}		-	-	29	
Turn-On Delay Time	$t_{d(on)}$	$V_{DD} = -50\text{ V}, I_D = -19\text{ A},$ $R_{\theta} = 9.1\ \Omega, R_D = 2.4\ \Omega, \text{ see fig. 10}^b$	-	16	-	ns
Rise Time	t_r		-	73	-	
Turn-Off Delay Time	$t_{d(off)}$		-	34	-	
Fall Time	t_f		-	57	-	
Internal Drain Inductance	L_D	Between lead, 6 mm (0.25") from package and center of die contact 	-	4.5	-	nH
Internal Source Inductance	L_S		-	7.5	-	
Drain-Source Body Diode Characteristics						
Continuous Source-Drain Diode Current	I_S	MOSFET symbol showing the integral reverse p-n junction diode 	-	-	-19	A
Pulsed Diode Forward Current ^a	I_{SM}		-	-	-72	
Body Diode Voltage	V_{SD}	$T_J = 25^\circ\text{C}, I_S = -19\text{ A}, V_{GS} = 0\text{ V}^b$	-	-	-5.0	V
Body Diode Reverse Recovery Time	t_{rr}	$T_J = 25^\circ\text{C}, I_F = -19\text{ A}, dI/dt = 100\text{ A}/\mu\text{s}^b$	-	130	260	ns
Body Diode Reverse Recovery Charge	Q_{rr}		-	0.35	0.70	
Forward Turn-On Time	t_{on}	Intrinsic turn-on time is negligible (turn-on is dominated by L_S and L_D)				

Notes

- a. Repetitive rating; pulse width limited by maximum junction temperature (see fig. 11).
b. Pulse width $\leq 300\ \mu\text{s}$; duty cycle $\leq 2\%$.

www.vishay.com
2

Document Number: 91078
S11-0512-Rev. B, 21-Mar-11

This datasheet is subject to change without notice.
THE PRODUCT DESCRIBED HEREIN AND THIS DATASHEET ARE SUBJECT TO SPECIFIC DISCLAIMERS, SET FORTH AT www.vishay.com/doc291000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



IRF9540, SiHF9540

Vishay Siliconix

TYPICAL CHARACTERISTICS (25 °C, unless otherwise noted)

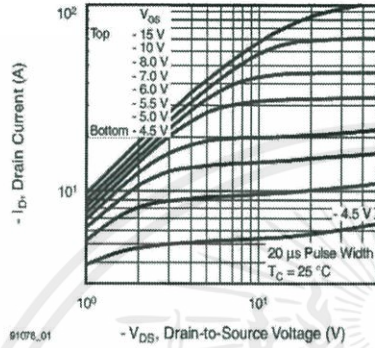


Fig. 1 - Typical Output Characteristics, $T_C = 25\text{ }^\circ\text{C}$

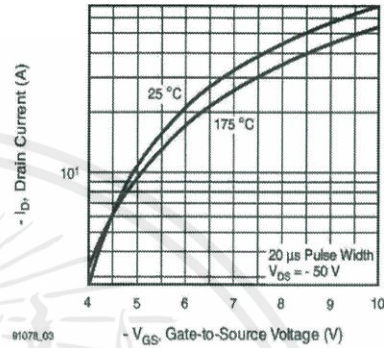


Fig. 3 - Typical Transfer Characteristics

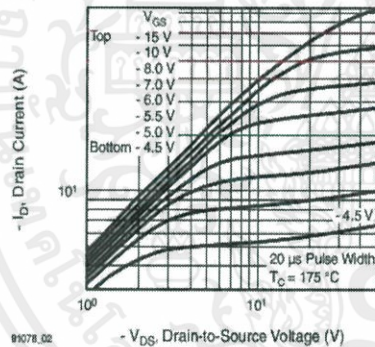


Fig. 2 - Typical Output Characteristics, $T_C = 175\text{ }^\circ\text{C}$

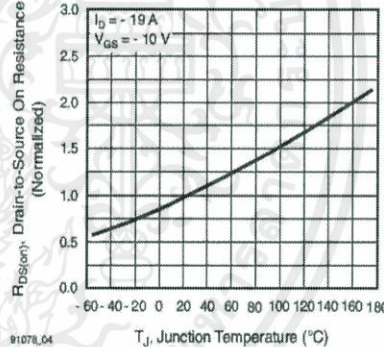
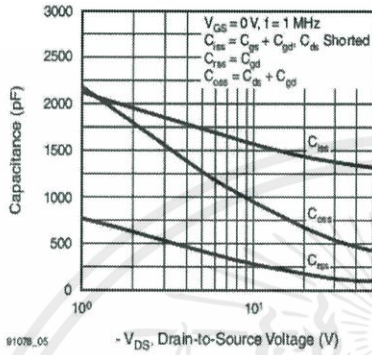


Fig. 4 - Normalized On-Resistance vs. Temperature

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

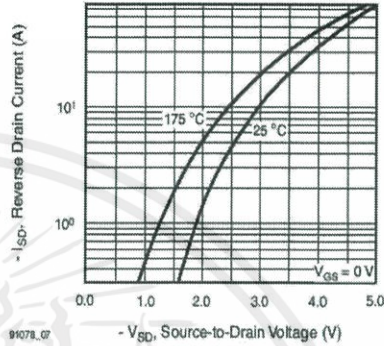
IRF9540, SiHF9540

Vishay Siliconix



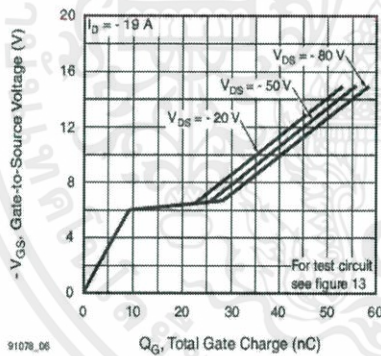
91078_05

Fig. 5 - Typical Capacitance vs. Drain-to-Source Voltage



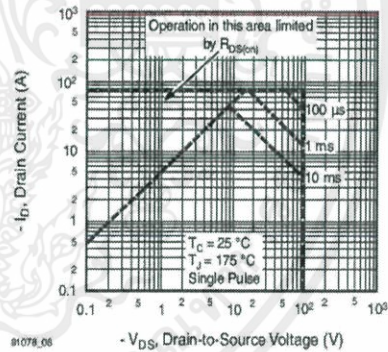
91078_07

Fig. 7 - Typical Source-Drain Diode Forward Voltage



91078_06

Fig. 6 - Typical Gate Charge vs. Gate-to-Source Voltage



91078_08

Fig. 8 - Maximum Safe Operating Area

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



IRF9540, SiHF9540

Vishay Siliconix

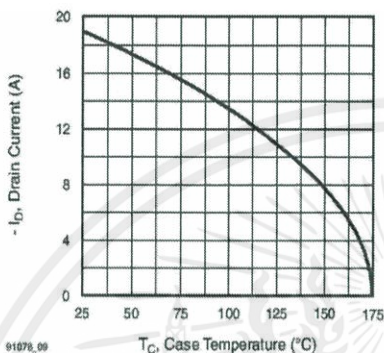


Fig. 9 - Maximum Drain Current vs. Case Temperature

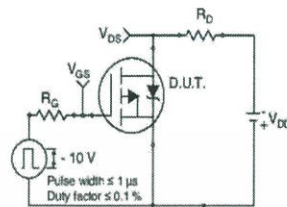


Fig. 10a - Switching Time Test Circuit

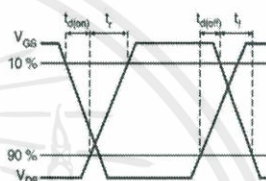


Fig. 10b - Switching Time Waveforms

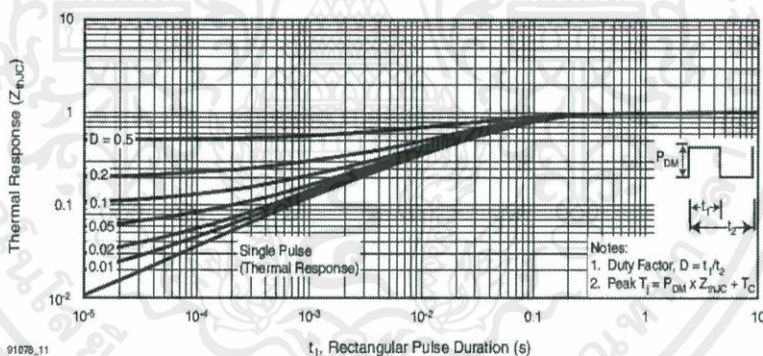


Fig. 11 - Maximum Effective Transient Thermal Impedance, Junction-to-Case

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IRF9540, SiHF9540

Vishay Siliconix

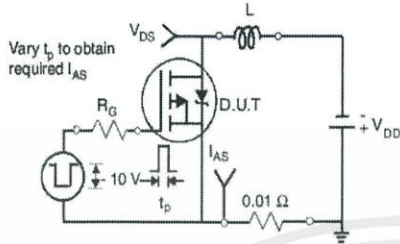


Fig. 12a - Unclamped Inductive Test Circuit

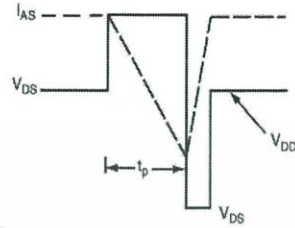


Fig. 12b - Unclamped Inductive Waveforms

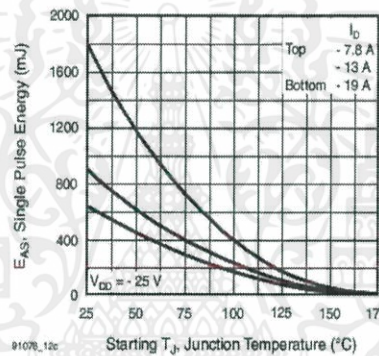


Fig. 12c - Maximum Avalanche Energy vs. Drain Current

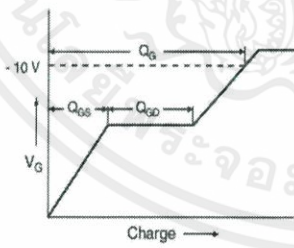


Fig. 13a - Basic Gate Charge Waveform

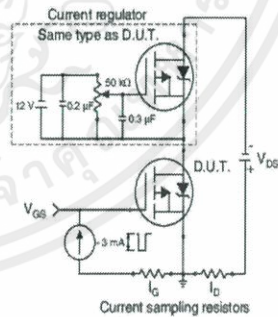
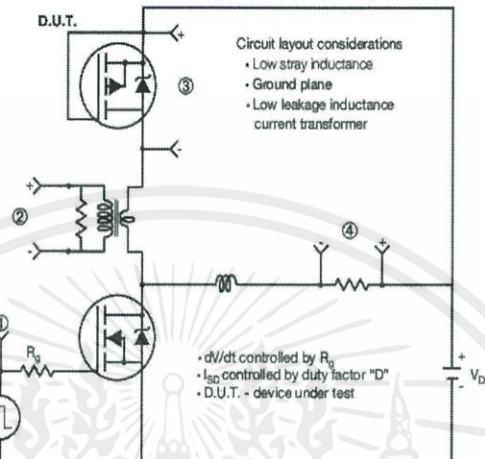


Fig. 13b - Gate Charge Test Circuit

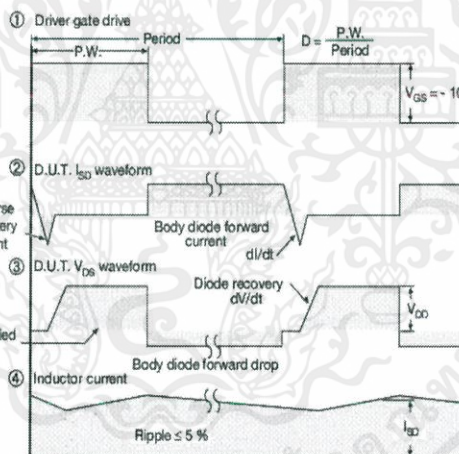
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


IRF9540, SiHF9540

Vishay Siliconix

Peak Diode Recovery dV/dt Test Circuit


Note
• Complement N-Channel of D.U.T. for driver



Note
a. $V_{GS} = -5 V$ for logic level and $-3 V$ drive devices

Fig. 14 - For P-Channel

Vishay Siliconix maintains worldwide manufacturing capability. Products may be manufactured at one of several qualified locations. Reliability data for Silicon Technology and Package Reliability represent a composite of all qualified locations. For related documents such as package/tape drawings, part marking, and reliability data, see www.vishay.com/ppg91078.

Document Number: 91078
S11-0512-Rev. B, 21-Mar-11

www.vishay.com

7

This datasheet is subject to change without notice.

THE PRODUCT DESCRIBED HEREIN AND THIS DATASHEET ARE SUBJECT TO SPECIFIC DISCLAIMERS, SET FORTH AT www.vishay.com/doc?91000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

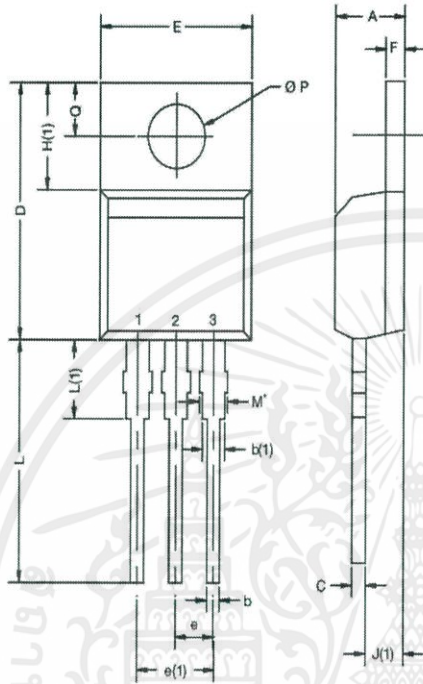


www.vishay.com

Package Information

Vishay Siliconix

TO-220-1



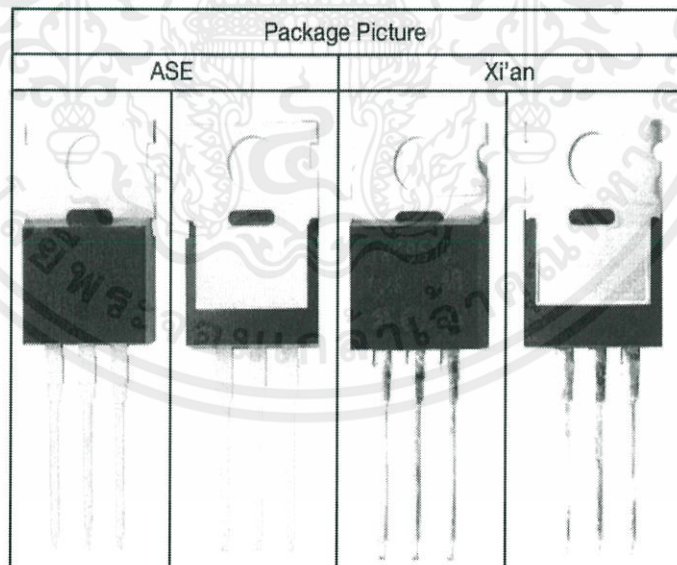
DIM.	MILLIMETERS		INCHES	
	MIN.	MAX.	MIN.	MAX.
A	4.24	4.65	0.167	0.183
b	0.69	1.02	0.027	0.040
b(1)	1.14	1.78	0.045	0.070
c	0.36	0.61	0.014	0.024
D	14.33	15.85	0.564	0.624
E	9.96	10.52	0.392	0.414
e	2.41	2.67	0.095	0.105
e(1)	4.88	5.28	0.192	0.208
F	1.14	1.40	0.045	0.055
H(1)	6.10	6.71	0.240	0.264
J(1)	2.41	2.92	0.095	0.115
L	13.36	14.40	0.526	0.567
L(1)	3.33	4.04	0.131	0.159
Ø P	3.53	3.94	0.139	0.155
Q	2.54	3.00	0.100	0.118

ECN: X15-0364-Rev. C, 14-Dec-15
DWG: 6031

Note

- M* = 0.052 inches to 0.064 inches (dimension including protrusion), heatsink hole for HVM

Package Picture



Revision: 14-Dec-15

1

Document Number: 66542

For technical questions, contact: hvm@vishay.com

THIS DOCUMENT IS SUBJECT TO CHANGE WITHOUT NOTICE. THE PRODUCTS DESCRIBED HEREIN AND THIS DOCUMENT ARE SUBJECT TO SPECIFIC DISCLAIMERS, SET FORTH AT www.vishay.com/doc791000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



www.vishay.com

Legal Disclaimer Notice

Vishay

Disclaimer

ALL PRODUCT, PRODUCT SPECIFICATIONS AND DATA ARE SUBJECT TO CHANGE WITHOUT NOTICE TO IMPROVE RELIABILITY, FUNCTION OR DESIGN OR OTHERWISE.

Vishay Intertechnology, Inc., its affiliates, agents, and employees, and all persons acting on its or their behalf (collectively, "Vishay"), disclaim any and all liability for any errors, inaccuracies or incompleteness contained in any datasheet or in any other disclosure relating to any product.

Vishay makes no warranty, representation or guarantee regarding the suitability of the products for any particular purpose or the continuing production of any product. To the maximum extent permitted by applicable law, Vishay disclaims (i) any and all liability arising out of the application or use of any product, (ii) any and all liability, including without limitation special, consequential or incidental damages, and (iii) any and all implied warranties, including warranties of fitness for particular purpose, non-infringement and merchantability.

Statements regarding the suitability of products for certain types of applications are based on Vishay's knowledge of typical requirements that are often placed on Vishay products in generic applications. Such statements are not binding statements about the suitability of products for a particular application. It is the customer's responsibility to validate that a particular product with the properties described in the product specification is suitable for use in a particular application. Parameters provided in datasheets and / or specifications may vary in different applications and performance may vary over time. All operating parameters, including typical parameters, must be validated for each customer application by the customer's technical experts. Product specifications do not expand or otherwise modify Vishay's terms and conditions of purchase, including but not limited to the warranty expressed therein.

Except as expressly indicated in writing, Vishay products are not designed for use in medical, life-saving, or life-sustaining applications or for any other application in which the failure of the Vishay product could result in personal injury or death. Customers using or selling Vishay products not expressly indicated for use in such applications do so at their own risk. Please contact authorized Vishay personnel to obtain written terms and conditions regarding products designed for such applications.

No license, express or implied, by estoppel or otherwise, to any intellectual property rights is granted by this document or by any conduct of Vishay. Product names and markings noted herein may be trademarks of their respective owners.

© 2017 VISHAY INTERTECHNOLOGY, INC. ALL RIGHTS RESERVED

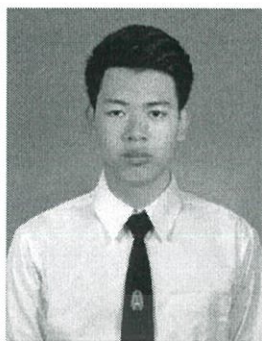
Revision: 08-Feb-17

1

Document Number: 91000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน



นายวิทักดี จันทอร

เกิดวันที่ 14 ธันวาคม 2539 ภูมิลำเนา จังหวัดราชบุรี

ศึกษาระดับมัธยมศึกษา โรงเรียน ภ.ป.ร.ราชวิทยาลัย ในพระบรมราชูปถัมภ์

ศึกษาระดับปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



นายนำน้ำ นิลนิมิตร

เกิดวันที่ 8 ตุลาคม 2539 ภูมิลำเนา จังหวัดสมุทรปราการ

ศึกษาระดับมัธยมศึกษา โรงเรียน ลาซาลกรุงเทพ

ศึกษาระดับปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



นางสาวอรณัน อันวรรณา

เกิดวันที่ 23 เมษายน 2540 ภูมิลำเนา จังหวัดแพร่

ศึกษาระดับมัธยมศึกษา โรงเรียน นารีรัตน์จังหวัดแพร่

ศึกษาระดับปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



นางสาวอนรรชวี มณี

เกิดวันที่ 19 กรกฎาคม 2540 ภูมิลำเนา จังหวัดเชียงราย

ศึกษาระดับมัธยมศึกษา โรงเรียน สามัคคีวิทยาคม

ศึกษาระดับปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้