

การชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนเพื่อแก้ปัญหาแรงดันไฟฟ้าในโซลาร์ฟาร์มตาม  
มาตรฐาน IEC-61850

REACTIVE POWER COMPENSATION FOR SOLVING VOLTAGE PROBLEMS IN  
PV FARM BASED UPON IEC-61850



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2562

KMITL-2019-EN-M-020-042

การชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนเพื่อแก้ปัญหาแรงดันไฟฟ้าในโซลาร์ฟาร์มตาม  
มาตรฐาน IEC-61850

REACTIVE POWER COMPENSATION FOR SOLVING VOLTAGE PROBLEMS IN  
PV FARM BASED UPON IEC-61850



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2562

KMITL-2019-EN-M-020-042

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

REACTIVE POWER COMPENSATION FOR SOLVING VOLTAGE PROBLEMS IN  
PV FARM BASED UPON IEC-61850



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

2019

KMITL-2019-EN-M-020-042

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPYRIGHT 2019**

**FACULTY OF ENGINEERING**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนเพื่อแก้ปัญหาแรงดันไฟฟ้าในโซลาร์ฟาร์มตามมาตรฐาน IEC-61850
ชื่อนักศึกษา	นายสันติชัย อู่อรุณ
รหัสประจำตัว	58601154
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2562
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.สุรินทร์ คำฝอย

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนเพื่อแก้ปัญหาแรงดันไฟฟ้าในโซลาร์ฟาร์มตามมาตรฐาน IEC-61850 เพื่อหาวิธีการควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ที่เหมาะสมกับการนำมาใช้ร่วมกับสถานีไฟฟ้าในอนาคต โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการทดสอบการสื่อสารแบบไร้สายระหว่างสถานีไฟฟ้ากับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งได้เปรียบเทียบความเร็วในการสื่อสารระหว่างแบบใช้สายสัญญาณและไม่ใช้สายสัญญาณ และการทดลองควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ระหว่างการควบคุมแบบระบบเปิดที่ใช้การศึกษาคุณลักษณะของระบบ แล้วนำมาวิเคราะห์หาสมการควบคุมกับการควบคุมแบบระบบปิดที่ใช้ระบบการควบคุมแบบป้อนกลับของสัญญาณขาออกเพื่อเปรียบเทียบข้อดีข้อด้อยของทั้งสองระบบ เพื่อนำไปสู่การใช้งานจริงในอนาคต จากการศึกษาครั้งนี้สามารถนำไปเป็นแนวทางการออกแบบระบบไฟฟ้าอัจฉริยะที่มีการสื่อสารระหว่างสถานีไฟฟ้าอัจฉริยะกับระบบผลิตพลังงานแสงอาทิตย์ในเรื่องการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนที่

จะต้องสัมพันธ์กัน

Thesis Title	Reactive Power Compensation for Solving Voltage Problems in PV Farm based upon IEC-61850
Student	Mr. Suntichai Uaroon
Student ID.	58601154
Degree	Master of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2019
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr.Surin Khomfoi

### ABSTRACT

Reactive power compensation for solving voltage problems in PV farm based upon IEC-61850 is presented in this thesis in order to find suitable reactive power compensation method in grid system. This would be a part of substation in the future. This thesis presents wireless connection between solar system and substation compare with LAN connection. The speed of wireless connection and LAN connection is show in this thesis. After that reactive power compensation is shown in the experiment. The experiment compares open loop control and closed loop with feedback control of reactive power compensation of solar inverter in order to analyze advantage and disadvantage in controlling reactive power. The result of this study can be used to design function of reactive power compensation for solving voltage problems of grid system and to improve operation in substation

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เรื่องการชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนเพื่อแก้ปัญหาแรงดันไฟฟ้าในโซลาร์ฟาร์มตามมาตรฐาน IEC-61850สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีด้วยการสนับสนุนในด้านต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นด้านความรู้ทางด้านวิชาการ ด้านเทคนิคการดำเนินงาน รวมถึงคำแนะนำต่างๆ ทางผู้จัดทำจึงขอขอบพระคุณในความอนุเคราะห์ที่ได้รับเหล่านี้

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.สุรินทร์ คำฝอย ผู้ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาของวิทยานิพนธ์นี้ ที่ช่วยประสิทธิ์ประสาทความรู้ทางด้านวิชาการ ดูแลเอาใจใส่ตลอดจนให้คำแนะนำในการดำเนินงาน ทำให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

ท้ายสุดนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดา ที่ได้อุปการะเลี้ยงดูอบรมสั่งสอนตลอดจนให้การสนับสนุนและเต็มกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้จนสำเร็จได้ด้วยดี คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ คณะผู้จัดทำขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน และหวังเป็นอย่างยิ่งว่า วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์แก่ผู้ที่ได้ทำการศึกษาเพื่อที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในงานวิจัยในด้านต่างๆ ได้ต่อไป

สันติชัย อุ่อรุณ

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	I
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	II
กิตติกรรมประกาศ .....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย .....	4
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	4
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย.....	5
1.5 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์.....	5
1.6 แผนการดำเนินการวิจัย.....	6
บทที่ 2 ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ .....	7
2.1 บทนำ.....	7
2.2 การผลิตไฟฟ้าของพลังงานแสงอาทิตย์.....	7
2.3 ปัญหาที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าเมื่อมีการเชื่อมระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ .....	9
2.4 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์.....	12
2.5 ชนิดของเซลล์แสงอาทิตย์.....	14
2.6 ประโยชน์ของการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ .....	18
2.7 อุปกรณ์สำคัญของระบบการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ .....	19
2.8 การประยุกต์ใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์.....	20
2.9 ตัวแปรต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์.....	22
2.10 ระบบการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ .....	23
2.11 โซลาร์อินเวอร์เตอร์.....	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษา IV นั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.12 แนวทางการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์.....	26
2.13 บทสรุป .....	27
<b>บทที่ 3 สถานีไฟฟ้าอัจฉริยะ.....</b>	<b>28</b>
3.1 บทนำ .....	28
3.2 สถานีไฟฟ้าอัจฉริยะ .....	28
3.3 โครงสร้างของระบบสถานีไฟฟ้าอัจฉริยะ .....	30
3.4 ประโยชน์ของระบบสถานีไฟฟ้าอัจฉริยะ .....	30
3.5 มาตรฐาน IEC 61850 .....	31
3.6 การสื่อสารแบบอนุกรม .....	34
3.7 การแก้ปัญหาระดับแรงดันเกินและแรงดันตกด้วยระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์....	36
3.8 บทสรุป.....	38
<b>บทที่ 4 การออกแบบการทดลอง .....</b>	<b>39</b>
4.1 บทนำ .....	39
4.2 ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ในการทดลอง .....	39
4.3 การสื่อสารระหว่างระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์กับสถานีไฟฟ้า .....	41
4.4 ระบบควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ .....	47
4.5 บทสรุป.....	49
<b>บทที่ 5 ผลการทดสอบแบตเตอรี่ .....</b>	<b>50</b>
5.1 บทนำ .....	50
5.2 การทดสอบการสื่อสารแบบไร้สายระหว่างสถานีไฟฟ้ากับระบบผลิตไฟฟ้า ด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ .....	50

5.3 การทดสอบการควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนของระบบผลิตไฟฟ้า ด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ .....	52
5.4 การทดสอบการควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนของระบบผลิตไฟฟ้า ด้วยพลังงานแสงอาทิตย์เทียบกับข้อมูลในสถานีไฟฟ้า.....	59
5.6 บทสรุป.....	60
บทที่ 6 บทสรุป ข้อเสนอแนะ และแนวทางการพัฒนา.....	61
6.1 บทสรุป.....	61
6.2 ข้อเสนอแนะและข้อควรระวัง .....	61
6.3 แนวทางการพัฒนา.....	62
เอกสารอ้างอิง .....	63
ภาคผนวก ก ตารางบันทึกผลการทดลอง.....	64
ภาคผนวก ข ผลงานทางวิชาการ.....	68
ประวัติผู้เขียน.....	74

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แผนการดำเนินการวิจัย.....	6
2.2 ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดต่างๆ.....	18
2.3 การใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์.....	20



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษา VII นั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 พลังงานหมุนเวียนในระบบโครงข่ายไฟฟ้า .....	2
1.2 ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์.....	3
2.1 การทำงานทั่วไปของเซลล์แสงอาทิตย์ .....	8
2.2 กำลังการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์และลักษณะโพลตรายวันต่อครัวเรือน .....	10
2.3 ระดับแรงดันของระบบเมื่อก่อนและหลังมีระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์.....	11
2.4 ส่วนประกอบของเซลล์แสงอาทิตย์ .....	12
2.5 โครงสร้างภายในเซลล์แสงอาทิตย์ .....	13
2.6 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยว .....	15
2.7 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกรวม .....	16
2.8 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน .....	16
2.9 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดคอปเปอร์อินเดียม .....	17
2.10 ระบบผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ.....	24
2.11 ระบบผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่อกับระบบจำหน่าย.....	24
2.12 ระบบผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบผสมผสาน .....	25
2.13 กราฟกำลังการผลิตไฟฟ้าต่อวันของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์.....	26
3.1 แผนผังการบริการ ACSI .....	32
3.2 ฟังก์ชันของการบริการ ACSI .....	34
3.3 การเชื่อมต่ออุปกรณ์สื่อสาร RS-232 .....	36
3.4 การเชื่อมต่ออุปกรณ์สื่อสาร RS-485 .....	36
4.1 ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ในการทดลอง .....	40
4.2 โซลาร์อินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการทดลอง .....	40
4.3 รายละเอียดคุณลักษณะของโซลาร์อินเวอร์เตอร์ .....	41
4.4 ตำแหน่งของการติดตั้ง POWER METER .....	42
4.5 ค่าทางไฟฟ้าที่จะมีการแสดงผลผ่านโปรแกรม .....	42
4.6 GATEWAY ของระบบ 22KV วงจรที่ 1.....	43
4.7 การสื่อสารระหว่างสถานีไฟฟ้าและระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์.....	44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษา VIII นั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.8 การสื่อสารระหว่างสถานีไฟฟ้าบับใหญ่และระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์.....	44
4.9 ไดอะแกรมการสื่อสารระหว่างโซลาร์อินเวอร์เตอร์และสถานีไฟฟ้า.....	45
4.10 ค่าทางไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าวงจรที่ 1 ที่ตั้งได้จาก GATEWAY .....	46
4.11 หน้าจอแสดงผลของระบบที่เขียนโปรแกรมขึ้นมา.....	46
4.12 ไดอะแกรมอุปกรณ์ภายในโซลาร์อินเวอร์เตอร์.....	47
4.13 ไดอะแกรมการสื่อสารระหว่าง PLC กับโซลาร์อินเวอร์เตอร์.....	48
4.14 ไดอะแกรมการสื่อสารระหว่าง PLC กับ โซลาร์อินเวอร์เตอร์.....	49
5.1 ข้อมูลความล่าช้าของการสื่อสารแบบมีสายสัญญาณ.....	50
5.2 ข้อมูลความล่าช้าของการสื่อสารแบบไร้สายสัญญาณ.....	51
5.3 โปรแกรมการแสดงผลของระบบไฟฟ้าในสถานีไฟฟ้า.....	51
5.4 ไดอะแกรมการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนของโซลาร์อินเวอร์เตอร์.....	52
5.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าเสมือนที่ถูกจ่ายกับเปอร์เซ็นต์การจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือน ...	53
5.6 ไดอะแกรมการควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนของโซลาร์อินเวอร์เตอร์.....	53
5.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนกับกำลังไฟฟ้าเสมือนที่ถูกจ่าย .	54
5.8 กราฟสมการเส้นตรงที่ได้จากการประมาณการจากข้อมูล .....	54
5.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าเสมือนอ้างอิงกับกำลังไฟฟ้าเสมือนที่จ่ายจริงที่ใช้การควบคุมโดยใช้สมการเส้นตรง .....	55
5.10 กราฟสมการกำลังสองที่ได้จากการประมาณการจากข้อมูล .....	56
5.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าเสมือนอ้างอิงกับกำลังไฟฟ้าเสมือนที่จ่ายจริงที่ใช้การควบคุมโดยใช้สมการกำลังสอง.....	57
5.12 ไดอะแกรมการควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนของโซลาร์อินเวอร์เตอร์ชนิดระบบปิด.....	57
5.13 ค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุม PID.....	58
5.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าเสมือนอ้างอิงกับกำลังไฟฟ้าเสมือนที่จ่ายจริงที่ใช้การควบคุมแบบ PID.....	58
5.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลกำลังไฟฟ้าเสมือนจากสถานีไฟฟ้ากับกำลังไฟฟ้าเสมือนที่จ่ายจริง.....	59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษา IX นั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันพลังงานเข้ามามีความสำคัญในการดำเนินชีวิตประจำวันของคนทั่วไปและมีส่วนสำคัญในการขับเคลื่อนระบบเศรษฐกิจของประเทศ การขยายตัวของประชากร การเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจ และอุตสาหกรรมเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้ความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มปริมาณมากขึ้น และในอนาคตปัญหาของการขาดแคลนพลังงานมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ทางกระทรวงพลังงานจึงได้มีการวางแผนอนุรักษ์พลังงานขึ้นเพื่อรองรับปัญหาการขาดแคลนพลังงานที่กำลังจะเกิดขึ้นในอนาคต จึงเป็นเหตุจำเป็นที่ทำให้ต้องมองหาพลังงานทางเลือกชนิดอื่นที่ไม่ใช่พลังงานที่ผลิตมาจากเชื้อเพลิงฟอสซิล เนื่องจากการผลิตไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงฟอสซิล เช่น น้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ และถ่านหิน เป็นเชื้อเพลิงใช้แล้วหมดไปและยังก่อให้เกิดมลพิษอีกด้วย ความนิยมในพลังงานหมุนเวียนจากทั่วโลกมีเพิ่มมากขึ้น ทำให้ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งเป็นพลังงานหมุนเวียนที่สะอาดได้รับความนิยมนับเป็นอย่างมาก ในการผลิตไฟฟ้าเพื่อให้เพียงพอต่อความต้องการใช้ไฟฟ้าในระบบ ข้อดีของพลังงานแสงอาทิตย์คือเป็นแหล่งพลังงานที่ได้จากธรรมชาติไม่มีวันหมดและ เป็นแหล่งพลังงานที่สะอาด ไม่มีการเผาไหม้ในกระบวนการผลิต จึงไม่ก่อให้เกิดมลภาวะด้านอากาศและน้ำแก่สิ่งแวดล้อม ในปัจจุบันมีแนวโน้มของต้นทุนในการติดตั้งรวมถึงราคาของอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์มีราคาลดต่ำลงอย่างต่อเนื่อง เพื่อเป็นการส่งเสริมการลงทุนในระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ควบคู่กับการสนับสนุนเชิงนโยบายจากรัฐบาล ในการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ให้มีปริมาณที่เพิ่มขึ้น โดยระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ได้จ่ายไฟฟ้าเข้าระบบเชิงพาณิชย์แล้ว (Commercial Operation Date: COD) กว่า 200 โรง (ข้อมูลเมื่อปี พ.ศ. 2558)

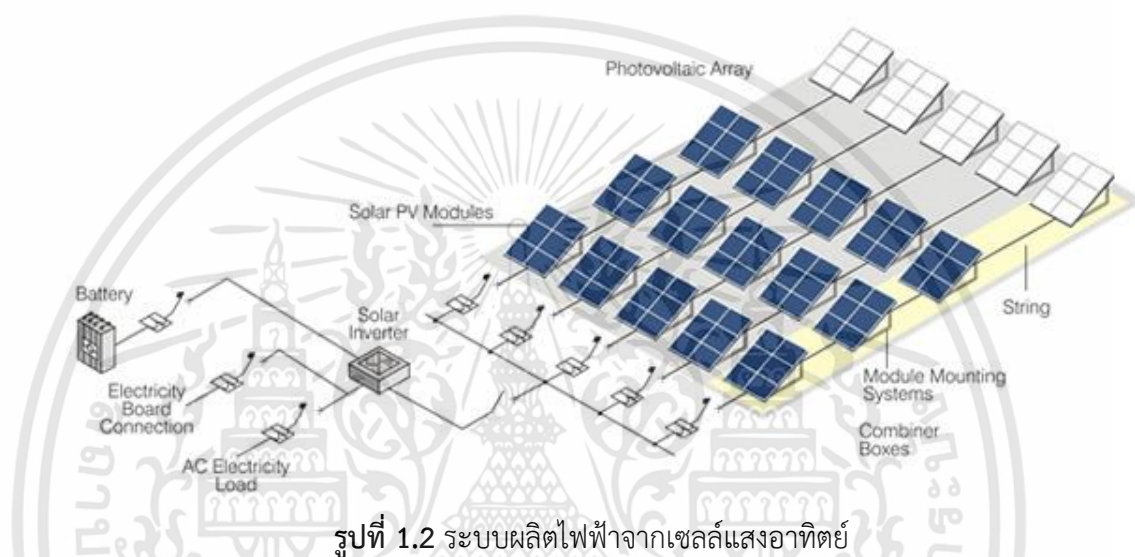


รูปที่ 1.1 พลังงานหมุนเวียนในระบบโครงข่ายไฟฟ้า

เนื่องจากระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่เชื่อมต่อเข้ากับระบบโครงข่ายไฟฟ้ามีมากขึ้น แต่การจัดการและการควบคุมการจ่ายไฟฟ้าเข้าสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ยังใช้ประโยชน์จากโรงไฟฟ้าที่มีอินเวอร์เตอร์เป็นส่วนควบคุมการจ่ายไฟฟ้าทำได้ไม่เต็มที่นัก โดยการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบันจะมีเพียงข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้าซึ่งมีการกำหนดค่าต่างๆ เช่น แรงดันไฟฟ้า ความถี่ไฟฟ้า และตัวประกอบกำลังไฟฟ้า ไว้เป็นช่วงให้ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทำงานได้อย่างอิสระภายใต้ข้อกำหนดนั้น นอกจากนี้ปัญหาที่พบเมื่อมีการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เข้าสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้า คือปัญหาแรงดันไฟฟ้าที่มีค่าอยู่นอกช่วงตามข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้าที่มีสาเหตุหลักจาก 2 ประการ ได้แก่ (1) สาเหตุที่เกิดจากระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เอง โดยระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์อาจจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงเข้าสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้าจนทำให้แรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้า ณ ตำแหน่งต่างๆ ยกเว้นจุดเชื่อมต่อ (Point of Common Coupling: PCC) มีค่าเกินร้อยละ 105 ของระดับแรงดันไฟฟ้าปกติ ซึ่งจากข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้าจะพบว่าไม่มีการกำหนดให้ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ต้องช่วยเหลือแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้าและทำให้ศูนย์ควบคุมการจ่ายไฟฟ้าต้องรับภาระในการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้า (2) สาเหตุที่เกิดจากระบบโครงข่ายไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงอย่างรุนแรง เช่น การเกิดอุบัติเหตุทำให้สายส่งชำรุด การซ่อมบำรุงระบบโครงข่ายไฟฟ้า การเพิ่มขึ้นของโหลดขนาดใหญ่ ซึ่งเป็นเหตุการณ์ที่ส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ทำให้ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่จำเป็นต้องเชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้าขณะที่แรงดันไฟฟ้า ณ จุดเชื่อมต่อมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 95 ถึง 105 ของแรงดันไฟฟ้าปกติไม่สามารถเชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้า ทำให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต้องมีการจ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้าเสมือนเพื่อเพิ่มหรือลดแรงดันไฟฟ้า โดยการจ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้าเสมือนนี้อาจส่งผลกระทบต่อการผลิตกำลังไฟฟ้าจริงของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แล้ว อีกทั้งยังส่งผลต่อเนื่องถึงการคิดค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่เป็นทั้งผู้ขายไฟฟ้าและผู้ใช้ไฟฟ้าต้องจ่ายให้การไฟฟ้าในกรณีที่มีค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนเกินกว่าที่กำหนด



รูปที่ 1.2 ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

งานวิจัยนี้นำเสนอการศึกษาการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์กับระบบโครงข่ายไฟฟ้า ปัญหาที่เกิดขึ้นเมื่อมีการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เข้าสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้า คือปัญหาแรงดันไฟฟ้าที่ไม่อยู่ในระดับแรงดันไฟฟ้าปกติ ซึ่งการแปรเปลี่ยนของขนาดแรงดันไฟฟ้าอาจทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าตกหรือแรงดันไฟฟ้าเกิน โดยแรงดันไฟฟ้าเปลี่ยนค่ากะทันหันในระบบโครงข่ายไฟฟ้าเนื่องจากการเกิดแรงดันไฟฟ้าตกและแรงดันไฟฟ้าเกินในระบบโครงข่ายไฟฟ้าจะทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้าในระบบทำงานผิดพลาดและอาจทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าเสียหายได้ จึงจำเป็นต้องควบคุมการจ่ายไฟฟ้าเพื่อรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าด้วยการจ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้าเสมือนเพื่อเพิ่มหรือลดแรงดันไฟฟ้า งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์รวมถึงหาวิธีการป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับอุปกรณ์ภายในระบบโครงข่ายไฟฟ้า

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ชดเชยค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนของระบบไฟฟ้า
2. เพื่อศึกษาหารูปแบบการควบคุมการจ่ายค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนของ Solar Inverter
3. เพื่อศึกษารูปแบบการสื่อสารตามมาตรฐาน IEC 61850 ของสถานีไฟฟ้าอัจฉริยะ

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาการชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนในสถานีไฟฟ้าบัวใหญ่ อ.บัวใหญ่ จ.นครราชสีมา ด้วยระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ที่รับค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนอ้างอิงมาจ่ายข้อมูล ณ สถานีไฟฟ้าที่ระดับแรงดัน 22kV, Feeder ที่ 1 ของระบบจำหน่าย

## 1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

1. ทำให้เกิดองค์ความรู้เกี่ยวกับการควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนในระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์
2. เพื่อนำองค์ความรู้เกี่ยวกับการควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนในระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ ไปพัฒนาต่อยอดในการออกแบบระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ที่จะเกิดขึ้นต่อไป
3. ทำให้เกิดองค์ความรู้เกี่ยวกับการสื่อสารของอุปกรณ์ไฟฟ้าในสถานีไฟฟ้ากับระบบไฟฟ้าอื่นๆ

## 1.5 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์

บทที่ 1 บทนำ กล่าวถึง ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของงานวิจัย ขอบเขตของงานวิจัย ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย โครงสร้างของวิทยานิพนธ์ และแผนการดำเนินการวิจัย

บทที่ 2 ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ กล่าวถึง การผลิตไฟฟ้าของพลังงานแสงอาทิตย์ หลักการทำงานทั่วไปของเซลล์แสงอาทิตย์ ประโยชน์ของการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ อุปกรณ์สำคัญของระบบการผลิตกระแสไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิดของเซลล์แสงอาทิตย์ และอินเวอร์เตอร์โซลาร์เซลล์

บทที่ 3 สถานีไฟฟ้าอัจฉริยะ กล่าวถึง ระบบภายในสถานีไฟฟ้าอัจฉริยะ โครงสร้างของสถานีไฟฟ้าอัจฉริยะ มาตรฐาน IEC61850 และการสื่อสารแบบอนุกรม

บทที่ 4 กล่าวถึง การออกแบบการทดลอง ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ การสื่อสารระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์กับสถานีไฟฟ้า และระบบควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์

บทที่ 5 ผลการทดสอบแบตเตอรี่ กล่าวถึง การทดสอบการสื่อสารแบบไร้สายระหว่างสถานีไฟฟ้ากับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ การทดสอบการควบคุมการจ่ายกำลังเสมือนของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ การทดสอบการควบคุมการจ่ายกำลังเสมือนของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์เทียบกับข้อมูลในสถานีไฟฟ้า

บทที่ 6 กล่าวถึงบทสรุปของงานวิจัย ข้อเสนอแนะ และแนวทางการพัฒนา



## 1.6 แผนการดำเนินการวิจัย

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินการวิจัย

การดำเนินงาน	เดือนที่												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1. ศึกษาข้อมูล ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์	■	■											
2. ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับสถานีไฟฟ้าอัจฉริยะ		■	■										
3. ศึกษาการใช้ระบบควบคุมกับโซลาร์อินเวอร์เตอร์		■	■										
4. ติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ในสถานีไฟฟ้า				■	■								
5. ติดตั้งระบบควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือนให้กับโซลาร์อินเวอร์เตอร์					■	■							
6. ทดสอบระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์							■	■					
7. ทดสอบการควบคุมการจ่ายกำลังเสมือนของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์							■	■					
8. เก็บผลการทดลองกำลังเสมือนของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์เทียบกับข้อมูลในสถานีไฟฟ้า									■	■			
8. สรุปผลงานวิจัย										■	■		
9. จัดทำรูปเล่มปริญาานิพนธ์													■

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

### 2.1 บทนำ

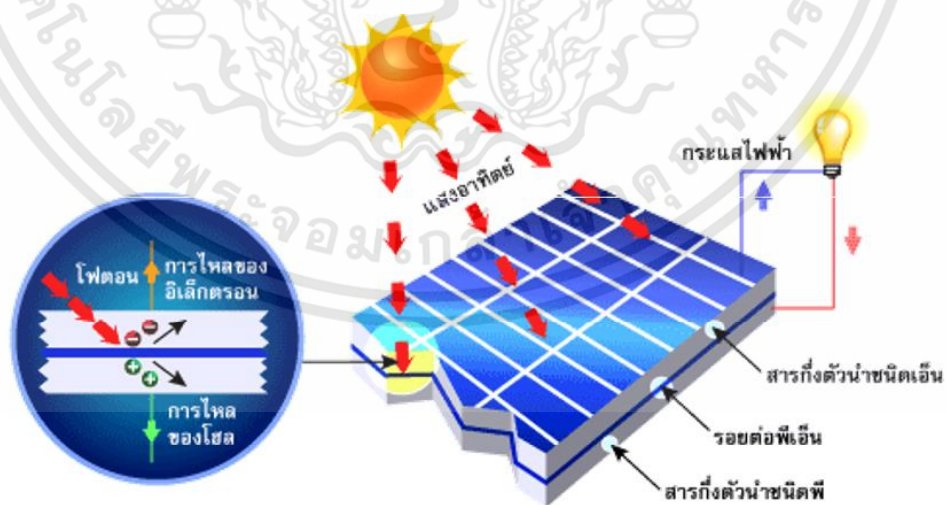
ปัจจุบันระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์มีความนิยมติดตั้งกันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากหลายปัจจัย เช่น การคุ้มค่าด้านการลงทุน การดูแลรักษาง่าย การใช้พลังงานแสงอาทิตย์ซึ่งเป็นพลังงานสะอาด แต่หากมองในมุมมองของผู้จำหน่ายไฟฟ้าแล้วนั้น แนนอนว่ากำลังการผลิตไฟฟ้าที่มากขึ้นในระบบไฟฟ้าส่งผลให้การควบคุมระบบไฟฟ้านั้นทำได้ยากและมีความซับซ้อนขึ้น ส่งผลให้เกิดปัญหาต่างๆ ตามมาในระบบไฟฟ้า บทนี้จะเป็นการศึกษาถึงการบวนการผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ ประโยชน์ของการผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ อุปกรณ์สำคัญที่ใช้ในระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ ปัญหาที่เกิดในระบบไฟฟ้าเมื่อมีการเชื่อมระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ และการสูญเสียโอกาสในการผลิตไฟฟ้าเมื่อมีการปลดออกจากระบบของโซลาร์อินเวอร์เตอร์ เพื่อนำข้อมูลดังกล่าวเป็นแนวทางในการออกแบบระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ที่จะเกิดขึ้นในอนาคต

### 2.2 การผลิตไฟฟ้าของพลังงานแสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์ หรือโซลาร์เซลล์ (Solar Cell) เป็นสิ่งประดิษฐ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง เซลล์แสงอาทิตย์ทำมาจากสารกึ่งตัวนำ เช่น ซิลิคอน (Silicon), แกลเลียม อาร์เซไนด์ (Gallium Arsenide), อินเดียม ฟอสไฟด์ (Indium Phosphide), แคดเมียม เทลเลอไรด์ (Cadmium Telluride) และคอปเปอร์ อินเดียม ไดเซเลไนด์ (Copper Indium Diselenide) เป็นต้น เมื่อได้รับแสงอาทิตย์โดยตรงก็จะเปลี่ยนเป็นพาหะนำไฟฟ้า และจะถูกแยกเป็นประจุไฟฟ้าบวกและลบเพื่อให้เกิดแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วทั้งสองของเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อนำขั้วไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ต่อเข้ากับอุปกรณ์ไฟฟ้ากระแสตรง กระแสไฟฟ้าจะไหลเข้าสู่อุปกรณ์เหล่านั้น ทำให้สามารถทำงานได้

เซลล์แสงอาทิตย์ เป็นอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าที่ไม่ต้องใช้เชื้อเพลิงอื่นใดนอกจากแสงอาทิตย์ ซึ่งเป็นพลังงานที่ได้เปล่า ไม่มีของเสียที่จะทำให้เกิดมลพิษขณะใช้งาน เป็นอุปกรณ์ที่ติดตั้งอยู่กับที่ไม่มีการเคลื่อนไหวใด ๆ ขณะทำงาน จึงไม่มีปัญหาด้านความสั่นไหว หรือต้องการการบำรุงรักษาเหมือนอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบอื่นๆ เช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ด้วยน้ำมันดีเซล นอกจากนั้นเซลล์แสงอาทิตย์ยังมีน้ำหนักเบา จึงทำให้ได้อัตราระหว่างกำลังไฟฟ้าต่อน้ำหนักได้ดีที่สุด

ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ประกอบด้วย แผงเซลล์แสงอาทิตย์ติดตั้ง และชุดแปลงกระแสไฟฟ้า (อินเวอร์เตอร์) โดยมีหลักการทำงานของระบบคือ เมื่อมีแสงอาทิตย์ตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์ จะเกิดการสร้างพาหะนำไฟฟ้าประจุลบและบวกขึ้น ได้แก่ อิเล็กตรอนและ โฮล โครงสร้างรอยต่อพีเอ็นจะทำหน้าที่สร้างสนามไฟฟ้าภายในเซลล์ เพื่อแยกพาหะนำไฟฟ้าชนิดอิเล็กตรอนไปที่ขั้วลบ และพาหะนำไฟฟ้าชนิดโฮลไปที่ขั้วบวก (ปกติที่ฐานจะใช้สารกึ่งตัวนำชนิดพี ขั้วไฟฟ้าด้านหลังจึงเป็นขั้วบวก ส่วนด้านรับแสงใช้สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ขั้วไฟฟ้าจึงเป็นขั้วลบ) ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าแบบกระแสตรงที่ขั้วไฟฟ้าทั้งสอง เมื่อต่อให้ครบวงจรไฟฟ้าจะเกิดกระแสไฟฟ้าไหลขึ้น การทำงานทั่วไปของเซลล์แสงอาทิตย์แสดงดังรูปที่ 2.1 ตัวอย่างเช่นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 นิ้ว จะให้กระแสไฟฟ้าประมาณ 2-3 แอมแปร์ และให้แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดประมาณ 0.6 โวลต์ เนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ไม่มากนัก ดังนั้นเพื่อให้ได้กำลังไฟฟ้ามักเพียงพอสำหรับใช้งาน จึงมีการนำเซลล์แสงอาทิตย์หลายๆ เซลล์มาต่อกันเป็น เรียกว่า แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Modules) ลักษณะการต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขึ้นอยู่กับความต้องการกระแสไฟฟ้าหรือแรงดันไฟฟ้า การต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบขนาน จะทำให้ได้กระแสไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น การต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบอนุกรม จะทำให้ได้แรงดันไฟฟ้าสูงขึ้น เซลล์แสงอาทิตย์ทั้งหมดจะผลิตกระแสไฟฟ้าตรง ผ่านระบบควบคุมเข้าอินเวอร์เตอร์ อินเวอร์เตอร์จะเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับจ่ายเข้าระบบไฟฟ้า ในช่วงที่ความเข้มของแสงอาทิตย์ไม่เพียงพอ หรือมีการใช้อุปกรณ์ที่ใช้กำลังไฟฟ้าสูงกว่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์แล้ว ระบบก็จะนำกำลังไฟฟ้าส่วนขาดจากระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบปกติของการไฟฟ้ามาใช้เพื่อให้อุปกรณ์ไฟฟ้าสามารถทำงานได้



รูปที่ 2.1 การทำงานทั่วไปของเซลล์แสงอาทิตย์

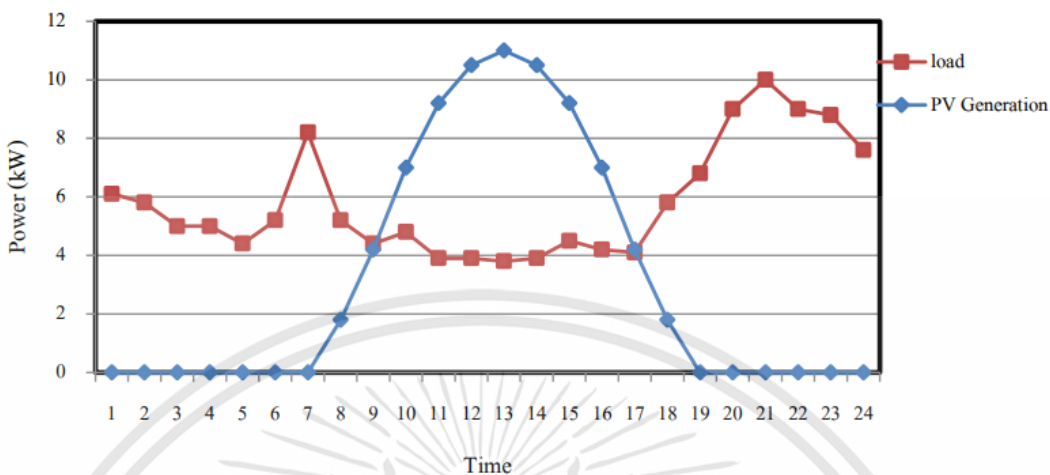
## 2.3 ปัญหาที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าเมื่อมีการเชื่อมระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์

ปัจจุบันระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์มีการติดตั้งใช้งานเพิ่มขึ้นทุกๆ ปี ประกอบกับนโยบายของรัฐในการส่งเสริมสนับสนุนการใช้งานพลังงานทดแทน ซึ่งทำให้มีทิศทางในการใช้งานระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์มากขึ้น ในอนาคตมีการคาดการณ์ว่าจะมีแนวโน้มการติดตั้ง ใช้งานระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์เพิ่มขึ้นต่อไปอีกเรื่อยๆ เป็นจำนวนมากจากนโยบายการผลิตพลังงานด้วยเซลล์แสงอาทิตย์อย่างอิสระ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นมากที่จะต้องพิจารณาผลกระทบของการติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ต่อคุณภาพไฟฟ้าในระบบจำหน่าย โดยปัจจัยหลักที่พิจารณาประกอบด้วย ปัจจัยด้านแรงดันไฟฟ้าและด้านกำลังไฟฟ้าสูญเสีย

ผลกระทบของการติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ต่อคุณภาพไฟฟ้าในระบบจำหน่ายได้แก่ การเปลี่ยนแปลงของระดับแรงดันไฟฟ้าจากการป้อนกำลังไฟฟ้าเข้าสู่ระบบไฟฟ้าที่ระดับสูง ส่งผลให้โซลาร์อินเวอร์เตอร์ตัดแหล่งผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ออกจากระบบ อีกทั้งยังส่งผลต่อคุณภาพของระบบไฟฟ้าในระบบจำหน่าย อาจส่งผลเสียต่ออุปกรณ์ที่เชื่อมต่ออยู่กับระบบจำหน่าย เช่น หม้อแปลงไฟฟ้า รีเลย์ สวิตช์ ฟิวส์ เป็นต้น

ลักษณะกำลังผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ใน 1 วัน จะมีลักษณะเปลี่ยนแปลงตามสภาพภูมิอากาศของประเทศและสามารถผลิตไฟฟ้าได้เฉพาะในเวลากลางวัน โดยปกติ ตั้งแต่เวลา 07.00 น.-18.00 น. และผลิต ไฟฟ้าได้สูงสุดในช่วงเวลา 11.00 น.-14.00 น. ดังรูปที่ 2.2 เราพบว่าช่วงเวลาความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงสุดและช่วงเวลากำลังผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์สูงสุดในรอบ 1 วันไม่ตรงกัน ปัญหาดังกล่าวส่งผลกระทบต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้าทั้งในส่วนของแรงดันไฟฟ้าเกินในช่วงเวลากลางวัน และอาจจะนำไปสู่กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่มากขึ้นเนื่องจากกำลังไฟฟ้าสามารถไหลย้อนกลับไปยังระบบจำหน่าย

ปัญหาของระบบจำหน่ายไฟฟ้าจากการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ได้แก่ ผลกระทบกับระดับแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่าย แรงดันไฟฟ้ากระเพื่อม ความไม่สมดุลของระดับแรงดันไฟฟ้า ผลกระทบที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์ ความไม่แน่นอนของการผลิตกำลังไฟฟ้า ผลกระทบจากตัวประกอบกำลังไฟฟ้า เป็นต้น เมื่อพิจารณาระดับแรงดันไฟฟ้าที่จุดเชื่อมต่อของการไฟฟ้านั้น จะต้องเป็นไปตามข้อกำหนดของการไฟฟ้าที่ระดับแรงดันต่างๆ โดยจะกำหนดค่าสูงสุดและต่ำสุด ดังตารางที่ 2.1 หากค่าแรงดันไฟฟ้ามีค่าสูงกว่าที่กำหนด จะส่งผลให้ระบบไฟฟ้าตัดแหล่งผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ออกจากระบบจำหน่าย ซึ่งเหตุการณ์ดังกล่าวนี้ส่งผลให้เสียโอกาสการจ่ายไฟจากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

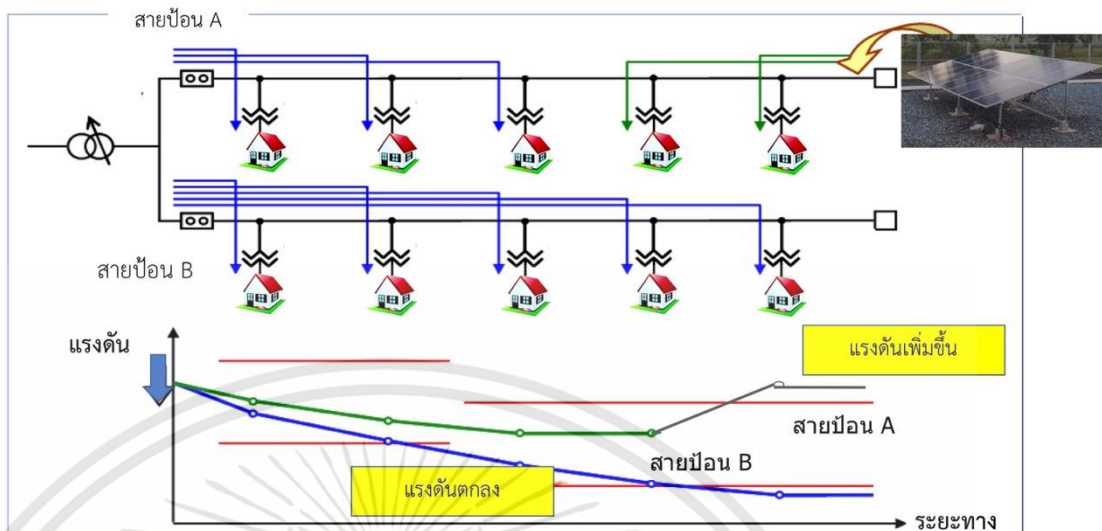


รูปที่ 2.2 กำลังการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์และลักษณะโหลดรายวันต่อครัวเรือน

ตารางที่ 2.1 ระดับแรงดันไฟฟ้าที่ยอมรับได้ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

ระดับแรงดัน	ภาวะปกติ		ภาวะฉุกเฉิน	
	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด
115 kV	120.7 kV	109.2 kV	126.5 kV	103.5 kV
69 kV	72.4 kV	65.5 kV	75.9 kV	62.1 kV
33 kV	34.7 kV	31.3 kV	36.3 kV	29.7 kV
22 kV	23.1 kV	20.9 kV	24.2 kV	19.8 kV
380 V	342 V	418 V	342 V	418 V
220 V	200 V	240 V	200 V	240 V

ซึ่งโดยปกติการเกิดแรงดันที่มากหรือน้อยในระบบไฟฟ้านอกจากจะขึ้นอยู่กับระยะทางระหว่างโหลดกับแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแล้วยังมีผลที่เกิดจากการเพิ่มขึ้นของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเข้ามาในระบบอีกด้วย ซึ่งแน่นอนว่าเมื่อโหลดที่ใกล้แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจะมีแรงดันที่ค่อนข้างสูงเนื่องจากทางผู้จำหน่ายจะทำให้ระดับแรงดัน ณ จุดนี้มากเพื่อให้โหลดที่อยู่ไกลมีแรงดันที่ไม่ต่ำกว่ามาตรฐาน หากมีการเกิดแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นในระบบก็จะทำให้แรงดัน ณ จุดนั้นสูงยิ่งขึ้นไปอีก และถ้าแหล่งจ่ายกำลังนั้นๆไม่สามารถประมาณการผลิตกำลังไฟฟ้าแต่ละช่วงเวลาได้ก็จะทำให้ระดับแรงดันในระบบไม่มีความแน่นอน ดังรูปที่ 2.3



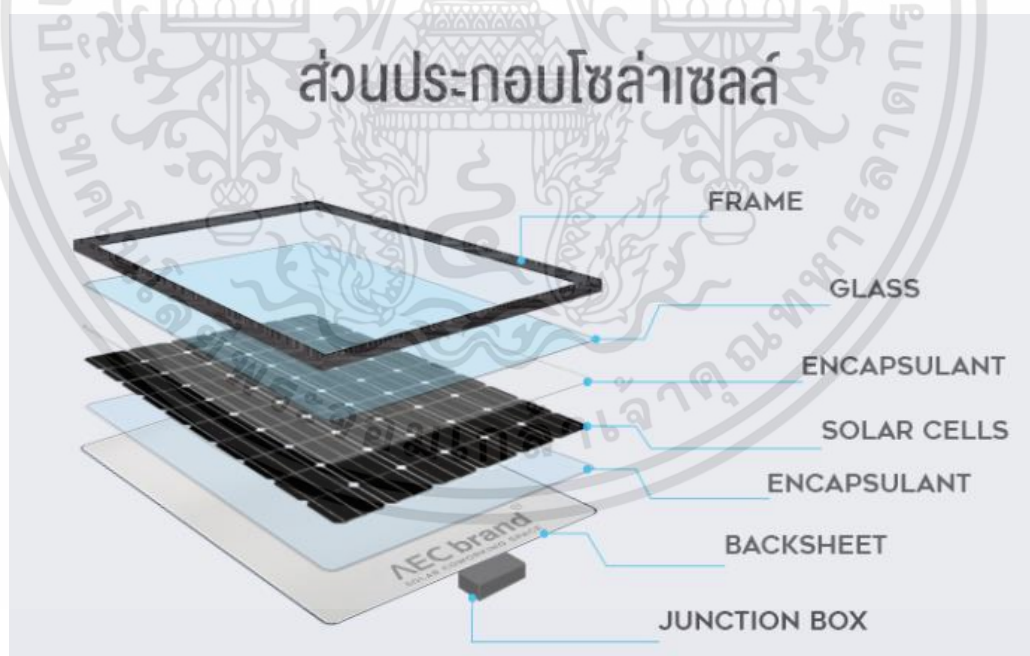
รูปที่ 2.3 ระดับแรงดันของระบบเมื่อก่อนและหลังมีระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์

ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่เชื่อมต่อถูกออกแบบสำหรับผลิตไฟฟ้าผ่านโซลาร์อินเวอร์เตอร์เข้าสู่ระบบสายจำหน่ายไฟฟ้าโดยตรง ทั้งนี้ไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์จะขายให้กับ การไฟฟ้าในอัตรารับซื้อไฟฟ้า (FIT) ผ่านมิเตอร์ขายไฟฟ้า ขณะที่ไฟฟ้าที่ใช้ภายในบ้านอยู่อาศัย ผู้ใช้ไฟฟ้า จะเสียค่าไฟฟ้าเท่ากับอัตราค่าไฟฟ้าที่กำหนดไว้ในโครงสร้างค่าไฟฟ้า ผ่านมิเตอร์ซื้อ โดยอัตรารับซื้อจะสูงกว่าอัตราค่าไฟฟ้า การเกิดเหตุการณ์ปลดออกของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ จะก่อให้เกิดความ สูญเสียค่าไฟฟ้า โดยทั่วไประบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์จะมีระยะเวลาในการทำงานต่อวัน ประมาณ 4 ชั่วโมง เมื่อเทียบกับปกติกำลังการผลิต หากมีการปลดการเชื่อมต่ออินเวอร์เตอร์ออกจาก ระบบไฟฟ้าเนื่องจากสถานะแรงดันไฟฟ้าต่ำหรือเกินมาตรฐานของระบบไฟฟ้า มีผลทำให้สูญเสียโอกาสใน การผลิตกำลังไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งจะมีค่ามากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับคุณภาพไฟฟ้าที่จุดเชื่อม ต่ออยู่นั้นๆ กรณีที่อินเวอร์เตอร์ถูกปลดออก จะต้องใช้เวลาอย่างน้อย 3 นาที หากภายในหนึ่งวันเกิดการปลด ออกของอินเวอร์เตอร์ 10 ครั้ง ทำให้สูญเสียโอกาสในการผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์เท่ากับ 30 นาที คิดเป็น 12.5% ของพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ต่อวัน ตัวอย่างเช่น ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงาน แสงอาทิตย์ขนาด 1 MW โอกาสในการผลิตกำลังไฟฟ้าที่ควรจะได้คือ 4 MWh เมื่อคิดค่ารับซื้อ พลังงานไฟฟ้าหน่วยละ 6 บาท สมมติมีการปลดออกของอินเวอร์เตอร์ 10 ครั้งต่อวันจะสูญเสียรายได้ ประมาณ 3,000 บาทต่อวัน หรือประมาณ 1,095,000 บาทต่อปี ทั้งนี้หากมีการแก้ปัญหาการปลดออก

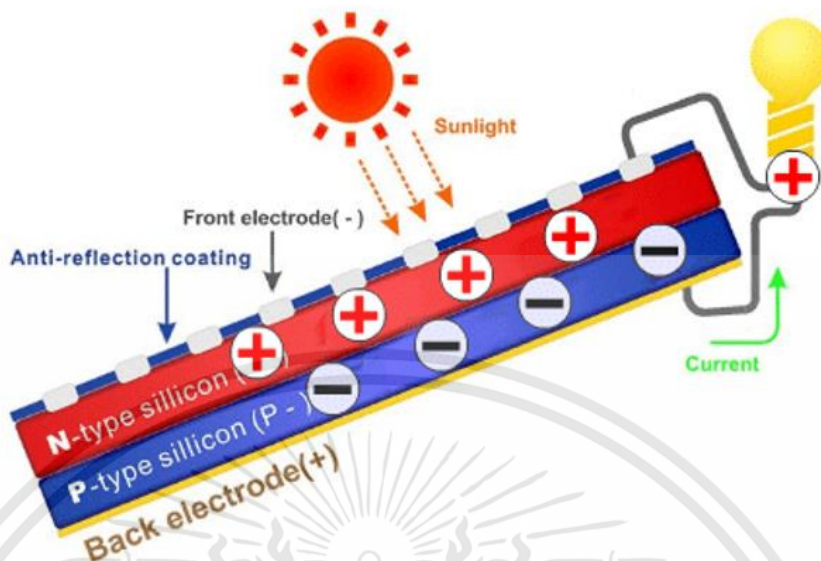
ของอินเวอร์เตอร์จากสาเหตุของความไม่สม่ำเสมอของแรงดันไฟฟ้าทั้งแรงดันไฟฟ้าต่ำและแรงดันไฟฟ้าเกิน จะทำให้ลดความสูญเสียค่าใช้จ่ายในส่วนนี้

## 2.4 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์

โครงสร้างที่นิยมมากที่สุด ได้แก่ รอยต่อพีเอ็นของสารกึ่งตัวนำ สารกึ่งตัวนำที่ราคาถูกที่สุดและมีมากที่สุดบนโลก คือ ซิลิคอน จึงถูกนำมาสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ โดยนำซิลิคอนมาถลุง และผ่านขั้นตอนการทำให้บริสุทธิ์ จนกระทั่งทำให้เป็นผลึก จากนั้นนำมาผ่านกระบวนการแพร่ซึมสารเจือปนเพื่อสร้างรอยต่อพีเอ็น โดยเมื่อเติมสารเจือฟอสฟอรัส จะเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (เพราะนำไฟฟ้าด้วยอิเล็กตรอนซึ่งมีประจุลบ) และเมื่อเติมสารเจือโบรอน จะเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี (เพราะนำไฟฟ้าด้วยโฮลซึ่งมีประจุบวก) ดังนั้น เมื่อนำสารกึ่งตัวนำชนิดพีและเอ็นมาต่อกัน จะเกิดรอยต่อพีเอ็นขึ้น โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอน อาจมีรูปร่างเป็นแผ่นวงกลมหรือสี่เหลี่ยมจัตุรัส ความหนา 200-400 ไมครอน (0.2-0.4 มม.) ผิวด้านรับแสงจะมีชั้นแพร่ซึมที่มีการนำไฟฟ้า ขั้วไฟฟ้าด้านหน้าที่รับแสงจะมีลักษณะคล้ายก้างปลาเพื่อให้ได้พื้นที่รับแสงมากที่สุด ส่วนขั้วไฟฟ้าด้านหลังเป็นขั้วโลหะเต็มพื้นผิว ส่วนประกอบของเซลล์แสงอาทิตย์แสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.4 ส่วนประกอบของเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 2.5 โครงสร้างภายในเซลล์แสงอาทิตย์

การทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์เป็นขบวนการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นกระแสไฟฟ้าได้โดยตรง โดยเมื่อแสงซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและมีพลังงานกระทบกับสารกึ่งตัวนำ จะเกิดการถ่ายเทพลังงานระหว่างกัน พลังงานจากแสงจะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้า (อิเล็กตรอน) ขึ้นในสารกึ่งตัวนำ จึงสามารถต่อกระแสไฟฟ้าดังกล่าวไปใช้งานได้ โครงสร้างภายในเซลล์แสงอาทิตย์แสดงดังรูปที่ 2.4

ระดับชั้นบนสุด เรียกว่า FRONT ELECTRODE ชั้นนี้จะมีแถบโลหะทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอน จะมีลักษณะเป็นโลหะ มักจะทำด้วยโลหะเงิน

ระดับชั้นที่ 2 ต่ำลงมา เรียกว่าชั้น n - type ซิลิคอน อยู่ด้านหน้าของ ระดับชั้น N นี้ คือชั้นของสารกึ่งตัวนำที่ใส่สารฟอสฟอรัสลงไป เพื่อให้มีการนำไฟฟ้า จะสร้างอิเล็กตรอนขึ้นมาในชั้นนี้เมื่อสารนี้โดนแดดหรือแสงอาทิตย์

ระดับชั้นที่ 3 ต่ำลงมา เรียกว่าชั้น p - n junction เป็นชั้นที่ชั้น N และ ชั้น P มาเจอกัน จากในรูปก็คือช่วงที่เป็นเส้นกั้นระหว่างชั้น N สีแดง และ ชั้น P สีน้ำเงิน เป็นจุดที่ชั้นซิลิคอน ชั้น N และ ชั้น P มาประกบต่อกัน เราจะเรียกจุดที่ประกบกันนี้ว่า P-N junction

ระดับชั้นที่ 4 ชั้นล่างพื้น เรียกว่าชั้น p - type ซิลิคอน ซึ่งอยู่ด้านล่างของเซลล์ ชั้น P คือชั้นของสารกึ่งตัวนำที่ได้ใส่สารโบรอน (Boron) เพื่อควบคุมให้มีการนำไฟฟ้าลงไป ทำให้โครงสร้างของอะตอมสูญเสียอิเล็กตรอนเกิดหลุมในชั้นนี้ (โฮล)

ระดับชั้นที่ 5 ชั้นล่างสุดเรียกว่าชั้น Back Electrode ด้านหลังของ p - type ซิลิคอนจะมีแถบโลหะเรียกว่า Back Electrode ทำหน้าที่เป็นตัวรวบรวมโฮล

ขั้นตอนการทำงาน เมื่อมีแสงอาทิตย์ตกกระทบ แสงอาทิตย์จะถ่ายเทพลังงานให้กับอิเล็กตรอนและโฮล ทำให้เกิดการเคลื่อนไหว และเมื่อพลังสูงเพียงพอ ทั้งอิเล็กตรอนและโฮลก็จะวิ่งเข้าหากันเพื่อจับคู่กัน อิเล็กตรอนจะวิ่งขึ้นไปยังชั้น n - type และโฮลจะวิ่งลงไปยังชั้น p type อิเล็กตรอนก็จะวิ่งขึ้นไปรวมกันอยู่ที่ชั้น Front Electrode และ โฮลก็จะวิ่งลงไปรวมกันที่ Back Electrode และเมื่อมีการต่อวงจรไฟฟ้าจากชั้น Front Electrode บนสุด และ Back Electrode ล่างสุด เมื่อต่อให้ครบวงจร ก็จะเกิดกระแสไฟฟ้าไหลขึ้น เพราะอิเล็กตรอนและโฮล จะวิ่งเพื่อจับคู่กัน

## 2.5 ชนิดของเซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์ที่พัฒนาและใช้งานในปัจจุบันนั้น แทบทั้งหมดทำจากธาตุซิลิคอนซึ่งเป็นธาตุที่มีมากเป็นอันดับสองบนโลก รองจากออกซิเจน ทรายตามชายหาด ท้องทะเล หินต่างๆ ก็มีซิลิคอนเป็นส่วนประกอบหลักๆ นั่นคือ เป็นธาตุที่มีมากมายเหลือใช้ (แต่การนำมาทำให้บริสุทธิ์ใช้งานได้ ต้องมีเทคนิคและใช้พลังงาน นั่นคือต้องมีค่าใช้จ่าย) ซิลิคอนเป็นวัตถุดิบที่ใช้มากในอุตสาหกรรมสารกึ่งตัวนำ โดยแทบจะเรียกได้ว่าเป็นเมล็ดข้าวสารของอุตสาหกรรมนี้เลยทีเดียว การจะนำซิลิคอนมาใช้ในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์นั้น ในแง่ของวัตถุดิบได้มีอุตสาหกรรมรองรับอยู่แล้ว เซลล์แสงอาทิตย์แบ่งออกเป็น 3 ชนิดตามโครงสร้างผลึก ดังนี้

1. เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากซิลิคอน ชนิดผลึกเดี่ยว (Single Crystalline Silicon Solar Cell) หรือที่รู้จักกันในชื่อ Monocrystalline Silicon Solar Cell และชนิดผลึกรวม (Polycrystalline Silicon Solar Cell) ลักษณะเป็นแผ่นซิลิคอนแข็งและบางมาก มักจะเห็นตามหลังคาบ้านและนิยมใช้กันมากที่สุด ลักษณะเป็นแผ่นซิลิคอนแข็งและบางมาก เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอน Crystalline Silicon (c-Si) โดยนำแท่งซิลิคอนมาถลุง ที่อุณหภูมิสูงถึง 1,500 องศาเซลเซียส และผ่านขั้นตอนการทำให้บริสุทธิ์จนกระทั่งทำให้เป็นผลึก จากนั้นนำมาผ่านกระบวนการแพร่ซึมสารเจือปนเพื่อสร้างรอยต่อพีเอ็น โดยเมื่อเติมสารเจือฟอสฟอรัส จะเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (เพราะนำไฟฟ้าด้วยอิเล็กตรอนซึ่งมีประจุลบ) และเมื่อเติมสารเจือโบรอน จะเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี (เพราะนำไฟฟ้าด้วยโฮลซึ่งมีประจุบวก) ดังนั้นเมื่อนำสารกึ่งตัวนำชนิดพีและเอ็นมาต่อกัน จะเกิดรอยต่อพีเอ็นขึ้น โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนอาจมีรูปร่างเป็นแผ่นวงกลมหรือสี่เหลี่ยมจัตุรัส ความหนา 200-400 ไมครอน (0.2-0.4 มม.) ผิวด้านรับแสงจะมีชั้นแพร่ซึมที่มีการนำไฟฟ้า ขั้วไฟฟ้าด้านหน้าที่รับแสงจะมีลักษณะคล้ายกางปลาเพื่อให้ได้พื้นที่รับแสงมากที่สุด ส่วนขั้วไฟฟ้าด้านหลังเป็นขั้วโลหะเต็มพื้นผิว โดยมีประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานประมาณร้อยละ 13-15 โดยที่ต้นทุนในการผลิตแผงเซลล์ชนิดนี้ค่อนข้างสูง

เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากซิลิคอนชนิดผลึกเดี่ยว (Single Crystal) หรือ Monocrystalline มีขั้นตอนการผลิต ดังนี้

1. นำซิลิคอนที่ถูกลงได้มาหลอมเป็นของเหลวที่อุณหภูมิประมาณ 1400 °C แล้วดึงผลึกออกจากของเหลว โดยลดอุณหภูมิลงอย่างช้าๆ จนได้แท่งผลึกซิลิคอนเป็นของแข็ง แล้วนำมาตัดเป็นแว่นๆ
2. นำผลึกซิลิคอนที่เป็นแว่น มาแพร่ซึมด้วยสารเจือปนต่างๆ เพื่อสร้างรอยต่อพีเอ็นภายในเตาแพร่ซึมที่มีอุณหภูมิประมาณ 900-1000 °C แล้วนำไปทำชั้นด้านการสะท้อนแสงด้วยเตาออกซิเดชันที่มีอุณหภูมิสูง
3. ทำขั้วไฟฟ้าสองด้านด้วยการฉาบโอโลหะภายใต้สุญญากาศ เมื่อเสร็จเรียบร้อยแล้วจะต้องนำไปทดสอบประสิทธิภาพด้วยแสงอาทิตย์เทียม และวัดหาค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้า



รูปที่ 2.6 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยว

เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากซิลิคอนชนิดผลึกรวม (Polycrystalline) มีขั้นตอนการผลิต ดังนี้

1. นำซิลิคอนที่ถูกลงและหลอมละลายเป็นของเหลวแล้วมาเทลงในแบบพิมพ์ เมื่อซิลิคอนแข็งตัว จะได้เป็นแท่งซิลิคอนเป็นแบบผลึกรวม แล้วนำมาตัดเป็นแว่นๆ
2. จากนั้นนำมาแพร่ซึมด้วยสารเจือปนต่างๆ และทำขั้วไฟฟ้าสองด้านด้วยวิธีการเช่นเดียวกับที่สร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากซิลิคอนชนิดผลึกเดี่ยว



รูปที่ 2.7 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกรวม

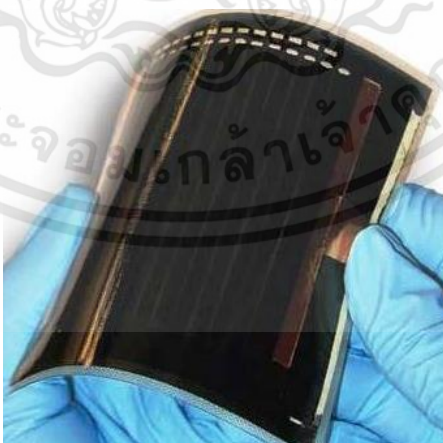
2. เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากอะมอร์ฟัสซิลิคอน (Amorphous Silicon Solar Cell) ลักษณะเป็นฟิล์มบางเพียง 0.5 ไมครอน (0.0005 มม.) น้ำหนักเบามาก และประสิทธิภาพเพียง 5-10% จะเห็นทั่วไปในเครื่องคิดเลขพลังงานแสงอาทิตย์ ข้อเสียคือจะแตกหักง่าย ใช้พื้นที่ติดตั้งมาก และมีประสิทธิภาพเพียง 5-10% เท่านั้น แต่มีข้อดีที่สามารถแปลงพลังงานแสงเพียงเล็กน้อยเป็นพลังงานไฟฟ้าได้มากกว่าโซลาร์เซลล์ชนิดอื่นๆ เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนมีโครงสร้างประกอบด้วยแผ่นฐานกระจกและฟิล์มบางชั้นต่างๆ เคลือบเป็นชั้นๆ คือ ฟิล์มบางชั้นไฟฟ้าโปร่งแสง (ดีบุกออกไซด์) หนาประมาณ 2000 อังสตรอม ฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอน หนาประมาณ 6000 อังสตรอม (รอยต่อ p-n) และฟิล์มบางชั้นไฟฟ้าด้านหลัง (อะลูมิเนียม) หนาประมาณ 5000 อังสตรอม สำหรับฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอนนั้นผลิตด้วยวิธีการแยกสลายก๊าซด้วยสนามไฟฟ้า (glow discharge plasma CVD) ได้เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพสูงสุดประมาณ 6.7%



รูปที่ 2.8 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน

เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากที่ทำจากอะมอร์ฟัสซิลิคอน มีขั้นตอนการผลิต ดังนี้

1. ทำการแยกสลายก๊าซซิลิโคน (Silane Gas) ให้เป็นอะมอร์ฟัสซิลิคอน โดยใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า เครื่อง Plasma CVD (Chemical Vapor Deposition) เป็นการผ่านก๊าซซิลิโคนเข้าไปใน ครอบแก้วที่มีขั้วไฟฟ้าความถี่สูง จะทำให้ก๊าซแยกสลายเกิดเป็นพลาสมา และอะตอมของ ซิลิคอนจะตกลงบนฐานหรือสแตนเลสสตีลที่วางอยู่ในครอบแก้ว เกิดเป็นฟิล์มบางขนาดไม่ เกิน 1 ไมครอน (0.001 มม.)
  2. ขณะที่แยกสลายก๊าซซิลิโคน จะผสมก๊าซฟอสฟีนและไดโบเรนเข้าไปเป็นสารเจือปน เพื่อ สร้างรอยต่อพีเอ็นสำหรับใช้เป็นโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์
  3. การทำขั้วไฟฟ้า มักใช้ขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงที่ทำจาก ITO (Indium Tin Oxide)
3. เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากสารกึ่งตัวนำอื่นๆ เช่น แกลเลียม อาร์เซไนด์, แคดเมียม เทลเลอไรด์ และคอปเปอร์ อินเดียม ไดเซเลไนด์ เป็นต้น มีทั้งชนิดผลึกเดี่ยว (Single Crystalline) และผลึก รวม (Polycrystalline) เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากแกลเลียม อาร์เซไนด์ จะให้ประสิทธิภาพสูงถึง 20-25% เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสารประกอบของคอปเปอร์อินเดียมไดเซเลไนด์ (Copper Indium Gallium Di-Selenide) เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ใช้สารผสมของ Copper Indium Gallium และ Selenium โดยมีทั้งที่ใช้ Cadmium Sulphide และไม่ใช่ Cadmium Sulphide เป็นบัฟเฟอร์ในเซลล์แสงอาทิตย์ มีทั้งชนิดผลึกเดี่ยว (Single Crystalline) และผลึกรวม (Polycrystalline) เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้มีประสิทธิภาพสูง อยู่ที่ประมาณ 20-25% และมี ราคาสูงที่สุด จึงนิยมใช้ในโครงการอวกาศ เช่นในดาวเทียมต่างๆ



รูปที่ 2.9 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดคอปเปอร์อินเดียม

ตารางที่ 2.2 ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดต่างๆ

ประเภทของวัสดุ	โครงสร้าง	ประสิทธิภาพของเซลล์	ประสิทธิภาพของโมดูล
ซิลิคอน-แบบผลึก	ผลึกเดี่ยว(Single Crystalline Silicon Solar Cell หรือ Monocrystalline Silicon Solar Cell)	15-24 %	10-14 %
ซิลิคอน-แบบผลึก	ผลึกโพลี(Polycrystalline)	10-17 %	9-12 %
ซิลิคอน-อะมอร์ฟัส	Amorphous Silicon Amorphous SiC Amorphous SiGe	8-13 %	6-9 %
สารประกอบอื่น	GaAs, CdTe , CuInSe2	18-30 % (GaAs) 10-15 % 10-15 %	NA

## 2.6 ประโยชน์ของการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

- สามารถประหยัดค่าไฟฟ้าที่ต้องจ่ายให้กับการไฟฟ้าฯ โดยจะประหยัดค่าไฟฟ้าในส่วนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทดแทนการใช้ไฟปกติ
- ลดผลกระทบจากสิ่งแวดล้อมอันเนื่องมาจากการผลิตไฟฟ้าด้วยรูปแบบอื่นเช่น การผลิตไฟฟ้าจากน้ำมัน หรือถ่านหิน ซึ่งเชื้อเพลิงเหล่านี้มีส่วนทำลายสภาพแวดล้อมทางธรรมชาติทั้งสิ้น
- ใช้พลังงานจากธรรมชาติ คือ แสงอาทิตย์ ซึ่งสะอาดและบริสุทธิ์ ไม่ก่อปฏิกิริยาที่จะทำให้อุณหภูมิเป็นพิษ
- เป็นการนำพลังงานจากแหล่งธรรมชาติมาใช้อย่างคุ้มค่าและไม่มีวันหมดไปจากโลกนี้
- สามารถนำไปใช้เพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ทุกพื้นที่บนโลก และได้พลังงานไฟฟ้าใช้โดยตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ไม่ต้องใช้เชื้อเพลิงอื่นใดนอกจากแสงอาทิตย์ จึงไม่มีการเผาไหม้และไม่ก่อให้เกิดมลภาวะด้านอากาศและน้ำ
- ไม่เกิดเสียงและไม่มีการเคลื่อนไหวขณะใช้งาน จึงไม่เกิดมลภาวะด้านเสียง
- เป็นอุปกรณ์ที่ติดตั้งอยู่กับที่ ไม่มีชิ้นส่วนใดที่มีการเคลื่อนไหวขณะทำงาน จึงไม่เกิดการสึกหรอ
- ต้องการการบำรุงรักษาต่ำ
- อายุการใช้งานยืนยาวและประสิทธิภาพคงที่
- มีน้ำหนักเบา ติดตั้งง่าย เคลื่อนย้ายสะดวกและรวดเร็ว
- เนื่องจากมีลักษณะเป็นโมดูล จึงสามารถประกอบได้ตามขนาดที่ต้องการ
- ช่วยลดปัญหาการสะสมของก๊าซต่างๆ ในบรรยากาศ เช่น คาร์บอนมอนอกไซด์, ซัลเฟอร์ไดออกไซด์, ไฮโดรคาร์บอน และก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ ฯลฯ ซึ่งเป็นผลจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงจำพวกน้ำมัน ถ่านหิน และก๊าซธรรมชาติ ล้วนแล้วแต่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เกิดปฏิกิริยาเรือนกระจก ทำให้โลกร้อนขึ้น เกิดฝนกรด และอากาศเป็นพิษ ฯลฯ

## 2.7 อุปกรณ์สำคัญของระบบการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตไฟฟ้ากระแสตรง จึงนำกระแสไฟฟ้าไปใช้ได้เฉพาะกับอุปกรณ์ไฟฟ้ากระแสตรงเท่านั้น หากต้องการนำไปใช้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้ไฟฟ้ากระแสสลับหรือเก็บสะสมพลังงานไว้ใช้ต่อไป จะต้องใช้ร่วมกับอุปกรณ์อื่นๆ อีก โดยรวมเข้าเป็นระบบที่ผลิตกระแสไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ อุปกรณ์สำคัญๆ มีดังนี้

1. แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Module) ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า ซึ่งเป็นไฟฟ้ากระแสตรงและมีหน่วยเป็นวัตต์ (Watt) มีการนำแผงเซลล์แสงอาทิตย์หลายๆ เซลล์มาต่อกันเป็นแถวหรือเป็นชุด (Solar Array) เพื่อให้ได้พลังงานไฟฟ้าใช้งานตามที่ต้องการ โดยการต่อกันแบบอนุกรม จะเพิ่มแรงดันไฟฟ้า และการต่อกันแบบขนาน จะเพิ่มพลังงานไฟฟ้า หากสถานที่ตั้งทางภูมิศาสตร์แตกต่างกัน ก็จะมีผลให้ปริมาณของค่าเฉลี่ยพลังงานสูงสุดในหนึ่งวันไม่เท่ากันด้วย รวมถึงอุณหภูมิก็มีผลต่อการผลิตพลังงานไฟฟ้า หากอุณหภูมิสูงขึ้น การผลิตพลังงานไฟฟ้าจะลดลง
2. เครื่องควบคุมการประจุ (Charge Controller) ทำหน้าที่ประจุกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์เข้าสู่แบตเตอรี่ และควบคุมการประจุกระแสไฟฟ้าให้มีปริมาณเหมาะสมกับแบตเตอรี่ เพื่อยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ รวมถึงการจ่ายกระแสไฟฟ้าออกจากแบตเตอรี่ด้วย ดังนั้น การทำงานของเครื่องควบคุมการประจุ คือ เมื่อประจุกระแสไฟฟ้าเข้าสู่แบตเตอรี่จน

- เต็มแล้ว จะหยุดหรือลดการประจุกระแสไฟฟ้า (และมักจะมีคุณสมบัติในการตัดการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้า กรณีแรงดันของแบตเตอรี่ลดลงด้วย) ระบบพลังงานแสงอาทิตย์จะใช้เครื่องควบคุมการประจุกระแสไฟฟ้าในกรณีที่มีการเก็บพลังงานไฟฟ้าไว้ในแบตเตอรี่เท่านั้น
3. แบตเตอรี่ (Battery) ทำหน้าที่เป็นตัวเก็บพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไว้ใช้เวลาที่ต้องการ เช่น เวลาที่ไม่มีแสงอาทิตย์ เวลากลางคืน หรือนำไปประยุกต์ใช้งานอื่นๆ แบตเตอรี่มีหลายชนิดและหลายขนาดให้เลือกใช้งานตามความเหมาะสม
  4. เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า (Inverter) ทำหน้าที่แปลงพลังงานไฟฟ้าจากกระแสตรง (DC) ที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ให้เป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) เพื่อให้สามารถใช้ได้กับอุปกรณ์ไฟฟ้ากระแสสลับ แบ่งเป็น 2 ชนิด คือ Sine Wave Inverter ใช้ได้กับอุปกรณ์ไฟฟ้ากระแสสลับทุกชนิด และ Modified Sine Wave Inverter ใช้ได้กับอุปกรณ์ไฟฟ้ากระแสสลับที่ไม่มีส่วนประกอบของมอเตอร์และหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่เป็น Electronic ballast
  5. ระบบป้องกันฟ้าผ่า (Lightning Protection) ทำหน้าที่ป้องกันความเสียหายที่เกิดกับอุปกรณ์ไฟฟ้าเมื่อฟ้าผ่า หรือเกิดการเหนี่ยวนำทำให้ความต่างศักย์สูง ในระบบทั่วไปมักไม่ใช้อุปกรณ์นี้ จะใช้สำหรับระบบขนาดใหญ่และมีความสำคัญเท่านั้น รวมถึงต้องมีระบบสายดินที่มีประสิทธิภาพด้วย

## 2.8 การประยุกต์ใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์

การนำพลังงานแสงอาทิตย์ซึ่งเป็นพลังงานจากธรรมชาติมาทดแทนพลังงานรูปแบบอื่นๆ ได้รับความสนใจและเป็นที่ยอมรับมากขึ้น สามารถนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์อย่างมากมายในการดำรงชีวิต รวมถึงไม่เป็นการทำลายสิ่งแวดล้อม

### ตารางที่ 2.3 การใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์

บ้านพักอาศัย	ระบบแสงสว่างภายในบ้าน, ระบบแสงสว่างนอกบ้าน (ไฟสนาม, ไฟโรงจอดรถ และโคมไฟรั้วบ้าน ฯลฯ), อุปกรณ์ไฟฟ้าชนิดต่างๆ , ระบบเปิด-ปิดประตูบ้าน, ระบบรักษาความปลอดภัย, ระบบระบายอากาศ, เครื่องสูบน้ำ, เครื่องกรองน้ำ และไฟสำรองยามฉุกเฉิน
ระบบสูบน้ำ	อุปโภค, สาธารณูปโภค, ฟาร์มเลี้ยงสัตว์, เพาะปลูก, ทำสวน-ไร่, เหมืองแร่ และชลประทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบแสงสว่าง	โคมไฟป้ายรถเมล์, ตู้โทรศัพท์, ป้ายประกาศ, สถานที่จอดรถ, แสงสว่างภายนอกอาคาร และไฟถนนสาธารณะ
ระบบประจุแบตเตอรี่	ไฟสำรองไว้ใช้ยามฉุกเฉิน, ศูนย์ประจุแบตเตอรี่ประจำหมู่บ้านในชนบทที่ไม่มีไฟฟ้าใช้, แหล่งจ่ายไฟสำหรับใช้ในครัวเรือนและระบบแสงสว่างในพื้นที่ห่างไกล
ทำการเกษตร	ระบบสูบน้ำ, พัฒลมอบผลผลิตทางการเกษตร และเครื่องนวดข้าว
เลี้ยงสัตว์	ระบบสูบน้ำ, ระบบเติมออกซิเจนในบ่อน้ำ (บ่อกุ้งและบ่อปลา) และแสงไฟดักจับแมลง
อนามัย	ตู้เย็น/กล่องทำความเย็นเพื่อเก็บยาและวัคซีน, อุปกรณ์ไฟฟ้าทางการแพทย์สำหรับหน่วยอนามัย, หน่วยแพทย์เคลื่อนที่ และสถานีอนามัย
คมนาคม	สัญญาณเตือนทางอากาศ, ไฟนำร่องทางขึ้น-ลงเครื่องบิน, ไฟประกาศ, ไฟนำร่องเดินเรือ, ไฟสัญญาณข้ามถนน, สัญญาณจราจร, โคมไฟถนน และโทรศัพท์ฉุกเฉิน
สื่อสาร	สถานีทวนสัญญาณไมโครเวฟ, อุปกรณ์โทรคมนาคม, อุปกรณ์สื่อสารแบบพกพา (เช่นวิทยุสนามของหน่วยงานบริการและทหาร) และสถานีตรวจสอบอากาศ
บันเทิงและพักผ่อนหย่อนใจ	แหล่งจ่ายไฟฟ้าสำหรับบ้านพักตากอากาศในพื้นที่ห่างไกล, ระบบประจุแบตเตอรี่แบบพกพาติดตัวไปได้ และอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ให้ความบันเทิง ฯลฯ
พื้นที่ห่างไกล	ภูเขา, เกาะ, ป่าลึก และพื้นที่สายส่งการไฟฟ้าเข้าไม่ถึง
อวกาศ	ดาวเทียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.9 ตัวแปรต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์

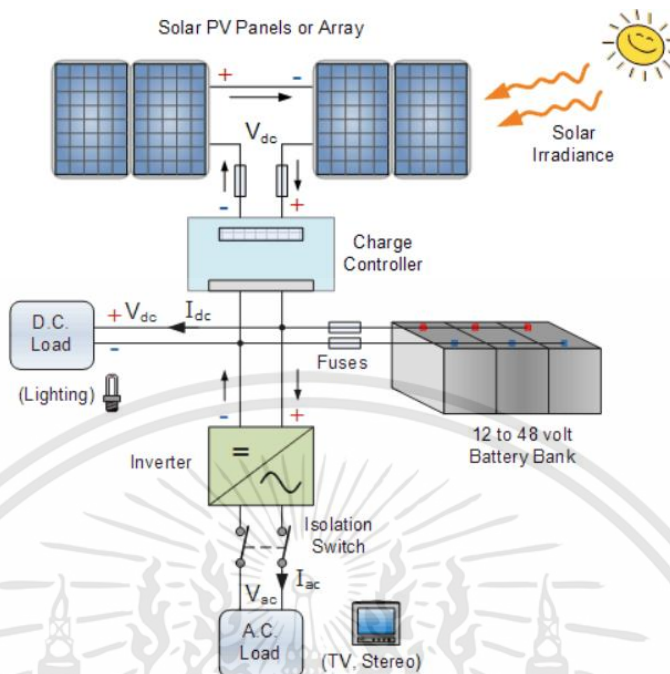
ตัวแปรที่สำคัญที่มีส่วนทำให้เซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพการทำงานในแต่ละพื้นที่ต่างกัน และมีความสำคัญในการพิจารณานำไปใช้ในแต่ละพื้นที่ ตลอดจนการนำไปคำนวณระบบหรือคำนวณ จำนวนแผงแสงอาทิตย์ที่ต้องใช้ในแต่ละพื้นที่ มีดังนี้

1. ความเข้มของแสงจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสไฟ (Current) หมายความว่าเมื่อความเข้มของแสงสูง กระแสที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ก็จะสูงขึ้น ในขณะที่แรงดันไฟฟ้าหรือโวลต์แทบจะไม่แปรไปตามความเข้มของแสงมากนัก ความเข้มของแสงที่ใช้วัดเป็นมาตรฐานคือ ความเข้มของแสงที่วัดบนพื้นโลกในสภาพอากาศปลอดโปร่ง ปราศจากเมฆหมอกและวัดที่ระดับน้ำทะเลในสภาพที่แสงอาทิตย์ตั้งฉากกับพื้นโลก ซึ่งความเข้มของแสงจะมีค่าเท่ากับ 100 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งมีค่าเท่ากับ AM 1.5 (Air Mass 1.5) และถ้าแสงอาทิตย์ทำมุม 60 องศากับพื้นโลกความเข้มของแสง จะมีค่าเท่ากับประมาณ 75 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งมีค่าเท่ากับ AM2 กรณีของแผงเซลล์แสงอาทิตย์นั้นจะใช้ค่า AM 1.5 เป็นมาตรฐานในการวัดประสิทธิภาพของแผง
2. อุณหภูมิจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับแรงดันไฟฟ้า แต่จะไม่ส่งผลกระทบต่อกระแสไฟฟ้า ในขณะที่แรงดันไฟฟ้าจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งโดยเฉลี่ยแล้วทุกๆ 1 องศาเซลเซียส ที่เพิ่มขึ้น จะทำให้แรงดันไฟฟ้าลดลง 0.5% และในกรณีของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มาตรฐานที่ใช้กำหนดประสิทธิภาพของแผงแสงอาทิตย์คือ ณ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เช่น กำหนดไว้ว่าแผงแสงอาทิตย์มีแรงดันไฟฟ้าที่วงจรเปิด (Open Circuit Voltage หรือ  $V_{oc}$ ) ที่ 21 V ณ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ก็จะหมายความว่าแรงดันไฟฟ้าที่จะได้จากแผงแสงอาทิตย์ เมื่อยังไม่ได้ต่อกับอุปกรณ์ไฟฟ้า ณ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จะเท่ากับ 21 V ถ้าอุณหภูมิสูงกว่า 25 องศาเซลเซียส เช่น อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส จะทำให้แรงดันไฟฟ้าของแผงแสงอาทิตย์ลดลง 2.5% ( $0.5\% \times 5$  องศาเซลเซียส) นั่นคือ แรงดันของแผงแสงอาทิตย์ที่  $V_{oc}$  จะลดลง 0.525 V ( $21\text{ V} \times 2.5\%$ ) เหลือเพียง 20.475 V ( $21\text{V} - 0.525\text{V}$ ) สรุปได้ว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น แรงดันไฟฟ้าก็จะลดลง ซึ่งมีผลทำให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงแสงอาทิตย์ลดลงด้วย จากข้อกำหนดดังกล่าวข้างต้น ก่อนที่ผู้ใช้จะเลือกใช้แผงแสงอาทิตย์ จะต้องคำนึงถึงคุณสมบัติของแผงที่ระบุไว้ในแผงแต่ละชนิดด้วยว่า ใช้มาตรฐานอะไร หรือมาตรฐานที่ใช้วัดแตกต่างกันหรือไม่ เช่นแผงชนิดหนึ่งระบุว่า ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ 80 วัตต์ ที่ความเข้มแสง 1,200 W ต่อ ตร.เมตร ณ อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ขณะที่อีกชนิดหนึ่งระบุว่า ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ 75 วัตต์ ที่ความเข้มแสง 1,000 W ต่อ ตร.เมตร และอุณหภูมิมาตรฐาน 25 องศาเซลเซียส แล้ว จะพบว่าแผงที่ระบุว่าให้กำลังไฟฟ้า 80 W จะให้กำลังไฟฟ้าน้อยกว่า จากสาเหตุดังกล่าว ผู้ที่จะใช้แผงจึงต้องคำนึงถึงข้อกำหนดเหล่านี้ในการเลือกใช้แผงแต่ละชนิดด้วย

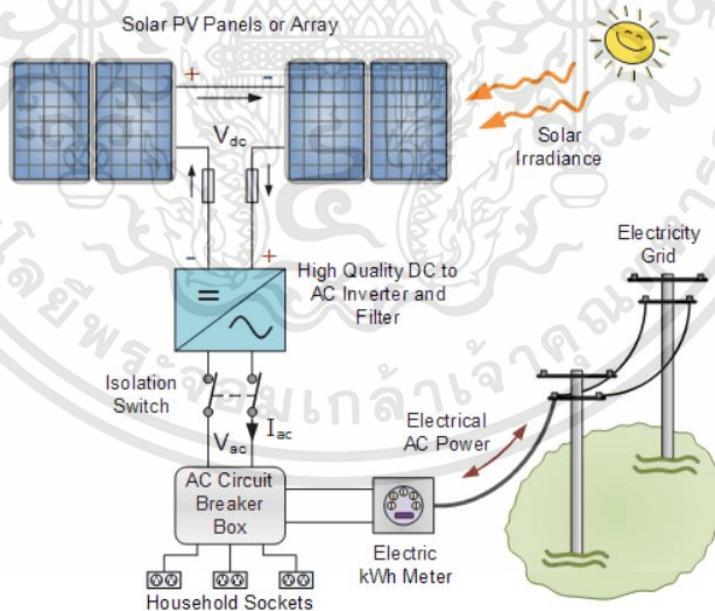
3. การยึดและติดตั้งแผงก็เป็นอีกหนึ่งตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพ การติดตั้งแผงจะต้องคำนวณว่าแผงควรจะต้องติดตั้งให้มีความชันจากพื้นกึ่งองศาและหันหน้าไปทางทิศใด(โดยทั่วไปจะติดตั้งให้ระนาบแผงโซลาร์เซลล์หันไปทางทิศใต้ โดยมีความชันประมาณ 15 องศาจากพื้นดิน) การยึดและติดตั้งแผงนั้นก็มีผลอย่างมากต่อประสิทธิภาพโดยรวมของแผงหรือทั้งระบบ ถ้าติดตั้งไปผิดทิศหรือความชันแผงจากพื้นไม่ได้ กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ก็จะลดลงไปอย่างมาก
4. เงาบังแสง นอกจากการติดตั้งแผงที่เหมาะสมแล้ว เงาที่บังแผงโซลาร์เซลล์ในบางส่วนก็มีผลต่อประสิทธิภาพโดยรวมของทั้งระบบด้วย เพราะโดยส่วนมากแล้วระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์โดยแผงโซลาร์เซลล์จะต่อวงจรเป็นแบบอนุกรมแผงโซลาร์เซลล์เข้าด้วยกัน เพื่อให้ได้แรงดันที่ออกแบบไว้ เมื่อมีเงาบางส่วนบังแสงของแผงโซลาร์เซลล์เพียงแค่ว่าเพียงหนึ่งแผงก็จะทำให้กระแสไฟฟ้าในระบบหยุดไหลได้ ดังนั้นตลอดทั้งวันควรมั่นใจว่าการติดตั้งแผงจะไม่มีร่มเงามาบังการรับแสงของแผงโซลาร์เซลล์

## 2.10 ระบบการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์

1. ระบบผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ (PV Stand-alone system): เป็นระบบผลิตไฟฟ้าที่ได้รับการออกแบบสำหรับใช้งานในพื้นที่ชนบทที่ไม่มีระบบสายส่งไฟฟ้า อุปกรณ์ระบบที่สำคัญประกอบด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ อุปกรณ์ควบคุมการประจุแบตเตอรี่ แบตเตอรี่ และอุปกรณ์เปลี่ยนระบบไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบอิสระ ระบบผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระแสดงดังรูปที่ 2.9
2. ระบบผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่อกับระบบจำหน่าย (PV Grid connected system): เป็นระบบผลิตไฟฟ้าที่ถูกออกแบบสำหรับผลิตไฟฟ้าผ่านอุปกรณ์เปลี่ยนระบบไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ เข้าสู่ระบบสายส่งไฟฟ้าโดยตรง ใช้ผลิตไฟฟ้าในเขตเมือง หรือพื้นที่ที่มีระบบจำหน่ายไฟฟ้าเข้าถึง อุปกรณ์ระบบที่สำคัญประกอบด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ อุปกรณ์เปลี่ยนระบบไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับชนิดต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้า ระบบนี้ไม่ต้องคำนึงว่าโหลดในบ้านใช้งานมากน้อยเพียงใด ระบบโซลาร์เซลล์ จะช่วยลดค่าไฟลงบางส่วนเท่านั้น ตามกำลังที่ผลิตได้ หากใช้ไฟมากกว่าระบบโซลาร์ผลิตได้ จะไปดึงไฟจากการไฟฟ้านำมาใช้ ระบบผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่อกับระบบจำหน่ายแสดงดังรูปที่ 2.10

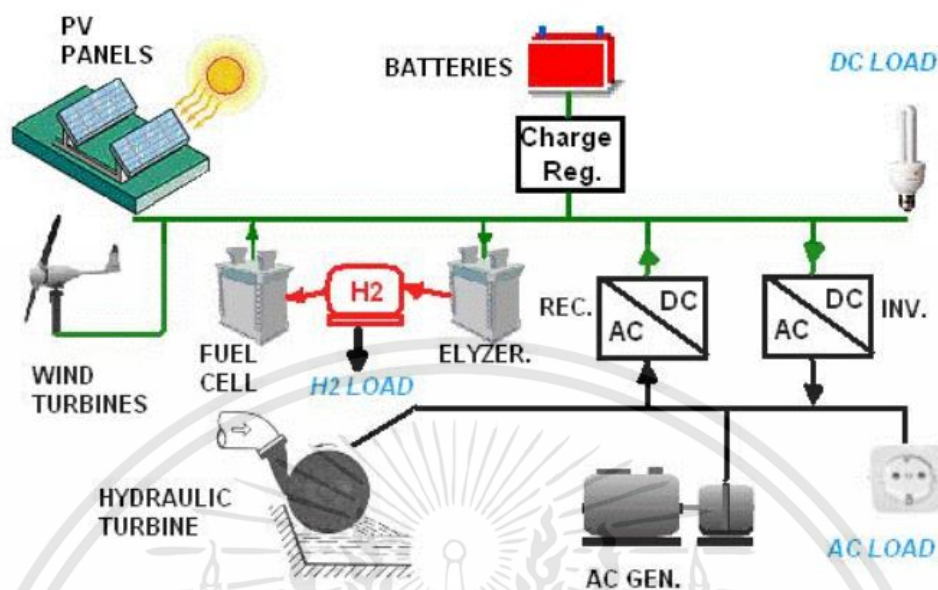


รูปที่ 2.10 ระบบผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ



รูปที่ 2.11 ระบบผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่อกับระบบจำหน่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 ระบบผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบผสมผสาน

- ระบบผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบผสมผสาน (PV Hybrid system): เป็นระบบผลิตไฟฟ้าที่ถูกออกแบบสำหรับทำงานร่วมกับอุปกรณ์ผลิตไฟฟ้าอื่นๆ เช่น ระบบเซลล์แสงอาทิตย์กับพลังงานลม และเครื่องยนต์ดีเซล ระบบเซลล์แสงอาทิตย์กับพลังงานลม และไฟฟ้าพลังน้ำ เป็นต้น โดยรูปแบบระบบจะขึ้นอยู่กับกรอกแบบตามวัตถุประสงค์โครงการเป็นกรณีเฉพาะ ระบบผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบผสมผสานแสดงดังรูปที่ 2.11

## 2.11 โซลาร์อินเวอร์เตอร์

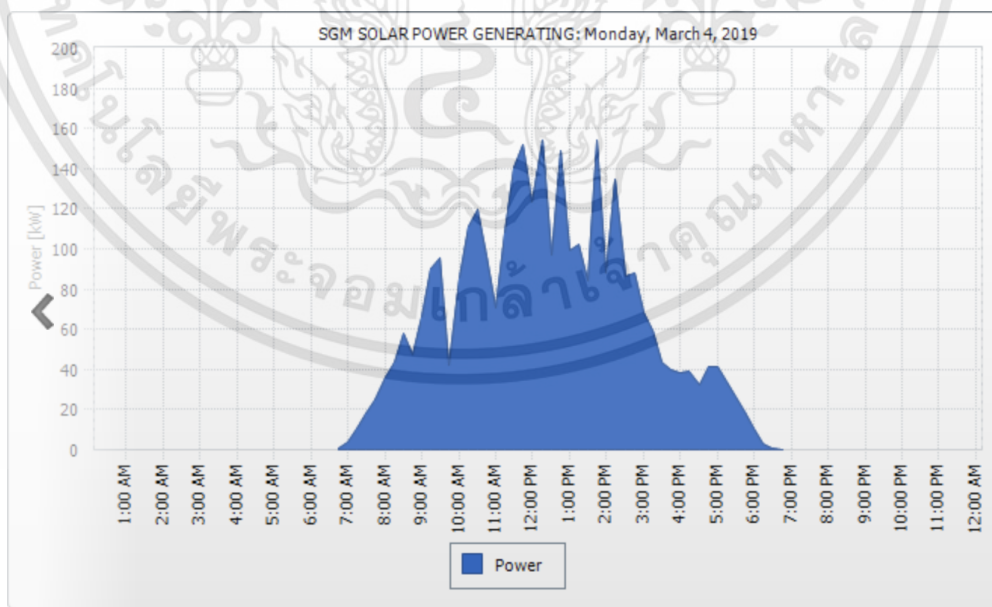
การทำงานของโซลาร์เซลล์นั้น มีแผงอุปกรณ์ทำหน้าที่แปลงพลังงานจากแสงอาทิตย์ให้กลายเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยพลังงานที่ได้จากแผงโซลาร์เซลล์จะเป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงหรือไฟ DC จากนั้นระบบจะต้องนำไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้มาจากแผงไปผ่านอุปกรณ์หลักที่เรียกว่า Solar Inverter โดยหน้าที่ของ Solar Inverter จะแปลงพลังงานจากพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงให้กลายเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ ที่เราใช้ตามบ้านเรือนทั่วไป และเป็นอุปกรณ์หลักที่ใช้ในการควบคุม เชื่อมต่อกับพลังงานหลักในระบบต่างๆ ของอาคาร บ้าน หรือโรงงานให้ดำเนินไปตามระบบปกติ

- อินเวอร์เตอร์รูปแบบต่อกับระบบจำหน่าย (PV Grid connected system) เป็นอินเวอร์เตอร์ที่แปลงไฟจากแผงโซลาร์จากไฟกระแสตรงไปเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ

- อินเวอร์เตอร์รูปแบบอิสระ (PV Stand-alone system) เป็นอินเวอร์เตอร์ที่ทำหน้าที่แปลงไฟจากแบตเตอรี่ 12V, 24V, 36V, 48V ไปเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ 110 V หรือ 220 V ที่สามารถนำไปใช้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าในบ้านที่เราใช้ในชีวิตประจำวัน
- อินเวอร์เตอร์รูปแบบผสมผสาน (PV Hybrid system) เป็นอินเวอร์เตอร์ที่มีการนำชาร์จคอนโทรลมารวมอยู่ในเครื่องเดียวกับที่สามารถรับไฟฟ้าจากแผงโซลาร์เซลล์และหรือจากกังหันลมและรวมจุดสนับสนุนไฟฟ้าที่เกิดจากเครื่องยนต์ปั่นไฟหรือไฟฟ้าจากการไฟฟ้าเมื่อเวลาที่ใช้ไฟจากแบตเตอรี่จนอ่อนลงมันจะสลับไปใช้ไฟจากไฟสนับสนุนแทน

## 2.12 แนวทางการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์

โดยทั่วไปการออกแบบระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์จะคิดที่กำลังผลิตสูงสุดที่ระบบสามารถผลิตได้ ซึ่งกำลังผลิตนี้ไม่สามารถทำนายได้ล่วงหน้าเนื่องจากมีหลายปัจจัยที่ส่งผลต่อกำลังผลิตที่ไม่สามารถคาดการณ์ไว้ล่วงหน้าได้ เช่น ฝนตก เมฆบดบัง ตำแหน่งดวงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม เป็นต้น เมื่อมาพิจารณากราฟกำลังผลิตต่อวันของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ดังรูปที่ 2.13 จะเห็นได้เวลามีช่วงเช้าและบ่ายที่ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้กำลังการผลิตที่ไม่เต็มพิกัดติดตั้งทำให้ ณ เวลานั้นสามารถปรับให้อินเวอร์เตอร์อยู่ในโหมดจ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้าเสมือนจากระบบไฟฟ้าได้ ซึ่งจะทำให้ระบบไฟฟ้ามีตัวช่วยเรื่องเสถียรภาพของแรงดันไฟฟ้าที่ดีขึ้นได้



รูปที่ 2.13 กราฟกำลังการผลิตไฟฟ้าต่อวันของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์

## 2.13 บทสรุป

จากที่กล่าวมาข้างต้นในบทที่ 2 นี้ ได้กล่าวถึงระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ประโยชน์ของการผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ อุปกรณ์สำคัญที่ใช้ในระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งเป็นความรู้พื้นฐานในการทำวิจัยฉบับนี้ นอกจากนี้ยังได้ศึกษาประเภทของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ทั้งรูปแบบต่อกับระบบจำหน่าย รูปแบบอิสระ และรูปแบบผสมผสาน ซึ่งเป็นแนวทางในการออกแบบการทดลอง อีกทั้งยังได้ศึกษาโซลาร์อินเวอร์เตอร์ซึ่งเป็นอุปกรณ์สำคัญที่ใช้ในระบบผลิตพลังงานแสงอาทิตย์



## บทที่ 3

# สถานีไฟฟ้าอัจฉริยะ

### 3.1 บทนำ

ปัจจุบันระบบไฟฟ้ามีการกระจายตัวของผู้ใช้งานและแหล่งผลิตไฟฟ้าที่มากขึ้น ทำให้ในการควบคุมกำลังไฟฟ้าให้มีความเสถียรภาพที่ดีทำได้ยากขึ้นเช่นกัน ดังนั้นแผนขับเคลื่อนการดำเนินงานด้านสมรรถกิริยาของประเทศไทยจึงได้มีโครงการเมืองอัจฉริยะ และการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) ซึ่งเป็นองค์กรที่จัดจำหน่ายไฟฟ้าขนาดใหญ่จึงมุ่งพัฒนาระบบไฟฟ้าเพื่อนำไปสู่โครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะ มีเป้าหมายการพัฒนาระบบภายในสถานีไฟฟ้าแรงสูงให้เป็นสถานีไฟฟ้าอัจฉริยะ เนื่องจากระบบสื่อสารของอุปกรณ์ของสถานีไฟฟ้าในอดีตจะใช้ระบบอนาล็อกในการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ ซึ่งจะใช้สายสัญญาณจำนวนมาก มีความไม่แน่นอนในการส่งข้อมูล และมีความล่าช้าในการสื่อสารในระบบป้องกัน มีผลทำให้การทำงานของอุปกรณ์ป้องกันในสถานีไฟฟ้ามีการทำงานที่ผิดพลาด ดังนั้นแนวทางในการนำสถานีไฟฟ้าอัจฉริยะมาใช้จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะนำมาแก้ปัญหาคอมพิวเตอร์ระบบไฟฟ้าที่ยั่งยืน โดยปัจจุบันเริ่มนำมาใช้มาตรฐาน IEC-61850 มาใช้ในสถานีไฟฟ้าบ้างแล้ว ซึ่งเป็นมาตรฐานการสื่อสารของอุปกรณ์ภายในสถานีไฟฟ้าอัจฉริยะ ในบทนี้จะกล่าวถึงหน้าที่ของสถานีไฟฟ้าอัจฉริยะ มาตรฐาน IEC-61850 การสื่อสารแบบอนุกรม และการแก้ปัญหาระดับแรงดันเกินและแรงดันตกด้วยระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

### 3.2 สถานีไฟฟ้าอัจฉริยะ

สถานีไฟฟ้าอัจฉริยะ ตามมาตรฐาน IEC-61850 สามารถรองรับการเชื่อมต่อสื่อสารข้อมูลของอุปกรณ์ต่างๆ ผ่านเครือข่ายได้ง่ายขึ้นและไร้ขีดจำกัด โดยจะทำงานร่วมกันเป็นโครงข่ายทั้งระบบ สามารถวิเคราะห์และแก้ไขปัญหาเหตุการณ์ไฟฟ้าขัดข้องได้ รวดเร็ว ถูกต้องและแม่นยำ ทั้งนี้อุปกรณ์มาตรฐาน IEC-61850 ทำให้อุปกรณ์ระบบควบคุมและระบบป้องกันทำงานได้อย่างสัมพันธ์กันมากขึ้น เวลาเกิดการลัดวงจรในระบบจำหน่าย ก็จะมีพื้นที่ไฟดับน้อยลงและสามารถใช้ฟังก์ชันประยุกต์ของอุปกรณ์ระบบควบคุมภายในสถานีไฟฟ้า ในการวิเคราะห์หาจุดเกิดเหตุข้อขัดข้อง และแยกแยะส่วนที่ขัดข้องนั้นออกพร้อมทั้งจ่ายไฟกลับคืนในส่วนที่เป็นปกติได้อย่างรวดเร็ว ด้วยการจัดหาอุปกรณ์ในการซ่อมแซมบำรุงรักษาสะดวกขึ้นเพราะอุปกรณ์แต่ละผลิตภัณฑ์สามารถเชื่อมต่อแลกเปลี่ยนข้อมูลกันได้รวดเร็ว เพราะใช้สายใยแก้วนำแสง รวมทั้งลดต้นทุนการจัดหาสายทองแดงในปริมาณมาก ส่งผลให้การจ่ายพลังงานไฟฟ้ามีประสิทธิภาพและมั่นคง สร้างความเชื่อมั่นในระบบไฟฟ้าแก่ผู้ประกอบการภาคธุรกิจและ

ภาคอุตสาหกรรม ตอบสนองงานแก้ไขปัญหาไฟฟ้าดับได้อย่างรวดเร็ว โดยจะช่วยลดปัญหาไฟตก ไฟดับ ไฟกระพริบ ช่วยเพิ่มความมั่นคงในการจ่ายไฟฟ้า รองรับการผลิตของภาคธุรกิจ อุตสาหกรรม และการท่องเที่ยว นอกจากนี้ยังสามารถรองรับกับโครงการระบบกริดที่กำลังจะเกิดขึ้นในอนาคตในรูปแบบของการจัดการโครงข่ายไฟฟ้าแบบแหล่งผลิตกระจายตัว หรือ Distributed Generation Resources จากพลังงานทดแทนในรูปแบบต่างๆ เช่น เซลล์แสงอาทิตย์ พลังงานลม และชีวมวลได้อย่างมีประสิทธิภาพซึ่งจะเป็นการสนับสนุนให้การลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ ระบบสถานีไฟฟ้าอัจฉริยะทำหน้าที่พื้นฐานดังนี้

1. การให้บริการในการเข้าถึงข้อมูลทางระบบไฟฟ้าทั้งระยะไกลและใกล้ (Remote/Local) เช่น ตรวจสอบสถานะอุปกรณ์ไฟฟ้า หรือแม้กระทั่งแก้ไขการตั้งค่าของระบบป้องกัน (Relay Setting)
2. การควบคุมการทำงานอุปกรณ์จ่ายไฟฟ้าโดยบุคคลและโดยระบบอัตโนมัติ (Manual/Automatic Function) ทั้งในเหตุการณ์ปกติและไม่ปกติ เช่น การรักษาระดับแรงดันไฟฟ้า
3. การจัดการระบบสื่อสารข้อมูลระหว่างอุปกรณ์จ่ายไฟฟ้าและระบบควบคุมหรือศูนย์สั่งการ (SCADA: Supervisory Control and Data Acquisition) ทำให้ได้ข้อมูลที่มีคุณภาพและเชื่อถือได้มากที่สุด

ระบบสถานีไฟฟ้าอัจฉริยะเริ่มต้นพัฒนามาจาก RTU (Remote Terminal Unit) และ Protective Relay ซึ่งเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ประกอบด้วยชุดรับส่งสัญญาณดิจิทัล และอะนาล็อก (DI/DO/AI/AO: Digital Input/Digital Output/Analog Input/Analog Output) รวมทั้งประกอบด้วยฟังก์ชันการทำงานซึ่งเป็นซอฟต์แวร์ เพื่อตั้งค่าวัด สถานะ สัญญาณเตือน รวมทั้งควบคุมการทำงานของอุปกรณ์จ่ายไฟฟ้า และป้องกันการเสียหายของอุปกรณ์ไฟฟ้า โดยค่าวัดและสถานะต่าง ๆ นั้นจะถูกส่งไปยังระบบ SCADA เพื่อประกอบการตัดสินใจในการควบคุมอุปกรณ์การจ่ายไฟฟ้านั้น ๆ ผ่านระบบสื่อสารข้อมูลด้วยโปรโตคอลที่ออกแบบมาสำหรับงานระบบอัตโนมัติโดยเฉพาะ ในปัจจุบัน RTU ยังมีใช้อย่างแพร่หลายในระบบขนาดเล็กหรือระบบที่ไม่มีความซับซ้อนสูง ส่วน Protective Relay มักถูกใช้ในการด้านระบบป้องกันอย่างเดียว

สำหรับระบบขนาดใหญ่ระบบสถานีไฟฟ้าอัจฉริยะเริ่มเข้ามามีบทบาทอันเนื่องมาจากโครงสร้างและสถาปัตยกรรมของระบบสถานีไฟฟ้าอัจฉริยะเป็นแบบกระจายหน้าที่ (Distributed Concept) ซึ่งมีความน่าเชื่อถือได้สูงตลอดรวมทั้งระบบประสิทธิภาพในการทำงานก็สูงเช่นกัน เนื่องจากระบบทำงานด้วยโปรเซสเซอร์หลายตัว (Multiple Processor) สามารถรองรับงานที่ต้องการการตอบสนองด้วยความเร็วสูง เช่น งานโอนถ่ายโหลดไฟฟ้าโดยอัตโนมัติ หรือ งานระบบป้องกันทางไฟฟ้า

### 3.3 โครงสร้างของระบบสถานีไฟฟ้าอัจฉริยะ

ระบบสถานีไฟฟ้าอัจฉริยะประกอบด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อัจฉริยะ (IED: Intelligence Electronic Device) หลาย ๆ ประเภท ทำหน้าที่ต่างกันเช่น เป็นอุปกรณ์ป้องกัน (Protective Relay) อุปกรณ์สื่อสารข้อมูล (Data Communication Device) อุปกรณ์ควบคุม (CU: Control Unit) หรือแม้กระทั่งตัว RTU IED (Remote Terminal Unit Intelligence Electronic) แต่ละตัวจะถูกติดตั้งตามโครงสร้างของระบบสถานีไฟฟ้าอัจฉริยะขึ้นอยู่กับหน้าที่และภาระงานของมัน โครงสร้างของระบบสถานีไฟฟ้าอัจฉริยะได้ถูกจัดแบ่งเป็น 3 ระดับ โดยแต่ละระดับมีหน้าที่ดังนี้

1. ระดับสถานี (Station Level) มีหน้าที่ในการส่งข้อมูลให้ระบบ SCADA การจัดการระบบอัตโนมัติ ระดับสถานี (ระหว่างอุปกรณ์ต่างเบย์หรือต่างกลุ่ม เช่น ระหว่างสองหม้อแปลงกำลัง) การจัดการวิเคราะห์และสำรองข้อมูล การเข้าจังหวะเวลาระหว่างอุปกรณ์ (Time Synchronization) การจัดการสัญญาณเตือน สถานะและการเปลี่ยนแปลงภายในสถานีย่อย และการควบคุมอุปกรณ์จ่ายไฟฟ้าผ่านระบบคอมพิวเตอร์ (HMI: Human Machine Interface)
2. ระดับเบย์ (Bay Level) มีหน้าที่ในการจัดการระบบอัตโนมัติระดับเบย์ระหว่างภายในเบย์เดียวกันหรือกลุ่มเดียวกัน เช่น กลุ่มหม้อแปลงกำลังเดียวกัน การดึงข้อมูลจากอุปกรณ์จ่ายไฟฟ้า (Data Acquisition) การจัดการการควบคุมอุปกรณ์จ่ายไฟฟ้า การจัดการระบบป้องกันอุปกรณ์จ่ายไฟฟ้า
3. ระดับโปรเซส (Process Level) มีหน้าที่เชื่อมสายสัญญาณทางไฟฟ้าจากอุปกรณ์จ่ายไฟฟ้าไปยังระดับเบย์ เช่น สายสัญญาณค่ากระแสจากหม้อแปลงกระแส (CT: Current Transformer), สายสัญญาณค่าสถานะของอุปกรณ์จ่ายไฟฟ้า เช่น สถานะปลดสับของเบรกเกอร์ สายสัญญาณควบคุมอุปกรณ์จ่ายไฟฟ้า เช่น สายสัญญาณปลดเบรกเกอร์ และสายสัญญาณสื่อสารข้อมูลสำหรับอุปกรณ์จ่ายไฟฟ้าสมัยใหม่ที่มี IED ขนาดเล็กฝังภายในตัวอุปกรณ์จ่ายไฟฟ้า เช่น หม้อแปลงกระแสอัจฉริยะ (Intelligence Current Transformer ตามมาตรฐาน IEC61850) การใช้สายสัญญาณสื่อสารข้อมูลจะสามารถลดจำนวนสายสัญญาณราคาสูงที่เป็นทองแดง และสามารถติดตั้งระบบสถานีไฟฟ้าอัจฉริยะได้โดยง่าย อันเนื่องมาจากสายสัญญาณสื่อสารข้อมูลต้องการพื้นที่ในการติดตั้งน้อย

### 3.4 ประโยชน์ของระบบสถานีไฟฟ้าอัจฉริยะ

ประโยชน์ของระบบสถานีไฟฟ้าอัจฉริยะสามารถวิเคราะห์ได้ 2 มุมมอง คือ ทางด้านธุรกิจ และทางด้านเทคนิคโดยในบทความนี้จะกล่าวในลักษณะโดยรวม ได้แก่

1. เพิ่มประสิทธิภาพในการใช้งานระบบไฟฟ้า (Enhancing Power System Operation) เนื่องจากระบบสถานีไฟฟ้าอัจฉริยะสามารถเข้าถึงข้อมูลของแต่ละอุปกรณ์ไฟฟ้า ทำให้วิศวกรไฟฟ้าสามารถรู้ขีด

ความสามารถของแต่ละอุปกรณ์ไฟฟ้าได้จริง และสามารถคำนวณค่าระยะเผื่อความปลอดภัย (Safety Margin) ของแต่ละอุปกรณ์ได้อย่างถูกต้อง ทำให้สามารถใช้งานอุปกรณ์ไฟฟ้าได้เหมาะสมกับราคาและความสามารถของมัน

2. เพิ่มความเชื่อถือได้และความยืดหยุ่นในระบบไฟฟ้า (Increasing Reliability and Flexibility) ระบบสถานีไฟฟ้าอัจฉริยะมีระบบอัตโนมัติที่จัดการสภาพขัดข้องทางไฟฟ้าทำให้ลดระยะเวลาไฟฟ้าดับ ป้องกันอุปกรณ์ไฟฟ้าราคาสูงชำรุดอันเนื่องมาจากกระแสลัดวงจรหรือแม้กระทั่งทำการปลดโหลดที่ไม่สำคัญเพื่อรักษาโหลดที่สำคัญเอาไว้ ดังตัวอย่างดังต่อไปนี้

### 3.5 มาตรฐาน IEC 61850

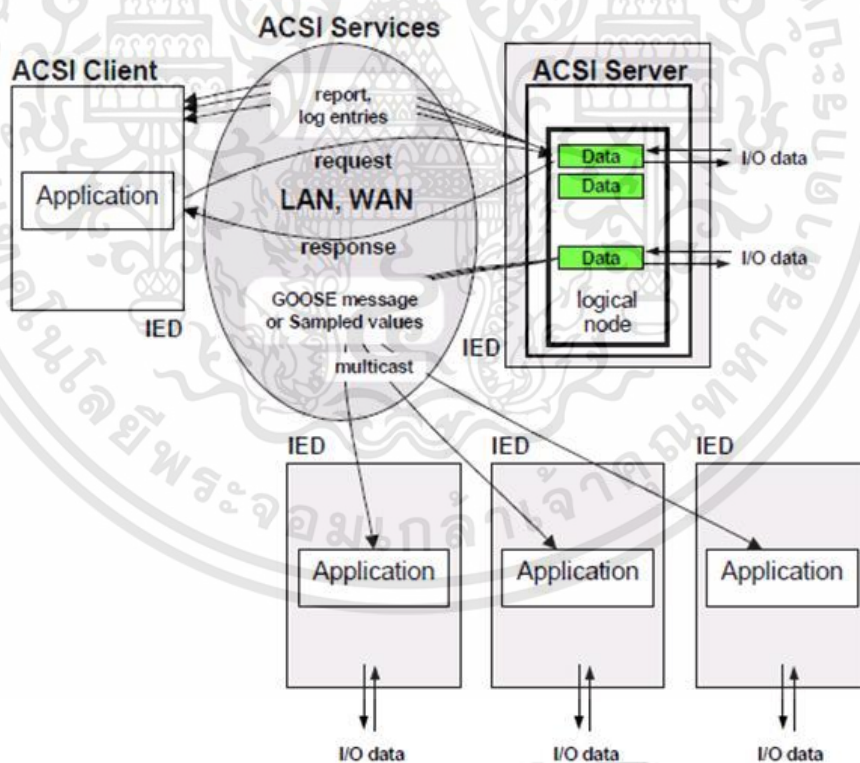
ระบบสื่อสารตามมาตรฐาน IEC-61850 ในสถานีย่อยไฟฟ้านั้น เป็นเทคโนโลยีสื่อสารที่เกี่ยวข้องกับโปรโตคอล มาตรฐาน IEC-61850 อนุญาตให้มีการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ทางด้านทุติยภูมิ (Secondary Device) ในสถานีย่อยแบบเพียร์ทูเพียร์ (Peer-to-peer) ซึ่งแต่ละอุปกรณ์จะมีสิทธิเท่าเทียมกัน โดยการสื่อสารดังกล่าวใช้การบริการสื่อสารที่เรียกทางเทคนิคว่า GSE (Generic Substation Event) ซึ่งจะมีความเร็วสูงและมีความเชื่อถือได้เพียงพอในการป้องกันความผิดพลาด หนึ่งในข้อความที่สำคัญที่สุดในการบริการแบบ GSE นั้นคือ ข้อความ GOOSE (Generic Object Oriented Substation Event) และเพื่อจะทำงานได้มีประสิทธิภาพดีขึ้น

ในปัจจุบันมาตรฐานสื่อสารแบบสากล สำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ทำงานภายใต้สภาพแวดล้อมสถานีย่อยไฟฟ้าที่ถูกนำมาใช้งานมากที่สุด คือ มาตรฐาน IEC (International Electrotechnical Commission) โดยมีหนึ่งในมาตรฐานที่สำคัญคือ IEC-61850 ซึ่งได้ถูกเผยแพร่และใช้งานอย่างกว้างขวางในเรื่องการสื่อสาร, ความคงทน และวิธีการแลกเปลี่ยนข้อมูลที่ใช้ภายในสถานีย่อย แต่อย่างไรก็ตาม มาตรฐาน IEC-61850 นั้นถ้าเทียบกับมาตรฐานอื่นก่อนหน้าก็ถือว่าเป็นมาตรฐานใหม่โดยมีหนึ่งในเป้าหมายหลักคือ ต้องการทำให้มั่นใจได้ว่าอุปกรณ์ทางด้านทุติยภูมิที่มาจากต่างผู้ผลิตสามารถทำงานร่วมกันได้ (Interoperability) โดยเฉพาะสำหรับเหตุการณ์ หรืออีเวนต์ (Event) ที่มีความสำคัญสูง เช่น ระบบป้องกันของอุปกรณ์นั้นทำงาน ซึ่งเมสเซจ GOOSE จะถูกใช้ในการแลกเปลี่ยนข้อมูลสำหรับงานที่มีความสำคัญสูงบนเครือข่ายท้องถิ่นแบบอีเทอร์เน็ต (Ethernet)

อุปกรณ์ทางด้านทุติยภูมิในสถานีย่อย ยกตัวอย่างเช่น รีเลย์ป้องกัน ได้ถูกพัฒนาเรื่อยมาเรียลไทม์ อิเล็กทรอนิกส์ มาเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อัจฉริยะ ที่เรียกว่า IED (Intelligent Electronic Device) ที่ใช้ความสามารถของไมโครคอนโทรลเลอร์สมัยใหม่ในการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ IED ด้วยกัน ถ้ากล่าวไปแล้วยังมีอีกเทคโนโลยีที่สำคัญ คือเทคโนโลยีอีเทอร์เน็ตซึ่งมีบทบาทหลักในการพัฒนาการสื่อสารในสถานีย่อยโดยเฉพาะอุปกรณ์สวิตช์อีเทอร์เน็ต (Ethernet Switch) แบบ Layer-3 ซึ่งความสามารถของ

เครือข่ายท้องถิ่นแบบเสมือน (Virtual LAN:VLAN) นั้นเพิ่มความเร็วในการส่งข้อมูล และการควบคุมการไหลข้อมูลที่ตีขึ้นอย่างมาก จนทำให้อีเทอร์เน็ตกลายเป็นเทคโนโลยีที่เชื่อถือได้สูงและเหมาะกับระบบงานแบบเวลาจริงได้

มาตรฐาน IEC-61850 ได้เตรียมการบริการสื่อสารแบ่งเป็นสองกลุ่มหลักระหว่างแต่ละเอนทิตี (Entity) ภายในระบบสถานีย่อยอัตโนมัติ (SAS: Substation Automation System) โดยกลุ่มแรกจะใช้หลักการไคลเอนต์เซิร์ฟเวอร์ (Client-Server) ซึ่งเป็นการบริการที่เหมาะสมกับการรายงานเหตุการณ์ (Reporting) และการสวิตชิงจากระยะไกล (Remote Switching) ซึ่งไม่มุ่งเน้นการรับรู้แบบเวลาจริง สำหรับการบริการกลุ่มที่สองใช้หลักการแบบเพียร์ทูเพียร์ เหมาะกับการสื่อสารของระบบงานที่มีความวิกฤติทางด้านเวลา เช่น การสื่อสารระหว่าง IED เพื่อระบบป้องกัน หรือ ระบบอัตโนมัติความเร็วสูง ตามเอกสาร ส่วน IEC61850-8-1 ระบุว่า GOOSE นั้นถูกอนุญาตให้ส่งแบบบรอดคาสต์แบบเจาะจงกลุ่มผู้รับ (Multicast) ภายในเครือข่ายท้องถิ่นได้ ทำให้หนึ่งสัญญาณสามารถส่งให้หลาย IED ทำงานพร้อมกันได้ ยกตัวอย่าง การทำงานของฟังก์ชัน CBF (Circuit-breaker Failure)

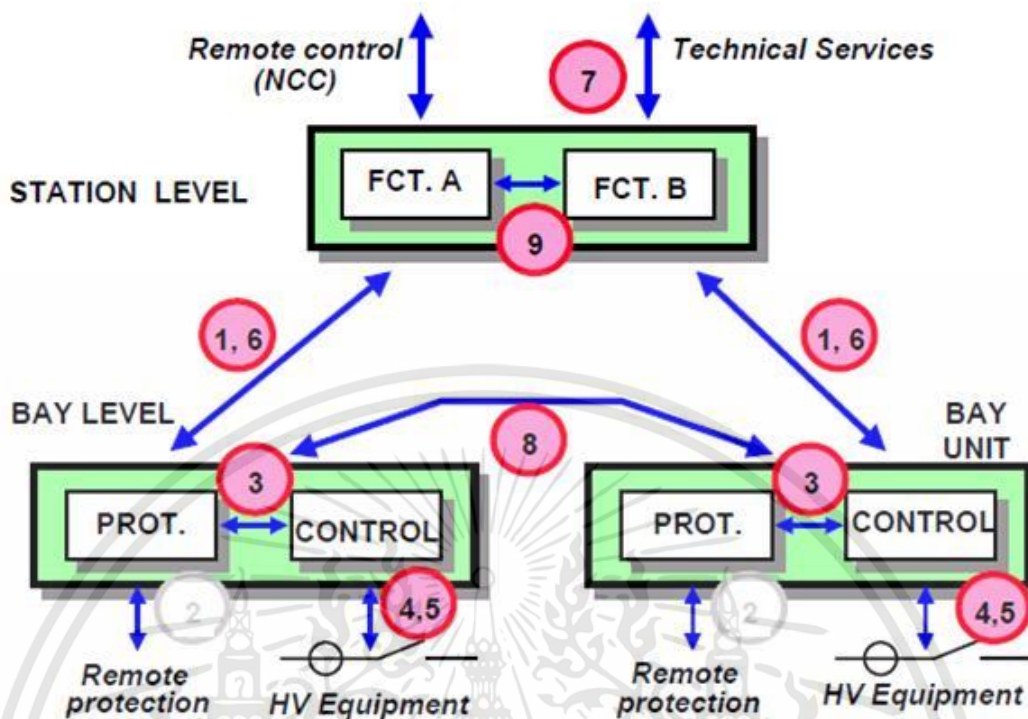


รูปที่ 3.1 แผนผังการบริการ ACSI

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สิ่งหนึ่งที่สำคัญนั้นคือวิธีการเชื่อมต่อแบบโลจิกที่เป็นการเชื่อมต่อภายในซอฟต์แวร์ ที่เรียกว่า ACSI (Abstract Communication Service) ซึ่งแสดงในรูปที่ 3.1 จะถูกควบคุมด้วยเอกสาร ส่วน IEC61870-7-2 ซึ่งนิยามการบริการพื้นฐานสำหรับอุปกรณ์ IED ในสถานีย่อย และได้นิยาม 2 กลุ่มการสื่อสารทั้งแบบ ไคลเอนต์เซิร์ฟเวอร์ และเพียร์ทูเพียร์ สำหรับการบริการแบบ GSE นั้นให้ความเร็วและความเชื่อถือได้แบบกระจายวงกว้างทั้งข้อมูลแบบอินพุตและเอาต์พุต บนพื้นฐานหลักการพัลลิกเซอร์/ซบสไครเบอร์ (Publisher/Subscriber) เทียบเคียงระหว่างผู้ผลิตวารสารและผู้รับวารสาร วิธีการดังกล่าวสนับสนุนในการแจ้งเหตุการณ์ในสถานีย่อยแบบกระจายให้มากกว่าหนึ่งอุปกรณ์ผ่านการใช้บริการมัลติคาสต์และบรอดคาสต์ระหว่างซึ่งกันและกัน โดยมี 2 ระดับควบคุม (Control Class) และโครงสร้างของเมสเซจที่ถูกนิยามในมาตรฐาน นั่นคือ ข้อความ GSSE (Generic Substation State Event) ที่สามารถส่งสถานะแบบลักษณะคู่บิต (Bit Pair) และเมสเซจ GOOSE (Generic Object Oriented Substation Event) ที่สามารถส่งข้อมูลในลักษณะชุดของข้อมูล หรือ ดาต้าเซต (Data-Set) ที่มีระเบียบแบบแผนและข้อมูลที่มากกว่าและปัจจุบันถูกใช้งานแทนที่ GSSE เกือบ 100% ขอบเขตของการสื่อสารสำหรับมาตรฐาน IEC-61850 และการเชื่อมต่อทางโลจิกจะแสดงที่หน้า 13 ของส่วนเอกสาร IEC61850-1 โดยได้ระบุว่า การเชื่อมต่อแบบโลจิกที่ 8 ถูกใช้สำหรับการแลกเปลี่ยนข้อมูลโดยตรงระหว่างเบย์ (เพียร์ทูเพียร์) แต่อย่างไรก็ตามเมสเซจ GOOSE ก็ยังอาจถูกใช้ระหว่างอุปกรณ์เบย์เลเวลกับสแตชันเลเวล ดังแสดงในรูปที่ 3.2

IEC-61850 เป็นมาตรฐานสากลสำหรับการสื่อสารในสถานีย่อย ช่วยให้สามารถบูรณาการการป้องกัน การควบคุม การวัดและการตรวจสอบทั้งหมดภายในสถานีย่อยและยังมีวิธีการป้องกันการใช้งานสถานีไฟฟ้าด้วยความเร็วสูง การใช้งานที่ครอบคลุมช่วยให้สามารถรวมรีเลย์เข้ากับระบบย่อยสลายอัตโนมัติของ IEC-61850 และในเวลาเดียวกันจะช่วยให้สามารถ เชื่อมต่อกับหน่วยการรวมต่างๆ ของผู้ผลิตต่างๆผ่านทางบัสกระบวนการ IEC-61850 ซึ่งรวมเอา ความสะดวกสบายของอีเทอร์เน็ตเข้ากับประสิทธิภาพและความปลอดภัยซึ่งเป็นสิ่งจำเป็นในสถานีไฟฟ้าย่อยในปัจจุบัน รีเลย์ที่เปิดใช้งาน IEC-61850 จะติดตั้งการดีอีเทอร์เน็ตแบบรวมที่ให้ทั้งทองแดงและอีเทอร์เน็ตเบอร์ ไม่มีตัวแปลงภายนอกหรือตัวแปลงข้อมูลที่เป็นและต้องมีอุปกรณ์ Ethernet มาตรฐานเท่านั้นเช่นสวิตช์และสวิตช์เกรด



รูปที่ 3.2 ฟังก์ชันของการบริการ ACSI

### 3.6 การสื่อสารแบบอนุกรม

การสื่อสารแบบอนุกรมนับว่ามีความสำคัญต่อการใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์มาก เพราะสามารถใช้เป็นพินท์และจอภาพของ PC เป็นอินพุตและเอาต์พุตในการติดต่อหรือควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ด้วยสัญญาณอย่างน้อยเพียง 3 เส้นเท่านั้น คือ สายส่งสัญญาณ TX, สายรับสัญญาณ RX และสาย GND อัตราการส่งข้อมูล (Baud rate) หรือความเร็วของการรับส่งข้อมูล เป็นจำนวนบิตต่อวินาทีเช่น 300, 1200, 2400, 4800, 9600, 14400, 19200, 38400, 56000 เป็นต้น การเลือกอัตราการส่งข้อมูลขึ้นอยู่กับชนิดของสายสัญญาณ, ระยะทาง, และปริมาณสัญญาณรบกวน รูปแบบการสื่อสารแบบอนุกรมมีด้วยกันอยู่ 2 แบบ คือแบบซิงโครนัส (Synchronous) และแบบอะซิงโครนัส (Asynchronous) การสื่อสารแบบซิงโครนัสจะมีสัญญาณนาฬิกาเป็นตัวกำหนดจังหวะเวลาการส่งข้อมูลร่วมอยู่ด้วยอีกเส้นหนึ่ง ใช้คู่กับสัญญาณข้อมูล ตัวอย่างเช่น การส่งสัญญาณจากคีย์บอร์ด เป็นต้น การสื่อสารแบบอะซิงโครนัส (Asynchronous) เป็นการรับส่งข้อมูล โดยที่ไม่จำเป็นต้องมีสัญญาณนาฬิกาไปด้วย แต่จะใช้ให้ตัวส่งและตัวรับมีอัตราส่งข้อมูลที่เท่ากัน

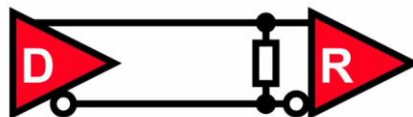
RS-232 ใช้เทคนิคสัญญาณรับส่งแบบคอมมอน (Common Mode) สัญญาณรับส่งแบบคอมมอนนั้นจะใช้สัญญาณกราวด์ (Ground Signal) เป็นตัวเปรียบเทียบ ปัญหาจะเกิดขึ้นเมื่อระดับสัญญาณ

กราวด์ของตัวรับและตัวส่งไม่เท่ากัน ยิ่งระดับสัญญาณแตกต่างกันมากเท่าไร ก็ยิ่งมีผลต่อความผิดพลาดในการสื่อสารมากขึ้นเท่านั้น เพราะการตีความข้อมูลที่ได้รับเข้ามาว่าเป็นศูนย์หรือหนึ่งจะดูจากระดับความแตกต่างระหว่างสัญญาณกราวด์กับสัญญาณข้อมูลที่ได้รับเข้ามา และยังเมื่อมีสัญญาณรบกวน สอดแทรกเข้ามาในสายสัญญาณมากเท่าไร ก็ยิ่งทำให้การตีความสัญญาณมีโอกาสผิดพลาดสูงมากยิ่งขึ้น หรือหมายถึงระดับความผิดพลาดในการรับส่งข้อมูลจะสูงขึ้นจนไม่สามารถสื่อสารกันได้ หรือต้องลดระดับความเร็วในการสื่อสารลงมา

RS-485 เป็นหนึ่งในมาตรฐานการสื่อสารแบบอนุกรม (Serial Communication) ที่ถูกกำหนดขึ้นมาโดยกลุ่มพันธมิตรอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ในประเทศสหรัฐอเมริกา (Electronic Industries Alliance (EIA)) เพื่อตอบสนองต่อความต้องการใช้งานที่ต้องการเชื่อมต่ออุปกรณ์หลายๆ ตัวบนข่ายสายเดียวกัน โดยมีระยะทางการสื่อสารที่ไกลขึ้น และมีความเร็วรับส่งข้อมูลที่สูงขึ้น เมื่อเทียบกับมาตรฐานการสื่อสาร RS-232 เหตุผลที่การสื่อสาร แบบ RS-485 สามารถรับส่งสัญญาณข้อมูลได้ไกลขึ้นและเร็วขึ้น เพราะ RS-485 ใช้เทคนิคสัญญาณรับส่งแบบดิฟเฟอเรนเชียล (Differential Mode) จะไม่ใช่สัญญาณกราวด์เป็นระดับอ้างอิงหรือเปรียบเทียบ แต่จะดูที่ความต่างของสัญญาณของคู่สายเป็นสำคัญ ทำให้ปัญหาเรื่องความแตกต่างของสัญญาณกราวด์ระหว่างอุปกรณ์รับและอุปกรณ์ส่งหมดไป เพราะไม่ถูกนำมาใช้อ้างอิง และถ้าหากคู่สายที่ใช้รับส่งสัญญาณพันกันเป็นเกลียวก็จะยิ่งส่งผลให้สัญญาณรบกวนจากภายนอกที่สอดแทรกเข้ามาในคู่สายก็จะถูกกำจัดออกไปได้โดยง่าย ทำให้การสื่อสารแบบ RS-485 ทนต่อสัญญาณรบกวนภายนอกได้สูง สามารถรับส่งสัญญาณได้ไกลขึ้นและเร็วขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเทคนิคสัญญาณรับส่งแบบคอมมอน

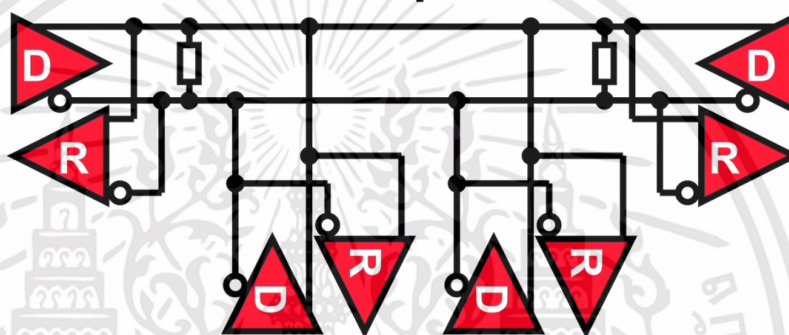
การสื่อสารแบบ RS-232 เป็นการเชื่อมต่อเป็นจุดต่อจุด (Point to point) ซึ่งจะต่ออุปกรณ์ส่งกับตัวรับข้อมูลเพียงชุดเดียวดังรูปที่ 3.3 แต่การสื่อสารแบบ RS-485 มีลักษณะการเชื่อมต่อเป็นแบบหลายจุด (Multi-point) หรือ Multi-drop ดังรูปที่ 3.4 การต่อแบบหลายจุดนี้ทำให้สามารถมองสายสัญญาณเป็นบัสนำสัญญาณได้ (Signal Bus) จำนวนคอมพิวเตอร์หรืออุปกรณ์ที่สามารถอยู่บน RS-485 บัสหนึ่งถูกกำหนดไว้ที่ 32 อุปกรณ์ ในกรณีที่ต้องการเพิ่มจะต้องมีตัวทวนสัญญาณ (Signal Repeater) หรือใช้ตัวส่ง-รับสัญญาณที่มีอิมพีแดนซ์สูงขึ้น ซึ่งเราอาจเพิ่มจำนวนจุดเชื่อมต่อขึ้นได้ถึง 128 จุด ความยาวของสายสัญญาณตามมาตรฐาน RS-485 นี้สามารถยาวได้ถึง 1.2 กิโลเมตร การสื่อสารจะเป็นแบบสองทางไม่พร้อมกัน (Half Duplex) คือการส่งข้อมูลและรับข้อมูลแบบสลับกัน เมื่อด้านหนึ่งส่งข้อมูล อีกด้านหนึ่งเป็นตัวรับข้อมูล ไม่สามารถรับส่งในเวลาเดียวกันได้

## Point-to-Point



รูปที่ 3.3 การเชื่อมต่ออุปกรณ์สื่อสาร RS-232

## Multi-point



รูปที่ 3.4 การเชื่อมต่ออุปกรณ์สื่อสาร RS-485

### 3.7 การแก้ปัญหาระดับแรงดันเกินและแรงดันตกด้วยระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

แรงดันไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาตามความเปลี่ยนแปลงของปริมาณการใช้ไฟฟ้า ปริมาณการส่งไฟฟ้าในสายส่ง การควบคุมของศูนย์ควบคุมระบบไฟฟ้า และการเกิดเหตุฉุกเฉินในระบบ เนื่องจากผู้ใช้ไฟฟ้าต้องการให้คุณภาพแรงดันไฟฟ้าที่จุดเชื่อมต่อเป็นไปได้ตามเกณฑ์ที่ตกลง ดังนั้นจึงเป็นหน้าที่ของศูนย์ควบคุมที่จะต้องควบคุมให้แรงดันเป็นไปตามข้อตกลง การควบคุมแรงดันเป็นปัญหาของแต่ละพื้นที่ดังนั้นการแก้ปัญหาจึงต้องแก้เป็นพื้นที่ โดยจัดให้มีแหล่งรับจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนให้เพียงพอเพื่อควบคุมแรงดันไฟฟ้าให้ได้ตามที่กำหนด เราสามารถกำหนดปัญหาออกได้เป็น 2 ช่วง คือ ช่วงปกติและช่วงฉุกเฉิน สำหรับแหล่งรับจ่ายกำลังเสมือน แบ่งเป็น 2 ส่วนคือ Static และ Dynamic ในส่วนของ Static ได้แก่ Shunt capacitor และ Reactor ส่วนของ Dynamic เช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้า, SVC, OLTC ที่ทำงานโดยอัตโนมัติ เป็นต้น ซึ่งทางศูนย์ควบคุมต้องจัดทำข้อมูลติดตามความพร้อมใช้งานของอุปกรณ์ และเขียนขั้นตอนการควบคุม อุปกรณ์ให้เหมาะสมกับการรองรับในสภาวะปกติและฉุกเฉิน ซึ่งอาจนำไปสู่การเกิด Voltage collapse และ Cascade tripping ซึ่งจะทำให้เกิดไฟดับเป็นบริเวณกว้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันไฟฟ้าเป็นหนึ่งในตัวชี้วัดคุณภาพไฟฟ้าที่ส่งให้ผู้ใช้ไฟฟ้า การส่งกระแสไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าที่อยู่ห่างไกลจะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งมาก ส่งผลให้แรงดันที่ปลายสายส่งลดลงต่ำกว่าค่ามาตรฐาน การควบคุมแรงดันไฟฟ้าทำได้หลายวิธี เช่น การควบคุมด้วยอุปกรณ์ควบคุม/ชดเชยแรงดันไฟฟ้าด้วย Capacitor Bank หรือ Shunt Reactor การควบคุมที่แรงดันที่ขั้วของโรงไฟฟ้าผ่านระบบ Automatic Voltage Regulator (AVR) เป็นต้น

การติดตั้ง Capacitor Bank หรือตัวเก็บประจุไฟฟ้าขนาดใหญ่จำนวนหลายชุด ที่ใส่ขนานเข้ามาในระบบไฟฟ้า ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่สร้างกำลังไฟฟ้าเสมือนให้กับระบบไฟฟ้า การนำ Capacitor Bank เข้าใช้งานในระบบไฟฟ้าจะส่งผลให้ค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนเพิ่มขึ้น จึงสามารถเพิ่มแรงดันไฟฟ้าได้ และในทางกลับกัน หากต้องการให้แรงดันไฟฟ้าในระบบลดลง จะใช้วิธีปลด Capacitor Bank ออกจากระบบ อีกทั้งยังทำหน้าที่ปรับค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ (Power Factor) ของระบบให้มีค่าสูงขึ้น เพื่อที่จะไม่ต้องเสียค่าปรับและลดกำลังงานสูญเสียในระบบ ส่วนประกอบภายใน Capacitor Bank ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์ควบคุมค่าตัวประกอบกำลัง (PF. Controller) ตัวเก็บประจุไฟฟ้า (Capacitor) และอุปกรณ์ตัดต่อตัวเก็บประจุไฟฟ้า (Magnetic Contactor) โดยจำนวนหรือขนาดของคาปาซิเตอร์ที่ต้องการต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับค่ากำลังงานเสมือนที่เกิดขึ้นในระบบในขณะนั้น โดย Power Factor Controller จะทำการตรวจวัดค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ของระบบและจะสั่งการให้ Magnetic Contactor ต่อหรือปลดคาปาซิเตอร์จากระบบเพื่อให้ได้ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ตามต้องการ

Shunt Reactor เป็นอุปกรณ์ ดูดซับ Q ชนิดหนึ่ง การนำมาใช้งานจะส่งผลให้ค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนในระบบไฟฟาลดลง จึงสามารถลดระดับแรงดันไฟฟ้าได้ และในทางกลับกันหากต้องการให้แรงดันไฟฟ้าในระบบเพิ่มขึ้น ก็สามารถปลด Shunt Reactor ออกจากระบบไฟฟ้า ซึ่งคุณสมบัติของ Shunt Reactor และ Capacitor Bank ตรงข้ามกัน

Static VAR Compensator (SVC) เป็นอุปกรณ์ทางด้าน Power System Stabilizer (PSS) ชนิดหนึ่ง อุปกรณ์ชนิดนี้มีคุณสมบัติพิเศษคือสามารถ Generate Q และ Absorb Q ให้แก่ระบบเพื่อการปรับปรุงค่าแรงดันไฟฟ้าได้ คุณสมบัติของ SVC คือทำงานเพื่อรักษาเสถียรภาพหรือเพิ่มค่าเสถียรภาพของระบบ เพื่อให้ระบบมีความมั่นคงมากขึ้น โดยออกแบบอุปกรณ์ควบคุมเป็นแบบ Solid State Shunt Capacitive และ Shunt Reactor มีความสามารถปรับค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนอย่างต่อเนื่อง เป็นอุปกรณ์ที่ช่วยให้ระบบมีความมั่นคง อุปกรณ์นั้นประกอบด้วย ตัวเก็บประจุขนาน และรีแอคเตอร์ขนาน โดยมี Thyristor Switches เป็นตัวควบคุมการจ่ายกำลังรีแอคทีฟ

### 3.8 บทสรุป

บทที่ 3 ได้กล่าวถึงสถานีไฟฟ้าอัจฉริยะซึ่งสามารถรองรับการเชื่อมต่อสื่อสารข้อมูลของอุปกรณ์ต่างๆ ผ่านเครือข่าย ตามมาตรฐาน IEC-61850 โดยจะทำงานร่วมกันเป็นโครงข่ายทั้งระบบ ซึ่งเป็นวิธีการในการแก้ปัญหาระดับแรงดันเกินและแรงดันตกด้วยระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ ทั้งนี้จะนำหลักการดังกล่าวมาใช้เป็นแนวทางในการออกแบบการเชื่อมต่อระหว่างสถานีไฟฟ้าและการผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือนของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์



## บทที่ 4

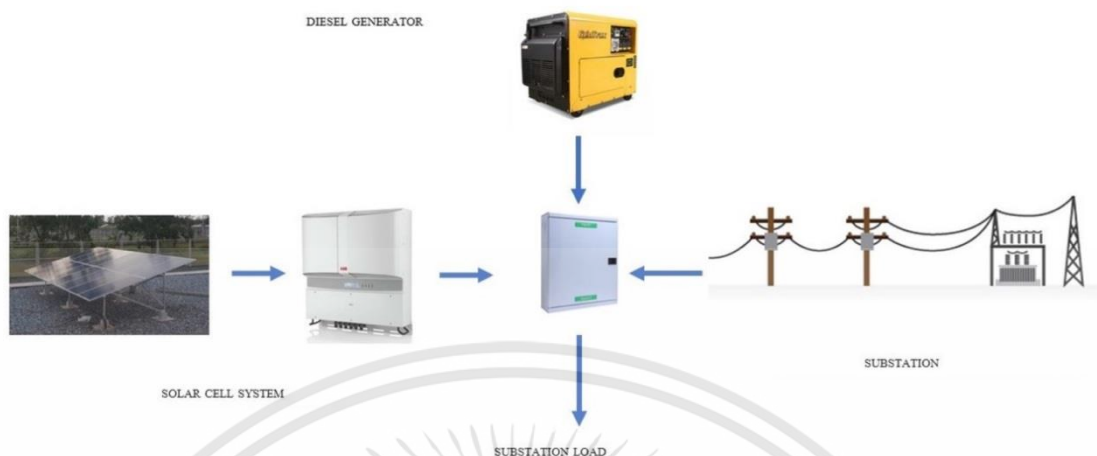
### การออกแบบการทดลอง

#### 4.1 บทนำ

ในปัจจุบันมีการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์เป็นจำนวนมาก และยังมีทิศทางการติดตั้งที่เพิ่มขึ้นอีกด้วย เนื่องจากระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์นั้นมีความคุ้มค่าในการลงทุน แต่จากปัญหาที่ได้พบเห็นในระบบไฟฟ้าที่ก่อนหน้านี้ได้กล่าวมานั้นคือ แรงดันไฟฟ้าในระบบไม่มีเสถียรภาพ บางตำแหน่งในระบบไฟฟ้ามีแรงดันต่ำกว่ามาตรฐาน ทำให้องค์กรที่ทำหน้าที่จำหน่ายไฟฟ้าต้องมีการติดอุปกรณ์บางอย่างเพิ่มเข้าไปในระบบ เพื่อให้ระดับแรงดันไฟฟ้าสูงขึ้น ซึ่งการควบคุมระดับแรงดันนั้นอาศัยหลักการของ Volt/VAR Control คือการควบคุมปริมาณกำลังไฟฟ้าเสมือนในระบบซึ่งมีผลทำให้ระดับแรงดันไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นเมื่อในระบบไฟฟ้ามีการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์อยู่แล้วนั้น อีกทั้งความสามารถในการควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนของโซลาร์อินเวอร์เตอร์ จึงเป็นเรื่องที่ควรพิจารณาหากให้ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ที่อยู่แต่ละตำแหน่งในสายส่งของระบบไฟฟ้า ช่วยกันควบคุมระดับแรงไฟฟ้าไฟฟ้าในระบบให้มีเสถียรภาพที่ดีขึ้น จึงเป็นที่มาของการทดลองนี้ ซึ่งจะทำการทดสอบการควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนของโซลาร์อินเวอร์เตอร์ให้สัมพันธ์กับค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนที่ในระบบไฟฟ้ายังต้องการ โดยการดึงข้อมูลไฟฟ้าของระบบผ่านสถานีไฟฟ้า

#### 4.2 ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ในการทดลอง

ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ทดลองประกอบด้วยอุปกรณ์หลักคือ เซลล์แสงอาทิตย์และอินเวอร์เตอร์ ในการทดลองนี้เป็นการจำลองรักษาเสถียรภาพของแรงดันไฟฟ้าในสถานีไฟฟ้า โดยการให้ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์มีการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนให้กับระบบไฟฟ้าเพื่อชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนที่เกิดขึ้นในระบบ โดยในอุปกรณ์ของระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์นั้น อุปกรณ์ที่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนได้ก็คือโซลาร์อินเวอร์เตอร์ ดังนั้นในการทดลองจะใช้การควบคุมโซลาร์อินเวอร์เตอร์ในโหมดของการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนเป็นหลัก ในการทดลองจะใช้ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีติดตั้งในสถานีไฟฟ้าบัวใหญ่ อำเภอบัวใหญ่ จังหวัดนครราชสีมา ซึ่งมีกำลังติดตั้งของแผงโซลาร์เซลล์ 5 kW ซึ่งแผนภาพการเชื่อมต่อของระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในสถานีไฟฟ้าบัวใหญ่ แสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ในการทดลอง

ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งในสถานีบัวใหญ่ จะมีการติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์ ขนาด 325 W จำนวน 16 แผง และใช้โซลาร์อินเวอร์เตอร์ ยี่ห้อ ABB ขนาด 10 kW 3P แสดงดังรูปที่ 4.2 โดยรายละเอียดคุณลักษณะของโซลาร์อินเวอร์เตอร์ ดังรูปที่ 4.3 นอกจากนี้มีระบบผลิตไฟฟ้าด้วยแสงอาทิตย์แล้วยังมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซลไว้ใช้กรณีไฟฟ้าจากระบบจำหน่ายเกิดการดับขึ้น ทำให้ระบบยังมีพลังงานไฟฟ้าใช้ ซึ่งเกิดจากการผลิตไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซลและระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์



รูปที่ 4.2 โซลาร์อินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

Technical data and types

Type code	PVI-10.0-I-OUTD-400	PVI-12.0-I-OUTD-400
<b>Input side</b>		
Absolute maximum DC input voltage ( $V_{max,abs}$ )	520 V	
Start-up DC input voltage ( $V_{start}$ )	200 V (adj. 120...350 V)	
Operating DC input voltage range ( $V_{dmin}...V_{dmax}$ )	0.7 x $V_{start}...520$ V	
Rated DC input voltage ( $V_{dc}$ )	345 V	
Rated DC input power ( $P_{dc}$ )	10500 W	12300 W
Number of independent MPPT	2 <sup>ch</sup>	
Maximum DC input power for each MPPT ( $P_{MPPTmax}$ )	6800 W	
DC input voltage range with parallel configuration of MPPT at $P_{dc}$	220...470 V	250...470 V
DC power limitation with parallel configuration of MPPT	Linear derating from max to null [470V ≤ $V_{MPPT}$ ≤ 520V]	
DC power limitation for each MPPT with independent configuration of MPPT at $P_{dc}$ , max unbalance example	6800 W [285V ≤ $V_{MPPT}$ ≤ 470V] the other channel: $P_{dc}$ -6800W [155V ≤ $V_{MPPT}$ ≤ 470V]	6800 W [275V ≤ $V_{MPPT}$ ≤ 470V] the other channel: $P_{dc}$ -6800W [220V ≤ $V_{MPPT}$ ≤ 470V]
Maximum DC input current ( $I_{dc,max}$ ) / for each MPPT ( $I_{MPPT,max}$ )	48.0 A / 24.0 A	50.0 A / 25.0 A
Maximum input short circuit current for each MPPT	29.0 A	
Number of DC inputs pairs for each MPPT	2	
DC connection type	Tool Free PV connector WM / MC4	
<b>Input protection</b>		
Reverse polarity protection	Yes, from limited current source	
Input over voltage protection for each MPPT - varistor	2	
Photovoltaic array isolation control	According to local standard	
DC switch rating for each MPPT (version with DC-switch)	32 A / 600 V	
<b>Output side</b>		
AC grid connection type	Three phase 3W or 4W+PE	
Rated AC power ( $P_{ac}@cos\phi=1$ )	10000 W	12000 W
Maximum AC output power ( $P_{ac,max}@cos\phi=1$ )	11000 W <sup>(3)</sup>	12500 W <sup>(4)</sup>
Maximum apparent power ( $S_{max}$ )	11100 VA	13300 VA
Rated AC grid voltage ( $V_{ac}$ )	400 V	
AC voltage range	320...480 V <sup>(1)</sup>	
Maximum AC output current ( $I_{ac,max}$ )	16.0 A	18.0 A
Contributory fault current	25.0 A	
Rated output frequency (f)	50 Hz / 60 Hz	
Output frequency range ( $f_{min}...f_{max}$ )	47...53 Hz / 57...63 Hz <sup>(2)</sup>	
Nominal power factor and adjustable range	> 0.995, adj. ± 0.9 with $P_{dc}=10.0$ kW	> 0.995, adj. ± 0.9 with $P_{dc}=12.0$ kW
Total current harmonic distortion	< 2%	
AC connection type	Screw terminal block, cable gland M40	
<b>Output protection</b>		
Anti-islanding protection	According to local standard	
Maximum AC overcurrent protection	20.0 A	
Output overvoltage protection - varistor	3 plus gas arrester	

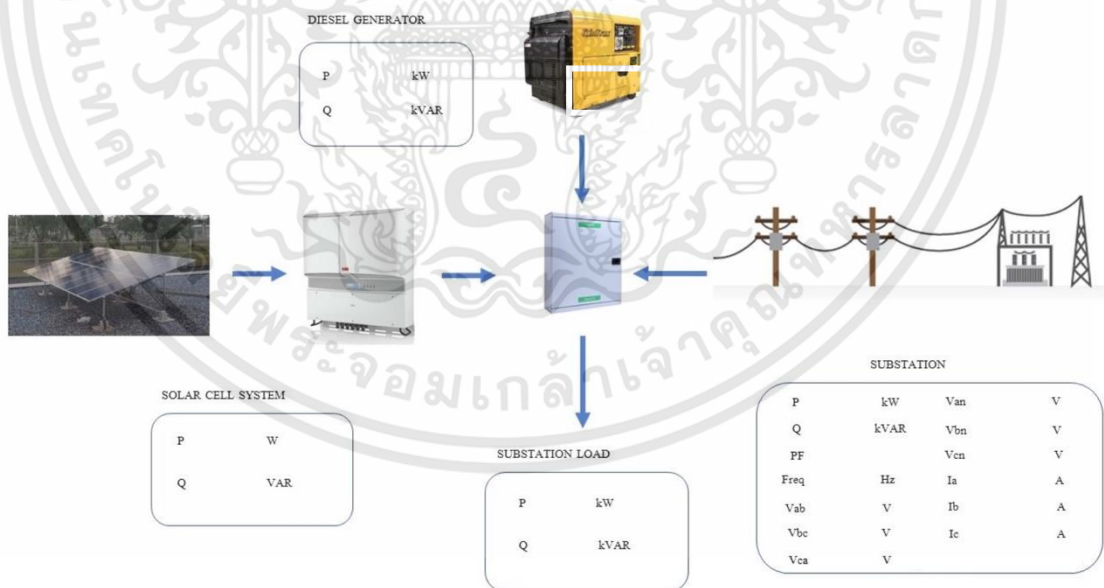
รูปที่ 4.3 รายละเอียดคุณลักษณะของโซลาร์อินเวอร์เตอร์

### 4.3 การสื่อสารระหว่างระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์กับสถานีไฟฟ้า

แผนภาพการเชื่อมต่อของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในสถานีไฟฟ้าบับใหญ่จะเห็นได้ว่า แหล่งจ่ายของระบบไฟฟ้าของโหลดในสถานีไฟฟ้าบับใหญ่ มีอยู่ด้วยกัน 3 แหล่งคือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ดีเซล, ไฟฟ้าระบบจำหน่าย และ ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ ในการทดลองข้อมูลส่วนที่จะใช้คือข้อมูลกำลังไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ และข้อมูลของระบบไฟฟ้า (substation) โดยจะมีการรับค่าข้อมูลของการใช้กำลังไฟฟ้าเสมือน ที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้า เพื่อนำมาควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือน ของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งข้อมูลทางไฟฟ้า ระหว่างระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ และ สถานีไฟฟ้า นั้นจะได้อาจจากการเขียนโปรแกรม ผ่าน PLC (Programable Logic Control) การดึงค่าข้อมูลของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ จะดึงผ่าน Power meter ที่มีการติดตั้งอยู่ที่โซลาร์อินเวอร์เตอร์ ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ตำแหน่งของการติดตั้ง Power Meter

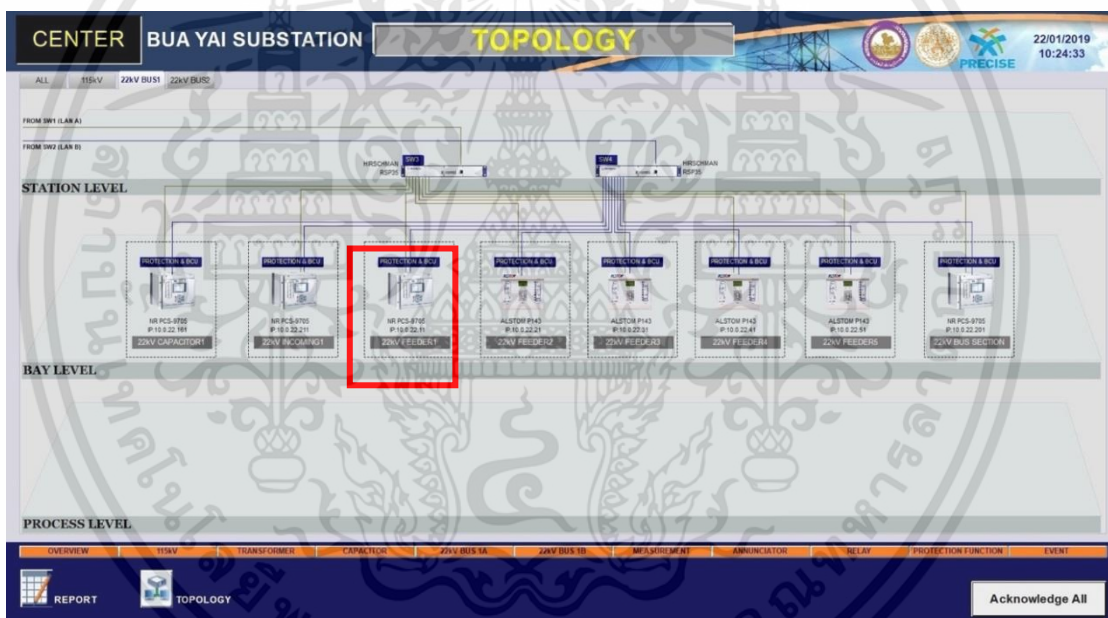


รูปที่ 4.5 ค่าทางไฟฟ้าที่จะมีการแสดงผลผ่านโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สถานีไฟฟ้าบัวใหญ่เป็นสถานีไฟฟ้าสถานีที่ 2 ของประเทศไทยที่ถูกเปลี่ยนจากการสื่อสารของอุปกรณ์ในรูปแบบอนาล็อกมาเป็นแบบดิจิทัล โดยการสื่อสารของอุปกรณ์ในระบบสถานีจะใช้ Protocol IEC-61850 เป็นมาตรฐานในการรับส่งข้อมูล ซึ่งมาตรฐาน IEC-61850 นั้นที่มีความไวและเสถียรภาพในการสื่อสารของแต่ละอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้ามาก

ส่วนของข้อมูลทางไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าจะได้มาจากการดึงข้อมูลผ่าน Gateway ของสถานีไฟฟ้า โดยปกติสถานีไฟฟ้าบัวใหญ่ อ.บัวใหญ่ จ.นครราชสีมา ก็จะมีระดับแรงดันไฟฟ้าในระบบส่งอยู่ 2 ระดับ คือ 115 kV และ 22kV ในการจำลองการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนของโซลาร์อินเวอร์เตอร์ ในการทดลองนี้จะเลือกดึงข้อมูลของ วงจรในระดับแรงดันไฟฟ้า 22kV ซึ่งจำนวนวงจรในระดับแรงดันไฟฟ้า 22kV นั้นมีอยู่ 10 วงจร โดยในการทดลองครั้งนี้จะเลือกมาหนึ่งวงจรคือ วงจรที่ 1 โดยการดึงข้อมูลนั้นจะดึงผ่าน GATEWAY ที่ทำหน้าที่เป็นทางผ่านและรวมข้อมูลทางไฟฟ้าของวงจรที่ 1 ในระบบ 22 kV ดังรูปที่ 4.6

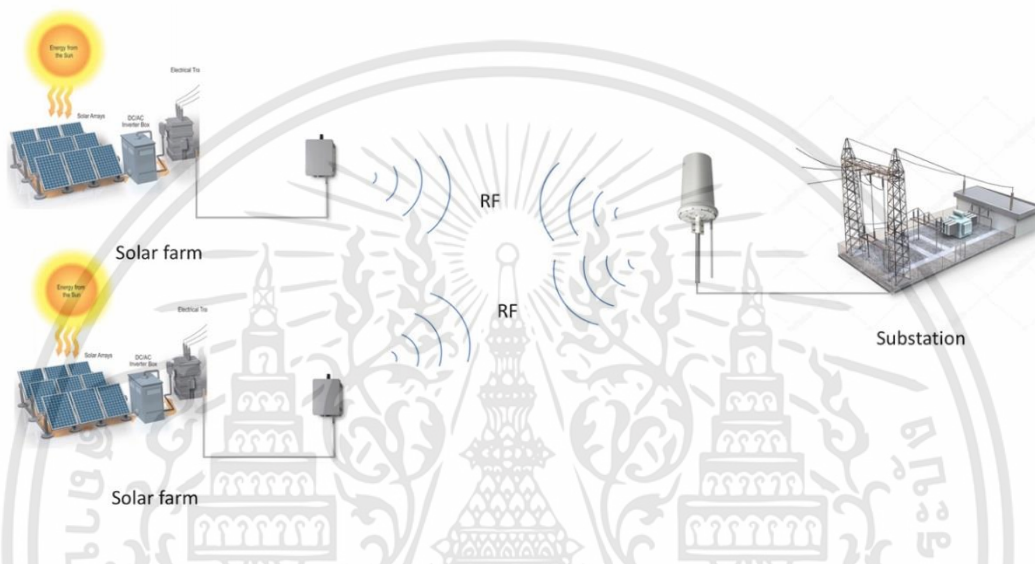


รูปที่ 4.6 Gateway ของระบบ 22kV วงจรที่ 1

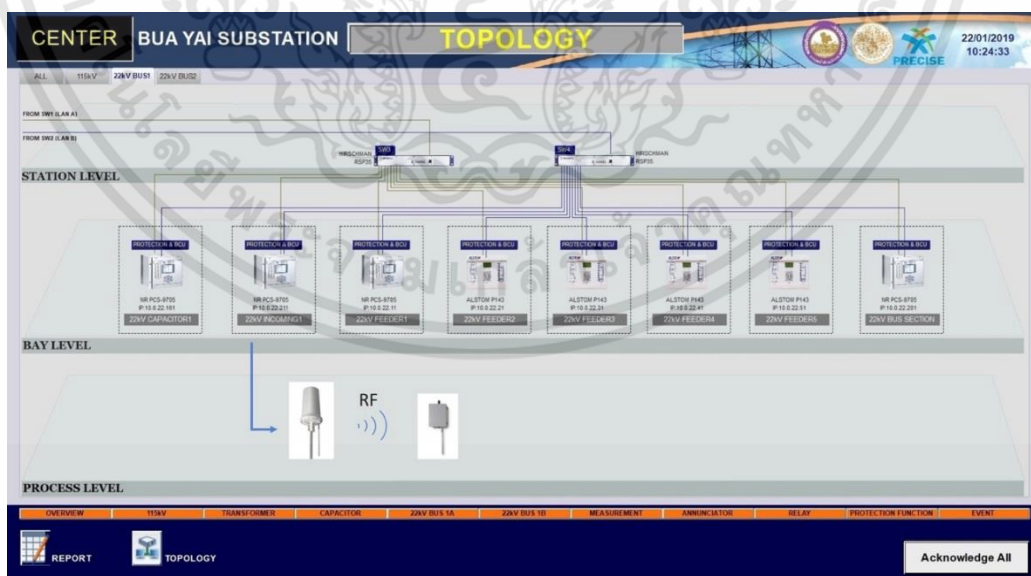
ซึ่งในระบบที่จะใช้ในการสื่อสารข้อมูลระหว่างสถานีไฟฟ้า และระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์นั้น จะอ้างอิงจากระบบที่ใช้จริงในปัจจุบัน คือส่วนใหญ่แล้วตำแหน่งสถานที่ที่มีการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์นั้นจะไม่อยู่ใกล้สถานีไฟฟ้าเสมอไป ทำให้การสื่อสารระหว่างสถานีไฟฟ้ากับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์จำเป็นต้องใช้การสื่อสารของข้อมูลทางสัญญาณไร้สายจะเป็นสิ่งที่เหมาะสมที่สุด โดยให้ตัวกระจายสัญญาณอยู่ที่สถานีไฟฟ้าและอุปกรณ์รับส่งข้อมูลอยู่ที่

ตำแหน่งของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์แต่ละสถานที่ที่มีการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ดังรูปที่ 4.7

จากการที่ข้อมูลการสื่อสารระหว่างสถานีไฟฟ้าและระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์เหมาะสมที่จะสื่อสารกันผ่านทางอากาศมากกว่าทางสายสัญญาณ ดังนั้นในการดึงข้อมูลทางไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้านั้นจะมีการติดตั้งอุปกรณ์รับส่งสัญญาณวิทยุเพื่อใช้ในการสื่อสารดังรูปที่ 4.8



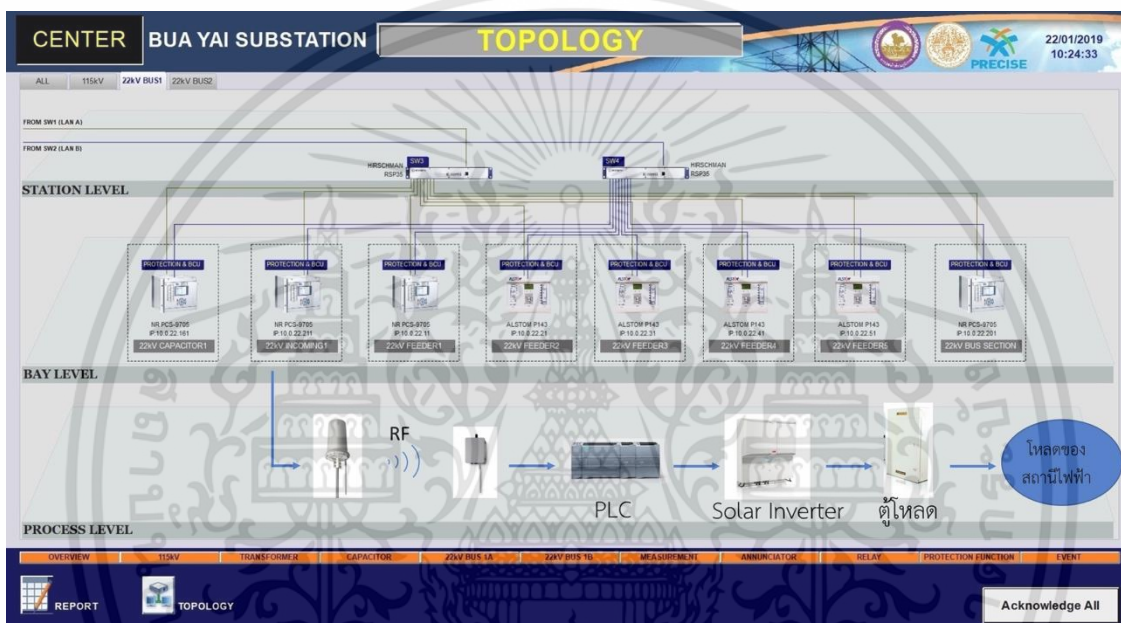
รูปที่ 4.7 การสื่อสารระหว่างสถานีไฟฟ้าและระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์



รูปที่ 4.8 การสื่อสารระหว่างสถานีไฟฟ้าบัวใหญ่และระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสื่อสารของข้อมูลระหว่างสถานีไฟฟ้าและระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ ทางด้านระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์นั้นจะต้องมีอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่รับส่งข้อมูลและควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าของโซลาร์อินเวอร์เตอร์ ในการทดลองนี้อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่นี้คือ PLC(Programable Logic Control) ยี่ห้อ SIEMENS รุ่น S7-1200 ซึ่งครอบคลุมต่อการทำงานในฟังก์ชันทั้งหมดที่จะเกิดขึ้นในการทดลองนี้ ซึ่งไดอะแกรมการสื่อสารระหว่างโซลาร์อินเวอร์เตอร์และสถานีไฟฟ้า ที่ใช้ในการทดลองนี้ดังรูปที่ 4.9



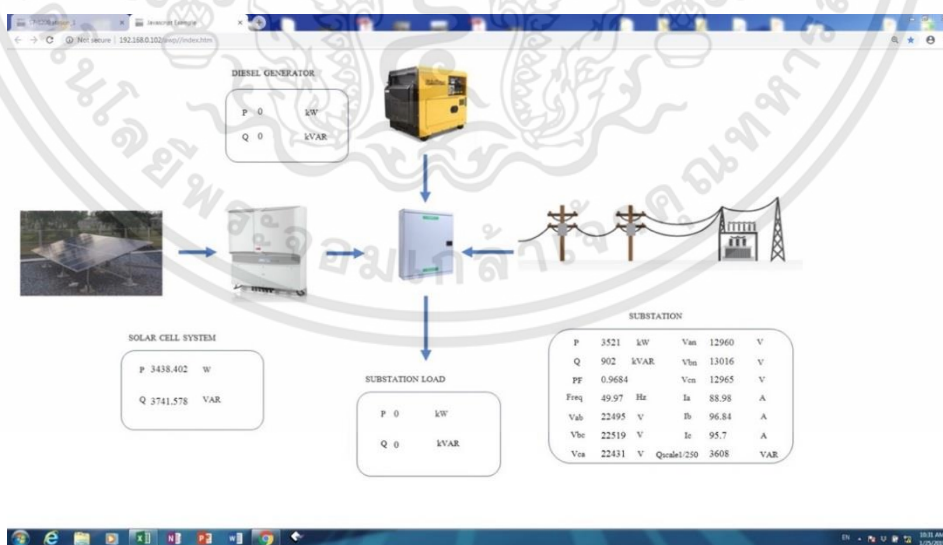
รูปที่ 4.9 ไดอะแกรมการสื่อสารระหว่างโซลาร์อินเวอร์เตอร์และสถานีไฟฟ้า

รูปแบบการสื่อสารของ PLC และ GATEWAY ซึ่งเป็นที่ผ่านทางของข้อมูลของสถานีไฟฟ้าบวใหญ่ จะใช้ Protocol ชนิด MODBUS TCP/IP เป็นการสื่อสารโดยจะให้ทางด้าน GATEWAY ทำหน้าที่เป็น Server และ PLC เป็น Client เพื่อที่ PLC จะไปดึงข้อมูลทางไฟฟ้าจากสถานีไฟฟ้า มาประมวลผลเพื่อใช้ในการควบคุมการทำงานของโซลาร์อินเวอร์เตอร์ต่อไป โดยค่าที่ดึงได้จาก Gateway แสดงดังรูปที่ 4.9 แต่ในการทดลองนี้ใช้เพียงค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนของระบบไฟฟ้าเท่านั้น

GID	Description	Address	Group No.	Group heading
1	3530 [22kV OUT01]P	6	22	Measurement
2	3531 [22kV OUT01]Q	6	22	Measurement
3	3532 [22kV OUT01]COS	6	22	Measurement
4	3533 [22kV OUT01]f	6	22	Measurement
5	3534 [22kV OUT01]Uab Phase AB Amplitude_(repeat1)	6	22	Measurement
6	3535 [22kV OUT01]Ubc Phase BC Amplitude_(repeat1)	6	22	Measurement
7	3536 [22kV OUT01]Uca Phase CA Amplitude_(repeat1)	6	22	Measurement
8	3537 [22kV OUT01]Ua Phase A Amplitude_(repeat1)	6	22	Measurement
9	3538 [22kV OUT01]Ub Phase B Amplitude_(repeat1)	6	22	Measurement
10	3539 [22kV OUT01]Uc Phase C Amplitude_(repeat1)	6	22	Measurement
11	3540 [22kV OUT01]Ia Phase A Amplitude_(repeat1)	6	22	Measurement
12	3541 [22kV OUT01]Ib Phase B Amplitude_(repeat1)	6	22	Measurement
13	3542 [22kV OUT01]Ic Phase C Amplitude_(repeat1)	6	22	Measurement

รูปที่ 4.10 ค่าทางไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าวงจรที่ 1 ที่ดึงได้จาก Gateway

จากข้อมูลค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้มาจากสถานีไฟฟ้ามีค่าสูงประมาณ 500-1000kVAR ซึ่งความสามารถการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนของโซลาร์อินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการทดลองนั้นทำได้ประมาณ 5kVAR เท่านั้น ทำให้การทดลองนี้ต้องลดสัดส่วนของกำลังไฟฟ้าเสมือนที่ได้มาจากวงจรไฟฟ้าที่ 1 ของสถานีไฟฟ้าลง โดยในการทดลองจะลดลง 250 เท่า โดยเรียกชื่อกำลังไฟฟ้าเสมือนที่ถูกลดทอนลงนี้ใหม่ว่า Qscale1/250 และในการทดลองนี้จะมีการเขียนโปรแกรมดึงข้อมูลที่ต้องการแสดงมาแสดงบนเว็บเบราว์เซอร์อีกด้วย ดังรูปที่ 4.11

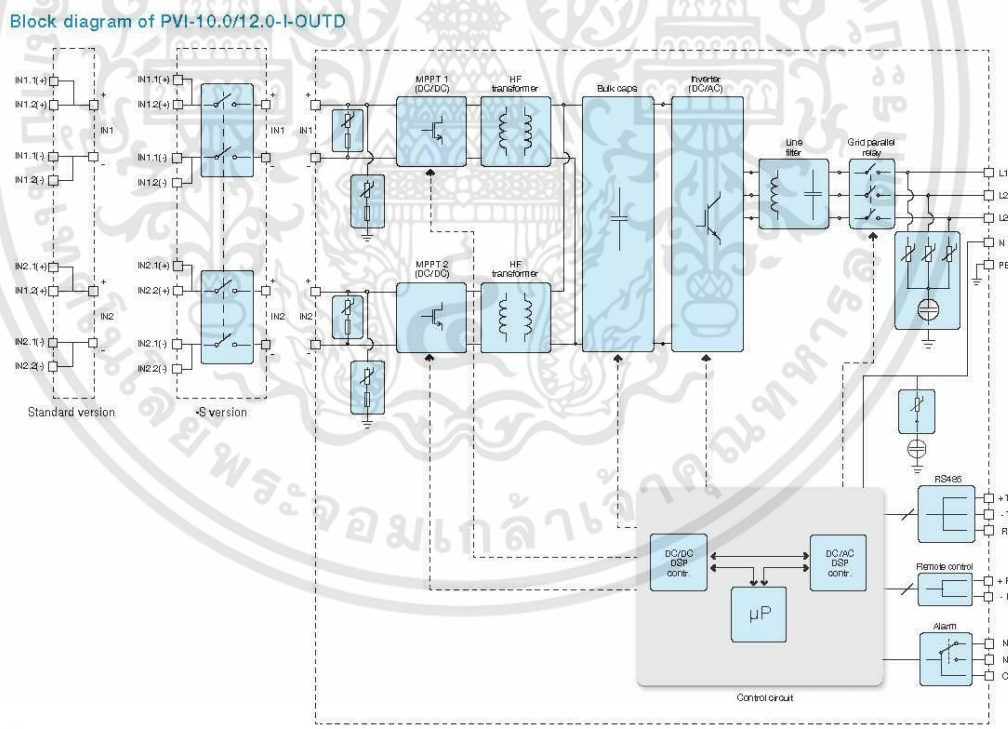


รูปที่ 4.11 หน้าจอแสดงผลของระบบที่เขียนโปรแกรมขึ้นมา

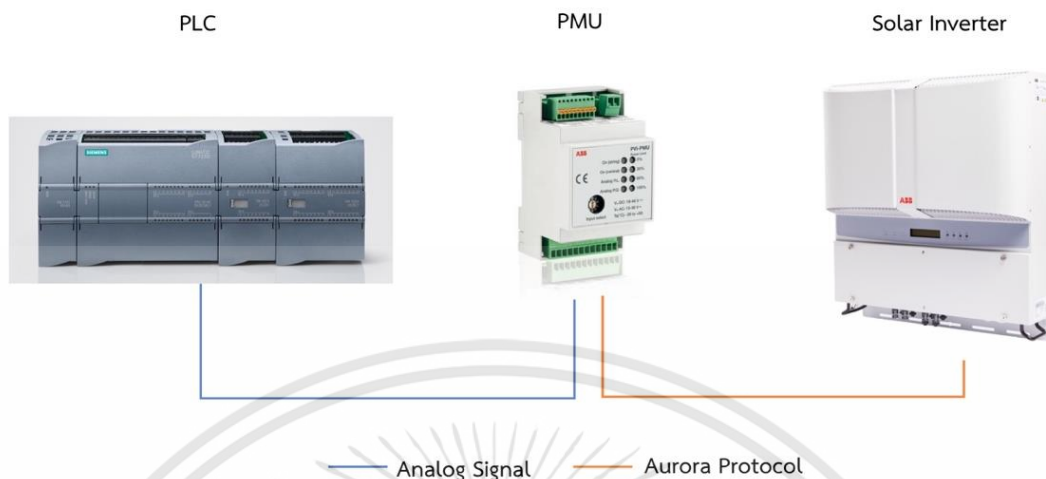
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.4 ระบบควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์

การควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์นั้นก็คือ การควบคุมการทำงานของโซลาร์อินเวอร์เตอร์ ที่ทำหน้าที่ส่งผ่านกำลังไฟฟ้าแรงดันกระแสตรงที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์มาเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ที่แรงดัน 400/230 50Hz เข้าสู่ระบบจำหน่ายของระบบไฟฟ้าในประเทศไทย โดยปกติหน้าที่หลักของโซลาร์อินเวอร์เตอร์นั้นจะทำหน้าที่ส่งผ่านกำลังไฟฟ้าจริง (Active Power) เข้าสู่ระบบไฟฟ้าเพียงเท่านั้น หรือค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าเป็น 1 (Power Factor = 1) แต่ในการทดลองนี้จะเป็นการควบคุมการจ่ายค่ากำลังไฟฟ้าเสมือน (Reactive Power) ของโซลาร์อินเวอร์เตอร์ ให้สัมพันธ์กับปริมาณกำลังไฟฟ้าเสมือน (Reactive Power) ที่ถูกใช้จริงในระบบไฟฟ้าของสถานี่ไฟฟ้า ภายในโซลาร์อินเวอร์เตอร์นั้นจะมีส่วนที่เป็นสวิตซ์ซิ่งที่เป็นตัวหลักในการแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงมาเป็นแรงไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งสามารถที่จะปรับมุมในการสวิตซ์ได้ทำให้สามารถควบคุมปริมาณกำลังไฟฟ้าเสมือนได้ ดังรูปที่ 4.12 ซึ่งความสามารถที่จะจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนนั้นขึ้นอยู่กับพิสัยขนาดกำลังของโซลาร์อินเวอร์เตอร์แต่ละรุ่น แต่ละยี่ห้อ



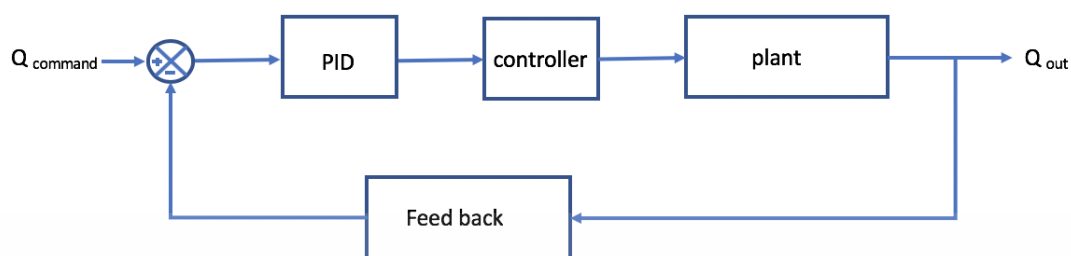
รูปที่ 4.12 ไดอะแกรมอุปกรณ์ภายในโซลาร์อินเวอร์เตอร์



รูปที่ 4.13 ไดอะแกรมการสื่อสารระหว่าง PLC กับโซลาร์อินเวอร์เตอร์

ในการสื่อสารเพื่อควบคุมการทำงานของโซลาร์อินเวอร์เตอร์ของยี่ห้อ ABB นั้นเราไม่สามารถเชื่อมต่อการสื่อสารโดยตรงระหว่าง PLC กับโซลาร์อินเวอร์เตอร์ได้เนื่องจากโซลาร์อินเวอร์เตอร์ของยี่ห้อนี้จะสื่อสารด้วย Protocol ที่เรียกว่า Aurora Protocol ซึ่งเป็น Protocol เฉพาะของทางบริษัท ABB ทำให้ต้องใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า PMU (Power Manager Unit) เป็นตัวกลางในการสื่อสารโดยแปลงสัญญาณอะนาล็อกจาก PLC มาเป็น Aurora Protocol เพื่อที่จะสามารถควบคุมปริมาณการจ่ายค่า Reactive Power ของโซลาร์อินเวอร์เตอร์ได้ดังรูปที่ 4.13

ในการทดลองควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนของโซลาร์อินเวอร์เตอร์ ซึ่งต้องควบคุมค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนที่จ่ายออกมาจากโซลาร์อินเวอร์เตอร์ให้มีค่าเท่ากับค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนที่อ่านค่ามาจากสถานีไฟฟ้า ซึ่งจากขีดจำกัดของโซลาร์อินเวอร์เตอร์ที่ได้กล่าวมาข้างต้นไว้แล้วว่ามีสามารถจ่ายได้แค่ประมาณ 5 kVAR จึงทำให้ในการควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนของโซลาร์อินเวอร์เตอร์จะใช้ Qscale1/250 เป็นค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนที่ใช้อ้างอิง ( $Q_{command}$ ) ในการสั่งการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนของโซลาร์อินเวอร์เตอร์ โดยเขียนเป็นไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 ไดอะแกรมการสื่อสารระหว่าง PLC กับ โซลาร์อินเวอร์เตอร์

#### 4.5 บทสรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงการทดสอบระบบการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนในระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์เข้าสู่ระบบไฟฟ้า เพื่อช่วยการรักษาระดับแรงดันของระบบไฟฟ้าให้มีเสถียรภาพมากขึ้น ซึ่งในการทดลองครั้งนี้เป็นเพียงการจำลองการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนจากระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีขนาดเล็ก แต่มีรูปแบบการทดลองที่เหมือนกับระบบที่จะใช้จริง ครอบคลุมทั้งด้านการสื่อสารภายในสถานีไฟฟ้าที่เป็นระบบ IEC-61850 และรูปแบบการควบคุมการผลิตกำลังไฟฟ้าเสมือนของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

## บทที่ 5

### ผลการทดสอบ

#### 5.1 บทนำ

ในบทนี้จะเสนอถึงผลการทดสอบการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ ที่มีความสัมพันธ์กับความต้องการกำลังไฟฟ้าเสมือนในระบบไฟฟ้า โดยจะเริ่มจากการเปรียบเทียบรูปแบบการสื่อสารข้อมูลระหว่างสถานีไฟฟ้ากับอุปกรณ์ควบคุม แบบไร้สายกับมีสายสัญญาณ การตั้งค่าข้อมูลทางไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้า และการควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อให้ได้ทราบที่รูปแบบและวิธีการที่ดี เพื่อเป็นแนวทางในการใช้กับระบบจริงในคราวต่อไป

#### 5.2 การทดสอบการสื่อสารแบบไร้สายระหว่างสถานีไฟฟ้ากับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์

การทดลองข้างต้นเมื่อทำการสื่อสารแบบใช้สายสัญญาณในการสื่อสาร ข้อมูลที่อ่านได้ทางฝั่งตัวรับสัญญาณนั้นอ่านได้ค่าที่ถูกต้องตามค่าที่อ่านได้จากตัวส่งสัญญาณไม่มีความผิดพลาดของข้อมูล เมื่อมาวัดด้านความเร็วในการสื่อสารนั้น ข้อมูลมีความล่าช้าในการอ่านประมาณน้อยกว่า 1 ms ดังรูปที่ 5.1 หลังจากนั้นทำการทดลองการสื่อสารใหม่โดยใช้การสื่อสารแบบไร้สาย พบว่าข้อมูลที่ส่งมาไม่มีความผิดพลาดด้านการรับส่งค่า แต่เมื่อพิจารณาส่วนในการความเร็วในการรับส่งข้อมูลนั้น เกิดความล่าช้าในการอ่านค่าประมาณ 131 ms ดังรูปที่ 5.2 การโปรแกรมการแสดงผลของระบบไฟฟ้าในสถานีไฟฟ้างดังรูปที่ 5.3

```
Microsoft Windows [Version 6.1.7601]
Copyright (c) 2009 Microsoft Corporation. All rights reserved.

C:\Users\suntichai>ping 192.168.0.130

Pinging 192.168.0.130 with 32 bytes of data:
Reply from 192.168.0.130: bytes=32 time<1ms TTL=128
Reply from 192.168.0.130: bytes=32 time<1ms TTL=128
Reply from 192.168.0.130: bytes=32 time<1ms TTL=128
Reply from 192.168.0.130: bytes=32 time<1ms TTL=128

Ping statistics for 192.168.0.130:
    Packets: Sent = 4, Received = 4, Lost = 0 (0% loss),
    Approximate round trip times in milli-seconds:
        Minimum = 0ms, Maximum = 0ms, Average = 0ms

C:\Users\suntichai>
```

รูปที่ 5.1 ข้อมูลความล่าช้าของการสื่อสารแบบมีสายสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Microsoft Windows [Version 6.1.7601]
Copyright (c) 2009 Microsoft Corporation. All rights reserved.

C:\Users\suntichai>ping 192.168.43.7

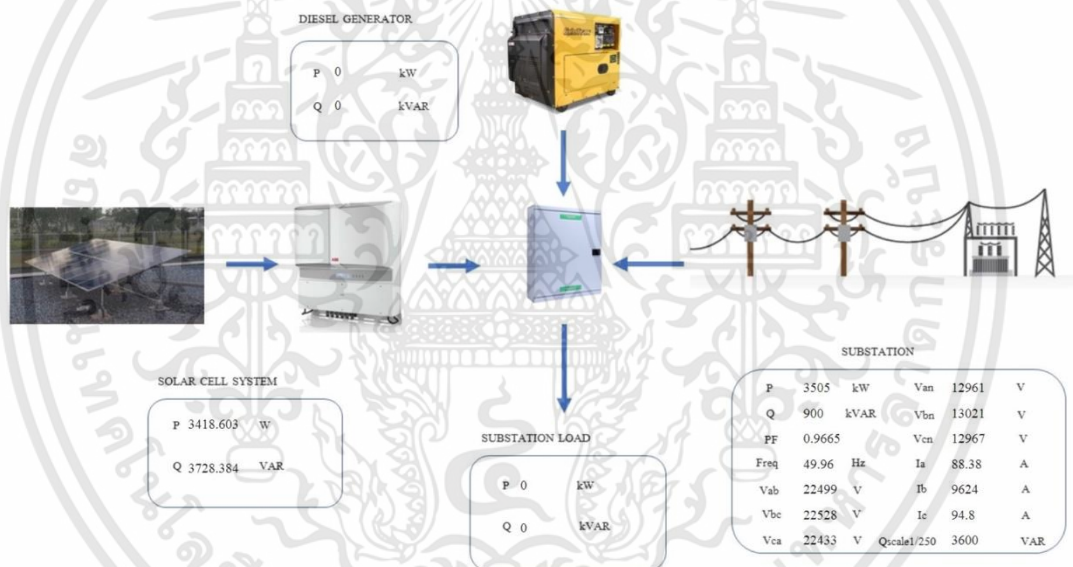
Pinging 192.168.43.7 with 32 bytes of data:
Reply from 192.168.43.7: bytes=32 time=98ms TTL=64
Reply from 192.168.43.7: bytes=32 time=114ms TTL=64
Reply from 192.168.43.7: bytes=32 time=146ms TTL=64
Reply from 192.168.43.7: bytes=32 time=166ms TTL=64

Ping statistics for 192.168.43.7:
    Packets: Sent = 4, Received = 4, Lost = 0 (0% loss),
    Approximate round trip times in milli-seconds:
        Minimum = 98ms, Maximum = 166ms, Average = 131ms

C:\Users\suntichai>

```

รูปที่ 5.2 ข้อมูลความล่าช้าของการสื่อสารแบบไร้สายสัญญาณ



รูปที่ 5.3 โปรแกรมการแสดงผลของระบบไฟฟ้าในสถานีไฟฟ้า

จากการทดสอบเปรียบเทียบการสื่อสารแบบไร้สายและมีสายสัญญาณระหว่างสถานีไฟฟ้ากับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์นั้น ในการสื่อสารแบบไร้สายนั้นจะมีความล่าช้าในการส่งมากกว่าการส่งแบบมีสายสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.3 การทดสอบการควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนของระบบผลิตไฟฟ้าด้วย

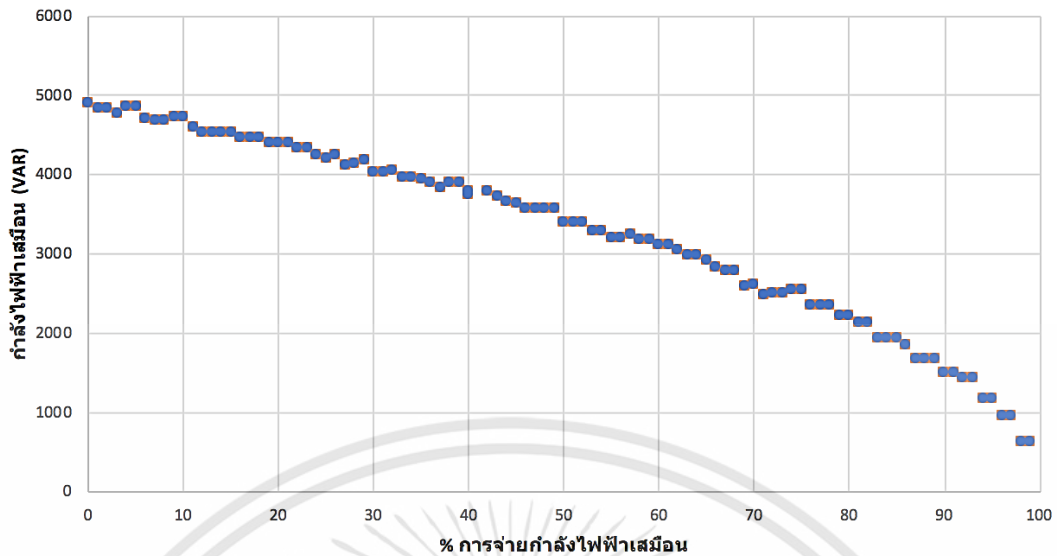
#### พลังงานแสงอาทิตย์

การทดสอบความสามารถการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์นั้น Solar Inverter จะรับคำสั่งเป็นเปอร์เซ็นต์เพื่อที่จะจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนตามคำสั่งเปอร์เซ็นต์นั้นๆ ตามรูปที่ 5.4 โดย plant ในรูปสื่อถึงคุณลักษณะการจ่ายออกของกำลังไฟฟ้าเสมือนของ Solar Inverter ซึ่งในการทดลองก็คือการหาโมเดลของ Solar Inverter นั้นเองเพื่อจะได้นำไปออกแบบระบบควบคุมไว้ขั้นตอนต่อไป การทดลองนี้จะทำการส่งค่าเปอร์เซ็นต์การจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนตั้งแต่ 0 – 100 เปอร์เซ็นต์ เพื่อดูกำลังไฟฟ้าเสมือนที่ถูกจ่ายโดย Solar Inverter และเก็บผลการทดลองดังตาราง ในภาคผนวก ก



รูปที่ 5.4 ไดอะแกรมการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนของโซลาร์อินเวอร์เตอร์

ในการเก็บข้อมูลจะมีการเก็บค่าระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนกับค่ากำลังไฟฟ้าเสมือน โดยที่เปอร์เซ็นต์การจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนจะทำการเพิ่มขึ้นทีละ 1 เปอร์เซ็นต์ ทำให้ได้ค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนที่ถูกจ่ายออกมามีค่าเปลี่ยนแปลงไป จากข้อมูลการเก็บค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนที่ถูกจ่ายด้วย Solar Inverter เมื่อทำการส่งค่าเปอร์เซ็นต์การผลิตให้ Solar Inverter จะเห็นได้ว่าค่าเปอร์เซ็นต์กับการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนของ Solar Inverter นั้นมีการผกผันกัน ด้วยสาเหตุมาจากคุณลักษณะเฉพาะของ Solar Inverter ยี่ห้อ ABB ซึ่งเมื่อนำข้อมูลที่เก็บค่าได้มาพล็อตกราฟจะได้ตามรูปที่ 5.5

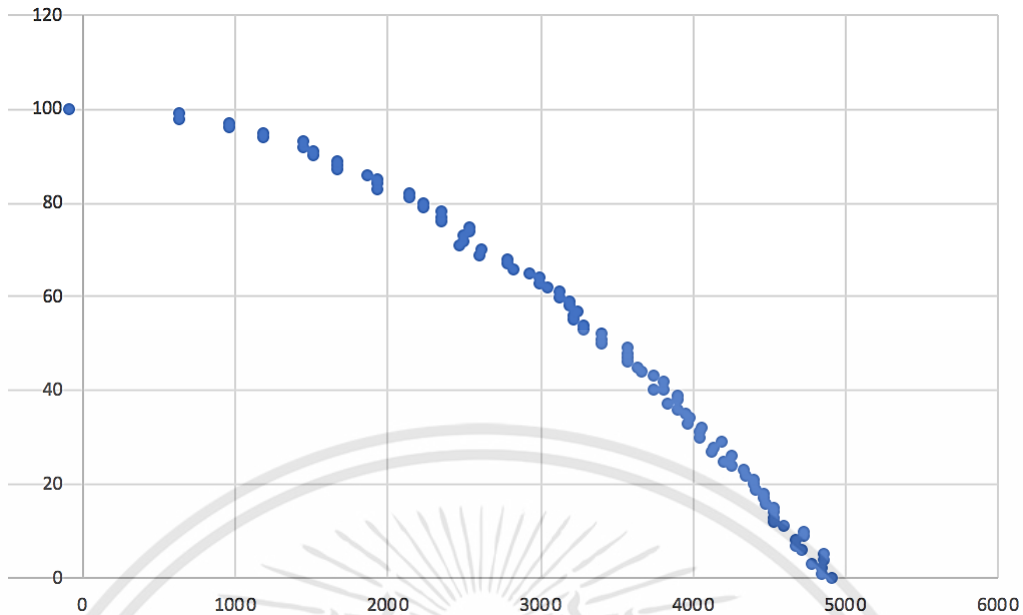


รูปที่ 5.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าเสมือนที่ถูกจ่ายกับเปอร์เซ็นต์การจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือน

เมื่อได้ทราบลักษณะพฤติกรรมของการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนของ Solar Inverter เทียบกับค่าเปอร์เซ็นต์ที่ใช้ส่งไปแล้ว จากนั้นจะมีการใส่ระบบควบคุม (Controller) ไปในระบบดังรูปที่ 5.6 โดยข้อมูลขาเข้าของระบบควบคุมนั้นจะเป็นค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนอ้างอิง ( $Q_{\text{command}}$ ) ค่าขาออกเป็นเปอร์เซ็นต์การจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือน ดังนั้นลักษณะของการออกแบบระบบควบคุมจะมีรูปแบบผกผันกับระบบการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ที่ทำการทดลองก่อนหน้า นี้ ดังนั้นจึงนำข้อมูลมาวาดกราฟใหม่โดยสลับค่าในแต่ละแกนใหม่ให้แนวนอนเป็นกำลังไฟฟ้าเสมือนที่ผลิตได้ ส่วนแนวตั้งเป็นเปอร์เซ็นต์การจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือน จะได้กราฟดังรูปที่ 5.7

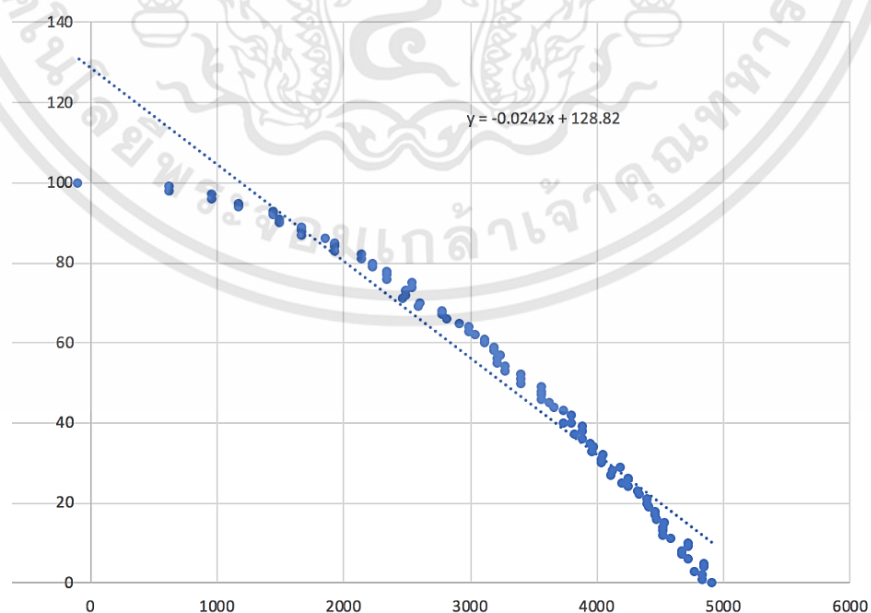


รูปที่ 5.6 ไดอะแกรมการควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนของโซลาร์อินเวอร์เตอร์



รูปที่ 5.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนกับกำลังไฟฟ้าเสมือนที่ถูกจ่าย

ในการทดลองต่อจากนี้จะหาสมการของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าเสมือนที่ถูกจ่ายจาก Solar Inverter กับค่าเปอร์เซ็นต์การจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือน โดยขั้นแรกจะใช้สมการเส้นตรงในการประมาณหาความสัมพันธ์ของชุดข้อมูลทั้งสองโดยรูปแบบกราฟที่ได้ดังรูปที่ 5.8 ทำให้ได้สมการเส้นตรงออกมาดังสมการที่ 5.1



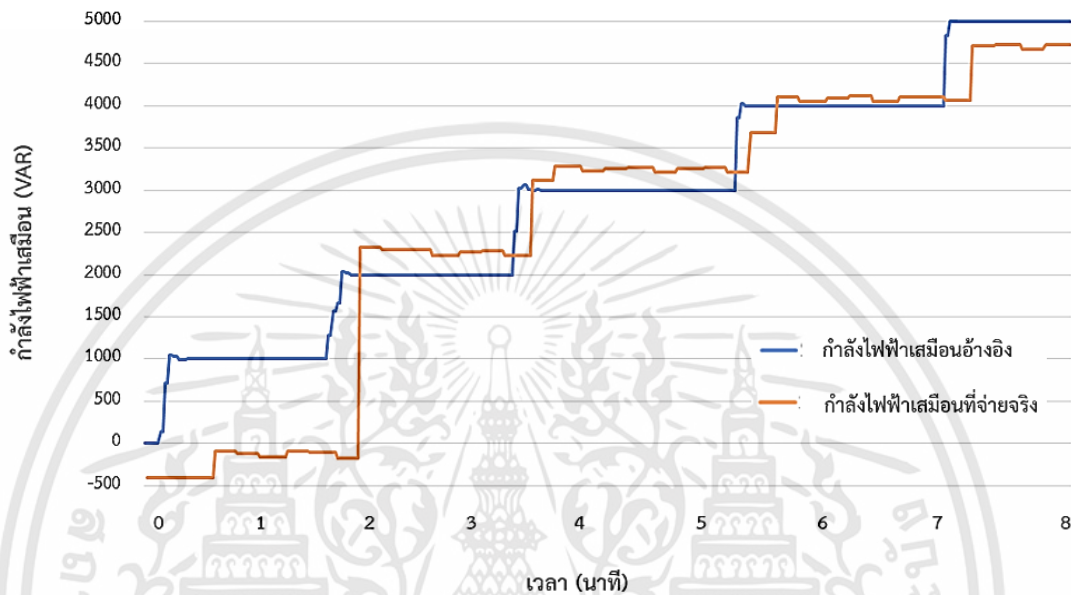
รูปที่ 5.8 กราฟสมการเส้นตรงที่ได้จากการประมาณการจากข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$y = -(0.0242x) + 128.82 \quad (5.1)$$

เมื่อ  $y$  คือเปอร์เซ็นต์การจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือน

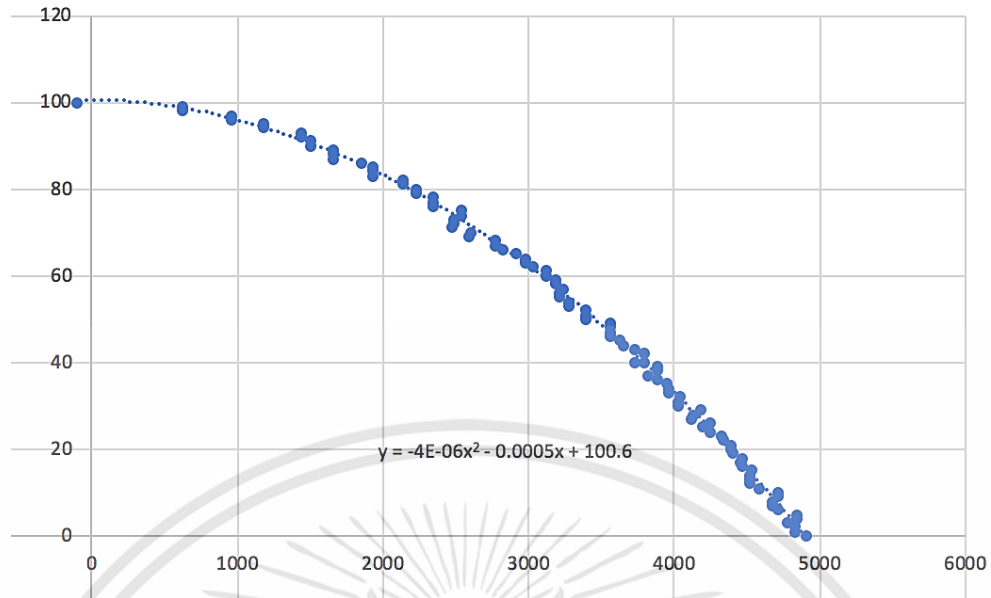
$x$  คือกำลังไฟฟ้าเสมือนที่ถูกจ่าย



รูปที่ 5.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าเสมือนอ้างอิงกับกำลังไฟฟ้าเสมือนที่จ่ายจริง ที่ใช้การควบคุมโดยใช้สมการเส้นตรง

เมื่อได้สมการความสัมพันธ์ของชุดข้อมูลแล้ว ทำการใส่สมการที่ได้เข้าไปในระบบควบคุม จากนั้นจะทำการเก็บค่า  $Q_{\text{command}}$  และ  $Q_{\text{out}}$  ซึ่งเป็นข้อมูลขาเข้าและข้อมูลขาออกของระบบใหม่ หลังจากการใส่ระบบควบคุมเข้าไป ทำให้ได้กราฟข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าเสมือนที่ถูกจ่ายออกจาก Solar Inverter กับ กำลังไฟฟ้าเสมือนอ้างอิง ดังรูปที่ 5.9

ต่อไปจะเป็นการหาสมการใหม่ที่ทำให้ตรงกับข้อมูลมากขึ้น โดยการเปลี่ยนมาใช้รูปแบบสมการกำลังสอง ทำให้สมการที่ได้มีความถูกต้องมากขึ้นดังรูปที่ 5.10 และได้สมการดังสมการที่ 5.2



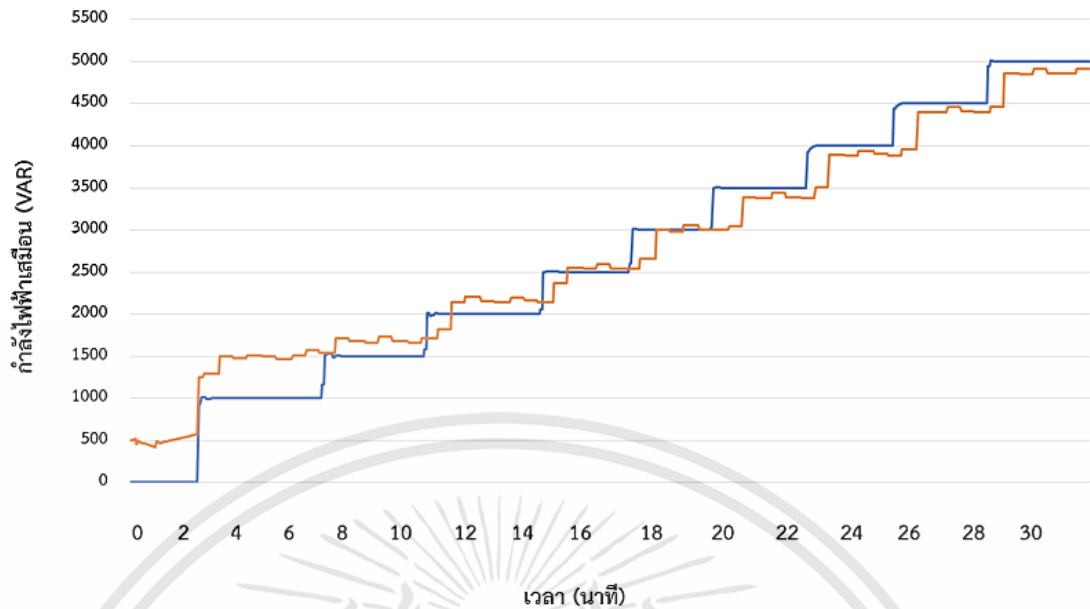
รูปที่ 5.10 กราฟสมการกำลังสองที่ได้จากการประมาณการจากข้อมูล

$$y = -0.00001x^2 - 0.0005x + 100.6 \quad (5.2)$$

เมื่อ  $y$  คือเปอร์เซ็นต์การจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือน

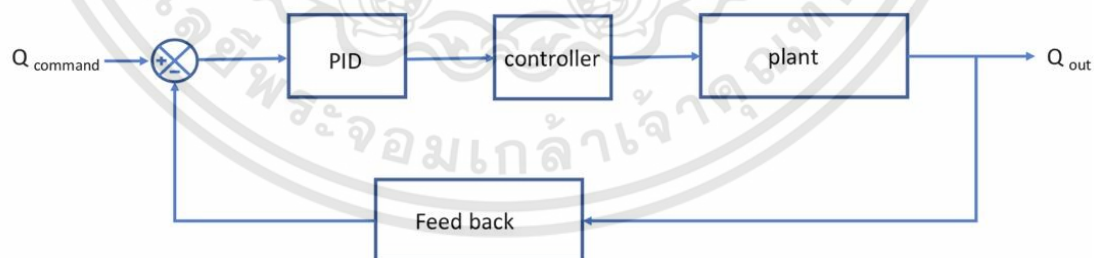
$x$  คือกำลังไฟฟ้าเสมือนที่ถูกจ่าย

เมื่อได้สมการความสัมพันธ์ของชุดข้อมูลใหม่แล้ว ทำการใส่สมการที่ได้เข้าไปในระบบควบคุม จากนั้นจะทำการเก็บค่า  $Q_{\text{command}}$  และ  $Q_{\text{out}}$  ซึ่งเป็นข้อมูลขาเข้าและข้อมูลขาออกของระบบใหม่ หลังจากการใส่ระบบควบคุมเข้าไป ทำให้ได้กราฟข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าเสมือนที่ถูกจ่ายออกจาก Solar Inverter กับ กำลังไฟฟ้าเสมือนอ้างอิง ดังรูปที่ 5.11



รูปที่ 5.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าเสมือนอ้างอิงกับกำลังไฟฟ้าเสมือนที่จ่ายจริงที่ใช้  
การควบคุมโดยใช้สมการกำลังสอง

หลังจากการทดลองข้างต้นที่ใช้สมการในการควบคุมระบบ หรือเรียกได้ว่าเป็นการควบคุมแบบระบบเปิด ซึ่งจะไม่มีการป้อนกลับของข้อมูลออกมาเกี่ยวข้องกับการควบคุม ในการทดลองต่อไปเป็นการทดลองระบบที่มีการป้อนกลับของสัญญาณหรือเรียกได้ว่าเป็นระบบปิด ซึ่งจะใช้การจูนระบบด้วย PID Control ดังรูปที่ 5.12 โดยค่าพารามิเตอร์ของระบบดังรูปที่ 5.13



รูปที่ 5.12 ไดอะแกรมการควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนของโซลาร์อินเวอร์เตอร์ชนิดระบบปิด

PID Parameters

Enable manual entry

Proportional gain: 6.621458E-3

Integral action time: 5.114735 s

Derivative action time: 1.314018 s

Derivative delay coefficient: 0.1

Proportional action weighting: 7.170551E-1

Derivative action weighting: 0.0

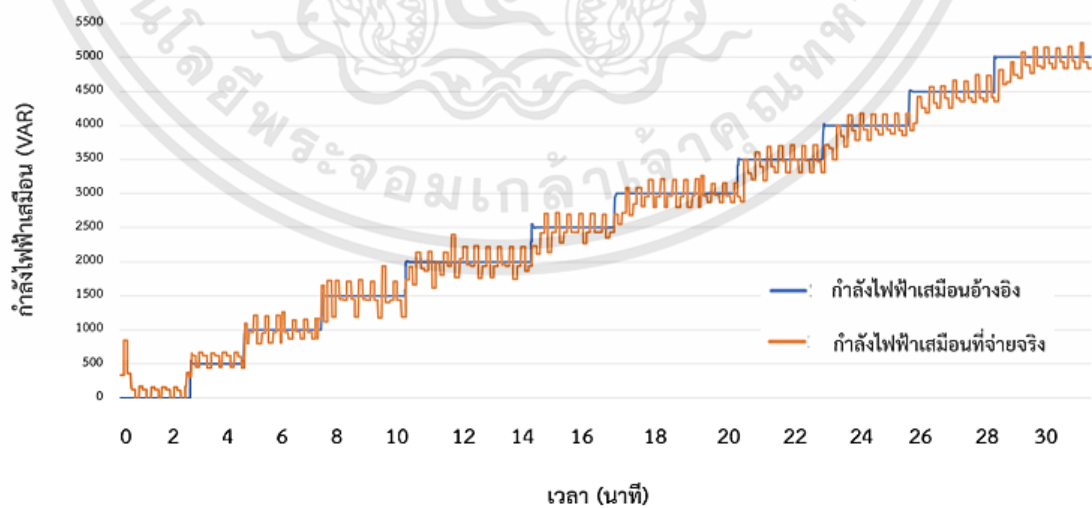
Sampling time of PID algorithm: 1.999968E-1 s

Tuning rule

Controller structure: PID

รูปที่ 5.13 ค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุม PID

ผลการทดลองเมื่อควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าด้วยระบบปิด จะทำการเก็บค่า  $Q_{\text{command}}$  และ  $Q_{\text{out}}$  ซึ่งเป็นข้อมูลขาเข้าและข้อมูลขาออกของระบบ หลังจากการใส่ระบบควบคุมระบบปิดนี้เข้าไป ทำให้ได้กราฟข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าเสมือนที่ถูกจ่ายออกจาก Solar Inverter กับ กำลังไฟฟ้าเสมือนอ้างอิง ดังรูปที่ 5.14

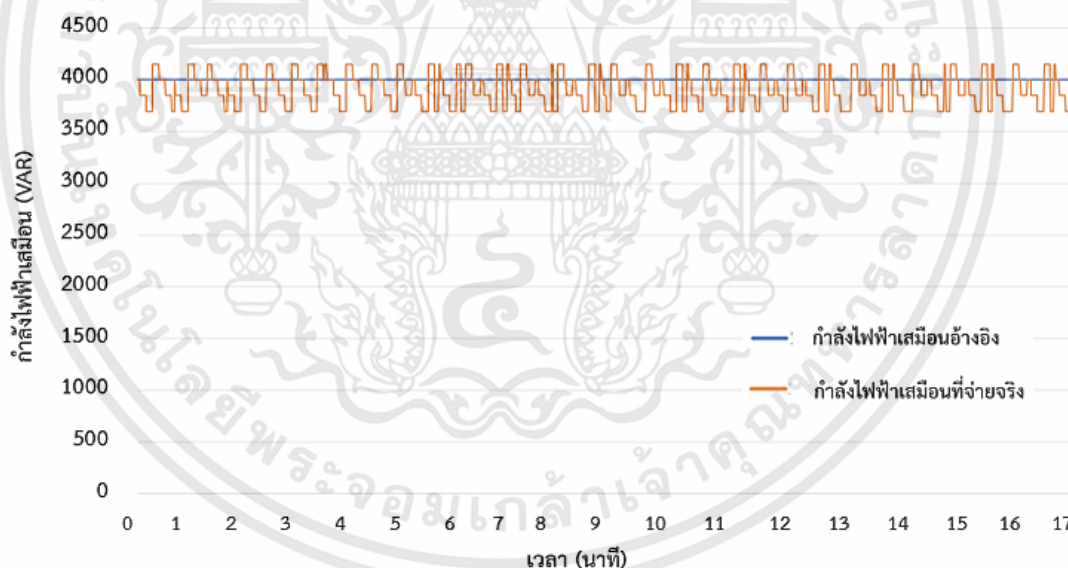


รูปที่ 5.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าเสมือนอ้างอิงกับกำลังไฟฟ้าเสมือนที่จ่ายจริง ที่ใช้การควบคุมแบบ PID

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.4 การทดสอบการควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนของระบบผลิตไฟฟ้าด้วย พลังงานแสงอาทิตย์เทียบกับข้อมูลในสถานีไฟฟ้า

หลังจากที่มีการทดลองระบบควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนในแต่ละรูปแบบแล้ว การทดลองต่อไปจะเป็นการรวมกันของ 2 ส่วน คือระบบดึงค่ากำลังไฟฟ้าที่ใจสถานีไฟฟ้าต้องการ กับระบบควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือน โดยในส่วนระบบควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนนั้นจะเลือกใช้ระบบปิดที่ใช้ PID Control เนื่องจากมีความยืดหยุ่นสูงในการควบคุมเนื่องจากหากตัวแปรในระบบมีการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมก็ไม่ทำให้การควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าต่างจากเดิมไป จากที่บทก่อนหน้าได้กล่าวไว้แล้วว่าค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนที่สถานีไฟฟ้าต้องการนั้นมีค่ามาก ทำให้ต้องลดสัดส่วนค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนที่สถานีไฟฟ้าต้องการลงมา 250 เท่าเรียกค่านี้ว่า  $Q_{Scale250}$  การทดลองนี้จะให้  $Q_{Scale250}$  เป็นกำลังไฟฟ้าเสมือนอ้างอิงให้กับการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนของโซลาร์อินเวอร์เตอร์ ซึ่งเมื่อทำการเชื่อมต่อค่าอ้างอิงกำลังไฟฟ้าเสมือนของระบบไฟฟ้าในสถานีไฟฟ้า ( $Q_{Scale250}$ ) เข้ากับระบบควบคุมแบบเปิดที่ได้ทำการตั้งค่าไว้ ทำให้ได้กราฟดังรูปที่ 5.15



รูปที่ 5.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลกำลังไฟฟ้าเสมือนจากสถานีไฟฟ้ากับกำลังไฟฟ้าเสมือนที่จ่ายจริง

## 5.5 บทสรุป

ในบทนี้ได้มีการทดสอบการสื่อสารระหว่างสถานีไฟฟ้ากับโซลาร์อินเวอร์เตอร์ด้วยแบบไร้สาย และแบบใช้สายสัญญาณสื่อสาร ในการสื่อสารแบบไร้สายนั้นจะเห็นได้ว่ามีความล่าช้าในการส่งกว่า การสื่อสารแบบใช้สายสัญญาณสื่อสาร แต่ถือว่าเป็นค่าที่ยอมรับได้ ถ้าพิจารณาในด้านของรูปแบบ การนำไปใช้งาน การสื่อสารที่เหมาะสมระหว่างสถานีไฟฟ้ากับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ควรจะเป็นการสื่อสารแบบไร้สาย เนื่องจากตำแหน่งของสถานีไฟฟ้าและระบบผลิตไฟฟ้าพลังงาน แสงอาทิตย์มีการกระจายออกไปในแต่ละพื้นที่

การทดลองการควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนของโซลาร์อินเวอร์เตอร์นั้นได้มีการ เปรียบเทียบระหว่างการควบคุมแบบเปิดและแบบปิด ซึ่งการทดลองแบบเปิดนั้นอาศัยการสร้าง สมการความสัมพันธ์ของข้อมูลขึ้นมา ความคลาดเคลื่อนขึ้นอยู่กับความถูกต้องของการหาสมการ คุณสมบัติของระบบนั้น ในการทดลองแบบเปิดจะเห็นได้ว่าระบบมีการควบคุมที่จะพยายามทำให้ สัญญาณขาออกใกล้เคียงกับค่าอ้างอิงตลอดเวลา ทั้งนี้เมื่อพิจารณาทั้งสองวิธี สรุปได้ว่าการใช้การ ควบคุมแบบปิดเหมาะสมกว่า เนื่องจากถ้าพารามิเตอร์ของระบบมีการเปลี่ยนแปลงไป จะไม่ส่งผล กระทบกับระบบควบคุมแบบปิด ทำให้ระบบมีเสถียรภาพที่ดี

## บทที่ 6

# บทสรุป ข้อเสนอแนะ และแนวทางการพัฒนา

### 6.1 บทสรุป

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการศึกษาการควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ ให้มีความสัมพันธ์กับความต้องการกำลังไฟฟ้าเสมือนของสถานีไฟฟ้าเพื่อช่วยรักษาระดับแรงดันของระบบไฟฟ้าให้ดีขึ้น อีกทั้งยังประหยัดอุปกรณ์ที่ต้องใช้ในการรักษาเสถียรภาพระดับแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าอีกด้วย ทางด้านการสื่อสารของระบบของสถานีไฟฟ้ากับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์นั้น ในการทดลองสามารถบอกได้ว่าความเร็วของการสื่อสารแบบไร้สายนั้นมีความเร็วในการสื่อสารช้ากว่าแบบมีสาย แต่ด้านความเหมาะสมนั้นจะเห็นได้ว่าระบบสื่อสารแบบไร้สายจะได้สะดวกในการใช้งานมากกว่าเพราะระยะทางระหว่างตำแหน่งของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์และสถานีไฟฟ้านั้นอยู่ใกล้กันและในการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนนี้สามารถเพิ่มจำนวนระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์มากกว่า 1 ระบบในการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนเข้าระบบไฟฟ้า

ในการศึกษาเทคนิคการควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในวิทยานิพนธ์นี้หลักๆ จะมี 2 รูปแบบการควบคุม คือการควบคุมแบบเปิดกับการควบคุมแบบปิด ซึ่งเมื่อพิจารณาจากผลการทดลอง ระบบควบคุมแบบเปิดอาจมีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าระบบควบคุมแบบปิด แต่เมื่อพิจารณาถึงเสถียรภาพของระบบควบคุมนั้น ระบบควบคุมแบบเปิดจะมีค่าความคลาดเคลื่อนมากขึ้น เมื่อตัวแปรของระบบมีการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม แต่ความคลาดเคลื่อนนี้จะไม่เกิดในการควบคุมแบบปิด สรุปได้ว่าการควบคุมแบบปิดนั้นเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์

### 6.2 ข้อเสนอแนะและข้อควรระวัง

1. การสื่อสารแบบไร้สายในการทดลองนี้อาจมีความล่าช้าในการส่งข้อมูล ทำให้ผลการทดลองมีความคลาดเคลื่อนไป
2. โซลาร์อินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการทดลองนี้อาจมีความล่าช้าในการควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือน ดังนั้นเมื่อนำมาใช้ในสถานีไฟฟ้าในอนาคต จะต้องเลือกโซลาร์อินเวอร์เตอร์ที่มีความเร็วในการควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือนมากกว่านี้

### 6.3 แนวทางการพัฒนา

โครงการวิจัยนี้สามารถทำการพัฒนาต่อยอดเพิ่มเติม ในการออกแบบระบบการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนในสถานีไฟฟ้าด้วยระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์จากหลายแหล่ง เพื่อชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนที่ต้องการในระบบกริดให้มีประสิทธิภาพดีขึ้น



## เอกสารอ้างอิง

- [1] สยามรัฐ. “Energy 4.0 บนแนวคิดประชารัฐ ดันพลังงานอัจฉริยะพัฒนาชาติ.” [Online]. Available: <http://www.siamrath.co.th/n/4385>. 2559.
- [2] Piyushkumar M. Saradva, Ketan T. Kadivar, Mahesh H. Pandya, Abhayrajsinh J. Rana, "Reactive and real power compensation in distribution line using D-STATCOM with energy storage" **International Conference on Computation of Power, Energy Information and Commuincation (ICCPEIC)**, 20-21 April 2016. pp 726 - 732
- [3] Kenan Yang, Yiyu Gong ; Pu Zhang ; Zhaoyan Liu “A reactive power compensation method based on tracing the power flow and loss function of power system” **International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT)**, November 2015
- [4] Liming Liu, Hui Li ; Yaosuo Xue ; Wenxin Liu, Reactive Power Compensation and Optimization Strategy for Grid-Interactive Cascaded Photovoltaic Systems”, **IEEE Transactions on Power Electronics**, 2015. pp188 – 202
- [5] Texas instruments. “Introduction to the Controller Area Network (CAN).” [Online]. Available: <http://www.ti.com/lit/an/sloa101b/sloa101b.pdf>. May 2016.
- [6] AutomationForum. “Differences between RS232 , RS422 and RS485.” [Online]. Available: <https://automationforum.in/t/differences-between-rs232-rs422-and-rs485/391>. April 2015.
- [7] General Electric. “IEC-61850.” [Online]. Available:<http://www.gegridsolutions.com/multilin/journals/issues/spring09/iec61850.pdf>. 2559.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1 บันทึกค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนกับเปอร์เซ็นต์ควบคุม

เปอร์เซ็นต์ควบคุม	กำลังไฟฟ้าเสมือน (kVAR)	เปอร์เซ็นต์ควบคุม	กำลังไฟฟ้าเสมือน (kVAR)
0	4908.765	22	4342.075
1	4836.993	23	4328.882
2	4836.993	24	4255.583
3	4777.603	25	4203.505
4	4850.193	26	4249.695
5	4850.193	27	4117.715
6	4718.213	28	4130.909
7	4678.619	29	4183.708
8	4678.619	30	4038.528
9	4724.816	31	4038.528
10	4724.816	32	4051.728
11	4592.836	33	3965.944
12	4526.088	34	3972.541
13	4526.088	35	3952.086
14	4526.843	36	3893.354
15	4533.446	37	3827.368
16	4474.056	38	3892.706
17	4460.855	39	3892.706
18	4467.459	40	3800.974
19	4408.063	41	3741.584
20	4394.869	42	3800.974
21	4394.869	43	3734.987

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1 (ต่อ) บันทึกค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนกับเปอร์เซ็นต์ควบคุม

เปอร์เซ็นต์ควบคุม	กำลังไฟฟ้าเสมือน (kVAR)	เปอร์เซ็นต์ควบคุม	กำลังไฟฟ้าเสมือน (kVAR)
44	3661.787	68	2778.149
45	3629.407	69	2599.545
46	3570.01	70	2613.172
47	3570.01	71	2474.595
48	3569.422	72	2494.392
49	3569.422	73	2494.392
50	3398.443	74	2540.158
51	3398.443	75	2540.158
52	3405.04	76	2349.218
53	3279.663	77	2349.218
54	3279.663	78	2349.218
55	3213.676	79	2230.444
56	3213.676	80	2230.444
57	3240.07	81	2144.297
58	3186.745	82	2144.297
59	3186.745	83	1933.494
60	3120.77	84	1933.494
61	3120.77	85	1933.494
62	3042.103	86	1860.897
63	2989.316	87	1669.255
64	2989.316	88	1669.255
65	2922.835	89	1669.533

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

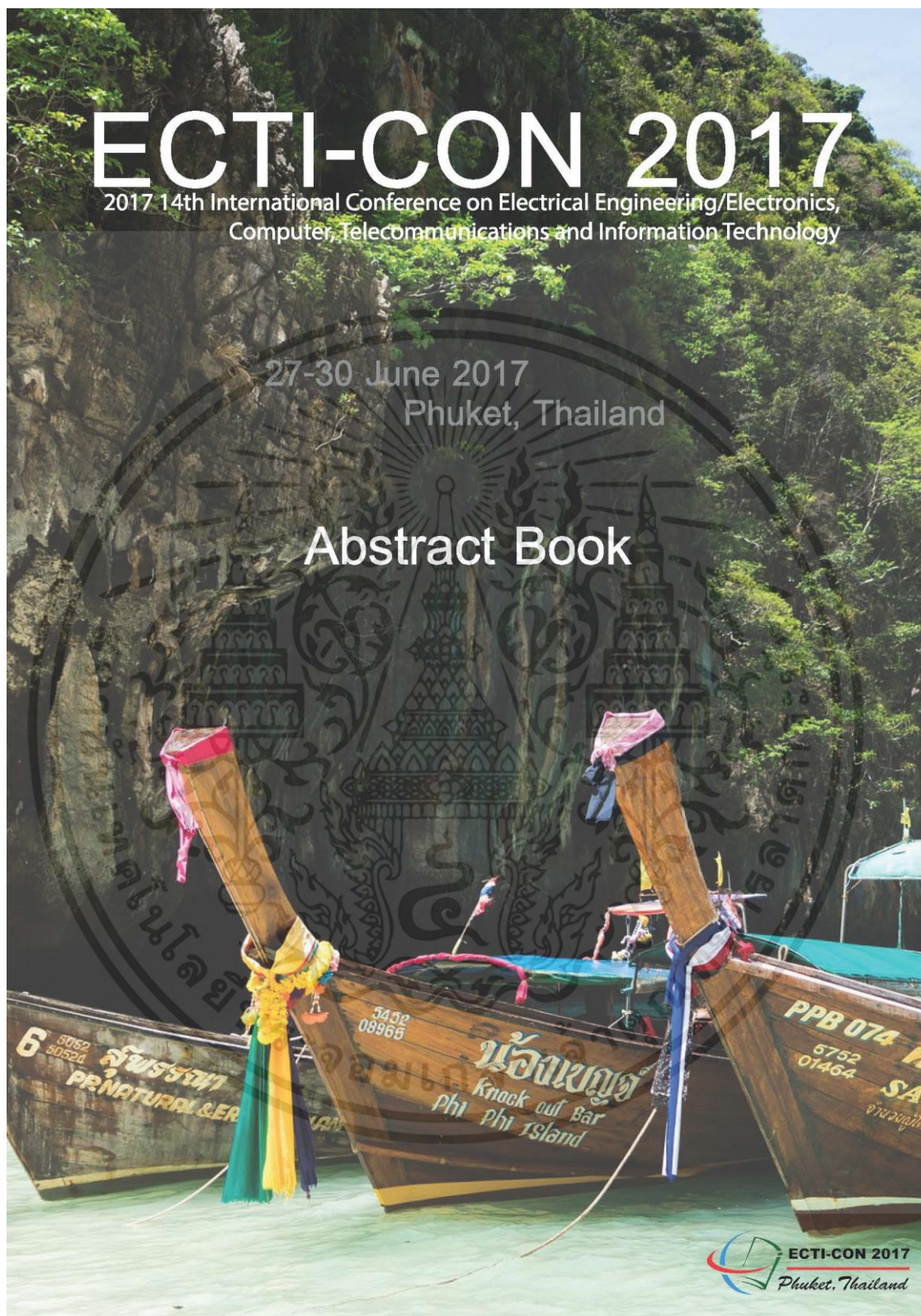
ตารางที่ 1 (ต่อ) บันทึกค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนกับเปอร์เซ็นต์ควบคุม

เปอร์เซ็นต์ควบคุม	กำลังไฟฟ้าเสมือน (kVAR)	เปอร์เซ็นต์ควบคุม	กำลังไฟฟ้าเสมือน (kVAR)
90	1504.556	95	1181.219
91	1504.556	96	963.288
92	1445.173	97	963.288
93	1445.173	98	633.5078
94	1181.219	99	633.5078

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# Reactive Power Compensation For Solving Voltage Problems in PV Farm based upon IEC - 61850

Suntichai Uaroon

Dept. of Electrical Engineering, Faculty of Engineering  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
Bangkok, Thailand, 10520  
suntichai\_uaroon@hotmail.com

Panya Khemmook<sup>1</sup>, Surin Khomfoi<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Dept. of Electrical Engineering, Faculty of Engineering  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
Bangkok, Thailand, 10520  
Kp.panya@gmail.com<sup>1</sup>, kkhsurin@kmitl.ac.th<sup>2</sup>

**ABSTRACT**-Reactive power compensation for solving voltage problem in PV farm based upon IEC 61850 is presented in this paper in order to control voltage within acceptable range. The Volt/VAR control is used in solar inverter of PV farm to improve power quality and also reduce the disconnection of solar inverter caused by overvoltage. So, the owner of PV farm will get more opportunity to sell solar electricity back to the grid. For Volt/VAR control, solar inverter with PQ mode is used to control the active and reactive power of the system. Electricity data from substation are sent to PLC based upon IEC 61850, which is the standard communication of electrical substation system. In this paper, simulation result verifies that Volt/VAR can be improve a power quality in a PV farm.

**Keywords**-Volt/VAR control; Reactive power; IEC 61850; PQ mode

## I. INTRODUCTION

Nowadays, electricity demand continues to rise at a strong pace related to high economic growth. Thus, in order to meet increasing electrical demand, power plants are constructed from variety generation resource, such as, natural gas, coal, fuel oil, and renewable energy. Renewable energy is widespread popular energy resource to provide electricity without giving any CO<sub>2</sub> emission. The limitation of this resource is their output fluctuate according to the real time availability. The fluctuation can be predicted accurately only a few hours to days. The complexity of this resource affect power quality of grid. Renewable generation including photovoltaic (PV) systems can have a significant impact on load characteristics in distribution networks and also affect power quality residential distribution networks. The most cited PQ problems that may arise due to grid connected PV generation are overvoltage and fluctuations, harmonic distortion, transient phenomena and reverse power flow. These effects result in potential damaging of sensitive electronic equipment and capacitor banks, overheating of transformers and neutral conductors and additional losses in the power system.

Degraded power quality entails additional costs for both the electricity distributor and its customers. The purpose of this paper is to find the solution for solving voltage problem in PV farm. The investment on solar farm become popular because of reduction electricity bills. A large number of connected PV panels can cause overvoltage. These makes solar inverter

disconnect from grid and affect the solar owner from selling solar electricity back to grid. All PV farms are connected together by a substation, which is an interconnection part of an electrical generation and distribution system. Substations transform voltage from high to low, or perform any of several other important functions. Between the generating station and consumer, substations generally have switching, protection and control equipment and one or more transformers. Other devices for power quality control such as power factor correction capacitors and voltage regulators may also be located at a substation. So the problem of overvoltage can be displayed in substation. This paper presents Volt/VAR control of solar inverter to maintain acceptable voltage at all points along the distribution by adjusting reactive power in smart grid.

The rest of the paper is organized as follow: Section II briefly present related theory about Volt/VAR control, IEC 61850 standard, programmable logic controller, and solar inverter. Section III show experimental setup including specification of devices. Section IV shows experimental result. Finally, Section V summarized the contribution of the paper.

## II. RELATED THEORY

### A. Volt/VAR control

Volt/VAR control (VVC) is a fundamental operating requirement of all electric distribution systems. The purpose of Volt/VAR Control is to maintain acceptable voltage and acceptable power factor at all points along the distribution feeder under all loading conditions. Volt/VAR Control in a smart grid is to improve efficiency through voltage optimization. Volt/VAR Optimization has been successfully used to increase power system efficiency of utilities. Volt/VAR optimization system configuration is shown in Fig 1. This system consists of DLA Master Station, Substation transformer with load tap changer, Substation Capacitor Bank, Substation RTU, Line Regulator, and Switched Capacitor Bank. Line Regulator always measure and monitor load voltage.

If overvoltage occur at measured point, The DLA Master Station would send the command to switched capacitor bank, substation capacitor bank or transformer with load tap changer to absorb reactive power from smart grid.

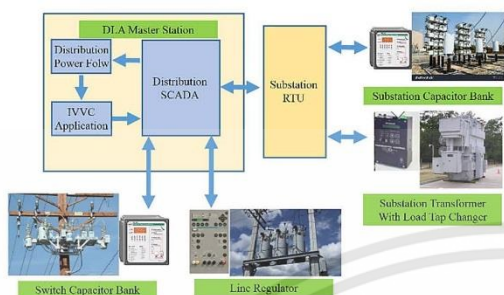


Fig 1 Volt/VAR optimization system configuration

### B. IEC 61850 Standard

IEC 61850 is a standard for configuration of intelligent electronic devices for electrical substation systems to be able to communicate with each other. A control model is divided into GOOSE (Generic Object Oriented Substation Events) and GSSE (Generic Substation State Events). These protocols can run over TCP/IP networks or substation LANs using high speed switched Ethernet to obtain the necessary response for protective relaying. A format of GOOSE data is grouped into a data set and transmitted within a time period of 4 millisecond.

### C. Programmable Logic Control

A programmable logic controller (PLC) is an industrial digital computer which has been adapted for the control of manufacturing processes, such as assembly lines, or robotic devices, or any activity that requires high reliability control and ease of programming and process fault diagnosis. PLC have been widely adopted as high-reliability automation controllers suitable for harsh environments. PLCs can range from devices with tens of I/O in a housing integral with the processor, to large rack-mounted modular devices with a count of thousands of I/O, and which are often networked to other PLC and SCADA systems. They can be designed for multiple arrangements of digital and analog inputs and outputs (I/O), extended temperature ranges, immunity to electrical noise, and resistance to vibration and impact. This paper use PLC to receive GOOSE message from electrical substation system and send a command to solar inverter to operate PQ control.

### D. Solar Inverter

A solar inverter or PV inverter is used to convert the variable direct current (DC) output of a photovoltaic (PV) solar panel into a utility frequency alternating current (AC) that can be fed into a commercial electrical grid. Solar inverters have special functions including maximum power point tracking. Solar inverters may be classified into 3 broad types, stand-alone inverters, grid-tie inverters and battery backup inverters. This paper focus on grid-tie inverters, which are designed to shut down automatically during overvoltage of utility supply. Many solar inverters are designed to be connected to a utility grid, and

will not operate when they do not detect the presence of the grid.

PQ control in grid connected mode will be used to interface between the grid and the inverter. PQ controller is designed so that the inverter could control the active and reactive power of grid from a small signal variations of the voltage magnitude and its phase.

Fig 2 show Volt/VAR characteristic of smart inverter. The graph show that solar inverter has 2 modes, which are inductive mode and capacitive mode. If overvoltage occur in grid, then the solar inverter will be in inductive mode to absorb reactive power from grid. On the other hand, if under voltage occur in grid, then the solar inverter will be in capacitive mode to inject reactive power to grid. Solar inverter can also control power factor to be not under 0.9 according to acceptable value of electric utility.

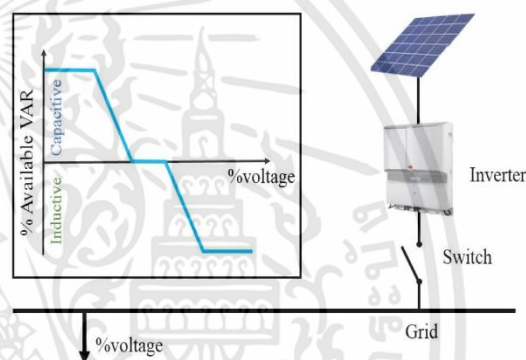


Fig 2 Volt/VAR characteristic of smart inverter.

### I. EXPERIMENTAL SETUP

This section describe an experimental setup. The connection for PV generation is shown in Fig 3 In general, PV panel is connected to inverter to convert direct current produced by PV panel into an alternate current. After conversion of current, this generating power is sent to grid. Moreover, this paper presents the additional function of solar inverter, which is used to control active power and reactive power.

The electricity data from the electrical substation system are sent to PLC in a form of GOOSE message. The PLC receives the electricity data, which are voltage, current, voltage harmonic, and current harmonic based on IEC 61850 or communication standard of electrical substation system. Then the PLC would consider only voltage data of that substation. If the voltage exceed the acceptable range, PLC as a unit processor would control the voltage by sending the command to PMU, which is used to transform analog electrical data to digital in a form of Aurora protocol. This protocol is only used for ABB inverter. After that PMU would send the command of PLC to solar inverter in order to control reactive power in that substation. Fig 4 show the experimental devices.

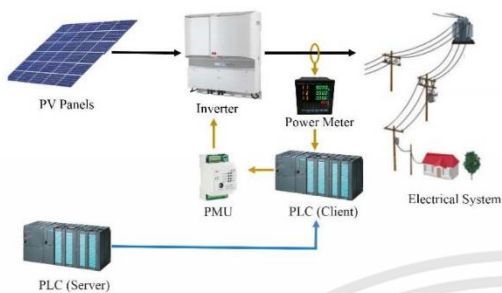


Fig 3 The connection for PV generation



Fig 4 Experimental devices.

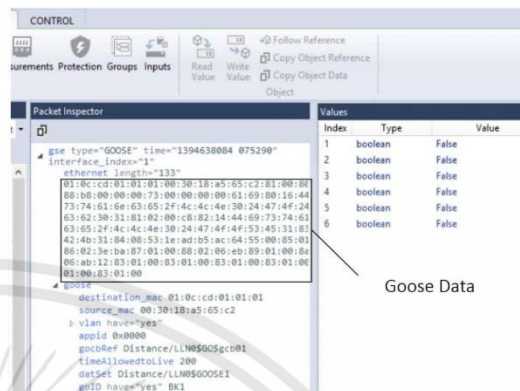


Fig 5 Section of the GOOSE message structure frame

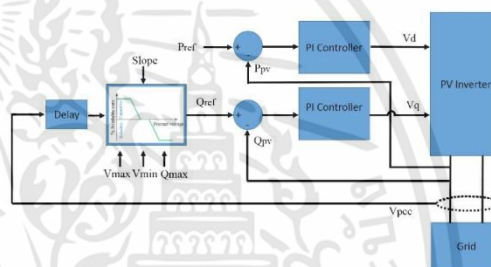


Fig 6 Volt/VAR control block diagram

In the experimental setup, two strings connected in parallel. There are 18 panels per string connected in series. The output power of one string is 280W. The PV panels are connected to 10kV solar inverter. The electrical data from electrical substation system is in a form of GOOSE message as shown in Fig 5

The structure of GOOSE message consists of a fixed terms of length, and fixed terms of content. The variable in terms of both length and content chosen to be communicated. Firstly the fixed portion of the message structure is examined and briefly discussed, starting with the Preamble and ending at the Ethertype. The Preamble and Start of frame are performed at the hardware level. The Destination address is a multicast address consisting of 6 bytes. The Source address is also 6 bytes long. As per IEEE 802.1Q, priority tagging is used to separate time critical and high priority bus traffic for protection-relevant applications.

After PLC receive GOOSE message, voltage data will be used in reactive power compensation of Volt/VAR control. The Volt/VAR control block diagram is shown in Fig. 6. Measured voltages from electrical substation system is fed into slope block to calculate for  $Q_{ref}$ . This  $Q_{ref}$  will be an input of PI controller Block to control reactive power of solar inverter. So the voltage level will be in the acceptable range.

## II. EXPERIMENTAL RESULT

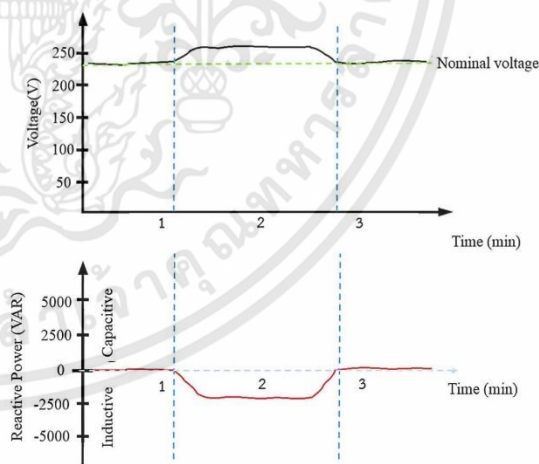


Fig. 7 The simulation of voltage in PV farm without using Volt/VAR control and  $Q_{ref}$  from control block diagram

Solar inverter with Volt/VAR control is used to compensate reactive power in order to maintain acceptable voltage at all point of distribution system. Fig. 7 show the simulation of voltage in PV farm without using Volt/VAR control. The voltage gradually rise and exceed nominal voltage of distribution system. Qref in control block diagram is also simulated at the same time in Fig. 7. The experimental result show that Qref is in inductive mode to absorb reactive power from distribution system. Fig. 8 show voltage in PV farm after compensate reactive power. The simulation result verified that solar inverter with Volt/VAR control can maintain voltage level to be in acceptable value.

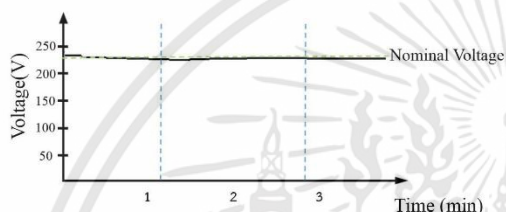


Fig. 8 Voltage in PV farm after compensate reactive power

### III. CONCLUSION

Reactive power compensation for solving voltage problems in PV farm based upon IEC 61850 is presented in this paper. The experimental result shows that solar inverter can improve power quality through voltage optimization of PV farm in distribution system. Volt/VAR control is used to compensate reactive power during overvoltage. The experimental result shows that PV farm with solar inverter could absorb reactive power during overvoltage. As a result, the voltage level gradually fall to nominal voltage. If distribution system is connected with a large number of PV farms, so this solution can reduce disconnection of PV panels during overvoltage and the

owner of PV farm would get more opportunity to sell solar electricity. Moreover, the efficiency and reliability of distribution system will be improved.

### ACKNOWLEDGMENT

This research is supported in part by funds provided by Ministry of Energy and Renewable Energy Application Laboratory (REAL). In many cases authors would like to express gratitude or thanks to other bodies who generally support this work. First, author would like to thank Associate Professor Surin Khomfoi for his encouragement and helpful discussion. Author also extend thanks to Mr. Phoompat Jampeethong and Mr. Chetnapat Praisuwanna for assistance with instrument and give us an inspiration to improve this research. In addition, author would like to thank Mr. Panya Khemmook for giving valuable comment suggestions on this research.

### REFERENCES

- [1] Chakraborty, S.; Hoke, A. and Lundstrom, B., "Evaluation of multiple inverter volt-VAR control interactions with realistic grid impedances," in *Power & Energy Society General Meeting, 2015 IEEE*, vol. no., pp.1-5, 26-30 July 2015
- [2] Jahangiri, P.; Aliprantis, D.C., "Distributed Volt/VAR Control by PV Inverters," in *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol.28, no.3, pp.3429-3439, Aug. 2013
- [3] Kam, A.; Simonelli, J., "Stability of distributed, asynchronous VAR-based closed-loop voltage control systems," in *PES General Meeting, 2014 IEEE*, vol., no., pp.1-5, 27-31 July 2014
- [4] J.Smith, H.Li, "Potential interaction between smart inverters," presented at Electric Power Research Institute (EPRI) Smart Inverter Workshop, May 2014
- [5] Hoke, A.; Chakraborty, S.; Basso, T., "A power hardware-in-the-loop framework for advanced grid-interactive inverter testing," in *Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT), 2015 IEEE Power & Energy Society*, vol., no., pp.1-5, 18-20 Feb. 2015
- [6] Yazdani, A.; Di Fazio, A.R.; Ghoddami, H.; Russo, M.; Kazerani, M.; Jatskevich, J.; Strunz, K.; Leva, S.; Martinez, J.A., "Modeling Guidelines and a Benchmark for Power System Simulation Studies of Three-Phase Single-Stage Photovoltaic Systems," in *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol.26, no.2, April 2011
- [7] M. G. Kashani, S. Babaei and S. Bhattacharya, "SVC and STATCOM application in Electric Arc Furnace efficiency improvement," 2013 4th IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), Rogers, AR, 2013, pp. 1-7.

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายสันติชัย อุ่อรุณ
วัน เดือน ปีเกิด	24 มกราคม 2535
ที่อยู่	145 หมู่ 5 ตำบลย่านยาว อำเภอสามชุก จังหวัดสุพรรณบุรี 72130
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2558 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

### ผลงานวิจัย

- [1] สันติชัย อุ่อรุณ, ปัญญา เข้มมุข และสุรินทร์ คำฝอย “การใช้งานหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังในโซลาร์ฟาร์มด้วยวงจรมอดูเลตเตอร์มัลติเลเวลอินเวอร์เตอร์” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 38 (EECON 38) จังหวัดพระนครศรีอยุธยา ประเทศไทย วันที่ 18-20 พฤศจิกายน 2558
- [2] **Suntichai Uaroon**, Surin Khomfoi “Reactive Power Compensation for Solving Voltage Problems in PV Farm based upon IEC-61850” ECTI-CON 2017, Phuket, Thailand 27-30 June 2017

การชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนเพื่อแก้ปัญหาแรงดันไฟฟ้าในโซลาร์ฟาร์มตาม  
มาตรฐาน IEC-61850

REACTIVE POWER COMPENSATION FOR SOLVING VOLTAGE PROBLEMS IN  
PV FARM BASED UPON IEC-61850



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2562

KMITL-2019-EN-M-020-042

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

REACTIVE POWER COMPENSATION FOR SOLVING VOLTAGE PROBLEMS IN  
PV FARM BASED UPON IEC-61850



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

2019

KMITL-2019-EN-M-020-042

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2019

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนเพื่อแก้ปัญหาแรงดันไฟฟ้าในโซลาร์ฟาร์มตามมาตรฐาน IEC-61850
ชื่อนักศึกษา	นายสันติชัย อู่อรุณ
รหัสประจำตัว	58601154
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2562
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.สุรินทร์ คำฝอย

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนเพื่อแก้ปัญหาแรงดันไฟฟ้าในโซลาร์ฟาร์มตามมาตรฐาน IEC-61850 เพื่อหาวิธีการควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ที่เหมาะสมกับการนำมาใช้ร่วมกับสถานีไฟฟ้าในอนาคต โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการทดสอบการสื่อสารแบบไร้สายระหว่างสถานีไฟฟ้ากับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งได้เปรียบเทียบความเร็วในการสื่อสารระหว่างแบบใช้สายสัญญาณและไม่ใช้สายสัญญาณ และการทดลองควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ระหว่างการควบคุมแบบระบบเปิดที่ใช้การศึกษาคุณลักษณะของระบบ แล้วนำมาวิเคราะห์หาสมการควบคุมกับการควบคุมแบบระบบปิดที่ใช้ระบบการควบคุมแบบป้อนกลับของสัญญาณขาออกเพื่อเปรียบเทียบข้อดีข้อด้อยของทั้งสองระบบ เพื่อนำไปสู่การใช้งานจริงในอนาคต จากการศึกษาครั้งนี้สามารถนำไปเป็นแนวทางการออกแบบระบบไฟฟ้าอัจฉริยะที่มีการสื่อสารระหว่างสถานีไฟฟ้าอัจฉริยะกับระบบผลิตพลังงานแสงอาทิตย์ในเรื่องการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนที่ต้องสัมพันธ์กัน

Thesis Title	Reactive Power Compensation for Solving Voltage Problems in PV Farm based upon IEC-61850
Student	Mr. Suntichai Uaroon
Student ID.	58601154
Degree	Master of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2019
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr.Surin Khomfoi

### ABSTRACT

Reactive power compensation for solving voltage problems in PV farm based upon IEC-61850 is presented in this thesis in order to find suitable reactive power compensation method in grid system. This would be a part of substation in the future. This thesis presents wireless connection between solar system and substation compare with LAN connection. The speed of wireless connection and LAN connection is show in this thesis. After that reactive power compensation is shown in the experiment. The experiment compares open loop control and closed loop with feedback control of reactive power compensation of solar inverter in order to analyze advantage and disadvantage in controlling reactive power. The result of this study can be used to design function of reactive power compensation for solving voltage problems of grid system and to improve operation in substation

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เรื่องการชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนเพื่อแก้ปัญหาแรงดันไฟฟ้าในโซลาร์ฟาร์มตามมาตรฐาน IEC-61850สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีด้วยการสนับสนุนในด้านต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นด้านความรู้ทางด้านวิชาการ ด้านเทคนิคการดำเนินงาน รวมถึงคำแนะนำต่างๆ ทางผู้จัดทำจึงขอขอบพระคุณในความอนุเคราะห์ที่ได้รับเหล่านี้

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.สุรินทร์ คำฝอย ผู้ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาของวิทยานิพนธ์นี้ ที่ช่วยประสิทธิ์ประสาทความรู้ทางด้านวิชาการ ดูแลเอาใจใส่ตลอดจนให้คำแนะนำในการดำเนินงาน ทำให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

ท้ายสุดนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดา ที่ได้อุปการะเลี้ยงดูอบรมสั่งสอนตลอดจนให้การสนับสนุนและเต็มกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้จนสำเร็จได้ด้วยดี คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ คณะผู้จัดทำขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน และหวังเป็นอย่างยิ่งว่า วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์แก่ผู้ที่ได้ทำการศึกษาเพื่อที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในงานวิจัยในด้านต่างๆ ได้ต่อไป

สันติชัย อุ่อรุณ

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	I
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	II
กิตติกรรมประกาศ .....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย .....	4
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	4
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย.....	5
1.5 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์.....	5
1.6 แผนการดำเนินการวิจัย.....	6
บทที่ 2 ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ .....	7
2.1 บทนำ.....	7
2.2 การผลิตไฟฟ้าของพลังงานแสงอาทิตย์.....	7
2.3 ปัญหาที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าเมื่อมีการเชื่อมระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ .....	9
2.4 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์.....	12
2.5 ชนิดของเซลล์แสงอาทิตย์.....	14
2.6 ประโยชน์ของการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ .....	18
2.7 อุปกรณ์สำคัญของระบบการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ .....	19
2.8 การประยุกต์ใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์ .....	20
2.9 ตัวแปรต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์.....	22
2.10 ระบบการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ .....	23
2.11 โซลาร์อินเวอร์เตอร์.....	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษา IV นั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.12 แนวทางการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์.....	26
2.13 บทสรุป .....	27
<b>บทที่ 3 สถานีไฟฟ้าอัจฉริยะ.....</b>	<b>28</b>
3.1 บทนำ .....	28
3.2 สถานีไฟฟ้าอัจฉริยะ .....	28
3.3 โครงสร้างของระบบสถานีไฟฟ้าอัจฉริยะ .....	30
3.4 ประโยชน์ของระบบสถานีไฟฟ้าอัจฉริยะ .....	30
3.5 มาตรฐาน IEC 61850 .....	31
3.6 การสื่อสารแบบอนุกรม .....	34
3.7 การแก้ปัญหาระดับแรงดันเกินและแรงดันตกด้วยระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์....	36
3.8 บทสรุป.....	38
<b>บทที่ 4 การออกแบบการทดลอง .....</b>	<b>39</b>
4.1 บทนำ .....	39
4.2 ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ในการทดลอง .....	39
4.3 การสื่อสารระหว่างระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์กับสถานีไฟฟ้า .....	41
4.4 ระบบควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ .....	47
4.5 บทสรุป.....	49
<b>บทที่ 5 ผลการทดสอบแบตเตอรี่ .....</b>	<b>50</b>
5.1 บทนำ .....	50
5.2 การทดสอบการสื่อสารแบบไร้สายระหว่างสถานีไฟฟ้ากับระบบผลิตไฟฟ้า ด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ .....	50

5.3 การทดสอบการควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนของระบบผลิตไฟฟ้า ด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ .....	52
5.4 การทดสอบการควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนของระบบผลิตไฟฟ้า ด้วยพลังงานแสงอาทิตย์เทียบกับข้อมูลในสถานีไฟฟ้า.....	59
5.6 บทสรุป.....	60
บทที่ 6 บทสรุป ข้อเสนอแนะ และแนวทางการพัฒนา.....	61
6.1 บทสรุป.....	61
6.2 ข้อเสนอแนะและข้อควรระวัง .....	61
6.3 แนวทางการพัฒนา.....	62
เอกสารอ้างอิง .....	63
ภาคผนวก ก ตารางบันทึกผลการทดลอง.....	64
ภาคผนวก ข ผลงานทางวิชาการ.....	68
ประวัติผู้เขียน.....	74

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แผนการดำเนินการวิจัย.....	6
2.2 ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดต่างๆ.....	18
2.3 การใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์.....	20



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษา VII นั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 พลังงานหมุนเวียนในระบบโครงข่ายไฟฟ้า .....	2
1.2 ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์.....	3
2.1 การทำงานทั่วไปของเซลล์แสงอาทิตย์ .....	8
2.2 กำลังการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์และลักษณะโพลตรายวันต่อครัวเรือน .....	10
2.3 ระดับแรงดันของระบบเมื่อก่อนและหลังมีระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์.....	11
2.4 ส่วนประกอบของเซลล์แสงอาทิตย์ .....	12
2.5 โครงสร้างภายในเซลล์แสงอาทิตย์ .....	13
2.6 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยว .....	15
2.7 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกรวม .....	16
2.8 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน .....	16
2.9 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดคอปเปอร์อินเดียม .....	17
2.10 ระบบผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ.....	24
2.11 ระบบผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่อกับระบบจำหน่าย.....	24
2.12 ระบบผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบผสมผสาน .....	25
2.13 กราฟกำลังการผลิตไฟฟ้าต่อวันของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์.....	26
3.1 แผนผังการบริการ ACSI .....	32
3.2 ฟังก์ชันของการบริการ ACSI .....	34
3.3 การเชื่อมต่ออุปกรณ์สื่อสาร RS-232 .....	36
3.4 การเชื่อมต่ออุปกรณ์สื่อสาร RS-485 .....	36
4.1 ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ในการทดลอง .....	40
4.2 โซลาร์อินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการทดลอง .....	40
4.3 รายละเอียดคุณลักษณะของโซลาร์อินเวอร์เตอร์ .....	41
4.4 ตำแหน่งของการติดตั้ง POWER METER .....	42
4.5 ค่าทางไฟฟ้าที่จะมีการแสดงผลผ่านโปรแกรม .....	42
4.6 GATEWAY ของระบบ 22KV วงจรที่ 1.....	43
4.7 การสื่อสารระหว่างสถานีไฟฟ้าและระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์.....	44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษา VIII นั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.8 การสื่อสารระหว่างสถานีไฟฟ้าบับใหญ่และระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์.....	44
4.9 ไดอะแกรมการสื่อสารระหว่างโซลาร์อินเวอร์เตอร์และสถานีไฟฟ้า.....	45
4.10 ค่าทางไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าวงจรที่ 1 ที่ตั้งได้จาก GATEWAY .....	46
4.11 หน้าจอแสดงผลของระบบที่เขียนโปรแกรมขึ้นมา.....	46
4.12 ไดอะแกรมอุปกรณ์ภายในโซลาร์อินเวอร์เตอร์.....	47
4.13 ไดอะแกรมการสื่อสารระหว่าง PLC กับโซลาร์อินเวอร์เตอร์.....	48
4.14 ไดอะแกรมการสื่อสารระหว่าง PLC กับ โซลาร์อินเวอร์เตอร์.....	49
5.1 ข้อมูลความล่าช้าของการสื่อสารแบบมีสายสัญญาณ.....	50
5.2 ข้อมูลความล่าช้าของการสื่อสารแบบไร้สายสัญญาณ.....	51
5.3 โปรแกรมการแสดงผลของระบบไฟฟ้าในสถานีไฟฟ้า.....	51
5.4 ไดอะแกรมการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนของโซลาร์อินเวอร์เตอร์.....	52
5.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าเสมือนที่ถูกจ่ายกับเปอร์เซ็นต์การจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือน ...	53
5.6 ไดอะแกรมการคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนของโซลาร์อินเวอร์เตอร์.....	53
5.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนกับกำลังไฟฟ้าเสมือนที่ถูกจ่าย .	54
5.8 กราฟสมการเส้นตรงที่ได้จากการประมาณการจากข้อมูล .....	54
5.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าเสมือนอ้างอิงกับกำลังไฟฟ้าเสมือนที่จ่ายจริงที่ใช้การ ควบคุมโดยใช้สมการเส้นตรง .....	55
5.10 กราฟสมการกำลังสองที่ได้จากการประมาณการจากข้อมูล .....	56
5.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าเสมือนอ้างอิงกับกำลังไฟฟ้าเสมือนที่จ่ายจริงที่ใช้การ ควบคุมโดยใช้สมการกำลังสอง.....	57
5.12 ไดอะแกรมการคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนของโซลาร์อินเวอร์เตอร์ชนิดระบบปิด.....	57
5.13 ค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุม PID.....	58
5.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าเสมือนอ้างอิงกับกำลังไฟฟ้าเสมือนที่จ่ายจริงที่ใช้การ ควบคุมแบบ PID.....	58
5.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลกำลังไฟฟ้าเสมือนจากสถานีไฟฟ้ากับ กำลังไฟฟ้าเสมือนที่จ่ายจริง .....	59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษา IX นั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันพลังงานเข้ามามีความสำคัญในการดำเนินชีวิตประจำวันของคนทั่วไปและมีส่วนสำคัญในการขับเคลื่อนระบบเศรษฐกิจของประเทศ การขยายตัวของประชากร การเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจ และอุตสาหกรรมเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้ความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มปริมาณมากขึ้น และในอนาคตปัญหาของการขาดแคลนพลังงานมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ทางกระทรวงพลังงานจึงได้มีการวางแผนอนุรักษ์พลังงานขึ้นเพื่อรองรับปัญหาการขาดแคลนพลังงานที่กำลังจะเกิดขึ้นในอนาคต จึงเป็นเหตุจำเป็นที่ทำให้ต้องมองหาพลังงานทางเลือกชนิดอื่นที่ไม่ใช่พลังงานที่ผลิตมาจากเชื้อเพลิงฟอสซิล เนื่องจากการผลิตไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงฟอสซิล เช่น น้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ และถ่านหิน เป็นเชื้อเพลิงใช้แล้วหมดไปและยังก่อให้เกิดมลพิษอีกด้วย ความนิยมในพลังงานหมุนเวียนจากทั่วโลกมีเพิ่มมากขึ้น ทำให้ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งเป็นพลังงานหมุนเวียนที่สะอาดได้รับความนิยมนับเป็นอย่างมาก ในการผลิตไฟฟ้าเพื่อให้เพียงพอต่อความต้องการใช้ไฟฟ้าในระบบ ข้อดีของพลังงานแสงอาทิตย์คือเป็นแหล่งพลังงานที่ได้จากธรรมชาติไม่มีวันหมดและ เป็นแหล่งพลังงานที่สะอาด ไม่มีการเผาไหม้ในกระบวนการผลิต จึงไม่ก่อให้เกิดมลภาวะด้านอากาศและน้ำแก่สิ่งแวดล้อม ในปัจจุบันมีแนวโน้มของต้นทุนในการติดตั้งรวมถึงราคาของอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์มีราคาลดต่ำลงอย่างต่อเนื่อง เพื่อเป็นการส่งเสริมการลงทุนในระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ควบคู่กับการสนับสนุนเชิงนโยบายจากรัฐบาล ในการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ให้มีปริมาณที่เพิ่มขึ้น โดยระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ได้จ่ายไฟฟ้าเข้าระบบเชิงพาณิชย์แล้ว (Commercial Operation Date: COD) กว่า 200 โรง (ข้อมูลเมื่อปี พ.ศ. 2558)

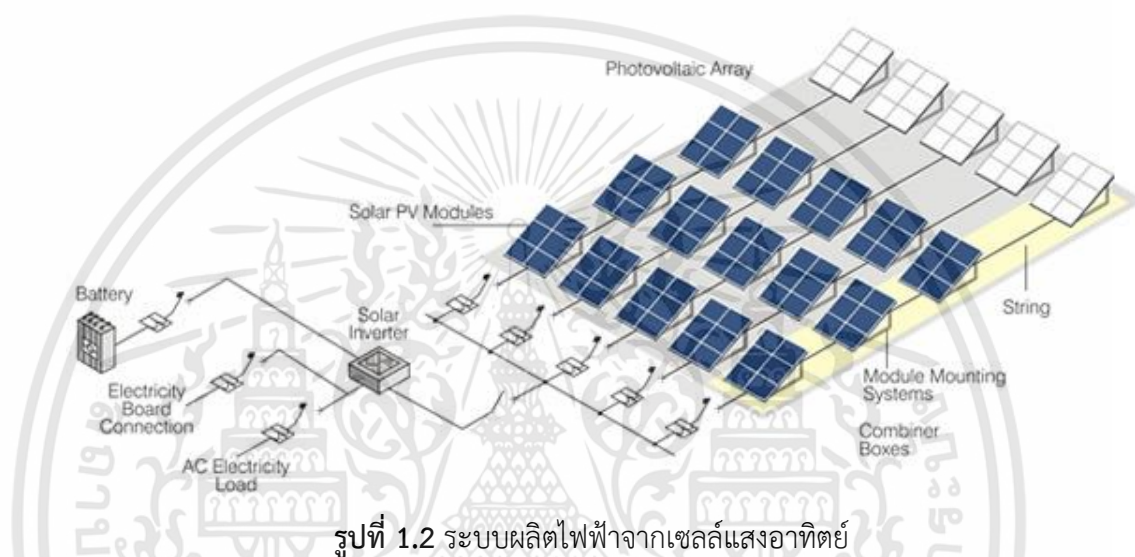


รูปที่ 1.1 พลังงานหมุนเวียนในระบบโครงข่ายไฟฟ้า

เนื่องจากระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่เชื่อมต่อเข้ากับระบบโครงข่ายไฟฟ้ามีมากขึ้น แต่การจัดการและการควบคุมการจ่ายไฟฟ้าเข้าสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ยังใช้ประโยชน์จากโรงไฟฟ้าที่มีอินเวอร์เตอร์เป็นส่วนควบคุมการจ่ายไฟฟ้าทำได้ไม่เต็มที่นัก โดยการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบันจะมีเพียงข้อกำหนดการเชื่อมต่อบริการโครงข่ายไฟฟ้าซึ่งมีการกำหนดค่าต่างๆ เช่น แรงดันไฟฟ้า ความถี่ไฟฟ้า และตัวประกอบกำลังไฟฟ้า ไว้เป็นช่วงให้ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทำงานได้อย่างอิสระภายใต้ข้อกำหนดนั้น นอกจากนี้ปัญหาที่พบเมื่อมีการเชื่อมต่อบริการโครงข่ายไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เข้าสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้า คือปัญหาแรงดันไฟฟ้าที่มีค่าอยู่นอกช่วงตามข้อกำหนดการเชื่อมต่อบริการโครงข่ายไฟฟ้าที่มีสาเหตุหลักจาก 2 ประการ ได้แก่ (1) สาเหตุที่เกิดจากระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เอง โดยระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์อาจจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงเข้าสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้าจนทำให้แรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้า ณ ตำแหน่งต่างๆ ยกเว้นจุดเชื่อมต่อ (Point of Common Coupling: PCC) มีค่าเกินร้อยละ 105 ของระดับแรงดันไฟฟ้าปกติ ซึ่งจากข้อกำหนดการเชื่อมต่อบริการโครงข่ายไฟฟ้าจะพบว่าไม่มีการกำหนดให้ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ต้องช่วยเหลือแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้าและทำให้ศูนย์ควบคุมการจ่ายไฟฟ้าต้องรับภาระในการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้า (2) สาเหตุที่เกิดจากระบบโครงข่ายไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงอย่างรุนแรง เช่น การเกิดอุบัติเหตุทำให้สายส่งชำรุด การซ่อมบำรุงระบบโครงข่ายไฟฟ้า การเพิ่มขึ้นของโหลดขนาดใหญ่ ซึ่งเป็นเหตุการณ์ที่ส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ทำให้ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่จำเป็นต้องเชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้าขณะที่แรงดันไฟฟ้า ณ จุดเชื่อมต่อมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 95 ถึง 105 ของแรงดันไฟฟ้าปกติไม่สามารถเชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้า ทำให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต้องมีการจ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้าเสมือนเพื่อเพิ่มหรือลดแรงดันไฟฟ้า โดยการจ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้าเสมือนนี้อาจส่งผลกระทบต่อการผลิตกำลังไฟฟ้าจริงของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แล้ว อีกทั้งยังส่งผลต่อเนื่องถึงการคิดค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่เป็นทั้งผู้ขายไฟฟ้าและผู้ใช้ไฟฟ้าต้องจ่ายให้การไฟฟ้าในกรณีที่มีค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนเกินกว่าที่กำหนด



รูปที่ 1.2 ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

งานวิจัยนี้นำเสนอการศึกษาการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์กับระบบโครงข่ายไฟฟ้า ปัญหาที่เกิดขึ้นเมื่อมีการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เข้าสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้า คือปัญหาแรงดันไฟฟ้าที่ไม่อยู่ในระดับแรงดันไฟฟ้าปกติ ซึ่งการแปรเปลี่ยนของขนาดแรงดันไฟฟ้าอาจทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าตกหรือแรงดันไฟฟ้าเกิน โดยแรงดันไฟฟ้าเปลี่ยนค่ากะทันหันในระบบโครงข่ายไฟฟ้าเนื่องจากการเกิดแรงดันไฟฟ้าตกและแรงดันไฟฟ้าเกินในระบบโครงข่ายไฟฟ้าจะทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้าในระบบทำงานผิดพลาดและอาจทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าเสียหายได้ จึงจำเป็นต้องควบคุมการจ่ายไฟฟ้าเพื่อรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าด้วยการจ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้าเสมือนเพื่อเพิ่มหรือลดแรงดันไฟฟ้า งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์รวมถึงหาวิธีการป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับอุปกรณ์ภายในระบบโครงข่ายไฟฟ้า

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ชดเชยค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนของระบบไฟฟ้า
2. เพื่อศึกษาหารูปแบบการควบคุมการจ่ายค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนของ Solar Inverter
3. เพื่อศึกษารูปแบบการสื่อสารตามมาตรฐาน IEC 61850 ของสถานีไฟฟ้าอัจฉริยะ

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาการชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนในสถานีไฟฟ้าบัวใหญ่ อ.บัวใหญ่ จ.นครราชสีมา ด้วยระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ที่รับค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนอ้างอิงมาจ่ายข้อมูล ณ สถานีไฟฟ้าที่ระดับแรงดัน 22kV, Feeder ที่ 1 ของระบบจำหน่าย

## 1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

1. ทำให้เกิดองค์ความรู้เกี่ยวกับการควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนในระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์
2. เพื่อนำองค์ความรู้เกี่ยวกับการควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนในระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ ไปพัฒนาต่อยอดในการออกแบบระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ที่จะเกิดขึ้นต่อไป
3. ทำให้เกิดองค์ความรู้เกี่ยวกับการสื่อสารของอุปกรณ์ไฟฟ้าในสถานีไฟฟ้ากับระบบไฟฟ้าอื่นๆ

## 1.5 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์

บทที่ 1 บทนำ กล่าวถึง ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของงานวิจัย ขอบเขตของงานวิจัย ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย โครงสร้างของวิทยานิพนธ์ และแผนการดำเนินการวิจัย

บทที่ 2 ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ กล่าวถึง การผลิตไฟฟ้าของพลังงานแสงอาทิตย์ หลักการทำงานทั่วไปของเซลล์แสงอาทิตย์ ประโยชน์ของการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ อุปกรณ์สำคัญของระบบการผลิตกระแสไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิดของเซลล์แสงอาทิตย์ และอินเวอร์เตอร์โซลาร์เซลล์

บทที่ 3 สถานีไฟฟ้าอัจฉริยะ กล่าวถึง ระบบภายในสถานีไฟฟ้าอัจฉริยะ โครงสร้างของสถานีไฟฟ้าอัจฉริยะ มาตรฐาน IEC61850 และการสื่อสารแบบอนุกรม

บทที่ 4 กล่าวถึง การออกแบบการทดลอง ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ การสื่อสารระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์กับสถานีไฟฟ้า และระบบควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์

บทที่ 5 ผลการทดสอบแบตเตอรี่ กล่าวถึง การทดสอบการสื่อสารแบบไร้สายระหว่างสถานีไฟฟ้ากับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ การทดสอบการควบคุมการจ่ายกำลังเสมือนของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ การทดสอบการควบคุมการจ่ายกำลังเสมือนของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์เทียบกับข้อมูลในสถานีไฟฟ้า

บทที่ 6 กล่าวถึงบทสรุปของงานวิจัย ข้อเสนอแนะ และแนวทางการพัฒนา



## 1.6 แผนการดำเนินการวิจัย

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินการวิจัย

การดำเนินงาน	เดือนที่												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1. ศึกษาข้อมูล ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์	■	■											
2. ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับสถานีไฟฟ้าอัจฉริยะ		■	■										
3. ศึกษาการใช้ระบบควบคุมกับโซลาร์อินเวอร์เตอร์		■	■										
4. ติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ในสถานีไฟฟ้า				■	■	■							
5. ติดตั้งระบบควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือนให้กับโซลาร์อินเวอร์เตอร์					■	■	■						
6. ทดสอบระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์							■	■	■				
7. ทดสอบการควบคุมการจ่ายกำลังเสมือนของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์							■	■	■				
8. เก็บผลการทดลองกำลังเสมือนของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์เทียบกับข้อมูลในสถานีไฟฟ้า									■	■	■		
8. สรุปผลงานวิจัย										■	■	■	
9. จัดทำรูปเล่มปริญาานิพนธ์													■

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## บทที่ 2

# ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

### 2.1 บทนำ

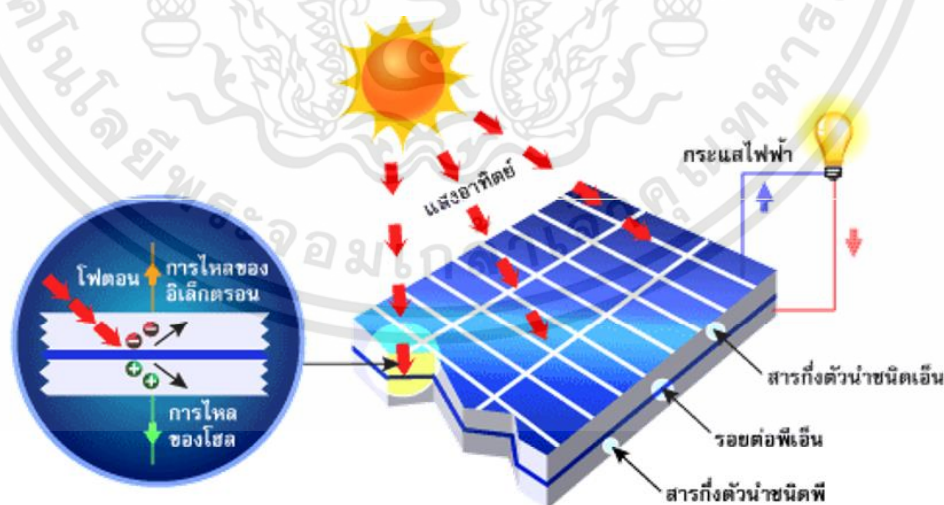
ปัจจุบันระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์มีความนิยมติดตั้งกันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากหลายปัจจัย เช่น การคุ้มค่าด้านการลงทุน การดูแลรักษาง่าย การใช้พลังงานแสงอาทิตย์ซึ่งเป็นพลังงานสะอาด แต่หากมองในมุมของผู้จำหน่ายไฟฟ้าแล้วนั้น แนนอนว่ากำลังการผลิตไฟฟ้าที่มากขึ้นในระบบไฟฟ้าส่งผลให้การควบคุมระบบไฟฟ้านั้นทำได้ยากและมีความซับซ้อนขึ้น ส่งผลให้เกิดปัญหาต่างๆ ตามมาในระบบไฟฟ้า บทนี้จะเป็นการศึกษาถึงการบวนการผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ ประโยชน์ของการผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ อุปกรณ์สำคัญที่ใช้ในระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ ปัญหาที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าเมื่อมีการเชื่อมระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ และการสูญเสียโอกาสในการผลิตไฟฟ้าเมื่อมีการปลดออกจากระบบของโซลาร์อินเวอร์เตอร์ เพื่อนำข้อมูลดังกล่าวเป็นแนวทางในการออกแบบระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ที่จะเกิดขึ้นในอนาคต

### 2.2 การผลิตไฟฟ้าของพลังงานแสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์ หรือโซลาร์เซลล์ (Solar Cell) เป็นสิ่งประดิษฐ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง เซลล์แสงอาทิตย์ทำมาจากสารกึ่งตัวนำ เช่น ซิลิคอน (Silicon), แกลเลียม อาร์เซไนด์ (Gallium Arsenide), อินเดียม ฟอสไฟด์ (Indium Phosphide), แคดเมียม เทลเลอไรด์ (Cadmium Telluride) และคอปเปอร์ อินเดียม ไตเซลไนด์ (Copper Indium Diselenide) เป็นต้น เมื่อได้รับแสงอาทิตย์โดยตรงก็จะเปลี่ยนเป็นพาหะนำไฟฟ้า และจะถูกแยกเป็นประจุไฟฟ้าบวกและลบเพื่อให้เกิดแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วทั้งสองของเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อนำขั้วไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ต่อเข้ากับอุปกรณ์ไฟฟ้ากระแสตรง กระแสไฟฟ้าจะไหลเข้าสู่อุปกรณ์เหล่านั้น ทำให้สามารถทำงานได้

เซลล์แสงอาทิตย์ เป็นอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าที่ไม่ต้องใช้เชื้อเพลิงอื่นใดนอกจากแสงอาทิตย์ ซึ่งเป็นพลังงานที่ได้เปล่า ไม่มีของเสียที่จะทำให้เกิดมลพิษขณะใช้งาน เป็นอุปกรณ์ที่ติดตั้งอยู่กับที่ไม่มีการเคลื่อนไหวใด ๆ ขณะทำงาน จึงไม่มีปัญหาด้านความสั่นหรือ ต้องการการบำรุงรักษาเหมือนอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบอื่นๆ เช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ด้วยน้ำมันดีเซล นอกจากนั้นเซลล์แสงอาทิตย์ยังมีน้ำหนักเบา จึงทำให้ได้อัตราระหว่างกำลังไฟฟ้าต่อน้ำหนักได้ดีที่สุด

ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ประกอบด้วย แผงเซลล์แสงอาทิตย์ติดตั้ง และชุดแปลงกระแสไฟฟ้า (อินเวอร์เตอร์) โดยมีหลักการทำงานของระบบคือ เมื่อมีแสงอาทิตย์ตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์ จะเกิดการสร้างพาหะนำไฟฟ้าประจุลบและบวกขึ้น ได้แก่ อิเล็กตรอนและ โฮล โครงสร้างรอยต่อพีเอ็นจะทำหน้าที่สร้างสนามไฟฟ้าภายในเซลล์ เพื่อแยกพาหะนำไฟฟ้าชนิดอิเล็กตรอนไปที่ขั้วลบ และพาหะนำไฟฟ้าชนิดโฮลไปที่ขั้วบวก (ปกติที่ฐานจะใช้สารกึ่งตัวนำชนิดพี ขั้วไฟฟ้าด้านหลังจึงเป็นขั้วบวก ส่วนด้านรับแสงใช้สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ขั้วไฟฟ้าจึงเป็นขั้วลบ) ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าแบบกระแสตรงที่ขั้วไฟฟ้าทั้งสอง เมื่อต่อให้ครบวงจรไฟฟ้าจะเกิดกระแสไฟฟ้าไหลขึ้น การทำงานทั่วไปของเซลล์แสงอาทิตย์แสดงดังรูปที่ 2.1 ตัวอย่างเช่นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 นิ้ว จะให้กระแสไฟฟ้าประมาณ 2-3 แอมแปร์ และให้แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดประมาณ 0.6 โวลต์ เนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ไม่มากนัก ดังนั้นเพื่อให้ได้กำลังไฟฟ้ามากเพียงพอสำหรับใช้งาน จึงมีการนำเซลล์แสงอาทิตย์หลายๆ เซลล์มาต่อกันเป็น เรียกว่า แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Modules) ลักษณะการต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขึ้นอยู่กับความต้องการกระแสไฟฟ้าหรือแรงดันไฟฟ้า การต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบขนาน จะทำให้ได้กระแสไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น การต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบอนุกรม จะทำให้ได้แรงดันไฟฟ้าสูงขึ้น เซลล์แสงอาทิตย์ทั้งหมดจะผลิตกระแสไฟฟ้าตรง ผ่านระบบควบคุมเข้าอินเวอร์เตอร์ อินเวอร์เตอร์จะเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับจ่ายเข้าระบบไฟฟ้า ในช่วงที่ความเข้มของแสงอาทิตย์ไม่เพียงพอ หรือมีการใช้อุปกรณ์ที่ใช้กำลังไฟฟ้าสูงกว่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์แล้ว ระบบก็จะนำกำลังไฟฟ้าส่วนขาดจากระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบปกติของกริดไฟฟ้ามาใช้เพื่อให้อุปกรณ์ไฟฟ้าสามารถทำงานได้



รูปที่ 2.1 การทำงานทั่วไปของเซลล์แสงอาทิตย์

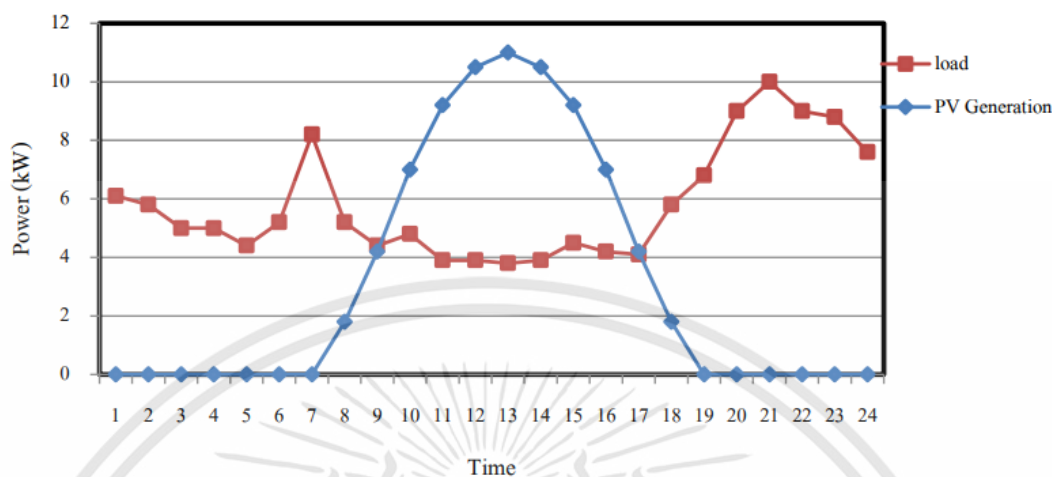
## 2.3 ปัญหาที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าเมื่อมีการเชื่อมระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์

ปัจจุบันระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์มีการติดตั้งใช้งานเพิ่มขึ้นทุกๆ ปี ประกอบกับนโยบายของรัฐในการส่งเสริมสนับสนุนการใช้งานพลังงานทดแทน ซึ่งทำให้มีทิศทางในการใช้งานระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์มากขึ้น ในอนาคตมีการคาดการณ์ว่าจะมีแนวโน้มการติดตั้ง ใช้งานระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์เพิ่มขึ้นต่อไปอีกเรื่อยๆ เป็นจำนวนมากจากนโยบายการผลิตพลังงานด้วยเซลล์แสงอาทิตย์อย่างอิสระ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นมากที่จะต้องพิจารณาผลกระทบของการติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ต่อคุณภาพไฟฟ้าในระบบจำหน่าย โดยปัจจัยหลักที่พิจารณาประกอบด้วย ปัจจัยด้านแรงดันไฟฟ้าและด้านกำลังไฟฟ้าสูญเสีย

ผลกระทบของการติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ต่อคุณภาพไฟฟ้าในระบบจำหน่ายได้แก่ การเปลี่ยนของระดับแรงดันไฟฟ้าจากการป้อนกำลังไฟฟ้าเข้าสู่ระบบไฟฟ้าที่ระดับสูง ส่งผลให้โซลาร์อินเวอร์เตอร์ตัดแหล่งผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ออกจากระบบ อีกทั้งยังส่งผลต่อคุณภาพของระบบไฟฟ้าในระบบจำหน่าย อาจส่งผลเสียต่ออุปกรณ์ที่เชื่อมต่ออยู่กับระบบจำหน่าย เช่น หม้อแปลงไฟฟ้า รีเลย์ สวิตช์ ฟิวส์ เป็นต้น

ลักษณะกำลังผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ใน 1 วัน จะมีลักษณะเปลี่ยนแปลงตามสภาพภูมิอากาศของประเทศและสามารถผลิตไฟฟ้าได้เฉพาะในเวลากลางวัน โดยปกติ ตั้งแต่เวลา 07.00 น.-18.00 น. และผลิต ไฟฟ้าได้สูงสุดในช่วงเวลา 11.00 น.-14.00 น. ดังรูปที่ 2.2 เราพบว่าช่วงเวลาความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงสุดและช่วงเวลากำลังผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์สูงสุดในรอบ 1 วันไม่ตรงกันปัญหาดังกล่าวส่งผลกระทบต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้าทั้งในส่วนองแรงดันไฟฟ้าเกินในช่วงเวลากลางวันและอาจจะนำไปสู่กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่มากขึ้นเนื่องจากกำลังไฟฟ้าสามารถไหลย้อนกลับไปยังระบบจำหน่าย

ปัญหาของระบบจำหน่ายไฟฟ้าจากการเชื่อมต่อบริษัทผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ได้แก่ ผลกระทบกับระดับแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่าย แรงดันไฟฟ้ากระเพื่อม ความไม่สมดุลของระดับแรงดันไฟฟ้า ผลกระทบที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์ ความไม่แน่นอนของการผลิตกำลังไฟฟ้า ผลกระทบจากตัวประกอบกำลังไฟฟ้า เป็นต้น เมื่อพิจารณาระดับแรงดันไฟฟ้าที่จุดเชื่อมต่อของการไฟฟ้านั้น จะต้องเป็นไปตามข้อกำหนดของการไฟฟ้าที่ระดับแรงดันต่างๆ โดยจะกำหนดค่าสูงสุดและต่ำสุด ดังตารางที่ 2.1 หากค่าแรงดันไฟฟ้ามีค่าสูงกว่าที่กำหนด จะส่งผลให้ระบบไฟฟ้าตัดแหล่งผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ออกจากระบบจำหน่าย ซึ่งเหตุการณ์ดังกล่าวนี้ส่งผลให้เสียโอกาสการจ่ายไฟจากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

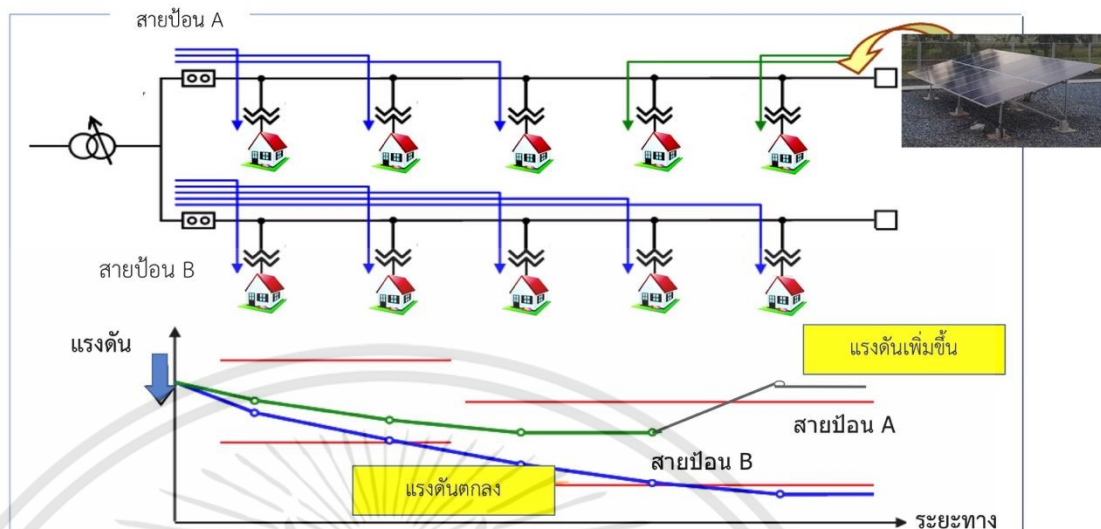


รูปที่ 2.2 กำลังการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์และลักษณะโหลดรายวันต่อครัวเรือน

ตารางที่ 2.1 ระดับแรงดันไฟฟ้าที่ยอมรับได้ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

ระดับแรงดัน	ภาวะปกติ		ภาวะฉุกเฉิน	
	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด
115 kV	120.7 kV	109.2 kV	126.5 kV	103.5 kV
69 kV	72.4 kV	65.5 kV	75.9 kV	62.1 kV
33 kV	34.7 kV	31.3 kV	36.3 kV	29.7 kV
22 kV	23.1 kV	20.9 kV	24.2 kV	19.8 kV
380 V	342 V	418 V	342 V	418 V
220 V	200 V	240 V	200 V	240 V

ซึ่งโดยปกติการเกิดแรงดันที่มากหรือน้อยในระบบไฟฟ้านอกจากจะขึ้นอยู่กับระยะทางระหว่างโหลดกับแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแล้วยังมีผลที่เกิดจากการเพิ่มขึ้นของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเข้ามาในระบบอีกด้วย ซึ่งแน่นอนว่าเมื่อโหลดที่ใกล้แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจะมีแรงดันที่ค่อนข้างสูงเนื่องจากทางผู้จำหน่ายจะทำให้ระดับแรงดัน ณ จุดนี้มากเพื่อให้โหลดที่อยู่ใกล้มีแรงดันที่ไม่ต่ำกว่ามาตรฐาน หากมีการเกิดแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นในระบบก็จะทำให้แรงดัน ณ จุดนั้นสูงยิ่งขึ้นไปอีก และถ้าแหล่งจ่ายกำลังนั้นๆไม่สามารถประมาณการผลิตกำลังไฟฟ้าแต่ละช่วงเวลาได้ก็จะทำให้ระดับแรงดันในระบบไม่มีความแน่นอน ดังรูปที่ 2.3



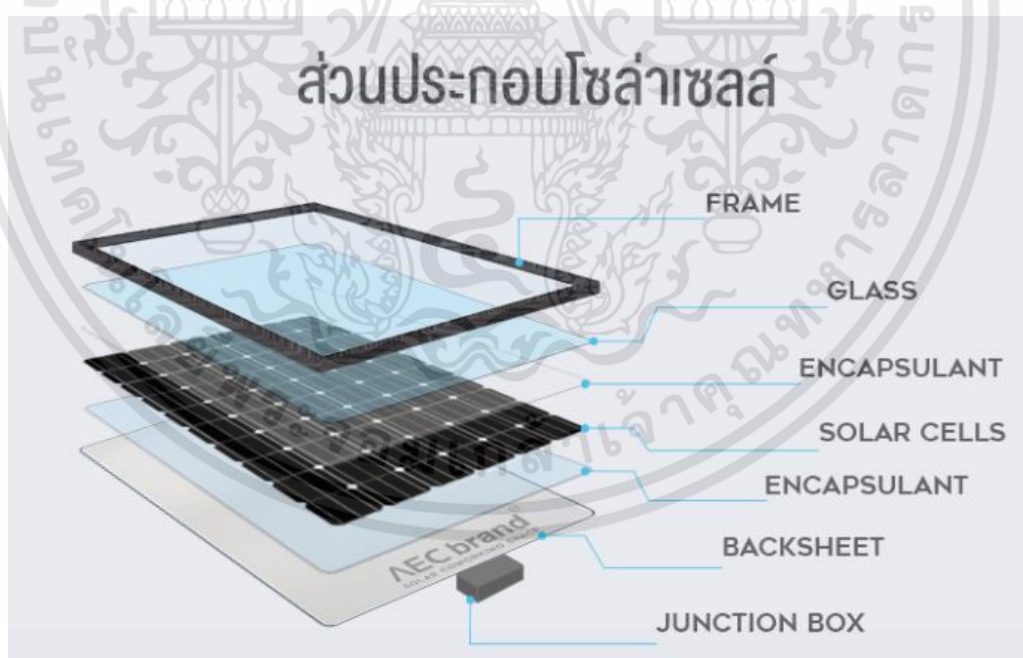
รูปที่ 2.3 ระดับแรงดันของระบบเมื่อก่อนและหลังมีระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์

ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่เชื่อมต่อถูกออกแบบสำหรับผลิตไฟฟ้าผ่านโซลาร์อินเวอร์เตอร์เข้าสู่ระบบสายจำหน่ายไฟฟ้าโดยตรง ทั้งนี้ไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์จะขายให้การไฟฟ้าในอัตราซื้อไฟฟ้า (FIT) ผ่านมิเตอร์ขายไฟฟ้า ขณะที่ไฟฟ้าที่ใช้ภายในบ้านอยู่อาศัย ผู้ใช้ไฟฟ้าจะเสียค่าไฟฟ้าเท่ากับอัตราค่าไฟฟ้าที่กำหนดไว้ในโครงสร้างค่าไฟฟ้า ผ่านมิเตอร์ซื้อ โดยอัตราซื้อจะสูงกว่าอัตราค่าไฟฟ้า การเกิดเหตุการณ์ปลดออกของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ จะก่อให้เกิดความสูญเสียค่าไฟฟ้า โดยทั่วไประบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์จะมีระยะเวลาในการทำงานต่อวันประมาณ 4 ชั่วโมง เมื่อเทียบกับปกติกำลังการผลิต หากมีการปลดการเชื่อมต่ออินเวอร์เตอร์ออกจากระบบไฟฟ้าเนื่องจากสภาวะแรงดันไฟฟ้าต่ำหรือเกินมาตรฐานของระบบไฟฟ้า มีผลทำให้สูญเสียโอกาสในการผลิตกำลังไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งจะมีค่ามากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับคุณภาพไฟฟ้าที่จุดเชื่อมต่อต่างๆ กรณีที่อินเวอร์เตอร์ถูกปลดออก จะต้องใช้เวลาอย่างน้อย 3 นาที หากภายในหนึ่งวันเกิดการปลดออกของอินเวอร์เตอร์ 10 ครั้ง ทำให้สูญเสียโอกาสในการผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์เท่ากับ 30 นาที คิดเป็น 12.5% ของพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ต่อวัน ตัวอย่างเช่น ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ขนาด 1 MW โอกาสในการผลิตกำลังไฟฟ้าที่ควรจะได้คือ 4 MWh เมื่อคิดค่ารับซื้อพลังงานไฟฟ้าหน่วยละ 6 บาท สมมติมีการปลดออกของอินเวอร์เตอร์ 10 ครั้งต่อวันจะสูญเสียรายได้ประมาณ 3,000 บาทต่อวัน หรือประมาณ 1,095,000 บาทต่อปี ทั้งนี้หากมีการแก้ปัญหาการปลดออก

ของอินเวอร์เตอร์จากสาเหตุของความไม่สม่ำเสมอของแรงดันไฟฟ้าทั้งแรงดันไฟฟ้าต่ำและแรงดันไฟฟ้าเกิน จะทำให้ลดความสูญเสียค่าใช้จ่ายในส่วนนี้

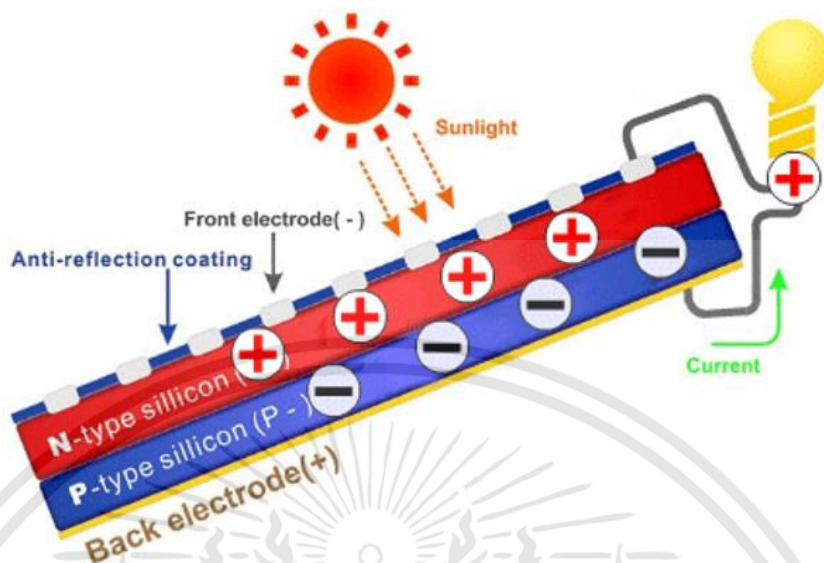
## 2.4 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์

โครงสร้างที่นิยมมากที่สุด ได้แก่ รอยต่อพีเอ็นของสารกึ่งตัวนำ สารกึ่งตัวนำที่ราคาถูกที่สุดและมีมากที่สุดบนโลก คือ ซิลิคอน จึงถูกนำมาสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ โดยนำซิลิคอนมาถลุง และผ่านขั้นตอนการทำให้บริสุทธิ์ จนกระทั่งทำให้เป็นผลึก จากนั้นนำมาผ่านกระบวนการแพร่ซึมสารเจือปนเพื่อสร้างรอยต่อพีเอ็น โดยเมื่อเติมสารเจือฟอสฟอรัส จะเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (เพราะนำไฟฟ้าด้วยอิเล็กตรอนซึ่งมีประจุลบ) และเมื่อเติมสารเจือโบรอน จะเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี (เพราะนำไฟฟ้าด้วยโฮลซึ่งมีประจุบวก) ดังนั้น เมื่อนำสารกึ่งตัวนำชนิดพีและเอ็นมาต่อกัน จะเกิดรอยต่อพีเอ็นขึ้น โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอน อาจมีรูปร่างเป็นแผ่นวงกลมหรือสี่เหลี่ยมจัตุรัส ความหนา 200-400 ไมครอน (0.2-0.4 มม.) ผิวด้านรับแสงจะมีชั้นแพร่ซึมที่มีการนำไฟฟ้า ขั้วไฟฟ้าด้านหน้ารับแสงจะมีลักษณะคล้ายก้างปลาเพื่อให้ได้พื้นที่รับแสงมากที่สุด ส่วนขั้วไฟฟ้าด้านหลังเป็นขั้วโลหะเต็มพื้นผิว ส่วนประกอบของเซลล์แสงอาทิตย์แสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.4 ส่วนประกอบของเซลล์แสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 โครงสร้างภายในเซลล์แสงอาทิตย์

การทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์เป็นขบวนการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นกระแสไฟฟ้าได้โดยตรง โดยเมื่อแสงซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและมีพลังงานกระทบกับสารกึ่งตัวนำ จะเกิดการถ่ายเทพลังงานระหว่างกัน พลังงานจากแสงจะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้า (อิเล็กตรอน) ขึ้นในสารกึ่งตัวนำ จึงสามารถต่อกระแสไฟฟ้าง่ายๆไปใช้งานได้ โครงสร้างภายในเซลล์แสงอาทิตย์แสดงดังรูปที่ 2.4

ระดับชั้นบนสุด เรียกว่า FRONT ELECTRODE ชั้นนี้จะมีแถบโลหะทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอน จะมีลักษณะเป็นโลหะ มักจะทำด้วยโลหะเงิน

ระดับชั้นที่ 2 ต่ำลงมา เรียกว่าชั้น n - type ซิลิคอน อยู่ด้านหน้าของ ระดับชั้น N นี้ คือชั้นของสารกึ่งตัวนำที่ใส่สารฟอสฟอรัสลงไป เพื่อให้มีการนำไฟฟ้า จะสร้างอิเล็กตรอนขึ้นมาในชั้นนี้เมื่อสารนี้โดนแดดหรือแสงอาทิตย์

ระดับชั้นที่ 3 ต่ำลงมา เรียกว่าชั้น p - n junction เป็นชั้นที่ชั้น N และ ชั้น P มาเจอกัน จากในรูปก็คือช่วงที่เป็นเส้นกันระหว่างชั้น N สีแดง และ ชั้น P สีน้ำเงิน เป็นจุดที่ชั้นซิลิคอน ชั้น N และ ชั้น P มาประกบต่อกัน เราจะเรียกจุดที่ประกบกันนี้ว่า P-N junction

ระดับชั้นที่ 4 ชั้นล่างพื้น เรียกว่าชั้น p - type ซิลิคอน ซึ่งอยู่ด้านล่างของเซลล์ ชั้น P คือชั้นของสารกึ่งตัวนำที่ได้ใส่สารโบรอน (Boron) เพื่อควบคุมให้มีการนำไฟฟ้าลงไป ทำให้โครงสร้างของอะตอมสูญเสียอิเล็กตรอนเกิดหลุมในชั้นนี้ (โฮล)

ระดับชั้นที่ 5 ชั้นล่างสุดเรียกว่าชั้น Back Electrode ด้านหลังของ p - type ซิลิคอนจะมีแถบโลหะเรียกว่า Back Electrode ทำหน้าที่เป็นตัวรวบรวมโฮล

ขั้นตอนการทำงาน เมื่อมีแสงอาทิตย์ตกกระทบ แสงอาทิตย์จะถ่ายเทพลังงานให้กับอิเล็กตรอนและโฮล ทำให้เกิดการเคลื่อนไหว และเมื่อพลังสูงเพียงพอ ทั้งอิเล็กตรอนและโฮลก็จะวิ่งเข้าหากันเพื่อจับคู่กัน อิเล็กตรอนจะวิ่งขึ้นไปยังชั้น n - type และโฮลจะวิ่งลงไปยังชั้น p type อิเล็กตรอนก็จะวิ่งขึ้นไปรวมกันอยู่ที่ชั้น Front Electrode และ โฮลก็จะวิ่งลงไปรวมกันที่ Back Electrode และเมื่อมีการต่อวงจรไฟฟ้าจากชั้น Front Electrode บนสุด และ Back Electrode ล่างสุด เมื่อต่อให้ครบวงจร ก็จะเกิดกระแสไฟฟ้าไหลขึ้น เพราะอิเล็กตรอนและ(โฮล) จะวิ่งเพื่อจับคู่กัน

## 2.5 ชนิดของเซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์ที่พัฒนาและใช้งานในปัจจุบันนั้น แทบทั้งหมดทำจากธาตุซิลิคอนซึ่งเป็นธาตุที่มีมากเป็นอันดับสองบนโลก รองจากออกซิเจน ทรายตามชายหาด ท้องทะเล หินต่างๆ ก็มีซิลิคอนเป็นส่วนประกอบหลักๆ นั่นคือ เป็นธาตุที่มีมากมายเหลือใช้ (แต่การนำมาทำให้บริสุทธิ์ใช้งานได้ ต้องมีเทคนิคและใช้พลังงาน นั่นคือต้องมีค่าใช้จ่าย) ซิลิคอนเป็นวัสดุที่ใช่มากในอุตสาหกรรมสารกึ่งตัวนำ โดยแทบจะเรียกได้ว่าเป็นเมล็ดข้าวสารของอุตสาหกรรมนี้เลยทีเดียว การจะนำซิลิคอนมาใช้ในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์นั้น ในแง่ของวัสดุได้มีอุตสาหกรรมรองรับอยู่แล้ว เซลล์แสงอาทิตย์แบ่งออกเป็น 3 ชนิดตามโครงสร้างผลึก ดังนี้

1. เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากซิลิคอน ชนิดผลึกเดี่ยว (Single Crystalline Silicon Solar Cell) หรือที่รู้จักกันในชื่อ Monocrystalline Silicon Solar Cell และชนิดผลึกรวม (Polycrystalline Silicon Solar Cell) ลักษณะเป็นแผ่นซิลิคอนแข็งและบางมาก มักจะเห็นตามหลังคาบ้านและนิยมใช้กันมากที่สุด ลักษณะเป็นแผ่นซิลิคอนแข็งและบางมาก เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอน Crystalline Silicon (c-Si) โดยนำแท่งซิลิคอนมาถูที่อุณหภูมิสูงถึง 1,500 องศาเซลเซียส และผ่านขั้นตอนการทำให้บริสุทธิ์จนกระทั่งทำให้เป็นผลึก จากนั้นนำมาผ่านกระบวนการแพร่ซึมสารเจือปนเพื่อสร้างรอยต่อพีเอ็น โดยเมื่อเติมสารเจือฟอสฟอรัส จะเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (เพราะนำไฟฟ้าด้วยอิเล็กตรอนซึ่งมีประจุลบ) และเมื่อเติมสารเจือโบรอน จะเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี (เพราะนำไฟฟ้าด้วยโฮลซึ่งมีประจุบวก) ดังนั้นเมื่อนำสารกึ่งตัวนำชนิดพีและเอ็นมาต่อกัน จะเกิดรอยต่อพีเอ็นขึ้น โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอน อาจมีรูปร่างเป็นแผ่นวงกลมหรือสี่เหลี่ยมจัตุรัส ความหนา 200-400 ไมครอน (0.2-0.4 มม.) ผิวด้านรับแสงจะมีชั้นแพร่ซึมที่มีการนำไฟฟ้า ขั้วไฟฟ้าด้านหน้าที่ได้รับแสงจะมีลักษณะคล้ายก้างปลาเพื่อให้ได้พื้นที่รับแสงมากที่สุด ส่วนขั้วไฟฟ้าด้านหลังเป็นขั้วโลหะเต็มพื้นผิว โดยมีประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานประมาณร้อยละ 13-15 โดยที่ต้นทุนในการผลิตแผงเซลล์ชนิดนี้ค่อนข้างสูง

เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากซิลิคอนชนิดผลึกเดี่ยว (Single Crystal) หรือ Monocrystalline มีขั้นตอนการผลิต ดังนี้

1. นำซิลิคอนที่ถลุงได้มาหลอมเป็นของเหลวที่อุณหภูมิประมาณ 1400 °C แล้วดึงผลึกออกจากของเหลว โดยลดอุณหภูมิลงอย่างช้าๆ จนได้แท่งผลึกซิลิคอนเป็นของแข็ง แล้วนำมาตัดเป็นแว่นๆ
2. นำผลึกซิลิคอนที่เป็นแว่น มาแพร่ซึมด้วยสารเจือปนต่างๆ เพื่อสร้างรอยต่อพีเอ็นภายในเตาแพร่ซึมที่มีอุณหภูมิประมาณ 900-1000 °C แล้วนำไปทำขั้นตอนการสะท้อนแสงด้วยเตาออกซิเดชันที่มีอุณหภูมิสูง
3. ทำขั้วไฟฟ้าสองด้านด้วยการฉาบโลหะภายใต้สุญญากาศ เมื่อเสร็จเรียบร้อยแล้วจะต้องนำไปทดสอบประสิทธิภาพด้วยแสงอาทิตย์เทียม และวัดหาคุณสมบัติทางไฟฟ้า



รูปที่ 2.6 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยว

เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากซิลิคอนชนิดผลึกรวม (Polycrystalline) มีขั้นตอนการผลิต ดังนี้

1. นำซิลิคอนที่ถลุงและหลอมละลายเป็นของเหลวแล้วมาเทลงในแบบพิมพ์ เมื่อซิลิคอนแข็งตัวจะได้เป็นแท่งซิลิคอนเป็นแบบผลึกรวม แล้วนำมาตัดเป็นแว่นๆ
2. จากนั้นนำมาแพร่ซึมด้วยสารเจือปนต่างๆ และทำขั้วไฟฟ้าสองด้านด้วยวิธีการเช่นเดียวกับที่สร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากซิลิคอนชนิดผลึกเดี่ยว



รูปที่ 2.7 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกรวม

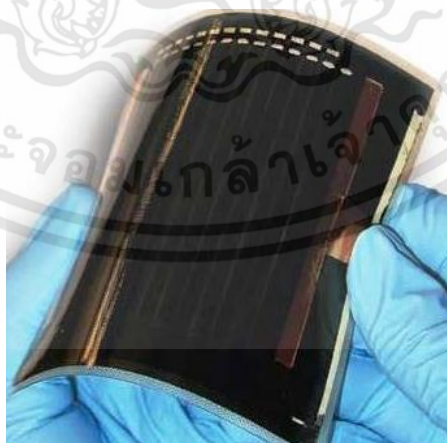
2. เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากอะมอร์ฟัสซิลิคอน (Amorphous Silicon Solar Cell) ลักษณะเป็นฟิล์มบางเพียง 0.5 ไมครอน (0.0005 มม.) น้ำหนักเบามาก และประสิทธิภาพเพียง 5-10% จะเห็นทั่วไปในเครื่องคิดเลขพลังแสงอาทิตย์ ข้อเสียคือจะแตกหักง่าย ใช้พื้นที่ติดตั้งมาก และมีประสิทธิภาพเพียง 5-10% เท่านั้น แต่มีข้อดีที่สามารถแปลงพลังงานแสงเพียงเล็กน้อยเป็นพลังงานไฟฟ้าได้มากกว่าโซลาร์เซลล์ชนิดอื่นๆ เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนมีโครงสร้างประกอบด้วยแผ่นฐานกระจกและฟิล์มบางชั้นต่างๆ เคลือบเป็นชั้นๆ คือ ฟิล์มบางชั้นไฟฟ้าโปร่งแสง (ดีบุกออกไซด์) หนาประมาณ 2000 อังสตรอม ฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอน หนาประมาณ 6000 อังสตรอม (รอยต่อ p-n) และฟิล์มบางชั้นไฟฟ้าด้านหลัง (อะลูมิเนียม) หนาประมาณ 5000 อังสตรอม สำหรับฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอนนั้นผลิตด้วยวิธีการแยกสลายก๊าซด้วยสนามไฟฟ้า (glow discharge plasma CVD) ได้เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพสูงสุดประมาณ 6.7%



รูปที่ 2.8 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน

เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากที่ทำจากอะมอร์ฟัสซิลิคอน มีขั้นตอนการผลิต ดังนี้

1. ทำการแยกสลายก๊าซซิลิโคน (Silane Gas) ให้เป็นอะมอร์ฟัสซิลิคอน โดยใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า เครื่อง Plasma CVD (Chemical Vapor Deposition) เป็นการผ่านก๊าซซิลิโคนเข้าไปใน ครอบแก้วที่มีขั้วไฟฟ้าความถี่สูง จะทำให้ก๊าซแยกสลายเกิดเป็นพลาสมา และอะตอมของ ซิลิคอนจะตกลงบนฐานหรือสแตนเลสสตีลที่วางอยู่ในครอบแก้ว เกิดเป็นฟิล์มบางขนาดไม่ เกิน 1 ไมครอน (0.001 มม.)
  2. ขณะที่แยกสลายก๊าซซิลิโคน จะผสมก๊าซฟอสฟีนและไดโบเรนเข้าไปเป็นสารเจือปน เพื่อ สร้างรอยต่อพีเอ็นสำหรับใช้เป็นโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์
  3. การทำขั้วไฟฟ้า มักใช้ขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงที่ทำจาก ITO (Indium Tin Oxide)
3. เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากสารกึ่งตัวนำอื่นๆ เช่น แกลเลียม อาร์เซไนด์, แคดเมียม เทลเลอไรด์ และคอปเปอร์ อินเดียม ไตเซลไนด์ เป็นต้น มีทั้งชนิดผลึกเดี่ยว (Single Crystalline) และผลึก รวม (Polycrystalline) เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากแกลเลียม อาร์เซไนด์ จะให้ประสิทธิภาพสูงถึง 20-25% เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสารประกอบของคอปเปอร์อินเดียมไตเซลไนด์ (Copper Indium Gallium และ Selenium โดยมีทั้งที่ใช้ Cadmium Sulphide และไม่ใช่ Cadmium Sulphide เป็นบัฟเฟอร์ในเซลล์แสงอาทิตย์ มีทั้งชนิดผลึกเดี่ยว (Single Crystalline) และผลึกรวม (Polycrystalline) เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้มีประสิทธิภาพสูง อยู่ที่ประมาณ 20-25% และมี ราคาสูงที่สุด จึงนิยมใช้ในโครงการอวกาศ เช่นในดาวเทียมต่างๆ



รูปที่ 2.9 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดคอปเปอร์อินเดียม

ตารางที่ 2.2 ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดต่างๆ

ประเภทของวัสดุ	โครงสร้าง	ประสิทธิภาพของเซลล์	ประสิทธิภาพของโมดูล
ซิลิคอน-แบบผลึก	ผลึกเดี่ยว(Single Crystalline Silicon Solar Cell หรือ Monocrystalline Silicon Solar Cell)	15-24 %	10-14 %
ซิลิคอน-แบบผลึก	ผลึกโพลี(Polycrystalline)	10-17 %	9-12 %
ซิลิคอน-อะมอร์ฟัส	Amorphous Silicon Amorphous SiC Amorphous SiGe	8-13 %	6-9 %
สารประกอบอื่น	GaAs, CdTe , CuInSe <sub>2</sub>	18-30 % (GaAs) 10-15 % 10-15 %	NA

## 2.6 ประโยชน์ของการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

- สามารถประหยัดค่าไฟฟ้าที่ต้องจ่ายให้กับการไฟฟ้าฯ โดยจะประหยัดค่าไฟฟ้าในส่วนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทดแทนการใช้ไฟปกติ
- ลดผลกระทบจากสิ่งแวดล้อมอันเนื่องมาจากการผลิตไฟฟ้าด้วยรูปแบบอื่นเช่น การผลิตไฟฟ้าจากน้ำมัน หรือถ่านหิน ซึ่งเชื้อเพลิงเหล่านี้มีส่วนทำลายสภาพแวดล้อมทางธรรมชาติทั้งสิ้น
- ใช้พลังงานจากธรรมชาติ คือ แสงอาทิตย์ ซึ่งสะอาดและบริสุทธิ์ ไม่ก่อปฏิกิริยาที่จะทำให้สิ่งแวดล้อมเป็นพิษ
- เป็นการนำพลังงานจากแหล่งธรรมชาติมาใช้อย่างคุ้มค่าและไม่วันหมดไปจากโลกนี้
- สามารถนำไปใช้เพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ทุกพื้นที่บนโลก และได้พลังงานไฟฟ้าใช้โดยตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ไม่ต้องใช้เชื้อเพลิงอื่นใดนอกจากแสงอาทิตย์ จึงไม่มีการเผาไหม้และไม่ก่อให้เกิดมลภาวะด้านอากาศและน้ำ
- ไม่เกิดเสียงและไม่มีการเคลื่อนไหวขณะใช้งาน จึงไม่เกิดมลภาวะด้านเสียง
- เป็นอุปกรณ์ที่ติดตั้งอยู่กับที่ ไม่มีชิ้นส่วนใดที่มีการเคลื่อนไหวขณะทำงาน จึงไม่เกิดการสึกหรอ
- ต้องการการบำรุงรักษาต่ำ
- อายุการใช้งานยืนยาวและประสิทธิภาพคงที่
- มีน้ำหนักเบา ติดตั้งง่าย เคลื่อนย้ายสะดวกและรวดเร็ว
- เนื่องจากมีลักษณะเป็นโมดูล จึงสามารถประกอบได้ตามขนาดที่ต้องการ
- ช่วยลดปัญหาการสะสมของก๊าซต่างๆ ในบรรยากาศ เช่น คาร์บอนมอนอกไซด์, ซัลเฟอร์ไดออกไซด์, ไฮโดรคาร์บอน และก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ ฯลฯ ซึ่งเป็นผลจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงจำพวกน้ำมัน ถ่านหิน และก๊าซธรรมชาติ ล้วนแล้วแต่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เกิดปฏิกิริยาเรือนกระจก ทำให้โลกร้อนขึ้น เกิดฝนกรด และอากาศเป็นพิษ ฯลฯ

## 2.7 อุปกรณ์สำคัญของระบบการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตไฟฟ้ากระแสตรง จึงนำกระแสไฟฟ้าไปใช้ได้เฉพาะกับอุปกรณ์ไฟฟ้ากระแสตรงเท่านั้น หากต้องการนำไปใช้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้ไฟฟ้ากระแสสลับหรือเก็บสะสมพลังงานไว้ใช้ต่อไป จะต้องใช้ร่วมกับอุปกรณ์อื่นๆ อีก โดยรวมเข้าเป็นระบบที่ผลิตกระแสไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ อุปกรณ์สำคัญๆ มีดังนี้

1. แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Module) ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า ซึ่งเป็นไฟฟ้ากระแสตรงและมีหน่วยเป็นวัตต์ (Watt) มีการนำแผงเซลล์แสงอาทิตย์หลายๆ เซลล์มาต่อกันเป็นแถวหรือเป็นชุด (Solar Array) เพื่อให้ได้พลังงานไฟฟ้าใช้งานตามที่ต้องการ โดยการต่อกันแบบอนุกรม จะเพิ่มแรงดันไฟฟ้า และการต่อกันแบบขนาน จะเพิ่มพลังงานไฟฟ้า หากสถานที่ตั้งทางภูมิศาสตร์แตกต่างกัน ก็จะมีผลให้ปริมาณของค่าเฉลี่ยพลังงานสูงสุดในหนึ่งวันไม่เท่ากันด้วย รวมถึงอุณหภูมิก็มีผลต่อการผลิตพลังงานไฟฟ้า หากอุณหภูมิสูงขึ้น การผลิตพลังงานไฟฟ้าจะลดลง
2. เครื่องควบคุมการประจุ (Charge Controller) ทำหน้าที่ประจุกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์เข้าสู่แบตเตอรี่ และควบคุมการประจุกระแสไฟฟ้าให้มีปริมาณเหมาะสมกับแบตเตอรี่ เพื่อยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ รวมถึงการจ่ายกระแสไฟฟ้าออกจากแบตเตอรี่ด้วย ดังนั้น การทำงานของเครื่องควบคุมการประจุ คือ เมื่อประจุกระแสไฟฟ้าเข้าสู่แบตเตอรี่จน

- เต็มแล้ว จะหยุดหรือลดการประจุกระแสไฟฟ้า (และมักจะมีคุณสมบัติในการตัดการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้า กรณีแรงดันของแบตเตอรี่ลดลงด้วย) ระบบพลังงานแสงอาทิตย์จะใช้เครื่องควบคุมการประจุกระแสไฟฟ้าในกรณีที่มีการเก็บพลังงานไฟฟ้าไว้ในแบตเตอรี่เท่านั้น
3. แบตเตอรี่ (Battery) ทำหน้าที่เป็นตัวเก็บพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไว้ใช้เวลาที่ต้องการ เช่น เวลาที่ไม่มีแสงอาทิตย์ เวลากลางคืน หรือนำไปประยุกต์ใช้งานอื่นๆ แบตเตอรี่มีหลายชนิดและหลายขนาดให้เลือกใช้งานตามความเหมาะสม
  4. เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า (Inverter) ทำหน้าที่แปลงพลังงานไฟฟ้าจากกระแสตรง (DC) ที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ให้เป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) เพื่อให้สามารถใช้ได้กับอุปกรณ์ไฟฟ้ากระแสสลับ แบ่งเป็น 2 ชนิด คือ Sine Wave Inverter ใช้ได้กับอุปกรณ์ไฟฟ้ากระแสสลับทุกชนิด และ Modified Sine Wave Inverter ใช้ได้กับอุปกรณ์ไฟฟ้ากระแสสลับที่ไม่มีส่วนประกอบของมอเตอร์และหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่เป็น Electronic ballast
  5. ระบบป้องกันฟ้าผ่า (Lightning Protection) ทำหน้าที่ป้องกันความเสียหายที่เกิดกับอุปกรณ์ไฟฟ้าเมื่อฟ้าผ่า หรือเกิดการเหนี่ยวนำทำให้ความต่างศักย์สูง ในระบบทั่วไปมักไม่ใช้อุปกรณ์นี้ จะใช้สำหรับระบบขนาดใหญ่และมีความสำคัญเท่านั้น รวมถึงต้องมีระบบสายดินที่มีประสิทธิภาพด้วย

## 2.8 การประยุกต์ใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์

การนำพลังงานแสงอาทิตย์ซึ่งเป็นพลังงานจากธรรมชาติมาทดแทนพลังงานรูปแบบอื่นๆ ได้รับความสนใจและเป็นที่ยอมรับมากขึ้น สามารถนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์อย่างมากภายใต้การดำรงชีวิต รวมถึงไม่เป็นการทำลายสิ่งแวดล้อม

### ตารางที่ 2.3 การใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์

บ้านพักอาศัย	ระบบแสงสว่างภายในบ้าน, ระบบแสงสว่างนอกบ้าน (ไฟสนาม, ไฟโรงจอดรถ และโคมไฟรั้วบ้าน ฯลฯ), อุปกรณ์ไฟฟ้าชนิดต่างๆ , ระบบเปิด-ปิดประตูบ้าน, ระบบรักษาความปลอดภัย, ระบบระบายอากาศ, เครื่องสูบน้ำ, เครื่องกรองน้ำ และไฟสำรองยามฉุกเฉิน
ระบบสูบน้ำ	อุปโภค, สาธารณูปโภค, ฟาร์มเลี้ยงสัตว์, เพาะปลูก, ทำสวน-ไร่, เหมืองแร่ และชลประทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบแสงสว่าง	โคมไฟป้ายรถเมล์, ตู้โทรศัพท์, ป้ายประกาศ, สถานที่จอดรถ, แสงสว่างภายนอกอาคาร และไฟถนนสาธารณะ
ระบบประจุแบตเตอรี่	ไฟสำรองไว้ใช้ยามฉุกเฉิน, ศูนย์ประจุแบตเตอรี่ประจำหมู่บ้านในชนบทที่ไม่มีไฟฟ้าใช้, แหล่งจ่ายไฟสำหรับใช้ในครัวเรือนและระบบแสงสว่างในพื้นที่ห่างไกล
ทำการเกษตร	ระบบสูบน้ำ, พัดลมอบผลผลิตทางการเกษตร และเครื่องนวดข้าว
เลี้ยงสัตว์	ระบบสูบน้ำ, ระบบเติมออกซิเจนในบ่อน้ำ (บ่อกักและบ่อปลา) และแสงไฟดักจับแมลง
อนามัย	ตู้เย็น/กล่องทำความเย็นเพื่อเก็บยาและวัคซีน, อุปกรณ์ไฟฟ้าทางการแพทย์สำหรับหน่วยอนามัย, หน่วยแพทย์เคลื่อนที่ และสถานีนอนามัย
คมนาคม	สัญญาณเตือนทางอากาศ, ไฟนำร่องทางขึ้น-ลงเครื่องบิน, ไฟประกาศ, ไฟนำร่องเดินเรือ, ไฟสัญญาณข้ามถนน, สัญญาณจราจร, โคมไฟถนน และโทรศัพท์ฉุกเฉิน
สื่อสาร	สถานีทวนสัญญาณไมโครเวฟ, อุปกรณ์โทรคมนาคม, อุปกรณ์สื่อสารแบบพกพา (เช่นวิทยุสนามของหน่วยงานบริการและทหาร) และสถานีตรวจสอบอากาศ
บันเทิงและพักผ่อนหย่อนใจ	แหล่งจ่ายไฟฟ้าสำหรับบ้านพักตากอากาศในพื้นที่ห่างไกล, ระบบประจุแบตเตอรี่แบบพกพาติดตัวไปได้ และอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ให้ความบันเทิง ฯลฯ
พื้นที่ห่างไกล	ภูเขา, เกาะ, ป่าลึก และพื้นที่สายส่งการไฟฟ้าเข้าไม่ถึง
อวกาศ	ดาวเทียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.9 ตัวแปรต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์

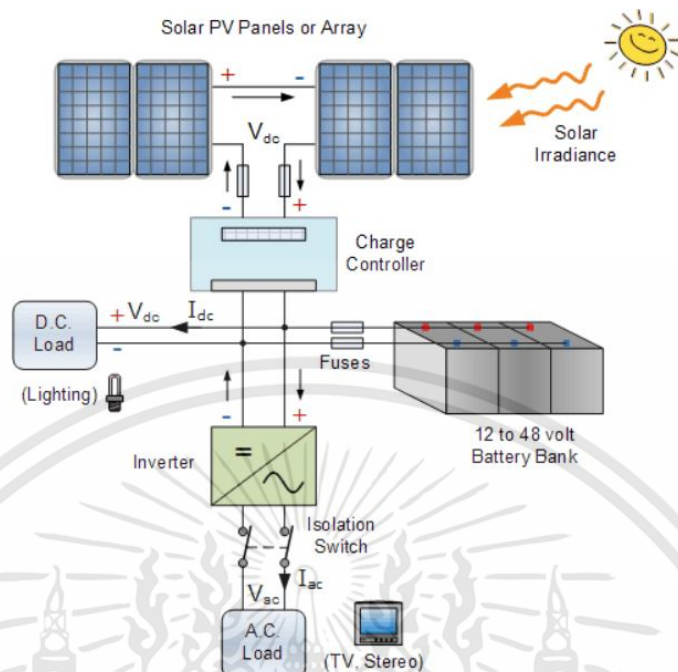
ตัวแปรที่สำคัญที่มีส่วนทำให้เซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพการทำงานในแต่ละพื้นที่ต่างกัน และมีความสำคัญในการพิจารณานำไปใช้ในแต่ละพื้นที่ ตลอดจนการนำไปคำนวณระบบหรือคำนวณ จำนวนแผงแสงอาทิตย์ที่ต้องใช้ในแต่ละพื้นที่ มีดังนี้

1. ความเข้มของแสงจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสไฟ (Current) หมายความว่าเมื่อความเข้มของแสงสูง กระแสที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ก็จะสูงขึ้น ในขณะที่แรงดันไฟฟ้าหรือโวลต์แทบจะไม่แปรไปตามความเข้มของแสงมากนัก ความเข้มของแสงที่ใช้วัดเป็นมาตรฐานคือ ความเข้มของแสงที่วัดบนพื้นโลกในสภาพอากาศปลอดโปร่ง ปราศจากเมฆหมอกและวัดที่ระดับน้ำทะเลในสภาพที่แสงอาทิตย์ตั้งฉากกับพื้นโลก ซึ่งความเข้มของแสงจะมีค่าเท่ากับ 100 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งมีค่าเท่ากับ AM 1.5 (Air Mass 1.5) และถ้าแสงอาทิตย์ทำมุม 60 องศากับพื้นโลกความเข้มของแสง จะมีค่าเท่ากับประมาณ 75 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งมีค่าเท่ากับ AM2 กรณีของแผงเซลล์แสงอาทิตย์นี้จะใช้ค่า AM 1.5 เป็นมาตรฐานในการวัดประสิทธิภาพของแผง
2. อุณหภูมิจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับแรงดันไฟฟ้า แต่จะไม่ส่งผลต่อกระแสไฟฟ้า ในขณะที่แรงดันไฟฟ้าจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งโดยเฉลี่ยแล้วทุกๆ 1 องศาเซลเซียส ที่เพิ่มขึ้น จะทำให้แรงดันไฟฟ้าลดลง 0.5% และในกรณีของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มาตรฐานที่ใช้กำหนดประสิทธิภาพของแผงแสงอาทิตย์คือ ณ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เช่น กำหนดไว้ว่าแผงแสงอาทิตย์มีแรงดันไฟฟ้าที่วงจรเปิด (Open Circuit Voltage หรือ  $V_{oc}$ ) ที่ 21 V ณ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ก็จะหมายความว่าแรงดันไฟฟ้าที่จะได้จากแผงแสงอาทิตย์ เมื่อยังไม่ได้ต่อกับอุปกรณ์ไฟฟ้า ณ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จะเท่ากับ 21 V ถ้าอุณหภูมิสูงกว่า 25 องศาเซลเซียส เช่น อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส จะทำให้แรงดันไฟฟ้าของแผงแสงอาทิตย์ลดลง 2.5% ( $0.5\% \times 5$  องศาเซลเซียส) นั่นคือ แรงดันของแผงแสงอาทิตย์ที่  $V_{oc}$  จะลดลง 0.525 V ( $21\text{ V} \times 2.5\%$ ) เหลือเพียง 20.475 V ( $21\text{V} - 0.525\text{V}$ ) สรุปได้ว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น แรงดันไฟฟ้าก็จะลดลง ซึ่งมีผลทำให้กำลังไฟสูงสุดของแผงแสงอาทิตย์ลดลงด้วย จากข้อกำหนดดังกล่าวข้างต้น ก่อนที่ผู้จะใช้จะเลือกใช้แผงแสงอาทิตย์ จะต้องคำนึงถึงคุณสมบัติของแผงที่ระบุไว้ในแผงแต่ละชนิดด้วยว่า ใช้มาตรฐานอะไร หรือมาตรฐานที่ใช้วัดแตกต่างกันหรือไม่ เช่นแผงชนิดหนึ่งระบุว่า ให้กำลังไฟสูงสุดได้ 80 วัตต์ ที่ความเข้มแสง 1,200 W ต่อ ตร.เมตร ณ อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ขณะที่อีกชนิดหนึ่งระบุว่า ให้กำลังไฟสูงสุดได้ 75 วัตต์ ที่ความเข้มแสง 1,000 W ต่อ ตร.เมตร และอุณหภูมิมาตรฐาน 25 องศาเซลเซียส แล้ว จะพบว่าแผงที่ระบุว่าให้กำลังไฟ 80 W จะให้กำลังไฟต่ำกว่า จากสาเหตุดังกล่าว ผู้ที่จะใช้แผงจึงต้องคำนึงถึงข้อกำหนดเหล่านี้ในการเลือกใช้แผงแต่ละชนิดด้วย

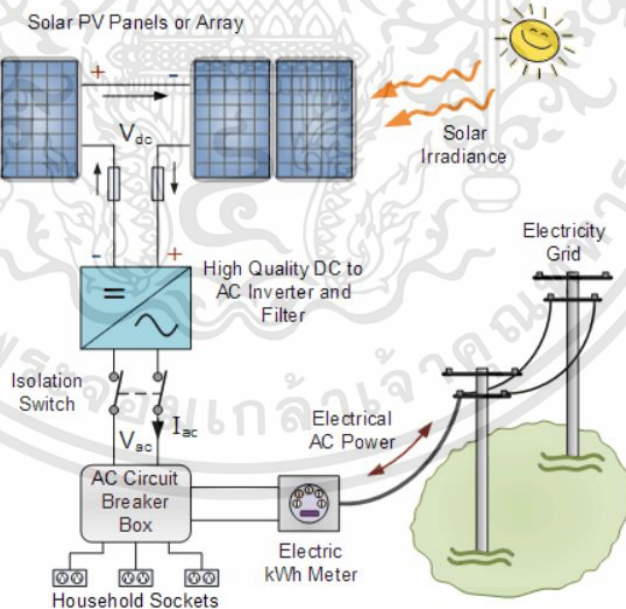
3. การยึดและติดตั้งแผงก็เป็นอีกหนึ่งตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพ การติดตั้งแผงจะต้องคำนวณว่าแผงควรจะต้องติดตั้งให้มีความชันจากพื้นกึ่งองศาและหันหน้าไปทางทิศใด(โดยทั่วไปจะติดตั้งให้ระนาบแผงโซลาร์เซลล์หันไปทางทิศใต้ โดยมีความชันประมาณ 15 องศาจากพื้นดิน) การยึดและติดตั้งแผงนั้นมีผลอย่างมากต่อประสิทธิภาพโดยรวมของแผงหรือทั้งระบบ ถ้าติดตั้งไปผิดทิศหรือความชันแผงจากพื้นไม่ได้ กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ก็จะลดลงไปอย่างมาก
4. เงาบังแสง นอกจากการติดตั้งแผงที่เหมาะสมแล้ว เงาที่บังแผงโซลาร์เซลล์ในบางส่วนก็มีผลต่อประสิทธิภาพโดยรวมของทั้งระบบด้วย เพราะโดยส่วนมากแล้วระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์โดยแผงโซลาร์เซลล์จะต่อวงจรเป็นแบบอนุกรมแผงโซลาร์เซลล์เข้าด้วยกัน เพื่อให้ได้แรงดันที่ออกแบบไว้ เมื่อมีเงาบางส่วนบังแสงของแผงโซลาร์เซลล์เพียงแค่เพียงหนึ่งแผงก็จะทำให้กระแสไฟฟ้าในระบบหยุดไหลได้ ดังนั้นตลอดทั้งวันควรมั่นใจว่าการติดตั้งแผงจะไม่มีร่มเงามาบังการรับแสงของแผงโซลาร์เซลล์

## 2.10 ระบบการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์

1. ระบบผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ (PV Stand-alone system): เป็นระบบผลิตไฟฟ้าที่ได้รับการออกแบบสำหรับใช้งานในพื้นที่ชนบทที่ไม่มีระบบสายส่งไฟฟ้า อุปกรณ์ระบบที่สำคัญประกอบด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ อุปกรณ์ควบคุมการประจุแบตเตอรี่ แบตเตอรี่ และอุปกรณ์เปลี่ยนระบบไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบอิสระ ระบบผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระแสดงดังรูปที่ 2.9
2. ระบบผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่อกับระบบจำหน่าย (PV Grid connected system): เป็นระบบผลิตไฟฟ้าที่ถูกออกแบบสำหรับผลิตไฟฟ้าผ่านอุปกรณ์เปลี่ยนระบบไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ เข้าสู่ระบบสายส่งไฟฟ้าโดยตรง ใช้ผลิตไฟฟ้าในเขตเมือง หรือพื้นที่ที่มีระบบจำหน่ายไฟฟ้าเข้าถึง อุปกรณ์ระบบที่สำคัญประกอบด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ อุปกรณ์เปลี่ยนระบบไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับชนิดต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้า ระบบนี้ไม่ต้องคำนึงว่าโหลดในบ้านใช้งานมากน้อยเพียงใด ระบบไฟโซลาร์เซลล์ จะช่วยลดค่าไฟลงบางส่วนเท่านั้น ตามกำลังที่ผลิตได้ หากใช้ไฟมากกว่าระบบโซลาร์ผลิตได้ จะไปดึงไฟจากการไฟฟ้านำมาใช้ ระบบผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่อกับระบบจำหน่ายแสดงดังรูปที่ 2.10

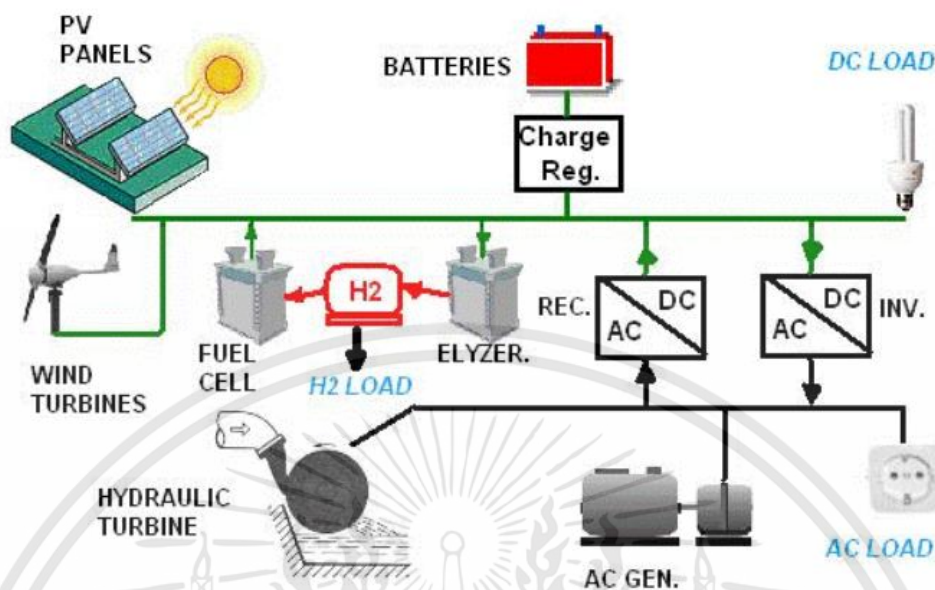


รูปที่ 2.10 ระบบผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ



รูปที่ 2.11 ระบบผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่อกับระบบจำหน่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 ระบบผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบผสมผสาน

- ระบบผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบผสมผสาน (PV Hybrid system): เป็นระบบผลิตไฟฟ้าที่ถูกออกแบบสำหรับทำงานร่วมกับอุปกรณ์ผลิตไฟฟ้าอื่นๆ เช่น ระบบเซลล์แสงอาทิตย์กับพลังงานลม และเครื่องยนต์ดีเซล ระบบเซลล์แสงอาทิตย์กับพลังงานลม และไฟฟ้าพลังน้ำ เป็นต้น โดยรูปแบบระบบจะขึ้นอยู่กับกรอกแบบตามวัตถุประสงค์โครงการเป็นกรณี เฉพาะ ระบบผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบผสมผสานแสดงดังรูปที่ 2.11

## 2.11 โซลาร์อินเวอร์เตอร์

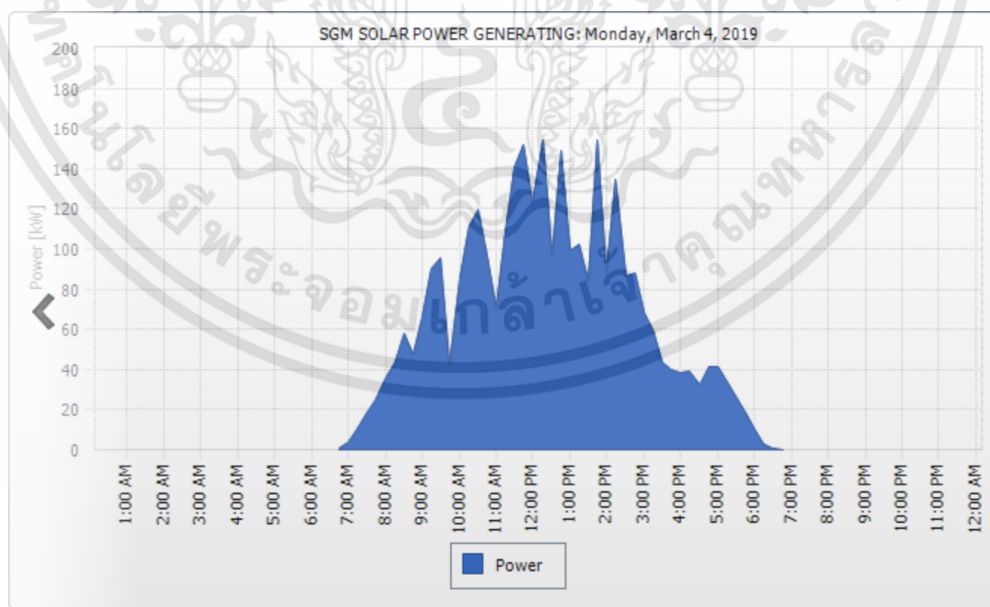
การทำงานของโซลาร์เซลล์นั้น มีแผงอุปกรณ์ทำหน้าที่แปลงพลังงานจากแสงอาทิตย์ให้กลายเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยพลังงานที่ได้จากแผงโซลาร์เซลล์จะเป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงหรือไฟ DC จากนั้นระบบจะต้องนำไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้มาจากแสงแดดไปผ่านอุปกรณ์หลักที่เรียกว่า Solar Inverter โดยหน้าที่ของ Solar Inverter จะแปลงพลังงานจากพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงให้กลายเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ ที่เราใช้ตามบ้านเรือนทั่วไป และเป็นอุปกรณ์หลักที่ใช้ในการควบคุม เชื่อมต่อกับพลังงานหลักในระบบต่างๆ ของอาคาร บ้าน หรือโรงงานให้ดำเนินไปตามระบบปกติ

- อินเวอร์เตอร์รูปแบบต่อกับระบบจำหน่าย (PV Grid connected system) เป็นอินเวอร์เตอร์ที่แปลงไฟจากแผงโซลาร์จากไฟกระแสตรงไปเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ

- อินเวอร์เตอร์รูปแบบอิสระ (PV Stand-alone system) เป็นอินเวอร์เตอร์ที่ทำหน้าที่แปลงไฟจากแบตเตอรี่ 12V, 24V, 36V, 48V ไปเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ 110 V หรือ 220 V ที่สามารถนำไปใช้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าในบ้านที่เราใช้ในชีวิตประจำวัน
- อินเวอร์เตอร์รูปแบบผสมผสาน (PV Hybrid system) เป็นอินเวอร์เตอร์ที่มีการนำฮาร์ดคอนโทรลมารวมอยู่ในเครื่องเดียวกับที่สามารถรับไฟฟ้าจากแผงโซลาร์เซลล์และหรือจากกังหันลมและรวมจุดสนับสนุนไฟฟ้าที่เกิดจากเครื่องยนต์ปั่นไฟหรือไฟฟ้าจากการไฟฟ้าเมื่อเวลาที่ใช้ไฟจากแบตเตอรี่จนอ่อนลงมันจะสลับไปใช้ไฟจากไฟสนับสนุนแทน

## 2.12 แนวทางการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์

โดยทั่วไปการออกแบบระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์จะคิดที่กำลังผลิตสูงสุดที่ระบบสามารถผลิตได้ ซึ่งกำลังผลิตนี้ไม่สามารถทำนายได้ล่วงหน้าเนื่องจากมีหลายปัจจัยที่ส่งผลต่อกำลังผลิตที่ไม่สามารถคาดการณ์ไว้ล่วงหน้าได้ เช่น ฝนตก เมฆบดบัง ตำแหน่งดวงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม เป็นต้น เมื่อมาพิจารณากราฟกำลังผลิตต่อวันของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ดังรูปที่ 2.13 จะเห็นได้เวลามีช่วงเช้าและบ่ายที่ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้กำลังการผลิตที่ไม่เต็มพิกัดติดตั้งทำให้ ณ เวลานั้นสามารถปรับให้อินเวอร์เตอร์อยู่ในโหมดจ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้าเสมือนจากระบบไฟฟ้าได้ ซึ่งจะทำให้ระบบไฟฟ้ามืดตัวช่วยเรื่องเสถียรภาพของแรงดันไฟฟ้าที่ดีขึ้นได้



รูปที่ 2.13 กราฟกำลังการผลิตไฟฟ้าต่อวันของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์

## 2.13 บทสรุป

จากที่กล่าวมาข้างต้นในบทที่ 2 นี้ ได้กล่าวถึงระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ประโยชน์ของการผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ อุปกรณ์สำคัญที่ใช้ในระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งเป็นความรู้พื้นฐานในการทำวิจัยฉบับนี้ นอกจากนี้ยังได้ศึกษาประเภทของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ทั้งรูปแบบต่อกับระบบจำหน่าย รูปแบบอิสระ และรูปแบบผสมผสาน ซึ่งเป็นแนวทางในการออกแบบการทดลอง อีกทั้งยังได้ศึกษาโซลาร์อินเวอร์เตอร์ซึ่งเป็นอุปกรณ์สำคัญที่ใช้ในระบบผลิตพลังงานแสงอาทิตย์



## บทที่ 3

# สถานีไฟฟ้าอัจฉริยะ

### 3.1 บทนำ

ปัจจุบันระบบไฟฟ้ามีการกระจายตัวของผู้ใช้งานและแหล่งผลิตไฟฟ้าที่มากขึ้น ทำให้ในการควบคุมกำลังไฟฟ้าให้มีความเสถียรภาพที่ดีทำได้ยากขึ้นเช่นกัน ดังนั้นแผนขับเคลื่อนการดำเนินงานด้านสมรรถกิริยาของประเทศไทยจึงได้มีโครงการเมืองอัจฉริยะ และการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) ซึ่งเป็นองค์กรที่จัดจำหน่ายไฟฟ้าขนาดใหญ่จึงมุ่งพัฒนาระบบไฟฟ้าเพื่อนำไปสู่โครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะ มีเป้าหมายการพัฒนาระบบภายในสถานีไฟฟ้าแรงสูงให้เป็นสถานีไฟฟ้าอัจฉริยะ เนื่องจากระบบสื่อสารของอุปกรณ์ของสถานีไฟฟ้าในอดีตจะใช้ระบบอนาล็อกในการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ ซึ่งจะใช้สายสัญญาณจำนวนมาก มีความไม่แน่นอนในการส่งข้อมูล และมีความล่าช้าในการสื่อสารในระบบป้องกัน มีผลทำให้การทำงานของอุปกรณ์ป้องกันในสถานีไฟฟ้ามีการทำงานที่ผิดพลาด ดังนั้นแนวทางในการนำสถานีไฟฟ้าอัจฉริยะมาใช้จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะนำมาแก้ปัญหาการควบคุมระบบไฟฟ้าที่ยั่งยืน โดยปัจจุบันเริ่มนำมาตรฐาน IEC-61850 มาใช้ในสถานีไฟฟ้าบ้างแล้ว ซึ่งเป็นมาตรฐานการสื่อสารของอุปกรณ์ภายในสถานีไฟฟ้าอัจฉริยะ ในบทนี้จะกล่าวถึงหน้าที่ของสถานีไฟฟ้าอัจฉริยะ มาตรฐาน IEC-61850 การสื่อสารแบบอนุกรม และการแก้ปัญหาระดับแรงดันเกินและแรงดันตกด้วยระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

### 3.2 สถานีไฟฟ้าอัจฉริยะ

สถานีไฟฟ้าอัจฉริยะ ตามมาตรฐาน IEC-61850 สามารถรองรับการเชื่อมต่อสื่อสารข้อมูลของอุปกรณ์ต่างๆ ผ่านเครือข่ายได้ง่ายขึ้นและไร้ขีดจำกัด โดยจะทำงานร่วมกันเป็นโครงข่ายทั้งระบบ สามารถวิเคราะห์และแก้ไขปัญหาเหตุการณ์ไฟฟ้าขัดข้องได้ รวดเร็ว ถูกต้องและแม่นยำ ทั้งนี้อุปกรณ์มาตรฐาน IEC-61850 ทำให้อุปกรณ์ระบบควบคุมและระบบป้องกันทำงานได้อย่างสัมพันธ์กันมากขึ้น เวลาเกิดการลัดวงจรในระบบจำหน่าย ก็จะมีพื้นที่เฟดบ้น้อยลงและสามารถใช้ฟังก์ชันประยุกต์ของอุปกรณ์ระบบควบคุมภายในสถานีไฟฟ้า ในการวิเคราะห์หาจุดเกิดเหตุข้อขัดข้อง และแยกแยะส่วนที่ขัดข้องนั้นออกพร้อมทั้งจ่ายไฟกลับคืนในส่วนที่เป็นปกติได้อย่างรวดเร็ว ด้วยการจัดหาอุปกรณ์ในการซ่อมแซมบำรุงรักษาสะดวกขึ้นเพราะอุปกรณ์แต่ละผลิตภัณฑ์สามารถเชื่อมต่อแลกเปลี่ยนข้อมูลกันได้รวดเร็ว เพราะใช้สายใยแก้วนำแสง รวมทั้งลดต้นทุนการจัดหาสายทองแดงในปริมาณมาก ส่งผลให้การจ่ายพลังงานไฟฟ้ามีประสิทธิภาพและมั่นคง สร้างความเชื่อมั่นในระบบไฟฟ้าแก่ผู้ประกอบการภาคธุรกิจและ

ภาคอุตสาหกรรม ตอบสนองงานแก้ไขปัญหาไฟฟ้าดับได้อย่างรวดเร็ว โดยจะช่วยลดปัญหาไฟตก ไฟดับ ไฟกระพริบ ช่วยเพิ่มความมั่นคงในการจ่ายไฟฟ้า รองรับการผลิตของภาคธุรกิจ อุตสาหกรรม และการท่องเที่ยว นอกจากนี้ยังสามารถรองรับกับโครงการระบบกริดที่กำลังจะเกิดขึ้นในอนาคตในรูปแบบของการจัดการโครงข่ายไฟฟ้าแบบแหล่งผลิตกระจายตัว หรือ Distributed Generation Resources จากพลังงานทดแทนในรูปแบบต่างๆ เช่น เซลล์แสงอาทิตย์ พลังงานลม และชีวมวลได้อย่างมีประสิทธิภาพซึ่งจะเป็นการสนับสนุนให้การลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ ระบบสถานีไฟฟ้าอัจฉริยะทำหน้าที่พื้นฐานดังนี้

1. การให้บริการในการเข้าถึงข้อมูลทางระบบไฟฟ้าทั้งระยะไกลและใกล้ (Remote/Local) เช่น ตรวจสอบสถานะอุปกรณ์ไฟฟ้า หรือแม้กระทั่งแก้ไขการตั้งค่าของระบบป้องกัน (Relay Setting)
2. การควบคุมการทำงานอุปกรณ์จ่ายไฟฟ้าโดยบุคคลและโดยระบบอัตโนมัติ (Manual/Automatic Function) ทั้งในเหตุการณ์ปกติและไม่ปกติ เช่น การรักษาระดับแรงดันไฟฟ้า
3. การจัดการระบบสื่อสารข้อมูลระหว่างอุปกรณ์จ่ายไฟฟ้าและระบบควบคุมหรือศูนย์สั่งการ (SCADA: Supervisory Control and Data Acquisition) ทำให้ได้ข้อมูลที่มีคุณภาพและเชื่อถือได้มากที่สุด

ระบบสถานีไฟฟ้าอัจฉริยะเริ่มต้นพัฒนามาจาก RTU (Remote Terminal Unit) และ Protective Relay ซึ่งเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ประกอบด้วยชุดรับส่งสัญญาณดิจิทัล และอะนาล็อก (DI/DO/AI/AO: Digital Input/Digital Output/Analog Input/Analog Output) รวมทั้งประกอบด้วยฟังก์ชันการทำงานซึ่งเป็นซอฟต์แวร์ เพื่อตั้งค่าวัด สถานะ สัญญาณเตือน รวมทั้งควบคุมการทำงานของอุปกรณ์จ่ายไฟฟ้า และป้องกันการเสียหายของอุปกรณ์ไฟฟ้า โดยค่าวัดและสถานะต่าง ๆ นั้นจะถูกส่งไปยังระบบ SCADA เพื่อประกอบการตัดสินใจในการควบคุมอุปกรณ์การจ่ายไฟฟ้านั้น ๆ ผ่านระบบสื่อสารข้อมูลด้วยโปรโตคอลที่ออกแบบมาสำหรับงานระบบอัตโนมัติโดยเฉพาะ ในปัจจุบัน RTU ยังมีใช้อย่างแพร่หลายในระบบขนาดเล็กหรือระบบที่ไม่มี ความซับซ้อนสูง ส่วน Protective Relay มักถูกใช้ในการด้านระบบป้องกันอย่างเดียว

สำหรับระบบขนาดใหญ่ระบบสถานีไฟฟ้าอัจฉริยะเริ่มเข้ามามีบทบาทอันเนื่องมาจากโครงสร้างและสถาปัตยกรรมของระบบสถานีไฟฟ้าอัจฉริยะเป็นแบบกระจายหน้าที่ (Distributed Concept) ซึ่งมีความน่าเชื่อถือได้สูงตลอดรวมทั้งระบบประสิทธิภาพในการทำงานก็สูงเช่นกัน เนื่องจากระบบทำงานด้วยโปรเซสเซอร์หลายตัว (Multiple Processor) สามารถรองรับงานที่ต้องการการตอบสนองด้วยความเร็วสูง เช่น งานโอนถ่ายโหลดไฟฟ้าโดยอัตโนมัติ หรือ งานระบบป้องกันทางไฟฟ้า

### 3.3 โครงสร้างของระบบสถานีไฟฟ้าอัจฉริยะ

ระบบสถานีไฟฟ้าอัจฉริยะประกอบด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อัจฉริยะ (IED: Intelligence Electronic Device) หลาย ๆ ประเภท ทำหน้าที่ต่างกันเช่น เป็นอุปกรณ์ป้องกัน (Protective Relay) อุปกรณ์สื่อสารข้อมูล (Data Communication Device) อุปกรณ์ควบคุม (CU: Control Unit) หรือแม้กระทั่งตัว RTU IED (Remote Terminal Unit Intelligence Electronic) แต่ละตัวจะถูกติดตั้งตามโครงสร้างของระบบสถานีไฟฟ้าอัจฉริยะขึ้นอยู่กับหน้าที่และภาระงานของมัน โครงสร้างของระบบสถานีไฟฟ้าอัจฉริยะได้ถูกจัดแบ่งเป็น 3 ระดับ โดยแต่ละระดับมีหน้าที่ดังนี้

1. ระดับสถานี (Station Level) มีหน้าที่ในการส่งข้อมูลให้ระบบ SCADA การจัดการระบบอัตโนมัติระดับสถานี (ระหว่างอุปกรณ์ต่างเบย์หรือต่างกลุ่ม เช่น ระหว่างหม้อแปลงกำลัง) การจัดการวิเคราะห์และสำรองข้อมูล การเข้าจังหวะเวลาระหว่างอุปกรณ์ (Time Synchronization) การจัดการสัญญาณเตือน สถานะและการเปลี่ยนแปลงภายในสถานีย่อย และการควบคุมอุปกรณ์จ่ายไฟฟ้าผ่านระบบคอมพิวเตอร์ (HMI: Human Machine Interface)
2. ระดับเบย์ (Bay Level) มีหน้าที่ในการจัดการระบบอัตโนมัติระดับเบย์ระหว่างภายในเบย์เดียวกันหรือกลุ่มเดียวกัน เช่น กลุ่มหม้อแปลงกำลังเดียวกัน การดึงข้อมูลจากอุปกรณ์จ่ายไฟฟ้า (Data Acquisition) การจัดการการควบคุมอุปกรณ์จ่ายไฟฟ้า การจัดการระบบป้องกันอุปกรณ์จ่ายไฟฟ้า
3. ระดับโปรเซส (Process Level) มีหน้าที่ที่เชื่อมสายสัญญาณทางไฟฟ้าจากอุปกรณ์จ่ายไฟฟ้าไปยังระดับเบย์ เช่น สายสัญญาณค่ากระแสจากหม้อแปลงกระแส (CT: Current Transformer), สายสัญญาณค่าสถานะของอุปกรณ์จ่ายไฟฟ้า เช่น สถานะปลดสับของเบรกเกอร์ สายสัญญาณควบคุมอุปกรณ์จ่ายไฟฟ้า เช่น สายสัญญาณปลดเบรกเกอร์ และสายสัญญาณสื่อสารข้อมูลสำหรับอุปกรณ์จ่ายไฟฟ้าสมัยใหม่ที่มี IED ขนาดเล็กฝังภายในตัวอุปกรณ์จ่ายไฟฟ้า เช่น หม้อแปลงกระแสอัจฉริยะ (Intelligence Current Transformer ตามมาตรฐาน IEC61850) การใช้สายสัญญาณสื่อสารข้อมูลจะสามารถลดจำนวนสายสัญญาณราคาสูงที่เป็นทองแดง และสามารถติดตั้งระบบสถานีไฟฟ้าอัจฉริยะได้โดยง่าย อันเนื่องมาจากสายสัญญาณสื่อสารข้อมูลต้องการพื้นที่ในการติดตั้งน้อย

### 3.4 ประโยชน์ของระบบสถานีไฟฟ้าอัจฉริยะ

ประโยชน์ของระบบสถานีไฟฟ้าอัจฉริยะสามารถวิเคราะห์ได้ 2 มุมมอง คือ ทางด้านธุรกิจ และทางด้านเทคนิคโดยในบทความนี้จะกล่าวในลักษณะโดยรวม ได้แก่

1. เพิ่มประสิทธิภาพในการใช้งานระบบไฟฟ้า (Enhancing Power System Operation) เนื่องจากระบบสถานีไฟฟ้าอัจฉริยะสามารถเข้าถึงข้อมูลของแต่ละอุปกรณ์ไฟฟ้า ทำให้วิศวกรไฟฟ้าสามารถรู้ขีด

ความสามารถของแต่ละอุปกรณ์ไฟฟ้าได้จริง และสามารถคำนวณค่าระยะเผื่อความปลอดภัย (Safety Margin) ของแต่ละอุปกรณ์ได้อย่างถูกต้อง ทำให้สามารถใช้งานอุปกรณ์ไฟฟ้าได้เหมาะสมกับราคาและความสามารถของมัน

2. เพิ่มความเชื่อถือได้และความยืดหยุ่นในระบบไฟฟ้า (Increasing Reliability and Flexibility) ระบบสถานีไฟฟ้าอัจฉริยะมีระบบอัตโนมัติที่จัดการสภาพขัดข้องทางไฟฟ้าทำให้ลดระยะเวลาไฟฟ้าดับ ป้องกันอุปกรณ์ไฟฟ้าราคาสูงชำรุดอันเนื่องมาจากกระแสลัดวงจรหรือแม้กระทั่งทำการปลดโหลดที่ไม่สำคัญเพื่อรักษาโหลดที่สำคัญเอาไว้ ดังตัวอย่างดังต่อไปนี้

### 3.5 มาตรฐาน IEC 61850

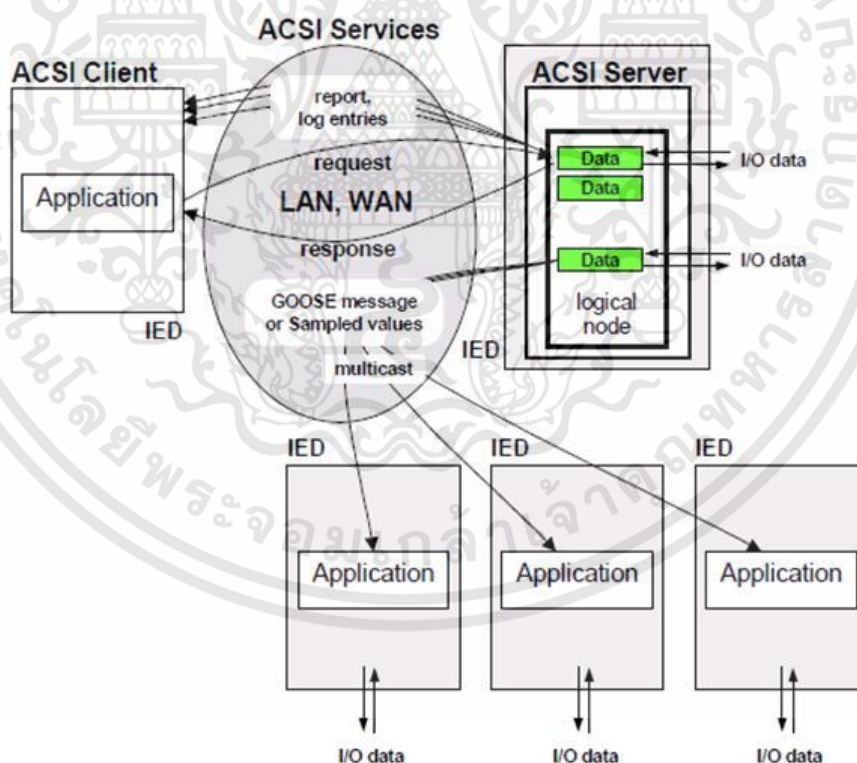
ระบบสื่อสารตามมาตรฐาน IEC-61850 ในสถานีย่อยไฟฟ้านั้น เป็นเทคโนโลยีสื่อสารที่เกี่ยวข้องกับโปรโตคอล มาตรฐาน IEC-61850 อนุญาตให้มีการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ทางด้านทุติยภูมิ (Secondary Device) ในสถานีย่อยแบบเพียร์ทูเพียร์ (Peer-to-peer) ซึ่งแต่ละอุปกรณ์จะมีสิทธิเท่าเทียมกัน โดยการสื่อสารดังกล่าวใช้การบริการสื่อสารที่เรียกทางเทคนิคว่า GSE (Generic Substation Event) ซึ่งจะมีความเร็วสูงและมีความเชื่อถือได้เพียงพอในการป้องกันความผิดพลาด หนึ่งในข้อความที่สำคัญที่สุดในการบริการแบบ GSE นั้นคือ ข้อความ GOOSE (Generic Object Oriented Substation Event) และเพื่อจะทำงานได้มีประสิทธิภาพดีขึ้น

ในปัจจุบันมาตรฐานสื่อสารแบบสากล สำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ทำงานภายใต้สภาพแวดล้อมสถานีย่อยไฟฟ้าที่ถูกนำมาใช้งานมากที่สุด คือ มาตรฐาน IEC (International Electrotechnical Commission) โดยมีหนึ่งในมาตรฐานที่สำคัญคือ IEC-61850 ซึ่งได้ถูกเผยแพร่และใช้งานอย่างกว้างขวางในเรื่องการสื่อสาร, ความคงทน และวิธีการแลกเปลี่ยนข้อมูลที่ใช้ภายในสถานีย่อย แต่อย่างไรก็ตาม มาตรฐาน IEC-61850 นั้นถ้าเทียบกับมาตรฐานอื่นก่อนหน้าก็ถือว่าเป็นมาตรฐานใหม่โดยมีหนึ่งในเป้าหมายหลักคือ ต้องการทำให้มั่นใจได้ว่าอุปกรณ์ทางด้านทุติยภูมิที่มาจากต่างผู้ผลิตสามารถทำงานร่วมกันได้ (Interoperability) โดยเฉพาะสำหรับเหตุการณ์ หรืออีเวนต์ (Event) ที่มีความสำคัญสูง เช่น ระบบป้องกันของอุปกรณ์นั้นทำงาน ซึ่งเมสเสจ GOOSE จะถูกใช้ในการแลกเปลี่ยนข้อมูลสำหรับงานที่มีความสำคัญสูงบนเครือข่ายท้องถิ่นแบบอีเทอร์เน็ต (Ethernet)

อุปกรณ์ทางด้านทุติยภูมิในสถานีย่อย ยกตัวอย่างเช่น รีเลย์ป้องกัน ได้ถูกพัฒนาเรื่อยมาเรียลไยอิเล็กทรอนิกส์ มาเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อัจฉริยะ ที่เรียกว่า IED (Intelligent Electronic Device) ที่ใช้ความสามารถของไมโครคอนโทรลเลอร์สมัยใหม่ในการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ IED ด้วยกัน ถ้ากล่าวไปแล้วยังมีอีกเทคโนโลยีที่สำคัญ คือเทคโนโลยีอีเทอร์เน็ตซึ่งมีบทบาทหลักในการพัฒนาการสื่อสารในสถานีย่อยโดยเฉพาะอุปกรณ์สวิตช์อีเทอร์เน็ต (Ethernet Switch) แบบ Layer-3 ซึ่งความสามารถของ

เครือข่ายท้องถิ่นแบบเสมือน (Virtual LAN:VLAN) นั้นเพิ่มความเร็วในการส่งข้อมูล และการควบคุมการไหลข้อมูลที่ดียิ่งขึ้นอย่างมาก จนทำให้เทอร์เน็ตกลายเป็นเทคโนโลยีที่เชื่อถือได้สูงและเหมาะกับระบบงานแบบเวลาจริงได้

มาตรฐาน IEC-61850 ได้เตรียมการบริการสื่อสารแบ่งเป็นสองกลุ่มหลักระหว่างแต่ละเอนทิตี (Entity) ภายในระบบสถานีย่อยอัตโนมัติ (SAS: Substation Automation System) โดยกลุ่มแรกจะใช้หลักการไคลเอนต์เซิร์ฟเวอร์ (Client-Server) ซึ่งเป็นการบริการที่เหมาะสมกับการรายงานเหตุการณ์ (Reporting) และการสวิตชิงจากระยะไกล (Remote Switching) ซึ่งไม่มุ่งเน้นการรับรู้แบบเวลาจริง สำหรับการบริการกลุ่มที่สองใช้หลักการแบบเพียร์ทูเพียร์ เหมาะกับการสื่อสารของระบบงานที่มีความวิกฤติทางด้านเวลา เช่น การสื่อสารระหว่าง IED เพื่อระบบป้องกัน หรือ ระบบอัตโนมัติความเร็วสูง ตามเอกสาร ส่วน IEC61850-8-1 ระบุว่า GOOSE นั้นถูกอนุญาตให้ส่งแบบบรอดคาสต์แบบเจาะจงกลุ่มผู้รับ (Multicast) ภายในเครือข่ายท้องถิ่นได้ ทำให้หนึ่งสัญญาณสามารถส่งให้หลาย IED ทำงานพร้อมกันได้ ยกตัวอย่าง การทำงานของฟังก์ชัน CBF (Circuit-breaker Failure)

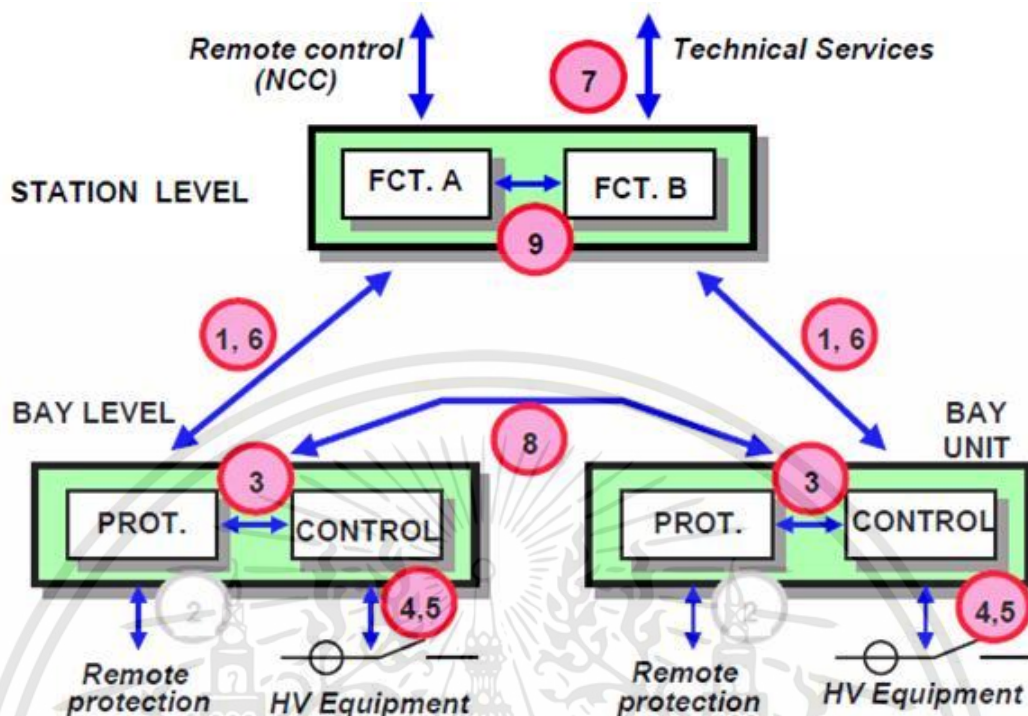


รูปที่ 3.1 แผนผังการบริการ AC SI

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สิ่งหนึ่งที่สำคัญนั้นคือวิธีการเชื่อมต่อแบบโลจิกที่เป็นการเชื่อมต่อภายในซอฟต์แวร์ ที่เรียกว่า ACSI (Abstract Communication Service) ซึ่งแสดงในรูปที่ 3.1 จะถูกควบคุมด้วยเอกสาร ส่วน IEC61870-7-2 ซึ่งนิยามการบริการพื้นฐานสำหรับอุปกรณ์ IED ในสถานีย่อย และได้นิยาม 2 กลุ่มการสื่อสารทั้งแบบ โคลเอนด์เซิร์ฟเวอร์ และเพียร์ทูเพียร์ สำหรับการบริการแบบ GSE นั้นให้ความเร็วและความเชื่อถือได้แบบกระจายวงกว้างทั้งข้อมูลแบบอินพุตและเอาต์พุต บนพื้นฐานหลักการพัลลิกเซอร์/ซัพสไครเบอร์ (Publisher/Subscriber) เทียบเคียงระหว่างผู้ผลิตวารสารและผู้รับวารสาร วิธีการดังกล่าวสนับสนุนในการแจ้งเหตุการณ์ในสถานีย่อยแบบกระจายให้มากกว่าหนึ่งอุปกรณ์ผ่านการใช้บริการมัลติคาสต์และบรอดคาสต์ระหว่างซึ่งกันและกัน โดยมี 2 ระดับควบคุม (Control Class) และโครงสร้างของเมสเซจที่ถูกนิยามในมาตรฐาน นั้นคือ ข้อความ GSSE (Generic Substation State Event) ที่สามารถส่งสถานะแบบลักษณะคู่บิต (Bit Pair) และเมสเซจ GOOSE (Generic Object Oriented Substation Event) ที่สามารถส่งข้อมูลในลักษณะชุดของข้อมูล หรือ ดาต้าเซต (Data-Set) ที่มีระเบียบแบบแผนและข้อมูลที่มากกว่าและปัจจุบันถูกใช้งานแทนที่ GSSE เกือบ 100% ขอบเขตของการสื่อสารสำหรับมาตรฐาน IEC-61850 และการเชื่อมต่อทางโลจิกจะแสดงที่หน้า 13 ของส่วนเอกสาร IEC61850-1 โดยได้ระบุว่า การเชื่อมต่อแบบโลจิกที่ 8 ถูกใช้สำหรับการแลกเปลี่ยนข้อมูลโดยตรงระหว่างเบย์ (เพียร์ทูเพียร์) แต่อย่างไรก็ตามเมสเซจ GOOSE ก็ยังอาจถูกใช้ระหว่างอุปกรณ์เบย์เลเวลกับสเตชันเลเวล ดังแสดงในรูปที่ 3.2

IEC-61850 เป็นมาตรฐานสากลสำหรับการสื่อสารในสถานีย่อย ช่วยให้สามารถบูรณาการการป้องกัน การควบคุม การวัดและการตรวจสอบทั้งหมดภายในสถานีย่อยและยังมีวิธีการป้องกันการใช้งานสถานีไฟฟ้าย่อยความเร็วสูง การใช้งานที่ครอบคลุมช่วยให้สามารถรวมรีเลย์เข้ากับระบบย่อยสลายอัตโนมัติของ IEC-61850 และในเวลาเดียวกันจะช่วยให้สามารถ เชื่อมต่อกับหน่วยการรวมต่างๆ ของผู้ผลิตต่างๆผ่านทางบักระบบการ IEC-61850 ซึ่งรวมเอา ความสะดวกสบายของอีเทอร์เน็ตเข้ากับประสิทธิภาพและความปลอดภัยซึ่งเป็นสิ่งจำเป็นในสถานีไฟฟ้าย่อยในปัจจุบัน รีเลย์ที่เปิดใช้งาน IEC-61850 จะติดตั้งการ์ดอีเทอร์เน็ตแบบรวมที่ให้ทั้งทองแดงและอีเทอร์เน็ตเบอร์ ไม่มีตัวแปลงภายนอกหรือตัวแปลงข้อมูลที่เป็นและต้องมีอุปกรณ์ Ethernet มาตรฐานเท่านั้นเช่นสวิตช์และสวิตซ์เกรด



รูปที่ 3.2 ฟังก์ชันของการบริการ ACSE

### 3.6 การสื่อสารแบบอนุกรม

การสื่อสารแบบอนุกรมนับว่ามีความสำคัญต่อการใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์มาก เพราะสามารถใช้แป้นพิมพ์และจอภาพของ PC เป็นอินพุตและเอาต์พุตในการติดต่อหรือควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ด้วยสัญญาณอย่างน้อยเพียง 3 เส้นเท่านั้น คือ สายส่งสัญญาณ TX, สายรับสัญญาณ RX และสาย GND อัตราการส่งข้อมูล (Baud rate) หรือความเร็วของการรับส่งข้อมูล เป็นจำนวนบิตต่อวินาทีเช่น 300, 1200, 2400, 4800, 9600, 14400, 19200, 38400, 56000 เป็นต้น การเลือกอัตราการส่งข้อมูลขึ้นอยู่กับชนิดของสายสัญญาณ, ระยะทาง, และปริมาณสัญญาณรบกวน รูปแบบการสื่อสารแบบอนุกรมมีด้วยกันอยู่ 2 แบบ คือแบบซิงโครนัส (Synchronous) และแบบอะซิงโครนัส (Asynchronous) การสื่อสารแบบซิงโครนัสจะมีสัญญาณนาฬิกาเป็นตัวกำหนดจังหวะเวลาการส่งข้อมูลรวมอยู่ด้วยอีกเส้นหนึ่ง ใช้คู่กับสัญญาณข้อมูล ตัวอย่างเช่น การส่งสัญญาณจากคีย์บอร์ด เป็นต้น การสื่อสารแบบอะซิงโครนัส (Asynchronous) เป็นการรับส่งข้อมูล โดยที่ไม่จำเป็นต้องมีสัญญาณนาฬิกาไปด้วย แต่จะใช้ให้ตัวส่งและตัวรับมีอัตราส่งข้อมูลที่เท่ากัน

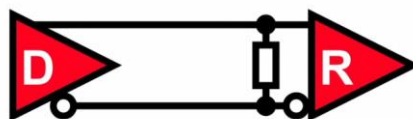
RS-232 ใช้เทคนิคสัญญาณรับส่งแบบคอมมอน (Common Mode) สัญญาณรับส่งแบบคอมมอนนั้นจะใช้สัญญาณกราวด์ (Ground Signal) เป็นตัวเปรียบเทียบ ปัญหาจะเกิดขึ้นเมื่อระดับสัญญาณ

กราวด์ของตัวรับและตัวส่งไม่เท่ากัน ยิ่งระดับสัญญาณแตกต่างกันมากเท่าไร ก็ยิ่งมีผลต่อความผิดพลาดในการสื่อสารมากขึ้นเท่านั้น เพราะการตีความข้อมูลที่รับเข้ามาว่าเป็นศูนย์หรือหนึ่งจะดูจากระดับความแตกต่างระหว่างสัญญาณกราวด์กับสัญญาณข้อมูลที่รับเข้ามา และยิ่งเมื่อมีสัญญาณรบกวน สอดแทรกเข้ามาในสายสัญญาณมากเท่าไร ก็ยิ่งทำให้การตีความสัญญาณมีโอกาสผิดพลาดสูงมากยิ่งขึ้น หรือหมายถึงระดับความผิดพลาดในการรับส่งข้อมูลจะสูงขึ้นจนไม่สามารถสื่อสารกันได้ หรือต้องลดระดับความเร็วในการสื่อสารลงมา

RS-485 เป็นหนึ่งในมาตรฐานการสื่อสารแบบอนุกรม (Serial Communication) ที่ถูกกำหนดขึ้นมาโดยกลุ่มพันธมิตรอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ในประเทศสหรัฐอเมริกา (Electronic Industries Alliance (EIA)) เพื่อตอบสนองต่อความต้องการใช้งานที่ต้องการเชื่อมต่ออุปกรณ์หลายๆ ตัวบนขั้วสายเดียวกัน โดยมีระยะทางการสื่อสารที่ไกลขึ้น และมีความเร็วรับส่งข้อมูลที่สูงขึ้น เมื่อเทียบกับมาตรฐานการสื่อสาร RS-232 เหตุผลที่การสื่อสาร แบบ RS-485 สามารถรับส่งสัญญาณข้อมูลได้ไกลขึ้นและเร็วขึ้น เพราะ RS-485 ใช้เทคนิคสัญญาณรับส่งแบบดิฟเฟอเรนเชียล (Differential Mode) จะไม่ใช่สัญญาณกราวด์เป็นระดับอ้างอิงหรือเปรียบเทียบ แต่จะดูที่ความต่างของสัญญาณของคู่สายเป็นสำคัญ ทำให้ปัญหาเรื่องความแตกต่างของสัญญาณกราวด์ระหว่างอุปกรณ์รับและอุปกรณ์ส่งหมดไป เพราะไม่ถูกนำมาใช้อ้างอิง และถ้าหากคู่สายที่ใช้รับส่งสัญญาณพันกันเป็นเกลียวก็วยิ่งส่งผลให้สัญญาณรบกวนจากภายนอกที่สอดแทรกเข้ามาในคู่สายก็จะถูกกำจัดออกไปได้โดยง่าย ทำให้การสื่อสารแบบ RS-485 ทนต่อสัญญาณรบกวนภายนอกได้สูง สามารถรับส่งสัญญาณได้ไกลขึ้นและเร็วขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเทคนิคสัญญาณรับส่งแบบคอมมอน

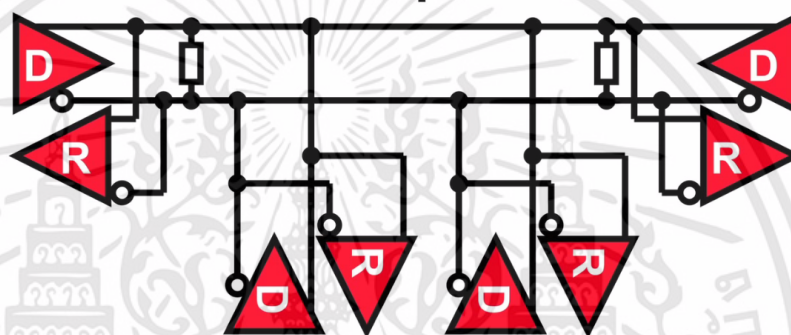
การสื่อสารแบบ RS-232 เป็นการเชื่อมต่อเป็นจุดต่อจุด (Point to point) ซึ่งจะต่ออุปกรณ์ส่งกับตัวรับข้อมูลเพียงชุดเดียวดังรูปที่ 3.3 แต่การสื่อสารแบบ RS-485 มีลักษณะการเชื่อมต่อเป็นแบบหลายจุด (Multi-point) หรือ Multi-drop ดังรูปที่ 3.4 การต่อแบบหลายจุดนี้ทำให้สามารถมองสายสัญญาณเป็นบัสสัญญาณได้ (Signal Bus) จำนวนคอมพิวเตอร์หรืออุปกรณ์ที่สามารถอยู่บน RS-485 บัสหนึ่งถูกกำหนดไว้ที่ 32 อุปกรณ์ ในกรณีที่ต้องการเพิ่มจะต้องมีตัวทวนสัญญาณ (Signal Repeater) หรือใช้ตัวส่ง-รับสัญญาณที่มีอิมพีแดนซ์สูงขึ้น ซึ่งเราอาจเพิ่มจำนวนจุดเชื่อมต่อขึ้นได้ถึง 128 จุด ความยาวของสายสัญญาณตามมาตรฐาน RS-485 นี้สามารถยาวได้ถึง 1.2 กิโลเมตร การสื่อสารจะเป็นแบบสองทางไม่พร้อมกัน (Half Duplex) คือการส่งข้อมูลและรับข้อมูลแบบสลับกัน เมื่อด้านหนึ่งส่งข้อมูล อีกด้านหนึ่งเป็นตัวรับข้อมูล ไม่สามารถรับส่งในเวลาเดียวกันได้

## Point-to-Point



รูปที่ 3.3 การเชื่อมต่ออุปกรณ์สื่อสาร RS-232

## Multi-point



รูปที่ 3.4 การเชื่อมต่ออุปกรณ์สื่อสาร RS-485

### 3.7 การแก้ปัญหาระดับแรงดันเกินและแรงดันตกด้วยระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

แรงดันไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาตามความเปลี่ยนแปลงของปริมาณการใช้ไฟฟ้า ปริมาณการส่งไฟฟ้าในสายส่ง การควบคุมของศูนย์ควบคุมระบบไฟฟ้า และการเกิดเหตุฉุกเฉินในระบบ เนื่องจากผู้ใช้ไฟฟ้าต้องการให้คุณภาพแรงดันไฟฟ้าที่จุดเชื่อมต่อเป็นไปตามเกณฑ์ที่ตกลง ดังนั้นจึงเป็นหน้าที่ของศูนย์ควบคุมที่จะต้องควบคุมให้แรงดันเป็นไปตามข้อตกลง การควบคุมแรงดันเป็นปัญหาของแต่ละพื้นที่ดังนั้นการแก้ปัญหาจึงต้องแก้เป็นพื้นที่ โดยจัดให้มีแหล่งรับจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนให้เพียงพอเพื่อควบคุมแรงดันไฟฟ้าให้ได้ตามที่กำหนด เราสามารถกำหนดปัญหาออกได้เป็น 2 ช่วง คือ ช่วงปกติและช่วงฉุกเฉิน สำหรับแหล่งรับจ่ายกำลังเสมือน แบ่งเป็น 2 ส่วนคือ Static และ Dynamic ในส่วนของ Static ได้แก่ Shunt capacitor และ Reactor ส่วนของ Dynamic เช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้า, SVC, OLTC ที่ทำงานโดยอัตโนมัติ เป็นต้น ซึ่งทางศูนย์ควบคุมต้องจัดทำข้อมูลติดตามความพร้อมใช้งานของอุปกรณ์ และเขียนขั้นตอนการควบคุม อุปกรณ์ให้เหมาะสมกับการรองรับในสภาวะปกติและฉุกเฉิน ซึ่งอาจนำไปสู่การเกิด Voltage collapse และ Cascade tripping ซึ่งจะทำให้เกิดไฟดับเป็นบริเวณกว้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันไฟฟ้าเป็นหนึ่งในตัวชี้วัดคุณภาพไฟฟ้าที่ส่งให้ผู้ใช้ไฟฟ้า การส่งกระแสไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าที่อยู่ห่างไกลจะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งมาก ส่งผลให้แรงดันที่ปลายสายส่งลดลงต่ำกว่าค่ามาตรฐาน การควบคุมแรงดันไฟฟ้าทำได้หลายวิธี เช่น การควบคุมด้วยอุปกรณ์ควบคุม/ชดเชยแรงดันไฟฟ้าด้วย Capacitor Bank หรือ Shunt Reactor การควบคุมที่แรงดันที่ขั้วของโรงไฟฟ้าผ่านระบบ Automatic Voltage Regulator (AVR) เป็นต้น

การติดตั้ง Capacitor Bank หรือตัวเก็บประจุไฟฟ้าขนาดใหญ่จำนวนมากหลายชุด ที่ใส่ขนานเข้ามาในระบบไฟฟ้า ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่สร้างกำลังไฟฟ้าเสมือนให้กับระบบไฟฟ้า การนำ Capacitor Bank เข้าใช้งานในระบบไฟฟ้าจะส่งผลให้ค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนเพิ่มขึ้น จึงสามารถเพิ่มแรงดันไฟฟ้าได้ และในทางกลับกัน หากต้องการให้แรงดันไฟฟ้าในระบบลดลง จะใช้วิธีปลด Capacitor Bank ออกจากระบบ อีกทั้งยังทำหน้าที่ปรับค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ (Power Factor) ของระบบให้มีค่าสูงขึ้น เพื่อที่จะไม่ต้องเสียค่าปรับและลดกำลังงานสูญเสียในระบบ ส่วนประกอบภายใน Capacitor Bank ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์ควบคุมค่าตัวประกอบกำลัง (PF. Controller) ตัวเก็บประจุไฟฟ้า (Capacitor) และอุปกรณ์ตัดต่อตัวเก็บประจุไฟฟ้า (Magnetic Contactor) โดยจำนวนหรือขนาดของคาปาซิเตอร์ที่ต้องการต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับค่ากำลังงานเสมือนที่เกิดขึ้นในระบบในขณะนั้น โดย Power Factor Controller จะทำการตรวจวัดค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ของระบบและจะสั่งการให้ Magnetic Contactor ต่อหรือปลดคาปาซิเตอร์จากระบบเพื่อให้ได้ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ตามต้องการ

Shunt Reactor เป็นอุปกรณ์ ดูดซับ Q ชนิดหนึ่ง การนำมาใช้งานจะส่งผลให้ค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนในระบบไฟฟาลดลง จึงสามารถลดระดับแรงดันไฟฟ้าได้ และในทางกลับกันหากต้องการให้แรงดันไฟฟ้าในระบบเพิ่มขึ้น ก็สามารถปลด Shunt Reactor ออกจากระบบไฟฟ้า ซึ่งคุณสมบัติของ Shunt Reactor และ Capacitor Bank ตรงข้ามกัน

Static VAR Compensator (SVC) เป็นอุปกรณ์ทางด้าน Power System Stabilizer (PSS) ชนิดหนึ่ง อุปกรณ์ชนิดนี้มีคุณสมบัติพิเศษคือสามารถ Generate Q และ Absorb Q ให้แก่ระบบเพื่อการปรับปรุงค่าแรงดันไฟฟ้าได้ คุณสมบัติของ SVC คือทำงานเพื่อรักษาเสถียรภาพหรือเพิ่มค่าเสถียรภาพของระบบ เพื่อให้ระบบมีความมั่นคงมากขึ้น โดยออกแบบอุปกรณ์ควบคุมเป็นแบบ Solid State Shunt Capacitive และ Shunt Reactor มีความสามารถปรับค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนอย่างต่อเนื่อง เป็นอุปกรณ์ที่ช่วยให้ระบบมีความมั่นคง อุปกรณ์นั้นประกอบด้วย ตัวเก็บประจุขนาน และรีแอกเตอร์ขนาน โดยมี Thyristor Switches เป็นตัวควบคุมการจ่ายกำลังรีแอกทีฟ

### 3.8 บทสรุป

บทที่ 3 ได้กล่าวถึงสถานีไฟฟ้าอัจฉริยะซึ่งสามารถรองรับการเชื่อมต่อสื่อสารข้อมูลของอุปกรณ์ต่างๆ ผ่านเครือข่าย ตามมาตรฐาน IEC-61850 โดยจะทำงานร่วมกันเป็นโครงข่ายทั้งระบบ ซึ่งเป็นวิธีในการแก้ปัญหาระดับแรงดันเกินและแรงดันตกด้วยระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ ทั้งนี้จะนำหลักการดังกล่าวมาใช้เป็นแนวทางในการออกแบบการเชื่อมต่อระหว่างสถานีไฟฟ้าและการผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือนของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์



## บทที่ 4

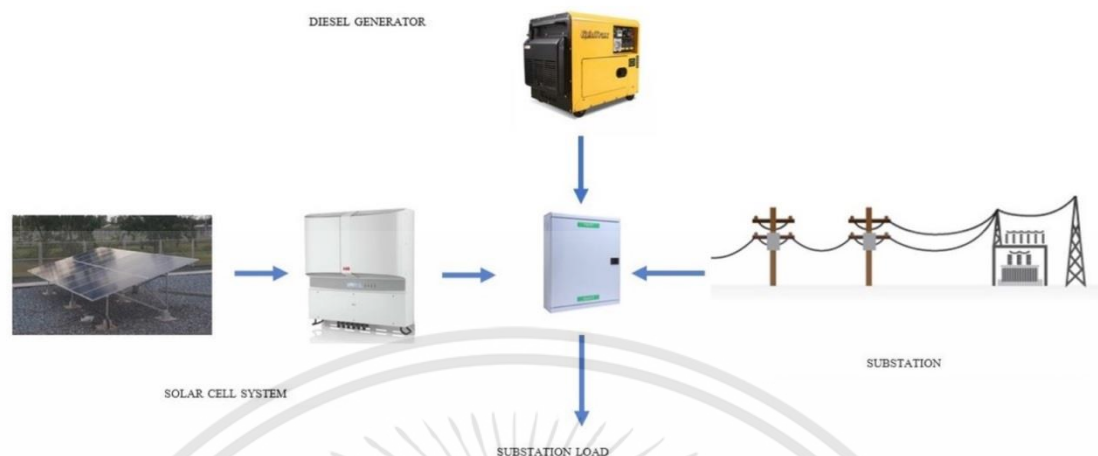
### การออกแบบการทดลอง

#### 4.1 บทนำ

ในปัจจุบันมีการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์เป็นจำนวนมาก และยังมีทิศทางการติดตั้งที่เพิ่มขึ้นอีกด้วย เนื่องจากระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์นั้นมีความคุ้มค่าในการลงทุน แต่จากปัญหาที่ได้พบเห็นในระบบไฟฟ้าที่ก่อนหน้านี้ได้กล่าวมานั้นคือ แรงดันไฟฟ้าในระบบไม่มีเสถียรภาพ บางตำแหน่งในระบบไฟฟ้ามีแรงดันต่ำกว่ามาตรฐาน ทำให้องค์กรที่ทำหน้าที่จำหน่ายไฟฟ้าต้องมีการติดอุปกรณ์บางอย่างเพิ่มเข้าไปในระบบ เพื่อให้ระดับแรงดันไฟฟ้าสูงขึ้น ซึ่งการควบคุมระดับแรงดันนั้นอาศัยหลักการของ Volt/VAR Control คือการควบคุมปริมาณกำลังไฟฟ้าเสมือนในระบบซึ่งมีผลทำให้ระดับแรงดันไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นเมื่อในระบบไฟฟ้ามีการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์อยู่แล้วนั้น อีกทั้งความสามารถในการควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนของโซลาร์อินเวอร์เตอร์ จึงเป็นเรื่องที่ควรพิจารณาหากให้ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ที่อยู่แต่ละตำแหน่งในสายส่งของระบบไฟฟ้า ช่วยกันควบคุมระดับแรงไฟฟ้าไฟฟ้าในระบบให้มีเสถียรภาพที่ดีขึ้น จึงเป็นที่มาของการทดลองนี้ ซึ่งจะทำการทดสอบการควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนของโซลาร์อินเวอร์เตอร์ให้สัมพันธ์กับค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนที่ในระบบไฟฟ้ายังต้องการ โดยการดึงข้อมูลไฟฟ้าของระบบผ่านสถานีไฟฟ้า

#### 4.2 ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ในการทดลอง

ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ทดลองประกอบด้วยอุปกรณ์หลักคือ เซลล์แสงอาทิตย์และอินเวอร์เตอร์ ในการทดลองนี้เป็นการจำลองรักษาเสถียรภาพของแรงดันไฟฟ้าในสถานีไฟฟ้า โดยการให้ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์มีการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนให้กับระบบไฟฟ้าเพื่อชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนที่เกิดขึ้นในระบบ โดยในอุปกรณ์ของระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์นั้น อุปกรณ์ที่สามารถจ่ายค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนได้ก็คือโซลาร์อินเวอร์เตอร์ ดังนั้นในการทดลองจะทำการควบคุมโซลาร์อินเวอร์เตอร์ในโหมดของการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนเป็นหลัก ในการทดลองจะใช้ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีติดตั้งในสถานีไฟฟ้าบัวใหญ่ อำเภอบัวใหญ่ จังหวัดนครราชสีมา ซึ่งมีกำลังติดตั้งของแผงโซลาร์เซลล์ 5 kW ซึ่งแผนภาพการเชื่อมต่อของระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในสถานีไฟฟ้าบัวใหญ่ แสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ในการทดลอง

ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งในสถานีบัวใหญ่ จะมีการติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์ ขนาด 325 W จำนวน 16 แผง และใช้โซลาร์อินเวอร์เตอร์ ยี่ห้อ ABB ขนาด 10 kW 3P แสดงดังรูปที่ 4.2 โดยรายละเอียดคุณลักษณะของโซลาร์อินเวอร์เตอร์ ดังรูปที่ 4.3 นอกจากนี้มีระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์แล้ว ยังมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซลไว้ใช้กรณีไฟฟ้าจากระบบจำหน่ายเกิดการดับขึ้น ทำให้ระบบยังมีพลังงานไฟฟ้าใช้ ซึ่งเกิดจากการผลิตไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซลและระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์



รูปที่ 4.2 โซลาร์อินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### Technical data and types

Type code	PVI-10.0-I-OUTD-400	PVI-12.0-I-OUTD-400
<b>Input side</b>		
Absolute maximum DC input voltage ( $V_{max,abs}$ )	520 V	
Start-up DC input voltage ( $V_{start}$ )	200 V (adj. 120...350 V)	
Operating DC input voltage range ( $V_{dcmin}...V_{dcmax}$ )	$0.7 \times V_{start}...520$ V	
Rated DC input voltage ( $V_{dc,r}$ )	345 V	
Rated DC input power ( $P_{dc,r}$ )	10500 W	12300 W
Number of independent MPPT	2 <sup>(1)</sup>	
Maximum DC input power for each MPPT ( $P_{MPPT,max}$ )	6800 W	
DC input voltage range with parallel configuration of MPPT at $P_{dc,r}$	220...470 V	250...470 V
DC power limitation with parallel configuration of MPPT	Linear derating from max to null [ $470V \leq V_{MPPT} \leq 520V$ ]	
DC power limitation for each MPPT with independent configuration of MPPT at $P_{dc,r}$ , max unbalance example	6800 W [ $285V \leq V_{MPPT} \leq 470V$ ] the other channel: $P_{dc,r} = 6800W$ [ $155V \leq V_{MPPT} \leq 470V$ ]	6800 W [ $275V \leq V_{MPPT} \leq 470V$ ] the other channel: $P_{dc,r} = 6800W$ [ $220V \leq V_{MPPT} \leq 470V$ ]
Maximum DC input current ( $I_{dc,max}$ ) / for each MPPT ( $I_{MPPT,max}$ )	48.0 A / 24.0 A	50.0 A / 25.0 A
Maximum input short circuit current for each MPPT	29.0 A	
Number of DC inputs pairs for each MPPT	2	
DC connection type	Tool Free PV connector WM / MC4	
<b>Input protection</b>		
Reverse polarity protection	Yes, from limited current source	
Input over voltage protection for each MPPT - varistor	2	
Photovoltaic array isolation control	According to local standard	
DC switch rating for each MPPT (version with DC switch)	32 A / 600 V	
<b>Output side</b>		
AC grid connection type	Three phase 3W or 4W+PE	
Rated AC power ( $P_{ac,r}$ @ $\cos\phi=1$ )	10000 W	12000 W
Maximum AC output power ( $P_{ac,max}$ @ $\cos\phi=1$ )	11000 W <sup>(3)</sup>	12500 W <sup>(4)</sup>
Maximum apparent power ( $S_{max}$ )	11100 VA	13300 VA
Rated AC grid voltage ( $V_{ac,r}$ )	400 V	
AC voltage range	320...480 V <sup>(5)</sup>	
Maximum AC output current ( $I_{ac,max}$ )	16.0 A	18.0 A
Contributory fault current	25.0 A	
Rated output frequency (f)	50 Hz / 60 Hz	
Output frequency range (f <sub>min</sub> ...f <sub>max</sub> )	47...53 Hz / 57...63 Hz <sup>(6)</sup>	
Nominal power factor and adjustable range	> 0.995, adj. $\pm 0.9$ with $P_{ac,r} = 10.0$ kW	> 0.995, adj. $\pm 0.9$ with $P_{ac,r} = 12.0$ kW
Total current harmonic distortion	< 2%	
AC connection type	Screw terminal block, cable gland M40	
<b>Output protection</b>		
Anti-islanding protection	According to local standard	
Maximum AC overcurrent protection	20.0 A	
Output overvoltage protection - varistor	3 plus gas arrester	

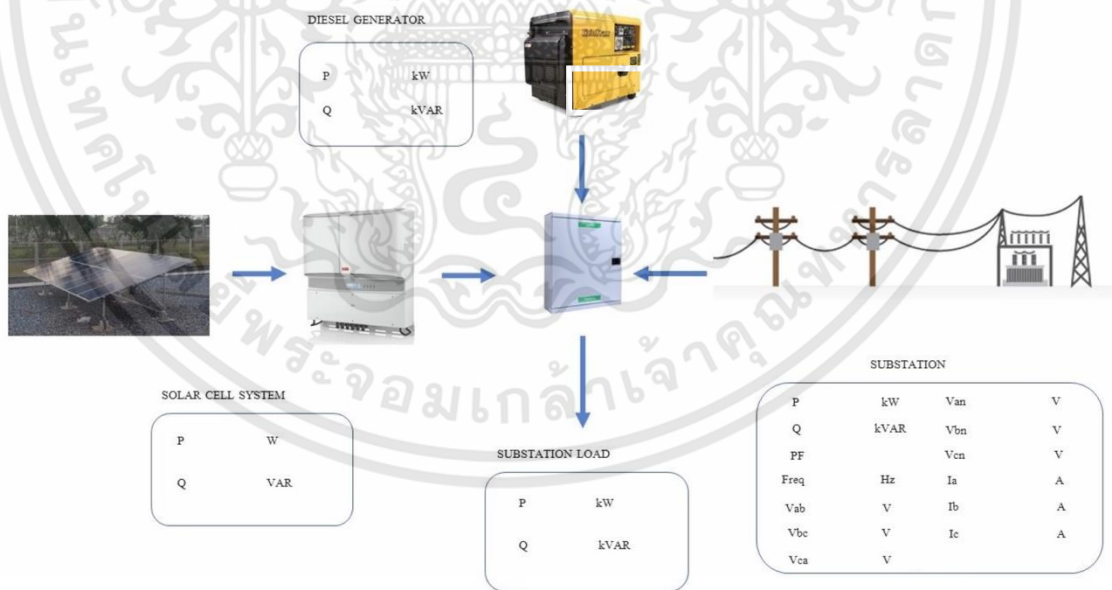
### รูปที่ 4.3 รายละเอียดคุณลักษณะของโซลาร์อินเวอร์เตอร์

#### 4.3 การสื่อสารระหว่างระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์กับสถานีไฟฟ้า

แผนภาพการเชื่อมต่อของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในสถานีไฟฟ้าบับใหญ่จะเห็นได้ว่า แหล่งจ่ายของระบบไฟฟ้าของโหลดในสถานีไฟฟ้าบับใหญ่ มีอยู่ด้วยกัน 3 แหล่งคือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ดีเซล, ไฟฟ้าระบบจำหน่าย และ ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ ในการทดลองข้อมูลส่วนที่จะใช้คือข้อมูลกำลังไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ และข้อมูลของระบบไฟฟ้า (substation) โดยจะมีการรับค่าข้อมูลของการใช้กำลังไฟฟ้าเสมือน ที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้า เพื่อนำมา ควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือน ของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งข้อมูลทางไฟฟ้า ระหว่างระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ และ สถานีไฟฟ้า นั้นจะได้มาจากการเขียนโปรแกรม ผ่าน PLC (Programable Logic Control) การดึงค่าข้อมูลของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ จะดึงผ่าน Power meter ที่มีการติดตั้งอยู่ที่โซลาร์อินเวอร์เตอร์ ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ตำแหน่งของการติดตั้ง Power Meter

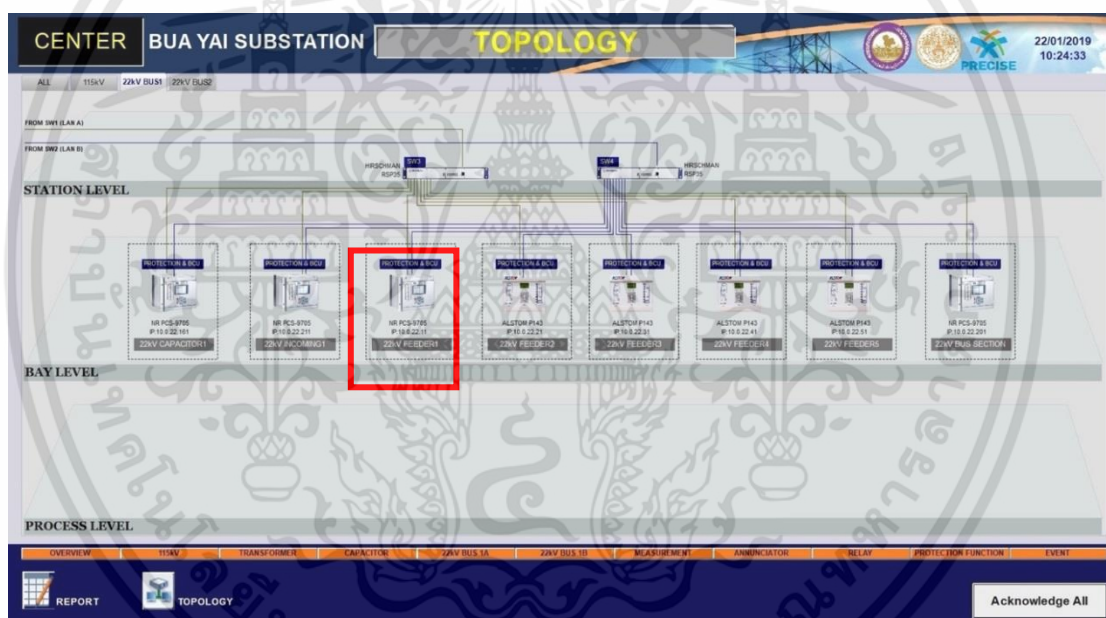


รูปที่ 4.5 ค่าทางไฟฟ้าที่จะมีการแสดงผลผ่านโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สถานีไฟฟ้าบัวใหญ่เป็นสถานีไฟฟ้าสถานีที่ 2 ของประเทศไทยที่ถูกเปลี่ยนจากการสื่อสารของอุปกรณ์ในรูปแบบอนาล็อกมาเป็นแบบดิจิทัล โดยการสื่อสารของอุปกรณ์ในระบบสถานีจะใช้ Protocol IEC-61850 เป็นมาตรฐานในการรับส่งข้อมูล ซึ่งมาตรฐาน IEC-61850 นั้นที่มีความไวและเสถียรภาพในการสื่อสารของแต่ละอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้ามาก

ส่วนของข้อมูลทางไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าจะได้มาจากการดึงข้อมูลผ่าน Gateway ของสถานีไฟฟ้า โดยปกติสถานีไฟฟ้าบัวใหญ่ อ.บัวใหญ่ จ.นครราชสีมา ก็จะมีระดับแรงดันไฟฟ้าในระบบส่งอยู่ 2 ระดับ คือ 115 kV และ 22kV ในการจำลองการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนของโซลาร์อินเวอร์เตอร์ ในการทดลองนี้ จะเลือกดึงข้อมูลของ วงจรในระดับแรงดันไฟฟ้า 22kV ซึ่งจำนวนวงจรในระดับแรงดันไฟฟ้า 22kV นั้นมีอยู่ 10 วงจร โดยในการทดลองครั้งนี้จะเลือกมาหนึ่งวงจรคือ วงจรที่ 1 โดยการดึงข้อมูลนั้นจะดึงผ่าน GATEWAY ที่ทำหน้าที่เป็นทางผ่านและรวมข้อมูลทางไฟฟ้าของวงจรที่ 1 ในระบบ 22 kV ดังรูปที่ 4.6

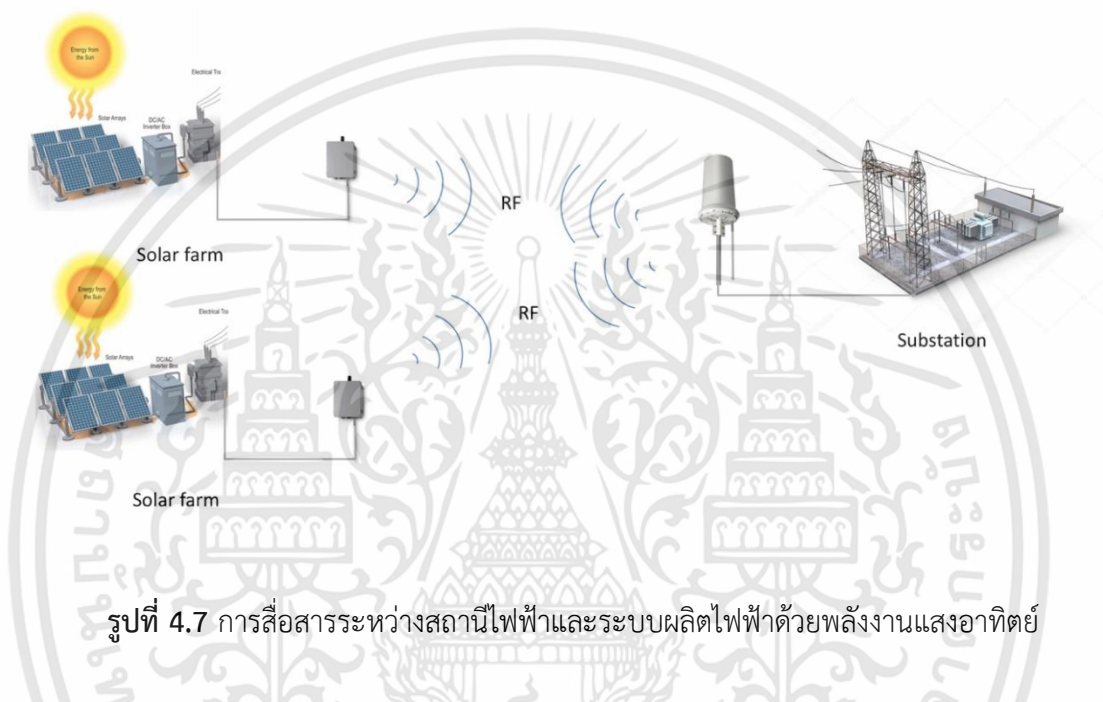


รูปที่ 4.6 Gateway ของระบบ 22kV วงจรที่ 1

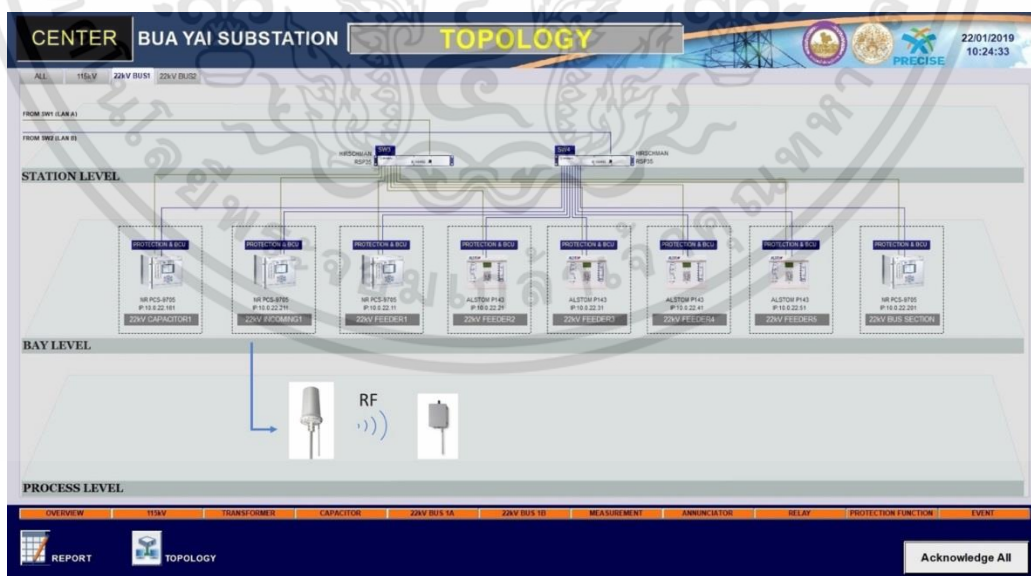
ซึ่งในระบบที่จะใช้ในการสื่อสารข้อมูลระหว่างสถานีไฟฟ้า และระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์นั้น จะอ้างอิงจากระบบที่ใช้จริงในปัจจุบัน คือส่วนใหญ่แล้วตำแหน่งสถานที่ที่มีการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์นั้นจะไม่อยู่ใกล้สถานีไฟฟ้าเสมอไป ทำให้การสื่อสารระหว่างสถานีไฟฟ้ากับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์จำเป็นต้องใช้การสื่อสารของข้อมูลทางสัญญาณไร้สายจะเป็นสิ่งที่เหมาะสมที่สุด โดยให้ตัวกระจายสัญญาณอยู่ที่สถานีไฟฟ้าและอุปกรณ์รับส่งข้อมูลอยู่ที่

ตำแหน่งของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์แต่ละสถานที่ที่มีการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ดังรูปที่ 4.7

จากการที่ข้อมูลการสื่อสารระหว่างสถานีไฟฟ้าและระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์เหมาะสมที่จะสื่อสารกันผ่านทางอากาศมากกว่าทางสายสัญญาณ ดังนั้นในการดึงข้อมูลทางไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้านั้นจะมีการติดตั้งอุปกรณ์รับส่งสัญญาณวิทยุเพื่อใช้ในการสื่อสารดังรูปที่ 4.8



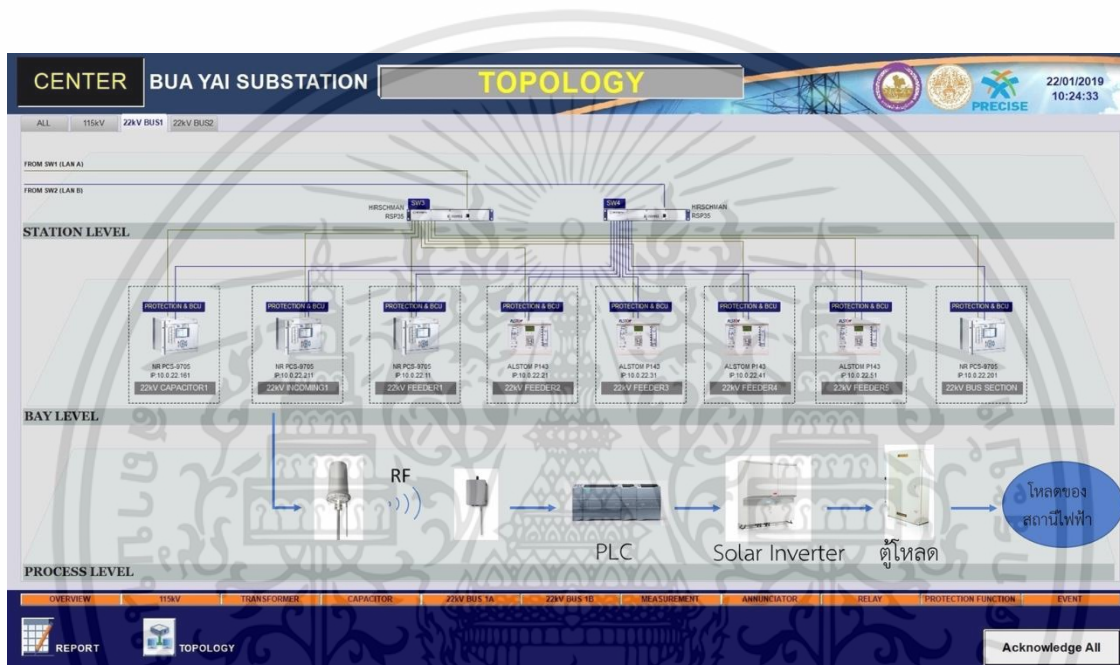
รูปที่ 4.7 การสื่อสารระหว่างสถานีไฟฟ้าและระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์



รูปที่ 4.8 การสื่อสารระหว่างสถานีไฟฟ้าบั่วใหญ่และระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสื่อสารของข้อมูลระหว่างสถานีไฟฟ้าและระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ ทางด้านระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์นั้นจะต้องมีอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่รับส่งข้อมูลและควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าของโซลาร์อินเวอร์เตอร์ ในการทดลองนี้ อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่นี้คือ PLC(Programable Logic Control) ยี่ห้อ SIEMENS รุ่น S7-1200 ซึ่งครอบคลุมต่อการทำงานในฟังก์ชันทั้งหมดที่จะเกิดขึ้นในการทดลองนี้ ซึ่งไดอะแกรมการสื่อสารระหว่างโซลาร์อินเวอร์เตอร์และสถานีไฟฟ้า ที่ใช้ในการทดลองนี้ดังรูปที่ 4.9



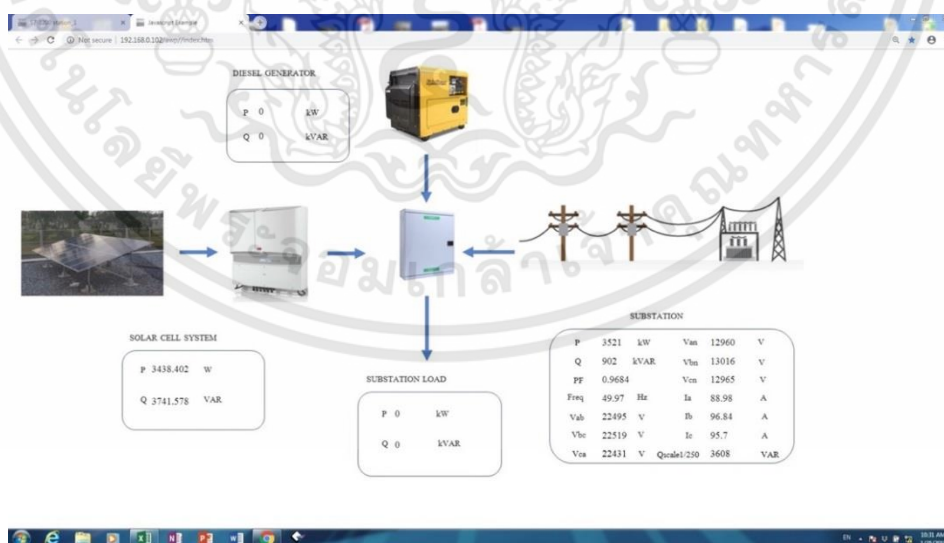
รูปที่ 4.9 ไดอะแกรมการสื่อสารระหว่างโซลาร์อินเวอร์เตอร์และสถานีไฟฟ้า

รูปแบบการสื่อสารของ PLC และ GATEWAY ซึ่งเป็นที่ผ่านทางของข้อมูลของสถานีไฟฟ้าบวใหญ่จะใช้ Protocol ชนิด MODBUS TCP/IP เป็นการสื่อสารโดยจะให้ทางด้าน GATEWAY ทำหน้าที่เป็น Server และ PLC เป็น Client เพื่อที่ PLC จะไปดึงข้อมูลทางไฟฟ้าจากสถานีไฟฟ้า มาประมวลผลเพื่อใช้ในการควบคุมการทำงานของโซลาร์อินเวอร์เตอร์ต่อไป โดยค่าที่ดึงได้จาก Gateway แสดงดังรูปที่ 4.9 แต่ในการทดลองนี้ใช้เพียงค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนของระบบไฟฟ้าเท่านั้น

GID	Description	Address	Group No.	Group heading
1	[22kV OUT01]P	6	22	Measurement
2	[22kV OUT01]Q	6	22	Measurement
3	[22kV OUT01]COS	6	22	Measurement
4	[22kV OUT01]f	6 <td 22	Measurement	
5	[22kV OUT01]Uab Phase AB Amplitude_(repeat1)	6	22	Measurement
6	[22kV OUT01]Ubc Phase BC Amplitude_(repeat1)	6	22	Measurement
7	[22kV OUT01]Uca Phase CA Amplitude_(repeat1)	6	22	Measurement
8	[22kV OUT01]Ua Phase A Amplitude_(repeat1)	6	22	Measurement
9	[22kV OUT01]Ub Phase B Amplitude_(repeat1)	6	22	Measurement
10	[22kV OUT01]Uc Phase C Amplitude_(repeat1)	6	22	Measurement
11	[22kV OUT01]Ia Phase A Amplitude_(repeat1)	6	22	Measurement
12	[22kV OUT01]Ib Phase B Amplitude_(repeat1)	6	22	Measurement
13	[22kV OUT01]Ic Phase C Amplitude_(repeat1)	6	22	Measurement

รูปที่ 4.10 ค่าทางไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าวงจรที่ 1 ที่ดึงได้จาก Gateway

จากข้อมูลค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้มาจากสถานีไฟฟ้ามีค่าสูงประมาณ 500-1000kVAR ซึ่งความสามารถการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนของโซลาร์อินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการทดลองนั้นทำได้ประมาณ 5kVAR เท่านั้น ทำให้การทดลองนี้ต้องลดสัดส่วนของกำลังไฟฟ้าเสมือนที่ได้มาจากวงจรไฟฟ้าที่ 1 ของสถานีไฟฟ้าลง โดยในการทดลองจะลดลง 250 เท่า โดยเรียกชื่อกำลังไฟฟ้าเสมือนที่ถูกลดทอนลงนี้ใหม่ว่า Qscale1/250 และในการทดลองนี้จะมีการเขียนโปรแกรมดึงข้อมูลที่ต้องการแสดงมาแสดงบนเว็บเบราว์เซอร์อีกด้วย ดังรูปที่ 4.11

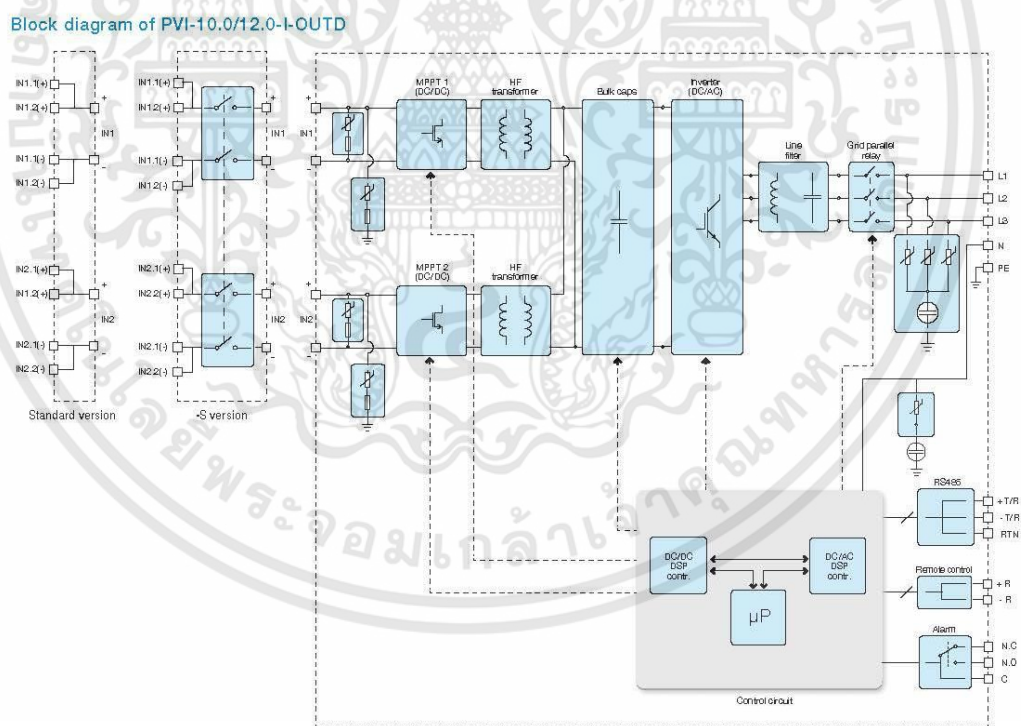


รูปที่ 4.11 หน้าจอแสดงผลของระบบที่เขียนโปรแกรมขึ้นมา

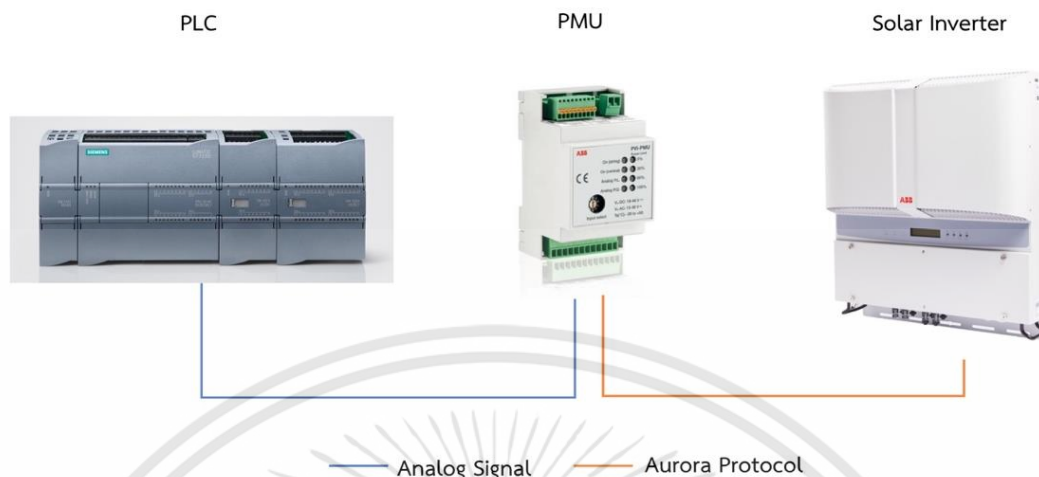
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4 ระบบควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์

การควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์นั้นก็คือ การควบคุมการทำงานของโซลาร์อินเวอร์เตอร์ ที่ทำหน้าที่ส่งผ่านกำลังไฟฟ้าแรงดันกระแสตรงที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์มาเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ที่แรงดัน 400/230 50Hz เข้าสู่ระบบจำหน่ายของระบบไฟฟ้าในประเทศไทย โดยปกติหน้าที่หลักของโซลาร์อินเวอร์เตอร์นั้นจะทำหน้าที่ส่งผ่านกำลังไฟฟ้าจริง (Active Power) เข้าสู่ระบบไฟฟ้าเพียงเท่านั้น หรือค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าเป็น 1 (Power Factor = 1) แต่ในการทดลองนี้จะเป็นการควบคุมการจ่ายค่ากำลังไฟฟ้าเสมือน (Reactive Power) ของโซลาร์อินเวอร์เตอร์ ให้สัมพันธ์กับปริมาณกำลังไฟฟ้าเสมือน (Reactive Power) ที่ถูกใช้จริงในระบบไฟฟ้าของสถานี่ไฟฟ้า ภายในโซลาร์อินเวอร์เตอร์นั้นจะมีส่วนที่เป็นสวิตซ์ซึ่งเป็นตัวหลักในการแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงมาเป็นแรงไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งสามารถที่จะปรับมุมในการสวิตซ์ได้ทำให้สามารถควบคุมปริมาณกำลังไฟฟ้าเสมือนได้ ดังรูปที่ 4.12 ซึ่งความสามารถที่จะจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนนั้นขึ้นอยู่กับพิกัดขนาดกำลังของโซลาร์อินเวอร์เตอร์แต่ละรุ่น แต่ละยี่ห้อ



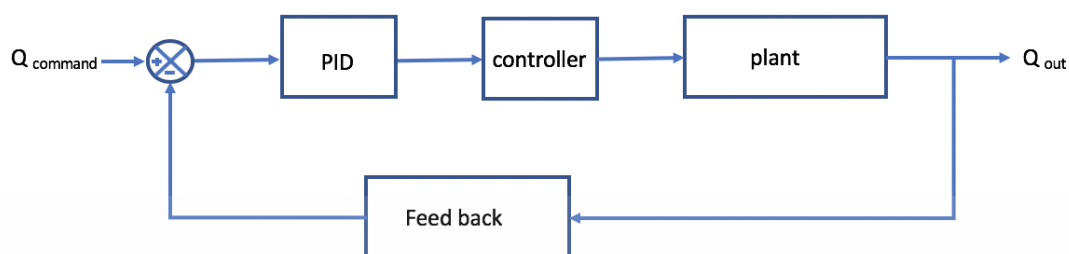
รูปที่ 4.12 ไดอะแกรมอุปกรณ์ภายในโซลาร์อินเวอร์เตอร์



รูปที่ 4.13 ไดอะแกรมการสื่อสารระหว่าง PLC กับโซลาร์อินเวอร์เตอร์

ในการสื่อสารเพื่อควบคุมการทำงานของโซลาร์อินเวอร์เตอร์ของยี่ห้อ ABB นั้นเราไม่สามารถเชื่อมต่อการสื่อสารโดยตรงระหว่าง PLC กับโซลาร์อินเวอร์เตอร์ได้เนื่องจากโซลาร์อินเวอร์เตอร์ของยี่ห้อนี้จะสื่อสารด้วย Protocol ที่เรียกว่า Aurora Protocol ซึ่งเป็น Protocol เฉพาะของทางบริษัท ABB ทำให้ต้องใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า PMU (Power Manager Unit) เป็นตัวกลางในการสื่อสารโดยแปลงสัญญาณอะนาล็อกจาก PLC มาเป็น Aurora Protocol เพื่อที่จะสามารถควบคุมปริมาณการจ่ายค่า Reactive Power ของโซลาร์อินเวอร์เตอร์ได้ดังรูปที่ 4.13

ในการทดลองควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนของโซลาร์อินเวอร์เตอร์ ซึ่งต้องควบคุมค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนที่จ่ายออกมาจากโซลาร์อินเวอร์เตอร์ให้มีค่าเท่ากับค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนที่อ่านค่ามาจากสถานีไฟฟ้า ซึ่งจากขีดจำกัดของโซลาร์อินเวอร์เตอร์ที่ได้กล่าวมาข้างต้นไว้แล้วว่ามีสามารถจ่ายได้แค่ประมาณ 5 kVAR จึงทำให้ในการควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนของโซลาร์อินเวอร์เตอร์จะใช้ Qscale1/250 เป็นค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนที่ใช้อ้างอิง(Q<sub>command</sub>) ในการสั่งการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนของโซลาร์อินเวอร์เตอร์ โดยเขียนเป็นไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 ไดอะแกรมการสื่อสารระหว่าง PLC กับ โซลาร์อินเวอร์เตอร์

#### 4.5 บทสรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงการทดสอบระบบการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนในระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์เข้าสู่ระบบไฟฟ้า เพื่อช่วยการรักษาระดับแรงดันของระบบไฟฟ้าให้มีเสถียรภาพมากขึ้น ซึ่งในการทดลองครั้งนี้เป็นเพียงการจำลองการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนจากระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีขนาดเล็ก แต่มีรูปแบบการทดลองที่เหมือนกับระบบที่จะใช้จริง ครอบคลุมทั้งด้านการสื่อสารภายในสถานีไฟฟ้าที่เป็นระบบ IEC-61850 และรูปแบบการควบคุมการผลิตกำลังไฟฟ้าเสมือนของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

## บทที่ 5

### ผลการทดสอบ

#### 5.1 บทนำ

ในบทนี้จะเสนอถึงผลการทดสอบการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ ที่มีความสัมพันธ์กับความต้องการกำลังไฟฟ้าเสมือนในระบบไฟฟ้า โดยจะเริ่มจากการเปรียบเทียบรูปแบบการสื่อสารข้อมูลระหว่างสถานีไฟฟ้ากับอุปกรณ์ควบคุม แบบไร้สายกับมีสายสัญญาณ การตั้งค่าข้อมูลทางไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้า และการควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อให้ได้ทราบที่รูปแบบและวิธีการที่ดี เพื่อเป็นแนวทางในการใช้กับระบบจริงในคราวต่อไป

#### 5.2 การทดสอบการสื่อสารแบบไร้สายระหว่างสถานีไฟฟ้ากับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์

การทดลองข้างต้นเมื่อทำการสื่อสารแบบใช้สายสัญญาณในการสื่อสาร ข้อมูลที่อ่านได้ทางฝั่งตัวรับสัญญาณนั้นอ่านได้ค่าที่ถูกต้องตามค่าที่อ่านได้จากตัวส่งสัญญาณไม่มีความผิดพลาดของข้อมูล เมื่อมาดูด้านความเร็วในการสื่อสารนั้น ข้อมูลมีความล่าช้าในการอ่านประมาณน้อยกว่า 1 ms ดังรูปที่ 5.1 หลังจากนั้นทำการทดลองการสื่อสารใหม่โดยใช้การสื่อสารแบบไร้สาย พบว่าข้อมูลที่ส่งมาไม่มีความผิดพลาดด้านการรับส่งค่า แต่เมื่อพิจารณาส่วนในการความเร็วในการรับส่งข้อมูลนั้น เกิดความล่าช้าในการอ่านค่าประมาณ 131 ms ดังรูปที่ 5.2 การโปรแกรมการแสดงผลของระบบไฟฟ้าในสถานีไฟฟ้างรูปที่ 5.3

```
Microsoft Windows [Version 6.1.7601]
Copyright (c) 2009 Microsoft Corporation. All rights reserved.

C:\Users\suntichai>ping 192.168.0.130

Pinging 192.168.0.130 with 32 bytes of data:
Reply from 192.168.0.130: bytes=32 time<1ms TTL=128
Reply from 192.168.0.130: bytes=32 time<1ms TTL=128
Reply from 192.168.0.130: bytes=32 time<1ms TTL=128
Reply from 192.168.0.130: bytes=32 time<1ms TTL=128

Ping statistics for 192.168.0.130:
    Packets: Sent = 4, Received = 4, Lost = 0 (0% loss),
    Approximate round trip times in milli-seconds:
        Minimum = 0ms, Maximum = 0ms, Average = 0ms

C:\Users\suntichai>
```

รูปที่ 5.1 ข้อมูลความล่าช้าของการสื่อสารแบบมีสายสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Microsoft Windows [Version 6.1.7601]
Copyright (c) 2009 Microsoft Corporation. All rights reserved.

C:\Users\suntichai>ping 192.168.43.7

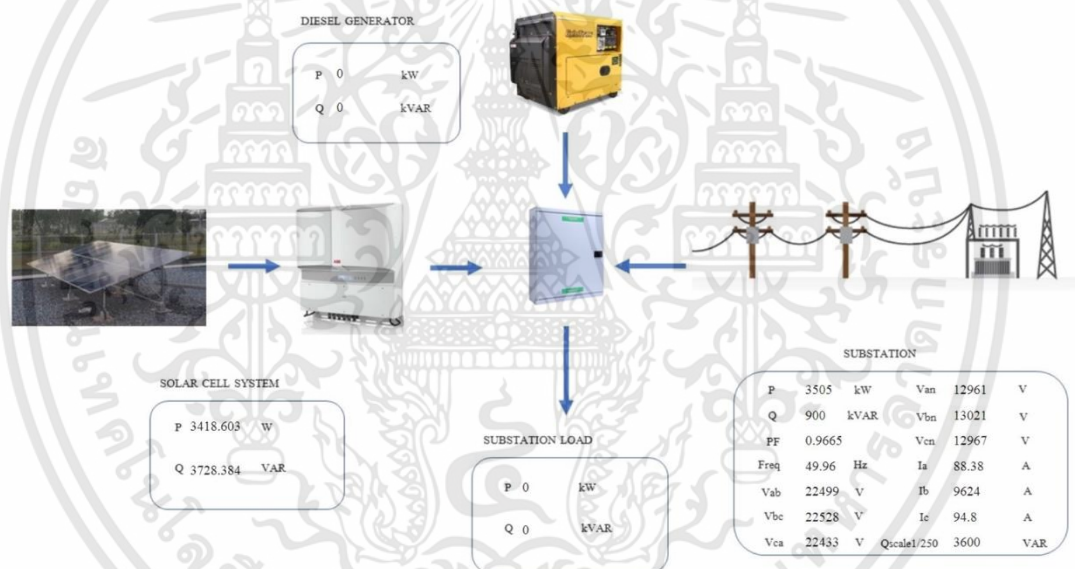
Pinging 192.168.43.7 with 32 bytes of data:
Reply from 192.168.43.7: bytes=32 time=98ms TTL=64
Reply from 192.168.43.7: bytes=32 time=114ms TTL=64
Reply from 192.168.43.7: bytes=32 time=146ms TTL=64
Reply from 192.168.43.7: bytes=32 time=166ms TTL=64

Ping statistics for 192.168.43.7:
    Packets: Sent = 4, Received = 4, Lost = 0 (0% loss),
    Approximate round trip times in milli-seconds:
        Minimum = 98ms, Maximum = 166ms, Average = 131ms

C:\Users\suntichai>

```

รูปที่ 5.2 ข้อมูลความล่าช้าของการสื่อสารแบบไร้สายสัญญาณ



รูปที่ 5.3 โปรแกรมการแสดงผลของระบบไฟฟ้าในสถานีไฟฟ้า

จากการทดสอบเปรียบเทียบการสื่อสารแบบไร้สายและมีสายสัญญาณระหว่างสถานีไฟฟ้ากับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์นั้น ในการสื่อสารแบบไร้สายนั้นจะมีความล่าช้าในการส่งมากกว่าการส่งแบบมีสายสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.3 การทดสอบการควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนของระบบผลิตไฟฟ้าด้วย

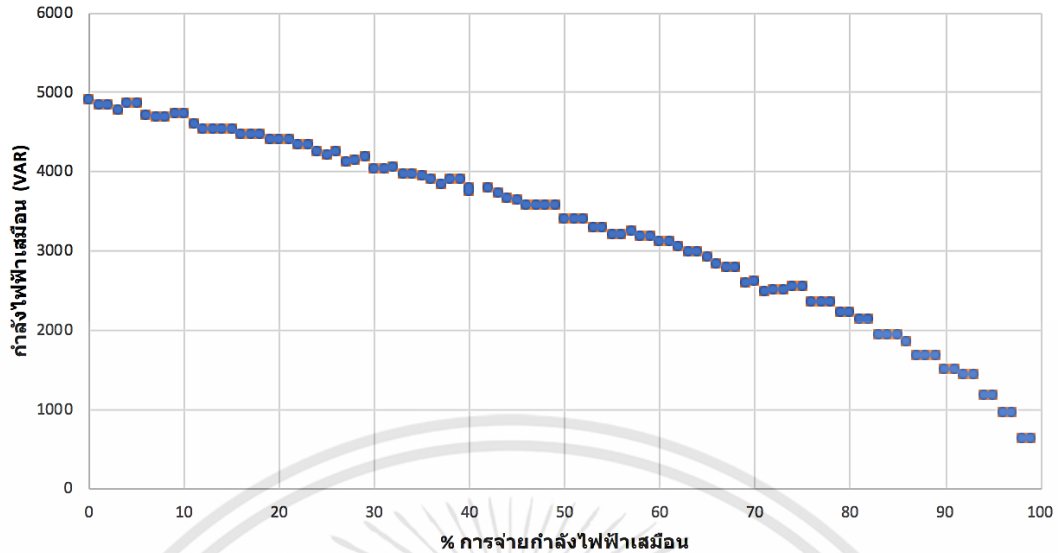
#### พลังงานแสงอาทิตย์

การทดสอบความสามารถการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์นั้น Solar Inverter จะรับคำสั่งเป็นเปอร์เซ็นต์เพื่อที่จะจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนตามคำสั่งเปอร์เซ็นต์นั้นๆ ตามรูปที่ 5.4 โดย plant ในรูปสื่อถึงคุณลักษณะการจ่ายออกของกำลังไฟฟ้าเสมือนของ Solar Inverter ซึ่งในการทดลองก็คือการหาโมเดลของ Solar Inverter นั้นเองเพื่อจะได้นำไปออกแบบระบบควบคุมโรชั้นต่อไป การทดลองนี้จะทำการส่งค่าเปอร์เซ็นต์การจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนตั้งแต่ 0 – 100 เปอร์เซ็นต์ เพื่อดูกำลังไฟฟ้าเสมือนที่ถูกจ่ายโดย Solar Inverter และเก็บผลการทดลองดังตาราง ในภาคผนวก ก



รูปที่ 5.4 ไดอะแกรมการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนของโซลาร์อินเวอร์เตอร์

ในการเก็บข้อมูลจะมีการเก็บค่าระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนกับค่ากำลังไฟฟ้าเสมือน โดยที่เปอร์เซ็นต์การจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนจะทำการเพิ่มขึ้นทีละ 1 เปอร์เซ็นต์ ทำให้ได้ค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนที่ถูกจ่ายออกมามีค่าเปลี่ยนแปลงไป จากข้อมูลการเก็บค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนที่ถูกจ่ายด้วย Solar Inverter เมื่อทำการส่งค่าเปอร์เซ็นต์การผลิตให้ Solar Inverter จะเห็นได้ว่าค่าเปอร์เซ็นต์กับการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนของ Solar Inverter นั้นมีการผกผันกัน ด้วยสาเหตุมาจากคุณลักษณะเฉพาะของ Solar Inverter ยี่ห้อ ABB ซึ่งเมื่อนำข้อมูลที่เก็บค่าได้มาพล็อตกราฟจะได้ตามรูปที่ 5.5



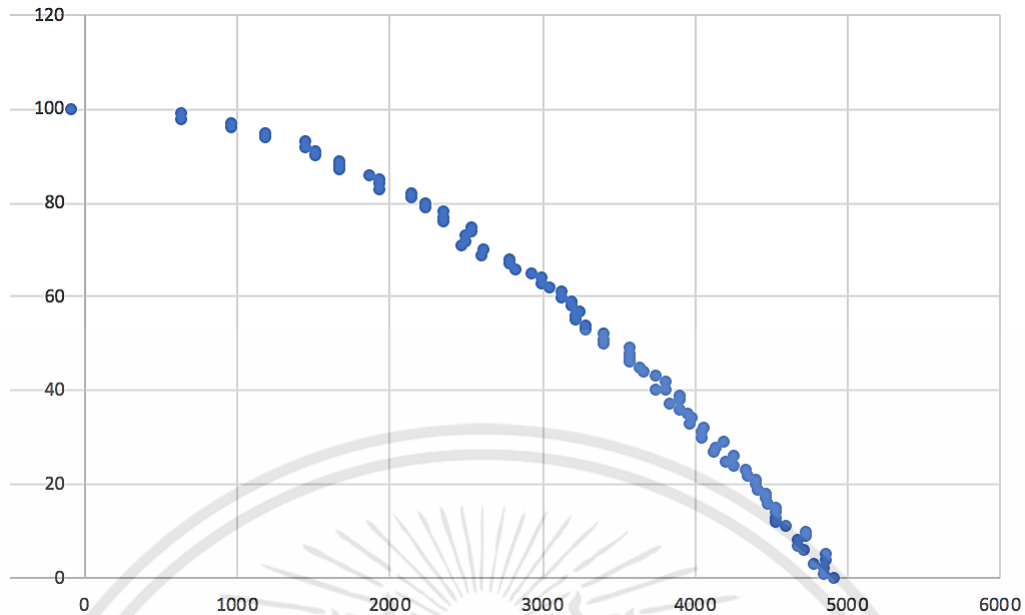
รูปที่ 5.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าเสมือนที่ถูกจ่ายกับเปอร์เซ็นต์การจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือน

เมื่อได้ทราบลักษณะพฤติกรรมของการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนของ Solar Inverter เทียบกับค่าเปอร์เซ็นต์ที่ใช้สั่งการแล้ว จากนั้นจะมีการใส่ระบบควบคุม (Controller) ไปในระบบดังรูปที่ 5.6 โดยข้อมูลขาเข้าของระบบควบคุมนั้นจะเป็นค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนอ้างอิง ( $Q_{\text{command}}$ ) ค่าขาออกเป็นเปอร์เซ็นต์การจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือน ดังนั้นลักษณะของการออกแบบระบบควบคุมจะมีรูปแบบผกผันกับระบบการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ที่ทำการทดลองก่อนหน้า นี้ ดังนั้นจึงนำข้อมูลมาวาดกราฟใหม่โดยสลับค่าในแต่ละแกนใหม่ให้แนวนอนเป็นกำลังไฟฟ้าเสมือนที่ผลิตได้ ส่วนแนวตั้งเป็นเปอร์เซ็นต์การจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือน จะได้กราฟดังรูปที่ 5.7



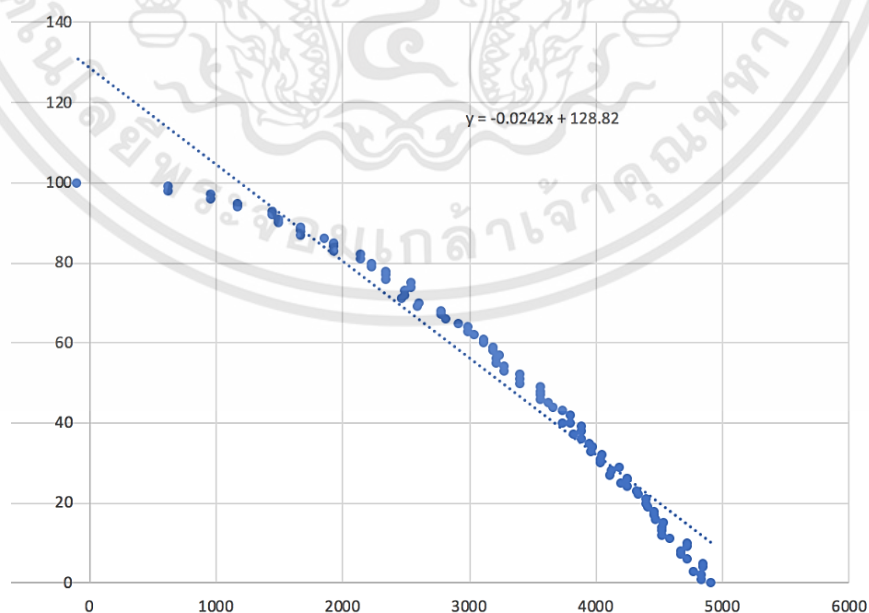
รูปที่ 5.6 ไดอะแกรมการควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนของโซลาร์อินเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนกับกำลังไฟฟ้าเสมือนที่ถูกจ่าย

ในการทดลองต่อจากนี้จะหาสมการของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าเสมือนที่ถูกจ่ายจาก Solar Inverter กับค่าเปอร์เซ็นต์การจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือน โดยขั้นแรกจะใช้สมการเส้นตรงในการประมาณหาความสัมพันธ์ของชุดข้อมูลทั้งสองโดยรูปแบบกราฟที่ได้ดังรูปที่ 5.8 ทำให้ได้สมการเส้นตรงออกมาดังสมการที่ 5.1



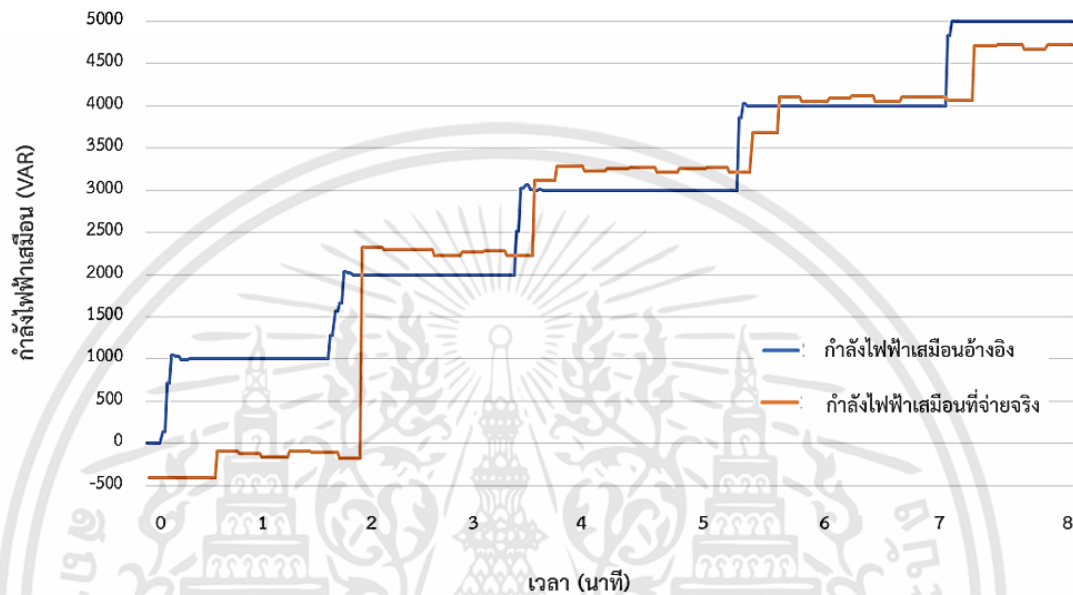
รูปที่ 5.8 กราฟสมการเส้นตรงที่ได้จากการประมาณการจากข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$y = -(0.0242x) + 128.82 \quad (5.1)$$

เมื่อ  $y$  คือเปอร์เซ็นต์การจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือน

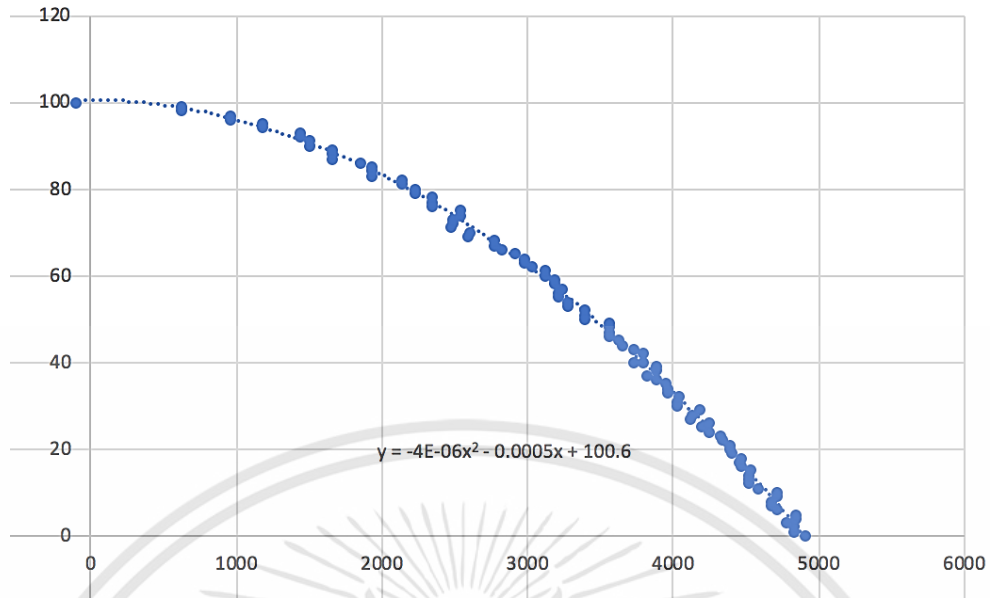
$x$  คือกำลังไฟฟ้าเสมือนที่ถูกจ่าย



รูปที่ 5.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าเสมือนอ้างอิงกับกำลังไฟฟ้าเสมือนที่จ่ายจริง  
ที่ใช้การควบคุมโดยใช้สมการเส้นตรง

เมื่อได้สมการความสัมพันธ์ของชุดข้อมูลแล้ว ทำการใส่สมการที่ได้เข้าไปในระบบควบคุม จากนั้นจะทำการเก็บค่า  $Q_{\text{command}}$  และ  $Q_{\text{out}}$  ซึ่งเป็นข้อมูลขาเข้าและข้อมูลขาออกของระบบใหม่ หลังจากการใส่ระบบควบคุมเข้าไป ทำให้ได้กราฟข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าเสมือนที่ถูกจ่ายออกจาก Solar Inverter กับ กำลังไฟฟ้าเสมือนอ้างอิง ดังรูปที่ 5.9

ต่อไปจะเป็นการหาสมการใหม่ที่ทำให้ตรงกับข้อมูลมากขึ้น โดยการเปลี่ยนมาใช้รูปแบบสมการกำลังสอง ทำให้สมการที่ได้มีความถูกต้องมากขึ้นดังรูปที่ 5.10 และได้สมการดังสมการที่ 5.2



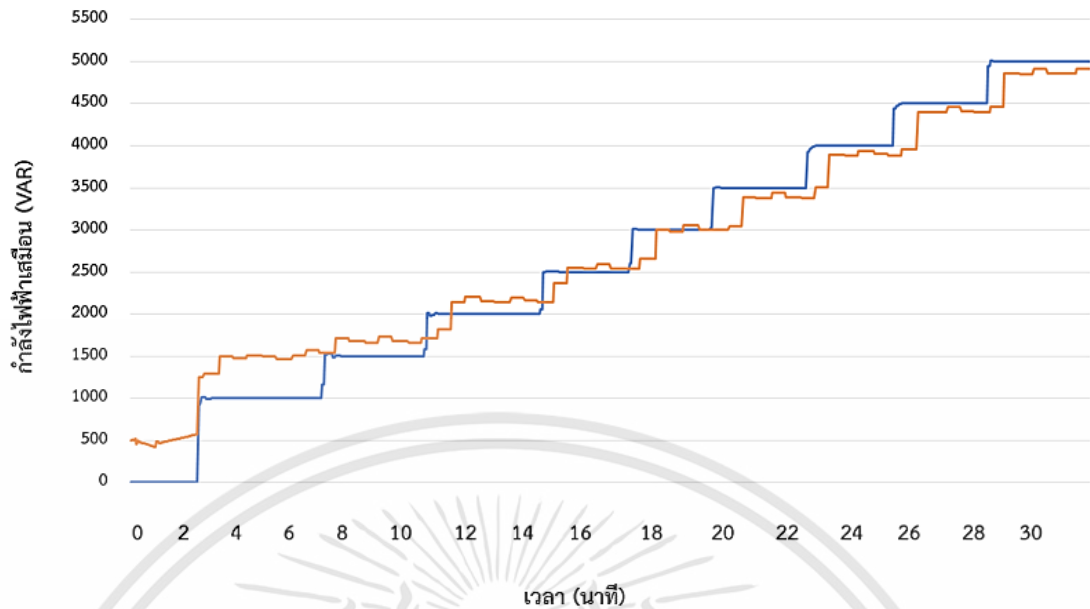
รูปที่ 5.10 กราฟสมการกำลังสองที่ได้จากการประมาณการจากข้อมูล

$$y = -0.00001x^2 - 0.0005x + 100.6 \quad (5.2)$$

เมื่อ  $y$  คือเปอร์เซ็นต์การจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือน

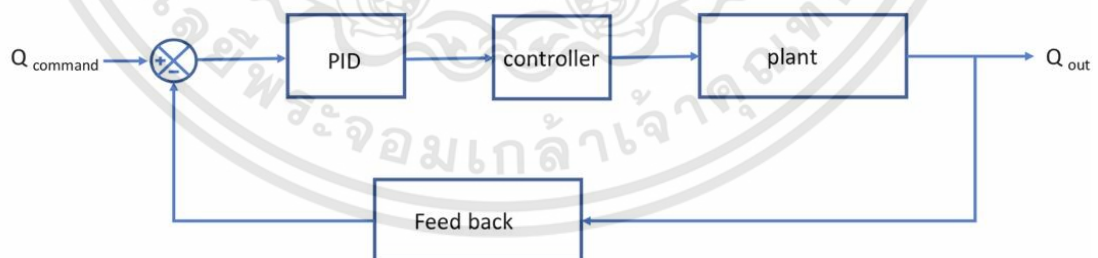
$x$  คือกำลังไฟฟ้าเสมือนที่ถูกรจ่าย

เมื่อได้สมการความสัมพันธ์ของชุดข้อมูลใหม่แล้ว ทำการใส่สมการที่ได้เข้าไปในระบบควบคุม จากนั้นจะทำการเก็บค่า  $Q_{\text{command}}$  และ  $Q_{\text{out}}$  ซึ่งเป็นข้อมูลขาเข้าและข้อมูลขาออกของระบบใหม่ หลังจากการใส่ระบบควบคุมเข้าไป ทำให้ได้กราฟข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าเสมือนที่ถูกรจ่ายออกจาก Solar Inverter กับ กำลังไฟฟ้าเสมือนอ้างอิง ดังรูปที่ 5.11



รูปที่ 5.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าเสมือนอ้างอิงกับกำลังไฟฟ้าเสมือนที่จ่ายจริงที่ใช้  
การควบคุมโดยใช้สมการกำลังสอง

หลังจากการทดลองข้างต้นที่ใช้สมการในการควบคุมระบบ หรือเรียกได้ว่าเป็นการควบคุมแบบระบบเปิด ซึ่งจะไม่มีการป้อนกลับของข้อมูลออกมาเกี่ยวข้องกับการควบคุม ในการทดลองต่อไปเป็นการทดลองระบบที่มีการป้อนกลับของสัญญาณหรือเรียกได้ว่าเป็นระบบปิด ซึ่งจะใช้การจูนระบบด้วย PID Control ดังรูปที่ 5.12 โดยค่าพารามิเตอร์ของระบบดังรูปที่ 5.13



รูปที่ 5.12 ไดอะแกรมการควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนของโซลาร์อินเวอร์เตอร์ชนิดระบบปิด

PID Parameters

Enable manual entry

Proportional gain: 6.621458E-3

Integral action time: 5.114735 s

Derivative action time: 1.314018 s

Derivative delay coefficient: 0.1

Proportional action weighting: 7.170551E-1

Derivative action weighting: 0.0

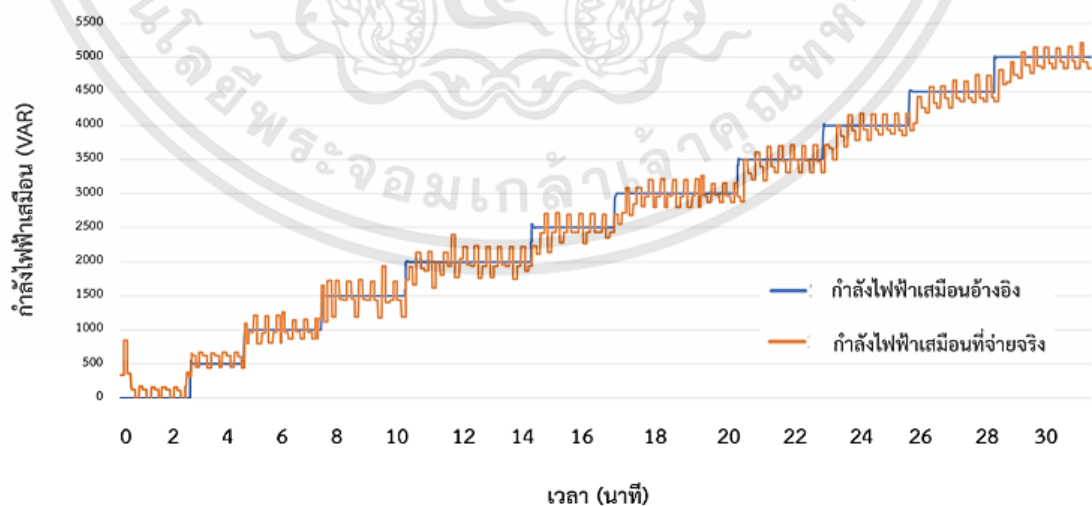
Sampling time of PID algorithm: 1.999968E-1 s

Tuning rule

Controller structure: PID

รูปที่ 5.13 ค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุม PID

ผลการทดลองเมื่อควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าด้วยระบบปิด จะทำการเก็บค่า  $Q_{\text{command}}$  และ  $Q_{\text{out}}$  ซึ่งเป็นข้อมูลขาเข้าและข้อมูลขาออกของระบบ หลังจากการใส่ระบบควบคุมระบบปิดนี้เข้าไป ทำให้ได้กราฟข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าเสมือนที่ถูกจ่ายออกจาก Solar Inverter กับ กำลังไฟฟ้าเสมือนอ้างอิง ดังรูปที่ 5.14

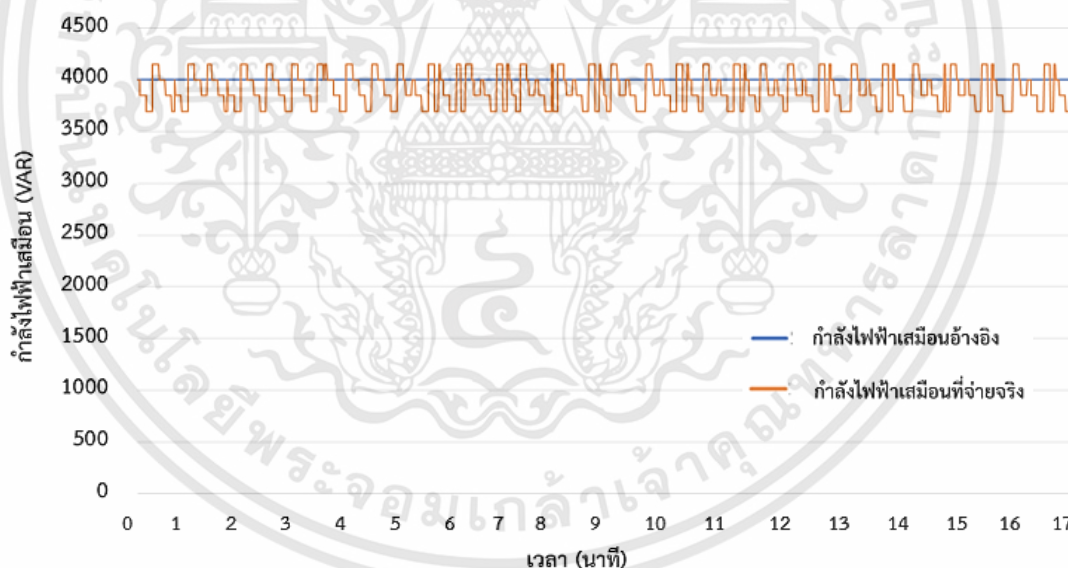


รูปที่ 5.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าเสมือนอ้างอิงกับกำลังไฟฟ้าเสมือนที่จ่ายจริง ที่ใช้การควบคุมแบบ PID

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.4 การทดสอบการควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนของระบบผลิตไฟฟ้าด้วย พลังงานแสงอาทิตย์เทียบกับข้อมูลในสถานีไฟฟ้า

หลังจากที่มีการทดลองระบบควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนในแต่ละรูปแบบแล้ว การทดลองต่อไปจะเป็นการรวมกันของ 2 ส่วน คือระบบดึงค่ากำลังไฟฟ้าที่โรงงานผลิตไฟฟ้าต้องการ กับระบบควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือน โดยในส่วนระบบควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนนั้นจะเลือกใช้ระบบปิดที่ใช้ PID Control เนื่องจากมีความยืดหยุ่นสูงในการควบคุมเนื่องจากหากตัวแปรในระบบมีการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมก็ไม่ทำให้การควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าต่างจากเดิมไป จากที่บทก่อนหน้าได้กล่าวไว้แล้วว่าค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนที่สถานีไฟฟ้าต้องการนั้นมีความมาก ทำให้ต้องลดสัดส่วนค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนที่สถานีไฟฟ้าต้องการลงมา 250 เท่าเรียกค่านี้ว่า  $Q_{Scale250}$  การทดลองนี้จะให้  $Q_{Scale250}$  เป็นกำลังไฟฟ้าเสมือนอ้างอิงให้กับการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนของโซลาร์อินเวอร์เตอร์ ซึ่งเมื่อทำการเชื่อมต่อค่าอ้างอิงกำลังไฟฟ้าเสมือนของระบบไฟฟ้าในสถานีไฟฟ้า ( $Q_{Scale250}$ ) เข้ากับระบบควบคุมแบบเปิดที่ได้ทำการตั้งค่าไว้ ทำให้ได้กราฟดังรูปที่ 5.15



รูปที่ 5.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลกำลังไฟฟ้าเสมือนจากสถานีไฟฟ้ากับ  
กำลังไฟฟ้าเสมือนที่จ่ายจริง

## 5.5 บทสรุป

ในบทนี้ได้มีการทดสอบการสื่อสารระหว่างสถานีไฟฟ้ากับโซลาร์อินเวอร์เตอร์ด้วยแบบไร้สาย และแบบใช้สายสัญญาณสื่อสาร ในการสื่อสารแบบไร้สายนั้นจะเห็นได้ว่ามีความล่าช้าในการส่งกว่า การสื่อสารแบบใช้สายสัญญาณสื่อสาร แต่ถือว่าเป็นค่าที่ยอมรับได้ ถ้าพิจารณาในด้านของรูปแบบ การนำไปใช้งาน การสื่อสารที่เหมาะสมระหว่างสถานีไฟฟ้ากับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ควรจะเป็นการสื่อสารแบบไร้สาย เนื่องจากตำแหน่งของสถานีไฟฟ้าและระบบผลิตไฟฟ้าพลังงาน แสงอาทิตย์มีการกระจายออกไปในแต่ละพื้นที่

การทดลองการควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนของโซลาร์อินเวอร์เตอร์นั้นได้มีการ เปรียบเทียบระหว่างการควบคุมแบบเปิดและแบบปิด ซึ่งการทดลองแบบเปิดนั้นอาศัยการสร้าง สมการความสัมพันธ์ของข้อมูลขึ้นมา ความคลาดเคลื่อนขึ้นอยู่กับความถูกต้องของการหาสมการ คุณลักษณะของระบบนั้น ในการทดลองแบบเปิดจะเห็นได้ว่าระบบมีการควบคุมที่จะพยายามทำให้ สัญญาณขาออกใกล้เคียงกับค่าอ้างอิงตลอดเวลา ทั้งนี้เมื่อพิจารณาทั้งสองวิธี สรุปได้ว่าการใช้การ ควบคุมแบบปิดเหมาะสมกว่า เนื่องจากถ้าพารามิเตอร์ของระบบมีการเปลี่ยนแปลงไป จะไม่ส่งผล กระทบกับระบบควบคุมแบบปิด ทำให้ระบบมีเสถียรภาพที่ดี

## บทที่ 6

# บทสรุป ข้อเสนอแนะ และแนวทางการพัฒนา

### 6.1 บทสรุป

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการศึกษาการควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ ให้มีความสัมพันธ์กับความต้องการกำลังไฟฟ้าเสมือนของสถานีไฟฟ้าเพื่อช่วยรักษาระดับแรงดันของระบบไฟฟ้าให้ดีขึ้น อีกทั้งยังประหยัดอุปกรณ์ที่ต้องใช้ในการรักษาเสถียรภาพระดับแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าอีกด้วย ทางด้านการสื่อสารของระบบของสถานีไฟฟ้ากับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์นั้น ในการทดลองสามารถบอกได้ว่าความเร็วของการสื่อสารแบบไร้สายนั้นมีความเร็วในการสื่อสารช้ากว่าแบบมีสาย แต่ด้านความเหมาะสมนั้นจะเห็นได้ว่าระบบสื่อสารแบบไร้สายจะได้สะดวกในการใช้งานมากกว่าเพราะระยะทางระหว่างตำแหน่งของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์และสถานีไฟฟ้านั้นอยู่ใกล้กันและในการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนนี้สามารถเพิ่มจำนวนระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์มากกว่า 1 ระบบในการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนเข้าระบบไฟฟ้า

ในการศึกษาเทคนิคการควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในวิทยานิพนธ์นี้หลักๆ จะมี 2 รูปแบบการควบคุม คือการควบคุมแบบเปิดกับการควบคุมแบบปิด ซึ่งเมื่อพิจารณาจากผลการทดลอง ระบบควบคุมแบบเปิดอาจมีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าระบบควบคุมแบบปิด แต่เมื่อพิจารณาถึงเสถียรภาพของระบบควบคุมนั้น ระบบควบคุมแบบเปิดจะมีค่าความคลาดเคลื่อนมากขึ้น เมื่อตัวแปรของระบบมีการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม แต่ความคลาดเคลื่อนนี้จะไม่เกิดในการควบคุมแบบปิด สรุปได้ว่าการควบคุมแบบปิดนั้นเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์

### 6.2 ข้อเสนอแนะและข้อควรระวัง

1. การสื่อสารแบบไร้สายในการทดลองนี้อาจมีความล่าช้าในการส่งข้อมูล ทำให้ผลการทดลองมีความคลาดเคลื่อนไป
2. โขลาร์อินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการทดลองนี้อาจมีความล่าช้าในการควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือน ดังนั้นเมื่อนำมาใช้ในสถานีไฟฟ้าในอนาคต จะต้องเลือกโซลาร์อินเวอร์เตอร์ที่มีความเร็วในการควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือนมากกว่านี้

### 6.3 แนวทางการพัฒนา

โครงการวิจัยนี้สามารถทำการพัฒนาต่อยอดเพิ่มเติม ในการออกแบบระบบการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนในสถานีไฟฟ้าด้วยระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์จากหลายแหล่ง เพื่อชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนที่ต้องการในระบบกริดให้มีประสิทธิภาพดีขึ้น





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1 บันทึกค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนกับเปอร์เซ็นต์ควบคุม

เปอร์เซ็นต์ควบคุม	กำลังไฟฟ้าเสมือน (kVAR)	เปอร์เซ็นต์ควบคุม	กำลังไฟฟ้าเสมือน (kVAR)
0	4908.765	22	4342.075
1	4836.993	23	4328.882
2	4836.993	24	4255.583
3	4777.603	25	4203.505
4	4850.193	26	4249.695
5	4850.193	27	4117.715
6	4718.213	28	4130.909
7	4678.619	29	4183.708
8	4678.619	30	4038.528
9	4724.816	31	4038.528
10	4724.816	32	4051.728
11	4592.836	33	3965.944
12	4526.088	34	3972.541
13	4526.088	35	3952.086
14	4526.843	36	3893.354
15	4533.446	37	3827.368
16	4474.056	38	3892.706
17	4460.855	39	3892.706
18	4467.459	40	3800.974
19	4408.063	41	3741.584
20	4394.869	42	3800.974
21	4394.869	43	3734.987

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1 (ต่อ) บันทึกค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนกับเปอร์เซ็นต์ควบคุม

เปอร์เซ็นต์ควบคุม	กำลังไฟฟ้าเสมือน (kVAR)	เปอร์เซ็นต์ควบคุม	กำลังไฟฟ้าเสมือน (kVAR)
44	3661.787	68	2778.149
45	3629.407	69	2599.545
46	3570.01	70	2613.172
47	3570.01	71	2474.595
48	3569.422	72	2494.392
49	3569.422	73	2494.392
50	3398.443	74	2540.158
51	3398.443	75	2540.158
52	3405.04	76	2349.218
53	3279.663	77	2349.218
54	3279.663	78	2349.218
55	3213.676	79	2230.444
56	3213.676	80	2230.444
57	3240.07	81	2144.297
58	3186.745	82	2144.297
59	3186.745	83	1933.494
60	3120.77	84	1933.494
61	3120.77	85	1933.494
62	3042.103	86	1860.897
63	2989.316	87	1669.255
64	2989.316	88	1669.255
65	2922.835	89	1669.533

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

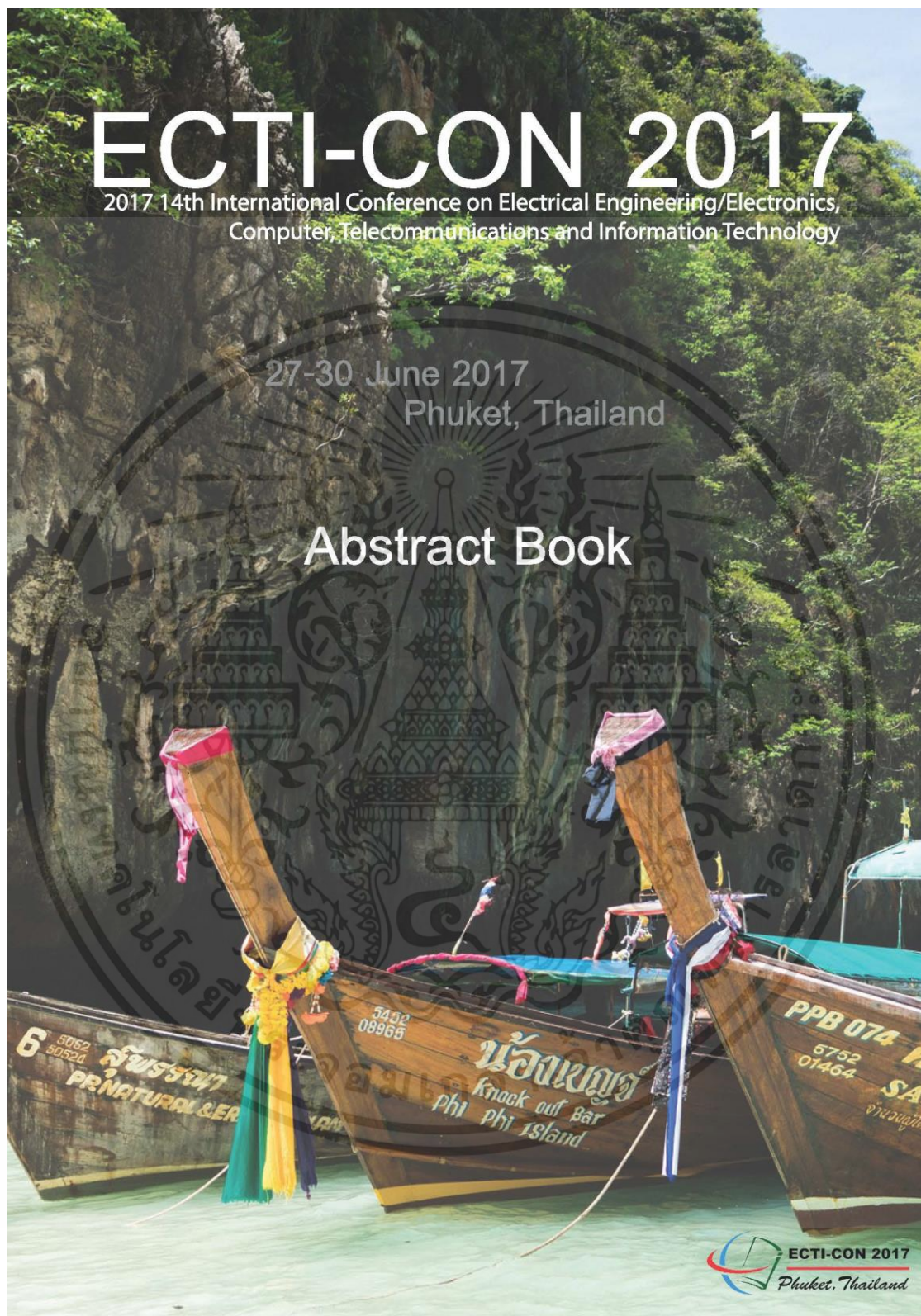
ตารางที่ 1 (ต่อ) บันทึกค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนกับเปอร์เซ็นต์ควบคุม

เปอร์เซ็นต์ควบคุม	กำลังไฟฟ้าเสมือน (kVAR)	เปอร์เซ็นต์ควบคุม	กำลังไฟฟ้าเสมือน (kVAR)
90	1504.556	95	1181.219
91	1504.556	96	963.288
92	1445.173	97	963.288
93	1445.173	98	633.5078
94	1181.219	99	633.5078

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# Reactive Power Compensation For Solving Voltage Problems in PV Farm based upon IEC - 61850

Suntichai Uaroon

Dept. of Electrical Engineering, Faculty of Engineering  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
Bangkok, Thailand, 10520  
suntichai\_uaroon@hotmail.com

Panya Khemmook<sup>1</sup>, Surin Khomfoi<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Dept. of Electrical Engineering, Faculty of Engineering  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
Bangkok, Thailand, 10520  
Kp.panya@gmail.com<sup>1</sup>, kkhsurin@kmitl.ac.th<sup>2</sup>

**ABSTRACT**-Reactive power compensation for solving voltage problem in PV farm based upon IEC 61850 is presented in this paper in order to control voltage within acceptable range. The Volt/VAR control is used in solar inverter of PV farm to improve power quality and also reduce the disconnection of solar inverter caused by overvoltage. So, the owner of PV farm will get more opportunity to sell solar electricity back to the grid. For Volt/VAR control, solar inverter with PQ mode is used to control the active and reactive power of the system. Electricity data from substation are sent to PLC based upon IEC 61850, which is the standard communication of electrical substation system. In this paper, simulation result verifies that Volt/VAR can be improve a power quality in a PV farm.

**Keywords**-Volt/VAR control; Reactive power; IEC 61850; PQ mode

## I. INTRODUCTION

Nowadays, electricity demand continues to rise at a strong pace related to high economic growth. Thus, in order to meet increasing electrical demand, power plants are constructed from variety generation resource, such as, natural gas, coal, fuel oil, and renewable energy. Renewable energy is widespread popular energy resource to provide electricity without giving any CO<sub>2</sub> emission. The limitation of this resource is their output fluctuate according to the real time availability. The fluctuation can be predicted accurately only a few hours to days. The complexity of this resource affect power quality of grid. Renewable generation including photovoltaic (PV) systems can have a significant impact on load characteristics in distribution networks and also affect power quality residential distribution networks. The most cited PQ problems that may arise due to grid connected PV generation are overvoltage and fluctuations, harmonic distortion, transient phenomena and reverse power flow. These effects result in potential damaging of sensitive electronic equipment and capacitor banks, overheating of transformers and neutral conductors and additional losses in the power system.

Degraded power quality entails additional costs for both the electricity distributor and its customers. The purpose of this paper is to find the solution for solving voltage problem in PV farm. The investment on solar farm become popular because of reduction electricity bills. A large number of connected PV panels can cause overvoltage. These makes solar inverter

disconnect from grid and affect the solar owner from selling solar electricity back to grid. All PV farms are connected together by a substation, which is an interconnection part of an electrical generation and distribution system. Substations transform voltage from high to low, or perform any of several other important functions. Between the generating station and consumer, substations generally have switching, protection and control equipment and one or more transformers. Other devices for power quality control such as power factor correction capacitors and voltage regulators may also be located at a substation. So the problem of overvoltage can be displayed in substation. This paper presents Volt/VAR control of solar inverter to maintain acceptable voltage at all points along the distribution by adjusting reactive power in smart grid.

The rest of the paper is organized as follow: Section II briefly present related theory about Volt/VAR control, IEC 61850 standard, programmable logic controller, and solar inverter. Section III show experimental setup including specification of devices. Section IV shows experimental result. Finally, Section V summarized the contribution of the paper.

## II. RELATED THEORY

### A. Volt/VAR control

Volt/VAR control (VVC) is a fundamental operating requirement of all electric distribution systems. The purpose of Volt/VAR Control is to maintain acceptable voltage and acceptable power factor at all points along the distribution feeder under all loading conditions. Volt/VAR Control in a smart grid is to improve efficiency through voltage optimization. Volt/VAR Optimization has been successfully used to increase power system efficiency of utilities. Volt/VAR optimization system configuration is shown in Fig 1. This system consists of DLA Master Station, Substation transformer with load tap changer, Substation Capacitor Bank, Substation RTU, Line Regulator, and Switched Capacitor Bank. Line Regulator always measure and monitor load voltage.

If overvoltage occur at measured point, The DLA Master Station would send the command to switched capacitor bank, substation capacitor bank or transformer with load tap changer to absorb reactive power from smart grid.

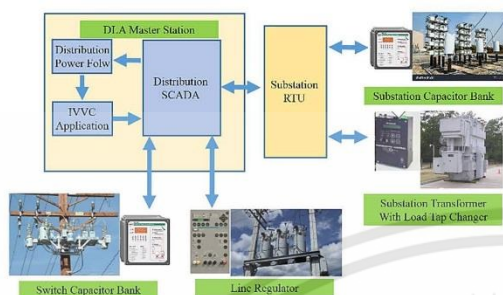


Fig 1 Volt/VAR optimization system configuration

### B. IEC 61850 Standard

IEC 61850 is a standard for configuration of intelligent electronic devices for electrical substation systems to be able to communicate with each other. A control model is divided into GOOSE (Generic Object Oriented Substation Events) and GSSE (Generic Substation State Events). These protocols can run over TCP/IP networks or substation LANs using high speed switched Ethernet to obtain the necessary response for protective relaying. A format of GOOSE data is grouped into a data set and transmitted within a time period of 4 millisecond.

### C. Programmable Logic Control

A programmable logic controller (PLC) is an industrial digital computer which has been adapted for the control of manufacturing processes, such as assembly lines, or robotic devices, or any activity that requires high reliability control and ease of programming and process fault diagnosis. PLC have been widely adopted as high-reliability automation controllers suitable for harsh environments. PLCs can range from devices with tens of I/O in a housing integral with the processor, to large rack-mounted modular devices with a count of thousands of I/O, and which are often networked to other PLC and SCADA systems. They can be designed for multiple arrangements of digital and analog inputs and outputs (I/O), extended temperature ranges, immunity to electrical noise, and resistance to vibration and impact. This paper use PLC to receive GOOSE message from electrical substation system and send a command to solar inverter to operate PQ control.

### D. Solar Inverter

A solar inverter or PV inverter is used to convert the variable direct current (DC) output of a photovoltaic (PV) solar panel into a utility frequency alternating current (AC) that can be fed into a commercial electrical grid. Solar inverters have special functions including maximum power point tracking. Solar inverters may be classified into 3 broad types, stand-alone inverters, grid-tie inverters and battery backup inverters. This paper focus on grid-tie inverters, which are designed to shut down automatically during overvoltage of utility supply. Many solar inverters are designed to be connected to a utility grid, and

will not operate when they do not detect the presence of the grid.

PQ control in grid connected mode will be used to interface between the grid and the inverter. PQ controller is designed so that the inverter could control the active and reactive power of grid from a small signal variations of the voltage magnitude and its phase.

Fig 2 show Volt/VAR characteristic of smart inverter. The graph show that solar inverter has 2 modes, which are inductive mode and capacitive mode. If overvoltage occur in grid, then the solar inverter will be in inductive mode to absorb reactive power from grid. On the other hand, if under voltage occur in grid, then the solar inverter will be in capacitive mode to inject reactive power to grid. Solar inverter can also control power factor to be not under 0.9 according to acceptable value of electric utility.

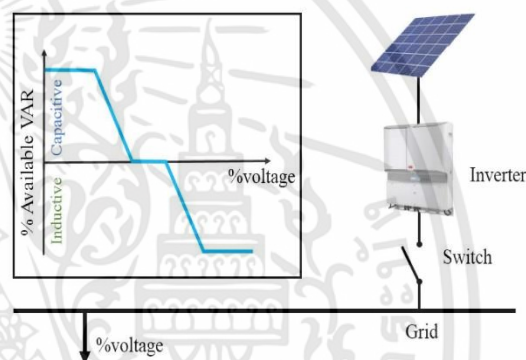


Fig 2 Volt/VAR characteristic of smart inverter.

### I. EXPERIMENTAL SETUP

This section describe an experimental setup. The connection for PV generation is shown in Fig 3 In general, PV panel is connected to inverter to convert direct current produced by PV panel into an alternate current. After conversion of current, this generating power is sent to grid. Moreover, this paper presents the additional function of solar inverter, which is used to control active power and reactive power.

The electricity data from the electrical substation system are sent to PLC in a form of GOOSE message. The PLC receives the electricity data, which are voltage, current, voltage harmonic, and current harmonic based on IEC 61850 or communication standard of electrical substation system. Then the PLC would consider only voltage data of that substation. If the voltage exceed the acceptable range, PLC as a unit processor would control the voltage by sending the command to PMU, which is used to transform analog electrical data to digital in a form of Aurora protocol. This protocol is only used for ABB inverter. After that PMU would send the command of PLC to solar inverter in order to control reactive power in that substation. Fig 4 show the experimental devices.

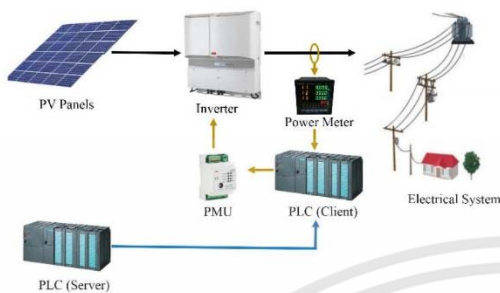


Fig 3 The connection for PV generation



Fig 4 Experimental devices.

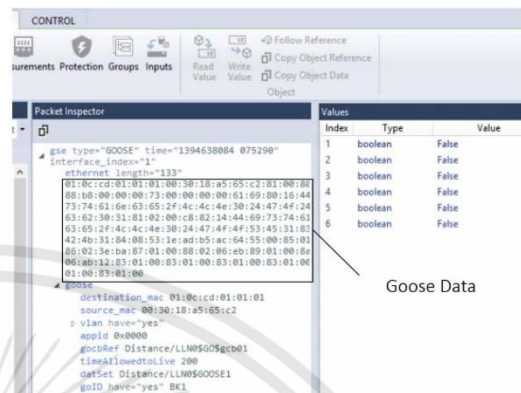


Fig 5 Section of the GOOSE message structure frame

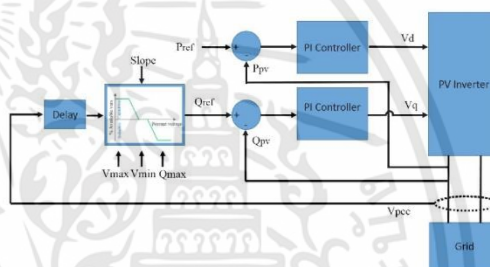


Fig 6 Volt/ VAR control block diagram

In the experimental setup, two strings connected in parallel. There are 18 panels per string connected in series. The output power of one string is 280W. The PV panels are connected to 10kV solar inverter. The electrical data from electrical substation system is in a form of GOOSE message as shown in Fig 5

The structure of GOOSE message consists of a fixed terms of length, and fixed terms of content. The variable in terms of both length and content chosen to be communicated. Firstly the fixed portion of the message structure is examined and briefly discussed, starting with the Preamble and ending at the Ethertype. The Preamble and Start of frame are performed at the hardware level. The Destination address is a multicast address consisting of 6 bytes. The Source address is also 6 bytes long. As per IEEE 802.1Q, priority tagging is used to separate time critical and high priority bus traffic for protection-relevant applications.

After PLC receive GOOSE message, voltage data will be used in reactive power compensation of Volt/ VAR control. The Volt/ VAR control block diagram is shown in Fig. 6. Measured voltages from electrical substation system is fed into slope block to calculate for  $Q_{ref}$ . This  $Q_{ref}$  will be an input of PI controller Block to control reactive power of solar inverter. So the voltage level will be in the acceptable range.

II. EXPERIMENTAL RESULT

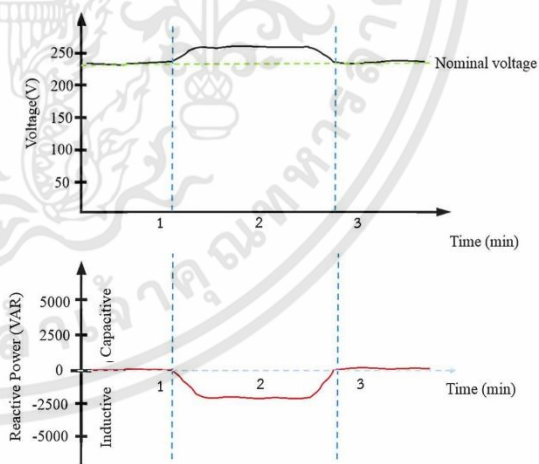


Fig. 7 The simulation of voltage in PV farm without using Volt/ VAR control and  $Q_{ref}$  from control block diagram

Solar inverter with Volt/VAR control is used to compensate reactive power in order to maintain acceptable voltage at all point of distribution system. Fig. 7 show the simulation of voltage in PV farm without using Volt/VAR control. The voltage gradually rise and exceed nominal voltage of distribution system. Qref in control block diagram is also simulated at the same time in Fig. 7. The experimental result show that Qref is in inductive mode to absorb reactive power from distribution system. Fig. 8 show voltage in PV farm after compensate reactive power. The simulation result verified that solar inverter with Volt/VAR control can maintain voltage level to be in acceptable value.

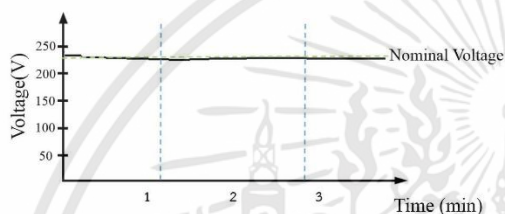


Fig. 8 Voltage in PV farm after compensate reactive power

### III. CONCLUSION

Reactive power compensation for solving voltage problems in PV farm based upon IEC 61850 is presented in this paper. The experimental result shows that solar inverter can improve power quality through voltage optimization of PV farm in distribution system. Volt/VAR control is used to compensate reactive power during overvoltage. The experimental result shows that PV farm with solar inverter could absorb reactive power during overvoltage. As a result, the voltage level gradually fall to nominal voltage. If distribution system is connected with a large number of PV farms, so this solution can reduce disconnection of PV panels during overvoltage and the

owner of PV farm would get more opportunity to sell solar electricity. Moreover, the efficiency and reliability of distribution system will be improved.

### ACKNOWLEDGMENT

This research is supported in part by funds provided by Ministry of Energy and Renewable Energy Application Laboratory (REAL). In many cases authors would like to express gratitude or thanks to other bodies who generally support this work. First, author would like to thank Associate Professor Surin Khomfoi for his encouragement and helpful discussion. Author also extend thanks to Mr. Phoompat Jamepthong and Mr. Chetnapat Praisuwanna for assistance with instrument and give us an inspiration to improve this research. In addition, author would like to thank Mr. Panya Khemmook for giving valuable comment suggestions on this research.

### REFERENCES

- [1] Chakraborty, S.; Hoke, A. and Lundstrom, B., "Evaluation of multiple inverter volt-VAR control interactions with realistic grid impedances," in *Power & Energy Society General Meeting, 2015 IEEE*, vol., no., pp.1- 5, 26-30 July 2015
- [2] Jahangiri, P.; Aliprantis, D.C., "Distributed Volt/VAR Control by PV Inverters," in *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol.28, no.3, pp.3429-3439, Aug. 2013
- [3] Kam, A.; Simonelli, J., "Stability of distributed, asynchronous VAR-based closed-loop voltage control systems," in *PES General Meeting, 2014 IEEE*, vol., no., pp.1-5, 27-31 July 2014
- [4] J.Smith, H.Li, "Potential interaction between smart inverters," presented at Electric Power Research Institute (EPRI) Smart Inverter Workshop, May 2014
- [5] Hoke, A.; Chakraborty, S.; Basso, T., "A power hardware-in-the-loop framework for advanced grid-interactive inverter testing," in *Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT), 2015 IEEE Power & Energy Society*, vol., no., pp.1-5, 18-20 Feb. 2015
- [6] Yazdani, A.; Di Fazio, A.R.; Ghoddami, H.; Russo, M.; Kazercani, M.; Jatskevich, J.; Strunz, K.; Leva, S.; Martinez, J.A., "Modeling Guidelines and a Benchmark for Power System Simulation Studies of Three-Phase Single-Stage Photovoltaic Systems," in *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol.26, no.2, April 2011
- [7] M. G. Kashani, S. Babaei and S. Bhattacharya, "SVC and STATCOM application in Electric Arc Furnace efficiency improvement," 2013 4th IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), Rogers, AR, 2013, pp. 1-7.

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายสันติชัย อุ่อรุณ
วัน เดือน ปีเกิด	24 มกราคม 2535
ที่อยู่	145 หมู่ 5 ตำบลย่านยาว อำเภอสามชุก จังหวัดสุพรรณบุรี 72130
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2558 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

### ผลงานวิจัย

- [1] สันติชัย อุ่อรุณ, ปัญญา เข็มมูข และสุรินทร์ คำฝอย “การใช้งานหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังในโซลาร์ฟาร์มด้วยวงจรมอดูเลตาร์มีลติเลเวลอินเวอร์เตอร์” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 38 (EECON 38) จังหวัดพระนครศรีอยุธยา ประเทศไทย วันที่ 18-20 พฤศจิกายน 2558
- [2] **Suntichai Uaroon**, Surin Khomfoi “Reactive Power Compensation for Solving Voltage Problems in PV Farm based upon IEC-61850” ECTI-CON 2017, Phuket, Thailand 27-30 June 2017