

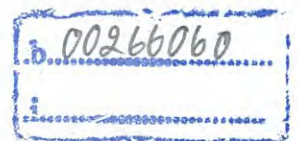
เทคนิคการตรวจจัดการเสื่อมสภาพของโซลาร์เซลล์ที่ใช้ในโซลาร์ฟาร์ม
DETERIORATED SOLAR PANEL DETECTION TECHNIQUE FOR A SOLAR FARM
APPLICATION



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2560

เทคนิคการตรวจจับการเสื่อมสภาพของโซลาร์เซลล์ที่ใช้ในโซลาร์ฟาร์ม

DETERIORATED SOLAR PANEL DETECTION TECHNIQUE FOR A SOLAR FARM
APPLICATION



TB00237

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DETERIORATED SOLAR PANEL DETECTION TECHNIQUE FOR A SOLAR FARM
APPLICATION



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

2017

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2560

เทคนิคการตรวจจัดการเสื่อมสภาพของโซลาร์เซลล์ที่ใช้ในโซลาร์ฟาร์ม

DETERIORATED SOLAR PANEL DETECTION TECHNIQUE FOR A SOLAR FARM
APPLICATION



อาจารย์ที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์ ดร.สุรินทร์ คำฝอย

อาจารย์ชัยทัต มณีอินทร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2560

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง เทคนิคการตรวจจัดการเสื่อมสภาพของโซลาร์เซลล์ที่ใช้ในโซลาร์ฟาร์ม

ผู้จัดทำ

1. นายพงศกร ทวนทอง
2. นายปิยะณัฐ ปราณี
3. นายพลเมฆ ศรีศุภเศรษฐกุล



..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุรินทร์ คำฝอย)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(อาจารย์ชัยทัต มณีอินทร์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทคนิคการตรวจจัดการเสื่อมสภาพของโซลาร์เซลล์ที่ใช้ในโซลาร์ฟาร์ม

นายพงศกร ทวนทอง
นายปิยะณัฐ ปราณี
นายพลเมฆ ศรีศุภเศรษฐกุล
รศ.ดร.สุรินทร์ คำฝอย อาจารย์ที่ปรึกษา
อ.ชัยทัต มณีอินทร์ อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2560

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เสนอเทคนิคการตรวจจัดการเสื่อมสภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ประยุกต์ใช้ในโซลาร์ฟาร์ม เทคนิคนี้เรียกว่า Box Plot ซึ่งใช้ในการวิเคราะห์รูปคลื่นสัญญาณ แรงดันและกระแสไฟฟ้า ด้วยวิธีการนี้จะช่วยลดเวลาที่ใช้ในการตรวจสอบเพื่อทำการบำรุงรักษาทำให้ตรวจพบความผิดปกติที่เกิดขึ้นและสามารถแก้ไขได้ทันที่ ทำให้โซลาร์ฟาร์มสามารถผลิตไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้วิธีการนี้สามารถใช้แสดงผลผ่านหน้าจอด้วยค่าจากอินเวอร์เตอร์ ส่งผลให้โซลาร์ฟาร์มสามารถทำการตรวจสอบการเสื่อมสภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้แบบเรียลไทม์ วิธีการที่นำเสนอนี้ผ่านการตรวจสอบ โดยผลจากการสร้างสถานการณ์จำลองและผลการทดลองจริง แสดงให้เห็นว่าด้วยวิธีการนี้สามารถตรวจสอบการเสื่อมสภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ได้อย่างน่าพึงพอใจ และผลที่ได้ยังแสดงให้เห็นว่า วิธีการนี้สามารถประยุกต์ใช้ในโซลาร์ฟาร์มได้

DETERIORATED SOLAR PANEL DETECTION TECHNIQUE FOR A SOLAR FARM APPLICATION

Mr.PONGSAKORN TUANTONG
Mr.PIYANUT PRANEE
Mr.PONLAMES SRISUPASRETAKUL
Assoc.Prof.Dr.Surin Khomfoi Advisor
Mr.Chaitat Maneeinn Advisor
Year 2017

Abstract

A detection technique of a deteriorated panel in a solar farm application is presented in this thesis. The technique called Box Plot is used to analyze the diagnostic signals which are current and voltage waveforms. The proposed method offers minimized time to search for maintenance and can be planned for proactive maintenance; therefore, a solar farm can achieve a high productivity in generating electricity. The method can be integratively used with the monitoring function in a central inverter. Consequently, a solar farm can detect a defected solar panel as a real time. The propose method is validated with both simulation and experimental results. The results show that the propose technique can detect a deteriorated panel satisfactorily. The result can also illustrate that this proposed detection method can be applied in a solar farm.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีเนื่องจากความกรุณาของ รศ.ดร.สุรินทร์ คำฝอย และ อาจารย์ชัยทัต มณีอินทร์ ที่กรุณาเป็นที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์ ให้คำปรึกษาและแนะนำ แนวทางการศึกษาวิจัย รวมทั้งตรวจสอบความเรียบร้อยของปริญญาานิพนธ์ จึงขอกราบขอบพระคุณท่าน อาจารย์เป็นอย่างสูง ณ ที่นี้

ขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบัน เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน ที่ได้มอบวิชาความรู้ให้แก่ข้าพเจ้าตั้งแต่เริ่มเข้า ศึกษาในปริญญาตรี

ขอบคุณอาคารระบบไฟฟ้าอัจฉริยะ Smartgrid Building (Real Lab) ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ อุปกรณ์และเครื่องมือในระหว่างการจัดทำงานวิจัย และขอขอบคุณนายปัญญา เข้มมุข ที่คอยให้ คำปรึกษาให้คำแนะนำต่าง ๆ คอยติดตามสอบถามความคืบหน้าของการวิจัย และขอขอบคุณที่ ๆ ระดับ การศึกษาปริญญาเอกและปริญญาโททุกท่านที่ คอยช่วยเหลือดูแลเอาใจใส่ในทุกด้านอย่างดีมาโดยตลอด

ขอขอบคุณ ผจก.บริษัท พาร์ม โรด โซล่า และ ผจก.บริษัท SUPER ENERGY ที่กรุณาให้ โอกาสกลุ่มของข้าพเจ้าได้เข้าเยี่ยมชมโซลาร์ฟาร์มเพื่อศึกษาดูงานและให้ข้อมูลเพื่อประกอบการจัดทำ โครงการวิจัยนี้ ขอขอบคุณที่ ๆ ที่โซลาร์ฟาร์มที่ให้การต้อนรับและดูแลเป็นอย่างดี ให้คำปรึกษา ให้ความรู้ใน ทุกเรื่องที่สอบถาม

ขอบคุณเพื่อน ๆ ทั้งในคณะและต่างคณะ ทั้งในสถาบันเดียวกันและต่างรั้วคนละสถาบัน ทุก ๆ กำลังใจ ทุก ๆ ความคิดเห็น ทุกการสนับสนุน มีส่วนช่วยให้งานวิจัยและปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จ ลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบุคคลที่สำคัญที่สุดคือ บิดา มารดา รวมถึงทุกคน ในครอบครัว ที่เป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนในทุกเรื่อง ทุกเวลา ทำให้กลุ่มของข้าพเจ้าสามารถทำ ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี คณะผู้จัดทำระลึกในพระคุณและกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ ด้วย

คณะผู้จัดทำ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูปภาพ	VIII
สารบัญตาราง	XI
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปริญญานิพนธ์	1
1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญานิพนธ์	2
1.3 ขอบเขต	2
1.4 วิธีการที่ใช้ในปริญญานิพนธ์	2
1.5 แผนการดำเนินงาน	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 Solar Cell	5
2.2 ชนิดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์	8
2.2.1 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากซิลิคอน ชนิดผลึกเดี่ยว	9
2.2.2 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกรวม	9
2.2.3 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากอะมอร์ฟัสซิลิคอน	9
2.2.4 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากสารกึ่งตัวนำอื่น	9
2.3 ขั้นตอนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์	10
2.4 ประเภทของ Solar Inverter ที่ใช้งานในปัจจุบัน	11
2.4.1 Central Solar Inverter	11
2.4.2 String Solar Inverter	12
2.4.3 Solar Inverter with Power Optimizer	14

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.4.3 Solar Inverter with Power Optimizer	14
2.4.3.1 ข้อดีของ Power Optimizer	14
2.4.4 Solar Micro Inverter	15
2.4.5 Off Grid Solar Inverter	16
2.4.6 Hybrid Solar Inverter	17
2.5 การวัดการกระจายของข้อมูล	17
2.5.1 การวัดการกระจายสัมบูรณ์	18
2.5.2 การวัดการกระจายสัมพัทธ์	21
2.6 เซลล์แสงอาทิตย์	23
2.7 การทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสาเหตุการเสื่อมสภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์	32
2.7.1 Discoloration	32
2.7.2 Cracking of Solar Cell and Glass Breakage	32
2.7.3 AR Coating (ARC) Degradation	32
2.7.4 Solder Bond	32
2.7.5 Hot Spots	32
2.7.6 Front Surface Soiling	33
2.7.7 Delamination	33
2.8 สรุป	38
บทที่ 3 การออกแบบและการสร้างอุปกรณ์	39
3.1 บทนำ	39
3.2 แผนผังภาพรวมระบบที่ใช้เทคนิคการตรวจจับการเสื่อมสภาพของเซลล์แสงอาทิตย์โดยวิธี Box Plot	39
3.3 การจำลองการใช้เทคนิคการตรวจจับการเสื่อมสภาพของแผงโซลาร์เซลล์ด้วยวิธีการ Box Plot	40

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.3.1 Normal Condition	41
3.3.2 Open Circuit Condition	42
3.3.3 Line-Line Condition (Fault Resistance = 0 Ω)	43
3.3.4 Line-Line Condition (Fault Resistance = 20 Ω)	44
3.3.5 Partial Shading Condition	45
3.3.6 Degradation Condition	46
3.4 สรุป	47
บทที่ 4 สรุปผลและวิเคราะห์ผลการทดลอง	48
4.1 บทนำ	48
4.2 การทดลองการใช้เทคนิคการตรวจจับการเสื่อมสภาพของแผงโซลาร์เซลล์โดยวิธี Box Plot	48
4.2.1 การทดลองในสภาวะ Normal Condition	48
4.2.2 การทดลองในสภาวะ Open Circuit Condition	50
4.2.3 การทดลองในสภาวะ Line-Line Condition	52
4.2.4 การทดลองในสภาวะ Partial Shading Condition	54
4.2.5 การทดลองในสภาวะ Degradation Condition	56
4.3 สรุป	59
บทที่ 5 บทสรุป ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา	60
5.1 บทสรุป	60
5.2 ข้อดี-ข้อเสียของวิธีการใช้เทคนิคการตรวจสอบการเสื่อมสภาพของแผงโซลาร์เซลล์โดยวิธีการ Box Plot	61
5.3 ข้อเสนอแนะและข้อระวัง	61
5.4 แนวทางการพัฒนา	62

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
เอกสารอ้างอิง	63
ภาคผนวก	64
ภาคผนวก ก อุปกรณ์ที่ใช้ในปริญญานิพนธ์	65
ภาคผนวก ข ผลการทดลองการตรวจจัดการเสื่อมสภาพของแผงโซลาร์เซลล์โดย วิธีการ Box Plot ด้วยการ Simulation และการทำการทดลองจริง	88
ภาคผนวก ค บทความทางวิชาการ	121
ประวัติผู้เขียน	126



สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 การทำงานภายในเซลล์แสงอาทิตย์	5
2.2 อิเล็กตรอนและโฮลเคลื่อนที่เข้าหากัน	7
2.3 ส่วนประกอบของเซลล์แสงอาทิตย์	8
2.4 Central Inverter	12
2.5 เปรียบเทียบการใช้งาน String Inverter & Central Inverter ในปี 2014 และ 2015	12
2.6 สตริงอินเวอร์เตอร์โตอะแกรม	13
2.7 ออนกริดอินเวอร์เตอร์	13
2.8 ตัวอย่างสตริงอินเวอร์เตอร์	14
2.9 ตัวอย่าง Solar Inverter	15
2.10 ตัวอย่างไมโครอินเวอร์เตอร์	16
2.11 การใช้งาน Solar Off Grid Inverter	16
2.12 โครงสร้างของ Box Plot	22
2.13 วงจรสมมูลย์ของเซลล์แสงอาทิตย์	23
2.14 กราฟคุณลักษณะ กระแส - แรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์	25
2.15 แสดงค่า Fill Factor ของเซลล์แสงอาทิตย์	25
2.16 ผลการจำลองผลกระทบของค่า N	27
2.17 ผลการจำลองผลกระทบของค่า I_s	27
2.18 กราฟ I-V Curve ผลการจำลองผลกระทบของค่า R_s	28
2.19 กราฟ P-V Curve ผลการจำลองผลกระทบของค่า R_s	28
2.20 กราฟ I-V Curve ผลการจำลองผลกระทบของค่า R_{sh}	29
2.21 กราฟ P-V Curve ผลการจำลองผลกระทบของค่า R_{sh}	29
2.22 กราฟ I-V Curve ผลการจำลองผลกระทบของค่า λ	30
2.23 กราฟ P-V Curve ผลการจำลองผลกระทบของค่า λ	30
2.24 กราฟ I-V Curve ผลการจำลองผลกระทบของค่า T	31
2.25 กราฟ P-V Curve ผลการจำลองผลกระทบของค่า T	31
2.26 ปรากฏการณ์การเปลี่ยนสีของเซลล์แสงอาทิตย์	34

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.27 แผงเซลล์แสงอาทิตย์เกิดรอยแตก	34
2.28 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการเสื่อมสภาพของสารป้องกันการสะท้อนแสง	35
2.29 การเกิดรอยไหม้ระหว่างการเชื่อมต่อ	35
2.30 การเกิดจุดร้อนขึ้นบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์	36
2.31 การปนเปื้อนเศษสิ่งสกปรกต่าง ๆ บริเวณขอบเซลล์	36
2.32 การแยกชั้นของตัววัสดุที่ห่อหุ้มเซลล์แสงอาทิตย์กับเซลล์แสงอาทิตย์	37
2.33 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเสื่อมสภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่าง ๆ	38
3.1 แผนผังภาพรวมระบบที่ใช้เทคนิคการตรวจจับการเสื่อมสภาพของเซลล์แสงอาทิตย์โดยวิธีการ Box Plot	39
3.2 ค่าพารามิเตอร์พื้นฐานระดับแผงที่ใช้ในวงจร Simulation	40
3.3 Normal Condition	41
3.4 ภาวะการทำงานภายใต้เงื่อนไข Normal Condition	41
3.5 Open Circuit Condition	42
3.6 ภาวะการทำงานภายใต้เงื่อนไข Open Circuit Condition	42
3.7 Line-Line Condition (Fault Resistance = 0 Ω)	43
3.8 ภาวะการทำงานภายใต้เงื่อนไข Line-Line Condition (Fault Resistance = 0 Ω)	43
3.9 Line-Line Condition (Fault Resistance = 20 Ω)	44
3.10 ภาวะการทำงานภายใต้เงื่อนไข Line-Line Condition (Fault Resistance = 20 Ω)	44
3.11 Partial Shading Condition	45
3.12 ภาวะการทำงานภายใต้เงื่อนไข Partial Shading Condition	45
3.13 Degradation Condition	46
3.14 ภาวะการทำงานภายใต้เงื่อนไข Degradation Condition	46
4.1 หน้าจอแสดงผลผ่านเว็บไซต์กรณี Normal Condition	49
4.2 ปลอดภัยไฟที่สตริง 2 เพื่อทำการเปิดวงจร	50
4.3 หน้าจอแสดงผลผ่านเว็บไซต์กรณี Open Circuit Condition	51
4.4 สับเบรกเกอร์ที่สตริง 2 เพื่อจำลองสภาวะการเกิด Line-Line	52
4.5 หน้าจอแสดงผลผ่านเว็บไซต์กรณี Line-Line Condition	53

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6 การทดลองบังเงาที่สตริง 2 โดยใช้แผ่นพิวเจอร์บอร์ด	54
4.7 หน้าจอแสดงผลผ่านเว็บไซต์กรณี Partial Shading Condition	55
4.8 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการเสื่อมสภาพจากการแตกหัก	56
4.9 เปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าระหว่างสตริงปกติกับสตริงที่มีการเสื่อมสภาพ	56
4.10 หน้าจอแสดงผลผ่านเว็บไซต์กรณี Degradation Condition	58
ก.1 สายส่งสัญญาณ USB RS485	66
ก.2 ตัวอย่างการเชื่อมต่อ RS485 ระหว่างเครื่องมือวัดกับตัวแปลงสัญญาณ	67
ก.3 ตัวอย่างการทำงานของ RS485 แบบ Network	68
ก.4 การตรวจเช็คสภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์	70
ก.5 การทำความสะอาดแผงเซลล์แสงอาทิตย์	70

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 วิธีการดำเนินงาน	3
2.1 ประเภทของวัสดุ โครงสร้างและประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์	9
2.2 ข้อมูลซึ่งมีการกระจายต่างกัน	17
ค.1 ค่ากระแสไฟฟ้าแต่ละสตรึงเทียบกับ ขอบเขตบนและขอบเขตล่างในสภาวะ Normal Condition	89
ค.2 ค่ากระแสไฟฟ้าแต่ละสตรึงเทียบกับ ขอบเขตบนและขอบเขตล่างในสภาวะ Open Circuit Condition	91
ค.3 ค่ากระแสไฟฟ้าแต่ละสตรึงเทียบกับ ขอบเขตบนและขอบเขตล่างในสภาวะ Line-Line Condition (Fault Resistance = 0 Ω)	94
ค.4 ค่ากระแสไฟฟ้าแต่ละสตรึงเทียบกับ ขอบเขตบนและขอบเขตล่างในสภาวะ Line-Line Condition (Fault Resistance = 20 Ω)	96
ค.5 ค่ากระแสไฟฟ้าแต่ละสตรึงเทียบกับ ขอบเขตบนและขอบเขตล่างในสภาวะ Partial Shading Condition	98
ค.6 ค่ากระแสไฟฟ้าแต่ละสตรึงเทียบกับ ขอบเขตบนและขอบเขตล่างในสภาวะ Degradation Condition	100
ค.7 ค่ากระแสไฟฟ้าแต่ละสตรึงเทียบกับ ขอบเขตบนและขอบเขตล่างในสภาวะ Normal Condition	102
ค.8 ค่ากระแสไฟฟ้าแต่ละสตรึงเทียบกับ ขอบเขตบนและขอบเขตล่างในสภาวะ Open Circuit Condition	107
ค.9 ค่ากระแสไฟฟ้าแต่ละสตรึงเทียบกับ ขอบเขตบนและขอบเขตล่างในสภาวะ Line-Line Condition	111
ค.10 ค่ากระแสไฟฟ้าแต่ละสตรึงเทียบกับ ขอบเขตบนและขอบเขตล่างในสภาวะ Partial Shading Condition	115
ค.11 ค่ากระแสไฟฟ้าแต่ละสตรึงเทียบกับ ขอบเขตบนและขอบเขตล่างในสภาวะ Degradation Condition	118

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปริญญานิพนธ์

จากแผนพัฒนากำลังไฟฟ้าของประเทศไทย พ.ศ. 2558-2579 (Power Development Plan : PDP) พบว่าความต้องการใช้ไฟฟ้ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตลอดเวลา แต่เชื้อเพลิงที่ใช้ผลิตไฟฟ้าในปัจจุบัน กลับลดลงในทุก ๆ ปี ตามแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2558-2579 (Alternative Energy Development Plan : AEDP 2015) ได้สนับสนุนและหาแนวทางที่จะผลิตกระแสไฟฟ้าโดยที่ไม่มีการใช้เชื้อเพลิง ซึ่งเซลล์แสงอาทิตย์เป็นพลังงานทางเลือกที่เหมาะสมด้วยเหตุผลที่ว่า พลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์เป็นพลังงานจากธรรมชาติที่ได้มาจากดวงอาทิตย์ซึ่งจัดเป็นทรัพยากรธรรมชาติประเภทใช้แล้วไม่หมดสิ้น ต้นทุนต่อหน่วยผลิตต่ำ และไม่สร้างมลพิษหรือมลภาวะที่กระทบต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งเป็นอีกแนวทางที่จะลดปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกอันเป็นผลให้สามารถแก้ไขปัญหาโลกร้อนได้ รวมทั้งเป็นจุดเริ่มต้นให้ประเทศไทยเริ่มก้าวเข้าสู่เส้นทางของการเป็นสังคมคาร์บอนต่ำ (Low Carbon Society)

โดยในปี พ.ศ. 2560 ประเทศไทยมีการใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์คิดเป็นร้อยละ 19.7 ของการใช้พลังงานทดแทนทั้งหมด ดังนั้นจึงมีการใช้แผงโซลาร์เซลล์ในการผลิตกระแสไฟฟ้าเป็นจำนวนมาก ซึ่งใช้พื้นที่เป็นจำนวนมากในการติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์ ในการตรวจเช็คความผิดปกติหรือความเสียหายที่เกิดขึ้น ในปัจจุบันได้ทำการตรวจเช็คโดยใช้คนเดินตรวจสอบทั้งหมด ซึ่งใช้ระยะเวลานานและเกิดความผิดพลาดในการตรวจสอบบ่อยครั้ง ถ้าสามารถใช้กระบวนการหรือวิธีการที่จำกัดขอบเขตการเดินทางจะช่วยให้เกิดความสะดวกรวดเร็ว ความแม่นยำและความรวดเร็วในการตรวจเช็ค แต่การตรวจสอบนี้อาจจะไม่ครอบคลุมในทุกกรณีที่เกิดความผิดปกติขึ้นกับโซลาร์เซลล์ ซึ่งอาจเกิดความผิดพลาดในการตรวจสอบได้

จากข้างต้นที่กล่าวมาจึงควรทำการศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้องทั้งเรื่องระบบที่ติดตั้งในฟาร์มโซลาร์เซลล์และผลกระทบที่คาดว่าจะเกิดขึ้นก่อนที่จะทำการตรวจเช็คโซลาร์เซลล์และแก้ไขปัญหาหากพบว่ามีผลกระทบเกิดขึ้น ยกตัวอย่างเช่น วิธีการที่เราใช้ไปรบกวนระบบที่ฟาร์มโซลาร์เซลล์ติดตั้ง เป็นต้น

1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญานิพนธ์

1. เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเสื่อมสภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ในระดับสตริง
2. เพื่อศึกษาผลกระทบที่เกิดจากการเสื่อมสภาพของเซลล์แสงอาทิตย์
3. เพื่อศึกษาเทคนิคการตรวจจัดการเสื่อมสภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ในระดับสตริง
4. เพื่อทดลองการตรวจจัดการเสื่อมสภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ในระดับสตริง

1.3 ขอบเขต

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาเทคนิคการตรวจจัดการเสื่อมสภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ในระดับสตริงที่มีการประยุกต์ใช้งานในโซลาร์ฟาร์ม โดยเป็นการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้ตัวแปรกระแสไฟฟ้าเป็นหลัก และใช้ข้อมูลในการศึกษาและทำการทดลองจากกลุ่มตัวอย่างแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ของห้องปฏิบัติการอาคารระบบไฟฟ้าอัจฉริยะ Smart Building (Real Lab) โดยวิธีการที่ใช้จำนวนสตริงที่มีการเสื่อมสภาพ ต้องไม่เกิน 25% ของจำนวนสตริงทั้งหมด

1.4 วิธีการที่ใช้ในปริญญานิพนธ์

1. ศึกษาวิธีการต่าง ๆ ที่ใช้ในการตรวจสอบความผิดปกติของแผงโซลาร์เซลล์ ทั้งข้อดีข้อเสียและขีดจำกัดของวิธีการที่ได้ทำการศึกษา
2. ศึกษากระบวนการที่จะนำข้อมูลที่ได้จากฟาร์มโซลาร์เซลล์มาวิเคราะห์หาความผิดปกติที่เกิดขึ้น
3. ศึกษาค้นคว้าและจัดเก็บข้อมูล
4. สร้างระบบที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้า
5. สรุปผลที่ได้
6. รวบรวมข้อมูลและจัดทำปริญญานิพนธ์

1.5 แผนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 วิธีการดำเนินงาน

การดำเนินงาน	ปี 2560 (ภาคเรียนที่1)					ปี 2561 (ภาคเรียนที่2)				
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี. ค.	เม.ย.	พ.ค.
1.ศึกษาหลักการงานและโครงสร้างเกี่ยวกับเซตต์ แสดงอาทิตย์										
2.ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการศึกษาของเซตต์ เซตต์										
3.ศึกษาเทคนิคการตรวจการเสื่อมสภาพของเซตต์ ระดับสตรีง										
4.ศึกษาดูงานที่ไฮลาร์ฟาร์มจริง										
5.ทดลอง Simulation วงจร										
6.ทดลองใช้วิธีการศึกษาในการวิเคราะห์ข้อมูล										
7.ทำการทดลองสร้างอุปกรณ์ทดสอบจริง										
8.วิเคราะห์ข้อมูลจากอุปกรณ์ทดสอบ										
9.ทำระบบแสดงผล Real Time Operation										
10.จัดทำรูปเล่มปริญญาบัตร										

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้เครื่องมือชุดระบบในการตรวจสอบแผงโซลาร์เซลล์ ที่ใช้ในโซลาร์ฟาร์ม
2. เป็นแนวทางให้เจ้าของโซลาร์ฟาร์ม เลือกวิธีในการวิเคราะห์ระบบของตนเอง
3. เจ้าของโซลาร์ฟาร์ม จะได้รับระบบที่แจ้งความผิดปกติภายในฟาร์มได้อย่างรวดเร็ว
4. เป็นแนวทางเพื่อคิดค้นวิธีตรวจสอบความผิดพลาดในฟาร์มให้ดียิ่งขึ้น
5. การพบเจอการเสื่อมสภาพของสตริงโซลาร์เซลล์และแก้ไขได้รวดเร็วเป็นการใช้งานโซลาร์เซลล์อย่างมีประสิทธิภาพ และ ป้องกันอันตรายที่อาจเกิดจากการชำรุดเสียหายของโซลาร์เซลล์
6. เป็นการลดการใช้กำลังคนในการตรวจสอบสภาพของโซลาร์เซลล์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

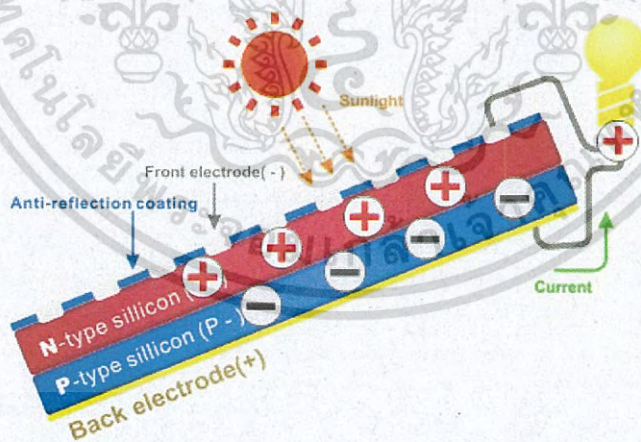
บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 Solar Cell

Solar Cell หรือ PV มีชื่อเรียกกันไปหลายอย่าง เช่น เซลล์แสงอาทิตย์ เซลล์สุริยะ หรือเซลล์ Photovoltaic ซึ่งต่างก็มีที่มาจากคำว่า Photovoltaic โดยแยกออกเป็น Photo หมายถึง แสง และ Volt หมายถึง แรงดันไฟฟ้า เมื่อรวมคำแล้วหมายถึง กระบวนการผลิตไฟฟ้าจากการตกกระทบของแสงบนวัสดุที่มีความสามารถในการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง แนวความคิดนี้ได้ถูกค้นพบมาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1839 แต่เซลล์แสงอาทิตย์ก็ยังไม่ถูกสร้างขึ้นมา จนกระทั่งในปี ค.ศ. 1954 จึงมีการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ และได้ถูกนำไปใช้เป็นแหล่งจ่ายพลังงานให้กับดาวเทียมในอวกาศ เมื่อปี ค.ศ. 1959 ดังนั้น จึงสรุปได้ว่า

เซลล์แสงอาทิตย์ คือ สิ่งประดิษฐ์ที่ทำจากสารกึ่งตัวนำ เช่น ซิลิคอน (Silicon), แกลเลียม อาร์เซไนด์ (Gallium Arsenide), อินเดียม ฟอสไฟด์ (Indium Phosphide), แคดเมียม เทลลูไรด์ (Cadmium Telluride) และคอปเปอร์ อินเดียม ไดเซเลไนด์ (Copper Indium Diselenide) เป็นต้น ซึ่งเมื่อได้รับแสงอาทิตย์โดยตรงก็จะเปลี่ยนเป็นพาหะนำไฟฟ้า และจะถูกแยกเป็นประจุไฟฟ้าบวกและลบเพื่อให้เกิดแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วทั้งสองของเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อนำขั้วไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ต่อเข้ากับอุปกรณ์ไฟฟ้ากระแสตรง กระแสไฟฟ้าจะไหลเข้าสู่อุปกรณ์เหล่านั้น ทำให้สามารถทำงานได้



รูปที่ 2.1 การทำงานภายในเซลล์แสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระดับชั้นบนสุด เรียกว่า Front Electrode ทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอน จะมีลักษณะเป็นโลหะ มักจะทำด้วยโลหะเงิน

ระดับชั้นที่ 2 เรียกว่าชั้น n - type silicon ซึ่งอยู่ด้านบนแต่รองลงมา หรือ อยู่ด้านหน้าของเซลล์ คือ ชั้นของสารกึ่งตัวนำที่ใส่สารฟอสฟอรัสลงไป เพื่อให้เกิดการนำไฟฟ้า โดยจะสร้างอิเล็กตรอนขึ้นมาในชั้นนี้เมื่อสารฟอสฟอรัสได้รับแสงอาทิตย์

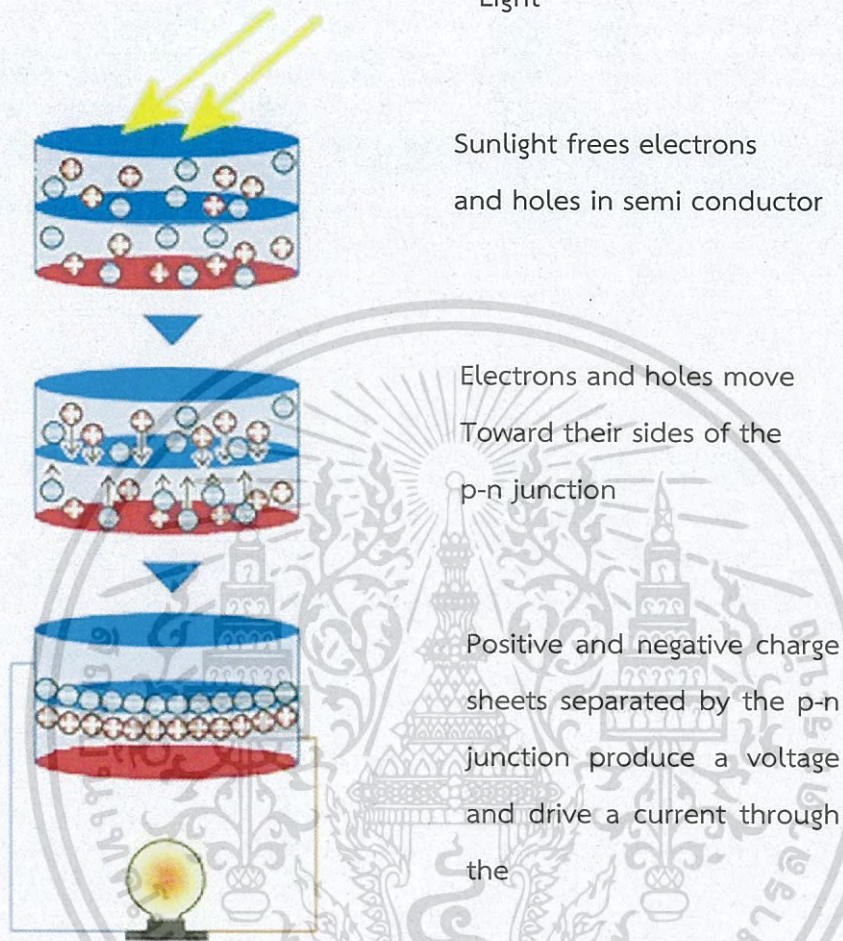
ระดับชั้นที่ 3 เรียกว่าชั้น p - n junction เป็นชั้นที่ชั้น N และ ชั้น P มาประกบกัน

ระดับชั้นที่ 4 เรียกว่าชั้น p - type silicon ชั้นของสารกึ่งตัวนำที่ได้ใส่สารโบรอน (Boron) เพื่อควบคุมให้มีการนำไฟฟ้าลงไป ทำให้โครงสร้างของอะตอมสูญเสียอิเล็กตรอนเกิดหลุม (Hole) ขึ้นในชั้นนี้ เมื่อเซลล์ชั้นบนรับพลังงานจากแสงอาทิตย์ และถ่ายเทพลังงานมาถึงชั้นนี้ ชั้นนี้จะทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอน ถ้าในตอนที่ยังไม่มีแดด ชั้น n - type silicon ซึ่งอยู่ด้านบนของเซลล์ก็พร้อมที่จะให้อิเล็กตรอน แต่ก็ยังมีโฮล ปนอยู่บ้างเล็กน้อยในชั้นนี้ ส่วนชั้น p - type ซิลิคอนซึ่งอยู่ด้านล่างนั้นมีโครงสร้างส่วนใหญ่เป็นโฮล แต่ยังคงมีอิเล็กตรอนปะปนบ้างเล็กน้อย

ระดับชั้นที่ 5 ชั้นล่างสุดเรียกว่าชั้น Back Electrode อยู่ด้านล่างของชั้น p - type silicon จะมีแถบโลหะเรียกว่า Back Electrode ทำหน้าที่เป็นตัวรวบรวมโฮล ตามรูปที่ 2.1

ขั้นตอนการทำงาน เมื่อมีแสงอาทิตย์มาตกกระทบ แสงอาทิตย์จะถ่ายเทพลังงานให้กับอิเล็กตรอนและโฮล ทำให้เกิดการเคลื่อนไหว และเมื่อพลังงานสูงเพียงพอ ทั้งอิเล็กตรอนและโฮลก็จะวิ่งเข้าหากันเพื่อจับคู่กัน อิเล็กตรอนจะวิ่งไปยังชั้น n - type และโฮลจะวิ่งไปยังชั้น p-type อิเล็กตรอนก็จะวิ่งขึ้นไปรวมกันอยู่ที่ชั้น Front Electrode และ โฮลก็จะวิ่งลงไปรวมกันที่ Back Electrode และเมื่อมีการต่อวงจรไฟฟ้าจากชั้น Front Electrode บนสุด และ Back Electrode ล่างสุด เมื่อต่อครบวงจรจะเกิดกระแสไฟฟ้าไหลขึ้น เพราะอิเล็กตรอนและโฮลจะวิ่งเพื่อจับคู่กัน ตามรูปที่ 2.2

Light



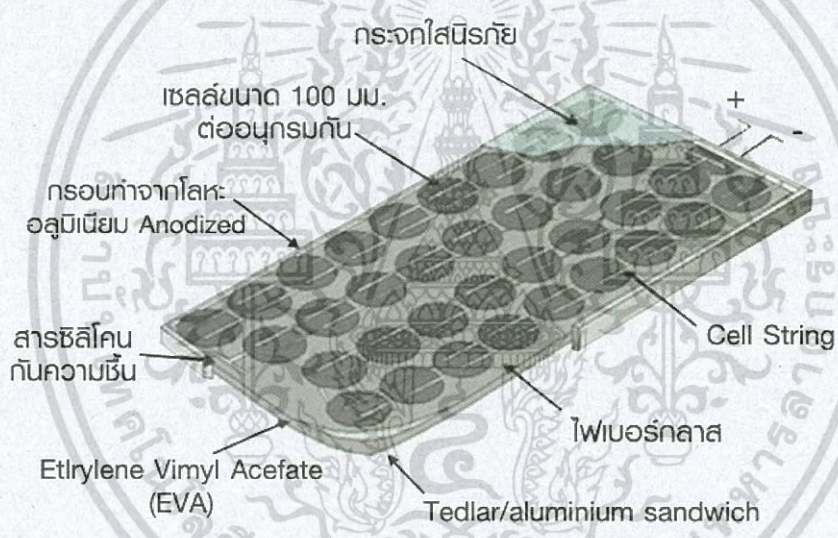
รูปที่ 2.2 อิเล็กตรอนและโฮลเคลื่อนที่เข้าหากัน

เซลล์แสงอาทิตย์ หรือ โซลาร์เซลล์ ทำมาจากสารกึ่งตัวนำ ซึ่งมีหลายชนิด เช่น ซิลิคอน (Silicon), แกลเลียมอาร์เซไนด์ (Gallium Arsenide), อินเดียมฟอสไฟด์ (Indium Phosphide), แคดเมียม เทลลูไรด์ (Cadmium Telluride), คอปเปอร์ อินเดียมไดเซเลไนด์ (Copper Indium Diselenide) สารกึ่งตัวนำเหล่านี้มีคุณสมบัติเหมือนกันคือ เมื่อเซลล์ถูกแสงอาทิตย์ก็จะเปลี่ยนตัวเองเป็นตัวนำไฟฟ้าโดยจะแยกเป็นประจุไฟฟ้าบวกและประจุไฟฟ้าลบ เพื่อให้เกิดแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วไฟฟ้าทั้งสองของเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อนำขั้วไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์โซลาร์เซลล์มาต่อเข้ากับอุปกรณ์ไฟฟ้า DC หรือไฟฟ้ากระแสตรง จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลเข้าสู่อุปกรณ์ไฟฟ้าทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าสามารถทำงานได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ผลิตขึ้นจากเซลล์แสงอาทิตย์เพียงเซลล์เดียวจะมีค่าต่ำมาก การนำมาใช้งานจะต้องนำเซลล์หลาย ๆ เซลล์ มาต่อกันแบบอนุกรมเพื่อเพิ่มค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าให้สูงขึ้น เซลล์ที่นำมาต่อกันในจำนวนและขนาดที่เหมาะสมเรียกว่า แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Module หรือ Solar Panel)

การทำเซลล์แสงอาทิตย์ให้เป็นแผงก็เพื่อความสะดวกในการนำไปใช้งาน ด้านหน้าของแผงเซลล์ประกอบด้วย แผ่นกระจกที่มีส่วนผสมของเหล็กต่ำ ซึ่งมีคุณสมบัติในการยอมให้แสงผ่านได้ดี และยังเป็นเกราะป้องกันแผ่นเซลล์อีกด้วย แผงเซลล์จะต้องมีการป้องกันความชื้นที่ตีมาก เพราะจะต้องอยู่กลางแจ้งกลางฝนเป็นเวลานาน ในการประกอบจะต้องใช้วัสดุที่มีความคงทนและป้องกันความชื้นที่ดี เช่น ซิลิโคนและ อีวีเอ (EVA : Ethelene Vinyl Acetate) เป็นต้น เพื่อเป็นการป้องกันแผ่นกระจกด้านบนของแผงเซลล์ จึงต้องมีการทำกรอบด้วยวัสดุที่มีความแข็งแรง แต่บางครั้งก็ไม่มีเวลาจำเป็น ถ้ามีการเสริมความแข็งแรงของแผ่นกระจกให้เพียงพอ ซึ่งก็สามารถทดแทนการทำกรอบได้เช่นกัน ดังนั้นแผงเซลล์จึงมีลักษณะเป็นแผ่นเรียบ (Laminate) ซึ่งสะดวกในการติดตั้ง ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ส่วนประกอบของเซลล์แสงอาทิตย์

2.2 ชนิดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์ที่พัฒนาและใช้งานในปัจจุบันนั้น แทบทั้งหมดทำจากธาตุซิลิคอน ซึ่งเป็นธาตุที่มีมากเป็นอันดับสองบนโลกรองจากออกซิเจน ทรายตามชายหาด ท้องทะเล หินต่าง ๆ ที่เห็นรอบตัวเราก็มีซิลิคอนเป็นส่วนประกอบหลัก ๆ นั่นคือ เป็นธาตุที่มีมากมายเหลือใช้ ซิลิคอนเป็นวัตถุดิบที่ใช้มากในอุตสาหกรรมสารกึ่งตัวนำในปัจจุบัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 ประเภทของวัสดุ โครงสร้างและประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

ประเภทของวัสดุ	โครงสร้าง	ประสิทธิภาพของเซลล์	ประสิทธิภาพของโมดูล
ซิลิคอน - แบบผลึก	ผลึกเดี่ยว (Single Crystalline Silicon Solar Cell) หรือที่รู้จักกันในชื่อ 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 ₂	18-30 % 10-15 % 10-15 %	NA

2.2.1 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากซิลิคอน ชนิดผลึกเดี่ยว (Single Crystalline Silicon Solar Cell) อาจจะเรียกว่า Mono Crystalline Silicon Solar Cell ลักษณะเป็นแผ่นซิลิคอนแข็งและบางมาก ซิลิคอนเป็นธาตุที่มีมากที่สุดในโลกชนิดหนึ่ง สามารถถลุงได้จากหินและทราย เทคโนโลยี C-Si ได้รับความนิยมและใช้งานกันอย่างแพร่หลาย นิยมใช้งานในพื้นที่เฉพาะได้แก่ ในชนบทที่ไม่มีไฟฟ้าใช้เป็นหลัก

2.2.2 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกรวม (Polycrystalline Silicon Solar Cell) ลักษณะเป็นแผ่นซิลิคอนแข็งและบางมากเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกโพลีได้ถูกพัฒนาขึ้น เพื่อแก้ปัญหาต้นทุนสูงของแบบผลึกเดี่ยว ซิลิคอนแบบผลึกโพลีหรือโพลีซิลิคอน ก็คือก้อนซิลิคอนที่เกิดจากการรวมตัวกันของชิ้นเล็ก ๆ (ขนาดระดับ ไมโครเมตร - มิลลิเมตร) ของผลึกเดี่ยวของซิลิคอน

2.2.3 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากอะมอร์ฟัสซิลิคอน (Amorphous Silicon Solar Cell) ลักษณะเป็นฟิล์มบางเพียง 0.5 ไมครอน (0.0005 มม.) น้ำหนักเบามาก และประสิทธิภาพเพียง 5-10 % เป็นเทคโนโลยีที่ใช้ธาตุซิลิคอนเช่นกัน แต่จะไม่ใช่ผลึก แต่ผลของสารอะมอร์ฟัสจะทำให้เกิดเป็นฟิล์มบางของซิลิคอน ซึ่งมีความบางประมาณ 300 นาโนเมตร ทำให้ไม่สิ้นเปลืองเนื้อวัสดุ น้ำหนักเบา การผลิตทำได้ง่าย และข้อดีของ A-Si ไม่เกิดมลพิษกับสิ่งแวดล้อม จึงเหมาะที่จะประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าที่กินไฟฟ้าน้อย เช่น เครื่องคิดเลข นาฬิกาข้อมือ วิทยุทรานซิสเตอร์ เป็นต้น

2.2.4 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากสารกึ่งตัวนำอื่น ๆ เช่น แกลเลียมอาร์เซไนด์ (GaAs), แคดเมียม เทลลูไรด์ (CdTe) และคอปเปอร์ อินเดียม ไดเซเลไนด์ (CuInSe₂) เป็นต้น มี

ทั้งชนิดผลึกเดี่ยว (Single Crystalline) และผลึกรวม (Polycrystalline) เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากแคลเซียม อาร์เซไนด์จะให้ประสิทธิภาพสูงถึง 20-25 %

2.3 ขั้นตอนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์

วัสดุสำคัญที่ใช้ทำเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ใช้มากที่สุดในปัจจุบันได้แก่ สารซิลิคอน (Si) ซึ่งเป็นสารชนิดเดียวกับที่ใช้ทำชิปในคอมพิวเตอร์และเครื่องอิเล็กทรอนิกส์ ซิลิคอนเป็นสารซึ่งไม่เป็นพิษ มีการนำมาผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ใช้กันอย่างแพร่หลายเพราะมีราคาถูก คงทนและเชื่อถือได้ นอกจากนี้ยังมีวัสดุชนิดอื่นที่สามารถนำมาผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ได้ เช่น แกลเลียมอาร์เซไนด์ และแคดเมียมเทลลูไรด์ แต่ยังมีราคาสูง และบางชนิดยังไม่มีการพิสูจน์เรื่องอายุการใช้งานว่าสามารถใช้งานได้ยาวนาน ข้อเสียของซิลิคอนคือ การทำให้บริสุทธิ์และอยู่ในรูปสารที่พร้อมจะทำเซลล์แสงอาทิตย์ มีราคาแพง และ แรกหักง่ายในขบวนการผลิต

การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกเดี่ยว (Single Crystalline) การเตรียมสารซิลิคอนชนิดนี้เริ่มต้นจากนำสารซิลิคอนซึ่งผ่านการทำให้เป็นก้อนที่มีความบริสุทธิ์สูงมาก (99.999 %) มาหลอมละลายในเตา Induction Furnace ที่อุณหภูมิสูงถึง 1,500 องศาเซลเซียส เพื่อทำการสร้างแท่งผลึกเดี่ยวขนาดใหญ่ (เส้นผ่านศูนย์กลาง 6-8 นิ้ว) พร้อมกับใส่สารเจือปน Boron เพื่อทำให้เกิด P-type แล้วทำให้เกิดการเย็นตัวจับตัวกันเป็นผลึกด้วย Seed ซึ่งจะตกผลึกมีขนาดหน้าตัดใหญ่ แล้วค่อย ๆ ดึงแท่งผลึกนี้ขึ้นจากเตาหลอม ด้วยเทคโนโลยีการดึงผลึก จะได้แท่งผลึกยาวเป็นรูปทรงกระบอก คุณภาพของผลึกเดี่ยวจะสำคัญมากต่อคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ จากนั้นนำแท่งผลึกมาตัดให้เป็นแผ่นบาง ๆ ด้วยลวดตัดเพชร (Wire Cut) เรียกว่า เวเฟอร์ ซึ่งจะได้แผ่นผลึกมีความหนาประมาณ 300 ไมโครเมตร และขัดความเรียบของผิว จากนั้นก็จะนำไปเจือสารที่จำเป็นในการทำให้เกิดเป็น p-n junction ขึ้นบนแผ่นเวเฟอร์ ด้วยวิธีการ Diffusion ที่อุณหภูมิระดับ 1,000 องศาเซลเซียส จากนั้นนำไปทำขั้วไฟฟ้าเพื่อนำกระแสไฟออกใช้ ที่ผิวบนจะเป็นขั้วลบส่วนผิวล่างเป็นขั้วบวก ขั้นตอนสุดท้ายจะเป็นการเคลือบฟิล์มผิวหน้าเพื่อป้องกันการสะท้อนแสงให้น้อยที่สุด ตอนนี้จะได้เซลล์ที่พร้อมใช้งาน หลังจากนั้นก็นำไปประกอบเข้าแผงโดยใช้กระจกเป็นเกราะป้องกันแผ่นเซลล์ และใช้ซิลิโคนและอีวีเอ (EVA : Ethelene Vinyl Acetate) ช่วยป้องกันความชื้น ในการใช้งานจริงจะนำเซลล์แต่ละเซลล์มาต่ออนุกรมกันเพื่อเพิ่มแรงเคลื่อนไฟฟ้าให้ได้ตามต้องการ

การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกรวม (Poly Crystalline) การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์โดยวิธีนี้จะมีค่าใช้จ่ายที่ถูกกว่าวิธีแรก คือการทำแผ่นเซลล์ จะใช้วิธีการหลอมสารซิลิคอนให้ละลายพร้อมกับใส่สารเจือปน Boron เพื่อทำให้เกิด P-type แล้วเทลงในแบบพิมพ์ เมื่อสารละลายซิลิคอนแข็งตัวก็จะได้เป็นแท่งซิลิคอนแบบผลึกรวม (ตกผลึกไม่พร้อมกัน) จากนั้นนำไปตัดเป็นแผ่นเช่นเดียวกับแบบผลึกเดี่ยว ความแตกต่างระหว่างแบบผลึกเดี่ยวและแบบผลึกรวมสังเกตได้จากผิวผลึก ถ้ามีโทนสีที่ต่างกันอย่างเกิดจากผลึกเล็ก ๆ หลายผลึกในแผ่นเซลล์จะเป็นแบบผลึกรวม ในขณะที่แบบผลึกเดี่ยวจะเห็นเป็นผลึกเนื้อเดียว คือ มีสีเดียวตลอดทั้งแผ่น ส่วนกรรมวิธีการผลิตเซลล์ที่เหลือจะเหมือนกัน เซลล์แสงอาทิตย์แบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลึกรวม (Poly Crystalline) จะให้ประสิทธิภาพต่ำกว่าแบบผลึกเดี่ยว ประมาณ 2-3 % อย่างไรก็ตาม เซลล์ทั้ง 2 ชนิด มีข้อเสียในการผลิต คือ แฉกหักง่ายเช่นกัน

การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากอะมอร์ฟัสซิลิคอน โดยทำการแยกสลายก๊าซซิลเลน (Silane Gas) ให้เป็นอะมอร์ฟัสซิลิคอน โดยใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า เครื่อง Plasma CVD (Chemical Vapor Deposition) เป็นการผ่านก๊าซซิลเลนเข้าไปในกรอบแก้วที่มีขั้วไฟฟ้าความถี่สูง จะทำให้ก๊าซแยกสลายเกิดเป็นพลาสมา และอะตอมของซิลิคอนจะตกลงบนฐานหรือสแตนเลสสตีลที่วางอยู่ในกรอบแก้ว เกิดเป็นฟิล์มบางขนาดไม่เกิน 1 ไมครอน (0.001 มม.) ขณะที่แยกสลายก๊าซซิลเลน จะผสมก๊าซฟอสฟีนและไดโบเรนเข้าไปเป็นสารเจือปน เพื่อสร้างรอยต่อพีเอ็นสำหรับใช้เป็นโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์การทำให้ขั้วไฟฟ้า มักใช้ขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงที่ทำจาก ITO (Indium Tin Oxide)

การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากแคลเลียม อาร์เซไนด์ขั้นตอนการปลูกชั้นผลึก ใช้เครื่องมือ คือ เต้าปลูกชั้นผลึกจากสถานะของเหลว (LPE : Liquid Phase Epitaxy) ขั้นตอนการปลูกชั้นผลึกที่เป็นรอยต่อเอ็นพี ใช้เครื่องมือ คือ เครื่องปลูกชั้นผลึกด้วยลำโมเลกุล (MBE : Molecular Beam Epitaxy)

2.4 ประเภทของ Solar Inverter ที่ใช้งานในปัจจุบัน

Solar Inverter มีหน้าที่แปลงกระแสไฟฟ้ากระแสตรง (จากแผงโซลาร์เซลล์) ให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ เพื่อนำมาต่อโหลดเพื่อใช้งานต่อไป

2.4.1 Central Solar Inverter : เป็นอินเวอร์เตอร์ขนาดใหญ่ ที่พบเจอในตลาดทั่วไปมีขนาดตั้งแต่ 100 kW - 2,500 kW ตามรูปที่ 2.4 ส่วนใหญ่จะใช้ ในโซลาร์ฟาร์ม หรือ PV Plant ขนาดใหญ่ที่มีการติดตั้งกำลังการผลิตเป็นหลาย ๆ เมกกะวัตต์ สะดวกในการติดตั้งระบบใหญ่ ๆ แต่มีข้อเสียคือ หากตัวอินเวอร์เตอร์เสีย ก็จะทำให้กำลังการผลิตไฟฟ้าทั้งระบบลดลงอย่างมากเช่น PV Plant ขนาดกำลังการผลิต 10 MW โดยใช้ Central Solar Inverter ขนาด 1,000 kW จำนวน 10 set หากเสียไป 1 ตัว ก็ทำให้ Performance หายไปตั้ง 10 % ซึ่งหากเราใช้อินเวอร์เตอร์ ที่ขนาดเล็ก ๆ ลง หากเสียไปสัก 1 ตัว Performance ก็จะไม่ค่อยตกไปมากนัก

ยี่ห้อที่ผลิตจำหน่าย อาทิ เช่น AEG Power Solution, Eaton, GE Power Conversion, Ingeteam, Parker Hannifin, Power Electronics, Satcon, Schneider Electric, SMA, Ingeteam INC. เป็นต้น แนวโน้มในอนาคต สัดส่วนการใช้งาน Central Solar Inverter จะลดน้อยลง ซึ่งจะมีการใช้ String Solar Inverter เพิ่มมากขึ้น ดังรูปที่ 2.5

ABB central inverters
PVS800
100 to 1000 kW

SUNNY CENTRAL 1000CP XI



ตัวอย่าง Central Inverter

ตัวอย่าง Central Inverter มีชื่อ SMA ขนาด 1,122 kW.

รูปที่ 2.4 Central Inverter

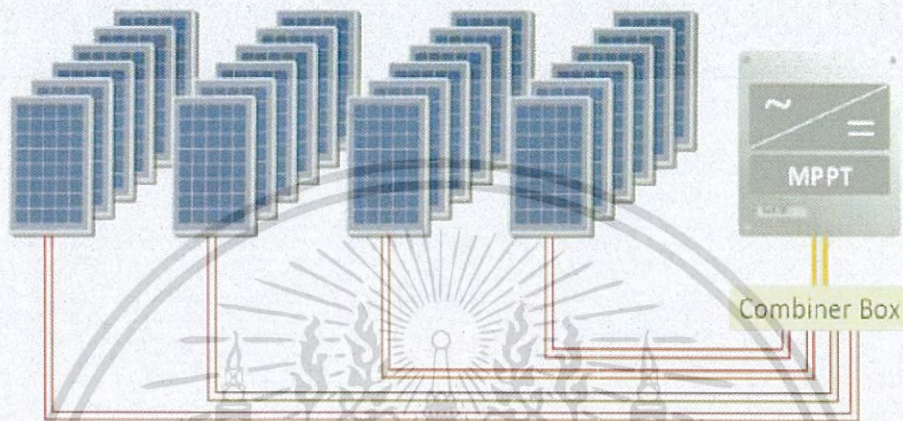


รูปที่ 2.5 เปรียบเทียบการใช้งาน String Inverter & Central Inverter ในปี 2014 และ 2015

2.4.2 String Solar Inverter เป็นอินเวอร์เตอร์ขนาดเล็ก ตั้งแต่ 2 kW - 60 kW ซึ่งเป็นอินเวอร์เตอร์ ที่เรานำมาติดตั้งใช้งานตามบ้าน สำนักงาน หรือโรงงาน ที่ส่วนใหญ่ติดตั้งบนหลังคาหรือดาดฟ้า เนื่องจากกำลังการผลิตและขนาดที่เหมาะสมในการติดตั้งการต่อใช้งาน โดยนำแผงเซลล์แสงอาทิตย์มาอนุกรม และหรือ ขนานกัน ตามรูปที่ 2.6 ให้ได้ค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า หรือ กำลังไฟฟ้า ให้เหมาะสมกับที่ String Solar Inverter ต้องการแล้วอินเวอร์เตอร์ก็แปลงไฟฟ้า DC จากแผงให้เป็นไฟฟ้า AC แล้วขนานหรือเชื่อมต่อเข้ากับไฟฟ้าของการไฟฟ้า ที่เมนเบรคเกอร์ หรือ MDB ดังรูปที่ 2.7 และ 2.8

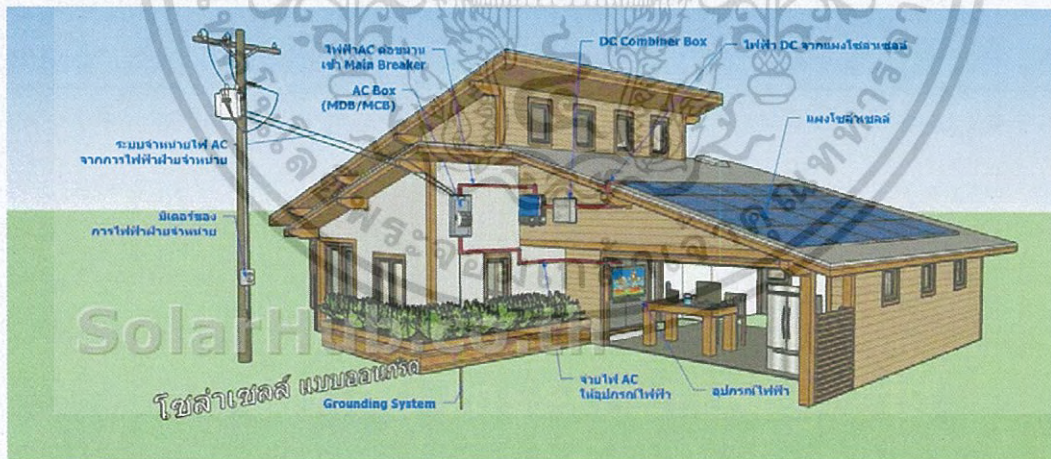
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยี่ห้อที่ผลิตจำหน่าย อาทิ เช่น ABB, Fronius, Ginlong (Ningbo) Technologies, KACO, Pika Energy, Schneider Electric, SMA, HUAWEL, Ingeteam INC. เป็นต้น



String Inverter Diagram

รูปที่ 2.6 สตริงอินเวอร์เตอร์ไดอะแกรม



รูปที่ 2.7 ออนกริดอินเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 ตัวอย่างสตริงอินเวอร์เตอร์

2.4.3 Solar Inverter แบบมี Power Optimizer เป็นออนกริดอินเวอร์เตอร์ ประเภทหนึ่งซึ่ง พัฒนาการเพื่อทำให้ อินเวอร์เตอร์มีประสิทธิภาพสูงขึ้น โดยการเพิ่มอุปกรณ์ Power Optimizer ไปติดตั้ง ที่ใต้แผงโซลาร์เซลล์ แต่ละแผง (บางรุ่น 1 Power Optimizer ต่อได้ 2 PV) เพื่อทำหน้าที่ในการปรับแต่ง ค่าแรงดันไฟฟ้า DC ที่มาจากแผงโซลาร์เซลล์ให้เหมาะสม (DC to DC) แล้วจึงส่งต่อไปยัง Inverter เพื่อ แปลงเป็น ไฟฟ้า AC นำไปใช้งานต่อไป

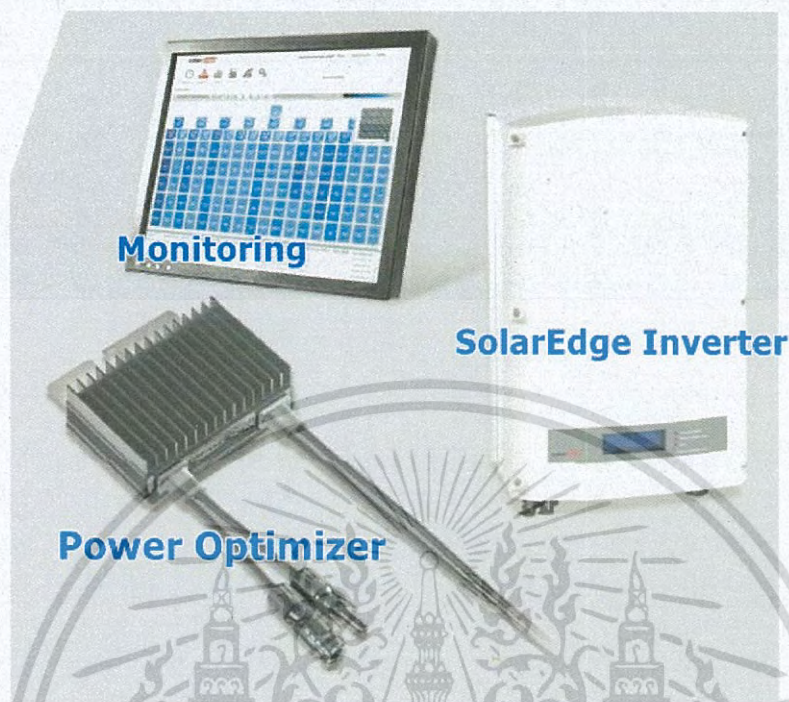
2.4.3.1 ข้อดีของ Power Optimizer

1. หากบางแผงถูกบังแสง หรือเกิดเงา ถ้าเป็นแบบ String Solar Inverter ทั่วไปค่า กำลังไฟฟ้าที่ได้ก็ลดลงไปทั้ง String (อาจจะ 10-20 แผงขึ้นอยู่กับขนาดของแผง) แต่ถ้ามี Power Optimizer แล้วแต่ละแผงจะทำงานแยกเป็นอิสระ จึงทำให้ทุกแผงผลิตกระแสไฟฟ้าได้สูงสุดในขณะนั้น ทำให้กำลังไฟฟ้าลดลงเฉพาะแผงที่มีเงาบังเท่านั้น

2. มอนิเตอร์กำลังการผลิต หรือเหตุเสีย ได้เป็นรายแผง แต่หากเป็น String Solar Inverter ก็จะได้เป็นราย String

3. กรณี String Solar Inverter หากปิดระบบ หรือ Off Power ของ อินเวอร์เตอร์ ใน เวลากลางวัน แผงโซลาร์เซลล์ก็ยังผลิตไฟฟ้าอย่างต่อเนื่องซึ่งอาจมีแรงดันมากถึง 500-800 VDC ส่งต่อมายังอินเวอร์เตอร์ แต่หากเป็น Solar Inverter แบบมี Power Optimizer เมื่อปิดระบบ ก็จะปรับแรงดัน ลงมาให้เหลือเพียง 1 โวลท์ เท่านั้น เพื่อให้เกิดความปลอดภัยกับผู้ใช้งาน

ยี่ห้อที่ผลิตจำหน่าย ที่พบเห็นมีอยู่ 4 ยี่ห้อ SolarEdge, Tigo Energy, Alencon Systems และ Pika Energy

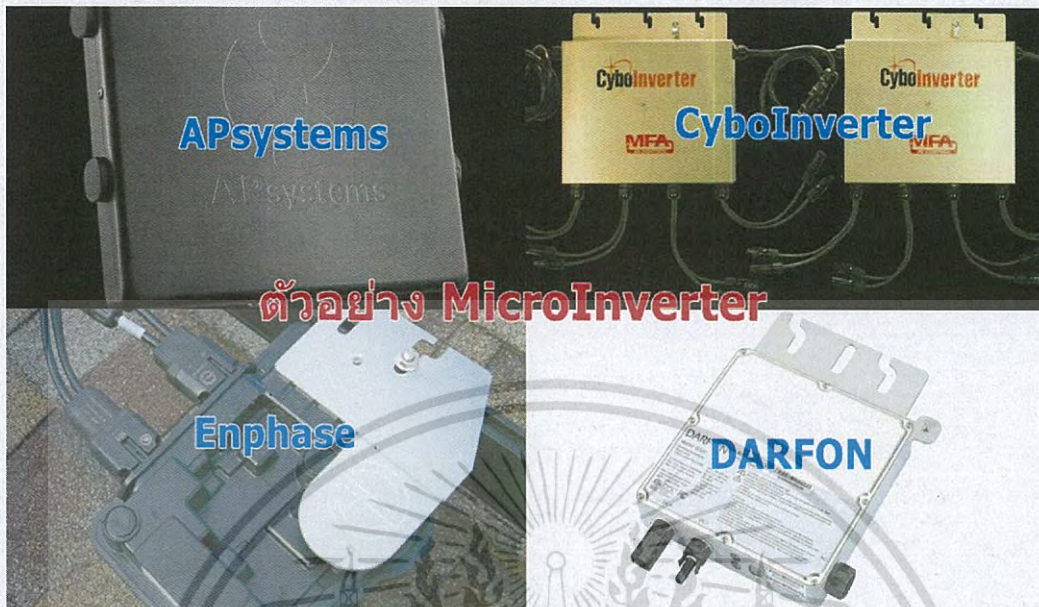


รูปที่ 2.9 ตัวอย่าง Solar Inverter

2.4.4 Solar Micro Inverter เป็นโซลาร์อินเวอร์เตอร์ที่มีทั้งแบบออนกริด หรือแบบออฟกริด โดยทางสถาปัตยกรรมก็คือ ทำตัวอินเวอร์เตอร์ให้เล็กลง แล้วไปติดตั้งที่แผงโซลาร์เซลล์ โดยอาจจะต่อโดยใช้ Micro Inverter 1 ตัว ต่อ 1 แผง, 1 ตัวต่อ 2 แผง หรือ 1 ตัว ต่อ 4 แผง แล้วแต่ที่แต่ละยี่ห้อจะผลิตออกมาจำหน่าย ซึ่งเอาท์พุทที่ออกมาจาก Micro Inverter ก็เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ ที่นำไปต่อใช้งานได้เลย ซึ่งอินเวอร์เตอร์ประเภทนี้กำลังเป็นที่นิยมในต่างประเทศ และมีหลายยี่ห้อที่แข่งขันกันปรับปรุงและพัฒนากันค่อนข้างมาก อันเนื่องมาจากผู้ใช้งานทั่วไปสามารถติดตั้งใช้งานได้เอง เคลื่อนย้ายได้สะดวก มีชุดติดตั้งแบบง่าย ๆ จำนวนไม่กี่แผง อีกทั้งทำใช้งานเป็นระบบออฟกริด (สถานที่ที่ไม่มีระบบจำหน่ายไฟของการไฟฟ้า) ก็ติดตั้งได้ง่าย

ยี่ห้อที่ผลิตจำหน่าย และได้รางวัล 2016 Top Solar MicroInverter Products มีอยู่ 6 ยี่ห้อ ประกอบด้วย APsystems, CyboEnergy, Darfon America Corp, Enphase Energy, KACO new energy และ Magnum Energy เป็นต้น

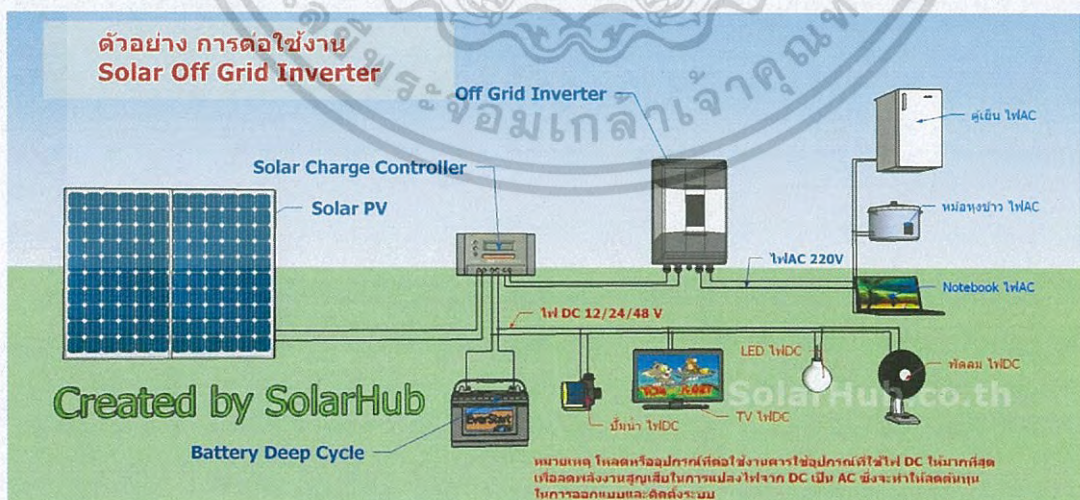
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ตัวอย่าง MicroInverter

รูปที่ 2.10 ตัวอย่างไมโครอินเวอร์เตอร์

2.4.5 Off Grid Solar Inverter เป็นโซลาร์อินเวอร์เตอร์แบบออฟกริดซึ่งหมายถึงเป็นอินเวอร์เตอร์ที่แปลงไฟฟ้า DC จากแผงโซลาร์เซลล์ ให้เป็นไฟฟ้า AC แล้วนำไปต่อใช้งานได้เลยโดยไม่ต้องไปขนานหรือเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายของการไฟฟ้า ซึ่งระบบออฟกริดนี้ส่วนใหญ่ก็จะต้องมีระบบแบตเตอรี่ และชาร์จเจอร์มาต่อร่วมด้วยเพื่อทำหน้าที่เก็บสำรองพลังงานไฟฟ้าไว้ตอนที่ไม่มีแสงแดด ดังรูปที่ 2.11 ซึ่งอินเวอร์เตอร์ประเภทนี้ก็เหมาะกับสถานที่ที่ไม่มีไฟฟ้าของการไฟฟ้าเข้าถึง แต่ต้นทุนของระบบนี้ก็ยังมีข้อจำกัดที่แบตเตอรี่ในปัจจุบันยังมีราคาสูง และอายุการใช้งานแบตเตอรี่อยู่ที่ 2-5 ปี



รูปที่ 2.11 การใช้งาน Solar Off Grid Inverter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.6 Hybrid Solar Inverter ไฮบริดส์โซลาร์อินเวอร์เตอร์บางบริษัทแบ่งได้เป็นแบบ ไฮบริดส์ อ็อฟกริด และ ไฮบริดส์ ออนกริด

ไฮบริดส์ อ็อฟกริด คือ อินเวอร์เตอร์รับไฟได้จากหลายแหล่ง เช่น ไฟจากแผงโซลาร์เซลล์ ไฟจากการไฟฟ้า ไฟจากเครื่องปั่นไฟ หรือไฟจากกังหันปั่นไฟ เป็นต้น แล้วในระบบก็มีแบตเตอรี่ เพื่อเก็บพลังงานไฟฟ้าด้วย วัสดุอุปกรณ์ไม่มีแสงแดด โดยสามารถตั้งค่าให้รับไฟจากแหล่งใดก่อนก็ได้ เช่นเวลากลางวัน ก็ใช้ไฟจากแผงโซลาร์เซลล์ พอกลางคืนใช้ไฟจากแบตเตอรี่ หากแบตเตอรี่ไฟหมด ก็ให้ใช้ไฟจากการไฟฟ้า สำหรับความหมายของอ็อฟกริด คือในตอนกลางวัน ถ้าไฟจากแผงโซลาร์เซลล์ ผลิตมามากเกินไปกว่าที่ใช้ งาน ก็จะไม่เชื่อมต่อหรือไม่ขนานหรือไม่ไหลย้อนกลับไปยังระบบจำหน่ายไฟของการไฟฟ้า

ไฮบริดส์ ออนกริด เหมือนกับ ไฮบริดส์ อ็อฟกริด ทุกอย่างยกเว้นถ้าไฟเหลือจากแผงโซลาร์เซลล์ จะขนานหรือเชื่อมต่อหรือไหลย้อนกลับเข้าสู่ระบบจำหน่ายไฟของการไฟฟ้า

ยี่ห้อที่ผลิตจำหน่าย มีมากมาย เช่น KOLSAT, GOODWE, Lantron เป็นต้น

2.5 การวัดการกระจายของข้อมูล (Measures of Dispersion)

การวัดการกระจาย (Measures of Dispersion) เป็นสถิติประเภทหนึ่งที่คำนวณออกมาเป็นตัวเลข เพื่อให้สามารถอธิบายลักษณะการกระจายของข้อมูล การที่ข้อมูลชุดหนึ่ง ๆ ประกอบด้วยค่าที่ต่าง ๆ กันเราเรียกว่า เป็นข้อมูลที่มีการกระจาย แต่ถ้าชุดข้อมูลนั้นประกอบด้วยค่าที่ต่างกันมาก เรียกว่า เป็นข้อมูลที่มีการกระจายมาก ถ้าข้อมูลชุดนั้นประกอบด้วยค่าต่างกันน้อย เรียกว่า เป็นข้อมูลที่มีการกระจายน้อย และถ้าข้อมูลชุดนั้นประกอบด้วยค่าที่เท่ากันหมด เรียกว่า เป็นข้อมูลที่ไม่มีการกระจาย ดังตัวอย่าง

ตารางที่ 2.2 ข้อมูลซึ่งมีการกระจายต่างกัน

ข้อมูลชุดที่	คะแนนในชุดข้อมูล					ลักษณะการกระจาย
1	6	9	30	60	90	มีการกระจายมาก
2	40	41	47	48	50	มีการกระจายน้อย
3	20	20	20	20	20	ไม่มีการกระจาย

การวัดการกระจายนิยมใช้ร่วมกับการวัดแนวโน้มเข้าสู่ส่วนกลาง เพราะจะช่วยอธิบายลักษณะของข้อมูลได้ชัดเจนยิ่งขึ้น ทั้งนี้ เนื่องจากการวัดแนวโน้มเข้าสู่ส่วนกลางเป็นเพียงการบอกค่ากลางของข้อมูลชุดนั้น แต่เราก็ยังไม่ทราบชัดเจนถึงลักษณะการกระจายของข้อมูลว่าคะแนนต่าง ๆ ในชุดข้อมูลนั้นมีค่าใกล้เคียงกัน หรือแตกต่างกันมาก ถ้าเรามีทั้งค่าแนวโน้มเข้าสู่ส่วนกลางและค่าการกระจายก็จะทำให้เข้าใจลักษณะข้อมูลนั้นได้ชัดเจนขึ้นมากกว่ามีแต่ค่าแนวโน้มเข้าสู่ส่วนกลางเพียงอย่างเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวัดการกระจายของข้อมูล แบ่งได้เป็น 2 วิธี คือ

1. การวัดการกระจายสัมบูรณ์ (Absolute Variation) คือการวัดการกระจายของข้อมูลเพียงชุดเดียว เพื่อดูว่าข้อมูลชุดนั้นแต่ละค่ามีความแตกต่างกันมากหรือน้อยเพียงไร นิยมใช้กันอยู่ 4 ชนิด คือ

- พิสัย (Range)
- ส่วนเบี่ยงเบนควอร์ไทล์ (Quartile Deviation)
- ส่วนเบี่ยงเบนเฉลี่ย (Mean Deviation หรือ Average Deviation)
- ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation)

2. การวัดการกระจายสัมพัทธ์ (Relative Variation) คือการวัดการกระจายของข้อมูลที่มีมากกว่า 1 ชุด โดยใช้อัตราส่วนของค่าที่ได้จากการวัดการกระจายสัมบูรณ์ กับค่ากลางของข้อมูลนั้น ๆ เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบการกระจายของข้อมูลเหล่านั้น มีอยู่ 4 ชนิด คือ

- สัมประสิทธิ์ของพิสัย (Coefficient of Range)
- สัมประสิทธิ์ของส่วนเบี่ยงเบนควอร์ไทล์ (Coefficient of Quartile Deviation)
- สัมประสิทธิ์ของส่วนเบี่ยงเบนเฉลี่ย (Coefficient of Average Deviation)
- สัมประสิทธิ์ของความแปรผัน (Coefficient of Variation)

2.5.1 การวัดการกระจายสัมบูรณ์ (Absolute Variation)

พิสัย (Range)

เป็นค่าที่ใช้วัดการกระจายของข้อมูล โดยการหาความแตกต่างระหว่างค่าสูงสุดกับค่าต่ำสุดของข้อมูลชุดใดชุดหนึ่ง ซึ่งนับเป็นวิธีการกระจายอย่างคร่าว ๆ และง่ายที่สุด เนื่องจากคะแนนเพียง 2 ค่าเท่านั้นในการคำนวณ คือค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดคะแนนค่าอื่น ๆ ไม่ได้นำมาพิจารณาเลยถ้าพิสัยมีค่ามากแสดงว่ามีการกระจายมาก ถ้าพิสัยมีค่าน้อยแสดงว่ามีการกระจายน้อยการวัดการกระจายด้วยค่าพิสัยมักใช้ควบคู่กับการวัดแนวโน้มเข้าสู่ส่วนกลางด้วยค่าฐานนิยม (Mode) หรืออาจใช้ควบคู่กับการวัดแนวโน้มเข้าสู่ส่วนกลางวิธีอื่น ๆ ในกรณีที่มีข้อมูลจำนวนน้อยหรือเมื่อต้องการทราบการกระจายอย่างคร่าว ๆ โดยรวดเร็ว

วิธีการหาค่าพิสัย

กรณีของข้อมูลที่ไม่ได้แจกแจงความถี่

$$\text{ใช้สูตร} \quad \text{พิสัย} = \text{ค่าสูงสุด} - \text{ค่าต่ำสุด}$$

$$\text{หรือ} \quad \text{Range} = X_{\max} - X_{\min} \quad (2.1)$$

กรณีของข้อมูลที่แจกแจงความถี่โดยแบ่งเป็นอัตรภาคชั้น

ใช้สูตร พิสัย = ขอบเขตบนของอัตรภาคชั้นที่มีข้อมูลที่มีค่าสูงสุด - ขอบเขตล่างของอัตรภาคชั้นที่มีข้อมูลที่มีค่าต่ำสุด

ส่วนเบี่ยงเบนควอร์ไทล์

ส่วนเบี่ยงเบนควอร์ไทล์ (Quartile Deviation : Q.D.) เป็นค่าที่ใช้วัดการกระจายของข้อมูลรอบ ๆ ค่ามัธยฐาน (Median) ซึ่งมีค่าเท่ากับครึ่งหนึ่งของผลต่างระหว่างควอร์ไทล์ที่ 3 กับควอร์ไทล์ที่ 1 ถ้าส่วนเบี่ยงเบนควอร์ไทล์มีค่ามากแสดงว่ามีการกระจายมาก ถ้าส่วนเบี่ยงเบนควอร์ไทล์มีค่าน้อยแสดงว่ามีการกระจายน้อย

วิธีการหาค่าส่วนเบี่ยงเบนควอร์ไทล์

$$\text{ใช้สูตร} \quad \text{Q.D.} = \frac{Q_3 - Q_1}{2} \quad (2.2)$$

จากสูตรเห็นได้ว่าค่า Q.D. แสดงถึงการกระจายของข้อมูลว่าห่างจากมัธยฐาน (Median) ซึ่งเป็นตำแหน่งกึ่งกลางของชุดข้อมูลมากน้อยเพียงไร จึงมักใช้ควบคู่กันกับการวัดแนวโน้มเข้าสู่ส่วนกลางด้วยค่ามัธยฐาน

ส่วนเบี่ยงเบนเฉลี่ย

ส่วนเบี่ยงเบนเฉลี่ย (Mean Deviation : M.D.) เป็นค่าที่ใช้วัดการกระจายของข้อมูลรอบ ๆ ค่าเฉลี่ย (Mean) โดยการหาค่าเฉลี่ยของผลรวมของผลต่างระหว่างคะแนนแต่ละตัวกับค่าเฉลี่ย ถ้าส่วนเบี่ยงเบนเฉลี่ยมีค่ามากแสดงว่ามีการกระจายมาก ถ้าส่วนเบี่ยงเบนเฉลี่ยมีค่าน้อยแสดงว่ามีการกระจายน้อย

วิธีการหาค่าส่วนเบี่ยงเบนเฉลี่ย

ข้อมูลไม่ได้แจกแจงความถี่

$$\text{ใช้สูตร} \quad \text{M.D.} = \frac{\sum_{i=1}^N |x_i - \mu|}{N} \quad (2.3)$$

ข้อมูลแจกแจงความถี่

$$\text{ใช้สูตร} \quad \text{M.D.} = \frac{\sum_{i=1}^k f_i |x_i - \mu|}{N} \quad (2.4)$$

ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation : S.D.) เป็นการวัดการกระจายของคะแนนรอบ ๆ ค่าเฉลี่ย (Mean) คล้าย ๆ กับส่วนเบี่ยงเบนเฉลี่ย แต่การแก้ปัญหาค่าสัมบูรณ์โดยใช้วิธียกกำลังสอง ค่าผลต่างระหว่างคะแนนแต่ละตัวกับค่าเฉลี่ย ทำให้เครื่องหมายลบหมดไปเมื่อหาค่าเฉลี่ยของผลรวมกรณีข้อมูลไม่ได้แจกแจงความถี่ มีสูตรดังนี้

ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวอย่างแทนด้วย s

$$\text{ใช้สูตร} \quad s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (2.5)$$

ข้อสังเกตเกี่ยวกับการใช้ค่าการวัดการกระจายค่าพิสัย

1. พิสัยเป็นการวัดการกระจายโดยใช้คะแนนเพียง 2 ตัว ไม่ได้นำคะแนนทุกตัวมาใช้ในการคำนวณจึงเป็นวิธีการกระจายอย่างหยาบ ๆ
2. พิสัยเหมาะสำหรับวัดการกระจายอย่างคร่าว ๆ เมื่อต้องการทราบค่าการกระจายอย่างรวดเร็วเพราะใช้เวลาน้อยในการคำนวณ
3. พิสัยเหมาะกับชุดข้อมูลขนาดเล็กมากกว่าขนาดใหญ่ถ้าข้อมูลใหญ่มีแนวโน้มค่าพิสัยสูง
4. ไม่ควรใช้พิสัยในการเปรียบเทียบการกระจายของข้อมูลที่มีขนาดไม่เท่ากัน ถ้าเป็นข้อมูลกลุ่มใหญ่มีแนวโน้มที่ค่าพิสัยจะสูง

ค่าส่วนเบี่ยงเบนควอไทล์

1. ส่วนเบี่ยงเบนควอไทล์ เป็นการวัดการกระจายที่ดีกว่าการวัดด้วยค่าพิสัย แต่ก็ยังใช้เพียงบางค่าไม่ได้ใช้ข้อมูลทุกค่าในการคำนวณ
2. ส่วนเบี่ยงเบนควอไทล์ เหมาะสำหรับใช้วัดการกระจายกรณีมีคะแนนบางค่าสูงหรือต่ำกว่าคะแนนตัวอื่น ๆ ในชุดมาก
3. ส่วนเบี่ยงเบนควอไทล์เหมาะสำหรับใช้ควบคุมกับการวัดแนวโน้มเข้าสู่ส่วนกลางด้วยค่ามัธยฐาน

ค่าส่วนเบี่ยงเบนเฉลี่ย

1. ส่วนเบี่ยงเบนเฉลี่ย เป็นการวัดการกระจายที่ละเอียดกว่าการวัดด้วยค่าพิสัยและส่วนเบี่ยงเบนควอไทล์เพราะได้ใช้คะแนนทุก ๆ ตัวในการคำนวณ
2. การคำนวณค่าส่วนเบี่ยงเบนเฉลี่ยไม่ได้คำนึงถึงเครื่องหมายของผลต่างระหว่างคะแนนแต่ละตัวกับค่าเฉลี่ย ซึ่งขัดต่อหลักคณิตศาสตร์ จึงไม่เป็นที่นิยมใช้

ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

1. ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เป็นการวัดการกระจายของข้อมูลที่ใช้คะแนนทุกตัว ในการคำนวณจึงเป็นการวัดการกระจายที่ละเอียดกว่าการหาโดยพิสัย พิสัยควอไทล์ และส่วนเบี่ยงเบนควอไทล์
2. ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เป็นการวัดการกระจายของข้อมูลที่นิยมใช้มากที่สุดโดยเฉพาะอย่างยิ่งในการวิจัย
3. ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เป็นค่าการกระจายที่มีหน่วยเช่นเดียวกับหน่วยของข้อมูลที่เก็บรวบรวมมา ส่วนค่าความแปรปรวน ซึ่งมีค่าเป็นกำลังสองของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็นค่าการกระจายที่มีหน่วยเป็นกำลังสองของหน่วยของข้อมูลที่เก็บรวบรวมมา

2.5.2 การวัดการกระจายสัมพัทธ์

ในกรณีที่ต้องการเปรียบเทียบการกระจายของข้อมูลต่างกลุ่ม (ต่างชุด) ถ้าข้อมูลแต่ละชุดเป็นข้อมูลที่มีหน่วยวัดเดียวกัน ขนาดเท่ากัน และค่าแนวโน้มเข้าสู่ส่วนกลางเท่ากันก็สามารถนำค่าการกระจายมาเปรียบเทียบกันได้เลย แต่ถ้าเป็นกรณีที่ข้อมูลแต่ละชุด เป็นข้อมูลที่มีหน่วยวัดต่างกันหรือมีขนาดไม่เท่ากัน หรือค่าแนวโน้มเข้าสู่ส่วนกลางไม่เท่ากัน จะไม่สามารถนำค่าการกระจายมาเปรียบเทียบกันได้ทันที แต่ต้องคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย (Coefficient of Dispersion) ของคะแนนแต่ละชุดแล้วจึงนำค่าสัมประสิทธิ์การกระจายนั้นมาเปรียบเทียบกัน กรณีนี้ไม่สามารถบอกได้ว่าข้อมูลใดมีการกระจายมากกว่ากัน กรณีนี้จะต้องหาค่าสัมประสิทธิ์การกระจายเพื่อนำมาเปรียบเทียบกัน

การหาค่าสัมประสิทธิ์การกระจายมีหลายชนิด แล้วแต่ชนิดของสถิติที่ใช้วัดการกระจายดังต่อไปนี้
กรณีวัดการกระจายด้วยพิสัย

ใช้สัมประสิทธิ์ของพิสัย (Coefficient of Range : C.R.)

$$\text{ใช้สูตร} \quad C.R. = \frac{X_{\max} - X_{\min}}{X_{\max} + X_{\min}} \quad (2.6)$$

กรณีวัดการกระจายส่วนเบี่ยงเบนควอไทล์

ใช้สัมประสิทธิ์ของส่วนเบี่ยงเบนควอไทล์ (Coefficient of Quartile Deviation : C.Q.)

$$\text{ใช้สูตร} \quad C.Q. = \frac{Q_3 - Q_1}{Q_3 + Q_1} \quad (2.7)$$

กรณีวัดการกระจายด้วยส่วนเบี่ยงเบนเฉลี่ย

ใช้สัมประสิทธิ์ของส่วนเบี่ยงเบนเฉลี่ย (Coefficient of Average Deviation)

$$\text{ใช้สูตร} \quad C.A. = \frac{M.D.}{\mu} \quad \text{หรือ} \quad \frac{M.D.}{\bar{x}} \quad (2.8)$$

กรณีวัดการกระจายด้วยส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

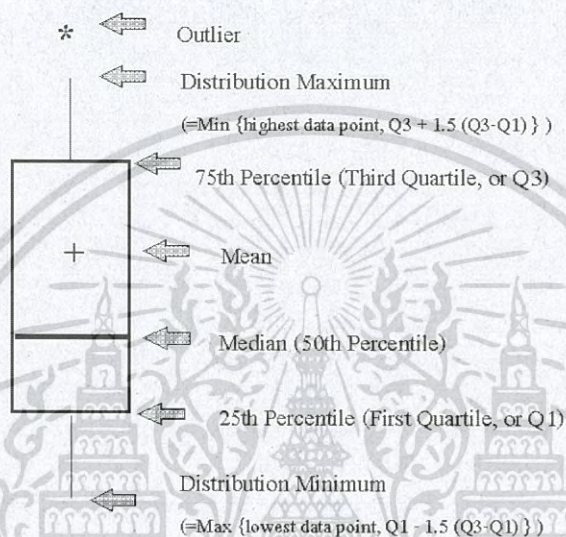
ใช้สัมประสิทธิ์ของความแปรผัน (Coefficient of Variation : C.V.)

ใช้สูตร

$$C.V. = \frac{\sigma}{\mu} \text{ หรือ } \frac{s}{\bar{x}} \quad (2.9)$$

Box Plot

เป็นหนึ่งในวิธีการทางสถิติ ที่ใช้แสดงสาระที่สำคัญของข้อมูลคือ ค่ากลาง ค่าการกระจาย สัดส่วนข้อมูลที่มากหรือน้อยกว่าค่ากลาง (Symmetry) รวมทั้งข้อมูลที่อยู่ห่างจากกลุ่มมาก ๆ (Outlier) ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 โครงสร้างของ Box Plot

Box Plot จะแสดงข้อมูลทั้งหมดออกมา 3 Quartiles โดยมีการจัดเรียงอันดับของข้อมูลแล้ว ข้อมูลที่ตกอยู่ภายใต้ Q_1 (Quartile 1) คือข้อมูล 25 % แรกจากค่าต่ำขึ้นมา จะแสดงในรูปเส้นตรง หนึ่งเส้น (Whisker) ข้อมูลที่ตกอยู่ภายใต้ Q_2 คือข้อมูลตัวที่มากกว่า 25 % จนถึงตัวที่ 75 % โดยแสดงออกมาในรูป สีเหลี่ยมผืนผ้า ภายใน Q_3 นี้ จะมีค่าที่ 50 % ของข้อมูลอยู่ เขียนแทนด้วยเส้นตรงอยู่ภายในรูปสีเหลี่ยมผืนผ้า ค่านี้คือค่าค่ากลางของข้อมูลทั้งหมด (Median) และตรงค่าเฉลี่ย (Mean) จะแทนด้วยเครื่องหมายบวก โดยที่ค่าอาจจะเท่าหรือต่างกับค่า Median ก็ได้ ส่วนค่าที่ตกอยู่ภายใต้ Q_3 คือตัวที่มากกว่า 75 % ขึ้นไป จะเขียนแทนด้วยเส้นตรง เช่นเดียวกับ Q_1 และมี Outlier ค่าสุดโต่ง เป็นค่าที่สูงหรือต่ำผิดปกติ โดยโปรแกรมทางสถิติส่วนใหญ่ นิยม Plot ข้อมูลเป็น Outlier เมื่อข้อมูลนั้น มีค่าน้อยกว่า $Q_1 - 1.5(Q_3 - Q_1)$ หรือมีค่าสูงกว่า $Q_3 + 1.5(Q_3 - Q_1)$

2.6 เซลล์แสงอาทิตย์

กระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ (Photo Current) เกิดจากแสงสว่างไปทำให้เซลล์แสงอาทิตย์สร้างประจุพาหะอิสระ ให้ไหลผ่านโหลดที่ต่ออยู่เป็นสัดส่วนตรงกับความเข้มแสงที่ตกกระทบบนรอยต่อ PN Junction ซึ่งจะเขียนแทนด้วยไดโอดและแหล่งจ่ายกระแส ในสมการที่ (2.10) แสดงถึงคุณลักษณะทางกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งจะเขียนอยู่ในรูปของ ฟังก์ชันเอ็กโปเนนเชียล (Exponential Equation)

$$\text{ใช้สูตร} \quad I = I_{ph} - I_s \left(\exp \frac{q(V + IR_s)}{N \cdot K \cdot T} - 1 \right) - \frac{(V + IR_s)}{R_{sh}} \quad (2.10)$$

เมื่อ I_{ph} คือ กระแสไฟฟ้าที่เกิดจากแสง หน่วยเป็น A

I_s คือ กระแสไบอัสอิมิตีวย้อนกลับของไดโอด หน่วยเป็น A

q คือ ประจุอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ 1.602×10^{-19} C

N คือ Ideal Factor

K คือ ค่าคงที่ของ Boltzman มีค่าเท่ากับ $1.3806504 \times 10^{-23}$ J/Kevin

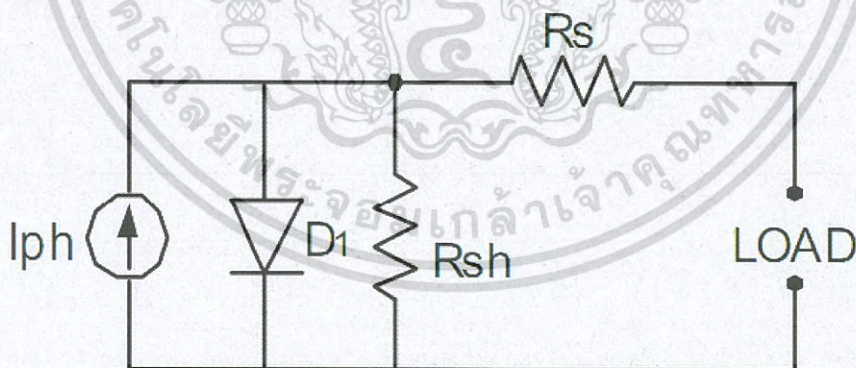
T คือ อุณหภูมิที่รอยต่อขณะทำงานของเซลล์ หน่วยเป็น Kevin

V คือ แรงดันที่ตกคร่อมไดโอด หน่วยเป็น V

R_s คือ ค่าความต้านทานอนุกรมของเซลล์ หน่วยเป็น Ω

R_{sh} คือ ค่าความต้านทานขนานของเซลล์ หน่วยเป็น Ω

ค่า Ideal factor นั้นขึ้นอยู่กับเทคโนโลยีในการผลิตโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 2.13 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์

จากวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ในรูปที่ 2.13 จะเห็นว่ามี 5 ตัวแปรที่มีผลต่อกระแสและแรงดันขาออกของเซลล์แสงอาทิตย์ คือ I_s เป็นผลของไดโอด ค่า I_{ph} เป็นผลของแสงที่ตกกระทบบน และค่า R_s , R_{sh} เป็นค่าความต้านทานซึ่งถือเป็นการสูญเสียที่เซลล์แสงอาทิตย์

ผลกระทบจากระดับของแสงอาทิตย์

ค่า I_{ph} เป็นกระแสที่สร้างขึ้นจากเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้แสงในการเปลี่ยนรูปพลังงาน ซึ่งค่ากระแสที่สร้างขึ้นเป็นสัดส่วน โดยตรงกับความเข้มแสง (Radiation Intensity) และอุณหภูมิตามสมการที่ (2.11)

$$\text{ใช้สูตร} \quad I_{ph} = [I_{SC} + K_I(T - T_{ref})] \lambda \quad (2.11)$$

เมื่อ I_{SC} คือ กระแสลัดวงจรของเซลล์ที่ 25 °C หน่วยเป็น A

K_I คือ สัมประสิทธิ์ อุณหภูมิของกระแสลัดวงจร หน่วยเป็น A/°C

T_{ref} คือ อุณหภูมิอ้างอิงของเซลล์ หน่วยเป็น Kelvin

λ คือ ความเข้มแสง หน่วยเป็น kW/m²

ผลกระทบของอุณหภูมิ

หากกำหนดให้ความเข้มแสงมีค่าคงที่จากสมการที่ (2.11) ค่าอุณหภูมิมีผลกระทบต่อกำลังไฟฟ้าขาออกของเซลล์แสงอาทิตย์ เนื่องจากค่ากระแสลัดวงจรสัมพันธ์กับอุณหภูมิ อีกทั้งอุณหภูมียังมีผลกระทบต่อกระแสไบอัสอิ่มตัวย้อนกลับของไดโอดที่เรียกว่า Reverse Saturation Current of Diode I_s ดังสมการที่ (2.12)

$$\text{ใช้สูตร} \quad I_s(T) = I_s \left[\frac{T}{T_{ref}} \right]^3 \exp \left[\left(\frac{T}{T_{ref}} - 1 \right) \frac{E_g}{N V_t} \right] \quad (2.12)$$

เมื่อ E_g คือ Band Gap Energy of Semiconductor

V_t คือ Thermal Voltage at Room Temperature

แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (PV Module)

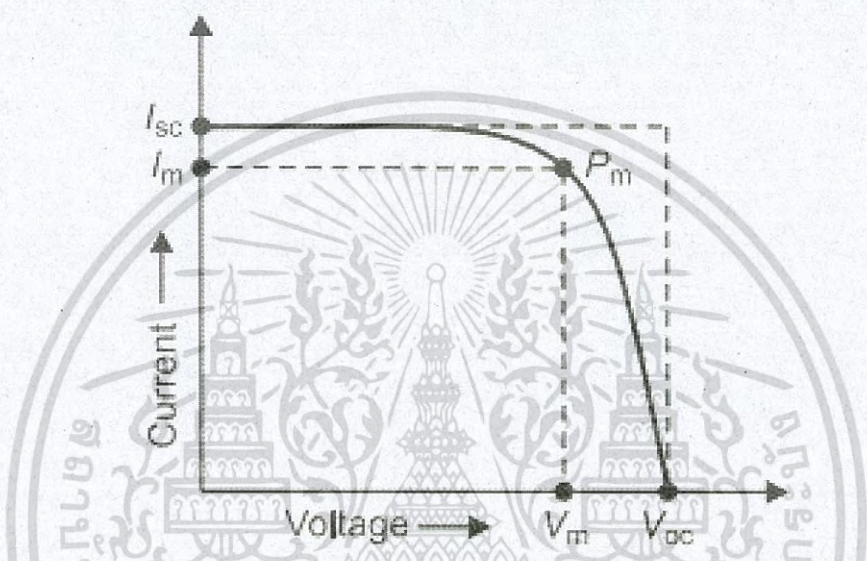
แผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบโมดูล เป็นการนำเซลล์แสงอาทิตย์มาต่อแบบอนุกรมเพื่อเพิ่มแรงดันให้เหมาะสมกับพิกัดแรงดันของแบตเตอรี่คือ 12 V ส่วนการต่อแบบขนานจะเป็นการเพิ่มกระแสไฟฟ้า โดยแรงดันและกระแสของเซลล์จะแปรผันตามตัวแปรในสมการที่ (2.11) หากไม่คิดผลของ R_s และ R_{sh} จะได้สมการของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตามสมการที่ (2.13)

$$\text{ใช้สูตร} \quad I = (n_p \times I_{ph}) - (n_p \times I_s) \left(\exp \frac{qV}{NKTn_s} - 1 \right) \quad (2.13)$$

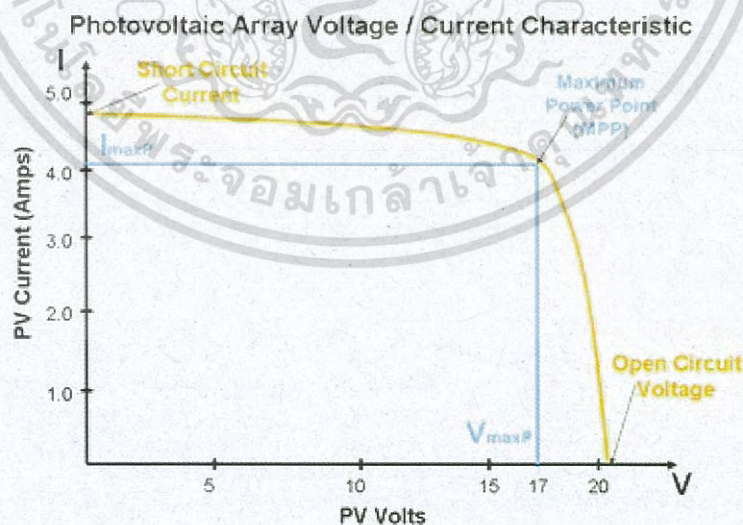
เมื่อ n_p คือ จำนวนเซลล์ที่ต่อขนาน และ n_s คือจำนวนเซลล์ที่ต่ออนุกรม

กราฟคุณลักษณะกระแส - แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ (I-V Curve)

คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์สามารถแสดงได้โดยใช้ I-V Curve ซึ่งใช้ตรวจสอบกำลังผลิตสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ หากอุณหภูมิของเซลล์และปริมาณความเข้มแสงที่ตกกระทบแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าคงที่สามารถสร้าง I-V Curve ได้ดังรูปที่ 2.14 ซึ่งจะมีจุดสำคัญที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุดเรียกว่า Maximum Power Point (MPP หรือ P_{max})



รูปที่ 2.14 กราฟคุณลักษณะกระแส - แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 2.15 แสดงค่า Fill Factor ของเซลล์แสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการพิจารณาคุณลักษณะทางกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ จะมีพารามิเตอร์ที่สำคัญที่จะต้องเกี่ยวข้องดังต่อไปนี้ แรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจร (Open Circuit Voltage : V_{oc}), กระแสขณะลัดวงจร (Short Circuit Current : I_{sc}), กำลังไฟฟ้าสูงสุด (Maximum Power Point : MPP), กระแสไฟฟ้าสูงสุด (Maximum Power Current : I_{mp}) และแรงดันไฟฟ้าสูงสุด (Maximum Power Voltage : V_{mp}) นอกจากนั้นยังมีค่าที่เกี่ยวข้องกับคุณภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ ได้แก่

อัตราส่วนของกำลังไฟฟ้าสูงสุดต่อผลคูณระหว่างกระแสขณะลัดวงจรกับค่าแรงดันขณะเปิดวงจร เรียกว่า ค่าฟิลล์แฟคเตอร์ (Fill Factor : FF) ดังรูปที่ 2.15 เป็นค่าที่แสดงถึงคุณภาพของโซลาร์เซลล์ โดยสามารถเขียนเป็นสมการที่ (2.14)

$$\text{ใช้สูตร} \quad FF = \frac{V_{mp} I_{mp}}{V_{oc} I_{sc}} \quad (2.14)$$

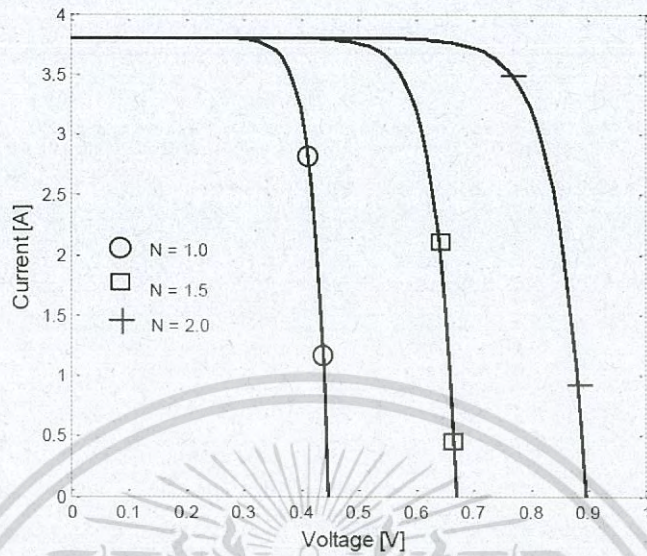
ประสิทธิภาพของโซลาร์เซลล์ หาได้จากอัตราส่วนของกำลังไฟฟ้าด้านออกต่อกำลังแสงอาทิตย์ด้านเข้า (P_{in}) สามารถเขียนเป็นสมการที่ (2.15)

$$\text{ใช้สูตร} \quad \eta = \frac{V_{oc} I_{sc} \times FF}{P_{in}} \quad (2.15)$$

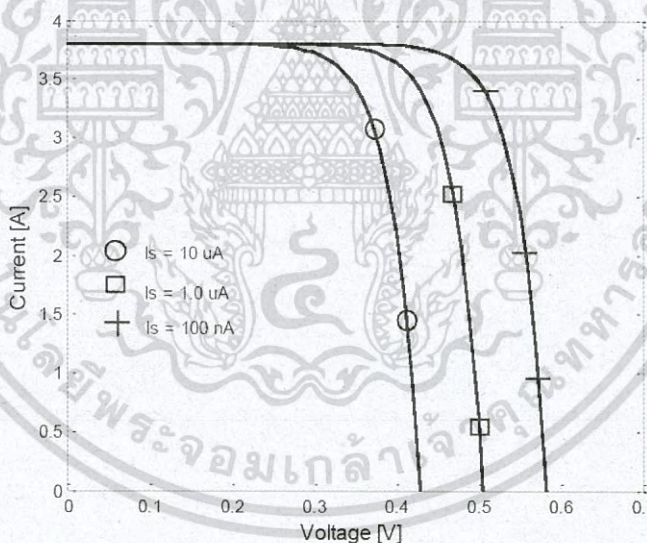
ผลการจำลองระบบ

ผลของไดโอด (Ideal Factor and Reverse Saturation Current of Diode)

ค่า N ของเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิคอนมีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 2 ขึ้นอยู่กับการผลิตโครงสร้างของเซลล์โดยดูจากตารางที่ 2.1 ในการจำลองได้ทดสอบที่ค่า N เป็น 1.0, 1.5 และ 2.0 ได้ผลตามรูปที่ 2.16 ส่วนค่ากระแสรั่วในสภาวะอิมิตัวขณะจ่ายไบอัสกลับในการจำลองได้ทดสอบที่ค่า I_s เป็น 100 nA, 1 μ A และ 10 μ A ได้ผลตามรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.16 ผลการจำลองผลกระทบของค่า N

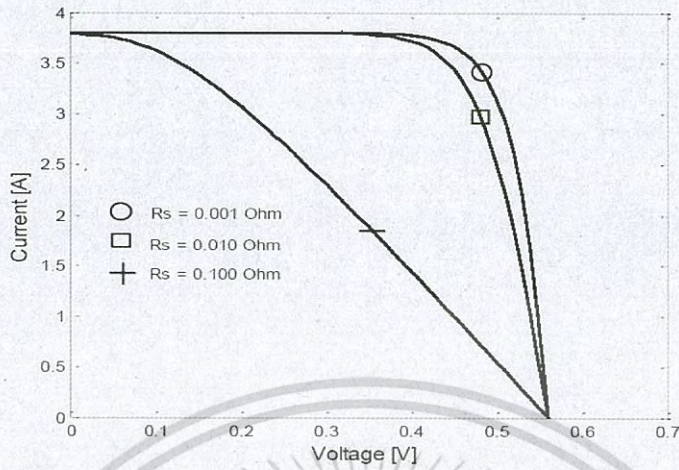


รูปที่ 2.17 ผลการจำลองผลกระทบของค่า I_s

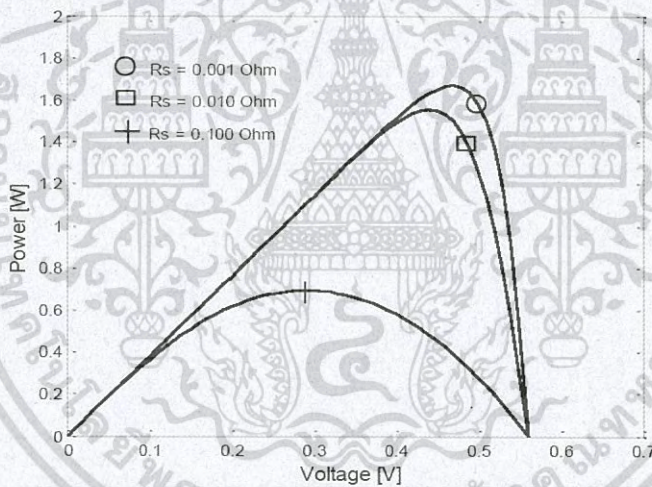
ผลของความต้านทานอนุกรม (Series Resistance)

ค่า R_s เป็นความต้านทานของซิลิคอนที่เรียงกันเป็นชั้นร่วมกับความต้านทานของขั้วโลหะด้านหน้าและด้านหลังจุดต่อกับขั้วภายนอกในการจำลองได้ทดสอบที่ค่า R_s เป็น 1 mΩ, 0.01 Ω และ 0.1 Ω ได้ผลกราฟกระแสต่อแรงดันตามรูปที่ 2.18 และกราฟกำลังไฟฟ้า - แรงดันไฟฟ้าตามรูปที่ 2.19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.18 กราฟ I-V Curve ผลการจำลองผลกระทบของค่า R_s

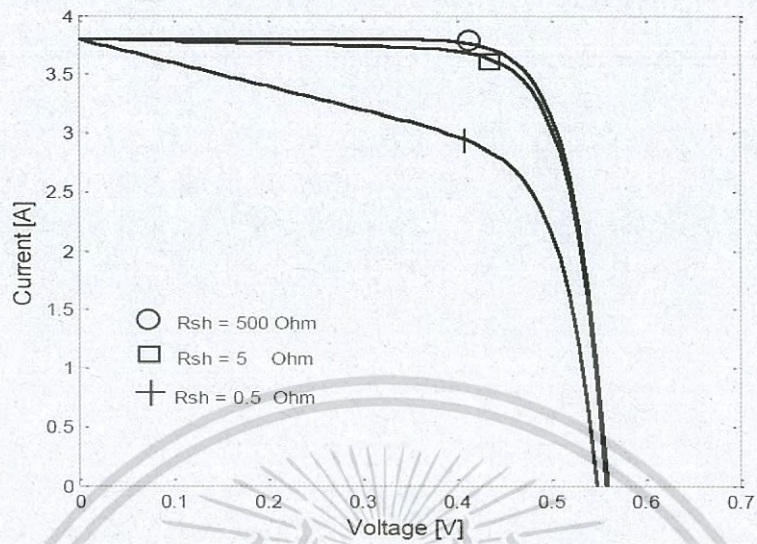


รูปที่ 2.19 กราฟ P-V Curve ผลการจำลองผลกระทบของค่า R_s

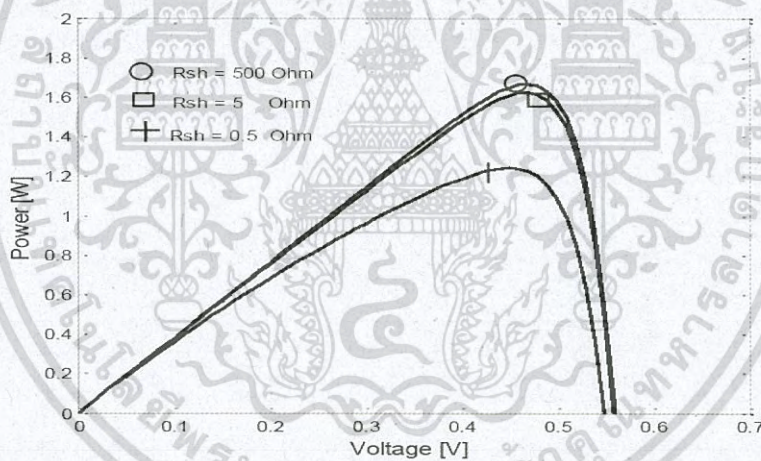
ผลของความต้านทานขนาน (Shunt Resistance)

ค่า R_{sh} เป็นการรั่วไหลของกระแสเนื่องจากรอยต่อ P-N Junction ที่ไม่สมบูรณ์ทำให้เกิดการลัดวงจรบางส่วนโดยเฉพาะใกล้กับขอบของเซลล์ในการจำลองได้ทดสอบที่ค่า R_{sh} เป็น 500 Ω , 5 Ω และ 0.5 Ω ได้ผลกราฟกระแส - แรงดันตามรูปที่ 2.20 และกราฟกำลังไฟฟ้า - แรงดันไฟฟ้าตามรูปที่ 2.21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.20 กราฟ I-V Curve ผลการจำลองผลกระทบของค่า R_{sh}

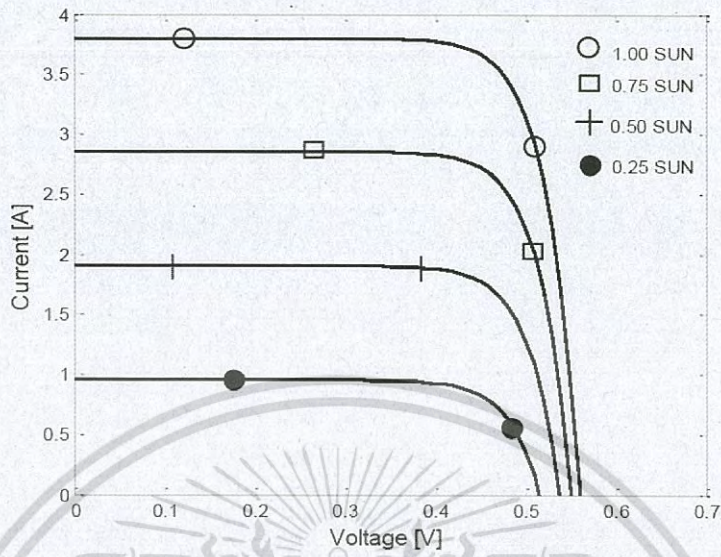


รูปที่ 2.21 กราฟ P-V Curve ผลการจำลองผลกระทบค่า R_{sh}

ผลของความเข้มแสง (Radiation Intensity)

ความเข้มแสงเป็นตัวแปรหลักในการจ่ายกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยกระแสโฟโต้ที่เกิดขึ้นต่อแสงสว่างจะมีสัดส่วนที่เป็นเชิงเส้นกับแสงสว่างของดวงอาทิตย์ กำหนด I_{sc} เป็น 3.8 A ที่ STC (ความเข้มแสง 1000 W/m^2 อุณหภูมิ 25°C , AM=1.5) ในการจำลองได้ทดสอบที่ค่าความเข้มแสง λ เป็น 1.00 sun, 0.75 sun, 0.50 sun และ 0.25 sun (อุณหภูมิคงที่ 25°C) ได้ผลกราฟกระแส - แรงดันตามรูปที่ 2.22 และกราฟกำลังไฟฟ้า - แรงดันไฟฟ้าตามรูปที่ 2.23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



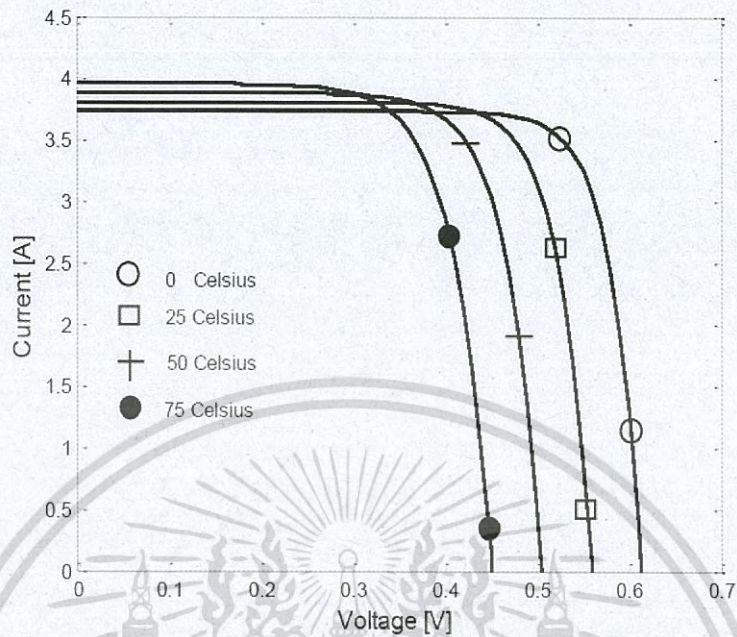
รูปที่ 2.22 กราฟ I-V Curve ผลการจำลองผลกระทบของค่า λ



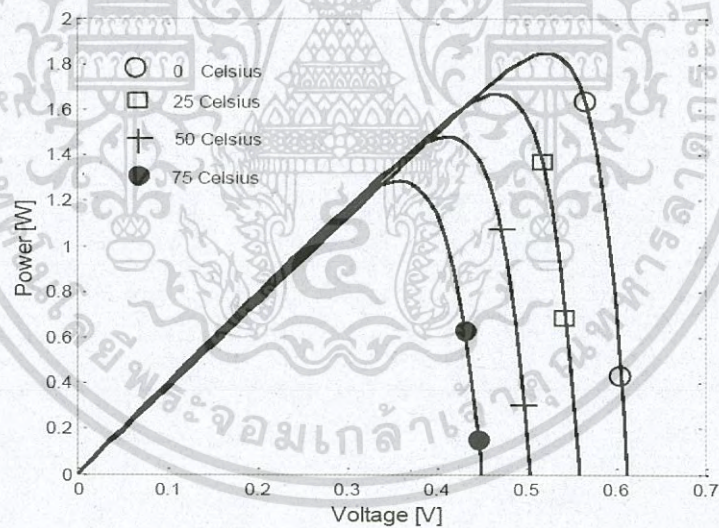
รูปที่ 2.23 กราฟ P-V Curve ผลการจำลองผลกระทบของค่า λ

ผลของอุณหภูมิ (Cell Temperature)

อุณหภูมิของเซลล์ที่สูงขึ้นจะทำให้อิเล็กทรอนิกส์รอยต่อ P-N มีพลังงานในการเคลื่อนตัว จึงทำให้กระแสตรงเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิแต่ไม่มากนักในการจำลองได้ทดสอบที่ค่า T เป็น 0°C, 25°C, 50°C และ 75°C (ความเข้มแสง 1000 W/m²) ได้ผลกราฟกระแส - แรงดันตามรูปที่ 2.24 และกราฟกำลังไฟฟ้า - แรงดันไฟฟ้าตามรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.24 กราฟ I-V Curve ผลการจำลองผลกระทบของค่า T



รูปที่ 2.25 กราฟ P-V Curve ผลการจำลองผลกระทบของค่า T

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 การทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสาเหตุการเสื่อมสภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

จากการศึกษาวิจัยเรื่องปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการลดลงของประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ พบว่า ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์จะค่อย ๆ ลดลงไปตามอายุการใช้งาน นอกจากการเสื่อมสภาพตามอายุการใช้งานแล้ว ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ยังขึ้นอยู่กับปัจจัยภายนอกและคุณสมบัติภายในตัวเซลล์แสงอาทิตย์ ได้แก่ สภาพแวดล้อม อุณหภูมิ ความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ ชนิดของโซลาร์เซลล์ วัสดุที่ใช้ในการประกอบแผง การยึดและการติดตั้งแผง ความต้านทานขนานและความต้านทานอนุกรม เป็นต้น

จากการศึกษาของ Edson and Ernest (2004) และ Manish and Arun (2017) พบว่าจากปัจจัยที่กล่าวมาส่งผลให้เกิดสภาวะการเสื่อมสภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้ ดังนี้

2.7.1 Discoloration คือ ปรากฏการณ์การเกิดการเปลี่ยนสีของตัวห่อหุ้มแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เริ่มจากมีลักษณะเป็นจุดเล็ก ๆ สีน้ำตาลแล้วค่อย ๆ ขยายตัวใหญ่ขึ้นเป็นวงสีน้ำตาลขนาดใหญ่บนตัวห่อหุ้มแผงเซลล์แสงอาทิตย์ดังแสดงในรูปที่ 2.26 ส่งผลให้ความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ที่เข้าสู่เซลล์แสงอาทิตย์ผ่านได้น้อยลง ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้มีค่าลดลงด้วย โดยสาเหตุหลักของปรากฏการณ์นี้คือ ความเกาะแน่นของกระจกกับตัวเซลล์แสงอาทิตย์ สภาพแวดล้อมที่แห้งแล้งและการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้อุณหภูมิสูงติดต่อกันเป็นระยะเวลานาน โดยปรากฏการณ์นี้สามารถสังเกตเห็นได้ด้วยตาเปล่า

2.7.2 Cracking of Solar Cell and Glass Breakage คือ ปรากฏการณ์ที่ตัวแผงเซลล์แสงอาทิตย์เกิดรอยแตก หรือ กระจกที่ห่อหุ้มตัวเซลล์แสงอาทิตย์มีรอยแตกเกิดขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.27 ซึ่งทำให้ความสามารถในการผลิตกำลังไฟฟ้าลดลง โดยสาเหตุหลักของปรากฏการณ์นี้เกิดจากการได้รับแรงทางกลหรือความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิ อาจเกิดในขั้นตอนการติดตั้ง บำรุงรักษา หรือเกิดการกระแทกระหว่างการขนย้าย ปรากฏการณ์นี้มีทั้งที่สามารถเห็นได้ด้วยตาเปล่า และไม่สามารถเห็นได้ด้วยตาเปล่า เนื่องจากรอยแตกมีขนาดเล็กมากระดับไมโครเมตร

2.7.3 AR Coating (ARC) Degradation คือ ปรากฏการณ์ที่สารเคลือบกันแสงสะท้อนของกระจกเกิดการเสื่อมสภาพ ดังแสดงในรูปที่ 2.28 ทำให้ความเข้มแสงอาทิตย์ที่ผ่านผิวกระจกลดน้อยลง ส่งผลให้การผลิตกำลังไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์เกิดขึ้นน้อยลง สาเหตุเกิดจากเศษสิ่งสกปรกและผงฝุ่นต่าง ๆ

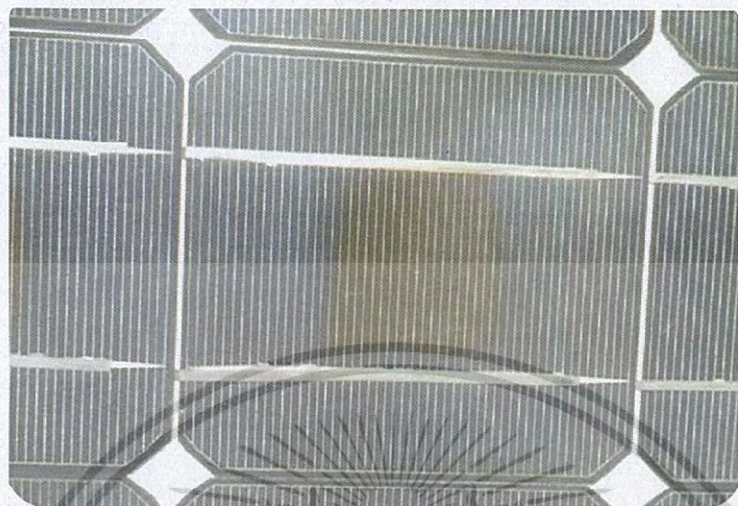
2.7.4 Solder Bond คือปรากฏการณ์การเกิดจุดไหม้ เนื่องจากการเชื่อมต่อระหว่างสตริง ดังแสดงในรูปที่ 2.29 การเชื่อมต่อที่ไม่ดีอาจก่อให้เกิดการแยกตัวระหว่างเซลล์ ส่งผลให้ความต้านทานอนุกรมมีค่าสูงขึ้น และเป็นผลให้กำลังไฟฟ้าที่จะผลิตได้มีค่าลดลง

2.7.5 Hot Spots คือปรากฏการณ์การเกิดจุดร้อนหรือบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงขึ้นบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ดังแสดงในรูปที่ 2.30 ซึ่งก่อให้เกิดความเสียหายต่อตัวเซลล์ได้ โดยสาเหตุหลักเกิดจากปรากฏการณ์การเกิดเงาบังบางส่วน (Partial Shading) เนื่องจากเซลล์ที่ถูกเงาบังจะทำหน้าที่เป็นภาระทางไฟฟ้าแทนที่จะเป็นแหล่งจ่ายพลังงาน ส่งผลให้เกิดกระแสไหลย้อนกลับไปยังเซลล์นั้นและเกิดความร้อนที่ตัวเซลล์สูงขึ้นผิดปกติ

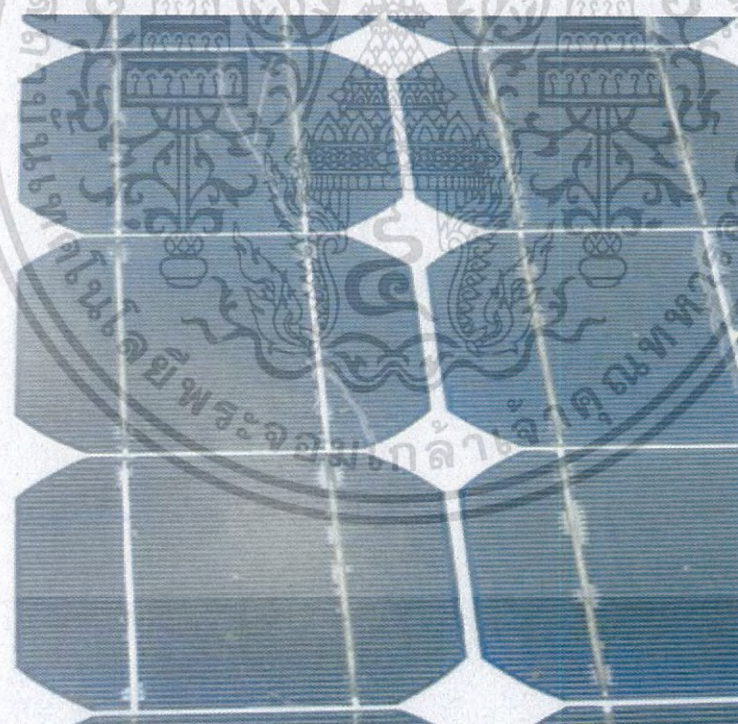
2.7.6 Front Surface Soiling คือปรากฏการณ์การปนเปื้อนจากเศษฝุ่นสิ่งสกปรกต่าง ๆ ซึ่งเกิดขึ้นแล้วแต่สภาพแวดล้อม เช่น อาจเกิดจากควันของยานพาหนะ โรงงานอุตสาหกรรม พายุ แม้กระทั่งขึ้นนก เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 2.31 แม้ว่าจะจะเป็นเศษฝุ่นเล็ก ๆ ที่มาบังอยู่บนตัวหุ้มแผงโซลาร์เซลล์ ก็สามารถส่งผลให้ความเข้มแสงที่จะผ่านเข้าตัวเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าลดลงได้ และถ้าขนาดของการปนเปื้อนมีมากขึ้นก็สามารถส่งผลทำให้ประสิทธิภาพการผลิตกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ลดลงได้อย่างรุนแรงเช่นกัน

2.7.7 Delamination คือปรากฏการณ์การเกิดการแยกชั้นของวัสดุที่ใช้ห่อหุ้มตัวแผงเซลล์แสงอาทิตย์กับเซลล์แสงอาทิตย์ มักเกิดขึ้นบริเวณขอบของเซลล์แสงอาทิตย์ ดังแสดงในรูปที่ 2.32 ส่งผลให้เกิดการสะท้อนกลับของรังสีแสงอาทิตย์มากขึ้นและอาจทำให้เกิดการซึมผ่านของน้ำเข้าไปภายในโครงสร้างของตัวแผงเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งอาจก่อให้เกิดความเสียหายได้ โดยสาเหตุหลักเกิดจากการเลือกวัสดุที่ใช้ในการห่อหุ้มไม่ได้มาตรฐานและความผิดพลาดในขั้นตอนการประกอบ

จากปรากฏการณ์ที่กล่าวมาทั้งหมด อาจแยกสาเหตุที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์ดังกล่าวได้ตามรูปที่ 2.33 สาเหตุและปรากฏการณ์ที่กล่าวมาทั้งหมดเป็นแค่สาเหตุและปรากฏการณ์หลัก ๆ ที่พบเจอได้บ่อยและมีความสำคัญอย่างมากต่อการลดลงของประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ในความเป็นจริงอาจมีสาเหตุและปรากฏการณ์อื่น ๆ มากกว่านี้ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ เนื่องจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็นอุปกรณ์ที่ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่างทั้งปัจจัยที่ควบคุมได้และควบคุมไม่ได้ดังที่กล่าวมาข้างต้น ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องควบคุมปัจจัยต่าง ๆ ที่สามารถควบคุมได้ ให้เหมาะสมกับการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์และมีการตรวจสอบประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์อย่างสม่ำเสมอ เพื่อให้การทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพมากที่สุด

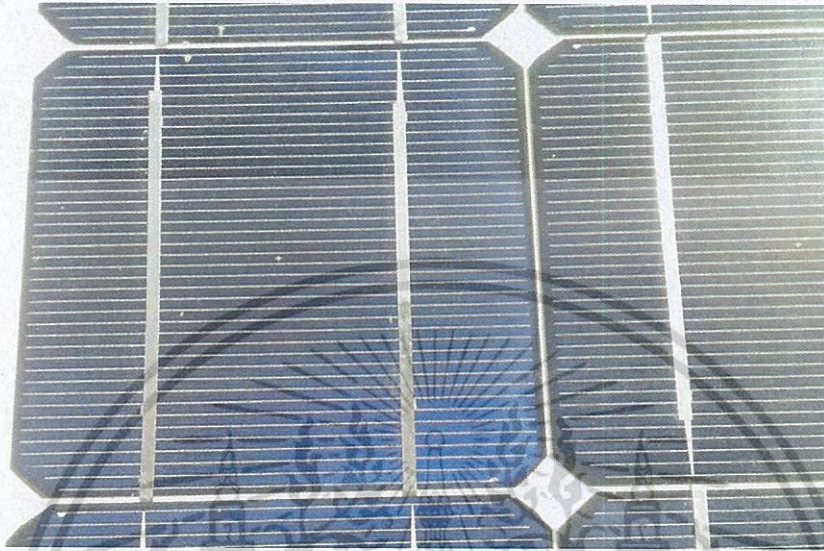


รูปที่ 2.26 ปรากฏการณ์การเปลี่ยนสีของเซลล์แสงอาทิตย์

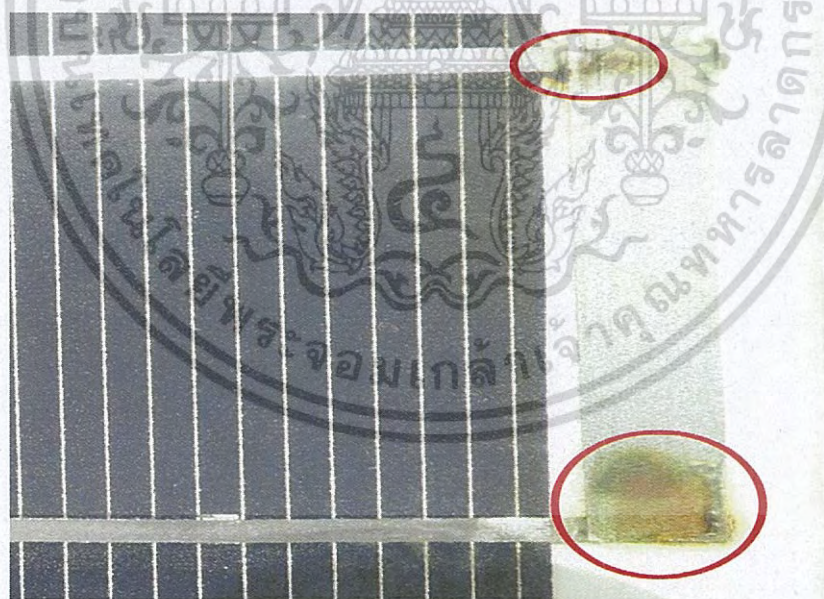


รูปที่ 2.27 แผงเซลล์แสงอาทิตย์เกิดรอยแตก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

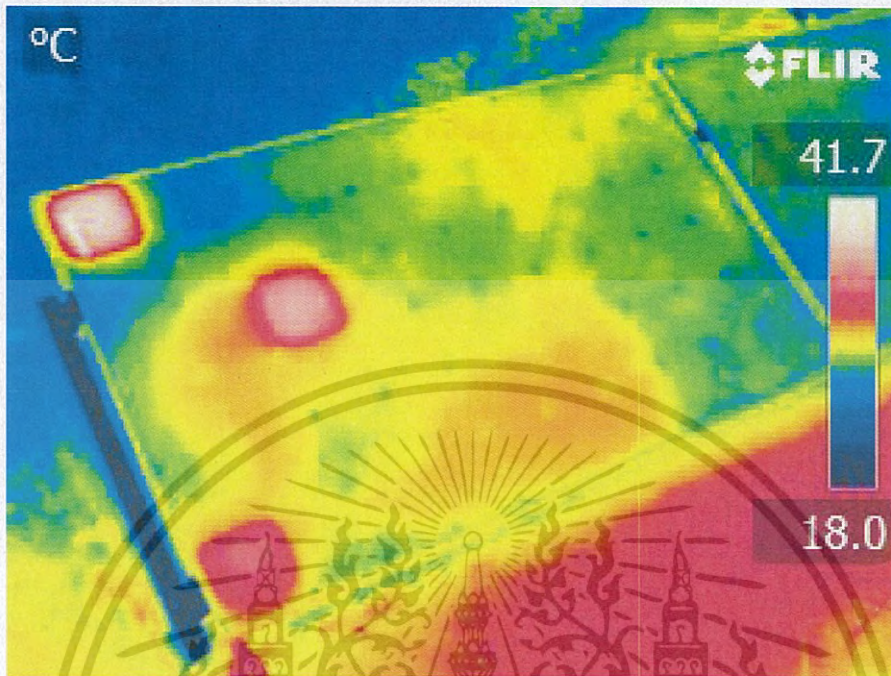


รูปที่ 2.28 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการเสื่อมสภาพของสารป้องกันการสะท้อนแสง



รูปที่ 2.29 การเกิดรอยไหม้ระหว่างการเชื่อมต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

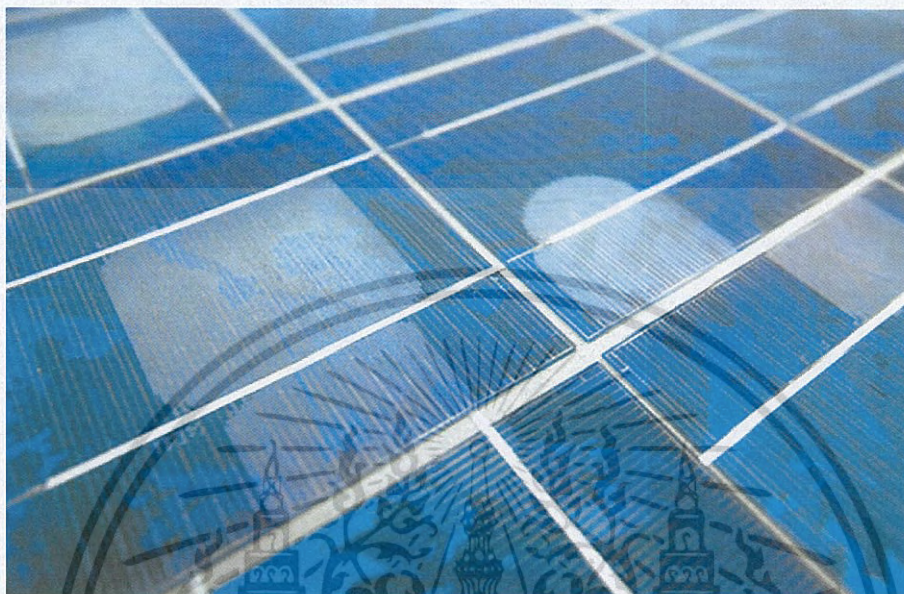


รูปที่ 2.30 การเกิดจุดร้อนขึ้นบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์



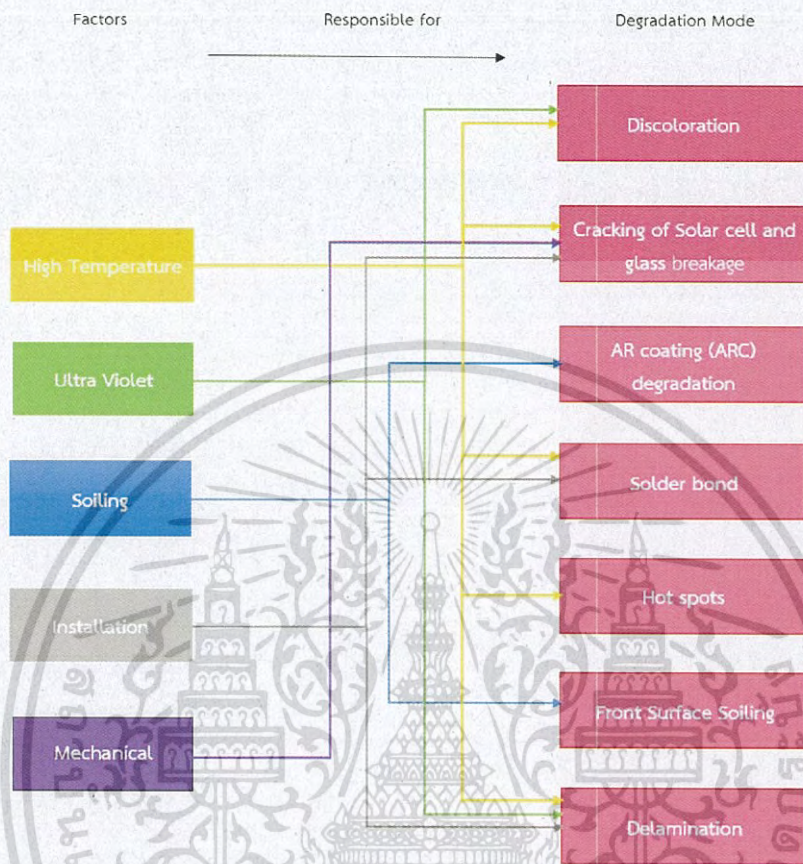
รูปที่ 2.31 การปนเปื้อนเศษสิ่งสกปรกต่าง ๆ บริเวณขอบเซลล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.32 การแยกชั้นของตัววัสดุที่ห่อหุ้มเซลล์แสงอาทิตย์กับเซลล์แสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.33 ปัจจัยที่มีผลต่อการเสื่อมสภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่าง ๆ

ที่มา ดัดแปลงจาก Arun (2017)

2.8 สรุป

เซลล์แสงอาทิตย์ คือ สิ่งประดิษฐ์ที่เมื่อได้รับแสงอาทิตย์ก็จะเปลี่ยนเป็นไฟฟ้ากระแสตรง โดยวิธีที่นำมาใช้ในปริมาณหนึ่ง เล่มนี้ จะนำวิธีเชิงสถิติมาอธิบายลักษณะการกระจายของข้อมูล โดยจะมีการหาขอบเขตบนและขอบเขตล่าง ซึ่งตัวแปรที่นำมาใช้หาขอบเขตบนและขอบเขตล่างคือ คิวไทล์ที่ 1 และคิวไทล์ที่ 3 ถ้าข้อมูลใดหลุดออกจากขอบเขตก็จะแสดงว่าข้อมูลนั้นมีความผิดปกติเกิดขึ้น

จากการศึกษาเรื่องปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อ การลดลงของประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ พบว่า ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์จะค่อย ๆ ลดลงไปตามอายุการใช้งาน นอกจากการเสื่อมสภาพตามอายุการใช้งานแล้ว ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ยังขึ้นอยู่กับปัจจัยภายนอกและคุณสมบัติภายในตัวเซลล์แสงอาทิตย์ ได้แก่ สภาพแวดล้อม อุณหภูมิ ความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ ชนิดของโซลาร์เซลล์ วัสดุที่ใช้ในการประกอบแผง การยึดและการติดตั้งแผง ความต้านทานขนานและความต้านทานอนุกรม เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

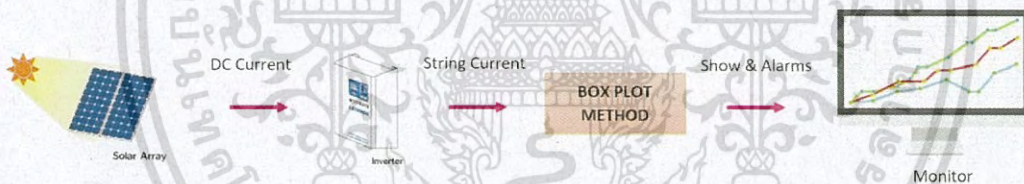
บทที่ 3

การออกแบบและการสร้างอุปกรณ์

3.1 บทนำ

ในการออกแบบระบบการตรวจจัดการเสื่อมสภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ จากการศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้องทั้งเรื่องระบบที่ติดตั้งในโซลาร์ฟาร์ม ผลกระทบที่คาดว่าจะเกิดขึ้น และการแก้ไขปัญหาหากพบว่ามีผลกระทบเกิดขึ้น จึงได้ทำการจำลองระบบเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดย่อมขึ้นมา แล้วทำการจำลองสถานการณ์การเสื่อมสภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขึ้นมา แล้วทำการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์ โดยใช้โปรแกรม PSIM, MATLAB และ Microsoft Excel ซึ่งในบทนี้จะกล่าวถึงการศึกษาทดลองและออกแบบการเทคนิคที่ใช้ในการตรวจจัดการเสื่อมสภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธี Box Plot

3.2 แผนผังภาพรวมระบบที่ใช้เทคนิคการตรวจจัดการเสื่อมสภาพของเซลล์แสงอาทิตย์โดยวิธี Box Plot

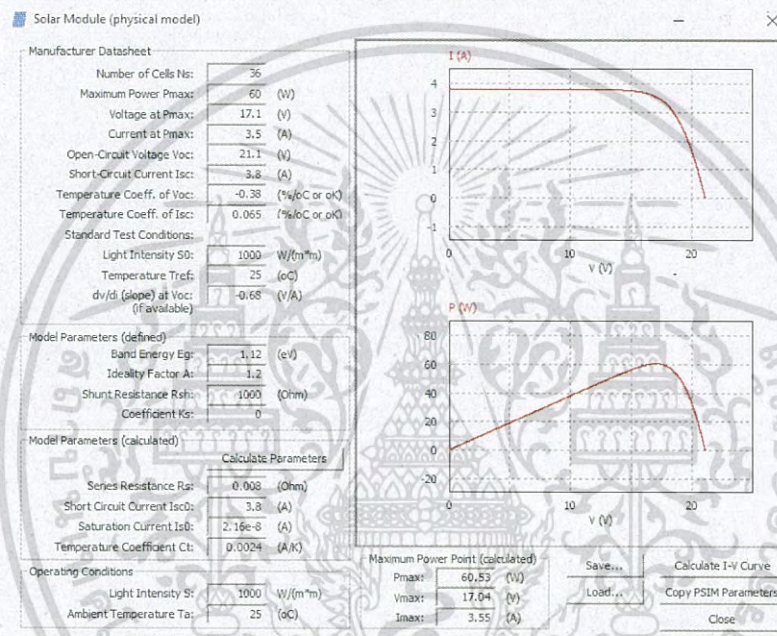


รูปที่ 3.1 แผนผังภาพรวมระบบที่ใช้เทคนิคการตรวจจัดการเสื่อมสภาพของเซลล์แสงอาทิตย์โดยวิธี Box Plot

ระบบการตรวจจัดการเสื่อมสภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธีการ Box Plot แสดงดังรูปที่ 3.1 โดยเริ่มต้นจาก กลุ่มแผงเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อได้รับพลังงานแสงอาทิตย์จะผลิตกระแสไฟฟ้ากระแสตรงส่งผ่านอินเวอร์เตอร์เพื่อแปลงเป็นกระแสไฟฟ้าสลับ โดยภายในตัวอินเวอร์เตอร์จะมีระบบบันทึกข้อมูลกระแสที่ผลิตได้ระดับสตริงแบบเรียลไทม์ การใช้วิธีการ Box Plot เป็นการนำค่ากระแสไฟฟ้าระดับสตริงที่ได้จากอินเวอร์เตอร์มาวิเคราะห์ตามหลักการทางสถิติเพื่อหาขอบเขตและทำการแยกข้อมูลที่มีความผิดปกติไปจากชุดข้อมูลนั้น ๆ ด้วยวิธีการทางสถิติโดยใช้การเขียน Code ผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ หลังจากนั้นจะแสดงผลผ่านหน้าจอคอมพิวเตอร์ และทำการแจ้งเตือนเมื่อมีการตรวจพบเจอการเสื่อมสภาพของกลุ่มแผงเซลล์แสงอาทิตย์ผ่านความผิดปกติของกระแสระดับสตริง

3.3 การจำลองการใช้เทคนิคการตรวจจับการเสื่อมสภาพของแผงโซลาร์เซลล์ ด้วยวิธีการ Box Plot

ในหัวข้อนี้ได้มีการจำลองกลุ่มวงจรย่อยของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขึ้นมา เพื่อนำค่ากระแสตรงที่ได้ไปใช้ในการทดลองวิเคราะห์ข้อมูลผ่านวิธีการ Box Plot โดยใช้โปรแกรม PSIM ในการจำลองได้สร้างกลุ่มวงจรย่อยของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ระดับอาคารขึ้นมาซึ่งประกอบด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดกันจำนวน 4 สตริง แต่ละสตริงมีแผงเซลล์แสงอาทิตย์ต่ออนุกรมกันจำนวน 5 แผง และมีการกำหนดค่าพารามิเตอร์พื้นฐานต่าง ๆ ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ค่าพารามิเตอร์พื้นฐานระดับแผงที่ใช้ในวงจร Simulation

การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีการ Box Plot เป็นการใช่วิธีการทางสถิติเพื่อหาชุดข้อมูลที่มีความผิดปกติจากกลุ่มข้อมูลนั้น ๆ โดยใช้การกำหนดขอบเขตบนและขอบเขตล่าง แล้วดูว่าข้อมูลใดที่อยู่นอกขอบเขตข้อมูลนั้น จัดเป็นข้อมูลที่มีความผิดปกติ โดยการหาขอบเขตบนและขอบเขตล่างทำได้ ดังนี้

$$\text{Upper Bound} = Q_3 + 1.5(Q_3 - Q_1) \quad (3.1)$$

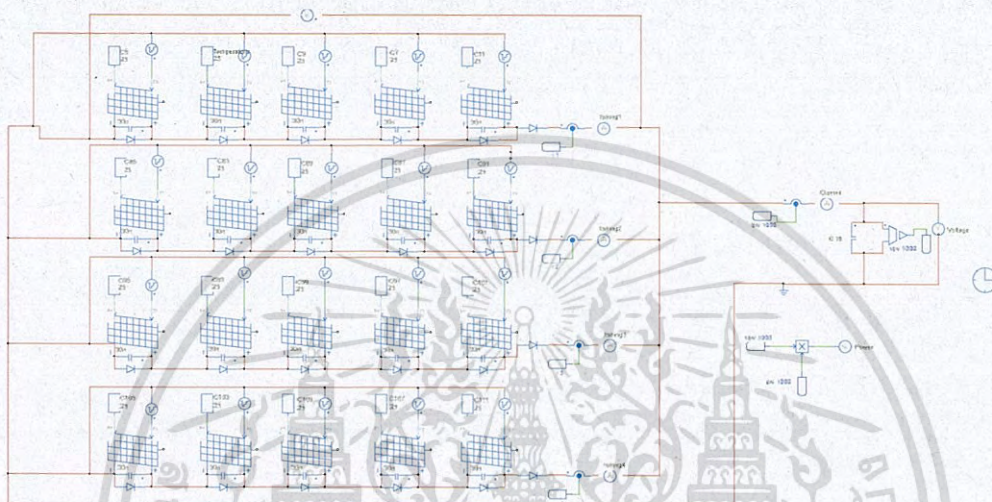
$$\text{Lower Bound} = Q_1 - 1.5(Q_3 - Q_1) \quad (3.2)$$

เมื่อ Q_1 คือ ค่าของ ควอไทล์ที่ 1

และ Q_3 คือ ค่าของ ควอไทล์ที่ 3

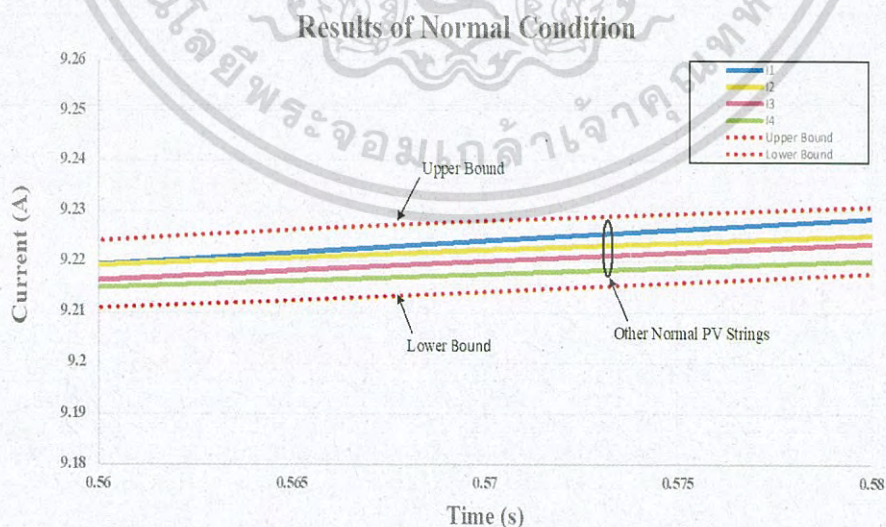
ในการทดลองได้กำหนดให้มีเงื่อนไขการเชื่อมสภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แตกต่างกันทั้งหมด 6 สภาวะ ดังนี้

3.3.1 Normal Condition ในสภาวะนี้ได้มีการเปลี่ยนค่าความเข้มแสงตั้งแต่ 0-1100 W/m² ทั้งอาเรย์ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์หาค่ากระแสตรงในสภาวะปกติ วงจรที่ใช้แสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 Normal Condition

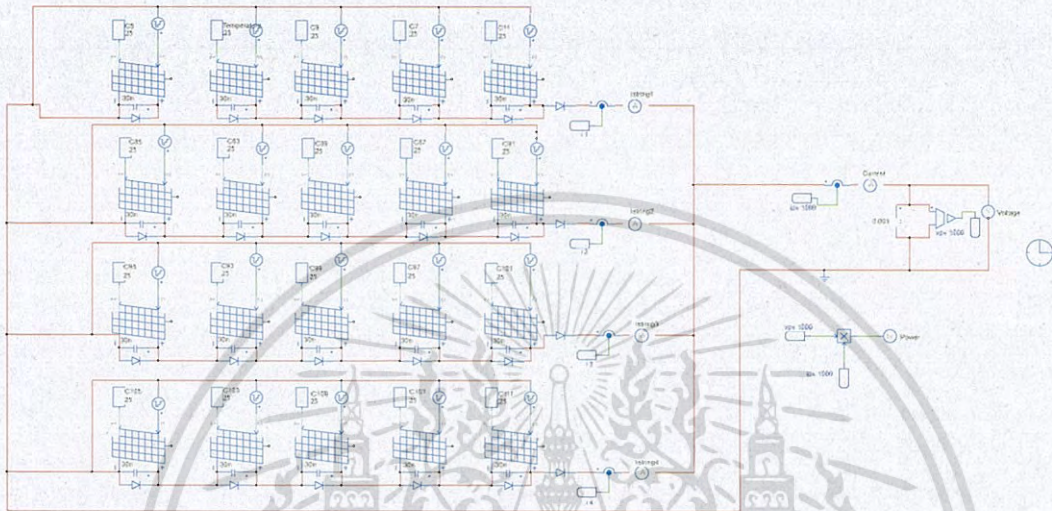
จากการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีการ Box Plot ในกรณี Normal Condition ค่าข้อมูลที่ได้แสดงในตารางที่ ค.1 พบว่าค่าของกระแสไฟฟ้าทุกสตริงอยู่ในช่วงขอบเขตบนและขอบเขตล่าง จึงไม่มีความผิดปกติเกิดขึ้น ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ภาพการทำงานภายใต้เงื่อนไข Normal Condition

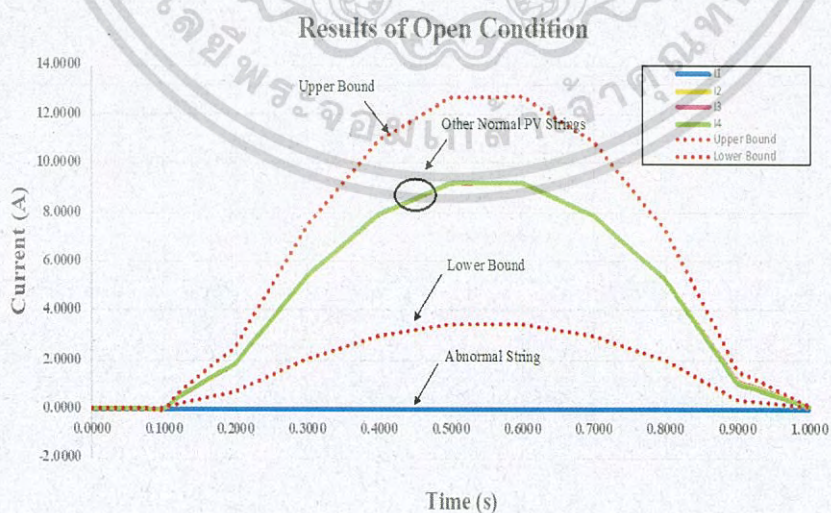
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 Open Circuit Condition เป็นการจำลองสมภาวะการเสื่อมสภาพเนื่องจากการเปิดวงจร โดยอาจเกิดจาก สายหลุด หรือ ฟิวส์ขาด เป็นต้น ในสถานะนี้มีการเปลี่ยนค่าความเข้มแสงตั้งแต่ 0-1100 W/m^2 ทั้งอาร์เรย์ และมีการเปิดวงจรบริเวณสตริงที่ 1 แสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 Open Circuit Condition

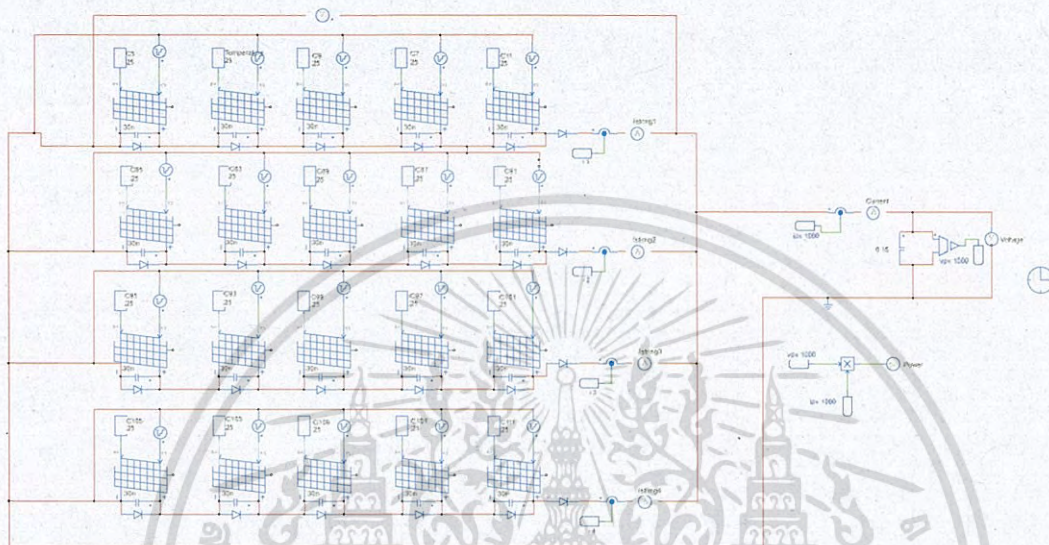
จากการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีการ Box Plot ในกรณี Open Circuit Condition ค่าข้อมูลที่ได้แสดงในตารางที่ ค.2 พบว่าค่าของกระแสไฟฟ้าที่สตริง 2, 3 และ 4 นั้นมีค่าอยู่ในช่วงขอบเขตบนและขอบเขตล่าง ในขณะที่ค่าของกระแสไฟฟ้าที่สตริง 1 มีค่ากลายเป็น 0 A และมีค่าต่ำกว่าขอบเขตล่างตลอดช่วงการทดสอบจึงสรุปได้ว่าที่สตริง 1 มีความผิดปกติเกิดขึ้น ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ภาวะการทำงานภายใต้เงื่อนไข Open Circuit Condition

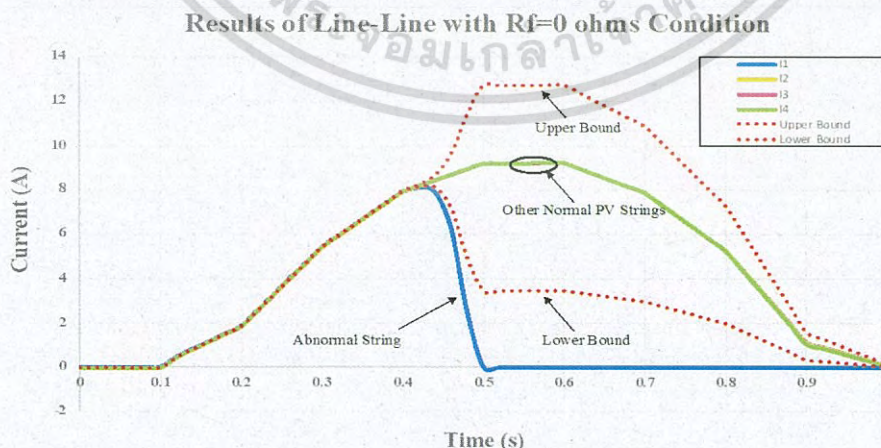
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 Line-Line (Fault Resistance = 0 Ω) เป็นการจำลองสภาวะการเสื่อมของประสิทธิภาพ เนื่องจากเกิดการลัดวงจรโดยมีความต้านทาน 0 Ω ในสภาวะนี้มีการเปลี่ยนค่าความเข้มแสงตั้งแต่ 0-1100 W/m² ทั้งอาร์เรย์ และมีการลัดวงจรเกิดขึ้นบริเวณสตริงที่ 1 แสดงดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 Line-Line Condition (Fault Resistance = 0 Ω)

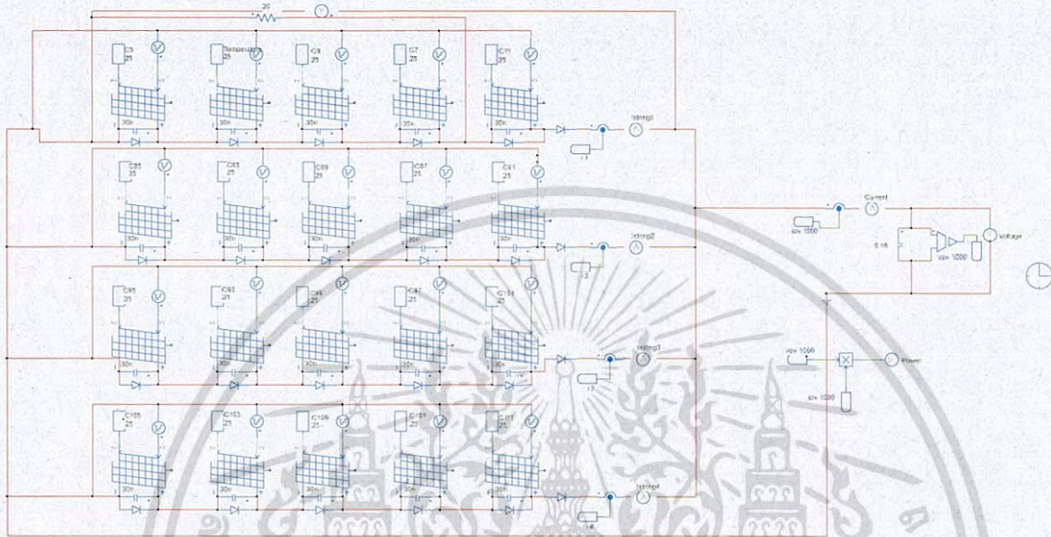
จากการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีการ Box Plot ในกรณี Line-Line Condition (Fault Resistance = 0 Ω) ค่าข้อมูลที่ได้แสดงในตารางที่ ค.3 พบว่าค่าของกระแสไฟฟ้าที่สตริง 2, 3 และ 4 นั้นมีค่าอยู่ในช่วงขอบเขตบนและขอบเขตล่าง ในขณะที่ค่าของกระแสไฟฟ้าที่สตริง 1 ณ เวลา 0.42 วินาที มีค่าลดลงกลายเป็น 0 A อย่างทันทีทันใด และมีค่าต่ำกว่าขอบเขตล่างตลอดช่วงการทดสอบจึงสรุปได้ว่าที่สตริง1 มีความผิดปกติเกิดขึ้น ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 สภาวะการทำงานภายใต้เงื่อนไข Line-Line Condition (Fault Resistance = 0 Ω)

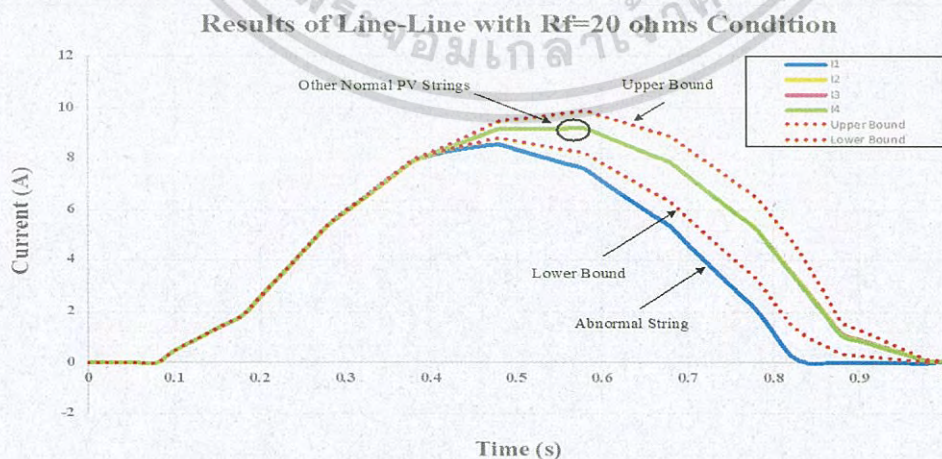
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.4 Line-Line (Fault Resistance = 20 Ω) เป็นการจำลองสภาวะการเสื่อมของประสิทธิภาพเนื่องจากเกิดการลัดวงจรโดยมีความต้านทาน 20 Ω ในสภาวะนี้มีการเปลี่ยนค่าความเข้มแสงตั้งแต่ 0-1100 W/m² ทั้งอาร์เรย์ และมีการลัดวงจรเกิดขึ้นบริเวณสตริงที่ 1 แสดงดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 Line-Line Condition (Fault Resistance = 20 Ω)

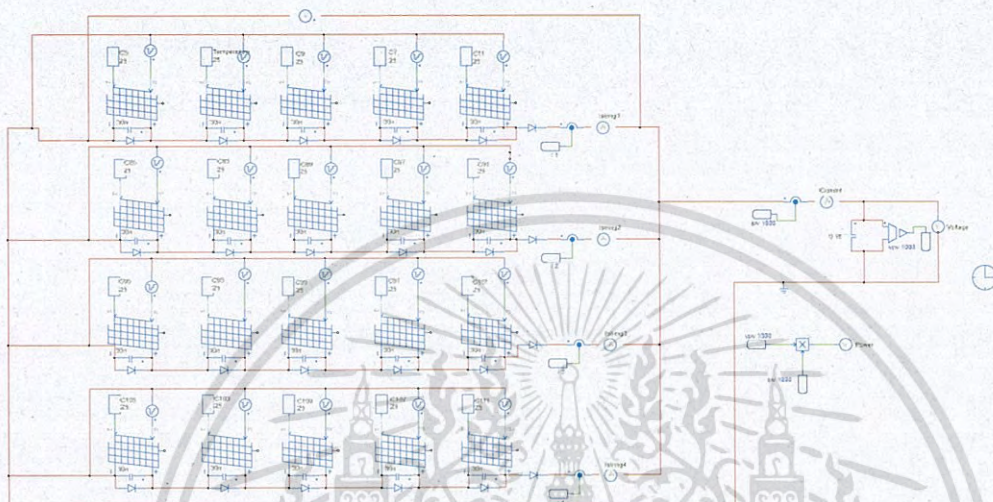
จากการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีการ Box Plot ในกรณี Line-Line Condition (Fault Resistance = 20 Ω) ค่าข้อมูลที่ได้แสดงในตารางที่ ค.4 พบว่าค่าของกระแสไฟฟ้าที่สตริง 2, 3 และ 4 นั้นมีค่าอยู่ในช่วงขอบเขตบนและขอบเขตล่าง ในขณะที่ค่าของกระแสไฟฟ้าที่สตริง 1 ณ เวลา 0.42 วินาที ค่าของกระแสไฟฟ้าที่สตริง 1 เริ่มมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องส่งผลให้ค่าที่ได้ต่ำกว่าขอบเขตล่างตลอดช่วงการทดลองที่เหลือ จึงสรุปได้ว่าที่สตริง 1 มีความผิดปกติเกิดขึ้น ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 ภาวะการทำงานภายใต้เงื่อนไข Line-Line Condition (Fault Resistance = 20 Ω)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

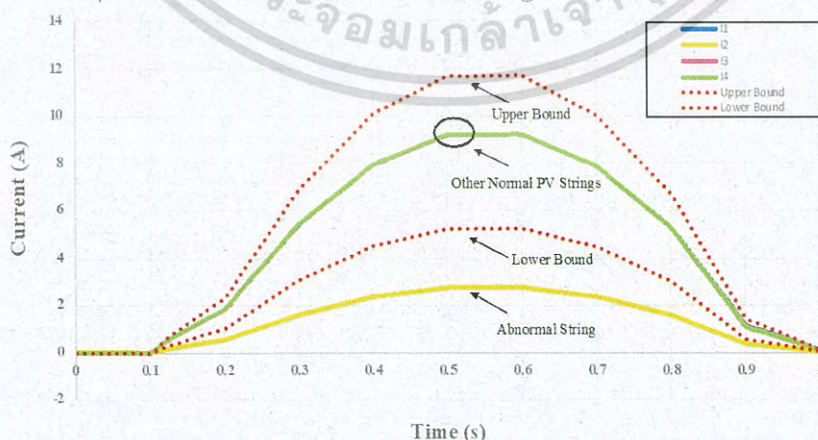
3.3.5 Partial Shading Condition เป็นการจำลองความผิดปกติของประสิทธิภาพของแผงโซลาร์เซลล์เนื่องจากปรากฏการณ์เงาบัง ในสภาวะนี้มีการเปลี่ยนค่าความเข้มแสงตั้งแต่ 0-1100 W/m² ในสตริงที่ 2, 3 และ 4 และมีการกำหนดค่าความเข้มแสงที่สตริง 1 เท่ากับ 500 W/m² แสดงดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 Partial Shading Condition

จากการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีการ Box Plot ในกรณี Partial Shading Condition ค่าข้อมูลที่ได้แสดงในตารางที่ ค.5 พบว่าค่าของกระแสไฟฟ้าที่สตริง 1, 3 และ 4 นั้นมีค่าอยู่ในช่วงขอบเขตบนและขอบเขตล่าง ในขณะที่สตริง 2 ถูกจำลองให้ความเข้มแสงลดลงเพื่อจำลองสภาวะการเกิดเงาบังส่งผลให้ค่าของกระแสที่สตริง 2 มีค่าต่ำกว่าสตริงอื่น ๆ และมีค่าออกนอกขอบเขตล่าง จึงสรุปได้ว่าที่สตริง 2 มีความผิดปกติเกิดขึ้น ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.12

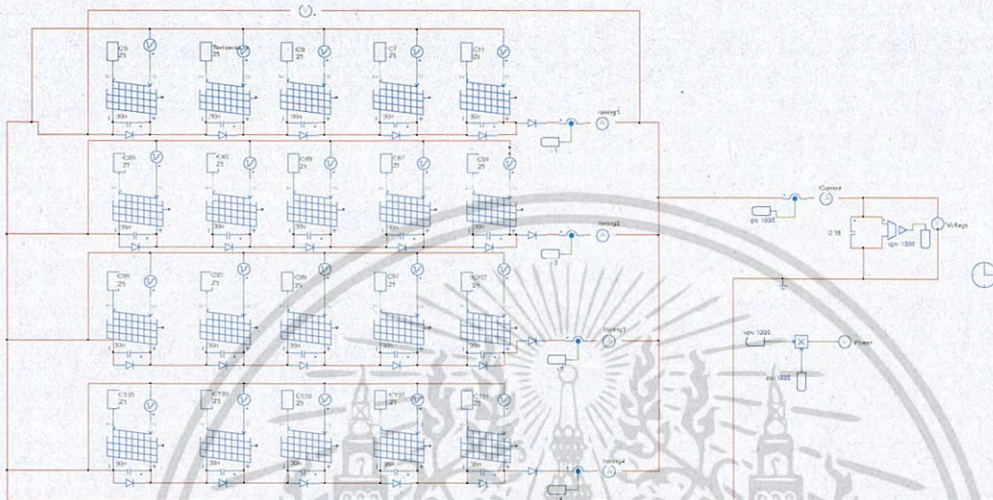
Results of Partial Shading Condition



รูปที่ 3.12 ภาวะการทำงานภายใต้เงื่อนไข Partial Shading Condition

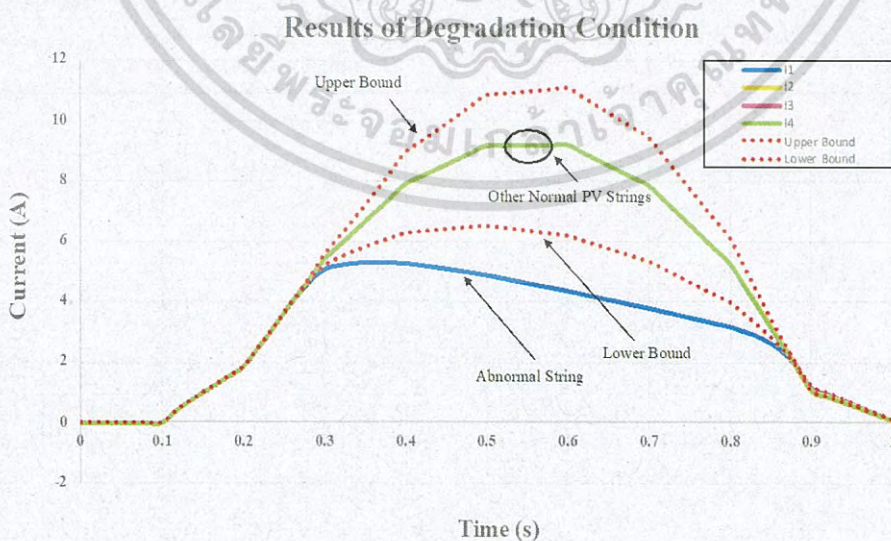
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.6 Degradation เป็นการจำลองการเสื่อมสภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยทำการเพิ่มค่าความต้านทานอนุกรม ในสตริงที่ 1 ให้มีค่าเท่ากับ 0.1 โดยในสภาวะนี้มีการเปลี่ยนค่าความเข้มแสงตั้งแต่ 0-1100 W/m² ทั้งอาร์เรย์ แสดงดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 Degradation Condition

จากการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีการ Box Plot ในกรณี Degradation Condition ค่าข้อมูลที่ได้แสดงในตารางที่ ค.6 พบว่าค่าของกระแสไฟฟ้าที่สตริง 2, 3 และ 4 นั้นมีค่าอยู่ในช่วงขอบเขตบนและขอบเขตล่างค่าของกระแสไฟฟ้าที่สตริง1 มีค่าต่ำกว่าสตริงอื่น ๆ และมีค่าต่ำกว่าขอบเขตล่าง จึงสรุปได้ว่าที่สตริง1 มีความผิดปกติเกิดขึ้น ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.14

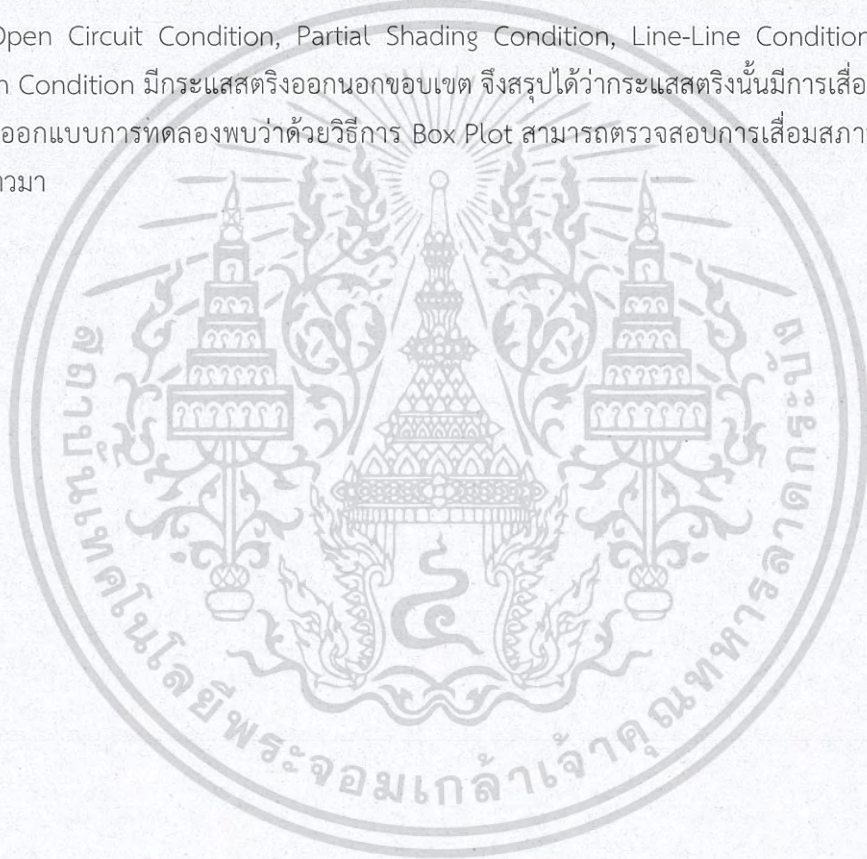


รูปที่ 3.14 ภาพการทำงานภายใต้เงื่อนไข Degradation Condition

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 สรุป

จากการออกแบบจำลองสถานการณ์การเสื่อมสภาพของกลุ่มแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่แตกต่างกันทั้งหมด 6 สภาวะด้วยโปรแกรม PSIM และ Microsoft Excel แล้วแสดงผลเป็นกราฟของกระแสแต่ละสตริงของโซลาร์เซลล์ เมื่อนำค่าที่ได้มาทำการวิเคราะห์ตรวจจับการเสื่อมสภาพด้วยวิธีการ Box Plot ซึ่งวิธีการดังกล่าวจะทำการกำหนดช่วงขอบเขตบนและขอบเขตล่างขึ้นมาโดยใช้ค่ากระแสในระดับสตริงที่สนใจทั้งหมด เมื่อมีกระแสของสตริงใด ๆ ที่ไม่ได้อยู่ในช่วงขอบเขตบนและขอบเขตล่างแสดงว่าสตริงนั้นเกิดการเสื่อมสภาพ พบว่าที่สภาวะ Normal Condition ไม่มีกระแสสตริงใดออกนอกขอบเขต แต่ที่สภาวะ Open Circuit Condition, Partial Shading Condition, Line-Line Condition และ Degradation Condition มีกระแสสตริงออกนอกขอบเขต จึงสรุปได้ว่ากระแสสตริงนั้นมีการเสื่อมสภาพ และจากการออกแบบการทดลองพบว่าด้วยวิธีการ Box Plot สามารถตรวจสอบการเสื่อมสภาพได้ทุกกรณีดังที่กล่าวมา



บทที่ 4

สรุปผลและวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 บทนำ

จากการทดลองระบบการตรวจจับความผิดปกติของโซลาร์เซลล์ในระดับสตริง โดยทำการทดลองใช้กับ Solar Roof Top ของอาคารระบบไฟฟ้าอัจฉริยะ (Real LAB) จำนวน 4 สตริง ควบคุมด้วยอินเวอร์เตอร์ขนาด 10 kW โดยสามารถสื่อสารกับคอมพิวเตอร์ด้วยสายสัญญาณ RS485 ซึ่งจะได้ค่ามาเป็นชุดข้อมูลจำเพาะ ในรูปแบบรหัส ASCII ซึ่งต้องใช้โปรโตคอลในการอ่านค่า ในที่นี่เราจะใช้โปรแกรม MATLAB ในการถอดรหัสเพื่อทำการแปลงค่าแบบอัตโนมัติ จากค่าที่ได้ จะเลือกนำค่าของกระแสสตริงมาใช้ในการวิเคราะห์เพื่อทำการคำนวณหาสตริงที่มีความผิดปกติเกิดขึ้น ด้วยวิธี Box Plot โดยใช้โปรแกรม MATLAB ประมวลผล ในส่วนกระบวนการของ Box Plot นั้น จะนำค่า กระแสทั้ง 4 สตริง มาหาค่า Upper Bound และ ค่า Lower Bound เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการเราจะได้ ค่าสถานะ Error จากโปรแกรม MATLAB แล้วทำการบันทึกข้อมูลในรูปของ File Text แบบเรียลไทม์ตลอดการรับค่า หลังจากนั้นเราได้สร้าง Server จำลอง ด้วยโปรแกรม Xampp แล้วทำการสร้างหน้าเว็บด้วย Visual Studio Code โดยใช้ Code ภาษา PHP และ JAVA Script ด้วยการอ่านค่าจาก File Text ที่ MATLAB ได้ทำการสร้างไว้ เราสามารถดูค่ากระแสไฟฟ้าและสถานะได้ผ่านเว็บเบราว์เซอร์ โดยแบ่งออกได้เป็น 3 สถานะ แสดงด้วยสี 3 สี สีเขียว หมายถึงสถานะปกติ, สีส้ม หมายถึง มีความผิดปกติเกิดขึ้น และ สีแดง หมายถึง มีการเสื่อมสภาพเกิดขึ้น

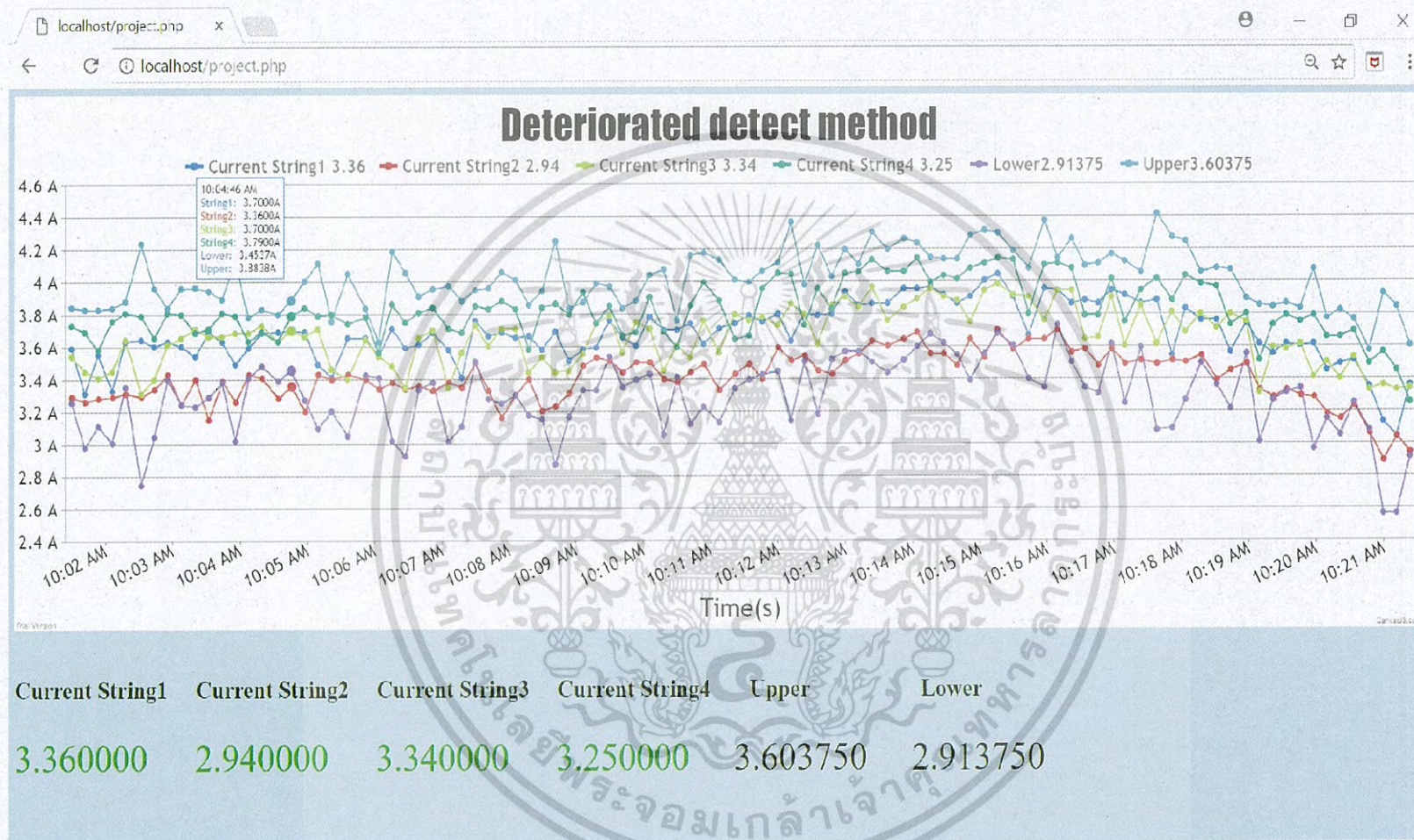
4.2 การทดลองการใช้เทคนิคการตรวจจับการเสื่อมสภาพของโซลาร์เซลล์โดยวิธี Box Plot

ในที่นี่เราทำการทดลองด้วยการจำลองสถานการณ์ ทั้ง 5 สถานการณ์ คือ Normal Condition , Open Circuit Condition, Line-Line Condition, Partial Shading Condition และ Degradation Condition แล้วทำการบันทึกค่าและวิเคราะห์ผลที่เกิดขึ้นในแต่ละสถานการณ์ ดังต่อไปนี้

4.2.1 การทดลองในสถานะ Normal Condition

ในสถานะปกติทำการทดสอบโดยวัดค่ากระแสไฟฟ้าทั้งหมด 4 สตริงที่ได้ทำการติดตั้งไว้แล้ว ในสถานะเดียวกัน

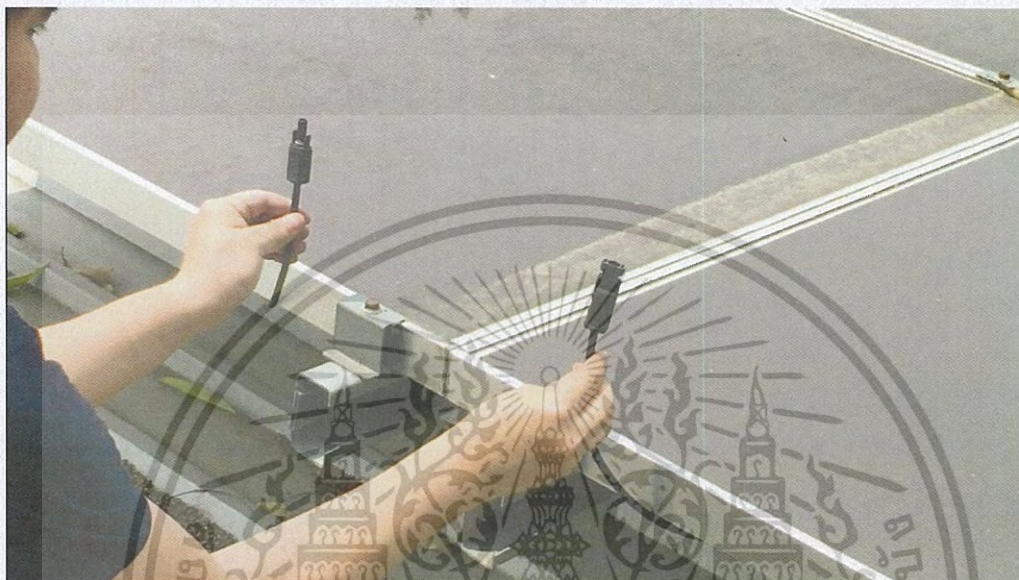
จากการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีการ Box Plot ในกรณี Normal Condition ค่าข้อมูลที่ได้แสดงในตารางที่ ค.7 จะเห็นได้ว่าในสถานะปกติค่าของกระแสไฟฟ้าทั้ง 4 สตริง มีค่าอยู่ในช่วงขอบเขตบนและขอบเขตล่างตลอดการทดลอง จึงไม่มีการตรวจพบเจอความผิดปกติใด ๆ ค่าของกระแสทุกสตริงจึงเป็นสีเขียวดังแสดงในหน้าจอแสดงผล ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 หน้าจอแสดงผลผ่านเว็บไซต์กรณี Normal Condition

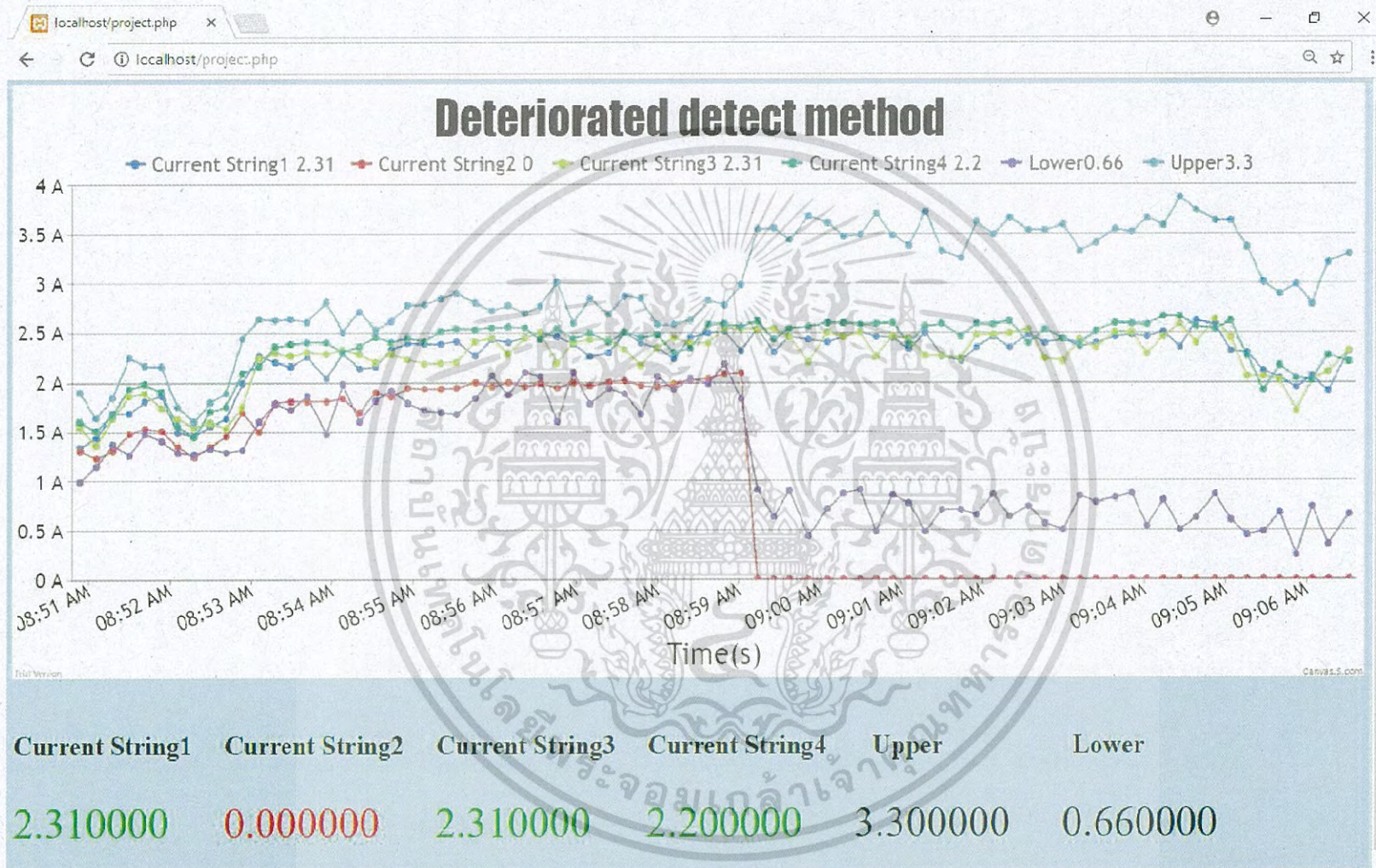
4.2.2 การทดลองในสถานะ Open Circuit Condition

Open Circuit เกิดจากการขาด การหลุดออกของสายไฟ ส่งผลให้กระแสไฟฟ้าไหลไม่ได้ เพื่อที่จะจำลองสถานการณ์นี้ จึงทำการปลดสายไฟบริเวณสตรึง 2 ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ปลดสายไฟที่สตรึง 2 เพื่อทำการเปิดวงจร

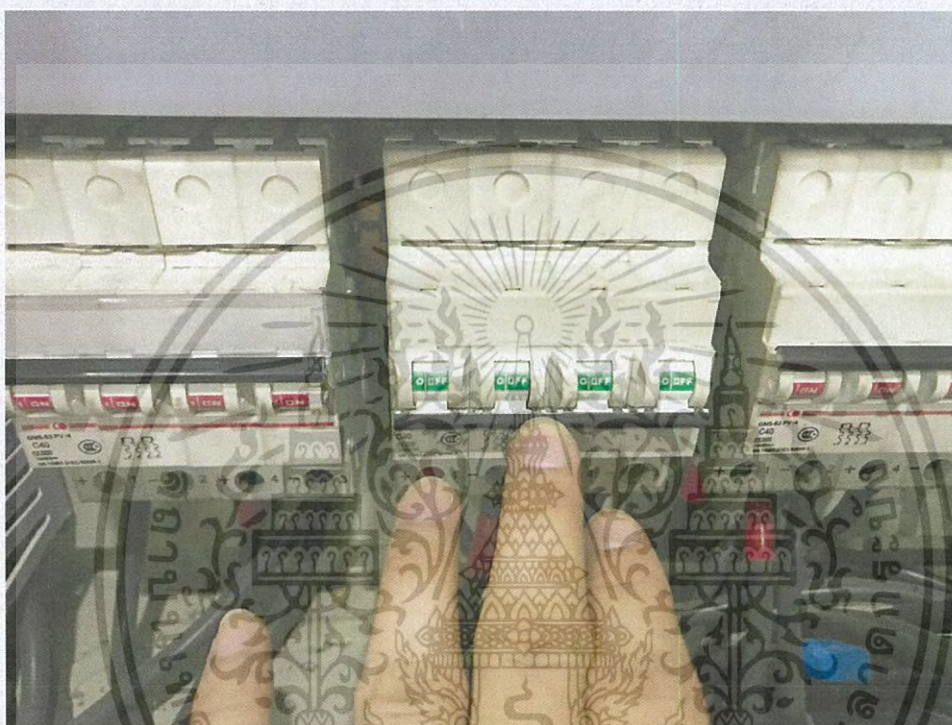
จากการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีการ Box Plot ในกรณี Open Circuit Condition ค่าข้อมูลที่ได้แสดงในตารางที่ ค.8 พบว่าค่าของกระแสไฟฟ้าที่สตรึง 1, 3 และ 4 นั้นมีค่าอยู่ในช่วงขอบเขตบนและขอบเขตล่าง ในขณะที่ค่าของกระแสที่สตรึง 2 ขณะมีการเปิดวงจรมีค่ากลายเป็น 0 A และค่าที่ได้จะอยู่นอกขอบเขตทำให้ระบบสามารถตรวจสอบความผิดปกติได้ ค่ากระแสสตรึงที่ 2 จะเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีส้มในช่วงเวลาหนึ่งและกลายเป็นสีแดงในที่สุด แสดงผลในหน้าจอแสดงผล ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 หน้าจอแสดงผลผ่านเว็บไซต์กรณี Open Circuit Condition

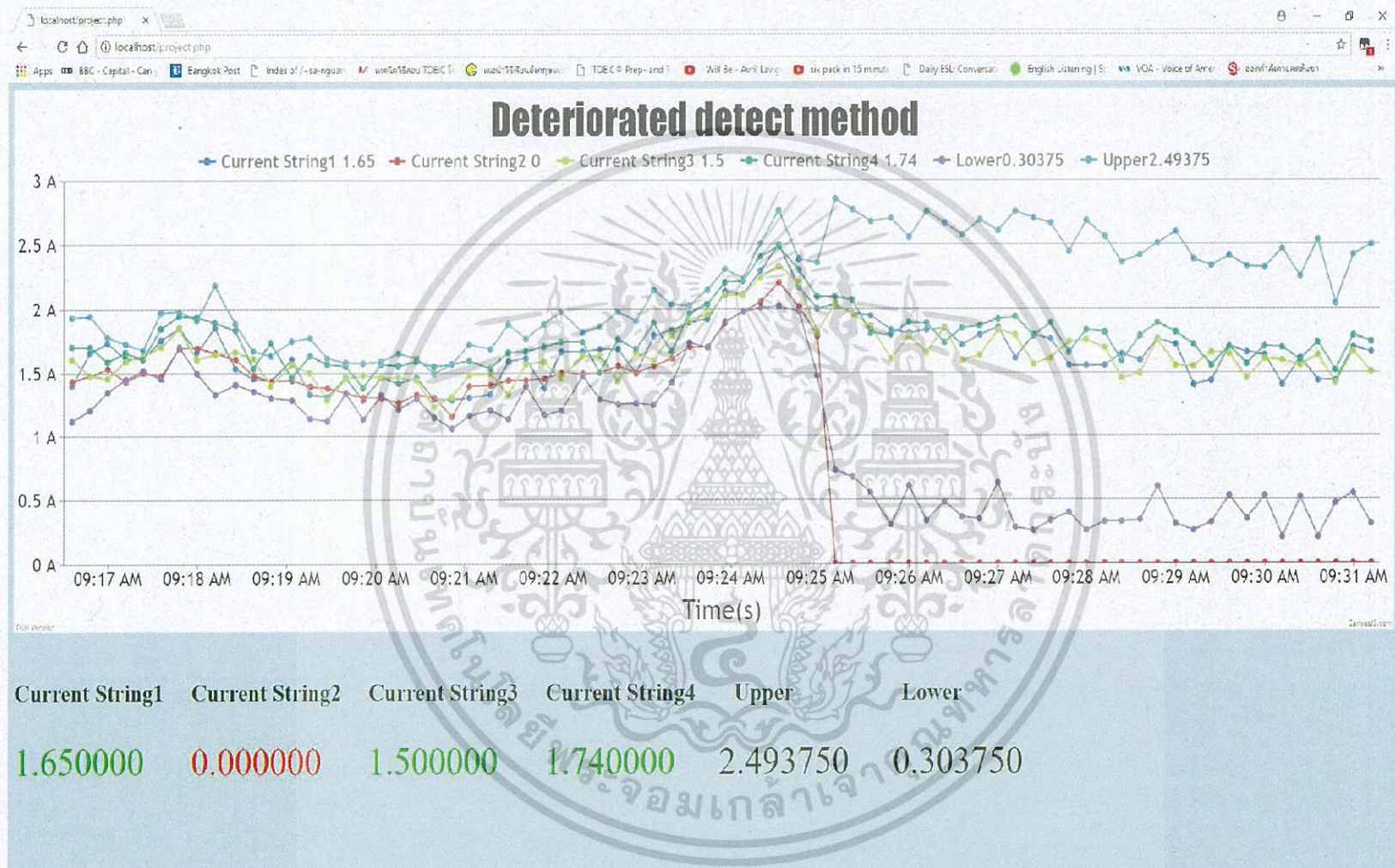
4.2.3 การทดลองในสภาวะ Line-Line Condition

โดยปกติ เมื่อเกิดสภาวะ Line-Line เกิดขึ้น เบรกเกอร์จะทำการทริป เพื่อทำการป้องกันระบบจากความเสียหายที่จะเกิดขึ้น เพื่อสร้างสภาวะการณีนี้อ จึงทำการสับเบรกเกอร์ลงที่สตรึง 2 เพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงของกระแสที่สตรึง 2 ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 สับเบรกเกอร์ที่สตรึง 2 เพื่อจำลองสภาวะการเกิด Line-Line

จากการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีการ Box Plot ในกรณี Line-Line Condition ค่าข้อมูลที่ได้แสดงในตารางที่ ค.9 พบว่าค่าของกระแสไฟฟ้าที่สตรึง 1, 3 และ 4 นั้นมีค่าอยู่ในช่วงขอบเขตบนและขอบเขตล่าง ในขณะที่ค่าของกระแสไฟฟ้าที่สตรึง 2 เมื่อทำการสับเบรกเกอร์ ณ เวลา 8:59:14 AM ค่าของกระแสที่สตรึง 2 มีค่ากลายเป็น 0 A และค่าที่ได้อยู่นอกขอบเขตทำให้ระบบสามารถตรวจสอบความผิดปกติได้ ค่ากระแสสตรึงที่ 2 จะเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีแดงในช่วงเวลาหนึ่งและกลายเป็นสีแดงในที่สุด แสดงผลในหน้าจอแสดงผล ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 หน้าจอแสดงผลผ่านเว็บไซต์กรณี Line-Line Condition

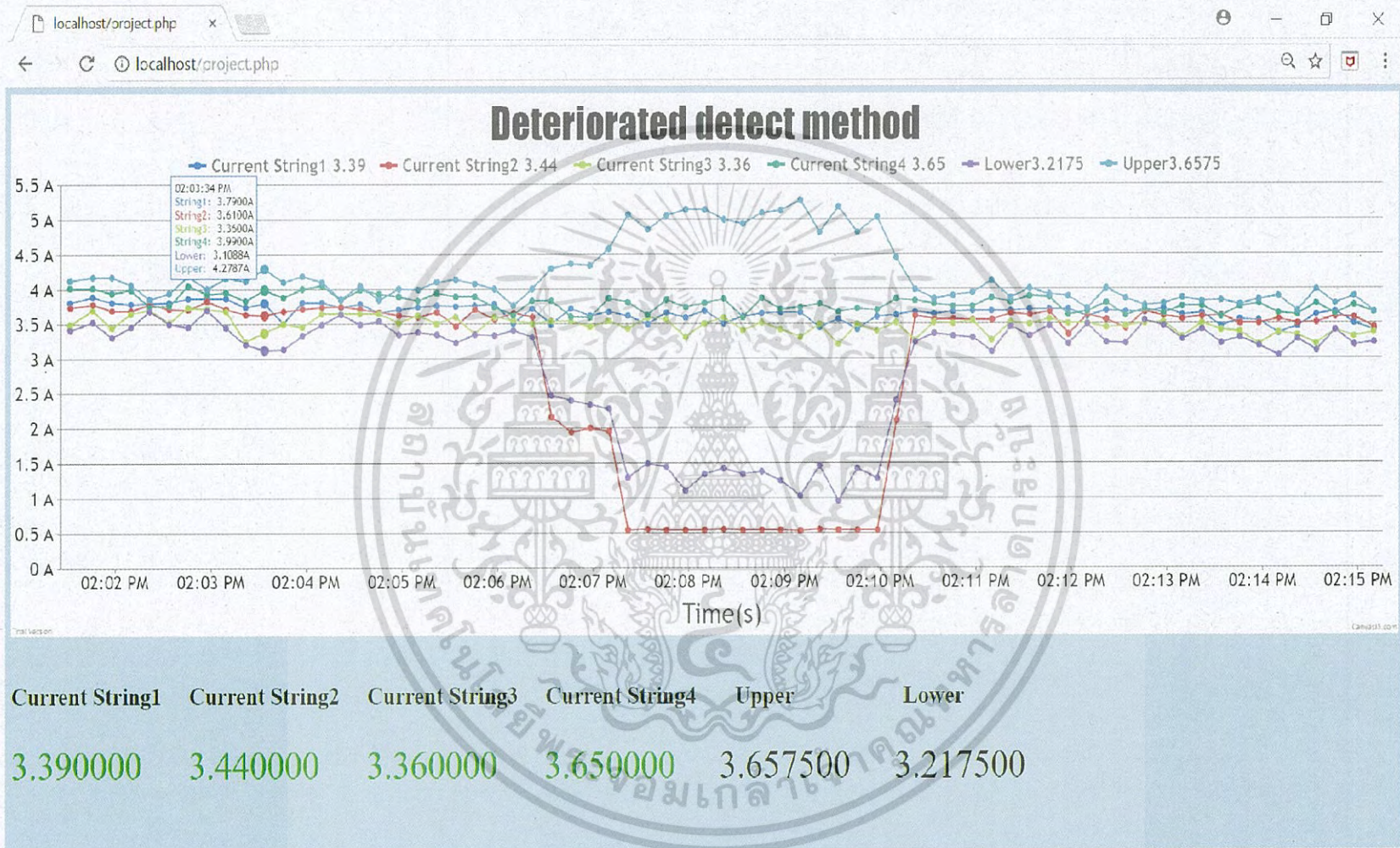
4.2.4 การทดลองในสถานะ Partial Shading Condition

Partial shading จะเกิดขึ้นเมื่อมีเงาบังซึ่งเกิดจากอะไรก็ตามไม่ว่าเป็นเมฆ ต้นไม้ เครื่องบิน และอื่น ๆ ในกรณีนี้ เราทำการบังเงาที่สตริง 2 โดยใช้แผ่นฟิวเจอร์บอร์ดเป็นเวลาประมาณ 4 นาที แล้วจึงนำแผ่นฟิวเจอร์บอร์ดออก ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 การทดลองบังเงาที่สตริง 2 โดยใช้แผ่นฟิวเจอร์บอร์ด

จากการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีการ Box Plot ในกรณี Partial Shading Condition ค่าข้อมูลที่ได้แสดงในตารางที่ ค.10 พบว่าค่าของกระแสไฟฟ้าที่สตริง 1, 3 และ 4 นั้นมีค่าอยู่ในช่วงขอบเขตบนและขอบเขตล่าง ในขณะที่สตริง 2 ถูกจำลองสภาวะการเกิดเงาบังโดยใช้แผ่นฟิวเจอร์บอร์ด ส่งผลให้ค่ากระแสที่สตริง 2 มีค่าออกนอกขอบเขต และระหว่างนั้นสีของกระแสที่สตริง 2 จะเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีส้ม และเมื่อนำเงาที่บังออกค่าของกระแสสตริงที่ 2 จะกลับมามีค่าอยู่ในขอบเขตและสีจะกลับเป็นสีเขียวดังเดิม ดังแสดงในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 หน้าจอแสดงผลผ่านเว็บไซต์กรณี Partial Shading Condition

4.2.5 การทดลองในสภาวะ Degradation Condition

ในกรณีนี้ เราทำการเตรียมสตริง 2 ให้มีการเสื่อมสภาพ โดยเลือกใช้แผงที่มีการเสื่อมสภาพ ในการต่อเพื่อวัดค่าแทนแผงปกติ โดยสามารถตรวจสอบได้จากค่าของกระแสไฟฟ้าที่ออกมาจากสตริงนี้เมื่อเทียบกับสตริงอื่น ๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.8 และ 4.9



รูปที่ 4.8 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการเสื่อมสภาพจากการแตกหัก



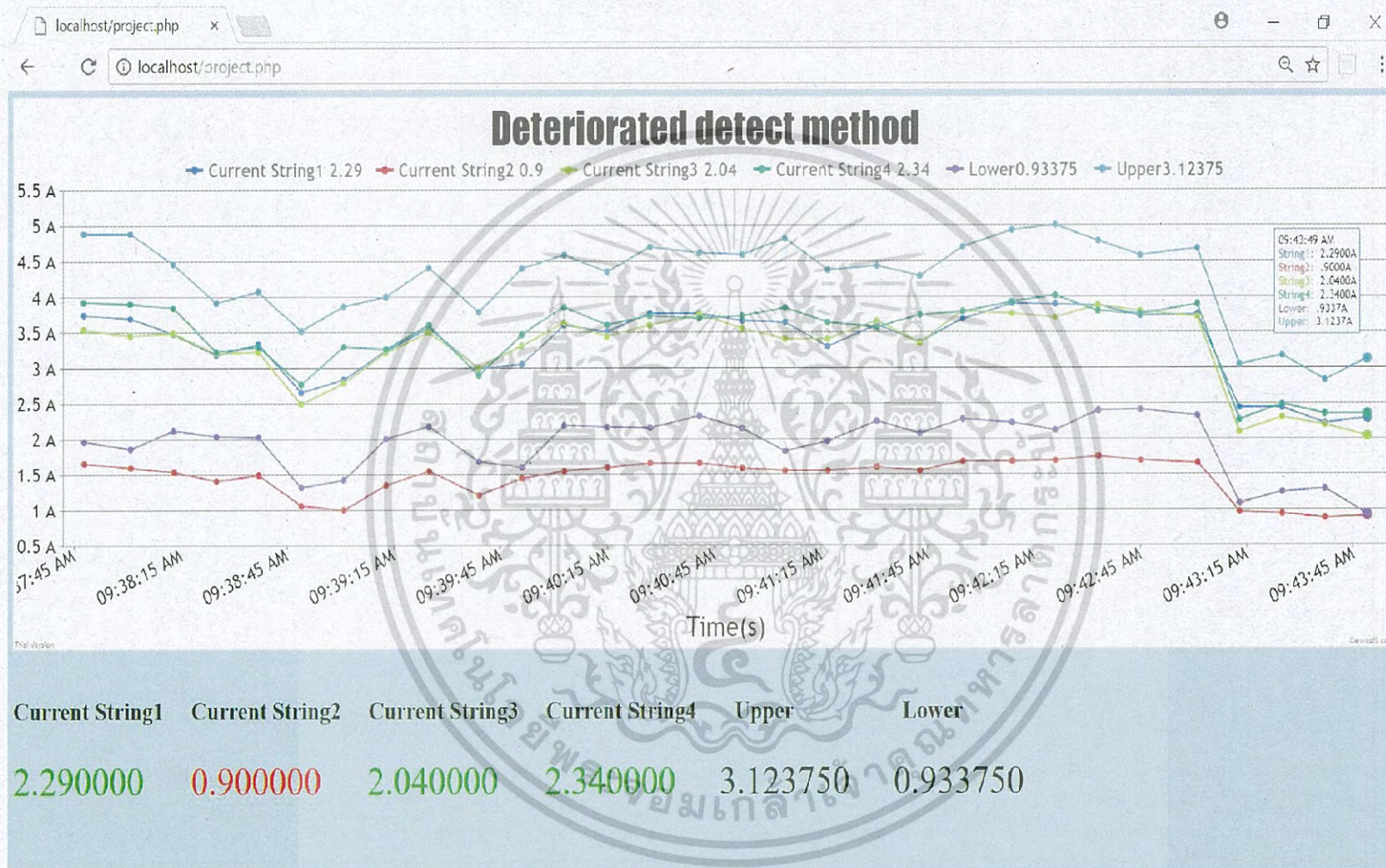
รูปที่ 4.9 เปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าระหว่างสตริงปกติกับสตริงที่มีการเสื่อมสภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีการ Box Plot ในกรณี Degradation Condition ค่าข้อมูลที่ได้แสดงในตารางที่ ค.11 จะเห็นได้ว่าค่าของกระแสที่สตรึง 2 มีค่าต่ำกว่าค่าของกระแสที่สตรึงอื่น ส่งผลให้ค่าของกระแสที่สตรึง 2 มีค่าออกนอกขอบเขตทำให้ระบบสามารถตรวจสอบความผิดปกติได้ ค่ากระแสที่สตรึง 2 จะเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีส้มในช่วงเวลาหนึ่งและกลายเป็นสีแดงในที่สุด แสดงผลในหน้าจอแสดงผล ดังรูปที่ 4.10



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 หน้าจอแสดงผลผ่านเว็บไซต์กรณี Degradation Condition

4.3 สรุป

ในการทดลองได้มีการทดลองทั้งหมด 5 กรณี คือ Normal Condition, Open Circuit Condition, Line-Line Condition, Partial Shading Condition และ Degradation Condition โดยในกรณี Normal Condition กระแสไฟฟ้าของแต่ละสตริงจะอยู่ในขอบเขตบนและขอบเขตล่างทำให้ไม่มีการ Outlier ออกมา กรณี Open Circuit Condition ได้ทำการทดลองโดยการปลดสายไฟที่สตริง 2 ส่งผลให้กระแสที่สตริงนั้นไหลไม่ได้ ค่าที่วัดได้จึงมีค่าเป็นศูนย์ ทำให้ระบบสามารถตรวจสอบ outlier ออกมาได้ กรณี Line-Line Condition ได้ทำการทดลองโดยเมื่อเกิดการ Short circuit กระแสไฟฟ้าในสตริงนั้นจะมากกว่ากระแสไฟฟ้าในสตริงอื่น ๆ ทำให้ฟิวส์ที่มีหน้าที่ในการป้องกันกระแสเกินเกิดการขาดโดยเมื่อฟิวส์ขาด กระแสไฟฟ้าในสตริงนั้นจะตกลงเป็นศูนย์ซึ่งค่ากระแสนี้จะหลุดออกจากขอบเขตล่างทำให้เกิดการ Outlier ออกมา กรณี Partial Shading Condition เป็นกรณีที่เงาบังเกิดจากเงาของเมฆบังทำให้กระแสที่เกิดขึ้นจะมีการลดลงซึ่งค่ากระแสนี้จะหลุดออกจากขอบเขตล่างทำให้เกิดการ Outlier ออกมา แต่เมื่อเวลาผ่านไปเงาซึ่งเกิดจากการบังหายไปค่าของกระแสไฟฟ้าสตริงนั้นจะกลับมาเท่ากับสตริงอื่นอีกครั้ง กรณี degradation Condition เป็นกรณีที่เกิดจากการเสื่อมของแผงโซลาร์เซลล์โดยค่าไฟฟ้าของสตริงที่เสื่อมนั้นจะหลุดออกจากขอบเขตทำให้เกิดการ Outlier ออกมา จะเห็นว่าวิธี Box Plot สามารถตรวจสอบความผิดปกติทั้ง 5 กรณีที่เกิดขึ้นได้ทั้งหมด

บทที่ 5

บทสรุป ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา

ในปัจจุบันการผลิตไฟฟ้าจากโซลาร์เซลล์มีความแพร่หลายมากเนื่องจากพลังงานจากโซลาร์เซลล์เป็นพลังงานที่สะอาดและนำมาใช้ได้อย่างไม่จำกัด จึงได้มีการสร้างฟาร์มโซลาร์เซลล์เป็นจำนวนมากขึ้นทุกปี และแต่ฟาร์มก็มีขนาดใหญ่มาก ซึ่งทำให้การซ่อมบำรุงยากขึ้นตามขนาดของฟาร์มนั้นๆ เราจึงค้นหาวิธีที่จะตรวจสอบให้ไวที่สุด เพื่อลดการสูญเสียรายได้ในส่วนที่เสียหาย จากการศึกษาค้นคว้าวิธีการตรวจสอบการเสื่อมสภาพของแผงโซลาร์เซลล์ทำให้ทราบถึงข้อจำกัดที่ใช้ในการตรวจสอบ ทางคณะผู้จัดทำโครงการจึงทำการศึกษาค้นคว้าข้อมูลเพิ่มเติมเกี่ยวกับวิธีแก้ไขปัญหาดังกล่าว โดยใช้วิธี Box Plot ซึ่งเป็นวิธีทางคณิตศาสตร์ที่ใช้หลักการทางสถิติ โดยได้นำค่าไฟฟ้ากระแสตรงของแต่ละสตริงมาหาขอบเขตบน (Upper Bound) และ ขอบเขตล่าง (Lower Bound) ในกรณีที่กระแสที่ออกนอกขอบเขตวิธี Box Plot ก็จะสามารถตรวจสอบความผิดปกติที่เกิดขึ้นได้และได้มีการแสดงผลผ่านเว็บไซต์ โดยในส่วนของการทำงานนั้นได้มีการจำแนกกรณีการทดสอบเป็น 5 กรณี คือ Normal Condition, Open circuit Condition, Line-Line Condition, Partial shading Condition และ Degradation Condition

5.1 บทสรุป

ในการนำวิธี ตรวจสอบความผิดปกติของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธี Box Plot ในกรณี Normal Condition นั้นจากผลการติดตั้งพบว่าสามารถแสดงความผิดปกติของ Solar Roof Top ได้อย่างแม่นยำและรวดเร็วที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ โดยจะแสดงสถานะเป็นสีเขียวที่สตริง

ในส่วนของกรณี Open Circuit Condition เราได้ทำการจำลองสถานการณ์ขึ้นมาและได้นำเอาระบบของเราตรวจสอบพบว่าระบบสามารถจับความผิดปกติได้อย่างแม่นยำตามที่ได้คาดการณ์ไว้ โดยจะแสดงสถานะเป็นสีส้มก่อน และเป็นสีแดงในสตริงที่พบความผิดปกติ

ในกรณีของ Line-Line Condition เราได้ทำการจำลองสถานการณ์โดยการทำให้เบรกเกอร์ที่ปในระหว่างที่ระบบทำงานตรวจสอบอยู่ พบว่าระบบสามารถตรวจจับความผิดปกติได้อย่างแม่นยำ โดยแสดงสถานะสตริงเป็นสีส้มก่อน และเป็นสีแดงในสตริงที่พบความผิดปกติ

ในกรณี Partial shading Condition เราได้ทำการจำลองสถานการณ์ขึ้นมาโดยนำสิ่งกีดขวางไปบังโซลาร์เซลล์ขณะทำงานอยู่เป็นเวลา 4 นาทีตามที่เราได้เก็บข้อมูลมา โดยเปิดระบบตรวจสอบอยู่ตลอดเวลา พบว่าระบบของเราสามารถตรวจจับความผิดปกติได้อย่างแม่นยำตามที่ได้คาดการณ์ไว้ โดยจะแสดงสถานะเป็นสีส้มเป็นเวลา 4 นาที แล้วจะกลับมาเป็นสีเขียวเมื่อทำการนำสิ่งกีดขวางออกจากสตริงที่ทำการจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณี Degradation Condition เราได้นำแผงโซลาร์เซลล์ที่เกิดการเสื่อมจริงไปติดตั้งในชุดการจำลองสถานการณ์ แล้วให้ระบบตรวจสอบ พบว่าระบบสามารถตรวจสอบ ความผิดปกติได้โดยจะแสดงสเตตัสเป็นสีส้ม และเป็นสีแดงในสตริงที่ติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์ที่เสื่อมสภาพตามที่ได้คาดการณ์ไว้

จากการทดลองทั้งหมดทำให้ทราบว่าระบบของเราสามารถตรวจจับความผิดปกติทั้ง 5 กรณีได้ และสามารถแสดงจุดที่เสียได้อย่างแม่นยำ

5.2 ข้อดี-ข้อเสียของวิธีการใช้เทคนิคการตรวจจับการเสื่อมสภาพของแผงโซลาร์เซลล์โดยวิธี Box Plot

5.2.1 ข้อดี

1. ต้นทุนต่ำ
2. สามารถแสดงผลแบบ Real-time ได้
3. เป็นระบบที่เข้าใจได้ง่าย ใช้เพียงหลักการวิเคราะห์กระแสไฟฟ้า
4. เป็นการลดแรงงานที่ใช้ในการตรวจสอบ
5. ประหยัดเวลาที่ใช้ในการตรวจสอบ
6. ง่ายต่อการปรับปรุงระบบ
7. ลดความเสียหายที่เกิดจากการเสื่อมสภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

5.2.2 ข้อเสีย

1. มีฟังก์ชันน้อย
2. อินเวอร์เตอร์ที่ใช้ต้องเป็นชนิดที่สามารถวัดค่ากระแสได้ในระดับสตริงเป็นอย่างน้อย

5.3 ข้อเสนอแนะและข้อระวัง

จากการทดลองตลอดวิจัยนี้พบว่า มีข้อเสนอแนะและข้อควรระวังดังนี้

1. ในส่วนการทดลองนั้น วิธีการ Box Plot เหมาะสำหรับข้อมูลที่มีจำนวนมาก ๆ และควรใช้แผงโซลาร์เซลล์ที่มีประสิทธิภาพของแผงเท่ากันในแต่ละสตริงซึ่งจะทำให้วิธี Box Plot มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น

2. ยังมีขีดจำกัดในการติดต่อกับ Inverter อยู่ ทำให้การนำระบบไปติดตั้งในรุ่นอื่นนั้น จะต้องทำการตั้งค่าระบบในส่วนของการติดต่อ และการแปลงค่าใหม่ตาม Protocol ของเครื่องรุ่นนั้น ๆ

5.4 แนวทางการพัฒนา

งานวิจัยนี้สามารถพัฒนาเพิ่มเติมความสามารถในการตรวจสอบความผิดปกติที่เกิดขึ้นกับแผงโซลาร์เซลล์ได้ดังนี้

1. วิธีการนี้อาจจะสามารถนำไปพัฒนาต่อยอดได้โดยการทำเป็น Application สำหรับใช้งานบนโทรศัพท์มือถือ เพื่อให้เกิดความสะดวกและรวดเร็วมากยิ่งขึ้นในการแจ้งเตือนและทำให้สามารถแก้ปัญหาได้อย่างทันที่

2. สามารถนำไปพัฒนาเพื่อหาวิธีที่จะทราบประสิทธิภาพของแต่ละแผงในช่วงเวลาต่าง ๆ ว่าสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้เป็นร้อยละเท่าไรของประสิทธิภาพสูงสุด

3. สามารถประยุกต์ต่อยอดในการตรวจสอบความผิดปกติในรูปแบบอื่นได้ โดยใช้ระบบของเราเป็นพื้นฐาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] แดดจ้าโซลาร์ อคาเดมี่. “เจาะลึกการทำงานของโซลาร์เซลล์.” [ระบบออนไลน์]
ที่มา: <https://www.dadjar.solar>
- [2] โซลาร์ ฮับ จำกัด. “อุปกรณ์สำหรับโซลาร์เซลล์.” [ระบบออนไลน์]
ที่มา: <http://www.solarhub.co.th/solar-information/solar-component/403-solar-inverter>
- [3] Diew Jaibun. “การวัดการกระจายของข้อมูล.” [ระบบออนไลน์]
ที่มา: http://www.mwit.ac.th/~math/E_Learning/MATH30203/sources/Statistics_06.pdf
- [4] ฉลอง สีแก้วสีว. “การนำเสนอข้อมูลด้วยแผนภูมิ.” [ระบบออนไลน์]
ที่มา: <https://sites.google.com/site/mystatistics01/chapter2/graphical-data-presentation>
- [5] ดร.จรัล ทรัพย์เสรี. “Box Plot.” [ระบบออนไลน์]
ที่มา: http://www.tpa.or.th/publisher/pdfFileDownloadS/FQ148_p35-37.pdf
- [6] มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง. “แผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink แบบ
ทันเวลา.” [ระบบออนไลน์] ที่มา: <http://tit.ac.th/NEWS-PDF/ET006.pdf>
- [7] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานกระทรวงพลังงาน. “ไฟฟ้าจาก
แสงอาทิตย์.” [ระบบออนไลน์]
ที่มา: <http://www.chumphon.kmitl.ac.th/me/images/stories/km/km002.pdf>
- [8] Edson L. Meyer, E. Ernest van Dyk, “Assessing the Reliability and Degradation of
Photovoltaic Module Performance Parameters,” IEEE trans., Vol.53, No.1, 2004, pp.
83-92.
- [9] Ahmed Buraiou, Messaoud Hamouda, Abdelkader Chaker, Salah Latchtar, Ammar
Necaibia, Nadir Boutasseta, Mohammed Mostefaoui, “Experimental evaluation of
the performance and degradation of single crystalline silicon photovoltaic modules
in the saharan environmental,” Elsevier Energy, 2017, pp. 22-30.
- [10] Manish Kumar, Arun Kumar, “Performance assessment and degradation analysis of
solar photovoltaic technologies,” Elsevier, 2017.
- [11] Ye Zhao, Brad Lehman, “Outlier Detection Rules for Fault Detection in Solar
Photovoltaic Arrays,” IEEE, 2013, pp. 2913-2920.
- [12] บริษัท โอเมก้า เมชเซอร์ริง อินสทรูเมนต์ จำกัด. “RS 485.” [ระบบออนไลน์].
ที่มา: <https://www.omi.co.th/th/article/rs485>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

RS485



รูปที่ ก.1 สายส่งสัญญาณ USB RS485

RS485 (Recommended Standard no. 485) คือมาตรฐานการสื่อสารข้อมูลดิจิทัลแบบอนุกรม (Serial Communication) ซึ่งถูกกำหนดขึ้นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1998 โดยความร่วมมือของ TIA (Telecommunications Industry Association) และ EIA (Electronic Industries Association) มาตรฐาน RS485 ถูกใช้อย่างแพร่หลายในโรงงานอุตสาหกรรม เนื่องจากสามารถส่งสัญญาณได้ไกลและยังสามารถส่งข้อมูลได้พร้อม ๆ กันได้หลายจุด ปกติแล้ว EIA จะตั้งชื่อมาตรฐานของตัวเองโดยใช้คำนำหน้าว่า "RS" (Recommended Standard) แต่เนื่องจากมาตรฐานนี้เป็นความร่วมมือระหว่าง 2 หน่วยงาน คือ TIA และ EIA ทั้งสองหน่วยงานจึงตกลงเปลี่ยนจากคำว่า "RS" เป็น "TIA/EIA" แทนอย่างเป็นทางการ เพื่อระบุถึงแหล่งที่มาของมาตรฐานอย่างชัดเจน โดยต่อมาทาง EIA ก็ได้ยกเลิกมาตรฐานนี้ และมาตรฐาน RS485 นี้ก็ได้ถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่องจนถึงปัจจุบันโดย TIA ทำให้มาตรฐาน RS485 ถูกเปลี่ยนชื่อเป็น "TIA-485" อย่างเป็นทางการ แต่สุดท้ายเพราะความเคยชินทำให้วิศวกรทั่วโลกยังเรียกมาตรฐานการสื่อสารนี้ว่า RS485 เหมือนเดิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลักการทํางานของ RS485

มาตรฐาน RS485 เป็นมาตรฐานที่รับ/ส่งข้อมูลในแบบที่เรียกว่า Half Duplex คือ สามารถรับและส่งข้อมูลได้ทีละอย่างเท่านั้นไม่สามารถทำทั้งสองอย่างได้ในเวลาเดียวกัน



รูปที่ ก.2 ตัวอย่างการเชื่อมต่อ RS485 ระหว่างเครื่องมือวัดกับตัวแปลงสัญญาณ

สำหรับการรับ/ส่งข้อมูลดิจิทัลแบบ RS485 นั้น จะส่งข้อมูลโดยใช้สายไฟเพียงแค่ 2 เส้นคือ A และ B เป็นตัวบอกรหัสดิจิทัล (Digital Code) โดยใช้ความแตกต่างของแรงดันไฟระหว่างขั้ว A และ B เป็นตัวบอกรหัสนี้

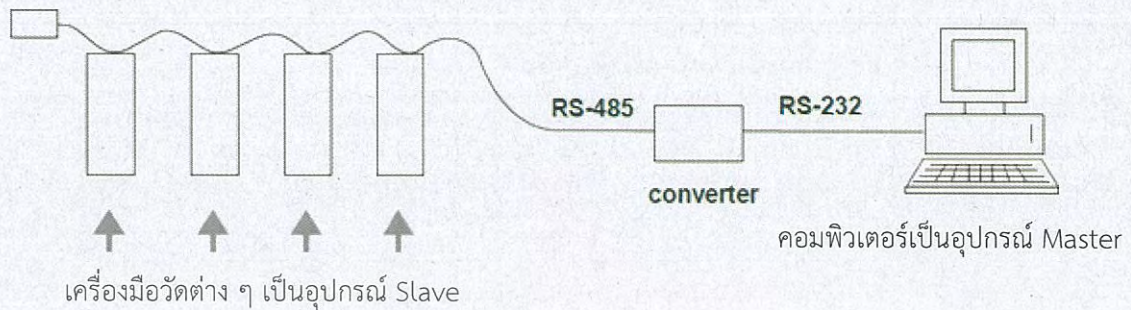
เมื่อ $V_a - V_b$ ได้แรงดันไฟฟ้าน้อยกว่า -200 mV คือสัญญาณดิจิทัลเป็น 1

เมื่อ $V_a - V_b$ ได้แรงดันไฟฟ้ามากกว่า $+200$ mV คือสัญญาณดิจิทัลเป็น 0

หลักการทํางานของ RS485 แบบ NETWORK

มาตรฐาน RS485 สามารถเชื่อมต่อการรับส่งข้อมูลแบบเครือข่าย (Network) โดยมีอุปกรณ์ในเครือข่ายได้สูงสุดถึง 32 ตัว ซึ่งในเครือข่าวนั้น จะต้องมียุกรณ์อยู่ 1 ตัว ทำหน้าที่คอยจัดการการสื่อสารในเครือข่าย ซึ่งเราจะเรียกอุปกรณ์ตัวนี้ว่า "Master" และอุปกรณ์ส่วนที่เหลือเราจะเรียกว่า "Slave" โดยที่ Slave แต่ละตัวจะมีหมายเลข Address ของตัวเอง และเมื่อตัว Master ต้องการสั่งการตัว Slave ตัว Master จะส่งชุดคำสั่งพร้อมระบุหมายเลข Address ไปยังอุปกรณ์ Slave ทุกตัว เมื่ออุปกรณ์ Slave ได้รับคำสั่งและคำสั่งนั้นมีหมายเลข Address ตรงกับตัวเอง อุปกรณ์ Slave ถึงจะทำตามคำสั่งของ Master เป็นลำดับไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.3 ตัวอย่างการทำงานของ RS485 แบบ Network

จำนวนอุปกรณ์สูงสุดในเครือข่าย RS485

เครือข่าย RS485 สามารถมีอุปกรณ์ในระบบได้สูงสุด 32 ตัว เมื่ออุปกรณ์เหล่านั้นมีความต้านทานไฟฟ้าภายใน 12 k Ω แต่ปัจจุบันการออกแบบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้พัฒนาจนมีความต้านทานไฟฟ้าภายในที่สูงมาก (ในหลัก M Ω) ซึ่งทำให้เครือข่าย RS485 สามารถมีอุปกรณ์ในระบบได้สูงสุดถึง 256 ตัว นอกจากนี้เครือข่าย RS485 ยังสามารถใช้ตัวขยายสัญญาณ (Repeater) สำหรับเพิ่มอุปกรณ์ในเครือข่ายได้ถึงหลายพันตัวและครอบคลุมระยะหลายกิโลเมตร

ข้อดีของสัญญาณ RS485

RS485 เป็นมาตรฐานที่ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อลบลจุดด้อยของมาตรฐานรุ่นเก่า ๆ อย่าง RS232 RS422 RS423 เป็นต้น ซึ่งข้อดีหลัก ๆ ของมาตรฐาน RS485 มีดังนี้

สามารถส่งสัญญาณได้ไกล

RS485 สามารถส่งสัญญาณได้ไกลสูงสุดถึง 1,200 เมตร ซึ่งถือว่าเป็นระยะทางที่ไกลมากเพียงพอต่อการใช้งานในโรงงานอุตสาหกรรมอย่างแน่นอนและจะเห็นได้ชัดว่าระยะการส่งสัญญาณได้ถูกพัฒนาขึ้นมากจนทิ้งห่างมาตรฐานรุ่นเก่าอย่าง RS232 ที่สามารถส่งสัญญาณได้เพียง 15 เมตร เท่านั้น

สามารถเชื่อมต่อเป็นเครือข่ายได้

นอกจากจะส่งสัญญาณได้ไกลแล้ว RS485 ยังสามารถเชื่อมต่อเป็นเครือข่าย (Network) แบบ Multipoint ได้ด้วย ซึ่งสามารถเชื่อมต่ออุปกรณ์ในระบบได้สูงสุดถึง 32 ตัว ซึ่งสิ่งนี้ถือว่าเป็นอีกหนึ่งจุดเด่นของสัญญาณ RS485 เลยทีเดียว

ประหยัดงบประมาณในการเดินสาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มาตรฐาน RS485 เป็นมาตรฐานที่ใช้สายไฟเพียง 2 เส้นในการรับส่งข้อมูล เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานรุ่นเก่าที่สามารถส่งสัญญาณในระยะเท่ากันอย่าง RS422 ที่ต้องใช้สายไฟถึง 4 เส้นในการรับส่งข้อมูล ซึ่งราคาสายเคเบิลแบบ 2 แกน จะถูกกว่าสายเคเบิลแบบ 4 แกน ถึงเกือบครึ่ง ในความเป็นจริงแล้วเรื่องงบประมาณถือเป็นเรื่องสำคัญมาก ๆ ซึ่งนี่ถือเป็นอีกหนึ่งจุดเด่นของ RS485 เลยทีเดียว

ข้อจำกัดของสัญญาณ RS485

RS485 เป็นมาตรฐานที่ถูกพัฒนาขึ้นจนลบข้อด้อยที่มีอยู่ในมาตรฐานเก่า ๆ ไป แต่ก็ไม่ใช่ว่าจะไม่มีข้อเสียอยู่เลย โดยข้อเสียหลัก ๆ ของ RS485 มีดังนี้

ต้องใช้ตัวแปลงสัญญาณในการเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์

เนื่องจากปัจจุบันคอมพิวเตอร์ที่เราใช้กันอยู่นั้นไม่มี Port เชื่อมต่อสัญญาณ RS485 โดยตรง จะมีก็แต่ USB หรือ RS232 เท่านั้น ดังนั้น เราต้องเสียงบประมาณเพิ่มขึ้นในการซื้อตัวแปลงสัญญาณ (Converter) เพื่อแปลงสัญญาณจาก RS485 เป็น USB หรือ RS232 ในการเชื่อมต่อนั่นเอง

ความเร็วในการรับส่งข้อมูล

RS485 จะถูกพัฒนาด้านความเร็วในการรับส่งข้อมูลขึ้นมาแล้วก็ตามเมื่อเทียบกับมาตรฐานเก่า แต่ก็ยังมีความล่าช้าอยู่เมื่อเชื่อมต่อในลักษณะเครือข่ายจำนวนมาก ๆ

Solar Roof Top ของอาคารระบบไฟฟ้าอัจฉริยะ Smartgrid Building (Real Lab)



รูปที่ ก.4 การตรวจเช็คสภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ ก.5 การทำความสะอาดแผงเซลล์แสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SHARP



Say yes to solar power!
Because it is the
Global Warming Solution.

NA-F121GK **121W**

Thin-film silicon

Innovation from the photovoltaic pioneer

Sharp, as a solar specialist with 50 years of experience in photovoltaics (PV), makes an essential contribution towards groundbreaking advancements in solar technology.

NA series thin-film photovoltaic modules consist of an amorphous and a microcrystalline silicon film. This microamorphous tandem structure absorbs not only the visible but also the invisible components of the sun's spectrum and leads to especially effective utilisation of solar energy.

The Sharp NA series module offers optimal system integration - both technically and economically - and suitable for installation in on-grid and off-grid systems.

Product features

- Tandem structure comprising of an amorphous and a microcrystalline silicon film with stabilized module efficiency of up to 8.5%.
- The black module creates a harmonious appearance.
- Higher energy yield per Watt both at high temperatures and with diffuse light.
- Use of annealed glass, EVA plastic and weather-protection foil, as well as an anodized aluminum frame with water drainage holes for prolonged use.
- Output: connection cable with water-protected plug connector.
- Qualified IEC 61646, EN : 61730 PV module safety standard

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Mechanical data

Cell	Thin-film silicon (Amorphous Si/ microcrystalline Si tandem structure)
Solar cell strings	45 in series
Dimensions (LxWxD mm)	1409 x 1009 x 46 mm
Weight (Typical)	18kg
Connection type	Multi-Contact PV-KBT3II/KST3II
Bypass diodes	One bypass diodes shall be installed in the terminal box

Limit values

Storage humidity	Less than 90	%
Operating temperature (cell)	-40 to +90	°C
Storage temperature	-40 to +90	°C
Maximum system voltage	1,000	VDC
Maximum mechanical load	2,400	N/m ²

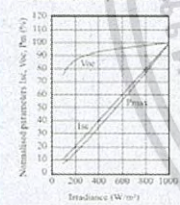
Electrical data

Module production in Japan		Initial value NA-F121GK	Nominal value NA-F121GK	
Rated power		142.4W	121W	W
Open circuit voltage	V _{oc}	60.2	59.2	V
Short circuit current	I _{sc}	3.43	3.34	A
Voltage at maximum power	V _{pm}	48.2	45	V
Current at maximum power	I _{pm}	2.96	2.69	A
Module efficiency			8.5	%
Temperature coefficient open circuit voltage	$\alpha_{V_{oc}}$		-0.3	%/°C
Temperature coefficient short circuit current	$\alpha_{I_{sc}}$		0.070	%/°C
Temperature coefficient power	$\alpha_{P_{m}}$		-0.24	%/°C
NOCT			44	°C

The electrical data applies under standard testing conditions (STC): radiation 1,000W/m² with a spectrum of AM 1.5 and at a cell temperature of 25°C. The power output is subject to a manufacturing tolerance of +10% and -5%.

Characteristic curves

Characteristic curves. Current-power against irradiance (cell temperature: 25°C)



Characteristic curves. Operating parameters (Isc, Voc, Pm) against cell temperature



Applications

- On-grid PV systems
- Off-grid systems
- On-roof PV systems (roof parallel)
- On-roof PV systems (on stilts)
- Ground installations

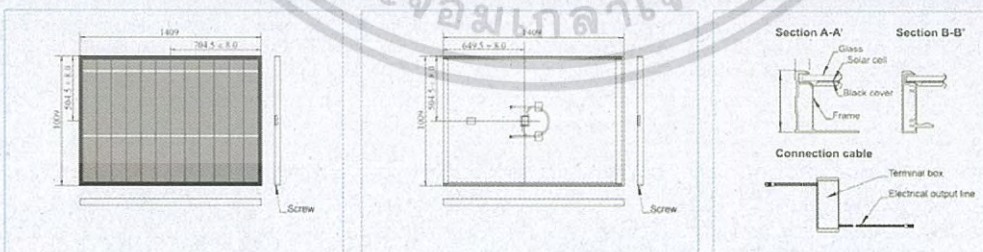
Note

Modifications to technical data are possible without prior notice. Please request the current data sheets from Sharp before using Sharp products. Sharp assumes no responsibility for damage caused to equipment fitted with Sharp products based on unverified information.

The specifications may deviate slightly and are not guaranteed. Installation and operating instructions are to be obtained from the relevant manuals or can be downloaded from www.sharp-world.com.

This module should not be connected directly to a load.

External dimensions



SHARP

SHARP THAI CO.,LTD.

952 RAMALAND BUILDING, 12th FLOOR, RAMA IV ROAD, SURIYAWONG, BANGRAK, BANGKOK 10500

TEL. 0 2638 3970-72 FAX. 0 2638 3777

e-mail : virut.m@stcl.sharp-world.com, chatchawat.c@stcl.sharp-world.com

www.sharphai.co.th

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PD10-242(1/15)

4/2/2012
Tabuchi Electric Co., Ltd.
Technology Development Headquarter



10kW Power Conditioner
Communication Specifications for Measurement
N Protocol Ver. 1.01

Target Power Conditioner Model

- EPU-A-T100
- SP10-AC4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PD10-242(2/15)

Index

0. Revision history	3
1. System configuration	4
2. Power conditioner setting and method	4
(1) Address setting	4
(2) Power conditioner unit setting	4
3. Communication control procedure	5
(1) Communication control procedure between Power conditioner	5
(2) Communication control procedure detail of Master station	6
(3) Communication control procedure detail of Slave station	7
(4) Control procedure sample	8
4. Communication time	8
(1) Communication time	8
(2) Transfer switching time	8
5. Power conditioner communication protocol	10
(1) Communication specification	10
(2) Transfer protocol	10
(3) Each data specification	13
(4) 4~20mA / 1~5V Input / Output	14
(5) Transfer statement sample of Power conditioner status (ASCII Signage)	14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PD10-242(3/15)

0. Revision history

Ver.	Modification	Revision
1.01	Original release	2010/11/2 Tabuchi Electric
1.0.1	Change waiting time T4	2012/2/14 Tabuchi Electric



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PD10-242(4/15)

1. System configuration

Configuration with maximum 15 units of Power conditioner is possible.

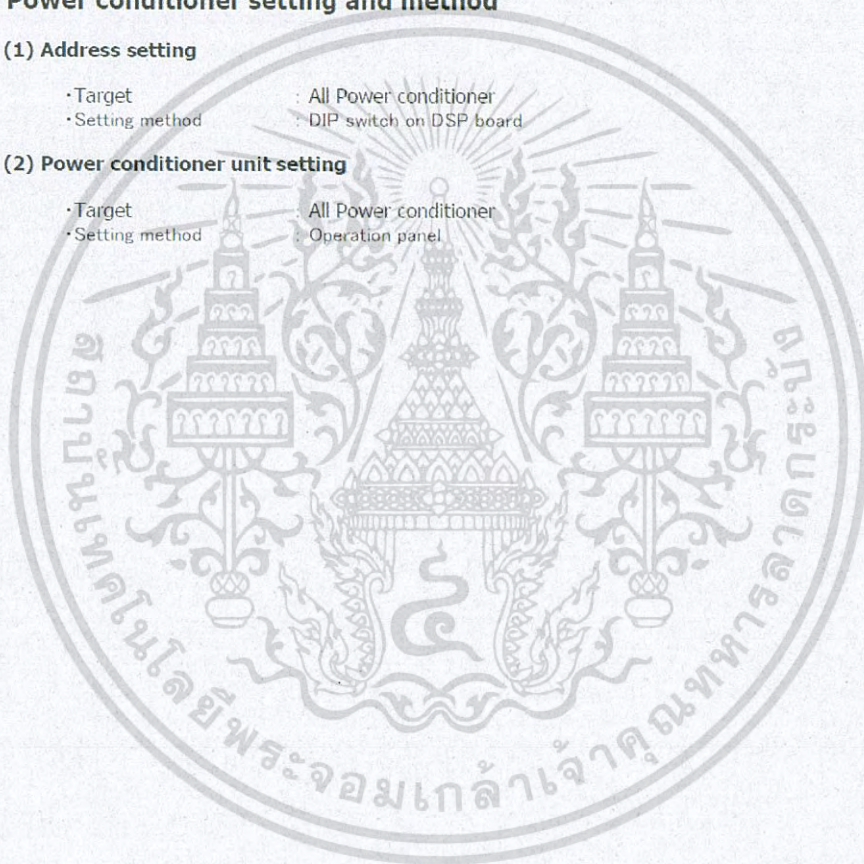
2. Power conditioner setting and method

(1) Address setting

- Target : All Power conditioner
- Setting method : DIP switch on DSP board

(2) Power conditioner unit setting

- Target : All Power conditioner
- Setting method : Operation panel



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PD10-242(5/15)

3. Communication control procedure

(1) Communication control procedure between Power conditioner

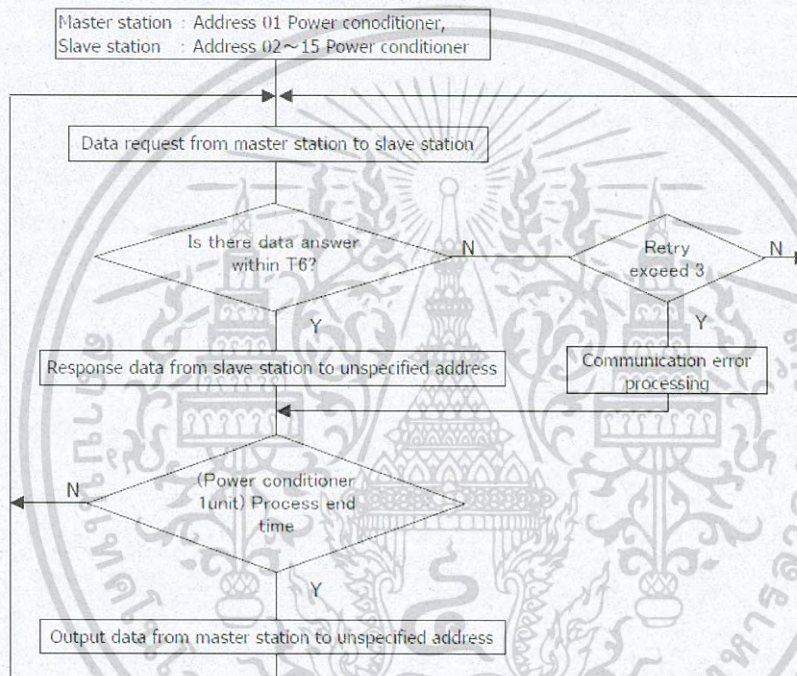


Figure1 Communication control procedure between Power conditioner.

※1 T6, reference T6 time of 4.(2) item.

※2 Capture the unspecified address data and display each calculation processing at each station.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PD10-242(6/15)

(2) Communication control procedure detail of Master station

※ Timer T1~T6 is described at 4.(2) Item

(a) Initial state

In the case of request message sending, receive the message at last and then send the request message to T3 (or more) after the lapse and transit to response message waiting state.

(b) Response transfer waiting state

2-1 After transmitting the request message, in the case of STX received within T6, transition to message receiving waiting state.

2-2 In the case of STX unreceivable within T6, continue to the present state. However, in the case of retransmission, transmit request message.

2-3 All ignore, except STX request.

(c) Message receiving waiting state

3-1 After transmitting the request message. In the case of all data received within T2 until CR, processing is performed in accordance with the condition.

- In case of Checksum(CR) is normal and destination station should be received. Transition to the initial state as normal communication.

- Other than above

Transit to Response message waiting state. However, in the case of retransmission, transmit request message.

3-2 In case of all character data unable to receive within T2 until CR, Transition to the initial state as timeout. However, in the case of retransmission, transmit request message.

3-3 In the case of STX received, initiate message and discard the transfer statement that has been received and then receive the newly message.

3-4 In the case of Receive error (Parity error, framing error, overrun error) occurred, ignore that receive message.

3-5 In the case of default length message over, discard message and transit to response message waiting state.

PD10-242(7/15)

(3) Communication control procedure detail of Slave station

※Timer T1~T6 is described in item 4.(2)

(a) Initial state

- 1-1 In case of received STX, transit to receive message waiting state.
- 1-2 In case of received except STX, ignore all received content.

(b) Message receiving waiting state

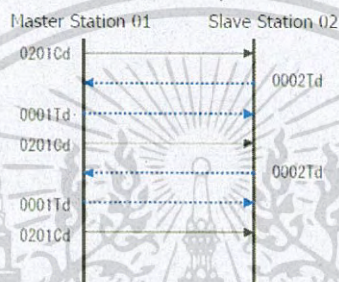
Identical except for the message receiving waiting state transfer statement of the master station of processing conditions and the following 2 points.

- In case of request message was received, send the response message.
 - No retransmission process for Slave station.
- 2-1 In case of receiving STX all data within T1 until CR, performs process according to the following condition
- In case of Checksum(CR) is normal and destination station should be received. Transition to the initial state as normal communication.
 - Other than above Transition to the initial state.
- 2-2 In case of all character data unable to receive within T1 until CR, Transition to the initial state as timeout.
- 2-3 In the case of STX received, initiate message and discard the transfer statement that has been received and then receive the newly message.
- 2-4 In the case of Receive error (Parity error, framing error, overrun error) occurred, ignore that receive message.
- 2-5 In the case of default length message over, discard message and transit to response message waiting state.

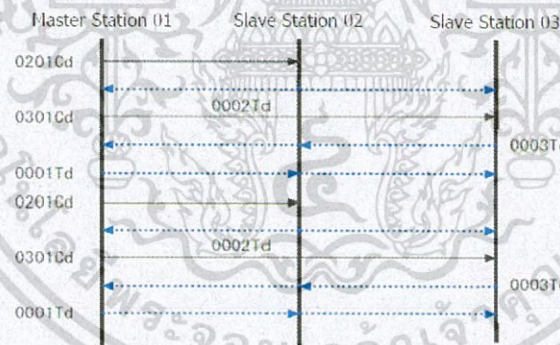
PD10-242(8/15)

(4) Control procedure sample

- Power conditioner 2 units configuration.



- Power conditioner 3 units configuration.

**4. Communication time****(1) Communication time**

Power conditioner communication time must be within 3.5 seconds/1 cycle when maximum 15 units of Power conditioner are used (Retry occur exception).

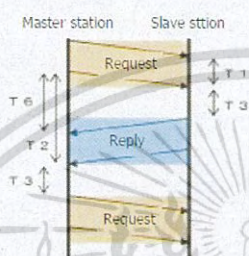
(2) Transfer switching time

Control line transceivers of both master and slave station for 3-wire half duplex.

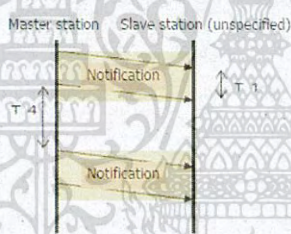
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PD10-242(9/15)

① Request reply format :



② Notification format



	Value [ms]	Remark
T1	150	Waiting time, after received STX until receive CR. ※ Consider time of maximum frame length sending with 19200bps.
T2	130	Waiting time, after sent CR until receive CR. ※ Consider time of T1+T3 + Margin
T3	30	Minimum waiting time, after received CR until send transfer response. Maximum allowable time, after sent CR until OFF Line Transceiver.
T4	30(ver1.01)	Minimum waiting time, after sent CR until send the next transfer.
T6	50	Waiting time, after sent CR data request until receive STX data response.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PD10-242(10/15)

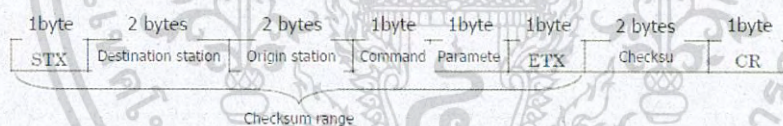
5. Power conditioner communication protocol

(1) Communication specification

Item	Specification	Remark
Standard	RS-485	
Transmission method	half-double, 3-wire	
Synchronization method	Asynchronous mode (Asynchronous) method	
Transmission rate	19200bps	
Start bit	1 bit	
Data length	8 bits	
Parity	None	
Stop bit	1 bit	
Cable length	Total length 1000m (Use for shield wire)	Shielded twisted pair wire 1.25mm 2-2P using
Maximum number	15 units	
Transmission character	ASCII code	
Maximum data length	166 Character	

(2) Transfer protocol

(a) 「Request」 Element



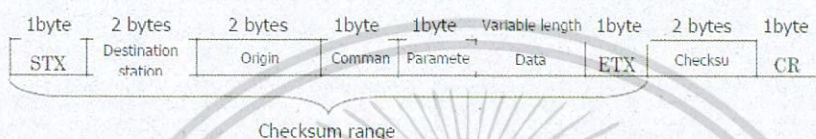
STX	02H
Destination station	ASCII Code 2 bytes : 00~15 (3030H~3135H)
Origin station	ASCII Code 2 bytes : 01~15 (3031H~3135H)
Command	ASCII Code 1 byte : C(43H)
Parameter	ASCII Code 1 byte : d, s(64H~73H)
ETX	03H
Checksum	Add checksum range until STX~ETX with all ASCII Code, converse the lower 1 byte to ASCII Code (2 characters) Value : 00~FF (3030H~4646H)
CR	0DH

※ Use ", "(2Ch) to separate between data.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PD10-242(11/15)

(b) 「Response」Element



STX	02H
Destination station	ASCII Code 2 bytes : 00~15(3030H~3135H)
Origin station	ASCII Code 2 bytes : 01~15(3031H~3135H)
Command	ASCII Code 1 byte : T(54H)
Parameter	ASCII Code 1 byte : d, s(64H, 73H)
Data variable length	ASCII Code (Size is due to parameter)
ETX	03H
Checksum	Add checksum range until STX~ETX with all ASCII Code, converse the lower 1 byte to ASCII Code(2 characters) Value : 00~FF(3030H~4646H)
CR	0DH

※ Use "\", "(2Ch) to separate between data.

(c) Address allocation table

Address	Compatible device
00	Unspecified
01	Main Power conditioner
02~15	Sub-Power conditioner

(d) Request - Response comparison table

Request			Response		
Command	Parameter	Content	Command	Parameter	Content
C (43H)	d (64H)	PCS status, Industrial value request	T (54H)	d (64H)	PCS status, Industrial value response
C (43H)	s (73H)	(Unuse)	T (54H)	s (73H)	Communication error

(e) Parameter and data

① Command : C(Request)

Parameter	Content	Remark
d	PCS status, Industrial value request	
s	(Unuse)	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PD10-242(12/15)

② Command : T(Response d, s)

Parameter	Data No.	Content	Data format	Data range	Size	Remark
d	1	Device state 1	□□	00~FF	ASCII2 byte	
	2	Device state 2	□□	00~FF	ASCII2 byte	
	3	Minor fault state (System abnormal)	□□	00~FF	ASCII2 byte	
	4	Minor fault state (Device abnormal)	□□	00~FF	ASCII2 byte	
	5	Double fault state	□□	00~FF	ASCII2 byte	
	6	DC voltage1	□□□.□	000.0~999.9	ASCII4 byte	V
	7	DC voltage2	□□□.□	000.0~999.9	ASCII4 byte	V
	8	DC voltage3	□□□.□	000.0~999.9	ASCII4 byte	V
	9	DC voltage4	□□□.□	000.0~999.9	ASCII4 byte	V
	10	DC voltage5	□□□.□	000.0~999.9	ASCII4 byte	V
	11	DC current1	△□□.□□	-99.99~+99.99	ASCII5 byte	A
	12	DC current2	△□□.□□	-99.99~+99.99	ASCII5 byte	A
	13	DC current3	△□□.□□	-99.99~+99.99	ASCII5 byte	A
	14	DC current4	△□□.□□	-99.99~+99.99	ASCII5 byte	A
	15	DC current5	△□□.□□	-99.99~+99.99	ASCII5 byte	A
	16	DC power (Total)	△□□.□□	-99.99~+99.99	ASCII5 byte	kW
	17	AC voltage	□□□.□	000.0~999.9	ASCII4 byte	V
	18	AC current	□□.□□	00.00~99.99	ASCII4 byte	A
	19	AC power	△□□.□□	-99.99~+99.99	ASCII5 byte	kW
	20	Frequency	□□.□	00.0~99.9	ASCII3 byte	Hz
	21	Cumulative watt	□□□□□□□□	0000000~9999999	ASCII7 byte	kWh
	22	4~20mA (Solar radiation intensity)	□.□□□□	0.000~9.999	ASCII4 byte	1~5V O/P
	23	4~20mA (Temperature)	□.□□□□	0.000~9.999	ASCII4 byte	1~5V O/P
s	1	Communication error	□□	00~FF	ASCII2 byte	

Complement 1)

- Numerical data output from the high-order digit. Symbol △ output ASCII character "+" or "-".

Complement 2)

- 「Frequency」 output number of digit " - " (2DH) during power outage (30V less than)
- 「Solar radiation intensity」 「Ambient temperature」 output are 1.000~5.000[V] for input 4~20mA and 0.000[V] output for no input state (Less than 0.25V)
- Data of 「DC voltage 1~5」 「DC power (Total)」 「AC current」 「AC power」 except during operating are set to Zero(0).
- 「DC voltage 1~5」 「AC voltage」 data that less than 30V are set to Zero(0).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PD10-242(13/15)

(3) Each data specification

① Parameter d - Data 1 Device state1 (ASCII2 byte)

MSB	bit7	bit6	bit5	bit4	bit3	bit2	bit1	bit0	LSB
bit7	: Operating (0 = None operating, 1 = Operating state)								
bit6	: Standby (0 = None standby, 1 = Standby state)								
bit5	: Stop (0 = None stop, 1 = Stop state)								
bit4	: Fault (0 = None fault, 1 = When a fault occurs)								
bit3	: (0 Fixation)								
bit2	: RY1 Contact output (0 = RY1 None contact output, 1 = RY1 During contact output)								
bit1	: RY2 Contact output (0 = RY2 None contact output, 1 = RY2 During contact output)								
bit0	: (0 Fixation)								

② Parameter d - Data 2 Device state 2 (ASCII2 byte)

MSB	bit7	bit6	bit5	bit4	bit3	bit2	bit1	bit0	LSB
bit7	: During control voltage suppression (Voltage suppression control start · 1 holding)								
bit6	: During temperature rise output limit (Temperature rise output restriction start · 1 holding)								
bit5	: (0 Fixation)								
bit4	: (0 Fixation)								
bit3	: (0 Fixation)								
bit2	: (0 Fixation)								
bit1	: (0 Fixation)								
bit0	: (0 Fixation)								

③ Parameter d - Data 3 Minor fault state (System abnormal) (ASCII2 Code)

MSB	bit7	bit6	bit5	bit4	bit3	bit2	bit1	bit0	LSB
bit7	: System over voltage (System over voltage detection · 1 holding)								
bit6	: System under voltage (System under voltage detection · 1 holding)								
bit5	: Over frequency (Over frequency detection · 1 holding)								
bit4	: Under frequency (Under frequency detection · 1 holding)								
bit3	: OVGR (OVGR detection · 1 holding)								
bit2	: Active islanding operation (Active islanding operation protection · 1 holding)								
bit1	: Passive islanding operation (Passive islanding operation protection · 1 holding)								
bit0	: (0 Fixation)								

PD10-242(14/15)

④ Parameter d - Data 4 Minor fault state (Device abnormal) (ASCII2 Code)

MSB	bit7	bit6	bit5	bit4	bit3	bit2	bit1	bit0	LSB
	bit7	: Instant over voltage (Instant overvoltage detection · 1 holding)							
	bit6	: Instant under voltage (Instant under voltage detection · 1 holding)							
	bit5	: DC under voltage (DC under voltage detection · 1 holding)							
	bit4	: DC component leakage (DC component leakage detection · 1 holding)							
	bit3	: (0 Fixation)							
	bit2	: (0 Fixation)							
	bit1	: (0 Fixation)							
	bit0	: (0 Fixation)							

⑤ Parameter d - Data 5 Double fault condition (ASCII2 Code)

MSB	bit7	bit6	bit5	bit4	bit3	bit2	bit1	bit0	LSB
	bit7	: IPM abnormal (IPM abnormality detection · 1 holding)							
	bit6	: DC / DC abnormal (DC / DC abnormal protection · 1 holding)							
	bit5	: DC over voltage (DC over voltage protection · 1 holding)							
	bit4	: MCCB trip (MCCB trip detection · 1 holding)							
	bit3	: Synchronous communication abnormal (Synchronous communication anomaly detection · 1 holding)							
	bit2	: DC ground fault (DC ground fault detection · 1 holding)							
	bit1	: (0 Fixation)							
	bit0	: (0 Fixation)							

(4) 4~20mA / 1~5V Input / Output

No	Content	
22	Solar radiation intensity	Solar radiation intensity measurement input 4~20mA converted value to 1~5V
23	Temperature	Temperature measurement input 4~20mA converted value to 1~5V

(5) Transfer statement sample of Power conditioner status (ASCII Signage)

Request transfer (STX)0201Cd(ETX)7D(CR)

1	(STX)	Start of text character = 02h	
2	02	Destination station	
3	01	Origin station	From device No.1 to device No.2
4	C	Command	Call
5	d	Parameter	Power conditioner status
6	(ETX)	End-of-text character = 03h	No data portion to request
7	7D	Checksum	
8	(CR)	Recovery character = 0Dh	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PD10-242(15/15)

Response transfer (STX)0002Td80,00,00,00,00,3830,3828,3832,3833,...
 ,1234567,1265,3850(ETX)FF(CR)

1 (STX)	Start of text character = 02h	
2 00	Destination station	
3 02	Origin station	From device No.1 to unspecified
4 T	Command	Transmit
5 d	Parameter	Power conditioner status
6 80,	Device state1	10000000b Data separator is ","(2Ch)
7 00,	Device state2	00000000b
8 00,	Minor fault state (System abnormal)	00000000b
9 00,	Minor fault state (Device abnormal)	00000000b
10 00,	Double fault state	00000000b
11 3830,	DC voltage1	383.0V
12 3828,	DC voltage2	382.8V
13 3832,	DC voltage3	383.2V
14 3833,	DC voltage4	383.3V
15 3826,	DC voltage5	382.6V
16 +0310,	DC current1	+3.10A
17 +0308,	DC current2	+3.08A
18 +0311,	DC current3	+3.11A
19 +0303,	DC current4	+3.03A
20 +0290,	DC current5	+2.90A
21 +0583,	DC power (General)	+5.83kW
22 2030,	AC voltage	203.0V
23 1558,	AC current	15.58A
24 +0548,	AC power	5.48kW
25 599,	Frequency	59.9Hz
26 1234567,	Cumulative watt	1234567kWh
27 1265,	4~20mA (Solar radiation intensity)	1.265V
28 3850	4~20mA(Temperature)	3.850V (Separator is not required in the final data)
29 (ETX)	End-of-text character = 03h	
30 FF	Checksum	
31 (CR)	Recovery character = 0Dh	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่วากรณ์ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ข

ผลการทดลองการตรวจจับการเสื่อมสภาพของแผงโซลาร์เซลล์โดยวิธีการ Box Plot ด้วย
การ Simulation และการทำการทดลองจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองจากการ Simulation

ตารางที่ ค.1 ค่ากระแสไฟฟ้าแต่ละสตรึงเทียบกับ ขอบเขตบนและขอบเขตล่างในสภาวะ Normal Condition

I_{string} (A) Time (s)	I_1	I_2	I_3	I_4	UPPER BOUND	LOWER BOUND
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0200	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0400	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0600	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0800	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.1000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.1200	0.4692	0.4699	0.4701	0.4715	0.4716	0.4686
0.1400	0.8148	0.8170	0.8175	0.8201	0.8207	0.8139
0.1600	1.1604	1.1642	1.1649	1.1688	1.1699	1.1593
0.1800	1.5060	1.5113	1.5123	1.5174	1.5190	1.5046
0.2000	1.8516	1.8584	1.8597	1.8661	1.8682	1.8499
0.2200	2.5630	2.5687	2.5703	2.5763	2.5787	2.5604
0.2400	3.2746	3.2789	3.2813	3.2865	3.2899	3.2706
0.2600	3.9862	3.9891	3.9925	3.9968	4.0014	3.9806
0.2800	4.6979	4.6997	4.7037	4.7084	4.7134	4.6907
0.3000	5.4095	5.4114	5.4151	5.4202	5.4245	5.4028
0.3200	5.9125	5.9146	5.9190	5.9231	5.9290	5.9050
0.3400	6.4153	6.4185	6.4229	6.4259	6.4327	6.4087
0.3600	6.9214	6.9227	6.9272	6.9294	6.9358	6.9143
0.3800	7.4272	7.4254	7.4312	7.4324	7.4387	7.4195
0.4000	7.9324	7.9290	7.9352	7.9367	7.9417	7.9254
0.4200	8.1851	8.1837	8.1871	8.1889	8.1918	8.1805
0.4400	8.4379	8.4383	8.4389	8.4420	8.4419	8.4360

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$I_{\text{string}} \text{ (A)}$ Time (s)	I_1	I_2	I_3	I_4	UPPER BOUND	LOWER BOUND
0.4600	8.6906	8.6915	8.6905	8.6940	8.6946	8.6881
0.4800	8.9428	8.9459	8.9430	8.9461	8.9504	8.9385
0.5000	9.1961	9.1995	9.1952	9.1981	9.2023	9.1920
0.5200	9.2016	9.2068	9.2018	9.2038	9.2087	9.1977
0.5400	9.2096	9.2132	9.2090	9.2095	9.2122	9.2076
0.5600	9.2196	9.2192	9.2163	9.2149	9.2243	9.2109
0.5800	9.2287	9.2251	9.2235	9.2202	9.2310	9.2177
0.6000	9.2362	9.2301	9.2300	9.2261	9.2355	9.2252
0.6200	8.9675	8.9611	8.9602	8.9578	8.9674	8.9549
0.6400	8.6988	8.6927	8.6934	8.6899	8.6988	8.6879
0.6600	8.4300	8.4243	8.4257	8.4218	8.4315	8.4189
0.6800	8.1613	8.1559	8.1567	8.1536	8.1616	8.1515
0.7000	7.8924	7.8873	7.8875	7.8853	7.8916	7.8839
0.7200	7.3704	7.3665	7.3643	7.3631	7.3727	7.3588
0.7400	6.8480	6.8461	6.8422	6.8405	6.8537	6.8347
0.7600	6.3261	6.3255	6.3197	6.3179	6.3353	6.3096
0.7800	5.8042	5.8041	5.7967	5.7952	5.8159	5.7846
0.8000	5.2824	5.2819	5.2735	5.2725	5.2952	5.2601
0.8200	4.4582	4.4556	4.4406	4.4351	4.4819	4.4135
0.8400	3.6341	3.6272	3.6071	3.5958	3.6659	3.5674
0.8600	2.8100	2.7983	2.7742	2.7555	2.8488	2.7220
0.8800	1.9868	1.9685	1.9425	1.9163	2.0288	1.8802
0.9000	1.1642	1.1384	1.1117	1.0779	1.2073	1.0408
0.9200	0.9470	0.9275	0.9057	0.8783	0.9826	0.8486
0.9400	0.7308	0.7167	0.6993	0.6787	0.7594	0.6550
0.9600	0.5154	0.5059	0.4928	0.4805	0.5361	0.4620
0.9800	0.2999	0.2951	0.2886	0.2823	0.3102	0.2732

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

I_{string} (A)					UPPER BOUND	LOWER BOUND
Time (s)	I_1	I_2	I_3	I_4		
1.0000	0.0838	0.0839	0.0838	0.0838	0.0839	0.0838

ตารางที่ ค.2 ค่ากระแสไฟฟ้าแต่ละสตริงเทียบกับ ขอบเขตบนและขอบเขตล่างในสภาวะ Open Circuit Condition

I_{string} (A)					UPPER BOUND	LOWER BOUND
Time (s)	I_1	I_2	I_3	I_4		
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0200	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0400	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0600	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0800	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.1000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.1200	0.0000	0.4699	0.4701	0.4715	0.6475	0.1754
0.1400	0.0000	0.8170	0.8175	0.8201	1.1263	0.3047
0.1600	0.0000	1.1642	1.1649	1.1688	1.6050	0.4340
0.1800	0.0000	1.5113	1.5123	1.5174	2.0838	0.5633
0.2000	0.0000	1.8584	1.8597	1.8661	2.5625	0.6926
0.2200	0.0000	2.5687	2.5703	2.5763	3.5398	0.9585
0.2400	0.0000	3.2789	3.2813	3.2866	4.5179	1.2240
0.2600	0.0000	3.9891	3.9925	3.9968	5.4962	1.4892
0.2800	0.0000	4.6997	4.7038	4.7084	6.4752	1.7546

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

I_{string} (A) Time (s)	I_1	I_2	I_3	I_4	UPPER BOUND	LOWER BOUND
0.3000	0.0000	5.4114	5.4151	5.4202	7.4531	2.0218
0.3200	0.0000	5.9146	5.9191	5.9231	8.1463	2.2098
0.3400	0.0000	6.4186	6.4231	6.4260	8.8386	2.3991
0.3600	0.0000	6.9231	6.9272	6.9298	9.5311	2.5890
0.3800	0.0000	7.4275	7.4313	7.4338	10.2239	2.7787
0.4000	0.0000	7.9316	7.9353	7.9374	10.9166	2.9680
0.4200	0.0000	8.1838	8.1872	8.1890	11.2624	3.0631
0.4400	0.0000	8.4385	8.4391	8.4421	11.6064	3.1623
0.4600	0.0000	8.6916	8.6908	8.6941	11.9534	3.2569
0.4800	0.0000	8.9463	8.9431	8.9466	12.3049	3.3488
0.5000	0.0000	9.2009	9.1956	9.1992	12.6540	3.4423
0.5200	0.0000	9.2070	9.2025	9.2044	12.6599	3.4471
0.5400	0.0000	9.2140	9.2097	9.2097	12.6662	3.4519
0.5600	0.0000	9.2200	9.2166	9.2153	12.6764	3.4525
0.5800	0.0000	9.2256	9.2240	9.2207	12.6877	3.4522
0.6000	0.0000	9.2317	9.2315	9.2262	12.6993	3.4519
0.6200	0.0000	8.9639	8.9634	8.9580	12.3312	3.3509
0.6400	0.0000	8.6955	8.6948	8.6903	11.9609	3.2518
0.6600	0.0000	8.4269	8.4265	8.4224	11.5913	3.1521
0.6800	0.0000	8.1579	8.1580	8.1542	11.2213	3.0523

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$I_{\text{string}} \text{ (A)}$ Time (s)	I_1	I_2	I_3	I_4	UPPER BOUND	LOWER BOUND
0.7000	0.0000	7.8883	7.8887	7.8859	10.8494	2.9535
0.7200	0.0000	7.3679	7.3671	7.3633	10.1345	2.7553
0.7400	0.0000	6.8469	6.8443	6.8420	9.4151	2.5613
0.7600	0.0000	6.3258	6.3215	6.3203	8.6961	2.3667
0.7800	0.0000	5.8044	5.7998	5.7982	7.9794	2.1702
0.8000	0.0000	5.2829	5.2778	5.2760	7.2621	1.9739
0.8200	0.0000	4.4560	4.4436	4.4361	6.1261	1.6477
0.8400	0.0000	3.6279	3.6115	3.5975	4.9918	1.3219
0.8600	0.0000	2.7988	2.7806	2.7581	3.8599	0.9938
0.8800	0.0000	1.9696	1.9499	1.9196	2.7275	0.6670
0.9000	0.0000	1.1413	1.1194	1.0828	1.5940	0.3430
0.9200	0.0000	0.9295	0.9112	0.8819	1.2973	0.2800
0.9400	0.0000	0.7183	0.7030	0.6813	1.0005	0.2172
0.9600	0.0000	0.5070	0.4958	0.4823	0.7038	0.1564
0.9800	0.0000	0.2957	0.2901	0.2832	0.4101	0.0938
1.0000	0.0000	0.0843	0.0843	0.0842	0.1160	0.0314

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.3 ค่ากระแสไฟฟ้าแต่ละสตรึงเทียบกับ ขอบเขตบนและขอบเขตล่างในสภาวะ Line-Line

Condition (Fault Resistance = 0 ohm)

I_{string} (A) Time (s)	I_1	I_2	I_3	I_4	UPPER BOUND	LOWER BOUND
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0200	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0400	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0600	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0800	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.1000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.1200	0.4682	0.4699	0.4701	0.4715	0.4720	0.4680
0.1400	0.8139	0.8170	0.8175	0.8201	0.8210	0.8134
0.1600	1.1597	1.1642	1.1649	1.1688	1.1701	1.1588
0.1800	1.5055	1.5113	1.5123	1.5174	1.5192	1.5042
0.2000	1.8513	1.8584	1.8597	1.8661	1.8683	1.8497
0.2200	2.5630	2.5687	2.5703	2.5763	2.5787	2.5604
0.2400	3.2746	3.2789	3.2813	3.2865	3.2899	3.2706
0.2600	3.9862	3.9891	3.9925	3.9968	4.0014	3.9806
0.2800	4.6979	4.6997	4.7037	4.7084	4.7134	4.6907
0.3000	5.4095	5.4114	5.4151	5.4202	5.4245	5.4028
0.3200	5.9125	5.9146	5.9190	5.9231	5.9290	5.9050
0.3400	6.4153	6.4185	6.4229	6.4259	6.4327	6.4087
0.3600	6.9180	6.9227	6.9272	6.9294	6.9370	6.9122
0.3800	7.4192	7.4254	7.4312	7.4324	7.4430	7.4124
0.4000	7.9112	7.9290	7.9352	7.9367	7.9522	7.9080
0.4200	8.0959	8.1837	8.1871	8.1889	8.2264	8.1230
0.4400	7.9219	8.4383	8.4389	8.4420	8.6354	8.1136
0.4600	6.3027	8.6915	8.6905	8.6940	9.5900	7.1957
0.4800	2.4711	8.9460	8.9430	8.9462	11.3775	4.8935

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

I_{string} (A) Time (s)	I_1	I_2	I_3	I_4	UPPER BOUND	LOWER BOUND
0.5000	0.0000	9.2001	9.1952	9.1981	12.6520	3.4431
0.5200	0.0000	9.2069	9.2019	9.2038	12.6594	3.4466
0.5400	0.0000	9.2132	9.2090	9.2095	12.6660	3.4513
0.5600	0.0000	9.2193	9.2165	9.2151	12.6759	3.4526
0.5800	0.0000	9.2254	9.2239	9.2205	12.6876	3.4520
0.6000	0.0000	9.2314	9.2312	9.2262	12.6988	3.4521
0.6200	0.0000	8.9631	8.9627	8.9579	12.3294	3.3519
0.6400	0.0000	8.6941	8.6935	8.6900	11.9579	3.2533
0.6600	0.0000	8.4245	8.4260	8.4220	11.5874	3.1539
0.6800	0.0000	8.1561	8.1569	8.1539	11.2176	3.0541
0.7000	0.0000	7.8877	7.8878	7.8858	10.8477	2.9543
0.7200	0.0000	7.3677	7.3646	7.3632	10.1299	2.7579
0.7400	0.0000	6.8467	6.8430	6.8418	9.4127	2.5625
0.7600	0.0000	6.3257	6.3213	6.3200	8.6960	2.3664
0.7800	0.0000	5.8043	5.7996	5.7978	7.9794	2.1697
0.8000	0.0000	5.2827	5.2775	5.2755	7.2621	1.9734
0.8200	0.0000	4.4559	4.4435	4.4359	6.1260	1.6475
0.8400	0.0000	3.6277	3.6089	3.5973	4.9871	1.3245
0.8600	0.0000	2.7987	2.7744	2.7580	3.8484	1.0005
0.8800	0.0000	1.9695	1.9434	1.9186	2.7164	0.6724
0.9000	0.0000	1.1406	1.1125	1.0791	1.5848	0.3441
0.9200	0.0000	0.9294	0.9069	0.8801	1.2911	0.2815
0.9400	0.0000	0.7181	0.7012	0.6811	0.9974	0.2190
0.9600	0.0000	0.5068	0.4956	0.4821	0.7036	0.1564
0.9800	0.0000	0.2955	0.2899	0.2831	0.4098	0.0938
1.0000	0.0000	0.0843	0.0842	0.0841	0.1160	0.0314

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.4 ค่ากระแสไฟฟ้าแต่ละสตริงเทียบกับ ขอบเขตบนและขอบเขตล่างในสภาวะ Line-Line
(Fault Resistance = 0 Ω)

I_{string} (A) Time (s)	I_1	I_2	I_3	I_4	UPPER BOUND	LOWER BOUND
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0200	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0400	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0600	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0800	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.1000	0.4682	0.4699	0.4701	0.4715	0.4720	0.4680
0.1200	0.8139	0.8170	0.8175	0.8201	0.8210	0.8134
0.1400	1.1597	1.1642	1.1649	1.1688	1.1701	1.1588
0.1600	1.5055	1.5113	1.5123	1.5174	1.5192	1.5042
0.1800	1.8513	1.8584	1.8597	1.8661	1.8683	1.8497
0.2000	2.5630	2.5687	2.5703	2.5763	2.5787	2.5604
0.2200	3.2746	3.2789	3.2813	3.2865	3.2899	3.2706
0.2400	3.9862	3.9891	3.9925	3.9968	4.0014	3.9806
0.2600	4.6979	4.6997	4.7037	4.7084	4.7134	4.6907
0.2800	5.4095	5.4114	5.4151	5.4202	5.4245	5.4028
0.3000	5.9125	5.9146	5.9190	5.9231	5.9290	5.9050
0.3200	6.4153	6.4185	6.4229	6.4259	6.4327	6.4087
0.3400	6.9180	6.9227	6.9272	6.9294	6.9370	6.9122
0.3600	7.4194	7.4254	7.4312	7.4324	7.4429	7.4125
0.3800	7.9137	7.9290	7.9352	7.9367	7.9512	7.9095
0.4000	8.1298	8.1837	8.1871	8.1889	8.2136	8.1442
0.4200	8.2905	8.4383	8.4389	8.4420	8.4971	8.3439
0.4400	8.4040	8.6915	8.6905	8.6940	8.8021	8.5090
0.4600	8.4884	8.9459	8.9430	8.9462	9.1209	8.6544

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

I_{string} (A) Time (s)	I_1	I_2	I_3	I_4	UPPER BOUND	LOWER BOUND
0.4800	8.5544	9.1995	9.1952	9.1981	9.4437	8.7898
0.5000	8.3708	9.2069	9.2019	9.2038	9.5203	8.6784
0.5200	8.1840	9.2132	9.2090	9.2095	9.5969	8.5663
0.5400	7.9926	9.2193	9.2164	9.2149	9.6787	8.4477
0.5600	7.7958	9.2252	9.2236	9.2202	9.7638	8.3242
0.5800	7.6034	9.2304	9.2303	9.2261	9.8451	8.2056
0.6000	7.1407	8.9611	8.9602	8.9578	9.6458	7.8181
0.6200	6.6841	8.6927	8.6934	8.6899	9.4496	7.4317
0.6400	6.2338	8.4243	8.4258	8.4218	9.2496	7.0499
0.6600	5.7905	8.1559	8.1567	8.1537	9.0460	6.6730
0.6800	5.3523	7.8874	7.8876	7.8855	8.8404	6.2993
0.7000	4.6774	7.3668	7.3644	7.3631	8.3750	5.6817
0.7200	4.0153	6.8461	6.8426	6.8406	7.9073	5.0705
0.7400	3.3660	6.3256	6.3206	6.3181	7.4344	4.4675
0.7600	2.7295	5.8042	5.7981	5.7955	6.9556	3.8730
0.7800	2.1057	5.2819	5.2754	5.2727	6.4711	3.2868
0.8000	1.2037	4.4557	4.4425	4.4351	5.6736	2.3995
0.8200	0.3215	3.6273	3.6085	3.5959	4.8670	1.5235
0.8400	0.0000	2.7984	2.7743	2.7569	3.8492	0.9988
0.8600	0.0000	1.9686	1.9432	1.9181	2.7160	0.6721
0.8800	0.0000	1.1401	1.1123	1.0789	1.5844	0.3440
0.9000	0.0000	0.9287	0.9066	0.8798	1.2906	0.2814
0.9200	0.0000	0.7171	0.7009	0.6806	0.9967	0.2187
0.9400	0.0000	0.5060	0.4949	0.4812	0.7029	0.1556
0.9600	0.0000	0.2952	0.2887	0.2824	0.4081	0.0940
0.9800	0.0000	0.0840	0.0840	0.0839	0.1156	0.0314
1.0000	0.0838	0.0839	0.0838	0.0838	0.0839	0.0838

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.5 ค่ากระแสไฟฟ้าแต่ละสตริงเทียบกับ ขอบเขตบนและขอบเขตล่างในสภาวะ Partial

Shading Condition

I_{string} (A)	I_1	I_2	I_3	I_4	UPPER BOUND	LOWER BOUND
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0200	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0400	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0600	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0800	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.1000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.1200	0.4699	0.1394	0.4701	0.4715	0.5952	0.2625
0.1400	0.8170	0.2433	0.8175	0.8201	1.0350	0.4567
0.1600	1.1642	0.3472	1.1649	1.1688	1.4748	0.6510
0.1800	1.5113	0.4511	1.5123	1.5174	1.9146	0.8452
0.2000	1.8584	0.5550	1.8597	1.8661	2.3544	1.0395
0.2200	2.5687	0.7679	2.5703	2.5763	3.2518	1.4385
0.2400	3.2789	0.9809	3.2813	3.2866	4.1500	1.8370
0.2600	3.9891	1.1939	3.9925	3.9968	5.0485	2.2354
0.2800	4.6997	1.4069	4.7038	4.7084	5.9476	2.6339
0.3000	5.4114	1.6199	5.4151	5.4202	6.8456	3.0343
0.3200	5.9146	1.7718	5.9191	5.9231	7.4818	3.3172
0.3400	6.4186	1.9238	6.4230	6.4260	8.1172	3.6015
0.3600	6.9230	2.0757	6.9272	6.9297	8.7528	3.8863
0.3800	7.4273	2.2277	7.4313	7.4336	9.3886	4.1707
0.4000	7.9307	2.3797	7.9353	7.9367	10.0248	4.4538
0.4200	8.1837	2.4555	8.1872	8.1890	10.3416	4.5977
0.4400	8.4384	2.5313	8.4391	8.4421	10.6571	4.7444
0.4600	8.6916	2.6072	8.6908	8.6941	10.9758	4.8863

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

I_{string} (A) \ Time (s)	I_1	I_2	I_3	I_4	UPPER BOUND	LOWER BOUND
0.4800	8.9462	2.6830	8.9431	8.9465	11.2987	5.0257
0.5000	9.2008	2.7588	9.1953	9.1991	11.6195	5.1663
0.5200	9.2070	2.7621	9.2020	9.2042	11.6241	5.1728
0.5400	9.2133	2.7654	9.2091	9.2096	11.6291	5.1797
0.5600	9.2194	2.7687	9.2165	9.2152	11.6377	5.1831
0.5800	9.2255	2.7720	9.2240	9.2207	11.6481	5.1847
0.6000	9.2316	2.7753	9.2314	9.2262	11.6584	5.1865
0.6200	8.9636	2.6939	8.9632	8.9580	11.3205	5.0348
0.6400	8.6950	2.6124	8.6944	8.6901	10.9803	4.8849
0.6600	8.4259	2.5310	8.4260	8.4220	10.6410	4.7342
0.6800	8.1562	2.4496	8.1569	8.1539	10.2992	4.5850
0.7000	7.8877	2.3682	7.8878	7.8858	9.9597	4.4344
0.7200	7.3678	2.2117	7.3647	7.3632	9.3007	4.1401
0.7400	6.8468	2.0552	6.8430	6.8419	8.6421	3.8471
0.7600	6.3257	1.8987	6.3213	6.3201	7.9840	3.5532
0.7800	5.8043	1.7422	5.7997	5.7980	7.3260	3.2588
0.8000	5.2828	1.5857	5.2776	5.2757	6.6675	2.9646
0.8200	4.4559	1.3389	4.4435	4.4360	5.6239	2.4844
0.8400	3.6277	1.0922	3.6089	3.5973	4.5775	2.0072
0.8600	2.7987	0.8455	2.7744	2.7580	3.5314	1.5290
0.8800	1.9695	0.5988	1.9434	1.9186	2.4919	1.0466
0.9000	1.1406	0.3520	1.1125	1.0792	1.4528	0.5642
0.9200	0.9294	0.2866	0.9069	0.8802	1.1836	0.4607
0.9400	0.7181	0.2212	0.7013	0.6812	0.9144	0.3572
0.9600	0.5069	0.1558	0.4956	0.4822	0.6452	0.2538
0.9800	0.2955	0.0904	0.2900	0.2831	0.3760	0.1503
1.0000	0.0843	0.0250	0.0842	0.0841	0.1066	0.0470

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.6 ค่ากระแสไฟฟ้าแต่ละสตริงเทียบกับ ขอบเขตบนและขอบเขตล่างในสภาวะ Degradation

I_{string} (A) Time (s)	I_1	I_2	I_3	I_4	UPPER BOUND	LOWER BOUND
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0200	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0400	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0600	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0800	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.1000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.1200	0.4692	0.4699	0.4701	0.4715	0.4716	0.4686
0.1400	0.8148	0.8170	0.8175	0.8201	0.8207	0.8139
0.1600	1.1603	1.1642	1.1649	1.1688	1.1699	1.1592
0.1800	1.5059	1.5113	1.5123	1.5174	1.5191	1.5045
0.2000	1.8514	1.8584	1.8597	1.8661	1.8682	1.8498
0.2200	2.5625	2.5687	2.5703	2.5763	2.5788	2.5601
0.2400	3.2713	3.2789	3.2813	3.2865	3.2911	3.2685
0.2600	3.9745	3.9891	3.9925	3.9968	4.0058	3.9732
0.2800	4.6294	4.6997	4.7037	4.7084	4.7391	4.6479
0.3000	5.0736	5.4114	5.4151	5.4202	5.5504	5.1929
0.3200	5.2233	5.9146	5.9190	5.9231	6.1875	5.4743
0.3400	5.2928	6.4185	6.4230	6.4259	6.8537	5.7071
0.3600	5.3155	6.9227	6.9272	6.9294	7.5379	5.9107
0.3800	5.3080	7.4259	7.4313	7.4324	8.2342	6.0938
0.4000	5.2791	7.9290	7.9353	7.9367	8.9392	6.2629
0.4200	5.2122	8.1837	8.1872	8.1889	9.3078	6.3206
0.4400	5.1397	8.4384	8.4390	8.4420	9.6788	6.3746
0.4600	5.0623	8.6916	8.6906	8.6941	10.0552	6.4205
0.4800	4.9802	8.9461	8.9430	8.9464	10.4369	6.4616

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

l_{string} (A) Time (s)	l_1	l_2	l_3	l_4	UPPER BOUND	LOWER BOUND
0.5000	4.8940	9.2004	9.1952	9.1985	10.8176	6.5013
0.5200	4.7894	9.2069	9.2019	9.2038	10.8634	6.4400
0.5400	4.6848	9.2132	9.2090	9.2095	10.9092	6.3793
0.5600	4.5804	9.2193	9.2164	9.2151	10.9583	6.3153
0.5800	4.4760	9.2254	9.2238	9.2204	11.0091	6.2495
0.6000	4.3718	9.2313	9.2311	9.2261	11.0591	6.1846
0.6200	4.2525	8.9626	8.9623	8.9579	10.7336	6.0103
0.6400	4.1359	8.6930	8.6935	8.6900	10.4057	5.8389
0.6600	4.0219	8.4244	8.4259	8.4219	10.0791	5.6676
0.6800	3.9106	8.1560	8.1568	8.1538	9.7510	5.4982
0.7000	3.8018	7.8876	7.8877	7.8857	9.4220	5.3304
0.7200	3.6778	7.3675	7.3646	7.3632	8.7505	5.0566
0.7400	3.5559	6.8464	6.8429	6.8416	8.0792	4.7847
0.7600	3.4351	6.3257	6.3212	6.3195	7.4082	4.5125
0.7800	3.3142	5.8042	5.7993	5.7972	6.7368	4.2402
0.8000	3.1913	5.2823	5.2770	5.2747	6.0650	3.9671
0.8200	3.0157	4.4558	4.4433	4.4354	4.9954	3.5315
0.8400	2.7966	3.6274	3.6088	3.5967	3.9385	3.0716
0.8600	2.4749	2.7985	2.7743	2.7578	2.9203	2.5471
0.8800	1.9281	1.9693	1.9433	1.9184	1.9860	1.8895
0.9000	1.1608	1.1405	1.1124	1.0790	1.2078	1.0418
0.9200	0.9459	0.9292	0.9068	0.8800	0.9833	0.8501
0.9400	0.7306	0.7179	0.7011	0.6810	0.7585	0.6586
0.9600	0.5153	0.5064	0.4954	0.4819	0.5335	0.4672
0.9800	0.2999	0.2953	0.2895	0.2825	0.3094	0.2748
1.0000	0.0841	0.0841	0.0841	0.0840	0.0842	0.0840

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองจากการทดลองจริง

ตารางที่ ค.7 ค่ากระแสไฟฟ้าแต่ละสตรึงเทียบกับ ขอบเขตบนและขอบเขตล่างในสภาวะ Normal

Condition						
I_{string} (A)	I_1	I_2	I_3	I_4	UPPER BOUND	LOWER BOUND
Time (s)						
10:01:30 AM	3.59	3.29	3.54	3.73	3.84625	3.25625
10:01:42 AM	3.31	3.26	3.45	3.69	3.82875	2.97875
10:01:54 AM	3.55	3.28	3.41	3.58	3.8275	3.1075
10:02:06 AM	3.33	3.29	3.45	3.76	3.83875	3.00875
10:02:18 AM	3.63	3.31	3.64	3.81	3.88125	3.35125
10:02:32 AM	3.64	3.29	3.31	3.79	4.23625	2.74625
10:02:44 AM	3.6	3.34	3.4	3.65	3.95375	3.04375
10:02:56 AM	3.63	3.43	3.61	3.81	3.84	3.4
10:03:08 AM	3.6	3.24	3.65	3.8	3.95375	3.24375
10:03:20 AM	3.54	3.4	3.71	3.68	3.96125	3.23125
10:03:32 AM	3.69	3.15	3.66	3.71	3.93875	3.28875
10:03:44 AM	3.63	3.39	3.66	3.81	3.88875	3.37875
10:03:56 AM	3.49	3.26	3.68	3.79	4.12	3.02
10:04:08 AM	3.59	3.43	3.68	3.63	3.78125	3.41125
10:04:20 AM	3.68	3.41	3.73	3.69	3.83125	3.48125
10:04:34 AM	3.69	3.28	3.63	3.63	3.79875	3.38875
10:04:46 AM	3.7	3.36	3.7	3.79	3.88375	3.45375
10:04:58 AM	3.69	3.2	3.66	3.84	4.00125	3.27125

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

I_{string} (A)	I_1	I_2	I_3	I_4	UPPER BOUND	LOWER BOUND
10:05:10 AM	3.49	3.43	3.71	3.79	4.1125	3.0925
10:05:22 AM	3.41	3.4	3.46	3.8	3.75125	3.20125
10:05:36 AM	3.65	3.43	3.4	3.74	4.0475	3.0475
10:05:52 AM	3.65	3.4	3.64	3.78	3.83625	3.42625
10:06:04 AM	3.54	3.34	3.54	3.56	3.6275	3.4075
10:06:16 AM	3.71	3.38	3.48	3.86	4.18625	3.01625
10:06:28 AM	3.59	3.34	3.35	3.75	4.05375	2.92375
10:06:40 AM	3.61	3.36	3.65	3.81	3.90375	3.33375
10:06:52 AM	3.68	3.33	3.7	3.84	3.94875	3.37875
10:07:06 AM	3.58	3.38	3.35	3.71	3.9725	3.0125
10:07:18 AM	3.41	3.35	3.56	3.68	3.8825	3.1025
10:07:30 AM	3.76	3.5	3.73	3.85	3.9475	3.5075
10:07:42 AM	3.66	3.33	3.6	3.83	3.9575	3.2775
10:07:54 AM	3.68	3.16	3.71	3.88	4.05625	3.24625
10:08:06 AM	3.65	3.3	3.71	3.83	4.00625	3.29625
10:08:18 AM	3.66	3.4	3.44	3.58	3.855	3.175
10:08:30 AM	3.58	3.2	3.53	3.84	3.94125	3.15125
10:08:42 AM	3.69	3.23	3.44	3.86	4.25	2.87
10:08:54 AM	3.51	3.31	3.45	3.8	3.83375	3.16375
10:09:06 AM	3.58	3.48	3.55	3.93	3.87	3.33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

I_{string} (A) Time	I_1	I_2	I_3	I_4	UPPER BOUND	LOWER BOUND
10:09:18 AM	3.59	3.53	3.74	3.74	3.9875	3.3275
10:09:30 AM	3.76	3.51	3.79	3.85	3.96625	3.53625
10:09:42 AM	3.65	3.44	3.56	3.66	3.83625	3.34625
10:09:54 AM	3.6	3.5	3.75	3.68	3.88125	3.39125
10:10:06 AM	3.78	3.5	3.71	3.9	4.03875	3.42875
10:10:18 AM	3.7	3.4	3.45	3.69	4.075	3.055
10:10:30 AM	3.7	3.38	3.6	3.59	3.75625	3.40625
10:10:42 AM	3.74	3.44	3.53	3.85	4.1575	3.1175
10:10:54 AM	3.61	3.49	3.76	3.99	4.17375	3.22375
10:11:08 AM	3.71	3.33	3.56	3.88	4.1275	3.1275
10:11:22 AM	3.74	3.43	3.8	3.64	4.00625	3.33625
10:11:34 AM	3.79	3.49	3.76	3.66	3.9925	3.3925
10:11:46 AM	3.75	3.4	3.78	3.95	4.0625	3.4225
10:12:00 AM	3.8	3.59	3.73	4.05	4.11375	3.44375
10:12:12 AM	3.63	3.51	3.86	4.04	4.3625	3.1425
10:12:24 AM	3.8	3.54	3.8	3.73	3.97625	3.50625
10:12:36 AM	3.79	3.45	3.61	3.95	4.22	3.18
10:12:48 AM	3.8	3.43	3.85	3.83	4.02625	3.51625
10:13:00 AM	3.93	3.51	3.9	4.05	4.19625	3.56625
10:13:12 AM	3.85	3.55	3.84	4.06	4.105	3.565

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

I_{string} (A)						
Time	I_1	I_2	I_3	I_4	UPPER BOUND	LOWER BOUND
10:13:24 AM	3.86	3.63	3.96	4.13	4.3025	3.5025
10:13:38 AM	3.86	3.6	3.76	4.06	4.195	3.435
10:13:52 AM	3.95	3.64	3.84	4.06	4.25875	3.50875
10:14:04 AM	3.95	3.68	3.89	4.14	4.2375	3.5975
10:14:16 AM	3.96	3.55	3.95	3.99	4.14375	3.67375
10:14:28 AM	3.91	3.55	3.9	4.03	4.13125	3.62125
10:14:40 AM	3.86	3.48	3.88	4.01	4.13375	3.54375
10:14:52 AM	3.9	3.64	3.75	4.08	4.27875	3.38875
10:15:04 AM	4	3.53	3.94	4.11	4.3125	3.5525
10:15:16 AM	4.04	3.7	3.98	4.14	4.2975	3.6775
10:15:30 AM	3.9	3.58	3.91	4.13	4.1825	3.6025
10:15:44 AM	3.66	3.64	3.9	3.8	4.08	3.4
10:15:58 AM	3.95	3.64	3.76	4.1	4.37375	3.34375
10:16:10 AM	3.94	3.7	3.94	4.11	4.13625	3.72625
10:16:22 AM	3.86	3.56	3.94	4.08	4.26	3.5
10:16:34 AM	3.88	3.58	3.64	3.79	4.09375	3.34375
10:16:46 AM	3.86	3.48	3.65	3.79	4.1075	3.3075
10:16:58 AM	3.94	3.58	3.9	4.01	4.16375	3.61375
10:17:10 AM	3.91	3.49	3.6	3.75	4.11625	3.24625
10:17:24 AM	3.86	3.51	3.85	3.94	4.0525	3.5925

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

I_{string} (A)						
Time	I_1	I_2	I_3	I_4	UPPER BOUND	LOWER BOUND
10:17:38 AM	3.88	3.49	3.61	4.01	4.41125	3.08125
10:17:52 AM	3.54	3.51	3.81	3.88	4.27	3.09
10:18:04 AM	3.83	3.5	3.68	4.03	4.2475	3.2675
10:18:18 AM	3.76	3.54	3.8	3.98	4.055	3.495
10:18:32 AM	3.76	3.39	3.71	3.96	4.08	3.36
10:18:44 AM	3.56	3.45	3.8	3.73	4.07	3.21
10:18:58 AM	3.74	3.49	3.75	3.8	3.89	3.55
10:19:10 AM	3.61	3.33	3.31	3.51	3.85	3.01
10:19:22 AM	3.55	3.28	3.59	3.73	3.83875	3.26875
10:19:34 AM	3.61	3.33	3.58	3.79	3.86125	3.31125
10:19:46 AM	3.6	3.29	3.61	3.75	3.82875	3.33875
10:19:58 AM	3.61	3.28	3.41	3.79	4.07125	2.96125
10:20:10 AM	3.45	3.18	3.5	3.65	3.77	3.15
10:20:22 AM	3.49	3.15	3.4	3.65	3.81875	3.04875
10:20:34 AM	3.51	3.23	3.53	3.69	3.765	3.245
10:20:48 AM	3.35	3.06	3.33	3.49	3.56875	3.07875
10:21:00 AM	3.13	2.89	3.36	3.56	3.92	2.56
10:21:12 AM	3.04	3.04	3.33	3.45	3.84	2.56
10:21:24 AM	3.36	2.94	3.34	3.25	3.60375	2.91375

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.8 ค่ากระแสไฟฟ้าแต่ละสตรึงเทียบกับ ขอบเขตบนและขอบเขตล่างในสภาวะ Open Circuit

Condition

I_{string} (A)	I_1	I_2	I_3	I_4	UPPER BOUND	LOWER BOUND
8:50:54 AM	1.34	1.3	1.54	1.6	1.8925	0.9925
8:51:06 AM	1.43	1.23	1.36	1.51	1.63375	1.14375
8:51:18 AM	1.68	1.3	1.63	1.66	1.84125	1.37125
8:51:30 AM	1.68	1.48	1.86	1.93	2.24875	1.25875
8:51:42 AM	1.8	1.53	1.88	1.98	2.16375	1.47375
8:51:54 AM	1.86	1.51	1.74	1.9	2.15125	1.40125
8:52:06 AM	1.49	1.35	1.63	1.55	1.7425	1.2825
8:52:18 AM	1.45	1.24	1.54	1.44	1.59625	1.26625
8:52:30 AM	1.55	1.35	1.59	1.7	1.79375	1.32375
8:52:42 AM	1.63	1.45	1.53	1.75	1.885	1.285
8:52:54 AM	1.99	1.69	1.75	2.09	2.435	1.315
8:53:06 AM	2.26	1.5	2.24	2.15	2.63125	1.60125
8:53:18 AM	2.2	1.78	2.29	2.36	2.62625	1.77625
8:53:30 AM	2.15	1.8	2.26	2.38	2.63125	1.72125
8:53:42 AM	2.25	1.8	2.3	2.4	2.60625	1.85625
8:53:56 AM	2.03	1.8	2.28	2.4	2.81625	1.46625
8:54:08 AM	2.29	1.83	2.33	2.3	2.50625	1.97625
8:54:20 AM	2.13	1.69	2.28	2.36	2.72	1.6
8:54:32 AM	2.15	1.89	2.2	2.46	2.535	1.815

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

I_{string} (A) Time	I_1	I_2	I_3	I_4	UPPER BOUND	LOWER BOUND
8:54:44 AM	2.33	1.85	2.28	2.4	2.61	1.91
8:54:56 AM	2.39	1.94	2.23	2.45	2.77625	1.78625
8:55:08 AM	2.38	1.93	2.18	2.41	2.7925	1.7125
8:55:20 AM	2.38	1.93	2.19	2.51	2.84375	1.69375
8:55:32 AM	2.41	1.94	2.2	2.54	2.90375	1.67375
8:55:46 AM	2.26	2	2.41	2.53	2.8075	1.8275
8:55:58 AM	2.43	1.95	2.45	2.55	2.7225	2.0625
8:56:10 AM	2.4	2	2.28	2.56	2.785	1.865
8:56:22 AM	2.45	1.95	2.45	2.55	2.7	2.1
8:56:34 AM	2.5	1.99	2.5	2.43	2.77	2.05
8:56:46 AM	2.46	1.94	2.19	2.54	3.00875	1.59875
8:56:58 AM	2.38	2	2.4	2.44	2.5975	2.0975
8:57:10 AM	2.25	1.96	2.43	2.49	2.84625	1.77625
8:57:24 AM	2.29	2	2.43	2.4	2.6925	1.9325
8:57:36 AM	2.5	2.01	2.33	2.5	2.875	1.875
8:57:48 AM	2.39	1.96	2.16	2.45	2.8475	1.6675
8:58:00 AM	2.35	1.95	2.35	2.48	2.58125	2.05125
8:58:12 AM	2.23	1.98	2.45	2.29	2.57375	1.92375
8:58:24 AM	2.45	2.01	2.39	2.34	2.62625	2.03625
8:58:38 AM	2.49	2.03	2.39	2.58	2.83125	1.98125

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

I_{string} (A) Time	I_1	I_2	I_3	I_4	UPPER BOUND	LOWER BOUND
8:58:50 AM	2.51	2.08	2.54	2.59	2.7775	2.1775
8:59:02 AM	2.31	2.09	2.54	2.56	2.98	1.82
8:59:14 AM	2.54	0	2.53	2.61	3.5475	0.9075
8:59:26 AM	2.3	0	2.54	2.43	3.55625	0.62625
8:59:38 AM	2.46	0	2.46	2.54	3.4325	0.8925
8:59:52 AM	2.43	0	2.2	2.56	3.68125	0.43125
9:00:06 AM	2.4	0	2.5	2.6	3.6125	0.7125
9:00:18 AM	2.46	0	2.46	2.6	3.47	0.87
9:00:30 AM	2.5	0	2.5	2.58	3.4875	0.9075
9:00:42 AM	2.46	0	2.25	2.59	3.7	0.48
9:00:54 AM	2.45	0	2.46	2.6	3.48125	0.85125
9:01:06 AM	2.33	0	2.44	2.39	3.385	0.765
9:01:18 AM	2.49	0	2.26	2.56	3.72625	0.47625
9:01:30 AM	2.25	0	2.26	2.59	3.325	0.705
9:01:44 AM	2.21	0	2.24	2.46	3.25125	0.70125
9:01:56 AM	2.35	0	2.48	2.59	3.625	0.645
9:02:08 AM	2.46	0	2.48	2.58	3.495	0.855
9:02:20 AM	2.35	0	2.49	2.61	3.65625	0.62625
9:02:34 AM	2.48	0	2.53	2.39	3.5425	0.7425
9:02:46 AM	2.39	0	2.24	2.53	3.5425	0.5625

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$I_{\text{string}} \text{ (A)}$ Time	I_1	I_2	I_3	I_4	UPPER BOUND	LOWER BOUND
9:03:00 AM	2.43	0	2.21	2.44	3.595	0.495
9:03:12 AM	2.36	0	2.43	2.38	3.32625	0.83625
9:03:24 AM	2.39	0	2.35	2.51	3.40625	0.77625
9:03:38 AM	2.46	0	2.5	2.6	3.545	0.825
9:03:50 AM	2.48	0	2.5	2.59	3.51625	0.86625
9:04:02 AM	2.46	0	2.28	2.58	3.66	0.54
9:04:14 AM	2.5	0	2.46	2.66	3.5825	0.8025
9:04:26 AM	2.35	0	2.59	2.66	3.875	0.495
9:04:38 AM	2.61	0	2.39	2.56	3.7425	0.6225
9:04:52 AM	2.58	0	2.63	2.53	3.635	0.855
9:05:04 AM	2.31	0	2.45	2.61	3.62625	0.59625
9:05:16 AM	2.29	0	2.05	2.26	3.3625	0.4425
9:05:28 AM	2.11	0	2.05	1.91	3.01375	0.48375
9:05:40 AM	2.03	0	2.01	2.16	2.895	0.675
9:05:52 AM	1.94	0	1.7	2.03	2.99375	0.24375
9:06:04 AM	2.05	0	2.01	2.01	2.78875	0.73875
9:06:16 AM	1.9	0	2.1	2.26	3.2125	0.3525
9:06:31 AM	2.31	0	2.31	2.2	3.3	0.66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.9 ค่ากระแสไฟฟ้าแต่ละสตรึงเทียบกับ ขอบเขตบนและขอบเขตล่างในสภาวะ Line-Line

Condition						
I_{string} (A)	I_1	I_2	I_3	I_4	UPPER BOUND	LOWER BOUND
Time						
9:16:36 AM	1.4	1.43	1.6	1.7	1.92875	1.11875
9:16:48 AM	1.65	1.48	1.48	1.7	1.93625	1.20625
9:17:00 AM	1.73	1.53	1.45	1.58	1.77875	1.34875
9:17:12 AM	1.61	1.43	1.59	1.65	1.725	1.445
9:17:24 AM	1.61	1.5	1.63	1.6	1.675	1.515
9:17:36 AM	1.75	1.48	1.7	1.84	1.96375	1.45375
9:17:48 AM	1.85	1.69	1.84	1.94	1.9775	1.6975
9:18:00 AM	1.66	1.69	1.6	1.93	1.9075	1.4875
9:18:12 AM	1.85	1.65	1.64	1.89	2.17875	1.32875
9:18:26 AM	1.53	1.6	1.66	1.83	1.8825	1.4025
9:18:38 AM	1.45	1.48	1.61	1.53	1.66625	1.35625
9:18:50 AM	1.43	1.43	1.4	1.73	1.62875	1.29875
9:19:04 AM	1.6	1.44	1.56	1.46	1.7425	1.2825
9:19:16 AM	1.33	1.39	1.5	1.63	1.76875	1.13875
9:19:28 AM	1.31	1.38	1.28	1.56	1.60875	1.11875
9:19:40 AM	1.46	1.34	1.45	1.55	1.5725	1.3325
9:19:52 AM	1.28	1.3	1.48	1.38	1.57	1.13
9:20:04 AM	1.46	1.3	1.46	1.56	1.5825	1.3225
9:20:16 AM	1.41	1.26	1.46	1.55	1.6475	1.2075

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

l_{string} (A) Time	l_1	l_2	l_3	l_4	UPPER BOUND	LOWER BOUND
9:20:28 AM	1.46	1.33	1.44	1.58	1.60625	1.29625
9:20:40 AM	1.29	1.3	1.23	1.54	1.4875	1.1475
9:20:52 AM	1.28	1.15	1.31	1.56	1.56	1.06
9:21:04 AM	1.3	1.39	1.48	1.59	1.7175	1.1575
9:21:18 AM	1.33	1.4	1.49	1.53	1.67625	1.20625
9:21:30 AM	1.58	1.44	1.33	1.65	1.875	1.135
9:21:42 AM	1.61	1.44	1.56	1.66	1.76125	1.39125
9:21:54 AM	1.38	1.45	1.58	1.7	1.87625	1.16625
9:22:06 AM	1.66	1.5	1.45	1.74	1.96875	1.19875
9:22:20 AM	1.66	1.49	1.63	1.74	1.8075	1.4675
9:22:32 AM	1.68	1.5	1.63	1.5	1.85625	1.28625
9:22:44 AM	1.68	1.55	1.43	1.76	1.97	1.25
9:22:56 AM	1.49	1.5	1.65	1.68	1.8975	1.2575
9:23:08 AM	1.78	1.55	1.59	1.88	2.1425	1.2425
9:23:20 AM	1.83	1.61	1.79	1.66	2.02875	1.41875
9:23:32 AM	1.89	1.7	1.9	1.96	2.02375	1.73375
9:23:44 AM	1.91	1.7	1.95	2.03	2.13875	1.68875
9:23:56 AM	2.13	1.88	2.1	2.2	2.30125	1.89125
9:24:08 AM	2.11	1.98	2.1	2.21	2.2325	1.9725
9:24:20 AM	2.29	2.05	2.24	2.4	2.505	2.005

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$I_{\text{string}} \text{ (A)}$ Time	I_1	I_2	I_3	I_4	UPPER BOUND	LOWER BOUND
9:24:32 AM	2.49	2.2	2.33	2.48	2.76	2.02
9:24:46 AM	2.16	2.01	2.2	2.3	2.37875	1.96875
9:24:58 AM	2	1.78	1.81	2.09	2.3525	1.4725
9:25:10 AM	2.03	0	2.04	2.09	2.8475	0.7275
9:25:22 AM	1.96	0	1.95	2.06	2.76875	0.67875
9:25:34 AM	1.94	0	1.86	1.8	2.675	0.555
9:25:48 AM	1.83	0	1.6	1.79	2.7	0.3
9:26:00 AM	1.8	0	1.78	1.89	2.55375	0.60375
9:26:12 AM	1.83	0	1.65	1.88	2.75	0.33
9:26:24 AM	1.84	0	1.85	1.73	2.66	0.48
9:26:36 AM	1.71	0	1.59	1.84	2.5675	0.3675
9:26:48 AM	1.79	0	1.63	1.86	2.685	0.345
9:27:00 AM	1.85	0	1.83	1.91	2.60375	0.63375
9:27:12 AM	1.61	0	1.79	1.93	2.75125	0.28125
9:27:24 AM	1.79	0	1.56	1.78	2.70125	0.25125
9:27:36 AM	1.76	0	1.61	1.88	2.66375	0.33375
9:27:48 AM	1.55	0	1.74	1.65	2.4375	0.3975
9:28:00 AM	1.55	0	1.75	1.83	2.68125	0.25125
9:28:12 AM	1.55	0	1.69	1.81	2.55625	0.32625
9:28:24 AM	1.64	0	1.45	1.58	2.35625	0.32625

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

I_{string} (A)	I_1	I_2	I_3	I_4	UPPER BOUND	LOWER BOUND
Time						
9:28:36 AM	1.59	0	1.49	1.78	2.4175	0.3375
9:28:48 AM	1.76	0	1.75	1.88	2.50625	0.59625
9:29:00 AM	1.71	0	1.55	1.81	2.59375	0.30375
9:29:12 AM	1.4	0	1.54	1.71	2.38125	0.25125
9:29:24 AM	1.43	0	1.65	1.55	2.32875	0.31875
9:29:36 AM	1.7	0	1.64	1.7	2.405	0.525
9:29:48 AM	1.65	0	1.45	1.56	2.325	0.345
9:30:00 AM	1.63	0	1.6	1.7	2.31875	0.52875
9:30:12 AM	1.4	0	1.59	1.69	2.4625	0.2025
9:30:24 AM	1.61	0	1.55	1.59	2.24375	0.51375
9:30:36 AM	1.43	0	1.63	1.73	2.52875	0.19875
9:30:48 AM	1.43	0	1.41	1.51	2.03875	0.46875
9:31:00 AM	1.69	0	1.66	1.78	2.41375	0.54375
9:31:12 AM	1.65	0	1.5	1.74	2.49375	0.30375

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.10 ค่ากระแสไฟฟ้าแต่ละสตริงเทียบกับ ขอบเขตบนและขอบเขตล่างในสภาวะ Partial

Shading Condition

I_{string} (A) Time	I_1	I_2	I_3	I_4	UPPER BOUND	LOWER BOUND
2:01:32 PM	3.8	3.74	3.48	4.01	4.11875	3.40875
2:01:46 PM	3.89	3.78	3.69	4.01	4.16375	3.51375
2:01:58 PM	3.81	3.69	3.44	3.94	4.165	3.305
2:02:10 PM	3.78	3.69	3.64	3.98	4.05875	3.44875
2:02:22 PM	3.79	3.78	3.7	3.75	3.85	3.67
2:02:34 PM	3.81	3.71	3.51	3.76	3.94125	3.49125
2:02:46 PM	3.86	3.7	3.73	4.04	4.17875	3.44875
2:02:58 PM	3.86	3.83	3.71	3.93	3.99375	3.68375
2:03:10 PM	3.86	3.71	3.68	3.95	4.1525	3.4325
2:03:22 PM	3.74	3.63	3.25	3.83	4.10375	3.19375
2:03:34 PM	3.79	3.61	3.36	3.99	4.27875	3.10875
2:03:46 PM	3.49	3.68	3.49	3.88	4.09	3.13
2:03:58 PM	3.81	3.71	3.45	4	4.17625	3.32625
2:04:10 PM	3.8	3.73	3.64	4.04	4.08875	3.47875
2:04:22 PM	3.74	3.75	3.64	3.84	3.85875	3.62875
2:04:34 PM	3.78	3.71	3.64	3.99	4.0425	3.4825
2:04:46 PM	3.65	3.66	3.64	3.93	3.8475	3.5275
2:04:58 PM	3.7	3.61	3.51	3.89	3.99125	3.34125
2:05:10 PM	3.73	3.59	3.61	3.83	3.98	3.38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$l_{\text{string}} (A)$ Time	l_1	l_2	l_3	l_4	UPPER BOUND	LOWER BOUND
2:05:22 PM	3.76	3.66	3.49	3.94	4.08625	3.33625
2:05:34 PM	3.75	3.46	3.59	3.89	4.12625	3.21625
2:05:46 PM	3.76	3.7	3.35	3.89	4.0625	3.3425
2:05:58 PM	3.78	3.56	3.59	3.74	4.00125	3.33125
2:06:10 PM	3.5	3.65	3.54	3.61	3.755	3.395
2:06:22 PM	3.71	3.59	3.5	3.83	3.99875	3.30875
2:06:34 PM	3.48	2.16	3.53	3.83	4.2875	2.4675
2:06:46 PM	3.71	1.94	3.53	3.59	4.35125	2.40125
2:06:58 PM	3.6	2	3.45	3.58	4.33125	2.34125
2:07:10 PM	3.66	1.96	3.53	3.86	4.56875	2.27875
2:07:22 PM	3.6	0.54	3.43	3.8	5.06375	1.29375
2:07:34 PM	3.48	0.55	3.58	3.61	4.8475	1.4875
2:07:46 PM	3.65	0.54	3.55	3.84	5.0475	1.4475
2:07:58 PM	3.58	0.54	3.3	3.74	5.135	1.095
2:08:10 PM	3.68	0.54	3.5	3.79	5.12875	1.33875
2:08:22 PM	3.49	0.55	3.58	3.85	4.98625	1.41625
2:08:34 PM	3.59	0.54	3.4	3.58	4.92875	1.33875
2:08:46 PM	3.64	0.54	3.51	3.86	5.08625	1.37625
2:08:58 PM	3.65	0.54	3.41	3.7	5.1175	1.2375
2:09:10 PM	3.65	0.53	3.31	3.74	5.25875	1.02875

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

l_{string} (A) Time	l_1	l_2	l_3	l_4	UPPER BOUND	LOWER BOUND
2:09:22 PM	3.44	0.55	3.48	3.78	4.81125	1.46125
2:09:34 PM	3.56	0.54	3.2	3.66	5.16	0.96
2:09:46 PM	3.41	0.54	3.48	3.71	4.805	1.425
2:09:58 PM	3.59	0.54	3.39	3.69	5.02125	1.27125
2:10:10 PM	3.61	2.11	3.51	3.85	4.435	2.395
2:10:22 PM	3.66	3.6	3.26	3.83	3.98375	3.23375
2:10:34 PM	3.63	3.55	3.51	3.78	3.85875	3.34875
2:10:46 PM	3.66	3.55	3.5	3.75	3.9	3.32
2:10:58 PM	3.68	3.54	3.53	3.75	3.9375	3.2975
2:11:10 PM	3.68	3.54	3.26	3.86	4.1075	3.0875
2:11:22 PM	3.68	3.64	3.51	3.81	3.87	3.45
2:11:34 PM	3.7	3.61	3.48	3.89	4.0025	3.3225
2:11:46 PM	3.7	3.66	3.55	3.88	3.91375	3.46375
2:11:58 PM	3.7	3.34	3.5	3.61	3.89125	3.20125
2:12:10 PM	3.59	3.61	3.5	3.66	3.705	3.485
2:12:22 PM	3.68	3.54	3.44	3.79	3.99625	3.22625
2:12:34 PM	3.66	3.43	3.46	3.6	3.85875	3.20875
2:12:46 PM	3.65	3.66	3.5	3.7	3.75625	3.52625
2:12:58 PM	3.71	3.6	3.51	3.64	3.7775	3.4575
2:13:10 PM	3.61	3.56	3.3	3.75	3.87	3.27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

I_{string} (A)						
Time	I_1	I_2	I_3	I_4	UPPER BOUND	LOWER BOUND
2:13:22 PM	3.64	3.59	3.49	3.75	3.82125	3.41125
2:13:34 PM	3.45	3.6	3.4	3.59	3.825	3.205
2:13:46 PM	3.54	3.5	3.38	3.74	3.77	3.29
2:13:58 PM	3.53	3.5	3.2	3.78	3.84375	3.17375
2:14:10 PM	3.35	3.55	3.36	3.64	3.895	3.035
2:14:22 PM	3.45	3.49	3.33	3.61	3.67	3.27
2:14:34 PM	3.61	3.51	3.2	3.78	3.9825	3.1025
2:14:46 PM	3.66	3.59	3.4	3.63	3.78	3.4
2:14:58 PM	3.5	3.58	3.3	3.76	3.8875	3.1875
2:15:10 PM	3.39	3.44	3.36	3.65	3.6575	3.2175

ตารางที่ ค.11 ค่ากระแสไฟฟ้าแต่ละสตรึงเทียบกับ ขอบเขตบนและขอบเขตล่างในสภาวะ Degradation Condition

I_{string} (A)						
Time	I_1	I_2	I_3	I_4	UPPER BOUND	LOWER BOUND
9:37:48 AM	3.74	1.65	3.53	3.93	4.87875	1.96875
9:38:01 AM	3.69	1.6	3.45	3.91	4.88125	1.85125
9:38:13 AM	3.48	1.54	3.49	3.84	4.45125	2.12125
9:38:25 AM	3.18	1.41	3.2	3.23	3.9125	2.0325
9:38:37 AM	3.33	1.49	3.23	3.3	4.07625	2.02625
9:38:49 AM	2.66	1.06	2.49	2.76	3.51375	1.30375

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$I_{\text{string}} (A)$ Time	I_1	I_2	I_3	I_4	UPPER BOUND	LOWER BOUND
9:39:01 AM	2.83	1	2.78	3.3	3.86625	1.41625
9:39:13 AM	3.24	1.35	3.21	3.26	3.995	1.995
9:39:25 AM	3.56	1.55	3.5	3.59	4.4	2.18
9:39:39 AM	2.99	1.2	3	2.89	3.78	1.68
9:39:51 AM	3.05	1.44	3.31	3.46	4.3975	1.5975
9:40:03 AM	3.6	1.55	3.63	3.86	4.5875	2.1875
9:40:15 AM	3.5	1.6	3.44	3.6	4.3425	2.1625
9:40:27 AM	3.76	1.65	3.59	3.73	4.68625	2.15625
9:40:41 AM	3.76	1.65	3.75	3.69	4.61125	2.32125
9:40:53 AM	3.65	1.58	3.55	3.73	4.58875	2.13875
9:41:05 AM	3.63	1.55	3.4	3.85	4.80625	1.81625
9:41:17 AM	3.3	1.55	3.41	3.63	4.36875	1.95875
9:41:31 AM	3.6	1.59	3.65	3.56	4.43	2.25
9:41:43 AM	3.36	1.55	3.35	3.74	4.2875	2.0675
9:41:55 AM	3.68	1.68	3.8	3.78	4.6925	2.2725
9:42:09 AM	3.91	1.68	3.76	3.93	4.9275	2.2275
9:42:21 AM	3.89	1.69	3.7	4.01	5.00375	2.11375
9:42:33 AM	3.88	1.75	3.88	3.8	4.76875	2.39875
9:42:45 AM	3.73	1.69	3.8	3.75	4.57625	2.40625

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

I_{string} (A)	I_1	I_2	I_3	I_4	UPPER BOUND	LOWER BOUND
9:43:01 AM	3.75	1.66	3.71	3.89	4.66625	2.31625
9:43:13 AM	2.43	0.96	2.1	2.26	3.03375	1.08375
9:43:25 AM	2.43	0.94	2.3	2.48	3.16625	1.23625
9:43:37 AM	2.21	0.88	2.19	2.35	2.81875	1.28875
9:43:49 AM	2.29	0.9	2.04	2.34	3.12375	0.93375



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทคนิคการตรวจจําการเสื่อมสภาพของโซลาร์เซลล์ที่ใช้ในโซลาร์ฟาร์ม

Deteriorated Solar Panel Detection Technique For a Solar Farm Application

นายปิยะณัฐ ปรานี, นายพงศกร ทวนทอง, นายพลเมฆ ศรีศุภเศรษฐกุล

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ซอย หลงกรุง 1 ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์ 02-329-8000 ต่อ 3925 E-mail: sun_april@outlook.com

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เสนอเทคนิคการตรวจจําการเสื่อมสภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ประยุกต์ใช้ในโซลาร์ฟาร์ม เทคนิคนี้เรียกว่า Box Plot ซึ่งใช้ในการวิเคราะห์รูปคลื่นสัญญาณ แรงดันและกระแสไฟฟ้า ด้วยวิธีการนี้จะช่วยลดเวลาที่ใช้ในการตรวจสอบเพื่อทำการบำรุงรักษาทำให้ตรวจพบความผิดปกติที่เกิดขึ้นและสามารถแก้ไขได้ทันที่ ทำให้โซลาร์ฟาร์มสามารถผลิตไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้วิธีการนี้สามารถใช้แสดงผลผ่านหน้าจอด้วยค่าจากอินเวอร์เตอร์ ส่งผลให้โซลาร์ฟาร์มสามารถทำการตรวจสอบการเสื่อมสภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้แบบเรียลไทม์ วิธีการที่นำเสนอนี้ผ่านการตรวจสอบ โดยผลจากการสร้างสถานการณ์จำลองและผลการทดสอบจริง แสดงให้เห็นว่าด้วยวิธีการนี้สามารถตรวจสอบการเสื่อมสภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ได้อย่างน่าพึงพอใจ และผลที่ได้ยังแสดงให้เห็นว่า วิธีการนี้สามารถประยุกต์ใช้ในโซลาร์ฟาร์มได้

คำสำคัญ: แผงเซลล์แสงอาทิตย์, การเสื่อมสภาพ

Abstract

A detection technique of a deteriorated panel in a solar farm application is presented in this thesis. The technique called Box Plot is used to analyze the diagnostic signals which are current and voltage waveforms. The proposed method offers minimized time to search for maintenance and can be planned for proactive maintenance; therefore, a solar farm can achieve a high productivity in generating electricity. The method can be integratively used with the monitoring function in a central inverter. Consequently, a solar farm can detect a defected solar panel as a real time. The propose method is validated with both simulation and experimental results.

The results show that the propose technique can detect a deteriorated cell satisfactorily. The result can also illustrate that this proposed detection method can be applied in a solar farm.

Keyword: Solar cell, Deteriorate

1. บทนำ

ในปี พ.ศ. 2560 ประเทศไทยมีการใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์คิดเป็นร้อยละ 19.7 ของการใช้พลังงานทดแทนทั้งหมด ดังนั้นจึงมีการใช้แผงโซลาร์เซลล์ในการผลิตกระแสไฟฟ้าเป็นจำนวนมาก ในการตรวจเช็คความผิดปกติหรือความเสียหายที่เกิดขึ้น ได้ทำการตรวจเช็คโดยใช้คนเดินตรวจสอบทั้งหมด ซึ่งใช้ระยะเวลาและเกิดความผิดพลาดในการตรวจสอบบ่อยครั้ง ถ้าสามารถใช้กระบวนการหรือวิธีการที่จำกัดขอบเขตการเดินจะช่วยให้เกิดความสะดวกรวดเร็ว ความแม่นยำและความรวดเร็วในการตรวจเช็ค เป็นต้น

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อเสื่อมสภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

จากการศึกษาวิจัยพบว่า ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์จะค่อย ๆ ลดลงไปตามอายุการใช้งาน นอกจากการเสื่อมสภาพตามอายุการใช้งานแล้ว ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ยังขึ้นอยู่กับปัจจัยภายนอกและคุณสมบัติภายในตัวเซลล์แสงอาทิตย์ ได้แก่ สภาพแวดล้อม อุณหภูมิ ความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ ชนิดของโซลาร์เซลล์ วัสดุที่ใช้ในการประกอบแผง การยึดและการติดตั้งแผง ความต้านทานขนานและความต้านทานอนุกรม เป็นต้น

2.2 Box Plot

Box Plot เป็นกระบวนการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้หลักการทางสถิติโดยการกำหนดค่าขอบเขตบนและขอบเขตล่างโดยใช้ค่าของข้อมูลในควอไทล์ต่างๆ ดังแสดงในสมการที่ (1) และ (2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{Upper bound} = Q3 + 1.5(Q3 - Q1) \quad (1)$$

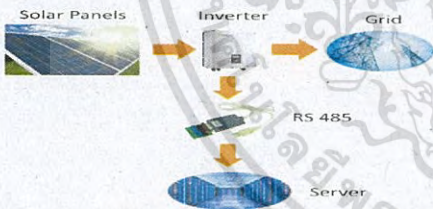
$$\text{Lower bound} = Q1 - 1.5(Q3 - Q1) \quad (2)$$

ด้วยวิธีการนี้ จะสามารถตรวจสอบ outlier ที่อยู่นอกเหนือขอบเขตบนและขอบเขตล่างได้ อย่างไรก็ตามเงื่อนไขของวิธีการนี้คือจำนวนสถิติที่นำมาวิเคราะห์ต้องมีการเชื่อมสภาพไม่เกิน 25% ของจำนวนสถิติทั้งหมด

3.การออกแบบการทดลอง

3.1 ระบบที่ใช้เทคนิคการตรวจจัดการเชื่อมสภาพของเซลล์แสงอาทิตย์โดยวิธี Box Plot

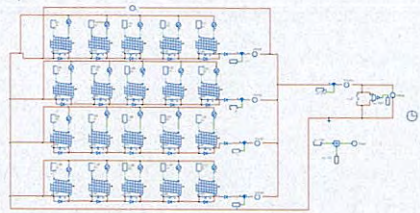
ระบบการตรวจจัดการเชื่อมสภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธีการ Box Plot แสดงดังรูปที่ 3.1 โดยวิธีการ Box plot เป็นการนำค่ากระแสไฟฟ้าระดับสถิติที่ได้จากอินเวอร์เตอร์มาวิเคราะห์ตามหลักการทางสถิติเพื่อหาขอบเขตและทำการแยกข้อมูลที่มีความผิดปกติไปจากชุดข้อมูลนั้น ๆ ด้วยวิธีการทางสถิติโดยใช้การเขียน Code ผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ หลังจากนั้นจะแสดงผลผ่านหน้าจอคอมพิวเตอร์ และทำการแจ้งเตือนเมื่อมีการตรวจพบอาการเชื่อมสภาพของกลุ่มแผงเซลล์แสงอาทิตย์ผ่านความคิดปกติของกระแสระดับสถิติ ในส่วนของการแจ้งเตือนนั้นแบ่งออกเป็น 3 สถานะแสดงด้วยสี 3 สี สีเขียว หมายถึงสถานะปกติ สีส้ม หมายถึง มีความผิดปกติเกิดขึ้น และ สีแดง หมายถึง มีการเชื่อมสภาพเกิดขึ้น



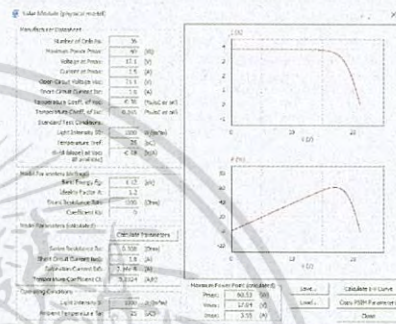
รูปที่ 3.1 แผนผังภาพรวมระบบที่ใช้เทคนิคการตรวจจัดการเชื่อมสภาพของเซลล์แสงอาทิตย์โดยวิธี Box Plot

3.2 วงจรที่ใช้ในการจำลอง (Simulation Circuit)

การทดลองวิเคราะห์ข้อมูลผ่านวิธีการ Box Plot โดยใช้โปรแกรม PSIM ในการจำลองได้สร้างกลุ่มวงจรย่อยของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ระดับอาร์เรย์ขึ้นมาซึ่งประกอบด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนานกันจำนวน 4 สถริง แต่ละสถิติมีแผงเซลล์แสงอาทิตย์ต่ออนุกรมกันจำนวน 5 แผงดังรูปที่ 3.2 และมีการกำหนดค่าพารามิเตอร์พื้นฐานต่าง ๆ ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.2 วงจรที่ใช้ในการจำลองด้วยโปรแกรม PSIM



รูปที่ 3.3 ค่าพารามิเตอร์พื้นฐานระดับแผงที่ใช้ในวงจร Simulation

3.2.1 กรณี Normal Condition ในสถานะนี้ได้มีการเปลี่ยนค่าความเข้มแสงตั้งแต่ 0-1100 W/m² ทั้งอาร์เรย์เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ค่ากระแสสถิติในสถานะปกติ วงจรที่ใช้แสดงดังรูปที่ 3.4

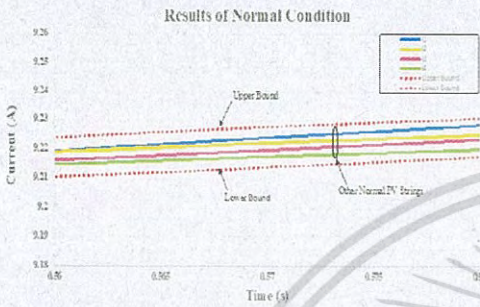
3.2.2 กรณี Open Circuit Condition เป็นการจำลองสถานการณ์เชื่อมสภาพเนื่องจากการเปิดวงจร โดยอาจเกิดจาก สายหลุด หรือ พิวสขาด เป็นต้น ในสถานะนี้มีการเปลี่ยนค่าความเข้มแสงตั้งแต่ 0-1100 W/m² ทั้งอาร์เรย์ และมีการเปิดวงจรบริเวณสถิติที่ 1 แสดงดังรูปที่ 3.5

3.2.3 Line-Line (Fault Resistance = 0 Ω) เป็นการจำลองสถานการณ์เชื่อมสภาพเนื่องจากการลัดวงจร โดยมีความต้านทาน 0 Ω ในสถานะนี้มีการเปลี่ยนค่าความเข้มแสงตั้งแต่ 0-1000 W/m² ทั้งอาร์เรย์ และมีการลัดวงจรเกิดขึ้นบริเวณสถิติที่ 1 แสดงดังรูปที่ 3.6

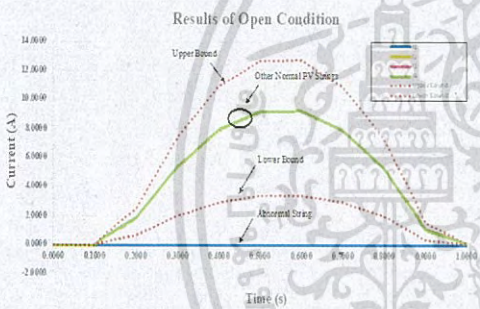
3.2.4 Line-Line (Fault Resistance = 20 Ω) เป็นการจำลองสถานการณ์เชื่อมของประสิทธิภาพเนื่องจากการลัดวงจร โดยมีความต้านทาน 20 Ω ในสถานะนี้มีการเปลี่ยนค่าความเข้มแสงตั้งแต่ 0-1100

3.2.5 Partial Shading Condition เป็นการจำลองความคิดปกติของประสิทธิภาพของแผงโซลาร์เซลล์เนื่องจากปรากฏการณ์เงาบัง ในสถานะนี้มีการเปลี่ยนค่าความเข้มแสงตั้งแต่ 0-1100 W/m² ในสถิติที่ 2, 3 และ 4 และมีมีการกำหนดค่าความเข้มแสงที่สถิติ 1 เท่ากับ 500 W/m² แสดงดังรูปที่ 3.8

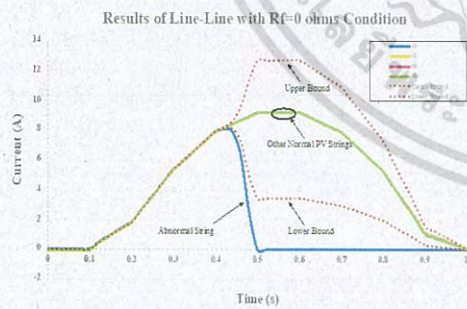
3.2.6 Degradation เป็นการจำลองการเสื่อมสภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยทำการเพิ่มค่า ความต้านทานอนุกรม ในสตริงที่ 1 ให้มีค่าเท่ากับ 0.1 โดยในสภาวะนี้มีการเปลี่ยนค่าความเข้มแสงตั้งแต่ 0-1100 W/m² ทั้งอาร์เรย์ แสดงดังรูปที่ 3.9



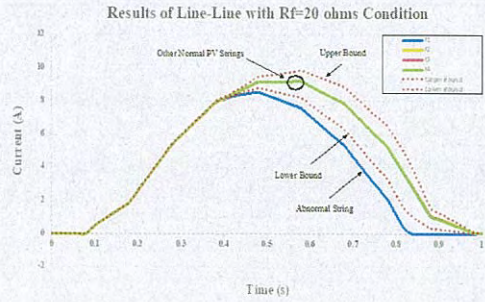
รูปที่ 3.4 ภาวะการทำงานภายใต้เงื่อนไข Normal Condition



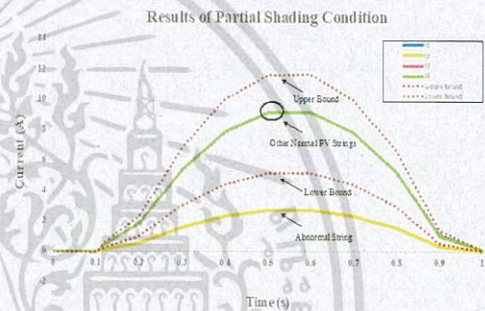
รูปที่ 3.5 ภาวะการทำงานภายใต้เงื่อนไข Open Circuit



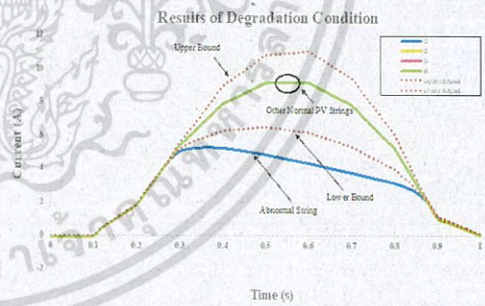
รูปที่ 3.6 ภาวะการทำงานภายใต้เงื่อนไข Line-Line fault (Fault Resistance = 0 Ω)



รูปที่ 3.7 ภาวะการทำงานภายใต้เงื่อนไข Line-Line fault (Fault Resistance = 20 Ω)



รูปที่ 3.8 ภาวะการทำงานภายใต้เงื่อนไข Partial Shading



รูปที่ 3.9 ภาวะการทำงานภายใต้เงื่อนไข Degradation

บทที่ 4 ผลการทดลอง

4.1 ผลการทดลองการใช้เทคนิคการตรวจับการเสื่อมสภาพของโซลาร์เซลล์โดยวิธี Box Plot

ในการทำการทดลองด้วยการจำลองสถานการณ์ ทั้ง 5 สถานการณ์ คือ Normal Circuit Condition, Open Circuit Condition, Line-Line Condition, Partial Shading Condition และ Degradation Condition

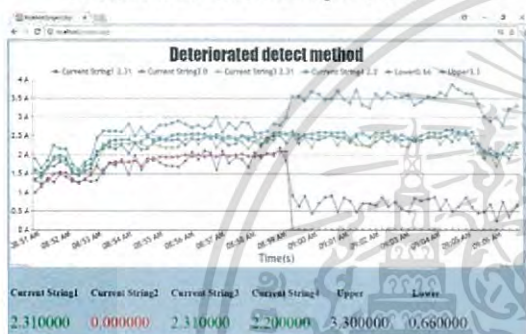
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่วารณิใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.1 ผลการทดลองในสภาวะ Normal



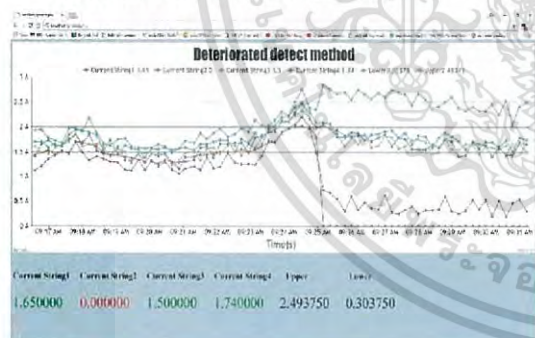
รูปที่ 4.1 หน้าจอแสดงผลผ่านเว็บไซค์กรณี Normal

4.2.2 ผลการทดลองในสภาวะ Open Circuit



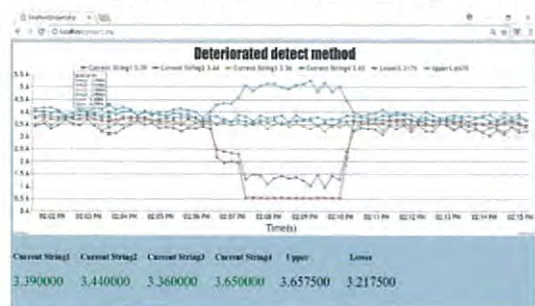
รูปที่ 4.2 หน้าจอแสดงผลผ่านเว็บไซค์กรณี Open Circuit

4.2.3 ผลการทดลองในสภาวะ Line-Line



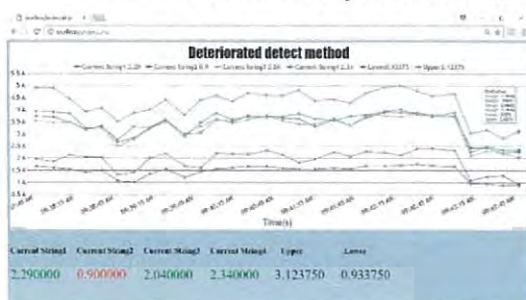
รูปที่ 4.3 หน้าจอแสดงผลผ่านเว็บไซค์กรณี Line-Line

4.2.4 ผลการทดลองในสภาวะ Partial Shading



รูปที่ 4.4 หน้าจอแสดงผลผ่านเว็บไซค์กรณี Partial Shading

4.2.5 ผลการทดลองในสภาวะ Degradation Condition



รูปที่ 4.5 หน้าจอแสดงผลผ่านเว็บไซค์กรณี Degradation

บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาค้นคว้าวิธีการตรวจสอบการเสื่อมสภาพของแผงโซลาร์เซลล์ทำให้ทราบถึงข้อจำกัดที่ใช้ในการตรวจสอบ ทางคณะผู้จัดทำโครงการจึงทำการศึกษาค้นคว้าข้อมูลเพิ่มเติมเกี่ยวกับวิธีแก้ไขปัญหาดังกล่าว โดยใช้วิธี Box Plot ซึ่งเป็นวิธีทางคณิตศาสตร์ที่ใช้หลักการทางสถิติ โดยได้นำค่าไฟฟ้ากระแสตรงของแต่ละสตริงมาหาขอบเขตบน (Upper Bound) และ ขอบเขตล่าง (Lower Bound) ในกรณีที่กระแสสั้นออกนอกขอบเขตวิธี Box Plot ก็จะสามารถตรวจสอบความผิดปกติที่เกิดขึ้นได้ และมีการแสดงผลผ่านเว็บไซค์ โดยในส่วนของผลการทดลองนั้นได้มีการจำแนกกรณีการทดสอบเป็น 5 กรณี คือ Normal Condition, Open circuit Condition, Line-Line Condition, Partial shading Condition และ Degradation Condition ด้วยวิธี Box Plot สามารถตรวจสอบความผิดปกติที่เกิดขึ้นกับแผงโซลาร์เซลล์ได้ในทุก ๆ กรณี

เอกสารอ้างอิง

- [1] Edson L.Meyer, E.Ernest van Dyk, "Assessing the Reliability and Degradation of Photovoltaic Module Performance Parameters," IEEE, 2004.
- [2] Ye Zhao, Brad Lehman, "Outlier Detection Rules for Fault Detection in Solar Photovoltaic Arrays," IEEE, 2013, pp. 2913-2920.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน



ชื่อ-นามสกุล นายปิยะณัฐ ปราณี

วัน เดือน ปี เกิด 3 กรกฎาคม 2539

ที่อยู่ 49/111 K.C. สุวินทวงศ์ แขวงลำผักชี เขตหนองจอก กรุงเทพฯ 10530

ประวัติการศึกษา

ปีการศึกษา 2556

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนเตรียมอุดมศึกษาน้อมเกล้า

ปีการศึกษา 2560

สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า กำลัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ฝึกงานภาคฤดูร้อน

การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ฝ่ายควบคุมประสิทธิภาพ



ชื่อ-นามสกุล นายพงศกร ทานทอง

วัน เดือน ปี เกิด 22 กรกฎาคม 2537

ที่อยู่ 179/1 หมู่ 7 ถนนสุวรรณศร4/4 ตำบลบ้านใหญ่ อำเภอเมือง จ. นครนายก 26000

ประวัติการศึกษา

ปีการศึกษา 2556

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนจุฬาภรณราชวิทยาลัย ชลบุรี

ปีการศึกษา 2560

สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า กำลัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ฝึกงานภาคฤดูร้อน

M.E.C.T Company Limited ฝ่ายควบคุมและตรวจสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ชื่อ-นามสกุล นายพลเมฆ ศรีศุภเศรษฐกุล

วัน เดือน ปี เกิด 13 เมษายน 2539

ที่อยู่ หมู่บ้าน The Extenso 88/39 หมู่ 5 ซอย 12 เขตหนองจอก แขวง
กระทุ่มราย กรุงเทพฯ 10530

ประวัติการศึกษา

ปีการศึกษา 2556

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนวัดสุทธิวาราม

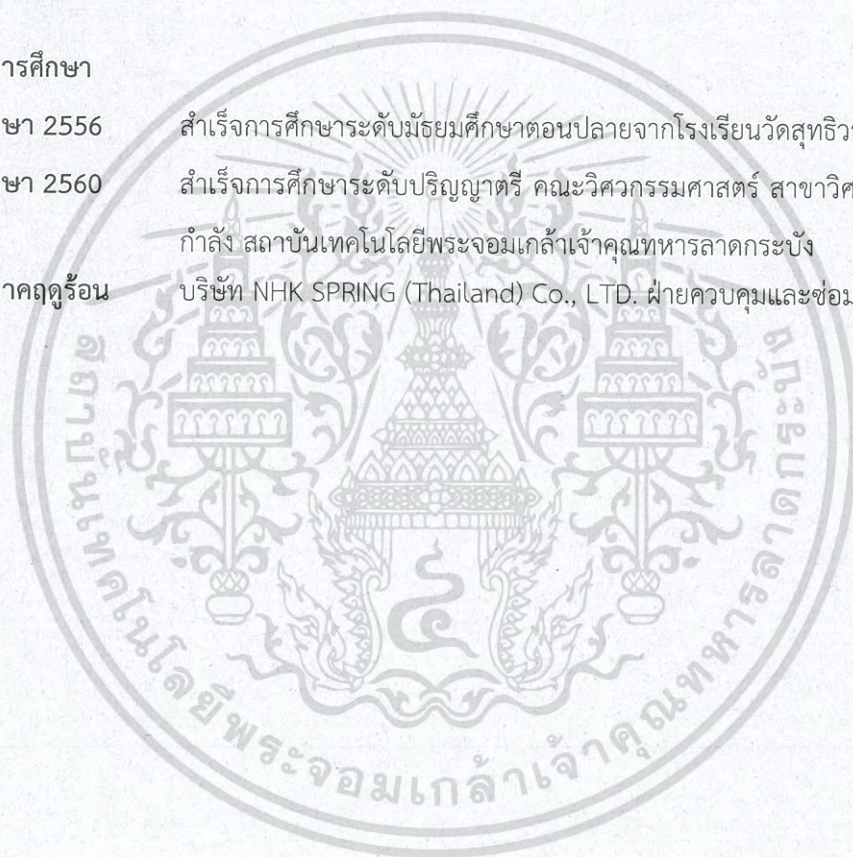
ปีการศึกษา 2560

สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า

ฝึกงานภาคฤดูร้อน

กำลัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บริษัท NHK SPRING (Thailand) Co., LTD. ฝ่ายควบคุมและซ่อมบำรุง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้