เครื่องทดสอบ I-V สำหรับชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์

I-V TESTER FOR PHOTOVOLTAIC ARRAY

บุรินทร์ เดชะเทศ

BURIN DECHATESA

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2562

KMITL-2019-SC-M-030-066

เครื่องทดสอบ I-V สำหรับชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์

I-V TESTER FOR PHOTOVOLTAIC ARRAY

บุรินทร์ เดชะเทศ

BURIN DECHATESA

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2562

KMITL-2019-SC-M-030-066

I-V TESTER FOR PHOTOVOLTAIC ARRAY

BURIN DECHATESA

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE IN APPLIED PHYSICS
DEPARTMENT OF PHYSICS FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2019
KMITL-2019-SC-M-030-066

COPYRIGHT 2019
FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT’S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์ เครื่องทดสอบ I-V สำหรับชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์
ชื่อนักศึกษา บุรินทร์ เดชะเทศ
รหัสประจำตัว 57605093
ปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชา ฟิสิกส์
พ.ศ. 2562
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ วิชิต ศิริโชติ

บทคัดย่อ

อุปกรณ์นี้พัฒนาขึ้นเพื่อใช้สำหรับการวัดคุณสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์พร้อมโหลดแบบเก็บประจุไฟฟ้า อุปกรณ์นี้มีความสามารถในการทดสอบแรงดันไฟฟ้าสูงถึง 400 โวลต์ แรงดันและกระแสลัดวงจรสูงถึง 15 แอมแปร์ วงจรนี้สร้างขึ้นด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ชิปเดี่ยว 32 บิต dspic33FJ256MC710 ตัวแปลงอนาล็อกเป็นดิจิตอล 12 บิตบนชิปอ่านแรงดันไฟฟ้าผ่านโหลดแบบเก็บประจุไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าผ่านตัวต้านทานชั้นท์ เฟิร์มแวร์ภายในไมโครคอนโทรลเลอร์จัดการข้อมูลดิบโดยใช้การปรับเส้นโค้งแบบพหุนามเพื่อให้ได้ค่าพารามิเตอร์คุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์ คือแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดกระแสไฟฟ้าลัดวงจรกระแสไฟสูงสุดจุดไฟสูงสุดและค่าฟิลล์แฟคเตอร์ ทำการทดสอบกับชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบโมโนคริสตอล แบบอะมอร์ฟัสและแบบฟิลล์มบาง ผลการเปรียบเทียบกับเครื่องทดสอบพลังงานแสงอาทิตย์ PV Seaward และ I-V curve tracer รุ่น PV200 ผลของแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดกระแสไฟฟ้าลัดวงจรและค่าฟิลล์เฟคเตอร์มีความคลาดเคลื่อนร้อยละ 7

คำสำคัญ : เครื่องทดสอบ I-V, ชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์, โหลดแบบเก็บประจุไฟฟ้า

Thesis Title	I-V TESTER FOR PHOTOVOLTAIC ARRAY
Student Name	Burin Dechatesa
Student ID	57605093
Degree	Master of Science (Applied Physics)
Department	Physics
Year	2019
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Wichit Sirichote

Abstract

A device used for measuring the Current-Voltage characteristic of the photovoltaic string with capacitive load has been developed. The device is capable of testing up to 400V, Open Circuit voltage and 15 Amperes, Short Circuit current. The circuit is built with a 32-bit single chip microcontroller, dspic33FJ256MC710. The on-chip 12-bit Analog to Digital converter reads the voltage across capacitive load and electrical current through the shunt resistor. The MCU firmware manipulates the raw data using polynomial curve fitting, providing the PV characteristic parameters, i.e. the open circuit voltage, short circuit current, maximum power point, and fill factor. Testing has been done with the Monocrystalline, Amorphous and Thin films photovoltaic string. The results were compared with a Seaward solar PV tester and I-V curve tracer model PV200. The results of the open circuit voltage, short circuit current and fill factor error were below 7%.

Keywords : I-V tester, Photovoltaic string, Capacitive load

กิตติกรรมประกาศ

การที่งานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จได้นั้นต้องขอขอบคุณผู้มีพระคุณและมีความกรุณาดังต่อไปนี้ รศ.วิชิต ศิริโชติ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่คอยให้คำแนะนำชี้แนะแนวทางในการแก้ปัญหา ให้กำลังใจยามที่ยากลำบากแก่ผม

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี ที่เอื้อเฟื้อเครื่องมือและอุปกรณ์เพื่อใช้ในงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณ ดร.กาจปัญญา สุวรรณสุโข ที่ได้กรุณาประสานงานในการทดลองเครื่องที่ต่างจังหวัดให้ผ่านไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ กัลยาณมิตร เพื่อนนักศึกษาภาคฟิสิกส์ประยุกต์ ผู้ที่อยู่เคียงข้างให้กำลังใจและเชื่อมั่นในตัวผมในยามที่ข้าพเจ้าหมดความเชื่อมั่นในตัวเอง ถ้าขาดบุคคลที่กล่าวมาข้างต้นนั้นงานวิจัยนี้ก็มิอาจจะสำเร็จลุล่วงได้ ถ้างานวิจัยชิ้นนี้มีความบกพร่องประการใด ผมกราบขออภัยมา ณ ที่นี้ด้วย

นาย บุรินทร์ เดชะเทศ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย . ... ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ........ ข
กิตติกรรมประกาศ........ ค
สารบัญ........ ง
สารบัญตาราง........ ช
สารบัญรูป .... ซ

บทที่ 1 บทนำ........ 1
1.1 ที่มาและความสำคัญ 1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย 2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย........ 2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 2

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง 3
2.1 เซลล์แสงอาทิตย์ 3
2.1.1 หลักการของเซลล์แสงอาทิตย์........ 3
2.1.2 การตอบสนองต่อสเปกตรัมแสงอาทิตย์........ 3
2.1.3 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ 4
2.1.4 สมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์........ 5
2.1.5 ผลกระทบจากความเข้มรังสีแสงอาทิตย์และอุณหภูมิ........ 6
2.1.6 ความต้านทานอนุกรมและความต้านทานขนาน 6
2.1.7 การเชื่อต่อเซลล์แสงอาทิตย์แบบอนุกรม 7
2.1.8 การเชื่อต่อเซลล์แสงอาทิตย์แบบขนาน........ 8
2.1.9 ค่ากระแสลัดวงจร (Short-Circuit Current)........ 9
2.1.10 ค่าแรงดันวงจรเปิด (Open-Circuit Voltage)........ 10
2.1.11 ฟิลล์แฟคเตอร์ (Fill Factor)........ 10
2.2 เทคนิคในการวัดและการสร้างเส้นแนวโน้ม 11
2.2.1 ตัวเก็บประจุ........ 11
2.2.2 การวัดกระแสและแรงดันโดยใช้ตัวเก็บประจุเป็นโหลด........ 12

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

2.2.3 การสร้างเส้นแนวโน้ม 14
2.2.4 การหาค่ากระแสลัดวงจร 18
2.2.5 การหาค่าแรงดันวงจรเปิด 18
2.2.6 การหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสูดและค่ากระแสสูงสุด 19

บทที่ 3 การออกแบบ การสร้างและทดสอบ 21
3.1 การออกแบบฮาร์ดแวร์ 22
3.1.1 ส่วนประมวลผล 22
3.1.2 สวิตช์คำสั่ง 22
3.1.3 วงจรแหล่งจ่าย 23
3.1.4 วงจรแสดงผลแบบกราฟิก 24
3.1.5 วงจรขับไอจีบีที 25
3.1.6 วงจรการวัดแรงดันไฟฟ้า 26
3.1.7 การวัดกระแส 27
3.1.8 การวัดความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ 28
3.1.9 การวัดอุณหภูมิ 29
3.2 การออกแบบซอร์ฟแวร์ 29
3.3 การสอบเทียบและการทดสอบ 31

บทที่ 4 ผลการทดลอง 33
4.1 การสอบเทียบ 33
4.2 การทดสอบการวัดกับชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดต่างๆ 39
4.2.1 ผลการทดสอบการวัดชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบโมโนคริสตอล 39
4.2.2 ผลการทดสอบการวัดชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบอะมอร์ฟัส 40
4.2.3 ผลการทดสอบการวัดชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบาง 41

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 43
เอกสารอ้างอิง 44
ภาคผนวก 45

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก ก 46
ประวัติผู้เขียน 52

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

4.1 ค่า ADC ที่ได้จากเครื่องทดสอบ I-V และค่ากระแสจากมิเตอร์ รุ่น PV200 23

4.2 กระแสที่วัดได้จากเครื่องทดสอบ I-V.. 26

4.3 ค่า ADC ที่ได้จากเครื่องทดสอบ I-V และค่าแรงดันไฟฟ้าจากมิเตอร์ รุ่น PV200.................. 27

4.4 แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากเครื่องทดสอบ I-V 28

4.5 ข้อมูลชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบโมโนคริสตอลที่ได้จากเครื่องทดสอบ I-V กับ PV200 ที่ความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ 798 W/m2 ที่อุณหภูมิ 38 องศาเซลเซียส... 31

4.6 ข้อมูลชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่แบบอะมอร์ฟัสที่ได้จากเครื่องทดสอบ I-V กับ PV200 ที่ความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ 519 W/m2 ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส... 32

4.7 ข้อมูลชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบางที่ได้จากเครื่องทดสอบ I-V กับ PV200 ที่ความเข้มรังสี 516 W/m2 ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส... 33

สารบัญรูป

รูปที่ **หน้า**

2.1 กระบวนการเปลี่ยนพลังงานแสงให้เป็นไฟฟ้า...... 5

2.2 การตอบสนองต่อสเปกตรัมแสงอาทิตย์ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดต่างๆ...... 11

2.3 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์...... 12

2.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์(I-V Curve) 12

2.5 ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความเข้มรังสี...... 13

2.6 กราฟความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน...... 13

2.7 การต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบอนุกรม...... 14

2.8 การต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบขนาน...... 14

2.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันเมื่อนำแผงเซลล์แสงอาทิตย์มาต่อแบบอนุกรมและต่อแบบขนาน...... 15

2.10 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อเกิดกระแสลัดวงจร...... 15

2.11 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อเกิดแรงดันวงจรเปิด...... 16

2.12 การหาค่าฟิลล์แฟคเตอร์จากกราฟกระแสและแรงดัน...... 16

2.13 (ก) โครงสร้างของตัวเก็บประจุ (ข) สัญลักษณ์ของตัวเก็บประจุ...... 17

2.14 วงจรการต่อตัวเก็บประจุเข้ากับแผงเซลล์แสงอาทิตย์อย่างงาย...... 18

2.15 การเปลี่ยนแปลงของกระแสและแรงดันเมื่อปิดสวิตช์...... 19

2.16 (ก) กรณีกระแสลัดวงจรมีค่าคงที่ (ข) การเปลี่ยนแปลงของแรงดันเมื่อเกิดกระแสมีค่าคงที่ 19

2.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันที่ได้จากข้อมูลดิบ...... 20

2.18 ค่ากระแสลัดวงจรที่จุดตักบนแกน Y ของกราฟกระแสและแรงดัน...... 20

2.19 ค่าแรงดันวงจรเปิดที่จุดตัดบนแกน X ของกราฟกระแสและแรงดัน...... 21

2.20 กราฟแสดงกำลังไฟฟ้าสูงสุดและแรงดันไฟฟ้าสูงสุดและกระแสไฟฟ้าสูงสุด 21

3.1 แผนภาพเครื่องทดสอบ I-V สำหรับชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์...... 22

3.2 ไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC เบอร์ 33FJ256MC710 22

3.3 วงจรสวิตช์คำสั่ง 22

3.4 แบตเตอรี่ Li-ion ขนาด 18650 23

3.5 วงจรควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้า 24

3.6 วงจรแสดงผลผ่านจอแอลซีดีแบบกราฟิก...... 26

3.7 (ก) จอแสดงผลแบบกราฟ (ข) จอแสดงผลข้อมูลแบบตัวเลข...... 27

3.8 วงจรขับไอจีบีที...... 29

สารบัญรูป

รูปที่ **หน้า**

3.9 ตัวอย่างไอจีบีที 30
3.10 (ก) วงจรวัดแรงดันไฟฟ้า (ข) โหลดที่ต่อกับวงจรแบ่งแรงดัน 31
3.11 (ก) วงจรสำหรับใช้วัดกระแส (ข) ตัวต้านทานที่ใช้สำหรับวัดกระแส 32
3.12 โครงสร้างทั่วไฟของไพรานอมิเตอร์ 34
3.13 วงจรขยายสัญญาณเอาท์พุตจากไพรานอมิเตอร์ 29
3.14 เซนเซอร์วัดอุณหภูมิ 29
3.15 แผนผังการทำงานของของเครื่องทดสอบ I-V สำหรับชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 35
3.16 การจัดอุปกรณ์ในการสอบเทียบการวัดกระแส 35
3.17 การจัดอุปกรณ์ในการสอบเทียบการวัดแรงดัน 35
3.15 แผนผังการทำงานของของเครื่องทดสอบ I-V สำหรับชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 35
3.16 การจัดอุปกรณ์ในการสอบเทียบการวัดกระแส 35
3.17 การจัดอุปกรณ์ในการสอบเทียบการวัดแรงดัน 35
3.18 (ก) ชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโมโนคริสตอล (ข) ชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบอะมอร์ฟัส (ค) ชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง 35
4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า ADC กับ กระแสจากมิเตอร์รุ่น PV200 35
4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้าจากมิเตอร์ รุ่น PV200 กับค่ากระแสจากเครื่องทดสอบ I-V 35
4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า ADC กับแรงดันไฟฟ้าจากมิเตอร์รุ่น PV200 35
4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าจากมิเตอร์ รุ่น PV200 กับค่าแรงดันไฟฟ้าจากเครื่องทดสอบ I-V 35
4.5 หน้าจอแสดงผลการวัดคุณลักษณะกระแสและแรงดันของชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบโมโนคริสตอล 35
4.6 หน้าจอแสดงผลการวัดคุณลักษณะกระแสและแรงดันของชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบอะมอร์ฟัส 35
4.7 หน้าจอแสดงผลการวัดคุณลักษณะกระแสและแรงดันของชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบาง 35

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

เซลล์แสงอาทิตย์นั้นถูกคิดค้นและได้รับการพัฒนาแล้วนำมาประยุกต์ใช้เป็นเวลานานแล้ว และยิ่งได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นมากเมื่อเกิดวิกฤตปัญหาขาดแคลนพลังงาน เนื่องจากพลังงานน้ำมัน ถ่านหิน ก๊าซธรรมชาติ ที่มีราคาเพิ่มสูงขึ้นและกำลังจะหมดไป จึงมีความต้องการในการหาพลังงาน จากแหล่งอื่น เซลล์แสงอาทิตย์จึงเป็นที่สนใจและยอมรับกันในฐานะเป็นแหล่งพลังงานไฟฟ้าที่สะอาด สามารถนำใช้ผลิตพลังงานไฟฟ้าได้อย่างอิสระในพื้นที่ห่างไกลที่ระบบสายส่งไฟฟ้ายังเข้าไปไม่ถึงหรือจะใช้งานร่วมกับระบบสายส่ง

สำหรับการทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์นั้นผู้ผลิตกระทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ซึ่งใช้เครื่องจำลองแสงที่มีช่วงความยาวคลื่นเท่ากับความยาวคลื่นในมวลอากาศ 1.5 กำหนดความเข้มแสงที่ 1000 วัตต์ต่อตารางเมตรและควบคุมอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ 25 องศาเซลเซียส แล้วจึงทำการวัดคุณลักษณะกระแสและแรงดัน แต่ในกรณีที่นำแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไปใช้ในระบบการผลิตไฟฟ้า โดยจำเป็นต้องมีการใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์หลายๆแผงต่อกัน เพื่อให้ได้ค่าแรงดันวงจรเปิดที่เหมาะสมกับระดับแรงดันค่ายอดของไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งระดับแรงดันค่ายอดคลื่นของไฟฟ้ากระแสสลับในประเทศไทยนั้นมีที่ 310 โวลต์ อีกทั้งสภาพแวดล้อมและบริเวณที่ติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์นั้นมีสภาวะที่แตกต่างจากสภาวะที่ทดสอบทั้งบริเวณที่ติดตั้ง ปริมาณความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ฝุ่นละอองหรือการเสื่อมสภาพของตัวแผงเอง ซึ่งปัจจัยเหล่านี้ส่งผลให้ความสารถในการผลิตไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

ดังนั้นจึงมีแนวคิดในกานสร้างเครื่องทดสอบกระแสและแรงดันไฟฟ้าของชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบพกพา เพื่อใช้วัดประสิทธิภาพของชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในสภาพแวดล้อมติดตั้ง โดยสามารถวัดกระแสได้สูงสุด 15 แอมแปร์และวัดแรงดันได้สูงสุด 450 โวลต์ โดยการประยุกต์ใช้ตัวเก็บประจุเป็นโหลดและใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC ในการควบคุมและประมวลผลข้อมูล ตัวเก็บประจุนั้นถูกใช้งานอย่างแพร่หลาย [1] และเป็นโหลดที่นิยมใช้ในเชิงธุรกิจอีกด้วย ในการหากราฟคุณลักษณะกระแสและแรงดันของชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์และตัวเก็บประจุเป็นโหลดที่เป็นมาตรฐานในการวัดชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีกำลังไฟฟ้าตั้งแต่ 2-50 กิโลวัตต์ [2]

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาคุณลักษณะกระแสและแรงดันของชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์

1.2.2 ออกแบบและสร้างเครื่องทดสอบกระแสและแรงดันของชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1.3.1 ออกแบบและสร้างเครื่องทดสอบกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ที่มีช่วงในการวัดค่ากระแส 0-15 แอมแปร์ และแรงดันไฟฟ้า 0-400 โวลต์

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้เครื่องทดสอบกระแสและแรงดันของชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีราคาถูกและใช้งานได้ง่าย

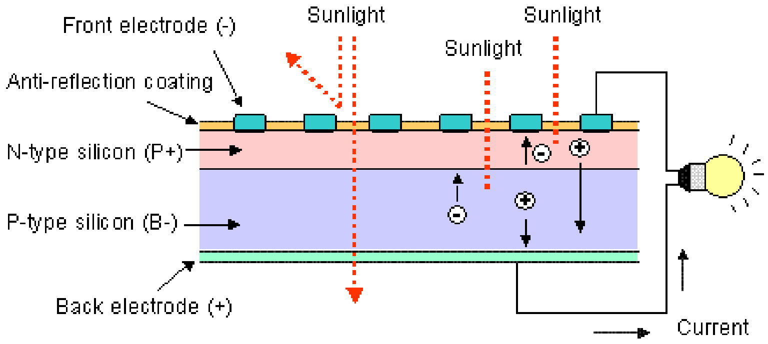
1.4.2 สามารถวิเคราะห์ประสิทธิภาพของชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์จากคุณลักษณะของกระแสและแรงดัน

บทที่ 2
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 เซลล์แสงอาทิตย์ [3-9]

2.1.1 หลักการทำงานของแสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์เป็นอุปกรณ์ทางไฟฟ้าที่ทำจากสารกึ่งตัวนำ มีหน้าที่เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นไฟฟ้ากระแสตรง อาศัยกระบวนการโฟโตโวลตาอิก (photovoltaic effect) ซึ่งเกิดจากความต่างศักย์ไฟฟ้าภายในการกึ่งตัวนำเมื่อได้รับแสงที่มีพลังงานมากพอที่จะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระ โครงสร้างที่สำคัญของเซลล์แสงอาทิตย์มีลักษณะเหมือนกับไดโอดทั่วไป ประกอบด้วยรอยต่อระหว่างสารกึ่งตัวนำสองชนิดได้แก่ สารกึ่งตัวนำชนิดพีเป็นขั้วบวกและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นเป็นขั้วลบดังแสดงในรูปที่ 2.1



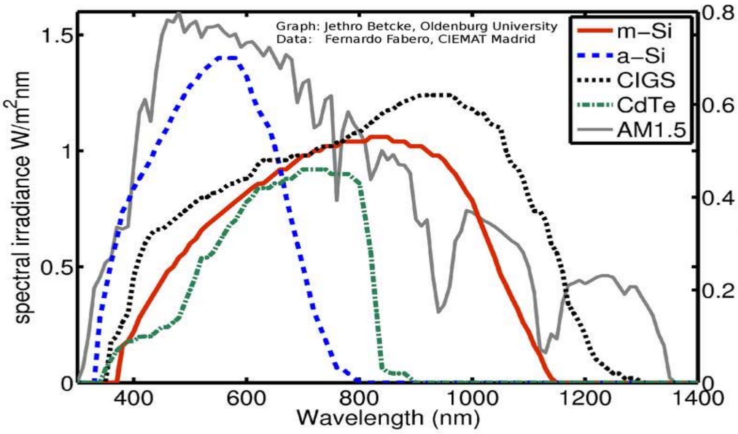
รูปที่ 2.1 กระบวนการเปลี่ยนพลังงานแสงให้เป็นไฟฟ้า

เมื่อแสงซึ่งมีลักษณะเป็นอนุภาคหรือกลุ่มก้อนพลังงานซึ่งเรียกว่าโฟตอน (photon) ตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์จะทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระและโฮลอิสระขึ้น สนามไฟฟ้าภายในจะส่งอิเล็กตรอนอิสระไปที่ด้านเอ็นและส่งโฮลไปที่ด้านพี เมื่อต่อวงจรภายนอกให้กับเซลล์ กระแสอิเล็กตรอนจะไหลจากด้านเอ็นไปที่ด้านพีซึ่งกระแสอิเล็กตรอนจะมีทิศทางตรงกันข้ามกับกระแสไฟฟ้า (current) กล่าวคือจะเกิดกระแสไฟฟ้าจากด้านพีไปด้านเอ็นนั่นเอง สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในเซลล์ทำให้เกิดแรงดัน (voltage)

2.1.2 การตอบสนองต่อสเปกตรัมแสงอาทิตย์

รังสีจากดวงอาทิตย์ประกอบด้วยแสงอัลตราไวโอเลต แสงที่มองเห็นด้วยตาเปล่าและแสงอินฟราเรด หากพิจารณาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ต้องคำนึงถึงสเปกตรัมแสงและการ

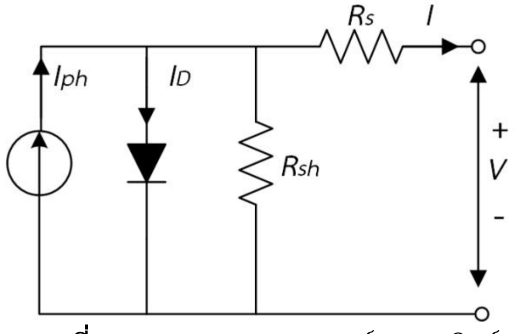
ตอบสนองต่อสเปกตรัมประกอบกัน ถึงแม้ว่าสเปกตรัมของรังสีจากดวงอาทิตย์ค่อนข้างกว้างตั้งแต่ 380-1100 นาโนเมตร แต่ด้วยข้อจำกัดของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สามารถตอบสนองต่อสเปกตรัมแสงช่วงที่มองเห็นด้วยตาเปล่าและแสงอินฟราเรด ดังนั้นช่วงความยาวคลื่นที่ใช้งานจริงจึงแคบลงรูปที่ 2.2 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพที่แตกต่างกันของเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทต่างๆ



รูปที่ 2.2 การตอบสนองต่อสเปกตรัมแสงอาทิตย์ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดต่างๆ

2.1.3 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์สามารถแทนได้ด้วยวงจรสมมูล (equivalent circuit) ดังรูปที่2.3 ประกอบด้วย แหล่งจ่ายกระแสตรงต่อขนานกับไดโอดชนิดรอยต่อพี-เอ็นและความต้านทานชั้นท์ (shunt resistance : R_{sh}) แล้วอนุกรมความต้านทานอนุกรม (series resistance : R_s) โดยกำหนดให้แหล่งจ่ายกระแสเป็นแบบกระแสคงที่ ซึ่งแปรผันผันตามความเข้มแสง ความต้านทานอนุกรมเป็นค่าคาวามต้านทานที่เกิดขึ้นจากจุดเชื่อมต่อระหว่างตัวนำไฟฟ้ากับเซลล์ ส่วนความต้านทานชั้นท์เกิดขึ้นเมื่อมีแรงดันไฟฟ้าในลักษณะย้อนกลับให้กับไดโอด ในทางอุดมคติจะไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลย้อนกลับ แต่ในความเป็นจริงจะมีกระแสไหลย้อยกลับในระดับต่ำ ดังนั้นจึงแทนด้วยความต้านทานชั้นท์ ซึ่งค่าความต้านทานชั้นท์มีค่าสูงมากเมื่อเทียบกับค่าความต้านทานอนุกรม



รูปที่ 2.3 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์

จากรูปที่ 2.2 สามารถสร้างสมการความสัมพันธ์กระแสและแรงดันได้ดังสมการต่อไปนี้

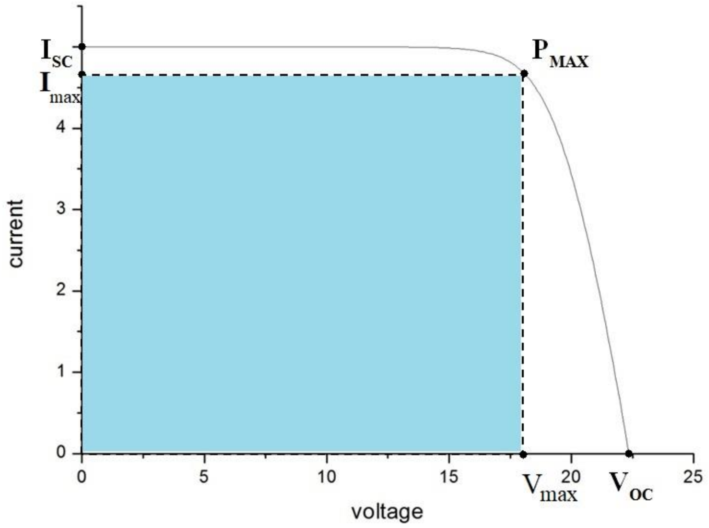
$$I = I_{ph} - I_D - I_{sh} \tag{1}$$

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{q(V + R_s I)}{A k_B T} \right) - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \tag{2}$$

เมื่อ

I_{ph}	คือ	กระแสไฟฟ้าที่เกิดจากแสง (photocurrent)
I_D	คือ	กระแสไดโอด (diode current)
I_0	คือ	กระแสอิ่มตัว (saturation current)
A	คือ	ค่าตัวประกอบอุดมคติ (ideality factor)
q	คือ	ประจุไฟฟ้า (electronic charge)
k_B	คือ	ค่าคงที่ของโบลทซ์มันน์ (Boltzman’s constant)
T	คือ	อุณหภูมิรอยต่อ (junction temperature)
R_s	คือ	ความต้านทานอนุกรม (series resistance)
R_{sh}	คือ	ความต้านทานชั้นท์ (shunt resistance)

2.1.4 สมบัติทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

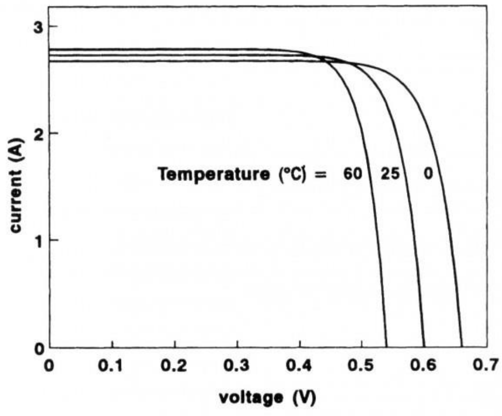


รูปที่ 2.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (I-V Curve)

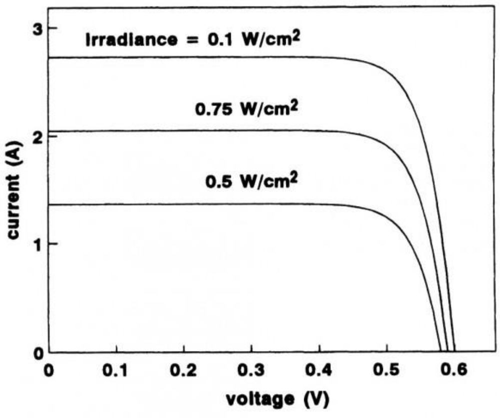
สมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์แสดงด้วยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ดังรูปที่ 2.4 เมื่อต่อโหลดที่สามารถปรับค่าได้ (variable load) โดยแสดงค่าตั้งแต่สภาวะลัดวงจร (short circuit) ถึงสภาวะวงจรเปิด (open circuit) โดยตัดแกนตั้งที่แรงดันมีค่าเป็นศูนย์จะได้ค่ากระแสลัดวงจร (short circuit current : I_{sc}) ส่วนจุดตัดแกนนอนที่กระแสมีค่าเท่ากับศูนย์จะได้ค่าแรงดันวงจรเปิด (open circuit voltage : V_{oc}) โดยกำลังไฟฟ้าสูงสุด (power at maximum point : P_{max}) หาได้จากผลคูณระหว่างกระแสและแรงดันซึ่งกำลังไฟฟ้าสูงนั้นมีได้ค่าเดียว ส่วนกระแสที่จุดนี้จะเรียกว่า กระแสที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (current at maximum power point : I_{max}) ค่าแรงดันไฟฟ้าที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดจะเรียกว่า แรงดันที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (voltage at maximum power point : V_{max})

2.1.5 ผลกระทบจากความเข้มรังสีแสงอาทิตย์และอุณหภูมิ

ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ขึ้นอยู่กับปัจจัยภายนอกและสมบัติของเซลล์ โดยเซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกติดตั้งในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน จะสามารถผลิตไฟฟ้าได้แตกต่างกันโดยสังเกตได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันโดยรูปที่ 2.5 (ก) เป็นผลจากการได้รับความเข้มรังสีคงที่แต่อุณหภูมิเพิ่มขึ้น มีผลให้แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ลดลงแต่กระแสลัดวงจรกลับมีค่าสูงขึ้น ส่วนในรูปที่ 2.5 (ข) เป็นการควบคุมอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ให้คงที่แล้วทำการเพิ่มความเข้มรังสีจะเห็นว่าค่ากระแสลัดวงจรเพิ่มสูงขึ้นส่วนแรงดันวงจรเปิดเพิ่มขึ้นเล็กน้อย



(ก)



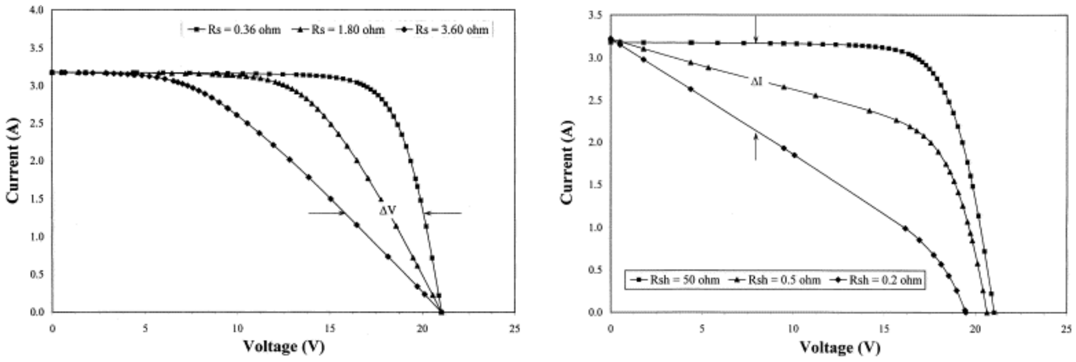
(ข)

รูปที่ 2.5 ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความเข้มรังสี

2.1.6 ความต้านทานอนุกรมและความต้านทานชั้นท์

จากรูปที่ 2.2 ภายในวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์นั้นนอกจากจะประกอบด้วยแหล่งจ่ายกระตรงและไดโอดแล้วยังประประกอบด้วยตัวต้านทาน 2 คือ ความต้านทานอนุกรมและความต้านทานชั้นท์ จากรูปที่ 2.6 (ก) จะพบว่าการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานอนุกรมไม่มีผลต่อ

กระแสลัดวงจรและแรงดันวงจรเปิดแต่มีผลต่อค่ากำลังไฟฟ้าเนื่องจากเมื่อค่าความต้านทานอนุกรมเพิ่มขึ้นแรงดันที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดจะเพิ่มสูงขึ้นทำให้เซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพสูงขึ้น ส่วนรูปที่ 2.6 (ข) เมื่อค่าความต้านทานชั้นท์เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้กระแสที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้น

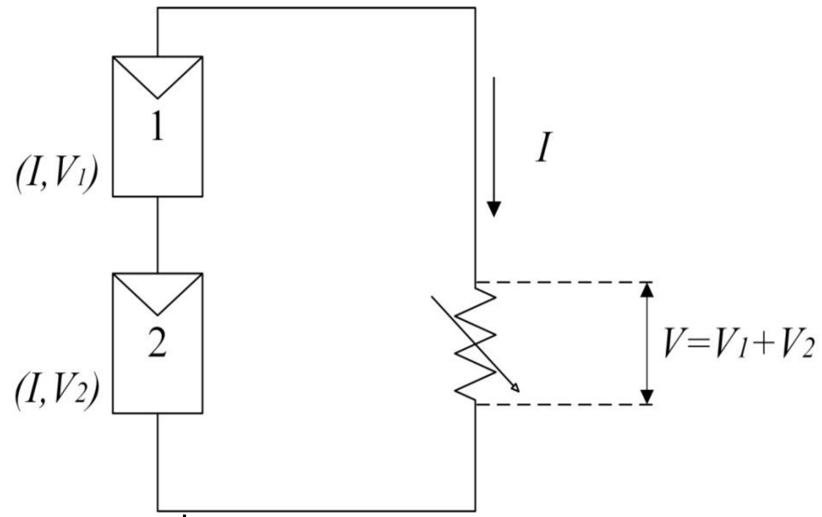


(ก) (ข)

รูปที่ 2.6 กราฟความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน

2.1.7 การเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์แบบอนุกรม

การเชื่อมต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์ดังแสดงในรูปที่ 2.7 เป็นการนำแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำนวนสองแผงมาต่อกันแบบอนุกรมแล้วต่อเข้ากับโหลดซึ่งเป็นตัวต้านทานปรับค่าได้ (variable load R) ในกรณีนี้ทั้งสองแผงมีกระแสและแรงดันเท่ากันจะพบว่าแรงดันรวมจะมีค่าเท่ากับแรงดันจากแผงที่หนึ่งรวมกับแผงที่สองส่วนกระแสมีค่าเท่าเดิม



รูปที่ 2.7 การต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบอนุกรม

เมื่อต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบอนุกรมค่าแรงดันวงจรเปิดจะมีค่าดังสมการต่อไปนี้
ที่ $I > 0$ จะได้

$$V = V_1 + V_2 \tag{8}$$

ที่ $I = 0$ จะได้

$$V_{OC} = 2V_{OC1} = 2V_{OC2} \tag{9}$$

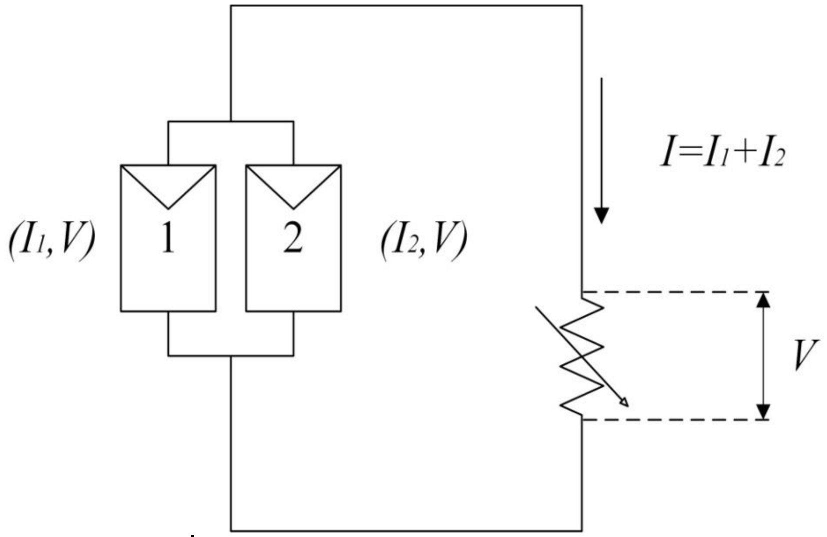
ที่เงื่อนไขที่ทำให้เกิดกระแสลัดวงจร $R = 0$ กระแสลัดวงจรจะมีค่าดังสมการ

$$I_{SC} = I_{SC1} = I_{SC2} \tag{10}$$

และแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทานจะมีค่าดังสมการ

$$V = V_1 = V_2 = 0 \tag{11}$$

2.1.8 การเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์แบบขนาน

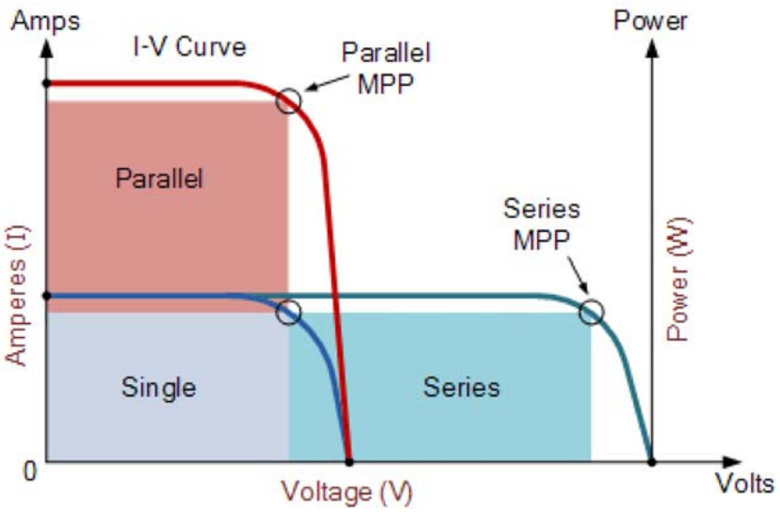


รูปที่ 2.8 การต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบขนาน

จากรูปที่ 2.8 เมื่อนำแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีความสามารถในการจ่ายกระแสและแรงดันหรือมีคุณลักษณะของกระแสและแรงดันเหมือนกันนำมาต่อขนานกันจะได้ค่ากระแสดังนี้

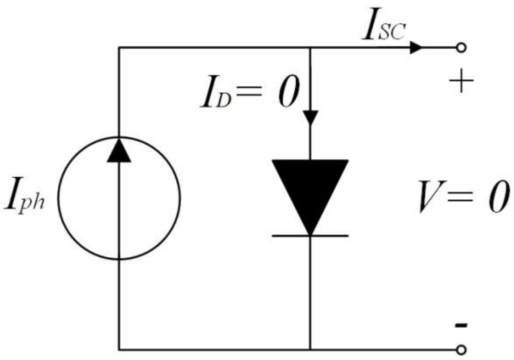
$$I = I_1 + I_2 \tag{12}$$

$$V = V_1 = V_2 \tag{13}$$



รูปที่ 2.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันเมื่อนำแผงเซลล์แสงอาทิตย์มาต่อแบบอนุกรมและต่อแบบขนาน

2.1.9 ค่ากระแสลัดวงจร (Short-circuit current)



รูปที่ 2.10 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์กรณีที่เกิดค่ากระแสลัดวงจร

รูปที่ 2.10 แสดงวงจรที่ทำให้เกิดค่ากระแสลัดวงจร ค่ากระแสลัดวงจรคือค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้เมื่อค่าความต้านทานของโหลดมีค่าน้อยต่ำมากเมื่อเทียบกับค่าความต้านทานของเซลล์แสงอาทิตย์เสมือนกับการลัดวงจรเข้าด้วยกัน ทำให้ค่ากระแสที่วัดได้มีค่าสูงสุดในขณะที่ค่าแรงดันมีค่าเป็นศูนย์

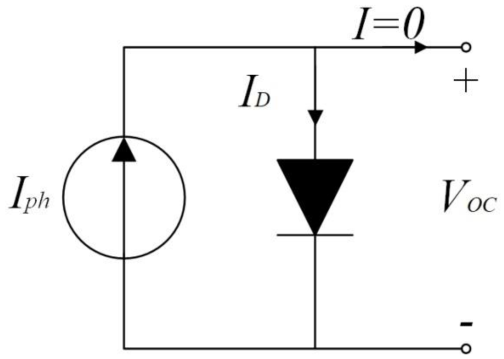
จากสมการที่ (2) เมื่อ $V = 0$ จะได้

$$I = I_{ph} - I_0\left[\exp\left(\frac{qR_sI}{Ak_BT}\right) - 1\right] - \frac{R_sI}{R_{sh}} \tag{3}$$

จากรูปที่ 2.10 ที่เงื่อนไขการลัดวงจรผลจากค่าความต้านทานอนุกรมมีผลน้อยมาก ($R_s = 0$) จึงสามารถพิจารณาได้ว่าค่ากระแสลัดวงจร (I_{SC}) มีค่าเท่ากับค่ากระแสที่เกิดจากแสง (I_{ph}) ดังสมการต่อไปนี้

$$I_{SC} = I_{ph} \tag{4}$$

2.1.10 ค่าแรงดันวงจรเปิด (Open-circuit voltage)



รูปที่ 2.11 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์กรณีที่เกิดค่าแรงดันวงจรเปิด

ค่าแรงดันวงจรเปิดคือค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้เมื่อค่าความต้านทานของโหลดมีค่าสูงมาก เมื่อเทียบกับค่าความต้านทานของเซลล์แสงอาทิตย์ เสมือนกับว่าเปิดวงจรจรออกจากกันทำให้กระแสไม่สามารถไหลผ่านจนครบวงจรได้ ทำให้กระแสมีค่าเท่ากับศูนย์ในขณะที่แรงดันมีค่าสูงสุด ซึ่งวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์กรณีที่เกิดค่าแรงดันวงจรเปิดแสดงได้ดังรูปที่ 2.11 ซึ่งแรงดันวงจรเปิดสามารถอธิบายได้ด้วยสมการต่อไปนี้

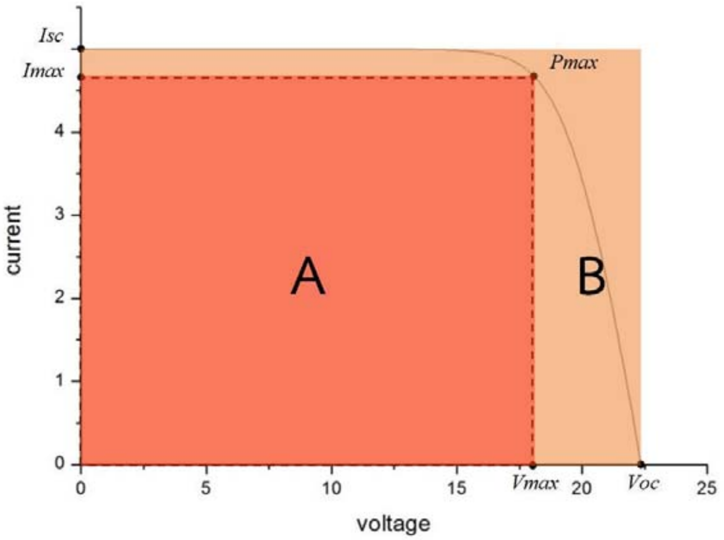
$$V_{oc} = \frac{Ak_B T}{q} \ln\left(\frac{I_{ph} + I_0}{I_0}\right) \tag{5}$$

2.1.11 ฟิลล์แฟคเตอร์ (Fill factor)

ฟิลล์แฟคเตอร์ (Fill Factor : FF) เป็นค่าปริมาณที่บ่งบอกถึงคุณภาพในการผลิตไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยค่าฟิลล์แฟคเตอร์เป็นอัตราส่วนของกำลังฟ้าสูงสุดต่อผลคูณระหว่างกระแสลัดวงจรกับค่าแรงดันวงจรเปิดดังแสดงในรูปที่ 2.12 สามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$FF = \frac{areaA}{areaB} \tag{6}$$

$$FF = \frac{P_{\max}}{I_{SC} \times V_{OC}} \tag{7}$$

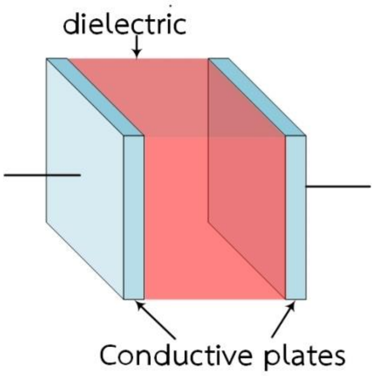


รูปที่ 2.12 การหาค่าฟิลล์แฟคเตอร์จากกราฟกระแสและแรงดัน

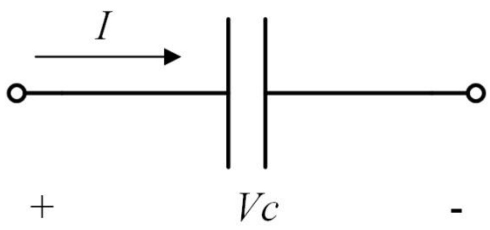
2.2 เทคนิคในการวัดและการสร้างเส้นแนวโน้ม

2.2.1 ตัวเก็บประจุ

ตัวเก็บประจุ (capacitor) เป็นอุปกรณ์สะสมพลังงานชนิดหนึ่ง โดยมีโครสร้างที่ประกอบด้วยแผ่นโลหะ 2 แผ่นที่ถูกขั้นกลางด้วยสารไดอิเล็กทริค โดยที่ประจุลบจะถูกเก็บอยู่บนแผ่นโลหะด้านหนึ่ง ส่วนประจุก็จะถูกเก็บอยู่บนแผ่นโลหะตัวนำอีกด้านหนึ่ง นั้นคือจะมีพลังงานสะสมอยู่ที่ตัวเก็บประจุในรูปของสนามไฟฟ้ารูปที่ 2.13 (ก) โครางสร้างอย่างง่ายของตัวเก็บประจุ (ข) สัญลักษณ์ของตัวเก็บประจุ



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.13 (ก) โครงสร้างของตัวเก็บประจุ (ข) สัญลักษณ์ของตัวเก็บประจุ

เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้า (v) ให้กับตัวเก็บประจุ ส่งผลให้เกิดประจุขึ้นตรงตรงข้ามบนแผ่นตัวนำทั้งสองปริมาณของประจุไฟฟ้าจะแปรผันตรงกับค่าความจุดังสมการต่อไปนี้

$$q = Cv \tag{14}$$

เมื่อ C คือ ค่าความจุไฟฟ้ามีหน่วยเป็นฟารัด (Farad)

จากสมการที่ (14) สามารถคำนวณหาปริมาณกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุได้โดยการหาอนุพันธ์ของสมการที่ (14) จะได้

$$\frac{dq}{dt} = C\frac{dv}{dt} \tag{15}$$

แทนค่า $i = \frac{dq}{dt}$ ลงในสมการ (15) จะได้

$$i = C\frac{dv}{dt} \tag{16}$$

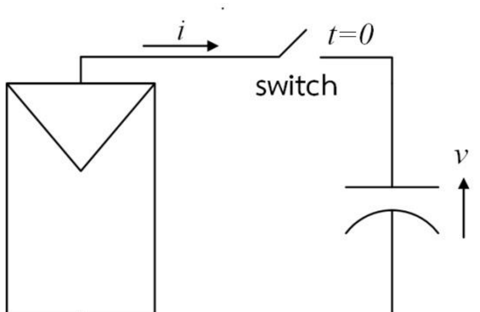
สมการที่ (16) คือสมการคำนวณหากระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ เมื่อมีประจุสะสมในตัวเก็บประจุมากขึ้นแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุก็จะสูงขึ้นจนแรงดันที่ตกคร่อมมีค่าเท่ากับแหล่งจ่าย โดยแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุสามารถคำนวณได้จากปริพันธ์ทั้งสองข้ามของสมการที่ (16)

$$\int_{t_0}^{t} idt = \int_{t_0}^{t} C\frac{dv}{dt} = C\int_{t_0}^{t} \frac{dv}{dt}$$

$$\int_{t_0}^{t} idt = C\{v(t) - v(t_0)\}$$

$$v(t) = \frac{1}{C}\int_{t_0}^{t} idt + v(t_0) \tag{17}$$

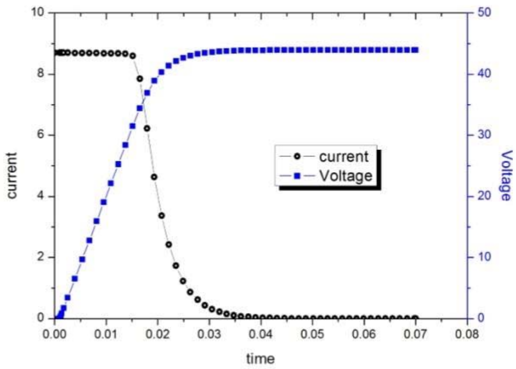
2.2.2 การวัดกระแสและแรงดันโดยใช้ตัวเก็บประจุเป็นโหลด



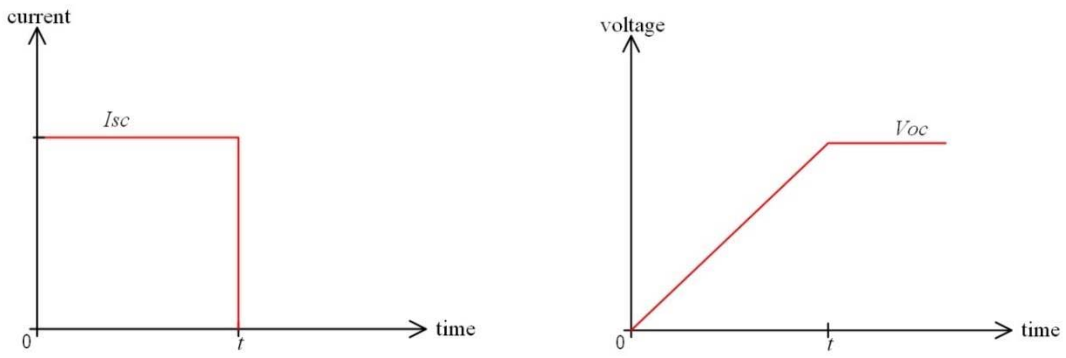
รูปที่ 2.14 แผนผังการต่อตัวเก็บประจุเข้ากับแผงเซลล์แสงอาทิตย์

จากรูปที่ 2.14 แสดงรูปแบบอย่าง่ายของการต่อตัวเก็บประจุเข้ากับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ที่เวลา t=0 แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุมีค่าเท่ากับ เมื่อทำการปิดสวิตช์กระแสจากเซลล์แสงอาทิตย์

จะไหลเข้าตัวเก็บประจุ โดยในขณะที่แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุมีค่าเป็นศูนย์กระแสจากเซลล์แสงอาทิตย์จะไหลเข้าไปยังตัวเก็บประจุได้เต็มกำลังที่เซลล์แสงอาทิตย์จะผลิตได้โดยกระแสนี้จะเรียกว่ากระแสลัดวงจร (short-circuit current : I_{sc}) เมื่อเวลาผ่านไปมีประจุเข้าไปสะสมในตัวเก็บประจุมากขึ้นส่งผลให้แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุมีค่าสูงขึ้นโดยแรงดันจะเพิ่มสูงขึ้นจนมีค่าเท่าค่าแรงดันวงจรเปิด (open-circuit voltage : V_{oc}) กระแสก็จะหยุดไหลเข้าตัวเก็บประจุ โดยการเปลี่ยนแปลงของกระแสและแรงดันแสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 การเปลี่ยนแปลงของกระแสและแรงดันเมื่อปิดสวิตซ์



(ก) (ข)

รูปที่ 2.16 (ก) กรณีกระแสลัดวงจรมีค่าคงที่ (ข) การเปลี่ยนแปลงของแรงดันเมื่อกระแสมีค่าคงที่

จากรูปที่ 2.12 จะพบว่าการเปลี่ยนแปลงปริมาณกระแสและแรงดันนั้นไม่เป็นเชิงเส้นเพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณาจะกำหนดให้กระแสที่ไหลเข้าตัวเก็บประจุมีค่าคงที่ คือมีค่ากระแสลัดวงจรคงที่นั้นเองดังแสดงในรูปที่ 2.13 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันสามารถกำหนดได้ด้วยคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวเก็บประจุดังสมการที่ (17) เมื่อกระแสมีค่าคงที่คือ $i = I_{SC}$ และ $v(t_0) = 0$ จะได้

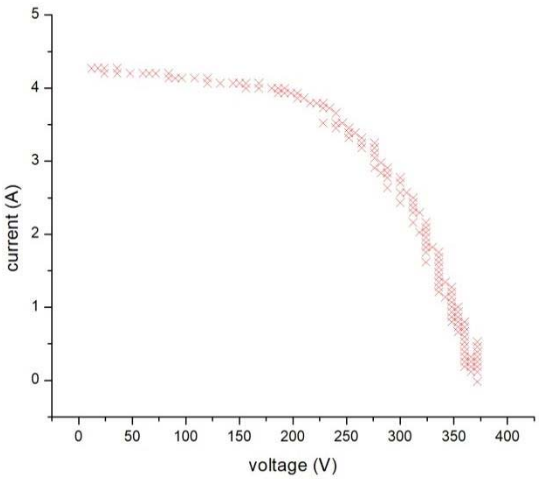
$$V_{OC} = \frac{I_{SC}}{C} T \tag{18}$$

เมื่อ T คือ เวลาที่ใช้ในการสะสมประจุจนเต็ม

จากสมการที่ (18) สามารถจักรูปใหม่เพื่อคำนวณหาขนาดของตัวเก็บประจุดังสมการที่(19) ซึ่งมีความจำเป็นต่อการกำหนดระยะเวลาในการวัดกระแสและแรงดัน

$$T = \frac{V_{OC}}{I_{SC}} C \tag{19}$$

2.2.3 การสร้างสมการเส้นแนวโน้ม



รูปที่ 2.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันที่ได้จากข้อมูลดิบ

พารามิเตอร์ที่บ่งบอกถึงประสิทธิภาพการทำงานของชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์หาได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันโดยการนำข้อมูลดิบมาสร้างกราฟดังแสดงในรูปที่ 2.12จากรูปเมื่อเริ่มต้นการวัดปริมาณกระแสและแรงดันมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วทำให้การเก็บข้อมูลในช่วงแรกจะได้ข้อมูลได้น้อยและปริมาณจุดข้อมูลจะเพิ่มเมื่อตัวเก็บประจุใกล้จะเก็บประจุจนเต็ม ดังนั้นจึงต้องนำข้อมูลที่ได้มาสมการเส้นแนวโน้ว โดยใช้สมการพอลิโนเมียลอันดับที่ 5 ดังสมการที่ (20)

$$y = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 + a_4 v^4 + a_5 x^5 \tag{20}$$

เมื่อ y คือ ค่ากระแสไฟฟ้าที่คำนวณได้จากสมการเส้นแนวโน้มและ a_0, a_1, a_2, a_3, a_4 และ a_5 คือค่าสัมประสิทธิ์ของสมการ โดยมีวิธีการคำนวณดังนี้

$$A=\begin{bmatrix} n & \sum x_i & \sum x_i^2 & \cdots & \sum x_i^j \\ \sum x_i & \sum x_i^2 & \sum x_i^3 & \cdots & \sum x_i^{j+1} \\ \sum x_i^2 & \sum x_i^3 & \sum x_i^4 & \cdots & \sum x_i^{j+2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \sum x_i^j & \sum x_i^{j+1} & \sum x_i^{j+1} & \cdots & \sum x_i^{j+j} \end{bmatrix}$$

$$X=\begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_j \end{bmatrix}$$

$$B=\begin{bmatrix} \sum y_i \\ \sum (\mathrm{x}_i \mathrm{y}_i) \\ \sum (\mathrm{x}_i^2 \mathrm{y}_i) \\ \vdots \\ \sum (\mathrm{x}_i^j \mathrm{y}_i) \end{bmatrix}$$

จาก

$$AX=B \tag{21}$$

เมื่อแทนค่าลงในสมการจะได้

$$\begin{bmatrix} n & \sum x & \sum x^2 & \sum x^3 & \sum x^4 & \sum x^5 \\ \sum x & \sum x^2 & \sum x^3 & \sum x^4 & \sum x^5 & \sum x^6 \\ \sum x^2 & \sum x^3 & \sum x^4 & \sum x^5 & \sum x^6 & \sum x^7 \\ \sum x^3 & \sum x^4 & \sum x^5 & \sum x^6 & \sum x^7 & \sum x^8 \\ \sum x^4 & \sum x^5 & \sum x^6 & \sum x^7 & \sum x^8 & \sum x^9 \\ \sum x^5 & \sum x^6 & \sum x^7 & \sum x^8 & \sum x^9 & \sum x^{10} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum y \\ \sum xy \\ \sum x^2 y \\ \sum x^3 y \\ \sum x^4 y \\ \sum x^5 y \end{bmatrix} \tag{22}$$

เมื่อ n คือจำนวนข้อมูลที่นำมาคำนวณ

x คือค่าแรงดันไฟฟ้า

y คือค่ากระแสไฟฟ้า

วิธีการแก้สมการจะใช้กฎของเครเมอร์ (Cramer’s rule) โดยการแทนค่า เมทริกซ์ B ลงในเมทริกซ์ A โดยแทนที่ละหลักซึ่งจะทำให้ได้เมทริกซ์ A_{11} , A_{12} , A_{13} , A_{14} , A_{15} และ A_{16}

$$A_{11} = \begin{bmatrix} \sum y & \sum x & \sum x^2 & \sum x^3 & \sum x^4 & \sum x^5 \\ \sum xy & \sum x^2 & \sum x^3 & \sum x^4 & \sum x^5 & \sum x^6 \\ \sum x^2 y & \sum x^3 & \sum x^4 & \sum x^5 & \sum x^6 & \sum x^7 \\ \sum x^3 y & \sum x^4 & \sum x^5 & \sum x^6 & \sum x^7 & \sum x^8 \\ \sum x^4 y & \sum x^5 & \sum x^6 & \sum x^7 & \sum x^8 & \sum x^9 \\ \sum x^5 y & \sum x^6 & \sum x^7 & \sum x^8 & \sum x^9 & \sum x^{10} \end{bmatrix}$$

$$A_{12} = \begin{bmatrix} n & \sum y & \sum x^2 & \sum x^3 & \sum x^4 & \sum x^5 \\ \sum x & \sum x\ y & \sum x^3 & \sum x^4 & \sum x^5 & \sum x^6 \\ \sum x^2 & \sum x^2 y & \sum x^4 & \sum x^5 & \sum x^6 & \sum x^7 \\ \sum x^3 & \sum x^3 y & \sum x^5 & \sum x^6 & \sum x^7 & \sum x^8 \\ \sum x^4 & \sum x^4 y & \sum x^6 & \sum x^7 & \sum x^8 & \sum x^9 \\ \sum x^5 & \sum x^5 y & \sum x^7 & \sum x^8 & \sum x^9 & \sum x^{10} \end{bmatrix}$$

$$A_{13} = \begin{bmatrix} n & \sum x & \sum y & \sum x^3 & \sum x^4 & \sum x^5 \\ \sum x & \sum x^2 & \sum x\ y & \sum x^4 & \sum x^5 & \sum x^6 \\ \sum x^2 & \sum x^3 & \sum x^2 y & \sum x^5 & \sum x^6 & \sum x^7 \\ \sum x^3 & \sum x^4 & \sum x^3 y & \sum x^6 & \sum x^7 & \sum x^8 \\ \sum x^4 & \sum x^5 & \sum x^4 y & \sum x^7 & \sum x^8 & \sum x^9 \\ \sum x^5 & \sum x^6 & \sum x^5 y & \sum x^8 & \sum x^9 & \sum x^{10} \end{bmatrix}$$

$$A_{14} = \begin{bmatrix} n & \sum x & \sum x^2 & \sum y & \sum x^4 & \sum x^5 \\ \sum x & \sum x^2 & \sum x^3 & \sum x & \sum x^5 & \sum x^6 \\ \sum x^2 & \sum x^3 & \sum x^4 & \sum x^2 & \sum x^6 & \sum x^7 \\ \sum x^3 & \sum x^4 & \sum x^5 & \sum x^3 & \sum x^7 & \sum x^8 \\ \sum x^4 & \sum x^5 & \sum x^6 & \sum x^4 & \sum x^8 & \sum x^9 \\ \sum x^5 & \sum x^6 & \sum x^7 & \sum x^5 & \sum x^9 & \sum x^{10} \end{bmatrix}$$

$$A_{15} = \begin{bmatrix} n & \sum x & \sum x^2 & \sum x^3 & \sum y & \sum x^5 \\ \sum x & \sum x^2 & \sum x^3 & \sum x^4 & \sum x\ y & \sum x^6 \\ \sum x^2 & \sum x^3 & \sum x^4 & \sum x^5 & \sum x^2 y & \sum x^7 \\ \sum x^3 & \sum x^4 & \sum x^5 & \sum x^6 & \sum x^3 y & \sum x^8 \\ \sum x^4 & \sum x^5 & \sum x^6 & \sum x^7 & \sum x^4 y & \sum x^9 \\ \sum x^5 & \sum x^6 & \sum x^7 & \sum x^8 & \sum x^5 y & \sum x^{10} \end{bmatrix}$$

$$A_{16} = \begin{bmatrix} n & \sum x & \sum x^2 & \sum x^3 & \sum x^4 & \sum y \\ \sum x & \sum x^2 & \sum x^3 & \sum x^4 & \sum x^5 & \sum x\,y \\ \sum x^2 & \sum x^3 & \sum x^4 & \sum x^5 & \sum x^6 & \sum x^2 y \\ \sum x^3 & \sum x^4 & \sum x^5 & \sum x^6 & \sum x^7 & \sum x^3 y \\ \sum x^4 & \sum x^5 & \sum x^6 & \sum x^7 & \sum x^8 & \sum x^4 y \\ \sum x^5 & \sum x^6 & \sum x^7 & \sum x^8 & \sum x^9 & \sum x^5 y \end{bmatrix}$$

จากนั้นคำนวณหาดีเทอมิแนนต์ของเมทริกซ์ A , A_{11} , A_{12} , A_{13} , A_{14} , A_{15} และ A_{16} จากนั้นคำนวณหาค่า a_0 , a_1 , a_2 , a_3 , a_4 และ a_5 ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$a_0 = \frac{\det(A_{11})}{\det(A\ )} \tag{23}$$

$$a_1 = \frac{\det(A_{12})}{\det(A\ )} \tag{24}$$

$$a_2 = \frac{\det(A_{13})}{\det(A\ )} \tag{25}$$

$$a_3 = \frac{\det(A_{14})}{\det(A\ )} \tag{26}$$

$$a_4 = \frac{\det(A_{15})}{\det(A\ )} \tag{27}$$

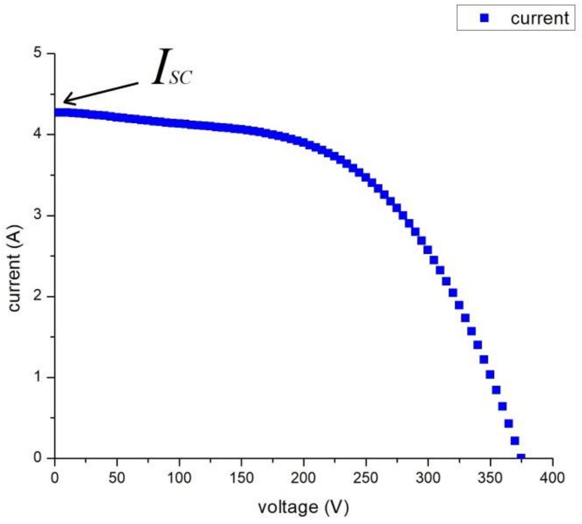
$$a_5 = \frac{\det(A_{16})}{\det(A\ )} \tag{28}$$

2.2.4 การหาค่ากระแสลัดวงจร

จากสมการเส้นแนวโน้มที่ได้จากขั้นตอนข้างต้น ค่ากระแสลัดวงจรจะหาได้จากจุดตัดบนแกน y ของเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันหรือแทนค่า $v = 0$ ลงในสมการเส้นแนวโน้ม ทำให้ได้ค่ากระแสลัดวงจรมีค่าเท่ากับค่าสัมประสิทธิ์ a_0 ของสมการเส้นแนวโน้มนั่นเอง

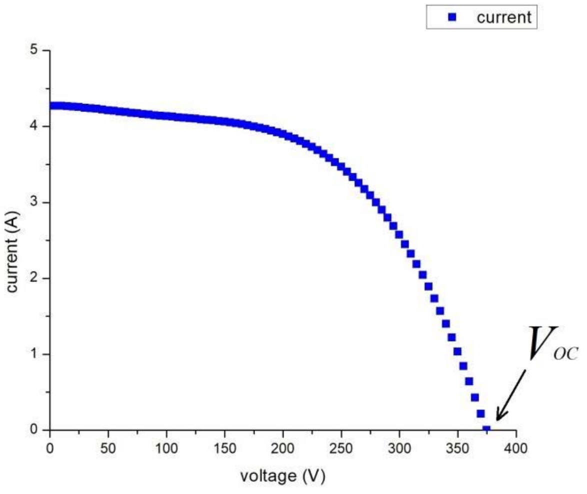
$$I = a_0 + a_1 v + a_2 v^2 + a_3 v^3 + a_4 v^4 + a_5 v^5 \tag{28}$$

$$I = a_0 \tag{29}$$



รูปที่ 2.18 ค่ากระแสลัดวงจรที่จุดตัดบนแกน y ของกราฟกระแสและแรงดัน

2.2.5 การหาค่าแรงดันวงจรเปิด



รูปที่ 2.19 ค่าแรงดันวงจรเปิดที่จุดตัดบนแกน x ของกราฟกระแสและแรงดัน

จากรูปที่ 2.16 ค่าแรงดันวงจรเปิดหาได้จากจุดตัดบนแกน x ของกราฟกระแสและแรงดัน ซึ่งจะคำนวณด้วยการแทนค่าแรงดันลงในสมการตัวแทนแล้วดูว่าคร่าแรงดันใดที่ทำให้ค่ากระแสเป็นศูนย์ เรียกวิธีนี้ว่า incremental search method มีสมการในการประมาณค่าคือ

$$x = x_i - \frac{h - f(x_i)}{f(x_i) - f(x_i - h)} \tag{30}$$

โดยที่ x_i คือค่าแรงดันที่แทนลงในสมการเส้นแนวโน้มแล้วทำให้ค่ากระแสมีค่าติดลบเป็นค่าแรก ส่วน $f(x_i)$ คือค่ากระแสที่ติดลบเป็นค่าแรก h คือผลต่างของค่าแรงดันที่แทนลงในสมการแต่ละขั้นและ $f(x_i-h)$ คือค่ากระแสที่เป็นค่าบวกค่าสุดท้าย

ในการคำนวณหาค่าแรงดันวงจรเปิดจะเริ่มแทนค่าแรงดันลงในสมการตัวแทนตั้งแต่ศูนย์ จนถึงค่าแรงดันที่ทำให้ค่ากระแสติดลบ ความละเอียดของค่าแรงดันวงจรเปิดที่คำนวณได้จะขึ้นอยู่กับความละเอียด ในการเพิ่มขึ้นของค่าแรงดันที่แทนลงในสมการหรือก็คือค่า h นั่นเอง

ตัวอย่างค่ากระแสและแรงดัน

แรงดัน(V)	กระแส(A)
0.00	3.392
⋮	⋮
382.50	0.01951
382.75	0.00934
383.00	-0.00084

จะได้ h = 382.75-382.50 = 0.25

$f(x_i)$ = -0.00084

$f(x_i-h)$ = 0.00934

x_i = 383.00

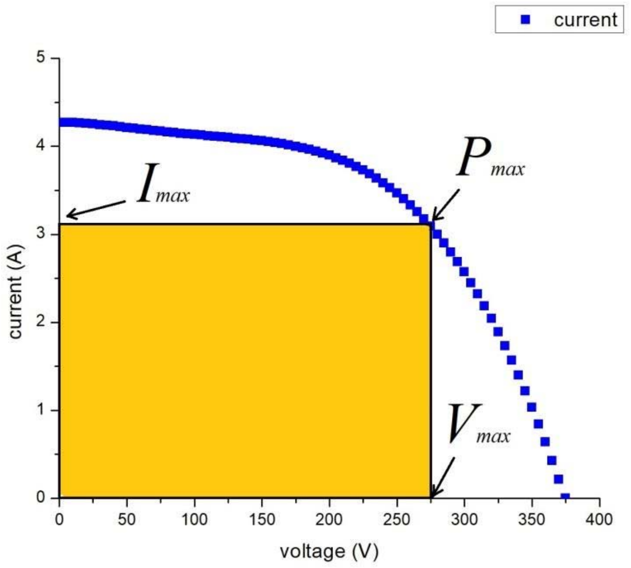
เมื่อแทนค่าลงในสมการที่ (30) จะได้

$$x = 383 - \frac{(0.25)\cdot(-0.00084)}{(-0.00084)-(0.00934)} = 382.98$$

ดังนั้นจากตัวอย่างจะได้ค่าแรงดันวงจรเปิดมีค่าเท่ากับ 382.98 โวลต์

2.2.6 การหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดและค่ากระแสสูงสุด

การหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด ค่าแรงดันวงจรเปิดและค่ากระแสสูงสุดนั้นจะทำได้โดยการแทนค่าแรงดันไฟฟ้าลงในสมการเส้นแนวโน้มจนถึงค่าแรงดันวงจรเปิด แล้วนำค่ากระแสได้จากสมการเส้นแนวโน้มแต่ละค่าคูณกับค่าแรงดันที่แทนเข้าไป กระแสและแรงดันไฟฟ้าที่ทำให้ได้ผลคูณมากที่สุดนั่นคือค่ากระแสสูงสุดและแรงดันไฟฟ้าสูงสุด ส่วนผลคูณที่มีค่าสูงสุดก็คือค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดนั่นเอง

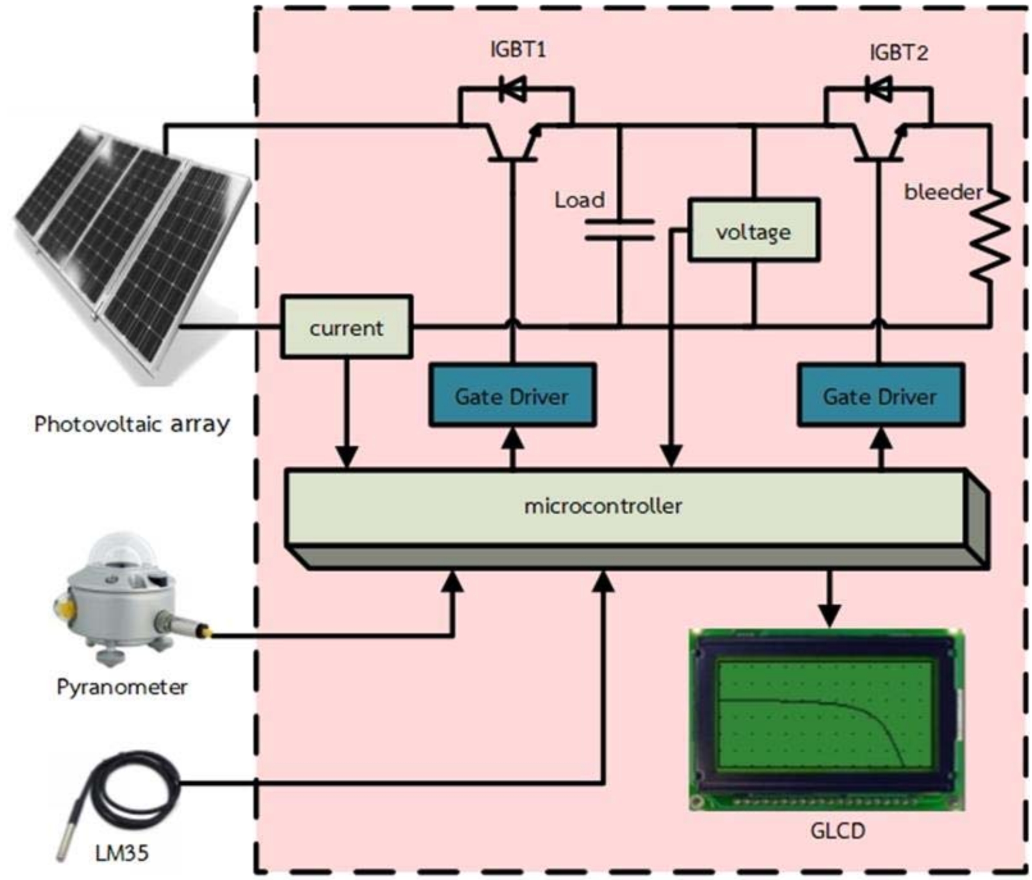


รูปที่ 2.20 กราฟแสดงกำลังไฟฟ้าสูงสุดและแรงดันไฟฟ้าสูงสุดและกระแสสูงสุด

บทที่ 3

การออกแบบ การสร้างและการทดสอบ

ในบทนี้กล่าวถึงการออกแบบเครื่องทดสอบกระแสและแรงดันสำหรับชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยการออกแบบให้เครื่องทดสอบสามารถวัดแรงดันได้สูงสุด 450 โวลต์และสามารถวัดกระแสได้สูงสุด 15 แอมแปร์ โดยปริมาณที่ทำการวัดจะวัดตามมาตรฐาน IEC 61829 (photovoltaics (PV) array – On-site measurement of *I-V* characteristics) ซึ่งกำหนดปริมาณที่ต้องทำการวัดซึ่งได้แก่แรงดัน กระแส อุณหภูมิแวดล้อมและปริมาณความเข้มรังสี [10] การวัดกระแสจะเป็นการวัดทางอ้อมโดยการวัดแรงดันตกคร่อมตัวต้านทานวัดกระแส ส่วนการวัดแรงดันจะวัดแรงตกคร่อมโหลดโดยตรง สำหรับปริมาณความเข้มรังสีใช้ไพรานอมิเตอร์ (pyranometer) ในการวัดและใช้ไอซี LM35 วัดอุณหภูมิแวดล้อม สำหรับการแสดงผลใช้จอภาพผลึกเหลว (LCD : liquid crystal display) แบบกราฟิกขนาด 128x64 จุดในการแสดงปริมาณต่างๆและแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน โดยแนวคิดในการออกแบบแสดงเครื่องวัดกระแสและแรงดันสำหรับชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์แสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนภาพเครื่องทดสอบ I-V สำหรับชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์

3.1 การออกแบบฮาร์ดแวร์

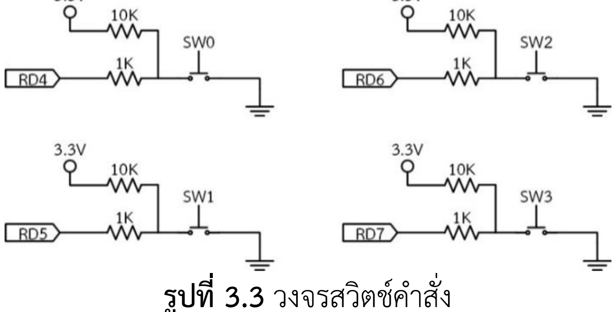
3.1.1 ส่วนประมวลผล

รูปที่ 3.2 ไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC เบอร์ 33FJ256MC710

ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือไอซีตระกูล dsPIC รุ่น 33FJ256MC710 ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ประมวลผลในระดับ 16 บิต เป็นการรวมกันระหว่าง Digital Signal Processing (DSP) และ Peripheral Interface Controller (PIC) จุดเด่นของ dsPIC คือ การประมวลผลสัญญาณดิจิตอล โดยมีการเพิ่มขีดความสามารถของหน่วยประมวลผลกลาง โดยเฉพาะอย่างยิ่งด้านการคำนวณทางคณิตศาสตร์ เนื่องจากเป็นหัวใจของการประมวลผลสัญญาณดิจิตอล และสามารถประมวลผลข้อมูลขนาด 16 บิต นอกจากนั้นยังเพิ่มความเร็วในการประมวลผล เพื่อให้สามารถรองรับการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณดิจิตอล นั่นคือเพิ่มความสามารถของโมดูลแปลงสัญญาณดิจิตอล (ADC) ให้สามารถสุ่มสัญญาณได้เร็วขึ้นและมีความละเอียดขนาด 10 บิต และ 12 บิต และสามารถเข้าถึงหน่วยความจำโดยตรง (direct memory access : DMA) ช่วยลดเวลาในการจำเก็บข้อมูล

3.1.2 สวิตช์คำสั่ง

วงจรสวิตช์คำสั่งดังแสดงในรูปที่ 3.3 จะใช้วงจรสวิตช์แบบกดติด-ปล่อยดับ (Push Button) พร้อมวงจรพูลอัพ (pull-up) ใช้กับแหล่งจ่าย 3.3 โวลต์ โดยขณะที่สวิตช์ยังไม่ถูกกดจะมีสถานะเป็นลอจิก“0” โดยวงจรส่วนนี้จะมีอยู่ 4 ชุด ประกอบด้วย ปุ่มรีเซ็ต ปุ่มแสดงกราฟกระแส-แรงดัน ปุ่มแสดงผลแบบตัวเลขและปุ่มคำสั่งเริ่มต้นการวัด

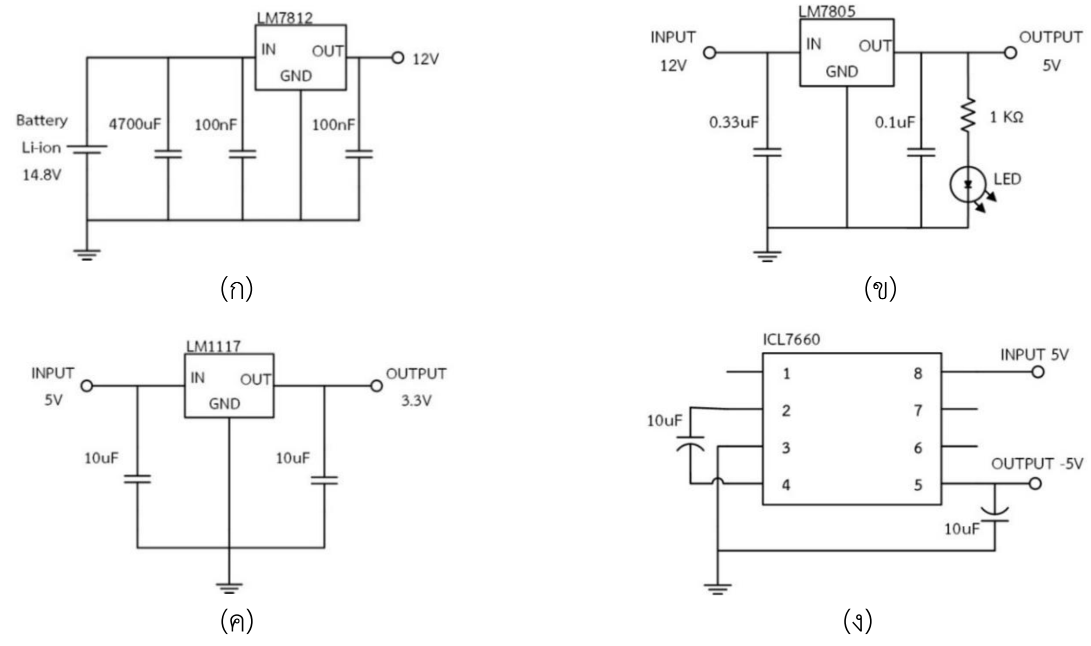


รูปที่ 3.3 วงจรสวิตช์คำสั่ง

3.1.3 วงจรแหล่งจ่ายไฟ

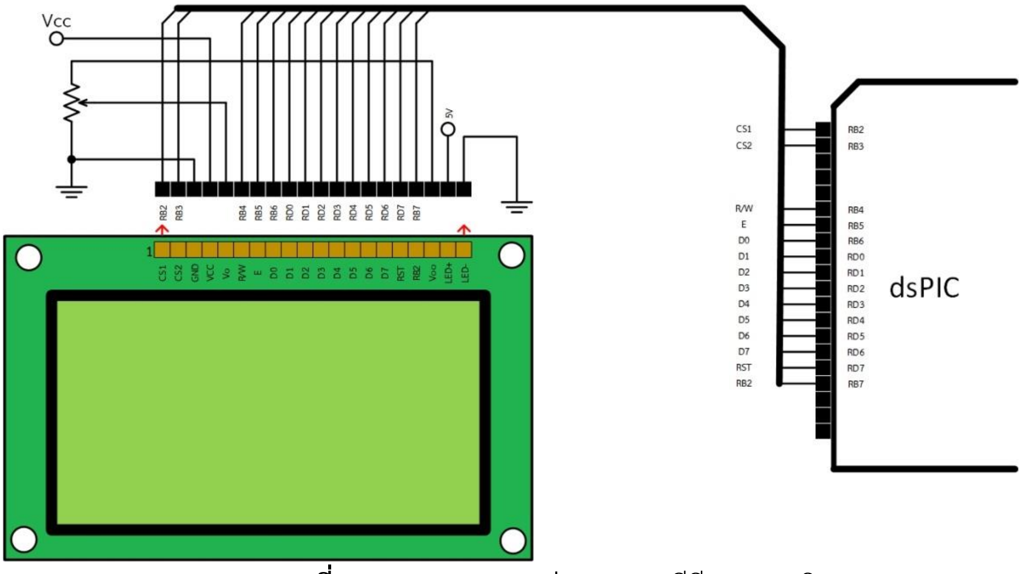
รูปที่ 3.4 แบตเตอรี่ Li-ion ขนาด 18650

สำหรับแหล่งจ่ายไฟนั้นใช้แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน (Li-on) เบอร์ 18650 จำนวน 4 ก้อนซึ่งจะให้แรงดันไฟฟ้า 14.8 โวลต์ ดังแสดงในรูปที่ 3.4 เป็นแหล่งจ่ายไฟหลักให้กลับเครื่อง เนื่องจากอุปกรณ์และไอซีต่างๆในเครื่องใช้แรงดันไฟฟ้าแตกต่างกันจึงจำเป็นต้องใช้วงจรรักษาระดับแรงดันหลายวงจรให้เหมาะสมกับอุปกรณ์นั้นดังแสดงในรูปที่ 3.5 รูปที่ 3.5 (ก) เป็นวงรักษาระดับแรงดันขนาด 12 โวลต์ใช้สำหรับขับขาเกตของไอจีบีที (IGBT : insulated-gate bipolar transistor) รูปที่ 3.5 (ข) คือวงจรรักษาระดับแรงดัน 5 โวลต์ใช้ไอซีเรกกูเลเตอร์ (regulator)เบอร์ LM7805 ใช้สำหรับวงจรขยายสัญญาณต่างๆและเป็นไฟเลี้ยงให้กับวงจรขับไอจีบีที อีกด้วย รูปที่ 3.5(ค) คือวงจรรักษาระดับแรงดันขนาด 3.3 โวลต์ใช้สำหรับเป็นไฟเลี้ยงให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์โดยไอซีเรกกูเลเตอร์ที่ใช้คือเบอร์LM1117 รูปที่ 3.5 (ง) คือวงจรไฟลบใช้ไอซีเบอร์ ICL7660 ปรับแรงดัน



รูปที่ 3.5 วงจรควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้า

3.1.4 การแสดงผลแบบกราฟิก



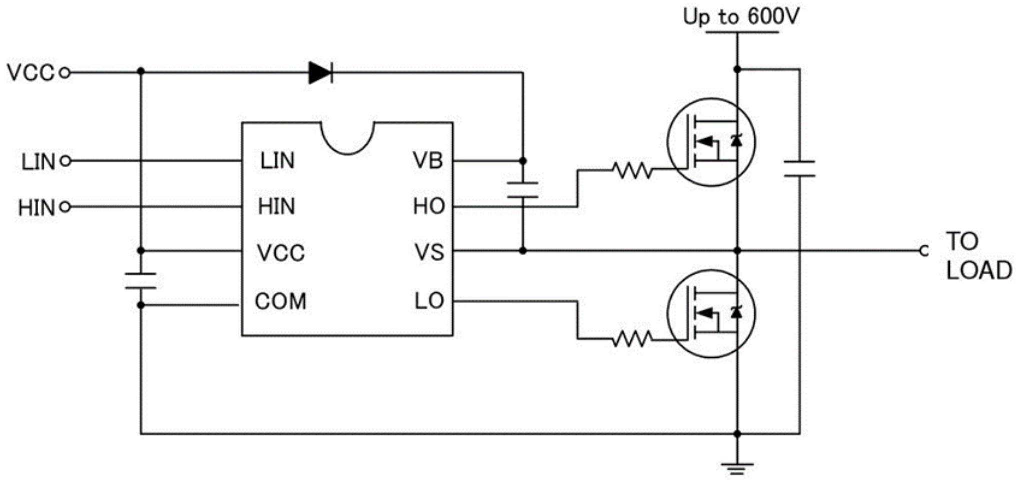
รูปที่ 3.6 วงจรแสดงผลผ่านจอแอลซีดีแบบกราฟิก

เครื่องทดสอบกระแสและดันออกแบบให้แสดงผลผ่านหน้าจอแอลซีดีแบบกราฟิก ขนาด 128x64 จุด โดยจอแสดงผลสามารถปรับความความสว่างของหน้าเพื่อให้เหมาะสมกับการทำงานในที่แจ้งและมีแสงแดด โดยมีวงจรเชื่อมต่อการใช้งานร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์ดังรูปที่ 3.5 ซึ่งแสดงผลทั้งในรูปแบบของกราฟและแบบตัวเลข ดังแสดงในรูปที่ 3.6

(ก) (ข)

รูปที่ 3.7 (ก) การแสดงผลแบบกราฟ (ข) จอแสดงผลข้อมูลแบบตัวเลข

3.1.6 วงจรขับไอจีบีที



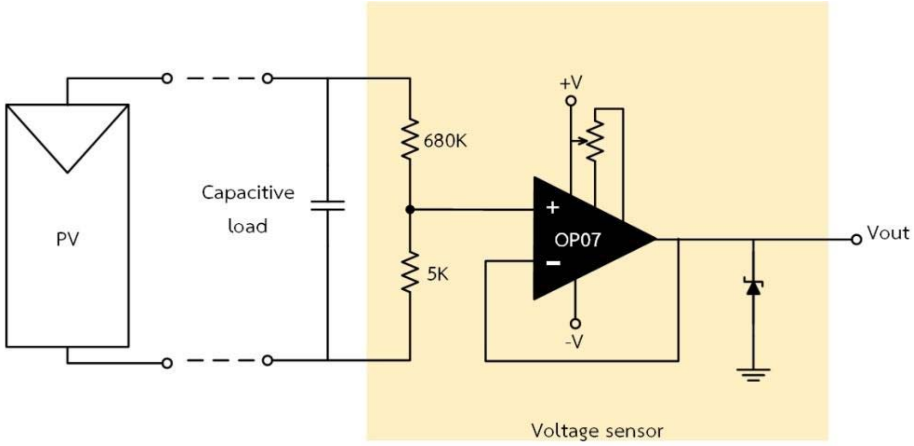
รูปที่ 3.8 วงจรขับไอจีบีที

การควบคุมการนำประจุเข้าไปยังตัวเก็บประจุและการคายประจุนั้นใช้ไอจีบีที(IGBT : insulated-gate bipolar transistor) เป็นสวิตช์ควบคุมดังรูปที่ 3.1 โดย IGBT1 ทำหน้าที่เป็นสวิตช์เชื่อมต่อโหลดกับชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อเริ่มต้นการทดสอบ IGBT1 จะอยู่ในสถานะนำกระแส กระแสจะไหลจากชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์เข้าไปยังตัวเก็บประจุ ส่วน IGBT2 จะไม่ทำงานแต่จะทำงานก็ต่อเมื่อต้องการคายประจุออกจากตัวเก็บประจุ โดยระหว่างการทอสอบชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไอจีบีทีทั้งสองจะมีสถานะทำงานตรงข้ามกัน โดยไอจีบีทีจะถูกควบคุมการทำงานโดยไอซี BS2103E ซึ่งไอจีบีทีที่ใช้จะเป็นแบบ half bridge ดังแสดงในรูปที่ 3.9

รูปที่ 3.9 ตัวอย่างไอจีบีที

3.1.7 การวัดแรงดันไฟฟ้า

การวัดแรงดันไฟฟ้าเป็นการวัดแรงดันตกคร่อมโหลดซึ่งออกแบบให้สามารถวัดแรงดันได้สูงสุด 450 โวลต์ โดยใช้วงจรแบ่งแรงดันดังรูปที่ 3.10 เพื่อลดระดับแรงดันให้เหมาะสมกับช่องอนาลอกอินพุตของไมโครคอนโทรเลอร์โดยลดระดับสัญญาณให้อยู่ในช่วง 0–3.3 โวลต์ สัญญาณก่อนที่จะเข้าไมโครคอนโทรลเลอร์นั้นต้องผ่านวงจรบัฟเฟอร์ (buffer) โดยวงจรบัฟเฟอร์จะมีหน้าที่ปรับอิมพิแดนซ์ให้มีความเหมะสมในการส่งสัญญาณไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ได้อย่างเต็มที่โดยใช้ออป-แอมป์ เบอร์ OP07 ส่วนซีเนอร์ไดโอดจะมีหน้าที่รักษาระดับแรงดันไม่ให้สูงกว่าแรงดันที่ไมโครคอนโทรลเลอร์จะรับได้



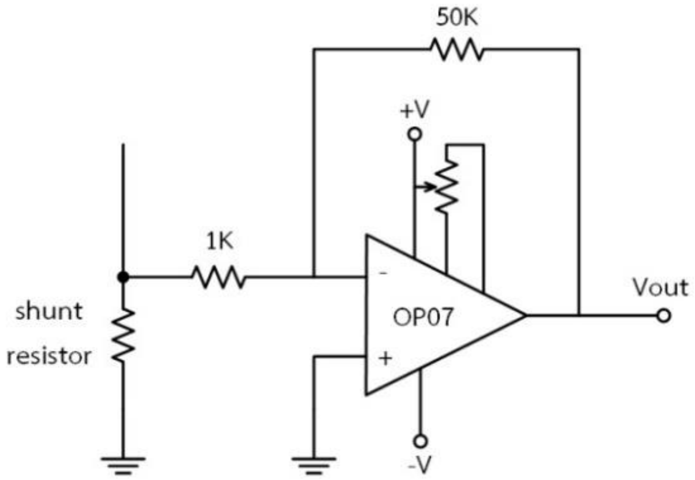
(ก)

(ข)

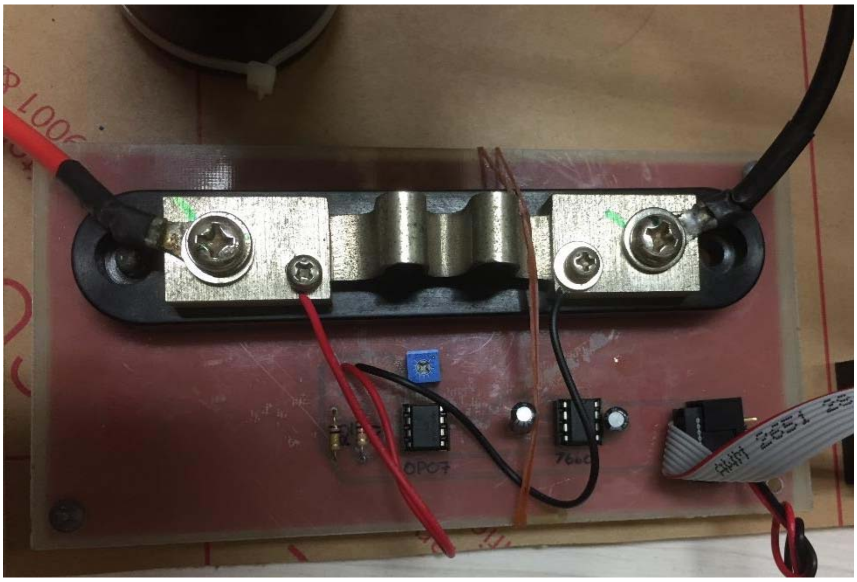
รูปที่ 3.10 (ก) วงจรวัดแรงดันไฟฟ้า (ข) โหลดที่ต่อกับวงจรแบ่งแรงดัน

3.1.8 การวัดกระแส

การวัดกระแสไฟฟ้านั้นเป็นการวัดกระแสทางอ้อมโดยการวัดแรงดันตกคร่อมตัวต้านทานวัดกระแส (shunt resistor) ดังแสดงในรูปที่ 3.11 (ก) ตัวต้านทานวัดกระแสต่ออนุกรมอยู่กับโหลด โดยแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวต้านทานวัดกระแสจะแปรผันตรงกับปริมาณกระแสที่ไหลผ่านตามกฎของโอห์ม รูปที่ 3.11 (ข) วงจรขยายสัญญาณแรงดันตกคร่อมตัวต้านทานเนื่องจากแรงดันตกคร่อมมีค่าน้อยจึงจำเป็นที่ต้องขยายสัญญาณเพื่อสะดวกต่อการเก็บข้อมูลโดยใช้วงจรขยายแบบกลับเฟสทำการขยายสัญญาณก่อนที่จะต่อเข้ากับช่องอนาล๊อกอินพุตของไมโครคอนโทรลเลอร์



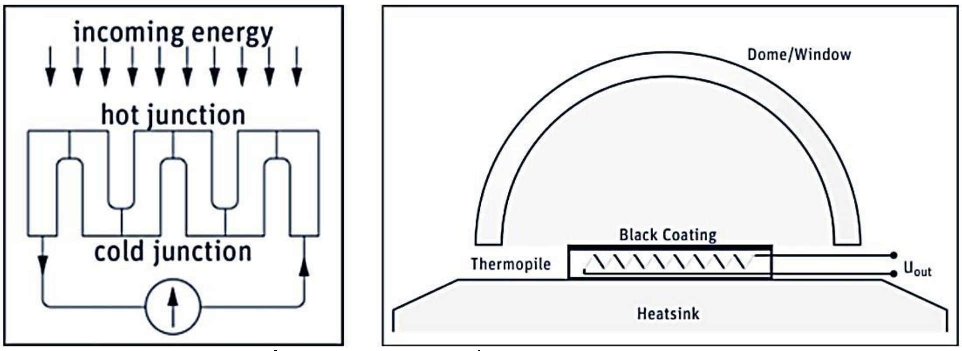
(ก)



(ข)

รูปที่ 3.11 (ก) วงจรสำหรับใช้วัดกระแส (ข) ตัวต้านทานที่ใช้สำหรับวัดกระแส

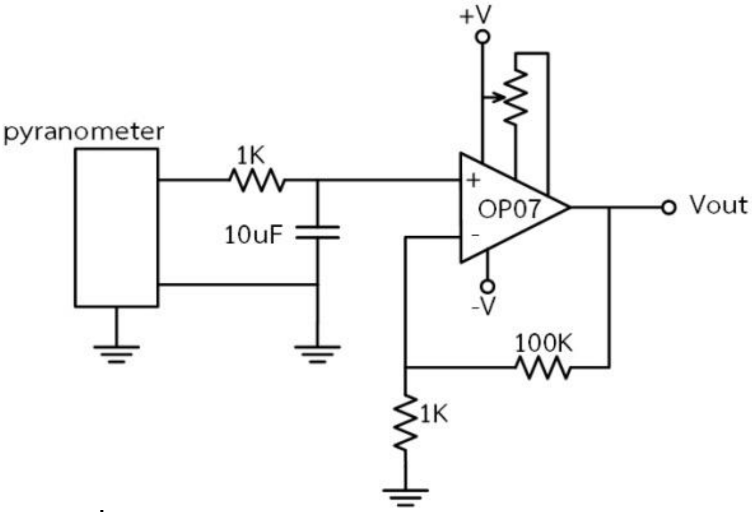
3.1.9 การวัดความเข้มรังสีแสงอาทิตย์



รูปที่ 3.12 โครงสร้างทั่วไปของไพรานอมิเตอร์

จากรูปที่ 3.12 คือโครงสร้างของไพรานอมิเตอร์ ซึ่งประกอบด้วยครอบแก้วใสรูปครึ่งวงกลมสองอันซ้อนกันโดยช่องว่างระหว่างครอบแก้วจะถูกทำให้เป็นสุญญากาศ ภายในนั้นเป็นเทอร์โมไพล์ (thermopile) ซึ่งประกอบด้วยเทอร์โมคัปเปิล (thermocouple) หลายชุดต่ออนุกรมกันสำหรับวัดความแตกต่างระหว่างรอยต่อร้อนกับรอยต่อเย็น เมื่อรอยต่อทั้งสองด้านทั้งสองด้านมีอุณหภูมิต่างกันจะเกิดปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริก (thermoelectric) ทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าที่ปลายลวดทั้งสองของเทอร์โมคัปเปิลซึ่งอุณหภูมิที่แตกต่างกันจะแปลผันตามความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์ ในงานวิจัยนี้ใช้ไพรานอมิเตอร์ของบริษัท KIPP & ZONEN รุ่น CM11 ซึ่งให้สัญญาณเอาท์พุตที่ 5.10×10^{-6} V/W/m^2

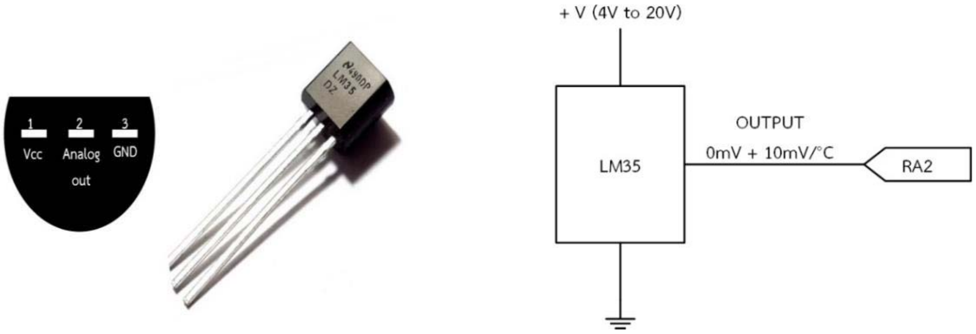
สัญญาณที่วัดได้จากไพรานอมิเตอร์จะผ่านวงจรขายแบบไม่กลับเฟส ดังรูปที่ 3.13 โดยกำหนดอัตราขยายให้เหมาะสมกับแรงดันขาข้าวของวงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล โดยใช้วงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอลขนาด 10 บิต ซึ่งมีอยู่ในไมโครคอนโทรลเลอร์



รูปที่ 3.13 วงจรขยายสัญญาณเอาท์พุตจากไพรานอมิเตอร์

3.1.5 การวัดอุณหภูมิ

สำหรับการวัดอุณหภูมินั้นเป็นการวัดอุณหภูมิอากาศบริเวณที่ติดตั้งชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (ambient temperature) โดยใช้ไอซี LM35 ในการวัดอุณหภูมิดังแสดงในรูปที่ 3.14(ก) ซึ่งให้สัญญาณที่ได้จากเซนเซอร์นั้นมีความเป็นเชิงเส้นซึ่งมีความไว 10 mV/˚C โดยมีช่วงการวัดอยู่ที่ 2 ถึง 150 องศาเซลเซียส โดยสัญญาณจากเซนเซอร์จะต่อเข้ากับช่องอนาลอกอินพุตของไมโครคอนโทรลเลอร์ดังรูปที่ 3.14 (ข) ซึ่งมีความละเอียดในการสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิตอลขนาด 10 บิต

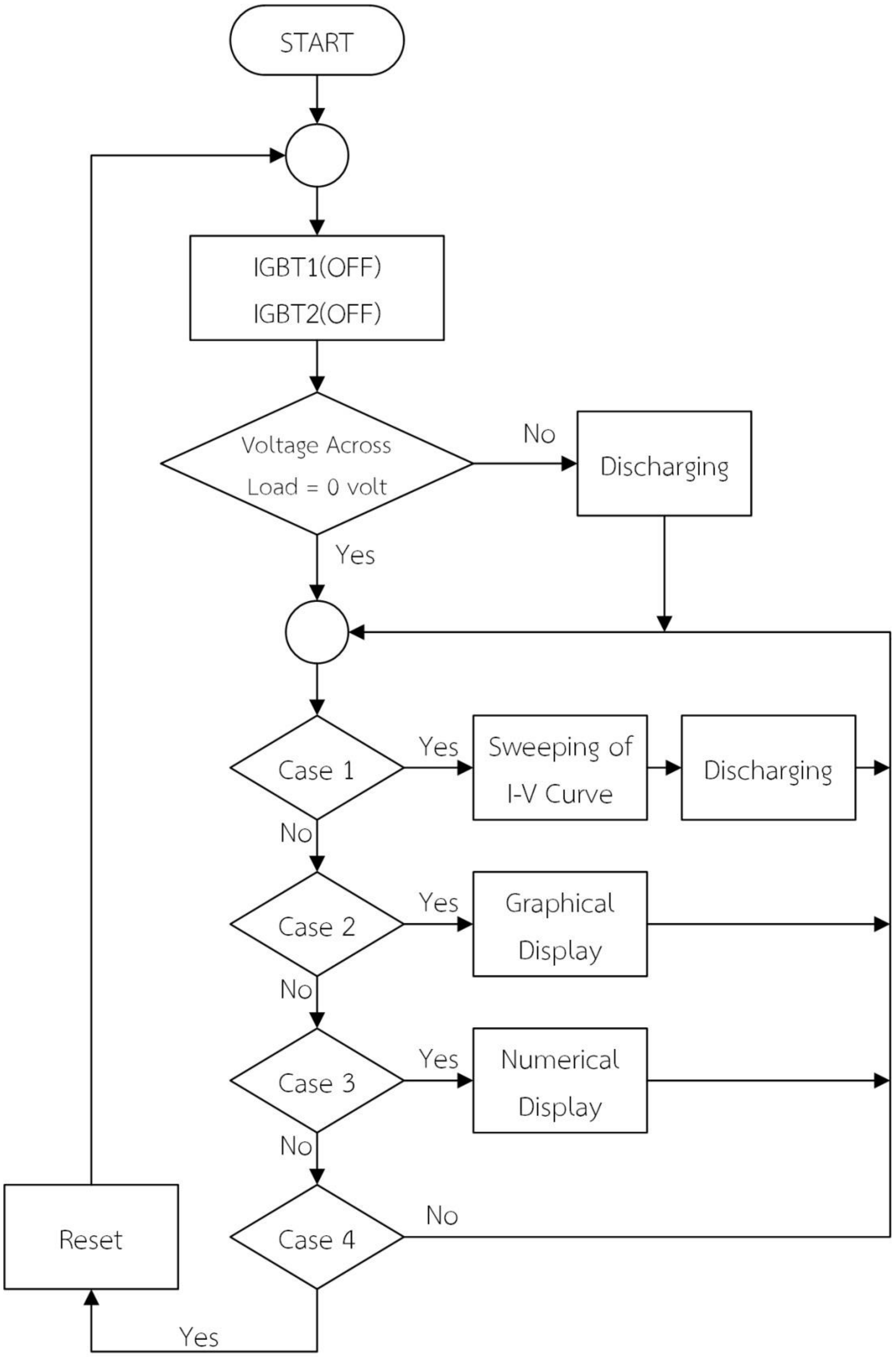


(ก) (ข)

รูปที่ 3.14 เซนเซอร์วัดอุณหภูมิ

3.2 การออกแบบซอร์ฟแวร์

การประมวลผลข้อมูลเพื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันเพื่อคำนวณหาค่าปริมาณต่างๆของชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์นั้นใช้ภาษาซีในการพัฒนาโปรแกรม โดยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมีขั้นตอนในการทำงานดังแสดงในรูปที่ 3.15 เมื่อเริ่มต้นการทำงานโปรแกรมจะสั่งให้ IGBT1 และ IGBT2 อยู่ในสถานะ ‘OFF’ คือไม่มีการนำกระแสเพื่อป้องกันการลัดวงจร จากนั้นทำการอ่านค่าแรงดันที่ตกคร่อมโหลดซึ่งหากมีแรงดันตกคร่อมจะเข้าสู่ขั้นตอนการคายประจุก่อนเมื่อขั้นตอนการคายประจุเสร็จสิ้นแล้วจึงจะไปขั้นตอนต่อไปคือการเลือกโหมดการทำงานซึ่งใช้คำสั่ง switch case ที่รับค่าจากปุ่มกดโดยแต่ละปุ่มจะกำหนดการทำงานของแต่ละกรณี โดยกรณีที่ 1(Case1) เป็นคำสั่งให้วัดกระแส แรงดัน ปริมาณความเข้มรังสีและอุณหภูมิแวดล้อม แล้วทำการคายประจุที่สะสมอยู่ในตัวเก็บประจุ กรณีที่ 2 เป็นคำสั่งให้แสดงผลกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์ดังแสดงในรูปที่ 3.7 (ก) กรณีที่ 3 เป็นคำสั่งให้แสดงผลแบบตัวเลขโดยแสดงค่าต่างๆ เช่น ค่าแรงดันวงจรเปิด ค่ากรแสลัดวงจรดังแสดงในรูปที่3.7 (ข) กรณีที่ 4 เป็นการรีเซตเครื่องโดยเมื่อทำงานรีเซตข้อมูลต่างๆจะถูกลบออกจากหน่วยความจำ

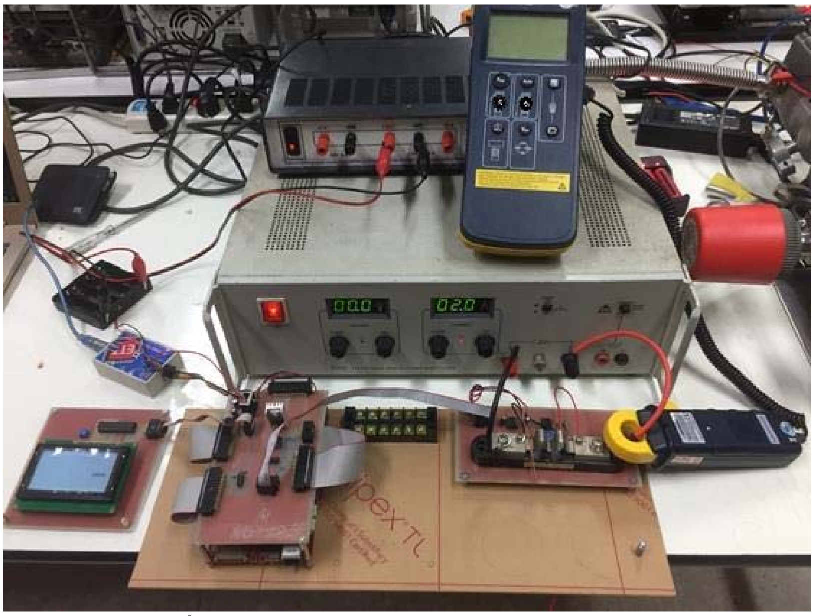


รูปที่ 3.15 แผนผังการทำงานของเครื่องทดสอบกระแสและแรงดันสำหรับชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์

3.3 การสอบเทียบและการทดสอบ

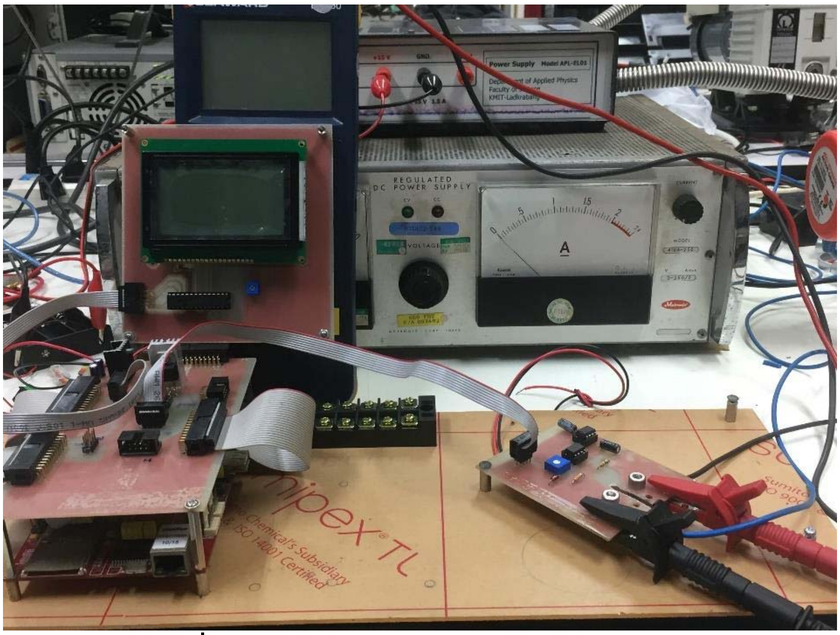
การสอบเทียบและการทดสอบการทำงานของเครื่องมีการทดสอบดังต่อไปนี้

การสอบเทียบการวัดแรงดันไฟฟ้า นั้นสอบเทียบโดยใช้เครื่องทดสอบระบบเซลล์แสงอาทิตย์ seaward รุ่น PV200 เป็นตัวเทียบ ดังแสดงในรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 การจัดอุปกรณ์ในการสอบเทียบการวัดกระแส

การสอบเทียบกระแสจะใช้แหล่งจ่ายกระแสตรง ที่สามารถจ่ายแรงดันได้สูงสุด 15 แอมแปร์ โดยสอบเทียบเครื่องทดสอบระบบเซลล์แสงอาทิตย์ seaward รุ่น PV200 ดังแสดงในรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 การจัดอุปกรณ์ในการสอบเทียบการวัดแรงดัน

ทดลองวัดค่ากระแสและแรงดันกับชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบโมโนคริสตอลแบบอะมอร์-ฟัสและแบบฟิล์มบาง ดังแสดงในรูปที่ 3.18 แล้วนำผมที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากเครื่องทดสอบระบบเซลล์แสงอาทิตย์จากบริษัท seaward รุ่น PV200 PV installation tester

(ก)

(ข)

(ค)

รูปที่ 3.18 (ก) ชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโมโนคริสตอล (ข) ชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบอะมอร์ฟัส (ค) ชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบา

บทที่ 4
ผลการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงการสอบเทียบเครื่องมือและการทดสอบการวัดคุณสมบัติของชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 3 ชนิด เซลล์แสงอาทิตย์แบบโมโนคริสตอล (Monocrystalline Solar cell) เซลล์แสงอาทิตย์แบบอะมอร์ฟัส (Amorphous silicon solar cell) และเซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบาง (Thin film Solar cell)

4.1 การสอบเทียบ

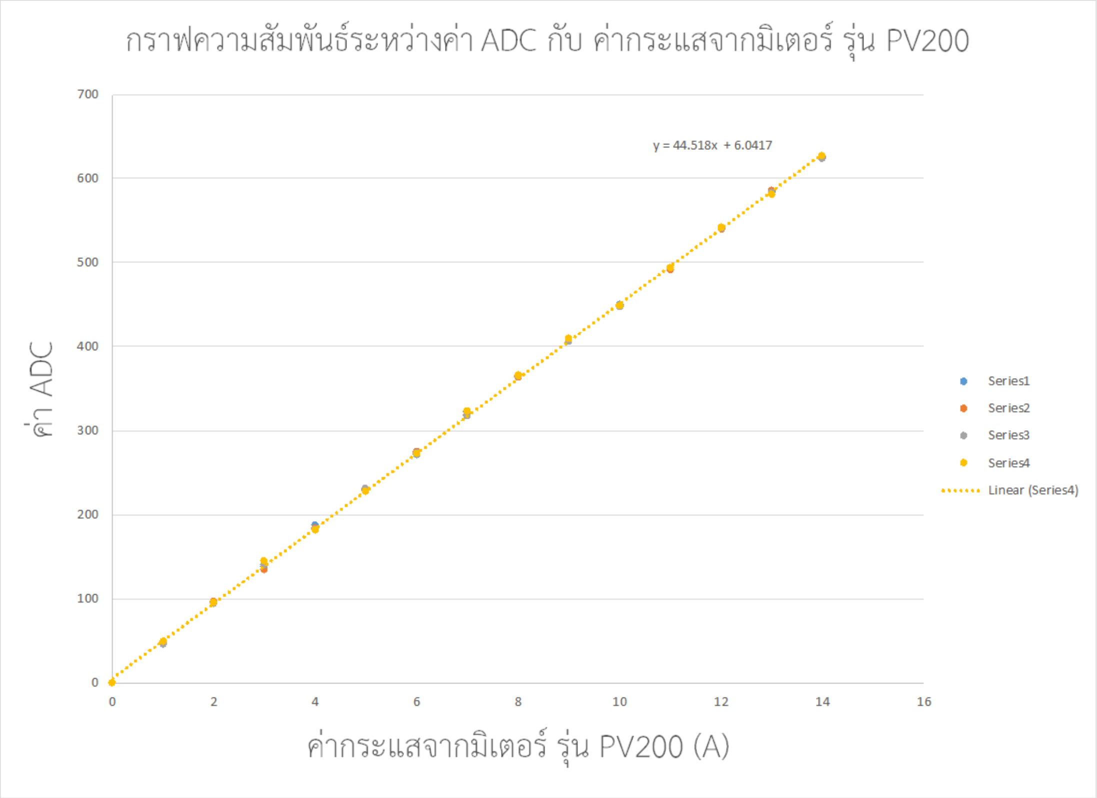
4.1.1 การสอบเทียบการวัดกระแส

ในการสอบเทียบการวัดกระแสนั้นทำโดยการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระไฟฟ้าที่อ่านได้จากมิเตอร์ รุ่น PV200 กับ ค่า ADC ที่อ่านได้จากไมโครคอนโทรลเลอร์ ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่า ADC ที่ได้จากเครื่องทดสอบ I-V และค่ากระแสจากมิเตอร์ รุ่น PV200

ค่ากระแสจากมิเตอร์(A)	**ค่า ADC**			
	ครั้งที่ 1	**ครั้งที่ 2**	**ครั้งที่ 3**	**ครั้งที่ 4**
0	0	0	0	0
1	48	47	46	49
2	94	97	94	96
3	138	135	140	145
4	187	184	183	182
5	229	230	231	228
6	272	275	274	273
7	322	319	318	323
8	363	364	365	366
9	407	408	406	410
10	450	448	447	449
11	493	491	494	494
12	539	540	541	542
13	584	585	583	581
14	626	625	624	627

ข้อมูลที่ได้จากตารางที่ 4.1 นำมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่วัดได้จากมิเตอร์รุ่น PV200 และค่า ADC ที่ได้จากเครื่องทดสอบสอบ I-V ได้กราฟความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า ADC กับ กระแสจากมิเตอร์รุ่น PV200

จากกราฟรูปที่ 4.2 จะได้สมการเส้นตรงดังนี้

$$y = 44.518x + 6.047 \tag{31}$$

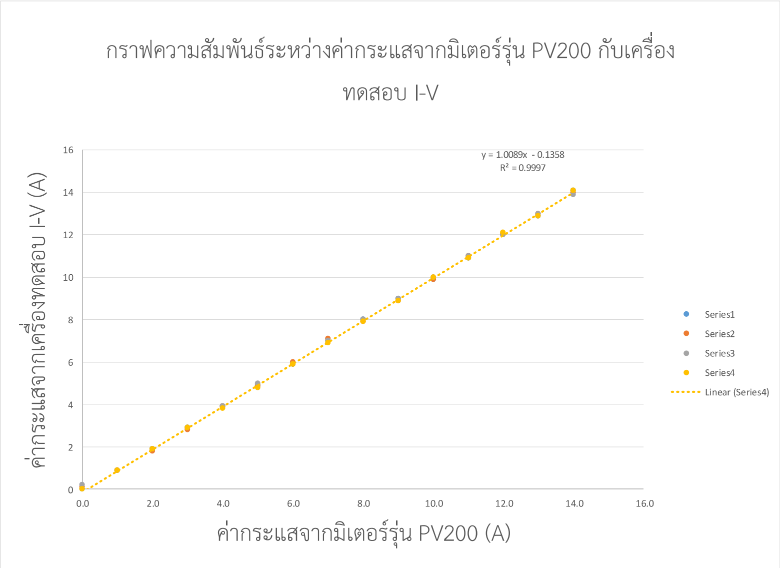
จากสมการที่ (30) จะได้

$$x = \frac{y - 6.047}{44.518} \tag{32}$$

จากนี้จะใช้สมการ (32) ในการคำนวณหาค่ากระแสไฟฟ้าสำหรับเครื่องทดสอบ I-V สำหรับชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อได้สมการในการคำนวณหากระแสแล้ว ผู้วิจัยได้ทำการทดลองวัดค่ากระแสซ้ำดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 กระแสที่วัดได้จากเครื่องทดสอบ I-V

ค่ากระแสจาก PV200 (A)	**กระแสที่วัดได้จากเครื่องทดสอบ I-V (A)**				**ความคลาเคลื่อน(%)**
	ครั้งที่ 1	**ครั้งที่ 2**	**ครั้งที่ 3**	**ครั้งที่ 4**	
0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	
1.0	0.9	0.9	0.9	0.9	10.0
2.0	1.9	1.8	1.9	1.9	10.0
3.0	2.9	2.8	2.9	2.9	6.7
4.0	3.9	3.9	3.9	3.8	5.0
5.0	4.9	4.9	5	4.8	4.0
6.0	5.9	6	5.9	5.9	1.7
7.0	7	7.1	7	6.9	1.4
8.0	8	7.9	8	7.9	1.3
9.0	9	8.9	9	8.9	1.1
10.0	9.9	9.9	10	10	1.0
11.0	10.9	11	11	10.9	0.9
12.0	12	12	12	12.1	0.8
13.0	12.9	13	13	12.9	0.8
14.0	14.1	14	13.9	14.1	0.7



รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสจากมิเตอร์ รุ่น PV200 กับค่ากระแสจากเครื่องทดสอบ I-V

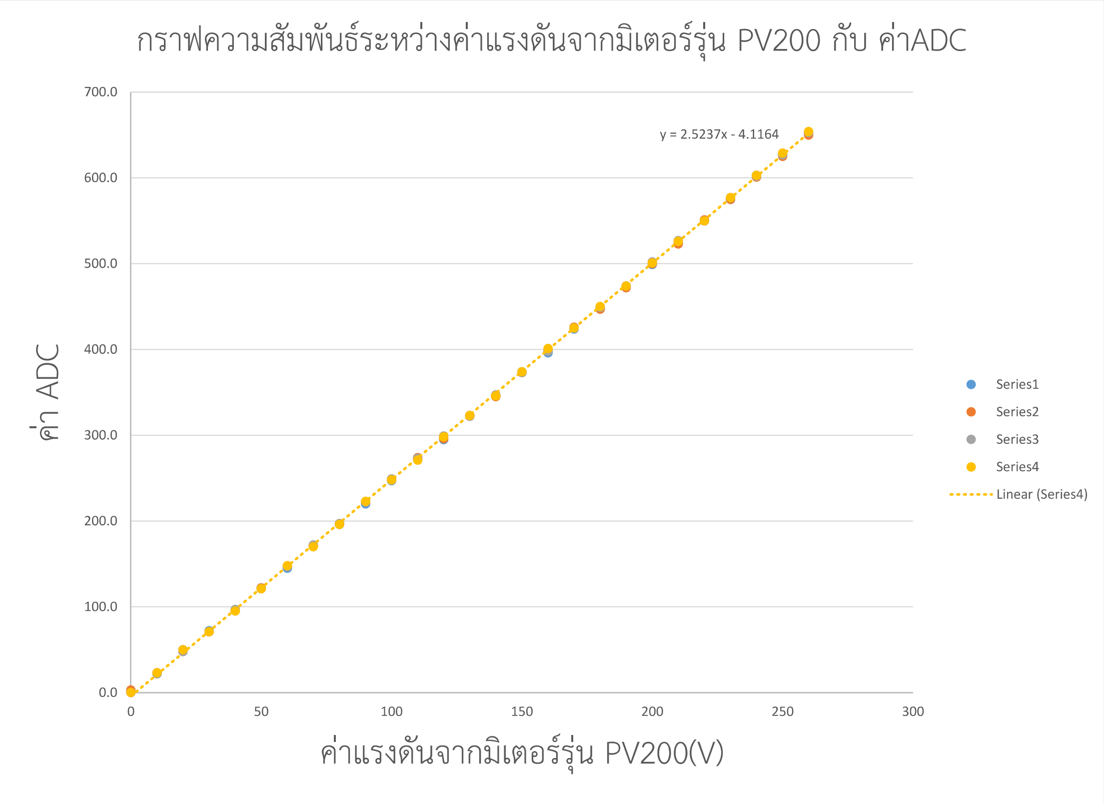
4.2.2 การสอบเทียบการวัดแรงดันไฟฟ้า

การสอบเทียบทำโดยหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าที่อ่านได้จากมิเตอร์ รุ่น PV200 กับค่า ADC

ตารางที่ 4.3 ค่า ADC ที่ได้จากเครื่องทดสอบ I-V และค่าแรงดันไฟฟ้าจากมิเตอร์ รุ่น PV200

ค่าแรงดันไฟฟ้า จาก PV200 (V)	**ค่า ADC**			
	ครั้งที่ 1	**ครั้งที่ 2**	**ครั้งที่ 3**	**ครั้งที่ 4**
0	0	3	0	0
10	22	23	22	23
20	50	48	48	50
30	72	71	71	71
40	96	96	97	95
50	122	122	121	121
60	145	147	147	148
70	171	171	172	170
80	196	197	197	196
90	220	222	222	223
100	247	248	249	248
110	272	274	273	271
120	295	296	299	298
130	323	323	322	323
140	346	345	347	346
150	374	373	373	374
160	396	399	398	401
170	424	426	425	425
180	448	447	449	450
190	473	472	474	474
200	499	500	502	501
210	524	523	527	526
220	550	551	550	550
230	575	575	577	577
240	603	601	602	603
250	627	625	627	629

ข้อมูลที่ได้จากตารางที่ 4.3 นำมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากมิเตอร์รุ่น PV200 และค่า ADC ที่ได้จากเครื่องทดสอบสอบ I-V ได้กราฟความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า ADC กับแรงดันไฟฟ้าจากมิเตอร์รุ่น PV200

จากกราฟรูปที่ 4.3 จะได้สมการเส้นตรงดังนี้

$$y = 2.5237x - 4.1164 \tag{33}$$

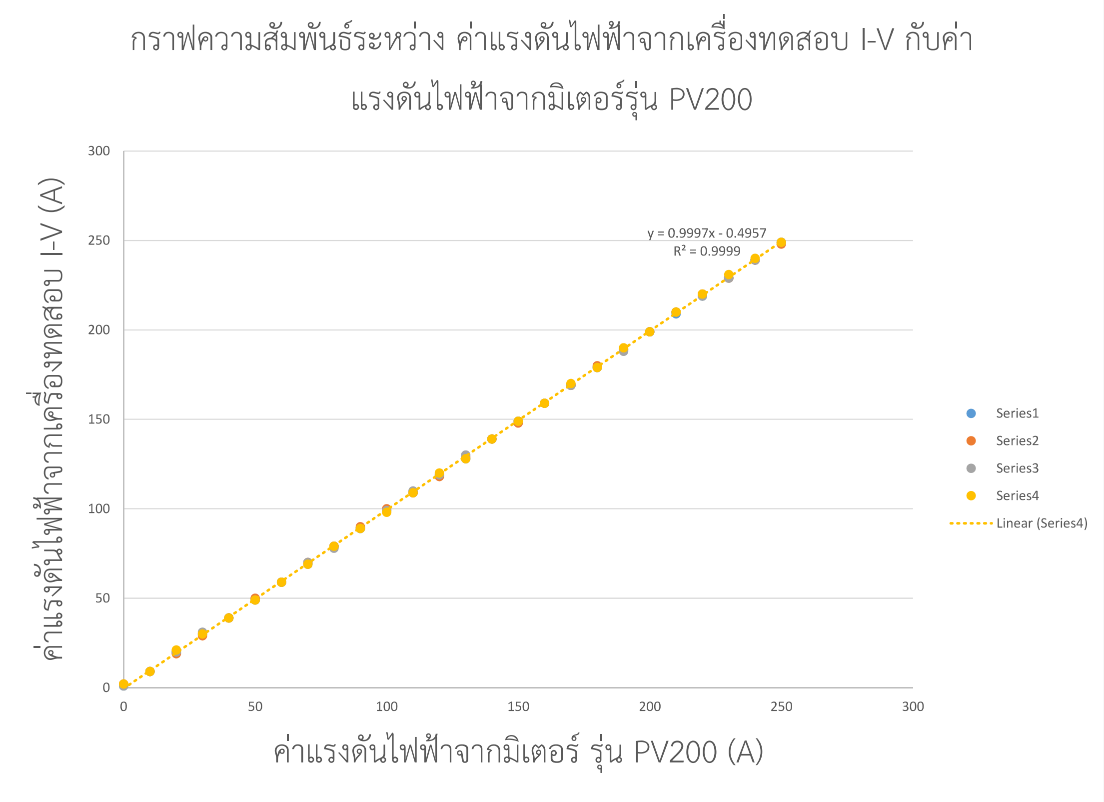
จากสมการที่ (33) จะได้

$$x = \frac{y + 4.1164}{2.5237} \tag{34}$$

จากนี้จะใช้สมการ (34) ในการคำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้าสำหรับเครื่องทดสอบ I-V สำหรับชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อได้สมการในการคำนวณหากระแสแล้ว ผู้วิจัยได้ทำการทดลองวัดค่าแรงดันไฟฟ้าซ้ำดังแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากเครื่องทดสอบ I-V

ค่าแรงดันไฟฟ้า จาก PV200(V)	ค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้(V)				ความคลาดเคลื่อน(%)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	
0	1	2	1	2	
10	9	9	9	9	10.0
20	20	19	20	21	5.0
30	30	29	31	30	3.3
40	39	39	39	39	2.5
50	49	50	49	49	2.0
60	59	59	59	59	1.7
70	69	70	70	69	1.4
80	79	79	78	79	1.3
90	89	90	89	89	1.1
100	99	100	99	98	2.0
110	109	109	110	109	0.9
120	119	118	119	120	1.7
130	128	129	130	128	1.5
140	139	139	139	139	0.7
150	149	148	149	149	0.7
160	159	159	159	159	0.6
170	169	169	169	170	0.6
180	179	180	179	179	0.6
190	189	189	188	190	1.1
200	199	199	199	199	0.5
210	209	210	210	210	0.5
220	219	220	219	220	0.5
230	229	229	229	231	0.4
240	239	239	239	240	0.4
250	249	249	249	250	0.8



รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าจากมิเตอร์ รุ่น PV200 กับค่าแรงดันไฟฟ้าจากเครื่องทดสอบ I-V

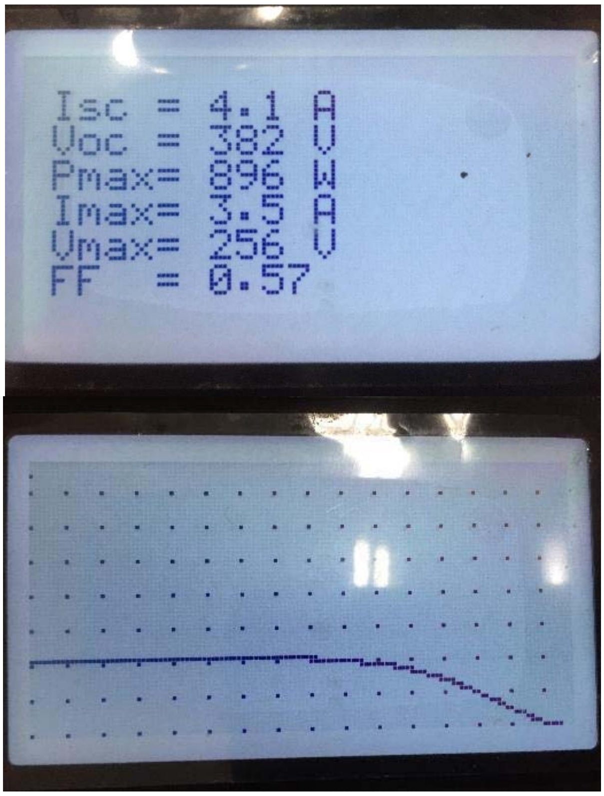
4.2 ผลการทดสอบการวัดกับชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดต่างๆ

4.2.1 ผลการทดสอบการวัดชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบโมโนคริสตอล

โดยจะทำการวัดชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบโมโนคริสตอลจำนวน 20 แผง ที่นำมาต่อกันแบบอนุกรม แล้วนำมาเปรียบเทียบกับเครื่องวัดรุ่น PV200

ตารางที่ 4.5 ข้อมูลชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบโมโนคริสตอลที่ได้จากเครื่องทดสอบ I-V กับ PV200 ที่ความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ 798 W/m^2 ที่อุณหภูมิ 38 องศาเซลเซียส

ข้อมูล	PV200	เครื่องทดสอบ I-V	ความคลาดเคลื่อนร้อยละ
กระแสลัดวงจร (A)	4.30	4.1	4.9
แรงดันวงจรเปิด (V)	372	380	2.1
กำลังไฟฟ้าสูงสุด(W)	898	896	0.2
กระแสที่กำลังไฟฟ้าสูงสุด (A)	3.40	3.5	2.9
แรงดันที่กำลังไฟฟ้าสูงสุด(V)	264	256	3.1
ฟิลล์แฟคเตอร์	0.56	0.57	1.8



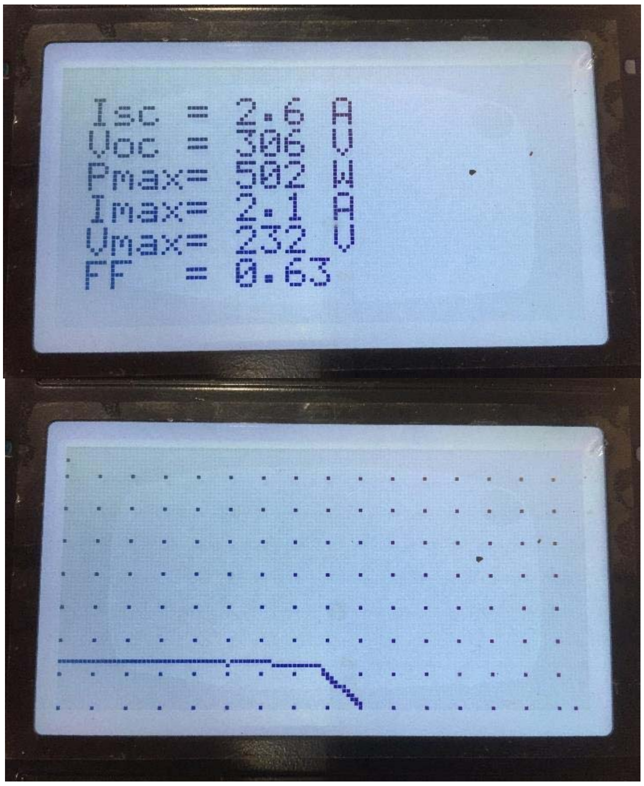
รูปที่ 4.5 หน้าจอแสดงผลการคุณลักษณะกระแสและแรงดันของวัดชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบโมโนคริสตอล

4.2.2 ผลการทดสอบการวัดชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบอะมอร์ฟัส

โดยจะทำการวัดชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบอะมอร์ฟัส จำนวน 10 แผง ที่นำมาต่อกันแบบอนุกรม ซึ่งจะทำการวัดที่ความเข้มรังสีของแสงต่างๆ กัน แล้วนำมาเปรียบเทียบกับเครื่องวัดรุ่น PV200

ตารางที่ 4.6 ข้อมูลชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบอะมอร์ฟัสที่ได้จากเครื่องทดสอบ I-V กับ PV200 ที่ความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ 519 W/m^2 ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส

ข้อมูล	PV200	เครื่องทดสอบ I-V	ความคลาดเคลื่อนร้อยละ
กระแสลัดวงจร (A)	2.58	2.6	0.8
แรงดันวงจรเปิด (V)	305	306	0.3
กำลังไฟฟ้าสูงสุด(W)	488	502	2.9
กระแสที่กำลังไฟฟ้าสูงสุด (A)	2.20	2.1	4.6
แรงดันที่กำลังไฟฟ้าสูงสุด(V)	222	232	4.5
ฟิลล์แฟคเตอร์	0.62	0.63	1.6



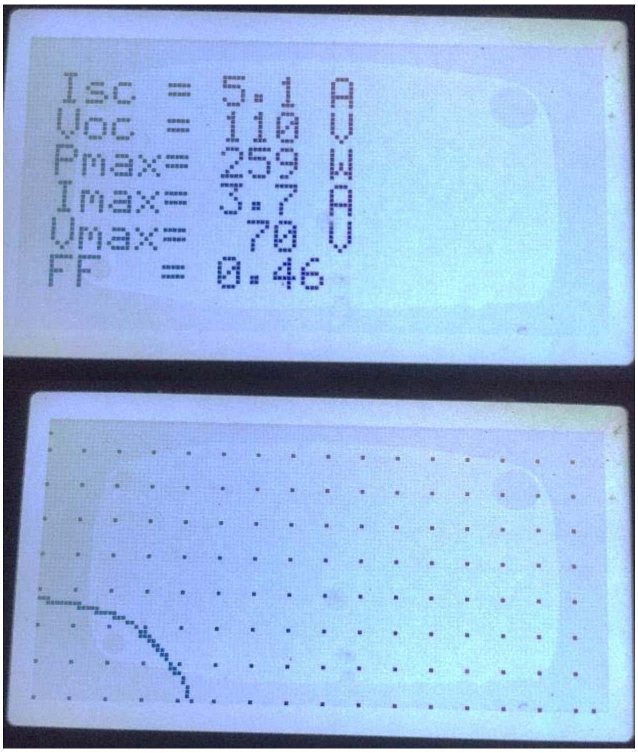
รูปที่ 4.6 หน้าจอแสดงผลการวัดคุณลักษณะกระแสและแรงดันของชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบอะมอร์ฟัส

4.2.2 ผลการทดสอบการวัดชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบาง

โดยจะทำการวัดชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์ม นำค่าที่วัดได้จากเครื่องทดสอบ I-V มาเปรียบเทียบกับเครื่องวัดรุ่น PV200

ตารางที่ 4.7 ข้อมูลชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบางที่ได้จากเครื่องทดสอบ I-V กับ PV200 ที่ความเข้มรังสี 516 W/m^2 ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส

ข้อมูล	PV200	เครื่องทดสอบ I-V	ความคลาดเคลื่อนร้อยละ
กระแสลัดวงจร (A)	5.17	5.1	1.4
แรงดันวงจรเปิด (V)	109	110	0.9
กำลังไฟฟ้าสูงสุด(W)	270	259	4.1
กระแสที่กำลังไฟฟ้าสูงสุด (A)	3.6	3.7	2.8
แรงดันที่กำลังไฟฟ้าสูงสุด(V)	75	70	6.7
ฟิลล์แฟคเตอร์	0.48	0.46	4.2



รูปที่ 4.7 หน้าจอแสดงผลการวัดคุณลักษณะกระแสและแรงดันของชุดเซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบาง

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้เครื่องทดสอบ I-V สำหรับชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งใช้ตัวเก็บประจุที่มีขนาด 2200 ไมโครฟารัด ทนแรงดันไฟฟ้าได้ 450 โวลต์ มาใช้เป็นโหลดให้กับชุดแผลเซลล์แสงอาทิตย์ โดยเครื่องทดสอบ I-V สำหรับชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้น สามารถวัดกระแสสูงสุดได้ 15 แอมแปร์และสามารถวัดแรงดันไฟฟ้าได้สูงสุด 400 โวลต์ มีความละเอียดในการวัด 0.1 แอมแปร์และ 1 โวลต์ตามลำดับ โดยผู้วิจัยได้นำเครื่องทดสอบ I-V สำหรับชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์มาทำการทดลองวัดคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งนอกห้องทดลอง โดยค่าที่ทำการวัดได้แก่ ค่าแรงดันวงจรเปิด ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุด ค่ากระแสลัดวงจร ค่ากระแสสูงสุด ค่าฟิลล์แฟคเตอร์ ได้ทำการทดสอบกับชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำมาจากวัสดุที่แตกต่างดัน โดยเมื่อนำค่าที่วัดได้จากเครื่องทดสอบ I-V มาเปรียบเทียบกับมิเตอร์ รุ่น PV200 โดยเมื่อพิจารณาค่าฟิลล์แฟคเตอร์ซึ่งเป็นที่บ่งบอกถึงคุณภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดแบบโมโนคริสตอลมีค่าความคลาดเคลื่อนร้อยละ 1.8 แบบอะมอร์ฟัสค่าฟิลล์แฟคเตอร์มีค่าความคลาดเคลื่อนร้อยละ 1.6 และแบบชนิดฟิล์มบางค่าฟิลล์แฟคเตอร์มีค่าความคลาดเคลื่อนร้อยละ 1.6

5.2 ข้อเสนอแนะ

หลังจากได้ทำการทดสอบเครื่องทดสอบ I-V สำหรับชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ผู้วิจัยได้สรุปแนวทางและข้อแนะแนะสำหรับการพัฒนาเครื่องดังนี้

5.2.1 งานวิจัยนี้เน้นการวัดคุณลักษณะของกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่มีกำลังไฟฟ้าสูง ฉะนั้นในการออกแบบแผ่นวงจรจะต้องคำนึงถึงกระไฟฟ้าและแรงดันฟ้าที่ไหลบนลายทองแดง ต้องออกแบบให้ลายทองแดงมีขนาดพื้นที่มากพอที่จะทำให้กระแสไหลได้โดยไม่เกิดความร้อน ควรเว้นระยะห่างของลายวงจรให้มากพอเพื่อป้องกันการอาร์คของเส้นทองแดง

5.2.2 ในการออกแบบและสร้างเครื่องทดสอบ I-V ผู้วิจัยได้ออกแบบแผ่นวงจรเป็นโมดูลหลายๆ โมดูลคือ แผ่นวงจรส่วนประมวลผล แผ่นวงจรสำหรับวัดกระแส แผ่นวงจรส่วนวัดแรงดันไฟฟ้า ซึ่งการออกแบบดังนี้เมื่อนำแต่ละส่วนเจ้ามากระกอบด้วยกัน อาจจะทำให้เกิดการลัดวงจรได้ง่ายเนื่องจากต้องเชื่อมต่อหลายๆ แผ่นวงจรเข้าด้วยกัน

5.2.3 ในงานวิจัยนี้ใช้ตัวเก็บประจุที่มีค่าความจุไฟฟ้าเพียงค่าเดียว เมื่อนำไปเป็นโหลดให้กับชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่กำลังไฟฟ้าแตกต่างกันทำให้ระยะเวลาในการชาร์จตัวเก็บประจุต่างกัน อาจส่งผลให้มูลที่เก็บได้ไม่ครบถ้วนทำให้การวัดเกิดความคลาดเคลื่อนได้

เอกสารอ้างอิง

[1] Neuenstein H., Albert K., 2004. "On-site power checks". Photon International (May), 70-74.

[2] Blaesser G., Munro, D., 1995. "Guidelines for the Assessment of Photovoltaic Plants". Document C. Initial and Periodic Tests on PV plant. Joint Research Centre Ispra. European Commission.

[3] กรมพลังงานพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. 2560. **กระประยุกต์ใช้เซลล์แสงอาทิตย์**. [Online]. Available : http://www.cssckmutt.in.th/cssc/cssc_training/

[4] Jethro Betche, 2018. **Spectrally Resolved Solar Irradiance From Meteosat Clound-Methods and Validation.** [Online]. Available : https://www.stellarnet.us/spectrally-resolved-solar-irradiance-meteosat-cloud-methods-validation/

[5] ITACA, 2018. **A Guide to Photovoltaic Panels.** [Online]. Available : https://www.itacanet.org/a-guide-to-photovoltaic-panels

[6] J. Munoz., E. Lorenzo. 2006. "Capacitive load based on IGBTs for on-site characterization of PV arrays". Solar Energy. 80(2006) : 1489-1497.

[7] T.H. Warner, C.H. Cox. 1982. "A High power current-voltage curve tracer employing a capacitive load." Solar Cells. 4(7) : 175-181.

[8] Marwan M. Mahmoud. 2004. "Transient analysis of PV power generator charging a capacitor for measurement of the *I-V* characteristics". Renewable Energy. 31(2006) : 2198-2206.

[9] สญชัย มานะพิทักษ์พงศ์. 2546. "โมดูล I-V สำหรับการประเมินประสิทธิภาพระยะยาวของระบบโฟโตโวลตาอิก". วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

[10] IEC, 1995. International Standard 61829. Crystalline silicon photovoltaic (PV) array – On-site measurement of *I-V* characteristics.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

บทความในงานประชุมวิชาการต่างๆ

The 9th Conference of Electrical Engineering Network
of Rajamangala University of Technology
งานประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 9
EENET2017
"การพัฒนานวัตกรรมเพื่ออุตสาหกรรมและการเกษตรอย่างยั่งยืน"
Sustainable Development of Innovation for Industry and Agriculture
2-4 May 2017, K.P. Grand Hotel Chanthaburi
Conference Topics
Electrical Power (PW)
Power Electronics (PE)
Energy and Energy Saving (ES)
Control Systems and Instrumentation (CT)
Computer and Information Technology (CP)
Electric Communication (CM)
Electronics (EL)
Digital Signal Processing (DS)
Innovation and Invention (IN)
General Electrical Engineering (GN)
AI SOLUTION
NEO DIDACTIC CO.,LTD.
phelps dodge
PTS Combination
ThaiEasyElec
PRIMUS COMPANY LIMITED
SAT

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 9
Proceedings of the 9th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2017 (EENET 2017)

ES

แบบจำลองการวัดคุณลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่อกันแบบสตริง โดยใช้โหลดแบบตัวเก็บประจุ

Modeling for measuring I-V characteristics of photovoltaic strings based on capacitive load

บุรินทร์ เตชะเทศ, ณัฏฐกฤษ สมดอก และ วิชิต ศิริโชติ
สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
เลขที่ 1 ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพ 10520 โทรศัพท์ 02-329-8400 E-mail: burin.teja@gmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้นำเสนอแบบจำลองการวัดคุณลักษณะกระแส-แรงดันในของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่อกันแบบสตริงโดยใช้โหลดแบบตัวเก็บประจุ การออกแบบและจำลองการวัดนั้นทำด้วยโปรแกรมพีสไปซ์ โดยแบบจำลองนั้นออกแบบให้สามารถวัดค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรได้สูงสุด 10 แอมแปร์และสามารถวัดแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรได้สูงสุด 450 โวลต์ โดยค่ากระแสลัดวงจร, ค่าแรงดันวงจรเปิดและค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ได้จากกราฟคุณลักษณะกระแส-แรงดันของแบบจำลองมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการวัดเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่อกันแบบสตริงซึ่งปฏิบัติงานอยู่จริง

คำสำคัญ: คุณลักษณะกระแส-แรงดัน, โหลดแบบตัวเก็บประจุ, เซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่อกันแบบสตริง

Abstract

This paper presents a modeling for measuring I-V characteristics of photovoltaic strings using a capacitive load. PSpice has been used to design and simulate. The modeling can measure the maximum short circuit current at 10 amperes and maximum open circuit voltage at 400 volts. The value of short circuit current, voltage open circuit and maximum power from modeling was compared the value from on-site I-V characteristics photovoltaic strings.

Keywords: I-V characteristics, photovoltaic strings, capacitive load

1. บทนำ

ในสถานการณ์ปัจจุบันพลังงานเชื้อเพลิงฟอสซิลเป็นแหล่งเชื้อเพลิงที่กำลังจะหมดไป ซึ่งจะส่งผลกระทบการใช้พลังงานโดยเฉพาะอย่างยิ่งกับการใช้ไฟฟ้า จึงมีการวิจัยพลังงานทางเลือกหลายทางเพื่อที่จะเข้ามาทดแทนพลังงานเชื้อเพลิงฟอสซิล เช่น พลังงานลม พลังงานความร้อน พลังงานคลื่น พลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งพลังงานงานเหล่านี้เกิดขึ้นเองและมีอยู่มากในธรรมชาติโดยเฉพาะอย่างยิ่งพลังงานแสงอาทิตย์

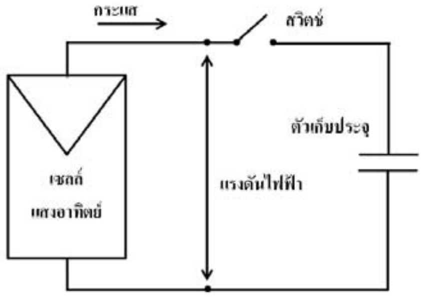
เซลล์แสงอาทิตย์จึงพลังงานทางเลือกเข้ามามีบทบาท และด้วยราคาที่ถูกลง มีประสิทธิภาพสูงเมื่อเทียบกับพลังงานงานทางเลือกอื่น โดยมีแนวโน้มการผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ในเชิงธุระกิจมากขึ้น [1] เช่นโรงงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ระบบโซลาร์รูฟ(solar roof) เหล่านี้เป็นการใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีกำลังไฟฟ้าสูง จึงจำเป็นจะต้องมีเครื่องมือวัดคุณลักษณะกระแส-แรงดันที่เหมาะสม เพราะการวัดคุณลักษณะกระแส-แรงดันมีความสำคัญมาก จะทำให้ทราบถึงคุณภาพความสมบูรณ์ ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับเซลล์แสงอาทิตย์[2]และความสามารถในการผลิตไฟฟ้าทำให้สามารถคาดการณ์การผลิตไฟฟ้าให้เหมาะสมกับความต้องการใช้ไฟฟ้า โดยหลักการวัดนั้นมีอยู่ด้วยกันหลายวิธีแต่หนึ่งซึ่งเป็นวิธีการที่มีความน่าสนใจคือการวัดโดยใช้โหลดแบบตัวเก็บประจุเนื่องจากเป็นวิธีที่ง่าย ใช้เวลาในการวัดน้อย มีความยืดหยุ่นในการใช้งานและราคาถูก[3]

ผู้วิจัยจึงแนวคิดที่พัฒนาโดยเริ่มจากการจำลองการวัดคุณลักษณะกระแส-แรงดันของเซล์แสงอาทิตย์โดยใช้โหลดแบบตัวเก็บประจุ เน้นการวัดเป็นแบบสตริงหรือมีขนาดกำลังไฟฟ้าสูง ซึ่งเงื่อนไขที่ใช้ในการจำลองเป็นเงื่อนที่อยู่ในสภาพการใช้งานจริงโดยจะจำลองที่ปริมาณความเข้มแสงต่างๆกัน

2. หลักการทำงานเบื้องต้น

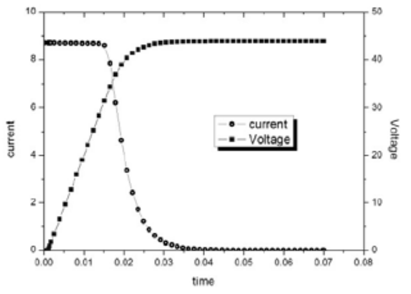
รูปที่ 1 แสดงรูปแบบอย่างง่ายของการต่อเซลล์แสงอาทิตย์เข้ากับโหลดตัวเป็นประจุ เริ่มจากตัวเก็บประจุจะคายประจุออกจนแรงดันตกคร่อมมีค่าศูนย์โวลต์ เมื่อทำการปิดสวิตช์กระแสจากเซลล์แสงอาทิตย์จะไหลเข้าตัวเก็บประจุ

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 9
Proceedings of the 9th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2017 (EENET 2017)



รูปที่ 1 แผงผังการต่อตัวเก็บประจุเข้ากับเซลล์แสงอาทิตย์

จากรูปที่ 2 แสดงการเปลี่ยนแปลงของกระแสและแรงดันของตัวเก็บประจุ โดยขณะที่แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุเป็นศูนย์กระแสจากเซลล์แสงอาทิตย์สามารถไหลเข้าตัวเก็บประจุได้เต็มกำลังที่เซลล์แสงอาทิตย์สามารถสร้างได้ เมื่อเวลาผ่านไปแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุจะมากขึ้นเนื่องจากสะสมประจุไว้ ทำให้ปริมาณกระแสที่ไหลเข้าตัวเก็บก็จะลดลงและจะหยุดเมื่อแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุมีค่าเท่ากับแรงดันวงจรเปิดของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยระยะเวลาที่ใช้นั้นขึ้นอยู่กับขนาดความจุไฟฟ้า

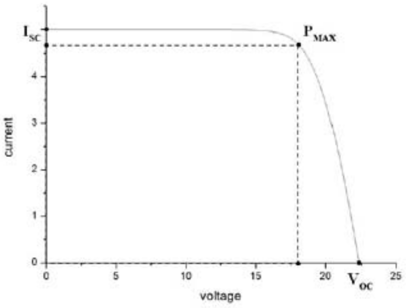


รูปที่ 2 การเปลี่ยนแปลงของกระแสและแรงดันไฟฟ้าหลังปิดสวิตช์ของตัวเก็บประจุ แรงดันดันวงจรเปิดและกระแสลัดวงจร โดยสามารถมีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$T_{sweep} = \frac{V_{OC}}{I_{SC}} C \tag{1}$$

เมื่อ T_{sweep} คือ เวลาที่ใช้ในการชาร์จตัวเก็บประจุจนเต็ม
V_{OC} คือ แรงดันวงจรเปิด
I_{SC} คือ กระแสลัดวงจร
C คือ ค่าความจุทางไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ

เมื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์ของกระและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ก็จะสามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆได้ เช่นค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร(I_{SC}) ค่าแรงดันวงจรเปิด(V_{OC})และค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด(P_{MAX})ได้ ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 คุณลักษณะกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์

3. การออกแบบและการจำลอง

สำหรับแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่นำมาต่อกันแบบสตริงนั้นเป็นชนิดผลึกเดี่ยวโดย ซึ่งนำมาต่อกันทั้งสิ้น 10 โมดูล โดยหนึ่งโมดูลกำหนดให้มีเซลล์ย่อยๆต่ออนุกรมกันจำนวน 36 เซลล์ ในการต่อแต่ละโมดูลต่อกันเป็นสตริงนั้นจุดเชื่อมต่อจะแสดงด้วยโนด ซึ่งระบุแต่ละโนดด้วยตัวเลขที่ไม่ซ้ำดังแสดงในรูปที่ 4

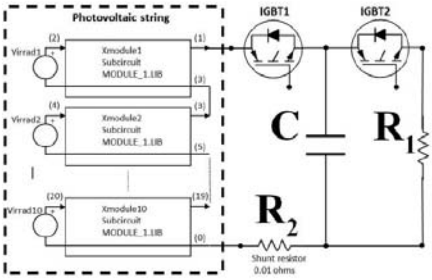
แบบจำลองการวัดที่ออกแบบนั้นใช้ไอจีบีที1(IGBT1)และไอจีบีที2(IGBT2)เป็นสวิตช์เปิดและปิด ซึ่งไอจีบีทีทั้งสองจะมีทำงานสลับกัน เมื่อเริ่มต้นการวัดไอจีบีที1จะทำงาน กระแสจะไหลเข้าตัวเก็บประจุโดยวัดกระแสด้วยการวัดแรงดันตกคร่อมตัวต้านทานวัดกระแส (R_s)แล้วจึงแปลงกลับเป็นค่ากระแสดังสามการต่อไปนี้

$$I = \frac{V}{R} \tag{2}$$

เมื่อ I คือ กระแสที่ได้เซลล์แสงอาทิตย์
V คือแรงดันตกคร่อมตัวต้านทานวัดกระแส
R คือค่าตัวต้านทานวัดกระแส

ส่วนแรงดันที่เซลล์แสงอาทิตย์จ่ายได้ จะวัดจากแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ สำหรับไอจีบีที2 จะทำงานเมื่อต้องการให้ตัวเก็บประจุคายประจุเพื่อเตรียมสำหรับการวัดครั้งต่อไป ซึ่งใช้การจำลองวัดคุณลักษณะกระแสและแรงดันทำการการวัดที่ปริมาณความเข้มแสงต่างๆกันดังนี้ ที่ปริมาณความเข้มรังสี 772.6 W/m^2, 561.4 W/m^2 และ 315.6 W/m^2 ซึ่งเป็นปริมาณความเข้มแสงเดียวกันกับขณะที่ทำวัด

คุณลักษณะกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งใช้อยู่จริง โดยจะผลที่ได้จากการจำลองจะนำมาเปรียบกับผลที่ได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ของบริษัท SIEMENS ซึ่งใช้งานอยู่จริงจำนวน 20 แผงซึ่งต่อกันแบบอนุกรม ที่สภาวะทดสอบมาตรฐาน(standard test conditions)แต่ละแผงมีค่าแรงดันวงจรเปิด 21.7 โวลต์ กระแสลัดวงจร 4.8 แอมแปร์และกำลังไฟฟ้าสูง 75 วัตต์

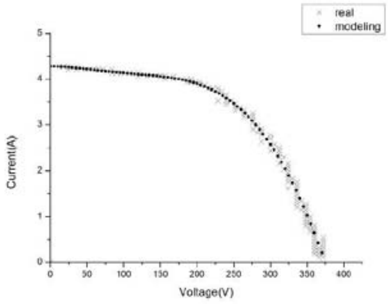


รูปที่ 4 แผนผังแบบจำลองการวัดคุณลักษณะกระแส-แรงดัน

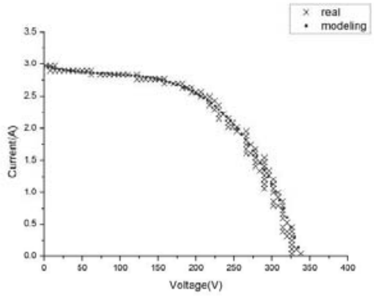
4. ผลการจำลอง

ตารางที่ 2 ตารางเปรียบเท่าค่ากระแสลัดวงจร(I_{sc}) แรงดันวงจรเปิด(V_{oc}) และกำลังไฟฟ้าสูงสุด(P_{max}) จากแบบจำลองกับค่าที่ได้จากการเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่อแบบสตริงที่ใช้งานอยู่จริง

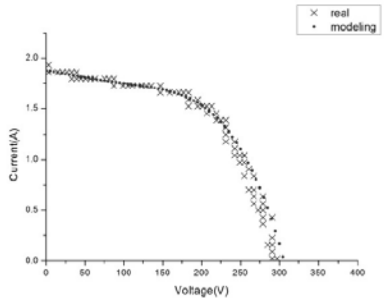
กรณี	ค่าที่นำเปรียบเทียบ	แบบจำลอง	จากการวัด	ค่าความแตกต่างร้อยละ
772.6 W/m^2	I_{sc}(A)	4.26	4.27	0.23
	V_{oc}(V)	373	375	0.53
	P_{max}(W)	896	867	3.28
561.4 W/m^2	I_{sc}(A)	2.94	2.96	0.67
	V_{oc}(V)	337	338	0.29
	P_{max}(W)	526	543	3.18
315.6 W/m^2	I_{sc}(A)	1.80	1.90	5.40
	V_{oc}(V)	308	298	3.30
	P_{max}(W)	323	310	4.10



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 5 กราฟคุณลักษณะกระแสขแรงดันจากแบบจำลองการวัดเทียบกับกราฟจากการวัดเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่อแบบสตริงที่ใช้งานอยู่จริง
(ก) ปริมาณความเข้มแสง 772.6 W/m^2
(ข) ปริมาณความเข้มแสง 561.4 W/m^2
(ค) ปริมาณความเข้มแสง 315.6 W/m^2

โดยเมื่อนำกราฟคุณลักษณะกระแสและแรงดันจากแบบจำลองการวัดเปรียบเทียบกับกราฟคุณลักษณะกระแสและแรงดันที่ได้จากการวัดดังแสดงในรูปที่ 5 พบว่าที่แต่ละความเข้มแสง กราฟคุณลักษณะกระแสและแรงดันมีแนวโน้วเดียวกัน เมื่อพิจารณาปริมาณกระแสลัดงจร แรงดันวงจรเปิดและกำลังไฟฟ้าสูงสุด ดังแสดงในตารางที่ 2 พบว่ามีค่าสอดคล้องกันดังจะเห็นได้จากค่าความแตกต่างซึ่งมีค่าน้อย

5. สรุป

ผลการจำลองการวัดคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่อกันแบบสตริงโดยใช้โหลดแบบตัวเก็บประจุมาเปรียบเทียบกับคุณลักษณะกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งใช้งานอยู่จริง โดยเปรียบเทียบค่ากระสลัดวงจร ค่าแรงดันวงจรเปิดและกำลังไฟฟ้าสูงสุด พบว่าค่าความแตกต่างน้อย จากค่าร้อยละแตกต่างที่มีค่าน้อยโหลดตัวเก็บประจุจึงเหมาะที่จะพัฒนาเป็นเครื่องทดสอบกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์แบบพกพาต่อไป

เอกสารอ้างอิง

[1] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. 2559. สถานภาพการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศไทย พ.ศ. 2557-2558. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์

[2] Marwan M Mahmoud, "Transient analysis of a PV power generator charging a capacitor for measurement of the I-V characteristics," Vol.31 Issue13, 2006, pp. 2198-2206.

[3] Fillippo Spertino, Jawad Ahmad, Alessandro Ciocia, Paolo leo, Ali F. Murtuza, Marcello Chiaberge, "Capacitor charging method for I-V curve tracer and MPPT in photovoltaic systems" Vol.119, 2015, pp. 461-473.

บุรินทร์ เดชะเทศ สำเร็จการศึกษาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พ.ศ. 2557 กำลังศึกษาปริญญาโท วิทยศาสตรมหาบัณฑิต สาขาฟิสิกส์

ณัฏกฤษ สมดอก ปัจจุบันกำลังศึกษาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง งานวิจัยที่สนใจได้แก่ photovoltaic system, power measurement

วิชิต ศิริโชติ สำเร็จการศึกษาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พ.ศ. 2529 ปริญญาโท วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พ.ศ. 2531 งานวิจัยที่สนใจได้แก่ photovoltaic system, science education

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นาย บุรินทร์ เดชะเทศ
วัน เดือน ปีเกิด	11 พฤศจิกายน 2534
ที่อยู่ปัจจุบัน	130/80 หมู่ที่ 1 ตำบลกุฎโง้ง อำเภอพนัสนิคม จังหวัดชลบุรี 20140
ประวัติการศึกษา	ปี 2556 สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ วิทยาศาสตรบัณฑิต เกรดเฉลี่ย 2.8 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปี 2562 สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต เกรดเฉลี่ย 3.59 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผลงานทางวิชาการ	The 9rd Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology ชื่อบทความวิจัย “Modeling for measureing I-V characteristics of photovoltaic string based on capacitive load”