การแปลงพลังงานของระบบพีวีโดยใช้วงจร MPPT คอนเวอร์เตอร์ ร่วมกับการเคลื่อนหมุนแผงพีวีทางกล

ENERGY TRANSFER FROM PV SYSTEM BY USING A COMBINATION OF MPPT CONVERTER AND MECHANICAL PV PANEL TRACKING

สุริยา สุริยกานนท์

SURIYA SURIYAKANONT

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2546

ISBN 974-324-969-9

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การแปลงพลังงานของระบบพีวีโดยใช้วงจร MPPT คอนเวอร์เตอร์ ร่วมกับการเคลื่อนหมุนแผงพีวีทางกล

ENERGY TRANSFER FROM PV SYSTEM BY USING A COMBINATION OF MPPT CONVERTER AND MECHANICAL PV PANEL TRACKING

สุริยา สุริยกานนท์

SURIYA SURIYAKANONT

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2546

ISBN 974-324-969-9

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 50948
วัน,เดือน,ปี 26 พ.ค. 2547

b.....
i.....

ENERGY TRANSFER FROM PV SYSTEM BY USING A COMBINATION OF MPPT CONVERTER AND MECHANICAL PV PANEL TRACKING

SURIYA SURIYAKANONT

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF

MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2003

ISBN 974-324-969-9

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การแปลงพลังงานของระบบพีวีโดยใช้วงจร MPPT คอนเวอร์เตอร์ ร่วมกับการเคลื่อนหมุนแผงพีวีทางกล

ENERGY TRANSFER FROM PV SYSTEM BY USING A COMBINATION OF MPPT CONVERTER AND MECHANICAL PV PANEL TRACKING

ชื่อนักศึกษา นายสุริยา สุริยกานนท์

รหัสประจำตัว 42061083

หลักสูตร วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ รศ.ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ดร.วงศ์วิทย์	เสนะวงศ์	
ผศ.ดร.วิจิตร	กิณเรศ	
ดร.สุพัฒน์	กิตติรัตน์สัจจา	
รศ.ดร.ชัยวุฒิ	ฉัตรอุทัย	
รศ.ศิริวัฒน์	โพธิเวชกุล	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 22 ธันวาคม 2546 เวลา 14.00-16.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร 12 ชั้น ชั้น 4 (ห้อง E12-403)

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว

(รศ.ดร.บุญวัฒน์ อัตชู)

รักษาราชการแทนคณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ 16 **เดือน** ธันวาคม **พ.ศ.** 2546

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การแปลงพลังงานของระบบพีวีโดยใช้ MPPT คอนเวอร์เตอร์ร่วมกับการเคลื่อนหมุนแผงพีวีทางกล
นักศึกษา	นายสุริยา สุริยกานนท์
รหัสประจำตัว	42061083
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2546
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้นำเสนอการออกแบบ และวิเคราะห์ผลการทดสอบการแปลงพลังงานไฟฟ้าจากระบบพีวีที่ได้จากการทำงานร่วมกันระหว่างระบบติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์กับวงจรอิเล็กทรอนิคส์กำลังเพื่อรักษาจุดกำลังสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ หรือวงจรคอนเวอร์เตอร์ปรับแรงดันกระแสตรงที่ทำงานแบบดึงกำลังไฟฟ้าสูงสุด(วงจรเอ็มพีพีทีคอนเวอร์เตอร์) โดยระบบที่ออกแบบในการทดสอบสามารถเคลื่อนหมุนติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์ได้ทั้ง 2 แนวแกน รวมทั้งปรับอัตราส่วนของแรงดันจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์กับแรงดันที่โหลดภาระให้ทำงานอยู่ใกล้กับจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้โดยอาศัยการทำงานของวงจรเอ็มพีพีทีคอนเวอร์เตอร์ สำหรับอัดประจุให้แบตเตอรี่ขนาด 65 แอมป์-ชั่วโมง ที่พิกัดกำลังอินพุท 110วัตต์ ผลการทดสอบการเคลื่อนหมุนทางกลเพื่อติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์ทั้งแบบ 2 แนวแกน และแบบปรับมุมเอียงตามแกนทิศตะวันออก-ทิศตะวันตก เพียงแกนเดียวร่วมกับเทคนิคการปรับแรงดันของวงจรเอ็มพีพีทีคอนเวอร์เตอร์ สามารถเพิ่มปริมาณพลังงานไฟฟ้าอัดประจุให้แบตเตอรี่ได้มากกว่าร้อยละ 20 เมื่อเทียบกับระบบอ้างอิงภายใต้เงื่อนไขควบคุมเดียวกัน แต่หากใช้ระบบติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์แบบปรับมุมเอียงตามแกนทิศตะวัน ออก-ทิศตะวันตก เพียงแกนเดียวพลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นคุ้มค่าต่อการลงทุนมากกว่าระบบที่มีการเคลื่อนหมุนแบบ 2 แนวแกน ในกรณีที่สถานีทดสอบตั้งอยู่ในประเทศไทย นอกจากนี้ภายในวิทยานิพนธ์ยังได้แสดงผลการวิเคราะห์ถึงปัจจัยอื่นๆที่สำคัญเพื่อเป็นข้อมูลในการเลือกใช้ รวมถึงการออกแบบระบบพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่เหมาะสมต่อไป

Thesis Title	Energy Transfer from PV System by Using a Combination of MPPT Converter and Mechanical PV Panel Tracking
Student	Mr. Suriya Suriyakanont
Student ID.	42061083
Degree	Master of Engineering
Programme	Electrical Engineering
Year	2546
Thesis Advisor	Assoc.Prof. Siriwat Potivejkul

ABSTRACT

This thesis presents the design and the analysis of energy transfer from PV system using the combination techniques of a sunlight tracker and power electronics circuits which keep the system operate at a maximum power transfer point or a MPPT (Maximum Power Point Tracking) converter. The design model joined the 2 axes tracker with the power electronics tracker circuit which could operate by constancy a load voltage for charging a 65Ah battery at 110W input power rated. The design PV system could develop an energy transfer to charge a battery more than 20% comparison to the reference system in the same control constrains. Although the results could be closely obtained in both of the 2 axes tracker and the E-W axis tracker combine to the voltage adjust technique of MPPT converter, the combination of E-W axis tracker and the MPPT converter was greater economical in Thailand latitude. The details of PV system design in Thailand will be analyzed in the thesis.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดี โดยได้รับคำแนะนำและแนวทางในการดำเนินงานวิจัย รวมทั้งโอกาสที่ดีในการทำงานและประสบการณ์ที่เป็นประโยชน์ ตลอดระยะเวลาที่ผ่านมาจากท่าน รองศาสตราจารย์ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง ตลอดจนคณาจารย์และเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่านที่ได้ให้ความสนับสนุนในด้านต่างๆ

ห้องปฏิบัติการวิจัยวัสดุวิศวกรรมไฟฟ้า ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง และภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สจล. ที่เอื้อเฟื้ออุปกรณ์ ข้อมูลและสถานที่ทดสอบ รวมทั้งคำแนะนำเกี่ยวกับการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณนักศึกษาปริญญาตรีและนักศึกษาปริญญาโททุกท่าน รุ่นพี่และรุ่นน้อง โดยเฉพาะพี่เล็ก(สิปปภาส), พี่แสป, พี่เก่ง และน้องบอลที่ได้ให้ความช่วยเหลือสนับสนุนอุปกรณ์ต่างๆ รวมทั้งให้ข้อมูลที่จำเป็นมากมายพร้อมทั้งข้อเสนอแนะต่างๆ สำหรับแนวทางการทำวิจัย

ขอขอบคุณพี่โจ(ก่อเกียรติ) ที่ช่วยเหลือในการออกแบบ และคำแนะนำอันมีค่าต่างๆ ขอบคุณเพื่อนยอด และเพื่อนโหน่งในความช่วยเหลืออย่างไม่เห็นแก่เหน็ดเหนื่อย

ขอขอบคุณพี่พรเทพ และ บริษัท อะมะดะ(ประเทศไทย)จำกัด ที่ช่วยเหลือเรื่องชิ้นงานที่เป็นส่วนสำคัญอันประมาณค่าไม่ได้ รวมทั้งพี่ป้า ที่ให้มุมมองที่สำคัญในการคำนวณแบบทางกล

ขอขอบคุณกำลังใจน้องนุช, น้องแคร์, น้องมิกิ และโอกาสจากผู้มีพระคุณทุกท่าน ซึ่งเป็นแรงบันดาลใจของความสำเร็จในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัว ที่ได้ให้ความรักและให้กำลังใจที่ดีมาตลอดชีวิต และให้ความช่วยเหลือในทุกๆ ด้านต่อการศึกษาและการทำวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้รับทุนสนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์ ประจำปีงบประมาณ 2546 จากบัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

สุริยา สุริยกานนท์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....II

กิตติกรรมประกาศ.....III

สารบัญ.....IV

สารบัญรูป.....X

สารบัญตาราง.....XVIII

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา.....1

1.2 ความมุ่งหมาย และวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....3

1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....5

1.4 ทฤษฎี หรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....6

1.5 ขอบเขตการวิจัย.....6

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา.....7

บทที่ 2 ระบบจ่ายพลังงานไฟฟ้าด้วยแสงอาทิตย์.....9

2.1 บทนำ.....9

2.1.1 การใช้ประโยชน์เชิงความร้อน (Thermal Application).....10

2.1.2 การใช้ประโยชน์เชิงไฟฟ้าโดยตรง (Direct Electric Conversion).....10

2.1.3 การใช้ประโยชน์เชิงเคมี (Photochemical Conversion).....10

2.2 สรุปสถานการณ์ของระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ในปัจจุบัน และแนวโน้มการใช้งานในอนาคต.....11

2.2.1 สาระสำคัญของนโยบาย แผน และแนวทางการวิจัยและพัฒนาพลังงานทดแทน พลังงานเซลล์แสงอาทิตย์ พ.ศ. 2540-2544.....11

2.2.2 นโยบาย แผน และสถานภาพของการวิจัยพัฒนาและการใช้เซลล์แสงอาทิตย์.....13

2.2.3 สถานภาพและแนวโน้ม.....13

2.2.3.1 สถานภาพของการวิจัย พัฒนา และการใช้เซลล์แสงอาทิตย์.....13

2.2.3.2 แนวโน้มของการวิจัย พัฒนา และการใช้เซลล์แสงอาทิตย์.....15

2.2.4 ปัญหาในการพัฒนา และแนวทางแก้ไข.....18

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3 การวิเคราะห์รังสีแสงอาทิตย์..... 20

2.3.1 การศึกษาข้อมูลพลังงานแสงอาทิตย์.....20

2.3.2 การวัดและการเก็บข้อมูลรังสีแสงอาทิตย์.....23

2.4 เซลล์แสงอาทิตย์ และการประยุกต์ใช้งาน..... 27

2.4.1 ทฤษฎีเบื้องต้นเกี่ยวกับแสงอาทิตย์.....30

2.4.2 การพิจารณาปริมาณความเข้มแสง.....49

2.4.3 ทฤษฎีของเซลล์แสงอาทิตย์.....54

2.4.3.1 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิกอน.....55

2.4.3.2 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกโพลีซิลิกอน..... 55

2.4.3.3 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิกอน.....55

2.4.3.4 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสารประกอบกึ่งตัวนำ.....56

2.4.4 หลักการทำงานโดยทั่วไปของเซลล์แสงอาทิตย์..... 58

2.4.4.1 คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์... 60

2.4.4.2 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์.....65

2.4.4.3 คุณสมบัติและรูปแบบการกำเนิดไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์..... 65

2.5 การศึกษาผลการต่อร่วมเซลล์แสงอาทิตย์.....66

2.5.1 การจัดสมดุลพลังงานของระบบ.....66

2.5.2 ความสิ้นเปลืองกำลังสูงสุดของเซลล์หนึ่งตัวในแผงเซลล์.....69

2.5.3 รูปแบบการต่อเซลล์อย่างอนุกรม และขนาน.....73

2.6 แบตเตอรี่..... 78

2.6.1 ชนิดของแบตเตอรี่ในระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์.....78

2.6.2 การใช้งานของแบตเตอรี่ในระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์.....79

2.6.3 การอัดประจุให้แบตเตอรี่..... 83

2.6.4 การพิจารณาขนาดของแบตเตอรี่ ในระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์.....84

2.7 บทสรุป.....86

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3 การทดสอบหาค่าพลังงานสูญเสีย และประสิทธิภาพ 134
4.3.1 หลักการ และเหตุผล 134
4.3.2 ทฤษฎีอ้างอิง และหลักการที่เกี่ยวข้อง 134
4.3.3 การเตรียมอุปกรณ์ทดสอบ 136
4.3.4 หัวข้อการทดสอบ 136
4.3.5 ผลการทดสอบ 139
4.3.6 บทวิเคราะห์การทดสอบ 141
4.4 การทดสอบความถูกต้องในส่วนแสดงผลจาก LCD 143
4.4.1 หลักการ และเหตุผล 143
4.4.2 ทฤษฎีอ้างอิง และหลักการที่เกี่ยวข้อง 143
4.4.3 การเตรียมอุปกรณ์ทดสอบ 144
4.4.4 หัวข้อการทดสอบ 144
4.4.5 ผลการทดสอบ 144
4.4.6 บทวิเคราะห์การทดสอบ 147
4.5 การทดสอบหาคุณลักษณะของแผงโซลาร์เซลล์เมื่อต่อใช้งานในลักษณะต่างๆ 149
4.5.1 หลักการ และเหตุผล 149
4.5.2 ทฤษฎีอ้างอิง และหลักการที่เกี่ยวข้อง 149
4.5.3 การเตรียมอุปกรณ์ทดสอบ 151
4.5.4 หัวข้อการทดสอบ 151
4.5.5 ผลการทดสอบ 152
4.5.6 บทวิเคราะห์การทดสอบ 166
4.6 การทดสอบพลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นเมื่อใช้ MPPT คอนเวอร์เตอร์ 167
4.6.1 หลักการ และเหตุผล 167
4.6.2 ทฤษฎีอ้างอิง และหลักการที่เกี่ยวข้อง 167
4.6.3 การเตรียมอุปกรณ์ทดสอบ 169
4.6.4 หัวข้อการทดสอบ 169
4.6.5 ผลการทดสอบ 170
4.6.6 บทวิเคราะห์การทดสอบ 171

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.7 การทดสอบพลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นเมื่อใช้ระบบติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์ 171
4.7.1 หลักการ และเหตุผล.....171
4.7.2 ทฤษฎีอ้างอิง และหลักการที่เกี่ยวข้อง.....172
4.7.3 การเตรียมอุปกรณ์ทดสอบ.....174
4.7.4 หัวข้อการทดสอบ.....174
4.7.5 ผลการทดสอบ.....175
4.7.6 บทวิเคราะห์การทดสอบ.....180
4.8 การทดสอบพลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นเมื่อใช้ MPPT คอนเวอร์เตอร์ร่วมกับการเคลื่อนหมุนแผงพีวีทางกลแบบ 2 แกน 182
4.8.1 หลักการ และเหตุผล.....182
4.8.2 ทฤษฎีอ้างอิง และหลักการที่เกี่ยวข้อง.....182
4.8.3 การเตรียมอุปกรณ์ทดสอบ.....183
4.8.4 หัวข้อการทดสอบ.....184
4.8.5 ผลการทดสอบ.....185
4.8.6 บทวิเคราะห์การทดสอบ.....186
4.9 การทดสอบการปรับหาจุดกำลังสูงสุดของ MPPT คอนเวอร์เตอร์.....187
4.9.1 หลักการ และเหตุผล.....187
4.9.2 ทฤษฎีอ้างอิง และหลักการที่เกี่ยวข้อง.....188
4.9.3 การเตรียมอุปกรณ์ทดสอบ.....188
4.9.4 หัวข้อการทดสอบ.....189
4.9.5 ผลการทดสอบ.....189
4.9.6 บทวิเคราะห์การทดสอบ.....190

บทที่ 5 บทสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....191
5.1 การออกแบบ และสร้างระบบพลังงานฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้ MPPT คอนเวอร์เตอร์ร่วมกับการเคลื่อนหมุนทางกล.....191
5.1.1 องค์ประกอบการออกแบบ MPPT คอนเวอร์เตอร์.....191
5.1.2 องค์ประกอบการออกแบบระบบติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์.....191

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.2 โปรแกรมควบคุมการทำงาน MPPT คอนเวอร์เตอร์
และระบบติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์.....192
5.2.1 โปรแกรมควบคุมการทำงานของ MPPT คอนเวอร์เตอร์
โดยไมโครคอนโทรลเลอร์.....192
5.2.2 โปรแกรมควบคุมการทำงานของระบบติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์.....192
5.2.3 การเชื่อมโยงการทำงานโปรแกรมควบคุม..... 192
5.3 การทดสอบคุณภาพ และการแปลงพลังงานไฟฟ้า... 193
5.4 ข้อเสนอแนะ..... 197
5.4.1 ข้อเสนอแนะสำหรับการออกแบบ
และใช้งานระบบติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์.....197
5.4.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการใช้งานแผงเซลล์แสงอาทิตย์.....197
5.4.3 ข้อเสนอแนะการใช้วงจรควบคุมการอัดประจุสำหรับโหลดภาระแบตเตอรี่.....197
5.4.4 ปัญหา และแนวทางแก้ไข..... 198

เอกสารอ้างอิง.....200

ภาคผนวก..... 203
ภาคผนวก ก. เครื่องมือวัด และอุปกรณ์ทางไฟฟ้า..... 204
ภาคผนวก ข. โปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์.....209
ภาคผนวก ค. เอกสารกำกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิคส์..... 243
ภาคผนวก ง. การทดสอบตามมาตรฐาน IEEE1513-2001(Out-Door Test)..... 253
ภาคผนวก จ. ข้อมูลประกอบเพิ่มเติม.....265
ภาคผนวก ฉ. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์..... 269

ประวัติผู้เขียน.....283

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

1.1 คุณลักษณะของกระแส-แรงดันโซลาร์เซลล์กับโหลดภาระชนิดต่างๆ.....2

1.2 กราฟคุณลักษณะกระแส-กำลัง-แรงดันของโซลาร์เซลล์.....4

2.1 องค์ประกอบของดวงอาทิตย์.....20

2.2 สเปกตรัมของรังสีแสงอาทิตย์ในแต่ละช่วงความยาวคลื่น.....20

2.3 เปรียบเทียบความเข้มแสงในแต่ละช่วงความยาวคลื่นที่ค่าความรับอาบรังสีต่างๆ..... 22

2.4 ผลการลดทอนปริมาณรังสีแสงอาทิตย์จากปัจจัยต่างๆ.....23

2.5 ผลการลดทอนปริมาณรังสีแสงอาทิตย์เมื่อเปลี่ยนความเข้มรังสีที่ความยาวคลื่นต่างๆ.....25

2.6 เครื่องมือวัดปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบลงบนพื้นโลก.....27

2.7 ตัวอย่างการนำเซลล์แสงอาทิตย์ไปใช้งานในลักษณะต่างๆ.....28

2.8 การใช้ไฟฟ้าแสงสว่าง ในบริเวณที่เป็นพื้นที่ของประเทศไทยด้วยภาพถ่ายจาก
ดาวเทียมในระยะไกล.....29

2.9 ความสัมพันธ์ของการเพิ่ม CO_2 ในชั้นบรรยากาศ กับอุณหภูมิเฉลี่ยของโลกที่เพิ่มขึ้น.....30

2.10 ลักษณะการโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์..... 31

2.11 มุมของลำแสงจากดวงอาทิตย์เทียบกับแนวตั้งฉากที่ระดับพื้นโลก..... 31

2.12 ผลของรังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบผิวโลก
จากการโคจรรอบดวงอาทิตย์ในแต่ละช่วงเวลาในรอบปี..... 32

2.13 การพิจารณามุมตกกระทบของรังสีแสงอาทิตย์บนโลก..... 33

2.14 ลักษณะการเคลื่อนที่ปรากฏของดวงอาทิตย์ เมื่อเมื่อพิจารณาจากจุดอ้างอิงบนโลก..... 36

2.15 การเปลี่ยนมุม Azimuth Angle (ϕ_h) ตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ในช่วงเวลาต่างๆ.....37

2.16 ตำแหน่งของมุม Zenith Angle (θ_h) และ Altitude Angle 37

2.17 ไดอะแกรมช่วยคำนวณ θ_h 38

2.18 สามเหลี่ยมจากส่วนของวงกลมในรูปที่ 2.17 39

2.19 ระนาบบนพื้นผิวโลก และระนาบดิคลิเนชั่น..... 40

2.20 ไดอะแกรมช่วยคำนวณ θ_h, ϕ_h 41

2.21 สามเหลี่ยมจากส่วนของทรงกลมในรูปที่ 2.20 41

2.22 ตำแหน่งของดวงอาทิตย์เมื่อผู้สังเกตอยู่ในแนวแกนเส้นศูนย์สูตร.....42

2.23 การเปลี่ยนแปลงของมุม θ_h, ϕ_h ในแต่ละชั่วโมง
ทุกวันที่ 21 ของแต่ละเดือนที่ละติจูด 32°เหนือ..... 43

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

2.24 การชดเชยมุมเอียงของแผงรับพลังงานในแนวราบ
เมื่อเทียบกับแนวราบในตำแหน่งที่มีละติจูดต่ำกว่า..... 44

2.25 การยกพื้นผิวด้วยค่ามุมเอียง T โดยหันด้านหน้าทางทิศใต้..... 45

2.26 การเปลี่ยนแปลงของมุม θ_h, ϕ_h ในแต่ละชั่วโมงวันที่ 21 มกราคม ที่ละติจูด 32° เหนือ.....46

2.27 แนวของดวงอาทิตย์ที่ปรากฏเมื่อผู้สังเกตอยู่ที่ละติจูดต่างกัน ในแต่ละฤดูกาล.....47

2.28 ไดอะแกรมของรังสีจากดวงอาทิตย์ต่อระนาบปกติ และระนาบเอียง.....48

2.29 ความเข้มรังสีจากดวงอาทิตย์ในแต่ละความยาวคลื่นที่ค่า Air Mass ต่างๆ..... 51

2.30 ลักษณะของแท่งผลึกซิลิกอนก่อนการตัดเพื่อทำเป็นแผ่นผลึกสารกึ่งตัวนำ.....54

2.31 ลักษณะการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน และโฮลในแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่สภาวะต่างๆ.....57

2.32 การเกิดคู่อิเล็กตรอน และโฮลขึ้นเมื่อมีแสงอาทิตย์มากระทบลงบนเซลล์.....58

2.33 การเคลื่อนที่ของประจุพาหะอิเล็คตรอนและโฮลภายใต้สนามไฟฟ้า..... 59

2.34 ลักษณะการเคลื่อนที่ของประจุพาหะอิเล็คตรอนและโฮลในสารกึ่งตัวนำที่สภาวะต่างๆ.... 59

2.35 การเปลี่ยนคุณลักษณะเฉพาะของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สภาวะต่างๆ..... 61

2.36 การพิจารณากราฟคุณลักษณะเฉพาะ เพื่อดูผลการเปลี่ยนแปลงค่าฟิลแฟกเตอร์
และจุดกำลังสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์..... 62

2.37 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อพิจารณาผลของความต้านทานอนุกรม และ
ความต้านทานขนาน..... 63

2.38 ผลการเปลี่ยนแปลงกราฟคุณลักษณะเมื่อค่าความต้านทานอนุกรม (R_s)
และความต้านทานขนาน (R_{sh}) เปลี่ยนแปลงค่าไป..... 64

2.39 ผลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์..... 65

2.40 คุณลักษณะของการต่อร่วมเซลล์แสงอาทิตย์แบบอนุกรม.....68

2.41 คุณลักษณะของการต่อร่วมเซลล์แสงอาทิตย์แบบขนาน.....69

2.42 ผลการเปลี่ยนกราฟคุณลักษณะเมื่อมีการบังเงาบางส่วนบนแผงเซลล์..... 70

2.43 ผลการทำงานของชุดเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้การรับอาบรังสีแสงอาทิตย์ที่ต่างกัน.....71

2.44 ผลกระทบต่างๆ ที่ส่งผลต่อคุณสมบัติการใช้งานของเซลล์แสงอาทิตย์..... 71

2.45 สถานะการทำงานของชุดเซลล์เมื่อมีการลัดวงจร และเปิดวงจรภายใต้การรับอาบรังสี
ที่ต่างกัน..... 72

2.46 ลักษณะการต่อใช้งานของบายพาสไดโอด และบล๊อกกิ้งไดโอด..... 73

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

2.47 การเปลี่ยนกราฟคุณลักษณะเฉพาะเมื่อนำเซลล์ที่มีคุณสมบัติต่างกันมาต่อร่วมกันแบบขนาน.....74

2.48 การทำงานของแบตเตอรี่ในแต่ละช่วงเวลาตามสภาพภูมิอากาศที่ต่างกัน.....79

2.49 ผลของอุณหภูมิต่อค่าความจุของแบตเตอรี่.....81

2.50 ค่าเปอร์เซ็นต์ Depth of Discharge.....82

3.1 วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบวงจรลดระดับแรงดันกระแสตรง.....88

3.2 สัญญาณกระแสในโหมดการทำงานแบบต่อเนื่อง.....89

3.3 การทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่องที่ $I_{mn} > 0$.....91

3.4 ค่ากระแสกระเพื่อมต่อหน่วยในรูปของความสัมพันธ์ของค่าดิวตี้ไซเคิล และ T / T_a.....93

3.5 ความสัมพันธ์ของค่าอินดัคแตนซ์ต่ำที่สุดเมื่อเปลี่ยนแปลงความถี่ใช้งาน.....94

3.6 กำลังสูญเสียที่แกนเทียบกับความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก.....99

3.7 วงจรเพิ่มระดับแรงดันกระแสตรงสำหรับขับมอสเฟต.....102

3.8 วงจรรวม MPPT คอนเวอร์เตอร์กับวงจรขับสัญญาณพัลส์ที่ขาเกต.....103

3.9 ทิศทางการหมุนโครงสร้าง และการปรับมุมแผง.....105

3.10 แรงที่กระทำต่อโครงสร้างจากการหมุนเมื่อมีการปรับมุมเอียงของแผงโซลาร์เซลล์.....106

3.11 ขนาดของ $\bar{M}_R$ ที่เปลี่ยนแปลงตามมุม θ.....107

3.12 ระบบโซ่ และเกียร์ที่เลือกใช้.....109

3.13 แรงที่กระทำต่อโครงสร้างจากการหมุนเมื่อมีการหมุนแผงโซลาร์เซลล์โดยรอบ.....110

3.14 ระบบโซ่ที่เลือกใช้ในการทดรอบที่มีระยะห่างจากจุดศูนย์กลางจานโซ่ใหญ่กับเล็กเท่ากับ D.....111

3.15 ขนาด และองค์ประกอบของโครงสร้างรองรับแผงแบบปรับตำแหน่งทางกลได้ 2 แนวแกน เมื่อมองจากด้านข้าง (หน่วย = เซนติเมตร).....113

3.16 ขนาด และองค์ประกอบของโครงสร้างรองรับแผงแบบปรับตำแหน่งทางกลได้ 2 แนวแกน เมื่อมองจากด้านหน้า (หน่วย = เซนติเมตร).....114

3.17 วงจรขับมอเตอร์กระแสตรงแบบกลับทิศทางหมุนได้.....115

3.18 วงจรแบ่งแรงดันสำหรับแปลงค่าความต้านทานเป็นแรงดันของ LDR.....116

3.19 Flow Chart โปรแกรมควบคุมการทำงานของ MPPT คอนเวอร์เตอร์.....118

3.20 Flow Chart โปรแกรมควบคุมการปรับมุมแผงเซลล์แสงอาทิตย์ระบบติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์.....121

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.1 วงจรที่ใช้ทดสอบเมื่อใช้โหลดภาระแบตเตอรี่ 126

4.2 Matlab Simulink บล็อคไดอะแกรม 127

4.3 สัญญาณแรงดันอินพุทคอนเวอร์เตอร์ขณะไม่ต่อโหลดภาระ 128

4.4 สัญญาณแรงดันอินพุทคอนเวอร์เตอร์จากการวัดจริงขณะต่อโหลดภาระ(CH1) และแรงดันอินเวอร์สของ V_{FWD}(CH2) 129

4.5 สัญญาณแรงดันที่อินพุทคอนเวอร์เตอร์จากโปรแกรม Matlab Time/div = $1x10^{-5}$ sec, V/div = 50mV 129

4.6 สัญญาณที่ได้จากการวัดจริง V_{GS}(CH1) และสัญญาณจาก V_{DS}(CH2) 130

4.7 สัญญาณแรงดันที่ V_{DS} ของ Mosfet จากโปรแกรม Matlab Time/div = $1x10^{-5}$ sec, V/div = 50mV 130

4.8 สัญญาณที่ได้จากการวัดจริง V_{GS}(CH1) และ V_{FWD}(CH2) 131

4.9 สัญญาณแรงดันที่ V_{FWD} จากโปรแกรม Matlab Time/div = $1x10^{-5}$ sec, V/div = 20V 131

4.10 สัญญาณแรงดันจากการวัดจริงที่แบตเตอรี่ V_{Batt}(CH2) และสัญญาณ V_{GS} 132

4.11 สัญญาณแรงดันที่แบตเตอรี่ V_{Batt}(CH2) จากโปรแกรม Matlab Time/div = $1x10^{-5}$ sec, V/div = 500 mV 132

4.12 สัญญาณแรงดันด้านอินพุทที่ได้จากโปรแกรม Matlab เมื่อลดค่าอินพุทคาปาซิเตอร์ลงเหลือ 35 μF Time/div = $1x10^{-5}$ sec, V/div = 200mV 133

4.13 สัญญาณแรงดันที่ V_{FWD} จากโปรแกรม Matlab เมื่อลดค่า C_S ภายในของ Mosfet Time/div = $1x10^{-5}$ sec, V/div = 20V 134

4.14 วงจรทดสอบประสิทธิภาพของระบบติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์แบบ 2 แกน 135

4.15 การต่ออุปกรณ์ และเครื่องมือวัดเพื่อทดสอบปประสิทธิภาพของ MPPT คอนเวอร์เตอร์ 137

4.16 ขณะทำการทดสอบพลังงานสูญเสียจากระบบติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์ และอุปกรณ์วัดกระแส-แรงดัน 138

4.17 ประสิทธิภาพของคอนเวอร์เตอร์ที่ดิ้วตี้ไซเคิลต่างๆ 142

4.18 ประสิทธิภาพของคอนเวอร์เตอร์เปรียบเทียบในแต่ละพิกัดกำลัง 142

4.19 การทดสอบค่าแรงดันอินพุทจาก LCD เปรียบเทียบกับค่าทีวัดได้จากมัลติมิเตอร์ 145

4.20 การทดสอบค่ากระแสอินพุทจาก LCD เปรียบเทียบกับค่าทีวัดได้จากมัลติมิเตอร์ 146

4.21 การทดสอบค่าแรงดันแบตเตอรี่จาก LCD เปรียบเทียบกับค่าทีวัดได้จากมัลติมิเตอร์ 147

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.22 วงจรเสมือนของเซลล์แสงอาทิตย์..... 149

4.23 วงจรที่ทดสอบคุณลักษณะทางกระแสแรงดัน (I-V Scan)..... 151

4.24 วงจรที่ทดสอบคุณลักษณะของแผงโซลาร์เซลล์เมื่อต่อใช้งาน 1 แผง..... 152

4.25 วงจรที่ทดสอบคุณลักษณะของแผงโซลาร์เซลล์เมื่อต่อใช้งาน 2 แผงแบบอนุกรม..... 152

4.26 กราฟคุณลักษณะกระแส-กำลัง-แรงดันของแผงโซลาร์เซลล์ 1 แผง
วันที่ 29 ก.ค. 2546 เวลา 15.00น. T = 48°C(ไม่มีเมฆ)..... 153

4.27 กราฟคุณลักษณะกระแส-กำลัง-แรงดันของแผงโซลาร์เซลล์ 2 แผง ต่อแบบอนุกรม วันที่ 29 ก.ค. 2546 เวลา 15.00น. T = 48°C(ความเข้มแสงน้อย-มีเมฆ)ทดสอบพร้อมกับรูปที่ 4.26...154

4.28 กราฟคุณลักษณะกระแส-กำลัง-แรงดันของแผงโซลาร์เซลล์ 1 แผง วันที่ 29 ก.ค. 2546 เวลา 15.18น. T = 50°C(ความเข้มแสงน้อย-มีเมฆ)..... 155

4.29 กราฟคุณลักษณะกระแส-กำลัง-แรงดันของแผงโซลาร์เซลล์ 2 แผง ต่อแบบอนุกรม วันที่ 29 ก.ค. 2546 เวลา 15.18น. T = 50°C(ไม่มีเมฆ) ทดสอบพร้อมกับรูปที่ 4.28..... 156

4.30 กราฟคุณลักษณะกระแส-กำลัง-แรงดันของแผงโซลาร์เซลล์ 1 แผง วันที่ 29 ก.ค. 2546 เวลา 15.37น. T = 50°C(ความเข้มแสงน้อย-มีเมฆ)..... 157

4.31 กราฟคุณลักษณะกระแส-กำลัง-แรงดันของแผงโซลาร์เซลล์ 2 แผง ต่อแบบอนุกรม วันที่ 29 ก.ค. 2546 เวลา 15.37น. T = 50°C(ความเข้มแสงน้อย-มีเมฆ)ทดสอบพร้อมกับรูปที่ 4.30 .. 158

4.32 วงจรที่ใช้ทดสอบคุณลักษณะของแผงโซลาร์เซลล์เมื่อต่อใช้งาน 2 แผงแบบขนาน.....159

4.33 รูปขณะทำการทดสอบ, เครื่องมือการทดสอบ และการวัดเพื่อหาคุณลักษณะของแผงโซลาร์เซลล์เมื่อต่อใช้งานในลักษณะต่างๆ.....159

4.34 กราฟคุณลักษณะกระแส-กำลัง-แรงดันของแผงโซลาร์เซลล์ 1 แผง
วันที่ 29 ก.ค. 2546 เวลา 15.55น. T = 48°C(ความเข้มแสงน้อย-มีเมฆ).....160

4.35 กราฟคุณลักษณะกระแส-กำลัง-แรงดันของแผงโซลาร์เซลล์ 2 แผง ต่อแบบขนาน วันที่ 29 ก.ค. 2546 เวลา 15.55น. T = 48°C(ความเข้มแสงน้อย-มีเมฆ) ทดสอบพร้อบกับรูปที่ 4.34..161

4.36 กราฟคุณลักษณะกระแส-กำลัง-แรงดันของแผงโซลาร์เซลล์ 1 แผง
วันที่ 29 ก.ค. 2546 เวลา 16.08น. T = 48°C(ความเข้มแสงน้อย-มีเมฆ).....162

4.37 กราฟคุณลักษณะกระแส-กำลัง-แรงดันของแผงโซลาร์เซลล์ 2 แผง ต่อแบบขนาน วันที่ 29 ก.ค. 2546 เวลา 16.08น. T = 48°C(ความเข้มแสงน้อย-มีเมฆ) ทดสอบพร้อบกับรูปที่ 4.36..163

4.38 กราฟคุณลักษณะกระแส-กำลัง-แรงดันของแผงโซลาร์เซลล์ 1 แผง
วันที่ 29 ก.ค. 2546 เวลา 16.17น. T = 50°C(ไม่มีเมฆ)..... 164

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.39 กราฟคุณลักษณะกระแส-กำลัง-แรงดันของแผงโซลาร์เซลล์ 2 แผง ต่อแบบขนาน วันที่ 29 ก.ค. 2546 เวลา 16.17น. T = 50°C(ไม่มีเมฆ) ทดสอบพร้อมกับรูปที่ 4.38 165

4.40 รูปวงจรที่ใช้ทดสอบตามหัวข้อที่ 4.6.4 169

4.41 ขณะทำการทดสอบ และเครื่องมือวัดที่ใช้กับ MPPT คอนเวอร์เตอร์ 169

4.42 เปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าในช่วงเวลาที่ทดสอบจากทั้งสองระบบ อุณหภูมิภายนอกโดยเฉลี่ย 50°C ความดันอากาศ758.5mmHg..... 170

4.43 เปรียบเทียบกระแสไฟฟ้าในช่วงเวลาที่ทดสอบจากทั้งสองระบบ อุณหภูมิภายนอกโดยเฉลี่ย 50°C ความดันอากาศ 758.5mmHg..... 170

4.44 รูปวงจรที่ใช้ทดสอบตามหัวข้อทดสอบ 4.7.4 175

4.45 ขณะทำการทดสอบระบบติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์เทียบกับระบบอ้างอิง 175

4.46 เปรียบเทยบกำลังไฟฟ้าในช่วงเวลาที่ทดสอบจากทั้งสองระบบ สำหรับการทดสอบตอนที่ 1 176

4.47 เปรียบเทียบกระแสไฟฟ้าในช่วงเวลาที่ทดสอบจากทั้งสองระบบ สำหรับการทดสอบตอนที่ 1 176

4.48 เปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าในช่วงเวลาที่ทดสอบจากทั้งสองระบบ สำหรับการทดสอบตอนที่ 2 177

4.49 เปรียบเทียบกระแสไฟฟ้าในช่วงเวลาที่ทดสอบจากทั้งสองระบบ สำหรับการทดสอบตอนที่ 2 177

4.50 เปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าในช่วงเวลาที่ทดสอบจากทั้งสองระบบ สำหรับการทดสอบตอนที่ 3 178

4.51 เปรียบเทียบกระแสไฟฟ้าในช่วงเวลาที่ทดสอบจากทั้งสองระบบ สำหรับการทดสอบตอนที่ 3 178

4.52 เปรียบเทียบกระแสไฟฟ้าในช่วงเวลาที่ทดสอบจากทั้งสองระบบ เพื่อหาอัตราการเพิ่มกำลังไฟฟ้าในแต่ละช่วงเวลา 179

4.53 เปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าในช่วงเวลาที่ทดสอบจากทั้งสองระบบ เพื่อหาอัตราการเพิ่มกำลังไฟฟ้าในแต่ละช่วงเวลา 179

4.54 ระบบทดสอบตามหัวข้อที่ 4.7.4 ใช้แผงโซลาร์เซลล์ 2 แผงต่อแบบอนุกรม 184

4.55 ขณะทำการทดสอบเปรียบเทียบทั้ง 2 ระบบ 184

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.56 เปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าระบบที่ทดสอบ และระบบอ้างอิงทดสอบตั้งแต่เวลา 6.30-16.30น. อุณหภูมิ 48.5°C ความดันอากาศ 758.5 mHg..... 185

4.57 เปรียบเทียบกระแสไฟฟ้าระบบที่ทดสอบ และระบบอ้างอิงทดสอบตั้งแต่เวลา 6.30-16.30น. อุณหภูมิ 48.5°C ความดันอากาศ 758.5 mHg..... 185

4.58 วงจรที่ใช้ทดสอบการปรับเข้าหาจุดกำลังสูงสุดของ MPPT คอนเวอร์เตอร์..... 189

4.59 ขณะทำการทดสอบการปรับเข้าหาจุดกำลังสูงสุดของ MPPT คอนเวอร์เตอร์..... 189

4.60 ผลการทดสอบการปรับเข้าจุดกำลังสูงสุดของ MPPT คอนเวอร์เตอร์ ทดสอบวันที่ 30 สิงหาคม 2546 อุณหภูมิเฉลี่ย 39.43°C ความดันอากาศ 758.5mmHg.....190

5.1 พลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นจากการทดสอบเทียบกับระบบอ้างอิงของระบบติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์..... 194

5.2 การทดสอบแสดงความคลาดเคลื่อนการสู่กำลังไฟฟ้าสูงสุดของ MPPT คอนเวอร์เตอร์.... 195

5.3 รูปแบบการคำนวณการประมาณการณ์พลังงานไฟฟ้าที่ได้จากระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ MPPT คอนเวอร์เตอร์ร่วมกับการติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์แบบ E-W Axis Tracker..... 195

5.4 กราฟเปรียบเทียบพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากการประมาณการณ์ตามรูปแบบการคำนวณในรูปที่ 5.3 เปรียบเทียบกับค่าพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบจริงทดสอบวันที่ 2 สิงหาคม 2546..... 196

ก-1 เครื่องมือวัดกระแส แรงดัน และเทอร์โมมิเตอร์..... 205

ก-2 เครื่องมือวัดกระแส..... 205

ก-3 มัลติมิเตอร์, เทอร์โมมิเตอร์ และไฮกรอมิเตอร์..... 206

ก-4 แผงโซลาร์เซลล์ที่ใช้ในงานวิจัยรุ่น BPTS1255HP..... 206

ก-5 บารอมิเตอร์วัดความดันอากาศ..... 207

ก-6 โครงตั้งแผงโซลาร์เซลล์เพื่อทดสอบ..... 207

ก-7 แบตเตอรี่ขนาด 65Ah เป็นโหลดภาระของระบบ..... 207

ก-8 แผงโหลดภาระความต้านทาน..... 208

ก-9 กล่องวงจร MPPT คอนเวอร์เตอร์ และวงจรสำหรับระบบติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์..... 208

ก-10 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น C-PIC V.4..... 208

ค-1 PIC ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ 16F877 อินพุท-เอาท์พุทไดอะแกรม.....251

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

ค-2 PIC ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ 18F458 อินพุท-เอาท์พุทไดอะแกรม.....252

ง-1 อุปกรณ์วัดความเข้มแสงไพรานอมิเตอร์.....255

ง-2 วงจรที่ใช้ทดสอบ I-V Scan.....255

ง-3 การทดสอบ I-V Scan ตามมาตรฐาน IEEE1513-2001(Out-door Test)..... 256

ง-4 ผลการทดสอบ I-V Scan แสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังแรงดันในแต่ละช่วงเวลาทดสอบวันที่ 2 พฤศจิกายน 2546..... 258

ง-5 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของกระแสลัดวงจรที่สัมพันธ์กับความเข้มแสงค่าต่างๆระหว่างค่าที่ได้จากการวัดจริงกับค่าที่ได้จากกรรมวิธี Non-linear Regression โดย Least square fitting = 22.5763, ความแปรปรวน = 0.5506 และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน = 0.7421.....259

จ-1 สัญญาณกระแส-แรงดันที่อินพุท MPPT คอนเวอร์เตอร์เมื่อต่อใช้งานร่วมกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์.....266

จ-2 สัญญาณกระแส-แรงดันที่เอาท์พุท MPPT คอนเวอร์เตอร์(เข้าแบตเตอรี่)เมื่อต่อใช้งานร่วมกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์.....266

จ-3 การทดสอบปรับ LDR โมดูลโดยอาศัยหลักการของนาฬิกาแดด.....267

จ-4 วงจรรวมของ ECU ที่ใช้ในระบบอ้างอิง.....268

จ-5 การทดสอบประสิทธิภาพของ ECU ทดสอบในสภาวะอัดประจุให้แบตเตอรี่จากแผงโซลาร์เซลล์ที่ใช้ในงานวิจัย 2 แผงต่อแบบขนาน.....268

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 การเปรียบเทียบปริมาณพลังงานสำรองประเภทต่างๆ เมื่อเทียบเป็นพลังงานความร้อน.....9

2.2 การหาค่าเลขประจำวัน ในรอบ 1 ปี.....34

2.3 ค่าชดเชยทางเวลา (The equation of time).....35

3.1 สัมประสิทธิ์ความหนาแน่นกระแส (K_j).....96

3.2 คุณสมบัติทางกายภาพของแกนที่เลือกใช้..... 97

3.3 คุณสมบัติของมอเตอร์ในแนวแกนต่างๆที่ได้จากการคำนวณในขั้นตอนการออกแบบ.....112

4.1 ค่าพลังงานสูญเสียจากการปรับมุมแผงมุม 75 องศาเทียบกับแนวดิ่งจนตั้งฉากกับแนวดิ่ง และกลับมาตำแหน่งที่ทำมุม 75 องศากับแนวดิ่งอีกครั้ง (Tilt Angle Adjustment)..... 139

4.2 ค่าพลังงานสูญเสียจากการปรับหมุนโครงแผงโดยรอบ (Polar EW Tracking).....140

4.3 ค่าพลังงานสูญเสียจากการจ่ายไฟเลี้ยงให้วงจรควบคุม.....141

4.4 แรงดันอินพุทที่วัดได้จากเครื่องมือวัดที่มีมาตรฐานกับแรงดันอินพุทที่แสดงจาก LCD 145

4.5 กระแสอินพุทที่วัดได้จากเครื่องมือวัดที่มีมาตรฐานกับกระแสอินพุทที่แสดงจาก LCD 146

4.6 แรงดันแบตเตอรี่ที่วัดได้จากเครื่องมือวัดที่มีมาตรฐานกับแรงดันที่แสดงจาก LCD 147

4.7 ตารางแสดงปริมาณที่สำคัญต่างๆเพื่อประมาณความเข้มรังสีในวันที่ 30 กรกฎาคม 2546.... 167

4.8 ปริมาณความเข้มรังสีตรง, รังสีกระจาย และปริมาณที่สำคัญด้านพลังงานอย่างอื่น ในวันที่ 30 กรกฎาคม 2546 ที่ได้จากการคำนวณ..... 168

4.9 ปริมาณความเข้มรังสีตรง, รังสีกระจาย และปริมาณที่สำคัญด้านกำลังอย่างอื่นในวันที่ 1, 2 และ 6 สิงหาคม 2546 ที่ได้จากการคำนวณ (สำหรับวันที่ 1 ส.ค. 2546 ยกเว้น A, B, C, D).....173

4.10 ผลการทดสอบตอนที่ 1-5 จากหัวข้อการทดสอบที่ 4.7..... 180

4.11 ปริมาณความเข้มรังสีตรง, รังสีกระจาย และปริมาณที่สำคัญด้านกำลังงานอย่างอื่น ในวันที่ 30 กรกฎาคม 2546 ที่ได้จากการคำนวณ..... 183

ค-1 คุณสมบัติของแกน TORIOD ที่ใช้ในงานวิจัย.....244

ค-2 คุณสมบัติของขดลวด.....245

ค-3 คุณสมบัติของมอสเฟตในวงจร MPPT คอนเวอร์เตอร์.....246

ค-4 คุณสมบัติของฟอสเฟตในวงจรเพิ่มแรงดัน..... 248

ง-1 สัมประสิทธิ์ที่ได้จากกระบวนการ Regression ตามสมการในมาตรฐาน IEEE1513-2001...260

ง-2 ข้อมูล I-V Scan และข้อมูลแวดล้อมใช้ในมาตรฐาน IEEE1513-2001ทดสอบวันที่ 2 พ.ย. 46..... 262

ง-3 ค่ากลางทางสถิติของข้อมูลจากการทดสอบ I-V Scan..... 264

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา

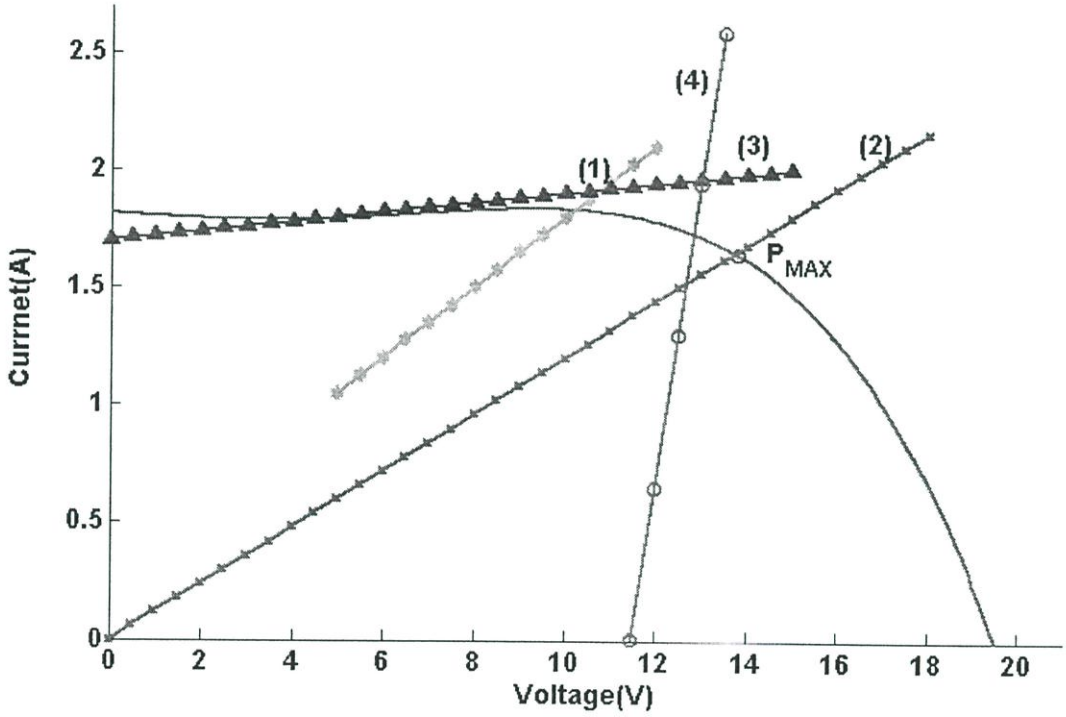
ในปัจจุบันได้มีการนำระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ มาใช้งานในรูปแบบต่างๆกันอย่างกว้างขวาง และมีแนวโน้มในการนำมาใช้งานกันมากขึ้นในอนาคตอันใกล้ เนื่องจากพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานที่สะอาด ไม่มีสารพิษตกค้างที่จะเป็นอันตรายต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม และที่สำคัญคือเป็นแหล่งพลังงานอันมหาศาลที่ได้เปล่าและมีอยู่ทั่วไปตามธรรมชาติ

ในการใช้งานของระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ สำหรับโหลดที่มีการใช้งานต่อเนื่อง ถ้าเป็นระบบที่ต้องการความน่าเชื่อถือสูงมักจะพบปัญหาเรื่องเสถียรภาพของระบบ เมื่อมีการใช้งานกับระบบจ่ายไฟด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ที่ไม่มีระบบเก็บพลังงานสำรอง หรือมีการออกแบบระบบเก็บสะสมพลังงานที่ไม่เหมาะสม ทั้งกรณีของระบบจ่ายไฟแบบเดี่ยว(Stand Alone) และการประยุกต์ใช้งานของระบบในลักษณะการต่อร่วมกับระบบไฟฟ้าอื่น หรือแม้จะเป็นระบบที่มีการออกแบบโดยเผื่อให้ระบบเก็บสะสมพลังงานมีขนาดใหญ่จนเกินความจำเป็น ก็มักจะมีปัญหาด้านความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์เข้ามาเกี่ยวข้องหรือขนาดของระบบจะต้องใหญ่จนเกินความจำเป็นเพื่อที่จะให้มีปริมาณพลังงานเพียงพอสำหรับจ่ายให้กับระบบเก็บสะสมพลังงานและจ่ายให้กับโหลดได้ ซึ่งเป็นการสิ้นเปลืองและไม่เหมาะสมอย่างยิ่งในการออกแบบหรือการใช้งานสำหรับระบบจ่ายไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์

ประเด็นที่น่าสนใจในการพิจารณา:

1. ไม่ว่าจะเป็นระบบขนาดใหญ่หรือเล็ก การแปลงพลังงานขึ้นกับปัจจัยทางภูมิประเทศ และภูมิอากาศ รวมทั้งช่วงเวลาที่เปลี่ยนแปลงไปในแต่ละวัน เดือน หรือ ปีดังนั้นการควบคุมการแปลง พลังงานต้องสามารถยืดหยุ่นต่อสภาพการดังกล่าวให้มากที่สุด
2. ปัจจัยที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งของการแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้าของระบบ ขึ้นกับคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์เองการให้ความสำคัญในการทดสอบและบันทึกผลการแปลงพลังงานดังกล่าวที่ได้มาตรฐานไว้อย่างต่อเนื่อง ทั้งแผงที่ติดตั้งในระบบใหม่ และการทดสอบแผงที่ติดตั้งใช้งานอยู่ เป็นข้อมูลที่สำคัญต่อการทำนายค่าพลังงานไฟฟ้าที่จะได้ต่อไป
3. การดึงกระแส และแรงดันของโหลดภาระมีผลต่อประสิทธิภาพของการแปลงพลังงานของระบบพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ (PV System : Photovoltaic System) เพราะคุณลักษณะทางไฟฟ้าของโซลาร์เซลล์มีลักษณะเป็นแหล่งกำเนิด กระแส-แรงดัน (Current-Voltage Source) เพราะมีลักษณะของกราฟ กระแส-แรงดันแบบรอยต่อ p-n ดังนั้นเมื่อนำมาจ่ายพลังงานให้กับโหลดภาระชนิดหนึ่งสิ่งที่ต้องพิจารณาคือ คุณลักษณะของแรงดัน

ของโหลดภาระเองว่ามีการเปลี่ยนแปลงอย่างไรต่อค่าพลังงานที่โหลดภาระต้องการ(หรือกระแสที่โหลดภาระต้องการ) ดังแสดงในรูปที่ 1.1 ย่านความต้องการกระแส และแรงดันของโหลดภาระต้องเหมาะสมกับกระแส และแรงดันที่แผงโซลาร์เซลล์ที่นำมาใช้ จ่ายให้ได้ในทุกช่วงเวลาที่โหลดภาระต้องการพลังงานไฟฟ้า เพื่อให้ระบบสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 1.1 คุณลักษณะของกระแส-แรงดันโซลาร์เซลล์ กับโหลดภาระชนิดต่างๆ

(1) ปั๊มน้ำรูปหอยโข่งที่ความดันน้ำคงที่(Constant Head Pressure)

(2) ความต้านทาน(R : Resistor)

(3) ปั๊มน้ำสูบน้ำที่ความดันน้ำคงที่

(4) แบตเตอรี่

จากประเด็นที่น่าสนใจทั้งหมดนั้นสามารถแบ่งได้เป็น 3 หัวข้อใหญ่ได้ดังนี้ คือ ปัจจัยด้านตัวเซลล์เอง ปัจจัยด้านดินฟ้าอากาศกับที่ตั้งทางภูมิประเทศ และปัจจัยจากโหลดภาระที่นำมาใช้ ซึ่งงานวิจัยเกี่ยวกับการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งในประเทศ รวมทั้งต่างประเทศก็ให้ความสำคัญต่อการแก้ปัญหาดังกล่าว

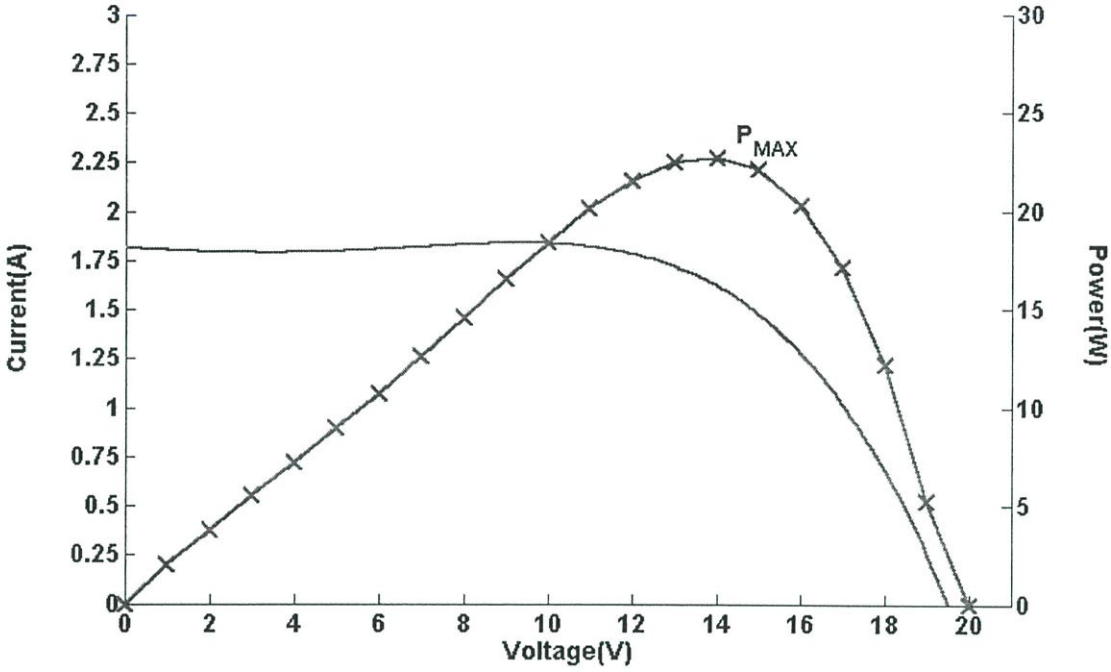
1.2 ความมุ่งหมาย และวัตถุประสงค์ของการศึกษา

จากประเด็นต่างๆที่กล่าวมาแล้วนั้นทำให้นักวิจัยส่วนใหญ่ตั้งวัตถุประสงค์ของงานวิจัยกี่ยวกับพลังงานแสงอาทิตย์ในด้านการควบคุมคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ให้มีความยืดหยุ่นในการนำไปใช้กับโหลดภาระหลากหลายชนิด โดยมีความมุ่งหมายให้อยู่ภายในขอบเขตของการสร้างระบบพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีความสามารถ ในการแปลงพลังงานแสงเป็น พลังงานไฟฟ้า ได้เต็มที่ เต็มพิกัดตลอดเวลาที่ระบบทำการแปลงพลังงาน(ในช่วงเวลากลางวัน) และเพียงพอที่จะจ่ายให้โหลดได้ตามเวลาที่กำหนด เทคนิคหนึ่งที่นำมาใช้ได้ผลในการสร้างวงจรอัดประจุให้แบตเตอรี่หรือใช้กับโหลดภาระชนิดอื่นๆ คือการใช้วงจรแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงหรือดีซี-ดีซี คอนเวอร์เตอร์(DC-DC Converter)[1] ช่วยรักษาระดับแรงดันที่แผงโซลาร์เซลล์ให้มีค่าใกล้เคียงกับแรงดันที่จุดที่มีการแปลงพลังงานมากที่สุด ซึ่งเรียกจุดนี้ว่า MPP (Maximum Power Point) เนื่องจากกระแส และแรงดันที่จุด MPP นั้นเปลี่ยนแปลงไปตามความเข้มแสงที่ตกกระทบแผง และสภาพดินฟ้าอากาศ ทำให้ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ จุด MPP เปลี่ยนแปลงไปด้วยดังนั้นการใช้ ดีซี-ดีซี คอนเวอร์เตอร์รักษาแรงดันแผงโซลาร์เซลล์ไว้ ที่จุด MPP ได้โดยที่ไม่กระทบระดับแรงดันที่โหลดภาระไม่ว่าจะเป็นโหลดภาระประเภทใดก็ตาม วงจรแปลงที่มีความสามารถดังกล่าวถูกเรียกว่า MPPT คอนเวอร์เตอร์(Maximum Power Point Tracking Converter) หัวใจหลักของการควบคุมการทำงานของคอนเวอร์เตอร์อยู่ที่การปรับค่า

ดิวตี้ไซเคิล $\alpha = \frac{T_{ON}}{T}$ เมื่อ T_{ON} คือ ช่วงเวลา Turn On ของคอนเวอร์เตอร์ และ T คือคาบเวลาของการ $\text{Turn}_{\text{ON-OFF}}$

สิ่งที่ต้องพิจารณาคือเราจะปรับดิวตี้ไซเคิลอย่างไรเพื่อให้สอดคล้องกับเป้าหมายที่เราตั้งเอาไว้นั้น ได้มีงานวิจัยต่างๆที่นำเสนอทั้งในประเทศ และต่างประเทศมากมาย ทั้งการใช้วิธีประมวลผลทางโปรแกรม(Software Simulation)[2] และการสร้าง MPPT คอนเวอร์เตอร์โดยอาศัยการควบคุมที่แตกต่างกันไป เช่น การนำค่าสภาพภูมิอากาศมาเป็นฐานข้อมูลในการควบคุม MPPT คอนเวอร์เตอร์[2, 5] การวัดค่ากระแส I_{SC} ในช่วงเวลาสั้นๆ เพื่อนำมาประมาณการค่ากระแส และแรงดันที่จุด MPP โดยอาศัยแฟคเตอร์ตัวคูณค่าหนึ่ง(เปลี่ยนแปลงไปตามประเภท และชนิดแผง) และป้อนกลับมาควบคุม ดิวตี้ไซเคิล สำหรับ MPPT คอนเวอร์เตอร์ต่อไป[3] การใช้ค่ากำลังไฟฟ้าที่เอาท์พุทเป็นองค์ประกอบหลัก กับค่าดิวตี้ไซเคิลซึ่งเปรียบเสมือนตัวแทนจากค่าแรงดันที่แผงในกรณีที่กำหนดแรงดันเอาท์พุทคงที่ ดังนั้นการตั้งค่าอัตราการปรับ ดิวตี้ไซเคิลก็คือการสุ่มเพื่อหาจุดที่ได้กำลังไฟฟ้ามากกว่าตำแหน่งเดิมโดยมีเป้าหมายให้ได้กำลังเอาท์พุทสูงสุดในช่วงเวลาหนึ่ง[4] หรือการควบคุมการปรับดิวตี้ไซเคิลตามกราฟกำลัง-แรงดันที่แสดงในรูปที่ 1.2 ซึ่งมีลักษณะกราฟเป็นภูเขาที่มีความสูงของกราฟเป็นค่ากำลังไฟฟ้า ที่ตำแหน่งแรงดันต่างๆกัน การควบคุมคอนเวอร์-

เตอร์จึงอาศัยการปรับตามความลาดชันของกราฟกำลังแรงดัน (P-V Mountain Curve Climbing) [6,7,8,9,10] ส่วนข้อมูลในการป้อนกลับมายังชุดควบคุมเพื่อไต่ระดับเข้าสู่จุด P_{MAX} ก็มีเอกลักษณ์แตกต่างกันไปในรายละเอียด



รูปที่ 1.2 กราฟคุณลักษณะกระแส-กำลัง-แรงดันของโซลาร์เซลล์

นักวิจัยบางกลุ่มนำเสนอรายละเอียดการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ การสวิทชิ่ง และ/หรือการแก้ปัญหากำลังสูญเสียจากสวิทชิ่ง [9,10] หรือนำเสนอจุดเด่นในการนำไมโครคอนโทรลเลอร์มาควบคุมการปรับแรงดันของคอนเวอร์เตอร์[7] นอกจากนี้ยังนำเสนอในส่วนของการประยุกต์ใช้งาน สำหรับการต่อร่วมกับระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง(DC-Link) ขนาดต่างๆ[11,12]

ส่วนปัญหาทางด้าน ปัจจัยทางภูมิประเทศ และมุมของแผงกับรังสีจากดวงอาทิตย์ที่ไม่คงที่ในแต่ละเวลา ทำให้ในบางช่วงเวลาลำแสงตกกระทบแผงในแนวที่เบนไปจากแนวตั้งฉากมากเกินไป ค่าพลังงานความเข้มแสงที่แผงได้รับไม่สม่ำเสมอทำให้ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานไฟฟ้าลดลง อาจชดเชยได้โดยการใช้ความรู้ทางด้านวิศวกรรมอิเล็กทรอนิคส์ วิศวกรรมเครื่องกล มาใช้ในการควบคุมการหมุนของแผงทางกล (Mechanical PV Panel Tracking) [13,14,15,16,17] นอกจากนี้ก็มี

งานวิจัยส่วนหนึ่งที่นำเสนอเกี่ยวกับการสร้างโมเดลในการตรวจจับความเข้มแสง[18] รวมทั้งการประยุกต์การปรับมุมแผงทางกลสำหรับระบบดาวเทียม[19,20]

ปัจจัยที่น่าสนใจที่เหลือ คือคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ ก็มีงานวิจัย และพัฒนาทางด้านวิศวกรรมวัสดุ และวิศวกรรมอิเล็กทรอนิคส์(Electronics&Material Engineering) เพื่อพัฒนาเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นอย่างต่อเนื่อง

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยชิ้นนี้ก็เน้นการแก้ปัญหาในการควบคุมการเก็บพลังงานจากแสงอาทิตย์ และแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้าที่คุ้มค่ามากที่สุด เช่นเดียวกับงานวิจัยชิ้นอื่นๆ แต่จุดเด่นของงานวิจัยในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้อยู่ที่การผนวกเอกลักษณ์ของ การควบคุม P-V Curve เข้ากับการปรับมุมแผงโซลาร์เซลล์ทางกลเข้าด้วยกัน

วัตถุประสงค์โดยรวมอาจแบ่งได้ดังนี้

1. ออกแบบระบบที่สามารถจ่ายพลังงานไฟฟ้า เพื่อใช้อัดประจุให้กับแบตเตอรี่(ในที่นี้จำลองสถานะเป็น โหลดภาระของระบบ) ใกล้เคียงกับพิกัดของแผงโซลาร์เซลล์ เท่าที่สภาวะแวดล้อมจะเอื้ออำนวย
2. เลือกใช้การควบคุมโดยไมโครคอนโทรลเลอร์เนื่องจากความสามารถของไมโครคอน-โทรลเลอร์ที่เพิ่มมากขึ้นในปัจจุบันทำให้การสร้างขอบเขตการควบคุม แรงดัน และกระแสป้อนกลับเข้ามาเพื่อใช้ควบคุมการปรับดิวตี้ไซเคิล หรือการปรับแรงดันทางอิเล็กทรอนิคส์กำลัง(Power Electronics) ได้ครอบคลุมเงื่อนไขต่างๆมากยิ่งขึ้น
3. เก็บข้อมูลเกี่ยวกับพลังงานแสงอาทิตย์ ให้มากเพียงพอในการออกแบบ และสอดคล้องกับมาตรฐาน IEEE1513-2001
4. ทดสอบพลังงานจากระบบที่ออกแบบในแง่มุมต่างๆ เพื่อหาความคุ้มค่าของพลังงานที่เสียไป เทียบกับพลังงานที่ได้มากขึ้น
5. ทดสอบการทำงานร่วมกันของการปรับมุมแผงโซลาร์เซลล์ทางกล กับการปรับแรงดันของคอนเวอร์เตอร์ตามหลักการ MPPT คอนเวอร์เตอร์ เพื่อหาความสามารถที่เพิ่มขึ้นในการอัดประจุแบตเตอรี่ เมื่อเปรียบเทียบกับการอัดประจุแบตแตอรี่ของระบบพีวี(Photovoltaic System)โดยทั่วไป

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

1. การใช้การปรับตำแหน่งทางกลช่วยให้ปริมาณความเข้มแสงที่ตกกระทบแผงมีค่ามากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับการตั้งมุมแผงคงที่
2. ค่าพลังงานสูญเสียในการหมุนของมอเตอร์เพื่อปรับมุมแผงโซลาร์เซลล์ตามตำแหน่งดวงอาทิตย์นั้นคุ้มค่ากับค่าพลังงานไฟฟ้าที่ได้

3. การใช้ MPPT คอนเวอร์เตอร์ที่มีการป้อนกลับ และมีเงื่อนไขการควบคุมที่ดีช่วยให้การปรับเข้าหาจุด MPP ได้รวดเร็วช่วยให้ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ได้ดีมากยิ่งขึ้น
4. เงื่อนไขการควบคุมดิวตี้ไซเคิลที่ดีครอบคลุมเหตุการณ์ และแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงทางสภาวะ ความเข้มแสง อุณหภูมิ รวมทั้งปัจจัยอื่นที่มีผลต่อการแปลงพลังงานไฟฟ้าของแผงโซลาร์เซลล์สอดคล้องกับสภาวะความต้องการกระแสของโหลดภาระ (แบตเตอรี่) โดยอาศัยการทำงานของ MPPT คอนเวอร์เตอร์ที่มีประสิทธิภาพช่วยให้ได้พลังงานไฟฟ้ามากขึ้น
5. การทำงานร่วมกันของการใช้ MPPT คอนเวอร์เตอร์ร่วมกับการเคลื่อนหมุนแผงพีวีทางกลช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการแปลงพลังงานไฟฟ้า ของระบบดียิ่งขึ้น

1.4 ทฤษฎี หรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

การนำทฤษฎีของวงจรแปลงดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์มาประยุกต์ใช้เป็น MPPT คอนเวอร์เตอร์นั้น ช่วยให้แรงดันที่แผงโซลาร์เซลล์อยู่ในช่วงการทำงานที่ใกล้เคียงกับพิกัดกำลังสูงสุด P_{MAX} ดังแสดงในรูปที่ 1.2 โดยไม่เสียความสามารถในการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดภาระ ข้อมูลในการรักษาระดับแรงดันหรือข้อมูลในการปรับดิวตี้ไซเคิลอาศัยหลักการการวัดปริมาณกระแส และแรงดันของแผงโซลาร์เซลล์ เพื่อป้อนให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ประมวลผล รวมทั้งการวางกระบวนการของโปรแกรม หรืออัลกอริทึม(Algorithm) ที่เหมาะสมสำหรับการนำข้อมูลที่ได้มาแปลงเป็นสัญญาณพัลส์(Pulse)ร่วมกับการติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์ที่มีการเคลื่อนหมุนทางกล โดยอาศัยการทำงานของวงจรควบคุมมอเตอร์กระแสตรงที่รับสัญญาณควบคุมจากไมโครคอนโทรลเลอร์ ให้มีการหมุนได้ 2 ทิศทาง และตรวจหาตำแหน่งของมุมแผงโซลาร์เซลล์โดยการป้อนกลับจากการวัดความสว่าง และความเข้มแสงโดยอาศัย LDR (Light Decrease Resistor) อีกชั้นหนึ่งเพื่อความแม่นยำทางตำแหน่ง และทิศทางการปรับองศาของแผงที่ถูกต้องมากยิ่งขึ้น

จากหลักการดังกล่าวทำให้ระบบสามารถแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าดีขึ้นตามขีดความสามารถที่แผง และสิ่งแวดล้อมในขณะนั้นๆเอื้ออำนวย นอกจากนี้การใช้การเคลื่อนหมุนแผงโซลาร์เซลล์เพื่อปรับมุมแผงทางกลนั้นยังช่วยให้แผงโซลาร์เซลล์ได้รับความเข้มแสงในปริมาณที่มากขึ้นอีกด้วย

1.5 ขอบเขตการวิจัย

1. ออกแบบ และสร้างวงจร MPPT คอนเวอร์เตอร์ที่มีอัลกอริทึมที่เหมาะสมกับระบบพีวีที่มีการเคลื่อนหมุนแผงโซลาร์เซลล์ทางกล

2. ออกแบบ และสร้างชุดปรับตำแหน่งแผงทางกล

3. จัดทำโปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์, ชุดวงจรควบคุม และวงจรรับส่งสัญญาณ ต่างๆ (Interface Circuit)

4. ทำการทดสอบเพื่อหาคุณลักษณะของแผงโซลาร์เซลล์ ที่นำมาใช้ในงานวิจัย

5. ทดสอบเพื่อหาเวลาที่เหมาะสมในการเริ่มต้น และช่วงเวลาในการปรับมุมแผงโซลาร์เซลล์ทางกล

6. ทดสอบเพื่อเปรียบเทียบค่าพลังงานที่เพิ่มขึ้นจากระบบที่มีการปรับมุมแผงทางกล เปรียบเทียบกับการตั้งแผงที่มีมุมเอียงคงที่ โดยใช้วงจรอัดประจุแบตเตอรี่(Battery Charger) ตามปกติเหมือนกัน

7. ทดสอบการแปลงพลังงานไฟฟ้าของระบบพีวีโดยอาศัยวงจร MPPT คอนเวอร์เตอร์ เปรียบเทียบกับระบบพีวีที่ใช้วงจรอัดประจุแบตเตอรี่ (Battery Charger) ตามปกติ

8. ทดสอบการแปลงพลังงานไฟฟ้าของระบบพีวีโดยอาศัยวงจร MPPT คอนเวอร์เตอร์ ร่วมกับการเคลื่อนหมุนแผงโซลาร์เซลล์ทางกล เพื่อหาค่าพลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับการตั้งแผงแบบมีมุมเอียงคงที่ และต่อกับวงจรอัดประจุแบตเตอรี่ตามปกติ

9. วิเคราะห์ และสรุปผล

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

สำหรับขั้นตอนของการศึกษางานวิจัยมีดังนี้

1) ศึกษาค้นคว้าและหาข้อมูลเกี่ยวกับคุณสมบัติ และคุณลักษณะเฉพาะของเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละแบบ แต่ละชนิด ที่มีการใช้งานกันอยู่
2) ศึกษาถึงวิธีการเก็บสะสมพลังงานของระบบพลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ ในรูปแบบการต่อใช้งานต่างๆกัน
3) ทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อหาคุณสมบัติ และคุณลักษณะเฉพาะของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สภาวะการใช้ต่างๆ
4) ทดสอบประสิทธิภาพจริง และองค์ประกอบที่สำคัญต่างๆในการคำนวณค่าการแปลงพลังงานไฟฟ้าของแผงโซลาร์เซลล์ที่นำมาใช้ ตามมาตรฐาน IEEE 1513-2001 ในส่วนของการทดสอบกับแสงจริง(Outdoor Test)
5) เขียนโปรแกรมที่ช่วยในการคำนวณ และประมวลผลจากข้อมูลที่วัดได้ในแต่ละหัวข้อ
6) สังเคราะห์ข้อมูลจาการทดสอบเบื้องต้นทั้งหมดเพื่อใช้ในการออกแบบ และสร้างวงจร MPPT คอนเวอร์เตอร์
7) ออกแบบลายวงจรโดยใช้โปรแกรมเขียนลายวงจร(Protel)เพื่อทำแผ่นลายวงจรสำหรับ MPPT คอนเวอร์เตอร์ และวงจรอื่นๆ

8) เขียนโปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อใช้ในการควบคุม MPPT คอนเวอร์เตอร์ และการปรับตำแหน่งแผงทางกล
9) ทดสอบการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์
10) ทดสอบการทำงานและตรวจสอบการปรับดิวตี้ไซเคิลของวงจรขับมอสเฟต
11) ทดสอบหาประสิทธิภาพคอนเวอร์เตอร์ที่พิกัดกำลังต่างๆ และรูปสัญญาณที่สำคัญ
12) ออกแบบ และสร้างชุดปรับมุมแผงทางกล รวมทั้งทดสอบเพื่อหาความเหมาะสมในการปรับมุมแผงในเงื่อนไขต่างๆ
13) ทดสอบค่าพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากแต่ละระบบ
14) ทดสอบการทำงานร่วมกันของระบบทั้งสอง
15) เปรียบเทียบค่าพลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นเมื่อใช้วงจร MPPT คอนเวอร์เตอร์ร่วมกับการปรับมุมแผงทางกล
16) เขียนโปรแกรมเพื่อช่วยในการคำนวณ และแสดงผล
17) แก้ไข และปรับปรุงระบบให้มีเสถียรภาพรวมทั้งมีความน่าเชื่อถือ สามารถนำไปใช้งานจริงได้อย่างมีประสิทธิภาพ
18) สรุปและวิเคราะห์ผลการดำเนินงานวิจัย พร้อมทั้งนำเสนอผลงาน
19) สรุปผลการดำเนินงานขั้นสุดท้ายของงานวิจัย

บทที่ 2
ระบบจ่ายพลังงานไฟฟ้าด้วยแสงอาทิตย์

2.1 บทนำ

มนุษย์เราได้ใช้ประโยชน์จากพลังงานแสงอาทิตย์มานานแล้ว แต่ส่วนใหญ่จะใช้กันตามธรรมชาติ เช่น ใช้โดยตรงในการตากแห้งเนื้อสัตว์ และผลไม้ หรือการทำเกลือจากน้ำทะเลที่ทำกันในประเทศไทยเป็นต้น นอกจากนี้ยังได้รับประโยชน์จากพลังงานแสงอาทิตย์โดยทางอ้อมเป็นจำนวนมหาศาล กล่าวคือ ก่อให้เกิดพลังงานน้ำ ซึ่งใช้จากการระเหยของน้ำในมหาสมุทร และทำให้เกิดพลังงานลม ซึ่งได้จากการหมุนเวียนของบรรยากาศ เมื่อได้รับความร้อน

ในปัจจุบันแหล่งพลังงานต้นกำเนิดประเภทใช้หมดเปลือง (Fund Energy Source) ที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้มีปริมาณทั้งหมดในโลก เมื่อเปรียบเทียบเป็นพลังงานความร้อน แยกตามชนิดต่าง ๆ ได้ดังนี้

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบปริมาณพลังงานสำรองประเภทต่างๆ เมื่อเทียบเป็นพลังงานความร้อน

ชนิดของพลังงานต้นกำเนิด (Primary Energy)	ปริมาณสำรองที่นำมาใช้ได้คือ เทียบเป็นพลังงานความร้อน (หน่วยเป็น Joules : จูล)
ถ่านหิน	30×10^{21}
ปิโตรเลียม	6×10^{21}
แก๊สธรรมชาติ	5×10^{21}
ยูเรเนียม	2×10^{21}
รวม	43×10^{21}

สำหรับพลังงานแสงอาทิตย์นั้น ประมาณว่าในปีหนึ่ง ๆ จะมีพลังงานที่ผ่านบรรยากาศมาตกกระทบบนผิวโลก (ทั้งพื้นดินและผิวน้ำ) ทั้งหมด $1,000 \times 10^{21}$ จูล ซึ่งมากกว่าปริมาณสำรองของแหล่งพลังงานต้นกำเนิด ทั้งหมดในโลกดังกล่าวข้างต้นประมาณ 23 เท่า จะเห็นว่าโลกเรามีพลังงานรูปนี้ที่จะนำมาใช้ประโยชน์อย่างเหลือเฟือ ถ้าวิวัฒนาการทางด้านเทคนิคได้มีการปรับปรุงให้สามารถทำได้โดยใช้เงินลงทุนน้อยลงและให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น เพราะการที่จะนำเอาพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ประโยชน์อย่างจริงจัง กว้างขวางทั้งในอุตสาหกรรมและครัวเรือนนั้นต้องประสบกับปัญหาต่าง ๆ มากมาย เช่น ทางด้านดินฟ้าอากาศ (Climatically problems) การเก็บเป็นพลังงานสำรองไว้ใช้ รวมทั้งความหนาแน่นของพลังงานที่ได้ ต่อหน่วยพื้นที่ยังมีอัตราที่ต่ำ

(Low Area Density of Energy Incidence) ปัญหาทั้งหมดที่กล่าวนี้ทำให้การลงทุนทั้งพลังงานรูปนี้มาใช้ประโยชน์ยังอยู่ในเกณฑ์สูงมาก[21]

อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าการลงทุนนำพลังงานรูปนี้มาใช้ประโยชน์ยังอยู่ในเกณฑ์สูงมาก แต่ก็เป็นแนวทางเลือกที่คุ้มค่าในอนาคต เพราะเป็นแหล่งพลังงานที่ไม่หมดสิ้น และสามารถนำมาทดแทนพลังงานประเภทน้ำมัน และก๊าซธรรมชาติ ฯลฯ ที่จะหมดไปในอนาคต ทำให้ประเทศที่พัฒนาแล้วหลายประเทศได้พยายามศึกษา วิจัย และทดสอบนำเทคโนโลยีต่าง ๆ มาพัฒนาการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ประโยชน์ ซึ่งพอสรุปแยกประเภทของการนำพลังงานไปใช้ได้ดังนี้

2.1.1 การใช้ประโยชน์เชิงความร้อน (Thermal Application) ซึ่งแยกได้ดังนี้

1) เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์มาเป็นพลังงานความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ เพื่อใช้ต้มน้ำ กลั่นน้ำ และหมุนมอเตอร์ปั๊มน้ำ เป็นต้น
2) เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์มาเป็นพลังงานความร้อนที่อุณหภูมิสูง เพื่อใช้หมุนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า การหุงต้ม และเตาเผา เป็นต้น
3) เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานความร้อนที่อุณหภูมิสูงมาก (Ultra-high Temperature) เพื่อหลอมเหล็ก และอุตสาหกรรมอื่น ๆ เป็นต้น

2.1.2 การใช้ประโยชน์เชิงไฟฟ้าโดยตรง (Direct Electric Conversion)

ได้แก่การเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าโดยผ่านเซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic Generator) ดังเช่น ในยานอวกาศสกายแล็ปจะติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งสามารถให้กำลังไฟฟ้าขนาด 25 kW. เพื่อใช้ในยานอวกาศ และในการสื่อสารส่งมายังโลก

2.1.3 การใช้ประโยชน์เชิงเคมี (Photochemical Conversion)

ได้แก่การผลิตเชื้อเพลิง โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมีของสารอินทรีย์ ปัจจุบันประเทศที่พัฒนาแล้วหลายประเทศได้ทำการวิจัย และพัฒนาการใช้ประโยชน์พลังงานแสงอาทิตย์ดังกล่าวข้างต้น ซึ่งบางอย่างถูกนำมาใช้ในเชิงพาณิชย์แล้ว เช่น เครื่องทำน้ำร้อนแบบ Flat – Plate Collector และ Solar cell สำหรับวัตถุประสงค์เฉพาะอย่างเช่น เครื่องมือสื่อสาร เป็นต้น

ประเทศไทยตั้งอยู่ในเขตที่นับว่า สามารถใช้ประโยชน์จากพลังงานแสงอาทิตย์ได้อย่างดี (latitude 5° - 21° N, longitude 91° - 106° E) แต่การพัฒนาอย่างจริงจังในการแปลงพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ยังมีไม่มากเท่าที่ควร นอกจากใช้ประโยชน์ตามธรรมชาติเท่านั้น เช่น ใช้ในการทำนาเกลือ อบหรือตากผลิตผลทางการเกษตร เช่น ไม้ ผลไม้ เนื้อสัตว์ เป็นต้น ซึ่งเป็นการใช้ประโยชน์ในวงจำกัด

การพัฒนานำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ประโยชน์ให้ได้อย่างจริงจัง และกว้างขวางจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีหน่วยงานปฏิบัติงานและรับผิดชอบโดยตรง ซึ่งในการกำหนดความเหมาะสมในการใช้ประโยชน์ในแต่ละพื้นที่ และฤดูกาลนั้น จำเป็นจะต้องศึกษาข้อมูล เช่น ความเข้มและอัตราเฉลี่ยที่พื้นที่ที่หนึ่งมีพลังงานแสงอาทิตย์ตกกระทบเท่าใดต่อปี เพื่อให้ทราบและจะได้นำไปศึกษาต่อไปว่า ตามสถิติข้อมูลทางพลังงานแสงอาทิตย์ที่เป็นอยู่เหมาะสมที่จะนำไปใช้ประโยชน์ (Application) แบบใดดังที่ประเทศต่าง ๆ กำลังค้นคว้าพัฒนากันอยู่มาใช้ได้ในอนาคต ยกตัวอย่าง เช่น บางพื้นที่ในประเทศไทยอาจมีแสงอาทิตย์เข้ม และปริมาณตกกระทบปานกลาง ซึ่งอาจเหมาะสมสำหรับนำมาใช้ประโยชน์ในทาง High temperature thermal application เช่น ใช้ให้พลังงานความร้อนใน Steam Electric Generator หรือใช้เป็นพลังงานกลหมุนปั๊มน้ำ และถ้ามีปริมาณตกกระทบต่ำ อาจใช้ประโยชน์ในทางต้มน้ำ หรือทำความเย็นภายในบ้านและอาคาร เป็นต้น

2.2 สรุปสถานการณ์ของระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ในปัจจุบัน และการใช้งานในอนาคต

2.2.1 สาระสำคัญของนโยบาย แผน และแนวทางการวิจัยและพัฒนาพลังงานทดแทน : พลังแสงอาทิตย์ พ.ศ. 2540-2544

เทคโนโลยีของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน ส่วนใหญ่เป็นแบบซิลิกอนผลึกเดี่ยว ขณะเดียวกันก็มีการวิจัยและพัฒนาการผลิตเซลล์เพื่อให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นและราคาถูกลง ปัจจุบันอุตสาหกรรมการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ทั่วโลกมีกำลังการผลิตรวมทั้งหมดไม่ต่ำกว่า 100 เมกะวัตต์ต่อปี และคาดว่าในปี พ.ศ. 2553 กำลังผลิตจะเพิ่มเป็น 800 เมกะวัตต์ต่อปี แต่ในกรณีที่ภาวะตลาดเกิดการเปลี่ยนแปลงปัจจัยบางอย่าง เช่น ราคาน้ำมันสูงขึ้น หรือปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อม คาดว่าในปี พ.ศ. 2553 กำลังผลิตจะเพิ่มเป็น 4,000 เมกะวัตต์

เท่าที่รวบรวมได้ขณะนี้มีการติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ทั่วโลกไปแล้วไม่ต่ำกว่า 760 เมกะวัตต์ (ข้อมูลถึงปี พ.ศ. 2538) โดยการติดตั้งขนาดใหญ่ที่สุดคือ 7 เมกะวัตต์ ที่ประเทศสหรัฐอเมริกา

ประเทศไทยอยู่ใกล้เส้นศูนย์สูตร ได้รับพลังงานจากดวงอาทิตย์ค่อนข้างสูงและสม่ำเสมอตลอดปี แต่การวิจัยและพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบันยังคงจำกัดอยู่เฉพาะในสถาบันการศึกษาบางแห่ง สำหรับโรงงานผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ จำนวน 3 แห่ง ที่มีอยู่ในปัจจุบันก็เป็นเพียงผู้นำเข้าเซลล์สำเร็จรูป และวัสดุจากต่างประเทศเพื่อประกอบเป็นแผงเท่านั้น โรงงานทั้ง 3 แห่ง มีกำลังผลิตประมาณ 3,000 กิโลวัตต์/ปี

ในด้านการใช้งานมีการติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ทั่วประเทศไปแล้วทั้งหมดประมาณ 3,700 กิโลวัตต์ ซึ่งมากกว่า 85% จำกัดอยู่ในส่วนของราชการและรัฐวิสาหกิจ

ปัญหาและอุปสรรคสำคัญของการใช้ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ในประเทศ คือ ขาดมาตรการจูงใจในด้านการลดหย่อนภาษีที่จะให้มีการผลิตอุปกรณ์และการใช้พลังงานทดแทน ถึงแม้การใช้ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ในหลายกรณีจะมีการคุ้มทุนในระยะยาวก็ตาม แต่ก็ยังได้รับความสนใจน้อย เนื่องจากการลงทุนขั้นต้นสูงและไม่มีมาตรการจูงใจ

โดยเหตุที่ระบบเซลล์แสงอาทิตย์สามารถติดตั้งและใช้งานได้ง่าย รวมทั้งมีขนาดที่ยืดหยุ่นตามความต้องการของผู้ใช้ จึงควรเป็นทางเลือกทางหนึ่งสำหรับการพัฒนาชนบทให้มีความเป็นอยู่และรายได้ดีขึ้น โดยสามารถใช้ในการสูบน้ำเพื่อการอุปโภคบริโภค และการสูบน้ำเพื่อบรรเทาปัญหาภัยแล้งที่อาจเกิดขึ้นได้ โดยเฉพาะในชนบทที่อยู่ห่างไกลและกันดาร นอกจากนั้นยังเป็นทางเลือกที่สำคัญในการผลิตไฟฟ้าเพื่อแสงสว่างสำหรับหมู่บ้านในชนบทและชุมชนที่มีความต้องการไฟฟ้าในปริมาณต่ำ (ปีละไม่กี่หมื่นยูนิต) นอกเหนือจากใช้กับระบบโทรคมนาคม และระบบวิทยุเพื่อการศึกษาในชนบท

จากศตวรรษที่ 21 เป็นต้นไปมีเหตุผลให้เชื่อได้ว่าจะมีการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ให้มีราคาการลงทุนใกล้เคียงโรงไฟฟ้าพลังความร้อน เนื่องจากราคาของเชื้อเพลิงจะสูงขึ้น และมาตรการทางมลภาวะจะเข้มงวดขึ้น การผลิตไฟฟ้าจากระบบเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดใหญ่ในเชิงพาณิชย์จะเป็นทางเลือกที่ดี และมีการใช้งานมากขึ้นในอนาคต โดยมีแนวทางในการวิจัยพัฒนาและสาธิตเซลล์แสงอาทิตย์ระหว่างช่วงปี พ.ศ. 2540-2544 มีดังนี้

1) แผนการวิจัยและพัฒนาการผลิตตัวเซลล์แสงอาทิตย์
2) แผนการวิจัยและพัฒนาระบบเซลล์แสงอาทิตย์
3) แผนการวิจัยและสาธิตการใช้งานระบบเซลล์แสงอาทิตย์และอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง
4) แผนการนำเซลล์แสงอาทิตย์ไปใช้ประโยชน์
5) แผนการส่งเสริมอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับงานด้านเซลล์แสงอาทิตย์ในประเทศ
6) แผนการพัฒนาบุคลากร
7) แผนงานส่งเสริม เผยแพร่และแลกเปลี่ยนข้อมูล/เทคโนโลยี
8) แผนการแก้ไขปรับเปลี่ยนกฎหมายและระเบียบสำหรับรองรับการใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์

โดยมีนโยบาย เพื่อส่งเสริมภาครัฐบาลและเอกชนให้มีการวิจัย พัฒนา สาธิต และผลิตตลอดจนการนำเซลล์แสงอาทิตย์ไปใช้ประโยชน์ให้เกิดขึ้นอย่างกว้างขวาง เนื่องจากแสงอาทิตย์เป็นพลังงานคืนรูปที่สะอาดไม่มีมลภาวะ และเป็นการลดการพึ่งพาการใช้เชื้อเพลิงจากฟอสซิลในอนาคต

2.2.2 นโยบาย แผน และสถานภาพของการวิจัยพัฒนาและการใช้เซลล์แสงอาทิตย์

จากวิกฤตการณ์ด้านพลังงานตั้งแต่ปี พ.ศ. 2516 เป็นต้นมา ได้มีการศึกษาและวิจัยการพัฒนาแหล่งพลังงานทดแทนกันอย่างต่อเนื่อง ซึ่งรวมถึงพลังงานแสงอาทิตย์ และจากปี พ.ศ. 2534 ทั่วโลกเริ่มตระหนักถึงปัญหามลภาวะที่เกิดขึ้นซึ่งเป็นการช่วยกระตุ้นการพัฒนาหาแหล่งพลังงานที่สะอาด เพื่อทดแทนการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลในการผลิตไฟฟ้าในบางส่วน การผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์นับเป็นทางเลือกที่เหมาะสมทางหนึ่ง เนื่องจากเป็นการนำพลังงานธรรมชาติที่ปราศจากมลภาวะและมีอยู่อย่างมหาศาลมาใช้ให้เกิดประโยชน์

การผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์มีจุดเด่น และมีความสำคัญแตกต่างจากวิธีอื่นหลายประการดังต่อไปนี้

1) ไม่มีการเผาไหม้ จึงไม่ก่อให้เกิดมลภาวะด้านอากาศ และน้ำ
2) ไม่มีการเคลื่อนไหวในขณะใช้งาน จึงไม่ก่อให้เกิดมลภาวะด้านเสียง
3) เป็นลักษณะโมดูลที่สามารถประกอบได้ตามขนาดที่ต้องการ
4) เป็นการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ที่มีอยู่ในธรรมชาติและไม่หมดสิ้นให้เกิดประโยชน์
5) ผลิตไฟฟ้าได้ทุกแห่งแม้บนเกาะเล็ก ๆ กลางทะเล บนยอดเขา และในอวกาศ
6) ประหยัดค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับระบบจ่ายไฟฟ้า
7) ได้พลังงานไฟฟ้าโดยตรง จากการแปลงพลังงานจากแสงอาทิตย์
8) ช่วยให้ประชากรที่อยู่ในพื้นที่ห่างไกลมีไฟฟ้าใช้อย่างทั่วถึง เป็นการปูพื้นฐานเทคโนโลยีที่สำคัญที่สุดอย่างหนึ่งในศตวรรษที่ 21

2.2.3 สถานภาพและแนวโน้ม

2.2.3.1 สถานภาพของการวิจัย พัฒนา และการใช้เซลล์แสงอาทิตย์

สถานภาพในต่างประเทศ

ปัจจุบันเทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตเป็นเชิงการค้าส่วนใหญ่เป็นแบบซิลิกอนแบบผลึกเดียว (Single Crystalline) และผลึกโพลี (Poly Crystalline) รวมกำลังผลิตทั่วโลกไม่ต่ำกว่า 100 เมกะวัตต์ต่อปี ผู้เกี่ยวข้องได้ให้ความสนใจและพยายามทำการวิจัยตลอดจนพัฒนาการผลิตให้ได้เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีราคาถูกและมีประสิทธิภาพเพื่อขยายตลาดของเซลล์ให้กว้างขวางขึ้น
งานต่าง ๆ ที่ดำเนินการอยู่มีหลายด้านอาทิ :-

เทคโนโลยีแบบซิลิกอนขณะนี้มีการทำวิจัยเพื่อลดต้นทุนการผลิต อันได้แก่ขั้นตอนการเตรียมวัสดุแบบต้นทุนต่ำ เช่น การผลิตแบบผลึกโพลี หรือริบบอนซิลิกอน (หรือเทคโนโลยีที่ใกล้เคียง เช่น Dendritic Web แทนผลึกเดี่ยว นอกจากนี้การผลิตแบบปริมาณมากก็สามารถลดต้นทุนได้อีกด้วย

เทคโนโลยีการผลิตเซลล์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิกอน(Amorphous Silicon) เป็นเทคโนโลยีที่ได้รับความสนใจมาก เพราะเป็นเซลล์ที่คาดว่าสามารถผลิตให้มีราคาถูกที่สุด ปัจจุบันอยู่ในขั้นการพัฒนาให้มีประสิทธิภาพที่ถาวรและสูงขึ้น

เทคโนโลยีที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพอีกแบบหนึ่งซึ่งมีการวิจัยและพัฒนาอย่างกว้างขวาง คือ Multi junction Thin-Film นอกจากนี้ยังมีการศึกษาและวิจัยวัสดุสารประกอบกึ่งตัวนำอย่างอื่นที่จะนำมาใช้ทำเซลล์แสงอาทิตย์ เช่น Cadmium Telluride, Copper Indium Diselenide และ Gallium Arsenide เป็นต้น[23]

มีการติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ไปแล้วทั่วโลกไม่ต่ำกว่า 760 เมกะวัตต์ การติดตั้งที่ขนาดใหญ่ที่สุดในโลก คือ 7,000 กิโลวัตต์ ที่ San Louis รัฐแคลิฟอร์เนีย สหรัฐอเมริกา และ 2,000 กิโลวัตต์ ที่ Saijo ประเทศญี่ปุ่น ตามลำดับ

สถานภาพในประเทศ

1) สถาบันการศึกษา

ประเทศไทยมีสถาบันการศึกษา 4 แห่ง ที่ทำการศึกษาวิจัยและพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ปัจจุบัน คือ ห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ได้ทำการวิจัยการผลิตเซลล์แบบผลึกเดี่ยว และผลึกโพลีซิลิกอนมาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2521 สถาบันการศึกษาอีก 3 แห่ง ได้แก่ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย มีอุปกรณ์หรือห้องทดลองในการทดสอบแผงและระบบ นอกจากนี้สถาบันการศึกษาทั้งหมดดังกล่าว ยังมีโครงการวิจัยและพัฒนาเกี่ยวกับการใช้ประโยชน์จากระบบเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดเล็กอีกด้วย เช่น ใช้ในการสูบน้ำเพื่ออุปโภคและบริโภค และเพื่อการเกษตร ให้แสงสว่าง ดักแมลง และใช้สำหรับตู้เย็น (เก็บวัคซีน) เป็นต้น

2) โรงงานประกอบเซลล์แสงอาทิตย์

โรงงานประกอบเซลล์แสงอาทิตย์ในประเทศมีอยู่ด้วยกัน 3 แห่ง โดยร่วมกับบริษัทต่างประเทศในลักษณะของการร่วมทุน และการให้ความช่วยเหลือทางด้านเทคโนโลยี โดยได้รับการสนับสนุนจากสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมการลงทุน การผลิตโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ของโรงงานทั้ง 3 แห่ง ดังกล่าว ใช้เซลล์แสงอาทิตย์สำเร็จรูป และวัสดุองค์ประกอบส่วนใหญ่ที่นำเข้าจากต่างประเทศ

ถึงแม้ว่าความสามารถในการผลิตรวมทั้งหมดในประเทศจะมีปริมาณ 3,000 กิโลวัตต์ต่อปี ก็ตาม แต่ความต้องการของตลาดในประเทศก็ยังมีไม่มากนัก และการส่งออกก็มีเพียงเล็กน้อย จึงทำให้ต้องผลิตเป็นช่วง ๆ ตามความต้องการของตลาดเท่านั้น อย่างไรก็ตามในช่วงปี พ.ศ. 2535 นี้ ผลสืบเนื่องจากโครงการอีสานเขียวทำให้บริษัทผู้ผลิตในประเทศจำนวนสองแห่งมียอดขายเพิ่มขึ้นสูงมาก

3) ตลาดเซลล์แสงอาทิตย์

สำหรับตลาดในประเทศเท่าที่ผ่านมาส่วนใหญ่เป็นหน่วยงานราชการ และรัฐวิสาหกิจ ซึ่งมีอยู่ประมาณ 85% อีก 1% เป็นของมหาวิทยาลัย และวิทยาลัย นอกนั้นเป็นตลาดเอกชน ยอดรวมติดตั้งทั้งหมดภายในประเทศจนถึงปี พ.ศ. 2539 มีประมาณ 3,700 กิโลวัตต์

2.2.3.2 แนวโน้มของการวิจัย พัฒนา และการใช้เซลล์แสงอาทิตย์

แนวโน้มในต่างประเทศ

1) สหรัฐอเมริกา

สหรัฐอเมริกาเป็นประเทศที่ใช้พลังงานมากที่สุดในโลก และเป็นประเทศที่มีความกว้างขวางทั้งทางด้านการวิจัย การผลิต และการใช้งาน ปัจจัยสำคัญที่ทำให้อุตสาหกรรมเซลล์แสงอาทิตย์ของสหรัฐอเมริกาก้าวไปไกลสืบเนื่องมาจากการที่มีแผนและนโยบายที่มีเป้าหมายอย่างแน่ชัดที่จะลดราคาเซลล์แสงอาทิตย์ให้ถูกลง เพื่อแข่งขันกับราคาไฟฟ้าในตลาดปัจจุบัน โดยกระทรวงการพลังงาน (Department of Energy, DOE) เป็นผู้รับผิดชอบโดยตรงต่อการวางนโยบายการผลิตพลังงานทดแทนต่าง ๆ โดยมอบหน้าที่ให้ Solar Energy Research Institute (SERI) เป็นผู้วางแผนและทำวิจัยพื้นฐานเกี่ยวกับพลังงานแสงอาทิตย์ และ Jet Propulsion Laboratories (JPL) เป็นผู้ทำวิจัยเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์ นอกจากนี้ยังมีภาคเอกชนและรัฐวิสาหกิจเข้ามามีบทบาทร่วมด้วย โดยอัตราส่วนของงบประมาณที่ใช้มาจากภาครัฐบาล และภาคเอกชนประมาณ 50 ต่อ 50

สำหรับเป้าหมายในอนาคตระหว่างปี พ.ศ. 2538-2543 มีแผนการที่จะติดตั้งโรงไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ให้มีกำลังผลิตระหว่าง 200-1,000 เมกะวัตต์ และพัฒนาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ให้ได้ถึง 10-20% นอกจากนี้แผนระยะยาว (ระหว่างปี พ.ศ. 2553-2573) มีเป้าหมายที่จะเพิ่มประสิทธิภาพเป็น 15-25% และจะให้มีกำลังผลิตติดตั้งประมาณ 1,000-15,000 เมกะวัตต์ คาดว่าราคาค่ากระแสไฟฟ้าที่ผลิตจากระบบนี้จะลดลงด้วยเช่นกัน

2) ญี่ปุ่น

ญี่ปุ่นซึ่งนับเป็นประเทศที่ได้รับความสำเร็จในด้านการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์มากที่สุด ได้จัดทำ Sunshine Project ขึ้นเพื่อให้เป็นแกนกลางการวิจัยพลังงานทดแทน ซึ่งมีพลังงานแสงอาทิตย์เป็นหลัก เมื่อปี พ.ศ. 2524 ได้จัดตั้งองค์การ New Energy Development Organization (NEDO หรือ New Energy & Industrial Technology Development Organization ในปัจจุบัน) ขึ้นรับผิดชอบ Sunshine Project โดยตรง มีหน่วยงานที่เข้าร่วมโครงการ ซึ่งมีทั้งสถาบันการศึกษาระดับมหาวิทยาลัย องค์การวิจัยของรัฐ/บริษัทเอกชนกว่า 20 แห่ง และบริษัทผลิตไฟฟ้าชั้นนำในประเทศญี่ปุ่น 8 แห่ง มีการตั้งเป้าหมายการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งหมดให้ได้ไม่ต่ำกว่า 2,000 กิโลวัตต์ ระหว่างปี พ.ศ. 2534-2538

NEDO คาดว่าต้นทุนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์จะลดลงเรื่อย ๆ จนมีความคุ้มค่าในการลงทุนเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้เครื่องยนต์ดีเซลในพื้นที่ห่างไกล เช่น เกาะ และภูเขา สำหรับเป้าหมายระยะยาว NEDO จะส่งเสริมการวิจัยเพื่อลดต้นทุนการผลิตลงให้เหลือ 20-40 บาทต่อวัตต์ ซึ่งจะสามารถแข่งขันได้กับการผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าขนาดใหญ่ทั่วไป

3) ประเทศอื่น ๆ

ในยุโรปตะวันตกมีหลายประเทศที่มีการวิจัย พัฒนา ผลิต และติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์เป็นจำนวนไม่น้อยเช่นกัน เช่น เยอรมนี อิตาลี ฝรั่งเศส สหราชอาณาจักร เป็นต้น ในทวีปเอเชียนอกจากประเทศญี่ปุ่นแล้วยังมีประเทศสาธารณรัฐประชาชนจีน และอินเดีย ซึ่งผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ใช้ในประเทศเป็นส่วนใหญ่อีกด้วย

ประเทศที่กำลังพัฒนาอีกหลาย ๆ ประเทศในทวีปแอฟริกา และเอเชีย มีการติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ใช้งานขนาดเล็ก ซึ่งยังไม่สามารถรวบรวมเป็นตัวเลขอีกเป็นจำนวนมาก ซึ่งส่วนใหญ่จะได้รับความช่วยเหลือจากประเทศอุตสาหกรรม

4) แนวโน้มด้านการผลิต

ระหว่างปี พ.ศ. 2543-2553 คาดว่าอุตสาหกรรมการผลิตแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั่วโลกจะมีการขยายเพิ่มขึ้นอีกประมาณ 190-800 เมกะวัตต์ต่อปี ซึ่งจะเพิ่มขึ้นประมาณ 2-8 เท่าของกำลังผลิตในปัจจุบัน และมากกว่า 50% ของการผลิตนี้เป็นของสหรัฐอเมริกา โดยเฉพาะอย่างยิ่งบริษัท Texas Instruments, Inc. ที่สร้างโรงงานผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Spherical Silicon ขนาด 15-20 เมกะวัตต์ต่อ

แนวโน้มในประเทศ

ประเทศไทยยังไม่มีหน่วยงานใดของรัฐบาลที่จัดสรรงบประมาณ เพื่อการทำวิจัยและพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์โดยตรง ดังเช่น SERI ในประเทศสหรัฐอเมริกาหรือ NEDO ในประเทศญี่ปุ่น และอุตสาหกรรมเซลล์แสงอาทิตย์ในประเทศไทยมีลักษณะเป็นการนำเข้าเซลล์แสงอาทิตย์จากต่างประเทศเพื่อนำมาประกอบและจำหน่าย

ในขณะที่พื้นที่ชนบทยังมีหมู่บ้านอีกจำนวนเกือบ 2,000 แห่ง (คิดเป็นประมาณ 5% ของหมู่บ้านทั้งหมดทั่วประเทศ) ที่ระบบจำหน่ายไฟฟ้ายังขยายไปไม่ถึง หากต้องการขยายระบบจำหน่ายไฟฟ้าให้ทั่วถึงครบทุกหมู่บ้านตามแผนการพัฒนาตามปกติจะใช้เวลามาก และเงินลงทุนสูง โดยเฉพาะหมู่บ้านเล็ก ๆ ในถิ่นทุรกันดารและอยู่ห่างไกล

โดยที่ประเทศไทยอยู่ใกล้เส้นศูนย์สูตร สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เฉลี่ยต่อวันได้สูงถึง 165,000 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อตารางกิโลเมตร ถ้าจะใช้เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตไฟฟ้าสนองความต้องการไฟฟ้าปัจจุบันทั่วประเทศในขณะนี้จะใช้พื้นที่ติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ประมาณ 1,000 ตารางกิโลเมตร เท่านั้น ในขณะที่การผลิตไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงฟอสซิลมี

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมและมีปริมาณแหล่งพลังงานฟอสซิลในประเทศสำรองจำกัด และคงจะต้องนำเข้าเพื่อสนองความต้องการไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นในอนาคตอันใกล้นี้

ตั้งแต่ปี พ.ศ.2536 เป็นต้นมา ประเทศไทยประสบปัญหาภัยแล้งซ้ำซากมาอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นการพัฒนาชนบทให้มีคุณภาพชีวิตที่ดีขึ้นตามนโยบายการขยายความเจริญสู่ชนบทของรัฐบาล และเพื่อบรรเทาปัญหาภัยแล้งนั้น การใช้เทคโนโลยีที่มีอยู่เดิมจะล่าช้าและขยายไปได้ไม่ทั่วถึง โดยเฉพาะอย่างยิ่งชนบทที่อยู่ห่างไกลในเขตทุรกันดารและแห้งแล้ง ซึ่งต้องการความช่วยเหลือในการพัฒนามากที่สุด เมื่อพิจารณาประกอบกับปัจจัยพื้นฐานอื่น ๆ ในประเทศแล้ว การสนับสนุนการใช้พลังงานแสงอาทิตย์เพื่อผลิตไฟฟ้าควรเริ่มและเป็นไปตามแนวทางต่อไปนี้

- สนับสนุนการติดตั้งระบบไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในหมู่บ้านชนบทห่างไกล เพื่อใช้กับระบบแสงสว่าง ระบบสูบน้ำขนาดเล็ก โทรทัศน์ ระบบสาธารณูปโภคขั้นพื้นฐานให้มากยิ่งขึ้น
- ให้ความสำคัญต่ออุตสาหกรรมการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ แบตเตอรี่ และอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องเพื่อรองรับความต้องการภายในประเทศ และประเทศกลุ่มอินโดจีน และอาเซียน ซึ่งกำลังต้องการไฟฟ้าเพื่อพัฒนาชนบท
- สาธิต ติดตั้งระบบไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดเล็ก (1-5 กิโลวัตต์) แบบต่อเข้าระบบสำหรับบ้านที่อยู่อาศัยเพื่อจำหน่ายไฟฟ้าส่วนเหลือใช้เข้าระบบจำหน่ายในลักษณะเดียวกับ Co-generation ซึ่งคาดว่าจะมีความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์
- สาธิตติดตั้งระบบไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดใหญ่ (1-10 เมกะวัตต์) แบบต่อเข้าระบบเพื่อใช้งานในลักษณะ Peak Shaving ในตอนกลางวัน
- ส่งเสริมการค้นคว้าวิจัยให้กว้างขวาง และต่อเนื่องสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อให้มีเทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพสูงยิ่งขึ้น และราคาถูกลงด้วย

นับว่าเป็นโอกาสอันดีที่จะส่งเสริมการใช้เซลล์แสงอาทิตย์ให้กว้างขวางขึ้น โดยควรมีแผนดำเนินการทั้งระยะสั้นและระยะยาวดังนี้

แผนระยะสั้น

1) เสนอรัฐบาลให้มีมาตรการจูงใจ เช่น การลดภาษีนำเข้า หรือนำมาลดหย่อนภาษีเมื่อมีการใช้ระบบเซลล์แสงอาทิตย์
2) สาธิตและเผยแพร่การใช้ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ให้กว้างขวางขึ้น และสนับสนุนให้มีการร่วมมือในการติดตั้งอุปกรณ์บันทึกข้อมูล
3) ศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ ในหมู่บ้านชนบทห่างไกลที่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคขยายสายส่งไฟฟ้าไปไม่ถึง
4) ศึกษาเทคโนโลยีที่เหมาะสม เพื่อการประยุกต์ใช้งานในรูปแบบใหม่ ๆ เพิ่มขึ้น

50948

แผนระยะยาว

ในแง่ของการจัดสรรงบประมาณเพื่อใช้ในการดำเนินมาตรการต่าง ๆ มีความจำเป็นที่จะต้องได้รับการช่วยเหลือและสนับสนุนจากรัฐบาลและหน่วยงานที่เกี่ยวข้องเป็นอย่างมาก

1) ส่งเสริมการวิจัยให้กับทางภาครัฐบาลและเอกชนในการผลิตเซลล์ และอุปกรณ์ประกอบขึ้นในประเทศ ซึ่งจะส่งผลให้ราคาของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ ถูกลง
2) ส่งเสริมการตลาด สนับสนุนให้มีการใช้งานอย่างแพร่หลาย โดยกำหนดให้หน่วยงานรัฐบาลเป็นแกนนำในการส่งเสริมการใช้ ซึ่งหากราคาของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ถูกลงจะเป็นการส่งเสริมมาตรการประหยัดไฟฟ้าได้อีกทางหนึ่ง
3) ส่งเสริมให้มีการใช้งานอย่างจริงจังในชนบท เพื่อทดแทนการเดินสายส่งเข้าไป ซึ่งจะต้องเสียค่าใช้จ่ายสูง

2.2.4 ปัญหาในการพัฒนา และแนวทางแก้ไข

ด้านกำลังคน

ปัจจุบันประเทศไทยอยู่ในช่วงการเปลี่ยนแปลงเศรษฐกิจและสังคมอย่างเด่นชัด ปัญหาทางด้านบุคลากรซึ่งมีจำนวนจำกัดเป็นอุปสรรคต่อการดำเนินกิจการในทุกสาขาอย่างไม่อาจปฏิเสธได้ แต่การวิจัยทางด้านระบบเซลล์แสงอาทิตย์ปัจจุบันดำเนินการอยู่ในกลุ่มของบุคลากรซึ่งมีความสนใจเป็นพิเศษในสถาบันการศึกษาเพียงไม่กี่แห่ง หากรัฐบาลได้เพิ่มสิ่งจูงใจให้เกิดขึ้นแล้ว คาดว่าบุคลากรซึ่งมีความสามารถจะหันมาให้ความสนใจมากขึ้น

ด้านงบประมาณ

ที่ผ่านมาในแต่ละปี การจัดสรรงบประมาณให้มีการวิจัย พัฒนา และสาธิตการใช้งานยังไม่ได้รับการสนับสนุนจากทางรัฐบาลและหน่วยงานที่เกี่ยวข้องเท่าที่ควร ดังนั้นรัฐบาลและหน่วยงานต่างๆ ที่เกี่ยวข้องควรมีการจัดสรรงบประมาณเพื่อการนี้โดยเฉพาะ

การถ่ายทอดเทคโนโลยีสู่ชนบท

การนำเทคโนโลยีเข้ามาและการรับการถ่ายทอดเทคโนโลยีจะเป็นวิธีที่ช่วยให้ประหยัดเวลาในการวิจัยและพัฒนา การแลกเปลี่ยนความคิดเห็นและประสบการณ์ในหมู่นักวิจัยด้วยกัน ทั้งในภาครัฐบาลและเอกชนจะช่วยให้การวิจัยและพัฒนาดำเนินไปในแนวทางที่ถูกต้อง จึงควรที่จะมีการขอรับความช่วยเหลือจากองค์การระหว่างประเทศในการจัดฝึกอบรม/สัมมนา/ดูงาน ให้กับผู้วิจัยโดยตรง

มาตรการการเงินการคลัง

แม้ว่าการใช้ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ในหลายกรณีจะมีความคุ้มทุนในระยะยาวดีกว่าระบบการผลิตไฟฟ้าซึ่งใช้อยู่ในปัจจุบัน แต่ยังไม่ได้รับความสนใจโดยทั่วไปเนื่องจากค่าลงทุนขั้นต้นของระบบเซลล์แสงอาทิตย์สูงกว่ามาก จึงควรได้รับการสนับสนุน/การจูงใจในรูปแบบต่างๆ จากรัฐบาล

เช่น การลดหย่อนภาษีแก่ผู้ประกอบการ การลดภาษีเงินได้แก่ผู้ใช้งานระบบเซลล์แสงอาทิตย์ สนับสนุนเงินทุนบางส่วน ซึ่งเป็นแนวทางที่ต่างประเทศนำมาใช้อย่างได้ผลแล้ว รวมทั้งการสนับสนุนด้านเงินทุนบางส่วน

เนื่องจากระบบเซลล์แสงอาทิตย์เป็นเทคโนโลยีค่อนข้างใหม่ และยังมีแนวทางสำหรับการวิจัยและพัฒนาอีกมาก จึงสามารถจัดลำดับความสำคัญให้มีการทำวิจัยพื้นฐานอันจะนำมาสู่การผลิตระบบเซลล์ที่มีราคาถูก และมีประสิทธิภาพสูงในอนาคตเป็นอันดับหนึ่ง

ลำดับรองลงมา ควรสนับสนุนให้มีการติดตามและประเมินผลของงานระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้ติดตั้งไปแล้ว ซึ่งรวมถึงการเก็บข้อมูลทางเทคนิคด้วยเครื่องบันทึกข้อมูล การเก็บข้อมูลความเป็นอยู่ และข้อคิดเห็นของประชาชนผู้ใช้ ตลอดจนข้อมูลผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง เป็นต้น เพื่อนำมาวิเคราะห์และประเมินผล อันจะเป็นประโยชน์ต่อการวิจัยและพัฒนาในอนาคต

สำหรับงานสาธิต การติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อใช้งานในรูปแบบต่าง ๆ ตามความเหมาะสมของประเทศ รวมทั้งการพัฒนาบุคลากร อันจะเป็นการส่งเสริมการใช้พลังงานที่สะอาด ช่วยเพิ่มรายได้และคุณภาพชีวิต อีกทั้งยังเป็นการทดแทนการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลในอนาคต ก็ควรได้รับการสนับสนุนเช่นกัน

ผลที่คาดว่าจะได้รับจากการพัฒนาอันจะเกิดประโยชน์ต่อประเทศชาติโดยรวมเป็นดังนี้

- ระดับประเทศ

  หากมีการใช้ประโยชน์จากระบบเซลล์แสงอาทิตย์อย่างจริงจังแล้ว ตามแนวโน้มการใช้ตามโครงการที่จะเกิดขึ้นรวมกำลังผลิตประมาณ 7,960 กิโลวัตต์ คาดว่าจะเกิดผลดีดังนี้

  - ลดการนำเข้าน้ำมันเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้าลงได้ประมาณ 4.38 ล้านลิตร/ปี
  - ช่วยลดมลพิษ CO_2 ประมาณ 1,000-12,000 ตัน/ปี
  - ช่วยลด SO_2 ประมาณ 625-716 ตัน/ปี

- ระดับหมู่บ้าน

  เป็นการช่วยพัฒนาชนบทให้มีความเป็นอยู่และรายได้ดีขึ้น และเป็นการช่วยบรรเทาปัญหาภัยแล้งได้อีกทางหนึ่งด้วย โดยเฉพาะในชนบทที่ห่างไกล

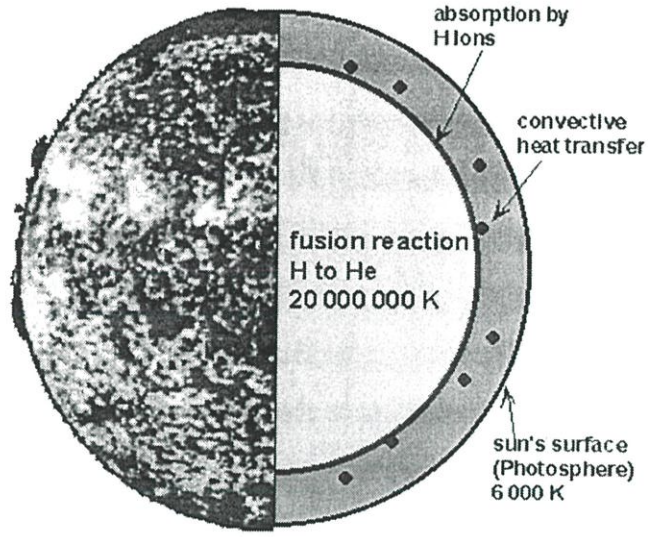
- ระดับผู้ประกอบการ

  เป็นการก่อให้เกิดพื้นฐานด้านอุตสาหกรรมการผลิตระบบเซลล์แสงอาทิตย์ขึ้นในประเทศ อันจะก้าวไปสู่การส่งออก โดยเฉพาะประเทศกลุ่มอินโดจีน และอาเซียน ซึ่งเป็นการสร้างงานได้อีกทางหนึ่ง

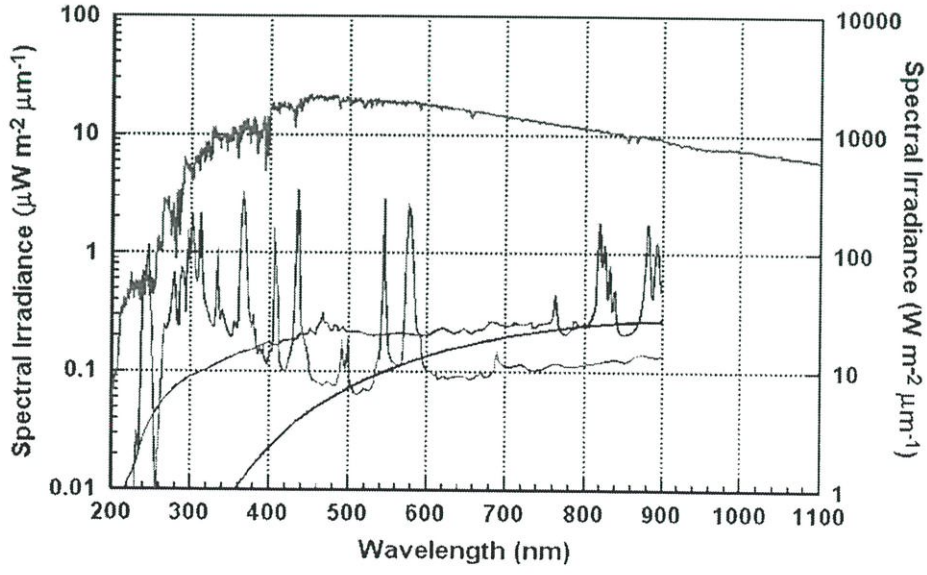
2.3 การวิเคราะห์รังสีแสงอาทิตย์

2.3.1 การศึกษาข้อมูลพลังงานแสงอาทิตย์

ดวงอาทิตย์เป็นแหล่งกำเนิดของพลังงานมหาศาล และสำคัญที่สุดของมวลมนุษย์ โดยมีโครงสร้าง และสเปกตรัมของรังสีแสงอาทิตย์ เป็นดังรูปที่ 2.1 และ รูปที่ 2.2 ตามลำดับ เทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์เป็นเทคโนโลยีหนึ่ง ซึ่งสามารถเปลี่ยนรังสีดวงอาทิตย์เป็นกระแสไฟฟ้าได้โดยตรง ปราศจากการเผาไหม้และการเคลื่อนไหวอันจะก่อให้เกิดมลภาวะต่าง ๆ



รูปที่ 2.1 องค์ประกอบของดวงอาทิตย์



รูปที่ 2.2 สเปกตรัมของรังสีแสงอาทิตย์ในแต่ละช่วงความยาวคลื่น

การศึกษาข้อมูลพลังงานแสงอาทิตย์นั้นอาจแบ่งแยกประเภทได้ตามวัตถุประสงค์และชนิดของเครื่องมือ ดังนี้

1) ศึกษาทางด้านอุตุนิยมวิทยา และอุทกวิทยา โดยใช้เครื่องบันทึกช่วงเวลาที่มีแดด (Sunshine Duration Recorder)

2) ศึกษาทางด้านการนำมาใช้ประโยชน์ทางพลังงาน โดยใช้เครื่องมือวัดและบันทึกอัตราตกกระทบของรังสี ประเภท Pyranometer, Solarimeter และ Actinometer ซึ่งแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ Mechanical Type (Bimetallic) และ Thermoelectric Type

อย่างไรก็ตามในการใช้เครื่องมือเพื่อศึกษาตามวัตถุประสงค์ในข้อ 2 นั้น ก็จะสามารถให้ข้อมูล เพื่อการศึกษาตามวัตถุประสงค์ในข้อ 1 ได้อย่างดีด้วย สำหรับประเทศไทยนั้น กรมอุตุนิยมวิทยาได้มีข่ายการวัดหาข้อมูลของแสงอาทิตย์ โดยติดตั้งเครื่องมือแบบ Solarimeter 2 เครื่อง ที่กรุงเทพฯ และเชียงใหม่ แต่ข้อมูลจากการวัดและบันทึกได้ใช้ไปเพื่อประโยชน์ทางอุตุนิยมวิทยาเท่านั้น อย่างไรก็ดีสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเซีย ได้เคยพยายามศึกษาการกระจายรังสีพลังงานแสงอาทิตย์ในประเทศไทยโดยใช้การคำนวณประมาณค่าจากข้อมูลที่ได้จาก Sunshine recorder ของกรมอุตุนิยมวิทยา ดังปรากฏในรายงาน "The availability of solar Energy in Thailand" February 1976 by Dr.R.H.B. Excell ซึ่งค่าประมาณที่คำนวณได้ในจังหวัดต่าง ๆ เช่น เชียงราย เป็นสถานีที่มีเครื่องวัด และบันทึกจริงของสำนักงานพลังงานแห่งชาติติดตั้งอยู่ เมื่อนำมาเปรียบเทียบกันแล้ว ค่าที่คำนวณได้ในรายงานจะมีค่าสูงกว่าค่าที่วัดได้จริงโดยเฉลี่ยทั้งปีถึงร้อยละ 17 ฉะนั้นเพื่อศึกษาความเหมาะสมที่จะนำแหล่งพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ประโยชน์ในด้านพลังงานอย่างจริงจัง ซึ่งมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีข่ายการวัด (Measuring Network) เพื่อข้อมูลที่แท้จริง ด้านการตกกระทบของรังสีพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar energy radiation) ด้วยเครื่องมือดังกล่าวในข้อ 2

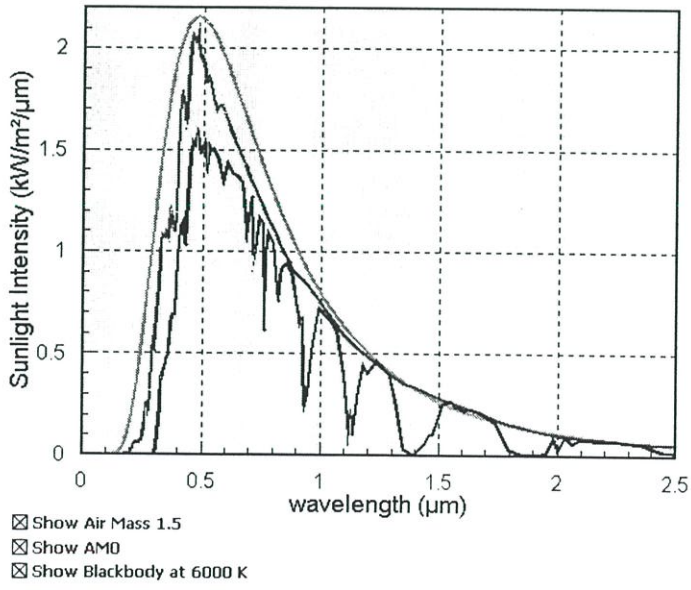
จากเหตุผลดังกล่าวสำนักงานพลังงานแห่งชาติ จึงได้จัดตั้งเครือข่ายการวัดเพื่อศึกษาข้อมูลด้านการกระจายรังสีพลังงานแสงอาทิตย์ภายในประเทศ โดยในระยะเริ่มแรกได้ทำการติดตั้ง สถานีวัดและบันทึกพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยเครื่องมือวัด และบันทึกแบบ Mechanical Pyranograph "bi-metallic" โดยติดตั้งเครื่องวัดฯ เหนือระดับพื้นดินประมาณ 1.30 เมตร ซึ่งในปี 2518 ได้ติดตั้งและวัดข้อมูลพลังงานแสงอาทิตย์จำนวน 4 สถานี ที่กรุงเทพฯ อุบลราชธานี อุดรธานี และเชียงราย ส่วนในปี 2519 ได้ติดตั้งเครื่องวัดหาข้อมูลอีกจำนวน 3 สถานี ที่จังหวัดสุราษฎร์ธานี กระบี่ และขอนแก่น ในปี 2520 ได้ติดตั้งอีก 3 สถานี

การสำรวจศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับการใช้ประโยชน์จากพลังงานแสงอาทิตย์จะแบ่งออกเป็น 2 ระยะ คือ

ระยะที่ 1 : การศึกษาเบื้องต้น โดยติดตั้งเครื่องมือวัดตามภูมิภาคต่าง ๆ เพื่อนำข้อมูลมาวิเคราะห์ และจัดทำรายงานประจำปี

ระยะที่ 2 : การศึกษาโดยละเอียด เป็นการศึกษาหาข้อมูลเพิ่มเติมเฉพาะภูมิภาคที่ได้จากการศึกษาเบื้องต้น แสดงว่ามีความเหมาะสมเพียงพอที่ควรจะมีการพัฒนาการใช้ประโยชน์จากพลังงานแสงอาทิตย์ การศึกษาในขั้นนี้รวมถึงการรวบรวมข้อมูล และศึกษาลักษณะและความต้องการใช้พลังงานรูปต่าง ๆ ในปัจจุบันตามภูมิภาคนั้น ๆ

ปริมาณความเข้มของพลังงานแสงอาทิตย์ตกกระทบตามข้อมูลที่ได้จากสถานีวัดจะมีค่าเฉลี่ยประจำเดือน ประมาณ 300-400 $Cal.cm^{-2}min.^{-1}$ จากรูปที่ 2.3 ค่าระดับความเข้มของพลังงานแสงอาทิตย์ ขนาดนี้มากเพียงพอที่จะนำไปใช้ประโยชน์ด้านพลังงานได้ เช่น การต้มน้ำร้อน (Solar Water Heater) การทำน้ำกลั่น (Desalination) และการทำความเย็น (Solar Cooling) เป็นต้น ในประเทศไทยได้มีการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ทำน้ำร้อนใช้ในโรงพยาบาล และสระว่ายน้ำบางแห่งบ้างแล้ว นอกจากนี้ระดับความเข้มฯ ดังกล่าวก็ยังสามารถนำไปใช้ประโยชน์ทางด้านการเกษตรได้อีก เช่น การสูบน้ำโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ขับเครื่องต้นกำลัง เป็นต้น การริเริ่มนำเอาพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ประโยชน์ดังกล่าวจะเป็นประโยชน์อย่างมากในอนาคตสำหรับประเทศไทยซึ่งเป็นประเทศเกษตรกรรม เพราะประหยัดพลังงานไฟฟ้า และน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้อยู่ในปัจจุบันได้ส่วนหนึ่ง สามารถนำพลังงานที่สงวนได้นั้นไปใช้ประโยชน์กับงานอื่นได้อีกด้วย อีกทั้งยังประหยัดเงินตราต่างประเทศที่ต้องใช้งบประมาณในการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศ หากได้มีการพัฒนาการใช้ประโยชน์ โดยจัดตั้งเป็นรูปโครงการอย่างจริงจังแล้วก็อาจนำเอาพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้เป็นพลังงานทดแทนได้รวดเร็วขึ้น



รูปที่ 2.3 เปรียบเทียบความเข้มแสงในแต่ละช่วงความยาวคลื่นที่ค่าอาบรังสีต่างๆ

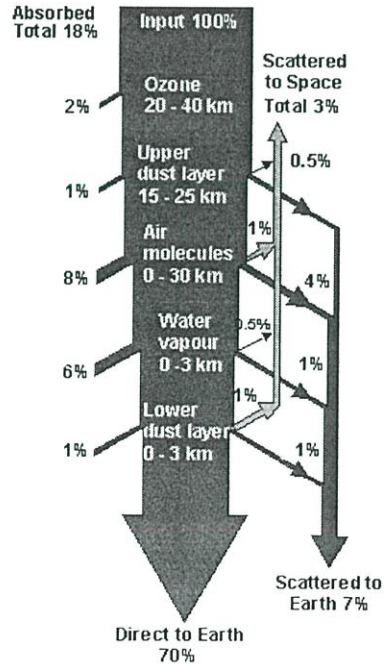
งานศึกษาวิเคราะห์ข้อมูลพลังงานแสงอาทิตย์ เป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไปในประเทศที่เจริญและพัฒนาแล้วว่ามีความสำคัญมากอย่างหนึ่ง และถือว่ามีความจำเป็นอย่างยิ่งในการวางรากฐาน

การพัฒนานำเอาพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ประโยชน์ต่อประเทศ สำหรับประเทศไทย ซึ่งตั้งอยู่ในเขตที่เหมาะสมในการใช้ประโยชน์พลังงานแสงอาทิตย์ จึงควรจะมีข่ายการวัด (Measuring Network) เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ละเอียดยิ่งขึ้นในทุกภูมิภาค และพร้อมที่จะนำมาใช้ประโยชน์ได้จริงและทันต่อสถานะการณ์ในปัจจุบัน

โดยทั่วไปแล้วข่ายการวัดควรประกอบด้วย เครื่องวัดและบันทึกที่เป็นมาตรฐาน ซึ่งได้ปรับค่าคลาดเคลื่อน (Calibrate) ในการวัดกับเครื่องวัดอื่น ๆ ตามสถานีวัด การกำหนดตำแหน่งสถานีวัดควรให้กระจายอยู่ทั่วประเทศ และติดตั้งในพื้นที่ที่คาดว่าควรจะมีการนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ประโยชน์ในพื้นที่นั้น ๆ ได้ในอนาคต ข้อมูลที่ได้จากแต่ละสถานีควรครอบคลุมได้โดยเฉลี่ยไม่มากกว่า 3 จังหวัด โดยสรุปก็คือข่ายการวัดของประเทศไทยควรมีสถานีวัดทั้งหมดประมาณ 24 สถานี

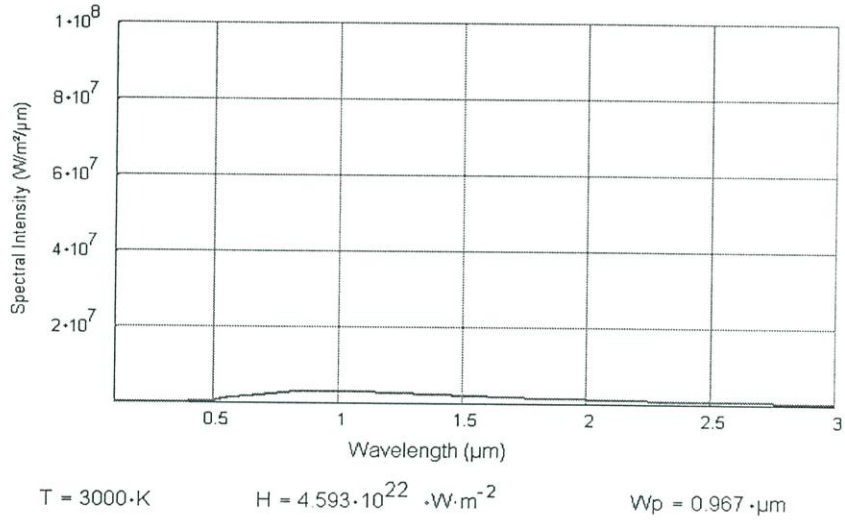
2.3.2 การวัดและการเก็บข้อมูลรังสีแสงอาทิตย์

ปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบมายังพื้นโลกจะถูกลดทอน และดูดกลืนจากปัจจัยต่างๆ เช่น ชั้นโอโซน ไอน้ำ และฝุ่นละอองในอากาศ เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ส่วนที่เหลือจะสามารถส่งผ่านมายังผิวโลกได้ โดยสามารถพิจารณาเปรียบเทียบค่าความเข้มการรับอาบรังสีแสงอาทิตย์ของวัตถุดำที่ค่าอุณหภูมิต่างๆ จากรูปที่ 2.5

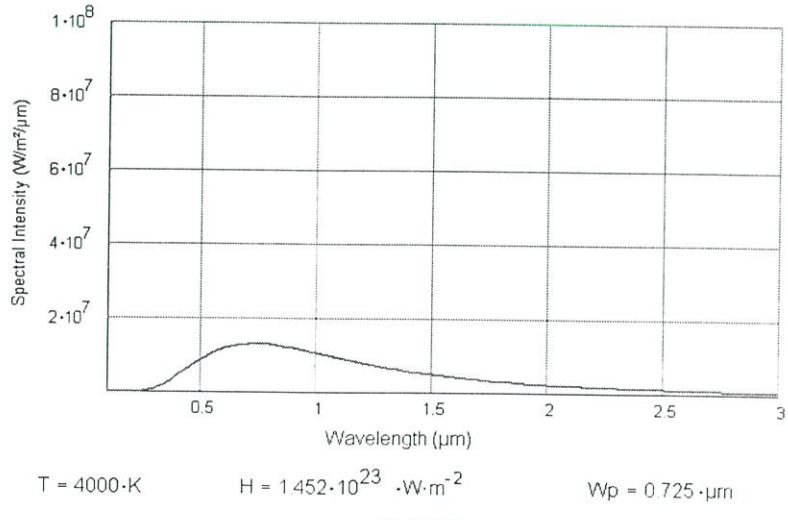


รูปที่ 2.4 ผลการลดทอนปริมาณรังสีแสงอาทิตย์จากปัจจัยต่างๆ

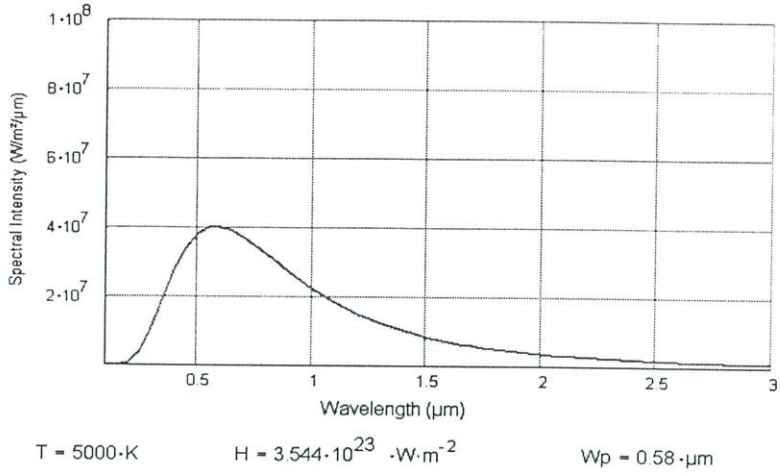
พลังงานแสงอาทิตย์ส่วนที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ แบ่งได้เป็น 2 ชนิด ตามความยาวคลื่น คือชนิดความยาวคลื่นสั้น ได้แก่ รังสีตรง และชนิดคลื่นยาว ได้แก่ รังสีกระจาย รวมทั้งการกระท้อนซึ่งมีผลมากในบริเวณที่มีภูมิประเทศปกคลุมด้วยหิมะ เป็นต้น[24] ยิ่งข้อมูลรังสีแสงอาทิตย์ที่ละเอียดและถูกต้องจำเป็นมากเท่าใด ก็จะทำให้การวิเคราะห์และประเมินศักยภาพ การใช้ประโยชน์จากพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยอุปกรณ์เปลี่ยนพลังงานรูปแบบต่าง ๆ เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพและประหยัด



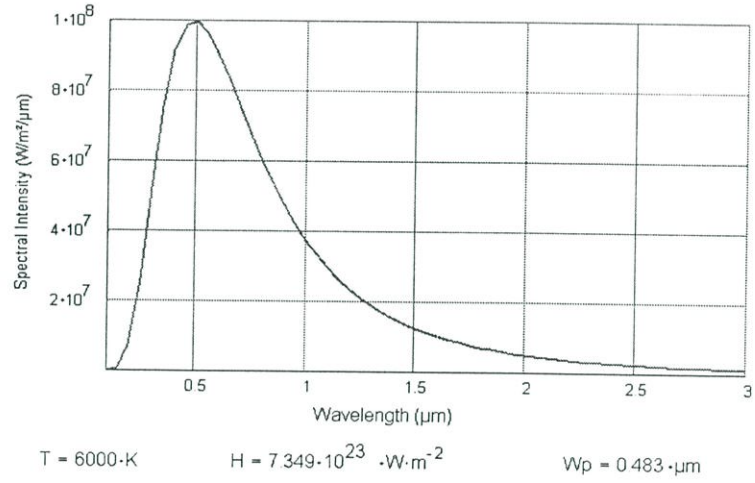
2.5 (ก)



2.5 (ข)



2.5 (ค)



2.5 (ง)

รูปที่ 2.5 ผลการลดทอนปริมาณรังสีแสงอาทิตย์เมื่อเปลี่ยนความเข้มรังสีที่ความยาวคลื่นต่างๆ

ก) ที่อุณหภูมิ 3,000 K ค) ที่อุณหภูมิ 5,000 K

ข) ที่อุณหภูมิ 4,000 K ง) ที่อุณหภูมิ 6,000 K

เครื่องมือวัดความเข้มพลังงานแสงอาทิตย์

เครื่องมือวัดความเข้มพลังงานแสงอาทิตย์ที่สำคัญ แบ่งออกได้ 2 แบบ

1) ไพร์เฮลิโอมีเตอร์ (pyrheliometer) เป็นเครื่องมือวัดความเข้มรังสีตรงที่ตกกระทบตั้งฉาก ส่วนประกอบมีกระบอกหน้าต่างแคบสวมอยู่เพื่อกันรังสีกระจายเวลาหันไปที่ดวงอาทิตย์ ตัวรับแสงเป็นเทอร์โมไพล์ นอกจากนี้จะต้องมีอุปกรณ์ติดตามดวงอาทิตย์ตลอดเวลา เพื่อรับรังสี

ตรงไพร์เฮลิโอมีเตอร์ที่นิยมใช้กันเช่น Angstrom pyrhelicmeter, Abbot water flow pyrheliometer, Abbot silver disc pyrheliometer เป็นแบบ Kippt & Zonen

2) ไพราโนมีเตอร์ (pyranometer) ใช้วัดฟลักซ์ของรังสีรวม (global solar irradiance or solar flux) คือรังสีตรง + รังสีกระจายที่ตกกระทบพื้นราบจากครึ่งทรงกลมหนึ่ง (มุมตัน = 180°) อาจใช้ไพราโนมีเตอร์วัดเฉพาะรังสีกระจายเท่านั้น โดยการใช้แถบจานวงกลมบังแสงอาทิตย์ คือ บังรังสีตรงเกิดเงาบังตัวรับแสงของเครื่อง และต้องแก้ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการบังรังสีกระจายบางส่วน

เครื่องไพราโนมีเตอร์ที่นิยมใช้กันมากเป็นแบบเอพพ์เลย์ (Eppley pyranometer) วัดรังสีในช่วงความยาวคลื่น 280 – 2800 nm มีครอบแก้วใสรูปครึ่งทรงกลม 2 อันซ้อนกัน ภายในที่เป็นฐานประกอบด้วยวงแหวนสองวงหนาประมาณ 0.25 มิลลิเมตร วางซ้อนในระดับเดียวกัน วงหนึ่งทาสีดำส่วนอีกวงทาสีขาว วงแหวนทั้งสองเชื่อมติดกับเทอร์โมไพล์ (Thermopile) ซึ่งประกอบด้วยเทอร์โมคับเปิลจำนวน 10 – 50 ชุดอนุกรมกัน อาศัยหลักการว่า ความต่างกันของอุณหภูมิระหว่างผิวดำกับผิวขาว (วงแหวนสีดำดูดกลืนความร้อน ส่วนสีขาวไม่ดูดกลืนความร้อน) ทำให้เกิดความต่างศักย์ระหว่างปลายของเทอร์โมคับเปิล เกิดกระแสไฟฟ้าในเทอร์โมไพล์จากนั้นก็ปรับเทียบความต่างศักย์เป็นความเข้มหรือฟลักซ์ของรังสีแสงอาทิตย์ และอาจรวมในช่วงเวลาติดต่อกันเป็นพลังงานแสงอาทิตย์ได้ (Wh/m^2) อีกแบบที่นิยมใช้คือของ Kipp and Zonen ในช่วงความยาวคลื่น 305 – 2800 nm เป็นเทอร์โมไพล์แลล Moll – Gorczyski ประกอบด้วยเทอร์โมคับเปิลจำนวน 100 ชุด ฝังในกระเบื้องเซรามิคส์[25] ใช้หลักการให้เทอร์โมไพล์ขั้วร้อนรับรังสีแสงอาทิตย์ ส่วนขั้วเย็นทาสีขาวซ่อนไว้ใต้โคมบังแดด

ส่วนไพราโนมีเตอร์แบบ Robitsch อาศัยหลักการขยายตัวของโลหะคู่ (ที่อุณหภูมิเดียวกันขยายและหดต่างกัน) แบบของ Yellott Solarimeter ใช้เซลล์สุริยะซิลิกอนหรือแคดเมียมซัลไฟด์ ซึ่งมีกระแสเป็นปฏิภาคโดยตรงกับรังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบ แต่การตอบสนองที่ความยาวช่วงคลื่นค่อนข้างจำกัดต้องมีการเทียบปรับค่ามาตรฐาน เครื่องไพร์เฮลิโอมีเตอร์ และไพราโนมีเตอร์จะต่อเข้าเครื่องนับเรียกว่าอินทิเกรเตอร์ เพื่อนับปริมาณรังสีติดต่อกันตลอดวัน สามารถอ่านความเข้มรังสี ในขณะเวลาใด ๆ หรืออินทิเกรตรวมแต่ละชั่วโมง หรือตลอดวันได้พลังงานแสงอาทิตย์ (Wh/m^2, $Wh/m^2/day$)

นอกจากอุปกรณ์วัดรังสีแสงอาทิตย์ที่กล่าวมาแล้วยังมีเครื่องมือที่สำคัญอีกชิ้นหนึ่งคือ เครื่องวัดระยะนานของแสงแดดจ้ารายวัน (sunshine duration) ได้แก่ Campbell-Stokes recorder มีลักษณะเป็นลูกแก้วทรงกลมเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 96 มิลลิเมตร เพื่อโฟกัสแสงลงบนแถบกระดาษเคมี กระดาษจะมีรอยไหม้เมื่อความเข้มแสงอาทิตย์สูงเกินกว่าระดับที่กำหนดไว้ ความยาวของรอยไหม้แสดงช่วงเวลามีแดด ตัวเลขที่นำไปใช้ประโยชน์คือจำนวนชั่วโมงเฉลี่ยที่ดวงอาทิตย์

ส่องแสงจ้า (Bright Sunshine Hour) สำหรับกระดาษเคมีเป็นแผนภูมิแบ่งเสกลขีดละ ½ ชั่วโมง แผนภูมิมี 4 แบบใช้กับฤดูร้อน ฤดูหนาว ฤดูใบไม้ร่วง และฤดูใบไม้ผลิต

รูปที่ 2.6 เครื่องมือวัดปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบลงบนพื้นโลก

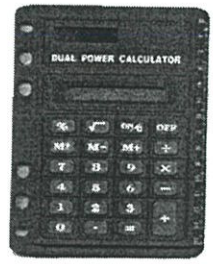
<u>หมายเหตุ</u> : คำนิยามของ "ความเข้มรังสี" (radiation intensity) คือพลังงานที่ผ่านพื้นราบสมมุติต่อหน่วยพื้นที่ต่อหน่วยเวลาต่อมุมตัน ซึ่งมีเส้นแบ่งครึ่งตั้งฉากกับพื้นราบนั้น หน่วย $MJ/m^2/s$ หรือ W/m^2 "ฟลักซ์รังสี (radiation flux)" หรือ "ความรับอาบรังสีสุริยะ (solar irradiance) คือ พลังงานที่ผ่านพื้นราบสมมุติต่อหน่วยพื้นที่ต่อหน่วยเวลา และในทุกทิศทางของด้านหนึ่งของพื้นราบสมมุติ มุมตัน = 180° หน่วยเป็น W/m^2 เช่นกัน

2.4 เซลล์แสงอาทิตย์ และการประยุกต์ใช้งาน

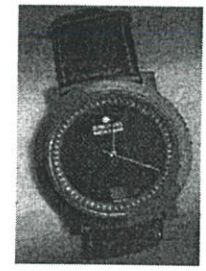
การใช้ประโยชน์จากพลังงานแสงอาทิตย์ในทางตรง อันได้แก่ระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ (Photovoltaic System หรือ PV System) และเป็นหัวเรื่องที่จะนำกล่าวในวิทยานิพนธ์นี้โดยใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า เซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งจะทำหน้าที่แปลงจากพลังงานแสงอาทิตย์ไปเป็นพลังงานไฟฟ้าสำหรับนำไปใช้งานได้โดยตรง[26]

ระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ (Photovaltaic System) เป็นกระบวนการใช้ประโยชน์จากการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์ไปเป็นไฟฟ้าได้โดยตรงจากเซลล์แสงอาทิตย์ นับได้ว่าเป็นการใช้ประโยชน์จากพลังงานทดแทนในรูปแบบหนึ่งที่มีความคุ้มค่าและไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเหมือนพลังงานที่ได้จากรูปแบบอื่น ๆ ที่ใช้งานกันอยู่ เช่น น้ำมัน ถ่านหิน และก๊าซธรรมชาติ เป็นต้น ระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์มีการเริ่มใช้งานมาเป็นระยะเวลานานโดยมีรายงานเกี่ยวกับการใช้ระบบดังกล่าวตั้งแต่ ปี

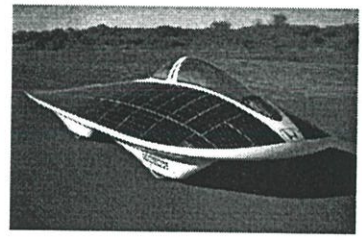
ค.ศ. 1950 เป็นต้นมา และในปี ค.ศ. 1960 มีการวิจัยและพัฒนาให้นำไปใช้งานเพื่อเป็นแหล่งพลังงานในอุตสาหกรรมด้านอวกาศ ส่วนการใช้งานตามบ้านเรือนทั่ว ๆ ไป และในงานด้านอื่น ๆ ขณะนั้นยังไม่แพร่หลายนัก เนื่องจากมีต้นทุนค่อนข้างสูงเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้พลังงานในรูปแบบอื่น ๆ



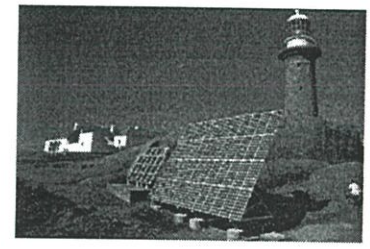
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

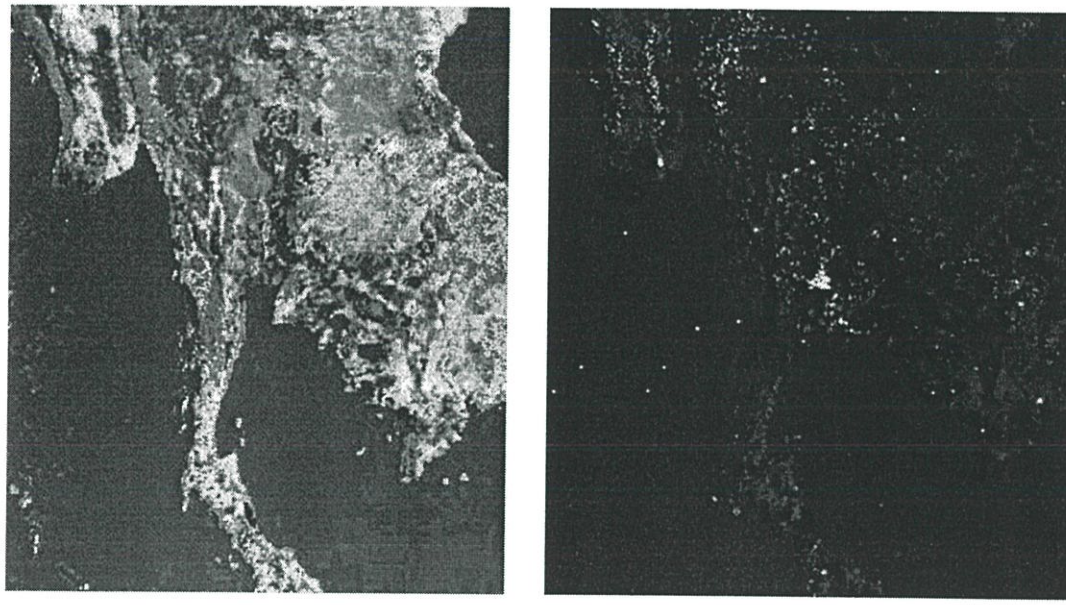
รูปที่ 2.7 ตัวอย่างการนำเซลล์แสงอาทิตย์ไปใช้งานในลักษณะต่างๆ

ก) เครื่องคิดเลข
ข) นาฬิกาข้อมือ
ค) รถไฟฟ้าพลังแสงอาทิตย์
ง) ระบบไฟฟ้าแสงสว่าง และอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ

การใช้เซลล์แสงอาทิตย์อย่างเป็นรูปธรรมส่งผลให้เทคโนโลยีทางด้านสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำจำพวก ซิลิกอน มีการพัฒนาและเปลี่ยนแปลงไปอย่างรวดเร็วอีกทั้งยังมีบทบาทสำคัญและเป็นทางเลือกของการใช้พลังงานในรูปแบบหนึ่ง ช่วงที่เกิดวิกฤติกาลน้ำมันในปี ค.ศ. 1970 อีกด้วย การใช้งานที่แพร่หลายของเซลล์แสงอาทิตย์ในยุคแรก ๆ คือใช้เป็นแหล่งพลังงาน สำหรับอุปกรณ์ไฟฟ้าขนาดเล็กเช่น เครื่องคิดเลข และนาฬิกา เป็นต้น จากนั้นจึงได้มีการพัฒนาใช้กับงานประเภทอื่นๆ

นอกจากนี้ระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ ยังถูกนำไปใช้งานอย่างแพร่หลายในพื้นที่ห่างไกล บริเวณที่เป็นป่าไม้และภูเขารวมทั้งตามหมู่เกาะต่าง ๆ ในท้องทะเล ที่ระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้าไม่สามารถเข้าไปถึงได้ อันเนื่องจากการลงทุนเดินสายไฟและติดตั้งระบบที่สูงมากนั่นเอง จากการสำรวจข้อมูลของการไฟฟ้าพบว่าประเทศไทยยังมีบ้านเรือนประชาชนในพื้นที่ห่างไกลที่ยังไม่มีไฟฟ้าใช้อีกหลายพันหลังคาเรือน ดังรูป 2.8 ที่ได้แสดงภาพถ่ายจากดาวเทียมในระยะไกล เปรียบเทียบให้เห็นพื้นที่บริเวณที่เป็นประเทศไทย ทั้งตอนกลางวัน และตอนกลางคืน จะเห็นได้ว่าในช่วงเวลากลางคืน จุดที่มีแสงสว่างเกิดขึ้นหรือบริเวณที่มีการใช้ไฟฟ้า ยังมีเฉพาะตำแหน่งที่เป็นแหล่งชุมชน

และตัวเมืองใหญ่ ๆ ของแต่ละจังหวัดเท่านั้น ด้วยเหตุนี้หน่วยงานที่เกี่ยวข้องได้เล็งเห็นประโยชน์ที่จะนำระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์แบบติดตั้งเดี่ยว(Stand Alone) มาใช้งานในพื้นที่ห่างไกล ที่ระบบไฟฟ้าปกติเข้าไปไม่ถึงเพื่อเป็นการลดค่าใช้จ่ายในการติดตั้งและวางระบบไฟฟ้า ทั้งยังตอบสนองต่อความต้องการและอำนวยความสะดวกให้แก่ประชาชนได้อย่างทั่วถึงอีกด้วย



(ก) (ข)

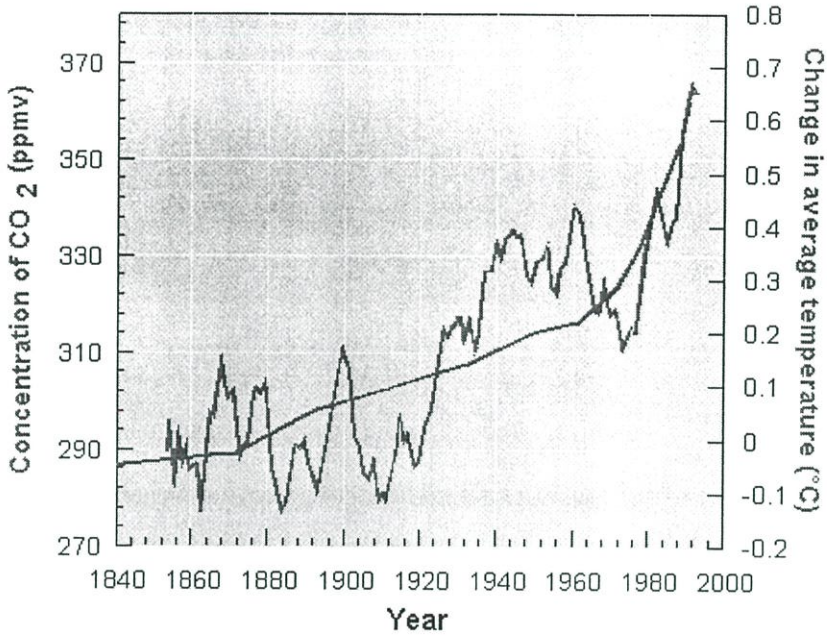
รูปที่ 2.8 การใช้ไฟฟ้าแสงสว่าง ในบริเวณที่เป็นพื้นที่ของประเทศไทยด้วยภาพถ่ายจากดาวเทียมในระยะไกล

ก) ภาพถ่ายดาวเทียมในช่วงเวลากลางวัน ข) ภาพถ่ายดาวเทียมในช่วงเวลากลางคืน

ในอดีตการใช้ระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ ที่มีพิกัดกำลังสูง ๆ ยังไม่ได้รับความสนใจเท่าที่ควร ทั้งนี้เนื่องจากมีประสิทธิภาพการแปลงพลังงานไฟฟ้าต่ำ (ประมาณ 10 %) และต้นทุนต่อหน่วยพลังงานยังสูงมากเมื่อเทียบกับแหล่งพลังงานในรูปอื่น แต่เมื่อเทคโนโลยีทางด้านสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำมีการพัฒนาจากเดิมมาก ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์สูงขึ้นเป็นลำดับ (โดยเฉลี่ยประมาณ 15% หรือมากกว่านี้ ในปี ค.ศ. 1999) ทำให้มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายขึ้น รวมทั้งได้รับความไว้วางใจจากหน่วยที่รับผิดชอบดูแลด้านพลังงาน โดยมีการสนับสนุนและผลักดันให้มีการใช้งานอย่างจริงจังในฐานะพลังงานทดแทนที่สำคัญรูปแบบหนึ่ง

ภาวะเรือนกระจก (Greenhose effect) เป็นแรงจูงใจอย่างหนึ่งที่ทำให้ระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ได้รับความนิยม มากกว่าแหล่งพลังงานในรูปอื่นนั่นคือ เซลล์แสงอาทิตย์ เป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ ที่ไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เหมือนกับแหล่งเชื้อเพลิงอื่นๆ เช่น ถ่านหินหรือน้ำมัน เป็นต้น มีการตั้งสมมุติฐานและลงความเห็นว่าผลของภาวะเรือนกระจกทำให้อุณหภูมิโดยเฉลี่ยของโลกสูงขึ้น เนื่องจากมลภาวะและการใช้สารเคมีบางประเภทที่ส่งผลต่อชั้นบรรยากาศ

ในช่วงหลายทศวรรษที่ผ่านมา เป็นผลให้ปริมาณการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์สู่โลกมีการเปลี่ยนแปลงไปอย่างมาก ทำให้อุณหภูมิโดยเฉลี่ยของโลกเปลี่ยนแปลงไปในลักษณะเพิ่มสูงขึ้นทุก ๆ ปี "พลังงานสะอาดและได้เปล่า" จากคำกล่าวนี้เป็นการยืนยัน จุดเด่น และความน่าสนใจของการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อเป็นพลังงานทดแทน และจัดได้ว่าเป็นพลังงานทางเลือกที่น่าสนใจยิ่ง



รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ของการเพิ่ม CO_2 ในชั้นบรรยากาศ กับอุณหภูมิเฉลี่ยของโลกที่เพิ่มขึ้น

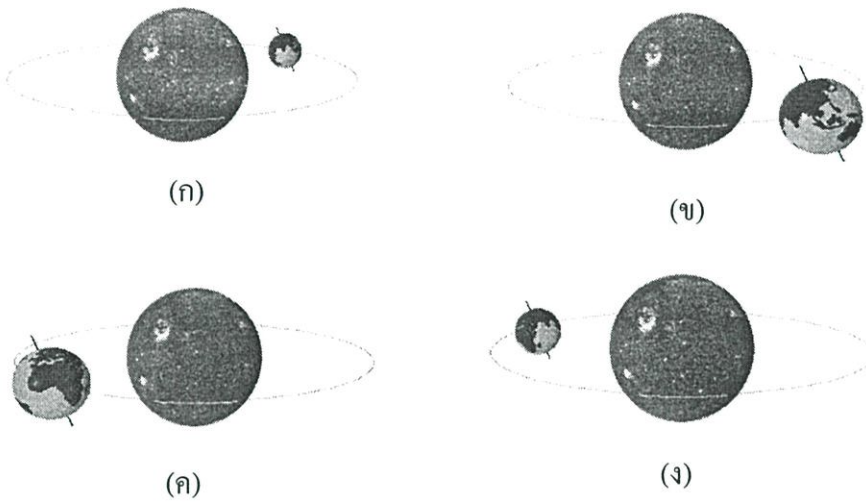
2.4.1 ทฤษฎีเบื้องต้นเกี่ยวกับแสงอาทิตย์

ความสัมพันธ์ระหว่างดวงอาทิตย์กับโลก (Sun Position in Relation To the Earth) ตลอดระยะเวลา 1 ปี ขณะที่โลกหมุน แสดงดังรูปที่ 2.10 วงโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์เป็น รูปวงรี โดยแกนหมุนของโลกจะเอียงทำมุม 23.45 องศา กับแนวตั้งฉากของระนาบวงโคจรในการอ้างอิงระนาบของการโคจร ประมาณการณ์ได้ว่าหากซีกโลกเหนือเอียงไปทางดวงอาทิตย์ในฤดูร้อน และในทางกลับกันถ้าซีกโลกใต้เอียงไปทางดวงอาทิตย์จะเป็นฤดูหนาว

เพื่อความสะดวกในการพิจารณาความเข้ม และผลการตอบสนองทางความถี่ของแสงอาทิตย์ จึงได้มีการกำหนดค่า แอร์แมสเอ็ม (Air Mass mหรือ AMm) ขึ้นโดยค่าแอร์แมส คือ อัตราส่วนระหว่างระยะทางเดินของแสงอาทิตย์ที่เวลาใดๆ ต่อ ระยะทางเดินของแสงเมื่อดวงอาทิตย์อยู่เหนือศีรษะ[27] ซึ่งสามารถแสดงการพิจารณาค่าดังกล่าวได้ดังรูปที่ 2.11 และสมการคำนวณแสดงได้ดังนี้

$$Air\ \text{Mass} = \sec(\theta) = \frac{1}{\cos(\theta)} \tag{2.1}$$

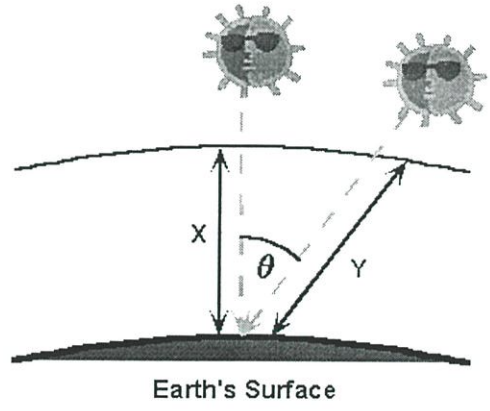
โดยที่ θ คือ มุมระหว่างแนวของลำแสงที่กระทำกับแนวดิ่ง



รูปที่ 2.10 ลักษณะการโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์

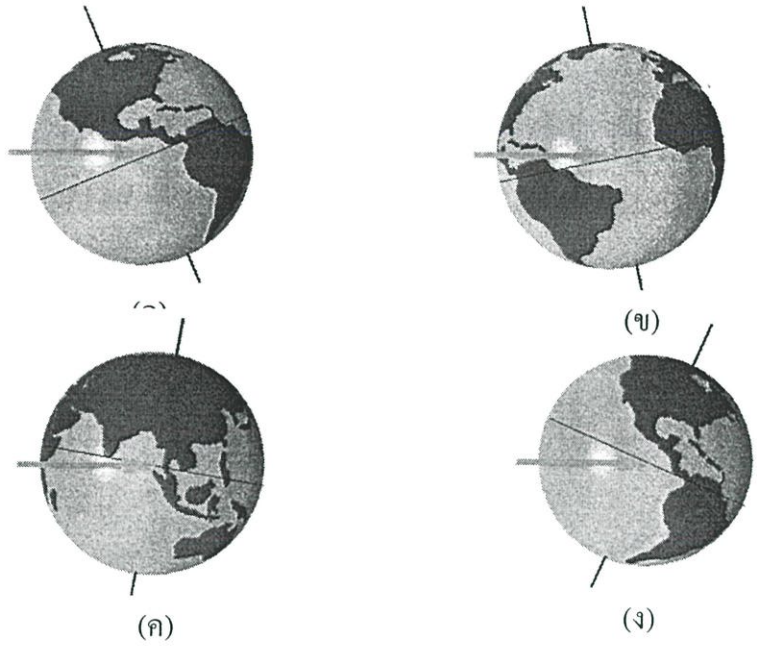
ก) ช่วงเดือนมีนาคม ค) ช่วงเดือนกันยายน

ข) ช่วงเดือนมิถุนายน ง) ช่วงเดือนธันวาคม



รูปที่ 2.11 มุมของลำแสงจากดวงอาทิตย์เทียบกับแนวตั้งฉากที่ระดับพื้นโลก

แสงอาทิตย์ที่อยู่นอกบรรยากาศโลกจะเรียกว่า แอร์แมสซีโร่ (AM0) จะถือว่ามีค่าพลังงานประมาณ 135 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร สำหรับแสงบริเวณผิวโลกที่ระดับน้ำทะเลในตอนเที่ยงวันจะเรียกว่า แอร์แมสวัน (AM1) จะถือว่ามีค่าพลังงานประมาณ 100 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ในปัจจุบันการวัดเซลล์แสงอาทิตย์บนพื้นโลกจะใช้ค่า แอร์แมส อยู่ที่ 1.5 (AM1.5) ซึ่งจะมีค่าพลังงานโดยประมาณอยู่ที่ 83.2 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ปริมาณพลังงานแสงนี้ได้ถูกนำไปใช้เป็นค่าเปรียบเทียบความสามารถของเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่างๆในการเปลี่ยนพลังงานแสงมาเป็นพลังงานไฟฟ้า ซึ่งก็คือประสิทธิภาพของเซลล์นั่นเอง



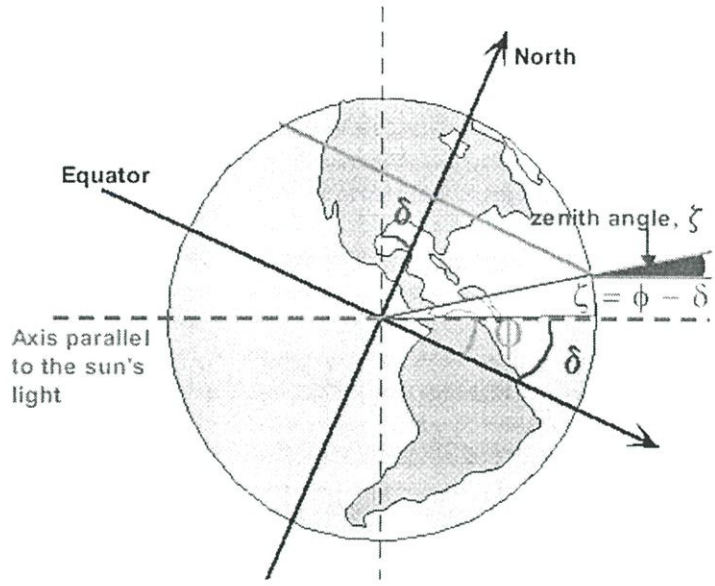
รูปที่ 2.12 ผลของรังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบผิวโลก จากการโคจรรอบดวงอาทิตย์ในแต่ละช่วงเวลาในรอบปี

ก) ช่วงเดือนมีนาคม ค) ช่วงเดือนกันยายน

ข) ช่วงเดือนมิถุนายน ง) ช่วงเดือนธันวาคม

เส้นอาร์คติค (Arctic Circle) และเส้นแอนตาร์คติค (Antarctic Circle) เส้นทรอปิคออฟแคนเซอร์ (Tropic Cancer) และเส้นทรอปิคออฟแคพริคอน (Tropic of Capricorn) มีความสัมพันธ์กับดวงอาทิตย์ใน 4 ฤดู โดยในฤดูหนาวดวงอาทิตย์จะอยู่ห่างจากโลกมากที่สุด และเป็นช่วงที่ขั้วโลกเหนือจะเอียงหนีจากดวงอาทิตย์ 23.45 องศา ด้วยเหตุนี้บริเวณเหนือเส้นอาร์คติคจะมืดโดยสมบูรณ์ และบริเวณใต้เส้นแอนตาร์คติคจะสว่างโดยตลอด ส่วนในฤดูร้อนดวงอาทิตย์จะอยู่ใกล้โลกมากที่สุดเช่นกัน ซึ่งขั้วโลกเหนือจะเอียงเข้าหาดวงอาทิตย์ 23.45 องศา ด้วยเหตุนี้บริเวณเหนือเส้นอาร์คติคจะสว่างโดยตลอด และบริเวณใต้เส้นแอนตาร์คติคจะมืดโดยสมบูรณ์ ส่วนในฤดูใบไม้ร่วงจะมีกลางวันเท่ากับกลางคืน ซึ่งขั้วโลกเหนือและขั้วโลกใต้จะมีระยะห่างจากดวงอาทิตย์เท่ากัน ซึ่งแสดงดังรูป 2.12

ด้วยเหตุนี้รังสีที่ส่องลงมาบนโลกจึงเป็นฟังก์ชันทางเลขาคณิต มุมพื้นฐานต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นดังแสดงได้เป็นความสัมพันธ์ระหว่างดวงอาทิตย์กับผิวโลกดังรูปที่ 2.13 โดยกำหนดให้พิจารณา ณ จุดอ้างอิงที่อยู่บนผิวโลก



รูปที่ 2.13 การพิจารณามุมตกกระทบของรังสีแสงอาทิตย์บนโลก

ละติจูด (Latitude) คือ มุมจากระนาบเส้นศูนย์สูตรถึงจุดอ้างอิงบนผิวโลก ละติจูดที่อยู่เหนือเส้นศูนย์สูตรจะกำหนดให้มีค่าเป็นบวก และละติจูดที่อยู่ต่ำกว่าเส้นศูนย์สูตรลงมาจะกำหนดให้มีค่าเป็นลบ

Declination (δ หรือ d) คือ มุมที่รังสีของดวงอาทิตย์กระทำกับระนาบของเส้นศูนย์สูตร กำหนดให้มุมเดคลิเนชั่นที่เอียงไปทางขั้วโลกเหนือมีค่าเป็นบวก จากรูปที่ 2.13 มุมเดคลิเนชั่นเป็นมุมระหว่างเส้นจากจุดศูนย์กลางโลก ถึงจุดศูนย์กลางของดวงอาทิตย์กระทำกับโพรเจคชั่นของเส้นนี้บนระนาบเส้นศูนย์สูตร ค่าของมุมเดคลิเนชั่นจะมีค่าตั้งแต่ศูนย์องศา ในฤดูใบไม้ผลิ (วันที่มีกลางวันเท่ากับกลางคืน) ถึง + 23.45 องศา ในฤดูร้อน (วันที่ดวงอาทิตย์อยู่ใกล้โลกที่สุด) และจากศูนย์องศา ในฤดูใบไม้ร่วง (วันที่มีกลางวันเท่ากับกลางคืน) ถึง - 23.45 องศา ในฤดูหนาว (วันที่ดวงอาทิตย์อยู่ไกลโลกที่สุด) โดยที่ค่าการเปลี่ยนแปลงของมุมเดคลิเนชั่นตลอดปีจะสามารถคำนวณได้จาก

$$\delta = 23.45^{\circ} \sin\left(\left(\frac{284 + N}{365}\right) * 360\right) \qquad (2.2)$$

เมื่อ N คือเลขวันในรอบปี

ในการคำนวณเราจะใช้ค่าเดคลิเนชั่นคงที่ตลอดทั้งวัน โดยค่า N หาจากตารางดังนี้

ตารางที่ 2.2 การหาค่าเลขประจำวัน ในรอบ 1 ปี

เดือน	ค่า N ของวันที่ 1 ในแต่ละเดือน	ค่าเฉลี่ยในแต่ละเดือน		
		วันที่	ค่า N	δ Declination
มกราคม	I	17	17	-20.9
กุมภาพันธ์	31+I	16	47	-13.0
มีนาคม	59+I	16	75	-2.4
เมษายน	90+I	15	105	9.4
พฤษภาคม	120+I	15	135	18.8
มิถุนายน	151+I	11	162	23.1
กรกฎาคม	181+I	17	198	21.2
สิงหาคม	212+I	16	228	13.5
กันยายน	243+I	15	258	2.2
ตุลาคม	273+I	15	288	-9.6
พฤศจิกายน	304+I	14	318	-18.9
ธันวาคม	334+I	10	344	-23.0

เวลาของดวงอาทิตย์ (Solar Time)

เวลาที่ใช้บนโลกนั้นล้วนอ้างอิงมาจากเวลา 0.00 น. ที่เส้นลองกิจูด (Longitude) ศูนย์องศา ณ ตำบลกรีนนิช (Greenwich) หรือเรียกว่า GCT (Greenwich Civil Time) เวลาในท้องถิ่นหนึ่งๆใช้ชื่อแทนว่า LCT (Local Civil Time) ซึ่งจะเพิ่มขึ้น 1 ชั่วโมงทุกๆ 15 องศาตะวันออกจากตำบล Greenwich และลดลง 1 ชั่วโมงทุกๆ 15 องศาตะวันตกจากตำบล Greenwich เช่นกัน ดังนั้นจุดที่มีลองกิจูด 180 องศา จะมีความแตกต่างทางเวลา 12 ชั่วโมง เมื่อเทียบกับ GCT ทำให้สามารถพิจารณาเส้นแบ่งวันได้จากเส้นลองกิจูด 180 องศาในทิศทางตรงกันข้าม

หากเราพิจารณาที่เส้นแบ่งเวลาในทุกๆ 15 องศาลองกิจูด ให้เป็นเวลามาตรฐาน (Local Standard Time) ในพื้นที่นั้นๆ และครอบคลุมเวลาที่เป็นมาตรฐานในท้องถิ่นภายในขอบของเส้นแบ่งเวลาข้างเคียงที่มีลองกิจูดต่างกัน 15° ดังตัวอย่างเช่น ในสหรัฐอเมริกามีการแบ่งพื้นที่เวลา (Time Zone) ออกเป็น EST (East Standard Time), CST (Central Standard Time), MST (Mountain Standard Time) และPST (Pacific Standard Time) เพื่อระบุเวลาให้แก่เส้นลองกิจูด 75°W, 90°W, 105°W, 120°W ตามลำดับ การแบ่งเวลาท้องถิ่นที่พื้นที่ต่างๆใน Time Zone ที่กำหนดจะมีเวลาช้า

กว่า 4 นาทีจากลองกิจูดมาตรฐานออกไปทางตะวันตก 1 องศา เช่น ลองกิจูด 110°W เมื่อให้เวลาอ้างอิงเป็น GCT ดังนั้นเวลามาตรฐานในท้องถิ่นคือ MST สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$(MST) = (GCT) - 105^{\circ}/15^{\circ} = (GCT) - 7hr \tag{2.3}$$

หาเวลาท้องถิ่น

$$(LCT) = (MST) - (5^{\circ}) \cdot (4\,\text{min/deg}\,ree) \tag{2.4}$$

$$(LCT) = (MST) - 20\,\text{min} \tag{2.5}$$

ถ้าโลกหมุนรอบตัวเอง และโคจรรอบดวงอาทิตย์แบบอุดมคติ คือเป็นวงกลมโดยสมบูรณ์ ค่า LCT ที่คำนวณได้ย่อมเท่ากับเวลาของดวงอาทิตย์ (Solar Time) แต่อย่างไรก็ดีเพราะการเคลื่อนหมุนของโลกไม่ได้เป็นวงกลมโดยสมบูรณ์ เวลาของดวงอาทิตย์ (LST: Local Solar Time) จึงมีความแตกต่างจาก LCT ไปบ้าง โดยนักดาราศาสตร์ระบุค่าคลาดเคลื่อนทางความสัมพันธ์ของเวลาทั้งสองดังแสดงในตารางที่ 2.3 [42]

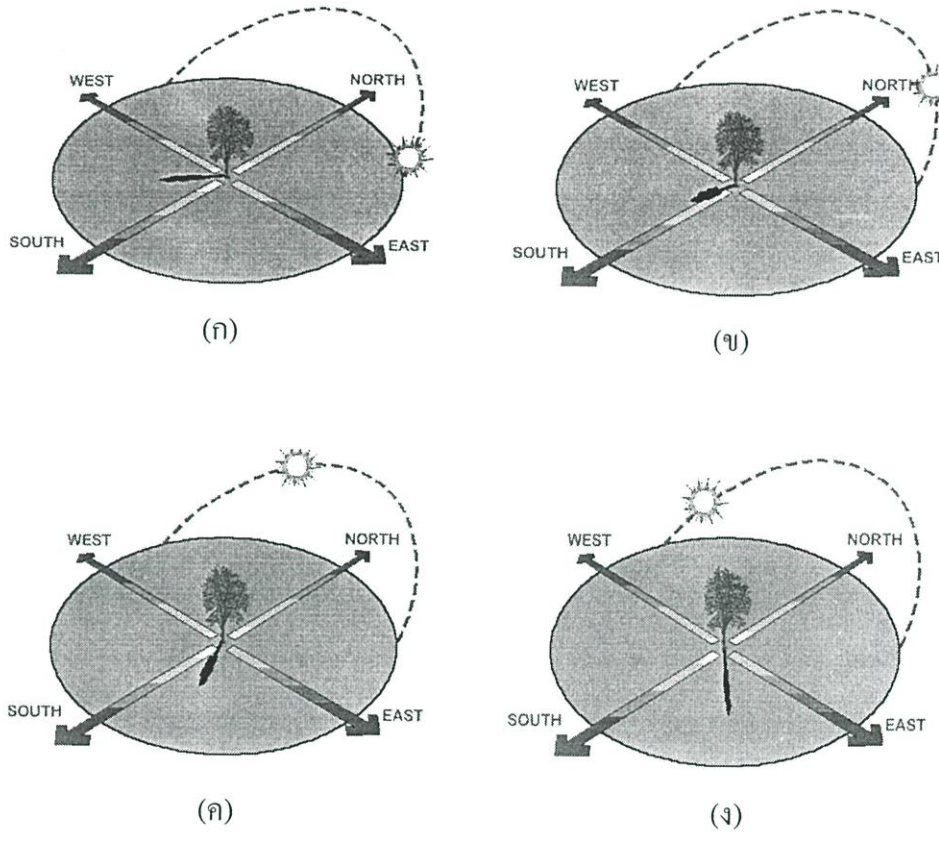
ตารางที่ 2.3 ค่าชดเชยทางเวลา (The equation of time) min: sec

วันที่:	1	8	15	21
เดือน:				
มกราคม	-(3:16)	-(6:26)	-(9:12)	-(11:27)
กุมภาพันธ์	-(13:34)	-(14:14)	-(14:15)	-(13:41)
มีนาคม	-(12:36)	-(11:04)	-(9:14)	-(7:12)
เมษายน	-(4:11)	-(2:07)	-(0:15)	1:19
พฤษภาคม	2:50	3:31	3:44	1:19
มิถุนายน	2:25	1:15	-(0:09)	-(1:40)
กรกฎาคม	-(3:33)	-(4:48)	-(5:45)	-(6:19)
สิงหาคม	-(6:17)	-(5:40)	-(4:35)	-(3:04)
กันยายน	-(0:15)	2:03	4:29	6:58
ตุลาคม	10:02	12:11	13:59	15:20
พฤศจิกายน	16:20	16:16	15:29	14:02
ธันวาคม	11:14	8:26	5;13	1:47

การใช้งานค่าความคลาดเคลื่อนตามตารางสามารถแสดงได้ดังสมการ

$$LST = LCT + Eq._of_time \tag{2.6}$$

ความคลาดเคลื่อนของเวลาดังในตารางสามารถคำนวณเพื่อหาช่วงวันที่ต้องการชดเชยทางเวลาที่ไม่ได้ระบุในตารางได้ โดยใช้วิธีการประมาณค่าภายในช่วง (Interpolation) ตามค่าที่แสดงในตารางที่ 2.3 สำหรับวันอื่นๆในรอบปี



รูปที่ 2.14 ลักษณะการเคลื่อนที่ปรากฏของดวงอาทิตย์ เมื่อพิจารณาจากจุดอ้างอิงบนโลก

ก) ช่วงที่ดวงอาทิตย์เริ่มปรากฏ ค) ช่วงเวลาหลังเที่ยงวัน

ข) ช่วงเวลาก่อนเที่ยงวัน ง) ช่วงเวลาใกล้ค่ำ

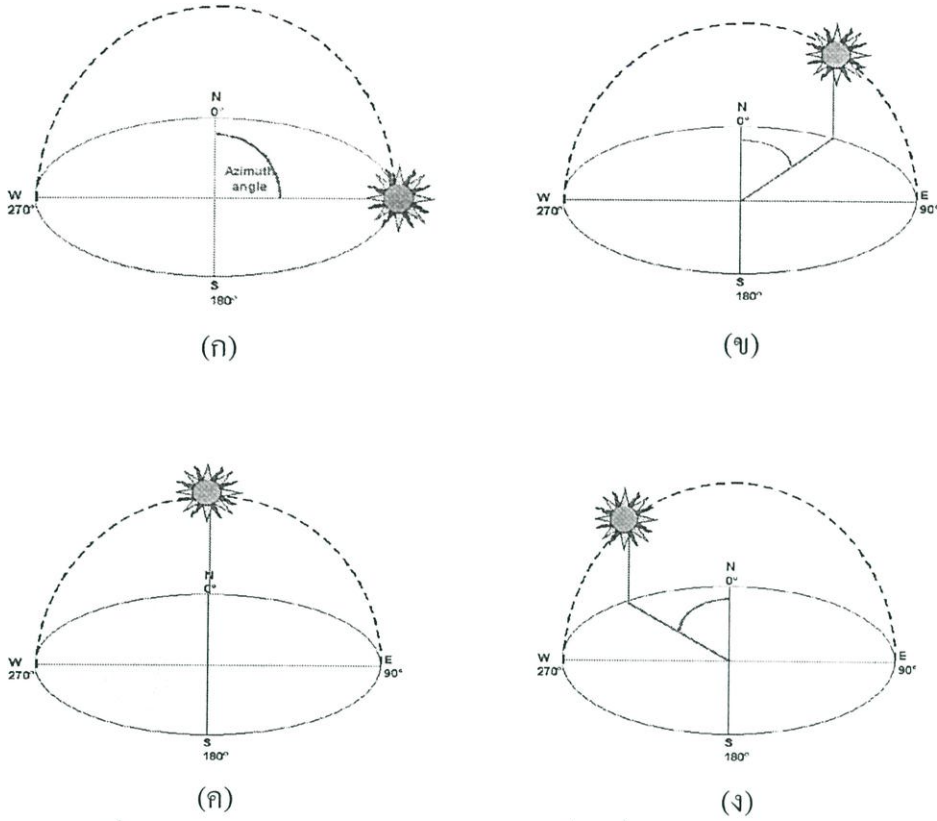
ตำแหน่งของดวงอาทิตย์ (Location of the Sun) ที่ทุกๆ ตำแหน่งบนโลก และทุกๆเวลาระบุได้โดยการลากเส้นตรงใดๆไปหาดวงอาทิตย์ (Line to Sun) ดังแสดงในรูปที่ 2.17 ตำแหน่งของเส้นตรงที่สมมติขึ้นสามารถระบุได้โดยใช้มุม 2 มุม คือ (θ_h, ϕ_h) เมื่อ

θ_h คือมุมระหว่างเส้นตรง Line to Sun กับแนวดิ่ง (Zenith Angle)

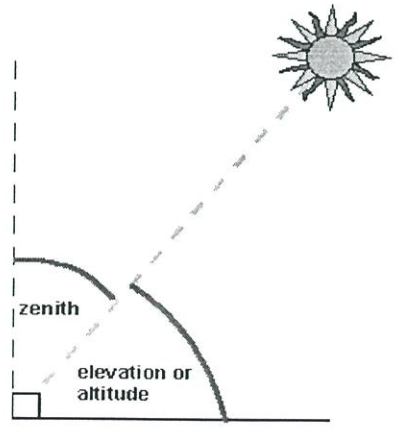
ϕ_h คือมุมระหว่างเงาของเส้นตรง Line to Sun ที่ฉายลงบนระนาบแนวนอน กับทิศเหนือ (Azimuth Angle)

จุดประสงค์ของหัวข้อนี้คือการหาสมการคำนวณมุมเหล่านี้ที่ทุกๆเวลา และทุกๆตำแหน่ง

บนพื้นผิวโลก โดยอาศัยการคิดแบบ 2 ขั้นตอนคือ การหาเฉพาะ θ_h ก่อนจากนั้นจึงหาทั้ง θ_h และ ϕ_h อีกครั้งหนึ่ง



รูปที่ 2.15 การเปลี่ยนมุม Azimuth angle (ϕ_h) ตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ ในช่วงเวลาต่างๆ
ก) ช่วงที่ดวงอาทิตย์เริ่มปรากฏ ค) ช่วงเที่ยงวัน
ข) ช่วงเวลาก่อนเที่ยงวัน ง) ช่วงเวลาหลังเที่ยงวัน



รูปที่ 2.16 ตำแหน่งของมุม Zenith angle (θ_h) และ Altitude angle

เริ่มต้นใช้วิธีหา θ_h จากการสร้างเส้นสมมติต่างๆดังรูปที่ 2.17 โดยกำหนดให้มีค่าต่างๆดังนี้

O = จุดศูนย์กลางโลก

P = ตำแหน่งใดๆบนพื้นผิวโลกที่ต้องการหา θ_h

N = ขั้วโลกเหนือ

S = ขั้วโลกใต้

$NPCS$ = ลองกิจูดของเส้นรอบวงที่ผ่านจุด P

OQS_2 = Line to Sun จากจุดศูนย์กลางโลก

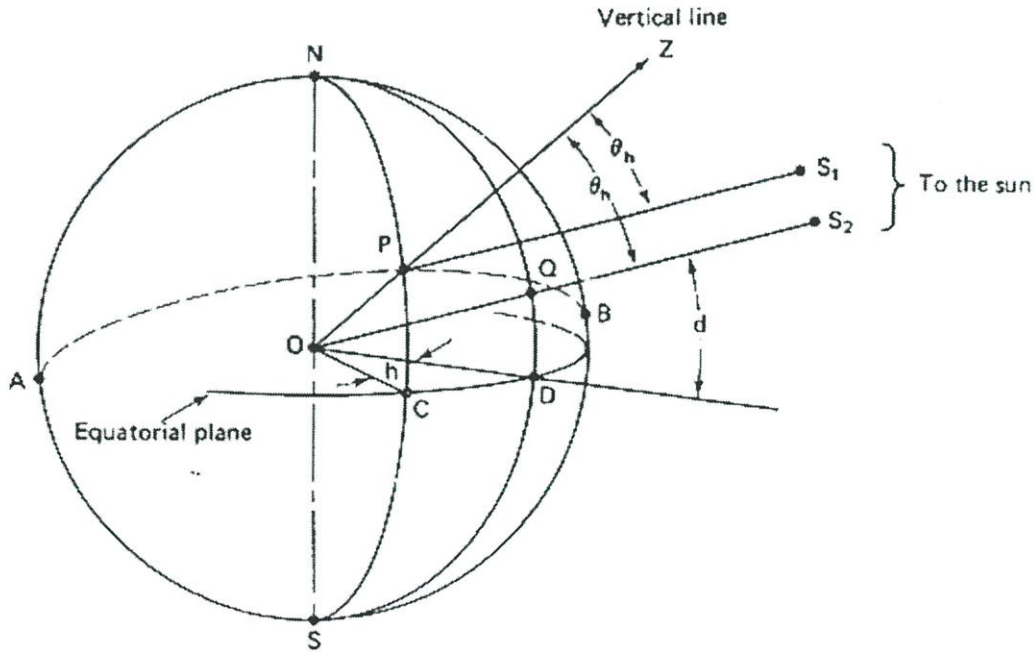
$NQDS$ = ลองกิจูดของเส้นรอบวงที่ผ่านจุด Q

OCD = สามเหลี่ยมเวลาที่เส้นศูนย์สูตร

$APQB$ = เส้นรอบวงที่ผ่านจุด P และ Q

PS_1 = Line to Sun จากจุด P

OPZ = เส้นแนวดิ่งที่จุด P

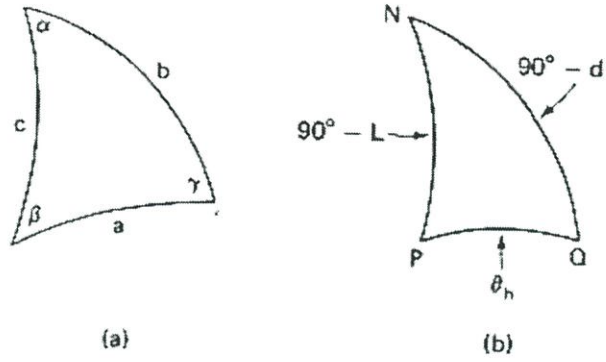


รูปที่ 2.17 ไดอะแกรมช่วยคำนวณ θ_h

ค่ามุม θ_h ที่ต้องการหาคือมุมระหว่างเส้น Line to Sun กับเส้นแนวดิ่งที่จุด P เส้น Line to Sun จากจุดศูนย์กลางโลกผ่านไปยังจุด Q ส่วนของวงกลม PQ เป็นส่วนหนึ่งในวงกลม APQB และได้ค่ามุม POQ คือมุม θ_h ส่วนของวงกลม PQ มีค่าเท่ากับ θ_h ในหน่วยเรเดียนด้วย มุมทางเวลา (Hour Angle: h) สามารถระบุได้โดยส่วนของวงกลมที่เส้นศูนย์สูตรระหว่างลองกิจูดที่ผ่านจุด P และลองกิจูดที่ผ่านจุด Q ดังนั้นส่วนของวงกลม CD จึงเท่ากับ h ค่ามุมทางเวลาสามารถแปลงหน่วยเป็นหน่วยทางเวลาได้โดยมีอัตราเท่ากับ 1 ชั่วโมงต่อ 15° สำหรับวงกลม PC คือละติจูดนั่นเอง

พิจารณาส่วนของวงกลม NPQ ซึ่งเกิดจากเส้นรอบวงของวงกลมต่างๆตัดกัน สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.18 สำหรับมุมต่างๆ ของสามเหลี่ยม ที่เป็นพื้นผิวทรงกลมจากการตัดกันของส่วนของวงกลม 3 วง สามารถนำกฎของ Cosine มาใช้ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\cos a = \cos b \cos c + \sin b \sin c \cos \alpha \tag{2.7}$$



รูปที่ 2.18 สามเหลี่ยมจากส่วนของวงกลมในรูปที่ 2.17

(a) แสดงค่ามุม และด้านใดๆสำหรับกฎของ Cosine

(b) แสดงค่ามุม และด้านสำหรับระบบที่พิจารณา

จากรูป (a) สามารถแปลงค่าจาก $\alpha \to \theta_h$, $b \to 90° - d$, $c \to 90° - L$ และ $\alpha \to h$ ดังแสดงในสมการ

$$\cos \theta_h = \cos d \cos L \cosh + \sin L \sin d \tag{2.8}$$

ซึ่งเป็นสมการที่ต้องการสำหรับที่ทุกๆจุด P ในตำแหน่งที่รู้ค่าละติจูด L สำหรับ d คือมุมดิคลิเนชั่นที่หาได้จากสมการ และมุม h หาได้จากสมการที่ (2.9)

$$h = (H - 12)15° \tag{2.9}$$

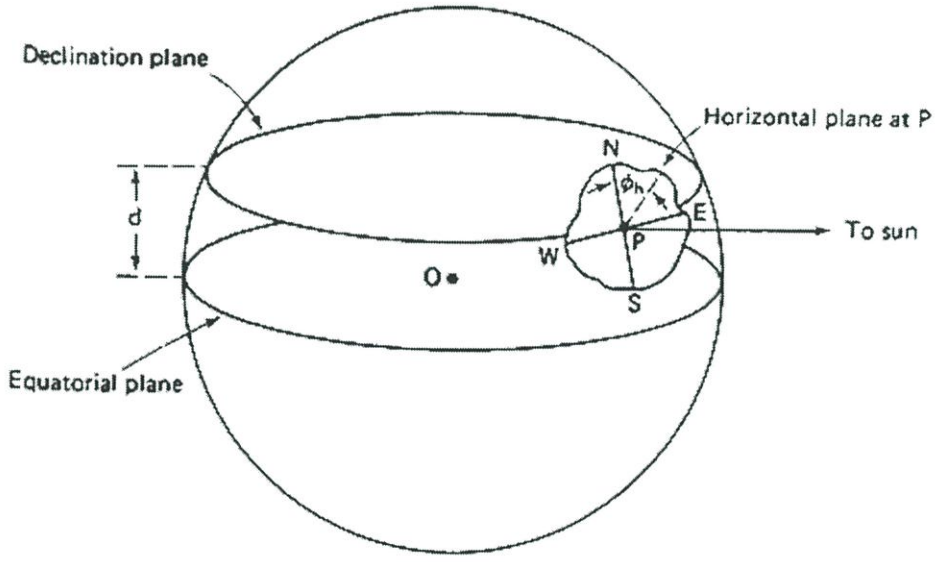
เมื่อ H คือ เวลาในท้องถิ่น ดังนั้น θ_h จึงสามารถคำนวณได้ที่ทุกๆจุด P ตามต้องการ

ส่วนการคำนวณ ϕ_h จำเป็นต้องวาดรูปที่ระนาบเล็กบนผิวทรงกลม(โลก) ที่จุด P ดังแสดงในรูปที่ 2.19 ระนาบดิคลิเนชั่นคือแนวโคจรของจุด P ในหนึ่งวันเมื่อเทียบกับศูนย์กลางของโลกไปดวงอาทิตย์ (หรือจุด O ในรูปที่ 2.17) อนุมานได้ว่าระนาบดิคลิเนชั่นขนานกับระนาบศูนย์สูตรแต่

ส่วนของเส้นโค้งที่เชื่อมระหว่างระนาบทั้ง 2 เป็นมุมดิคลิเนชั่นนั่นเอง ระนาบดังกล่าวจะอยู่เหนือระนาบศูนย์สูตรในฤดูร้อน และจะอยู่ด้านใต้ของระนาบศูนย์สูตรในฤดูหนาว เส้นที่ลากจากจุด P ไปดวงอาทิตย์ และเงาของเส้นดังกล่าวที่ฉายลงบนระนาบแนวนอนของจุด P (Tangent to the Earth at P) แสดงค่าได้ตามแนวเส้นประในรูปที่ 2.19 วาดเส้นแนวทิศเหนือ-ทิศใต้, ทิศตะวันออก-ทิศตะวันตก แนวเส้นแสดงทิศเหนือ และทิศใต้ก็คือเส้นบอกตำแหน่งลองกิจูดของจุด P นั่นเอง มุมระหว่างทิศเหนือ และเส้นเงาของ Line to Sun ที่ฉายลงบนระนาบก็คือมุม ϕ_h วาดรูป 2.19 ใหม่โดยอาศัยหลักการดังนี้

(1) ย้ายระนาบแนวระดับในทิศทางที่ขนานแนวเดิมมายังจุดศูนย์กลางของโลกที่จุด O

(2) เอียงรูปที่ 2.19 ไปทางด้านขวา เพื่อให้เส้นแนวดิ่ง OP ชี้ขึ้นด้านบนของหน้ากระดาษ



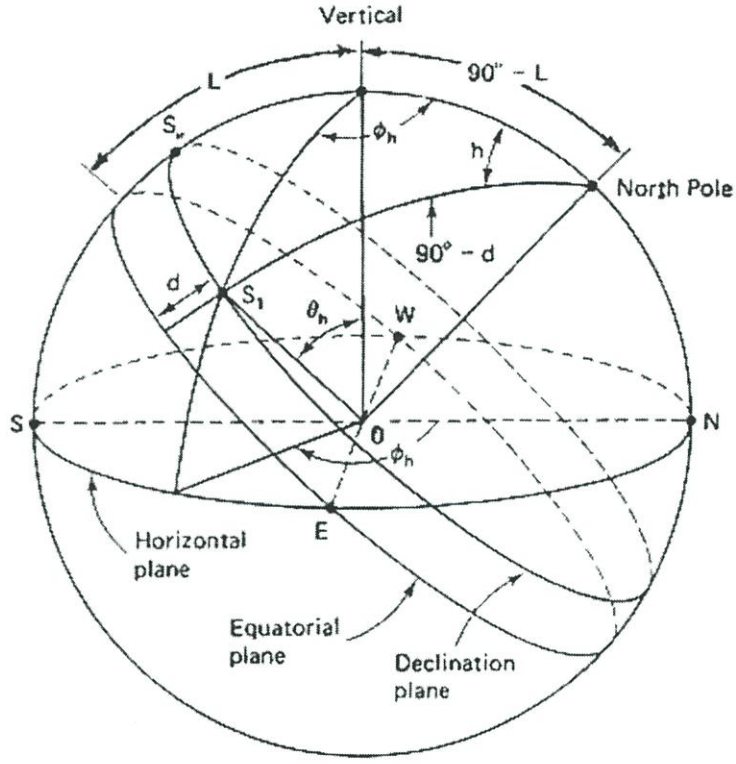
รูปที่ 2.19 ระนาบบนพื้นผิวโลก และระนาบดิคลิเนชั่น

หลักการทั้งสองข้อดังกล่าวสามารถสร้างรูปใหม่ได้ดังแสดงในรูปที่ 2.20 OS_1 คือเส้นตรง Line to Sun ในช่วงเวลาใดๆ จุด S_1 ตั้งอยู่บนระนาบดิคลิเนชั่นบนพื้นผิวโลก ซึ่งคือแนวโคจรของจุดตัดระหว่างเส้น Line to Sun กับพื้นผิวโลก เมื่อเส้นตรง Line to Sun เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่ง S_c ตามเวลาที่ล่วงไป ที่เวลา LST = 12.00 น. จนกระทั่งจุด S_1 เคลื่อนที่ครบ 1 รอบครบ 360° หรือครบรอบ 1 วันนั่นเอง ส่วนของทรงกลม S_c-N-S_1 ก็คือมุม h ส่วนค่ามุม θ_h, ϕ_h และ L แสดงได้ในรูปที่ 2.20 ถัดมาหากพิจารณารูปสามเหลี่ยมจากส่วนของทรงกลมในรูปที่ 2.20 เขียนรูปใหม่เพื่อหาค่าตามกฎของ Cosine โดยให้ค่า $\alpha = h$ เขียนสมการดั้งนี้

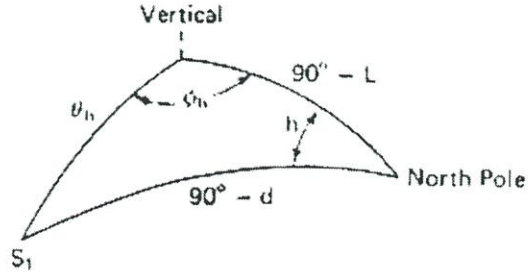
$$\cos\theta_h = \cos L \cos d \cosh + \sin L \sin d \tag{2.10}$$

เหมือนกับสมการที่ได้ก่อนหน้านี้ แต่เลือกแทนค่า $\alpha = \phi_h$ ดังรูปที่ 2.21 ได้

$$\cos\phi_h = \frac{\sin d - \sin L \cos\theta_h}{\cos L \sin\theta_h} \tag{2.11}$$



รูปที่ 2.20 ไดอะแกรมช่วยคำนวณ θ_h, ϕ_h



รูปที่ 2.21 สามเหลี่ยมจากส่วนของทรงกลมในรูปที่ 2.20

การหามุม ϕ_h ตามสมการข้างต้น เป็นคำตอบที่ต้องการสำหรับ θ_h, ϕ_h ในรูปของมุม d, L และ h โดยสามารถสรุปใจความสำคัญได้ดังนี้ค่ามุมทางเวลา h จะสมมาตรกันเมื่อเทียบกับเวลา

LST ที่ 12.00 น. หรือเวลาเที่ยงตรงของดวงอาทิตย์ (Solar Noon) ทำให้ค่า θ_h สมมาตรกันเมื่อเทียบกับเวลา Solar Noon ด้วย เช่น θ_h ที่ 10.00 น. จะเท่ากับ θ_h ที่ 14.00 น. ส่วน ϕ_h แสดงคุณสมบัติสมมาตรกันตามเวลาเมื่อวัดเทียบกับทิศใต้ เนื่องจาก ϕ_h ในสมการหากวัดเทียบกับทิศใต้คือ $(\phi_h - 180°)$ ซึ่งมีความสมมาตรกันเมื่อเทียบกับเวลา Solar Noon ทำให้ได้ความสัมพันธ์ง่ายๆว่า $\theta_h = L - d$ และ $\phi_h = -1$ ที่เวลา Solar Noon ความแตกต่างของมุมดวงอาทิตย์ที่เวลาเที่ยงวัน เป็นจริงในทุกๆแนว ของการโคจรของเส้น Line to Sun ในทุกละติจูด และทุกๆวันในรอบปี ที่เส้นศูนย์สูตร L = 0 ดังนั้น θ_h จะเปลี่ยนจาก 23.45° ในวันที่ 21 ธันวาคม ไปเป็น 0° ในวันที่ 21 มีนาคม เป็น 23.45° อีกครั้งในวันที่ 21 มิถุนายน และสุดท้ายกลับมาเป็น 0° อีกเมื่อถึงวันที่ 21 กันยายนตามลำดับ ข้อสรุปเหล่านี้เป็นจริงที่ทุกละติจูด เพียงแต่การคำนวณ θ_h ต้องเปลี่ยนจาก d เป็น |L-d|

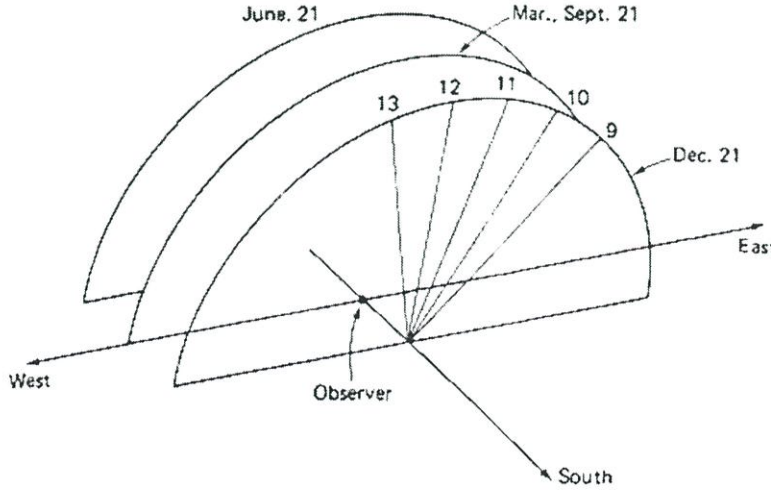
ดังนั้นที่เวลาเที่ยงวันของดวงอาทิตย์ ในซีกโลกเหนือที่มีละติจูดมากกว่า 23.45° ดวงอาทิตย์จะอยู่ในตำแหน่งทิศใต้เมื่อสังเกตจากท้องฟ้าเสมอ มุมยกของดวงอาทิตย์จากทิศใต้ที่เวลาเที่ยงวัน คือ 90-L+d เนื่องจาก d เป็นลบในช่วงฤดูหนาว และเป็นบวกในช่วงฤดูร้อน ทำให้ผลต่างของมุมของดวงอาทิตย์ที่ปรากฏบนท้องฟ้าระหว่างวันที่ 21 ธันวาคม และวันที่ 21 มิถุนายนของทุกปีในเวลาเที่ยงวันเท่ากับ 46.90°

สำหรับวันที่ 21 มีนาคม และวันที่ 21 กันยายน, d = 0 ดังนั้น การคำนวณ θ_h ลดรูปลงเหลือ

$$\cos\theta_h = \cos L \cosh \tag{2.12}$$

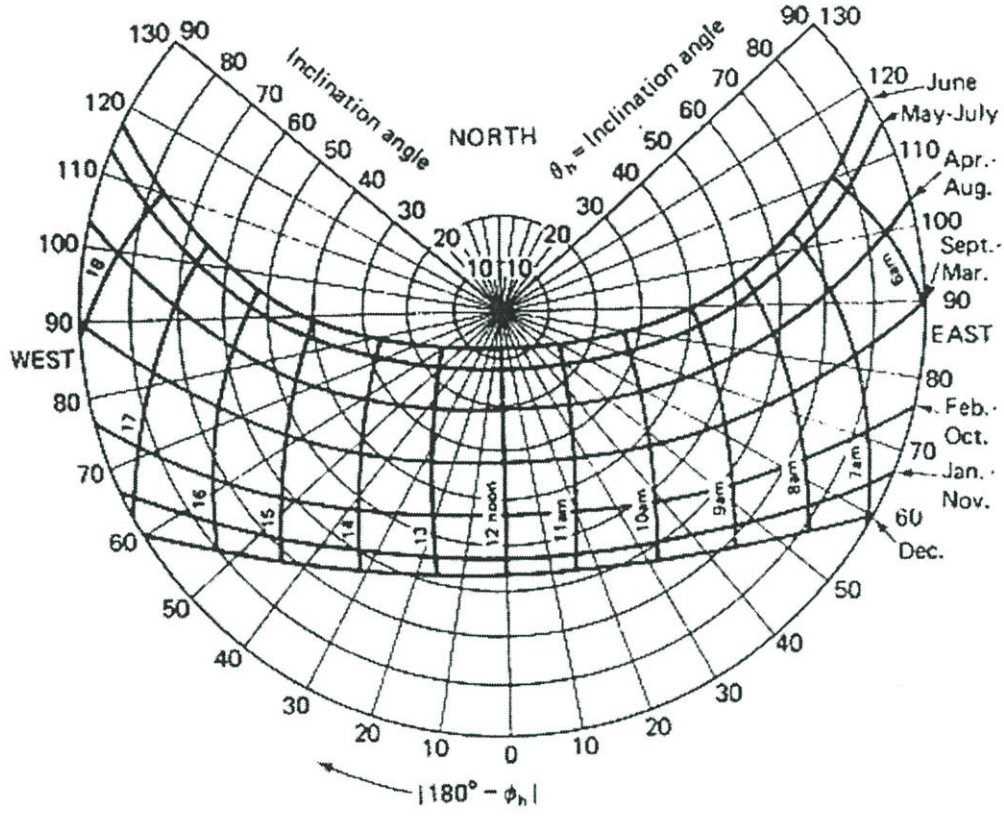
ในวันดังกล่าวการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์จะเป็นแนวเส้นจากทิศตะวันออก-ทิศตะวันตก ยกขึ้นจากทางทิศใต้เป็นมุม 90°-L เมื่อจุดสังเกตอยู่บนซีกโลกเหนือ เวลาระหว่างดวงอาทิตย์ขึ้น-ตกที่ปรากฏสามารถหาได้โดยใช้ค่ามุม θ_h เมื่อกำหนด $\theta_h = 90°$ หรือ $\cos\theta_h = 0$ ได้สมการดังนี้

$$\cosh = -\tan L \tan d \tag{2.13}$$



รูปที่ 2.22 ตำแหน่งของดวงอาทิตย์เมื่อผู้สังเกตอยู่ในแนวเส้นศูนย์สูตร

วันที่ 21 มีนาคม และวันที่ 21 กันยายน ช่วงเวลาดวงอาทิตย์ขึ้น 6 ชั่วโมงจนถึงเที่ยงวัน และจากเที่ยงถึงดวงอาทิตย์ตกอีก 6 ชั่วโมง ดังนั้นที่แนวศูนย์สูตรกลางวันจะยาวนาน 12 ชั่วโมง อย่างไรก็ดีที่ละติจูดอื่นๆ วันเวลาในช่วงฤดูร้อนจะยาวนานกว่าในฤดูหนาว และเวลาที่ยาวนานขึ้นในฤดูร้อน จะเท่ากับเวลาที่สั้นลงในฤดูหนาว



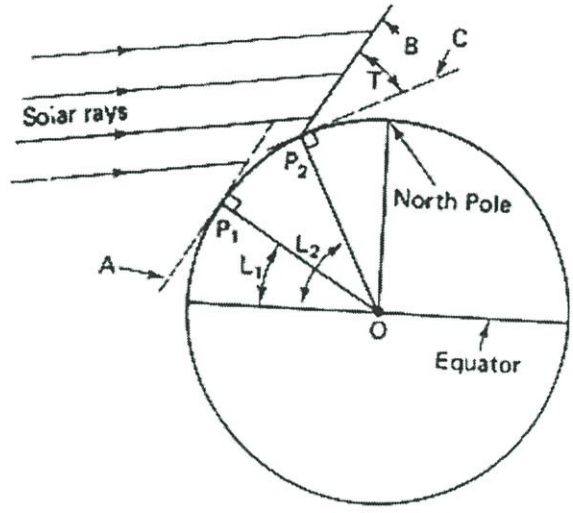
รูปที่ 2.23 การเปลี่ยนแปลงของมุม ϕ_h , θ_h ในแต่ละชั่วโมงทุกวันที่ 21 ของแต่ละเดือน ที่ละติจูด 32° เหนือ

โดยทั่วไป θ_h หาได้จากผลของการเปลี่ยนฤดูกาลในรอบปีส่วน ϕ_h เป็นผลมาจากเวลาในแต่ละวันเป็นหลักใหญ่ แนวโน้มวงโคจรของดวงอาทิตย์เหนือเส้นศูนย์สูตร แสดงได้ดังรูปที่ 2.22 วันที่ 21 มีนาคม และ 21 กันยายน ดวงอาทิตย์จะย้ายตำแหน่งการโคจรตามระนาบที่ตัดกับแนวดิ่งจากแนวทิศตะวันออก-ตะวันตก โดย ϕ_h จะเปลี่ยนไป 15° ทุก 1 ชั่วโมงส่วนวันที่ 21 ธันวาคม ระนาบการโคจรจะเปลี่ยนไป 23.45° ทางทิศใต้

การนำเสนอค่า θ_h เพื่อแสดงการโคจรของดวงอาทิตย์ได้ดีวิธีหนึ่งคือการนำเสนอแบบ Circular Polar Plots ดังแสดงในรูปที่ 2.23 ตำแหน่งบนเส้นรอบวงต่างแสดงค่า θ_h ส่วนแนวรัศมีที่เปลี่ยนไปแต่ละแนวแสดง ϕ_h ส่วนเส้นทางการโคจรของดวงอาทิตย์ในวันที่ 21 ของแต่ละเดือนแสดงค่าตามแนวเส้นโค้งแนวนอน โดยเส้นโค้งในแนวดิ่งแสดงช่วงเวลาต่างๆ หากตำแหน่งที่ตั้งของจุดสังเกตตั้งอยู่ในละติจูดที่สูงขึ้น กลุ่มของเส้นโค้งจากกราฟในรูปจะเคลื่อนลงทางใต้

ผลกระทบของมุมกเอียง(ยก) ของระนาบอ้างอิง (Effect of Tilting the Reference Plane)

ดวงอาทิตย์อยู่ไกลจากโลกมากเพื่อประโยชน์ในการพิจารณาจึงกำหนดให้รังสี แต่ละแนวที่ฉายจากดวงอาทิตย์มายังโลกมีลักษณะขนานกัน โดยไม่ขึ้นกับตำแหน่งจุดสังเกตบนผิวโลก หากมีการยกพื้นผิวระนาบที่จุดสังเกต 2 ระนาบเปรียบเทียบกันเพื่อให้พื้นผิวของระนาบทั้ง 2 มีมุมที่กระทำกับรังสีจากดวงอาทิตย์เท่าๆกันจะมีค่ามุม ϕ_h, θ_h เท่ากัน พิจารณารูปที่ 2.24



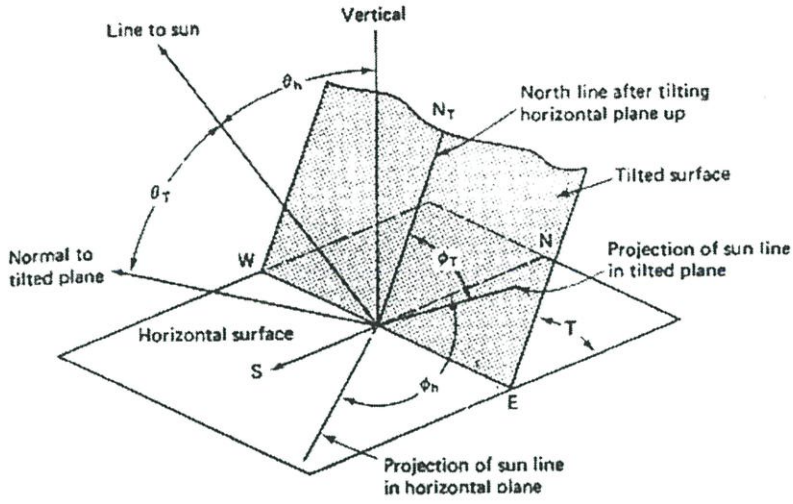
รูปที่ 2.24 การชดเชยมุมเอียงของแผงรับพลังงานในแนวราบเพื่อเทียบกับแนวราบในตำแหน่งที่มีละติจูดต่ำกว่า

พื้นผิว A เป็นระนาบที่มีจุด P_1 อยู่ที่ละติจูด L_1° ส่วนที่ละติจูดที่สูงกว่าเท่ากับ L_2° มีพื้นผิวระนาบเป็น C ถ้าพื้นผิว B ถูกยกขึ้นจาก C เป็นมุม T โดยหันหน้าไปทางทิศใต้ เมื่อค่ามุม T เท่ากับ L_2-L_1 มุมของรังสีที่กระทบลงบนพื้นผิว A และ B จะมีค่าเท่ากัน ดังนั้นการชดเชยมุมกระดกของพื้นผิวที่ตำแหน่งละติจูดใดๆจึงเท่ากับละติจูด เมื่อพิจารณาให้ละติจูด L_1 คือแนวเส้นศูนย์สูตร พื้นผิวที่ได้รับการชดเชยมุมกระดกแล้วจะขนานกับพื้นผิวระนาบที่ตำแหน่งศูนย์สูตร แต่ระยะทางการเดินทางของรังสีจากดวงอาทิตย์มากกว่า ซึ่งมีผลกระทบต่อพลังงานที่ตกกระทบพื้นผิวไม่มากนัก ประมาณได้ว่าพื้นผิวที่ได้รับการชดเชยมุมเอียงเสมือนหนึ่งพื้นผิวระนาบในแนวราบบนตำแหน่งศูนย์สูตร เนื่องจากมุมของรังสีตกกระทบที่เท่ากันดังกล่าว

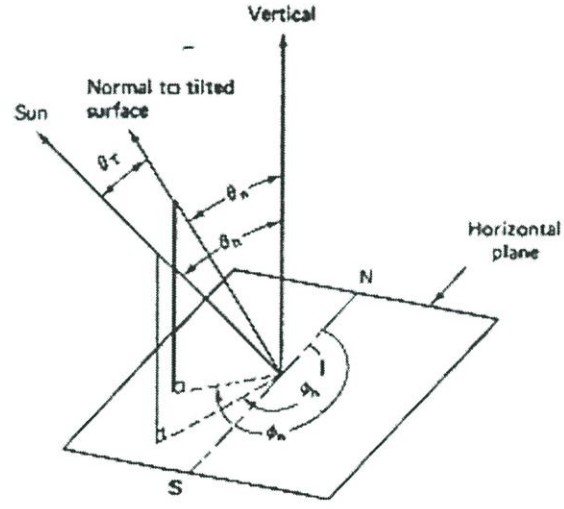
หากเขียนกลุ่มมุมอ้างอิงต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.25 ตามสมการที่ (2.10) และสมการที่ (2.11) ทำให้สามารถหา θ_T และ ϕ_T เพื่อใช้แทนค่า ϕ_h และ θ_h ได้โดยแทนค่า L ด้วย (L-T) ดังนั้น

$$\cos\theta_T = \cos(L-T)\cos d\cosh + \sin(L-T)\sin d \tag{2.14}$$

$$\cos\phi_T = \frac{\sin d - \sin(L-T)\cos\theta_T}{\cos(L-T)\sin\theta_T} \tag{2.15}$$



(ก)



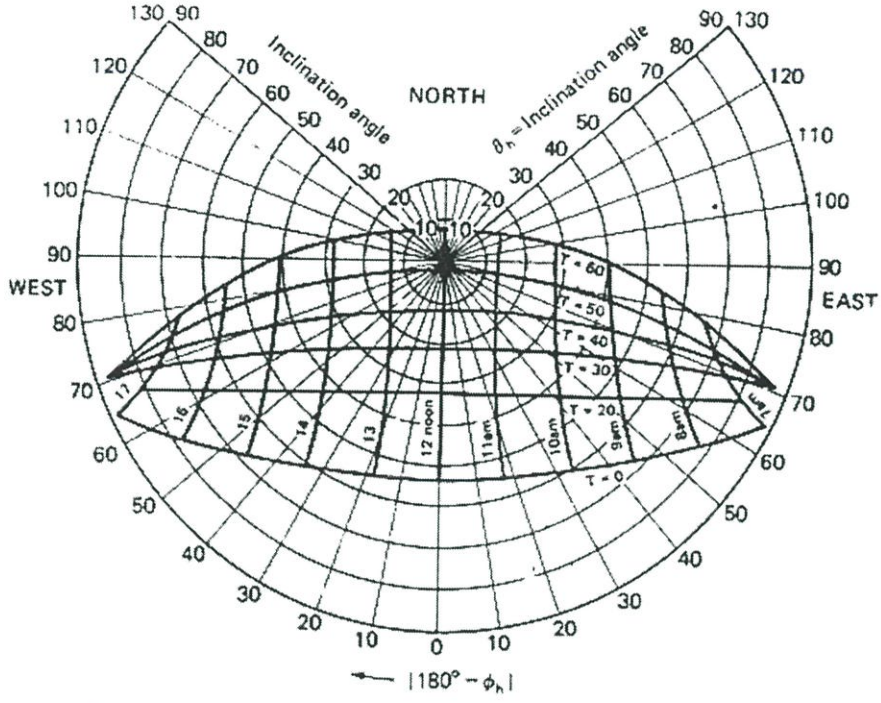
(ข)

รูปที่ 2.25 การยกพื้นผิวด้วยค่ามุมเอียง T หันด้านหน้าทางทิศใต้

(ก) แสดงระนาบเอียงทั้งระนาบ (ข) แสดงระนาบเอียงโดยใช้เส้นตั้งฉาก

เมื่อเปลี่ยนมุมเอียงหรือมุมกระดก (Tilt Angle) ของระนาบซึ่งมีความสำคัญอย่างมากต่อการเก็บพลังงานจากแสงอาทิตย์เพราะจะทำให้พื้นที่รับแสงมากขึ้นเมื่อเทียบกับแนวราบ แผงรับพลังงานแสงอาทิตย์แบบแบนที่มีมุมเอียงเท่ากับละติจูดสามารถรับแสงอาทิตย์ได้ดีเท่ากับตำแหน่งศูนย์สูตร ดังเช่นผลของการเปลี่ยนแปลงพื้นผิวที่มุมเอียง T สำหรับค่า θ_T และ ϕ_T ของวันที่ 21 มกราคม ที่ L = 32°N แสดงได้ดังรูปที่ 2.26 ดูเหมือนว่าที่มุมกระดกประมาณ 53° แนวโคจรของดวงอาทิตย์จะตรงกับแนวดิ่งพอดีที่เวลาเที่ยงวันการคิดค่ามุมเอียงนั้นไม่จำเป็นต้องหันหน้าแผงไปทางทิศเหนือ หรือใต้เท่านั้นอาจใช้การคิดค่ามุมโดยการสร้างรูปใหม่เพื่อความเข้าใจที่ง่ายขึ้น โดยแทน

เป็นเส้นแนวดิ่งที่ตั้งฉากกับระนาบที่ชดเชยมุมเอียงแล้วเมื่อระนาบนั้นหันหน้าไปในทิศทางใดๆ เพื่อหาค่ามุม θ_n และมุม ϕ_n



รูปที่ 2.26 การเปลี่ยนแปลงของมุม ϕ_h , θ_h ในแต่ละชั่วโมง วันที่ 21 มกราคม ที่ละติจูด 32° เหนือ

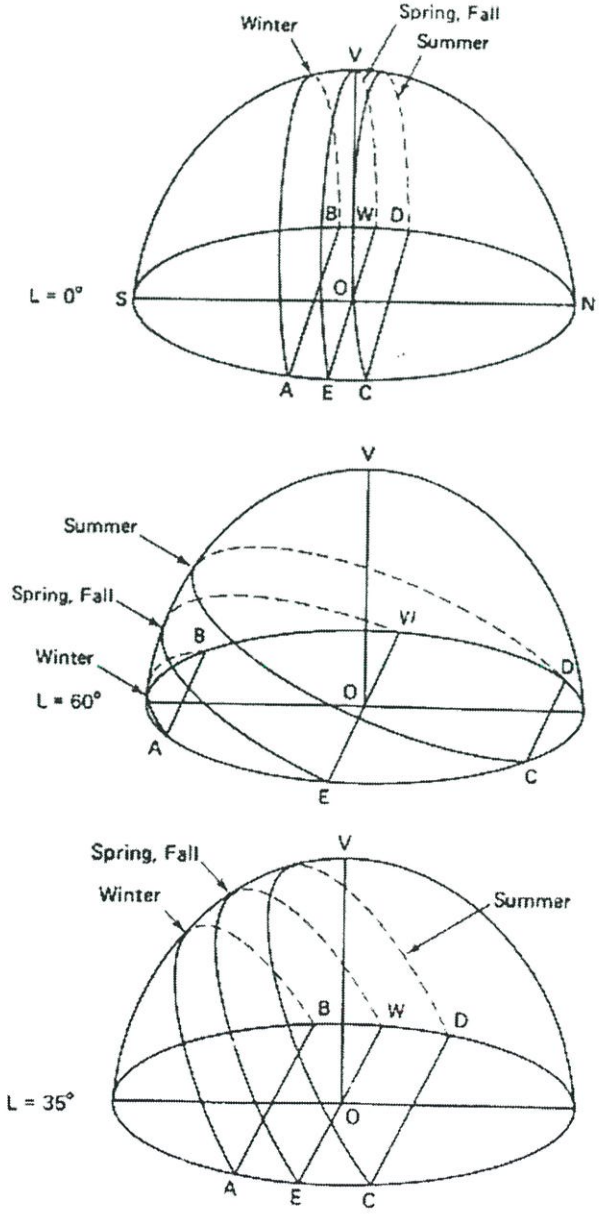
เทียบกับระนาบแนวนอน ดังแสดงในรูปที่ 2.25(ข) โดยเส้น Line to Sun บอกตำแหน่งโดยใช้มุม (θ_h, ϕ_h) เหมือนเดิม อ้างอิงทฤษฎีวิเคราะห์รูปทรงเรขาคณิตค่า Cosine ของ θ_T แสดงได้ดังนี้

$$\cos\theta_T = \cos\theta_n \cos\theta_h + \sin\theta_n \sin\theta_h \cos(\phi_h - \phi_n) \qquad (2.16)$$

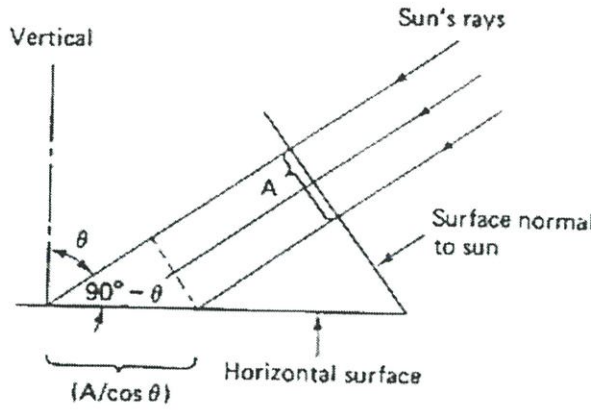
เมื่อเลื่อนจุดสังเกตไปที่ละติจูดอื่นๆทางซีกโลกเหนือระนาบแผงรับพลังงานจะหันหน้าแผงและเอียงไปทางทิศใต้ วิธีหนึ่งในการแสดงการเปลี่ยนตำแหน่งดวงอาทิตย์ที่ปรากฏคือการสร้างครึ่งทรงกลมเหนือผู้สังเกต และสร้างแนวโคจรบนครึ่งทรงกลมแนวโคจรนี้สามารถสังเกตได้โดยบุคคลที่อยู่ในตำแหน่งศูนย์กลางของครึ่งทรงกลมตามรูปที่ 2.27 ที่วาดแนวเส้นโคจรสำหรับวันที่ 21 เดือนธันวาคม มีนาคม กันยายน และ มิถุนายน สำหรับแนวละติจูดต่างๆกันเป็นตัวอย่าง

การพิจารณามุมเอียงที่เหมาะสม พิจารณาเส้นฟลักซ์ของรังสีจากดวงอาทิตย์ในรูปที่ 2.28 ความเข้มของรังสีดวงอาทิตย์ที่วัดได้เมื่อให้พื้นผิวที่รับแสงทำมุมตั้งฉากกับรังสี ค่าปริมาณความร้อนที่วัดได้จะอยู่ในหน่วย พลังงานต่อพื้นที่ และเวลาความเข้มของรังสีจากดวงอาทิตย์อาจอยู่หน่วย Btu/ft^2-hr, Langleys/hr (cal/cm^2-hr) หรือ W/m^2

ปริมาณความเข้มของรังสีจากดวงอาทิตย์จะเป็นสัดส่วนกับความเข้มของรังสีโดยตรงเมื่อพื้นที่รับแสงอยู่ในแนวตั้งฉากกับแนวรังสีทำให้มีความต้องการใช้แผงรับพลังงานแสงอาทิตย์ที่เคลื่อนที่ตั้งฉากกับแนวรังสีอย่างต่อเนื่อง ในความเป็นจริงวิธีนี้ไม่สะดวกนักนอกจากนี้ความเข้มแสงที่วัดได้ส่วนใหญ่มาจากเครื่องมือวัดที่ติดตั้งขนานกับแนวราบในรูปที่ 2.28 ถ้าให้แผงรับแสงที่ทำมุมเอียง θ มีพื้นที่ A และตั้งฉากกับแนวรังสีจากดวงอาทิตย์ ระนาบแนวนอนจะมีเส้นฟลักซ์ที่ตกลงบนพื้นที่นี้เป็น $A/\cos\theta$ ดังนั้นหากเราวัด และบันทึกค่าความเข้มแสงจากเครื่องมือวัดที่ติดตั้งในแนวระดับจึงต้องใช้สัดส่วนของค่า $\cos\theta$ ในการแปลงเป็นปริมาณความเข้มแสงที่พื้นที่ A ที่ตั้งฉากกับแนวรังสีได้รับ



รูปที่ 2.27 แนวของดวงอาทิตย์ที่ปรากฏเมื่อผู้สังเกตอยู่ที่ละติจูดต่างกัน ในแต่ละฤดูกาล



รูปที่ 2.28 ไดอะแกรมของรังสีจากดวงอาทิตย์ต่อระนาบปกติ และระนาบเอียง

ในทางปฏิบัติรังสีของแสงบางส่วนมีการกระเจิงจากชั้นบรรยากาศ และเมฆมาก่อนที่จะถึงพื้นที่รับแสงในแนวราบทำให้ค่ารังสีที่ได้มีการกระจายมาจากหลายทิศทางในปริมาณ และมุมตกกระทบต่างๆกันไม่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับ $\cos\theta$ ตามหลักการที่ได้อธิบายมาแล้วในขณะที่สถานีวัดความเข้มแสงส่วนใหญ่เก็บข้อมูลจากการติดตั้งเครื่องมือวัดขนานกับแนวราบจึงจำเป็นต้องมีวิธีประมาณการให้ได้ว่ามีปริมาณแสงเท่าใดตกลงบนแผงรับแสงที่ทำมุมเอียง θ กับระนาบ เพื่อให้นักออกแบบสามารถกำหนดค่ามุม θ ที่เหมาะสมของแผงรับพลังงานในช่วงวัน-เวลาที่ต่างๆกันได้เหมาะสมต่อไป การแปลงค่าที่ได้จากการวัดนั้นจำเป็นต้องแยกออกเป็นองค์ประกอบของรังสีจากแสงอาทิตย์ทั้งหมดเป็น แสงโดยตรง (Direct Irradiance) และแสงที่ได้จากการกระเจิง (Diffused Irradiance) สำหรับความเข้มแสงโดยตรงนั้นสามารถใช้กฎของ Cosine ดังอธิบายมาแล้ว ส่วนการแปลงค่าแสงจากการกระเจิงมีความซับซ้อนมากกว่าเพราะปริมาณของรังสีที่มากระทบกับระนาบแนวนอนมีองศาต่างๆกันไม่สามารถระบุได้ถึงแม้จะใช้วิธีอินทิเกรตเพื่อลำดับค่ามุม θ แต่ปริมาณรังสีในแต่ละองศาก็ไม่แน่นอน ในทางปฏิบัติจึงสะดวกกว่าถ้าสมมติให้รังสีที่ตกกระทบเครื่องมือวัดทั้งหมดเป็นรังสีโดยตรง และพิจารณาตามเงื่อนไขดังต่อไปนี้

วันที่อากาศแจ่มใสสัดส่วนของอัตรารังสีที่กระเจิงมายังเครื่องมือวัดอยู่ในช่วงประมาณ 10%-30% ของปริมาณรังสีรวมทั้งนี้ขึ้นกับละติจูด เวลา และบรรยากาศ สมมติให้ความเข้มรังสีจากดวงอาทิตย์โดยตรงขนานกัน และมีค่าเป็น I_N ให้ความเข้มรังสีในแนวระดับจากเครื่องมือวัดเป็น I_h และความเข้มรังสีบนพื้นผิวรับแสงที่ทำมุม T กับแนวระดับเป็น I_T ดังนั้นหากไม่นำปริมาณรังสีกระเจิงมาคำนวณค่าประมาณขององค์ประกอบสำหรับปรับค่าความเข้มแสง R (Correction Factor) หาได้จาก

$$R = \frac{I_T}{I_h} = \frac{I_N \cos\theta_T}{I_N \cos\theta_h} = \frac{\cos\theta_T}{\cos\theta_h} \qquad (2.17)$$

เมื่อ $\cos\theta_h$ สามารถหาได้จากสมการ 2.8 และ $\cos\theta_T$ หาได้จากสมการ 2.14 Correction Factor สำหรับมุมเอียงที่ถูกต้องสำหรับละติจูดในซีกโลกเหนือนั้นจะได้ $R > 1.2$ ในฤดูหนาว และน้อยกว่า 1.2 ในฤดูร้อน

แต่อย่างไรก็ดี เมื่อให้มุมเอียงของระนาบรับพลังงานมากเกินไปในตำแหน่งละติจูดเดียวกัน ค่า R ที่ลดลงในฤดูร้อนจะมากกว่าค่า R ที่มากขึ้นที่ได้จากฤดูหนาว สำหรับระบบที่ทำงานในฤดูหนาวเป็นส่วนใหญ่ ค่ามุมเอียงที่เหมาะสมจึงควรมีค่ามากกว่าละติจูด ส่วนระบบที่ติดตั้งเพื่อใช้งานทั้งปีนั้นมุมที่เหมาะสมจะมีค่าเท่ากับละติจูดหรือน้อยกว่า สำหรับค่า R ในเวลาต่างๆนอกเหนือจากเวลาเที่ยงวัน ตำแหน่งดวงอาทิตย์จะเยื้องไปทางทิศใต้มากขึ้นในฤดูหนาว ทำให้ค่า R เพิ่มขึ้นโดยแปรผันตามเวลาที่ต่างจากเที่ยงวัน ส่วนในฤดูร้อนการเปลี่ยนแปลงของค่า R จะมีทิศทางตรงกันข้าม สำหรับวันที่ 21 มีนาคม และ 21 กันยายน แฟคเตอร์ R จะคงที่ตลอดทั้งวัน ทั้งนี้เพราะวันดังกล่าวเป็นช่วงรอยต่อวันในแต่ละฤดู และมีมุม $\theta_h = 0^o$

2.4.2 การพิจารณาปริมาณความเข้มแสง

ความเข้มของรังสีจากดวงอาทิตย์จะเปลี่ยนแปลงตามวันในรอบปี เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงระยะทางระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์ตามแนวของวงโคจรของโลก เมื่อเราให้ปริมาณรังสีนอกชั้นบรรยากาศโลก (Extraterrestrial Irradiance) ณ ตำแหน่งที่มีระยะห่างเป็นระยะทางเฉลี่ยของโลกกับดวงอาทิตย์ (Mean Distance) เป็นค่าคงที่สำหรับการเปรียบเทียบค่าที่วัดได้จากระยะทางอื่นๆ ซึ่งสามารถวัดค่าได้ 1353 W/m^2 ค่อนข้างคงที่จากการเก็บข้อมูลจำนวนมากในหลายปีเป็น Solar Constant ส่วนค่าเฉลี่ยสูงสุดที่สามารถวัดได้อยู่ที่ 1377 W/m^2 หากเราให้ค่าความเข้มแสง 1353 W/m^2 เป็นค่ากลางในการเปรียบเทียบเพื่อคำนวณอัตราส่วนความเข้มแสงในรอบปีอื่นๆ ค่าที่ได้ในรอบ 1 ปีค่าส่วนใหญ่มีอัตราส่วนเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง $\pm 3\%$ ตามวันที่เปลี่ยนไปในรอบปีเมื่อเทียบกับ Solar Constant สมการสำหรับวิเคราะห์ Extraterrestrial Irradiance มีดังนี้

$$N_{ext} = S\left(\frac{\bar{r}}{r}\right)^2 \tag{2.18}$$

เนื่องจากการโคจรของโลกเป็นแบบวงรีจึงสามารถใช้สมการคำนวณระยะ r ได้ดังนี้

$$r = \frac{A\left(1-\varepsilon^2\right)}{1+\varepsilon\cos\phi} \tag{2.19}$$

เมื่อกำหนดให้

N_{ext} คือปริมาณความเข้มรังสีนอกชั้นบรรยากาศโลก(W/m^2)

S คือ Solar Constant ที่ระยะห่างเฉลี่ยจากโลกถึงดวงอาทิตย์(W/m^2)

$\bar{r}$ คือระยะทางเฉลี่ยจากโลกถึงดวงอาทิตย์(m)

r คือระยะทางจากโลกถึงดวงอาทิตย์(m)

A คือครึ่งหนึ่งของความยาวแกนหลักวงรี(วงโคจรโลกรอบดวงอาทิตย์)(m)

ε คือระยะเยื้องศูนย์ของวงโคจรของโลก

ϕ คือมุมกวาดของวงโคจรโดยอ้างอิงเป็น 0° ในตำแหน่งที่โลกมีมุมดิคลิเนชั่นเป็นศูนย์(องศา)

ค่า $\bar{r}$ คือการอินทิเกรต r ทั้งวงรอบวงรีได้ดังนี้

$$\bar{r} = \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} r(\phi)d\phi = A\left(1-\varepsilon^2\right)^{1/2} \tag{2.20}$$

ดังนั้นค่า N_{ext} ในช่วงเวลาใดๆหาได้จาก

$$N_{ext} = \frac{S(1+\varepsilon\cos\phi)^2}{(1-\varepsilon^2)} \tag{2.21}$$

เมื่อระยะเยื้องศูนย์ของวงโคจรของโลก (ε) คือ 0.01672 และ ϕ มีค่าเป็นศูนย์ในวันที่ 2 มิถุนายนของทุกปี ดังนั้นค่า ϕ สำหรับวันอื่นๆในปีปฏิทินคือ

$$\phi = (D-2)\frac{360}{365.2} \tag{2.22}$$

ส่วนค่ารังสีตกกระทบนอกชั้นบรรยากาศโลกที่ตั้งฉากกับระราบคือ I_{ext} ได้จากสมการ

$$I_{ext} = N_{ext}\cos\theta \tag{2.23}$$

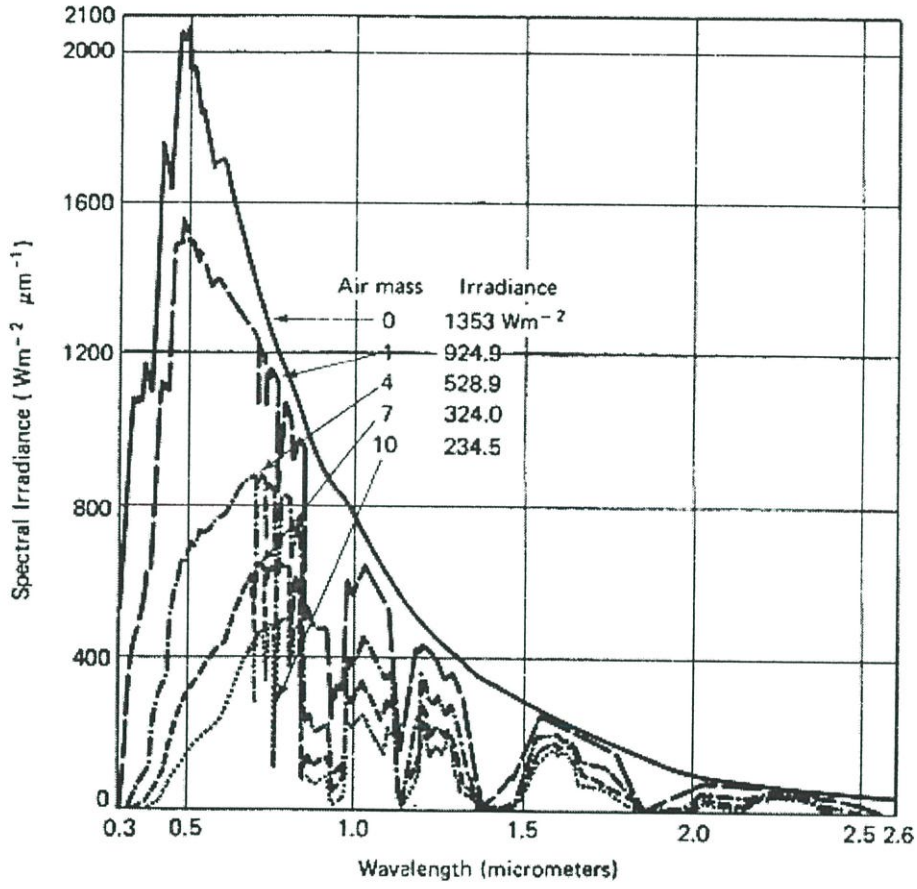
เมื่อ θ คือมุมรังสีตกกระทบเทียบกับแนวดิ่งของระนาบ(องศา)

เนื่องจากพลังงานจากความเข้มแสงที่ผ่านมายังพื้นโลก เกิดหลังจากรังสีจากภายนอกผ่านเข้ามาทางชั้นบรรยากาศ ซึ่งมีการกระเจิง (Scattering) และการดูดกลืน (Absorption) รังสีตามสภาพของชั้นบรรยากาศขณะนั้น จึงมีการกำหนดหลักการเพื่อใช้พิจารณาเรื่องดังกล่าวโดยให้ความเข้มรังสีเหนือชั้นบรรยากาศโลกมีค่ามวลอากาศ (Air Mass) เท่ากับ 0 และปริมาณของมวลอากาศเมื่อพิจารณารังสีที่ได้รับในแนวดิ่งตรงพอดีจากชั้นบรรยากาศลงมายังพื้นผิวโลกมีค่า Air Mass เท่ากับ 1 (หนังสือบางเล่มระบุเป็นที่ระดับน้ำทะเล) จึงเหมือนว่าทุกองศาที่มุม Zenith เอียงมาทางแนวราบมากเท่าใด ระยะทางการเดินทางของรังสีมายังพื้นผิวโลกยิ่งมีค่ามากขึ้น ซึ่งหาได้ดังสมการ

$$l = h\sec\theta_h \tag{2.24}$$

เมื่อ h คือระยะทางในแนวดิ่งของชั้นบรรยากาศในแต่ละท้องถิ่น(m)

l คือระยะทางใดๆ ตามค่า Air Mass ต่างๆ



รูปที่ 2.29 ความเข้มของรังสีจากดวงอาทิตย์ในแต่ละความยาวคลื่นที่ค่า Air Mass ต่างๆ

โดยทั่วไปกำหนดให้ $\frac{h}{l}=1$ ที่แนวดิ่งพอดีมีค่า Air Mass = 1 หากพิจารณาให้มีรังสีบางส่วนของแสงที่ผ่านมายังพื้นโลกที่ถูกกระเจิง และดูดกลืนพลังงานจากชั้นบรรยากาศโลกไปที่ความยาวคลื่นต่างๆ (λ) ในแต่ละระยะทาง l ปริมาณรังสีที่ผ่านมายังโลกในความยาวคลื่นต่างๆ เป็นสัดส่วนกับ $\exp[-\beta(\lambda)\cdot l]$ เมื่อ $\beta(\lambda)$ คือสัมประสิทธิ์การลดทอน (Extinction Coefficient) พลังงานแสงที่ผ่านมายังชั้นบรรยากาศโลก โดยประมาณของความเข้มรังสีได้จากการหาค่าเฉลี่ยฟังก์ชันดังกล่าว แยกพิจารณาในแต่ละความยาวคลื่นให้ค่าประมาณของสัมประสิทธิ์การลดทอนได้เป็น $\overline{\beta}$ ดังนั้นสัดส่วนการส่งรังสีผ่านมายังพื้นผิวโลกโดยเฉลี่ยคือ $\exp[-\beta\cdot l]$ หากวัดค่าสัดส่วนของความเข้มแสงบนพื้นผิวโลกที่ Air Mass เท่ากับหนึ่งต่อความเข้มแสงนอกชั้นบรรยากาศโลกที่ Air Mass เท่ากับศูนย์ได้ก็สามารถประมาณการ $\overline{\beta}$ ของพื้นที่นั้นๆได้ เช่น รูปที่ 2.29 เป็นปริมาณความเข้มรังสีที่ทดสอบได้จากสถานีทดสอบในรัฐเทคซัส ประเทศสหรัฐอเมริกา อัตราส่วนของความเข้มแสงเฉลี่ยที่ Air Mass เท่ากับ 1 กับ Air Mass เท่ากับ 0 คือ 924.6/1353 = 0.6836 ดังนั้น

$$\exp\left[-\overline{\beta}\cdot l\right]=\exp\left[-\overline{\beta}\cdot 1\right]=0.6836$$

$$\overline{\beta}=0.38$$

หากนำข้อมูลความเข้มแสงเฉลี่ยทั้งหมดจากสถานีทดสอบในแต่ละวันในรอบหลายปีมาเขียนกราฟที่มีความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสง และเวลาที่ทดสอบ กราฟที่ได้จะมีลักษณะเหมือนกันในแต่ละวันของแต่ละปีสำหรับวันที่อากาศแจ่มใส ดังนั้นจากความน่าจะเป็นของข้อมูลจำนวนมากที่ให้ผลการทดสอบไปในทิศทางเดียวกันทำให้สามารถนำสมการทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากการประมาณค่าสม-การจากกราฟ (Curve Fitting) มาใช้ในการคำนวณ Direct Irradiance ได้ดังนี้

$$N(H,D)=N_0\left[1-\left(\frac{|H-12|}{4.7+0.0126d}\right)^{3.5}\right] \tag{2.25}$$

$$N_0=77-6\cos\left[\frac{D_s-220\pi}{182.6}\right] \tag{2.26}$$

เมื่อกำหนดให้

N คือปริมาณรังสีเฉลี่ยบนพื้นโลก (Normal Incidence Intensity on Earth Surface) (W/m^2)

H คือ Solar Time (h) มีค่าอยู่ในช่วง 0-24

D คือจำนวนวันในรอบปีโดยนับจากวันที่ 21 ธันวาคม เป็นศูนย์กลาง โดยนำวันที่พิจารณามาหาผลต่างที่น้อยที่สุดจากวันที่เป็นศูนย์กลาง

D_s คือจำนวนวันในรอบปี กำหนดให้วันที่ 21 ธันวาคม มีค่าเป็น 1

N_0 คือค่าความเข้มแสงมากสุดในเวลาเที่ยงวัน (W/m^2)

สมการทั้งหมดสามารถใช้ได้อย่างถูกต้องในสถานีทดสอบส่วนการนำสมการไปใช้ในพื้นที่อื่นนั้น จำเป็นต้องทดสอบเก็บข้อมูลในลักษณะเดียวกันเพื่อปรับค่าคงที่ต่างๆอีกครั้ง แต่ก็สามารถนำแนวโน้มที่ได้จากสมการไปใช้เพื่อประโยชน์ในการทำนายค่าพลังงานที่สมควรจะได้รับในแต่ละวันได้ ดังนั้นหากต้องการนำสมการไปใช้ในพื้นที่อื่นที่มีละติจูดแตกต่างออกไป สมการในรูปแบบทั่วไปเพื่อหาค่าประมาณสำหรับการวัด Normal Incidence Intensity on Earth Surface คือ

$$N(H,D_s)=N_{ext}(D_s)\exp\left\{-\overline{\beta}(D_s)\sec\left[\theta_h(H,D)\right]\right\} \tag{2.27}$$

เมื่อกำหนด

$\overline{\beta}(D_s)$ คือค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์การลดทอนในวันที่ D_s ในรอบปี

$\sec\theta_h(H,D_s)$ คือ Air Mass ที่เวลา H ในวันที่ D_s

$N_{ext}(D_s)$ คือค่าความเข้มรังสีจากดวงอาทิตย์ที่นอกชั้นบรรยากาศโลก (W/m^2)

$N(H, D_s)$ คือ Direct Irradiance (W/m^2)

ความเข้มแสงโดยตรง และความเข้มแสงกระจาย (Direct and Diffuse Irradiance)

ปัญหาที่นำมาพิจารณาในที่นี้คือเมื่อแยกความเข้มแสงโดยรวม(Global Irradiance) ออกเป็นความเข้มแสงโดยตรง (Direct Irradiance) และความเข้มแสงกระจาย (Diffuse Irradiance) แล้ว สัดส่วนของความเข้มแสงทั้งสองส่วนมีค่าเป็นเท่าใด สำหรับ Direct Irradiance ที่วัดได้ในแนวราบ สามารถใช้อัตราส่วน $\cos\theta$ ในการเปลี่ยนเป็นปริมาณ Direct Irradiance ที่ตกลงบนแผงรับพลังงานที่ทำมุม θ กับแนวราบได้ หากเรากำหนดให้มุม Azimuth ของแนวราบ และระนาบที่ทำมุมเอียง T เป็น θ_0 และ θ_T ตามลำดับ ค่าความเข้มแสงโดยตรงที่แนวราบ และระนาบเอียง T องศาคือ

$$D_0 = N\cos\theta_0, D_T = N\cos\theta_T \tag{2.28}$$

ถ้านำค่าความเข้มแสงโดยตรงเหล่านี้ตัดออกจากความเข้มแสงโดยรวมที่วัดได้ ส่วนที่เหลือย่อมเป็นความเข้มรังสีกระจายนั่นเอง ซึ่งความเข้มแสงกระจายสามารถวัดได้โดยใช้ Pyrheliometer ดังนั้นความเข้มแสงกระจายของแนวราบ และระนาบเอียง T องศา เรียงตามลำดับคือ

$$F_0 = I_0 - D_0, F_T = I_T - D_T \tag{2.29}$$

เมื่อกำหนดให้

F_0, F_T คือความเข้มแสงกระจายที่พื้นราบ และระนาบเอียง (W/m^2)

I_0, I_T คือความเข้มแสงโดยรวมที่พื้นราบ และระนาบเอียง (W/m^2)

D_0, D_T คือความเข้มแสงตรงที่พื้นราบ และระนาบเอียง (W/m^2)

เพื่อหาความสัมพันธ์ของการนำค่าความเข้มแสงโดยรวมซึ่งได้จาก ความเข้มแสงตรง และความเข้มแสงกระจาย เนื่องจากเครื่องมือวัดความเข้มแสงในสถานีวัดตามสถานที่ต่างๆที่เก็บข้อมูลไปมากพอสมควรแล้วส่วนใหญ่ตั้งเครื่องมือวัดขนานกับพื้น หรือแนวราบมีเพียงบางส่วนที่ตั้งเครื่องมือวัดทำมุมเอียงกับแนวราบ ในขณะที่การติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ส่วนมากติดตั้งแบบทำมุมเอียงกับแนวราบ ดังนั้นข้อมูลทั้งหมดที่นำมาใช้จึงต้องสามารถแปลงความเข้มแสงรวมในแนวนอนเป็นความเข้มแสงรวมที่ระนาบเอียง T องศาใดๆได้

เนื่องจากรังสีกระจายไม่สามารถแปลงค่าโดยใช้อัตราส่วนของมุมตกกระทบที่แนวราบได้ เนื่องจากมุมตกกระทบของรังสีกระจายในแต่ละความยาวคลื่นมีค่าไม่เท่ากัน ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องกำหนดอัตราส่วนระหว่างรังสีกระจายในแนวราบเทียบกับรังสีกระจายที่ระนาบเอียง T องศา ให้ค่าที่ได้เป็น Q ดังนั้น Q หาได้จาก

$$Q = \frac{F_T}{F_0} \tag{2.30}$$

ส่วนอัตราส่วนระหว่างระนาบทั้งสองสำหรับรังสีตรงคือ สมการที่ (2.17)โดยให้ $\theta_h = \theta_0$

$$R = \frac{\cos\theta_T}{\cos\theta_0} \tag{2.31}$$

ดังนั้นอัตราส่วนของความเข้มแสงโดยรวมคือ

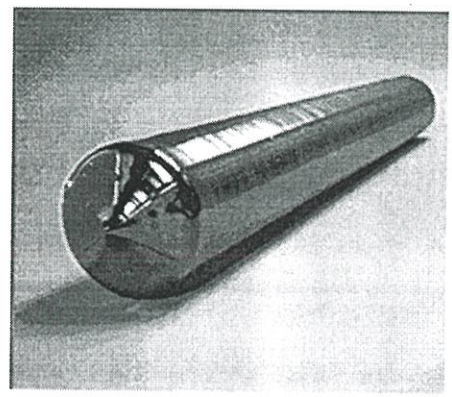
$$S = \frac{I_T}{I_0} = \left(\frac{F_0}{I_0}\right)Q + \left(1 - \frac{F_0}{I_0}\right)R \tag{2.32}$$

สำหรับสถานีวัดที่ไม่ได้บันทึกค่า I_T การประมาณการค่า S จะทำได้อย่างไรนั้น เนื่องจาก R สามารถคำนวณได้ ถ้าอัตราส่วนของ F_0/I_0 มีค่าน้อย S จะมีค่าใกล้เคียงกับ R ส่วนค่า R ต้องมีค่าประมาณเท่าใดจึงสามารถสมมติให้เท่ากับ S ได้นั้นต้องเกิดจากการทดสอบจริงที่พื้นที่นั้นจนมีข้อมูลเพียงพอเสียก่อน

2.4.3 ทฤษฎีของเซลล์แสงอาทิตย์

ปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์มีอยู่ด้วยกันหลายชนิดโดยแบ่งออกได้หลายชนิดดังนี้ คือ

1. เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิกอน
2. เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกโพลีซิลิกอน
3. เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัส
4. เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสารประกอบกึ่งตัวนำ



รูปที่ 2.30 ลักษณะแท่งผลึกซิลิกอน ก่อนการตัดเพื่อทำเป็นแผ่นผลึกสารกึ่งตัวนำ

2.4.3.1 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิกอน

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ปัจจุบันมีการผลิตใช้งานกันมากที่สุด เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิกอนนั้นทำมาจากซิลิกอนที่มีระนาบเดียวกันตลอดทั้งชิ้นงาน โดยที่ความหนาของแผ่นซิลิกอนนั้นมีค่าน้อย ทำให้น้ำหนักเบาและเป็นวัสดุที่ทนต่อแรงเค้นแม้จะมีความหนาเพียง 50 μm ก็ยังคงสภาพเป็นแผ่นได้ดี เซลล์ชนิดนี้จะมีประสิทธิภาพมากกว่าเซลล์ชนิดผลึกโพลีซิลิกอน และแบบอะมอร์ฟัส โดยที่ลักษณะสมบัติการผลิตพลังงานไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงตามอายุการใช้งานน้อยมาก อายุการใช้งานนานถึง 20 ปี ข้อเสียของเซลล์ชนิดนี้จะมีบ้างก็คือ เนื่องจากผลึกซิลิกอนมีช่องว่างแถบพลังงานชนิดไม่ตรง (Indirect Band Gap) ดังนั้นสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงมีค่าน้อย การผลิตจึงต้องผลิตให้หนาพอสมควร ซึ่งความหนาจะอยู่ประมาณ μm ขึ้นไป โดยที่การผลิตนั้นทำได้ง่าย ซึ่งใช้เทคโนโลยีการสร้าง IC ในการทำรอยต่อพี-เอ็น ซึ่งมีความก้าวหน้าไปมากในปัจจุบัน โดยในทางทฤษฎีแล้วเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้มีประสิทธิภาพสูงถึง 44 % แต่ในทางปฏิบัติจริงเซลล์ชนิดนี้จะมีการสูญเสียต่างๆ เกิดขึ้นทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์มีค่าต่ำลง

2.4.3.2 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกโพลีซิลิกอน

เซลล์ชนิดนี้ทำมาจากซิลิกอนที่ในผลึกจะมีระนาบของผลึกหลายชนิดปนอยู่ในระนาบเดียวกัน เช่น (111),(112) และ (330) เป็นต้น เมื่อดูด้วยตาเปล่าจะเห็นความแตกต่างของสีของแต่ละระนาบอย่างชัดเจน อาณาเขตของผลึกเรียกว่า “เกรน” (grain) เทคโนโลยีปัจจุบันนี้สามารถผลิตโพลีซิลิกอนให้มีเกรนที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่หลายสิบไมครอนถึงหลายพันไมครอน ถ้าเกรนมีขนาดใหญ่กว่าความหนาของเซลล์ พาหะโฟโตที่เกิดจากแสงสามารถเดินทางผ่านรอยต่อพี-เอ็น ออกสู่วงจรภายนอกเซลล์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ข้อเสียของเซลล์ชนิดนี้ก็คือมีพันธะของซิลิกอนที่มีแขนขาดอยู่มาก ซึ่งไม่มีซิลิกอนอะตอมอื่นมาเกาะพันธะด้วย ซึ่งพันธะแขนขาดนี้จะเป็นตัวทำให้เกิดสถานะจุดบกพร่อง (Defect State) ซึ่งสถานะจุดบกพร่องนี้จะเป็นตัวคอยจับพาหะข้างน้อยที่หลุดลอยจากการรับพลังงานแสงไม่ให้เดินทางออกสู่วงจรภายนอก และส่งผลทำให้เวลาอายุ (Life Time) ของพาหะข้างน้อยลดลง และที่ขอบของเกรนจะทำให้เกิดแถบพลังงานที่ขอบของเกรนเกิดเส้นโค้งขึ้น

2.4.3.3 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิกอน

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้จะเป็นแบบฟิลม์บาง ซึ่งสร้างมาจากอะมอร์ฟัสซิลิกอน ซึ่งเป็นซิลิกอนที่เรียงตัวกันแบบไม่เป็นระเบียบหรือเป็นระเบียบในช่วงระยะสั้นของอะตอมแต่ไม่เป็นระเบียบในช่วงระยะยาวของอะตอม ซึ่งการเรียงตัวของอะตอมอย่างเป็นระเบียบในช่วงระยะสั้นของอะตอมจะทำให้มีคุณสมบัติคล้ายผลึก แต่ในขณะที่การเรียงตัวแบบไม่เป็นระเบียบในช่วงระยะ

ยาวของอะตอมนี้จะทำให้มีคุณสมบัติต่าง ๆ แปลกออกไปเช่น ค่าคงที่ต่าง ๆ ทางฟิสิกส์สามารถเปลี่ยนแปลงได้ และคุณสมบัติทางฟิสิกส์จะเหมือนกันตลอดทุกทิศทางของวัสดุ ข้อดีของอะมอร์ฟัสซิลิกอน ก็คือ มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ดี สามารถผลิตได้ที่อุณหภูมิต่ำประมาณ 200-300 องศาเซลเซียส โดยการสร้างบนพื้นผิวฐานรองอะไรก็ได้ ราคาถูกและประหยัดพลังงาน เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ถูกผลิตครั้งแรกในปี ค.ศ.1977 โดย Carlson และ Wronski ต่อมา Dr Hamakawa มหาวิทยาลัยโอซาก้า ได้ออกแบบเป็นเซลล์แสงอาทิตย์เป็นลักษณะของ (a-Su:H) p-I-n ซึ่งใช้กันอยู่ทุกวันนี้ประสิทธิภาพโดยรวมของเซลล์ชนิดนี้มีค่าอยู่ประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์[32] และเซลล์ชนิดนี้สามารถประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์อย่างอื่นอีกเช่น ตัวตรวจจับแสงสีต่าง ๆ

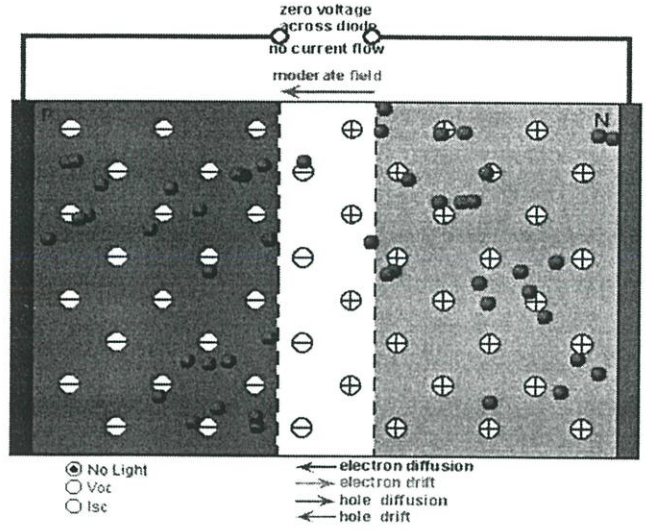
2.4.3.4 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสารประกอบกึ่งตัวนำ

เซลล์ชนิดนี้สร้างจากสารประกอบกึ่งตัวนำตระกูล III-V เช่น GaAs และ InP และสารประกอบกึ่งตัวนำตระกูล II-VI เช่น Cds, DdTe ซึ่งผลิตขายในเชิงอุตสาหกรรมแล้ว โดยมากเซลล์ที่สร้างจาก GaAs และ InP จะใช้กันมากในอวกาศ โดยเฉพาะ InP นั้นจะมีคุณสมบัติทนต่อรังสีได้ดี ข้อดีของเซลล์จำพวกนี้คือ เซลล์มีประสิทธิภาพสูง เนื่องจากสารที่นำมาทำเซลล์มีค่าช่องว่างพลังงานที่สูงประมาณ 1.4-1.5 eV และมีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงสูงเนื่องจากเป็นแสงที่มีช่องว่างแถบพลังงานแบบตรง (direct band gap) ซึ่งสามารถทำเป็นแบบฟิล์มบางได้ โดยถ้าเทียบเป็นประสิทธิภาพที่ 15 % จะต้องใช้ซิลิกอนที่มีความหนาถึง 100μm ในขณะที่ใช้ GaAs จะใช้ความหนาเพียง 10μm เซลล์ชนิดนี้จะมีความทนทานต่อรังสีสูง และทำงานได้ดีในความเข้มสูงๆ คุณสมบัติเด่นอีกข้อหนึ่งก็คือ สามารถสร้างเป็นหลายๆ ชั้นได้จะทำให้มีศักยภาพในการดูดกลืนคลื่นแสงในลักษณะสเปรกตรัมที่กว้างได้ดี

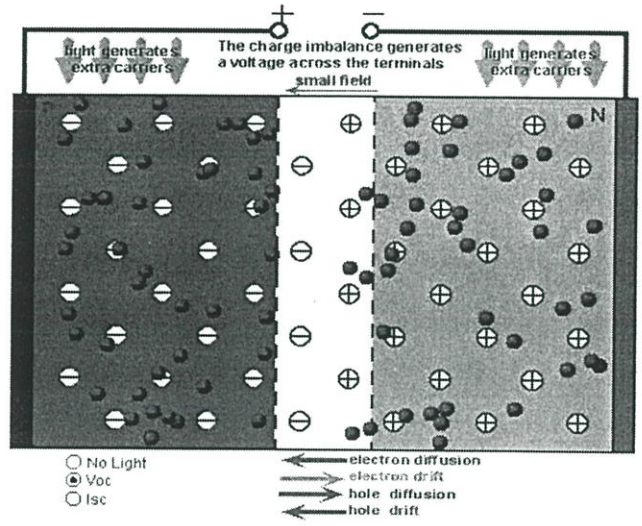
โดยที่กล่าวยกตัวอย่างชนิดของเซลล์แสงอาทิตย์มาทั้ง 4 ชนิดนั้น สารแต่ละชนิดที่นำมาทำเซลล์นั้นจะมีช่องว่างแถบพลังงานที่ต่ำคืออยู่ระหว่าง 0.4-2.0 eV ซึ่งช่องว่างแถบพลังงานนี้เองจะเป็นตัวกำหนด "แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร" V_{OC} ซึ่งถ้า E_g มีค่ามากค่าของ V_{OC} ก็จะมีค่ามากตามไปด้วย แต่ถ้า E_g มีค่าน้อยก็จะได้ V_{OC} น้อยเช่นกัน

ตัวกำหนดค่าของ V_{OC} นอกจากจะเป็นค่า E_g แล้วยังมีอีกอย่างหนึ่งก็คือ "กระแสไฟฟ้าย้อนกลับอิ่มตัวของไดโอด" I_S (Saturated Reverse Current) ซึ่งค่าของ I_S มีค่าน้อยก็จะทำให้ค่าของ V_{OC} มีค่ามากเพราะค่าของ I_S เป็นปฏิภาคผกผันกับ E_g โดยสามารถแสดงลักษณะการเคลื่อนที่ของอิเล็คตรอน และโฮล ในกรณีต่างๆ ดังรูปที่ 2.31

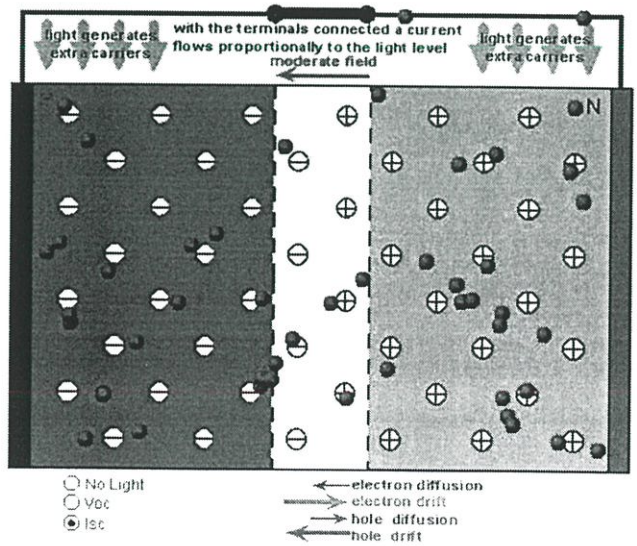
(ก)



(ข)



(ค)

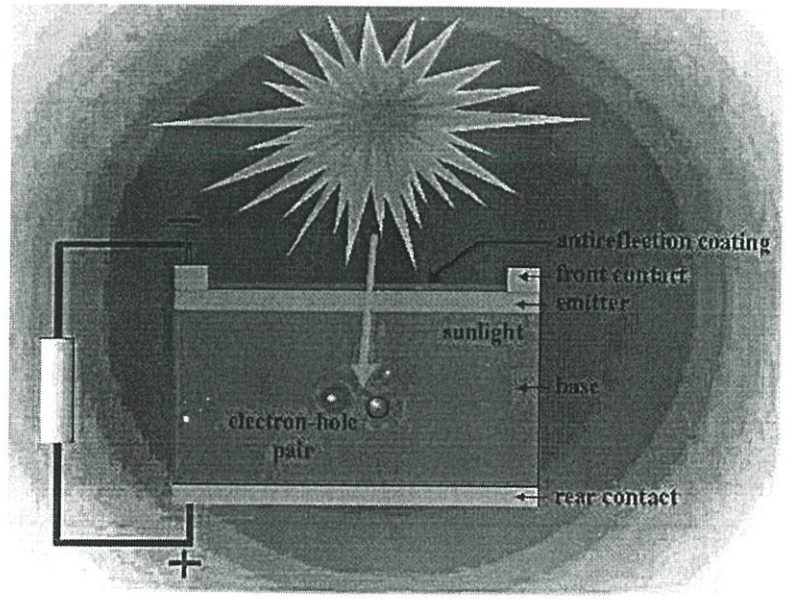


รูปที่ 2.31 ลักษณะการเคลื่อนที่ของอิเล็คตรอนและโฮลในแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่สภาวะต่างๆ (ก) กรณีไม่มีแสงตกกระทบบนแผงเซลล์, (ข) เมื่อเกิดการเปิดวงจร, (ค) เมื่อเกิดการลัดวงจร

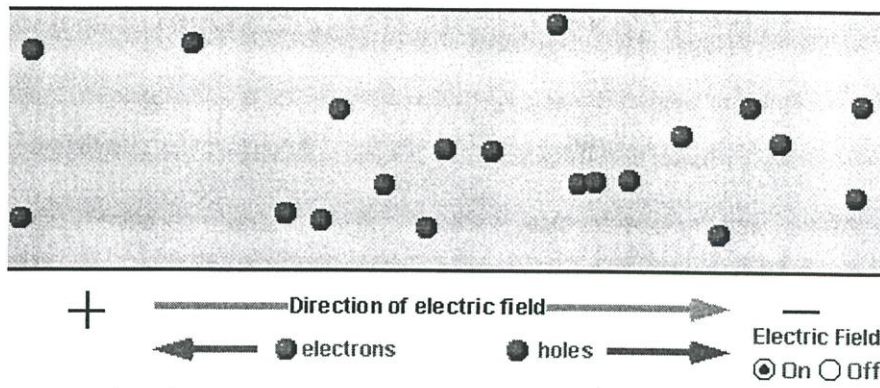
ปัจจัยอื่นๆ ที่ทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าต่ำลงก็คือ อุณหภูมิ โดยที่อุณหภูมินี้จะมีผลอย่างมากกับเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้สารที่มีค่า E_g ต่ำๆ มาทำ เพราะว่าอุณหภูมิจะทำให้ "กระแสไฟฟ้าลัดวงจร" (I_{SC}) สูงขึ้นแต่ไม่มากนัก แต่ค่าของ V_{OC} และค่าฟิลล์แฟกเตอร์ (FF) จะมีค่าลดลง จึงทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ต่ำลง ซึ่งกล่าวโดยสรุปก็คือค่าของพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เป็นตัวกำหนดค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ในตอนนี้ก็คือ ค่าของ V_{OC} และ I_{SC} ต้องมีค่ามาก ส่วนค่าของ I_S จะต้องมีค่าน้อย โดยที่อุณหภูมิจะต้องไม่สูงจนเกินไป

2.4.4 หลักการทำงานโดยทั่วไปของเซลล์แสงอาทิตย์

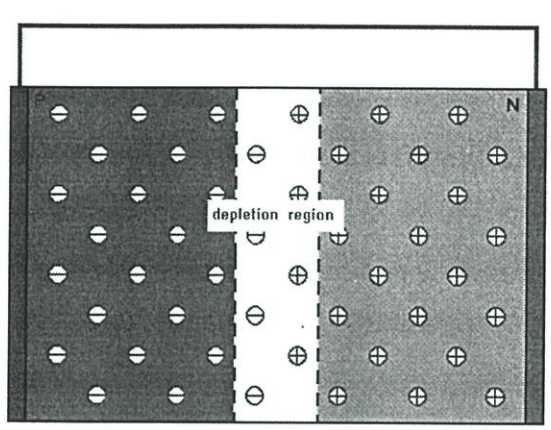
เมื่อสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและชนิดพีมาต่อเข้าด้วยกันนั้น จะได้ลักษณะของแถบพลังงานซึ่งอยู่ในสถานะของสมดุลความร้อน และเมื่อมีแสงมาตกกระทบที่บริเวณปลอดพาหะนั้นจะทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอนโฮลขึ้น ดังรูปที่ 2.32 ทั้งนี้ต้องขึ้นอยู่กับพลังงานแสงด้วยว่าจะเพียงพอที่จะกระตุ้นให้อิเล็กตรอนสามารถที่จะเปลี่ยนระดับพลังงานขึ้นไปยังแถบความนำได้หรือไม่ ถ้าพลังงานมากพอก็จะกระตุ้นให้อิเล็กตรอนเปลี่ยนระดับพลังงานขึ้นไปยังแถบความนำได้และจะเหลือโฮลไว้ที่แถบวาเลนซ์ ที่บริเวณปลอดพาหะนั้นจะมีสนามไฟฟ้าอยู่ ซึ่งมีทิศทางจากสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นไปยังสารกึ่งตัวนำชนิดพี สนามไฟฟ้านี้เองจะเป็นตัวทำให้อิเล็กตรอนที่เกิดจากแสงเคลื่อนที่ไปยังด้านเอ็น ในขณะเดียวกันโฮลก็จะเคลื่อนที่ไปยังด้านพี โดยการเคลื่อนที่ของประจุพาหะอิเล็คตรอนและโฮลภายใต้สนามไฟฟ้าได้แสดงดังรูปที่ 2.33



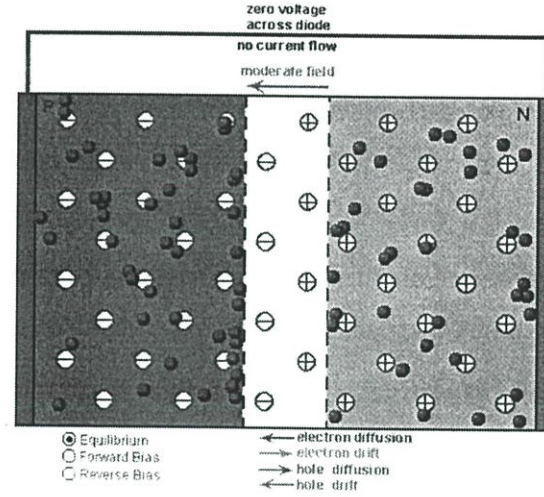
รูปที่ 2.32 การเกิดคู่อิเล็คตรอน และโฮลขึ้นเมื่อมีแสงอาทิตย์มาตกกระทบลงบนเซลล์



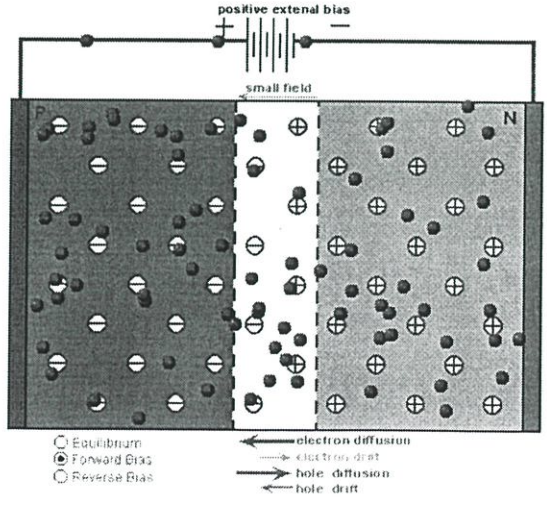
รูปที่ 2.33 การเคลื่อนที่ของประจุพาหะอิเล็คตรอนและโฮลภายใต้สนามไฟฟ้า



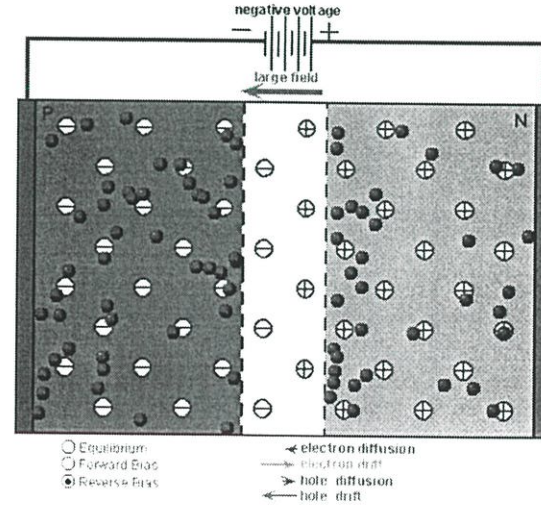
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 2.34 ลักษณะการเคลื่อนที่ของประจุพาหะอิเล็คตรอนและโฮลในสารกึ่งตัวนำที่สภาวะต่างๆ ก) สภาพปกติ, ข) ที่สภาวะสมดุล, ค) การกระตุ้นแบบ forward bias ง) การกระตุ้นแบบ reverse bias

2.4.4.1 คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์

เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์มีโครงสร้างเป็นแบบรอยต่อพี-เอ็น เพียงรอยต่อเดียวเหมือนไดโอด ดังนั้นคุณสมบัติทางแสงของเซลล์ในขณะที่ยังไม่ได้รับแสงจึงเหมือนกับไดโอดทั่วไป เพียงแต่มีกระแสรั่วไหลที่รอยต่อมากกว่าเท่านั้นดูได้จากรูป 2.34 ซึ่งแสดงลักษณะการเคลื่อนที่ของประจุพาหะอิเล็คตรอนและโฮลในสารกึ่งตัวนำที่สภาวะต่างๆไว้ นอกจากนี้เซลล์แสงอาทิตย์ยังมีพื้นที่รอยต่อมากกว่า ในขณะที่เซลล์ได้รับแสงทิศทางการไหลของกระแสที่ผ่านรอยต่อของเซลล์จะตรงกันข้ามกับขณะที่ยังไม่ได้รับแสง โดยที่แรงดันยังมีลักษณะเหมือนเดิมดังรูปที่ 2.35

เซลล์จะจ่ายกระแสออกมามากที่สุดเมื่อเซลล์ถูกลัดวงจรซึ่งให้มีค่าเป็น I_{sc} และ เซลล์จะจ่ายแรงดันไฟฟ้าได้มากที่สุด เมื่อเซลล์ถูกเปิดวงจรออก ซึ่งให้มีค่าเป็น V_{oc} เมื่อพิจารณาพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์ ซึ่งเป็นผลคูณระหว่างกระแสและแรงดันแล้ว จะพบว่ากราฟคุณสมบัติของเซลล์ในขณะที่ได้รับแสงในรูปที่ 2.35 จะมีอยู่จุดหนึ่งที่ค่าผลคูณของกระแสและแรงดันมีค่าสูงสุด จุดนี้จะเรียกว่าจุดพลังงานสูงสุดของเซลล์ กระแสและแรงดันที่จุดนี้มีค่าเป็น I_m และ V_m ตามลำดับถ้าเรานำไปให้กับแหล่งรับพลังงานหรือโหลด ที่มีความต้านทานพอดีกับจุดนี้ เซลล์จะจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับโหลดมีค่าสูงสุด ค่าความต้านทานของโหลดภาระที่เหมาะสมนี้จะคำนวณได้จากอัตราส่วนระหว่าง V_m ต่อ I_m หรือมีค่าท่ากับ V_m / I_m

ผลคูณของกระแสและแรงดันที่จุดพลังงานสูงสุดจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความชันในกราฟ คือ ถ้ากราฟมีความชันมากลักษณะกราฟที่ได้จะใกล้เคียงกับสี่เหลี่ยมมาก ค่าที่ได้ก็มากตามไปด้วย การที่กราฟของเซลล์แสงอาทิตย์มีความชันแตกต่างกันนั้น เป็นผลมาจากความต้านทานภายในเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละเซลล์นั้นมีความแตกต่างกัน จากกราฟคุณสมบัติของเซลล์นี้จะมีค่าๆหนึ่งที่แสดงให้เห็นว่าเซลล์สามารถจะจ่ายพลังงานไฟฟ้าออกมาใกล้เคียงกับค่าในอุดมคติมากเท่าใด ค่านี้จะเรียกว่าค่า "ฟิลแฟกเตอร์" (F.F. : Fill Factor) ของเซลล์ ซึ่งคำนวณได้จากสมการ

$$F.F = \frac{P_m}{P_o} = \frac{I_m * V_m}{I_{sc} * V_{oc}} \tag{2.32}$$

เมื่อ $F.F.$ คือ ค่าฟิลแฟกเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์

P_m คือ พลังงานสูงสุดที่ได้รับจากเซลล์จริงๆ(W)

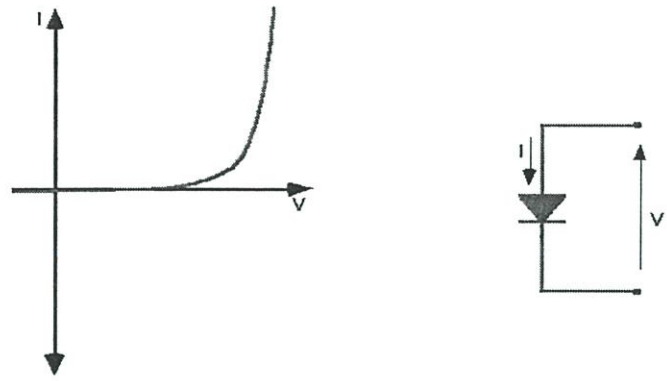
I_m คือ กระแสสูงสุดที่ได้รับจากเซลล์(A)

V_m คือ แรงดันสูงสุดที่ได้รับจากเซลล์(V)

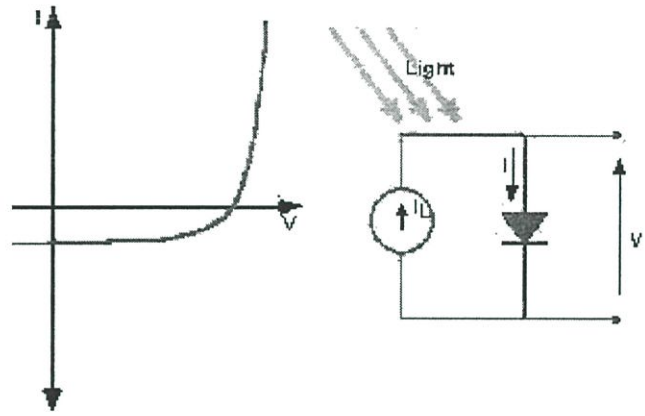
P_o คือ พลังงานสูงสุดที่ได้รับจากเซลล์ในทางอุดมคติ(W)

I_{sc} คือ ค่ากระแสลัดวงจร(A)

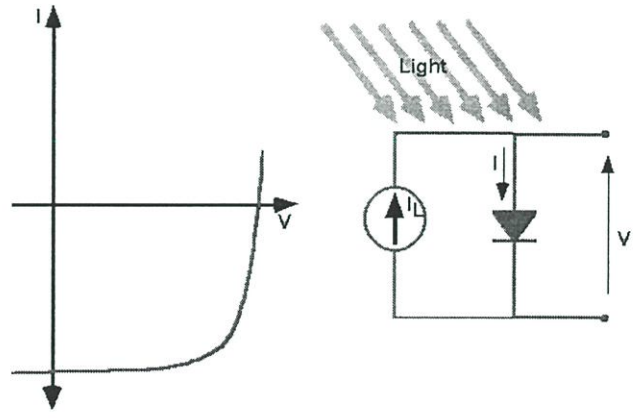
V_{oc} คือ แรงดันขณะวงจรเปิด(V)



(ก)



(ข)



(ค)

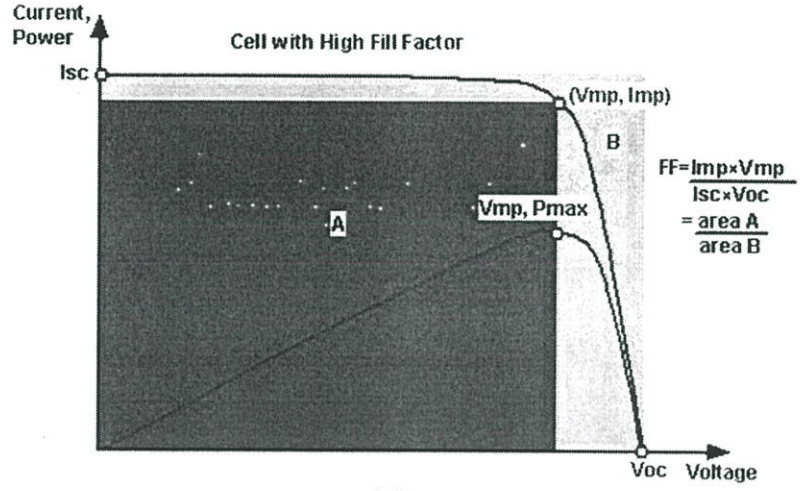
รูปที่ 2.35 การเปลี่ยนคุณลักษณะเฉพาะของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สภาวะต่างๆ

ก) เมื่อไม่มีแสงตกกระทบ

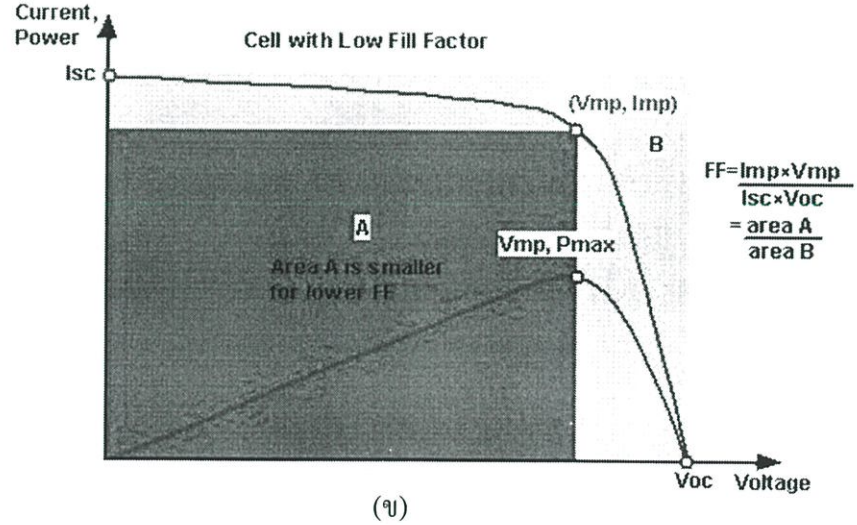
ข) เมื่อมีแสงตกกระทบเพียงเล็กน้อย

ค) เมื่อแสงที่ตกกระทบมีปริมาณมาก

จะเห็นได้ว่าค่าฟิลแฟกเตอร์มีค่าสูงสุดไม่เกิน 1 ถ้าค่าฟิลแฟกเตอร์มีค่าใกล้เคียง 1 มาก แสดงว่า เซลล์สามารถจ่ายพลังงานไฟฟ้าออกมาใกล้เคียงกับเซลล์แสงอาทิตย์ทางอุดมคติมาก โดยพลังงานจะอยู่ในฟังก์ชันของแรงดันภายใต้ I-V curve ค่ากำลังที่ได้สูงสุดนั้นจะอยู่ภายในสี่เหลี่ยมผืนผ้าของพื้นที่ใต้โค้งนั้นที่จุดกำลังสูงสุด (P_{mp}), กระแสสูงสุด (I_{mp}) และแรงดันสูงสุด (V_{mp}) ในอุดมคติเซลล์ควรจะทำงานภายใต้ค่า ณ. จุดกำลังสูงสุดนี้



(ก)

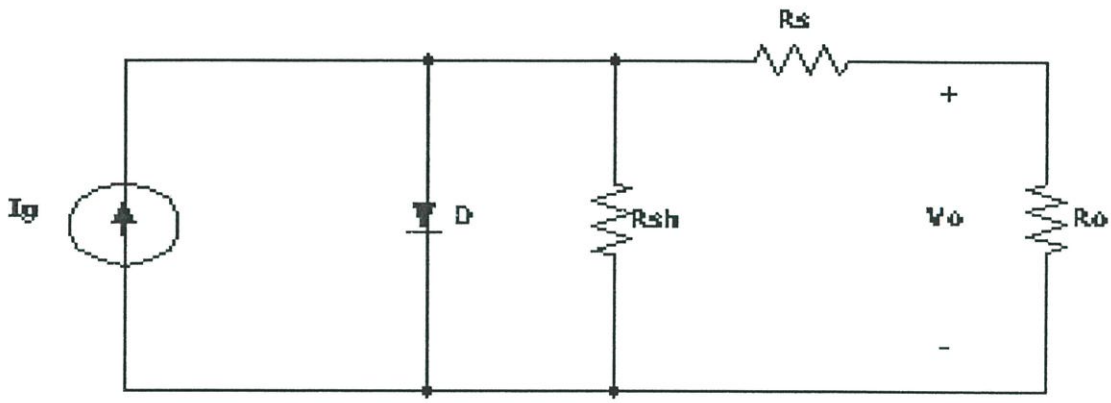


(ข)

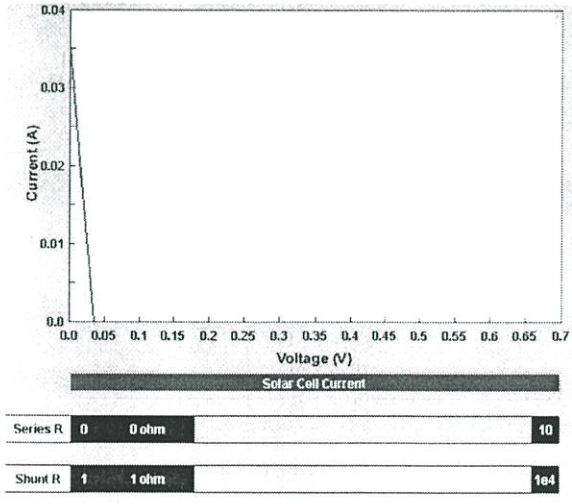
รูปที่ 2.36 การพิจารณากราฟคุณลักษณะเฉพาะ เพื่อดูผลการเปลี่ยนแปลงค่าฟิลแฟกเตอร์ และจุดกำลังสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์

ก) เมื่อค่าฟิลแฟกเตอร์มีค่าสูง ข) เมื่อค่าฟิลแฟกเตอร์มีค่าต่ำ

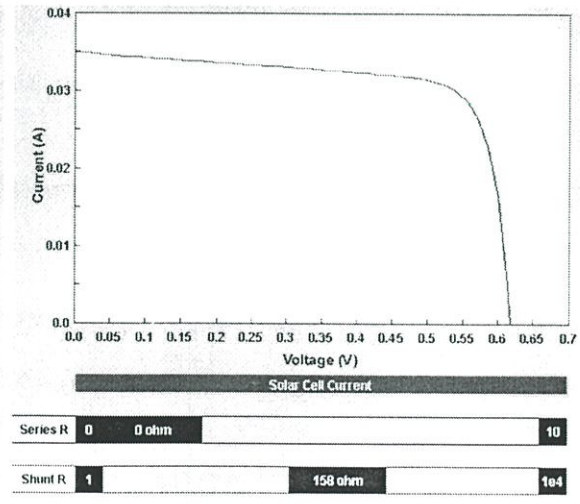
เพื่อที่จะเข้าใจคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ พิจารณาวงจรสมมูล (Equivalent Circuit) ดังแสดงในรูปที่ 2.37 เซลล์แสงอาทิตย์ประกอบไปด้วย แหล่งจ่ายกระแสคงที่ นั่นก็คือ กระแสของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เกิดจากแสง (I_L) ความต้านทานอนุกรมภายในเซลล์ (R_s) ความต้านทานขนาน (R_{sh}) และรอยต่อพี-เอ็นของไดโอด กระแส I_L ที่เกิดเนื่องจากแสงนี้จะถูกแบ่งไหลผ่านไดโอด และ R_{sh} แล้วจึงไหลมายังโหลด (R_L) กระแสที่ไหลผ่าน R_s และ R_L ให้มีค่าเป็น I_o



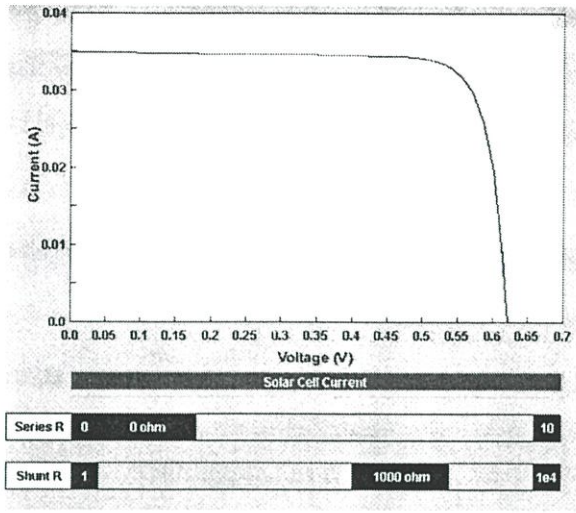
รูปที่ 2.37 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อพิจารณาผลของความต้านทานอนุกรม และความต้านทานขนาน



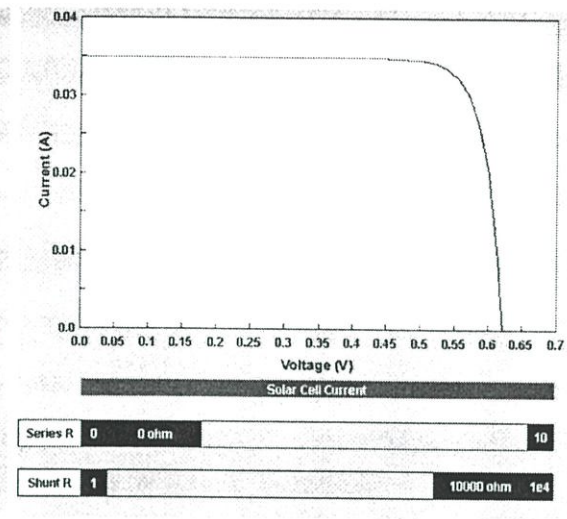
2.38 (ก)



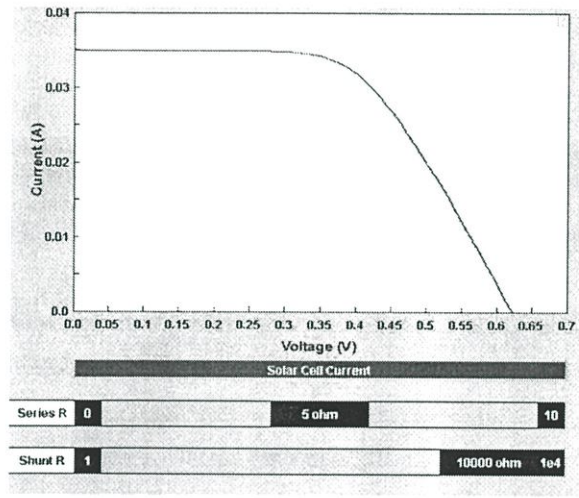
2.38 (ข)



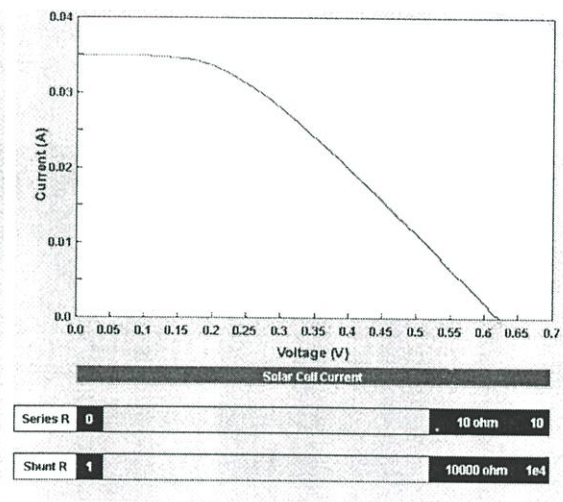
2.38 (ค)



2.38 (ง)



2.38 (จ)



2.38 (ฉ)

รูปที่ 2.38 ผลการเปลี่ยนแปลงกราฟคุณลักษณะเมื่อค่าความต้านทานอนุกรม (R_s) และความต้านทานขนาน (R_{sh}) เปลี่ยนแปลงค่าไป

ก) R_{sh} = 1 Ω และ R_s = 0 Ω

ข) R_{sh} = 158 Ω และ R_s = 0 Ω

ค) R_{sh} = 1,000 Ω และ R_s = 0 Ω

ง) R_{sh} = 10,000 Ω และ R_s = 0 Ω

จ) R_{sh} = 10,000 Ω และ R_s = 5 Ω

ฉ) R_{sh} = 10,000 Ω และ R_s = 10 Ω

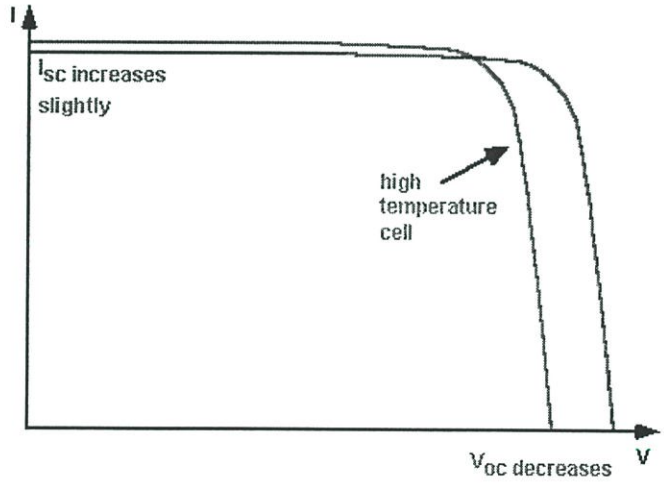
2.4.4.2 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์

ในการนำเซลล์ไปใช้งานจริงๆ นั้น เซลล์จะต้องได้รับความร้อนอันเนื่องมาจากแสงอาทิตย์ด้วย ซึ่งอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากความร้อนนี้ก็มีผลต่อกระแสและแรงดันที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยดูผลดังกล่าวได้จากรูป 2.39

การคาดคะเนอุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยใช้ค่าของปริมาณแสง อุณหภูมิโดยรอบ และความเร็วลม สามารถพิจารณาได้ดังนี้

$$T_c = T_a + \theta_G (1 + \theta_{Ta} T_a)(1 - \theta_{Vm} V_m) G \qquad (2.33)$$

สมการ 2.33 ซึ่ง T_C เป็นอุณหภูมิของอาร์เรย์ และ T_a เป็นอุณหภูมิโดยรอบ V_m เป็นความเร็วลม G เป็นปริมาณแสง $\theta_G = 0.0138$, $\theta_{Ta} = 0.031$ และ $\theta_{VW} = 0.042$ เป็นค่าคงที่ ซึ่งหาได้จากข้อมูลการทดลอง



รูปที่ 2.39 ผลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์

2.4.4.3 คุณสมบัติและรูปแบบการกำเนิดไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์

การออกแบบระบบ และการทำงานของ เซลล์แสงอาทิตย์ อยู่บนรากฐานของคุณสมบัติทางไฟฟ้า เช่น ความสัมพันธ์ระหว่าง แรงดันและกระแสเซลล์ภายใต้การเปลี่ยนแปลงปริมาณแสง และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเซลล์ (Cell Temperature) ค่าต่าง ๆ สำหรับจุดประสงค์ในการออกแบบระบบ รูปแบบจะถูกจัดให้อยู่ในการคำนวณค่าเฉลี่ยของกระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้าของเซลล์ภายใต้ช่วงสภาวะการใช้งานที่ถูกระบุไว้และคุณสมบัติต่าง ๆ เหล่านี้ต้องการข้อมูลจากผู้ผลิต เซลล์แสงอาทิตย์ นั้น ๆ ด้วย

ในรูปที่ 2.37 เป็นวงจรสมมูลที่ถูกใช้ในการคำนวณสำหรับเซลล์แต่ละตัว และใช้ในการประกอบโมดูลของหลาย ๆ เซลล์ และในการประกอบแถวลำดับเซลล์ (array) ของหลายๆ โมดูล โดยต้องทำการพิจารณาค่าพารามิเตอร์ 5 ชนิด ได้แก่ I_L, I_O, R_S, R_{sh} และพารามิเตอร์การปรับโค้งของเซลล์ที่อุณหภูมิและปริมาณแสงที่ระบุไว้ โดยคุณสมบัติของกระแสและแรงดัน เป็นดังสมการต่อไปนี้

$$I = I_L - I_D - I_{sh} = I_L - I_O\{\exp[\frac{V+IR_S}{a}] - 1\} - \frac{(V+IR_S)}{R_{sh}} \qquad (2.30)$$

และพลังงานจะเป็นดังสมการ

$$P = IV \qquad (2.31)$$

ลักษณะกระแส และแรงดันของระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ เป็นดังรูป 2.36 แกนของกระแส (ซึ่ง V=0) คือกระแสลัดวงจร และจุดตัดที่แกนแรงดัน (ซึ่ง I=0) เป็นแรงดันเปิดวงจร ซึ่งในช่วงนี้กระแสจะเกือบคงที่ถึงประมาณ 15 V และที่จุดนี้กระแสไดโอด(I_D) จะเริ่มเพิ่มขึ้นอย่างมาก สำหรับที่สภาวะเปิดวงจร ที่ประมาณ 20 V กระแส I_L ทั้งหมด(I_L คือ กระแสที่เกิดจากแสง) จะผ่านตัวไดโอด และความต้านทานแบบขนาน(ความต้านทานแบบชั้น) สำหรับการเปรียบเทียบเซลล์ซิลิกอนขนาด 1 ตารางเซนติเมตร ที่ปริมาณแสง 1000 W/m^2 แรงดันเปิดวงจรจะอยู่ประมาณ 0.6 V และกระแสลัดวงจรจะอยู่ประมาณ 20-30 มิลลิแอมแปร์

2.5 การศึกษาผลการต่อร่วมเซลล์แสงอาทิตย์

2.5.1 การจัดสมดุลพลังงานของระบบ

โดยการออกแบบระบบนั้นอยู่บนรากฐานของความสมดุลระหว่างพลังงานที่ผลิตได้จากแสงแต่ละปี กับพลังงานที่โหลดต้องการ ข้อมูลในการหาขนาดของระบบเป็นดังนี้

- พิจารณาจากข้อมูลของปริมาณแสงของพื้นที่นั้น และมุมเอียงของแผงเข้าด้วยกัน โดยใช้การวิเคราะห์ปริมาณแสงที่ตกในแต่ละวันในทุกเดือนของปี
- การพิจารณาความต้องการของโหลดที่ถูกระบุ หรือชนิดของโหลดที่เหมือนกันในระบบจะถูกใช้ในการพิจารณาความต้องการของโหลดในแต่ละวัน

1) การหาจำนวนโมดูลที่ต่อกันแบบอนุกรม

แรงดันกระแสตรง(V_{DC}) ที่ใช้งานของระบบจะถูกกำหนดมาให้ ดังนั้นจำนวนโมดูล(N_S) ซึ่งถูกต่อกันแบบอนุกรมจะหาได้จากค่าแรงดันของระบบ โดยสามารถเขียนได้เป็น

$$N_S = \frac{V_{DC}}{V_m} \tag{2.32}$$

ซึ่ง V_m เป็นแรงดันที่ผลิตได้ของโมดูล หนึ่ง โมดูล

2) จำนวนของแผงเซลล์ที่จะถูกต่อกันแบบขนาน

จำนวนแผงเซลล์ที่นำมาต่อขนานนี้จะเกี่ยวข้องกับกระแสที่ต้องการของโหลดภาระ โดยกระแสของโหลดภาระนี้ สามารถคำนวณได้จาก

$$I_L(A) = \frac{E_L}{(24V_{DC})} \tag{2.33}$$

ซึ่ง E_L (W_h/day) เป็นค่าพลังงานที่โหลดภาระต้องการ

ตอนนี้เราสามารถหาค่ากระแสปกติ (I_P) ซึ่งได้จากการผลิตของแผงที่ทำงาน ณ. จุดกำลังสูงสุด และปริมาณแสงที่มาตรฐาน AM 1.5 (ปริมาณแสงที่ 1 kW/m^2) ซึ่งสมดุลของพลังงานในแต่ละวันสามารถเขียนได้ดังนี้

$$E_L(W_h / day) = PSH * I_P * V_{DC} \tag{2.34}$$

เมื่อเรานำปริมาณแสงที่หาได้แล้วบนแผงทำให้อยู่ในรูปของ Peak Solar Hours (*PSH*) ซึ่งเท่ากับจำนวนของชั่วโมงที่ปริมาณแสงมาตรฐาน (1 kW/m^2) ดังนั้นจึงชัดเจนว่าค่า *PSH* เป็นค่าที่เท่ากับปริมาณแสงในรูปของ kWh/m^2day โดยใช้สมการที่ 2.33 และ 2.34 จะได้

$$I_P = \frac{24I_L}{PSH} \tag{2.35}$$

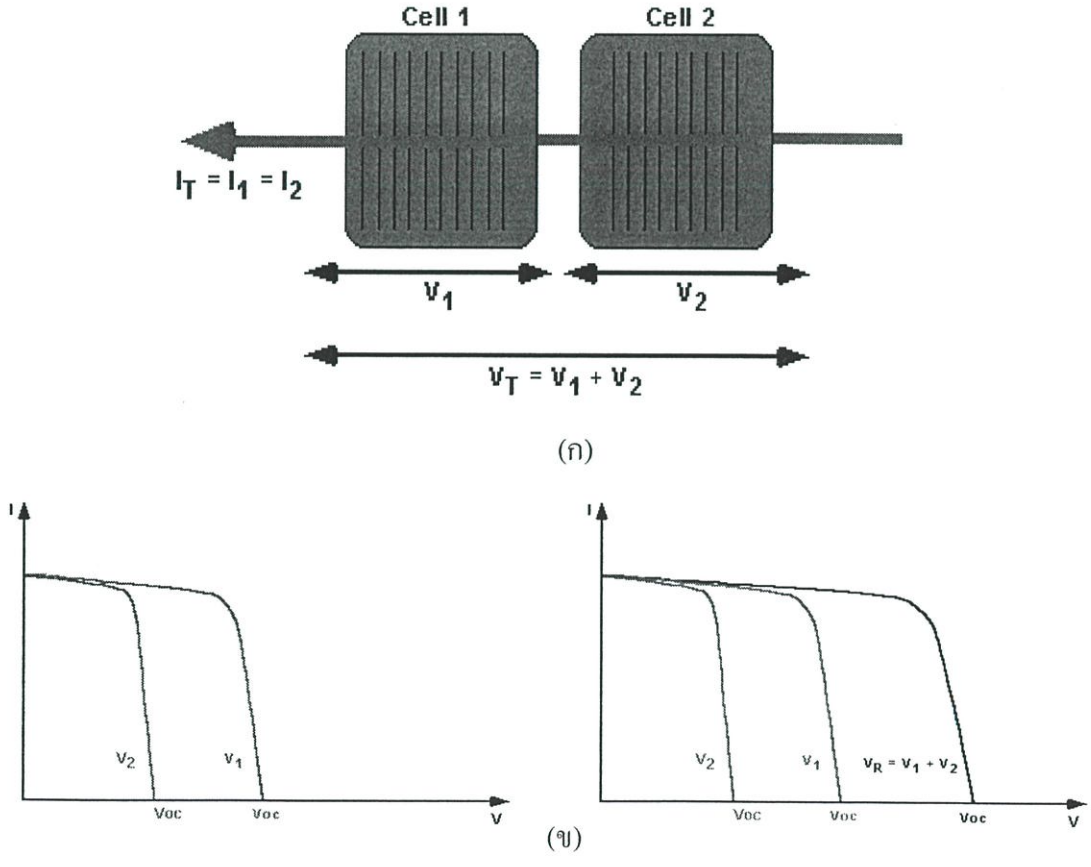
จากสมการที่ 2.35 สามารถแปลงค่าง่าย ๆ คือ กระแสเฉลี่ยของโหลดภาระ คูณกับจำนวนชั่วโมงในหนึ่งวันต้องเท่ากับ กระแสปกติ(peak)ของแผงเซลล์ คูณกับจำนวนชั่วโมงของ *PSH* ดังนั้นจำนวนโมดูล ที่ต่อแบบขนานจะสามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$N_P = \frac{(SF)I_P}{I_m} \tag{2.36}$$

ซึ่ง I_m เป็นค่ากระแสปกติ ที่ผลิตได้จากโมดูลของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ แต่ละตัวเมื่อแสงตกกระทบภายใต้สภาวะมาตรฐาน และ *SF* เป็นค่า Sizing Factor ซึ่งค่าตัวนี้เป็นค่าขนาดของการเผื่อของปริมาณกระแสที่จะผลิตได้สำหรับอาร์เรย์ โดยค่า Sizing Factor ตัวนี้จะอยู่ในช่วง 1-1.6

การต่อเซลล์ในลักษณะเป็นโมดูลมาตรฐานทำให้สะดวกในการใช้งาน และการผลิตเป็นอุตสาหกรรมก็สามารถควบคุมกระบวนการผลิตให้ได้มาตรฐานแน่นอน โมดูลจะถูกนำมาประกอบโดยการเชื่อมต่อเซลล์ดังที่ได้กล่าวมาแล้วและต่อสายไฟออกมาภายนอก ตัวโมดูลถูกประกบด้วยซับสเตรทกับกระจกปิดทับพร้อมกับนำไปใช้งานได้ การต่อเซลล์ในรูปแบบอนุกรม/ขนาน (หรือขนาน/อนุกรม) นั้นจะต้องคำนึงถึงข้อจำกัดที่สำคัญอันหนึ่ง คือความน่าเชื่อถือ อาจกล่าวได้อีกอย่างหนึ่งว่าจะต้องแน่ใจว่าแผงเซลล์มีความปลอดภัยและใช้งานได้แน่นอน ถึงแม้จะใช้งานสนามเซลล์ในกรณีที่เลวร้าย เช่น เซลล์บางตัวเกิดชำรุด (เซลล์มีการเปิดวงจรหรือลัดวงจร) หรือเกิดเงาบังเซลล์บางส่วนของแถวลำดับเซลล์แสงอาทิตย์

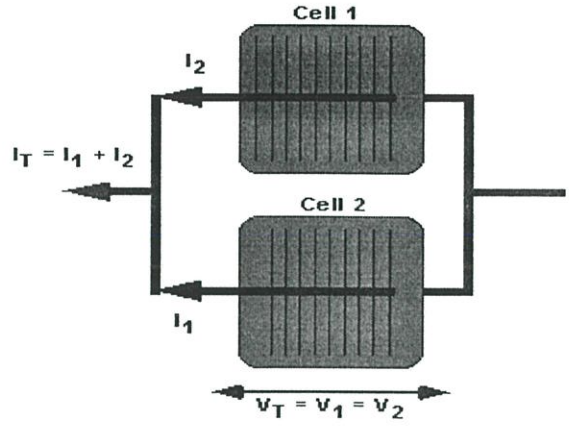
ในวงจรที่มีเซลล์ต่อแบบอนุกรมและขนาน ชุดของเซลล์ที่ต่อดังในรูป 2.40 เมื่อนำมาต่ออนุกรมเพิ่มขึ้นจำนวนหนึ่งจนได้แรงดันมาตรฐานดังที่กล่าวมาแล้ว เรียกว่า โมดูลจัดเข้าแผงได้ ก็เช่นเดียวกันเซลล์จำนวนหนึ่งต่อขนานกันเรียกว่าซับโมดูล เอาซับโมดูลจำนวนหนึ่งต่ออนุกรมกันจนได้แรงดันมาตรฐาน เรียกว่า โมดูล หรือสตริง (Strings) ดังในรูปที่ 2.41



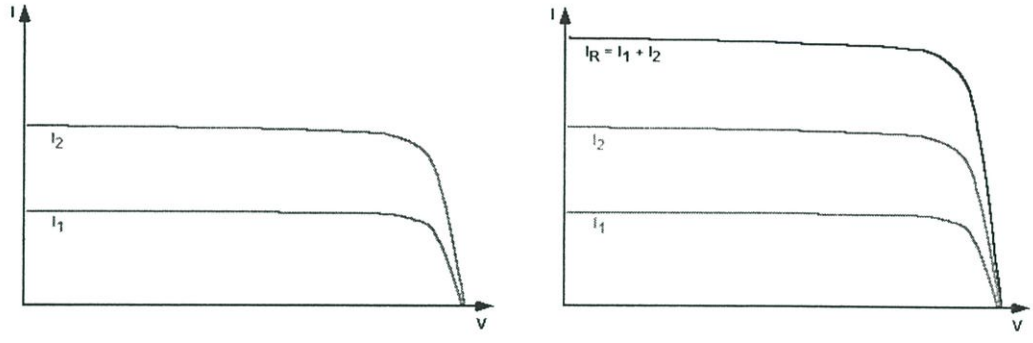
รูปที่ 2.40 คุณลักษณะของการต่อร่วมเซลล์แสงอาทิตย์แบบอนุกรม

ก) การต่อเซลล์ร่วมกันแบบอนุกรม

ข) การเปลี่ยนแปลงกราฟคุณลักษณะจากผลการต่อร่วมเซลล์แบบอนุกรม



(ก)



(ข)

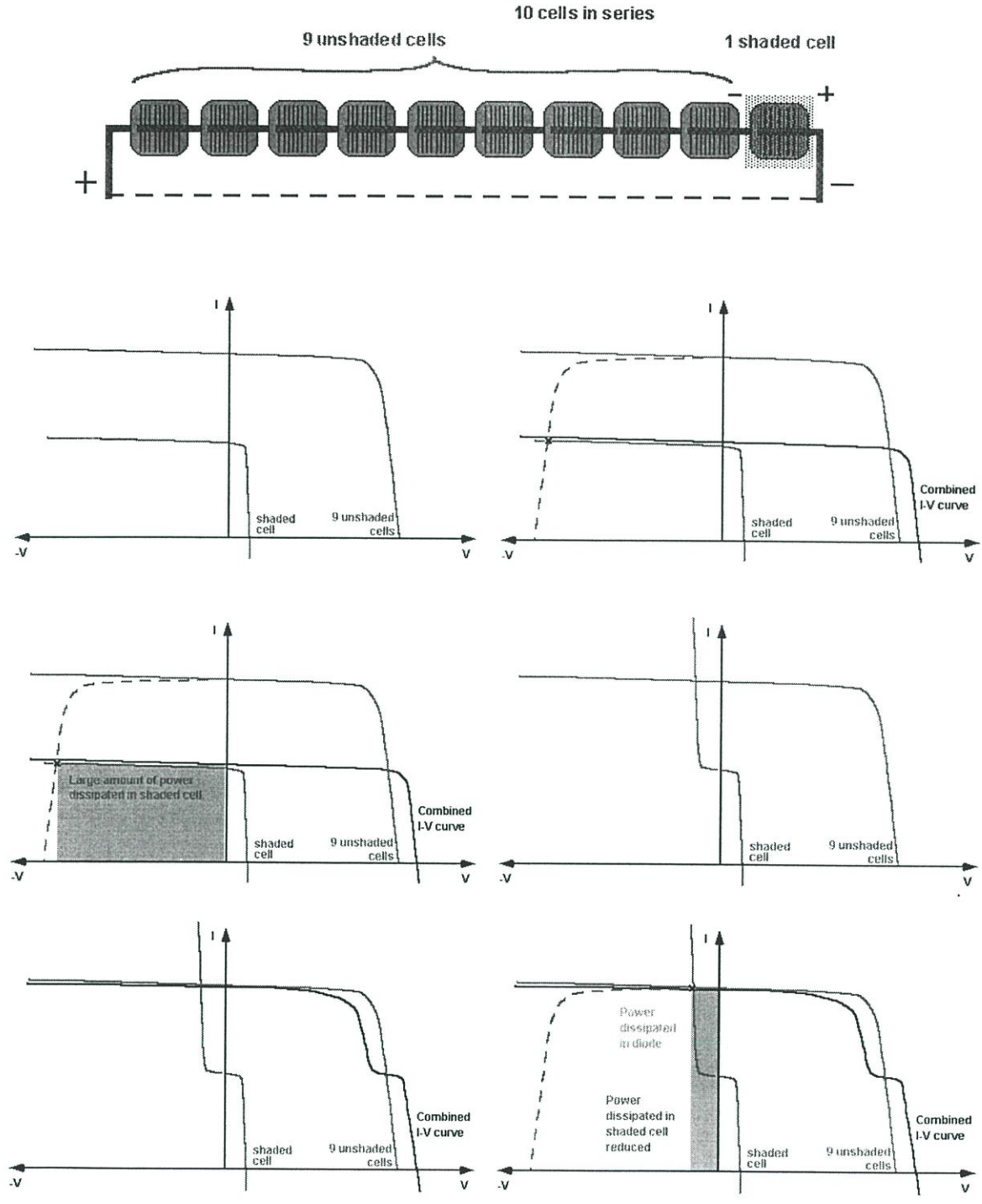
รูปที่ 2.41 คุณลักษณะของการต่อร่วมเซลล์แสงอาทิตย์แบบขนาน

ก) การต่อเซลล์ร่วมกันแบบขนาน

ข) การเปลี่ยนแปลงกราฟคุณลักษณะจากผลการต่อร่วมเซลล์แบบขนาน

2.5.2 ความสิ้นเปลืองกำลังสูงสุดของเซลล์หนึ่งตัวในแผงเซลล์

เซลล์ตัวเดียวเมื่อต่อเข้ากับโหลดภาระ ถ้าเซลล์ถูกเงาบังหรือโหลดเปลี่ยนแปลงก็ไม่เกิดความเสียหายใดๆ ต่อเซลล์นั้น เพราะว่ามันเป็นกำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในวงจรนั้น เซลล์ยังทนทานต่อการเกิดวงจรเปิดหรือลัดวงจรได้ดีอีกด้วย แต่ถ้าเซลล์นี้ต่อกับเซลล์อื่นๆ อีกหลายตัวเป็นแถวลำดับ ตอนนี้จะมีตัวกำเนิดไฟฟ้าจำนวนมากซึ่งบางกรณีอาจจะไปไบอัสเซลล์ตัวที่ถูกเงาบัง ทำให้เซลล์พังเนื่องจากกำลังไฟฟ้าจำนวนมากจ่ายเข้าไปในเซลล์เกิดความร้อนสูง โดยพิจารณาจากผลการเปลี่ยนกราฟคุณลักษณะเมื่อมีการบังเงาบางส่วนบนแผงเซลล์ดังรูปที่ 2.42 ถึงแม้ในเซลล์จะทนอุณหภูมิสูงได้ถึง 150^{O} - 200^{O}C ก็ตาม จึงควรกำหนดมิให้เซลล์เกิดความร้อนสูงเกิน 100^{O}C เพราะถ้าอุณหภูมิสูงกว่านี้ ส่วนที่ใช้เคลือบเซลล์อาจจะเกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพ เป็นผลให้ประสิทธิภาพและการทำงานของแผงเซลล์แย่ลง อายุการใช้งานจะสั้น

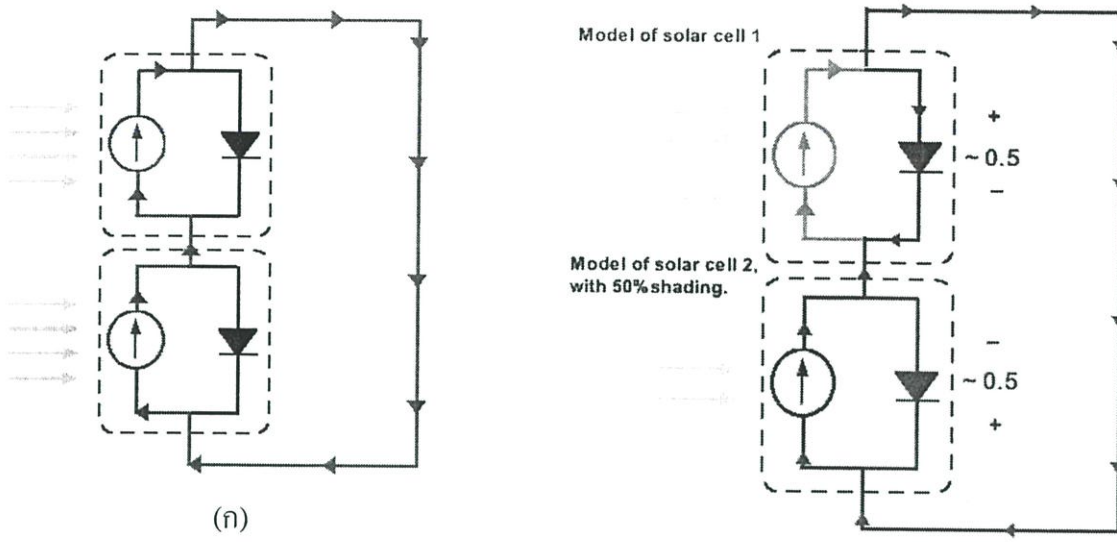


รูปที่ 2.42 ผลการเปลี่ยนกราฟคุณลักษณะเมื่อมีการบังเงาบางส่วนบนแผงเซลล์

การไบอัสตรงของเซลล์

เซลล์ที่ถูกเงาบังจะถูกไบอัสตรง ถ้ามีเซลล์อีกจำนวนหนึ่ง (ได้รับแสงและกำลังผลิตไฟอยู่) ต่อขนานกับมัน สมมุติแยกซับโมดูลออกจากแถวลำดับดังรูป 2.43 กระแสทั้งหมดที่ผลิตจากเซลล์ (ต่อขนาน) ที่ถูกแสงจะผ่านเข้าไปยังเซลล์ที่ถูกเงาบัง เหตุการณ์นี้มักเกิดในตอนซ่อมบำรุงหรือเปลี่ยนเซลล์ในแผงกลางแดด ดังนั้นถ้าคำนึงถึงความแตกต่างที่เป็นไปได้ของ V_{OC} สำหรับเซลล์

ในกลุ่มเดียวกันนี้ จะช่วยให้สามารถกำหนดจำนวนจำกัดของเซลล์ที่ควรจะนำมาต่อขนานกันและมีความปลอดภัยได้

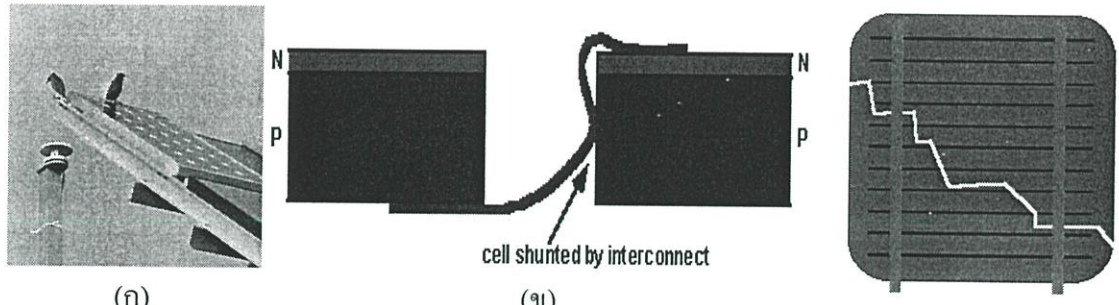


(ก) (ข)

รูปที่ 2.43 ผลการทำงานของชุดเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้การรับอาบรังสีแสงอาทิตย์ที่ต่างกัน

ก) ได้รับปริมาณแสงเท่าๆ กัน

ข) ได้รับปริมาณแสงที่ไม่เท่ากันเนื่องจากการบังเงา



(ก) (ข) (ค)

รูปที่ 2.44 ผลกระทบต่างๆ ที่ส่งผลต่อคุณสมบัติการใช้งานของเซลล์แสงอาทิตย์

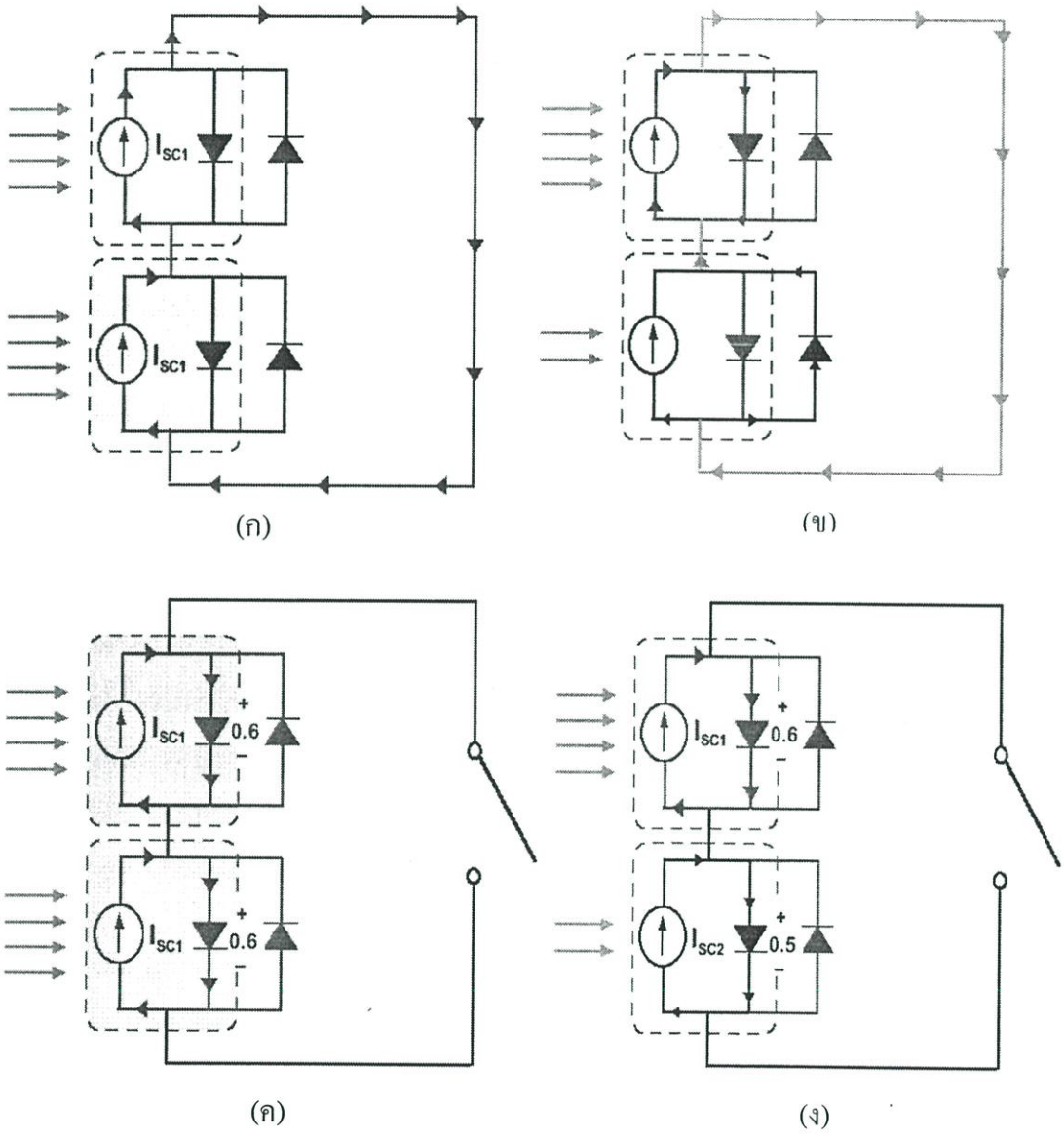
ก) มูลของนกที่เกาะตามแผงเซลล์ ค) การแตกร้าวบนแผงเซลล์

ข) การต่อร่วมเซลล์ที่ไม่สมบูรณ์

การไบอัสกลับของเซลล์

การไบอัสกลับของเซลล์มักทำความเสียหายแก่เซลล์ (ผลที่ตามมาอาจทำให้เซลล์ทั้งหมดในแผงเสื่อมคุณภาพ) เนื่องจากเกิดความร้อนในตัวเซลล์สูงเกินไป เมื่อเซลล์ 1 ตัวมีกระแสต่างจากเซลล์ตัวอื่นที่ต่ออนุกรมอยู่ อาจมีสาเหตุมาจากการถูกเงาบังหรือเกิดการชำรุด โดยดูได้จากตัวอย่างสาเหตุของการบกพร่องได้จากรูปที่ 2.44 เช่น กริดหัก เซลล์แตก และจากความไม่สมบูรณ์ต่างๆ

เป็นต้น สิ่งเหล่านี้ทำให้มีการสิ้นเปลืองกำลังในตัวเซลล์ เนื่องจากแรงดันของเซลล์อื่นๆ จะไปไบอัสกลับต่อเซลล์ตัวนั้น จุดไบอัสของเซลล์ตัวที่มีปัญหาได้จากจุดตัดระหว่างเส้นลักษณะเฉพาะ I-V - กลับของมันกับเงาของลักษณะเฉพาะตรงของ I-V อื่นที่ต่ออนุกรมอยู่และโหลดภายนอก



รูปที่ 2.45 สถานะการทำงานของชุดเซลล์เมื่อมีการลัดวงจร และเปิดวงจรภายใต้การรับอาบรังสีที่ต่างกัน

ก) สถานะการลัดวงจรเมื่อได้รับแสงเท่ากัน ข) สถานะการลัดวงจรเมื่อปริมาณแสงต่างกัน

ค) สถานะการเปิดวงจรเมื่อได้รับแสงเท่ากัน ง) สถานะการเปิดวงจรเมื่อปริมาณแสงต่างกัน

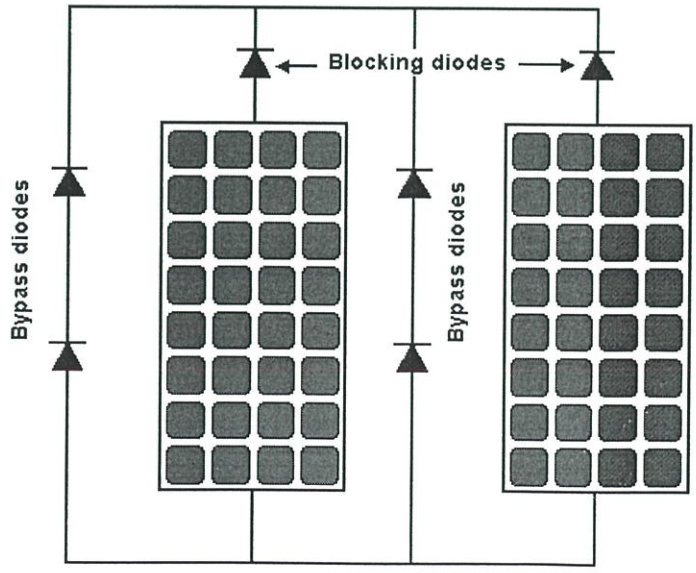
ในภาวะลัดวงจรเงาเส้น I-V ที่กล่าวถึงคือเส้น I-V ของเซลล์ (n-1) ตัว ส่วนในกรณีมีโหลดต่ออนุกรมอยู่จะต้องคำนวณหาเงาของเส้น I-V โดยเอาแรงดันที่ตคคร่อมโหลดหักออกจากเส้น I-V เดิมเสียก่อน รูป 2.45 แสดงให้เห็นผลจากภาวะลัดวงจร อันเป็นผลจากแรงดันรวม

ทั้งหมดของเซลล์ที่ถูกแสงจะไปไบอัส (กลับ) เซลล์ตัวเงาบัง กำลังสิ้นเปลืองอาจสูงมาก ดังนั้นในแถวลำดับแรงดันสูง (high voltage arrays) จึงควรระมัดระวังการออกแบบโมดูลให้มีการป้องกันที่เหมาะสม เพื่อความปลอดภัยของเซลล์ในขณะทำงาน

2.5.3 รูปแบบการต่อเซลล์อย่างอนุกรม และขนาน

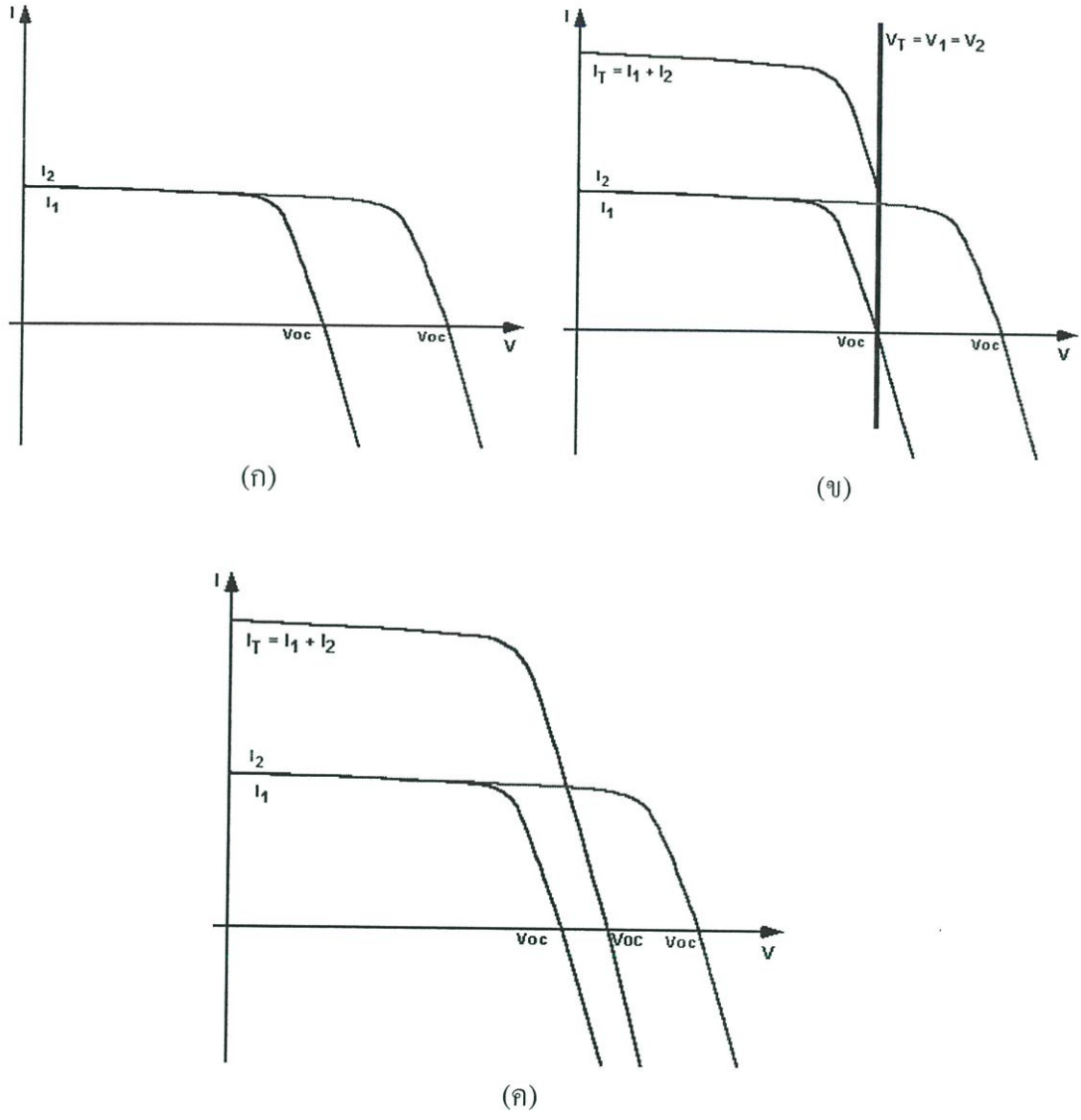
ในการต่อเซลล์ขนาน m ตัว (1 ซับโมดูล) และต่ออนุกรม n ซับโมดูล ถ้าเซลล์ 1 ตัว ถูกเงาบัง (หรือไม่คู่ควร) ความรุนแรงของการไบอัสกลับต่อตัวมันจะน้อยเพราะว่าเซลล์ตัวอื่นทุกตัวที่ต่อขนานกับมันจะต้องถูกแรงดันไบอัสตัวเดียวกันในกรณีนี้เซลล์ตัวอื่นๆ (ที่ถูกแสง) ที่ขนานกันจะสิ้นเปลืองกำลังสูงกว่าเซลล์ตัวถูกเงาบังเสียอีกเพราะที่แรงดันเดียวกัน มันจำต้องเฉลี่ยกันรับภาวะกระแสที่ดังรูป 2.46 สมมุติต่อบายพาสไดโอดคร่อม n ซับโมดูลที่อนุกรมกัน ขณะนี้กำลังพิจารณาในแง่เมื่อเกิดภาวะการไบอัสกลับสำหรับเซลล์เงาบัง 1 ตัว ในกลุ่มเซลล์ขนาน (ในซับโมดูลอันหนึ่งอันใด) โดยซับโมดูลที่มีเซลล์เงาบังจะถูกไบอัสกลับเมื่อซับโมดูลที่เหลือซึ่งอยู่ในสตริง อนุกรมเดียวกัน พยายามดันกระแสซึ่งมากกว่าให้ผ่านซับโมดูลที่มีเซลล์เงาบัง (กระแสสูงกว่า I_{SC} ของมันที่ควรจะมีตามปกติ) สำหรับบายพาสไดโอดมันจะถูกไบอัสตรงทันทีที่ที่ซับโมดูลนี้ถูกไบอัสกลับเลี่ยงกระแสไม่ให้ผ่านสตริงนี้ พิจารณาจากรูป 2.46 ในการใช้งานจะมีบล๊อกกิ้งไดโอด ต่ออนุกรมที่ขั้วของสตริงแต่ละชุด ลักษณะการต่อให้ไดโอดถูกไบอัสตรงขณะใช้งานปกติถ้าเซลล์หนึ่งตัวในสตริงใดชำรุดหรือเงาบัง

ถ้าไม่มีการระบุลักษณะเฉพาะของเซลล์ และโมดูลจะเป็นการยากมากในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ตามความต้องการของโหลดภาระ รูปที่ 2.47 แสดงคุณสมบัติ กระแส และแรงดันของโมดูล ต่อวงจรใช้งานทั้งในแบบที่ต่ออนุกรมและขนาน



รูปที่ 2.46 ลักษณะการต่อใช้งานของบายพาสไดโอด และบล๊อกกิ้งไดโอด

ตัวกำหนด ถ้าไม่มีการระบุลักษณะเฉพาะของเซลล์ และโมดูลจะเป็นการยากมากในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ตามความต้องการของโหลดภาระ รูป 2.47 แสดงคุณสมบัติกระแสและแรงดันของโมดูล ที่ต่อ 1 และ 2 ตัว ทั้งในแบบที่ต่ออนุกรมและขนาน



รูปที่ 2.47 การเปลี่ยนกราฟคุณลักษณะเฉพาะเมื่อนำเซลล์ที่มีคุณสมบัติต่างกันมาต่อร่วมกันแบบขนาน

ก) กราฟคุณลักษณะของแต่ละเซลล์

ข) เมื่อมีการนำเซลล์มาต่อขนาน

ค) ผลที่ได้รับเมื่อต่อร่วมกันแบบขนาน

โดยเส้นโค้งของ กระแส และแรงดันทั้งหมดในส่วนนี้จะถูกดำเนินการภายใต้สมการ 2.30 โดยพารามิเตอร์ทั้ง 5 ตัว ในโมเดลจะหาได้โดยตรง ด้วยการวัดคุณสมบัติ แรงดันและกระแสของ

โมดูลที่สภาวะอ้างอิง โดยการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของระบบเซลล์แสงอาทิตย์นี้จะกระทำภายใต้ปริมาณแสงอ้างอิงที่ 1000 W/m^2 และอุณหภูมิโดยรอบ(ambient temperature)ที่ 25 องศาเซลเซียส สำหรับการวัดกระแสและแรงดันที่สภาวะอ้างอิงนี้มักจัดอยู่ภายใต้สภาวะเปิดวงจร, ลัดวงจร และสภาวะกำลังสูงสุด แต่มันเป็นไปไม่ได้ที่จะหาพารามิเตอร์ทั้ง 5 ตัว โดยใช้การวัดแค่ 3 สภาวะนี้เท่านั้น อย่างไรก็ตามความต้านทานขนานของเซลล์ใหม่ๆ ที่ผลิตได้ตอนนี้จะสูงมากดังนั้นเทอมสุดท้ายของสมการ 2.30 มักจะถูกตัดทิ้งไป แต่ที่สภาวะแรงดันต่ำจำเป็นที่จะต้องพิจารณาความต้านทานขนานด้วย เมื่อความต้านทานขนานถูกทำให้เป็นค่าอนันต์ ก็จะยังเหลือ พารามิเตอร์อีก 4 ตัวที่ต้องหาภายใต้การวัดจุด 3 จุด ที่อยู่บนเส้นโค้งของ กระแสและแรงดัน เพื่อใช้สำหรับการวิเคราะห์ พารามิเตอร์ ทั้ง 4 ตัวนี้ ที่สภาวะลัดวงจร กระแสไดโอด(I_D) จะน้อยมาก และ กระแสเนื่องจากแสง(I_L) จะเท่ากับกระแสที่ลัดวงจร

$$I_L = I_{SC} \tag{2.37}$$

ที่สภาวะเปิดวงจร กระแสจะถูกทำให้เป็นศูนย์ และค่า 1 ที่อยู่ที่สมการ 2.30 จะน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบในเทอมของเอ็กโพแนนเชียล ดังนั้น

$$I_0 = I_L \, exp(\frac{-V_{oc}}{a}) \tag{2.38}$$

การพิจารณาเส้นโค้งของ กระแสและแรงดันที่สภาวะกำลังสูงสุด จะถูกแทนที่ลงไปในสมการ 2.30 , ค่า I_O จากสมการ 2.38 และค่า I_L จากสมการ 2.37 โดยตัด 1 ทิ้งไป ผลจะเป็นดังนี้

$$R_S = \frac{\{a \ln(1\text{-}I_{mp}/I_L) - V_{mp} + V_{oc}\}}{I_{mp}} \tag{2.39}$$

สมการ 2.39 R_S จะสัมพันธ์กับ a แต่ค่าสูงสุดที่เกิดขึ้นจะถูกจำกัด โดยค่า R_S สูงสุดจะเกิดขึ้นเมื่อ a เข้าใกล้ศูนย์ และค่าของ a จะสูงสุดเมื่อ R_S เข้าใกล้ศูนย์ ซึ่งตามปกติผู้ผลิตจะไม่ได้วัดพารามิเตอร์ของทั้งคู่ที่สภาวะต่างๆไว้ ดังนั้นค่าที่เราจะเลือกใช้ได้คือการใช้สภาวะที่จุดกำลังสูงสุด ซึ่งอนุพันธ์ของพลังงาน (แรงดันมีค่าเท่ากับศูนย์) และจากการคำนวณในกรณีนี้ ในบางครั้งผลของสมการก็ให้ผลลัพธ์ออกมาเป็นค่าลบสำหรับความต้านทานอนุกรม เมื่อนำค่าที่ได้ไปแทนในสมการ 2.30 ผลที่ได้ไม่สามารถนำไปใช้ได้ โดยปรากฏการณ์ที่ยุ่งยากทั้งหมดเกิดขึ้นจากโปรตอนทำงานร่วมกับสารกึ่งตัวนำ

จากรูป 2.39 แสดงผลของอุณหภูมิบนโมดูลในลักษณะเส้นโค้งของ กระแสและแรงดันที่ระดับปริมาณแสงคงที่ ซึ่งอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าแรงดันเปิดวงจรลดลง และเพิ่มกระแสลัดวงจรอีกเล็กน้อย เพื่อที่ว่าโมดูลจะสามารถบ่งชี้ผลกระทบได้นั้นจำเป็นต้องรู้โมเดลของพารามิเตอร์ อันได้แก่ I_O, I_L และ a ซึ่งแปรผันตามอุณหภูมิ สำหรับค่าความต้านทานอนุกรม (R_S) ได้ถูกระบุค่าให้เป็นอิสระจากอุณหภูมิในโมเดลนี้ สมการต่อไปนี้จะแสดงค่าประมาณการที่ถูกต้องสำหรับระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ หลาย ๆ โมดูล

$$\frac{a}{a_{ref}} = \frac{T_c}{T_{C_r,ref}} \tag{2.40}$$

$$I_L = (\frac{G_T}{G_{T,ref}})[I_{L,ref} + \mu_{L,sc}(T_c - T_{c,ref}) \tag{2.41}$$

$$\frac{I_o}{I_{o,ref}} = (\frac{T_c}{T_{c,ref}})^3 exp[\varepsilon N_s / a_{ref} * (1 - \frac{T_{c,ref}}{T_c})] \tag{2.42}$$

ซึ่ง ε เป็นค่าพลังงานในช่องว่างแถบพลังงานของวัสดุ โดยมีค่าเป็น 1.12 eV สำหรับซิลิกอน และ 1.35 eV สำหรับแกเรียมอาร์เซไน ค่า N_S เป็นจำนวนของเซลล์ที่ต่ออนุกรมในโมดูลคูณกับจำนวนโมดูลที่ต่อเป็นอนุกรม ซึ่งปริมาณต่างๆ เหล่านี้จะถูกระบุไว้ในรูปของค่าอ้างอิง (REFERENCE = REF) ซึ่งจะทำการวัดที่สภาวะอ้างอิงมาตรฐาน โดยสัมประสิทธิ์ของกระแสลัดวงจร จะถูกหาจากการวัดที่สภาวะแสงอ้างอิงจากสมการดังนี้

$$\mu_{L,sc} = \frac{dI_{sc}}{dT} = \frac{\{I_{sc}(T_2) - I_{sc}(T_1)\}}{(T_2 - T_1)} \tag{2.43}$$

ที่ T_2 และ T_1 ถูกวัด ณ. สภาวะอุณหภูมิอ้างอิงและในทำนองเดียวกัน สัมประสิทธิ์ของแรงดันเปิดวงจรหาได้จาก

$$\mu_{V,oc} = \frac{dV_{oc}}{dT} = \frac{\{V_{oc}(T_2) - V_{oc}(T_1)\}}{(T_1 - T_2)} \tag{2.44}$$

จากข้างต้นจึงทำให้สามารถจะระบุสมการของโมเดลได้ ถ้าเรารู้สัมประสิทธิ์ของกระแสลัดวงจร และสัมประสิทธิ์ของแรงดันเปิดวงจร เป็นการแสดงว่าสมการอิสระที่เพิ่มเข้ามาจะถูกหา

ได้จากการทดลองหาค่าของ μ_{Voc} โดยค่านี้ถูกหามาจากการวิเคราะห์ของ dV_{oc}/dT ดังนั้น V_{oc} ที่ถูกอนุพันธ์แล้วในสมการ 2.38 ซึ่งอยู่ในรูปของค่า T จะถูกใช้ในสมการ 2.40 และ 2.42 และใช้ในการหาของ $\mu_{L,sc}$ ซึ่งสามารถแสดงได้ว่า

$$a_{REF} = \frac{(\mu_{V,oc} T_{oc,ref} + \varepsilon N_S)}{(\mu_{L,sc} T_{C,ref} / I_{L,ref} - 3)} \tag{2.45}$$

ถ้าค่า a_{REF} ที่หาได้จากสมการ 2.45 มากกว่าศูนย์ แต่น้อยกว่าค่าสูงสุดที่ได้จากสมการ 2.39 (ตัวอย่าง เช่น ความต้านทานอนุกรมมีค่า เท่ากับศูนย์) ดังนั้นรูปแบบของเซลล์โมดูลจะสมบูรณ์ซึ่งค่าของ $V_{OC}, I_{SC}, I_{MP}, V_{MP}, \mu_{L,SC}$ และ μ_{VOC} ถูกวัด ณ. สภาวะอ้างอิง จากสมการ 2.37 , 2.39 และ 2.45 ถูกใช้เพื่อการหาค่า I_L, I_O, R_S และ a ที่สภาวะอ้างอิง และสมการ 2.40 - 2.42 ถูกใช้เพื่อหาค่า I_O, I_a และ a ที่อุณหภูมิเซลล์ใด ๆ ซึ่งขบวนการนี้จะสามารถหาค่า I_L ที่สภาวะอ้างอิง จากสมการ 2.37 และสามารถหาค่า a_{REF} จากสมการ 2.30 หาค่า $I_{O,REF}$ จากสมการ 2.38 และหาค่า $R_{S,REF}$ จากสมการ 2.39 และสามารถหา a , I_L และ I_O ที่อุณหภูมิใด ๆ โดยใช้สมการ 2.40 - 2.42 ดังนั้นคุณสมบัติของค่ากระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้า จะสามารถหาได้จากสมการ 2.30 และ 2.31 ซึ่งค่าความต้านทานขนานถูกกำหนดค่าให้เท่ากับอนันต์ ถ้าค่าของ a_{REF} ที่หาจากสมการ 2.30 เป็นค่าติดลบหรือมากกว่าค่าสูงสุดที่ได้รับจากสมการ 2.39แล้ว ทางเลือกที่จะใช้ค่า(ค่าซึ่งเพียงพอกับการคาดเดาคุณสมบัติเซลล์ที่พิจารณา) หรือเพื่อค้นหาโมเดลโดยมีความเป็นไปได้อย่างหนึ่งที่จะเปลี่ยนค่าเฉลี่ยของ N_S ในสมการ 2.45 และให้ปรากฏอยู่ในพารามิเตอร์ของโมเดลตัวอื่นๆ ดังนั้น สภาวะอื่นๆ ก็มีความจำเป็นเช่นกัน ค่าประสิทธิภาพ ณ. จุดกำลังสูงสุดของโมดูล เป็นพารามิเตอร์ตัวหนึ่งที่มีความสำคัญประมาณคุณสมบัติลักษณะของระบบ ซึ่งประสิทธิภาพ ณ. จุดกำลังสูงสุดของโมดูลเป็นดังต่อไปนี้

$$\eta_{mp} = \frac{I_{mp} V_{mp}}{A_c G_I} \tag{2.46}$$

ค่าของประสิทธิภาพนี้อยู่ในค่าเทอมของค่าสัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิ ณ. จุดกำลังสูงสุดโดย μ_{PMP}

$$\eta_{mp} = \eta_{mp,ref} + \mu_{P,mp}(T_C - T_{ref}) \tag{2.47}$$

ค่าของ μ_{Pmp} ถูกระบุจากการแก้ปัญหาโมเดลเซลล์ของประสิทธิภาพ ณ.จุดกำลังสูงสุดที่เกินช่วงอุณหภูมิ ผลของการคำนวณสำหรับโมดูล ที่ใช้เป็นตัวอย่างสัมประสิทธิ์ที่จุดกำลังสูงสุด จะเห็นเป็นฟังก์ชันเส้นตรงของอุณหภูมิ และมันยังอิสระจากปริมาณแสงใด ๆ การประมาณค่า μ_{Pmp} สำหรับสมการ 2.46 แสดงได้ดังนี้

$$\mu_{P,mp} = \frac{d\eta_{mp}}{dT} = \left(\frac{I_{mp}dV_{mp}}{dT} + \frac{V_{mp}dI_{mp}}{dT}\right) / A_c G_I \qquad (2.48)$$

สำหรับโมดูลจำนวนมากๆ μ_{ISC} มีค่าน้อยมาก ซึ่งผลของมันนี้ส่งผลกระทบโดยตรงกับค่า dV_{mp}/dT ซึ่งประมาณค่าคร่าว ๆ ได้เท่ากับศูนย์ และค่า dV_{mp}/dT ประมาณค่าอย่างคร่าวๆ ได้เท่ากับ dV_{oc}/dT ซึ่งการประมาณค่านี้ สัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิที่จุดกำลังสูงสุดประมาณดังนี้

$$\mu_{P,mp} = \frac{I_{mp}}{A_C G_T (dV_{OC}/dT)} = \frac{\eta_{mp,ref}\mu_{Voc}}{V_{mp}} \qquad (2.49)$$

2.6 แบตเตอรี่

2.6.1 ชนิดของแบตเตอรี่ในระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์

แบตเตอรี่แบบตะกั่ว-กรด(Lead Acid) แบตเตอรี่ถือเป็นอุปกรณ์สะสมพลังงานที่สำคัญสำหรับระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ และมีขนาดใหญ่ เมื่อเปรียบเทียบกับแบตเตอรี่ที่ใช้งานในรถยนต์ทั่วไป แบตเตอรี่แบบนี้ถูกผลิตขึ้นสำหรับงานที่หลากหลายโดยผู้ผลิตจะบอกคุณสมบัติต่างๆ ได้เป็นอย่างดี อย่างไรก็ตามแบตเตอรี่แบบนี้ก็มีข้อจำกัดหลายอย่าง เช่น ต้องการการดูแลรักษาบ่อย, ต้องคอยดูระดับน้ำกรดที่หายไประหว่างการใช้งาน, น้ำหนักมากจึงขนย้ายลำบากและเสียค่าก่อสร้างสำหรับวางแบตเตอรี่เพิ่มขึ้น แต่ที่แบตเตอรี่แบบนี้มีใช้งานกันมากในระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์[33] เนื่องจากมีความแข็งแรงทนทาน, อายุการใช้งานนาน และราคาไม่สูงมากนักเมื่อเทียบกับแบตเตอรี่แบบแห้ง

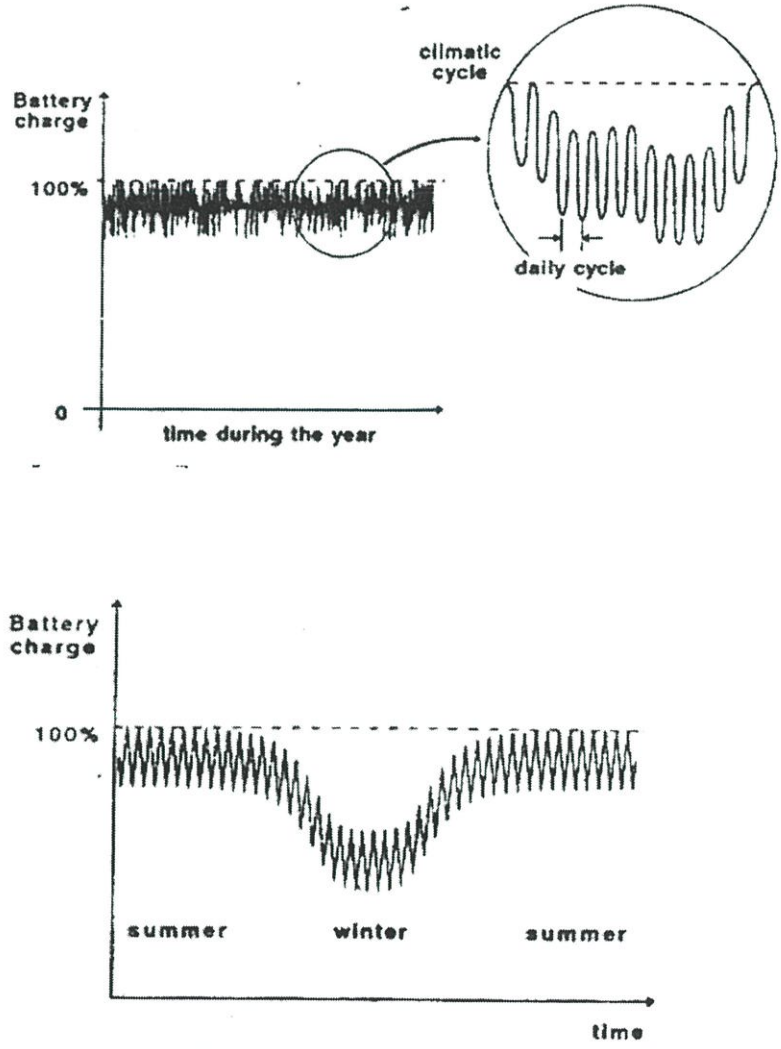
Advanced Batteries แบตเตอรี่ชนิดนี้เป็นระบบ zinc/bromine ข้อได้เปรียบของแบตเตอรี่แบบนี้คือ มีราคาต่ำ, น้ำหนักเบาเนื่องจากหลอมจากพลาสติกทำให้ขนย้ายง่าย, ทนทาน, ใช้งานได้ในหลายรูปแบบ แต่ข้อด้อยคือ ต้องการการดูแลรักษาสูงซึ่งต้องบำรุงรักษาปั๊มที่ใช้สำหรับหมุนเวียนสารละลายที่ใช้ทำปฏิกิริยา, และประสิทธิภาพใช้งานต่ำ

Nickel-Cadmium Battery (Ni-Cd) ถ้าพิจารณาเฉพาะคุณสมบัติของแบตเตอรี่แล้ว แบตเตอรี่แบบนี้เป็นแบตเตอรี่ที่เหมาะสมอย่างยิ่งในระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ เนื่องจากไม่มีปัญหา

จากการใช้ที่ Deep Cycle เลย แต่ข้อเสียคือ มีราคาแพง และหาได้ยาก จึงถูกจำกัดการใช้งานในระบบเล็กๆ เท่านั้น

2.6.2 การใช้งานของแบตเตอรี่ในระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์

แบตเตอรี่จะใช้งานได้ในสภาวะที่จำกัด ณ การออกแบบแต่ละชนิดจะมีผลต่อประสิทธิภาพและอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ โดยแบตเตอรี่จะถูกอัดประจุในช่วงเวลากลางวัน และจะปล่อยประจุในเวลากลางคืน อัตราการคายประจุในแต่ละวัน ต้องไม่สูงมากนักสำหรับระบบที่ไม่มีการสำรองพลังงานแบบอื่นร่วมด้วย



รูปที่ 2.48 การทำงานของแบตเตอรี่ในแต่ละช่วงเวลาตามสภาพภูมิอากาศที่ต่างกัน

การเลือกใช้ และการออกแบบแบตเตอรี่

คุณสมบัติของแบตเตอรี่ที่เหมาะสมกับระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์[34]

1. มี Cycle life สูง สำหรับการใช้งานแบบ Deep cycle

2. ต้องการการบำรุงรักษาต่ำ
3. ประสิทธิภาพในการชาร์จสูง
4. มีความสามารถที่จะดำรงอยู่ในสภาวะที่ถูกปล่อยประจุจนหมด (Deep Discharge)
5. อัตรา self-discharge ต่ำ
6. มีความเชื่อถือได้สูง (reliable)
7. อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงมีผลให้การทำงานของแบตเตอรี่เปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย

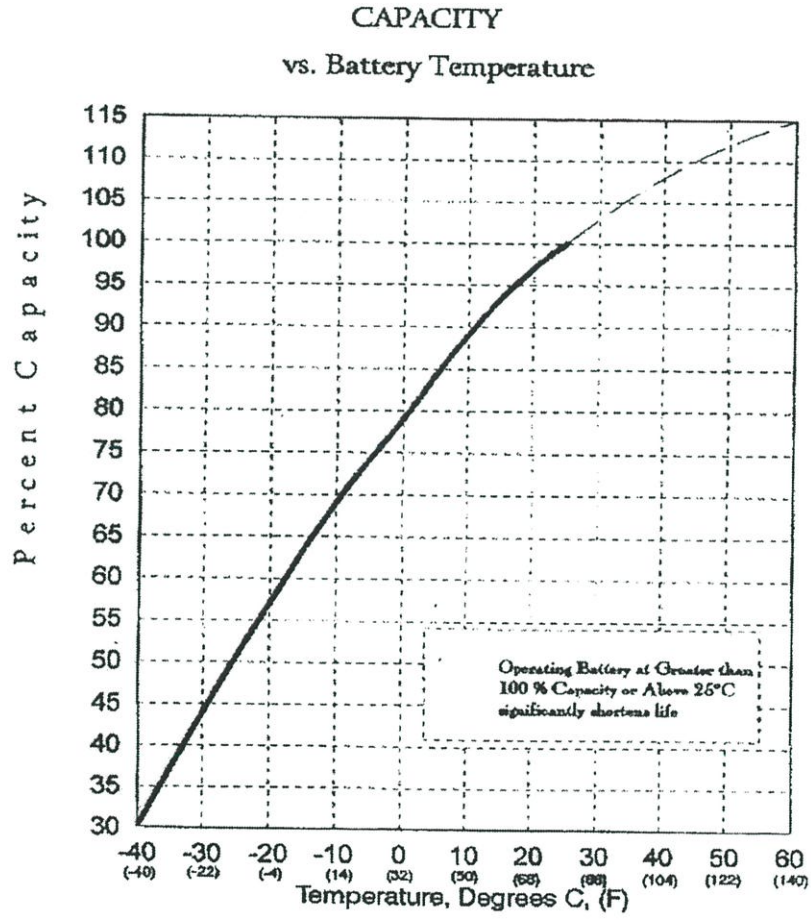
ปัจจัยที่จำเป็นสำหรับการพิจารณาเลือกแบตเตอรี่สำหรับการสร้างระบบจริง

1. หาง่าย หรือมีเพียงพอให้นำไปใช้งานได้
2. ระยะทาง เวลา และราคาในการขนส่งไปยังบริเวณที่ติดตั้ง (ระบบมีขนาดใหญ่)
3. การบำรุงรักษาระหว่างใช้งาน
4. น้ำหนัก
5. ราคาและความยากง่ายในการหาซื้ออุปกรณ์ควบคุม ถ้าหากจำเป็นต้องใช้

สำหรับในระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์นั้นส่วนใหญ่ที่ใช้จะใช้แบตเตอรี่แบบ Deep Cycle Lead Acid ความสามารถในการคลายประจุที่สูงจุดประสงค์เพื่อลดจำนวนแบตเตอรี่ โดยแบตเตอรี่ส่วนใหญ่จะแบ่งตามขนาด 2โวลท์, 6โวลท์, 12โวลท์ และ24โวลท์ สำหรับการเลือกขนาดแรงดันของเซลล์นั้น ควรจะเลือกขนาด 2โวลท์ มากกว่าเซลล์ขนาด 6โวลท์ หรือ12โวลท์ เพราะว่าแผ่นธาตุจะหนากว่า โดยปกติอายุการใช้งานของเซลล์ขนาด 2 โวลท์ จะประมาณ 2750 deep cycle เมื่อเปรียบเทียบกับ 700 deep cycle ของเซลล์ขนาด 6โวลท์ และ12โวลท์ อีกทั้งแบบ 2 โวลท์ ยังต้องการการบำรุงรักษาที่น้อยกว่า เพราะไม่ต้องเติมน้ำบ่อยๆ สำหรับการตรวจสอบแบตเตอรี่นั้นทำได้โดยตรวจดูที่แรงดันเซลล์แต่ละเซลล์ได้ โดยความแตกต่างของแรงดันเซลล์ควรอยู่ภายใน 0.05 โวลท์ เช่น ค่าที่อ่านได้สูงสุดเป็น 2.15 โวลท์ ค่าที่อ่านได้ต่ำสุดเป็น 2.10 โวลท์ โดยถ้ามีค่าแตกต่างมากกว่านี้ควรจะเปลี่ยนแบตเตอรี่ แต่สำหรับการตรวจสอบโดยทั่วไปที่ใช้กับแบบ 6โวลท์ และ12โวลท์ ทำได้โดยใช้Hydrometer เพื่อวัดค่า Specific Gravity ถ้าประจุเต็มค่าที่อ่านได้ควรจะเป็น 1.270 จุด

คุณสมบัติทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่มีความสำคัญในการพิจารณาออกแบบใช้งานในระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ โดยแรงดันเซลล์อยู่ในฟังก์ชั่นของอุณหภูมิ, อายุ, อัตราปล่อยประจุ, และชนิดของเซลล์ ในช่วงของการปล่อยประจุ แรงดันจะหล่นลงมา จากค่าเริ่ม 1.98 โวลท์ต่อเซลล์ ไปที่ 1.85 และ 1.65 โวลท์ต่อเซลล์ ขึ้นอยู่กับอายุและการใช้งาน ดังนั้นผู้ผลิตจะต้องระบุแรงดันต่ำสุดในการ หยุดใช้งาน สำหรับการปล่อยประจุแบบกำลังคงที่นั้นกระแสของแบตเตอรี่จะต้องเพิ่มขึ้นเพื่อให้เข้ากับแรงดันที่ลดลง โดยค่ากระแสสูงสุดจะเกิดขึ้นที่ค่าภาวะสุดท้ายของการคลายประจุ (End of Discharge) ส่วนในระหว่างช่วงเวลาในการอัดประจุแรงดันจะอยู่ในช่วง 2.2 โวลท์ต่อเซลล์

(ตอนเริ่มต้น) และสูงเท่ากับ 2.65 โวลท์ต่อเซลล์ ที่ End of Charge โดยขึ้นอยู่กับชนิดของแบตเตอรี่ การระบุขนาดความจุของแบตเตอรี่จะอยู่ในรูปของหน่วย กระแส-ชั่วโมง (amp-hours (Ah)) หรือ กำลัง-ชั่วโมง (kilowatt-hours (kWh)) โดยค่านี้จะบ่งบอกว่าเร็วแค่ไหนในการ ปล่อยประจุของแบตเตอรี่ที่ในรูปของค่า depth of discharge (DOD) โดยค่า depth of discharge ที่สูงๆ (มาก 70-80%) จะทำให้ส่งพลังงานได้สูงแต่จะมีผลต่ออายุการใช้งานของแบตเตอรี่ดังรูปที่ 2.50 และการอัดประจุที่ไม่สมบูรณ์ก็เป็นส่วนสำคัญที่จะทำให้อายุการใช้งานแบตเตอรี่ลดลง ดังนั้นผู้ออกแบบจึงควรออกแบบให้มีการอัดประจุ และนำไปใช้งานที่เหมาะสม



รูปที่ 2.49 ผลของอุณหภูมิต่อค่าความจุของแบตเตอรี่

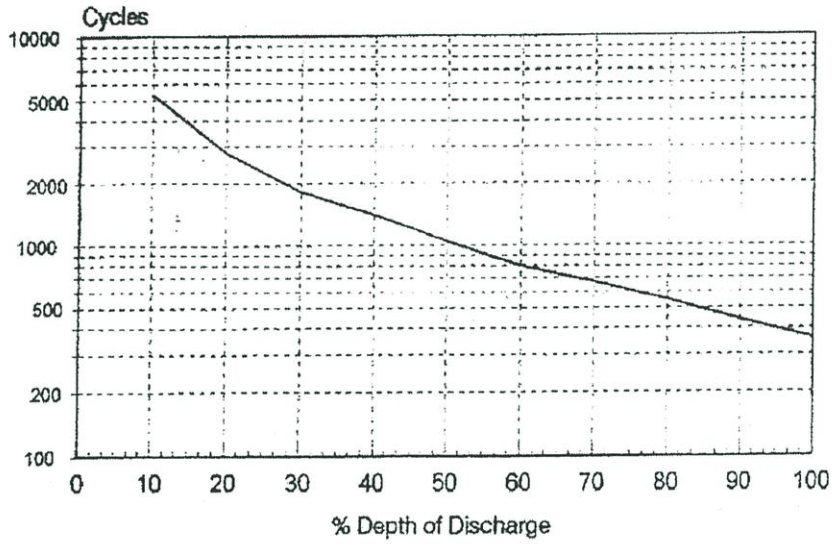
คำนิยามต่างๆ เกี่ยวกับแบตเตอรี่

1. Capacity หมายถึง ความจุของแบตเตอรี่

2. Ah units of capacity หมายถึง หน่วยที่ใช้ในการวัดค่าความจุของแบตเตอรี่ คือหน่วย ampere-hour(Ah) ซึ่งวัดได้โดยขณะที่ปล่อยประจุให้กระแสไหลออกคงที่ค่าหนึ่ง แล้วนับเวลาจนกระทั่งปล่อยประจุหมดแล้วนำค่ากระแสคูณกับเวลาจะได้ค่า Ah เช่นแบตเตอรี่ที่มีความจุ 80 Ah สามารถสามารถจ่ายกระแสได้ 4 A เป็นเวลา 20 h ซึ่งโดยปกติมาตรฐานอุตสาหกรรมจะกำหนด

พิกัดเหล่านี้ที่ 20 h แต่ถ้าใช้งานกระแสสูงขึ้นมากกว่า 4 A เช่น ถ้าใช้ 5 A ตามหลักการการคำนวณต้องได้เวลาใช้งาน 18 h แต่โดยคุณสมบัติทางกายภาพของแบตเตอรี่นั้นจะใช้ได้น้อยกว่า 18 h แต่จะน้อย กว่า 18 h เท่าไหร่นั้นขึ้นกับกราฟการคายประจุแบตเตอรี่ที่แตกต่างกันไปตามผู้ผลิตแต่ละรายว่าแบตเตอรี่จะถูกใช้ไปเร็วแค่ไหนเมื่อกระแสปล่อยประจุเพิ่มขึ้น ความจุที่ได้รับจริงๆ จะเสมือนว่ามีค่าลดลง ดังนั้นเพื่อความสะดวกค่าความจุจึงถูกเจาะจงไว้เรียกว่า ค่า C rate ของกระแสปล่อยประจุซึ่งก็คือค่าความจุ(Ah) หารด้วยค่าเวลา discharge

time(n) ซึ่งจะถูกเขียนด้วยตัวเล็ก เช่น แบตเตอรี่มีพิกัด 30 Ah ที่ C/20 หมายความว่าแบตเตอรี่นี้สามารถจ่ายกระแส 1.5A ได้ในเวลา 20 ชม.



รูปที่ 2.50 ค่าเปอร์เซ็นต์ Depth of Discharge

3. Cycle depth หมายถึง เปอร์เซ็นต์ที่ใช้บอกว่า แบตเตอรี่ถูกใช้ไปมากเท่าไหร่ ก่อนจะถูกชาร์จใหม่

- Shallow cycle หมายถึง แบตเตอรี่ที่ปล่อยประจุออกไป น้อยกว่า 50 % ก่อนถูกชาร์จใหม่
- Deep cycle หมายถึง แบตเตอรี่ที่ปล่อยประจุออกไป ตั้งแต่ 50% ขึ้นไปก่อนจะถูกชาร์จใหม่

4. Cell life เมื่อใช้แบตเตอรี่ไปสักระยะหนึ่ง ความจุของการชาร์จจะลดลงเหลือ 80% ของแบตเตอรี่ตอนที่ซื้อมาใหม่ ซึ่ง 20% ที่สูญเสียไปนั้น มีสาเหตุมาจากวงรอบการใช้งาน และอายุการใช้งาน จำนวนวงรอบที่ชาร์จก่อนที่ความจุจะลดลงเหลือ 80 % จะเรียกว่า Cycle life ซึ่งขึ้นอยู่กับ Cycle depth, Discharge current และอุณหภูมิ ในงานบางประเภทแบตเตอรี่จะถูกใช้น้อยมาก เช่น นำไปใช้เป็น standby battery ซึ่งถูกชาร์จอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งเกิดกรณีฉุกเฉินขึ้นจึงจะมีการปล่อยประจุ แต่แบตเตอรี่เหล่านี้จะมีความจุลดลงอย่างถาวรโดยอายุของมันซึ่งเราเรียกว่า calender life หรือ standby life ซึ่งวัดอยู่ในหน่วยปี และมีค่าขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ และสภาวะแวดล้อมที่ใช้งานด้วย

2.6.3 การอัดประจุให้แบตเตอรี่ รายละเอียดอุปกรณ์อัดประจุ และปล่อยประจุแบตเตอรี่ มีดังนี้

อุปกรณ์ตัด/ต่อการอัดประจุ หรือ Low Voltage Cutoff Unit มีหน้าที่เป็นอุปกรณ์ตัดต่อชนิดหนึ่งซึ่งจะใช้ควบคุมการตัดต่อระหว่างแบตเตอรี่กับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และระหว่างแบตเตอรี่กับโหลดภาระ เมื่ออยู่ในสภาวะที่กำหนด โดยอาศัยการทำงานของชุดรีเลย์ตัดตอน

1. ทำหน้าที่ตัดโหลดภาระออกจากแบตเตอรี่ เมื่อสถานะการปล่อยประจุของแบตเตอรี่มาถึงจุด Maximum Depth Of Discharge (MDOD) คือ สภาวะที่แบตเตอรี่จ่ายไฟออกไปจนถึงขั้นต่ำสุดที่กำหนดแล้ว และจะต่อโหลดเข้ากับแบตเตอรี่อีกครั้งหนึ่งเมื่อแบตเตอรี่มีการอัดประจุกลับจนถึงระดับที่สูงกว่า maximum depth of dischargeแล้ว
2. LVCU จะตัดแผงเซลล์แสงอาทิตย์ออกจากชุดแบตเตอรี่ เมื่อแรงดันขาออกของชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์ มีค่าน้อยกว่าค่าที่สามารถอัดประจุให้กับแบตเตอรี่ได้

คุณลักษณะอื่นของ LVCU มีดังนี้

- ในขณะทำงานนั้น LVCU จะใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ในการทำงานโดยจะต่อถาวรกับแบตเตอรี่เลย
- โดยทั่วไปแบตเตอรี่ ที่ใช้ LVCU จะมีการตัดโหลดภาระออกเมื่อแรงดันของแบตเตอรี่ต่ำลงเหลือประมาณ 11.1 ± 0.1 โวลท์ ที่ 25 องศาเซลเซียส และจะทำการต่อกลับเมื่อแบตเตอรี่อัดประจุใหม่จนระดับแรงดันถึงประมาณ 12.3 ±5% ที่ 25 องศาเซลเซียส
- LVCU จะมีกลไกที่สามารถป้องกันกระแสไหลจากแบตเตอรี่ ย้อนกลับสู่ชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยไม่ได้ใช้บล็อกกิ้งไดโอดในการป้องกันกระแสไหลย้อนกลับ แต่จะมีอุปกรณ์ที่ใช้ตรวจและควบคุมปริมาณและทิศทางของกระแส และนำข้อมูลนี้ไปสั่งการทำงานของชุดรีเลย์ตัดตอนต่อไป
- อุปกรณ์รีเลย์ที่ใช้ใน LVCU นั้น อย่างน้อยที่สุดต้องสามารถทนกระแสได้ 3 เท่า ของกระแสลัดวงจรที่ชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์
- เพื่อจะลดเสิร์จที่จะเกิดขึ้นเนื่องจากการทำงานของรีเลย์ เราจะใช้รีเลย์หน่วงเวลาในโดยตั้งการหน่วงเวลาการทำงานของรีเลย์ ไว้ประมาณ 5-10 วินาที เพื่อที่จะลดความบ่อยครั้งในการตัดต่อของรีเลย์ลง เพราะการตัดต่อที่บ่อยเป็นสาเหตุหนึ่งของการทำให้เกิดเสิร์จขึ้นได้
- LVCU จะต้องมีมาตรฐานที่จะสามารถทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมได้ไม่เกิน 0.05 โวลท์
- อุณหภูมิในการปฏิบัติงานของ LVCU อยู่ระหว่าง 0-55 องศาเซลเซียส
- ความชื้นในการปฏิบัติงานควรอยู่ที่ 0-95 %
- LVCU จะมีไฟแสดงสถานะบอกสถานะการทำงานของอุปกรณ์ โดยทั่วไปจะมี LED อย่างน้อย 4 หลอด ที่บอกสถานะ เช่น

- ไฟบอกสถานะเมื่อแรงดันจากชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีขนาดมากกว่าหรือเท่ากับแรงดันที่แบตเตอรี่ต้องการ ในการอัดประจุ
- ไฟที่บอกสถานะเมื่อกำลังมีการอัดประจุของแบตเตอรี่อยู่
- ไฟที่บอกว่าแบตเตอรี่มีระดับแรงดันที่ใกล้แรงดันที่มีประจุอัดอยู่เต็มที่ (End of Charge) โดยจะมีลักษณะเป็นไฟกระพริบ
- ไฟที่บอกว่าขณะนี้ระดับแรงดันของแบตเตอรี่ ถึงจุดต่ำแล้ว

ชุดควบคุมการอัดประจุของแบตเตอรี่

ชุดควบคุมการอัดประจุของแบตเตอรี่จะอาศัยหลักการทำงานของ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในการตัดต่อ โดยจะไม่ใช้อุปกรณ์จำพวกรีเลย์

หน้าที่หลักของชุดควบคุมการอัดประจุของแบตเตอรี่มีดังนี้

1. จะคอยตรวจสอบระดับแรงดันของแบตเตอรี่ ไม่ให้เกิดแรงดันเกินขึ้น โดยจะทำการตัดแบตเตอรี่ ออกจากชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อสถานะการประจุของแบตเตอรี่ถึงจุดสูงสุดหรือประจุเต็มแล้วนั่นเอง
2. จะควบคุมการตัดต่อวงจรระหว่าง แบตเตอรี่กับชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อแรงดันที่ออกมาจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์น้อยมากจนไม่สามารถทำการอัดประจุให้แบตเตอรี่ได้

คุณลักษณะอื่นๆ ของชุดควบคุมการประจุแบตเตอรี่ มีดังนี้

- ในการทำงานนั้น ชุดควบคุมการประจุแบตเตอรี่ จะนำพลังงานจากแบตเตอรี่ มาใช้
- ใช้รีเลย์หน่วงเวลาเพื่อที่จะลดความบ่อยครั้งในการตัดต่อของอุปกรณ์สวิทช์ลง โดยตั้งการหน่วงเวลาการทำงานไว้ประมาณ 5-10 วินาที
- อุปกรณ์สวิทช์สามารถทนกระแสไฟได้ประมาณ 2 เท่า ของกระแสลัดวงจรของชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์

2.6.4 การพิจารณาขนาดของแบตเตอรี่ ในระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์

แบตเตอรี่ที่ใช้ในระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ จะจ่ายพลังงานเมื่อโหลดภาระของระบบเกินกว่าพลังงานที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ สำหรับการออกแบบแบตเตอรี่ของระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์นี้เพื่อให้เพียงพอต้องมีแฟกเตอร์ต่างๆ ในการพิจารณาหลายชนิด ต้องพิจารณาถึงความจุ และจำนวนของเซลล์ที่จะใช้ในแบตเตอรี่ โดยจะมีแฟกเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการพิจารณาดังนี้

1. การพิจารณาพลังงานสำรอง คือช่วงเวลาที่โหลดภาระ ควรจะถูกจ่ายพลังงานโดยแบตเตอรี่ที่ติดตั้งไว้ ด้วยการออกแบบที่เหมาะสม
2. การพิจารณาลักษณะของโหลดภาระ โดยปริมาณกระแส ณ. ช่วงเวลาหนึ่งนั้นจะถูกจ่ายโดยแบตเตอรี่ กระแสสูงสุด และแรงดันของระบบ จะขึ้นกับลักษณะของโหลดภาระ การพิจารณาความจุของแบตเตอรี่ และอัตราการคายประจุ จะถูกพิจารณาโดย

ลักษณะจำเพาะของโหลด, จำนวนวันที่ต้องการให้แบตเตอรี่สำรองพลังงาน และชนิดของแบตเตอรี่

3. การพิจารณาจำนวนของเซลล์ที่ต่อแบบอนุกรม แรงดันของระบบจะเป็นตัวกำหนดจำนวนของเซลล์ที่จะนำมาต่ออนุกรม
4. การพิจารณาความจุ และจำนวนของแบตเตอรี่ที่ต่อแบบอนุกรม จะถูกพิจารณาในการเลือกขั้นสุดท้าย โดยจะขึ้นอยู่กับลักษณะจำเพาะของเซลล์และขนาดของแบตเตอรี่ที่จะใช้
5. ตารางพิจารณาขนาดของแบตเตอรี่ จะเป็นตารางในการหาและวิเคราะห์ขนาดของแบตเตอรี่ที่จะใช้ในระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์
6. ลักษณะคุณสมบัติของแบตเตอรี่ รูปแบบการใช้งานของระบบ, อายุการใช้งาน, การดูแลรักษา และราคา จะเป็นปัจจัยสำคัญในการเลือกชนิดของแบตเตอรี่ที่จะใช้กับระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์

การพิจารณาแบตเตอรี่สำรอง

ระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ที่ใช้กับงานบางประเภท อาจจะต้องการแบตเตอรี่สำรองไว้ เพื่อการรักษาเสถียรภาพของโหลดภาระ และเพื่อจัดหากระแสไฟฟ้าเมื่อเกิดเหตุการณ์ที่ไม่คาดคิด เช่น เกิดสภาวะอากาศแปรปรวนหรือเกิดความผิดพลาดในของอุปกรณ์ต่อร่วม ทำให้ไม่สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ จึงควรพิจารณาออกแบบระบบโดยมีปัจจัยต่างๆที่สำคัญ ดังต่อไปนี้

1.1 ความน่าเชื่อถือของระบบ เป็นค่าเปอร์เซ็นต์ของช่วงเวลาที่ระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์จะจ่ายให้เพียงพอกับความต้องการของภาระโหลด

1.2 ปริมาณแสง โดยค่าปริมาณแสงตัวนี้จะเป็นตัวแปรของวันแต่ละวัน และของฤดูกาล ที่มีผลกระทบต่อจำนวนวันที่ต้องสำรองพลังงานไว้ในแบตเตอรี่

1.3 ความต้องการของเสถียรภาพของระบบ ระบบแต่ละระบบมีความต้องการความเสถียรภาพต่างกัน ดังนั้นเมื่อปริมาณพลังงานที่สำรองไว้มีค่ามากก็ยิ่งเป็นการเพิ่มเสถียรภาพของระบบมากขึ้น

1.4 การจัดหากำลังไฟสำรอง ถ้าระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์มีระบบไฟฟ้าสำรองไว้ใช้งาน ก็มีความจำเป็นที่จะต้องมีการพิจารณา ความถี่ของการใช้งาน และช่วงเวลาในการใช้งานของแหล่งกำลังสำรองดังกล่าวให้มีความเหมาะสมด้วยเช่นกัน

1.5 ราคาของระบบ ราคาของระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์จะขึ้นกับ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ และขนาดของแบตเตอรี่ที่ใช้งานเป็นหลัก

2.7 บทสรุป

พลังงานแสงอาทิตย์นับวันจะมีความสำคัญต่อรูปแบบการใช้พลังงานในอนาคต เพราะเป็นพลังงานที่ใช้ไม่หมดเปลือง สามารถใช้แก้ปัญหาวิกฤตการณ์ด้านพลังงาน แทบทุกประเทศกำลังประสบปัญหาอยู่ทั้งทางด้านการขาดแคลนพลังงาน และราคาค่าพลังงานสูงขึ้นได้หากได้รับการร่วมมือ สนับสนุน ศึกษาค้นคว้าอย่างจริงจังแล้วก็อาจนำมาใช้เป็นพลังงานทดแทนได้ในบางส่วนอีกทั้งพลังงานแสงอาทิตย์นับว่าเป็น พลังงานสะอาด (Clean Energy) สามารถแก้ปัญหาสิ่งแวดล้อมเป็นพิษอันเกิดจากการผลิต และการใช้พลังงานที่ทั่วโลกกำลังวิตกอยู่ได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ประเทศไทยยังตั้งอยู่ในตำแหน่งที่เหมาะต่อการใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์เป็นอย่างยิ่ง

เซลล์แสงอาทิตย์เป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างเป็นแบบรอยต่อพี-เอ็น เหมือนกับโฟโต้ไดโอด และใช้หลักการโฟโต้โวลทาอิก(Photovoltaic)เหมือนกัน โดยเมื่อมีแสงตกกระทบที่เซลล์แสงอาทิตย์แล้วจะทำให้เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตกระแสไฟฟ้าออกมาได้ โครงสร้างโดยทั่วไปของเซลล์แสงอาทิตย์จะเหมือนกับไดโอดทั่วไปทุกประการแตกต่างกันเพียงแต่ ชั้นของสารกึ่งตัวนำทางด้านที่รับแสงต้องมีความบางมากๆ จนแสงส่องทะลุไปถึงรอยต่อและสารกึ่งตัวนำด้านที่เป็นฐานรองได้ เพราะฉะนั้นกราฟคุณสมบัติกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ยังไม่ถูกแสงจะมีลักษณะเหมือนไดโอดทุกประการ

การสร้างระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่จากเซลล์แสงอาทิตย์ จะไม่ใช้แผงเซลล์ใหญ่เพียงแผงเดียว แต่จะใช้โมดูลย่อยซึ่งมีระดับแรงดันมาตรฐานมาต่ออนุกรม/ขนาน หรือขนาน/อนุกรม เพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าตามที่ระบบต้องการ นอกจากนี้ยังมีการนำเซลล์จำนวนหนึ่งมาต่ออนุกรม และขนานอยู่ในแผงเซลล์ขนาดย่อย เพื่อให้ได้กำลังไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้าสูงเพียงพอต่อการใช้งานในระบบขนาดเล็กสำหรับโหลดภาระที่มีพิกัดไม่สูงมากนัก

บทที่ 3

การออกแบบ

3.1 กล่าวนำ

ในบทนี้กล่าวถึงการออกแบบระบบโดยรวมซึ่งประกอบด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วนด้วยกันคือ วงจรคอนเวอร์เตอร์, โครงสร้างแผงที่สามารถปรับมุมแผงได้ และไมโครคอนโทรลเลอร์รวมทั้งวงจรรับส่งสัญญาณเข้า-ออก(Input-Output Interface)

การออกแบบ MPPT คอนเวอร์เตอร์สามารถแบ่งออกเป็นส่วนย่อยๆที่จะกล่าวถึงการคำนวณเพื่อการออกแบบ และที่มาของการเลือกใช้อุปกรณ์บางชนิด ได้ดังนี้

1. การออกแบบค่าอินดัคเตอร์ของคอนเวอร์เตอร์
2. การเลือกใช้คาปาซิเตอร์กรองแรงดันกระเพื่อมที่เอาท์พุท และการคำนวณหาอินพุทคาปาซิเตอร์เพื่อช่วยสะสมพลังงานจากพีวีและช่วยให้แรงดันไฟฟ้าอินพุทมีความต่อเนื่องมากยิ่งขึ้น
3. การเลือกใช้อุปกรณ์บางชนิด เช่น มอสเฟต ฯ
4. วงจร Boost Converter สำหรับเพิ่มแรงดันให้กับวงจรขับ Mosfet

การออกแบบโครงสร้างสามารถปรับตำแหน่งทางกลเพื่อติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์ได้รวมทั้งส่วนของการควบคุมนั้นจะกล่าวในรายละเอียดการออกแบบดังนี้

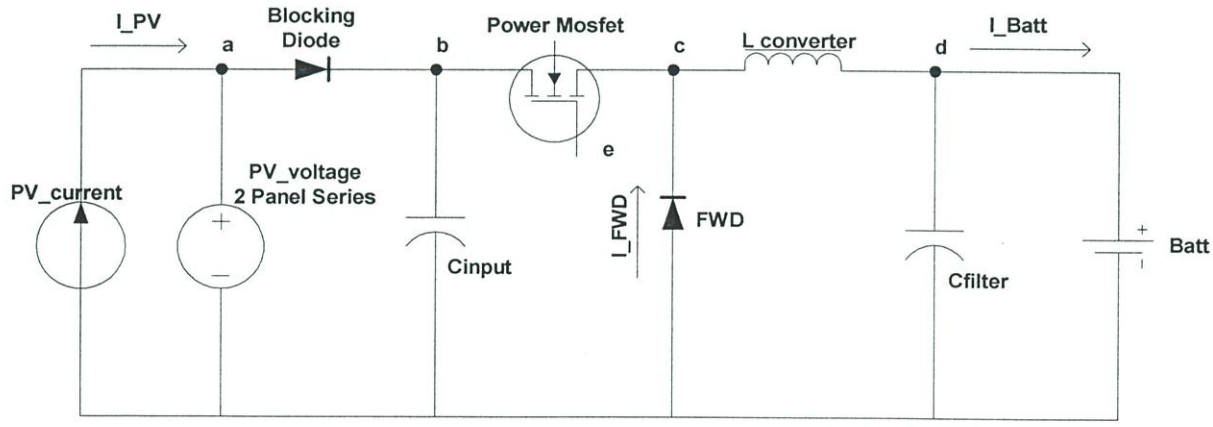
1. การออกแบบชุดปรับตำแหน่งทางกล และข้อมูลทางกลไกที่สำคัญ เช่นอัตราทดเกียร์ ฯ
2. วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์
3. วงจรตรวจจับแสง และเซ็นเซอร์ของระบบต่างๆ

ส่วนสุดท้ายที่กล่าวถึงเป็นส่วนของการเขียนโปรแกรมที่ใช้ควบคุมการทำงานของระบบโดยรวมที่ประกอบด้วย

1. โปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์
2. วงจรรับ-ส่งสัญญาณ(Input/Output Interface)
3. วงจรวัดแรงดัน และกระแส
4. หน่วยแสดงผลทางจอ LCD และสวิทช์กดแบบ 4x4 (4x4 Key Pad) สำหรับป้อนค่าอินพุทต่างๆให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์

3.2 วงจร MPPT คอนเวอร์เตอร์

ระบบที่ใช้ในงานวิจัยงานนั้นเป็นระบบพลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์แบบอิสระ(Stand Alone System) ที่มีโหลดภาระเป็นแบตเตอรี่ เมื่อให้แรงดันขณะอัดประจุมีค่าเป็น 12.5 -15.6 โวลท์ ขณะอัดประจุแบตเตอรี่ โดยรับพลังงานไฟฟ้า จากแผงโซลาร์เซลล์แบบซิลิกอนผลึกเดี่ยว(Single Crystalline Silicon) ขนาด 55W แรงดัน $V_{OC} = 21.2\ V$, $I_{SC} = 3.54\ A$ จำนวน 2 แผงมีแรงดันและกระแสที่จุด P_{MAX} เป็น $V_m = 17V$, $I_m = 3.23\ A$ ตามลำดับ ดังนั้นเพื่อความเหมาะสมในการใช้สำหรับอัดประจุแบตเตอรี่ที่มีแรงดันปกติ(Nominal Voltage) 12 V จึงเลือกใช้วงจรลดระดับแรงดันกระแสตรง(Buck Converter) ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ทำหน้าที่ลดระดับแรงดันจากแผงโซลาร์เซลล์ให้มีแรงดันที่เหมาะสมในการอัดประจุให้กับแบตเตอรี่ ส่วนกระแสนั้นจะเปลี่ยนแปลงตามอิทธิพลของความเข้มแสงที่ตกกระทบแผง โดยการควบคุมการทำงานคอนเวอร์เตอร์นั้นใช้อัลกอริทึมในการปรับแรงดันที่แผงโซลาร์เซลล์เข้าหาจุดกำลังสูงสุด (Maximum Power Point) ควบคุมสัญญาณพัลส์ขับขาเกตของเพาว์เวอร์มอสเฟต ดังรายละเอียดในส่วนของการออกแบบ และเขียนโปรแกรมควบคุม



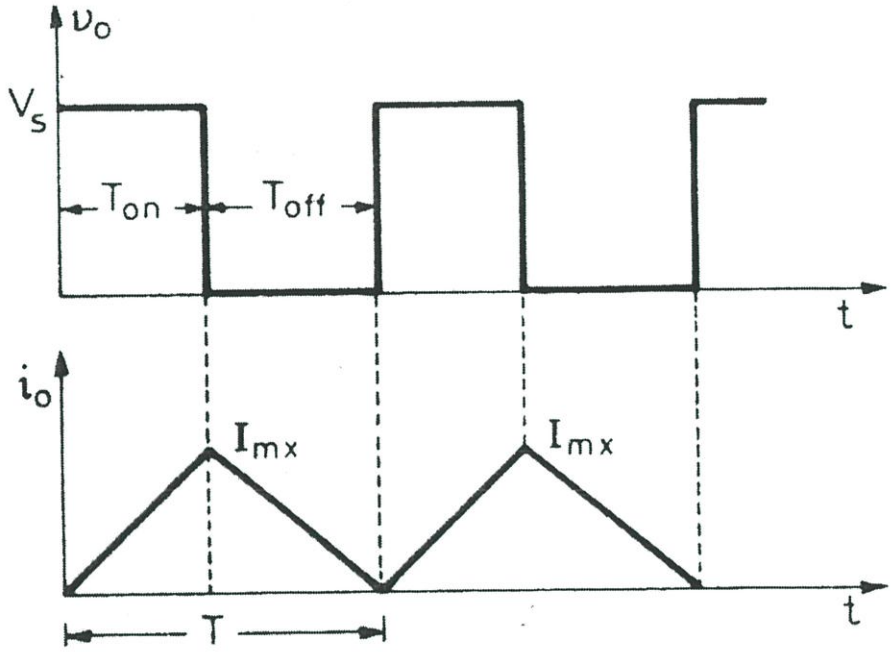
รูปที่ 3.1 วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบ วงจรลดระดับแรงดันกระแสตรง

3.2.1 การออกแบบอินดัคเตอร์

1) การหาค่าอินดัคเตอร์ของวงจร [37]

อินดัคเตอร์ในวงจรลดระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง เป็นส่วนสำคัญในการทำงานเพราะเป็นหน่วยสะสมพลังงานไฟฟ้าในสภาวะที่มอสเฟตทำงานอยู่ เพื่อปล่อยพลังงาน เพื่อจ่ายให้โหลดภาระ(แบตเตอรี่)ในสภาวะออฟมอสเฟต โดยจะต้องเก็บพลังงานได้มากพอสำหรับจ่ายให้โหลดภาระจนกว่าจะถึงช่วงเวลาที่มอสเฟตทำงานอีกครั้งหนึ่ง เพื่อให้เกิดความต่อเนื่องของกระแสที่โหลดภาระ รวมทั้งควรออกแบบให้แกนที่ใช้มีขนาดเล็กแต่ต้องเก็บพลังงานได้มากพอโดยแกนไม่อิ่มตัว(ขึ้นกับวัสดุแกนที่เลือกใช้) และขดลวดที่ใช้ควรจะน้อยที่สุดแต่มีค่าอินดัคแตนซ์เพียงพอ

ตามที่วงจรต้องการ จากวงจรพื้นฐานในรูปที่ 3.1 สัญญาณกระแสเอาท์พุท (I_Batt) ในโหมดการทำงานแบบต่อเนื่องแสดงได้ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 สัญญาณกระแสในโหมดการทำงานแบบต่อเนื่อง

เมื่อ v_o ในรูปที่ 3.2 คือแรงดันที่จุด c จากวงจรรูปที่ 3.1 และ สัญญาณกระแส i_o คือกระแส I_Batt จากวงจรในรูปที่ 3.1 เมื่อยังไม่ต่อ C_{filter} ขนานเข้ากับโหลดภาระ สัญญาณกระแส, พิจารณาสัญญาณกระแส i_o มีค่าเริ่มต้นจากศูนย์ จนกระทั่งขึ้นสู่จุดสูงสุด I_{mx} แบบเชิงเส้น และลดลงจนเป็นศูนย์อีกครั้งแบบเชิงเส้นเช่นกัน $(I_{mn} = 0)$ สัญญาณที่แสดงในรูปที่ 3.2 เป็นสัญญาณกระแสเอาท์พุทแบบอุดมคติกรณีค่าอินดัคแตนซ์ที่ใช้เป็นค่าอินดัคแตนซ์วิกฤต(Critical Inductance) หรือเป็นค่าอินดัคแตนซ์น้อยที่สุด ที่ทำให้การทำงานของคอนเวอร์เตอร์ที่มีกระแสโหลดภาระต่อเนื่อง (Continuous Load Current Mode) หากกำหนดให้องค์ประกอบทางไฟฟ้าต่างๆของระบบที่ใช้มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

V_S คือ แรงดันด้านอินพุทคอนเวอร์เตอร์(V)

V_O คือ แรงดันด้านเอาท์พุทที่โหลดภาระ(V)

f คือ ความถี่ของสัญญาณตัดต่อ(Chopped Frequency)(Hz)

I_O คือ กระแสเอาท์พุทที่โหลดภาระ(A)

I_{mx} คือกระแสเอาท์พุทสูงสุด(A)

I_{mn} คือกระแสเอาท์พุทต่ำสุด(A)

T_{on} คือเวลาช่วงสวิชท์ออนของมอสเฟต(s)

T_{off} คือเวลาช่วงสวิชท์ออฟของมอสเฟต(s)

T คือคาบเวลาทั้งหมด(s)

P_O คือกำลังไฟฟ้าด้านเอาท์พุท(W)

$L_{\min}$ คือค่าอินดัคแตนซ์วิกฤต หรือค่าอินดัคแตนซ์น้อยสุด(Henry)

สามารถคำนวณหาค่าอินดัคแตนซ์วิกฤตได้ดังกระบวนการต่อไปนี้

$$I_O \cdot T = \frac{1}{2} I_{mx} T_{on} + \frac{1}{2} I_{mx} T_{off} \tag{3.1}$$

จากกฎแรงดันของเคอร์ชอฟ วิเคราะห์วงรอบแรงดันที่ด้านเอาท์พุท

$$V_O + L_{\min} \frac{di}{dt} = V_S \tag{3.2}$$

$$V_O + L_{\min} \frac{I_{mx}}{T_{on}} = V_S \tag{3.3}$$

$$L_{\min} \frac{2I_O}{T_{on}} = V_S - V_O \tag{3.4}$$

$$L_{\min} = \frac{(V_S - V_O) T_{on}}{2I_O} \tag{3.5}$$

เมื่อ $T_{on} = \frac{\alpha_{\min}}{f}$, $T_{off} = \frac{(1-\alpha_{\min})}{f}$ และ $\alpha_{\min} = \frac{V_{O\min}}{V_{S\max}}$ แทนค่าในสมการที่ (3.5) และ (3.1) ได้ค่าอินดัคแตนซ์วิกฤตดังแสดงในสมการที่ (3.6)

$$L_{\min} = \left(\frac{(V_{S\max} - V_{O\min})}{f \cdot 2 \cdot f \left(\frac{I_{mx}\alpha_{\min}}{2f} + \frac{I_{mx}(1-\alpha_{\min})}{2f} \right)} \right) \tag{3.6}$$

$$L_{\min} \geq \frac{\left(1 - \frac{V_{O\min}}{V_{Smac}}\right) V_{O\min}}{f \cdot I_{mx}} \tag{3.7}$$

เมื่อ

$V_{S\max}$ คือค่าแรงดันอินพุทสูงสุด(V)

$V_{O\min}$ คือค่าแรงดันเอาท์พุทต่ำสุด(V)

$\alpha_{\min}$ คือ ดิวตี้ไซเคิลต่ำสุด

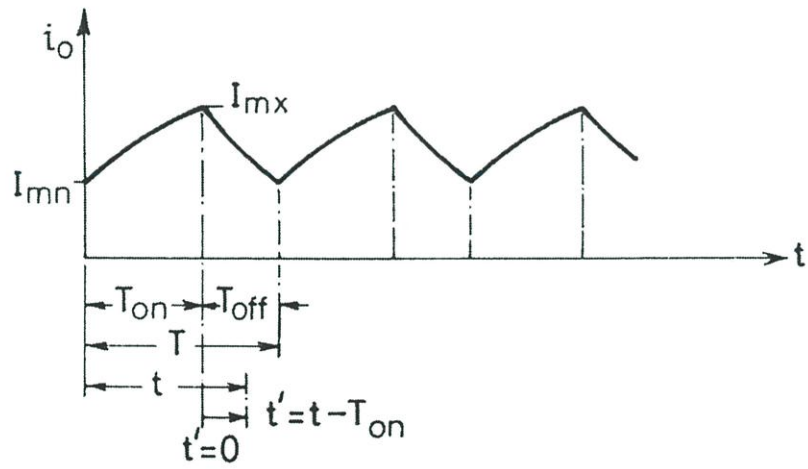
เพื่อความสามารถในการทำงานที่รักษาระดับแรงดันที่เอาท์พุท หรือ V_d ในรูปที่ 3.1 ไว้ที่จุดสูงสุด ให้เลือกใช้ค่า $V_{O\max}$ (แรงดันไฟฟ้าเอาท์พุทสูงสุด) แทนค่า $V_{O\min}$ จากสมการที่ 3.7 ในเบื้องต้นกำหนดให้ $I_{mn}=0$ สำหรับการคำนวณเพื่อการออกแบบหากกำหนดให้ I_{mn} เป็นค่าใดๆ ที่มากกว่าศูนย์ และน้อยกว่า I_{mx} หรือ มีความต่อเนื่องของกระแสรวมทั้งกระแสกระเพื่อมน้อยดังแสดงในรูปที่ 3.3

ค่า $L_{\min}$ สามารถคำนวณได้ตามสมการ ที่ (3.8)

$$L_{\min} \geq \frac{(1-\alpha_{\min})V_{O\max}}{f\cdot(I_{mx}-I_{mn})} \tag{3.8}$$

2) การหาค่ากระแสกระเพื่อม [37]

จากรูปที่ 3.2 ค่ากระแสกระเพื่อม(Ripple) หาได้จาก $\left|i_O(0)-i_O(T_{on})\right|$ หรือ $|0-I_{mx}|$ หาก



รูปที่ 3.3 การทำงานโหมดกระแสต่อเนื่องที่ $I_{mn}\rangle 0$

กระแสต่ำสุด (I_{mn}) มีค่ามากกว่าศูนย์ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ค่ากระแสกระเพื่อมหาได้จากสมการทั่วไปดังนี้

กรณี $0\leq t\leq T_{on}$

$$i_O(t)=\frac{V_S-E}{R}\left(1-\exp\left(-\frac{Rt}{L}\right)\right)+I_{mn}\exp\left(\frac{-Rt}{L}\right) \tag{3.7}$$

กรณี $T_{on}\leq t'\leq T_{off}$

$$i_O(t')=\frac{V_S-E}{R}\left(1-\exp\left(-\frac{Rt'}{L}\right)\right)+I_{mn}\exp\left(\frac{-Rt'}{L}\right) \tag{3.8}$$

เมื่อ $t' = t - T_{on}$

พิจารณาช่วงรอยต่อของการทำงานที่ $t = T_{on}, t' = 0$ จากสมการที่ (3.7)

$$I_{mx} = \frac{V_S - E}{R}\left(1 - \exp\left(-T_{on}/T_a\right)\right) + I_{mn}\exp\left(-T_{on}/T_a\right) \tag{3.9}$$

พิจารณาช่วงรอยต่อของการทำงานที่ $t' = T_{off} = T - T_{on}$ จากสมการที่ (3.8)

$$I_{mn} = -\frac{E}{R}\left\{1 - \exp\left(-\left(T - T_{on}\right)/T_a\right)\right\} + I_{mx}\exp\left(-\left(T - T_{on}\right)/T_a\right) \tag{3.10}$$

เมื่อ $T_a = \frac{L}{R}$, R = ความต้านทานภายในอินดัคเตอร์ (Ω)

จากสมการที่ (3.9) และ (3.10) หาค่า กระแสกระเพื่อมได้จาก

$$I_{mx} - I_{mn} = \frac{V_S}{R}\left[\frac{1 - \exp(-T_{on}/T_a)}{1 - \exp(-T/T_a)} - \frac{\exp\{(T_{on}/T_a) - 1\}}{\exp\{(T/T_a) - 1\}}\right] \tag{3.11}$$

หาค่ากระแสกระเพื่อมต่อหน่วย(Per unit ripple current) ได้จาก

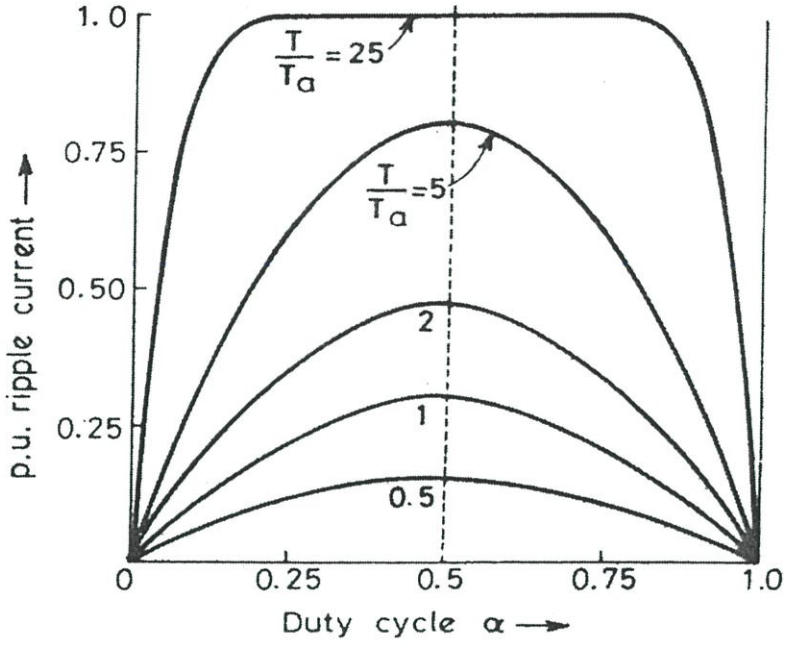
$$\frac{I_{mx} - I_{mn}}{V_S/R} = \left[\frac{1 - \exp(-T_{on}/T_a)}{1 - \exp(-T/T_a)} - \frac{\exp\{(T_{on}/T_a) - 1\}}{\exp\{(T/T_a) - 1\}}\right] \tag{3.12}$$

แทนค่า $T_{on} = \alpha T$ และ $T - T_{on} = (1 - \alpha)T$

$$\frac{I_{mx} - I_{mn}}{V_S/R} = \frac{\left(1 - \exp\left(-\alpha T/T_a\right)\right)\left(1 - \exp\left\{-(1-\alpha)T/T_a\right\}\right)}{1 - \exp\left(-T/T_a\right)} \tag{3.13}$$

จากรูปที่ 3.4 ที่ค่าดิวตี้ไซเคิล (α) เท่ากับ 50% ของทุกๆอัตราส่วน T/T_a จะมีค่ากระแสกระเพื่อมต่อหน่วย $\frac{I_{mx} - I_{mn}}{V_S/R}$ สูงที่สุดเพื่อความสะดวกให้ค่ากระแสกระเพื่อม ΔI_{mx} และ $T/T_a = x$ จากสมการที่ (3.13) สามารถเขียน ΔI_{mx} ได้ดังนี้

$$\Delta I_{mx} = \frac{V_S}{R}\left[\frac{\left(1 - e^{-0.5x}\right)\left(1 - e^{-0.5x}\right)}{1 - e^{-x}}\right] \tag{3.14}$$



รูปที่ 3.4 ค่ากระแสกระเพื่อมต่อหน่วยในรูปของความสัมพันธ์ของดิวตี้ไซเคิล และ T/T_a

$$= \frac{V_S}{R}\left[\frac{\left(1-e^{-0.5x}\right)\left(1-e^{-0.5x}\right)}{\left(1-e^{-0.5x}\right)\left(1+e^{-0.5x}\right)}\right]$$

$$= \frac{V_S}{R}\left[\frac{1-e^{-0.5x}}{1+e^{-0.5x}}\right] = \frac{V_S}{R}\tanh\frac{1}{4}x$$

$$= \frac{V_S}{R}\tanh\frac{T}{4T_a}$$

$$\Delta I_{mx} = \frac{V_S}{R}\tanh\frac{T}{T_a} = \frac{V_S}{R}\tanh\frac{R}{4fL} \qquad (3.15)$$

ในกรณีที่ค่าความต้านทานอินดัคเตอร์มีค่าน้อย มีผลทำให้ $4fL >> R$ และ $\tanh\frac{R}{4fL} = \frac{R}{4fL}$

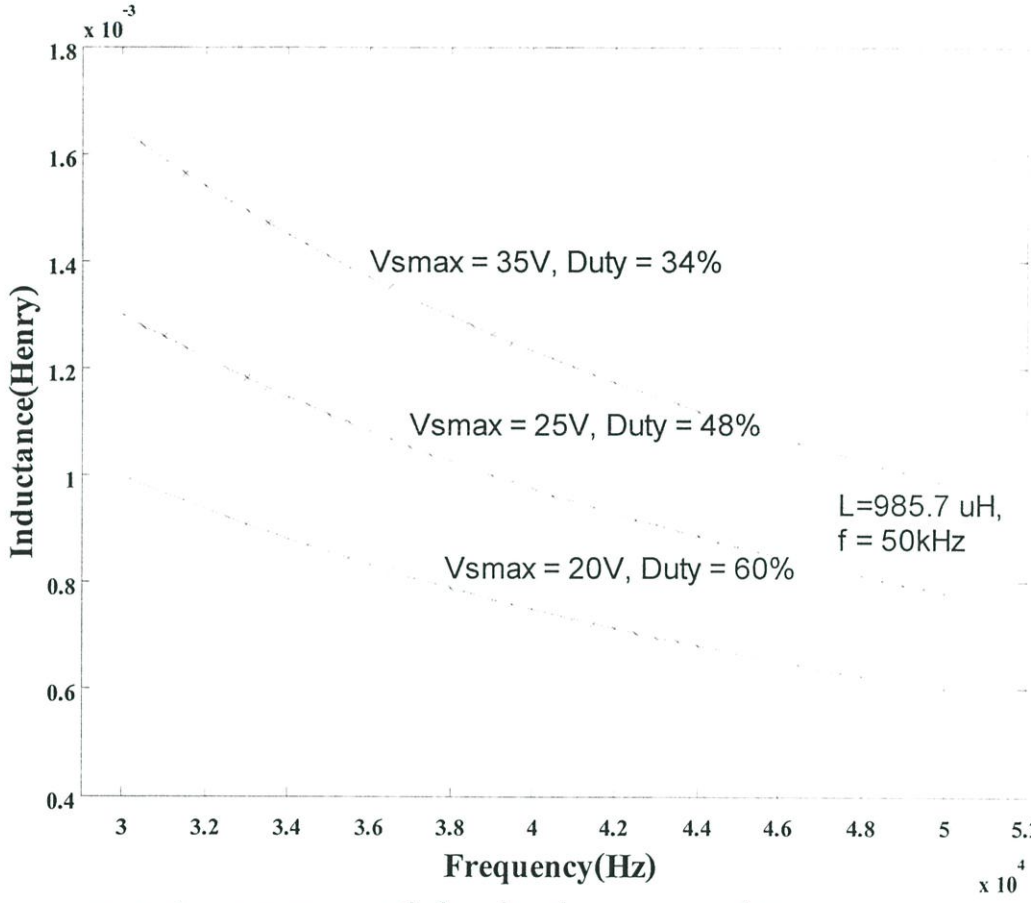
ค่าโดยประมาณของกระแสกระเพื่อมสูงสุดเขียนได้ดังแสดงในสมการที่ (3.16)

$$\Delta I_{mx} = \frac{V_S}{R}\cdot\frac{R}{4fL} = \frac{V_S}{4fL} \qquad (3.16)$$

นำค่าพิกัดต่างๆของระบบที่ใช้มาหาความสัมพันธ์ของค่าอินดัคแตนซ์ ที่ความถี่ต่างๆ จากเมื่อปรับแรงดันอินพุทของคอนเวอร์เตอร์ได้ดังแสดงในรูปที่ 3.5 โดยอาศัยสมการที่ (3.8) และ (3.16) เมื่อกำหนดให้พิกัดทางไฟฟ้าของระบบที่ใช้มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. แรงดันอินพุทจากแผงโซลาร์เซลล์ 20V- 35V

2. แรงดันเอาท์พุทสำหรับแบตเตอรี่(เมื่อเริ่มมีการอัดประจุ) 11.5V-15.6V
3. ความถี่ที่ใช้งานทดลองเลือกปรับค่าระหว่าง 10kHz-60kHz
4. พิกัดกระแสกระเพื่อมเอาท์พุท 0.2 A



รูปที่ 3.5 ความสัมพันธ์ของค่าอินดัคแตนซ์ต่ำที่สุดเมื่อเปลี่ยนแปลงความถี่ใช้งาน

จากรูปที่ 3.5 เมื่อค่าความถี่มากขึ้นค่าอินดัคแตนซ์ต่ำสุดที่สามารถใช้งานได้จะน้อยลงโดยอาศัยความสัมพันธ์ของปริมาณต่างๆตามสมการที่ 3.8 แต่ที่ความถี่เดียวกันทดลองปรับค่าแรงดันอินพุท ค่าอินดัคแตนซ์น้อยสุดที่ต้องใช้หากต้องการทำงานแบบกระแสโหลดต่อเนื่อง จะมากขึ้นเมื่อดิวตี้ไซเคิลน้อยลง(หรือแรงดันอินพุทมากขึ้น) ดังนั้นเพื่อให้ระบบยังคงทำงานที่ได้ดีในสภาวะแรงดันอินพุทต่างๆกันที่ความถี่ 50 kHz ค่าอินดัคแตนซ์ต่ำสุด สำหรับพิกัดแรงดันอินพุทขนาด 35V ที่พิจารณาได้จากกราฟรูปที่ 3.5 มีค่าเท่ากับ 985.7 μH จากสมการที่ (3.16) คำนวณค่ากระแสกระเพื่อมโดยประมาณเมื่อเลือกใช้ อินดัคแตนซ์ 985.7 μH

$$\Delta I_{mx} = \frac{35}{4 \times 50 \times 10^{3} \times 985.7 \times 10^{-6}} = 0.18A$$

ค่ากระแสกระเพื่อมที่ประมาณได้จากสมการที่ (3.16) มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้กำหนดไว้ในการออกแบบเบื้องต้น เลือกใช้อินดัคแตนซ์ 1200 μH ซึ่งมากกว่า อินดัคแตนซ์ต่ำสุดประมาณ 20% ค่ากระแสกระเพื่อมจะลดลงเหลือ 0.15A

3) การเลือกแกน, ขดลวด และจำนวนรอบของขดลวดที่ใช้ [40]

ข้อมูลที่นำมาพิจารณาในการออกแบบ

1. ค่าอินดัคแตนซ์ $L = 1200\mu H$
2. กระแสเอาท์พุทสูงสุด(DC Current) $I_o = 7.8A$
3. กระแสกระเพื่อม(AC Current) $\Delta I = 0.15A$
4. ความถี่ 50kHz
5. $B_m = 0.15$ Tesla
6. วัสดุที่ใช้ = Toriod Powder MPP

<u>ตอนที่ 1</u> คำนวณพลังงานที่สะสมในอินดัคแตนซ์

$$Energy = \frac{LI^2}{2} \text{ [W-s]} \tag{3.17}$$

$$Energy = \frac{1200\times10^{-6}\times\left(7.8+\frac{0.15}{2}\right)^2}{2} = 0.0372 \text{ [W-s]}$$

<u>ตอนที่ 2</u> คำนวณพื้นที่หน้าตัดแกนที่ใช้ (A_p)

$$A_p = \left(\frac{2(Energy)\times10^4}{B_m K_u K_j}\right)^{(x)} \tag{3.18}$$

เมื่อ A_p คือผลคูณของพื้นที่ว่างของแกนกับพื้นที่แกน(cm^4)

B_m คือความหนาแน่นของฟลักซ์(Tesla)

K_j คือค่าสัมประสิทธิ์ความหนาแน่นกระแส

K_u คือค่าสัมประสิทธิ์ของการพันขดลวด(Window Utilization Factor)

$$K_u = S_1 \times S_2 \times S_3 \times S_4 \tag{3.19}$$

เมื่อ S_1 = (พื้นที่ตัวนำ)/ (พื้นที่สาย)

S_2 =(พื้นที่พันขดลวด)/(พื้นที่ที่สามารถพันได้)

S_3 =(พื้นที่ที่สามารถพันได้)/(พื้นที่ว่างทั้งหมด)

S_4 =(พื้นที่ที่สามารถพันได้)/(พื้นที่ที่สามารถพันได้+พื้นที่ฉนวน)

โดย เลือกใช้ AWG12 (ดูรายละเอียดจากภาคผนวก)

$S_1 = \frac{33.08}{35.64} = 0.928$ ส่วนค่า S_2 ในทางปฏิบัติใช้ 60% หรือ 0.6, S_3 ขึ้นกับแกน และ บ็อบบิ้น กรณีที่ต้องใช้บ็อบบิ้น S_3 มีค่าระหว่าง 0.6- 0.9 ในที่นี้เลือกใช้ 0.75, สำหรับ S_4 เป็นดัชนีบอกขนาดพื้นที่ที่สามารถใช้ได้ที่เหลืออยู่เมื่อพันขดลวดหลายชั้น (เผื่อความหนาฉนวน) กรณีพันชั้นเดียวให้เป็น 1)

ตารางที่ 3.1 สัมประสิทธิ์ความหนาแน่นกระแส(K_j)

Core	Losses	$K_j(25^oC)$	$K_j(50^oC)$	(x)	(y)
Pot Core	$P_{cu} = P_{fe}$	433	632	1.2	-0.17
Powder Core	$P_{cu} >> P_{fe}$	**403**	**590**	**1.14**	**-0.12**
Laminataion	$P_{cu} = P_{fe}$	366	534	1.14	-0.12
C Core	$P_{cu} = P_{fe}$	323	468	1.16	-0.14
Single-coil	$P_{cu} >> P_{fe}$	395	569	1.16	-0.14
Tape-wound core	$P_{cu} = P_{fe}$	250	365	1.15	-0.13

<u>หมายเหตุ</u> ค่า x และ y เป็นดัชนียกกำลังของสมการที่ (3.18) และสำหรับคำนวณความหนาแน่นกระแส (J) สมการที่ (3.20) ตามลำดับ

ดังนั้น $K_u = 0.928 \times 0.6 \times 0.75 \times 1 = 0.4176$

$$A_p = \left(\frac{2(0.0372) \times 10^4}{(0.15)(0.4176)(590)} \right)^{1.14} = 30.65$$

<u>ตอนที่3</u> เลือกแกนที่นำมาใช้งาน

เลือกใช้แกนขนาด 5586x-xx (รายละเอียดในภาคผนวก) คุณสมบัติทางกายภาพที่สำคัญแสดงในตารางที่ 3.2

<u>ตอนที่4</u> คำนวณความหนาแน่นกระแส (J)

$$J = K_j A_p^{(y)} \quad [\text{A/cm}^2] \tag{3.20}$$

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติทางกายภาพของแกนที่เลือกใช้

รายการ	5586x-xx
A_p (cm^4)	31.8
A_c (cm^2)	1.77
W_a (cm^2)	17.99
MPL (cm)	20.0
Weight (gm)	288

จากค่า K_j , y ในตารางที่ 3.1 และ A_p ในตารางที่ 3.2 ความหนาแน่นกระแสเท่ากับ $J = 590 \times 31.8^{-0.12} = 389$ A/cm^2

ตอนที่5 คำนวณพื้นที่หน้าตัดของลวดที่ใช้

$$A_{w(B)} = \frac{I_o + \Delta I/2}{J} \quad [\text{cm}^2] \tag{3.21}$$

เมื่อ $A_{w(B)}$ คือพื้นที่หน้าตัดขดลวด(cm^2)

$$A_{w(B)} = \frac{7.8 + 0.2/2}{389} = 0.020 \text{ cm}^2$$

ตอนที่6 เลือกขนาดขดลวด(ปรับค่าจากที่ประมาณการเอาไว้)

จากข้อมูลความหนาแน่นกระแสเลือกขดลวดขนาด AWG12 มีข้อมูลที่สำคัญต่อการออกแบบดังนี้

1. พื้นที่หน้าตัดตัวนำ, $Bare, A_{w(B)} = 0.021$ cm^2
2. พื้นที่หน้าตัดขดลวดรวมฉนวนแล้ว, $Insulated, A_w = 0.023$ cm^2
3. ความต้านทานต่อหน่วยความยาว, $\mu\Omega/cm = 827$

ตอนที่7 คำนวณพื้นที่ว่างพันขดลวด $\left(W_{a(eff)}\right)$

$$W_{a(eff)} = W_a S_3 \tag{3.22}$$

$W_{a(eff)} = 17.99 \times 0.75 = 13.49 \ [\text{cm}^2]$

<u>ตอนที่8</u> คำนวณจำนวนรอบโดยใช้พื้นที่ขดลวดจาก ตอนที่ 6 (จำนวนที่สามารถพันได้)

$$N = \frac{W_{a(eff)} S_2}{A_w} \tag{3.23}$$

$$N = \frac{13.49 \times 0.6}{0.023} \approx 350$$

<u>ตอนที่9</u> การเลือกแกน

$$\mu_r = \frac{L \times MPL \times 10^8}{0.4\pi N^2 A_c} \tag{3.24}$$

$$\mu_r = \frac{1200 \times 10^{-6} \times 20 \times 10^8}{0.4 \times 3.14 \times 350^2 \times 1.77} \approx 9$$

เลือกใช้ แกน 55869-A2, $\mu_r = 14$, $mH/1000 = 16$

<u>ตอนที่10</u> คำนวณจำนวนรอบขดลวด

$$N = 1000\left(\frac{L}{L_{1000}}\right) \tag{3.25}$$

เมื่อ L_{1000} คือค่าอินดัคแตนซ์ต่อ 1000 รอบ ของแกน 55869-A2 $(mH/1000turns)$

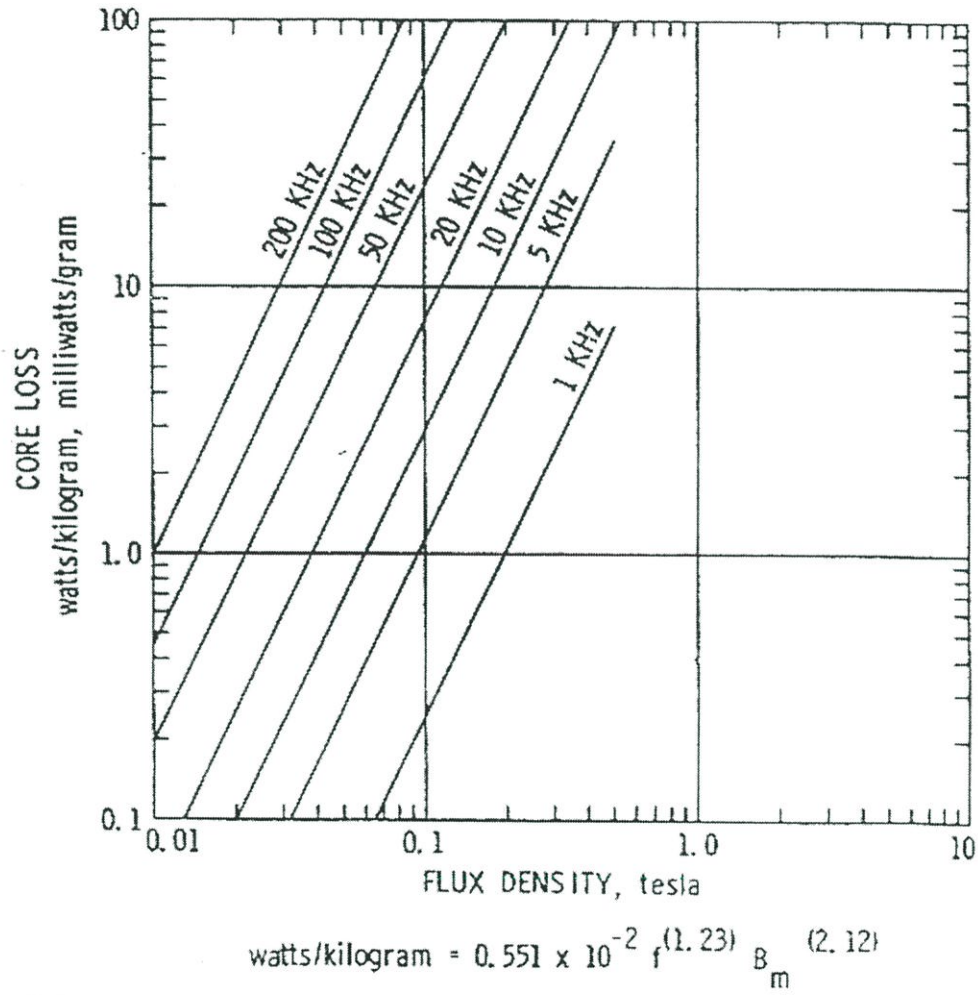
$N = 1000\left(\frac{1.2}{16}\right) = 75$ รอบ

จากข้อมูลแกนที่ใช้หากพันขดลวดเพียงชั้นเดียวสามารถพันได้สูงสุด 67 รอบ(รายละเอียดในภาคผนวก) เลือกพัน 65 รอบ ความต้านทาน $R_{dc} = \frac{0.262 \times 65}{67} = 0.254\Omega$ ค่าอินดัคแตนซ์ที่ได้คำนวณย้อนกลับตามสมการที่ (3.25) เท่ากับ $L = \frac{65}{1000} \times 16 = 1040\mu H$

ตอนที่11 คำนวณค่ากำลังสูญเสียจากขดลวด

$$P_{cu} = I^2 R \quad [\text{W}] \tag{3.26}$$

$P_{cu} = 7.875^2 \times 0.254 = 15.75W$



รูปที่ 3.6 กำลังสูญเสียที่แกนเทียบกับความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก

ตอนที่12 คำนวณค่ากำลังสูญเสียจากแกน

$$B_{ac} = \frac{0.4\pi N(\Delta I/2)\mu \times 10^{-4}}{MPL} \quad [\text{T}] \tag{3.27}$$

$$B_{ac} = \frac{(1.26)(65)(0.075)(14)\times 10^{-4}}{20} = 4.3\times 10^{-4} \text{ T}$$

$$W/kg = Kf^{(m)}B_m^{(m)} \text{ [T]} \tag{3.28}$$

$$mW/g = (0.551)(50000)^{1.23}\left(4.3\times10^{-4}\right)^{2.12}\times10^{-2} = 2.42\times10^{-4}$$

$$P_{fe} = (mW/g)(W_{rfe})\times10^{-3} \text{ [W]} \tag{3.29}$$

$$P_{fe} = \left(2.42\times10^{-4}\right)(288)\times10^{-3} = 0.697\times10^{-4}W$$

<u>ตอนที่13</u> คำนวณหาค่ากำลังงานสูญเสียรวม $(\sum P)$ และค่าพลังงานสูญเสียต่อพื้นที่ (ψ)

$$\sum P = P_{cu} + P_{fe} = 15.75 + 0.697\times10^{-4} = 15.82W$$

$$\psi = \frac{\sum P}{A_t} = \frac{15.82}{203.1} = 0.078W/cm^2$$

ค่าอินดัคแตนซ์ที่ออกแบบมีค่าเท่ากับ 1040 μH เลือกแกน Powder Toroid เบอร์ 55869-A2 ขดลวดเบอร์ AWG12 จำนวนรอบขดลวด 65 รอบ จำนวนชั้นที่พัน 1 ชั้น ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสีย 15.82 วัตต์ที่พิกัดกระแสเอาท์พุท 7.875A

3.2.2 การออกแบบคาปาซิเตอร์อินพุท และเอาท์พุท [7]

$$C_{ripple} \geq \frac{\alpha_m I_{om}}{rf_s V_{om}} \tag{3.31}$$

เมื่อ C_{ripple} คือคาปาซิเตอร์กรองแรงดันกระเพื่อม หรือคาปาซิเตอร์เอาท์พุท(F)

α_m คือ ดิวตี้ไซเคิลที่พิกัดกำลังสูงสุด

I_{om} คือกระแสเอาท์พุทที่พิกัดกำลังสูงสุด(A)

r เป็นค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันกระเพื่อม

f_s คือความถี่ใช้งาน(Hz)

V_{om} แรงดันเอาท์พุทสูงสุด(เฉพาะแรงดัน AC) (V)

$$C_{ripple} \geq \frac{0.34\times7.875}{0.02\times50\times10^3\times15.5} = 172\mu F \text{ เลือกใช้ } 350\mu F$$

$$C_{in} \geq \frac{(1-\alpha_m)I_{om}\alpha_m}{0.02 I_{pvm} R_{pvm} f_s} \tag{3.32}$$

เมื่อ C_{in} คืออินพุทคาปาซิเตอร์(F)

I_{pvm} กระแสอินพุทสูงสุด(A)

R_{pvm} ความต้านภายในแผงโซลาร์เซลล์(Ω)

$$R_{pvm} = \frac{V_{inm}}{I_{pvm}}$$

V_{inm} แรงดันอินพุทที่จุดกำลังสูงสุด(V)

$$C_{in} \geq \frac{(1-0.34)\times 7.875 \times 0.34}{0.02 \times 3.23 \times 10.836 \times 50 \times 10^3} = 50.5\mu F$$

เลือกใช้ $C_{in} = 100\,\mu F$ 100V และ $C_{ripple} = 350\mu F$ 65V

3.2.3 การเลือกอุปกรณ์อื่นๆ

มอสเฟต(Mosfet)

เลือกใช้เบอร์ RFG70N06 มีคุณสมบัติดังนี้

1) แรงดันเบรกดาวน์ $BV_{DS} = 60V$
2) กระแส $I_D = 70A$
3) แรงดันขีดเริ่มขาเกต-ซอร์ท $V_{GS} = 4V_{MAX}$
4) ความต้านทานขณะมอสเฟตออน $r_{DS} = 0.14\Omega$
5) คาปาซิแตนซ์ภายใน $4000pF$
6) กำลังไฟฟ้าแผ่กระจาย ที่ 25^oC 200 W
7) ช่วงเวลาหน่วงขณะออน (t_{dn}) = 200 ns, ช่วงเวลาขณะเริ่มนำกระแสจนถึงกระแสสูงสุด(t_r)= 900 ns
8) ช่วงเวลาหน่วงขณะออฟ (t_{doff}) = 400 ns, ช่วงเวลาที่กระแสเริ่มลดลงจนเป็นศูนย์ (t_{off})= 300 ns

ฟรีวิลลิ่งไดโอด และบล็อกกิ้งไดโอด

เลือกใช้ Fast Recovery Diode เบอร์ MUR1560 จำนวน 2 ตัว มีคุณสมบัติดังนี้

1) แรงดันรีเวอร์สไบอัส 600V $(PRV = 600V)$
2) กระแสเสิร์จ $I_{FM}Surge$ (Per Diode) = 250 A

3) พิกัดอุณหภูมิ $T_c = 100^oC$

4) แรงดันตกคร่อมขณะฟอร์วอร์ดไบอัส $V_F = 1.5V$

5) เวลาในการกลับสถานะ (Reverse Recovery Time) = 50 ns

อุปกรณ์สำหรับวงจรขับขาเกตแบบแยกกราวด์

1) ออปโต้แยกกราวด์เบอร์ H11L2

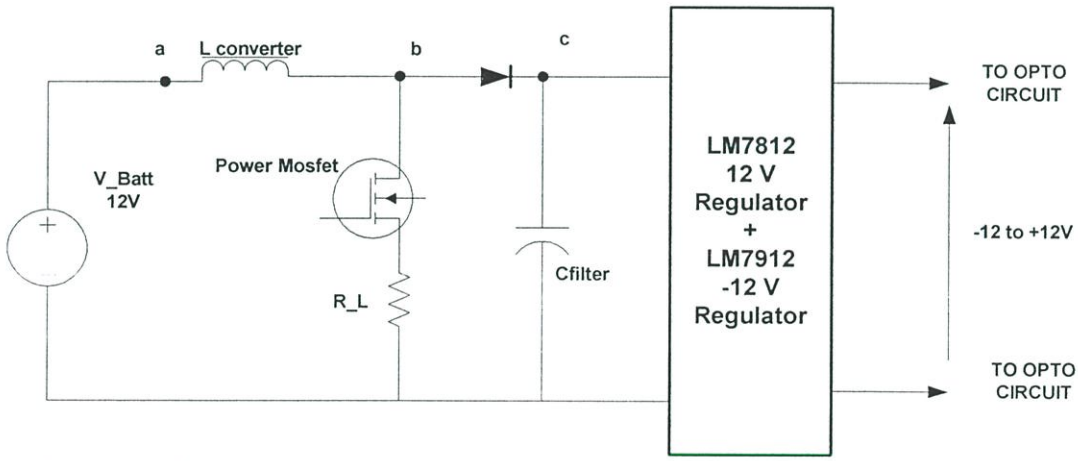
2) IC กำเนิดสัญญาณไฟลบ 12 V เบอร์ LM7912

3) IC กำเนิดสัญญาณไฟบวก 12 V เบอร์ LM7812

4) Zener Diode 18V

5) ไดโอดขนาด 2 A

3.2.4 วงจรคอนเวอร์เตอร์สำหรับจ่ายแรงดันเป็นวงจรขับมอสเฟต



รูปที่ 3.7 วงจรเพิ่มระดับแรงดันกระแสตรงสำหรับขับมอสเฟต

อุปกรณ์ที่เลือกใช้

1) อินดัคเตอร์ (L Converter) $= 110\mu H$

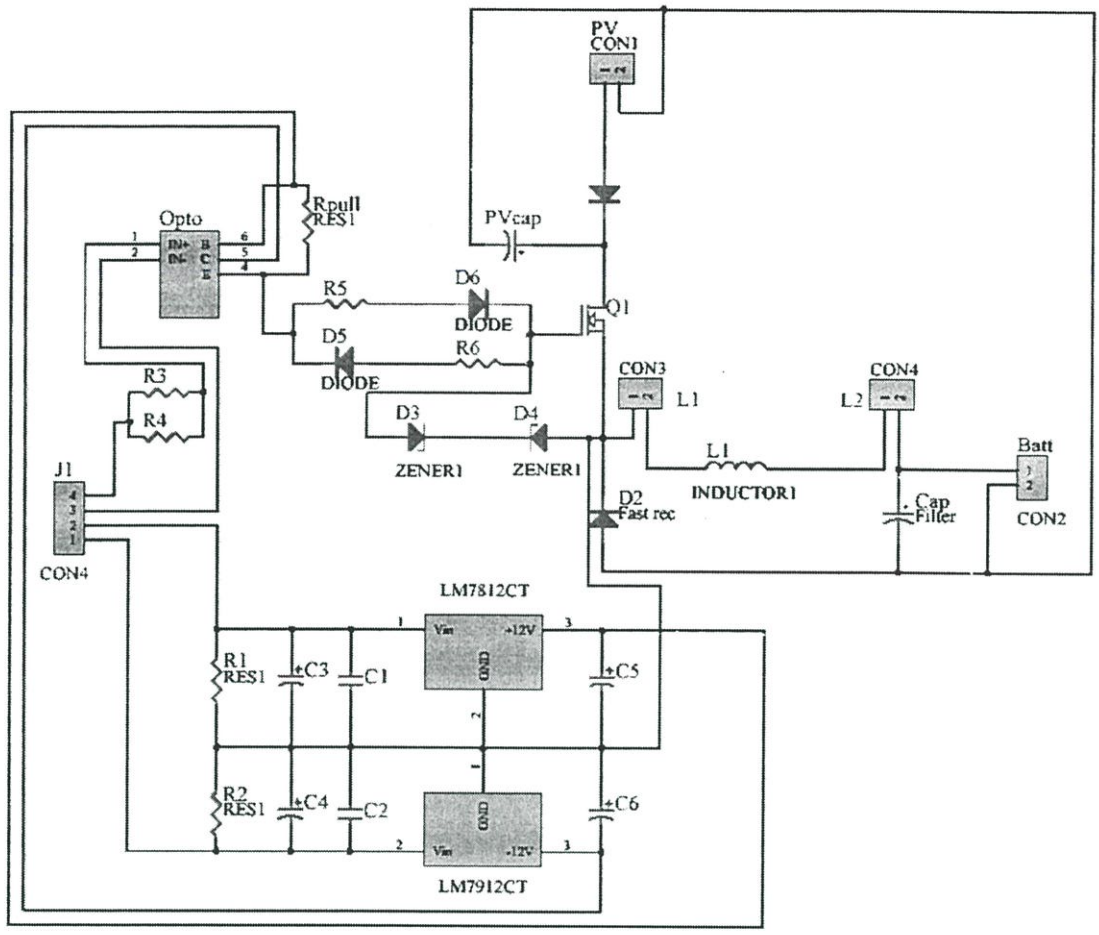
2) มอสเฟตกำลัง (Power Mosfet) เบอร์ IRF540

3) ความต้านทานจำกัดกระแส $R_L = 0.1\Omega$

4) คาปาซิเตอร์กรองแรงดัน (C filter) กระเพื่อม $1000\mu F$

หมายเหตุ การเลือกใช้งานวงจรขับมอสเฟตอาจเลือกใช้ IC ขับมอสเฟตแทนก็ได้

จากรายการอุปกรณ์ในหัวข้อที่ 3.2.2 และ หัวข้อที่ 3.2.3 สามารถแสดงการวางอุปกรณ์ได้ดังรูปที่ 3.8 ซึ่งเป็นวงจรจากโปรแกรมออกแบบแผ่นปริ้นซ์ Protel PCB Design



รูปที่ 3.8 วงจรรวม MPPT คอนเวอร์เตอร์ กับวงจรขับสัญญาณพัลส์ที่ขาเกต

3.3 การออกแบบชุดปรับตำแหน่งแผงทางกล

รูปแบบในการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์นั้นสามารถแบ่งรูปแบบการติดตั้งออกเป็น 2 แบบ หลักๆนั่นคือแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ตั้งอยู่กับที่ ที่มีค่ามุมคงที่เมื่อเทียบกับพื้นระนาบ กับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่สามารถเคลื่อนรับแสงตามตำแหน่งของดวงอาทิตย์ได้

แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่สามารถเคลื่อนหน้าสัมผัสรับแสงตามตำแหน่งดวงอาทิตย์ได้แบ่งออกได้เป็น

1. แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่สามารถเคลื่อนระนาบรับแสงตามตำแหน่งของดวงอาทิตย์ได้ 1 แนวแกน โดยปรับมุมตามทิศตะวันออก-ตะวันตก
2. แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่สามารถเคลื่อนระนาบรับแสงตามตำแหน่งดวงอาทิตย์ได้ 2 แนวแกนซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น
   2.1 แบบเคลื่อนที่อิสระตามทิศทางและตำแหน่งดวงอาทิตย์
   2.2 แบบเคลื่อนที่ตามการคำนวณจากสมการซึ่งจะกำหนดค่ามุมในแนว เหนือ-ใต้ไว้ โดยอาศัยการคำนวณตำแหน่งที่เหมาะสมจากมุมเดคลิเนชั่น (โดยจะนำค่ามุมเส้นละติจูด

ของตำแหน่งนั้น ลบด้วยมุมเดคลิเนชั่น) ซึ่งมุมเดคลิเนชั่นนั้นจะเปลี่ยนแปลงทุกวัน รวมทั้งการคำนวณค่าระนาบรับแสงอาทิตย์เคลื่อนที่จากแนวตะวันออกไปยังตะวันตก

เมื่อนำประสิทธิภาพในการรับพลังงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มาเปรียบเทียบกันแล้วแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการเคลื่อนระนาบรับแสงได้ 2 แนวแกนจะมีประสิทธิภาพในการรับพลังงานมากกว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการเคลื่อนระนาบรับแสง 1 แนวแกน และแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่สามารถเคลื่อนระนาบรับแสงได้อิสระตามตำแหน่งของดวงอาทิตย์ จะมีประสิทธิภาพในการรับพลังงานมากกว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่เคลื่อนที่เคลื่อนระนาบรับแสงจากการคำนวณของสมการ

ในงานวิจัยนี้เป็นการจัดสร้าง และศึกษาการทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ระบบเคลื่อนที่เปลี่ยนตำแหน่งตามดวงอาทิตย์เพื่อให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถรับพลังงานได้มากที่สุด

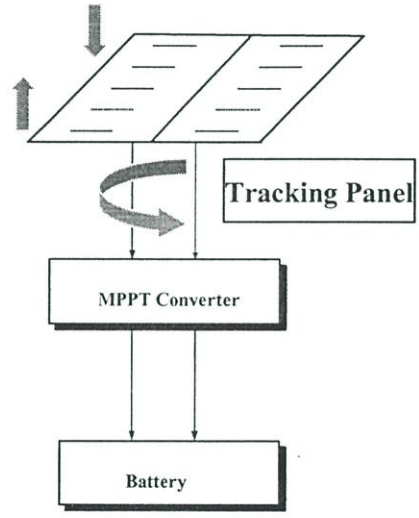
ระบบที่ใช้นั้นจะเป็นระบบที่เคลื่อนระนาบรับแผงได้โดยอิสระ ควบคุมการเคลื่อนระนาบรับแสงของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตั้งฉากกับดวงอาทิตย์ให้มากที่สุด แต่พลังงานที่ได้รับมาส่วนหนึ่งจะต้องสูญเสียไปในการขับเคลื่อนชุดต้นกำลัง เพื่อเคลื่อนระนาบรับแสงของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ รวมทั้งการสูญเสียจากการหลงทิศทางเมื่อสภาวะแสงเปลี่ยนแปลงแบบทันที และเหตุการณ์ทางธรรมชาติต่างๆ เพื่อลดกำลังสูญเสียจากภาวะดังกล่าวจึงใช้การตั้งเวลาการปรับมุมแผง ร่วมกับการเคลื่อนที่แบบอิสระโดยตรวจจับความเข้มแสง แล้วหมุน และปรับระนาบรับแผงตามตำแหน่งดวงอาทิตย์ โดยเวลาที่ตั้งไว้เป็นค่าเวลาที่เหมาะสมตามการโคจรของดวงอาทิตย์ การทำงานร่วมกันของการคำนวณเวลาที่เหมาะสมเพื่อเริ่มตรวจสอบตำแหน่งดวงอาทิตย์ และกำหนดทิศทางการหมุน รวมทั้งปรับมุมแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยอาศัยวงจรตรวจจับความเข้มแสง ช่วยให้ระบบมีความน่าเชื่อถือ และมีความมั่นคงมากขึ้น(Reliability and Stability)

โดยการทดลองหาประสิทธิภาพการรับพลังงาน ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ระบบติดตามตำแหน่งตามดวงอาทิตย์นั้น จะทำการทดลองเปรียบเทียบพลังงานที่เก็บสะสมในแบตเตอรี่ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ระบบเคลื่อนที่ตามตำแหน่งดวงอาทิตย์ กับพลังงานที่เก็บสะสมในแบตเตอรี่ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ตั้งอยู่กับที่ที่มุมที่ได้รับพลังงานมากที่สุด ซึ่งจะทำการทดลองในเวลาเดียวกัน สถานที่เดียวกันอุปกรณ์การทดลองที่ใช้มีประสิทธิภาพเท่ากัน เพื่อหาค่าพลังงานจากระบบทั้งสองมาเปรียบเทียบกัน

3.3.1 หลักการออกแบบ

จุดมุ่งหมายของการนำแผงเซลล์แสงอาทิตย์ระบบเคลื่อนที่ติดตามตำแหน่งตามดวงอาทิตย์มาใช้นั้น คือช่วยให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้รับพลังงานมากที่สุด นั่นคือแผงเซลล์แสงอาทิตย์ต้องเคลื่อนระนาบรับแสงไปยังตำแหน่งที่มีความเข้มของแสงมากที่สุด (ตั้งฉากกับดวงอาทิตย์) เพื่อที่เซลล์แสงอาทิตย์แปลงพลังงานไฟฟ้าออกมาได้เต็มที่ ซึ่งถ้าเราพิจารณาตำแหน่งของดวงอาทิตย์เปรียบเทียบกับโลกแล้ว ตำแหน่งดวงอาทิตย์ที่เปลี่ยนไปในแต่ละเวลาจะอยู่ที่แนวเส้นศูนย์สูตรของ

โลก และเนื่องจากสถานที่ที่ทำการทดลองอยู่ในกรุงเทพมหานคร ประเทศไทยซึ่งตั้งอยู่เหนือเส้นศูนย์สูตรที่ละติจูด $13^{o}-15'$ เหนือ ดังนั้นการออกแบบโครงสร้างของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ระบบเคลื่อนที่เปลี่ยนตำแหน่งตามดวงอาทิตย์ให้มีประสิทธิภาพสูงสุดนั้นจำเป็นต้องแบ่งการควบคุมออกเป็น 2 แนวแกนโดยแบ่งการเคลื่อนที่หมุนในแนวนอน (Azimuth Angle) และการปรับมุมที่ทำกับดวงอาทิตย์ในแนวดิ่ง (Zenith Angle) ระบบที่ใช้ควบคุมนั้นจะใช้ตำแหน่ง และทิศทางของดวงอาทิตย์เป็นตัวควบคุมตำแหน่ง และทิศทางของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งจะทำการตั้งเวลาการปรับมุม ร่วมกับการตรวจจับตำแหน่งของดวงอาทิตย์ในช่วงเวลาต่างๆ



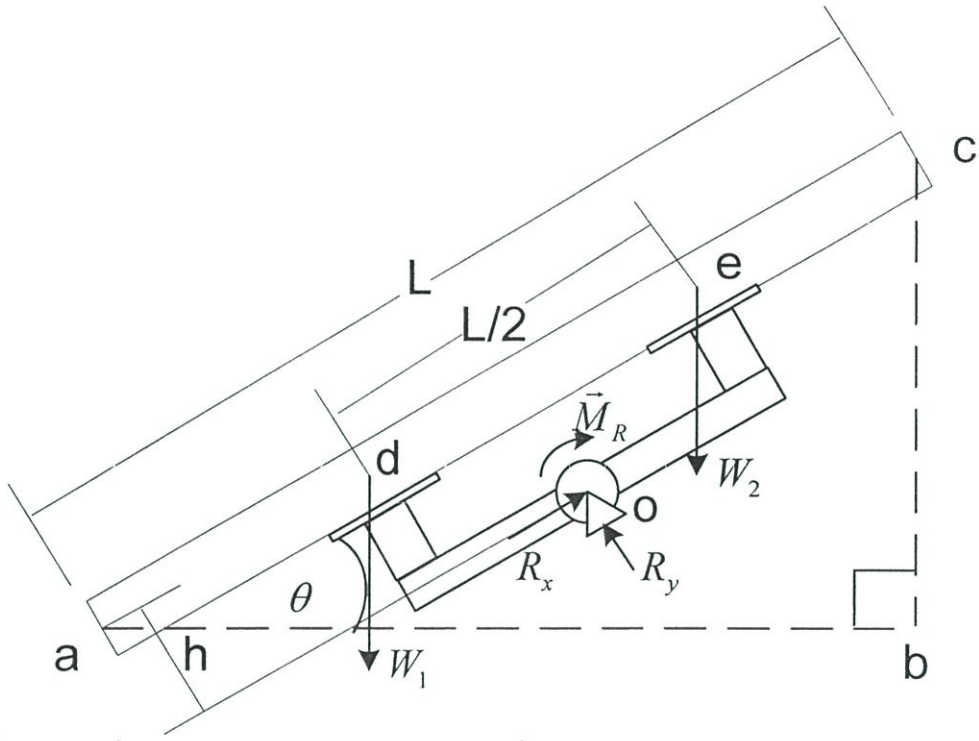
รูปที่ 3.9 ทิศทางการหมุนโครงสร้าง และการปรับมุมแผง

โครงสร้างของระบบประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือ

1. ส่วนที่เคลื่อนที่หมุนในแนวนอน สามารถหมุนได้ 360^{o}
2. ส่วนที่ปรับมุมเอียงในแนวดิ่งสามารถปรับมุมแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้ตั้งแต่ 0^{o}-75^{o}

แผงเซลล์แสงอาทิตย์ระบบเคลื่อนที่เปลี่ยนตำแหน่งตามดวงอาทิตย์นี้ มีแผ่นรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ขนาด 90x100 cm^{2} สามารถรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์รุ่น BPTS 1255 HP ขนาดพิกัดกำลัง 55 W ได้จำนวน 2 แผง (โครงสร้างที่ออกแบบไว้สำหรับรองรับแผงโซลาร์เซลล์สามารถปรับเปลี่ยนเพื่อใช้ตั้งแผงขนาดอื่นได้) อุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ทำโครงสร้างของระบบประกอบด้วยอะลูมิเนียม และเหล็กสำหรับจุดที่ต้องการความแข็งแรงเป็นพิเศษ ในส่วนของการส่งผ่านกำลังนั้นใช้ชุดเฟือง และโซ่ เพื่อลดอัตราทดรอบของมอเตอร์ โดยอาศัยหลักการคำนวณเพื่อหาองค์ประกอบที่สำคัญในการออกแบบดังต่อไปนี้

1. การคำนวณหาแรงบิด



รูปที่ 3.10 แรงที่กระทำต่อโครงสร้างจากการหมุนเมื่อมีการปรับมุมเอียงของแผงโซลาร์เซลล์

<u>ตอนที่1</u> การคำนวณหาขนาดมอเตอร์สำหรับการปรับมุมเอียงของแผงโซลาร์เซลล์(รูปที่ 3.10)

$$\sum \vec{F}_y = 0, \qquad \vec{W}_1 \cos\theta + \vec{W}_2 \cos\theta = \vec{R}_y \tag{3.30}$$

$$\sum \vec{F}_x = 0, \qquad \vec{W}_1 \sin\theta + \vec{W}_2 \sin\theta = \vec{R}_x \tag{3.31}$$

เมื่อ $\vec{W}_1, \vec{W}_2$ คือ1/2 ของผลรวมน้ำหนักแผงโซลาร์เซลล์ และโครงสำหรับวางแผง (N)

$\vec{R}_x, \vec{R}_y$ คือแรงปฏิกิริยาที่จุดรับน้ำหนักกระทำต่อโครงวางแผงในแนวแกน X, Y ตามลำดับ (N)

θ คือมุมแผงโซลาร์เซลล์ที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเทียบกับแนวระนาบ(องศา)

ผลรวมของโมเมนต์รอบจุด **o** ที่แสดงในรูปที่ 3.10 คำนวณได้ตามสมการที่ (3.32)

$$\sum \vec{M} = 0, \qquad \vec{W}_1 \sin\theta \times h + \vec{W}_2 \sin\theta \times h + W_1 \cos\theta \times \frac{L}{4} = \vec{M}_R + W_1 \cos\theta \times \frac{L}{4} \tag{3.32}$$

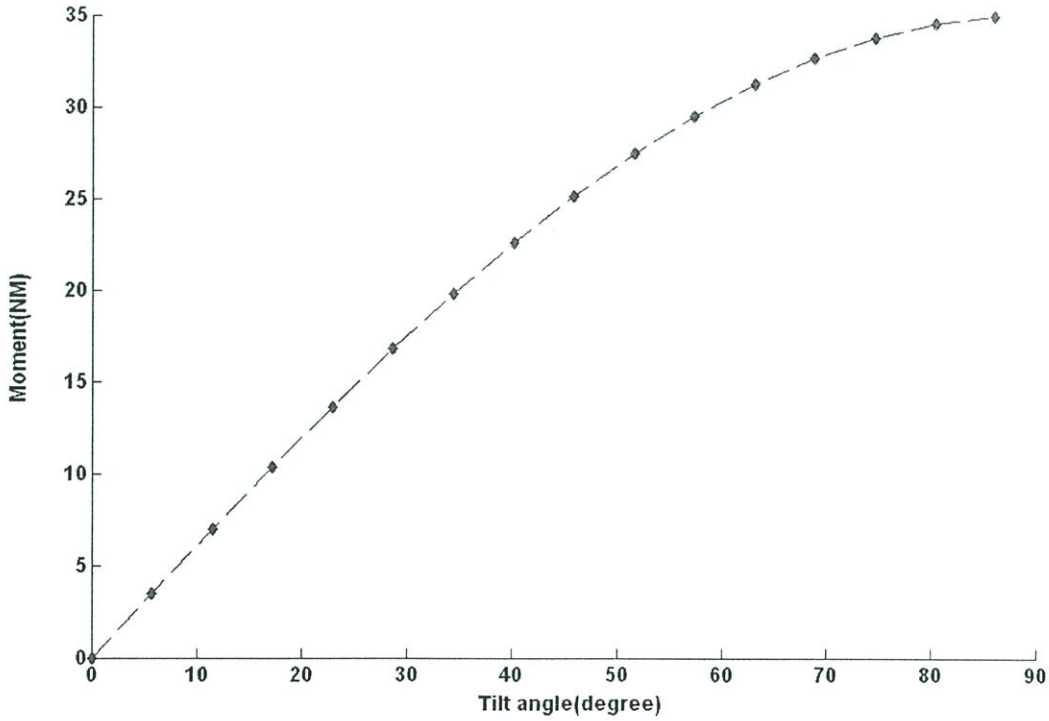
เมื่อ $\vec{L}$ คือความยาวของโครงรองรับแผงโซลาร์เซลล์(m)

$\vec{M}_R$ คือผลรวมโมเมนต์รอบจุดรับแรง **o** (NM)

เมื่อแทนค่า W เท่ากับ 35 kg ซึ่งเป็นน้ำหนักของแผงโซลาร์เซลล์ที่ใช้ รวมกับโครงสำหรับวางความยาว(L)เท่ากับ 1 เมตร กว้าง 0.9 เมตร ในสมการที่ (3.30)-(3.32) จุดรับแรง **o** ต้องสามารถรับแรงในแนวดิ่งได้มากกว่า 350 N และ ต้องรับโมเมนต์ $\left(\vec{M}_R\right)$ได้อย่างปลอดภัย เมื่อขนาดของ $W_1 = W_2 = \frac{W}{2}$ และ $h = 10$ cm ขนาดของ $\vec{M}_R$ ที่ต้องการจากจุดหมุน **o** คือ $35\sin\theta$ N-M เป็นไปตามการคำนวณจากสมการที่ (3.33)

$$\frac{W}{2}\sin\theta \times h + \frac{W}{2}\sin\theta \times h = \vec{M}_R \tag{3.33}$$

ขนาดของ $\vec{M}_R$ ที่เปลี่ยนแปลงไปที่มุม θ ตั้งแต่ $0° - 90°$ แสดงไว้ในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 ขนาดของ $\vec{M}_R$ ที่เปลี่ยนแปลงตามมุม θ

จากรูปที่ 3.11 ขนาดของโมเมนต์ $\vec{M}_R$ เทียบกับมุม θ มีค่ามากขึ้นเมื่อมุม θ โตขึ้นนั่นคือจุดหมุนต้องสามารถจ่ายแรงบิดได้มากที่สุดเมื่อ θ เท่ากับ 90 องศา ดังนั้นทอร์คสูงสุดที่จุดหมุน **o** ต้องการคือ $35\sin(90°) = 35$ NM เพื่อใช้เป็นแรงบิดในการปรับมุมเอียงของแผงจึงสามารถเอาชนะแรงบิดเนื่องจากน้ำหนักรวมของแผงโซลาร์เซลล์ และโครงสำหรับรองรับแผงได้

นำข้อมูลเบื้องต้นมาใช้เพื่อเลือกขนาดของมอเตอร์โดยพิจารณาดังนี้

1. ให้ความเร็วในการปรับมุมแผงจาก 0-75 องศา ใช้เวลาประมาณ 5 วินาที
2. ที่จุดหมุนต้องรับแรงบิดได้ 35 NM

ดังนั้นกำลังทางด้านเอาท์พุทของเพลาต่อกับโครงสำหรบวางแผงต้องมีพิกัดไม่น้อยกว่า $35 \times \frac{75 \times 2 \times 3.14}{360 \times 5} = 9.16W$ คำนวณหาขนาดของมอเตอร์เมื่อกำหนดให้ระบบที่เลือกใช้มีอัตราทดรอบ 2 ขั้น โดยขั้นที่ 1 เป็นระบบโซ่ และขั้นที่ 2 ใช้ระบบเกียร์ รวมทั้งมีรายละเอียดต่างๆ ดังต่อไปนี้

η_g คือประสิทธิภาพของเกียร์

R_g คืออัตราทดรอบเกียร์(15:1)

η_c คือประสิทธิภาพของโซ่, และจานโซ่

R_c คืออัตราทดรอบของระบบโซ่(5.5:3)

P_e คือกำลังไฟฟ้าที่มอเตอร์ (W)

P_g คือกำลังทางกลที่เกียร์ (W)

P_c คือกำลังทางกลที่ระบบโซ่ (W)

F_W คือแรงเนื่องจากน้ำหนักสำหรับหมุนแผงโซลาร์เซลล์ (N)

ω_{c1}, ω_{c2} คืออัตราเร็วเชิงมุมของจานโซ่ใหญ่-เล็ก ตามลำดับ $(rad/\sec)$

T_{c1}, T_{c2} คือแรงบิดจานโซ่ใหญ่-เล็กกระทำต่อโซ่ตามลำดับ (NM)

ω_{g1}, ω_{g2} คืออัตราเร็วเชิงมุมของเกียร์ใหญ่-เล็ก ตามลำดับ $(rad/\sec)$

T_{g1}, T_{g2} คือแรงบิดที่เกียร์ใหญ่-เล็กตามลำดับ (NM)

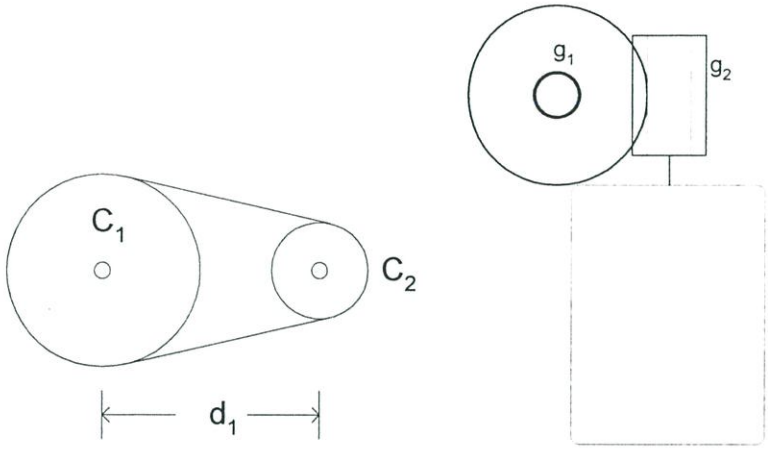
จากรูปที่ 3.12 และองค์ประกอบที่กำหนดให้ สามารถหาแรงบิดที่เกียร์ g_2 ซึ่งเป็นเกียร์ที่ต่อกับเพลาของมอเตอร์ได้ดังนี้

$$\omega_{c1} \times R_c \times R_g = \omega_{g2} \tag{3.34}$$

$$T_{C1}\omega_{C1} = \eta_C T_{C2}\omega_{C2} \quad \text{และ} \quad T_{C2}\omega_{C2} = T_{g1}\omega_{g1} \tag{3.35}$$

$$T_{g1}\omega_{g1} = \eta_g T_{g2}\omega_{g2} \tag{3.36}$$

$$T_{g2} = \frac{T_{C1}\omega_{C1}}{\eta_C \eta_g \omega_{g2}} \tag{3.37}$$



(ก) (ข)

รูปที่ 3.12 ระบบโซ่ และเกียร์ที่เลือกใช้

(ก) จานโซ่ที่มีขนาดรัศมีใหญ่ C1 และเล็ก C2 หรือมีอัตราทดรอบ $R_C = 5.5:3$

(ข) เกียร์สำหรับเปลี่ยนทิศทางการหมุนอัตราทด 15:1 , $R_g = 15$

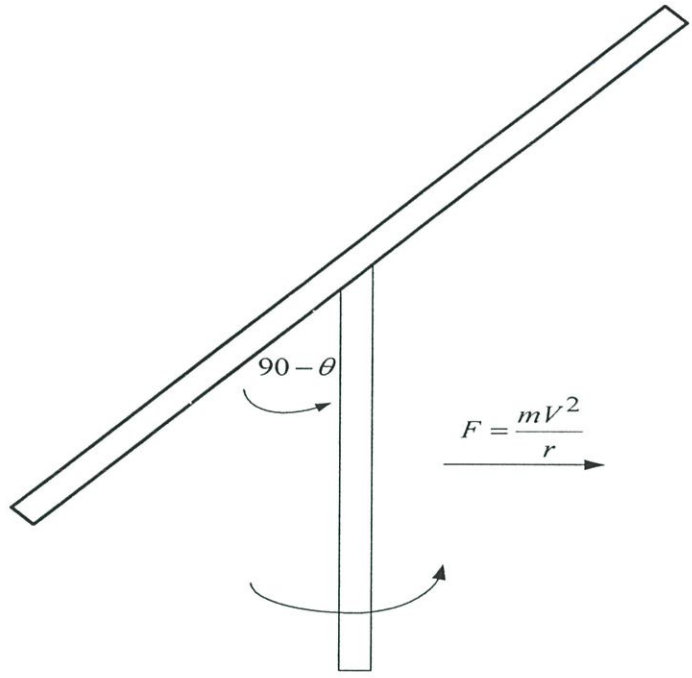
เมื่อสมมติค่าประสิทธิภาพในเกียร์ และโซ่เท่ากับ 0.8 หรือ 80% โดยมีกำลังงานที่ต้องการในการปรับมุมแผงโซลาร์เซลล์เท่ากับ 9.16W เมื่อแทนค่า $\omega_{C1} = 0.262 rad/\sec$ และ $R_C, R_g = 1.83,15$ ในสมการที่ (3.34) ความเร็วรอบของมอเตอร์ $\omega_{g2} = 7.183 rad/\sec$ แรงบิดของมอเตอร์ที่เลือกใช้ต้องมีขนาดน้อยที่สุดเท่ากับ $T_{g2} = \dfrac{9.16}{0.8 \times 0.8 \times 7.183} = 1.99 NM$ ดังนั้นพิกัดกำลังของมอเตอร์เมื่อกำหนดให้มอเตอร์มีประสิทธิภาพ 60% สามารถคำนวณได้จากสมการที่

$$P_e = \frac{T_{g2}\omega_{g2}}{\eta_M} = 23.82W \qquad (3.38)$$

<u>ตอนที่2</u> การคำนวณหาขนาดมอเตอร์สำหรับหมุนโครงตั้งแผงโซลาร์เซลล์(รูปที่ 3.13)

การเคลื่อนที่ในแนวแกนนี้เกิดจากการหมุนโครงตั้งแผงโดยรอบ ทำให้แผงมีการเคลื่อนที่แบบวงกลมที่มีสมการทั่วไปดังนี้

$$\sum \vec{F} = \frac{m(\vec{v} - \vec{v}_0)^2}{r} = m(\vec{\omega} - \vec{\omega}_0)^2 r \qquad (3.39)$$



รูปที่ 3.13 แรงที่กระทำต่อโครงสร้างจากการหมุนเมื่อหมุนแผงโซลาร์เซลล์โดยรอบ

เมื่อ

$\sum \vec{F}$ คือแรงลัพธ์ที่กระทำให้เกิดการเคลื่อนที่(N)

m คือมวลของวัตถุ(kg)

$\vec{v}$ คืออัตราเร็วเชิงเส้นในแนวสัมผัสเส้นรอบวง(m/s)

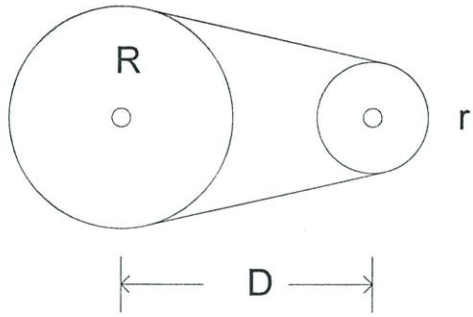
$\vec{v}_0$ คือความเร็วเชิงเส้นเริ่มต้น(m/s)

$\vec{\omega}$ คืออัตราเร็วเชิงมุม(rad/sec)

$\vec{\omega}_0$ คืออัตราเร็วเชิงมุมเริ่มต้น(rad/sec)

r คือรัศมีของการเคลื่อนที่(m)

ขนาดของแรงลัพธ์ที่กระทำมีค่ามากที่สุดเมื่อต้องการเริ่มต้นการหมุน ดังนั้นการพิจารณาขนาดของมอเตอร์ที่เลือกใช้ต้องสามารถฉุดให้มีการเริ่มหมุนจากจุดหยุดนิ่งหรือมีอัตราเร็วในการเคลื่อนที่เริ่มต้นเป็นศูนย์ จากรูปที่ 3.14 หากเลือกใช้การทดรอบเป็นระบบโซ่ที่มีอัตราทดรอบ r:R เท่ากับ 1:3 เมื่อ R,r คือรัศมีของจานโซ่ใหญ่-เล็กตามลำดับ



รูปที่ 3.14 ระบบโซ่ที่เลือกใช้ในการทดรอบที่มีระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางจานโซ่ใหญ่กับเล็กเท่ากับ D

หากให้อัตราเร็วเชิงมุมในการเคลื่อนที่เป็น 1 rev/10sec หรือ 0.628rad/sec และรัศมีของการเคลื่อนที่เปลี่ยนแปลงไปตามมุ θ หรือมุมที่แผงกระทำกับแนวระนาบโดยมีค่าเท่ากับ $\frac{L}{2}\cos\theta$ ดังนั้น r มีค่ามากสุดเท่ากับ $\frac{L}{2}=0.5m$ เมื่อ θ เท่ากับศูนย์องศา มวลของแผงโซลาร์เซลล์ และโครงประกอบที่มีการหมุนโดยรอบเท่ากับ 35kg ดังนั้นขนาดของแรงมากสุดที่สามารถฉุดให้มีการหมุนจากจุดหยุดนิ่งจนกระทั่งมีอัตราเร็วเชิงมุมเป็น 0.628 rad/sec มีค่าเท่ากับ

$$\left|\sum \vec{F}\right| = 35\times 0.628^2 \times 0.5 = 6.90N$$

โดยพิกัดกำลังที่ใช้คำนวณได้ดังนี้

$$\left|\sum \vec{F}\right| \times \left|\frac{L}{2}\right| \times |\vec{\omega}| = 6.90\times 0.5\times 0.628 = 2.16W$$

จากข้อกำหนดเบื้องต้นเกี่ยวกับพิกัดกำลังด้านเอาท์พุทที่ต้องการ และรายละเอียดการขับเคลื่อนดังแสดงในรูปที่ 3.14 คำนวณหาขนาดของมอเตอร์ได้ดังสมการที่ (3.40)-(3.42)

$$\omega_r r = \omega_R R, \omega_R = |\vec{\omega}| \tag{3.40}$$

$$T_r\omega_r = \frac{T_R\omega_R}{\eta_{r-R}} \tag{3.41}$$

$$P_{e1} = \frac{T_r\omega_r}{\eta_M} \tag{3.42}$$

เมื่อ ω_R, ω_r คืออัตราเร็วเชิงมุมของจานโซ่ใหญ่-เล็ก ตามลำดับ(rad/sec)

T_R คือแรงบิดที่จานโซ่ใหญ่ (NM)

T_r คือแรงบิดที่จานโซ่เล็ก (NM) ซึ่งมีค่าเท่ากับแรงบิดที่มอเตอร์

η_{r-R}, η_M คือประสิทธิภาพของระบบโซ่ และของมอเตอร์ตามลำดับ

P_{el} คือพิกัดกำลังของมอเตอร์(W)

ดังนั้นพิกัดกำลังของมอเตอร์ที่ใช้ P_{el} ควรมีค่ามากกว่า 4.51W แรงบิดไม่น้อยกว่า 2.40 NM ที่อัตราเร็วเชิงมุม 1.88rad/sec เนื่องจากในแนวแกนนี้ตำแหน่งที่ติดตั้งชุดมอเตอร์สำหรับหมุนโครงแผงใกล้จากจุดหมุนมากดังแสดงในรูปที่ 3.15 และรูปที่ 3.16 จึงควรเผื่อขนาดของมอเตอร์เอาไว้ 2-3 เท่าจากค่าที่คำนวณได้

2. การเลือกใช้มอเตอร์ และการเขียนแบบทางกล

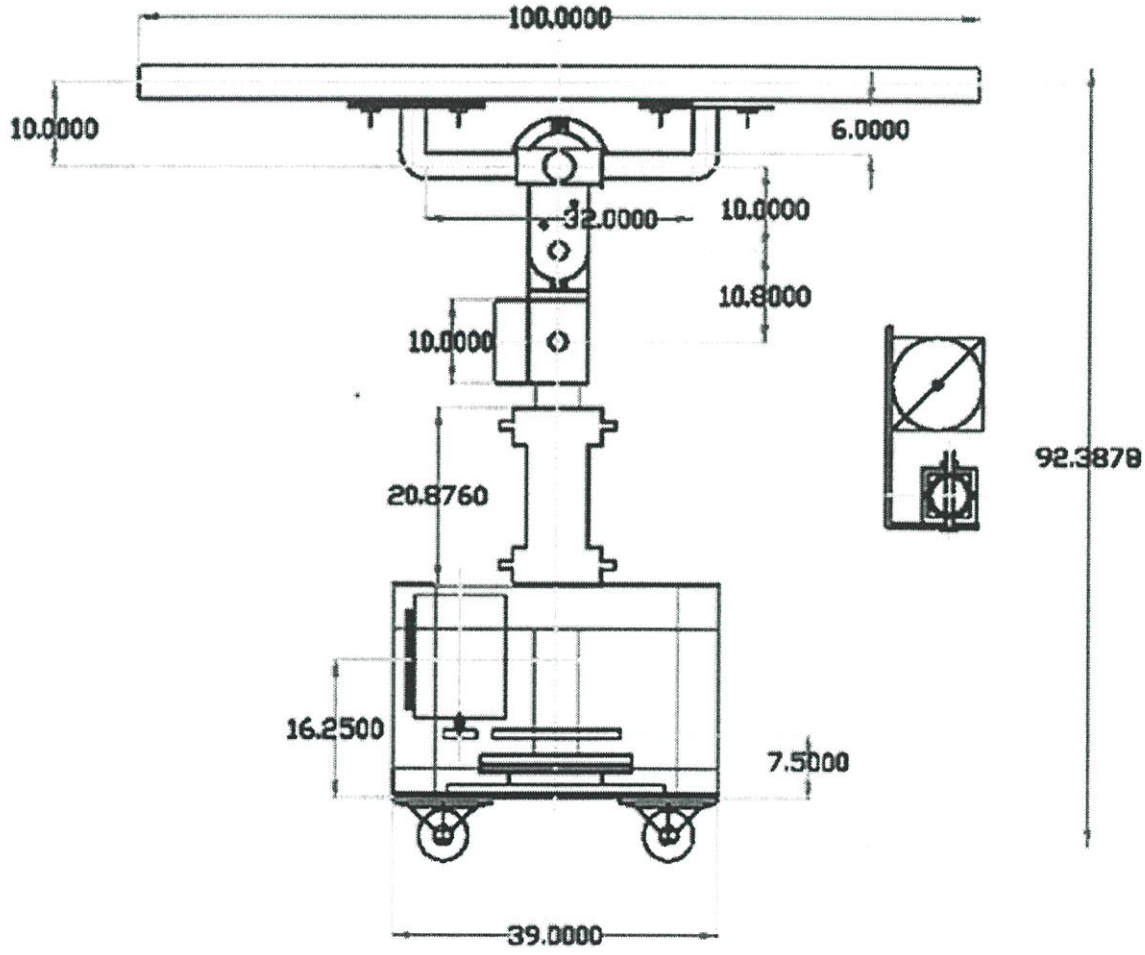
ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติของมอเตอร์ในแนวแกนต่างๆที่ได้จากการคำนวณในขั้นตอนการออกแบบ

คุณสมบัติ	มอเตอร์สำหรับปรับมุมเอียงแผงโซลาร์เซลล์	มอเตอร์สำหรับหมุนโครงรองรับแผงโซลาร์เซลล์
พิกัดกำลัง(W)	23.82	13.53
แรงบิด(NM)	3.32	7.20
อัตราเร็วรอบ(rad/sec)	7.183	1.88
พิกัดแรงดัน(V_{DC})	12	12
พิกัดกระแส(A)	1.99	1.13

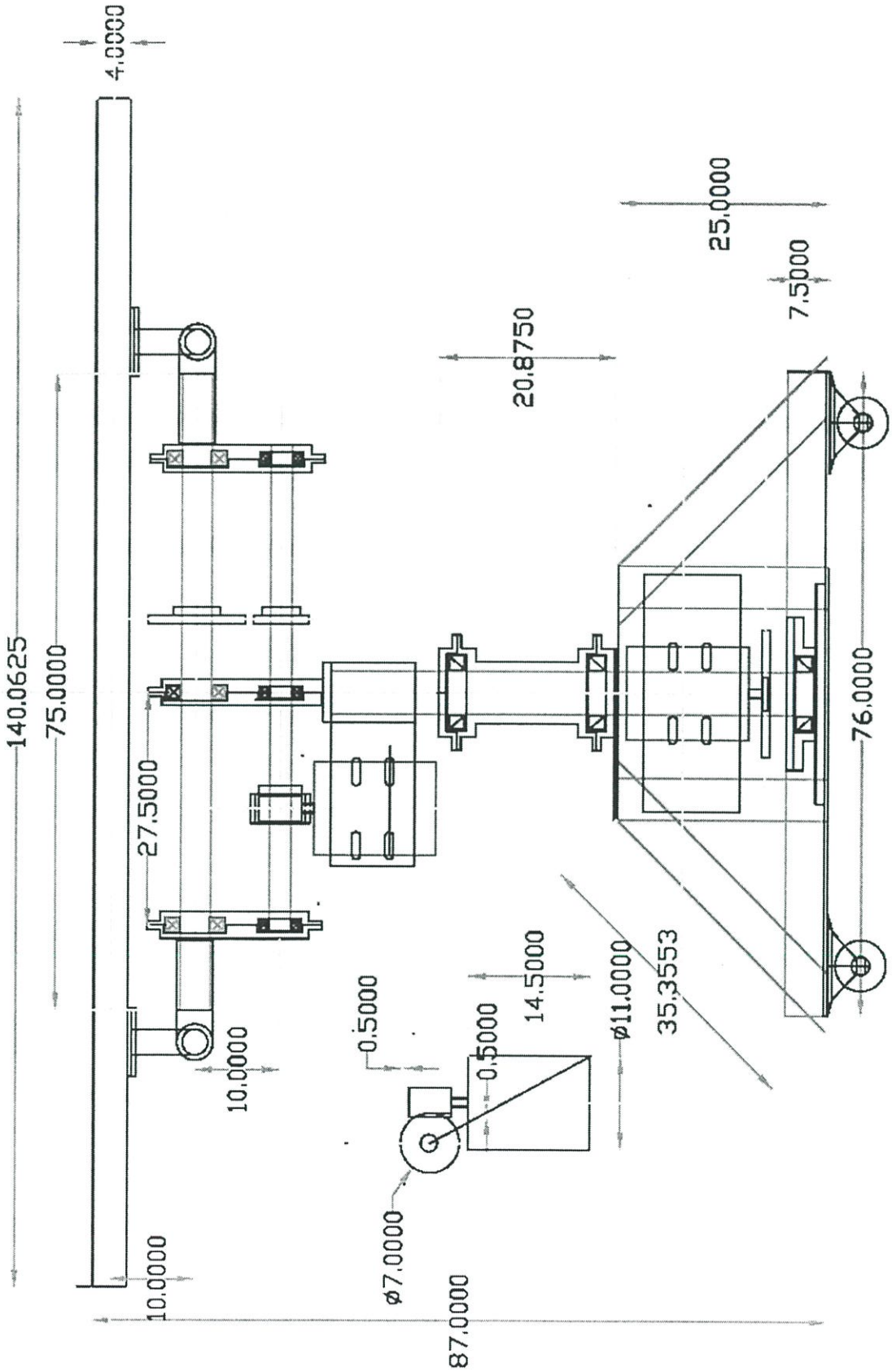
จากข้อมูลในตารางที่ 3.3 พิจารณาเลือกใช้มอเตอร์เกียร์ขนาด 25W พิกัดแรงดัน-กระแสเท่ากับ 12V และ 2.5A ตามลำดับ อัตราเร็วรอบสูงสุด 15รอบ/นาที หรือ 1.5rad/sec กับทั้ง 2 แนวแกน ดังนั้นอัตราเร็วในการปรับมุมอียงของแผงโซลาร์เซลล์จะลดลงเป็น $\frac{1.5}{1.83\times15} = \frac{0.055\times360}{2\times3.14} = 3.13$ องศา/วินาที และอัตราเร็วสำหรับการหมุนโครงรองรับแผงโซลาร์เซลล์เพิ่มขึ้นเป็น $\frac{1.5}{3} = \frac{0.5\times360}{2\times3.14} = 28.66$ องศา/วินาที เนื่องจากทุกๆ 3 นาที โดยประมาณตำแหน่งดวงอาทิตย์จะเปลี่ยนไป 1 องศา ดังนั้นความเร็วในการปรับมุมแผงโซลาร์เซลล์ของโมเดลที่ออกแบบไว้จึงสามารถนำมาใช้งานจริงได้อย่างมีประสิทธิภาพ หากพิจารณาตามมาตรฐาน IEEE 1513-2001[39] ซึ่งกำหนดให้การปรับมุมแผงโซลาร์เซลล์สำหรับการทดสอบ

ประสิทธิภาพแผงโซลาร์เซลล์ภาคสนาม(Out-door Test) ในหัวข้อที่ 5.2.1 เรื่องการปรับตำแหน่ง (Alignment) โดยอาศัยการปรับตำแหน่งแผงทางกลแบบ 2 แนวแกน(2 Axis Mechanical Tracker) มีความละเอียดในการปรับมุมอยู่ที่ 1 องศาในทั้ง 2 แนวแกนเช่นกัน(หากไม่มีการกำหนดความละเอียดในการปรับมุมแผงโซลาร์เซลล์จากผู้ผลิต)

นำข้อมูลการออกแบบโครงตั้งรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์มาเขียนแบบทางกล เพื่อกำหนดขนาด และองค์ประกอบต่างๆได้ดังแสดงในรูปที่ 3.15 และรูปที่ 3.16 มีความสูงโดยรวมประมาณ 92.40 เซนติเมตร ฐานสำหรับรองรับโครงสร้างมีขนาด 39x76 ตารางเซนติเมตร มีพื้นที่รองรับแผงสูงสุด 100x140 ตารางเซนติเมตร ติดตั้งล้อเลื่อนเพื่อสะดวกในการเคลื่อนย้าย และการทดสอบต่างๆ



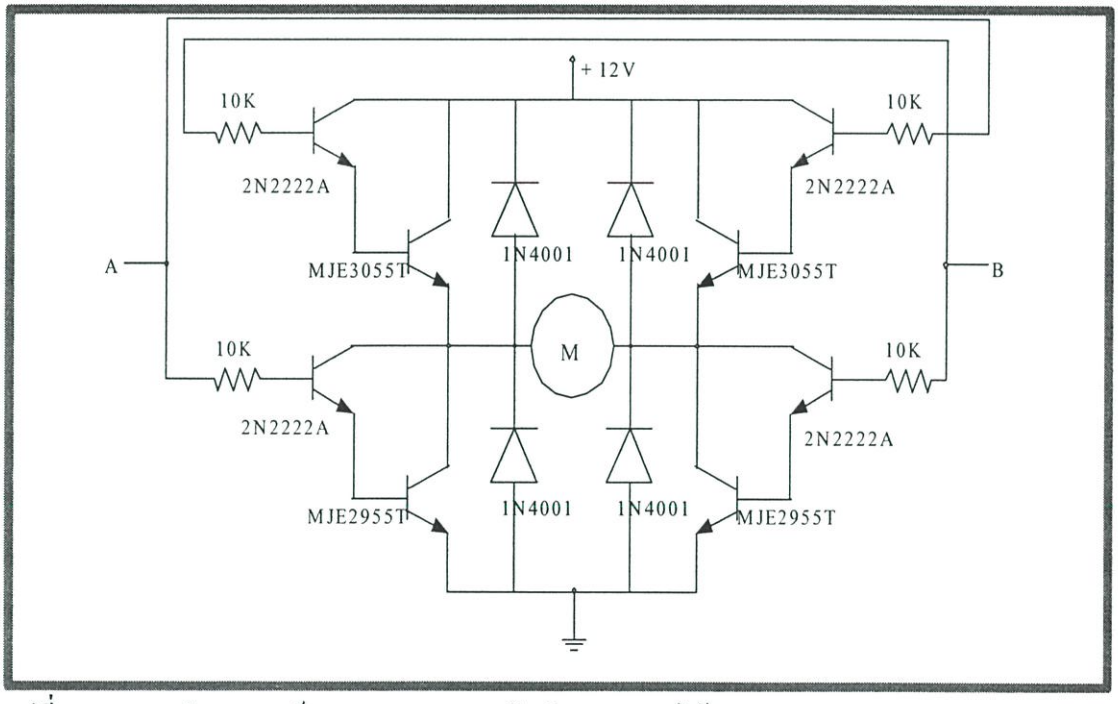
รูปที่ 3.15 ขนาด และองค์ประกอบของโครงสร้างรองรับแผงแบบปรับตำแหน่งทางกลได้ 2 แนวแกนเมื่อมองจากด้านข้าง(หน่วย = เซนติเมตร)



รูปที่ 3.16 ขนาด และองค์ประกอบของโครงสร้างรองรับแผงแบบปรับตำแหน่งทางกลได้ 2 แนวแกนเมื่อมองจากด้านหน้า(หน่วย = เซนติเมตร)

3.3.2 วงจรควบคุมทิศทางการหมุนของมอเตอร์

วงจรกำลังที่ใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์แบบฟุลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ ซึ่งมีคุณสมบัติในการกลับทิศทางการหมุนมอเตอร์กระแสตรงได้โดยอาศัยสัญญาณควบคุมที่มีขนาดแรงดัน 5V จากไมโครคอนโทรลเลอร์จ่ายให้ขั้วต่อ A, B ดังแสดงใน รูปที่ 3.17 การเลือกทิศทางหมุนขึ้นอยู่กับการจ่ายสัญญาณควบคุมให้กับ A, B เมื่อจ่ายสัญญาณแรงดันขนาด 5V ให้ขั้วต่อ A มอเตอร์จะหมุนไปในทิศทาง ตรงกันข้ามกับเมื่อจ่ายสัญญาณแรงดันขนาด 5V ให้ขั้วต่อ B โดยสัญญาณ A, B ที่ไมโครคอนโทรลเลอร์ต้องมีต้องมีขนาดแรงดันตรงกันข้าม คือในขณะที่ขั้วต่อใดมีขนาด 5V ขั้วต่อที่เหลือต้องมีขนาด 0V เพื่อป้องกันการสปาร์คของขั้วบวก-ลบจากแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงเพื่อใช้ขับมอเตอร์ เมื่อต้องการหมุนมอเตอร์เพื่อปรับมุมแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบ 2 แนวแกนจึงต้องใช้วงจรในรูปที่ 3.17 ทั้งสิ้น จำนวน 2 วงจร โดยในแต่ละแนวแกนมีความสามารถในการกลับทิศทางการปรับมุม(เนื่องจากการหมุนของมอเตอร์)ได้อย่างอิสระจากกัน

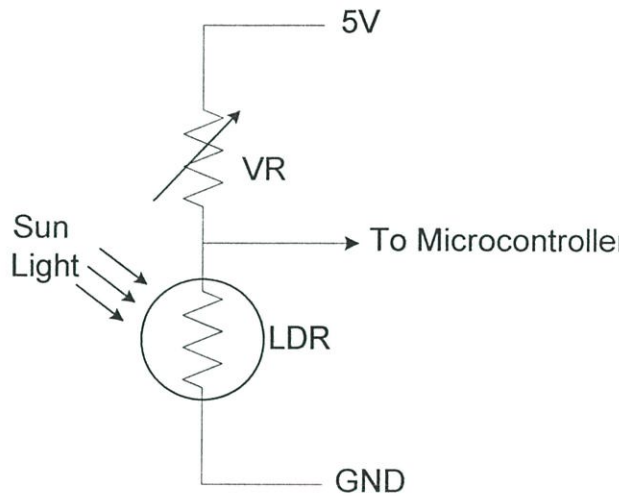


รูปที่ 3.17 วงจรขับมอเตอร์กระแสตรงแบบกลับทิศทางหมุนได้

3.3.3 วงจรตรวจจับแสง และเซ็นเซอร์

ความสำคัญของการปรับมุมแผงตามตำแหน่งดวงอาทิตย์อยู่ที่การติดตั้ง และออกแบบวงจรตรวจจับความเข้มแสง เนื่องจากระบบที่ออกแบบเป็นการผสมผสานระหว่างการกำหนดเวลาการปรับมุมแผงเซลล์แสงอาทิตย์(ประมาณ 3 นาที) และการตรวจเช็คความเข้มแสงจากวงจรที่อาศัยการทำงานของอุปกรณ์ที่มีค่าความต้านทานลดลง (LDR : Light Decrease Resistor) เมื่อความเข้มแสงมากขึ้น 4 ชุด แต่ละชุดแยกติดตั้งที่ขอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยมีหน้าที่ตรวจวัดระดับความสว่าง

และความเข้มแสงที่มาจากทิศทางที่ LDR ตัวนั้นๆติดตั้งอยู่ แล้วแปลงค่าความต้านทานที่ได้เป็นแรงดันเพื่อส่งให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยอาศัยวงจรแบ่งแรงดันอย่างง่ายดังแสดงในรูป



รูปที่ 3.18 วงจรแบ่งระดับแรงดัน สำหรับแปลงค่าความต้านทานเป็นแรงดันของ LDR

เมื่อระดับแรงดันส่งไปถึงไมโครคอนโทรลเลอร์ซึ่งมีหน่วยประมวลผลสัญญาณอะนาลอกเป็นสัญญาณดิจิตอล(A/D: Analog to Digital) อยู่ภายใน ดังนั้นระดับแรงดันจะถูกแปลงค่าเป็นตัวเลขเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบกับ ระดับแรงดันจาก LDR ที่ติดตั้งในตำแหน่งตรงกันข้าม โดยอาศัยการแปลง A/D ในลักษณะเดียวกัน (PIC18F458 มีอินพุทสำหรับ A/D อยู่ 8 อินพุท) ดังนั้นเราจึงสามารถระบุความแตกต่างของระดับความสว่าง และความเข้มแสง โดยอาศัยความแตกต่างของระดับแรงดันด้วยการทำงานร่วมกันของวงจรกำเนิดแรงดันจาก LDR และ A/D ในไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อตัดสินใจปรับมุมแผงโซลาร์เซลล์ รวมทั้งความสามารถในการตรวจสอบระดับความเข้มแสง และระดับความสว่างที่เหมาะสมในการปรับมุมแผงโซลาร์เซลล์ ทำให้ระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์นี้มีความสามารถในการตัดสินใจปรับตำแน่ง และมุมเอียงของแผงเมื่อมีระดับความเข้มแสงเพียงพอ และคุ้มค่าต่อพลังงานที่เสียไปในการปรับมุมแผงในขณะนั้นๆ เพื่อลดอัตราเสี่ยงในการหลงทิศทางเมื่ออยู่ในภาวะที่มีความเข้มแสงลดลงชั่วขณะอันเนื่องมาจากปัจจัยต่างๆ เช่น มีเมฆมาบังดวงอาทิตย์ทำให้ LDR ได้รับความเข้มแสงที่กระจัดกระจายมาจากทิศทางต่างๆ (Diffused Irradiance) แทนที่จะได้รับความเข้มแสงแบบตรง (Direct Irradiance) ค่าระดับแรงดันที่ส่งเข้ามาให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์เปลี่ยนแปลงไปแบบทันทีทันใด ทำให้ข้อมูลแรงดันที่นำมาเปรียบเทียบกันไม่มีเสถียรภาพ และความน่าเชื่อถือ (ในช่วงเวลานั้นๆ) หากในช่วงเวลาดังกล่าวเราอนุญาตให้มีการปรับตำแหน่ง และมุมแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้ก็มีความน่าจะเป็นในการหลงทิศของแผงโซลาร์เซลล์สูง ดังนั้การตั้งระดับแรงดันเริ่มต้นที่ได้จากวงจร LDR ใน

การอนุญาตให้มีการปรับมุมจึงมีความสำคัญยิ่งต่อการเขียนโปรแกรม(ซึ่งค่าแรงดันดังกล่าวสามารถหาได้จากการนำ LDR มาทดสอบภายใต้สภาวะแสงอาทิตย์จริง)

3.4 การเขียนโปรแกรม และไมโครคอนโทรลเลอร์

ปัจจุบันไมโครคอนโทรลเลอร์ได้เข้ามามีบทบาทในการควบคุมการทำงานของระบบต่างๆ รวมทั้งในงานวิจัยนี้ไม่ว่าจะเป็นส่วนของการควบคุมการปรับดิวตี้ไซเคิลของวงจร MPPT คอนเวอร์เตอร์ หรือในส่วนการปรับมุมแผงโซลาร์เซลล์ หลักการสำคัญในการเลือกใช้ไมโครคอน - โทรลเลอร์ โดยทั่วไปมีดังนี้

1. จำนวนขาอินพุท และเอาท์พุทของไมโครคอนโทรลเลอร์ที่เลือกใช้
2. องค์ประกอบของวงจรภายใน (Built-in Hardware Circuit) ที่เอื้อต่อการนำมาประยุกต์ใช้งานได้หลายลักษณะที่จำเป็นต้องใช้ และอุปกรณ์ต่อร่วมอื่นภายนอก (Option)
3. ภาษาที่ใช้ในการเขียนโปรแกรม

จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้นจึงเลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC เบอร์ PIC18F458 เนื่องจากมีคุณสมบัติที่เหมาะสมตามหลักการคือ มีจำนวนอินพุท/เอาท์พุท จำนวนมากถึง 32 หน่วย และมี Built-in Hardware มากมาย เช่น A/D ถึง 8 ช่องสัญญาณอินพุท, หน่วยกำเนิดสัญญาณพัลส์ (Hardware PWM) ฯ รวมทั้งภาษาที่ใช้เขียนง่าย คือใช้ภาษา PIC Basic ที่ง่ายต่อการศึกษาและทำความเข้าใจ เพราะการสั่งงานต่างๆ อาศัยชุดคำสั่งที่ไม่ต้องอ้างอิงถึงรีจีสเตอร์ (Register) มากนัก เช่น ชุดคำสั่งในการแสดงผลทางจอ LCD, ชุดคำสั่งในการสร้างสัญญาณพัลส์ที่มีความถี่ กับดิวตี้ไซเคิลตามที่ต้องการ หรือชุดคำสั่งในการแปลง A/D ฯ (รายละเอียดในภาคผนวก)

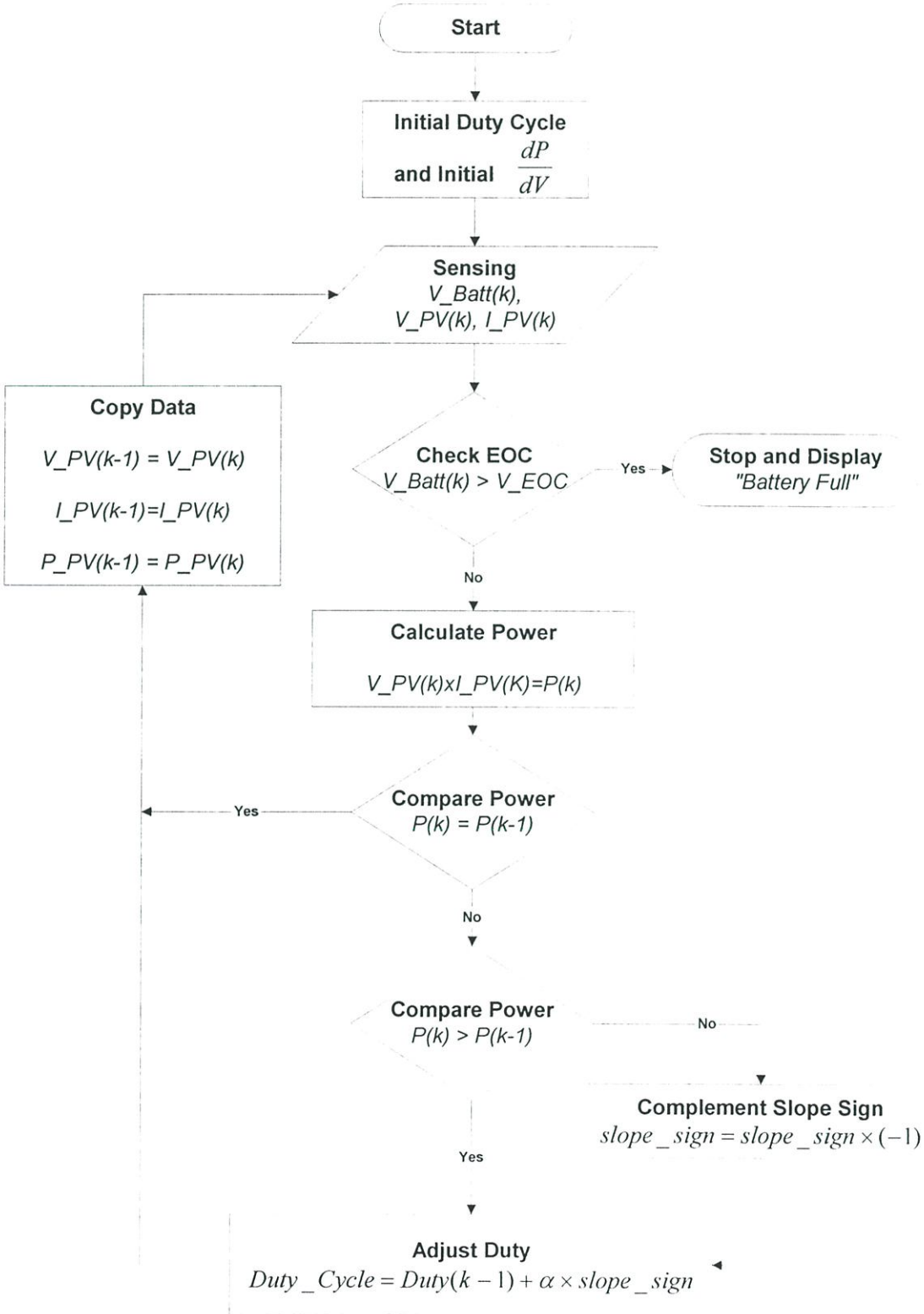
3.4.1 การเขียนโปรแกรม

การเริ่มต้นเขียนโปรแกรมโดยใช้ภาษา PIC Basic นั้นก็คล้ายกับการเขียนโปรแกรมทั่วๆไป คือการเขียนผังโปรแกรม (Flow Chart) เพื่อสามารถทำความเข้าใจการเขียนโปรแกรมได้ง่าย และสะดวกในการกำหนดรายละเอียดของโปรแกรมในแต่ละส่วน รวมทั้งความกะทัดรัดของโปรแกรม

Flow Chart ของโปรแกรมที่ใช้ในโครงงานแสดงได้ดังในรูปที่ 3.19 และรูปที่ 3.20 โดยแบ่งเป็น Flow Chart ของส่วนโปรแกรมควบคุม MPPT คอนเวอร์เตอร์ และส่วนของโปรแกรมควบคุมการปรับตำแหน่งมุมติดตั้งแผงทางกล (Mechanical Panel Tracking) ตามลำดับ

เนื่องจากการประมวลผลของไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC โดยใช้ภาษา PIC Basic นั้นจะประมวลผลทีละบรรทัดโดยหากบรรทัดก่อนหน้า หรือการวนเพื่อทำคำสั่งแบบซ้ำๆ (Loop) ยังไม่เสร็จสิ้นก็จะไม่นำคำสั่งบรรทัดถัดไปมาประมวล เว้นแต่คำสั่งที่มีการทำงานโดยต่อเนื่องจากคำสั่งก่อนหน้านี้ เช่นการสร้างพัลส์ ฯ ซึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงก็ต่อเมื่อมีการประมวลผลคำสั่งที่

เกี่ยวข้องอีกครั้งหนึ่ง ดังนั้นเพื่อความคล่องตัวในการปรับการทำงานของทั้งสองระบบให้สอดคล้องและทันท่วงทีต่อสภาพการเปลี่ยนแปลงทางตำแหน่งกับความเข้มแสงจากดวงอาทิตย์ จึงแยกการควบคุมการทำงานจากไมโครคอนโทรลเลอร์ 2 ชุด



รูปที่ 3.19 Flow Chart โปรแกรมควบคุมการทำงานของ MPPT คอนเวอร์เตอร์

3.4.2ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมควบคุม MPPT คอนเวอร์เตอร์

ขั้นตอนที่1 คือการเริ่มต้นการทำงานที่ค่าดิวตี้ไซเคิล และเครื่องหมายของ $\frac{dP}{dV}$ หรือความชันของกราฟกำลัง-แรงดันเริ่มแรกซึ่งหากกำหนดค่าเครื่องหมายของ $\frac{dP}{dV}$ ผิดจากความเป็นจริงจะใช้เวลาในการปรับเข้าหาย่านทำงานที่ถูกต้องประมาณ 2 วงรอบคำสั่งโดยเวลาที่ใช้ในแต่ละวงรอบขึ้นกับความยาวของคำสั่งในโปรแกรม แต่โดยรวมไม่เกิน 1 วินาที สำหรับค่าดิวตี้ไซเคิลที่เหมาะสมสำหรับการเริ่มต้นการทำงานนั้นขึ้นกับการทดสอบร่วมกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้การใช้งานจริง โดยในงานวิจัยนี้เลือกใช้ค่าดิวตี้ไซเคิลเริ่มต้นประมาณ 60% (ซึ่งได้จากการทดสอบ) แต่โดยทั่วไปอาจกำหนดเอาไว้ที่ 50% ก็ได้ สำหรับระยะเวลาในการปรับเข้าหาจุด MPP ในช่วงเริ่มต้นการทำงานนั้นขึ้นกับสภาพความเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงด้วย หากความเข้มแสงขณะทดสอบมีความเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก หรือคงที่อาจใช้เวลาประมาณ 5 วงรอบการทำงานในการปรับเข้าหาจุด MPP หรือ ประมาณ 5 วินาที เมื่อคอนเวอร์เตอร์สามารถปรับเข้าสู่การทำงานที่จุด MPP ได้แล้ว โปรแกรมควบคุมก็จะรักษาสถานะของการทำงานไว้ที่จุด MPP นี้ โดยอาจจะมีการปรับตัวบ้างเล็กน้อยตามสภาพความเข้มแสงจริงที่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา

ขั้นตอนที่2 เมื่อเริ่มต้นการทำงานโดยกำหนดดิวตี้ไซเคิล และเครื่องหมายของ $\frac{dP}{dV}$ หรือความชันของกราฟกำลัง-แรงดันเรียบร้อยแล้ว โปรแกรมจะเข้าสู่การทำงานของวงจรแปลง A/D ที่มีหน้าที่ในการแปลงแรงดันที่ได้จากการวัดทั้งในส่วนของแรงดันแบตเตอรี่, แรงดันที่แผง โซลาร์เซลล์ และแรงดันที่ได้จากความต้านทานที่อนุกรมกับวงจรเพื่อจำลองค่ากระแสให้เป็นแรงดันสำหรับใช้ในการวัดค่าให้เป็นสัญญาณดิจิตอลทำให้ไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถนำค่าที่ได้ไปประมวลผลต่อไป

ขั้นตอนที่3 ตรวจสอบระดับแรงดันของแบตเตอรี่ว่ามีค่าเกิน แรงดันอัดประจุสุดท้าย (EOC: End of Charge) หรือไม่ หากมีค่าเกินแรงดัน EOC ให้แสดงข้อความที่จอ LCD เพื่อแสดงว่าแบตเตอรี่ที่นำมาอัดประจุเต็มแล้ว (Battery Full) และหยุดการทำงาน เพื่อป้องกันความเสียหายที่ตัวแบตเตอรี่จนกว่าจะมีการเปลี่ยนแบตเตอรี่ใหม่ โดยค่าแรงดัน EOC มีค่าประมาณ 2.6 V/Cell หรือประมาณ 15.6 V สำหรับแบตเตอรี่ ตะกั่ว-กรด 12 V ทั่วไป ภายใต้สภาวะการอัดประจุที่ 0.1-0.2C เมื่อ C คือค่าความจุของแบตเตอรี่ (Battery Capacity) (Ah)

ขั้นตอนที่4 ขั้นตอนนี้เป็นการคำนวณค่ากำลังงานไฟฟ้าจากค่ากระแส และแรงดันที่แผงโซลาร์เซลล์ที่ได้จากการแปลงจากวงจร A/D ในขั้นตอนที่ 2 ซึ่งกำลังไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ $P(k)=V(k)\times I(k)$

ขั้นตอนที่5 นำค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้ $P(k)$ เปรียบเทียบกับค่ากำลังไฟฟ้าในสถานะก่อนหน้านี้ $P(k-1)$ว่ามีค่ามาก หรือน้อยกว่าโดยหากเป็นการเริ่มต้นโปรแกรมในวงรอบแรกค่ากำลังไฟฟ้า

$P(k-1)$ มีค่าเริ่มต้นเป็นศูนย์ แต่สำหรับในรงรอบถัดมา ค่า $P(k-1)$ จะเท่ากับ $P(k)$ ส่วน $P(k)$ เองนั้นจะถูกลบหลังจากเปรียบเทียบค่ากับ $P(k-1)$ แล้ว เพื่อรอรับค่าใหม่ในวงรอบต่อไป การเปรียบเทียบในขั้นตอนนี้แบ่งเป็น 2 เงื่อนไข คือ กำลังไฟฟ้าทั้งสองเท่ากันหรือไม่ ถ้าเท่ากันให้กลับไปรับค่า กระแส และแรงดันจากขั้นตอนที่ 2 อีกครั้งหนึ่ง ถ้าหากไม่เท่ากันให้ส่งไปเปรียบเทียบในเงื่อนไข $P(k)>P(k-1)$ หรือไม่ในขั้นตอนที่ 6

ขั้นตอนที่6 การเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้า $P(k)$ และ $P(k-1)$ ถ้า $P(k)>P(k-1)$ ให้ปรับดิวตี้ไซเคิลในขั้นตอนต่อไปได้เลย โดยค่าความชันกราฟกำลัง-แรงดันที่กำหนดไว้เริ่มแรกมีทิศทางถูกต้องแล้ว ซึ่งหาก $P(k)<P(k-1)$ แล้วแสดงว่าความชันที่กำหนดไม่ถูกต้อง โปรแกรมก็จะเข้าสู่การปรับเครื่องหมายของความชัน (Complement Slope Sign) ก่อนที่จะเข้าสู่การปรับดิวตี้ไซเคิล

ขั้นตอนที่7 การปรับดิวตี้ไซเคิลให้อ้างอิงค่าดิวตี้ไซเคิลเดิม หรือค่าดิวตี้ไซเคิลเริ่มต้นกรณีเป็นการทำงานในวงรอบแรก และบวก ลบ ด้วยค่า α ซึ่งเป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงของดิวตี้ไซเคิลที่ต้องการ ยิ่งค่า α มีค่าน้อยความละเอียดในการปรับการทำงานเข้าสู่ MPP จะมีมาก แต่ความเร็วในการปรับจะช้าลง การปรับค่าดิวตี้ไซเคิลจะมีทั้งการบวก หรือลบด้วยค่า α ซึ่งขึ้นกับการกำหนดความชันในขั้นตอนที่ 6 ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ค่า α ประมาณ 0.5% เนื่องจากเป็นค่ามีความละเอียด และมีระยะเวลาในการเข้าสู่จุด MPP เร็วพอ เมื่อความเข้มแสง และสภาพแวดล้อมที่เกี่ยวข้องกับการแปลงกำลังงานไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลง หากการประมวลผลขั้นตอนที่ 7 เสร็จสิ้นโปรแกรมก็จะทำสำเนา (Copy Data) ทั้ง กระแส, แรงดัน และกำลังไฟฟ้า ที่สถานะปัจจุบัน (k)ให้เป็นสถานะก่อนหน้านี้ $(k-1)$แล้วจึงลบค่าต่างๆในสถานะ (k) เพื่อรอรับค่าใหม่ในวงรอบต่อมา

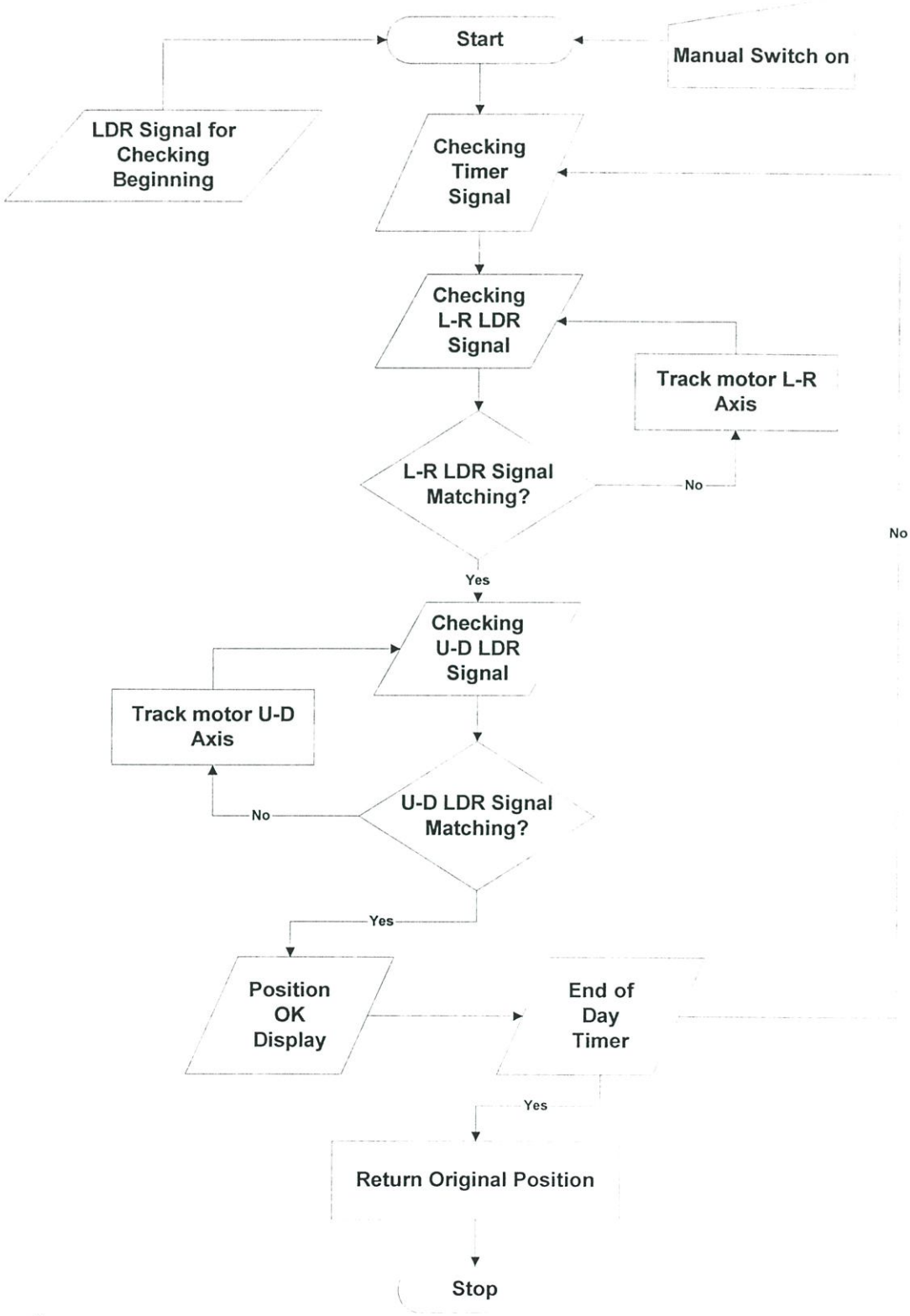
3.4.3 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมควบคุมระบบติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์

ขั้นตอนที่1 เริ่มต้นการทำงานโดยสามารถเลือกการทำงานจากการวัดระดับความสว่างและความเข้มแสง เพื่อเริ่มการปรับมุม หรือการเริ่มการทำงานโดยการป้อนคำสั่งผ่านสวิทช์ควบคุมแบบ 4x4

ขั้นตอนที่2 รอรับคำสั่งเพื่ออนุญาตให้มีการปรับมุมแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตามตำแหน่งดวงอาทิตย์โดยใช้การตั้งเวลาจากสัญญาณนาฬิกาภายในไมโครคอนโทรลเลอร์หากถึงเวลาที่ตั้งเอาไว้ (ประมาณ 3 นาที) เพื่อเริ่มการปรับตำแหน่ง และมุมแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โปรแกรมจึงข้ามไปทำงานในวงรอบต่อไป ซึ่งในขั้นตอนนี้หากยังไม่ถึงเวลาที่ตั้งไว้ก็สามารถปรับมุมกระดกของแผงโดยใช้สวิทช์ควบคุมก็ได้ เพื่อลดพลังงานสูญเสียในการปรับหามุมที่เหมาะสมในช่วงเริ่มต้นเนื่องจากให้มุมกระดกของแผงโซลาร์เซลล์เริ่มต้นที่ตำแหน่งที่ถูกต้องอยู่แล้ว

ขั้นตอนที่3 หากถึงเวลาที่กำหนดสัญญาณแรงดันที่ได้จากวงจรกำเนิดแรงดันโดยใช้ LDR เป็นตัวรับแสง จะส่งให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์ ขั้นตอนนี้จะตรวจสอบแรงดันจาก LDR ใน

ตำแหน่งซ้าย-ขวาของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ก่อน ซึ่งเป็น LDR เซ็นเซอร์ที่ควบคุมโครงตั้งแผง โดยรอบดังรูปที่ 3.10 (ข) แสดงทิศทางการหมุนในแกนนี้ ไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถเลือก



รูปที่ 3.20 Flow Chart โปรแกรมควบคุมการปรับมุมแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ระบบติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์

ทิศทางการหมุนจากการเปรียบเทียบแรงดันเพื่อหันมุมแผงด้านที่ได้รับแสงน้อยกว่า ให้ได้รับแสงมากขึ้นจนใกล้เคียงกับ LDR เซ็นเซอร์ที่ติดตั้งในทิศทางตรงกันข้าม หากได้ตำแหน่งที่เหมาะสมแล้วจึงข้ามไปตรวจสอบเซ็นเซอร์ที่ใช้ในการปรับมุมกระดกของแผงต่อไป

ขั้นตอนที่4 การปรับมุมกระดกของแผงใช้หลักการตรวจสอบแรงดันจากวงจร LDR เซ็นเซอร์ เช่นเดียวกับขั้นตอนที่ 3 แต่ในขั้นตอนนี้จะเปรียบเทียบแรงดันจากวงจร LDR เซ็นเซอร์ ที่ติดตั้งอยู่ด้านบน-ด้านล่าง หากความสว่างด้านใดมีค่ามีค่าน้อยกว่าไมโครคอนโทรลเลอร์ก็จะส่งสัญญาณควบคุมไปที่วงจรขับมอเตอร์เพื่อปรับมุมแผงเซลล์แสงอาทิตย์จนกว่า วงจรเซ็นเซอร์จะมีแรงดัน ใกล้เคียงกัน

เนื่องจากการลดค่าความต้านทานของ LDR ไม่เป็นเชิงเส้น และไม่มีมาตรฐานที่ชัดเจนสำหรับอุปกรณ์ตัวนี้ในประเทศไทย แม้แต่ LDR รุ่นเดียวดันเอง ถ้าต้องการวัดรายละเอียดของความต้านทานที่เปลี่ยนไป เมื่อแสงที่ได้รับแตกต่างกัน ก็ไม่เท่ากัน ดังนั้นการตั้งค่าแรงดันที่แตกต่างกันเพื่อเริ่มมีการหมุน และเพื่อสั่งให้หยุดหมุนมอเตอร์ในขั้นตอนที่3-4 ขึ้นกับการทดสอบเพื่อหาอัตราการเปลี่ยนแปลง ความต้านทาน ที่ความสว่าง และความเข้มแสงค่าต่างๆ ของ LDR ตัวที่นำมาใช้พร้อมกันเป็นคู่ๆ เพื่อติดตั้งในทิศทางตรงกันข้าม ในสภาวะการทำงานจริงของอุปกรณ์ และตำแหน่งที่ติดตั้ง รวมทั้งโมดูลย์ของตัวบังเงาภายใต้แสงอาทิตย์จริง จากข้อมูลการทดสอบนอกจากจะสามารถกำหนดความแตกต่างของแรงดันจากเซ็นเซอร์ที่เหมาะสมในการสั่งงานมอเตอร์แล้วยังสามารถ กำหนดสภาวะหยุดนิ่งเพื่อรอให้มีระดับความเข้มแสงเพียงพอ และคุ้มค่าในติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์ นั่นคือหากเป็นช่วงที่มีแต่แสงอาทิตย์แบบกระจัดกระจาย (Diffuse Irradiance) แผงเซลล์แสงอาทิตย์จะไม่การปรับมุมใดๆทั้งสิ้น ให้รอจนกว่าจะมีแสงอาทิตย์แบบโดยตรง (Direct Irradiance) ที่มีปริมาณมากเพียงพอ คุ้มค่าต่อพลังงานที่สูญเสียไป

ขั้นตอนที่5 เมื่อตำแหน่งของแผงเซลล์แสงอาทิตย์อยู่ในตำแหน่งที่ตั้งฉากกับดวงอาทิตย์หรือเหมาะสมที่สุด แล้วจึงแสดงข้อความ “Position OK” ที่จอ LCD เพื่อแสดงว่าระบบติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์ในวงรอบนี้เสร็จสิ้นแล้ว จากนั้นจึงกลับไปตรวจสอบเวลาว่าการทำงานมาถึงช่วงสุดท้ายของวันหรือยัง จากการตั้งเวลาสัญญาณนาฬิกาภายใน หากครบกำหนดเวลาแล้ว ก็จะปรับมุมแผงมาที่ตำแหน่งเริ่มต้นทางด้านทิศตะวันออกอีกครั้งเพื่อรอรับพลังงานแสงอาทิตย์อีกครั้งในวันต่อมา หากยังไม่ครบกำหนดก็จะหยุดรอคำสั่งการในการอนุญาตให้มีการติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์อีกในวงรอบถัดมา

ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ควบคุมการทำงานของ MPPT คอนเวอร์เตอร์นอกจากมีหน้าที่ในการควบคุมการปรับดิวตี้ไซเคิล แล้วยังมีหน้าที่ประมวลผล และแสดงข้อความทางจอ LCD รวมทั้งการรับคำสั่งต่างๆ จากการป้อนอินพุทผ่านแป้นกดแบบเมตริกซ์ 4x4 อีกด้วยรายละเอียดการเขียนโปรแกรมต่างแสดงไว้ในภาคผนวก

บทที่ 4
การทดลองเพื่อทดสอบประสิทธิภาพ และการทดสอบเปรียบเทียบการแปลงพลังงานไฟฟ้า

4.1 กล่าวนำ

ภายในเนื้อหาของบทนี้กล่าวถึงการทดลอง และการทดสอบระบบ โดยแบ่งการทดลองออกเป็นสองหัวข้อใหญ่ได้ดังนี้

4.1.1 การทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพ และความถูกต้อง เพื่อแยกวิเคราะห์ และทดสอบความสามารถของวงจร และอุปกรณ์อื่นๆที่นำมาใช้ในงานวิจัย ในด้านของความถูกต้องในการทำงานกับกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียไปกับการทำงานของวงจร รวมทั้งอุปกรณ์นั้นๆ โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อหาประสิทธิภาพเป็นหลัก แบ่งหัวข้อการทดสอบได้ดังนี้

1. ทดสอบเปรียบเทียบกับข้อมูลการคำนวณ รวมทั้งผลจากการประมวลผล หรือซิมมูเลชั่น (Simulation) จากโปรแกรม Matlab เพื่อเปรียบเทียบสัญญาณที่สำคัญที่ตำแหน่งต่างๆในวงจร

2. การจำลองสภาพใช้งานภายในห้องทดลองโดยควบคุมเงื่อนไขให้ใกล้เคียงกับสภาพความเป็นจริง เพื่อหาค่าพลังงานสูญเสีย และประสิทธิภาพของแต่ละอุปกรณ์

3. การทดสอบเพื่อเปรียบเทียบการแสดงผลของจอ LCD ในส่วนของการวัดกระแส-แรงดันอินพุท รวมทั้งแรงดันแบตเตอรี่ กับเครื่องมือวัดที่มีมาตรฐาน

4. การทดลองหาประสิทธิภาพของแผงโซลาร์เซลล์ที่จะนำมาใช้งาน เพื่อหาประสิทธิภาพของแผงในขณะนี้ รวมทั้งหาพารามิเตอร์ในการคำนวณประสิทธิภาพของแผง และนำมาประยุกต์ใช้ กับสมการตามมาตรฐาน IEEE 1513-2001เพื่อคำนวณความเข้มแสง จากข้อมูลกระแส-แรงดัน ของแผงโซลาร์เซลล์ที่วัดได้ในช่วงเวลาต่างๆ (I-V Scan Data) (แสดงไว้ในภาคผนวก)

4.1.2 การทดสอบประสิทธิภาพการเก็บพลังงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

1. การเปรียบเทียบ I-V Scan ที่ได้จากรูปแบบการต่อแผงแบบขนาน และอนุกรมเพื่อทดสอบความแตกต่างของพลังงานไฟฟ้าสูงสุดที่ได้ สำหรับเป็นข้อมูลในการเลือกใช้รูปแบบการต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในการออกแบบระบบ

2. การทดสอบหาค่าพลังงานที่เพิ่มขึ้นจากระบบที่ใช้ MPPT คอนเวอร์เตอร์ ในการอัดประจุแบตเตอรี่ของระบบที่นำเสนอในงานวิจัยนี้เปรียบเทียบกับระบบที่ไม่ได้ใช้ MPPT คอนเวอร์เตอร์ที่มีการต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์ แบบขนานเพื่ออัดประจุแบตเตอรี่

3. การทดสอบหาค่าพลังงานที่เพิ่มขึ้นจากระบบที่ปรับมุมแผงติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์เปรียบเทียบกับระบบที่ตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบคงที่ เพื่อหาความเหมาะสมในการปรับองศาของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยแบ่งเป็นการทดสอบย่อยๆดังนี้

- การทดสอบเพื่อหาความเหมาะสมของมุมแผงเริ่มต้นที่ทำกับแนวระนาบโดยให้ความสำคัญต่อค่าพลังงานไฟฟ้าขีดเริ่ม เพื่อหาเวลาที่ควรเริ่มต้นการปรับองศา ในการติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์ในช่วงเช้าของแต่ละวัน

- หากำลังไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นเมื่อพิจารณาให้มีการติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์ แบบ 1 แกน แยกเป็นการตั้งแผงที่ทำมุมคงที่กับแนวระนาบ[38] เปรียบเทียบกับการปรับหมุนโครงแผงโดยรอบตามมุม Azimuth เป็นแนวแกนที่ 1 และเปรียบเทียบกับการปรับมุมเอียงตามแนวทิศตะวันออก-ทิศตะวันตกเป็นแนวแกนที่ 2 โดยทดสอบแยกกันเพื่อหาความแตกต่างกำลังไฟฟ้าที่ได้มากขึ้นในแต่ละแนวแกน

- การทดสอบพลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นเมื่อมีการหมุนเพื่อติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์แบบ 2 แกน เปรียบเทียบกับการตั้งมุมแผงที่ได้ค่าพลังงานไฟฟ้ามากที่สุด [38]

4. การทดสอบหาค่าพลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นจากระบบที่มีการเคลื่อนหมุนแผงพีวีทางกลร่วมกับการใช้ MPPT คอนเวอร์เตอร์ ในการอัดประจุแบตเตอรี่ของระบบที่นำเสนอในงานวิจัยนี้เปรียบเทียบกับระบบที่ไม่ได้ใช้ MPPT คอนเวอร์เตอร์

วัตถุประสงค์ในการนำเสนอเนื้อหาการทดลองแต่ละหัวข้อ นอกจากมีความสำคัญในการวิเคราะห์ระบบที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้แล้วยังแสดงการนำข้อมูล และผลลัพธ์ที่ได้มาใช้วิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบเพื่อประกอบการพิจารณาตัดสินใจสำหรับออกแบบระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์อื่นให้มีความเหมาะสมอย่างเป็นระบบต่อไป

4.2 การทดสอบเปรียบเทียบ MPPT คอนเวอร์เตอร์ กับโปรแกรม Matlab

4.2.1 หลักการและเหตุผล

การทดสอบเพื่อยืนยันความถูกต้องของการออกแบบ ก่อนนำไปใช้งานจริง หรือก่อนนำไปทดสอบในขั้นตอนอื่นๆต่อไปช่วยให้สามารถควบคุมปัจจัยที่มีผลต่อความผิดพลาด (Error Influence) นอกจากนี้ยังเป็นการตรวจสอบผลลัพธ์ที่ได้ว่ามีความน่าเชื่อถือเพียงพอหรือไม่อีกด้วย

4.2.2 ทฤษฎีอ้างอิงและหลักการที่เกี่ยวข้อง

จากหลักการของวงจร คอนเวอร์เตอร์ และอุปกรณ์ต่างๆตามที่ออกแบบไว้ในบทที่ 3 ดังมีรายละเอียดดังนี้

1. Input Capacitor	100	μF
2. Converter Inductor	1,040	μH

3. Ripple Filter Capacitor 350 μF

4. Load 11.5~15.6 V (Battery)

5. Freewheeling diode and Blocking Diode MUR1506 (Fast Recovery Diode)

โดยการต่อวงจรดังรูปที่ 4.1 สำหรับระบบที่ใช้งานจริง และบล็อกไดอะแกรมวงจรในส่วนของโปรแกรม Matlab Simulink ดังแสดงในรูปที่ 4.2

สมการทั่วไปของกระแส และแรงดัน [37]

เมื่อ $0 \le t \le T_{on}$

$$i(t) = \frac{V_s - E}{R}\left(1 - e^{-\frac{Rt}{L}}\right) + I_{mn}e^{-\frac{Rt}{L}} \tag{4.1}$$

และ $T_{on} \le t \le T$

$$i(t) = -\frac{E}{R}\left(1 - e^{-\frac{Rt}{L}}\right) + I_{mx}e^{-\frac{Rt}{L}} \tag{4.2}$$

เมื่อ $i(t)$ คือสัญญาณกระแสที่เอาท์พุท(A)

V_s คือแรงดันด้านอินพุท(V)

E คือแรงดันที่แบตเตอรี่(V)

R คือความต้านทานรวมของวงจร(โอห์ม)

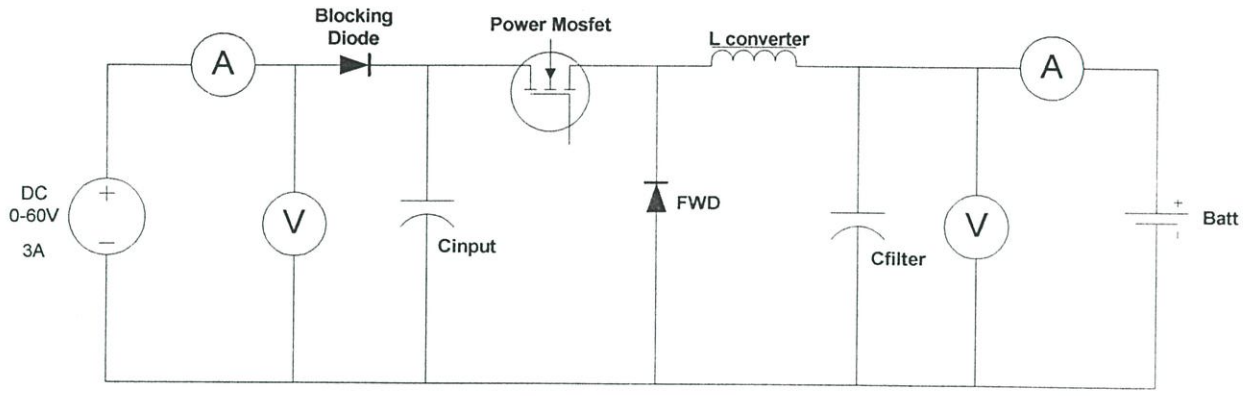
L คือคอนเวอร์เตอร์อินดัคเตอร์(Henry)

I_{mn} คือขีดจำกัดล่างของกระแสที่โหลดภาระ(A)

I_{mx} คือขีดจำกัดบนของกระแสที่โหลดภาระ(A)

เงื่อนไขการทดลอง

การจำลองการทำงานของระบบจะทดลองโดยการวัดสัญญาณที่ด้าน อินพุท และ เอาท์พุทของคอนเวอร์เตอร์ที่ ดิวตี้ไซเคิลประมาณ 50%-70% ที่พิกัดแรงดันอินพุทจากแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง (Power Supply) 20V-35V ทั้งนี้ขึ้นกับปริมาณกระแสขณะชาร์จแบตเตอรี่ เพราะค่าความต้านทานภายในแบตเตอรี่เปลี่ยนแปลงตลอดเวลาขณะชาร์จ ทำให้ต้องควบคุมแรงดัน และ/หรือดิวตี้ไซเคิลไม่ให้กระแสอินพุทเกิน 3A เนื่องจาก Power Supply มีพิกัดกระแสสูงสุด 3A



รูปที่ 4.1 วงจรที่ใช้ในการทดสอบเมื่อใช้ โหลดภาระแบตเตอรี่

จากนั้นทดสอบขีดจำกัดของความต่อเนื่องของคอนเวอร์เตอร์ เมื่อพิจารณาให้มีแรงดันตกคร่อมอุปกรณ์แต่ละตัวสูงสุดตามข้อมูลของอุปกรณ์ (Datasheet)
มีรายละเอียดดังนี้

1. Power Mosfet 0.14x4A= 0.56 V (4A = Maximum tested current)
2. Blocking Diode 1.5 V
3. Freewheeling diode $1.5\text{x}1-\alpha$ ($\alpha = duty_cycle$)

ดังนั้นค่าแรงดันอินพุทน้อยที่สุดที่มีกระแสอัดประจุที่แบตเตอรี่คำนวณได้จาก

$$V_{S(\min)} = \frac{E}{\alpha} + 0.56 + 1.5 + 1.5 \times (1-\alpha)$$

เมื่อทดสอบที่ดิวตี้(α) เท่ากับ 50% ค่าแรงดันที่ใช้ควรจะเป็น

$$V_{S(\min)} = \frac{13.5}{0.5} + 0.56 + 1.5 + 1.5 \times 0.5 = 29.81$$

เมื่อทดสอบที่ดิวตี้(α) เท่ากับ 70% ค่าแรงดันที่ใช้ควรจะเป็น

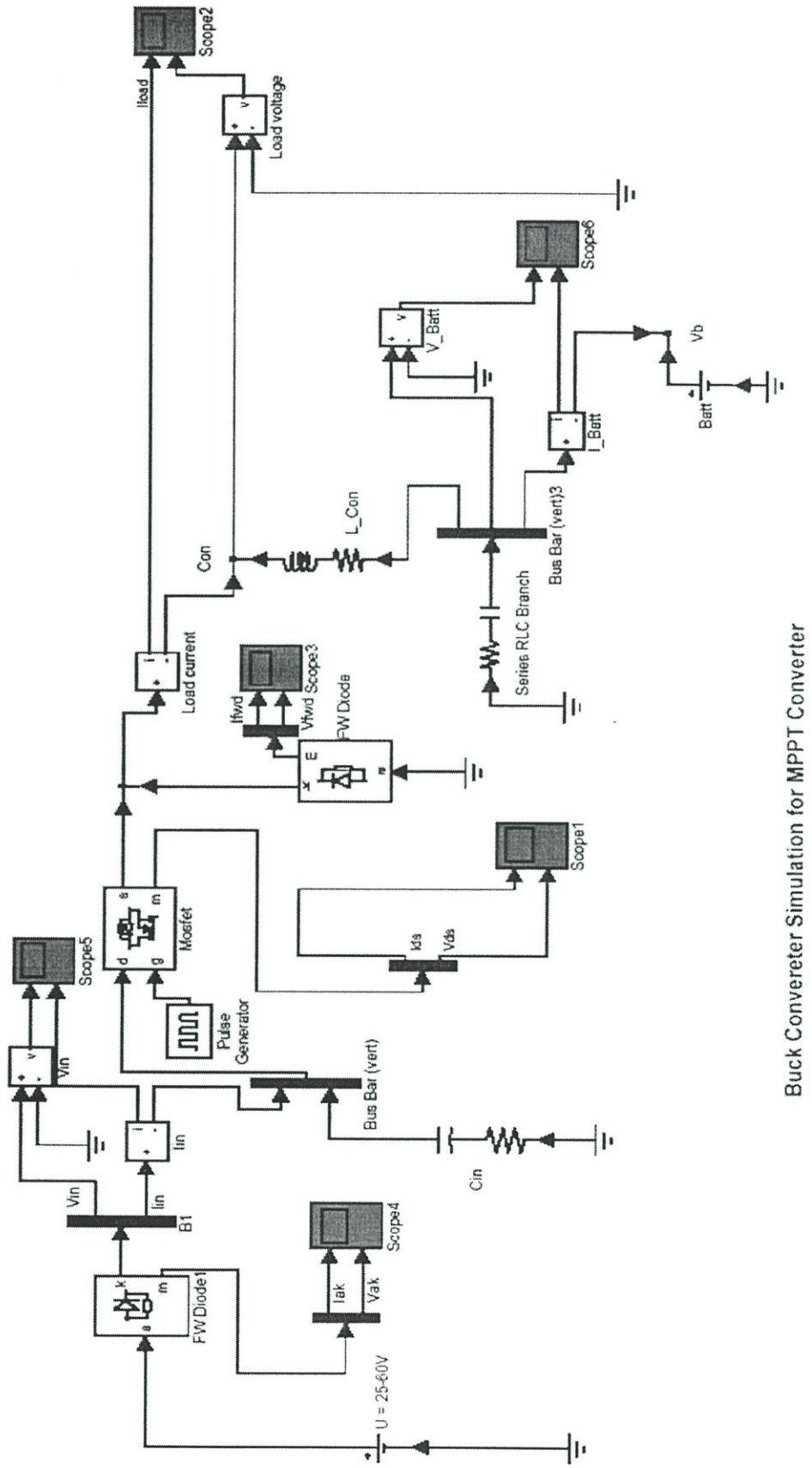
$$V_{S(\min)} = \frac{13.5}{0.7} + 0.56 + 1.5 + 1.5 \times 0.3 = 21.80$$

4.2.3 การเตรียมอุปกรณ์ทดสอบ

รายการอุปกรณ์

1. แอมป์มิเตอร์	จำนวน	2	เครื่อง
2. โวลท์มิเตอร์	จำนวน	2	เครื่อง
3. Power Supply 0-60 V 3A	จำนวน	1	เครื่อง
4. ออสซิลโลสโคป	จำนวน	1	เครื่อง
6. แบตเตอรี่ขนาด 65 Ah	จำนวน	1	ลูก

หมายเหตุ ตรวจดูรูปอุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ได้ในภาคผนวก



รูปที่ 4.2 Matlab Simulink บล็อคไดอะแกรม

4.2.4 หัวข้อการทดสอบ

ตอนที่1: ทดสอบวัดสัญญาณแรงดันที่ ด้านอินพุทเปรียบเทียบสัญญาณที่วัดได้จริงกับ สัญญาณที่ได้จากการซิมมูเลชั่นด้วยโปรแกรม Matlab

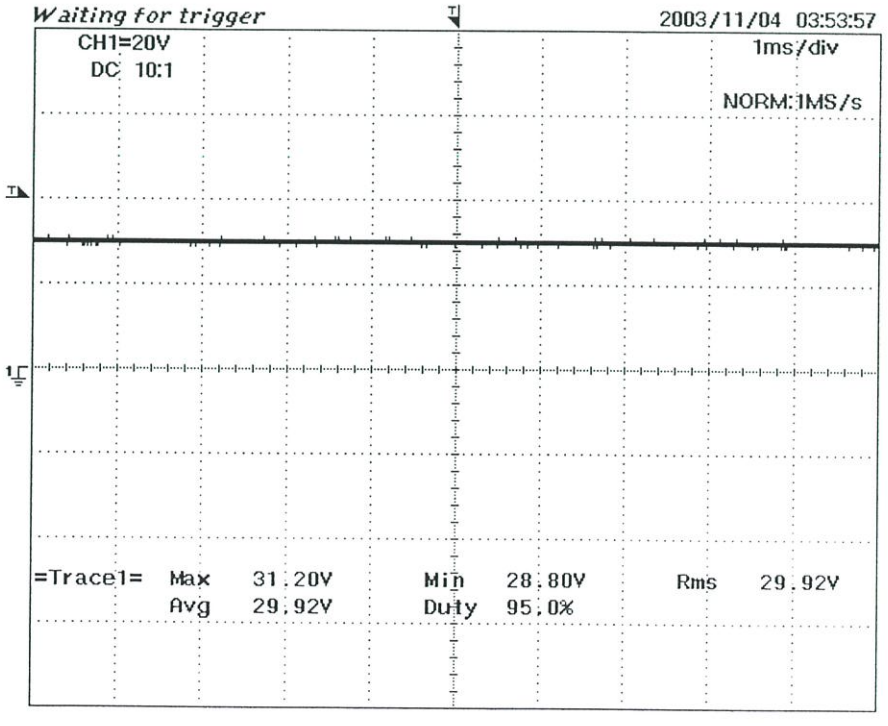
ตอนที่ 2: ทดสอบวัดสัญญาณแรงดันที่ Mosfet เปรียบเทียบสัญญาณที่วัดได้จริงกับ สัญญาณที่ได้จากการซิมมูเลชั่นด้วยโปรแกรม Matlab

ตอนที่3: ทดสอบวัดสัญญาณแรงดันที่ Freewheeling Diode เปรียบเทียบสัญญาณที่วัดจริงกับสัญญาณที่ได้จากการซิมมูเลชั่นด้วยโปรแกรม Matlab

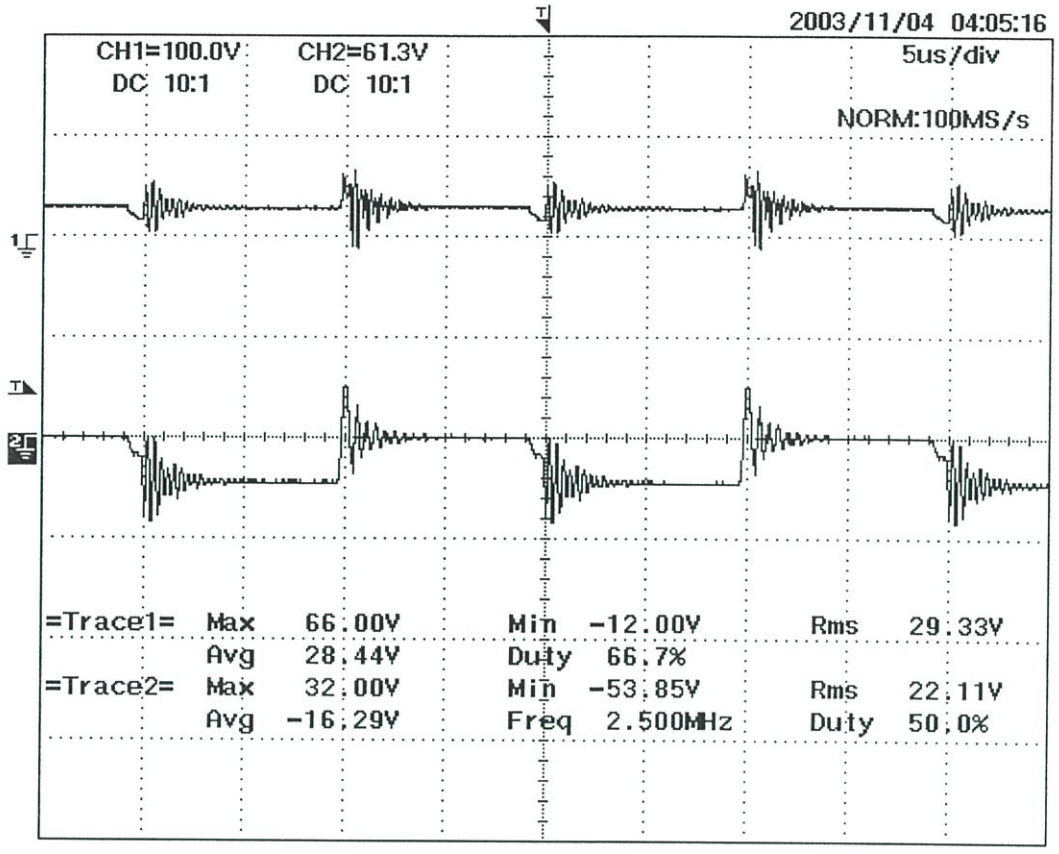
ตอนที่4: ทดสอบวัดสัญญาณแรงดันที่ เอาท์พุท เปรียบเทียบสัญญาณที่วัดจริงกับ สัญญาณที่ได้จากการซิมมูเลชั่นด้วยโปรแกรม Matlab

4.2.5 ผลการทดสอบ

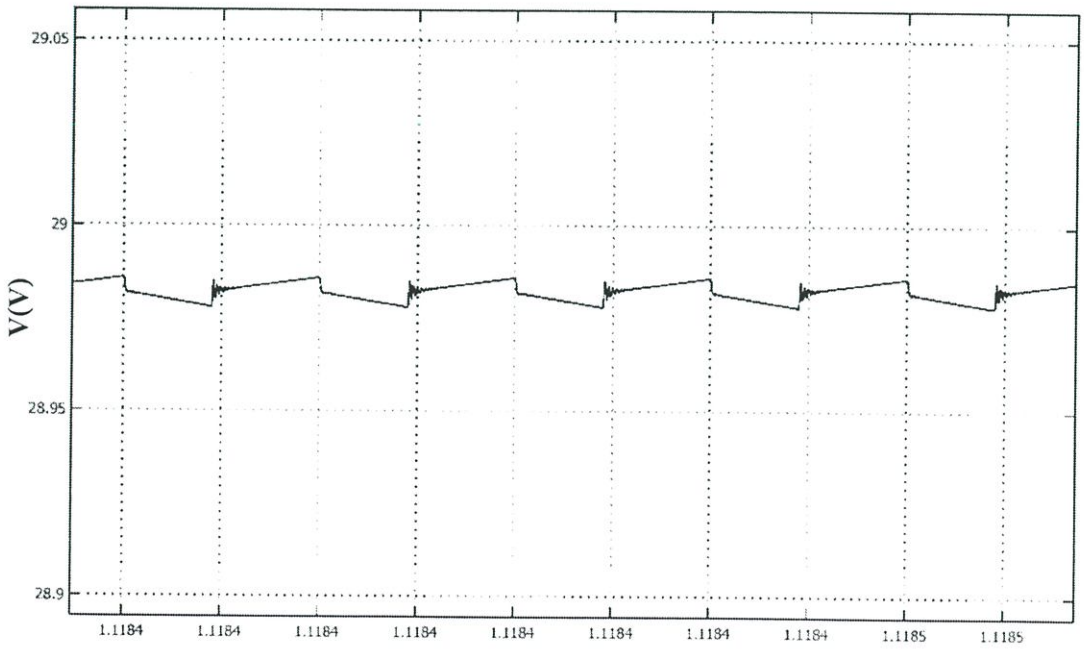
ตอนที่ 1: เริ่มทำการทดสอบโดยต่อระบบทดสอบตามรูปที่ 4.1 ใช้ Power Supply เป็นแหล่งกำเนิดโดยปรับแรงดันประมาณ 20V-30V ที่ดิวตี้ไซเคิล 50%-70% โดยไม่ให้กระแสที่ไหลจาก Power supply เกิน 3A ป้องกันความเสียหายของ Power Supply และเพื่อให้เห็นสัญญาณขณะ Mosfet On-Off ชัดเจน แล้ววัดสัญญาณแรงดันด้านอินพุทที่ได้กับแรงดันที่ V_{GS} เพื่อเปรียบเทียบสัญญาณด้านอินพุทกับสัญญาณการ On-Off Mosfet (V_{GS})รวมทั้งดิวตี้ไซเคิลขณะทำการทดสอบด้วยจากนั้นบันทึกค่าสัญญาณที่ได้



รูปที่ 4.3 สัญญาณแรงดันอินพุทคอนเวอร์เตอร์ขณะไม่ต่อโหลดภาระ



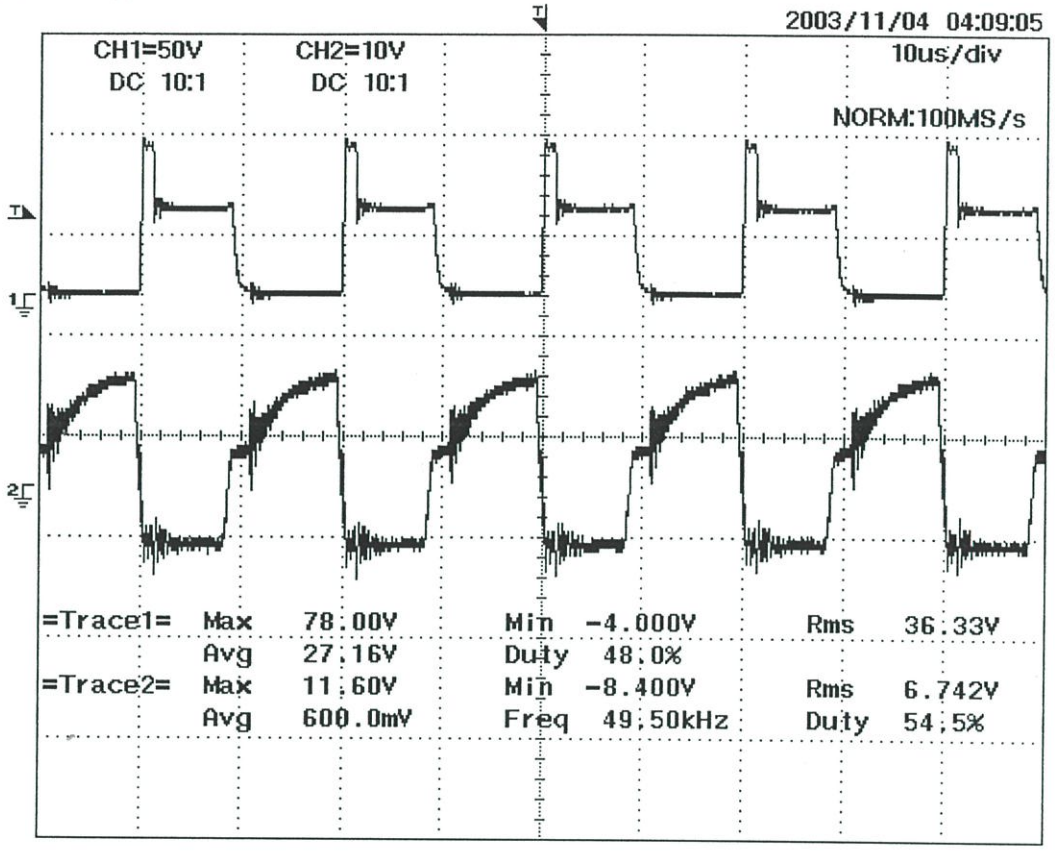
รูปที่ 4.4 สัญญาณแรงดันอินพุทคอนเวอร์เตอร์จากการวัดจริงขณะต่อโหลดภาระ(CH1) และแรงดันอินเวอร์สของ V_{FWD}(CH2)



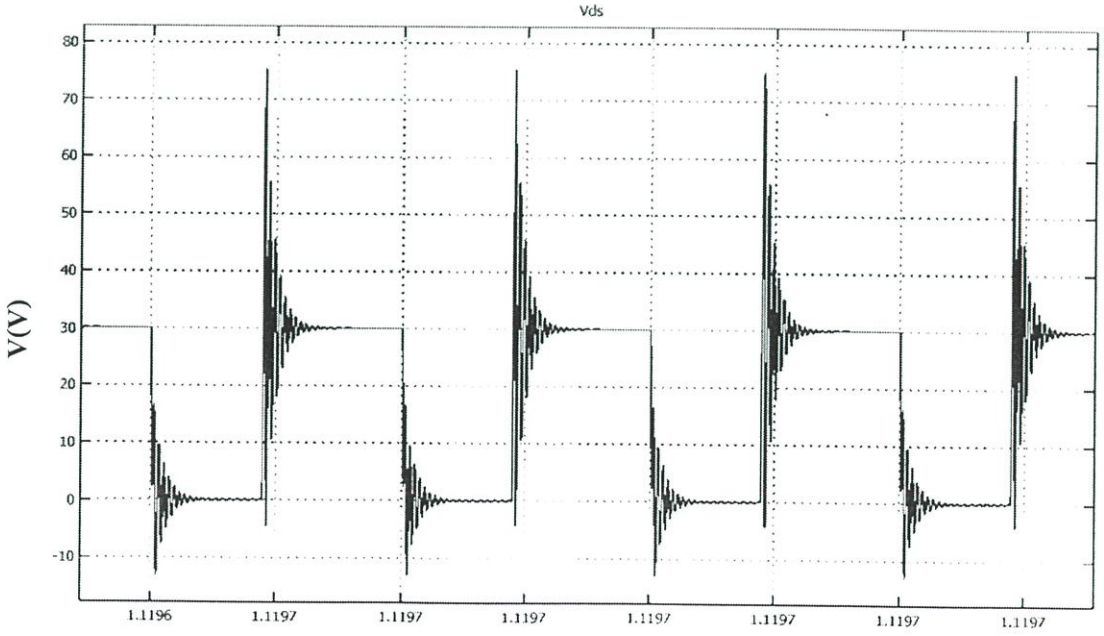
รูปที่ 4.5 สัญญาณแรงดันที่ อินพุทคอนเวอร์เตอร์จากโปรแกรม Matlab

Time/div = $1x10^{-5}$ sec, V/div = 50 mV

ตอนที่ 2: ทำการทดลองเหมือนตอนที่ 1 แต่วัดสัญญาณแรงดันที่ขา D-S ของ Mosfet เทียบกับสัญญาณที่ V_{GS}



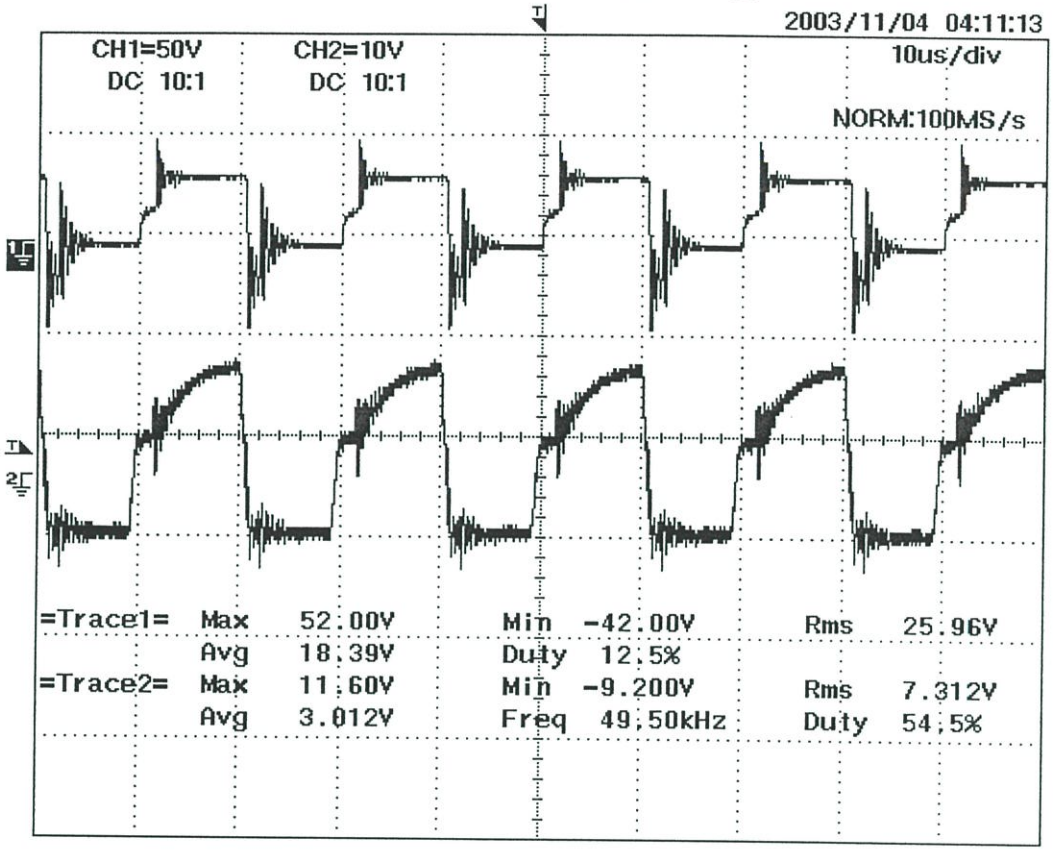
รูปที่ 4.6 สัญญาณที่ได้จากการวัดจริง V_{DS} (CH1) และสัญญาณจาก V_{GS} (CH2)



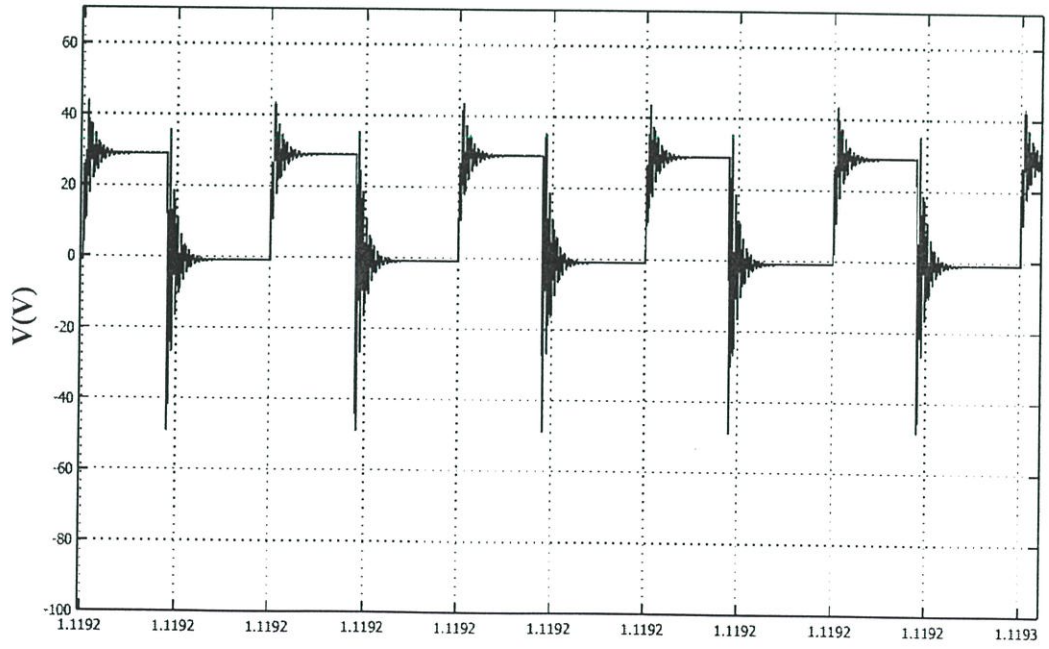
รูปที่ 4.7 สัญญาณแรงดันที่ V_{DS} ของ Mosfet จาก โปรแกรม Matlab

Time/div = $1x10^{-5}$ sec, V/div = 50 mV

ตอนที่ 3: ทำการทดลองเหมือนตอนที่ 1 แต่วัดสัญญาณแรงดันที่ อินพุทของ อินดัคเตอร์ หรือที่ขั้ว Cathode ของ FWD(Free Wheeling Diode) เทียบกับสัญญาณที่ V_{GS}



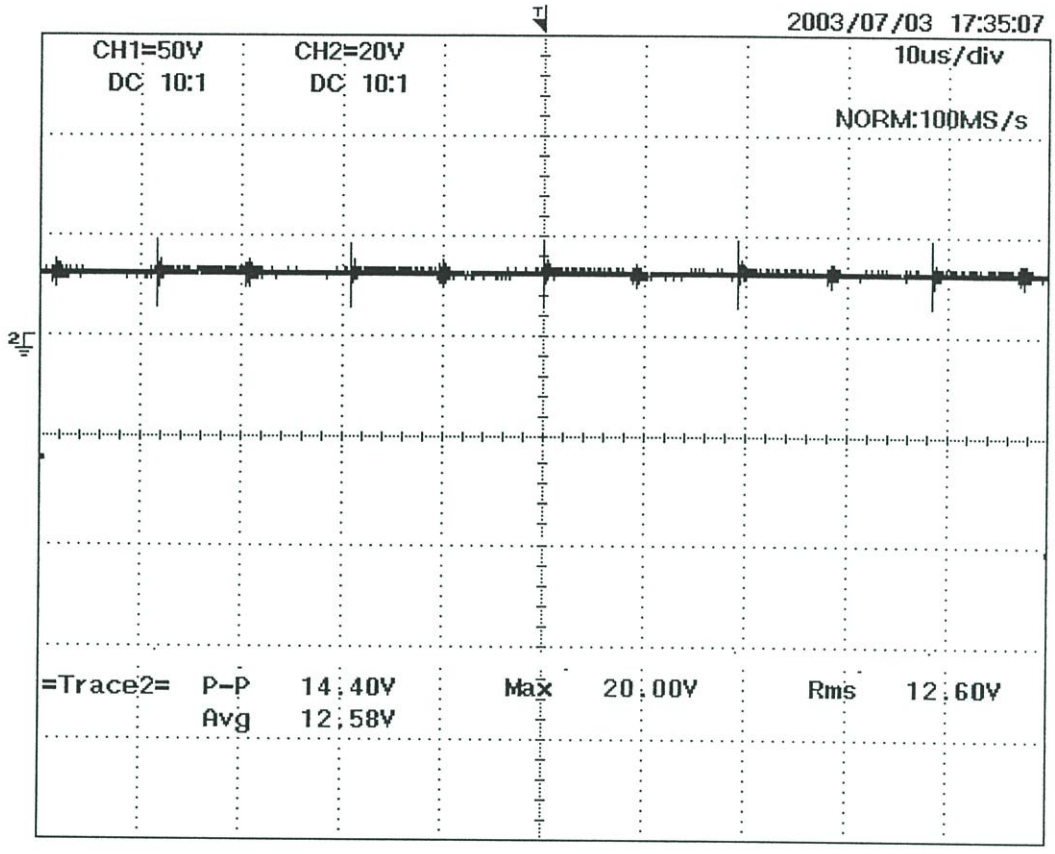
รูปที่ 4.8 สัญญาณที่ได้จากการวัดจริง V_{GS} (CH2) และ V_{FWD} (CH1)



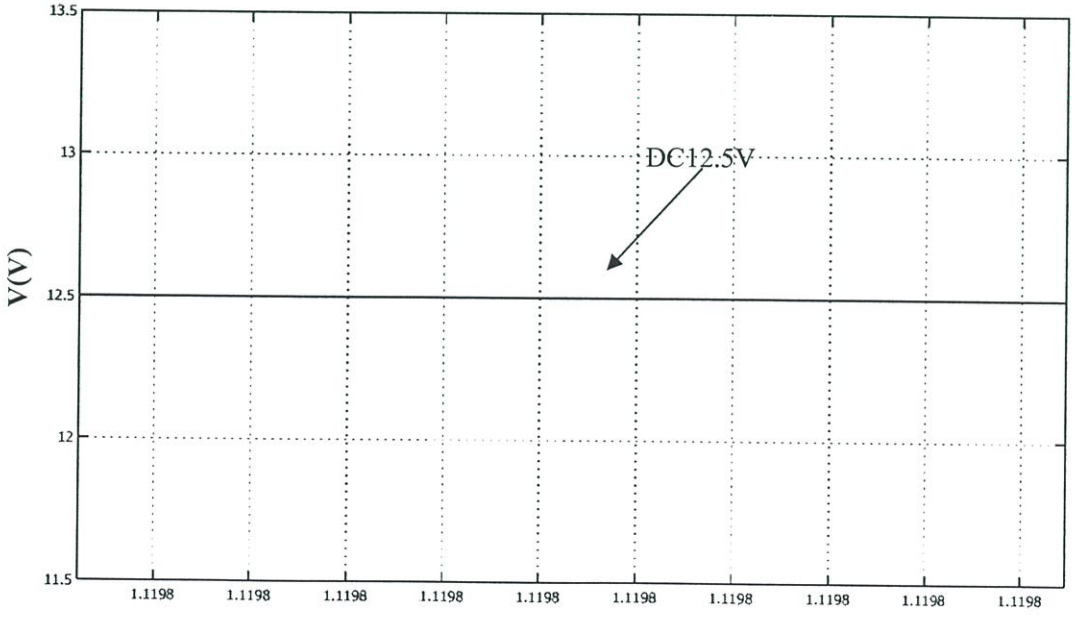
รูปที่ 4.9 สัญญาณแรงดันที่ V_{FWD} จาก โปรแกรม Matlab

Time/div = $1x10^{-5}$ sec, V/div = 20V

ตอนที่ 4: ทำการทดลองเหมือนตอนที่ 1 แต่วัดสัญญาณแรงดันที่ แบตเตอรี่เทียบกับสัญญาณที่ V_{GS}



รูปที่ 4.10 สัญญาณแรงดันจากการวัดจริงที่แบตเตอรี่ V_{Batt}

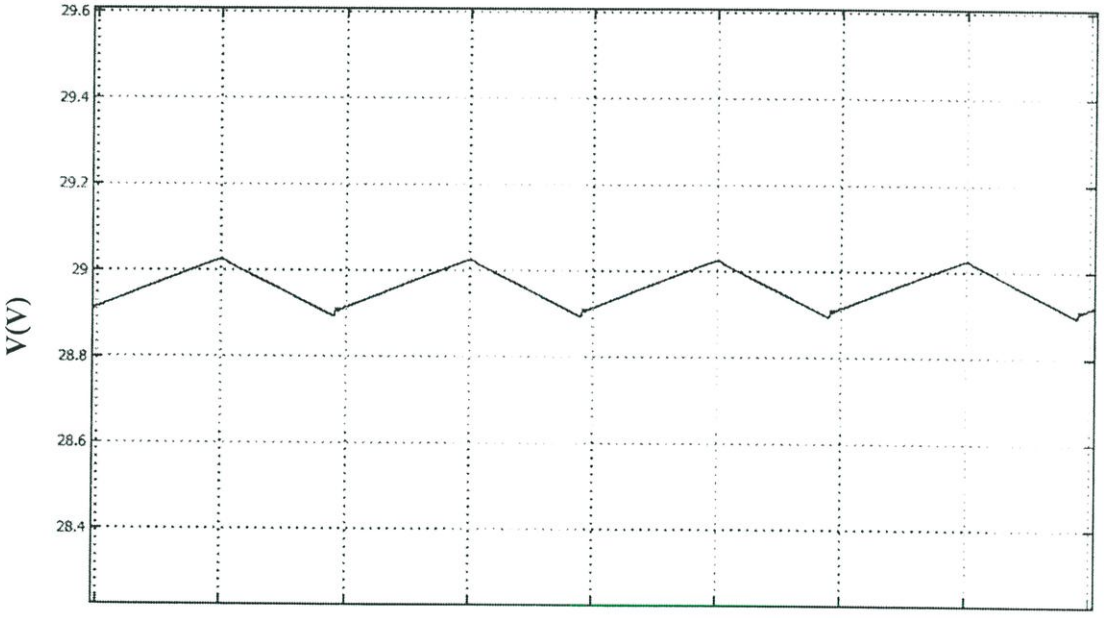


รูปที่ 4.11 สัญญาณแรงดันที่ แบตเตอรี่ V_{Batt} จากโปรแกรม Matlab

Time/div = $1x10^{-5}$ sec, V/div = 500 mV

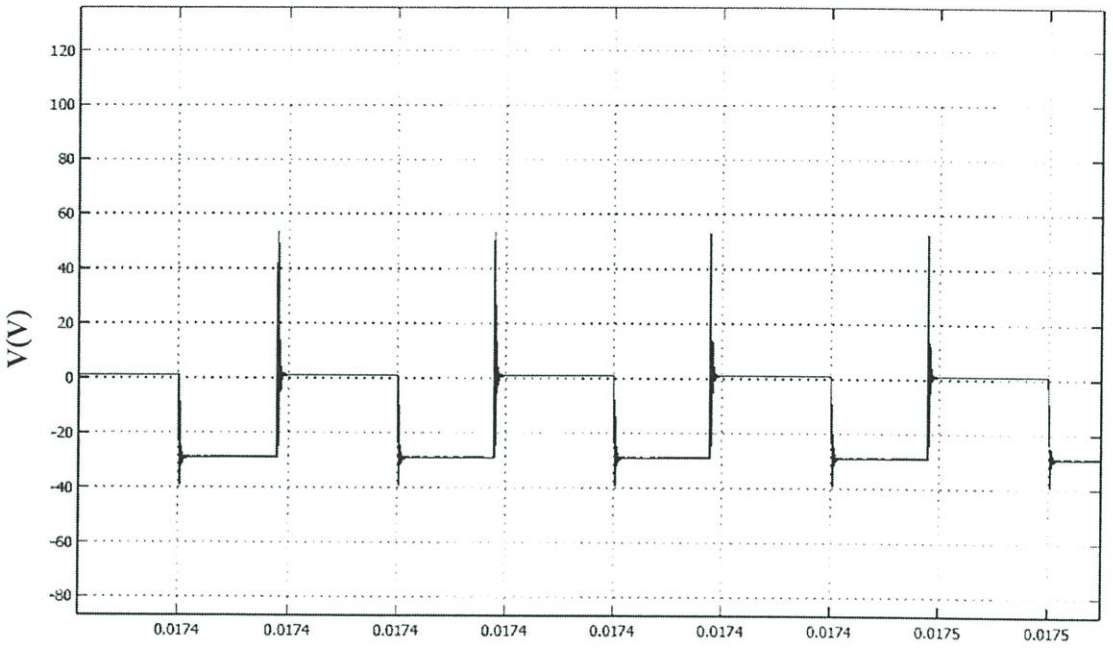
4.2.6 บทวิเคราะห์การทดสอบ

การทดลองตอนที่ 1 แสดงให้เห็นว่าเมื่อมีการจ่ายกระแส(และแรงดัน)ไปที่คอนเวอร์เตอร์ สัญญาณแรงดันจะมีการแกว่ง(Oscillation) เล็กน้อยเนื่องมาจากช่วงการตัดต่อการทำงานของมอสเฟต จากการทดสอบหากปรับลดค่าคาปาซิเตอร์ด้านอินพุทในส่วนของโปรแกรม Matlab Simmulink บล็อคไดอะแกรม การแกว่งของสัญญาณแรงดันที่ได้จะน้อยลงแต่ก็ทำให้ค่าแรงดันกระเพื่อมมากขึ้นจากเดิมประมาณ 2.5 เท่าเมื่อลดค่า C_{input} ลง 10 เท่าดังรูปที่ 4.12 เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.5 ตัวเก็บประจุด้านอินพุทยังมีบทบาทในการช่วยสะสมพลังงานที่แผงพีวีจ่ายออกมาอีกด้วยดังนั้นการเลือกขนาดของอินพุทคาปาซิแตนซ์ (C_{input}) จึงมีความสำคัญต่อคุณภาพของสัญญาณ(หมายถึงความนิ่งของกระแส-แรงดัน) และเป็นส่วนช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของระบบได้หากมีขนาดเหมาะสม



รูปที่ 4.12 สัญญาณแรงดันด้านอินพุทที่ได้จากโปรแกรม Matlab เมื่อลดค่าอินพุทคาปาซิเตอร์ลงเหลือ 35 μF , Time/div = $1x10^{-5}$ sec, V/div = 200 mV

ส่วนการทดลองในตอนที่ 2 และ 3 นั้นสัญญาณที่ได้ทั้งจากการวัดจริง และจากโปรแกรม Matlab จะมีลักษณะในการแกว่งของสัญญาณ ในช่วงรอยต่อของการ On-Off มอสเฟตทั้งนี้เนื่องมาจากแรงดันจากรอยต่อ P-N ของมอสเฟตไม่เป็นตกเป็นศูนย์ทันทีเมื่อสัญญาณที่ขาเกตอยู่ในช่วง Off เนื่องมาจากองค์ประกอบแฝงภายในมอสเฟตแต่ยังคงมีแรงดันย้อนกลับไปมา (P-N Voltage Recovery) อยู่ช่วงเวลาหนึ่งซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยการต่อ C_S สนับเบอร์ขนานเข้าไประหว่างขา D-S ของ Mosfet จะทำให้สัญญาณนิ่งขึ้น หรืออาจเลือก Mosfet ที่มีค่า C_S ภายในน้อยลงก็ได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.13 เมื่อลดค่า C_S ภายใน Mosfet ลงจาก 4000 pF เป็น 500 pF ซึ่งเสมือนกับการต่อวงจร RC สนับเบอร์ให้กับมอสเฟต แต่มีผลทำให้ประสิทธิภาพลดลงบ้างเนื่องจากกำลังสูญเสียในวงจร RC สนับเบอร์ที่เพิ่มเข้าไป



รูปที่ 4.13 สัญญาณแรงดันที่ V_{FWD} จากโปรแกรม Matlab เมื่อลดค่า C_S ภายในของ Mosfet Time/div = $1x10^{-5}$ sec, V/div = 20V

การทดลองในตอนที่ 4 เพื่อวิเคราะห์สัญญาณแรงดันที่แบตเตอรี่นั้นมีความแตกต่างกันเล็กน้อย ในเรื่องสัญญาณแกว่งในช่วงรอยต่อการ On-Off ของมอสเฟตเมื่อเปรียบเทียบจากสัญญาณที่วัดได้จริง กับสัญญาณที่ได้จากโปรแกรม Matlab ทั้งนี้เนื่องจาก Matlab กำหนดแบตเตอรี่เป็นแหล่งกำเนิด กระแสตรงแบบอุดมคติตัวหนึ่งจึงไม่มีการแกว่งของสัญญาณ

4.3 การทดสอบหาค่าพลังงานสูญเสีย และประสิทธิภาพ

4.3.1 หลักการและเหตุผล

ในหัวข้อนี้เป็นการทดลองเพื่อหาพลังงานสูญเสียของอุปกรณ์ที่แบ่งได้เป็น สองส่วนคือ

1. การหาค่าพลังงานสูญเสียมากที่สุดของระบบติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์ที่โดยส่วนใหญ่เป็นค่าพลังงานสูญเสียจากชุดขับมอเตอร์
2. การหาประสิทธิภาพของคอนเวอร์เตอร์

4.3.2 ทฤษฎีอ้างอิงและหลักการที่เกี่ยวข้อง

1. การคำนวณพลังงานสูญเสียของระบบติดตามตำแน่งดวงอาทิตย์

$$E_{loss} = \frac{V_{Batt}}{3600}\left[I_1 \cdot t_1 + I_{2u} \cdot t_{2u} + I_{2d} \cdot t_{2d} + I_s \cdot t_s\right] \quad (4.3)$$

เมื่อ

E_{loss} = ค่าพลังงานสูญเสียต่ำสุด (วัตต์-ชั่วโมง)

V_{batt} = แรงดันแบตเตอรี่ที่จ่ายให้มอเตอร์ (โวลท์)

t_1 = เวลาน้อยที่สุดที่ใช้หมุน ต่อวัน (วินาที)

I_1 = กระแสที่ใช้ในการหมุนแผง (แอมป์)

I_{2u} = กระแสในการปรับลดมุมเอียง (แอมป์)

I_{2d} = กระแสในการเพิ่มมุมเอียง (แอมป์)

I_s = กระแสที่จ่ายให้วงจรควบคุม (แอมป์)

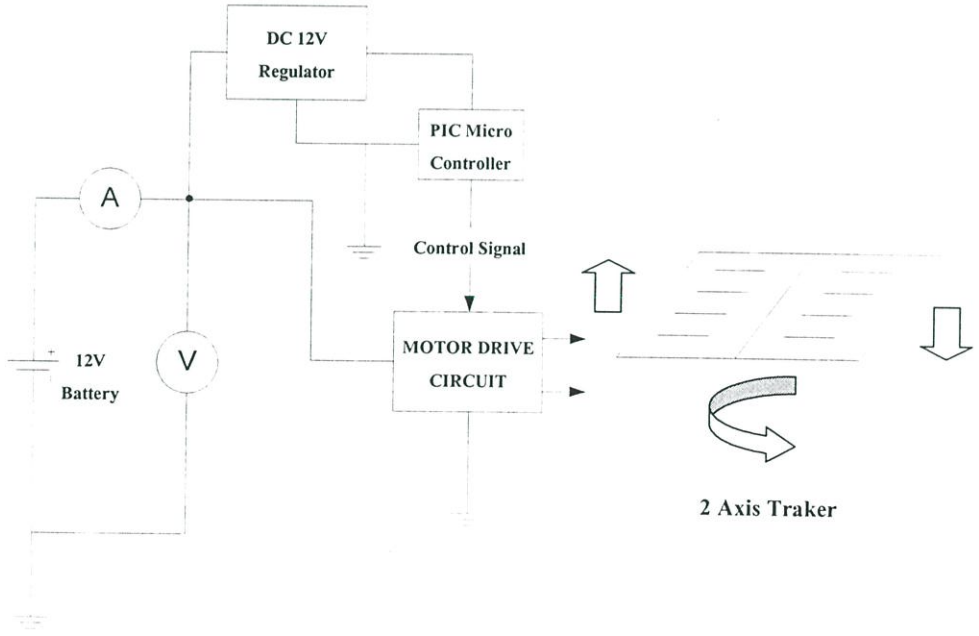
t_1 = เวลาที่ใช้ในการหมุนแผง (วินาที)

t_{2u} = เวลาที่ใช้ในการปรับลดมุมเอียง (วินาที)

t_{2d} = เวลาที่ใช้ในการเพิ่มมุมเอียง (วินาที)

t_s = เวลาการทำงานของวงจรควบคุม (วินาที)

ขนาด และพิกัดต่างๆ ของมอเตอร์ รวมทั้งวงจรแสดงไว้ในตารางที่ 3.3 และรูปที่ 3.17 ตามลำดับ



รูปที่ 4.14 วงจรทดสอบประสิทธิภาพของระบบติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์ แบบ 2 แกน

2. การหาประสิทธิภาพของคอนเวอร์เตอร์

ต่อวงจรดังรูปที่ 4.1 ทดสอบหาค่ากระแส และแรงดันทั้งด้านอินพุท และเอาท์พุท จากนั้นคำนวณค่าพลังงานสูญเสียจากสมการดังต่อไปนี้

$$Power_{Loss} = P_{in} - P_{out} \quad (4.4)$$

และประสิทธิภาพของระบบ

$$\%\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 \quad (4.5)$$

เมื่อกำหนดให้

$Power_{Loss}$ คือค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียจากคอนเวอร์เตอร์(W)

P_{out} คือค่ากำลังไฟฟ้าด้านเอาท์พุท(W)

P_{in} คือค่ากำลังไฟฟ้าด้านอินพุท(W)

เงื่อนไขการทดสอบ

1. ส่วนของการหาพลังงานสูญเสียจากจากระบบปรับมุมแผงทางกลจะทำการทดสอบโดยการหากำลังสูญเสียจากการหมุนแผงโดยรอบจากทิศตะวันออกไปทิศตะวันตกเพื่อปรับตามมุม Azimuth (Polar E-W Tracker) รวมทั้งหมุนกลับมาตำแหน่งเดิมอีกครั้ง และกำลังสูญเสียจากการปรับมุมเอียง (E-W Axis Tracker) ของแผงเมื่อเทียบกับพื้นราบจาก +75 องศา เป็น 0 องศา และปรับกับมาที่ +75 องศาอีกครั้ง [15,38]

2. เนื่องจากขีดจำกัดของแหล่งจ่ายไฟ (Power Supply) ที่สามารถจ่ายกระแสสูงสุดที่ 3A ดังนั้นในการทดสอบประสิทธิภาพคอนเวอร์เตอร์ เมื่อมีการปรับแรงดันต้องปรับค่าดิวตี้ไซเคิลให้เหมาะสมกับปริมาณกระแสด้วยเพื่อป้องกัน Power Supply เสียหาย

4.3.3 การเตรียมอุปกรณ์ทดสอบ

รายการอุปกรณ์

1. แอมป์มิเตอร์	จำนวน	2	เครื่อง
2. โวลท์มิเตอร์	จำนวน	2	เครื่อง
3. Power Supply 0-60 V 3A	จำนวน	1	เครื่อง
4. ออสซิลโลสโคป	จำนวน	1	เครื่อง
5. แผงโหลดภาระความต้านทาน	จำนวน	1	ชุด
6. แบตเตอรี่	จำนวน	1	ลูก

หมายเหตุ ตรวจดูรูปอุปกรณ์ และเครื่องมือต่างๆที่ใช้ได้ในภาคผนวก

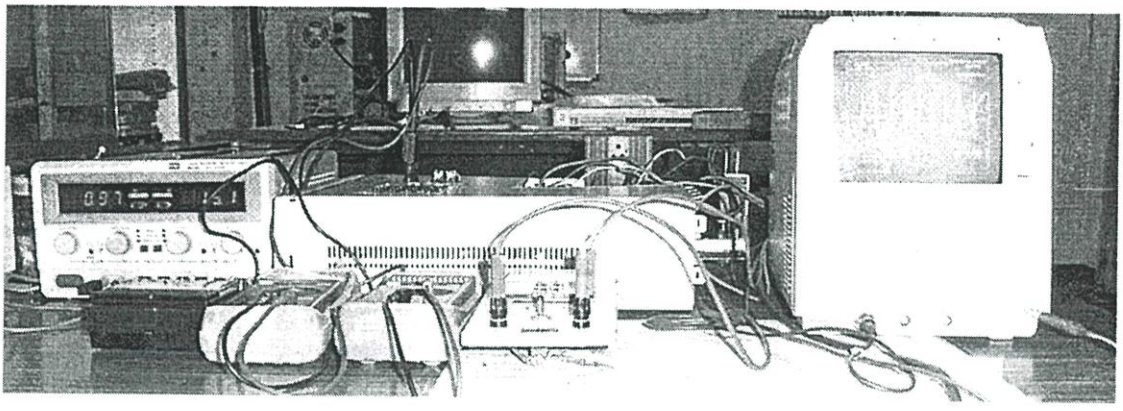
4.3.4 หัวข้อการทดสอบ

ตอนที่1: ทดสอบพลังงานสูญเสียมากที่สุดจากการหมุนมอเตอร์สำหรับ ปรับมุมเอียงแผง วัดค่ากระแส และแรงดันที่ใช้ในการปรับมุมในแต่ละครั้งโดยบันทึกข้อมูลทุกๆ 10 วินาที

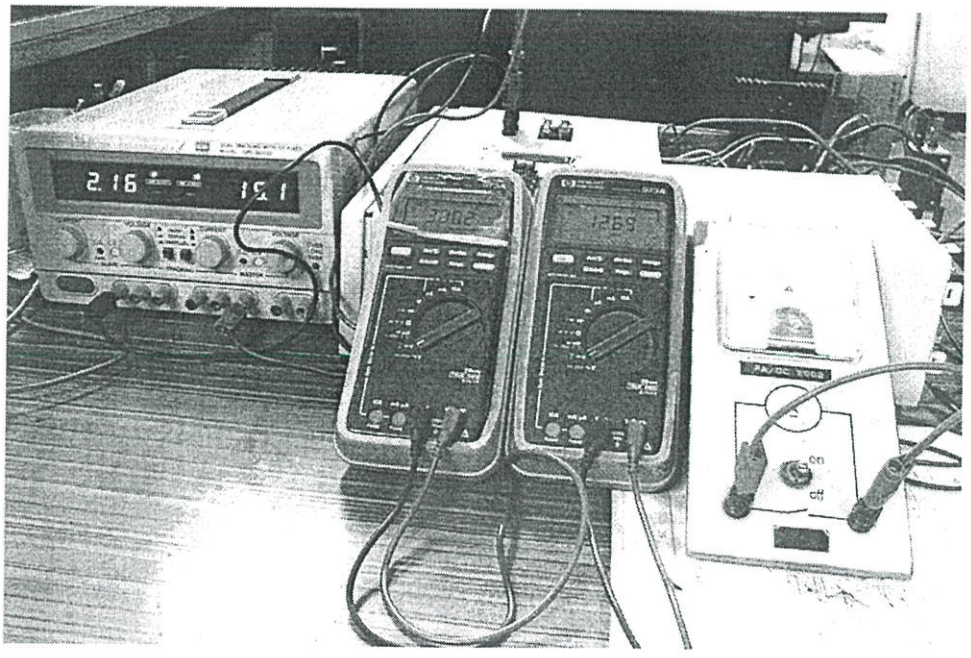
ตอนที่2: ทดสอบพลังงานสูญเสียมากที่สุดจากการหมุนมอเตอร์สำหรับปรับโครง แผง 180 องศา วัดค่ากระแส และแรงดันที่ใช้ในการหมุน โดยบันทึกข้อมูลทุกๆ 10 วินาที

ตอนที่3: ทดสอบหาค่าพลังงานสูญเสียจากภาคไฟเลี้ยงวงจรอิเล็กทรอนิคส์ และไมโครคอนโทรลเลอร์

ตอนที่4: ทดสอบพลังงานสูญเสีย และประสิทธิภาพของวงจรคอนเวอร์เตอร์



(ก)

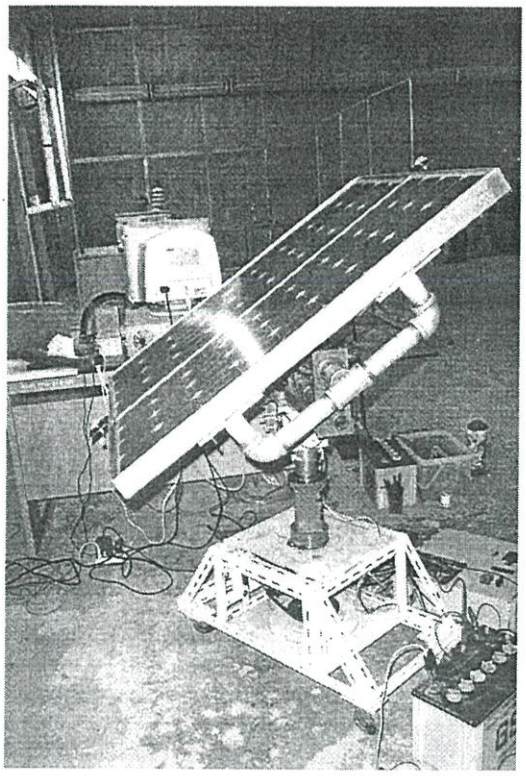


(ข)

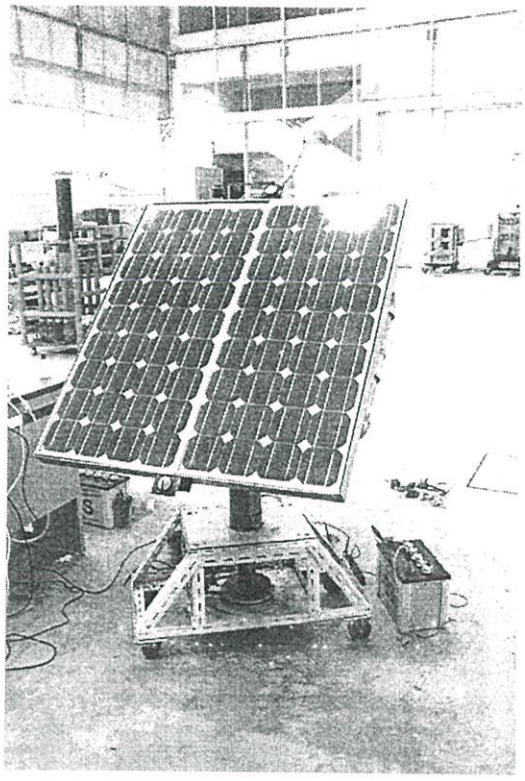
รูปที่ 4.15 การต่ออุปกรณ์ และเครื่องมือวัดเพื่อทดสอบประสิทธิภาพของ MPPT คอนเวอร์เตอร์

(ก) การต่ออุปกรณ์ และเครื่องมือวัด

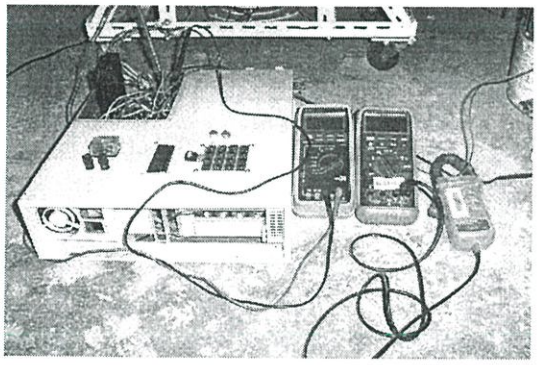
(ข) การแสดงผลของเครื่องมือวัด



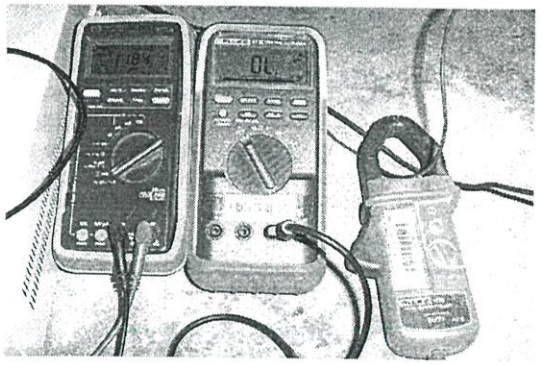
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 4.16 ขณะทำการทดสอบพลังงานสูญเสียจากระบบติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์ และอุปกรณ์วัดกระแส-แรงดัน

(ก) ระหว่างการทดสอบปรับมุมกระดกของแผง

(ข) การทดสอบหมุนโครงสร้างตามเข็มนาฬิกา

(ค) กล่องวงจรควบคุมการทำงาน

(ง) เครื่องมือวัดประกอบด้วยแคล้มมิเตอร์ และโวลท์มิเตอร์

4.3.5 ผลการทดสอบ

ตอนที่1: ทดสอบพลังงานสูญเสียมากที่สุดจากการหมุนมอเตอร์สำหรับ ปรับมุมเอียงของแผงจาก +75 องศา เป็น 0 องศา และกลับมาที่ +75 องศาอีกครั้ง โดยวัดค่ากระแส และแรงดันที่ใช้ในการหมุนตลอดกระบวนการปรับมุมเอียงเพื่อจำลองการทำงานในหนึ่งวัน (แบบดีที่สุดเพราะไม่มีการหลงทิศทางเลย)

ตารางที่ 4.1 ค่าพลังงานสูญเสียจากการปรับมุมแผงมุม 75 องศาเทียบกับแนวดิ่งจนตั้งฉากกับแนวดิ่งและกลับมาตำแหน่งที่ทำมุม 75 องศากับแนวดิ่งอีกครั้ง (Tilt Angle Adjustment)

Date	Time	VDC(V)	ADC(A)	POWER LOSS(W)	ENERGY LOSS(Wh)	Amp-Hour LOSS(Ah)	หมายเหตุ
08/08/2003	21:22:14	12.46231	0.58158	7.24783025	0.020132862	0.0016155	ตำแหน่งตั้งฉาก
08/08/2003	21:22:24	12.465	0.58692	7.3159578	0.020322105	0.001630333	ปรับลง
08/08/2003	21:22:33	12.45505	0.58211	7.250209156	0.02013947	0.001616972	ปรับลง
08/08/2003	21:22:43	12.45856	0.6008	7.485102848	0.020791952	0.001668889	ปรับลง
08/08/2003	21:22:54	11.60751	0.71501	8.299485725	0.023054127	0.001986139	ตำแหน่ง 75 องศา
08/08/2003	21:23:04	11.65405	0.71752	8.362013956	0.023227817	0.001993111	ตำแหน่ง 75 องศา
08/08/2003	21:23:13	12.52612	0.60025	7.51880353	0.020885565	0.001667361	ปรับขึ้น
08/08/2003	21:23:23	12.58807	0.54767	6.894108297	0.019150301	0.001521306	ปรับขึ้น
08/08/2003	21:23:33	12.37964	0.61148	7.569902267	0.021027506	0.001698556	ปรับขึ้น
08/08/2003	21:23:44	12.43903	0.59257	7.370996007	0.020474989	0.001646028	ปรับขึ้น
08/08/2003	21:23:54	12.48792	0.57846	7.223762203	0.020066006	0.001606833	ปรับขึ้น
08/08/2003	21:24:04	12.47137	0.58571	7.304606123	0.020290573	0.001626972	ตำแหน่งตั้งฉาก
				89.84277816	0.249563273	0.020278	
Total Time	1:50	Average Power Loss(w)		6.910982936			

ตอนที่2: ทดสอบพลังงานสูญเสียมากที่สุดจากการหมุนมอเตอร์สำหรับโครงสร้างแผง 180 องศาโดยวัดกระแส และแรงดันที่ใช้ในการหมุนตลอดกระบวนการหันด้านหน้าแผงไปในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา และกลับมาตำแหน่งเดิมโดยหมุนตามเข็มนาฬิกา (Azimuth Tracker หรือPolar E-W Tracker) แล้ววัดค่ากระแส และแรงดันที่ใช้ในการหมุนตลอดกระบวนการเพื่อจำลองการทำงานในหนึ่งวัน (แบบดีที่สุดเพราะไม่มีการหลงทิศทางเลย)

ตารางที่ 4.2 ค่าพลังงานสูญเสียจากการปรับหมุนโครงแผงโดยรอบ (Polar EW Tracking)

Date	Time	V DC	ADC	POWER LOSS(W)	ENERGY LOSS(Wh)	Amp-Hour LOSS(Ah)	หมายเหตุ
09/08/2003	2:27:54	12.37521	0.64585	7.992529379	0.02220147	0.00179403	หมุนทวนเข็มนาฬิกา
09/08/2003	2:28:04	12.32706	0.71448	8.807437829	0.024465105	0.00198467	หมุนทวนเข็มนาฬิกา
09/08/2003	2:28:14	12.42038	0.71318	8.857966608	0.024605463	0.00198106	หมุนทวนเข็มนาฬิกา
09/08/2003	2:28:23	11.9617	0.69921	8.363740257	0.023232612	0.00194225	หมุนทวนเข็มนาฬิกา
09/08/2003	2:28:33	11.76538	0.64698	7.611965552	0.021144349	0.00179717	หมุนทวนเข็มนาฬิกา
09/08/2003	2:28:44	11.91818	0.72084	8.591100871	0.023864169	0.00200233	หมุนทวนเข็มนาฬิกา
09/08/2003	2:28:53	11.99487	0.6633	7.956197271	0.022100548	0.0018425	หมุนทวนเข็มนาฬิกา
09/08/2003	2:29:04	11.94092	0.69841	8.339657937	0.023165716	0.00194003	หมุนทวนเข็มนาฬิกา
09/08/2003	2:29:13	11.85712	0.7795	9.24262504	0.025673958	0.00216528	หมุนตามเข็มนาฬิกา
09/08/2003	2:29:23	11.74435	0.81075	9.521731763	0.026449255	0.00225208	หมุนตามเข็มนาฬิกา
09/08/2003	2:29:34	11.73944	0.79319	9.311606414	0.025865573	0.00220331	หมุนตามเข็มนาฬิกา
09/08/2003	2:29:43	11.74249	0.72279	8.487354347	0.023575984	0.00200775	หมุนตามเข็มนาฬิกา
09/08/2003	2:30:14	11.6554	0.82259	9.587615486	0.026632265	0.00228497	หมุนตามเข็มนาฬิกา
09/08/2003	2:30:24	11.68768	0.76233	8.909869094	0.024749636	0.00211758	หมุนตามเข็มนาฬิกา
09/08/2003	2:30:34	11.56049	0.82424	9.528618278	0.026468384	0.00228956	หมุนตามเข็มนาฬิกา
09/08/2003	2:30:44	11.60953	0.82326	9.557661668	0.02654906	0.00228683	หมุนตามเข็มนาฬิกา
				140.6676778	0.390743549	0.03289139	
Total Time	2:50	Average Power Loss (w)		8.274569282			

ตอนที่3: ทดสอบหาค่าพลังงานสูญเสียจากภาคไฟเลี้ยงวงจรอิเล็กทรอนิคส์และไมโครคอนโทรลเลอร์โดยจ่ายไฟเลี้ยงเข้าวงจรควบคุมและวงจรช่วยทั้งหมดเพื่อวัดกระแสที่จ่ายให้วงจรทั้งหมด

ตารางที่ 4.3 ค่าพลังงานสูญเสียจากการจ่ายไฟเลี้ยงให้วงจรควบคุม

Date	Time	V DC(V)	A DC(A)	POWER LOSS(W)	ENERGY LOSS(Wh)	Amp-Hour LOSS(Ah)
08/08/2003	21:52:37	12.65601	0.01662	0.210342886	0.105171443	0.00831
08/08/2003	22:23:08	12.61682	0.01666	0.210196221	0.105098111	0.00833
08/08/2003	22:53:33	12.64011	0.01881	0.237760469	0.118880235	0.009405
08/08/2003	23:23:33	12.65527	0.01705	0.215772354	0.107886177	0.008525
08/08/2003	23:54:34	12.61584	0.01871	0.236042366	0.118021183	0.009355
08/08/2003	0:24:08	12.0249	0.01711	0.205746039	0.10287302	0.008555
08/08/2003	0:54:08	12.64099	0.01726	0.218183487	0.109091744	0.00863
09/08/2003	1:23:14	12.02356	0.02255	0.271131278	0.135565639	0.011275
				1.805175101	0.90258755	0.072385
Total Time	3:30:36	Average Power Loss		0.225646888		

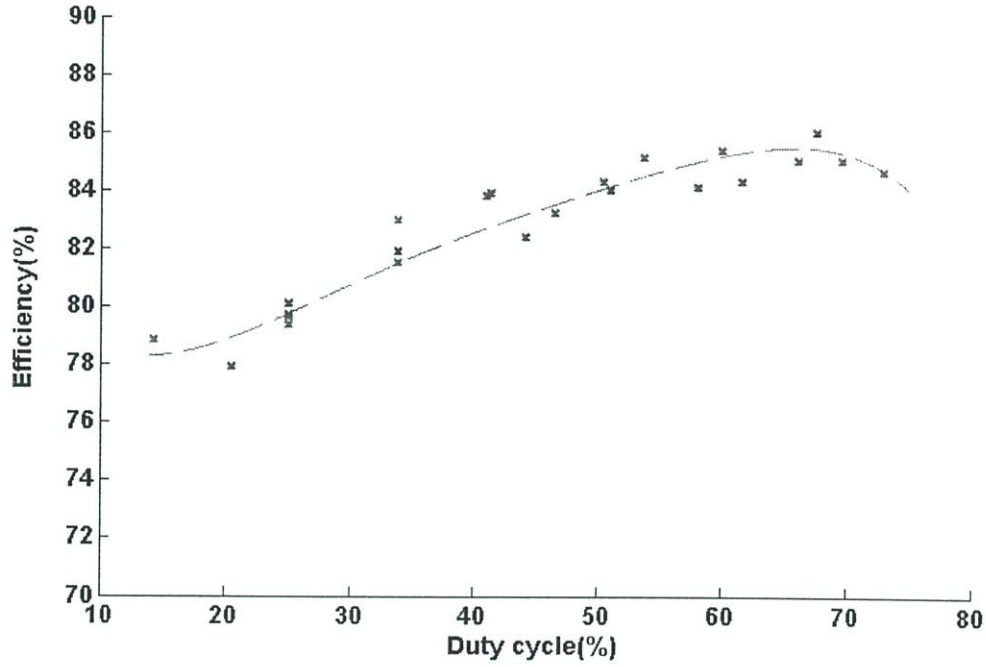
ตอนที่4: ทดสอบพลังงานสูญเสียจากวงจรคอนเวอร์เตอร์โดยป้อน แรงดันจาก Power Supply แล้ววัดค่ากระแส และแรงดันเฉลี่ยทั้งทางด้านเอาท์พุท และอินพุทโดยปรับเปลี่ยนแรงดันด้านอินพุทและดิวตี้ไซเคิลให้เหมาะสมเพื่อให้มีการปรับย่านการทดสอบที่พิกัดกำลังต่างๆผลการทดสอบแสดงได้ดังรูปที่ 4.17 และรูปที่ 4.18

4.3.6 บทวิเคราะห์การทดสอบ

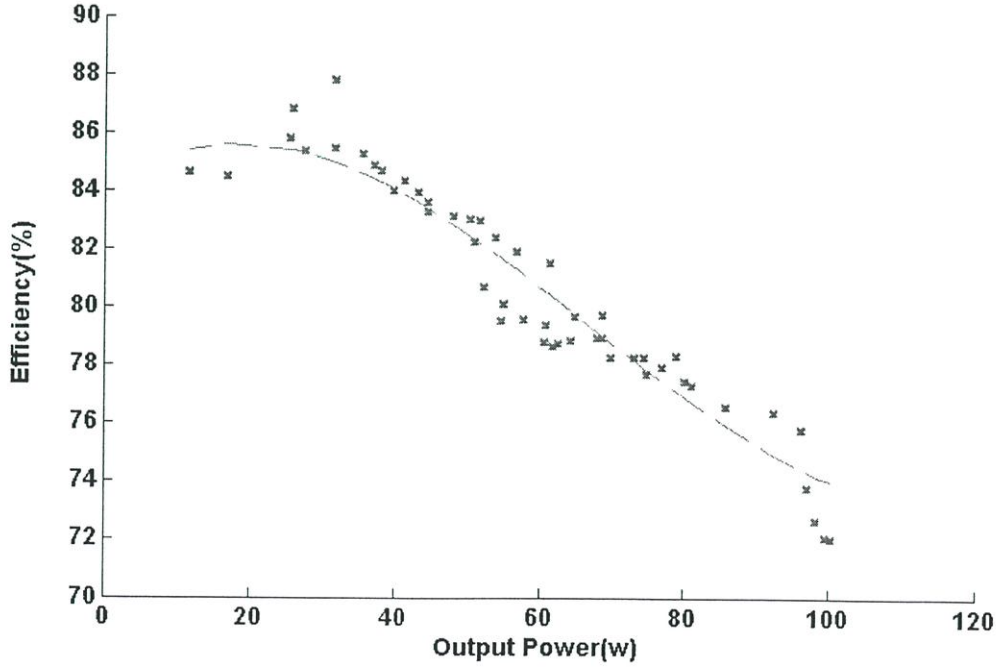
จากการทดสอบตอนที่ 1- 2 - 3 เมื่อพิจารณาค่าพลังงานสูญเสีย วัตต์-ชั่วโมง ทั้ง 2 แกนรวมกันจะมีค่าประมาณ 0.25+0.4 = 0.65Wh ส่วนค่ากระแส-ชั่วโมง(Ah) ทั้งสองแกนมีค่ารวมกันประมาณ 0.06Ah สำหรับวงจรควบคุม และเซ็นเซอร์ต่างๆมีค่ากระแสที่ใช้ป้อนเป็นไฟเลี้ยง 0.017 – 0.02 A

ในการวัดค่าแต่ละครั้งกระแสที่ใช้ในการปรับไม่คงที่ เนื่องจากในแต่ละตำแหน่งของแผง และมุมแผง (เมื่อมุม θ ต่างๆกัน) ต่างกันมีโหลดภาระ (เนื่องมาจากน้ำหนักของแผง) มากระทำที่มอเตอร์ไม่เท่ากัน ดังนั้นการคำนวณพลังงานที่ใช้ในการปรับมุมแผงทางกลในหนึ่งวันได้จากสมการที่ (4.3) จึงเลือกใช้ค่ากระแสสูงสุดในการหมุนแต่ละแกนจากตารางที่ 4.1 เพื่อคำนวณค่าพลังงานสูญเสียมากที่สุดได้ดังนี้

$$E_{Loss} = \frac{12.5}{3600}[0.823\times170+0.717\times70+0.715\times40+0.02\times36000]$$
$$= 3.259 \text{ Wh}$$



รูปที่ 4.17 ประสิทธิภาพของคอนเวอร์เตอร์ที่ดิวตี้ไซเคิลต่างๆ



รูปที่ 4.18 ประสิทธิภาพของคอนเวอร์เตอร์เปรียบเทียบในแต่ละพิกัดกำลัง

จากพลังงานสูญเสียที่ประมาณการได้หากพิจารณาให้ในแต่ละวันมีพลังงานสูญเสียเนื่องมาจากการหลงทิศทาง 200 % หรือ 2 เท่าค่าพลังงานสูญเสียสูงสุดมีเท่ากับ 6.52 Wh

การทดสอบตอนที่ 4 ในรูปที่ 4.17 ประสิทธิภาพของคอนเวอร์เตอร์ชุดนี้ดีที่สุดที่ดิวตี้ไซเคิลประมาณ 60%-75% แต่ผลจากการเปลี่ยนแปลงดิวตี้ไซเคิลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพไม่มาก นักเมื่อเทียบกับการเปลี่ยนแปลงพิกัดกำลังด้านเอาท์พุทดังแสดงในรูปที่ 4.18 ที่พิกัดกำลัง 35W-40W คอนเวอร์เตอร์ให้ประสิทธิภาพดีที่สุดที่ 85% และจะลดหลั่นลงไปเมื่อพิกัดกำลังด้านเอาพุทมากขึ้นโดยค่าพิกัดกำลังที่เอาท์พุทที่ทดสอบไว้สูงสุดคือ 110W เนื่องจากเป็นค่าพิกัดกำลังสูงสุดที่แผงพีวีขนาด 55W จำนวน 2 แผงสามารถจ่ายให้ได้ ดังนั้นการนำคอนเวอร์เตอร์ชุดนี้ไปใช้งานร่วมกับแผงพีวีขนาดพิกัด 110W หากพิจารณาให้แผงพีวีแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้สูงสุดตามพิกัด และคอนเวอร์เตอร์ทำงานที่ประสิทธิภาพ 75% พลังงานด้านเอาท์พุทที่อัดประจุให้แบตเตอรี่อยู่ที่ 82.5W ซึ่งคอนเวอร์เตอร์สามารถทำงานได้อย่างปลอดภัย และหากพิจารณาย้อนกลับไปที่กราฟในรูปที่ 4.18 อีกครั้งพิจารณาที่พิกัดกำลังเอาท์พุท 80W-85W มีประสิทธิภาพประมาณ 76-78% ซึ่งใกล้เคียงกับการประมาณการเอาไว้ในขั้นตอนการทดสอบซึ่งกำหนดประสิทธิภาพไว้ที่ 75% แสดงว่าส.ป.ส.การแทนค่าจุดข้อมูลด้วยเส้นกราฟ(Relative Correlation Coefficient) มีความเหมาะสม

4.4 การทดสอบความถูกต้องในส่วนแสดงผลจาก LCD

4.4.1 หลักการและเหตุผล

การทดสอบเพื่อยืนยันความถูกต้องของการแสดงผลทางจอ LCD ในส่วนของค่าแรงดัน รวมทั้งกระแสด้านอินพุทของคอนเวอร์เตอร์ และแรงดันจากแบตเตอรี่เพราะเป็นส่วนสำคัญส่วนหนึ่งในการนำค่าที่ได้จากการวัด และการแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นสัญญาณดิจิตอลของวงจร A/D ในไมโครคอนโทรลเลอร์ และการคำนวณภายในหน่วยประมวลผลก่อนที่จะแสดงผลผ่านทางจอ LCD

4.4.2 ทฤษฎีอ้างอิงและหลักการที่เกี่ยวข้อง

ในการทดสอบวงจรวัดกระแส และแรงดันทั้งด้านอินพุทกับเอาท์พุทนั้นสัญญาณ ที่ป้อนเข้าไมโครคอนโทรลเลอร์นั้นไม่ได้มีความเป็นเส้นตรงตลอดเวลาถึงแม้จะมีคาปาซิเตอร์กรองสัญญาณกระเพื่อมแล้วก็ตามแต่ยังคงมีการแกว่ง และการกระเพื่อมของสัญญาณเหลืออยู่บ้างในช่วงเวลาที่มอสเฟตเปลี่ยนสถานการณ์ทำงานดังแสดงในการทดสอบตอนที่ 4.2 ดังนั้นค่าที่นำมาใช้ในการคำนวณกำลังงานไฟฟ้าเพื่อหาตำแหน่งของแรงดันที่ต้องการปรับเข้าหาจุดดึงกำลังสูงสุดจึงควรนำค่าสัญญาณที่ได้ทั้งหมดของช่วงคาบเวลาหนึ่งๆมาใช้ในการประมวลผลของไมโครคอนโทรลเลอร์ซึ่งคำนวณคาบเวลาได้จาก $T = \frac{1}{f}$ เมื่อ $f = 50kHz$ คาบเวลาในการวัดสัญญาณที่ควรจะเป็นคือ $20\mu\text{sec}$

เนื่องจากไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ PIC18F458 มีหน่วยประมวลผลที่จะทำงานในแต่ละคำสั่งใช้เวลา 4 ไซเคิลของสัญญาณนาฬิกาโดยความถี่สัญญาณนาฬิกาที่ใช้เท่ากับ $10MHz$ ดังนั้นสามารถคำนวณความเหมาะสม ของจำนวนที่เหมาะสมในการรับค่าข้อมูลเพื่อหาค่าเฉลี่ยได้ดังนี้

- เวลาที่ใช้ในการประมวลผลคำสั่ง A/D ในแต่คำสั่งใช้เวลาประมาณ $\frac{1}{10\times10^{6}}\times4=0.4\,\mu\text{sec}$
- จำนวนครั้งที่สามารถรับข้อมูลได้ในช่วงเวลา 1 คาบเพื่อใช้ในการหาค่าเฉลี่ยของการ ON-OFF มอสเฟตคือ $\frac{20\,\mu\text{sec}}{0.4\,\mu\text{sec}}=50$ ครั้ง

4.4.3 การเตรียมอุปกรณ์ทดสอบ

รายการอุปกรณ์

1. แอมป์มิเตอร์	จำนวน	2	เครื่อง
2. โวลท์มิเตอร์	จำนวน	2	เครื่อง
3. Power Supply 0-60 V 3A	จำนวน	1	เครื่อง
4. แบตเตอรี่	จำนวน	1	ลูก

หมายเหตุ ตรวจดูรูปอุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ได้ในภาคผนวก

4.4.4 หัวข้อการทดสอบ

การทดสอบเพื่อตรวจสอบความผิดพลาดในการประมวลผลของกระแส และแรงดันเพื่อแสดงผลทางจอ LCD

ตอนที่ 1: ทดสอบเปรียบเทียบแรงดันอินพุท

ตอนที่ 2: ทดสอบเปรียบเทียบกระแสอินพุท

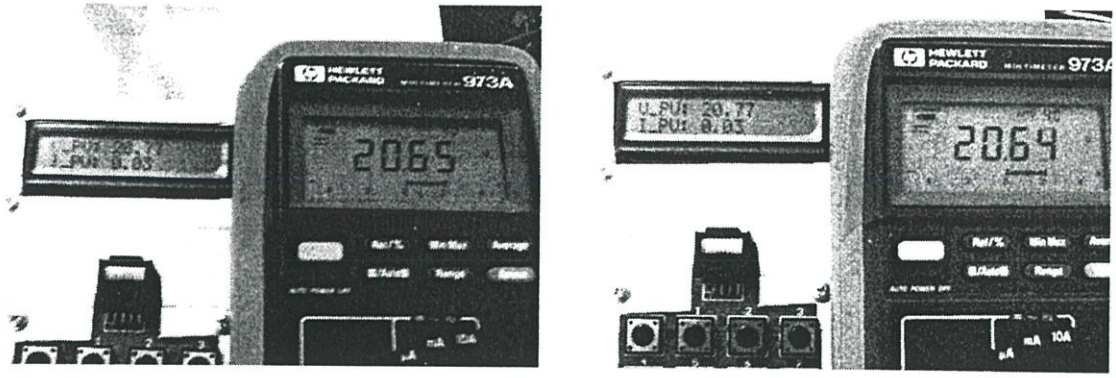
ตอนที่ 3: ทดสอบเปรียบเทียบแรงดันแบตเตอรี่

4.4.5 ผลการทดสอบ

ต่อวงจรดังรูป 4.1 แล้วทำการทดสอบตามขั้นตอนดังนี้

1. เขียนโปรแกรมในวัดค่ากระแส และแรงดันโดยใช้ชุดคำสั่งที่เกี่ยวข้องกับ A/ D
2. ทดสอบการรับค่าแรงดัน และการแสดงผลทางจอ LCD
3. ปรับปรุงการประมวลผลค่าต่างๆ โดยการเขียนโปรแกรมให้มีการนำค่าที่ได้จากการสุ่มจากหน่วยรับค่า A/D จำนวน 50 ครั้งเพื่อหาค่าเฉลี่ยก่อนนำค่าต่างๆไปเปรียบเทียบเพื่อแทรคหาจุดดึงกำลังสูงสุด
4. ทำการทดสอบซ้ำ 30 ครั้งเพื่อหาค่าความคลาดเคลื่อนจากการวัด

ตอนที่ 1: ทดสอบเปรียบเทียบการวัด-การแสดงผลแรงดันอินพุท

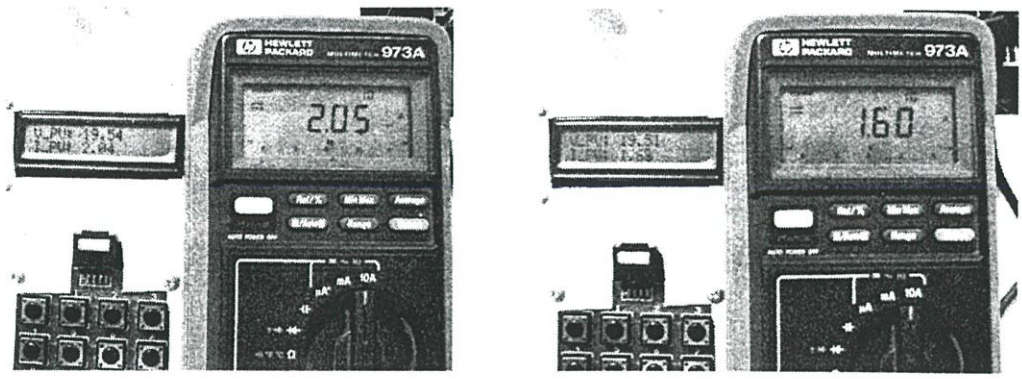


รูปที่ 4.19 การทดสอบวัดแรงดันอินพุทจาก LCD เปรียบเทียบกับค่าที่วัดจากมัลติมิเตอร์

ตารางที่ 4.4 แรงดันอินพุทที่วัดได้จากเครื่องมือวัดที่มีมาตรฐานกับแรงดันอินพุทที่แสดงจาก LCD

No	LCD (V)	Meter (V)	Error (%)	No	LCD (V)	Meter (V)	Error (%)	No	LCD (V)	Meter (V)	Error (%)
1	20.77	20.65	0.58111	11	19.05	19.02	0.15773	21	12.66	12.51	1.19904
2	20.77	20.64	0.62984	12	19.12	19.04	0.42017	22	12.64	12.52	0.95847
3	21.17	20.65	2.51816	13	19.03	19.01	0.10521	23	12.56	12.51	0.39968
4	20.45	20.63	0.87252	14	18.56	18.50	0.32432	24	10.05	10.01	0.39960
5	30.25	29.91	1.13674	15	18.55	18.51	0.21610	25	10.02	10.01	0.09990
6	32.32	32.56	0.73710	16	18.57	18.49	0.43267	26	10.13	10.05	0.79602
7	32.71	32.73	0.06111	17	17.52	17.51	0.05711	27	5.23	5.15	1.55340
8	35.85	36.01	0.44432	18	17.56	17.50	0.34286	28	5.12	5.15	0.58252
9	35.95	36.01	0.16662	19	17.80	17.52	1.59817	29	5.13	5.16	0.58140
10	34.96	35.90	2.61838	20	17.53	17.54	0.05701	30	5.2	5.16	0.77519
	Average Error(%)		0.97659		Average Error(%)		0.37113		Average Error(%)		0.73452

ตอนที่ 2: ทดสอบเปรียบเทียบการวัด-การแสดงผลกระแสอินพุท

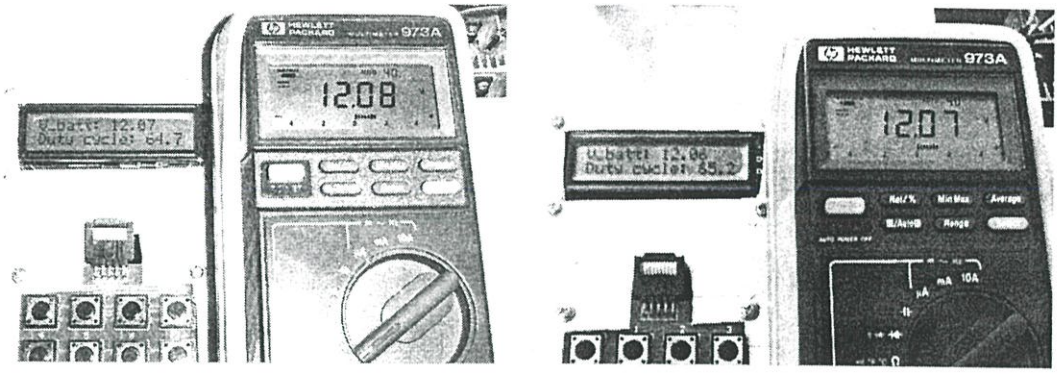


รูปที่ 4.20 การทดสอบวัดกระแสอินพุทจาก LCD เปรียบเทียบกับค่าที่วัดจากมัลติมิเตอร์

ตารางที่ 4.5 กระแสอินพุทที่วัดจากเครื่องมือวัดที่มีมาตรฐานกับกระแสอินพุทที่แสดงจาก LCD

No	LCD (A)	Meter (A)	Error (%)	No	LCD (A)	Meter (A)	Error (%)	No	LCD (A)	Meter (A)	Error (%)
1	2.04	2.05	0.48780	11	2.45	2.45	0.00000	21	1.83	1.81	1.10497
2	2.05	2.05	0.00000	12	2.55	2.45	4.08163	22	1.54	1.50	2.66667
3	2.06	2.05	0.48780	13	2.62	2.52	3.96825	23	1.55	1.52	1.97368
4	1.68	1.60	5.00000	14	2.62	2.65	1.13208	24	1.53	1.51	1.32450
5	1.62	1.60	1.00000	15	2.63	2.62	0.38168	25	1.50	1.50	0.00000
6	1.60	1.60	0.00000	16	3.12	3.13	0.31949	26	1.51	1.51	0.00000
7	3.01	3.01	0.00000	17	3.15	3.13	0.63898	27	1.54	1.55	0.64516
6	3.02	3.01	0.33223	18	3.14	3.13	0.31949	28	0.78	0.76	2.63158
9	3.03	3.01	0.66445	19	1.80	1.82	1.09890	29	1.13	1.16	2.58621
10	3.13	3.01	3.98671	20	1.83	1.82	0.54945	30	0.75	0.77	2.59740
	Average Error(%)		1.19590		Average Error(%)		1.24899		Average Error(%)		1.55302

ตอนที่ 3: ทดสอบเปรียบเทียบการวัด-แสดงผลแรงดันแบตเตอรี่



รูปที่ 4.21 การทดสอบวัดแรงดันแบตเตอรี่จาก LCD เปรียบเทียบกับค่าที่วัดจาก มัลติมิเตอร์

ตารางที่ 4.6 แรงดันแบตเตอรี่ที่วัดได้จากเครื่องมือวัดที่มีมาตรฐานกับแรงดันที่แสดงจาก LCD

No	LCD (V)	Meter (V)	Error (%)	No	LCD (V)	Meter (V)	Error (%)	No	LCD (V)	Meter (V)	Error (%)
1	12.07	12.08	0.08278	11	12.32	12.32	0.00000	21	11.78	11.76	0.17007
2	12.15	12.14	0.08237	12	12.33	12.32	0.08117	22	11.76	11.76	0.00000
3	12.16	12.13	0.24732	13	12.34	12.33	0.08110	23	11.77	11.76	0.08503
4	12.11	12.13	0.16488	14	13.54	13.51	0.22206	24	11.75	11.76	0.08503
5	12.12	12.25	1.00000	15	13.52	13.51	0.07402	25	11.82	11.76	0.51020
6	12.22	12.13	0.74196	16	13.56	13.52	0.29586	26	12.03	12.13	0.82440
7	12.52	12.46	0.48154	17	13.61	13.52	0.66568	27	12.12	12.13	0.08244
6	12.53	12.46	0.56180	18	13.13	13.13	0.00000	28	12.13	12.13	0.00000
9	12.45	12.46	0.08026	19	13.15	13.13	0.15232	29	12.14	12.13	0.08244
10	12.43	12.46	0.24077	20	13.16	13.13	0.22848	30	12.15	12.13	0.16488
	Average Error(%)		0.36837		Average Error(%)		0.18007		Average Error(%)		0.20045

4.4.6 บทวิเคราะห์การทดสอบ

จากการทดสอบวัดค่าแรงดันอินพุท หรือแรงดันจากแผงโซลาร์เซลล์มีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด (Error) จากกระบวนการประมวลผล A/D และการแสดงผลสูงสุด 1.5982% มีค่าผิดพลาดเฉลี่ย 0.6941% ส่วนการวัดกระแสอินพุท หรือกระแสจากแผงโซลาร์เซลล์มีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสูงสุด 5% และมีค่าผิดพลาดเฉลี่ย 1.3326% สำหรับแรงดันแบตเตอรี่มีค่าผิดพลาดสูงสุด 1% และมีค่าผิดพลาดเฉลี่ย 0.2496%

ในส่วนของการวัดค่ากระแสอินพุทนั้นมีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดมากเมื่อเทียบกับค่าที่วัดได้จากแอมป์มิเตอร์ที่มีมาตรฐาน และมากกว่าการวัดค่าแรงดันไม่ว่าจะเป็นการวัดแรงดันอินพุท หรือแรงดันแรงดันที่แบตเตอรี่ เนื่องมาจากสัญญาณกระแสที่นำมาประมวลผลต้องอาศัยการแปลงค่าเป็นแรงดันจากการใช้ความต้านทานขนาด 0.1 โอห์ม อนุกรมเข้าไปกับวงจรเพื่อวัดค่าแรงดันที่ตกคร่อมความต้านทานตัวนี้ แล้วส่งให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ประมวลผล เนื่องจากแรงดันที่นำมาใช้ป้อนให้ไมโครคอนโทรลเลอร์มีหน่วยเป็น mV ซึ่งมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับแรงดันอินพุท และแรงดันแบตเตอรี่ที่มีหน่วย เป็น V หากในช่วงเวลาที่ทำการวัดค่าแรงดันที่ความต้านทานขนาด 0.1 โอห์ม มีสัญญาณรบกวนจากวงจรภายนอกอื่นๆ เช่น ในช่วงเวลาดังกล่าวมีการสั่งให้มอเตอร์ทำงานเพื่อติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์ ก็จะทำให้ค่าแรงดันที่ไมโครคอนโทรลเลอร์อ่านได้มีค่าผิดพลาดไปมากนอกจากนี้ความต้านทานจะมีค่าไม่คงที่เมื่อมีกระแสไหลผ่านในปริมาณมากเนื่องมาจากผลทางด้านอุณหภูมิทำให้อัตราการเพิ่มระดับแรงดันที่ตกคร่อมความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นเมื่อเทียบกับกระแสที่เพิ่มขึ้น

ในการวัดค่าแรงดันในส่วนของแรงดันอินพุท และแรงดันที่แบตเตอรี่ เปอร์เซ็นต์ผิดพลาดจากการวัดแรงดันแบตเตอรี่น้อยกว่าแรงดันอินพุท เนื่องมาจากในการวัดค่าแรงดันอินพุทนั้นต้องลดระดับแรงดันลงในอัตราส่วน 35/5 = 7 เท่าโดยใช้ความต้านปรับค่าได้ให้มีค่าเป็น 5 โวลท์เมื่อรับแรงดันอินพุท 35 โวลท์ เนื่องจากวงจร A/D จะรับค่าแรงดันมาเปรียบเทียบกับระดับแรงดันอ้างอิงภายในซึ่งมีค่าสูงสุด 5V สำหรับใช้ในการประมวลผลต่อไป ส่วนการวัดแรงดันแบตเตอรี่ก็ใช้หลักการเดียวกันกับการวัดแรงดันอินพุทแต่อัตราการลดระดับแรงดัน 12/5 =2.4 เท่า เนื่องจากอัตราส่วนการลดทอนระดับแรงดันสำหรับการวัดแรงดันที่แบตเตอรี่มีค่าน้อยกว่าประมาณ 3 เท่าของอัตราส่วนการลดทอนระดับแรงดันสำหรับการวัดแรงดันอินพุททำให้มีเปอร์เซ็นต์ผิดพลาดน้อยกว่า

การแก้ปัญหาความผิดพลาดจากการวัดค่าอาจทำได้โดยการใช้สมการทางสถิติเพื่อจัดการข้อมูลที่อ่านได้ แต่เนื่องจากการคำนวณเชิงสถิติมีการจัดการตัวเลข และลำดับขั้นตอนจำนวนมากทำให้ต้องใช้เนื้อที่ในหน่วยความจำในปริมาณที่มาก เป็นผลให้โปรแกรมมีขนาดใหญ่อาจใช้ DSP (Digital Signal Processing) ซึ่งเป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ที่สามารถประมวลผลสัญญาณโดยใช้ อัลกอริทึมของ FFT (Fast Furier Transform) ช่วยให้ค่าที่อ่านได้มีความแม่นยำมากขึ้น หรืออาจจัดทำวงจรสำหรับติดต่อกับคอมพิวเตอร์ (Interface Card) เพื่อป้อนข้อมูลเข้าไปคำนวณในคอมพิวเตอร์ที่มีโปรแกรมคำนวณที่เหมาะสมรองรับแทนก็ได้แต่มีข้อเสียคือไม่เหมาะสมกับระบบอิสระ (Stand Alone)

ส่วนการวัดกระแสหากใช้ CT แบบกระแสตรง (DC Current Transformer) นอกจากทำให้ค่าที่วัดได้แม่นยำขึ้นแล้ว ยังทำให้ค่ากำลังงานสูญเสียที่เกิดจากความต้านทานที่อนุกรมกับวงจรลดลงอีกด้วย แต่ทั้งนี้ขึ้นกับความเหมาะสมในการลงทุนด้วยเนื่องจาก CT มีราคาสูงกว่าความต้านทานที่ใช้ในระบบที่ทดสอบมาก

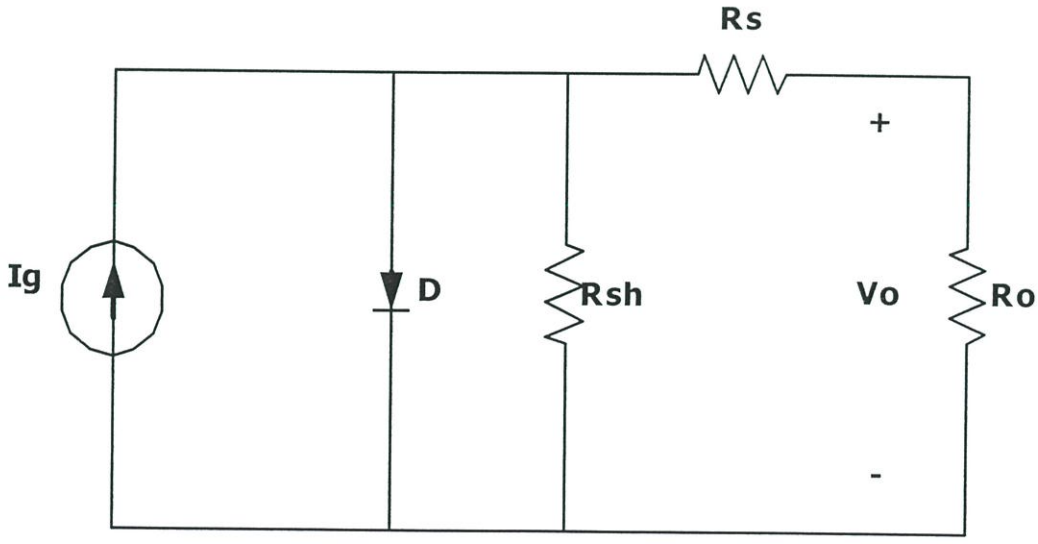
4.5 การทดสอบหาคุณลักษณะของแผงโซลาร์เซลล์เมื่อต่อใช้งานในลักษณะต่างๆ

4.5.1 หลักการและเหตุผล

คุณลักษณะของกระแส-แรงดันของโซลาร์เซลล์เป็นส่วนสำคัญสำหรับใช้เป็นข้อมูลในการควบคุมการปรับการทำงานของ MPPT คอนเวอร์เตอร์หาจุดกำลังสูงสุด ดังนั้นการทดสอบหากราฟคุณลักษณะของกระแส-แรงดันมีจุดประสงค์เพื่อให้ทราบถึงคุณลักษณะของแผงโซลาร์เซลล์ที่จะนำมาใช้เป็นหน่วยแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า นอกจากนี้หากสามารถวัดค่าข้อมูลทางเทคนิคต่างๆ เช่น ความเข้มแสง และอุณหภูมิเซลล์ หรืออุณหภูมิของแผงโซลาร์เซลล์(แต่การวัดอุณหภูมิเซลล์ทำให้ข้อมูลมีความถูกต้องมากกว่า) ในขณะทำการทดสอบควบคู่ไปกับการวัดค่ากระแส และแรงดัน(I-V Scan) ได้เมื่อนำมาอ้างอิงตามมาตรฐาน IEEE 1513-2001[39] โดยมีจำนวนข้อมูลต่างๆมากพอตามที่มาตรฐานกำหนด ก็สามารถนำมาคำนวณเชิงสถิติตามสมการภายใต้เงื่อนไขการทดสอบกับสภาวะแสงอาทิตย์จริง (Out Door Test) ของมาตรฐานนี้ได้ จากนั้นจึงประยุกต์ใช้สมการที่ได้เพื่อแปลงค่า I-V Scan เป็นค่าความเข้มแสงสำหรับการทดสอบในครั้งต่อๆไป เพื่อทดแทนการวัดจากเครื่องมือวัดความเข้มแสงโดยตรง

4.5.2 ทฤษฎีอ้างอิงและหลักการที่เกี่ยวข้อง

พิจารณาวงจรสมมูลย์ของโซลาร์เซลล์ ดังรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.22 วงจรเสมือนของเซลล์แสงอาทิตย์

จากรูปที่ 4.22 สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแส- แรงดันได้ดังนี้

$$I_O = I_g - I_D - I_{Rsh} \tag{4.6}$$

$$I_D = I_{sat}\left[\exp\left(\frac{q\left(V_O + R_S I\right)}{AK_B T}\right) - 1\right] \tag{4.7}$$

$$I_O = I_g - I_{sat}\left[\exp\left(\frac{q\left(V_O + R_S I_O\right)}{AK_B T}\right) - 1\right] - \frac{V_O + R_S I_O}{R_{sh}} \tag{4.8}$$

เมื่อกำหนด

I_g : กระแสที่ได้เมื่อแผงได้รับแสง(A)

I_{sat} : ค่ากระแสอิ่มตัวของเซลล์(A)

K_B : ค่าคงที่ของโบล์ทมาน (J/K)

T : อุณหภูมิในหน่วยเคลวิน(K)

R_s : ค่าความต้านทานอนุกรม (Ω)

R_{sh} : ค่าความต้านทานขนาน (Ω)

q : ประจุของอิเล็กตรอน(คูลอมบ์)

A : แฟคเตอร์ของรูปทรง(Dimension Factor or Ideality Factor)

V_o : แรงดันที่เอาท์พุท(V)

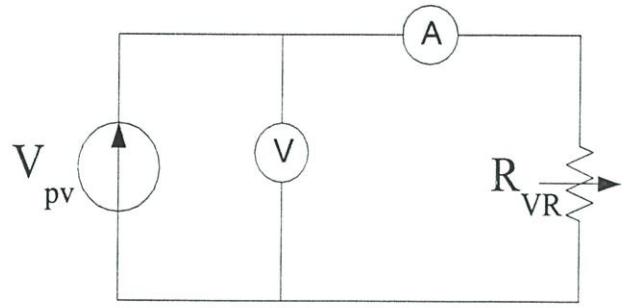
I_o : กระแสเอาท์พุท(A)

หากนำสมการที่ (4.8) มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแรงดันจะได้กราฟที่มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 1.2 ในบทที่ 1 เมื่อกำหนดองค์ประกอบทางไฟฟ้าต่างๆให้เมหาะสม

ถ้าต้องการทดสอบให้สอดคล้องกับมาตรฐาน IEEE1513-2001 นั้นค่ากระแส-แรงดันที่ได้จากการวัดค่าด้วยการปรับค่าความต้านทานโหลดภาระ R_O หรือค่า R_{VR} ในวงจรที่ใช้ในการทดสอบดังรูปที่ 4.23 ต้องวัดได้มากกว่า 100 ข้อมูล โดยข้อมูลที่ใช้ต้องมีการกระจายตามช่วงเวลาต่างๆในรอบ 1 วัน เพื่อไม่ให้มีการกระจุกตัวในช่วงเช้า หรือช่วงเวลาบ่าย ช่วงใดช่วงหนึ่งมากเกินไป(ในมาตรฐานระบุว่าจำนวนข้อมูลน้อยที่สุดที่อนุโลมให้ใช้ได้คือ 20 ข้อมูลต่อวัน)[39] ผลการทดสอบเพื่อหาสมการตามมาตรฐานแสดงในภาคผนวก

เงื่อนไขการทดลอง

1. การวัด กระแส และแรงดัน เมื่อะดับแรงดันเข้าใกล้ V_{OC} หรือแรงดันเปิดวงจรของแผงโซลาร์เซลล์นั้นควรปรับค่าความต้าน R_{VR} ทีละน้อยเนื่องจากจุดเหล่านี้หากเปลี่ยนแปลงความต้านทานเร็วเกินไปอาจได้กลุ่มข้อมูลที่มีความผิดพลาดมาก



รูปที่ 4.23 วงจรที่ใช้ทดสอบ คุณลักษณะทางกระแสแรงดัน (I-V Scan)

2. การทดสอบควรวัดค่ากระแสปิดวงจรก่อน(I_{SC})เนื่องจากหากระหว่างที่ทำการทดสอบหากความเข้มแสงเปลี่ยนแปลงไปโดยที่ผู้วัดไม่ทันสังเกตข้อมูลที่ได้ก็จะไม่ผิดพลาดมากนักเพราะผลกระทบของความเข้มแสงที่มีต่อ V_{OC} มีค่าไม่มากเมื่อเทียบกับผลกระทบที่มีต่อ I_{SC} อย่างไรก็ดีหากความเข้มแสงมีการเปลี่ยนแปลงในช่วงเวลาที่การทำ I-V Scan ยังไม่เสร็จสิ้นโดยที่ผู้วัดสังเกตได้ชัดเจนก็ควรจะเริ่มต้นทำการวัดค่าใหม่อีกครั้ง เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ถูกต้องมากยิ่งขึ้น

4.5.3 การเตรียมอุปกรณ์ทดสอบ

รายการอุปกรณ์

1. แอมป์มิเตอร์	จำนวน	2	เครื่อง
2. โวลท์มิเตอร์	จำนวน	2	เครื่อง
3. แผงโซลาร์เซลล์รุ่น BPTS1255HP	จำนวน	3	แผง
4. ออสซิลโลสโคป	จำนวน	1	เครื่อง
5. แผงโหลดภาระความต้านทาน	จำนวน	2	ชุด
6. เทอร์โมมิเตอร์	จำนวน	1	เครื่อง
7. บารอมิเตอร์จำนวน	จำนวน	1	เครื่อง

หมายเหตุ ตรวจดูรูปอุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ได้ในภาคผนวก

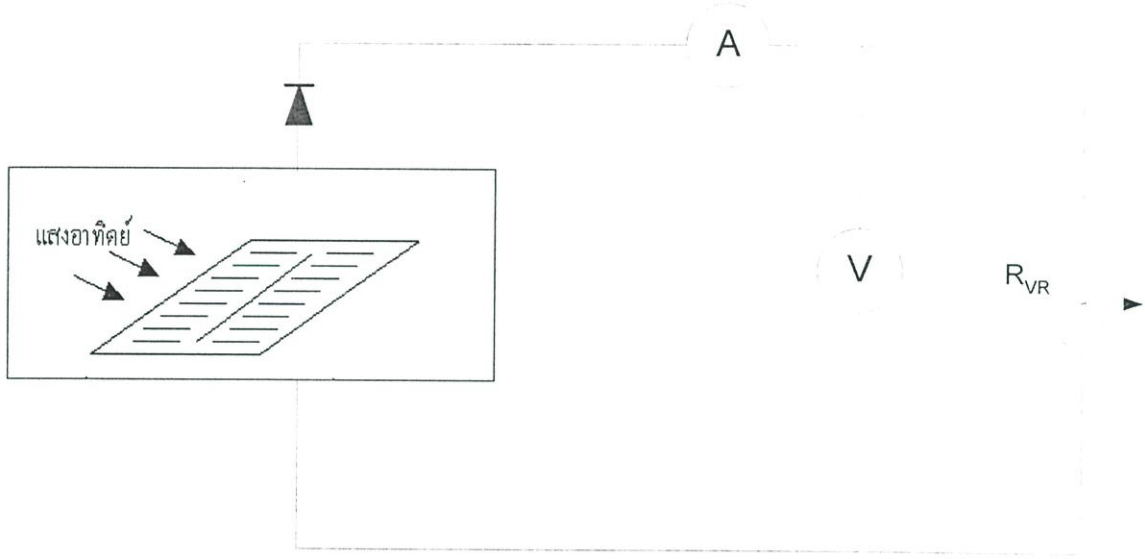
4.5.4 หัวข้อการทดสอบ

ตอนที่ 1: ทดสอบเปรียบเทียบคุณลักษณะกระแส – แรงดันที่ได้จากการต่อแผงโซลาร์เซลล์แบบอนุกรม 2 แผง กับข้อมูลที่ได้จาก 1 แผง โดยใช้แผงโซลาร์เซลล์ชนิดเดียวกัน พิกัดกำลังเดียวกัน จำนวน 3 แผงทดสอบพร้อมกันเพื่อให้อยู่ในสภาวะแวดล้อมเดียวกัน

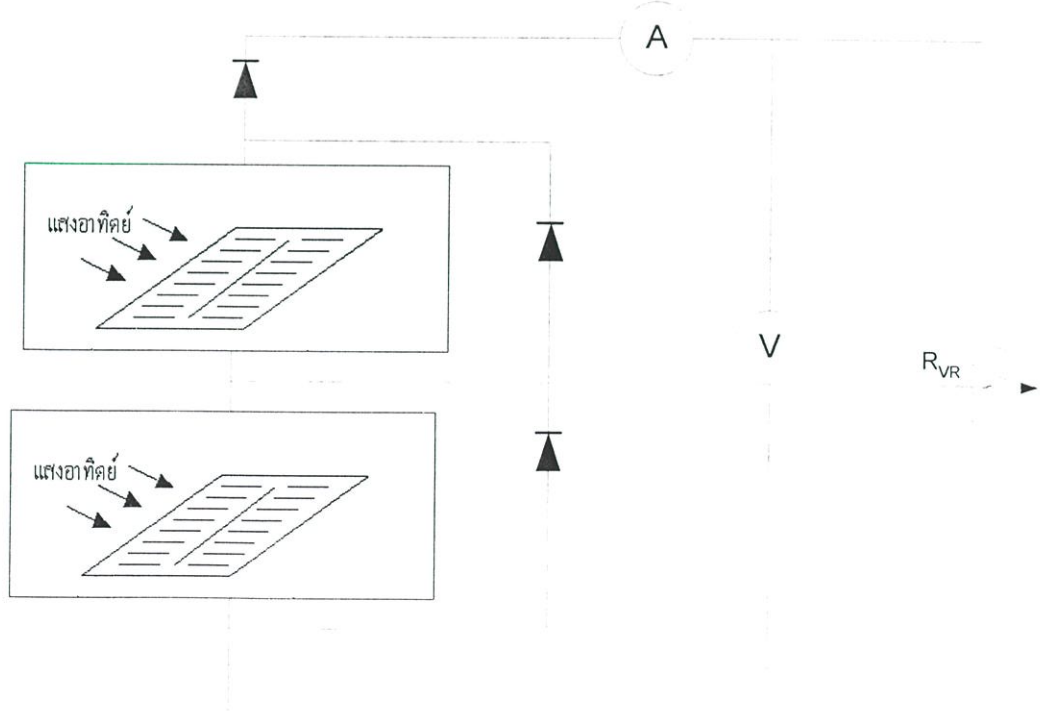
ตอนที่ 2: ทดสอบเปรียบเทียบคุณลักษณะกระแส – แรงดันที่ได้จากการต่อแผงโซลาร์เซลล์แบบขนาน 2 แผง กับข้อมูลที่ได้จาก 1 แผง โดยใช้แผงโซลาร์เซลล์ชนิดเดียวกัน พิกัดกำลังเดียวกัน จำนวน 3 แผงทดสอบพร้อมกันเพื่อให้อยู่ในสภาวะแวดล้อมเดียวกัน

4.5.5 ผลการทดสอบ

ตอนที่ 1: ต่อวงจรสำหรับการทดสอบตามรูปที่ 4.23 โดยใช้แผงโซลาร์เซลล์แผงเดียวตามรูปที่ 4.24 และแผงโซลาร์เซลล์แบบ 2 แผงอนุกรมกันตามรูปที่ 4.25 วัดค่ากระแสปิดวงจร(I_{sc} :Short Circuit Current) อุณหภูมิตัวถัง(T) และความดันอากาศ ก่อนจากนั้นปรับค่าความต้านทานมากขึ้นวัดค่ากระแสและแรงดันแล้วบันทึกผลการทดลอง จนกว่าค่ากระแสจะเข้าใกล้ศูนย์ หรือแรงดันเข้าสู่แรงดันเปิดวงจร (V_{OC} : Open Circuit Voltage) ทาการทดสอบซ้ำ 3 ครั้ง เพื่อแสดงผลเป็นกราฟ I-V และ P-V ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.26-4.31

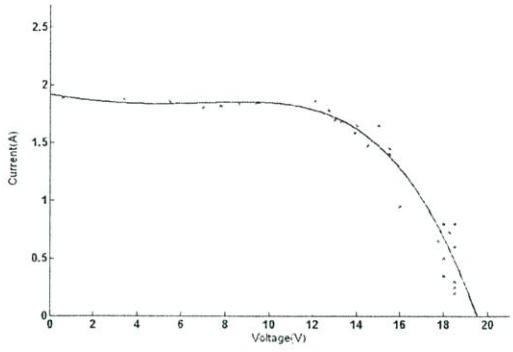


รูปที่ 4.24 วงจรที่ใช้ทดสอบคุณลักษณะของแผงโซลาร์เซลล์เมื่อต่อใช้งาน 1 แผง

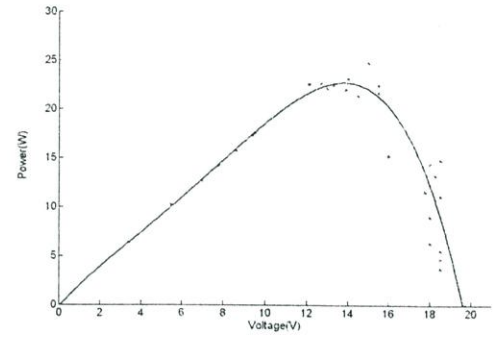


รูปที่ 4.25 วงจรที่ใช้ทดสอบคุณลักษณะของแผงโซลาร์เซลล์เมื่อต่อใช้งาน 2 แผง แบบอนุกรม

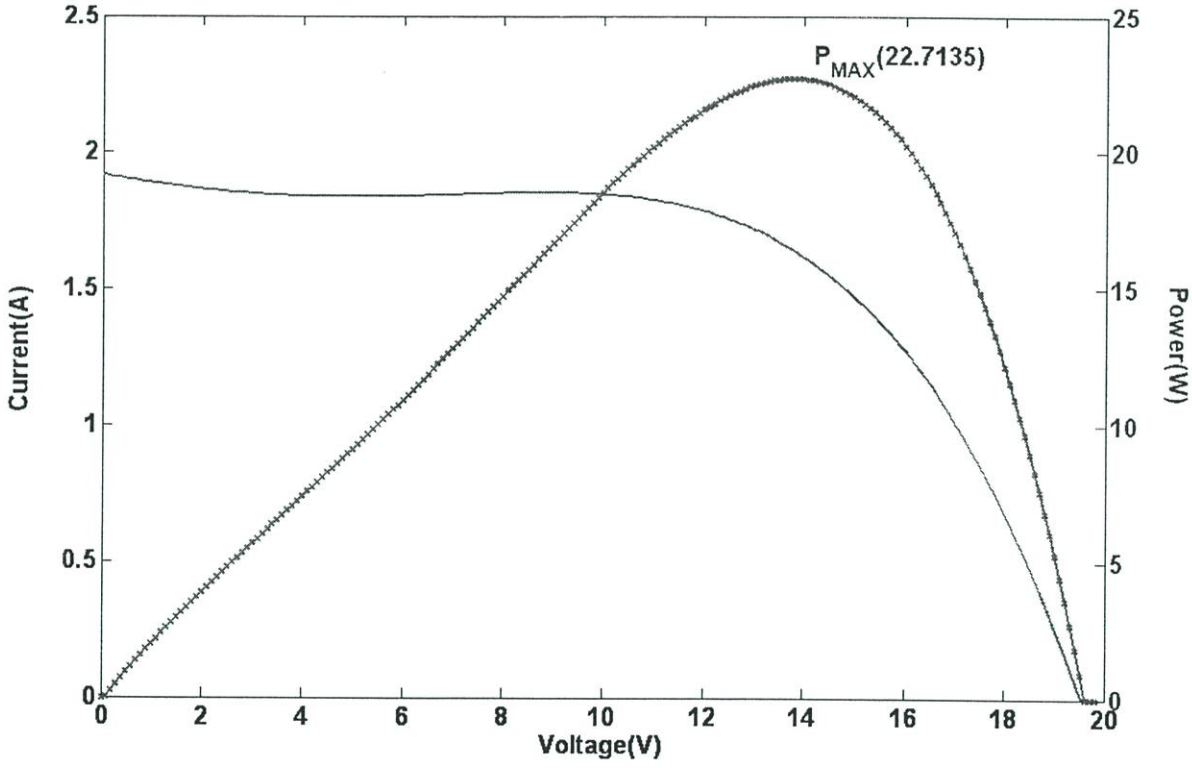
ผลการทดสอบตอนที่ 1 ครั้งที่ 1 เมื่อทดสอบแผงเดี่ยว



(ก)



(ข)



(ค)

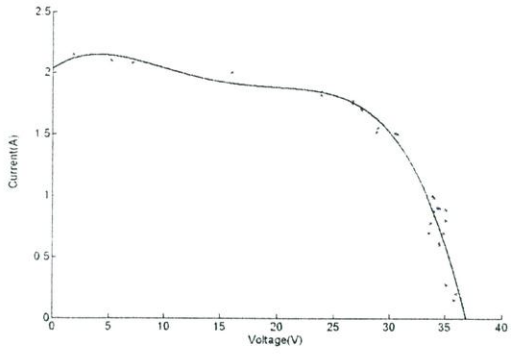
รูปที่ 4.26 กราฟคุณลักษณะกระแส-กำลัง-แรงดันของแผงโซลาร์เซลล์ 1 แผง
วันที่ 29 ก.ค. 2546 เวลา 15:00 น. T = 48°C (ความเข้มแสงน้อย-มีเมฆ)

(ก) คุณลักษณะกระแส-แรงดัน

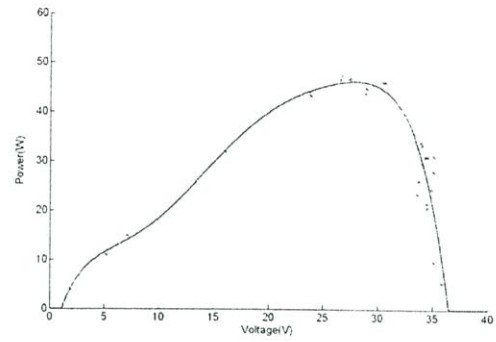
(ข) คุณลักษณะกำลัง-แรงดัน

(ค) คุณลักษณะกระแส-กำลัง-แรงดัน

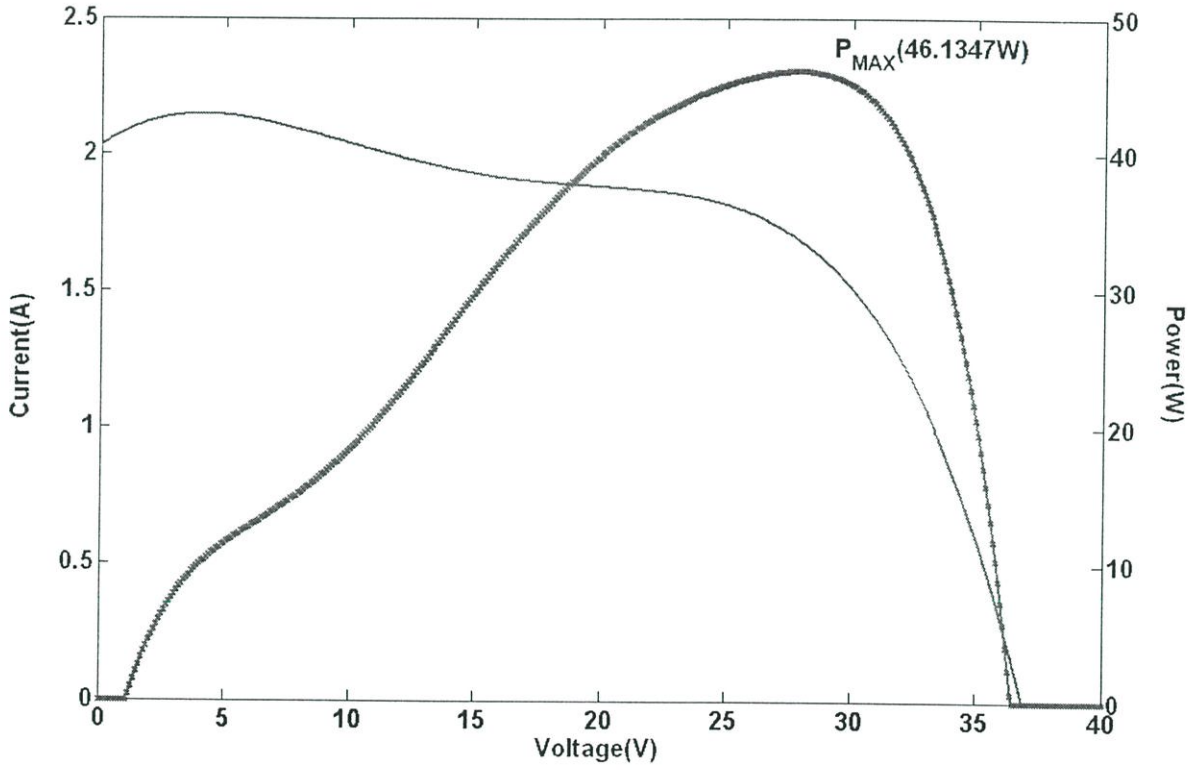
ผลทดสอบตอนที่ 1 ครั้งที่ 1 ต่อแผงโซลาร์เซลล์แบบอนุกรม



(ก)



(ข)



(ค)

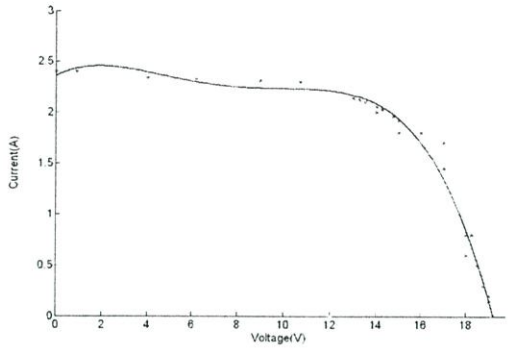
รูปที่ 4.27 กราฟคุณลักษณะกระแส-กำลัง-แรงดันของแผงโซลาร์เซลล์ 2 แผง ต่อแบบอนุกรม วันที่ 29 ก.ค. 2546 เวลา 15:00 น. T = 48°C (ความเข้มแสงน้อย-มีเมฆ) ทดสอบพร้อมกับรูปที่ 4.26

(ก) คุณลักษณะกระแส-แรงดัน

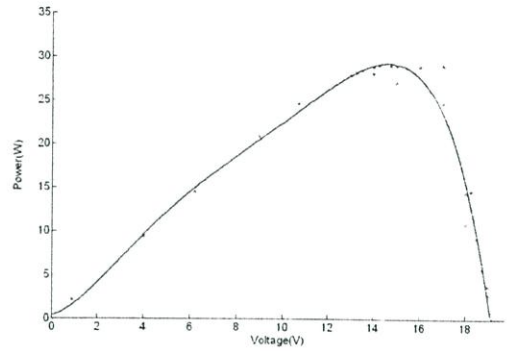
(ข) คุณลักษณะกำลัง-แรงดัน

(ค) คุณลักษณะกระแส-กำลัง-แรงดัน

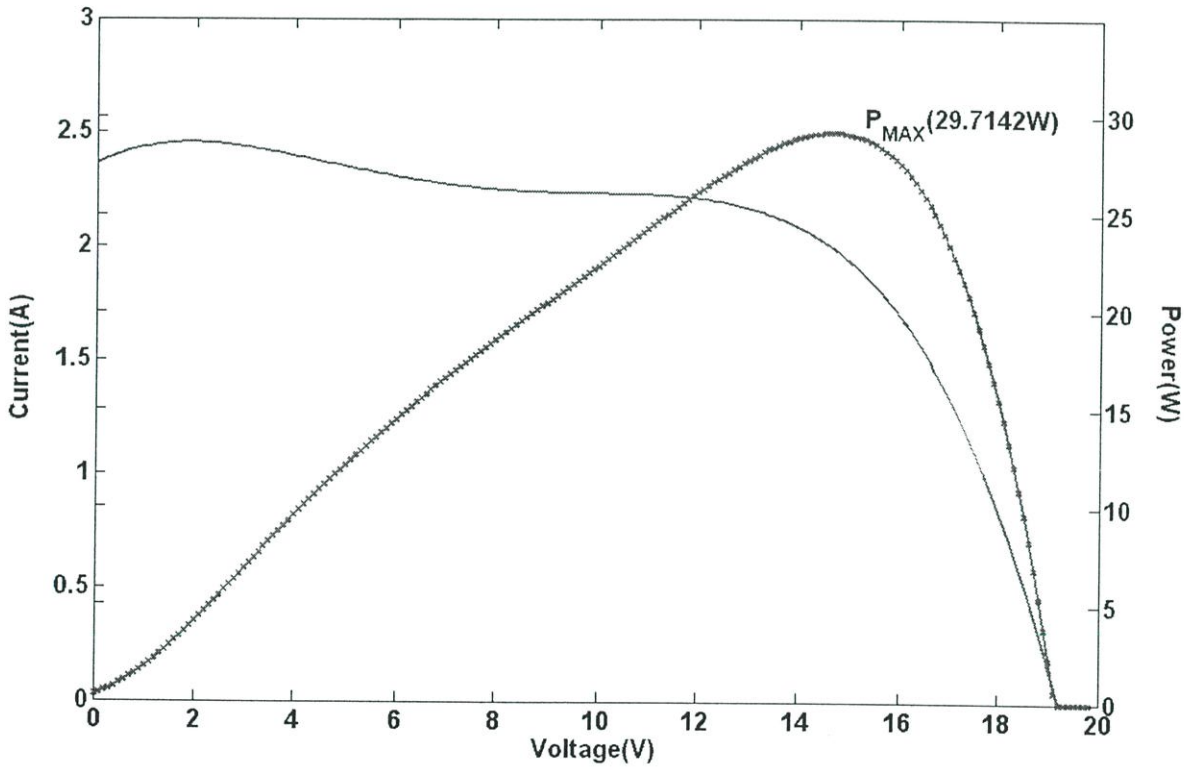
ผลการทดสอบตอนที่ 1 ครั้งที่ 2 เมื่อทดสอบแผงเดี่ยว



(ก)



(ข)



(ค)

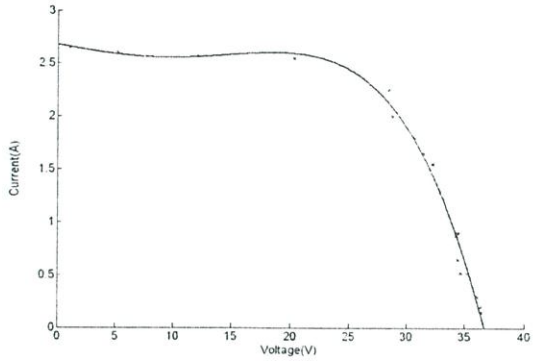
รูปที่ 4.28 กราฟคุณลักษณะกระแส-กำลัง-แรงดันของแผงโซลาร์เซลล์ 1 แผง
วันที่ 29 ก.ค. 2546 เวลา 15:18 น. T = 50°C (ไม่มีเมฆ)

(ก) คุณลักษณะกระแส-แรงดัน

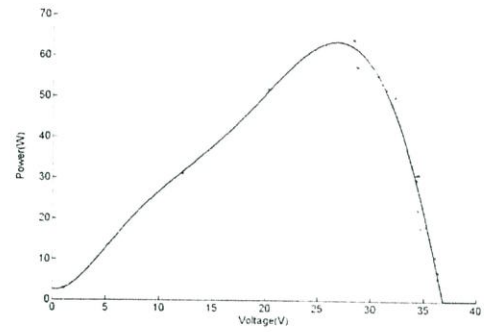
(ข) คุณลักษณะกำลัง-แรงดัน

(ค) คุณลักษณะกระแส-กำลัง-แรงดัน

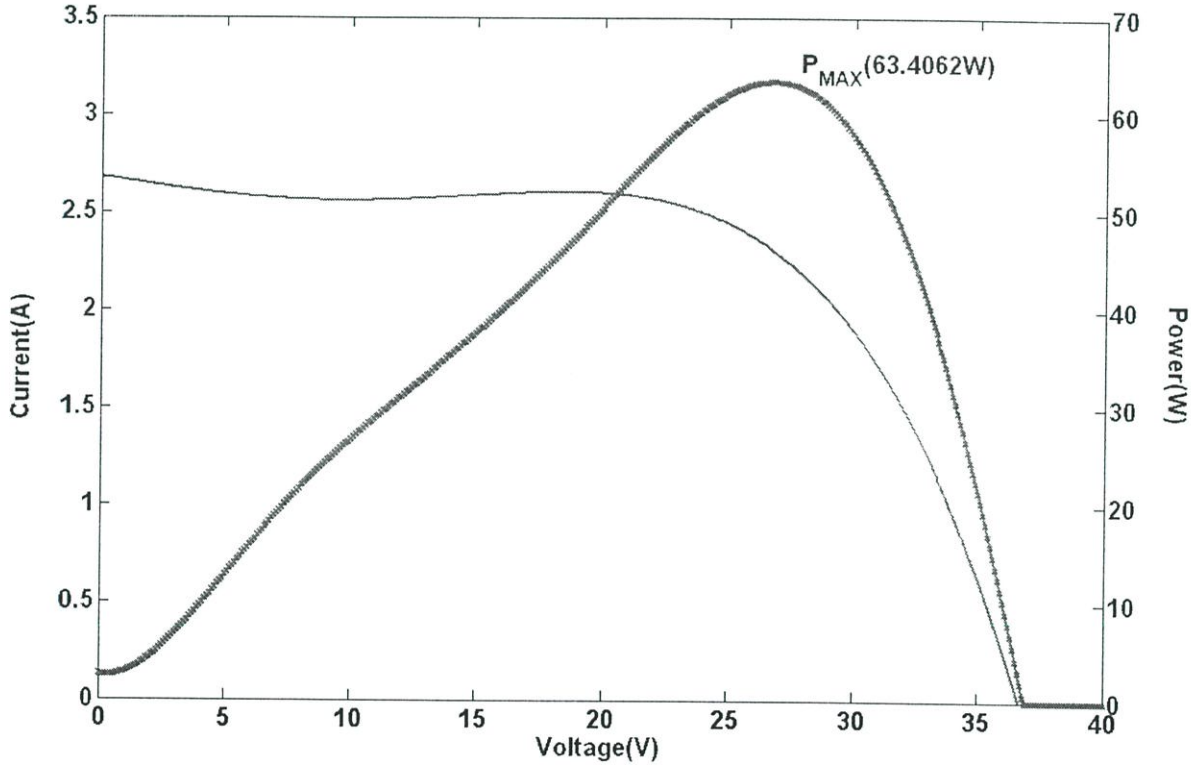
ผลทดสอบตอนที่ 1 ครั้งที่ 2 ต่อแผงโซลาร์เซลล์แบบอนุกรม



(ก)



(ข)



(ค)

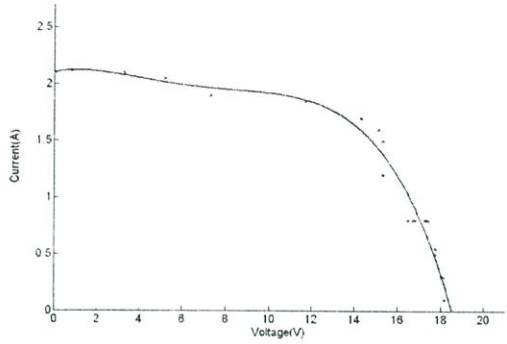
รูปที่ 4.29 กราฟคุณลักษณะกระแส-กำลัง-แรงดันของแผงโซลาร์เซลล์ 2 แผง ต่อแบบอนุกรม วันที่ 29 ก.ค. 2546 เวลา 15:18 น. T = 50°C (ไม่มีเมฆ) ทดสอบพร้อมกับรูปที่ 4.28

(ก) คุณลักษณะกระแส-แรงดัน

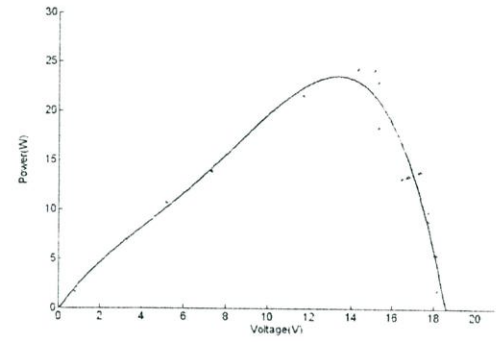
(ข) คุณลักษณะกำลัง-แรงดัน

(ค) คุณลักษณะกระแส-กำลัง-แรงดัน

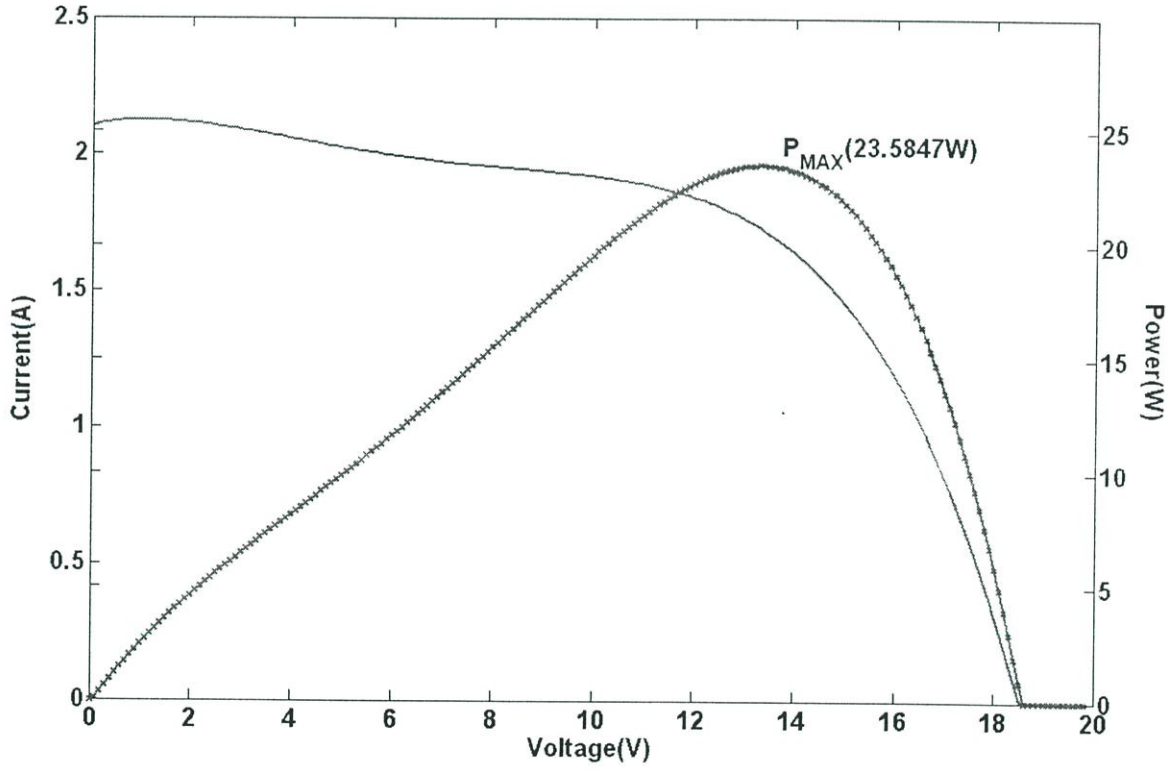
ผลการทดสอบตอนที่ 1 ครั้งที่ 3 เมื่อทดสอบแผงเดี่ยว



(ก)



(ข)



(ค)

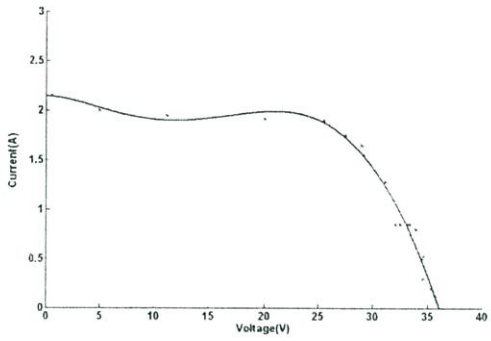
รูปที่ 4.30 กราฟคุณลักษณะกระแส-กำลัง-แรงดันของแผงโซลาร์เซลล์ 1 แผง
วันที่ 29 ก.ค. 2546 เวลา 15:37 น. T = 50°C (ความเข้มแสงน้อย-มีเมฆ)

(ก) คุณลักษณะกระแส-แรงดัน

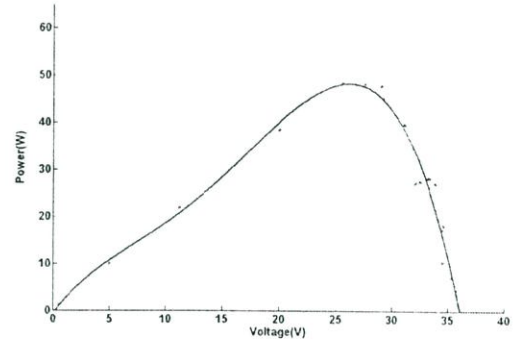
(ข) คุณลักษณะกำลัง-แรงดัน

(ค) คุณลักษณะกระแส-กำลัง-แรงดัน

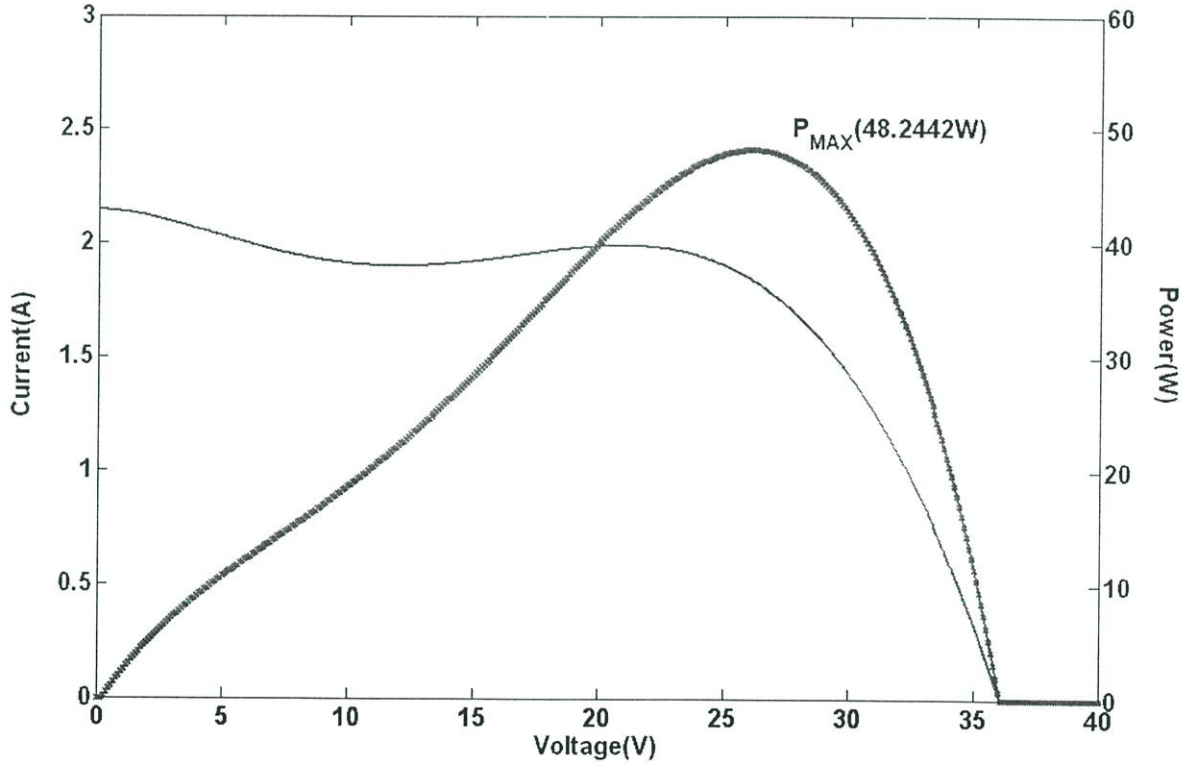
ผลทดสอบตอนที่ 1 ครั้งที่ 3 ต่อแผงโซลาร์เซลล์แบบอนุกรม



(ก)



(ข)



(ค)

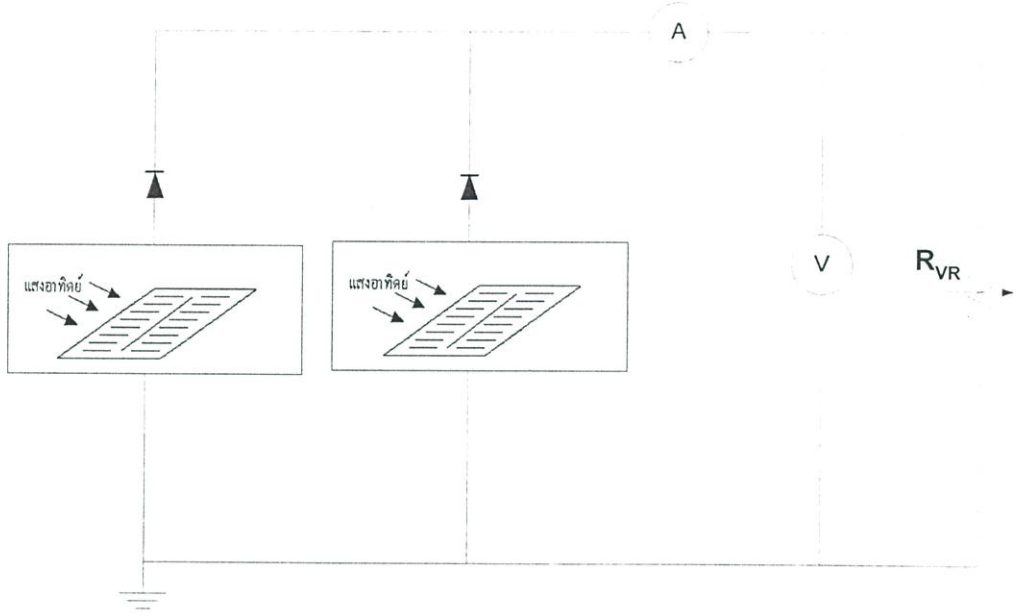
รูปที่ 4.31 กราฟคุณลักษณะกระแส-กำลัง-แรงดันของแผงโซลาร์เซลล์ 2 แผง ต่อแบบอนุกรม วันที่ 29 ก.ค. 2546 เวลา 15:37น. T = 50°C (ความเข้มแสงน้อย-มีเมฆ) ทดสอบพร้อมกับรูปที่ 4.30

(ก) คุณลักษณะกระแส-แรงดัน

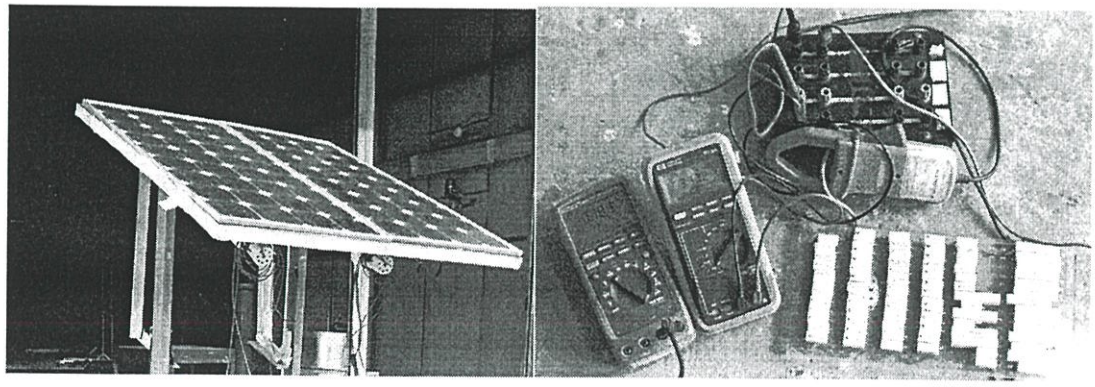
(ข) คุณลักษณะกำลัง-แรงดัน

(ค) คุณลักษณะกระแส-กำลัง-แรงดัน

ตอนที่ 2: ต่อวงจรสำหรับการทดสอบตามรูปที่ 4.23 โดยใช้แผงโซลาร์เซลล์แผงเดียวตามรูปที่ 4.24 และแผงโซลาร์เซลล์แบบ 2 แผงขนานกันตามรูปที่ 4.32 วัดกระแส อุณหภูมิตัวถัง(T) และความดันอากาศก่อนจากนั้นปรับค่าความต้านทานมากขึ้นวัดกระแส และแรงดันแล้วบันทึกผลการทดลองจนกว่าค่ากระแสจะเข้าใกล้ศูนย์ หรือแรงดันเข้าสู่แรงดันเปิดวงจรทำการทดสอบซ้ำ 3 ครั้ง เพื่อแสดงผลเป็นกราฟ I-V และ P-V ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.34-4.39

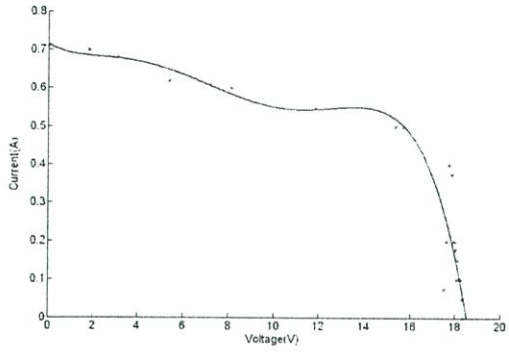


รูปที่ 4.32 วงจรที่ใช้ทดสอบคุณลักษณะของแผงโซลาร์เซลล์เมื่อต่อใช้งาน 2 แผงแบบขนาน

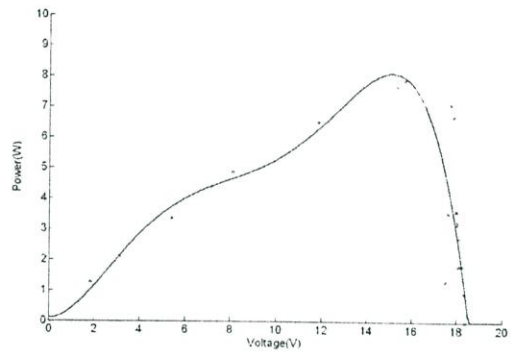


รูปที่ 4.33 รูปขณะทำการทดสอบ, เครื่องมือการทดสอบ และการวัดเพื่อหาคุณลักษณะของแผงโซลาร์เซลล์เมื่อต่อใช้งานในลักษณะต่างๆ

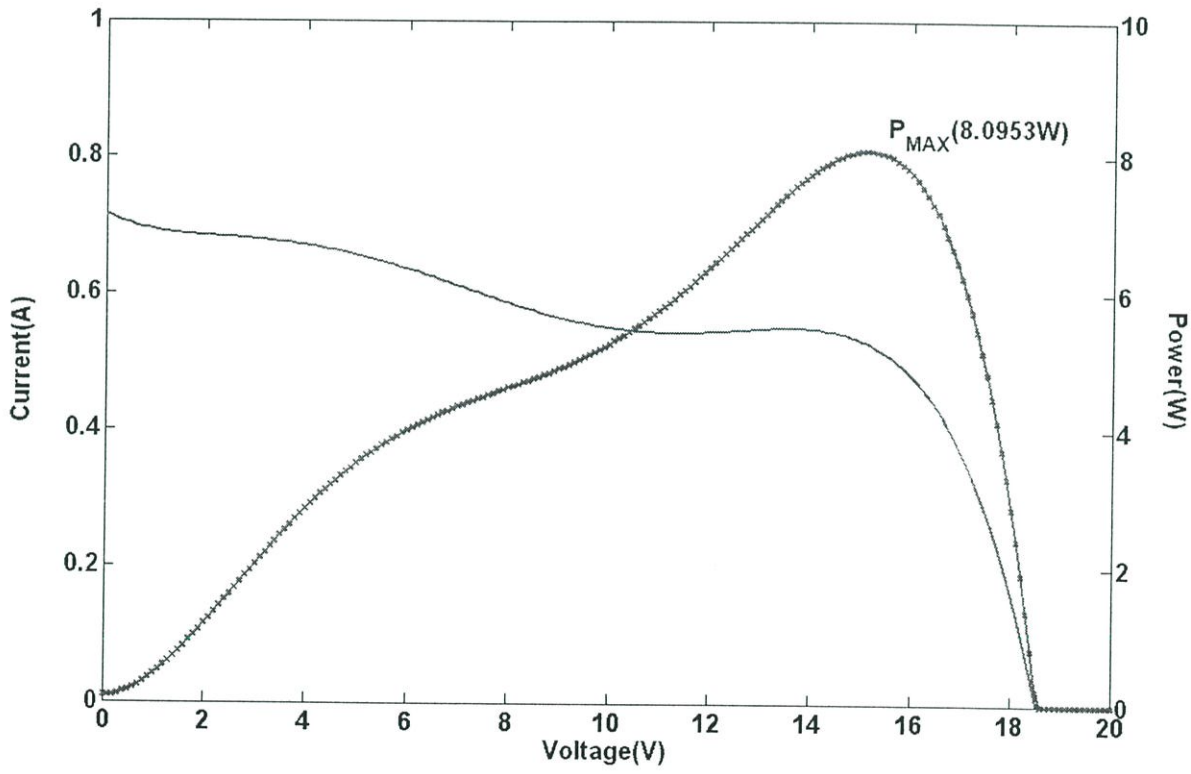
ผลการทดสอบตอนที่ 2 ครั้งที่ 1 เมื่อทดสอบแผงเดี่ยว



(ก)



(ข)



(ค)

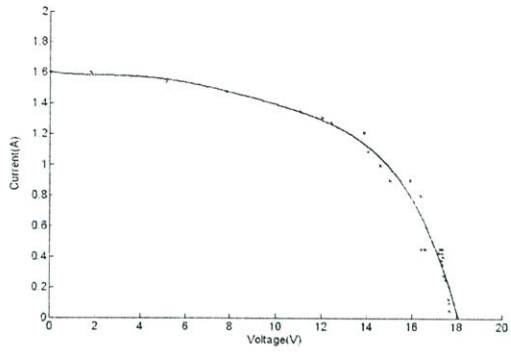
รูปที่ 4.34 กราฟคุณลักษณะกระแส-กำลัง-แรงดันของแผงโซลาร์เซลล์ 1 แผง
วันที่ 29 ก.ค. 2546 เวลา 15.55 น. T = 48°C (ความเข้มแสงน้อย-มีเมฆ)

(ก) คุณลักษณะกระแส-แรงดัน

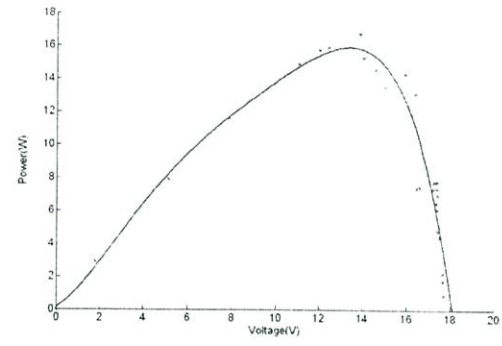
(ข) คุณลักษณะกำลัง-แรงดัน

(ค) คุณลักษณะกระแส-กำลัง-แรงดัน

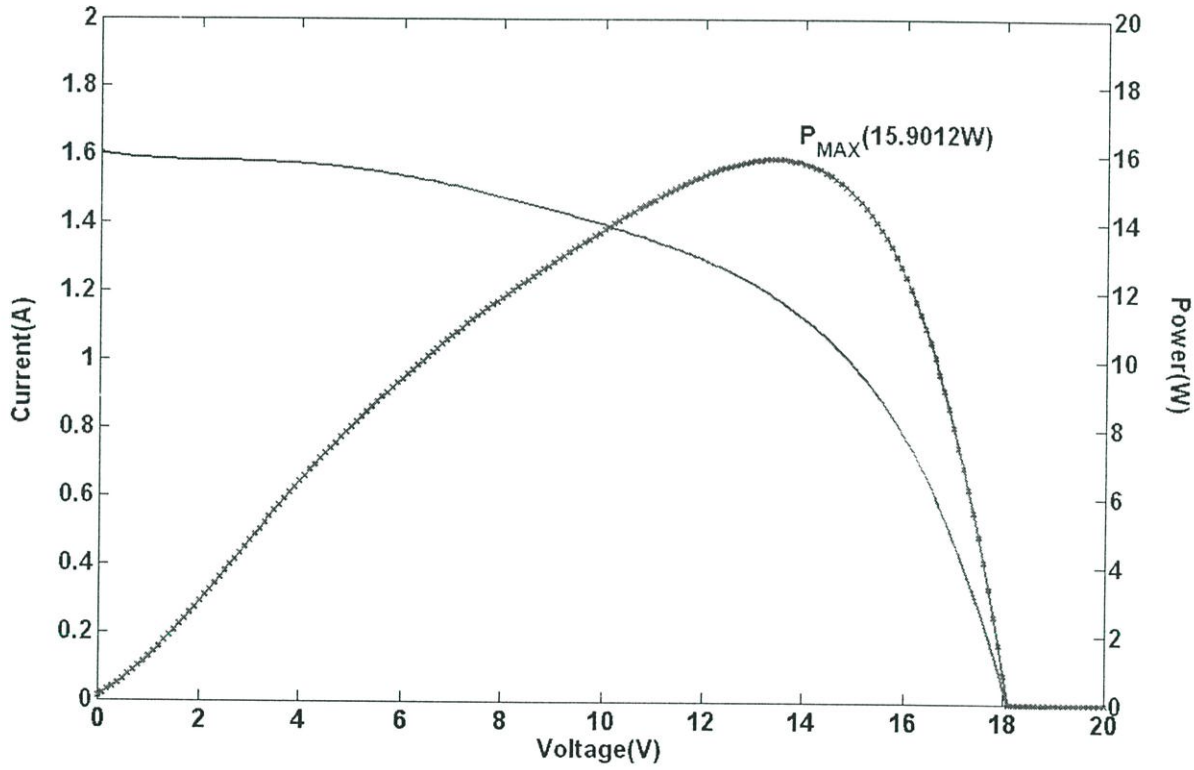
ผลทดสอบตอนที่ 2 ครั้งที่ 1 ต่อแผงโซลาร์เซลล์แบบขนาน



(ก)



(ข)



(ค)

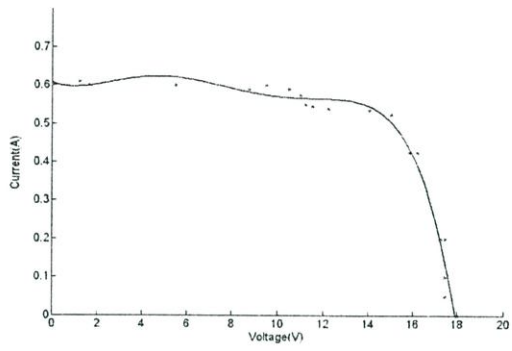
รูปที่ 4.35 กราฟคุณลักษณะกระแส-กำลัง-แรงดันของแผงโซลาร์เซลล์ 2 แผง ต่อแบบขนาน วันที่ 29 ก.ค. 2546 เวลา 15:55 น. T = 48°C (ความเข้มแสงน้อย-มีเมฆ) ทดสอบพร้อมกับรูปที่ 4.34

(ก) คุณลักษณะกระแส-แรงดัน

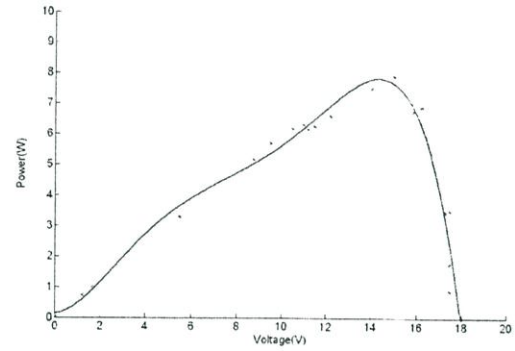
(ข) คุณลักษณะกำลัง-แรงดัน

(ค) คุณลักษณะกระแส-กำลัง-แรงดัน

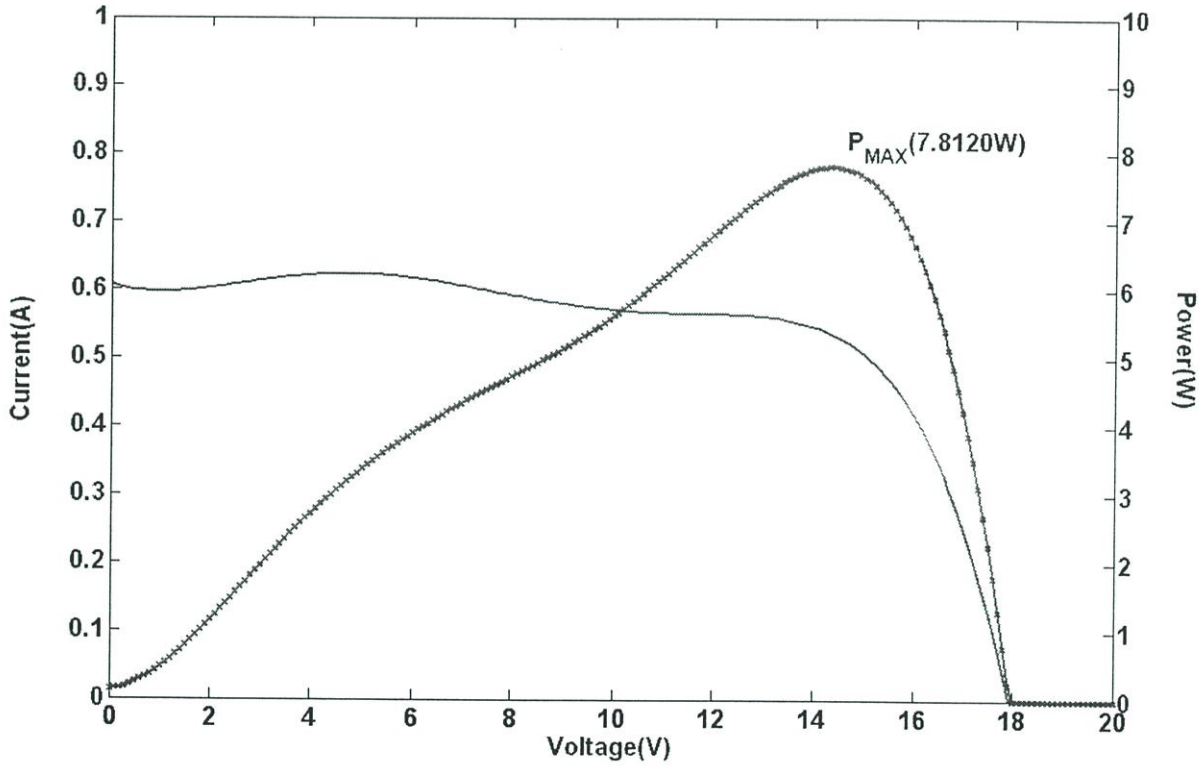
ผลการทดสอบตอนที่ 2 ครั้งที่ 2 เมื่อทดสอบแผงเดี่ยว



(ก)



(ข)



(ค)

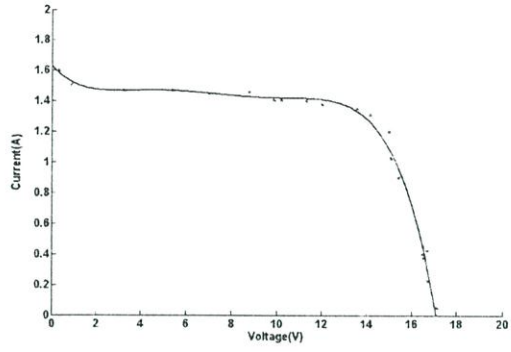
รูปที่ 4.36 กราฟคุณลักษณะ กระแส-กำลัง-แรงดันของแผงโซลาร์เซลล์ 1 แผง
วันที่ 29 ก.ค. 2546 เวลา 16.08 น. T = 48°C (ความเข้มแสงน้อย-มีเมฆ)

(ก) คุณลักษณะกระแส-แรงดัน

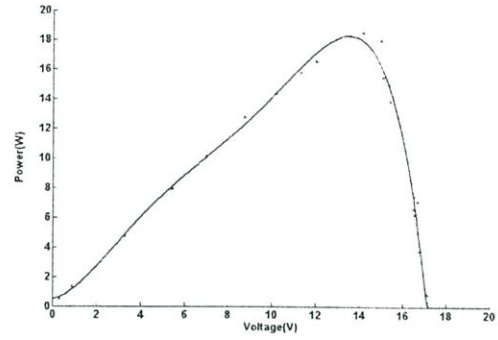
(ข) คุณลักษณะกำลัง-แรงดัน

(ค) คุณลักษณะกระแส-กำลัง-แรงดัน

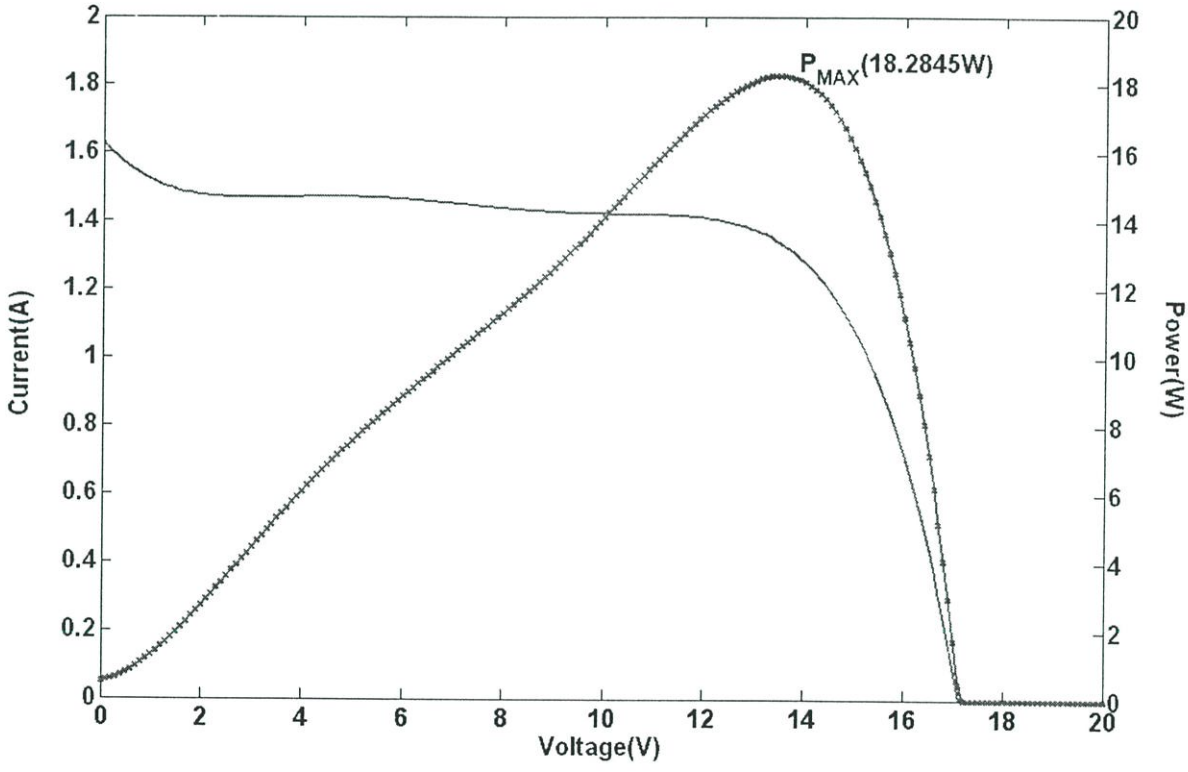
ผลทดสอบตอนที่ 2 ครั้งที่ 2 ต่อแผงโซลาร์เซลล์แบบขนาน



(ก)



(ข)



(ค)

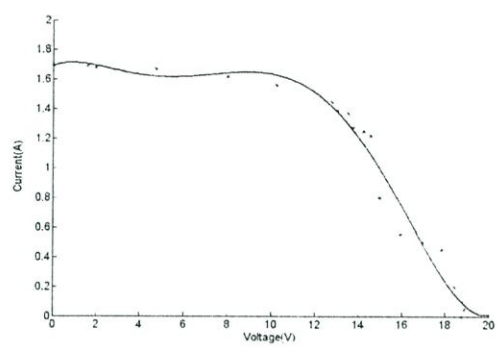
รูปที่ 4.37 กราฟคุณลักษณะกระแส-กำลัง-แรงดันของแผงโซลาร์เซลล์ 2 แผง ต่อแบบขนาน วันที่ 29 ก.ค. 2546 เวลา 16:08 น. T = 48°C (ความเข้มแสงน้อย-มีเมฆ) ทดสอบพร้อมกับรูปที่ 4.36

(ก) คุณลักษณะกระแส-แรงดัน

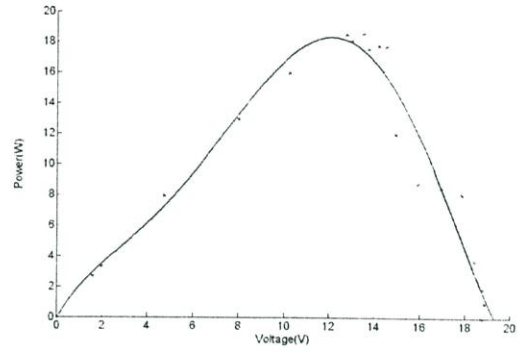
(ข) คุณลักษณะกำลัง-แรงดัน

(ค) คุณลักษณะกระแส-กำลัง-แรงดัน

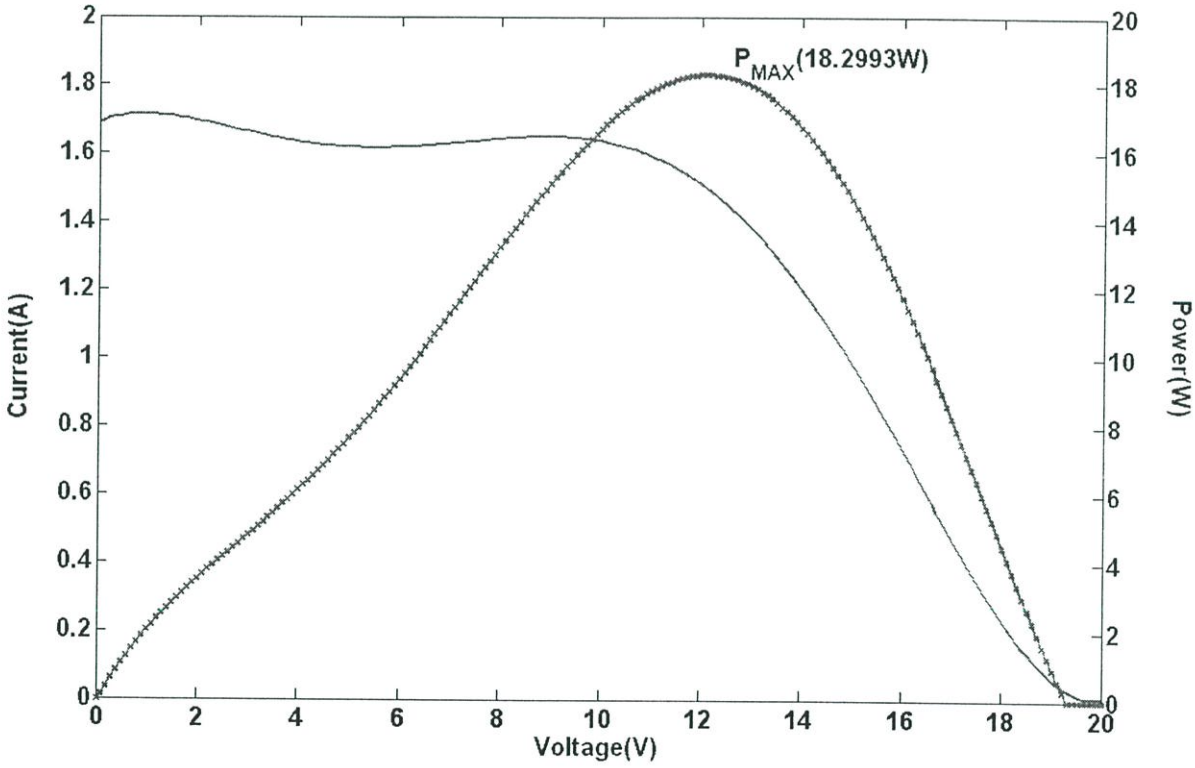
ผลการทดสอบตอนที่ 2 ครั้งที่ 3 เมื่อทดสอบแผงเดี่ยว



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.38 กราฟคุณลักษณะกระแส-กำลัง-แรงดันของแผงโซลาร์เซลล์ 1 แผง

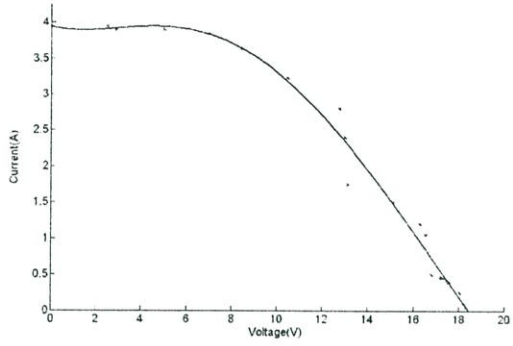
วันที่ 29 ก.ค. 2546 เวลา 16:17 น. T = 50°C (ไม่มีเมฆ)

(ก) คุณลักษณะกระแส-แรงดัน

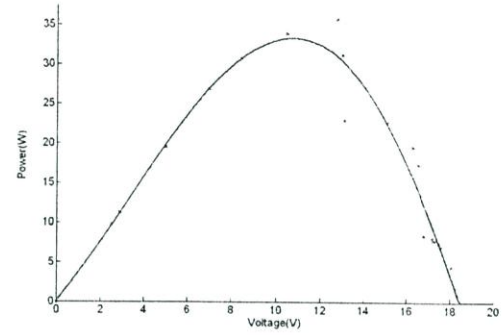
(ข) คุณลักษณะกำลัง-แรงดัน

(ค) คุณลักษณะกระแส-กำลัง-แรงดัน

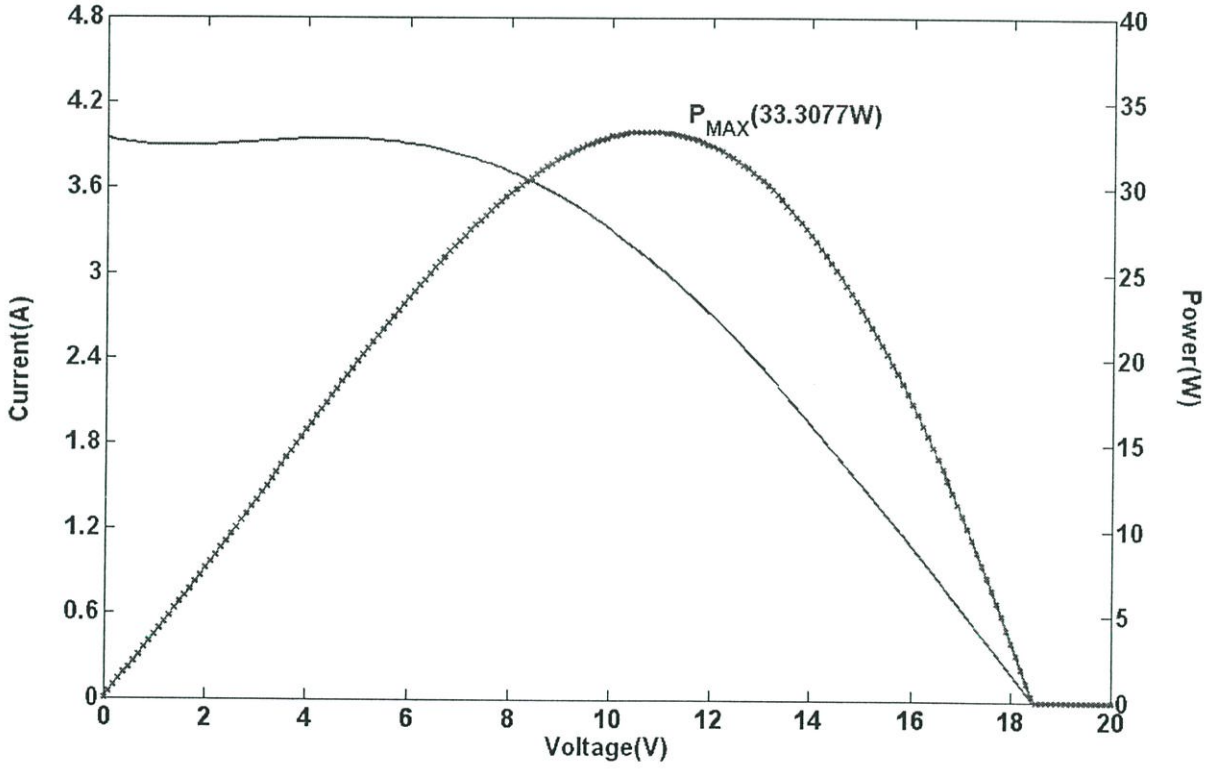
ผลทดสอบตอนที่ 2 ครั้งที่ 3 ต่อแผงโซลาร์เซลล์แบบขนาน



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.39 กราฟคุณลักษณะกระแส-กำลัง-แรงดันของแผงโซลาร์เซลล์ 2 แผง ต่อแบบขนาน วันที่ 29 ก.ค. 2546 เวลา 16:17 น. T = 50°C (ไม่มีเมฆ) ทดสอบพร้อมกับรูปที่ 4.38

(ก) คุณลักษณะกระแส-แรงดัน

(ข) คุณลักษณะกำลัง-แรงดัน

(ค) คุณลักษณะกระแส-กำลัง-แรงดัน

4.5.6 บทวิเคราะห์การทดสอบ

จากการทดสอบเพื่อหาค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้เปรียบเทียบกันระหว่างการต่อใช้งานแผงโซลาร์เซลล์แบบอนุกรม และการต่อแผงโซลาร์เซลล์แบบขนาน จากการทดสอบตอนที่ 1 และตอนที่ 2 ได้ค่าสอดคล้องกันคือการต่อใช้งานจากทั้ง 2 กรณีให้ค่ากำลังไฟฟ้าที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดมากกว่า การใช้งานแผงเดี่ยวประมาณ 2 เท่าเหมือนกัน

การใช้งานแบบอนุกรมให้ระดับแรงดันเป็น 2 เท่า แต่สามารถจ่ายกระแสได้ใกล้เคียงการใช้งานเพียงแผงเดียว ส่วนการใช้งานแบบขนานให้ผลตรงกันข้าม ดังนั้นเมื่อหาผลรวมของกำลังไฟฟ้าของการต่อใช้งานในทั้ง 2 ลักษณะจึงให้ผลสอดคล้องกัน ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบในหัวข้อนี้สามารถนำมาใช้เป็นการตัดสินใจออกแบบ และเลือกใช้รูปแบบการต่อใช้งาน ตัวอย่างเช่น

หากระบบที่ต้องการออกแบบเป็นการอัดประจุให้กับแบตเตอรี่ ซึ่งมีแรงดันอัดประจุตั้งแต่ 1.75-2.6V/Cell หรือแรงดันแบตเตอรี่ 10.5-15.6V จากกราฟรูปที่ 4.35, รูปที่ 4.37 และรูปที่ 4.39 ซึ่งเป็นการต่อแผงแบบขนาน พิจารณาจุดที่ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่เปลี่ยนแปลงไปตามความเข้มแสง และปัจจัยอื่นๆ โดยการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวอยู่ในช่วงแรงดัน 11- 14V เนื่องจากแรงดันในการอัดประจุแบตเตอรี่ต้องมีลักษณะแปรผันตามปริมาณพลังงานที่สะสมอยู่ในแบตเตอรี่หมายถึงแรงดันในการอัดประจุเพิ่มขึ้นจากการเพิ่มขณะอัดประจุจาก 10.5V-15.6V อย่างช้าๆ โดยค่ากระแสอัดประจุเปลี่ยนแปลงไปปริมาณมากเมื่อแรงดันเปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อยดังแสดงในรูปที่ 1.1(4) นอกจากนี้ผลของความต้านทานภายในแบตเตอรี่(มีค่าระหว่าง 0.1-0.2Ω สำหรับแบตเตอรี่แบบตะกั่ว-กรด)[41] ก็มีผลต่อค่ากระแสอัดประจุด้วยเช่นกัน ดังนั้นหากต้องการควบคุมแรงดันการอัดประจุให้มีลักษณะสอดคล้องกับการอัดประจุที่ถูกต้องกับการต่อใช้งานแผงแบบขนานนั้น MPPT คอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ต้องมีความสามารถในการปรับแรงดันได้ทั้ง ขึ้น-ลง(Buck-Boost Converter) ซึ่งมีข้อเสียคือมีประสิทธิภาพต่ำ และราคาในการลงทุนค่อนข้างสูงจึงควรเลือกใช้งาน MPPT คอนเวอร์เตอร์ที่มีลักษณะเป็นแบบแปลงแรงดันลง หรือ Buck Converter เนื่องจากมีการออกแบบที่ง่ายกว่า ราคาถูกกว่า และมีแนวโน้มของประสิทธิภาพสูงกว่า Buck-Boost Converter เมื่อพิจารณา รูปที่ 4.27, รูปที่ 4.29 และรูปที่ 4.31 เพื่อหาค่าแรงดันที่ให้ค่ากำลังงานไฟฟ้าสูงสุด หรือ MPP ได้ค่าแรงดันมีค่าระหว่าง 25-30V ซึ่งเป็นทิศทางเดียวกันคือสามารถนำหลักการของ Buck Converter มาใช้งานได้ และหากไม่คิดค่าแรงดันสูญเสียเนื่องจากแรงดันตกคร่อมอุปกรณ์ต่างๆ ในวงจรแล้ว MPPT คอนเวอร์เตอร์ที่ใช้จะมีการปรับดิวตี้ไซเคิลโดยประมาณระหว่าง 30%-78% ก็เป็นดิวตี้ไซเคิลที่เลือกใช้อุปกรณ์ประกอบวงจรขยายสัญญาณพัลส์ได้ง่ายเพราะอุปกรณ์บางรุ่นมีขีดจำกัดของการให้เอาท์พุทที่ดิวตี้ไซเคิลที่มีค่าต่ำ และสูงเกินไป(0%-10% และ/หรือ 90-100%)

แนวทางในการเลือกใช้งาน MPPT คอนเวอร์เตอร์ในงานวิจัยนี้ก็อาศัยหลักการดังกล่าวข้างต้นเป็นหลักการพิจารณาเลือก Buck คอนเวอร์เตอร์เป็นวงจรแปลงแรงดันสำหรับอัดประจุแบตเตอรี่ซึ่งเป็นโหลดภาระของระบบ

4.6 การทดสอบพลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นเมื่อใช้ MPPT คอนเวอร์เตอร์

4.6.1 หลักการและเหตุผล

จากการทดสอบประสิทธิภาพของคอนเวอร์เตอร์ตามหัวข้อการทดสอบที่ 4.2 และ 4.3 แล้วยังจำเป็นต้องทดสอบประสิทธิภาพของ MPPT คอนเวอร์เตอร์ ภายใต้สภาวะการใช้งานร่วมกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์จริงเปรียบเทียบกับการใช้แบตเตอรี่ชาร์จเจอร์โดยทั่วไปด้วยเพื่อหาค่าพลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นจากการใช้ MPPT คอนเวอร์เตอร์ ในที่นี้เลือกทดสอบเปรียบเทียบกับ ECU (Electrical Control Unit) ที่ทำงานแบบ LVCU ตามที่อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 2.6.3 (คุณสมบัติ, วงจรของ ECU แสดงในภาคผนวก)

4.6.2 ทฤษฎีอ้างอิงและหลักการที่เกี่ยวข้อง

จากหลักการทำงานของ MPPT คอนเวอร์เตอร์ดังที่ได้อธิบายไว้แล้วในบทที่ 1 และบทที่ 3 คือ การทำงานภายใต้สภาวะแสงอาทิตย์จริงบนพื้นผิวโลกที่อาจมีความเปลี่ยนแปลงได้ตามสภาพชั้นบรรยากาศ และปัจจัยทางภูมิอากาศในแต่ละช่วงเวลา ในที่นี้จัดการทดสอบในวันที่ 30 กรกฎาคม 2546 ซึ่งมีมุม d = 18.67 องศา ค่าความเข้มรังสีตรงในช่วงเวลาต่างๆของวันได้จากสมการที่ (2.27) ปริมาณสำคัญทั้งหมดที่คำนวณได้จากสมการที่ (2.10), (2.11), (2.16) และ (2.27) แสดงตามตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ตารางแสดงปริมาณที่สำคัญต่างๆ เพื่อประมาณการความเข้มรังสีในวันที่ 30 กรกฎาคม 2546

เวลา:	5.29	6.29	7.29	8.29	9.29	10.29	12.00	13.31	14.31	15.31	16.31	17.31	18.31
มุมเวลา(องศา):	94.6	79.6	64.6	49.6	34.6	19.6	0	19.6	34.6	49.6	64.6	49.6	94.6
ปริมาณที่สำคัญ:													
θ_h (องศา)	85.8	71.9	57.7	43.5	29.3	15.4	5.4	15.4	29.3	43.5	57.7	71.9	85.8
$\sec\theta_h$	13.63	3.20	1.90	1.40	1.10	1.04	1.00	1.04	1.10	1.40	1.90	3.2	13.63
$N(H,231)$ (W/m^2)	3.9	341.0	605.2	748.0	826.3	866.2	878.4	866.2	826.3	748.0	605.2	641.0	3.9
θ_T (องศา)	81.3	68.4	55.3	42.1	29.1	16.7	9.6	16.7	29.1	42.1	55.3	68.4	81.3
ϕ_h (องศา)	71.8	74.4	76.1	76.7	75.4	67.4	0	337.4	345.4	346.7	346.1	344.4	341.8
ϕ_n *(องศา)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
θ_n *(องศา)	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15

*เมื่อ θ_n = มุมเอียงคือ 15°และ $\phi_n = 0^\circ$ (เมื่อหน้าแผงหันไปทางทิศเหนือ) ; สัญลักษณ์ T คือระนาบเอียง, h คือแนวราบ และ n คือเส้นตั้งฉากกับระนาบรับพลังงาน

จากสมการที่ (2.17) เมื่อพิจารณาให้อัตราส่วนรังสีตรง (D) ที่ระนาบเอียง T องศาเทียบกับรังสีตรงที่ตกกระทบในแนวราบ มีค่าเท่ากับ $\frac{\cos\theta_T}{\cos\theta_h}$ หากสมมติให้มีปริมาณรังสีกระจาย (F) มายังระนาบรับพลังงานประมาณ 15% ของปริมาณรังสีรวมที่ระนาบในช่วงเวลานั้นๆ ให้ปริมาณรังสีรวมเป็น G

(Global Irradiance) หรือ I ตามสมการที่ (2.29) จากปริมาณความเข้มรังสีที่คำนวณได้จากตารางที่ 4.7 สามารถแยกเป็นปริมาณความเข้มรังสีส่วนต่างๆในแต่ละช่วงเวลา ได้ดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ปริมาณความเข้มรังสีตรง, รังสีกระจาย และปริมาณที่สำคัญด้านกำลังไฟฟ้าอย่างอื่นในวันที่ 30 กรกฎาคม 2546 ที่ได้จากการคำนวณ

เวลา:	5.29	6.29	7.29	8.29	9.29	10.29	12.00	13.31	14.31	15.31	16.31	17.31	18.31
ปริมาณที่สำคัญ:													
N (W/m^2)	3.9	341.0	605.2	748.0	826.3	866.2	878.4	866.2	826.3	748.0	605.2	641.0	3.9
G_h (I_h)(W/m^2)	0.3	124.6	380.2	638.3	848.0	983.0	1029.4	983.0	848.0	638.3	380.2	124.6	0.3
F_h(W/m^2)	0.0	18.7	57.0	95.8	127.2	147.4	154.4	147.4	127.2	95.8	57.0	18.7	0.0
D_h (W/m^2)	0.3	105.9	323.1	542.6	720.8	835.5	875.0	835.5	720.8	542.6	323.1	105.9	0.3
G_T (W/m^2)	0.6	146.4	403.9	651.6	849.1	975.2	1018.4	975.2	849.1	651.6	403.9	146.4	0.6
F_T (W/m^2)	0.1	22.0	60.6	97.7	127.4	146.3	152.8	146.3	127.4	97.7	60.6	22.0	0.1
D_T (W/m^2)	0.5	124.5	343.3	553.9	721.7	828.9	865.7	828.9	721.7	553.9	343.3	124.5	0.5
A*(W)	0.0	10.5	29.1	46.9	61.1	70.2	73.3	70.2	61.1	46.9	29.1	10.5	0.0
B*(W)	0.0	8.0	21.8	35.2	45.9	52.7	55.0	52.7	45.9	35.2	21.8	8.0	0.0
C*(W)	0.0	6.3	17.3	27.9	36.4	41.8	43.7	41.8	36.4	27.9	17.3	6.3	0.0

*เมื่อ A = กำลังไฟฟ้าที่แผงโซลาร์เซลล์ 0.9 m^2 สามารถผลิตได้ โดยคิดอัตราการแปลงพลังงานที่ 8% ของ G_T

B = กำลังไฟฟ้าที่ได้จากระบบที่ใช้ MPPT คอนเวอร์เตอร์ เมื่อคิดค่าประสิทธิภาพที่ 75%

C = กำลังไฟฟ้าของระบบที่ใช้แบตเตอรี่ชาร์จเจอร์เมื่อพิจารณาที่แรงดันอัดประจุคงที่ 12.5V และประสิทธิภาพของชาร์จเจอร์ 90% โดยประมาณการให้กระแสที่จุดแรงดัน 12.5V-จุด MPP เปลี่ยนแปลงแบบเชิงเส้น

สัญลักษณ์ T คือระนาบเอียง, h คือแนวราบ

จากตารางสามารถประมาณได้ว่าวันที่ทดสอบหากมีอากาศแจ่มใสตลอดทั้งวันจะมีพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากระบบที่ใช้ MPPT คอนเวอร์เตอร์มากขึ้น 45.0Wh โดยคำนวณจาก $\sum_{i=1}^{n} B_i t_i - \sum_{i=1}^{n} C_i t_i$ ตามตารางที่ 4.8 (กำหนด t = เวลา(H), n = จำนวนข้อมูล) หรือ 25.97% เมื่อเทียบกับการใช้ชาร์จเจอร์

เงื่อนไขการทดสอบ

1. เพื่อจัดให้ระบบที่ทดสอบมีปัจจัยทางสภาพดินฟ้าอากาศเหมือนกันจึงทดสอบที่ตำแหน่งแผงทำมุมเอียง 15° กับแนวราบ และหันหน้าแผงไปทางทิศเหนือเหมือนกัน ทดสอบที่วัน เวลาเดียวกัน

2. สำหรับการควบคุมอิทธิพลที่มีผลจากการวัด และการแปลงพลังงานไฟฟ้า ควบคุมโดยการใช้แผงโซลาร์เซลล์ชนิดเดียวกันใช้เครื่องมือวัดที่มีมาตรฐานเหมือนกัน รวมทั้งแบตเตอรี่ที่ใช้ก็มีขนาดเท่ากัน นอกจากนี้ก่อนที่ทำการทดสอบแบตเตอรี่จะถูกปล่อยประจุออกจนหมดเหมือนๆกันเพื่อพยายามกำจัดความแตกต่างเกี่ยวกับความต้านทานภายในแบตเตอรี่

4.6.3 การเตรียมอุปกรณ์ทดสอบ

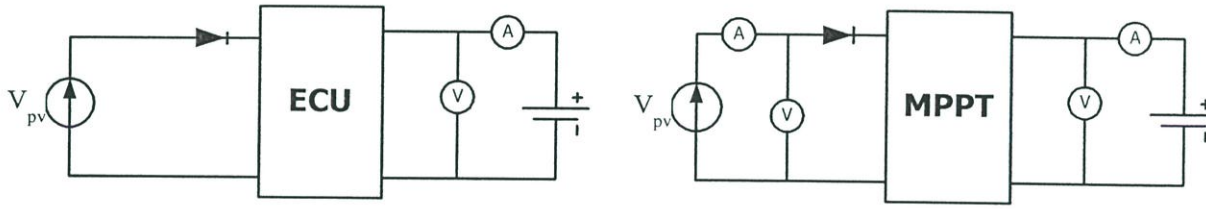
<u>รายการอุปกรณ์</u>

1. แผงโซลาร์เซลล์รุ่น BPTS1255HP	จำนวน	4	แผง
2. แอมป์มิเตอร์	จำนวน	2	เครื่อง
3. โวลท์มิเตอร์	จำนวน	2	เครื่อง
4. แบตเตอรี่ 65 Ah	จำนวน	2	ลูก
5. เทอร์โมมิเตอร์	จำนวน	1	เครื่อง
6. บารอมิเตอร์	จำนวน	1	เครื่อง

<u>หมายเหตุ</u> ตรวจดูรูปอุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ได้ในภาคผนวก

4.6.4 หัวข้อการทดสอบ

ทดสอบเปรียบเทียบกำลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นจากระบบที่ใช้ MPPT คอนเวอร์เตอร์เทียบกับระบบที่ใช้แบตเตอรี่ชาร์จเจอร์ปกติ (ECU)

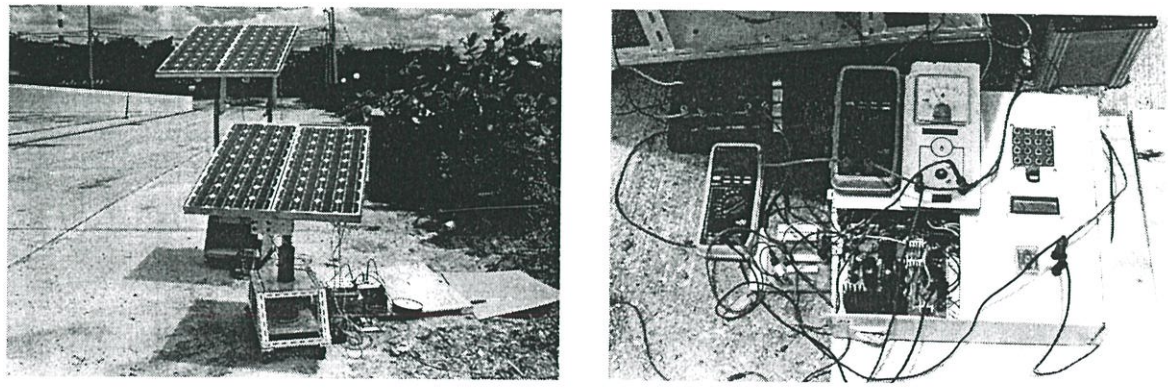


(ก) (ข)

รูปที่ 4.40 วงจรที่ใช้ในการทดสอบตามหัวข้อที่ 4.6.4

(ก) ระบบที่ใช้ ECU เป็นแบตเตอรี่ชาร์จเจอร์กับแผงโซลาร์เซลล์ต่อแบบขนานกัน 2 แผง

(ข) ระบบที่ใช้ MPPT คอนเวอร์เตอร์กับแผงโซลาร์เซลล์ต่ออนุกรมกัน 2 แผง



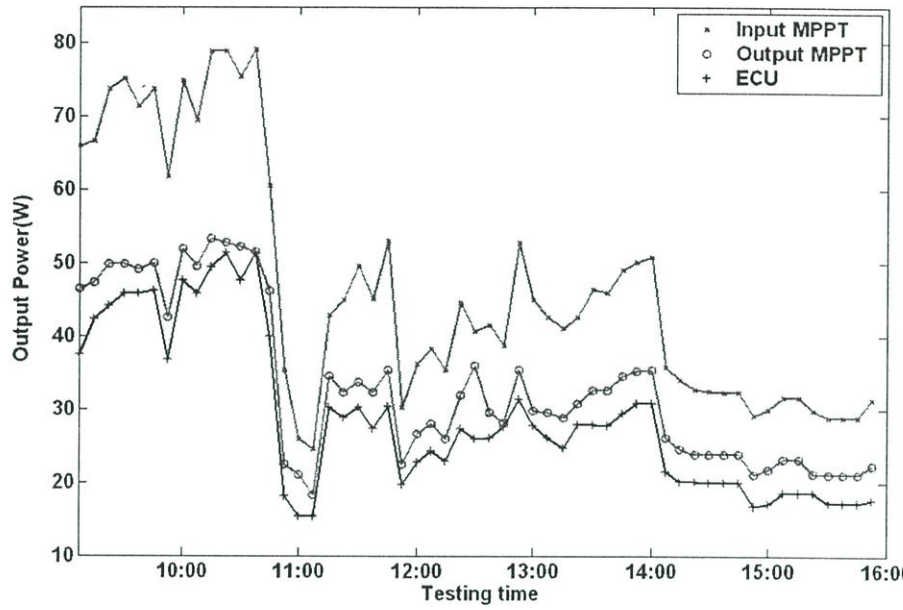
(ก) (ข)

รูปที่ 4.41 ขณะทำการทดสอบ และเครื่องมือวัดที่ใช้กับ MPPT คอนเวอร์เตอร์

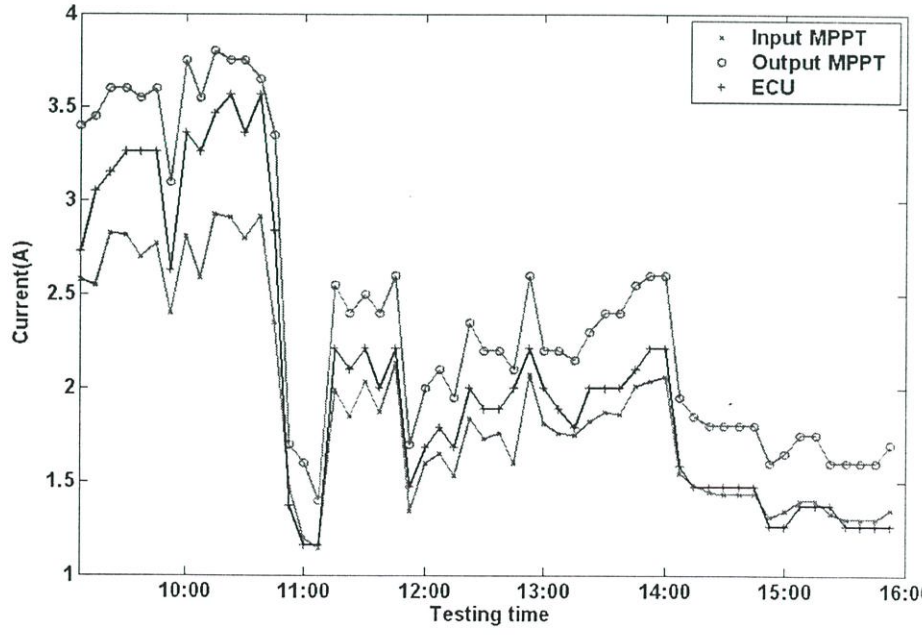
(ก) การตั้งแผงทดสอบที่มุมเอียงเท่าๆกัน (ข) เครื่องมือวัดที่ใช้กับ MPPT คอนเวอร์เตอร์

4.6.5 ผลการทดสอบ

ต่อวงจรดังรูปที่ 4.40 เพื่อทดสอบวัดค่ากระแส และแรงดันทุกๆ 7-8 นาทีบันทึกผลที่ทดสอบได้ทั้งกระแส แรงดัน อุณหภูมิ และความดันอากาศของสิ่งแวดล้อมในขณะที่ทดสอบ แสดงผลการทดสอบได้ดังกราฟรูปที่ 4.42-รูปที่ 4.43 ทดสอบวันที่ 30 กรกฎาคม 2546



รูปที่ 4.42 เปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าในช่วงเวลาที่ทดสอบจากทั้งสองระบบ อุณหภูมิภายนอกโดยเฉลี่ย 50°C ความดันอากาศ 758.5mmHg



รูปที่ 4.43 เปรียบเทียบกระแสไฟฟ้าในช่วงเวลาที่ทดสอบจากทั้งสองระบบ อุณหภูมิภายนอกโดยเฉลี่ย 50°C ความดันอากาศ 758.5mmHg

คำนวณพื้นที่ใต้กราฟของพลังงานไฟฟ้าตามรูปที่ 4.42 พลังงานไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นจากการใช้ MPPT คอนเวอร์เตอร์ประมาณ 30.66Wh-1.68Wh = 28.98Wh คิดเป็น 13.68% เทียบกับการใช้ ECU เมื่อ1.68Wh คือค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียจากไฟเลี้ยงวงจร สำหรับพลังงานไฟฟ้าที่ได้จาก MPPT คอนเวอร์เตอร์มีค่าเป็น 242.48Wh โดย MPPT คอนเวอร์เตอร์ทำงานที่ประสิทธิภาพ 72.02% แนวโน้มที่ได้จากการคำนวณที่แสดงไว้ในตารางที่ 4.8 ได้ค่าพลังงานไฟฟ้าที่คำนวณจาก $\sum_{i=1}^{n} B_i t_i$ เท่ากับ 325Wh เฉพาะช่วงเวลาเดียวกับที่มีการทดสอบคือเวลา 900น.-16.00น. ซึ่งเป็นค่ามากที่สุดเมื่อมีอากาศแจ่มใสตลอดวันเวลาที่ทดสอบดังนั้นพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบ MPPT คอนเวอร์เตอร์จริงคิดเป็น 74.61% เมื่อเทียบกับพลังงานไฟฟ้ามากที่สุดจากการคำนวณในช่วงเวลาเดียวกับการทดสอบ

4.6.6 บทวิเคราะห์การทดสอบ

สำหรับการพิจารณาในแง่ของกระแสควบคู่กับกำลังไฟฟ้าด้วยนั้นเพื่อแสดงให้เห็นว่าสำหรับโหลดแบตเตอรี่ความสำคัญของปริมาณที่นำไปใช้ในการจ่ายพลังงานจริงๆคือความจุของแบตเตอรี่ในหน่วยแอมป์ชั่วโมง (Ah) ส่วนปริมาณแรงดันที่มากขึ้น (ทำให้กำลังไฟฟ้ามากขึ้น) ขณะอัดประจุเป็นผลมาจากการเพิ่มการทำปฏิกิริยาของเซลล์ภายในแบตเตอรี่เมื่อมีการอัดประจุมากขึ้นไม่มีผลต่อประจุที่เก็บสะสมในแบตเตอรี่มากนัก เพราะขณะอัดประจุถึงจะมีแรงดันสูง แต่ปริมาณกระแสที่เข้าไปเก็บไว้ในแบตเตอรี่นั้นจะมากน้อยขึ้นกับปริมาณกระแสที่ไหลลงสู่แบตเตอรี่มากกว่า แต่อย่างไรก็ดีขณะที่ทำการอัดประจุแบตเตอรี่โดยเพิ่มแรงดันอัดประจุให้ที่ละน้อยนั้นค่ากระแสที่ไหลสู่แบตเตอรี่ก็จะค่อยๆเพิ่มขึ้นด้วย ทั้งนี้เพราะแรงดันที่มากขึ้นมีส่วนช่วยในการทำปฏิกิริยาเคมีภายในทำให้มีการทำปฏิกิริยาที่ไวมากขึ้นกระแสที่ไหลสู่แบตเตอรี่จึงมากขึ้นด้วย สัดส่วนของการเพิ่มแรงดัน-กระแสดังกล่าวกำหนดโดยชนิด ขนาด ประเภท รวมทั้งองค์ประกอบที่เป็นข้อมูลจากผู้ผลิต ดังนั้นหากมีความสัมพันธ์ของแรงดัน-กระแสของการอัดประจุ และคายประจุสำหรับแบตเตอรี่ที่แน่นอนก็สามารถประมาณการค่าความจุได้แม่นยำมากขึ้น แต่จากผลการทดสอบก็เป็นเครื่องพิสูจน์แล้วว่าระบบที่ใช้ MPPT คอนเวอร์เตอร์ตามที่ได้ออกแบบไว้ช่วยเพิ่มพลังงานไฟฟ้าโดยเฉลี่ยประมาณ 13.68%ต่อวัน และเพิ่มปริมาณกระแสอัดประจุประมาณ 2.52Ah-0.14Ah = 2.38Ah คิดเป็น 15.58%ต่อวัน สำหรับวันที่ทำการทดสอบ

4.7 การทดสอบพลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นเมื่อใช้ระบบติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์

4.7.1 หลักการและเหตุผล

ระบบติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์ที่ใช้ในปัจจุบันนั้นมีมากมายหลายลักษณะตามที่อธิบายในบทที่ 3 ดังนั้นการทดสอบในหัวข้อนี้จึงมีเป้าหมายเพื่อหาคำตอบที่แน่นอนจากด้านพลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นของการปรับมุมเอียง และการเคลื่อนหมุนแผงในลักษณะต่างๆ รวมทั้งเวลาที่ควรเริ่มต้น และหยุดในแต่ละวันกับช่วงเวลาที่ควรมีการเคลื่อนหมุนเพื่อติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์ โดยพิจารณาความคุ้มค่าของพลังงานไฟฟ้าที่มากขึ้นต่อพลังงานที่เสียไป

4.7.2 ทฤษฎีอ้างอิงและหลักการที่เกี่ยวข้อง

ความเข้มแสงในช่วงเวลาต่างๆ รวมทั้งความเข้มแสงเฉลี่ยในแต่ละวันนั้นสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.27) หากกำหนดให้สัมประสิทธิ์การลดทอน $\overline{\beta}$ มีค่าประมาณ 0.43 (จากการคำนวณในรูปที่ 2.29) สำหรับวันที่อากาศแจ่มใสไม่มีเมฆในที่นี้ทำการทดสอบในวันที่ 1,2 และ 6 สิงหาคม 2546 ที่เขตลาดกระบังกรุงเทพมหานคร มีมุมละติจูด 13.25′ เหนือ และมุมดิคลิเนชั้น d คือ 17.91°, 17.65° และ 16.55° สำหรับวันที่ 1,2 และ6 ตามลำดับ จากสมการที่ (2.13) เวลาของดวงอาทิตย์ในวันที่ทดสอบยาวนานประมาณ 12.58 ชั่วโมง (ใกล้เคียงกันทั้ง 3 วัน) หรืออาจประมาณได้ว่าเวลาที่ดวงอาทิตย์ขึ้น-เวลาที่ดวงอาทิตย์ตก คือ 5.31น. และ 18.29น. เมื่อใช้ค่าชดเชยทางเวลาร่วมกับสมการที่ (2.6) เวลาที่ดวงอาทิตย์ขึ้น-ดวงอาทิตย์ตกตามเวลาท้องถิ่นคือ 5.37.17น. และ 18.35.17น. ตามลำดับ หากต้องการหาปริมาณความเข้มรังสีในแต่ละเวลาในวันที่ทดสอบก็สามารถคำนวณได้โดยการหามุมที่สำคัญต่อระนาบรับพลังงานแสงที่ติดตั้งในมุมต่างๆ สำหรับระบบที่ทำการทดสอบแบ่งการติดตั้งมีดังนี้

1. ระบบที่ใช้เป็นระบบอ้างอิงในการเปรียบเทียบจะติดตั้งแผงทำมุมเอียง 15° กับแนวราบโดยหันหน้าแผงไปทางทิศเหนือ
2. ส่วนระบบที่มีการติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์แบบ 1 แกนแบ่งรายละเอียดได้ดังนี้
   2.1 ระบบที่ติดตามตำแน่งดวงอาทิตย์แบบเคลื่อนหมุนตามมุม Azimuth หรือ Polar E-W Tracker เพียงแกนเดียว จะติดตั้งแผงทำมุม 15° กับแนวราบ (θ_n) ส่วนหน้าแผงจะหันตามมุม Azimuth $(\phi_h = \phi_n)$
   2.2 ระบบที่ติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์โดยปรับมุมเอียงของแผงเมื่อเทียบกับแนวราบของแกนทิศตะวันออก-ตะวันตกเพียงอย่างเดียว ดังนั้นมุมเอียงของแผงจะไม่คงที่ขึ้นกับแนวโคจรของดวงอาทิตย์ $(\theta_n = T)$ และหน้าแผงจะหันทิศตะวันออกในตอนเช้า-เที่ยง $(\phi_h = 90°)$ และหันไปทางทิศตะวันตกตั้งแต่เที่ยงจนกระทั่งดวงอาทิตย์ตกดิน $(\phi_h = 270°)$
3. ระบบที่มีการติดตามดวงอาทิตย์ทั้ง 2 แกน โดยมีทั้งการปรับหน้าแผงระนาบรับพลังงานตามมุม Azimuth $(\phi_h = \phi_n)$ และปรับมุมเอียงของแผงด้วย $(\theta_n = T)$

อาศัยสมการที่ (2.10), (2.11), (2.16) และสมการที่ (2.27) คำนวณปริมาณความเข้มรังสี และปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ตกกระทบระนาบรับพลังงานที่มีการติดตั้งในหลายรูปแบบดังกล่าว แสดงไว้ในตาราง 4.9 พลังงานไฟฟ้าที่ควรจะได้จากระบบติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์ในแต่ละระบบมีดังนี้

1. ระบบที่มีการปรับการเคลื่อนหมุนแบบ Polar E-W Tracking เพียงแกนเดียวได้ค่าพลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 66.17Wh ต่อวันคิดเป็น 14.21% เมื่อเทียบกับระบบอ้างอิง
2. ระบบที่มีการปรับมุมเอียงของแผงตามแนวแกนตะวันออก-ตะวันตกเพียงแกนเดียว ได้ค่าพลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 116.68Wh ต่อวันคิดเป็น 25.05% เมื่อเทียบกับระบบอ้างอิง
3. ระบบติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์แบบ 2 แกน ได้ค่าพลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 134.42Wh ต่อวันคิดเป็น 28.90% เมื่อเทียบกับระบบอ้างอิง

ตารางที่ 4.9 ปริมาณความเข้มรังสีตรง, รังสีกระจาย และปริมาณที่สำคัญด้านพลังงานอย่างอื่นในวันที่ 1,2 และ 6 สิงหาคม 2546 ที่ได้จากการคำนวณ (สำหรับวันที่ 1 ส.ค. 2546 ยกเว้น A, B, C, D)

เวลา:	5.31	6.31	7.31	8.31	9.31	10.31	12.00	13.29	14.29	15.29	16.29	17.29	18.29
ปริมาณที่สำคัญ:													
N (W/m^2)	0.0	227.9	543.2	714.6	808.5	858.1	877.9	858.1	808.5	714.6	543.2	227.9	0.0
$G_h\ (I_h)$(W/m^2)	0.0	64.7	301.1	566.4	794.2	953.3	1026.6	953.3	794.2	566.4	301.1	64.7	0.0
F_h (W/m^2)	0.0	9.7	45.2	85.0	119.1	143.0	154.0	143.0	119.1	85.0	45.2	9.7	0.0
D_h (W/m^2)	0.0	55.0	256.0	481.4	675.1	810.3	872.6	810.3	675.1	481.4	256.0	55.0	0.0
G_T (W/m^2)	0.0	80.5	324.8	581.3	796.5	945.2	1013.5	945.2	796.5	581.3	324.8	80.5	0.0
F_T (W/m^2)	0.0	12.1	18.7	87.2	119.5	141.8	152.0	141.8	119.5	87.2	18.7	12.1	0.0
D_T (W/m^2)	0.0	68.4	276.1	494.1	677.0	803.4	861.4	803.4	677.0	494.1	276.1	68.4	0.0
G_{AZ} (W/m^2)	0.0	129.9	436.9	708.0	902.7	1006.8	1020.8	1006.8	902.7	708.0	436.9	129.9	0.0
F_{AZ} (W/m^2)	0.0	19.5	65.5	106.2	135.4	151.0	153.1	151.0	135.4	106.2	65.5	19.5	0.0
D_{AZ} (W/m^2)	0.0	110.4	371.3	601.8	767.3	855.8	867.7	855.8	767.3	601.8	371.3	110.4	0.0
G_{EW} (W/m^2)	0.0	233.7	583.2	794.1	921.1	994.1	1026.6	994.1	920.9	793.9	582.9	233.6	0.0
F_{EW} (W/m^2)	0.0	35.1	87.5	119.1	138.2	149.11	154.0	149.11	138.1	119.1	87.4	35.0	0.0
D_{EW} (W/m^2)	0.0	198.7	495.7	675.0	782.9	845.0	872.6	845.0	782.8	674.8	495.5	198.5	0.0
$G_{2\,Axis}$ (W/m^2)	0.0	240.9	593.0	801.2	925.3	996.5	1026.6	1009.5	951.1	840.8	639.1	268.1	0.0
$F_{2\,Axis}$ (W/m^2)	0.0	36.1	89.0	120.1	138.8	149.5	154.0	151.4	142.7	126.1	95.9	40.2	0.0
$D_{2\,Axis}$ (W/m^2)	0.0	204.8	504.1	681.0	786.5	847.0	872.6	858.1	808.1	714.6	543.2	227.9	0.0
A*(W) D_S =213	0.0	5.8	23.4	41.9	57.3	68.1	73.0	68.1	57.3	41.9	23.4	5.8	0.0
A*(W) D_S =214	0.0	5.8	23.4	41.9	57.3	68.0	72.9	68.0	57.3	41.9	23.4	5.8	0.0
A*(W) D_S =218	0.0	5.8	23.4	41.8	57.3	67.9	72.7	67.9	57.3	41.8	23.4	5.8	0.0
B*(W)	0.0	9.3	31.4	51.0	65.0	72.5	73.5	72.5	65.0	51.0	31.4	9.3	0.0
C*(W)	0.0	16.9	42.1	57.3	66.4	71.6	74.0	71.6	66.4	57.2	42.1	16.9	0.0
D*(W)	0.0	17.6	43.0	58.0	66.9	72.0	74.1	72.8	68.6	60.7	46.3	19.5	0.0

*เมื่อ A = กำลังไฟฟ้าที่แผงโซลาร์เซลล์ 0.9 m^2 T=15° $\phi_n = 0°$ โดยคิดอัตราการแปลงพลังงานที่ 8% ของ G_T

B = กำลังไฟฟ้าที่ได้จากระบบที่ใช้การติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์แบบปรับมุม Azimuth เมื่อ D_S=213

C = กำลังไฟฟ้าที่ได้จากระบบที่ใช้การติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์แบบปรับมุมเอียงตามแกน E-W เมื่อ D_S=214

D = กำลังไฟฟ้าที่ได้จากระบบที่ใช้การติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์แบบ 2 แกน เมื่อ D_S=218

นิยามให้ h คือแนวราบ, T คือมุมเอียง, AZ คือ Azimuth Tracker , EW คือ EW Axis Tracker, 2Axis คือ 2 Axes Tracker

เงื่อนไขการทดสอบ

1. เนื่องจากหากต้องการทดสอบระบบทั้งหมดภายใต้เงื่อนไขทางสภาพดินฟ้าอากาศเดียวกัน จำเป็นต้องใช้แผงโซลาร์เซลล์จำนวนทั้งสิ้น 8 หน่วย ด้วยข้อจำกัดเกี่ยวกับจำนวนแผงโซลาร์เซลล์ จึงจัดให้ระบบที่ตั้งมุมเอียงแผง 15° หันหน้าแผงไปทางทิศเหนือเป็นระบบมาตรฐานเพื่อใช้ในการอ้างอิงเปรียบเทียบกับการหมุน และปรับมุมเพื่อติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์ในลักษณะต่างๆ โดยเลือกทดสอบในวันที่ใกล้เคียงกันเพื่อให้พลังงานจากดวงอาทิตย์ในระบบอ้างอิงแตกต่างกันไม่มากนัก (สังเกตได้จากค่ากำลังไฟฟ้า A จากตารางที่ 4.9 ที่ค่า $D_S = 213, 214, 218$)

2. สำหรับการควบคุมอิทธิพลที่มีผลต่อการทดสอบจากการวัด และการแปลงพลังงานไฟฟ้าควบคุมโดยการใช้แผงโซลาร์เซลล์ชนิดเดียวกันใช้เครื่องมือวัดที่มีมาตรฐานเหมือนกัน รวมทั้งแบตเตอรี่ที่ใช้ก็มีขนาดเท่ากัน โดยก่อนที่ทำการทดสอบแบตเตอรี่จะถูกปล่อยประจุออกจนหมดเหมือนๆกันเพื่อพยายามกำจัดความแตกต่างเกี่ยวกับความต้านทานภายในแบตเตอรี่

4.7.3 การเตรียมอุปกรณ์ทดสอบ หมายเหตุ ตรวจดูรูปอุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ได้ในภาคผนวก

รายการอุปกรณ์

1. แผงโซลาร์เซลล์รุ่น BPTS1255HP	จำนวน	4	แผง
2. แอมป์มิเตอร์	จำนวน	2	เครื่อง
3. โวลท์มิเตอร์	จำนวน	2	เครื่อง
4. แบตเตอรี่ 65 Ah	จำนวน	2	ลูก
5. เทอร์โมมิเตอร์	จำนวน	1	เครื่อง
6. บารอมิเตอร์	จำนวน	1	เครื่อง

4.7.4 หัวข้อการทดสอบ

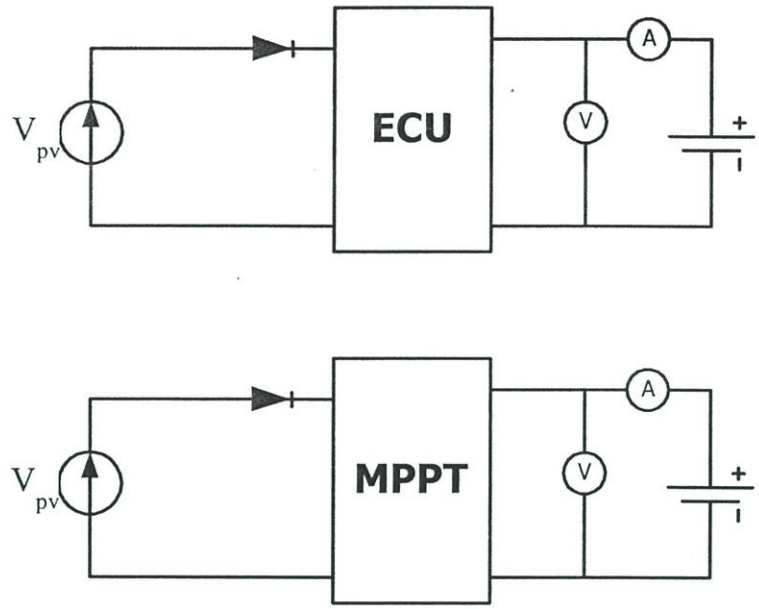
ตอนที่ 1: ทดสอบเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับระบบอ้างอิงกรณีมีการปรับองศาแบบ Polar E-W หรือหมุนโครงแผงโดยรอบตามมุมกวาดของวงโคจรดวงอาทิตย์ (Azimuth)

ตอนที่ 2: ทดสอบเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับระบบอ้างอิงกรณีมีการติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์แบบปรับมุมเอียงตามแกนทิศตะวันออก-ตะวันตกเพียงแกนเดียว (E-W Tracker)

ตอนที่ 3: ทดสอบเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับระบบอ้างอิงเมื่อใช้ระบบติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์แบบ 2 แกน (2 Axes Tracker)

ตอนที่ 4: ทดสอบหาความเหมาะสมของเวลา และกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมในการเริ่ม และหยุดการปรับองศา และเคลื่อนหมุนแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์

ตอนที่ 5: ทดสอบหาความเหมาะสมของความละเอียดในการติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์ โดยคำนึงถึงหลักการของพลังงานที่ได้เพิ่มขึ้นมาต้องมากที่สุด รวมทั้งระดับความเข้มรังสีแสงที่ให้พลังงานคุ้มค่าเพียงพอต่อการติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์

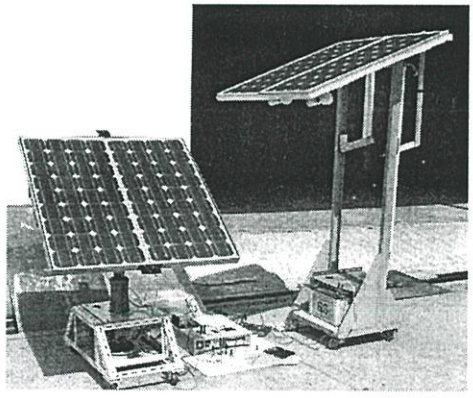


(ข)

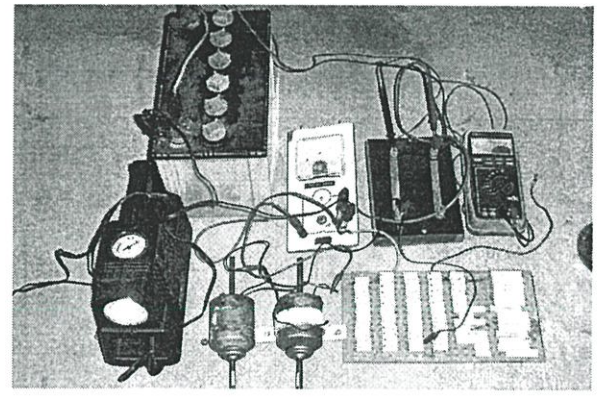
รูปที่ 4.44 รูปวงจรที่ใช้ทดสอบตามหัวข้อที่ 4.7.4

(ก) รูปวงจรสำหรับระบบที่อ้างอิงใช้แผงโซลาร์เซลล์ 2 แผงต่อแบบขนาน

(ข) รูปวงจรของระบบติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์ใช้แผงโซลาร์เซลล์ 2 แผงต่อแบบอนุกรม



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.45 ขณะทำการทดสอบระบบติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์ เทียบกับระบบอ้างอิง

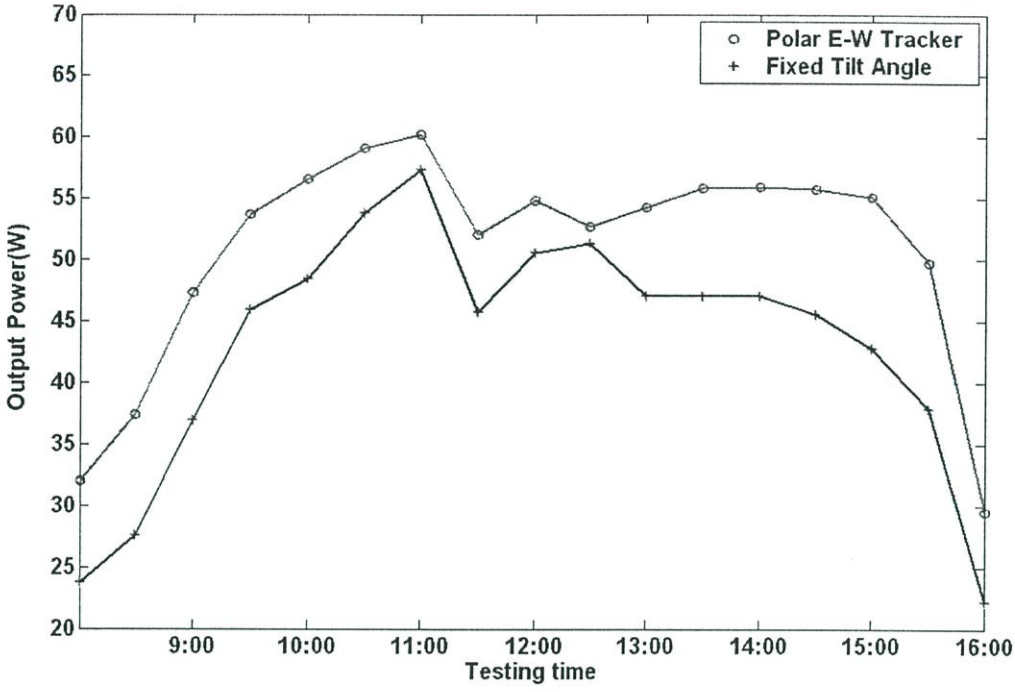
(ก) การตั้งแผงเพื่อทดสอบเปรียบเทียบกับระบบอ้างอิง

(ข) การคลายประจุแบตเตอรี่ก่อนนำมาทดสอบ

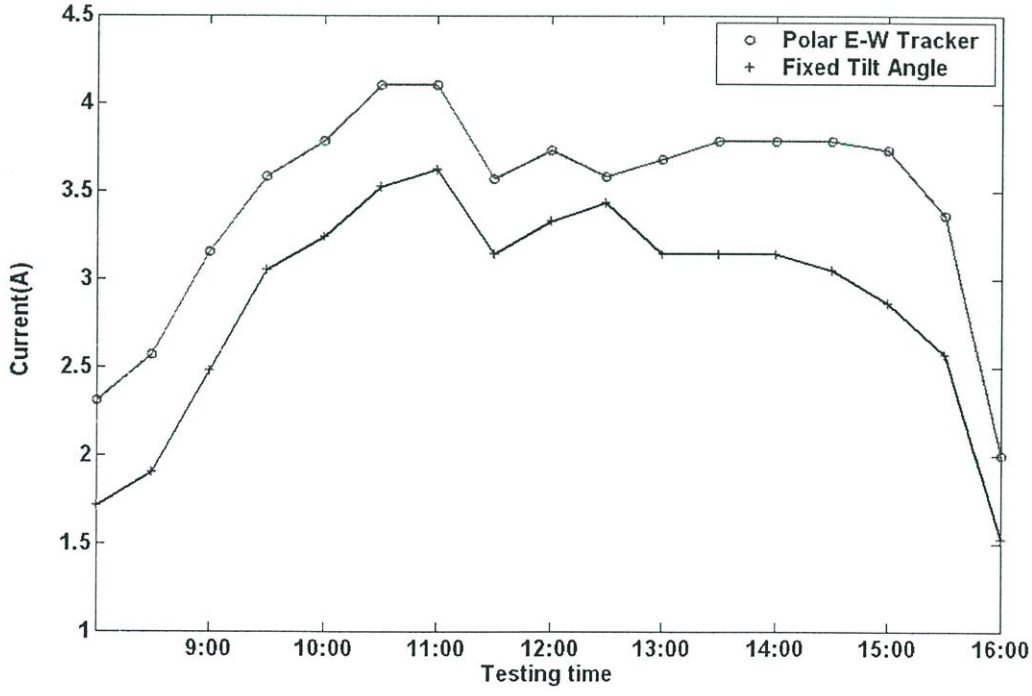
4.7.5 ผลการทดสอบ

ต่อวงจรดังรูปที่ 4.44 เพื่อทดสอบวัดค่ากระแส และแรงดันทุกๆ 30 นาทีสำหรับการทดสอบตอนที่ 1-3 และทุกๆ 10 นาที สำหรับการทดสอบตอนที่ 4-5 บันทึกผลที่ทดสอบได้ทั้งกระแส แรงดัน อุณหภูมิและความดันอากาศของสิ่งแวดล้อมในขณะที่ทดสอบ แสดงผลการทดสอบในหัวข้อการทดสอบ ต่างๆดังต่อไปนี้

ตอนที่ 1: ทดสอบเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้า และกระแสอัดประจุที่เพิ่มขึ้นของระบบที่มีการปรับองศาแบบ Polar E-W หรือหมุนโครงแผงโดยรอบตามมุมกวาดของวงโคจรดวงอาทิตย์ (Azimuth) เทียบกับระบบอ้างอิง ทดสอบวันที่ 1 สิงหาคม 2546 อุณหภูมิเฉลี่ย 52°C ความดันอากาศ 758.5mmHg

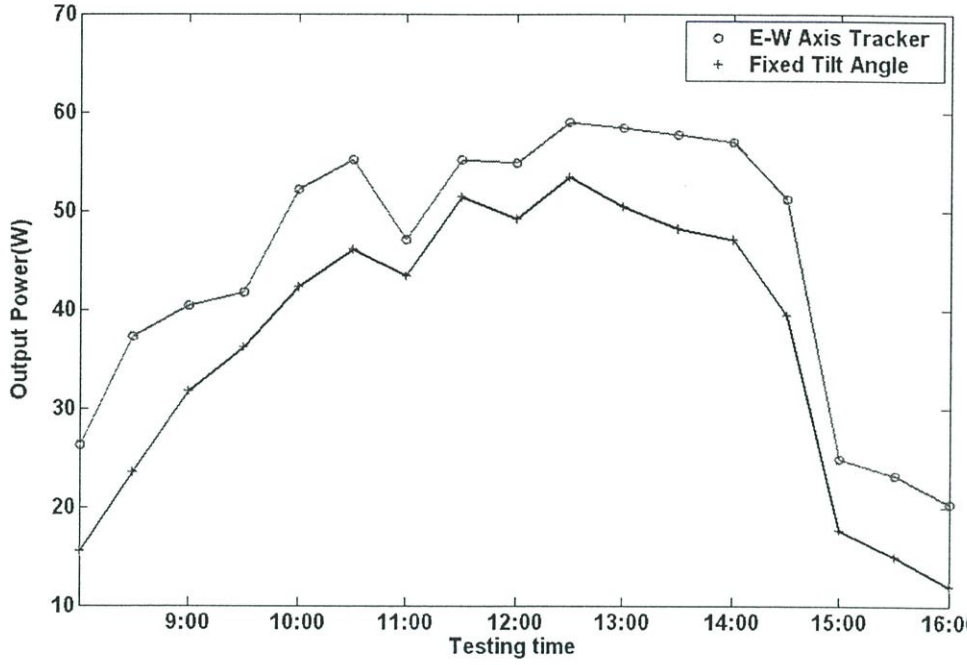


รูปที่ 4.46 เปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าในช่วงเวลาที่ทดสอบจากทั้งสองระบบสำหรับการทดสอบตอนที่ 1

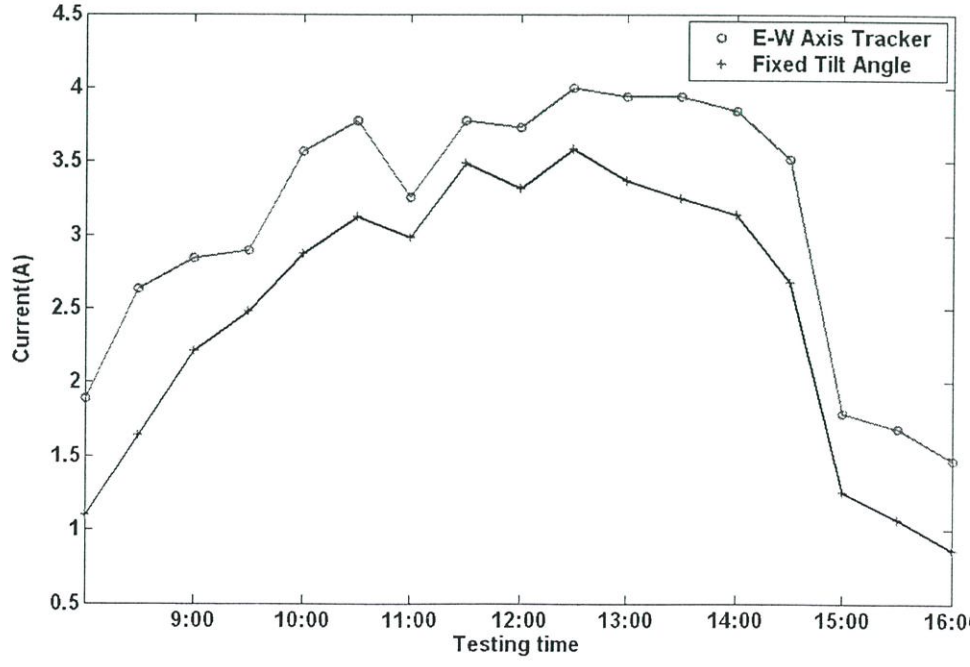


รูปที่ 4.47 เปรียบเทียบกระแสไฟฟ้าในช่วงเวลาที่ทดสอบจากทั้งสองระบบสำหรับการทดสอบตอนที่ 1

ตอนที่ 2: ทดสอบเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้า และกระแสอัดประจุที่เพิ่มขึ้นของระบบที่มีการติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์แบบปรับมุมเอียงของแผงตามแกนของทิศตะวันออก-ตะวันตกเพียงแกนเดียวเทียบกับระบบอ้างอิงทดสอบวันที่ 2 สิงหาคม 2546 อุณหภูมิเฉลี่ย 51°C ความดันอากาศ 758.5mmHg

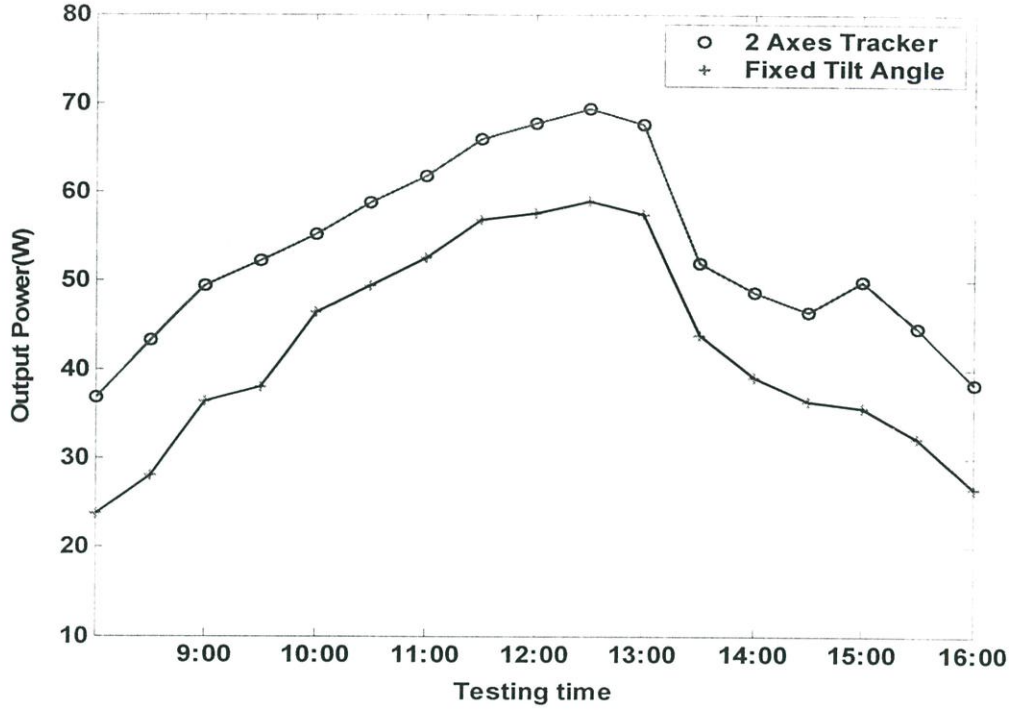


รูปที่ 4.48 เปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าในช่วงเวลาที่ทดสอบจากทั้งสองระบบสำหรับการทดสอบตอนที่ 2

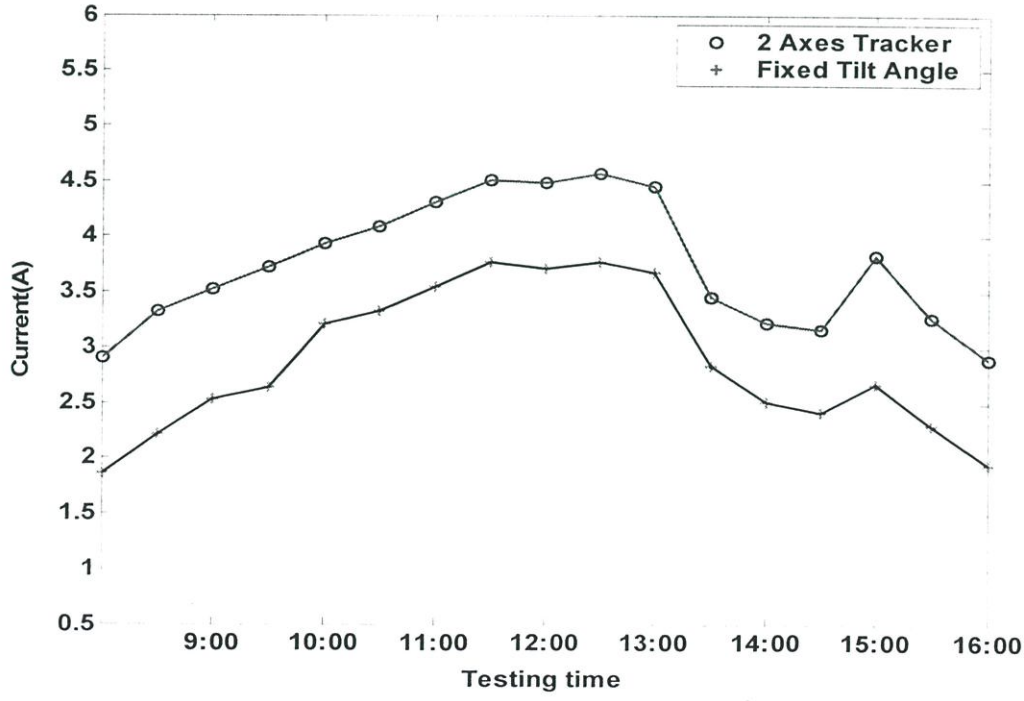


รูปที่ 4.49 เปรียบเทียบกระแสไฟฟ้าในช่วงเวลาที่ทดสอบจากทั้งสองระบบสำหรับการทดสอบตอนที่ 2

ตอนที่ 3: ทดสอบเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้า และกระแสอัดประจุที่เพิ่มขึ้นของระบบติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์แบบ 2 แกน (2 Axes Tracker) เทียบกับระบบอ้างอิง ทดสอบวันที่ 6 สิงหาคม 2546 อุณหภูมิเฉลี่ย 55°C ความดันอากาศ 758.5mmHg

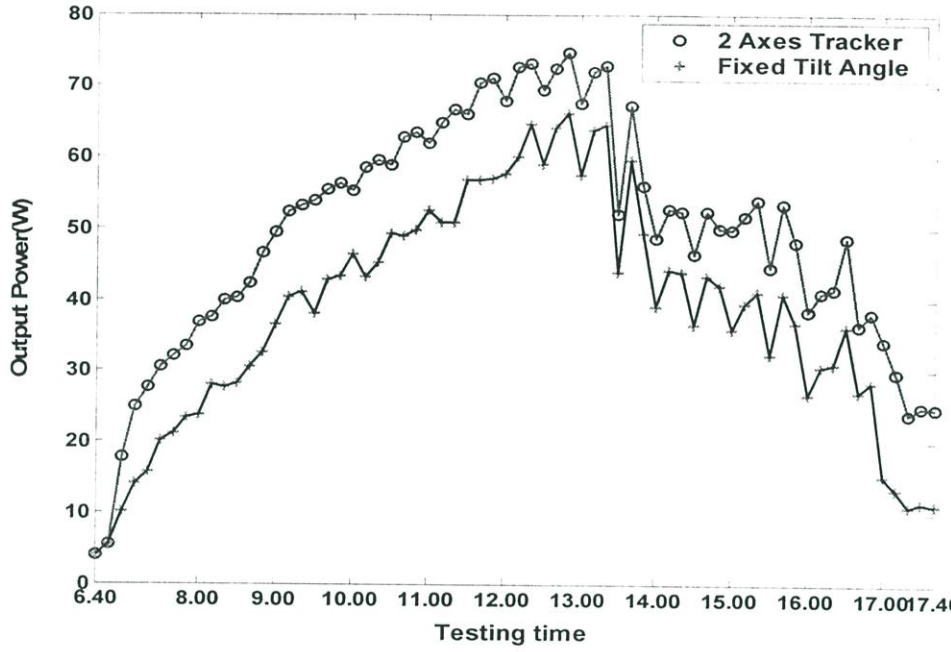


รูปที่4.50 เปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าในช่วงเวลาที่ทดสอบจากทั้งสองระบบสำหรับการทดสอบตอนที่ 3

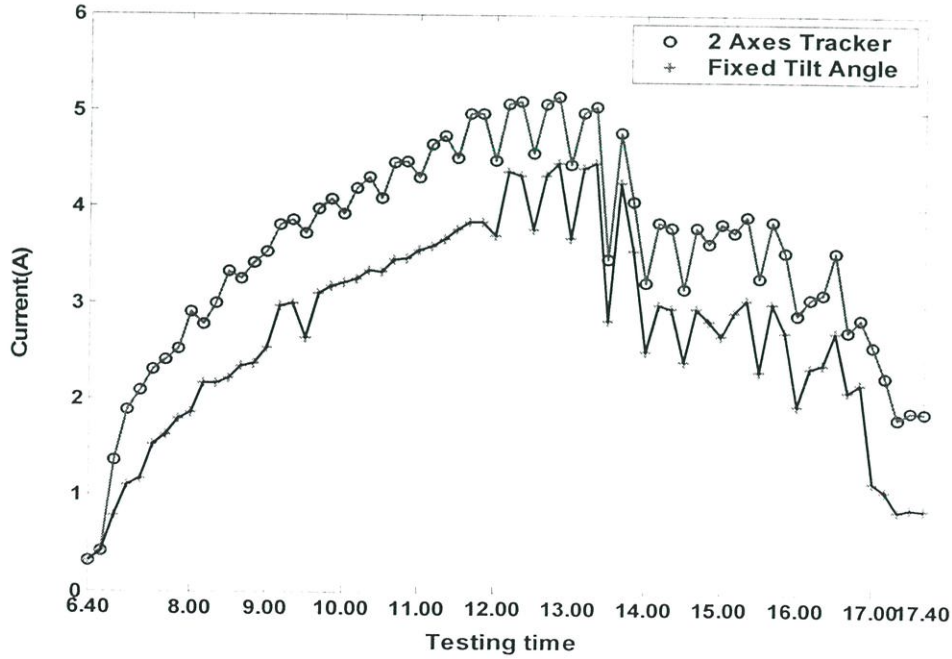


รูปที่4.51 เปรียบเทียบกระแสไฟฟ้าในช่วงเวลาที่ทดสอบจากทั้งสองระบบสำหรับการทดสอบตอนที่ 3

ตอนที่ 4-5: หาอัตราการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าที่แผงโซลาร์เซลล์สามารถผลิตได้ในแต่ช่วงเวลาโดยวัดค่ากระแส และแรงดันทุกๆ 10 นาที โดยตั้งเวลาให้มีการติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์ทุกๆ 10 นาทีเช่นกัน ตั้งแต่ดวงอาทิตย์ขึ้นจนถึงดวงอาทิตย์ตก สำหรับระบบที่มีการติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์แบบ 2 แกน ทดสอบวันที่ 6 สิงหาคม 2546 อุณหภูมิเฉลี่ย 55°C ความดันอากาศ 758.5mmHg



รูปที่ 4.52 เปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าในช่วงเวลาที่ทดสอบจากทั้งสองระบบ เพื่อหาอัตราการเพิ่มกำลังไฟฟ้าในแต่ละช่วงเวลา



รูปที่ 4.53 เปรียบเทียบกระแสไฟฟ้าในช่วงเวลาที่ทดสอบจากทั้งสองระบบ เพื่อหาอัตราการเพิ่มกระแสไฟฟ้าในแต่ละช่วงเวลา

4.7.6 บทวิเคราะห์การทดสอบ

ตอนที่ 1 – 3 จากการทดสอบในหัวข้อต่างๆกันเพื่อหาค่าพลังงาน และกระแสอัดประจุที่เพิ่มขึ้นจากระบบติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์ในหัวข้อต่างๆดังได้แสดงไว้ในกราฟรูปที่ 4.46-4.53 ให้ผลการทดสอบดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.10 ผลการทดสอบตอนที่ 1-5 จากหัวข้อการทดสอบที่ 4.7

No	พลังงานไฟฟ้า(Wh)						กระแสไฟฟ้า-ชั่วโมง(Ah)					
	ระบบทดสอบ	ระบบอ้างอิง	ผลต่าง	Loss	มากขึ้น	%	ระบบทดสอบ	ระบบอ้างอิง	ผลต่าง	Loss	มากขึ้น	%
1	431.12	365.61	65.61	3.24	62.37	17.06	29.29	24.42	4.87	0.27	4.60	18.84
2	381.30	311.56	69.74	3.07	66.67	21.40	26.28	21.21	5.07	0.26	4.81	22.68
3	454.02	359.86	94.155	4.38	89.77	24.95	31.83	24.47	7.37	0.37	7.00	28.60
4	550.15	426.76	123.39	5.65	117.74	27.59	39.50	30.26	9.24	0.47	8.77	28.97

เมื่อ การทดสอบ No.1 = Polar E-W Tracker, No.2 = E-W Axis Tracker, N0.3 = 2 Axes Tracker

No.4 = 2 Axes Tracker บันทึกค่าทุกๆ 10 นาที

ข้อมูลในตารางที่ 4.10 แสดงให้เห็นว่าพลังงานไฟฟ้าต่อวันที่ได้จากระบบติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์แบบการปรับมุมเอียงตามแกนทิศตะวันออก-ตะวันตก (E-W Axis Tracker) และแบบ 2 แกนมีความคุ้มค่ามากกว่าการปรับมุมแบบหมุนตามมุม Azimuth และหากเปรียบเทียบระหว่างระบบทั้งสองระบบติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์แบบ 2 แกนจะมีจุดเด่นในด้านพลังงานที่ได้ต่อวันที่มากที่สุดแต่สัดส่วนพลังงานที่ได้เพิ่มมามีค่ามากกว่าการปรับมุมเอียงเพียงอย่างเดียวแบบ E-W Axis Tracker ไม่มากนัก ดังนั้นหากคำนึงถึงการลงทุน และความคุ้มค่าแล้วการใช้ E-W Axis Tracker จะเป็นทางเลือกที่เหมาะสมมากกว่าเพราะจะทำให้โครงตั้งแผงเบาไม่ซับซ้อน ติดตั้งใช้งานง่าย และคุ้มค่าต่อการลงทุน แต่หากต้องการเก็บพลังงานให้ได้มากที่สุดเป็นประเด็นสำคัญแล้วก็ควรเลือกใช้ระบบติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์แบบ 2 แกน เช่น ระบบจ่ายพลังงานแบบเดี่ยว (Stand Alone) ส่วนความคุ้มค่าจะมากหรือน้อยขึ้นกับราคาวัสดุที่นำมาใช้ประกอบโครงตั้งแผง และราคาพลังงานไฟฟ้าว่ามีมูลค่าทางเศรษฐศาสตร์ต่างกันอย่างไรในสถานการณ์ที่พิจารณาเลือกใช้ระบบพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

สำหรับระบบติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์แบบ Polar E-W Tracker หรือ Azimuth Angle Tracker นั้นพลังงานที่ได้เพิ่มมาไม่คุ้มค่าต่อการลงทุนในตำแหน่งรับพลังงานที่มีที่ตั้งใกล้เส้นศูนย์สูตร เช่นประเทศไทย นอกจากนี้พื้นที่ในการติดตั้งยังมากกว่าพื้นที่ที่ใช้สำหรับระบบ E-W Axis Tracker มากที่สุดถึง 50% เพราะการหมุนตามลักษณะ Polar E-W Tracker ต้องการพื้นที่เป็นวงกลมโดยรอบ และมีค่ารัศมีของพื้นที่ที่ใช้เท่ากับ $\frac{\sqrt{L^2 + L^2 \cos^2 T}}{2}$ เมื่อ L คือความยาวของแผง (สมมติให้แผงมีพื้นที่เป็น

สี่เหลี่ยมจัตุรัส) และ T คือมุมเอียงของแผง โดยทั่วไปนิยมชดเชยมุมเอียงเท่ากับละติจูดดังนั้นเมื่อพิจารณาให้กรุงเทพฯเป็นพื้นที่รับพลังงานแล้วพื้นที่ทั้งหมดที่ต้องใช้คือ $1.43L^2$ ในขณะที่ระบบ E-W Axis Tracker ใช้พื้นที่มากที่สุด L^2 โดยสรุปแล้วระบบนี้ควรเลือกใช้งานร่วมกับการปรับในแนวแกน E-W Axis Tracker เป็นระบบปรับแบบ 2 แกนจึงมีความเหมาะสมมากกว่า

ตอนที่ 4 – 5 ผลการทดสอบตอนที่ 4-5 เพื่อทดสอบหาความเหมาะสมในการติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์แบบ 2 แกนในแต่ละช่วงเวลาสามารถวิเคราะห์ผลการทดสอบได้ดังนี้

1. การพิจารณาเวลาที่ใช้ในการเริ่ม และหยุดการติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์

1.1 การพิจารณาให้ผลรวมของพลังงาน และกระแสเพื่ออัดประจุให้อัดแบตเตอรี่เป็นบวกเสมอ เนื่องจากค่ากำลังสูงสุดที่ใช้ในแต่ละช่วงเวลาที่มีการหมุนมอเตอร์คือ $(0.835+0.717+0.02)\times12$ เท่ากับ 18.72W เพื่อเปรียบเทียบกับกราฟรูปที่ 4.52 กำลังงานที่ได้จากระบบที่ทดสอบเกิดขึ้นในช่วงเวลาระหว่าง 7.00น.-7.10น. โดยวิธีการประมาณค่าภายในช่วงเวลาที่กำลังไฟฟ้าจากระบบ 18.72W คือเวลาประมาณ 7:01:14น. คิดเป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที นับจากเวลาที่ดวงอาทิตย์ขึ้น

จากนั้นพิจารณากระแสรวมเข้าแบตเตอรี่เป็นบวกเสมอ ได้ว่าปริมาณกระแสสูงสุดที่ใช้ในการหมุนมอเตอร์ทั้ง 2 แนวแกนคือ 1.56A จากรูปที่ 4.53 ช่วงเวลาที่ต้องการใช้ประมาณค่าภายในช่วงคือ 7.00น.-7.10น. ที่มีค่ากระแสอัดประจุประมาณ 1.36A-1.88A ตามลำดับ ช่วงเวลาที่ต้องการคือ 7:3:51น. หรือเวลานับจากดวงอาทิตย์ขึ้นประมาณ 1 ชั่วโมง 33 นาที ดังนั้นหากพิจารณาให้สอดคล้องกับเงื่อนไขดังกล่าวทั้งคู่เวลาที่ควรเริ่มติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์คือเวลาประมาณ 1 ชั่วโมง 33 นาทีนับจากดวงอาทิตย์ขึ้น

1.2 พิจารณาให้เวลาเริ่มต้นการติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์เมื่อค่าพลังงานที่สะสมเพียงพอต่อพลังงานที่คาดว่าจะต้องใช้สูงสุดใน 1 วัน เนื่องจากพลังงานสูญเสียจากตารางที่ 4.10 คือ 5.65Wh สำหรับการการติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์ดวงอาทิตย์แบบ 2 แกน เปรียบเทียบกับพลังงานที่ได้นับจากเริ่มต้นเก็บพลังงานได้จนถึงพลังงานสะสมที่ต้องการคือ5.65Wh จากรูปที่ 4.52 พลังงานเริ่มต้นที่ได้จากเวลา 6.40น. คือ 3.92W เพื่อให้ได้พลังงานสะสม 5.65Wh ต้องเก็บพลังงาน 3.92W (สมมติว่าคงที่ตลอดจนกว่าจะครบ 5.65Wh) ยาวนานเป็นเวลานาน 1 = ชั่วโมง 26 นาที สรุปได้ว่าหากพิจารณาในแง่พลังงานสะสมเวลาที่ควรเริ่มต้นติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์คือ 8.06น. หรือคิดเป็น 2 ชั่วโมง 35 นาทีนับจากเวลาที่ดวงอาทิตย์ขึ้น

2. การหาช่วงเวลาที่เหมาะสมในการติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์จากการทดสอบโปรแกรมหากใช้ในการทำงานทุกๆ 3-4 นาที (หมายถึงมีการปรับมุมต่างๆทุกๆ 3-4 นาที) ซึ่งคือเวลาโดยประมาณที่ดวงอาทิตย์เปลี่ยนตำแหน่งไป 1 องศา และสอดคล้องกับมาตรฐาน IEEE1513-2001

แต่หากพิจารณาให้เหมาะสมกับการรับปริมาณรังสีตรงนั้นควรปรับมุมติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์ เมื่อตำแหน่งดวงอาทิตย์เปลี่ยนไป 5.6° (เนื่องจากเป็นค่ามุมที่เหมาะสมเพียงพอในการรับรังสีตรง เช่นเดียวกับมาตรฐานของเครื่องมือวัดรังสีตรง Pyrheliometer[42]) คำนวณย้อนกลับไปหาเวลาที่

ควรใช้ในปรับองศาแผงได้ผลลัพธ์คือ 22.4 นาที เพื่อยืนยันว่าการปรับเส้นตั้งฉากแผงทำมุมกับเส้นรังสีตรงไม่เกิน 5.6° โดยการกำจัดระยะขอบที่ใกล้เคียงกับ 5.6° ได้โดยใช้เวลาเพียงครึ่งเดียวจากที่คำนวณได้คือ 11.2 นาที ในการตั้งเวลาการติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์ ผลที่ได้จากการทดสอบในตอนที่ 4-5 นี้จะได้นำไปวิเคราะห์เปรียบเทียบกับการทดสอบในหัวข้อต่อไป

4.8 การทดสอบพลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นเมื่อใช้ MPPT คอนเวอร์เตอร์ร่วมกับการเคลื่อนหมุนแผงพีวีทางกลแบบ 2 แกน

4.8.1 หลักการและเหตุผล

จากการทดสอบในหัวข้อที่ผ่านมา โดยแยกเงื่อนไขการการทดสอบเพื่อประโยชน์ในการเปรียบเทียบการเพิ่มพลังงาน และกระแสอัดประจุให้แบตเตอรี่ ในหัวข้อการทดสอบนี้เป็นการทดสอบความสามารถสูงสุดของระบบที่ออกแบบ โดยการทำงานร่วมกันของเทคนิคการการแทรค หรือปรับเข้าหาจุด MPP ระหว่าง MPPT คอนเวอร์เตอร์ร่วมกับการเคลื่อนหมุนแผงพีวีทางกล เพื่อติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์แบบ 2 แกน การทดสอบในหัวข้อนี้ใช้ระบบอ้างอิงเหมือนกับการทดสอบในหัวข้อที่ 4.6 และ 4.7 เพื่อสะดวกในการนำมาเปรียบเทียบกันต่อไป

4.8.2 ทฤษฎีอ้างอิงและหลักการที่เกี่ยวข้อง

อาศัยหลักการเดียวกับหัวข้อที่ 4.7.2 สามารถคำนวณความเข้มแสงที่ตกกระทบบนแผงรับพลังงานแสงอาทิตย์ในระบบอ้างอิง และระบบที่ต้องการทดสอบได้ โดยระบบที่ทำการทดสอบมีการติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์แบบ 2 แกน คือมีทั้งการปรับหน้าแผงรับพลังงานตามมุม Azimuth ($\phi_h = \phi_n$) และปรับมุมเอียงของแผงด้วย ($\theta_n = T$) อาศัยสมการที่ (2.10), (2.11), (2.16), และ(2.17) คำนวณปริมาณความเข้มรังสี และปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ตกกระทบบนระนาบรับพลังงานได้ดังแสดงในตารางที่ 4.11 ซึ่งทำการทดสอบในวันที่ 15 สิงหาคม 2546

จากตารางที่ 4.11 ได้ว่าค่าพลังงานที่ผลิตได้จากระบบอ้างอิงเป็น 339.70Wh และพลังงานที่ได้จากระบบทดสอบมีค่าเท่ากับ 502.93Wh คิดเป็นพลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจากระบบอ้างอิง 46.13% ค่าตัวเลขที่ได้จากการประมาณการนี้จะเป็นจริงเมื่อในวันที่ทดสอบอากาศแจ่มใสตลอดวัน

เงื่อนไขการทดสอบ

1. การทดสอบเปรียบเทียบการอัดประจุจากระบบทั้งสอง ทำการทดสอบที่เวลาเดียวกัน เพื่อให้ปัจจัยทางแสง และสิ่งแวดล้อมเหมือนกัน โดยเลือกใช้ระบบอ้างอิงหันหน้าแผงไปทางทิศเหนือ และทำมุมเอียง 15° กับแนวราบซึ่งเป็นทิศที่เหมาะสมสำหรับวันที่ทดสอบ ส่วนมุมเอียง 15° เป็นมุมเอียงที่สามารถรับพลังงานได้ดีที่สุดสำหรับละติจูดของกรุงเทพมหานคร

2. สำหรับการควบคุมอิทธิพลที่มีผลต่อการทดสอบจากการวัด และการแปลงพลังงานไฟฟ้าควบคุมโดยการใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเดียวกันใช้เครื่องมือวัดที่เหมือนกัน รวมทั้งแบตเตอรี่ที่ใช้ก็

มีขนาดเท่ากันโดยก่อนทำการทดสอบแบตเตอรี่จะถูกปล่อยประจุออกจนหมดเหมือนๆกันเพื่อพยายามกำจัดความแตกต่างเกี่ยวกับความต้านทานภายในแบตเตอรี่

3. ตั้งเวลาในการติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์ไว้ที่ช่วงเวลา 3 นาที โดยตั้งสมมติฐานว่าดวงอาทิตย์เปลี่ยนตำแหน่งทุกๆ 1 องศาใช้เวลาประมาณ 3-4 นาที และเพื่อประโยชน์ในการเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของการทดสอบในตอนที่ 4-5 ของหัวข้อทดสอบที่ 4.7.4

ตารางที่ 4.11 ปริมาณความเข้มรังสีตรง, รังสีกระจาย และปริมาณที่สำคัญด้านกำลังงานอย่างอื่นในวันที่ 30 กรกฎาคม 2546 ที่ได้จากการคำนวณ

เวลา:	5.38	6.38	7.38	9.38	10.38	11.38	12.00	13.22	14.22	15.22	16.22	17.22	18.22
ปริมาณที่สำคัญ:													
N (W/m^2)	0.0	235.8	551.6	721.1	813.2	861.2	879.5	861.2	813.2	721.1	551.6	235.8	0.0
G_h (I_h)(W/m^2)	0.0	68.3	311.0	579.7	808.1	964.7	1033.1	964.7	808.1	579.7	311.0	68.3	0.0
G_T (W/m^2)	0.0	79.4	322.5	578.4	791.9	937.2	1000.4	937.2	791.9	578.4	322.5	79.4	0.0
G_{2Axis} (W/m^2)	0.5	124.5	343.3	553.9	721.7	828.9	865.7	828.9	721.7	553.9	343.3	124.5	0.5
A*(W)	0.0	5.5	24.9	46.4	64.6	77.2	82.6	77.2	64.6	46.4	24.9	5.5	0.0
B*(W)	0.0	15.0	36.3	48.7	56.1	60.2	62.0	60.8	57.4	50.9	38.9	16.6	0.0
C*(W)	0.0	3.8	15.4	27.5	37.7	44.6	47.6	44.6	37.7	27.5	15.4	3.8	0.0

*เมื่อ A = กำลังไฟฟ้าที่แผงโซลาร์เซลล์ 0.9 m^2 สามารถผลิตได้ โดยคิดอัตราการแปลงพลังงานที่ 8% ของ G_h

B = กำลังไฟฟ้าที่ได้จากระบบที่ใช้ MPPT คอนเวอร์เตอร์ ร่วมกับระบบติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์เมื่อคิดค่าประสิทธิภาพที่ 75% โดยมีปริมาณรังสีตกกระทบแผงเท่ากับ G_{2Axis}

C = กำลังไฟฟ้าที่ใช้แบตเตอรี่ชาร์จเจอร์เมื่อพิจารณาที่แรงดันอัดประจุคงที่ 12.5V และประสิทธิภาพของชาร์จเจอร์ 90% โดยประมาณการให้กระแสที่จุดแรงดัน 12.5V-จุด MPP เปลี่ยนแปลงแบบเชิงเส้น โดยมีปริมาณรังสีตกกระทบแผงเท่ากับ G_T

นิยามให้สัญลักษณ์ T คือระนาบเอียง, h คือแนวราบ, 2Axis คือการติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์แบบ 2 แกน

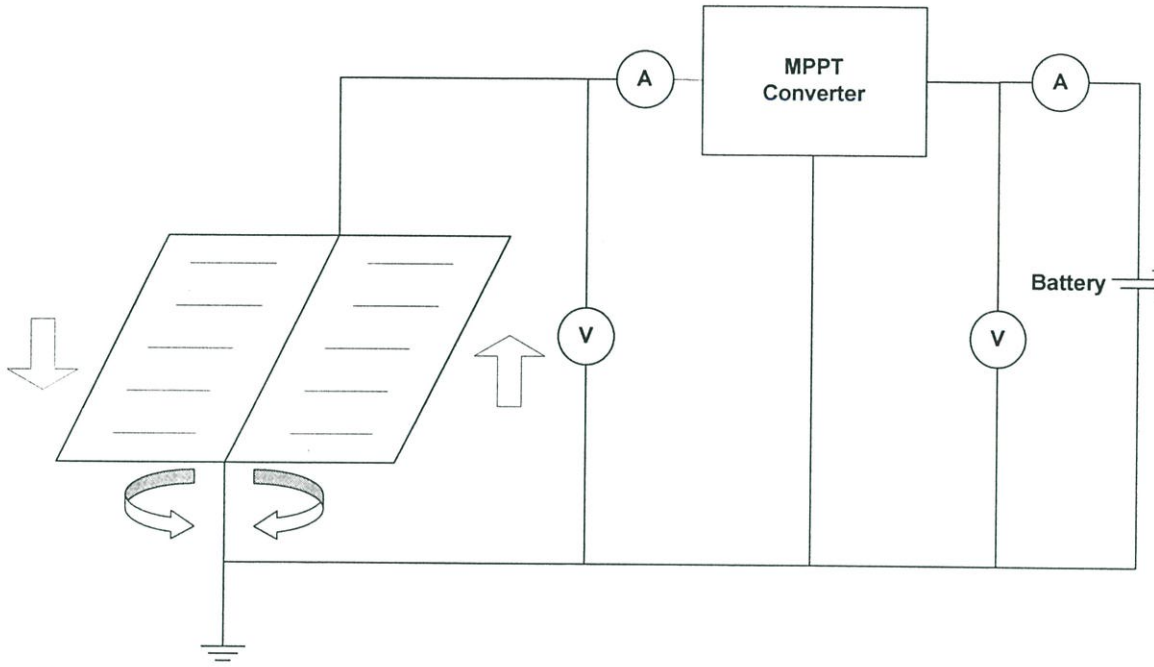
4.8.3 การเตรียมอุปกรณ์ทดสอบ <u>หมายเหตุ</u> ตรวจดูรูปอุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ได้ในภาคผนวก

<u>รายการอุปกรณ์</u>

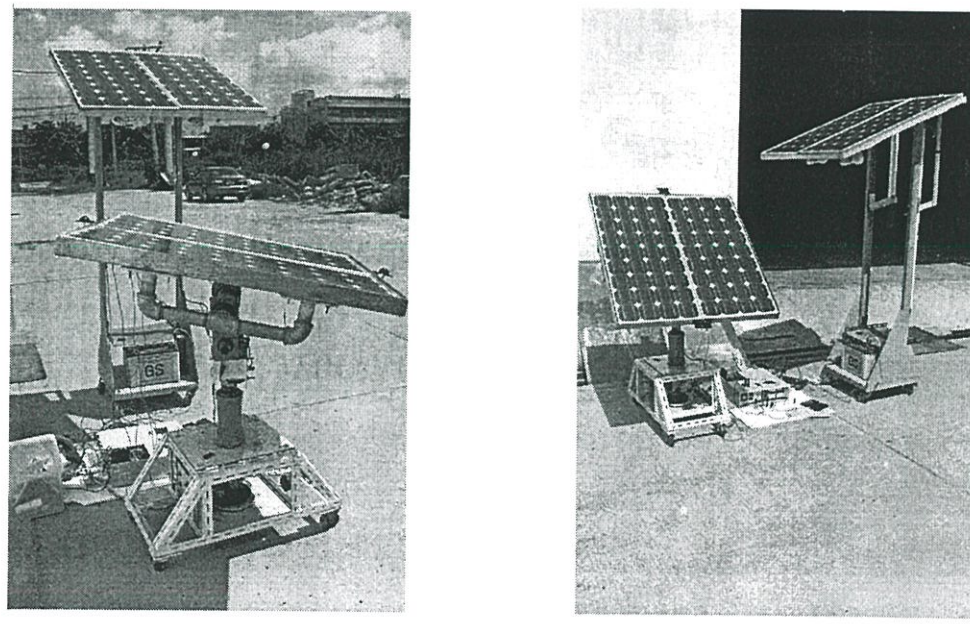
1. แผงโซลาร์เซลล์รุ่น BPTS1255HP	จำนวน	4	แผง
2. แอมป์มิเตอร์	จำนวน	2	เครื่อง
3. โวลท์มิเตอร์	จำนวน	2	เครื่อง
4. แบตเตอรี่ 65 Ah	จำนวน	2	ลูก
5. เทอร์โมมิเตอร์	จำนวน	1	เครื่อง
6. บารอมิเตอร์	จำนวน	1	เครื่อง

4.8.4 หัวข้อการทดสอบ

การทดสอบเพื่อเปรียบเทียบพลังงานไฟฟ้าจากระบบพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ MPPT คอนเวอร์เตอร์ร่วมกับการเคลื่อนหมุนแผงพีวีทางกล กับระบบอ้างอิงดังรูปที่ 4.54



รูปที่ 4.54 ระบบทดสอบตามหัวข้อที่ 4.7.4 ใช้แผงโซลาร์เซลล์ 2 แผงต่อแบบอนุกรม



(ก) (ข)

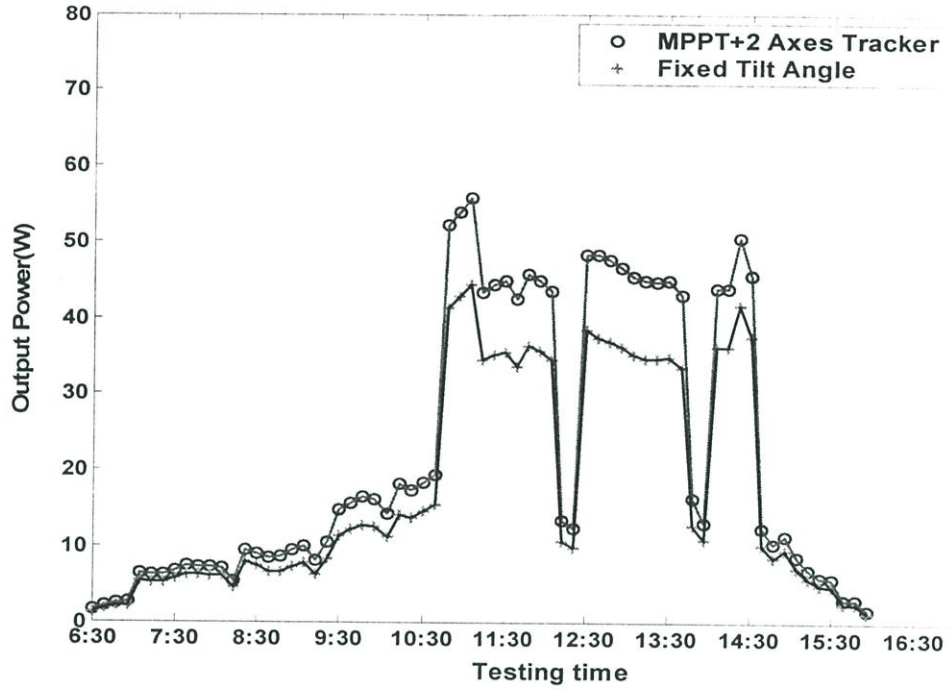
รูปที่ 4.55 ขณะทำการทดสอบเปรียบเทียบทั้ง 2 ระบบ

(ก) ช่วงเวลาเที่ยงวันที่แผงจากระบบทั้งสองได้รับพลังงานแสงใกล้เคียงกัน

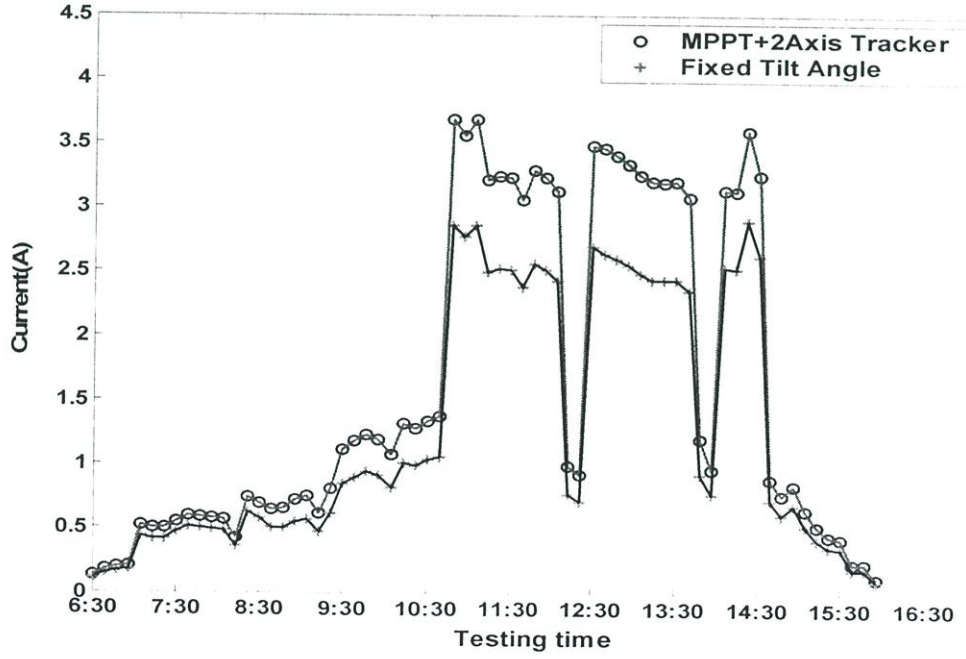
(ข) ช่วงเวลาใดๆ ที่แผงจากระบบที่ทดสอบสามารถรับพลังงานแสงได้มากกว่า

4.8.5 ผลการทดสอบ

อาศัยข้อมูลที่วัดจากวงจรที่ทดสอบตามรูปที่ 4.55 วัดค่ากระแส และแรงดันทุกๆ 10 นาทีพร้อมกับอุณหภูมิภายนอก และความดันบรรยากาศ แสดงผลการทดสอบได้ดังรูปที่ 4.56-รูปที่ 4.57



รูปที่ 4.56 เปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าระบบที่ทดสอบ และระบบอ้างอิงทดสอบวันที่ 15 ส.ค. 2546 เวลา 6.30น.-16.30น. อุณหภูมิเฉลี่ย 48.5°C ,ความดันอากาศ 758.5mmHg



รูปที่ 4.57 เปรียบเทียบกระแสไฟฟ้าระบบที่ทดสอบ และระบบอ้างอิงทดสอบวันที่ 15 ส.ค. 2546 เวลา 6.30น.-16.30น. อุณหภูมิเฉลี่ย 48.5°C ,ความดันอากาศ 758.5mmHg

4.8.6 บทวิเคราะห์การทดสอบ

1. จากกราฟรูปที่ 4.56 ค่าพลังงานไฟฟ้ารวมจากระบบที่ใช้ MPPT คอนเวอร์เตอร์ และการติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์แบบ 2 แกนร่วมกันลบด้วยค่าพลังงานสูญเสียทั้งหมดเพิ่มขึ้นจากระบบอ้างอิงประมาณ 247.25-196.72 = 45.28Wh และคิดเป็น 23.02% เมื่อเทียบกับระบบอ้างอิง และปริมาณกระแส-ชั่วโมงในรูปที่ 4.57 เพิ่มขึ้น 3.48Ah คิดเป็น 24.82% เมื่อเทียบกับระบบอ้างอิง หากนำข้อมูลที่ได้เปรียบเทียบกับการคำนวณจากตารางที่ 4.11 ที่ได้คาดการปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากระบบทดสอบเปรียบเทียบกับระบบอ้างอิงประมาณ 46.13% เนื่องจากเวลา 5.30น.-6.30น. และเวลา 16.10น.-18.30น. โดยประมาณช่วงเวลานี้ของวันที่ทดสอบระบบเก็บพลังงานไฟฟ้าทั้งสองระบบไม่สามารถแปลงพลังงานไฟฟ้าสำหรับจ่ายให้แบตเตอรี่ได้เลย อาจมีสาเหตุมาจากในช่วงเวลาดังกล่าวมีปริมาณความเข้มรังสีของดวงอาทิตย์น้อยมาก (พลังงานไฟฟ้าที่ควรได้สามารถตรวจสอบได้จากกำลังไฟฟ้า A และBในตารางที่ 4.11) จึงทำการประมาณการค่าพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากตารางที่ 4.11 ใหม่อีกครั้ง และพิจารณาเริ่มนับเวลาที่นำค่าพลังงานไฟฟ้ามาคำนวณที่ 6.30น.-16.10น. เพื่อให้สอดคล้องกับช่วงเวลาที่ทดสอบจาก $\sum_{i=6:30}^{16:10} B_i t_i$ และ $\sum_{i=6:30}^{16:10} C_i t_i$ มีกำลังไฟฟ้า-ชั่วโมงทั้งสิ้น 448.35Wh และ 315.00Wh จากระบบที่ทดสอบ และระบบอ้างอิงตามลำดับคิดเป็นพลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น 133.35Wh หรือ 42.33% ร้อยละของพลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นจากการทดสอบจริงผิดพลาดไปจากการคำนวณ $\frac{133.4-45.3}{134.4}\times 100\%$ เท่ากับ 66.04% หากเรานำข้อมูลจากการทดสอบตอนที่ 4-5 ในหัวข้อทดสอบที่ 4.7.4 มาพิจารณาหาค่าพลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นที่ผิดพลาดไปโดยวิธีเดียวกันได้ $\frac{130.8-117.7}{130.8}\times 100$ เท่ากับ 10.02% (จากข้อมูลในตารางที่ 4.9 คำนวณพลังงานไฟฟ้าประมาณการจาก $\sum_{i=6:30}^{18:10} D_i t_i - \sum_{i=6:30}^{18:10} A_{(Ds=218)_i} t_i$ เท่ากับ 443.06Wh-305.73Wh = 130.81Wh)

สังเกตได้ว่ายิ่งอากาศแจ่มใส และเก็บพลังงานได้ยาวนานมากกว่า พลังงานไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบจะใกล้เคียงกับการคำนวณมากกว่าวันที่อากาศมีปริมาณรังสีไม่มากนักดังได้อธิบายไว้แล้ว

2. เนื่องจากระบบที่ทดสอบตั้งเวลาในการติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์ไว้ทุกๆ 3 นาทีเพื่อจุดประสงค์การทดสอบเปรียบเทียบกับการทดสอบตอนที่ 4-5 ในหัวข้อที่ 4.7.4 นำค่าพลังงานที่ได้แสดงไว้รูปที่ 4.52 ได้ค่าพลังงานที่ได้ทั้งหมดคือ 561.11Wh

ความแตกต่างของระบบทั้ง 2 คือเวลาที่ใช้ในการปรับการติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์ โดยการทดสอบ 4.7.4 ใช้เวลา 10 นาที และการทดสอบที่ 4.8.4 ใช้เวลา 3 นาที อัตราการเพิ่มขึ้นของพลังงานที่ได้จากระบบทั้งสองเมื่อเปรียบเทียบกับระบบอ้างอิงคือ 28.92% และ 23.02% ตามลำดับจะเห็นว่ามีอัตราการเพิ่มขึ้นของพลังงานใกล้เคียงกัน แต่ค่าที่ได้จากการทดสอบที่ 4.7.4 มีค่ามากว่าเล็กน้อยซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า

2.1 การตั้งเวลาเพื่อติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์ที่ 10 นาทีเหมาะสำหรับระบบทั่วไปที่ต้องการติดตั้งเพื่อให้แผงรับพลังงานแสงที่เป็นรังสีตรงให้มากที่สุด เนื่องจากข้อดีคือค่าพลังงานสูญเสียในการทำงานน้อยลงเพราะจำนวนครั้งที่มอเตอร์ทำงานทั้งการเริ่มหมุน และหยุดหมุนน้อยลง เนื่องจากกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียไปในการเริ่มต้น และหยุดหมุนมอเตอร์มากกว่าการหมุนมอเตอร์ด้วยความเร็วคงที่จากค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตมีค่ามากกวาสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจลน์ ดังนั้นเมื่อพิจารณาให้ระยะทางที่เป็นองศาที่ต้องหมุนในแต่ละวันคงที่แล้วระบบนี้จึงได้เปรียบในเชิงของพลังงานสูญเสียต่อวันที่น้อยกว่าโดยไม่สูญเสียความสามารถในการรับรังสีตรง

2.2 ส่วนระบบติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์โดยตั้งเวลาการปรับองศาที่ละเอียดขึ้นมีข้อดีคือสอดคล้องกับมาตรฐาน IEEE1513-2001 เกี่ยวกับการทดสอบแบบกลางแจ้ง (Out Door Test) ที่มีข้อดีคือสามารถนำ I-V Scan ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผ่านการทดสอบมาประมาณค่าพลังงานต่อหน่วยพื้นที่ในช่วงเวลาที่ทำการวัด I-V Scan ในครั้งต่อๆไปได้ และปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ได้มากขึ้นก็คุ้มค่าเมื่อเทียบกับระบบอ้างอิง · แต่หากพิจารณาถึงการบำรุงรักษาที่มากขึ้นเนื่องจากแนวโน้มการทำงานในการเริ่มหมุน-หยุดหมุนมอเตอร์เพิ่มมากขึ้น 2-3 เท่า และโอกาสในการสูญเสียพลังงานจากการหมุนมากกว่าดังที่ได้อธิบายไปแล้ว ดังนั้นหากไม่มีความจำเป็นต้องทดสอบเพื่อนำสมการในมาตรฐานมาใช้คำนวณปริมาณความเข้มแสงแล้วก็ควรเลือกใช้เวลาในการปรับการติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์ที่มีมากขึ้นโดยไม่สูญเสียความสามารถในการรับรังสีตรงจากแสงอาทิตย์คือระหว่าง 10-12 นาที

2.3โดยรวมแล้วทั้งสองระบบให้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นดีพอๆกัน เพียงแต่การตั้งเวลาการติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์ที่น้อยกว่าย่อมเสียเปรียบในด้านจำนวนครั้งที่ต้องทำงานในแต่ละวัน ข้อมูลจากการทดสอบในวันที่ 15 สิงหาคม 2546 มีหลายช่วงเวลาที่ปริมาณรังสีตรงมีน้อยมากจึงทำให้ระบบที่ทำการทดสอบได้รับพลังงานจากรังสีตรงได้ไม่เต็มที่ซึ่งเป็นผลลบโดยตรงต่อระบบที่มีช่วงเวลาในการติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์น้อย ดังนั้นการเลือกใช้งานควรคำนึงถึงวัตถุประสงค์การติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ระบบติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์เป็นสำคัญดังกล่าวในข้อ 2.1-2.2 มากกว่าปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ได้

4.9 การทดสอบการปรับหาจุดกำลังสูงสุดของ MPPT คอนเวอร์เตอร์

4.9.1 หลักการและเหตุผล

จากการทดสอบถึงประสิทธิของ MPPT คอนเวอร์เตอร์ร่วมกับการเคลื่อนหมุนแผงพีวี (แผงเซลล์แสงอาทิตย์) ทางกลจากหัวข้อที่ผ่านมาทั้ง 4.6, 4.7 และ 4.8 ยังมีการทดสอบที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งคือการทดสอบเพื่อยืนยันว่า MPPT คอนเวอร์เตอร์สามารถปรับตัวเข้าหาจุดกำลังสูงสุดจริงหรือไม่ โดยอาศัยหลักการทำงานตามกราฟ P-V เป็นข้อพิสูจน์

4.9.2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

จากหลักการการปรับเข้าหาจุดกำลังสูงสุดตามที่ได้ออกแบบไว้ดังแสดงใน Flow Chart รูปที่ 3.19 อาศัยหลักการการปรับเข้าหาจุด MPP เป็นลำดับขั้นตอนดังนี้

1. จากการพิจารณากราฟ P-V ดังแสดงในรูปที่ 1.2 หรือจากการทดสอบหัวข้อที่ 4.5 ได้ว่าไม่ว่าจะมีการต่อใช้งานแผงพีวีในลักษณะใดค่ากระแส และแรงดันที่ใกล้เคียงจุด MPP เกิดจากรอยต่อของกราฟที่มีค่าความชัน $\frac{dP}{dV} > 0$ และ $\frac{dP}{dV} < 0$ โดยความชันช่วงที่เป็นบวกมีค่าสัมบูรณ์น้อยกว่าความชันในช่วงที่เป็นลบ ดังนั้นหากเริ่มต้นการทำงานที่ด้าน $\frac{dP}{dV} > 0$ ก็จะทำให้การปรับเข้าหาจุดกำลังสูงสุดช้ากว่าการเริ่มต้นในย่านที่ความชันเป็นลบในโปรแกรมจึงเลือกทำงานด้านที่ $\frac{dP}{dV} < 0$ ก่อน

2. ทำการวัดค่ากระแส-แรงดันจากแผงพีวีเพื่อป้อนกลับเข้าไมโครคอนโทรลเลอร์คำนวณกำลังไฟฟ้าจากแผงพีวีในช่วงเวลาใดๆ สำหรับการตัดสินใจปรับดิวตี้ไซเคิลต่อไปจากนั้นทำการตรวจสอบ $\frac{dP}{dV}$ อีกครั้งเป็นวงรอบสลับกันไป

เงื่อนไขการทดสอบ

1. จัดมุมเอียงของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้เหมือนกันเพื่อให้การทดสอบมีความเท่าเทียมกันในด้านปริมาณรังสีที่ได้รับ

2. สำหรับการควบคุมอิทธิพลที่มีผลต่อการทดสอบจากการวัด และการการแปลงพลังงานไฟฟ้าควบคุมโดยการใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเดียวกันใช้เครื่องมือวัดที่เหมือนกัน รวมทั้งแบตเตอรี่ที่ใช้ก็มีขนาดเท่ากันโดยก่อนทำการทดสอบแบตเตอรี่จะถูกปล่อยประจุออกจนหมดเหมือนๆกันเพื่อพยายามกำจัดความแตกต่างเกี่ยวกับความต้านทานภายในแบตเตอรี่

4.9.3 การเตรียมอุปกรณ์ทดสอบ

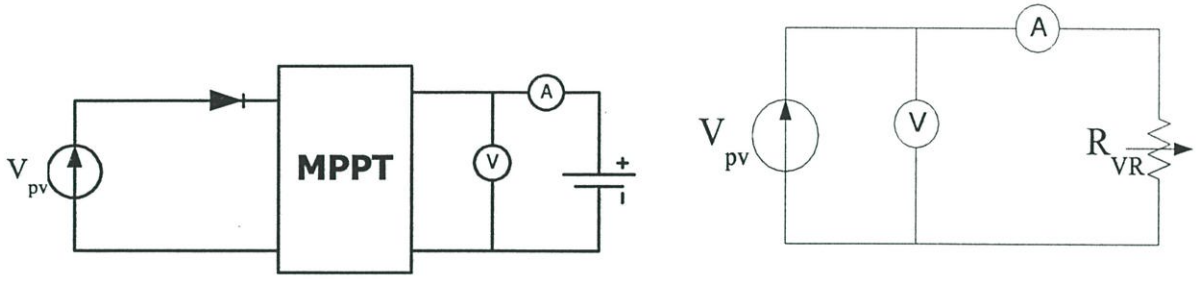
<u>รายการอุปกรณ์</u>

1. แผงโซลาร์เซลล์รุ่น BPTS1255HP	จำนวน	4	แผง
2. แอมป์มิเตอร์	จำนวน	3	เครื่อง
3. โวลท์มิเตอร์	จำนวน	3	เครื่อง
4. แบตเตอรี่ 65 Ah	จำนวน	1	ลูก
5. แผงโหลดความต้านทาน	จำนวน	1	ชุด
6. เทอร์โมมิเตอร์	จำนวน	1	เครื่อง
7. บารอมิเตอร์	จำนวน	1	เครื่อง

<u>หมายเหตุ</u> ตรวจดูรูปอุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ได้ในภาคผนวก

4.9.4 หัวข้อการทดสอบ

การทดสอบปรับเข้าหาจุดกำลังสูงสุดของ MPPT คอนเวอร์เตอร์ในแต่ละช่วงเวลา โดยทดสอบในช่วงเวลาเดียวกับที่ทำ I-V Scan

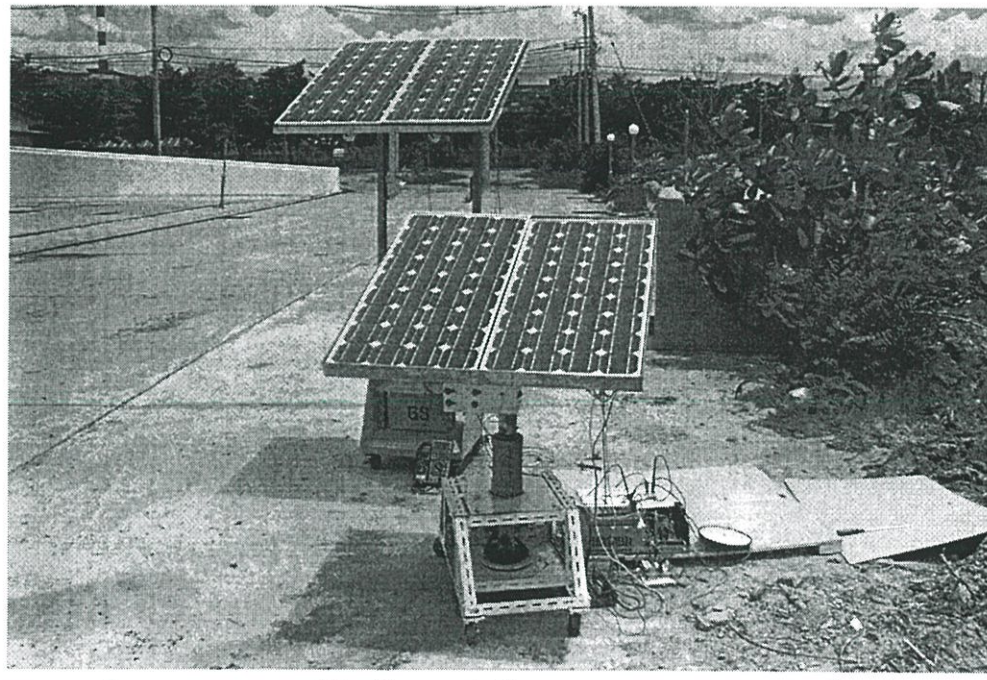


(ก) (ข)

รูปที่ 4.58 วงจรที่ใช้ทดสอบการปรับเข้าหาจุดกำลังสูงสุดของ MPPT คอนเวอร์เตอร์

(ก) ทดสอบโดยใช้ MPPT คอนเวอร์เตอร์จากแผงโซลาร์เซลล์ 2 แผงต่อแบบอนุกรม

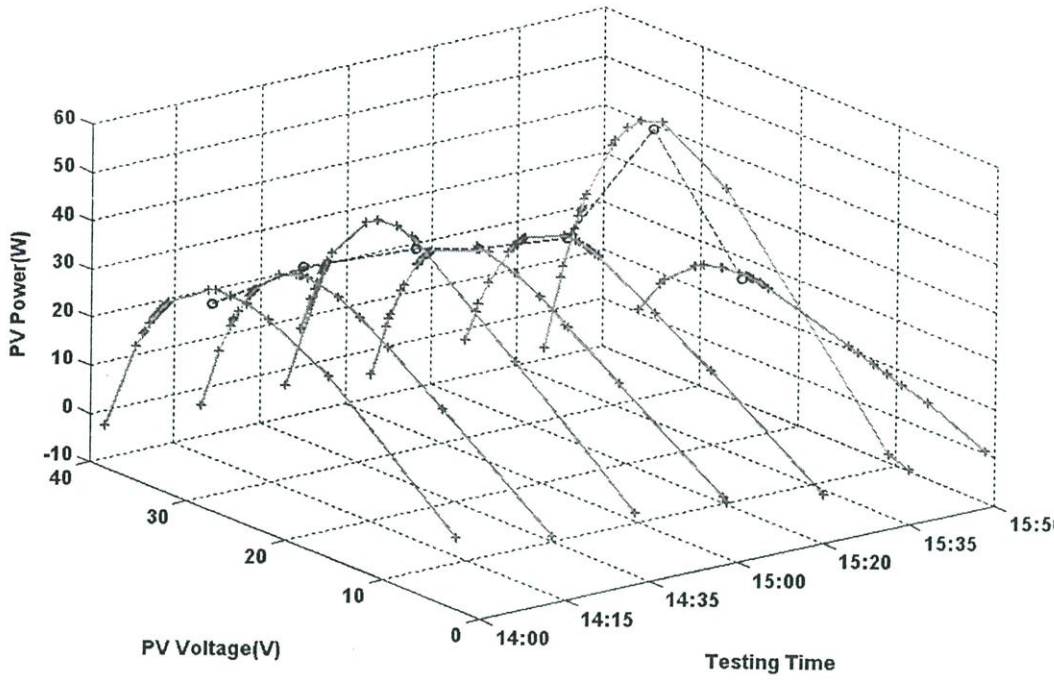
(ข) ทดสอบหา I-V Scan จากแผงโซลาร์เซลล์ 2 แผงต่อแบบอนุกรม



รูปที่ 4.59 ขณะทำการทดสอบการปรับเข้าหาจุดกำลังสูงสุดของ MPPT คอนเวอร์เตอร์

4.9.5 ผลการทดสอบ

ต่อวงจรดังรูปที่ 4.58 เพื่อทดสอบตามรูปที่แสดงไว้ในรูปที่ 4.59 การทดสอบประกอบด้วยการวัด I-V Scan พร้อมกับการบันทึกค่ากระแสแรงดันอินพุท และเอาท์พุทของ MPPT คอนเวอร์เตอร์ เพื่อนำมาแสดงการปรับเข้าหาจุด MPP ได้ดังรูปที่ 4.60



รูปที่ 4.60 ผลการทดสอบการปรับเข้าหาจุดกำลังสูงสุดของ MPPT คอนเวอร์เตอร์
ทดสอบวันที่ 30 สิงหาคม 2546 อุณหภูมิเฉลี่ย 39.43°C ความดันอากาศเฉลี่ย758.5mmHg

4.9.6 บทวิเคราะห์การทดสอบ

จากการทดสอบนำกำลังด้านอินพุทของแผงโซลาร์เซลล์มาสร้างกราฟร่วมแกนเดียวกันกับกราฟ กำลัง-แรงดัน ที่ได้จาก I-V Scan ดังแสดงในรูปที่ 4.60 ค่ากำลังอินพุทของ MPPT คอนเวอร์เตอร์สามารถรักษาเอาไว้ที่จุด MPP ของกราฟ I-V Scan ได้โดยมีค่าผิดพลาดเฉลี่ยอยู่ที่ 6.24% เมื่อเทียบกับจุด MPP ที่ได้จาก I-V Scan สาเหตุความผิดพลาดอาจเป็นผลจาก

1. การทำงานของ MPPT คอนเวอร์เตอร์เองที่ไม่สามารถปรับเข้าหาจุด MPP ได้เร็วพอเมื่อความเข้มแสง และอุณหภูมิเซลล์เปลี่ยนแปลง
2. ความผิดพลาดจากการอ่านค่าในมิเตอร์ที่ใช้ เพราะถึงแม้จะเป็นมัลติมิเตอร์แบบดิจิตอลที่มีความสะดวกในการอ่านค่าแล้วแต่ในสภาพการทำงานจริงตัวเลขที่แสดงจะไม่นิ่ง และเปลี่ยนแปลงเร็ว
3. ความผิดพลาดจากช่วงเวลาในการทำ I-V Scan ที่นานเกินไปเพราะหากช่วงเวลาที่ทำ I-V Scan นานเท่าใดยิ่งทำให้ความผิดพลาดของกลุ่มข้อมูลที่ได้ยิ่งมาก

อย่างไรก็ดีจากการทดสอบได้ข้อสรุปว่าการทำงานของ MPPT คอนเวอร์เตอร์สามารถดึงจุดทำงานสู่จุดที่มีกำลังสูงสุดของแผงพีวีที่ใช้ได้จริง โดยมีค่าคลาดเคลื่อนจากจุด MPP ประมาณ 6.24% ประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานอยู่ที่ประมาณ 72.21% ในอนาคตหากมีการพัฒนาประสิทธิภาพของ MPPT คอนเวอร์เตอร์มากขึ้นก็จะทำให้ได้พลังงานไฟฟ้าจากแผงพีวีอย่างเต็มที่มากยิ่งขึ้น

บทที่ 5
บทสรุป และวิเคราะห์ผล

5.1 การออกแบบ และสร้างระบบพลังงานไฟฟ้าจากเซล์แสงอาทิตย์ โดยใช้ MPPT คอนเวอร์เตอร์ร่วมกับการเคลื่อนหมุนทางกล

การใช้งานระบบพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ของระบบที่เลือกใช้ MPPT คอนเวอร์เตอร์ร่วมกับการเคลื่อนหมุนแผงพีวีทางกลตามที่ได้แสดงการออกแบบไว้ในบทที่ 3 มีองค์ประกอบที่ต้องนำมาพิจารณาดังนี้

5.1.1 องค์ประกอบการออกแบบ MPPT คอนเวอร์เตอร์

1. พิกัดของแผงโซลาร์เซลล์ที่ได้จากผู้ผลิตเกี่ยวกับประสิทธิการแปลงพลังงานไฟฟ้าสูงสุดที่ได้ผ่านการทดสอบตามที่มาตรฐานกำหนดมาแล้ว และจากการทดสอบจริงเพื่อนำข้อมูลมาใช้ในการออกแบบวงจร MPPT คอนเวอร์เตอร์เพราะหากใช้พิกัดสูงสุดของแผงโซลาร์เซลล์เป็นข้อมูลในการออกแบบคอนเวอร์เตอร์เพียงอย่างเดียวจะมีขนาดใหญ่เกินกว่าความจำเป็น

2. การเลือกใช้งานความถี่ของพัลส์ขับมอสเฟตสำหรับคอนเวอร์เตอร์ไม่ควรมากหรือต่ำเกินไป โดยทั่วไปอยู่ระหว่าง 30kHz-60kHz เนื่องจากหากความถี่ต่ำเกินไปอินดัคเตอร์จะมีขนาดใหญ่ และการปรับเข้าจุด MPP อาจทำได้ไม่ดีนัก ส่วนการเลือกใช้ความถี่สูงเกินไปก็มีกำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการสวิทช์มากขึ้นอุปกรณ์ที่ใช้มีราคาแพงขึ้น

3. อุปกรณ์อิเล็กทรอนิคส์ และไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ต้องทำงานได้เป็นปกติในช่วงการทำงานที่มีอุณหภูมิสูงได้ถึง 60°C-70°C

5.1.2 องค์ประกอบการออกแบบระบบติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์

1. น้ำหนักแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และโครงสร้างที่ต้องเคลื่อนหมุนทางกลเพื่อติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์

2. ระบบการหมุน และทิศทางการหมุนที่ออกแบบไว้ซึ่งมีความสำคัญยิ่งต่อพลังงานสูญเสียรวมทั้งความแข็งแรง เพราะถึงแม้ว่าสิ่งที่ต้องการคือการปรับหน้าแผงติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์ตามแนวทิศตะวันออก-ทิศตะวันตกแต่รูปแบบการหมุนนั้นมีมากมายหลายลักษณะ ดังนั้นจึงต้องวางแบบในขั้นตอนนี้ให้ดี

3. มอเตอร์ และการทดรอบมอเตอร์ซึ่งมีความสำคัญไม่ยิ่งหย่อนไปกว่าระบบการหมุน เนื่องจากมอเตอร์เป็นต้นกำลังในการหมุนควรเลือกพิกัดที่พอเหมาะกับโหลดภาระ

4. วงจรตรวจจับแสง และตำแหน่งที่ติดตั้งมีความสำคัญมากในการรับแสงเพื่อส่งสัญญาณในการติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์ให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ถ้าส่วนนี้ทำงานไม่ถูกต้องการทำงานทั้งหมดจะผิดพลาดมาก

5.2 โปรแกรมควบคุมการทำงานของ MPPT คอนเวอร์เตอร์ และระบบติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์

5.2.1 โปรแกรมควบคุมการทำงานของ MPPT คอนเวอร์เตอร์โดยไมโครคอนโทรลเลอร์

โปรแกรมสำหรับ MPPT คอนเวอร์เตอร์นั้นมีส่วนสำคัญหลัก 3 ส่วนด้วยกันคือ

1. ส่วนรับผลสัญญาณ และประมวลผลสัญญาณกระแส-แรงดันที่จำเป็นต่อการควบคุมดิวตี้ไซเคิล

2. ส่วนควบคุมดิวตี้ไซเคิล และปรับดิวตี้ไซเคิลจากข้อมูลกระแส-แรงดัน

3. ส่วนรับสัญญาณอินพุท และส่งสัญญาณเอาท์พุท (Interface) ทั้งจากเซ็นเซอร์, คีย์สวิทช์ และจอ LCD ฯลฯ

การใช้งานโปรแกรมควบคุมต้องให้ความสำคัญในการประมวลผลกระแส และแรงดันมากที่สุด เพราะหากการทำงานในส่วนนี้เพี้ยนไปจะส่งผลให้การควบคุมหลุดจากจุด MPP ได้โดยง่าย

5.2.2 โปรแกรมควบคุมการทำงานของระบบติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์

โปรแกรมสำหรับควบคุมการทำงานระบบติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์ดังที่ได้อธิบายไว้ใน Flow Chart ในรูปที่ 3.20 มีรายละเอียดการควบคุมโดยสรุปมีดังนี้

1. การรับแรงดันจากวงจร LDR ทั้ง 4 ทิศทางพร้อมประมวลผลเป็นตัวเลขเพื่อเปรียบเทียบกัน (ต้องออกแบบให้เหมาะสมต่ออุปกรณ์ LDR แต่ละตัว และมีการปรับตัวตามแสงอาทิตย์ในพื้นที่ทดสอบกับใช้งานได้เหมาะสม)

2. ส่วนควบคุมเวลาเพื่อรับรังสีตรงซึ่งอาจเลือกปรับตั้งได้ระหว่าง 3-12 นาที ตามความเหมาะสมในการใช้งานตามต้องการ โดยช่วงเวลาดังกล่าวแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไม่เสียความสามารถในการรับรังสีตรง

3. การส่งสัญญาณควบคุมวงจรขับมอเตอร์เพื่อติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์ในแต่ละแกน

4. ส่วนควบคุมโดยคีย์สวิทช์ และแสดงผลจากจอ LCD

5.2.3 การเชื่อมโยงการทำงานของโปรแกรมควบคุม

การทำงานของโปรแกรมควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ที่เลือกใช้ในโครงงานวิจัยนี้ แบ่งการทำงานเป็นการควบคุม MPPT คอนเวอร์เตอร์ และการควบคุมการติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์จากไมโครคอนโทรลเลอร์แยกกันคนละชุด เพื่อประโยชน์เกี่ยวกับความไวในการปรับตัวตามแสงอาทิตย์

ดังนั้นจึงต้องมีการโปรแกรมเพื่อเชื่อมโยงการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์แต่ละชุด ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1. การนับเวลาการติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์เพราะขณะที่มีการติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์กระแส และแรงดันมีการกระเพื่อมเนื่องจากการดึงกำลังไฟฟ้าจึงควรมีการสื่อสารระหว่างระบบควบคุมแต่ละชุดในขณะที่มอเตอร์หมุนเพื่อให้ MPPT คอนเวอร์เตอร์คงสภาวะเดิมไว้จนกว่าการติดตามดวงอาทิตย์จะเสร็จสิ้น

2. การเชื่อมต่อกับคีย์สวิทช์ ,จอ LCD และอุปกรณ์ภายนอกอื่นๆ เพราะหากใช้อุปกรณ์เหล่านี้แยกชุดกันจะทำให้ต้นทุนของระบบสูงขึ้นโดยไม่จำเป็น จึงควรเลือกใช้กับไมโครคอนโทรลเลอร์ชุดใดชุดหนึ่งเพียงชุดเดียวแล้วทำการเชื่อมโยงการทำงานในส่วนรับ-แสดงผลแทน

5.3 การทดสอบคุณภาพ และการแปลงพลังงานไฟฟ้า

สรุปการทดสอบคุณภาพ และการแปลงพลังงานไฟฟ้าจากการทดสอบต่างๆได้ดังนี้

1. ประสิทธิภาพ MPPT คอนเวอร์เตอร์

ทำการทดสอบประสิทธิภาพของ MPPT คอนเวอร์เตอร์ทั้งในห้องทดสอบโดยใช้แหล่งจ่ายไฟกระแสตรงเป็นแหล่งกำเนิดพลังงานไฟฟ้า และทดสอบประสอบประสิทธิภาพจากการใช้งานจริงได้ประสิทธิภาพเฉลี่ยเป็น 80.51% และ72.21% ตามลำดับ

2. กำลังสูญเสียจากการติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์ และไฟเลี้ยงวงจรควบคุม

แบ่งการทดสอบกำลังสูญเสียจากทั้งการติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์เป็นการทดสอบกำลังสูญเสียจากระบบ Polar E-W Tracker และ E-w Axis Tracker ได้พลังงานที่สูญเสียไปคือ 0.4Wh, 0.25Wh (จำลองการทำงานสำหรับ 1 วัน) ส่วนพลังงานสูญเสียจากไฟเลี้ยงวงจรควบคุมคือ 0.9Wh (ทดสอบ 3 ชั่วโมง 30 นาที) ได้พลังงานสูญเสียสูงสุดต่อวันเมื่อเผื่อการหลงทิศทางแล้วประมาณ 6.52Wh ดังแสดงรายละเอียดในหัวข้อที่ 4.3.6

3. ความผิดพลาดในการประมวลผล และแสดงผลจากจอ LCD

การประมวลผล และการแสดงผลมีทั้งหมด 3 ตำแหน่งดังนี้

- การประมวลผล และการแสดงผลแรงดันอินพุทมีความผิดพลาดสูงสุด 1.60% เฉลี่ย 0.69%
- การประมวลผล และการแสดงผลกระแสอินพุทมีความผิดพลาดสูงสุด 5.00% เฉลี่ย 1.33%
- การประมวลผล และการแสดงผลแรงดันแบตเตอรี่มีความผิดพลาดสูงสุด 1.00% เฉลี่ย 0.25%

4. การต่อร่วมกันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

การทดสอบหัวข้อนี้เพื่อทำ I-V Scan ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่อร่วมกันแบบอนุกรม และ

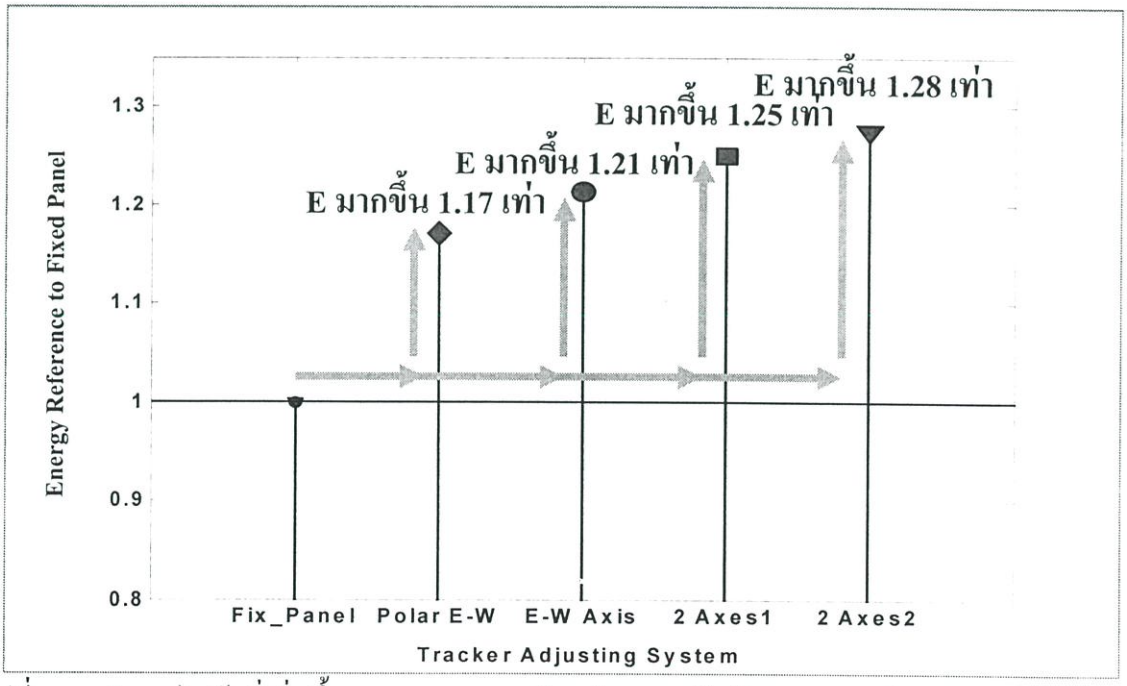
ขนานเปรียบเทียบกับ I-V Scan จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพียงแพงเดียวได้ผลสอดคล้องกันคือ จุดกำลังสูงสุด P_{MAX} ของการต่อร่วมกันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าประมาณ n เท่าของการใช้งาน 1 แผงเมื่อ n คือจำนวนแผงที่นำมาต่อร่วมกัน

โดยมีข้อกำหนดว่าคุณสมบัติกับประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่นำมาต่อร่วมกันต้องใกล้เคียงกัน และมีการต่อไดโอดบล็อกกระแส-ไดโอดบายพาสกระแสถูกต้อง

5. พลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นจากการติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์ (แสดงในรูปที่ 5.1)

- การติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์แบบ Polar E-W Tracker ร่วมกับ MPPT คอนเวอร์เตอร์ได้ค่าพลังงานเพิ่มขึ้นจากระบบอ้างอิงประมาณ 17.06%
- การติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์แบบ E-W Axis Tracker ร่วมกับ MPPT คอนเวอร์เตอร์ได้ค่าพลังงานเพิ่มขึ้นจากระบบอ้างอิงประมาณ 21.40%
- การติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์แบบ 2 Axes Tracker ร่วมกับ MPPT คอนเวอร์เตอร์ได้ค่าพลังงานเพิ่มขึ้นจากระบบอ้างอิงประมาณ 24.95%

เมื่อระบบอ้างอิงคือการอัดประจุผ่าน ECU ที่เป็นแบตเตอรี่ชาร์จเจอร์มีการทำงานแบบ LVCU และตั้งแผงแบบทำมุมคงที่ 15° เทียบกับแนวราบหันหน้าแผงไปทางทิศเหนือซึ่งเป็นทิศที่ดวงอาทิตย์เคลื่อนคล้อยไปในวันที่ทดสอบ



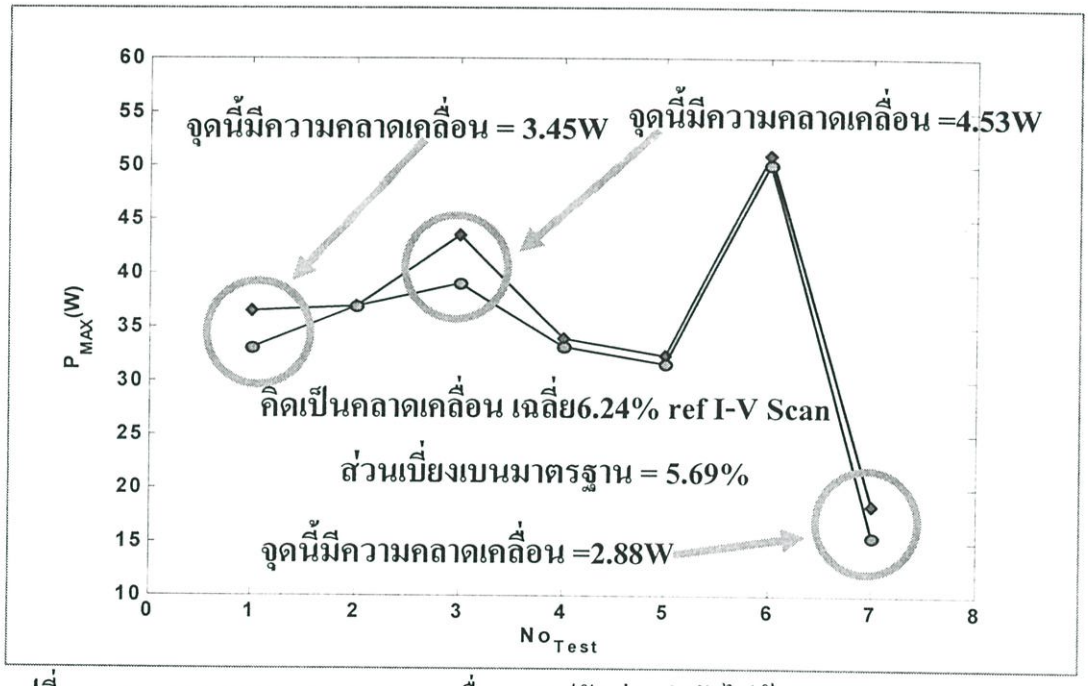
รูปที่ 5.1 พลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นจากการทดสอบเทียบกับระบบอ้างอิงของระบบติดตามดวงอาทิตย์ เมื่อ 2 Axes1 คือระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบ 2 แกนเมื่อตั้งเวลาการทำงานทุกๆ 3 นาที และ 2 Axes2 คือระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบ 2 แกนเมื่อตั้งเวลาการทำงานทุกๆ 10 นาที

6. พลังงานไฟฟ้าที่ได้เพิ่มขึ้นเมื่อใช้ MPPT คอนเวอร์เตอร์ร่วมกับการเคลื่อนหมุนแผงพีวีทางกล

การติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์แบบ 2 Axes Tracker ร่วมกับ MPPT คอนเวอร์เตอร์ได้ค่าพลังงานเพิ่มขึ้นจากระบบอ้างอิงประมาณ 27.59% ในวันที่อากาศแจ่มใสทั้งวัน และ 23.02% ในวันที่อากาศแจ่มใสเพียง 5-6 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 4.52 และรูปที่ 4.56 ตามลำดับ

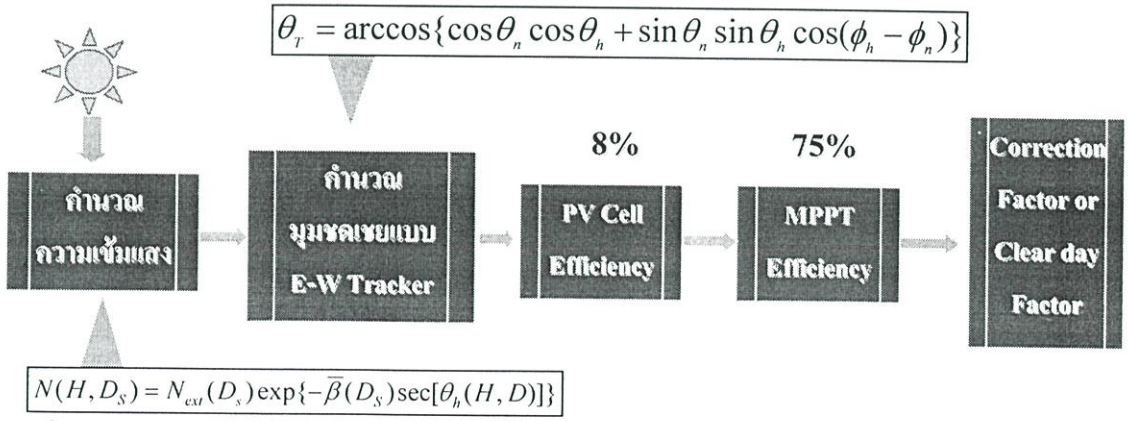
7. การปรับเข้าหาจุด MPP ของ MPPT คอนเวอร์เตอร์

การทดสอบการปรับการทำงานเข้าสู่จุด MPP ของ MPPT คอนเวอร์เตอร์ที่ออกแบบไว้ในหัวข้อการทดสอบที่ 4.9 ภายใต้สภาวะแสงอาทิตย์ที่มีการเปลี่ยนแปลง มีการปรับหาจุด MPP ผิดพลาดไปจากจุด MPP ที่ได้จาก I-V Scan เฉลี่ย 6.24%



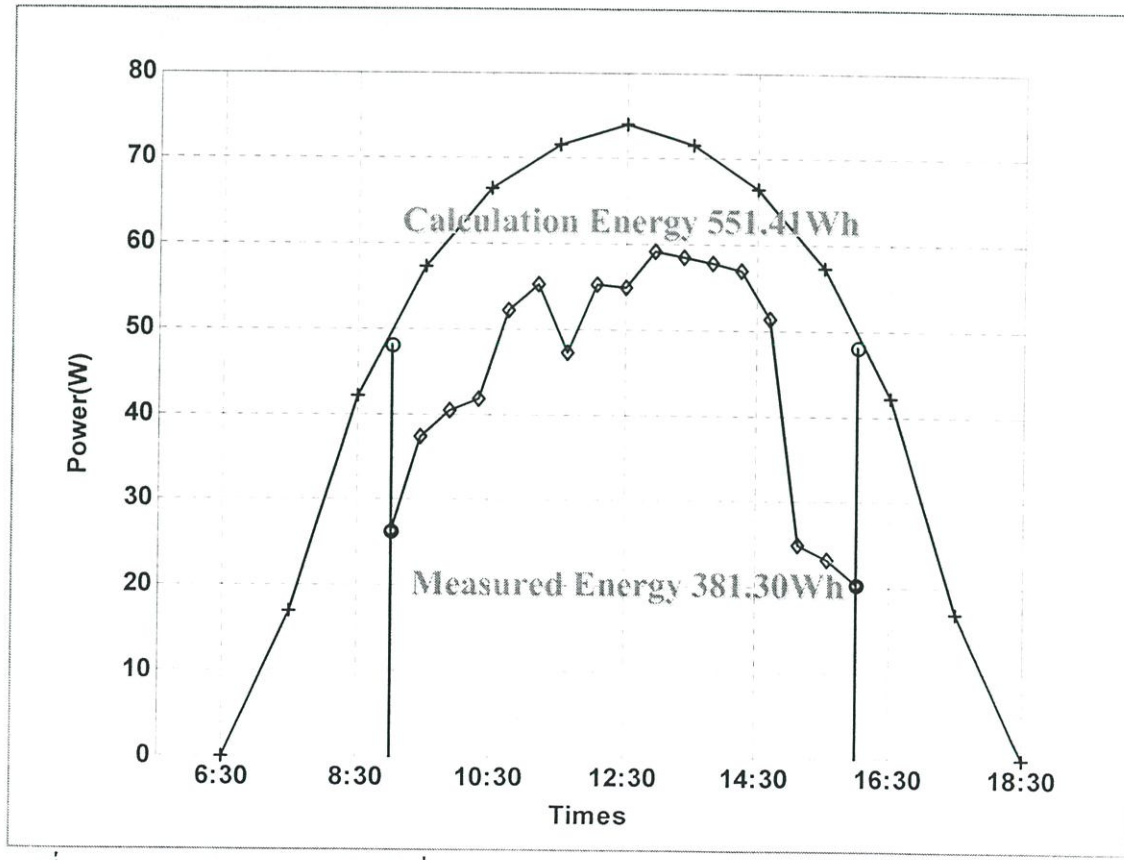
รูปที่ 5.2 การทดสอบแสดงความคลาดเคลื่อนการปรับสู่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของ MPPT คอนเอร์เตอร์

8. การประมาณการณ์พลังงานไฟฟ้าในแต่ละวัน



รูปที่ 5.3 รูปแบบการคำนวณการประมาณการณ์พลังงานไฟฟ้าที่ได้จากระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ MPPT คอนเวอร์เตอร์ร่วมกับการติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์แบบ E-W Axis Tracker

จากรูปที่ 5.3 การคำนวณพลังงานไฟฟ้าที่ได้ เริ่มต้นจากการคำนวณพลังงานแสงอาทิตย์ที่ส่งมายังสถานีทดสอบตามสมการที่ (2.27) และคำนวณมุมชดเชยแบบ E-W Axis Tracker ตามสมการที่ (2.16) เมื่อ θ_n คือมุมเอียงของแผงขณะใดๆ และ ϕ_n เท่ากับ 90° ในเวลาเช้า และเท่ากับ 270° ในช่วงบ่าย (พิจารณาได้จากรูปที่ 2.25) เมื่อสามารถคำนวณพลังงานแสง และมุมชดเชยแล้วก็สามารถทำนายพลังงานไฟฟ้าสูงสุดต่อหน่วยพื้นที่ได้โดยแทนค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และประสิทธิภาพของ MPPT คอนเวอร์เตอร์ ค่าพลังงานไฟฟ้าที่คำนวณได้แสดงได้ดังกราฟรูปพาราโบลาร์แบบคว่ำในรูปที่ 5.4 ส่วนค่าพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบแสดงไว้ในรูปเดียวกันผลที่ได้จากการคำนวณแตกต่างจากการทดสอบจริงประมาณ 30% เนื่องมาจาก ส.ป.ส. ความแจ่มใสของอากาศ (Correction Factor or Clear day Factor) ในวันที่ทดสอบซึ่งไม่เท่ากันในแต่ละวัน หากวันที่ทดสอบ ส.ป.ส. นี้มีค่าเท่ากับ 1 พลังงานที่ได้จากการทดสอบจะเท่ากับการคำนวณตามรูปแบบการคำนวณในรูปที่ 5.3 ซึ่งเป็นไปได้ยากอย่างยิ่งในความเป็นจริง ดังนั้นที่ถูกต้องคือจะพิจารณาอย่างไรให้การประมาณการพลังงานไฟฟ้าถูกต้องมากที่สุดนั้น คือการกำหนด ส.ป.ส.อากาศแจ่มใสของแต่ละวันขึ้นมา ซึ่งขึ้นกับการทดสอบจนแน่ใจว่าในวันที่ทดสอบ ณ สถานีทดสอบมีค่า ส.ป.ส. อากาศแจ่มใสเท่าใด ซึ่งข้อมูลเหล่านี้ไม่สามารถสมมติขึ้นมาได้ การได้มาซึ่ง ส.ป.ส. อากาศแจ่มใสนั้นต้องทำการเก็บข้อมูลจำนวนมากในแต่ละวันในหลายรอบปีของสถานีทดสอบเสียก่อน



รูปที่ 5.4 เปรียบเทียบพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากการประมาณการณ์ตามรูปแบบการคำนวณในรูปที่ 5.3 เปรียบเทียบกับค่าพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบจริงทดสอบวันที่ 2 สิงหาคม 2546

5.4 ข้อเสนอแนะ

การใช้งานพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Photovoltaic หรือการแปลงพลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์โดยตรง มีองค์ประกอบหลัก 3 องค์ประกอบใหญ่คือ

1. พลังงานจากแสงอาทิตย์
2. เซลล์แสงอาทิตย์ที่นำมาใช้งาน
3. วงจรควบคุม และโหลดภาระ

การใช้ประโยชน์จากการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าได้สูงสุดนั้นก็ขึ้นกับการควบคุมองค์ประกอบทั้ง 3 ส่วนดังกล่าวนั่นเอง การควบคุมพลังงานแสงอาทิตย์เป็นไปไม่ได้ในความเป็นจริง แต่การเก็บพลังงานแสงอาทิตย์ให้ได้ดีตลอดวันบนพื้นผิวโลกที่มีการเปลี่ยนแปลงวัน-ฤดูกาล โดยตลอดทำได้โดยการใช้ระบบพีวีที่มีการติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์

5.4.1 ข้อเสนอแนะสำหรับการออกแบบ และใช้งานระบบติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์

1. การเลือกระบบการปรับหมุนที่เหมาะสมจากการทดสอบได้ว่าการใช้ระบบ E-W Axis Tracker มีพลังงานเพิ่มขึ้นจากระบบอ้างอิงเป็นที่น่าพอใจ ดังนั้นระบบนี้จึงมีความเหมาะสมในด้านพลังงานไฟฟ้า และเมื่อพิจารณาถึงการออกแบบเกี่ยวกับโครงสร้างตั้งแผงก็มีความซับซ้อนไม่มากนักประกอบกับมีค่าใช้จ่ายที่ต่ำ จึงเป็นระบบที่น่าสนับสนุนในการออกแบบใช้งานเป็นระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดใหญ่ต่อไป

2. พื้นที่ทำงานในการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ระบบติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์จากระบบ E-W Axis Tracker เพียงอย่างเดียวน้อยกว่า พื้นที่ติดตั้งแผงของระบบติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์แบบ Polar E-W Tracker และ 2 Axes Tracker ถึง 50% เมื่อเทียบกับพื้นที่ใช้งานจากระบบ E-W Axis Tracker

5.4.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการใช้งานแผงเซลล์แสงอาทิตย์

การใช้งานแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยคำนึงถึงคุณลักษณะกระแส แรงดัน และการต่อร่วมกันแบบหลายแผงเพื่อใช้งานเป็นระบบจ่ายพลังงานไฟฟ้าขนาดใหญ่ ควรเลือกให้เหมาะกับโหลดภาระตามการปรับตัวของจุด MPP ตามแนวเส้น P_{MAX} ดังแสดงเป็นเส้นประเชื่อมจุด P_{MAX} ในรูปที่ 4.60 รวมทั้งต้องใช้ไดโอดบล็อกกระแส และไดโอดผ่านกระแส (Bypass Diode) ที่มีขนาดกับตำแหน่งที่ต่อร่วมในวงจรที่เหมาะสม

5.4.3 ข้อเสนอแนะการใช้วงจรควบคุมการอัดประจุสำหรับโหลดภาระแบตเตอรี่

การเลือกวงจรดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์เป็นวงจรสำหรับการอัดประจุโดยอาศัยการปรับดิวตี้ไซเคิลของสัญญาณขับคอนเวอร์เตอร์จากข้อมูลกระแส-แรงดันจากแผงโซลาร์เซลล์นับว่ามีความเหมาะสมในด้านการดึงพลังงานสูงสุดจากระบบพลังงานแสงอาทิตย์โดยทั่วไป หัวใจสำคัญของการใช้งานวงจร

MPPT คอนเวอร์เตอร์ที่ควรพิจารณาการออกแบบให้มีประสิทธิภาพสูงที่สุดเท่าที่จะทำได้ในงานวิจัยนี้ MPPT คอนเวอร์เตอร์มีประสิทธิภาพประมาณ 72% เมื่อเปรียบเทียบกับระบบอ้างอิงในสภาวะทำงานร่วมกับเซลล์แสงอาทิตย์จริง หากต้องการเพิ่มประสิทธิภาพของคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้อาจทำได้โดยใช้อุปกรณ์ที่มีแรงดันตกคร่อม และพลังงานสูญเสียเนื่องจากความร้อนต่ำมากๆ รวมทั้งเลือกใช้งานคาปาซิเตอร์กรองสัญญาณกระเพื่อมที่เหมาะสมไม่มาก หรือน้อยจนเกินไป

โหลดภาระที่ใช้หากเป็นแบตเตอรี่ก็ควรเข้าใจคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่เกี่ยวกับกระแสอัดประจุ และกระแสขณะคายประจุในภาคจ่ายพลังงาน รวมทั้งความจุของแบตเตอรี่เพราะมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อปริมาณกระแสที่สะสมในแบตเตอรี่กับการทำงานของ MPPT คอนเวอร์เตอร์

5.4.4 ปัญหา และแนวทางแก้ไข

1. ปัญหาในการทำงานวิจัยส่วนใหญ่เกิดจากการใช้วงจรเซ็นเซอร์ต่างๆ เนื่องจากอุปกรณ์บางชนิดไม่ได้มาตรฐานดีพอ เมื่อนำมาใช้งานในระบบก็ก่อให้เกิดความผิดพลาดในการทำงาน แก้ไขได้โดยการใช้อุปกรณ์ที่มีมาตรฐานรองรับแต่ก็มีราคาแพง หรือเพิ่มส่วนแสดงผลความผิดพลาดหากมีอุปกรณ์ใดอุปกรณ์หนึ่งทำงานไม่ถูกต้องโดยเพิ่มความสามารถในส่วนของโปรแกรมควบคุมไมโคร-คอนโทรลเลอร์

2. การลัดวงจรขณะทำการทดสอบ จากการทดสอบในช่วงแรกมีการลัดวงจรบ่อยครั้งเพราะมีอุปกรณ์ป้องกันไม่เพียงพอ ทำให้อุปกรณ์เสียหาย และเสียเวลาในการแก้ไข สามารถลดปัญหาเหล่านี้ได้โดยเพิ่มความรอบคอบ และให้ความสำคัญตั้งแต่ขั้นตอนการทดสอบเพื่อลดการสูญเสียดังกล่าว

3. การเลือกใช้วัสดุเพื่อทำโครงสร้างสำหรับระบบติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์ที่ไม่เหมาะสม เนื่องจากไม่เข้าใจการเลือกใช้วัสดุ รวมทั้งความแข็งแรงของวัสดุแต่ละประเภทดีพอ แก้ไขได้โดยหาความรู้เพิ่มเติมเกี่ยวกับวัสดุต่างๆ หรือปรึกษาผู้เชี่ยวชาญเพื่อให้รูปแบบที่สร้างออกมามีความลงตัวในหลายๆด้านที่ต้องการใช้งาน

4. ปัญหาเกี่ยวกับการทดสอบ และเครื่องมือวัดการที่มีจำนวนรวมทั้งความละเอียดไม่เพียงพอ แก้ไขโดยเลือกทดสอบในหลายๆรูปแบบประกอบกับเครื่องมือวัดที่พร้อม และมีความละเอียดเพียงพอทำให้ข้อมูลที่ได้สามารถนำมาวิเคราะห์ได้แม่นยำมากขึ้น

5. การวัดกระแสจากวงจรวัดกระแสแบบใช้ความต้านที่มีค่าน้อยต่ออนุกรมกับวงจรทำให้มีค่าพลังงานสูญเสียเกิดขึ้น และสัญญาณที่ได้ไม่นิ่งพอส่งผลให้การประมวลผลผิดพลาด สามารถแก้ไขได้โดยการใช้อุปกรณ์วัดกระแสแบบหม้อแปลงกระแสตรง (CT:Current Transformer) รวมทั้งใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่สามารถประมวลผลแบบ FFT ได้เพื่อเพิ่มอัลกอริทึมในการกำจัดสัญญาณรบกวน

6. การเลือกใช้อุปกรณ์ตรวจจับทิศทาง รวมทั้งการบังเงาที่มีความละเอียด และความน่าเชื่อถือ เนื่องจากการใช้ LDR ร่วมกับการบังเงาอย่างง่ายตามทิศทางที่ติดตั้งทั้ง 4 ด้านในงานวิจัยนี้ให้ความละเอียดในการตรวจจับทิศทางแสงเพียงระดับหนึ่งเท่านั้นยังคงต้องพัฒนาชุดตรวจจับแสงต่อไป ซึ่งอาจ

ทำได้โดยอาศัยวัสดุดำสมบูรณ์ (Perfect Black Material) ร่วมกับเทอร์โมคัปเปิลหลายรอยต่อ หรือเทอร์โมไพล์ในหลักการเดียวกันกับเครื่องมือวัดความเข้มแสงที่มีมาตรฐานร่วมกับโมเดลของฉากบังแสงที่เหมาะสม

7. วงจรคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้มีประสิทธิภาพไม่สูงนัก แก้ปัญหาได้โดยใช้มอสเฟต หรืออุปกรณ์ทำหน้าที่ตัดต่อวงจรคอนเวอร์เตอร์ที่มีค่าแรงดันตกคร่อมต่ำมากที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ รวมทั้งการใช้เทคนิคทางอิเล็กทรอนิคส์กำลังอื่นๆในการลดสัญญาณกระเพื่อม และเพิ่มความต่อเนื่องของสัญญาณกับพลังงานไฟฟ้า

เอกสารอ้างอิง

[1] Chihchiang Hua; "Chihming Shen Control of DC/DC converters for solar energy system with maximum power tracking", IECON 97 23rd International Conference

[2] Hiroshi Yamashita, Keita Tamahashi, Masakaza Michihira, Aldra Tsuyoshi, Kuniyuki Amako, and Minwon Park "A Novel Simulation Technique of the PV Generation System Using Real Weather Conditions" PCC Osaka 2002

[3] Toshihiko Noguchi, Member IEEE, Shigenori Togashi, and Ryo Nakamoto "Short Current Pulse-Based Maximum Power Point Tracking Method for Multiple Photovoltaic and Converter Module System" IEEE Transaction on Industrial Electronics, Vol.49, No.1, 1 Febuary 2002

[4] Mao-Lin chiang, Chib-Chiang Hua, and Jong Rong Lin "Direct Power control for Distributed PV Power System", PCC-Osaka 2002

[5] Minwon Park, Bong-tae Kim, In-Keun Yu "A Novel Simulation Method for PV Power Generation Systems Using Real Weather Condition", ISIE 2001, Pusan, Korea

[6] Nobuyuki Kasa, Takahiko Iida, and Gourab Majumdar "Robust Control for Maximum Power Point Tracking in Photovoltaic Power System", PCC- Osaka 2002

[7] Efticchios, Kostas Kalaitzakis, and Nicolas C. Vougaris "Developtment of a Microcontroller-Based, Photovoltaic Maximum Power Point Tracking Control System", IEEE Transaction on Power Electronics, Vol. 16, No.1, January 2001

[8] Ycong-Chau Kuo, Tsorng-Juu Liang, and Jiann-fuh Chen " Novel Maximum-Power-Point-Tracking Controller for Photovoltaic Energy Conversion System", IEEE Transaction on Industrial Electronics, Vol.48, no.3, June 2001

[9] J.H.R. Enslin, D.B. Snyman "Combined Low Cost, High Efficient Inverter, Peak Power Tracker and Regulator for PV Application", IEEE Transaction on Power Electronics, Vol.6, No.1, 1 January 1991

[10] SMM Wolf, JHR Enslin , Department of Electrical and Electronics Engineering University of Stellenbosh, Stellenbosh South Afarica, "Economic PV Maximum Power Point Tracking Regulator with Simplistic Controller, IEEE Conferrence 1993

[11] Xiaofeng Sun, Weiyang Wu, Xin Li, Qinglin Zhao "A Research on Photovoltaic Energy Controlling System with Maximum power Point Tracking", PCC-Osaka 2002

[12] Y.-M. Chen, Y.-C. Liu, F.-Y. Wu, and Y.-E. Wu "Multi- Input Converter with Power Factor Correction and Maximum Power Point Tracking Feature" IEEE Transaction 2002

[13] Daniel A. Pritchard "Sun Tracking by Peak Power Positioningfor Photovoltaic Concentrator Arrays" IEEE Transaction 1983

[14] กฤดา เชาว์วัฒนาพานิช, กิตติพงษ์ เชียงทอง, กิตติฤทธิ์ จ่างจิต, เกรียงศักดิ์ บันดาลศิริกุล, "เซลล์แสงอาทิตย์ระบบเคลื่อนที่เปลี่ยนตำแหน่งตามดวงอาทิตย์โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์" ปริญญานิพนธ์ ปีการศึกษา 2543 ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล.

[15] จุติเลิศ สกุลศักดิ์ม พีรสิทธิ์ ลิขิตดุษฎี, สรรเพชญ พนัสเจริญม "เซลล์แสงอาทิตย์เคลื่อนที่เปลี่ยนตำแหน่งตามดวงอาทิตย์" ปริญญานิพนธ์ ปีการศึกษา 2542 ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล.

[17] S. Suriyakanont, S. Potivejkul Department of Electrical Engineering, KMITL "Comparison of Maximum Power Transfer between Sunlight Solar Tracking and MPPT Converter" IPEC'2001, Nanyang University, Singapore, 15-17 May 2001.

[18] Greene, M.; Hong Tan; "Solar tracking: design and simulation [X-ray emission detection] " System Theory, 1988., Proceedings of the Twentieth Southeastern Symposium on , 20-22 March 1988 Page(s): 208 -212

[19] Gholdston, E.; Hartung, J.; Friefeld, J. "Current status, architecture, and future technologies for the International Space Station electric power system" Aerospace and Electronic Systems Magazine, IEEE , Volume: 11 Issue: 2 , Feb. 1996 Page(s): 25 -30

[20] Little, F.E "A wireless power transmission power system for microgravity crystal processing satellites"; Aerospace Conference Proceedings, 2000 IEEE , Volume: 4 , 18-25 March 2000 Page(s): 55 -60 vol.4

[21] F.Lasnier and T. Gan Ang. Photovoltaic Engineering Handbook. New York : Adam Hilger, 1990

[23] Shockley, W. and Queisser, H.J. "Detailed Balance Limit of Efficiency of p-n Junction Solar Cells." Journal of Applied Physics, 32, 1961. pp. 510-519.

[24] T. Markvart. Solar Electricity. London : John Wiley & Sons, Ltd. 1994.

[25] Muirhead, I.J. and Kuhn, D.J. "Photovoltaic Power System Design Using Available Meteorological Data." Proceedings, 4th International Photovoltaic Science and Engineering Conference, Sydney, 1989. pp. 947-953.

[26] R. H. B. Exell and K. Saricali. "The Availability of Solar Energy in Thailand." Research Report No. 63. AIT, Bangkok, 1976.

[27] ศูนย์วิจัยอิเล็คทรอนิกส์. **เทคโนโลยีการสร้าง และการใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์.** โครงการตำราวิชาการ, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

[29] ยุทธ อัครมาส. **ฟิสิกส์ของระบบเซลล์สุริยะ.** คณะวิทยาศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2530.

[30] บุญสร้าง ดิเรกสถาพร. "การศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้สระแสงอาทิตย์เป็นแหล่งความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือในประเทศไทย." วิศวกรรมสารมหาวิทยาลัย ขอนแก่น ปีที่23 ฉบับที่ 2, 2539. หน้า 51-73.

[31] ยุทธ อัครมาส และ พิฑูรย์ ตรีวิจิตรเกษม. "Photovoltaic Solar Systems." เอกสารประกอบการบรรยายทางวิชาการ โดย IEEE (THAILAND SECTION), 2526. หน้า 1-22.

[32] P. Wibulswas and K. Kirtikara. "Research and Development on Solar Energy in Thailand." UNIDO Consultative Meeting on Solar Energy Research & Applications , December 1992. pp. 356-362.

[33] Dunlop, J., Bower, W. and Harrington, S. "Performance of Battery Charge Controllers." 22nd IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Las Vegas, 1991. pp. 640-645.

[34] IEEE Std 1013-1990. **IEEE Recommended Practice for Sizing Lead-Acid Batteries for Photovoltaic (PV) Systems.** New York : IEEE, Inc. 1990.

[35] K.Y. Khouzam. "Optimum load Matching in Direct-Coupled Photovoltaic Power Systems Application to Resistive Loads." IEEE Transactions on Energy Conversion. EC-5, No.2, June 1990. pp.265-271.

[36] Serreze, H.B. "Optimizing Solar Cell Performance by Simultaneous Consideration of Grid Pattern Design and Interconnect Configurations." 13th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Washington, D.C., 1978. pp. 609-614.

[37] Dr. P.S. Bhimbhra "**Power Electronics**" Electrical and electronics Engineering Department Tharpar Institute of Engineering and Technology

[38] Sansak Deon, Siriwat Potivejkul, "Optimum PV panels setting analysis using numerical method technique", Department of Electrical Engineering, KMITL, Electrical Engineering Conference 2543, Agricultue University

[39] IEEE Standard 1513-2001 "IEEE Recommended Practice for Qualification of Concentrator Photovoltaic (PV) Receiver Sections and Modules"

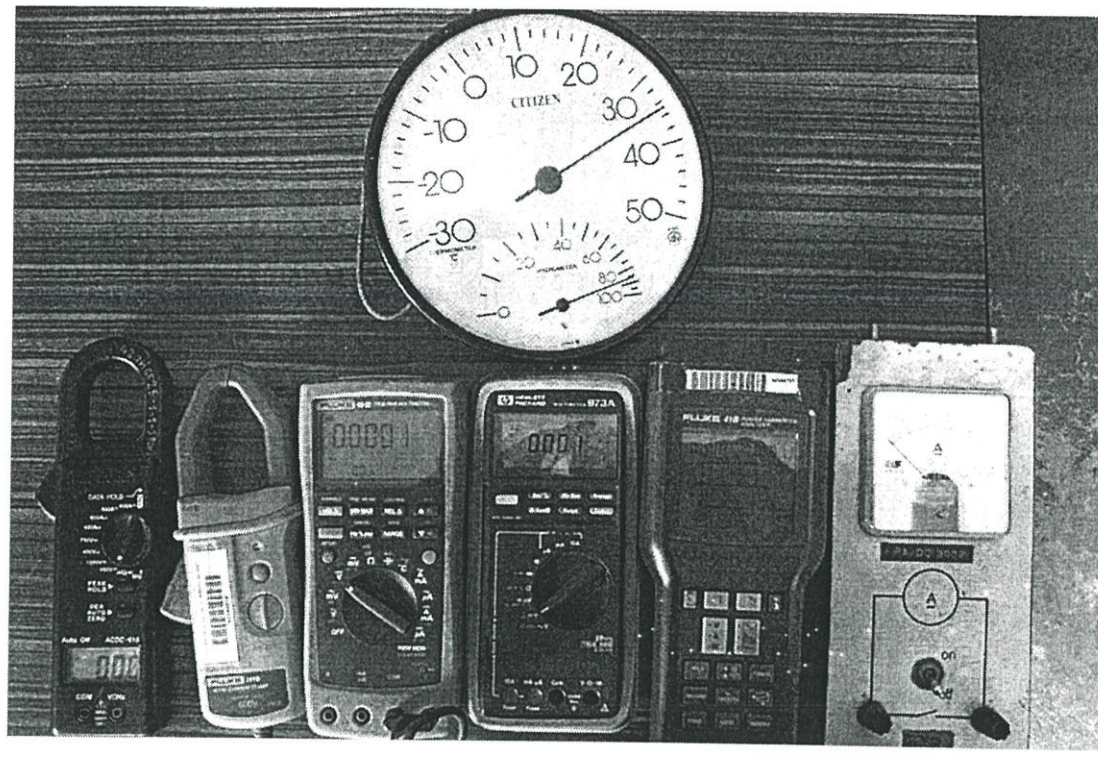
[40] Colonel Wm. T. McLyman, "Transformer and Inductor Design Handbook", Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology Pasadena California

[41] Hans Bode, **Lead-Acid Batteries.** Germany : John Wiley & Sons, Inc., 1977

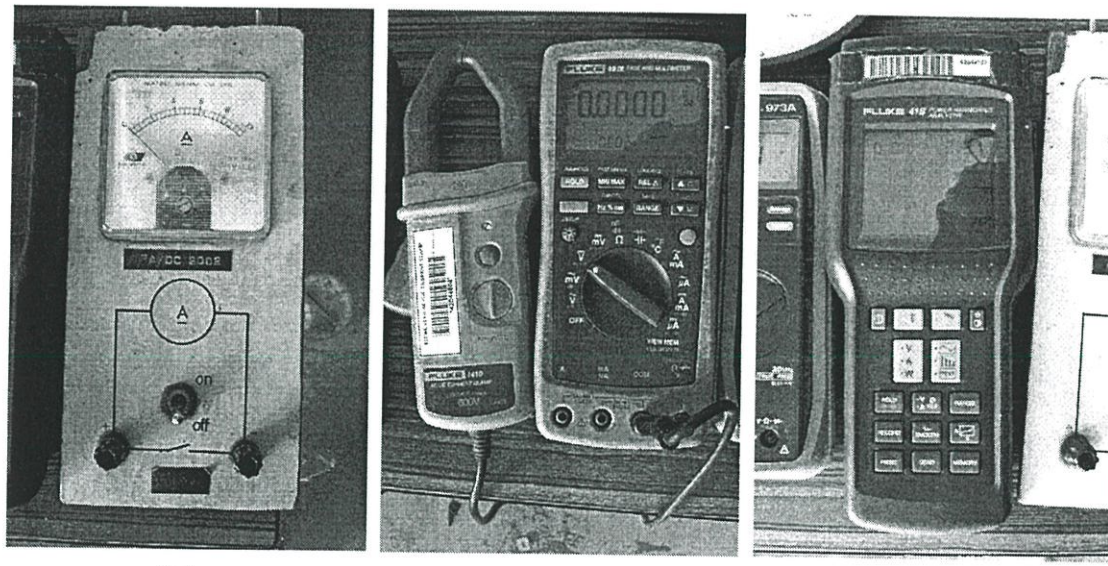
[42] Donald Rapp, "Solar Energy", Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology Pasadena California, University of Texas at Dallas Richardson, Texas

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.
เครื่องมือวัด และอุปกรณ์ทางไฟฟ้า



รูปที่ ก-1 เครื่องมือวัดกระแส แรงดัน และเทอร์โมมิเตอร์



(ก) (ข) (ค)

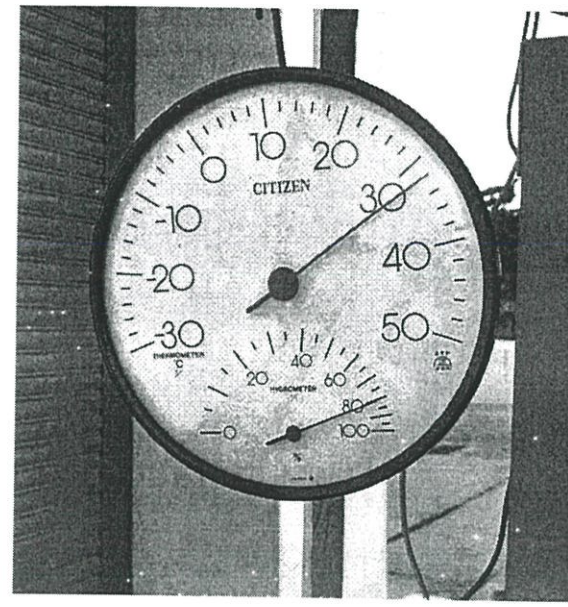
รูปที่ ก-2 เครื่องมือวัดกระแส

(ก) มิเตอร์วัดกระแสแบบเข็ม 0-10A

(ข) มิเตอร์วัดกระแสแบบแคลมป์ 1mV/A

(ค) มิเตอร์วัดกระแส และแรงดันแบบบันทึกค่าได้

(ก)

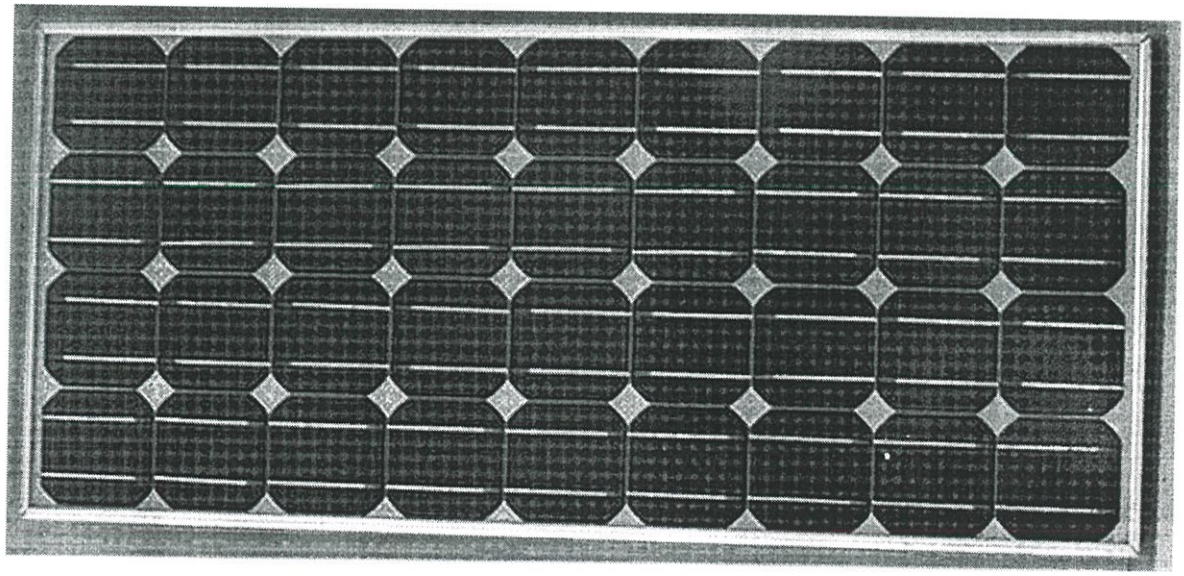


(ข)

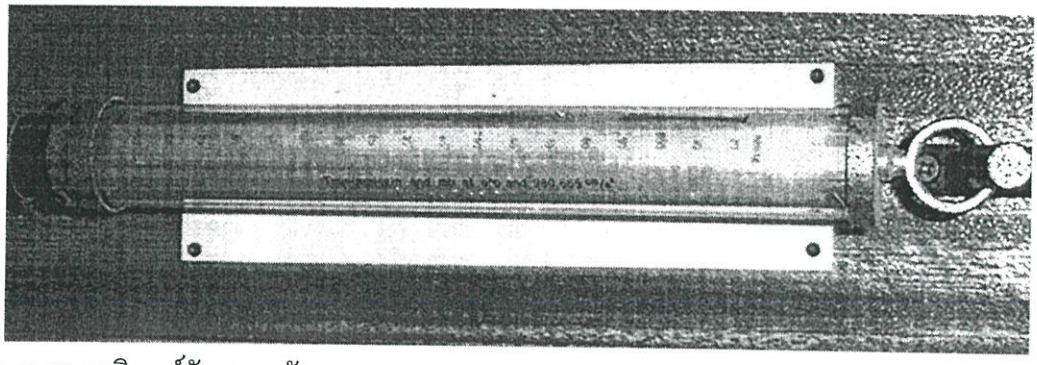
รูปที่ ก-3 มัลติมิเตอร์, เทอร์โมมิเตอร์ และไฮกรอมิเตอร์

(ก) มัลติมิเตอร์วัดแรงดัน และวัดกระแสแบบอนุกรม 0-10A

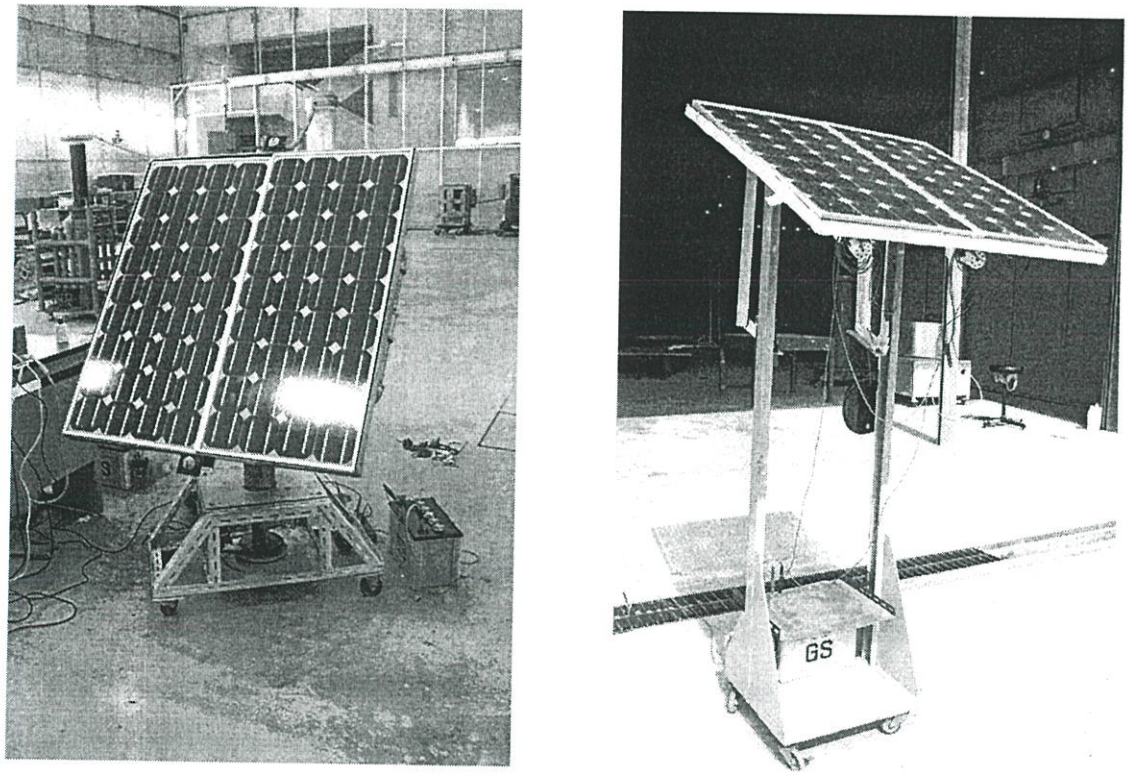
(ข) เทอร์โมมิเตอร์ และไฮกรอมิเตอร์



รูปที่ ก-4 แผงโซลาร์เซลล์ที่ใช้ในงานวิจัย



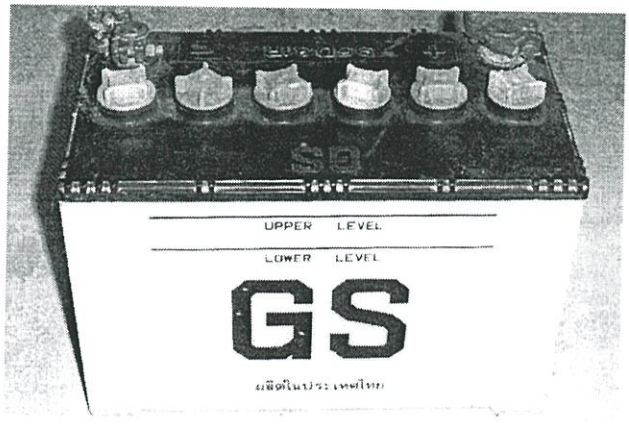
รูปที่ ก-5 บารอมิเตอร์วัดความดันอากาศ



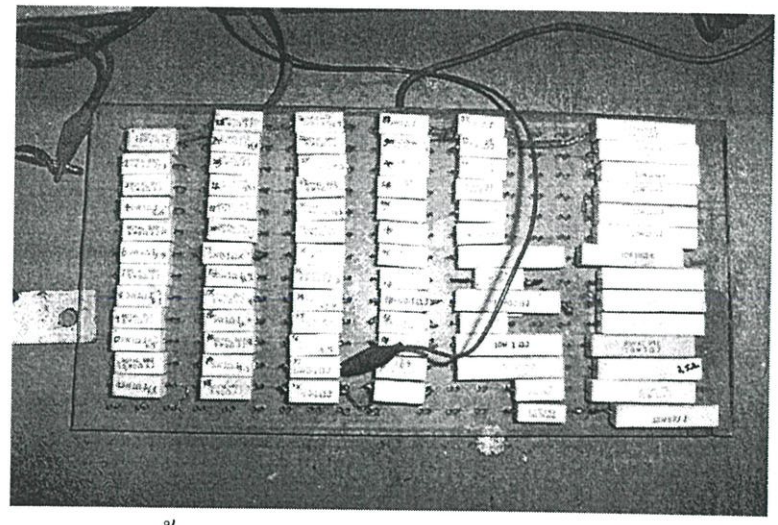
(ก) (ข)

รูปที่ ก-6 โครงสร้างตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อทดสอบ

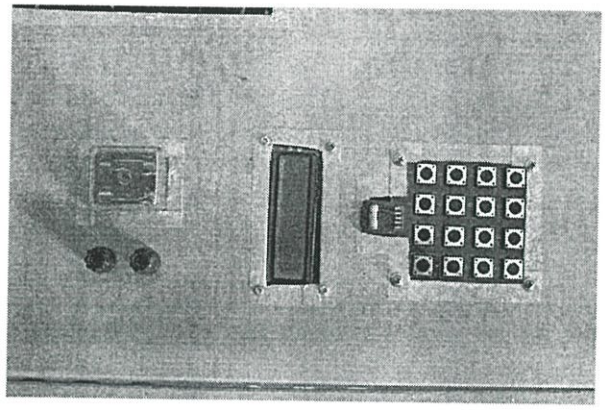
(ก) สำหรับระบบติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์ (ข) สำหรับระบบอ้างอิง และการทดสอบ I-V Scan



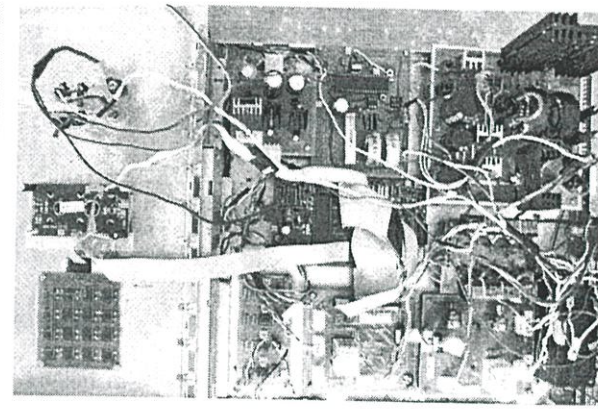
รูปที่ ก-7 แบตเตอรี่ขนาด 65Ah



รูปที่ ก-8 แผงโหลดภาระความต้านทาน

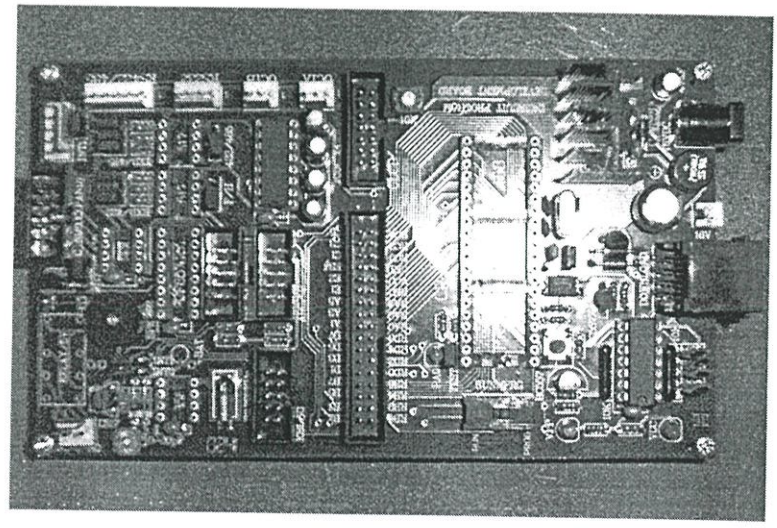


(ก)



(ข)

รูปที่ ก-9 กล่องวางวงจร MPPT คอนเวอร์เตอร์ และวงจรสำหรับระบบติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์
(ก) ภายนอก และหน่วยแสดงผลรวมทั้งอินพุทคีย์ต่างๆ
(ข) ภายในกล่องควบคุม



รูปที่ ก-10 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น C-PIC V.4

ภาคผนวก ข.
โปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์

```
'**********************โปรแกรมควบคุมสำหรับ MPPT คอนเวอร์เตอร์**********************
'**************************ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC 18F458****************************
'* Name    : MPPT TOTAL.BAS 31/7/46
'* Author  : SURIYA SURIYAKANONT
*****************************Define Variable and Constant**************************
INCLUDE "modedefs.bas"
Define OSC    10
Define LCD_DREG    PORTD                    'Define LCD Module
Define LCD_DBIT    4
Define LCD_RSREG   PORTC
Define LCD_RSBIT   0
Define LCD_EREG    PORTA
Define LCD_EBIT    4
Define LCD_BITS    4
Define LCD_LINES   2
DEFINE ADC_BITS    10
DEFINE ADC_CLOCK   8
     TRISE = %001                           'PORTE.0 =  input, PORTE.1, 2 = output
     TRISB = %11110010                      ' PORTB 4-7 as input
     TRISD = %00000000                      ' PORTD 0-3 as output
     TRISA = %01111                         'PORTA.0-3 = input, PORTA.4 = output
     TRISC = %00010000                      'Set PORTC.2 and 1 (CCP1) to output
     Track_ind var bit
     Brojac_1 var word
     Brojac var word                        'temporary Counter
     Duty VAR     WORD
     temp  var word                         'Start Duty cycle value
     BOOST   VAR WORD                       'Boost converter fixed duty
     Man_Au  VAR Bit                        'Manual_auto select bit
     Display VAR Bit                        'Display mode select bit
     I_PV   Var word[50]                    'PV_Current
     V_PV   Var word                        'PV_Voltage
     V_PV_1 Var word
     V_batt Var word                        'Batt Voltage
     B0     Var byte                        'Initial Slope setting
     slope   con 1                          'Initial Slope setting
```

```
Volrate con 6                    'Voltage conversion ratio
ind    var bit
Go_back var bit
i var byte
ind = %0
V_battrate con 6                 'Vol_batt concersion ratio
Power   var word                 'Power deliverly from PV
Power_1 var word                 'Temp power delivery
V_PV_2 var word[50]              'Temp PV_vol
I_PV_2 var word                  'Temp PV_cur
Pos_UD var byte                  'Up-Down Counter
Pos_LR var byte                  'Left Right Counter
Timing var word                  'Oneday counter
Time_step var byte               'Manual time step counter
tmp var word
tmp_duty var word
ret_A2D var bit
Plus_count var byte
Minus_count var byte
tmp_V_PV var word
UP_time2 var byte
UP_time2 = 0
UP_time4 var byte
UP_time4 = 0
Plus_count = 0
Minus_count = 0
ret_A2D = 0
LR var bit
supply var bit
supply = 0
LR = 0
Time_step = 1                    'Initial data
Pos_UD = 0
Pos_LR = 0
Timing = 0
LOW PORTE.2                      'Initial tracking output
```

```
        LOW PORTB.0
        Low PORTB.1
        tmp = 0
        Power_1 = 0
        EP   con 7000                    'PV_ Power changing gap Epsilon
        ind_freq var byte
        tmp_freq var byte
        ind_freq = 5
        alpha var byte
        alpha  = 1                       'Duty changing step 1:200%
        Currate con 5                    'Current conversion ratio
        DPIN   VAR    PORTC.4            'I2C data pin
        CPIN   VAR    PORTC.3            'I2C clock pin
        keypad  var byte
        freq var byte
        duty_U var byte
        duty_L var byte
        ANS var byte
        UP_V var byte
        DW_V var byte
        duty_L = 10
        duty_U = 130
        freq = 49
        Man_Au = 0
        V_PV = 0
        V_batt = 0
        Power = 0
        Track_ind = 0
        duty = 15                        'Initial Duty Cycle
        LOW PORTC.5
        LOW PORTE.1
        Gosub Hello                      'Display Hello massege
start:  T1CON = %00000001                'Prescale is 1:1 and enable TMR1
PIR1.0 = 0                               'Clear timer overflow bit in register PIR
        PIE1 = %00000001                 'Enable interrupt TMR1
        Brojac = 0                       'Initial Timer
```

```
        Brojac_1 = 0
        TMR1H = 0
        TMR1L = 0
        On Interrupt goto ISR                          'Interrupt vector
        INTCON = %11000000                             'Start wait for interrupt
'**********************************Main Program*********************************
Main:   if (Brojac > 470)&& (Man_Au = 0) then Switch   'Cont for 10 second
        if (Brojac > 720)&& (Man_Au = 1) then Switch
        Gosub Position_OK
        If Track_ind = 0 then
          Low PORTC.5
          Gosub Mss_31
        endif
        if duty > duty_U then
          duty = duty_U
        endif
        if duty < duty_L then
          duty = duty_L
        endif
        CCP1CON = %00001100                            ' Set CCP1 to PWM
        T2CON = %00000100                              ' Turn on Timer2, Prescale=1
' Use formula to determine PR2 value for a 50KHz signal,
' 10MHz clock, and prescale=1. (10E6/(1*4*50E3))-1=49
        PR2 = freq                                     ' Set PR2 to get freq +1 KHz out
' Use formula to determine CCPR1L:CCP1CON<5:4> value for
' ends of range 20% to 80%.  (freq+1)*4*0.2= 40(20% value)
' (freq+1)*4*0.8= 160 (80% value)
        CCP1CON.4 = duty.0                             ' Store duty to registers as
        CCP1CON.5 = duty.1                             ' a 10-bit word
        CCPR1L = DUTY >> 2
        If Man_Au = 1 then Scan_key
        If ret_A2D = 1 then A2D
'**********************************A to D Coverter*******************************
        ADCON1 = %10001001
        ADCON0 = %11101000                             ' Configure and turn on A/D Module
        Pause 500                                      ' Wait .5 second
```

```
Measure_Vbatt: ADCON0.2 = 1                    'Start Conversion
Sub_Vbatt:          pause 5
          if ADCON0.2 = 1 Then Sub_Vbatt
                    V_batt.highbyte = ADRESH    'move HIGH byte of result to adval
                    V_batt.lowbyte = ADRESL
                    temp = V_batt               'move LOW byte of result to
                    V_batt = (V_batt*/1550)>>2
          If temp > 1023 then
                    gosub Mss_2
                    Low PORTE.1
                    sleep 18000
          endif
          ADRESH = %00000000
          ADRESL = %00000000
A2D:  for i = 1 to 50
                    ADCON1 = %10000100          ' Set PORTA analog and RIGHT justify result
                    ADCON0 = %11000001          'Configure and turn on A/D Module
                    Pause 500                   ' Wait .5 second
Measure_V: ADCON0.2 = 1                        'Start Conversion
Sub_V: pause 5
        if ADCON0.2 = 1 Then Sub_V              'wait low on ADCON0.2,conversion finished
          V_PV_1.highbyte = ADRESH              'move HIGH byte of result to adval
          V_PV_1.lowbyte = ADRESL               'move LOW byte of result to adval
          V_PV_2[i-1] = V_PV_1
          ADRESH = %00000000
          ADRESL = %00000000
          V_PV_1 = 0
          Gosub Position_OK
          gosub Mode_sel
      next
          Gosub Position_OK
      for i = 1 to 50
          V_PV_1 = V_PV_1 + V_PV_2[i-1]
          Gosub Position_OK
      next
          Gosub Position_OK
```

```
        V_PV_1 = V_PV_1/50
        V_PV = V_PV_1
        ADRESH = %00000000
        ADRESL = %00000000
        tmp_V_PV = (V_PV*/3700)>>2
        if ret_A2D = 0 then
          Gosub Mss_1                          'Wait .1 second
        endif
       Gosub Mss_5
       for i = 1 to 50
        ADCON1 = %10001101
        ADCON0 = %11001000                     ' Configure and turn on A/D Module
        Pause 500                              ' Wait .5 second
Measure_I: ADCON0.2 = 1                        'Start Conversion
Sub_I: pause 5
      if ADCON0.2 = 1 Then Sub_I
        I_PV_2.highbyte = ADRESH               'move HIGH byte of result to adval
        I_PV_2.lowbyte = ADRESL                'move LOW byte of result to adval
        I_PV[i-1] = I_PV_2
        ADRESH = %00000000
        ADRESL = %00000000
        Gosub Position_OK
        gosub Mode_sel
      next
      Gosub Position_OK
      I_PV_2 = 0
      for i = 1 to 50
       I_PV_2 = I_PV_2 + I_PV[i-1]
       Gosub Position_OK
      next
       Gosub Position_OK
       If Track_ind = 0 then
         Low PortC.5
       endif
       I_PV_2 = I_PV_2/50
      Power_1 = V_PV_1*I_PV_2                  'Calculation Power
```

```
        pause 20
        I_PV_2 = (I_PV_2*/323)>>2
*********************************Compare Power*******************************
Duty_adjust:
      If (Power_1-Power = 0)&& Power != 0 then Plus_duty    'Compare Power to last result
      If V_PV_1-V_PV > 25 then                              'Voltage is greater
        if Power_1-Power > 0 then                           'Power increase
        Gosub Minus_duty                                    'Decrease actual duty
        ind = 1                                             'Set slope indicator to + direction
        endif
        if Power_1-Power < 0  then
        Gosub Plus_duty                                     'Increase actual duty cycle
        ind = 0                                             'Set slope indicator to - direction
        endif
      endif
      If V_PV_1-V_PV < -25 then                             'Voltage is less        'Power decrease
        if Power_1-Power > 0 then                           'Power increase
        Gosub Plus_duty                                     'Increase actual duty cycle
        ind = 0                                             'Set slope indicator to - direction
       endif
        if Power_1-Power < 0  then
        Gosub Minus_duty                                    'Decrease actual duty
        ind = 1                                             'Set slope indicator to + direction
        endif
     endif
if ((V_PV_1-V_PV < 24)or (V_PV_1-V_PV > -24)) && (Abs(Power_1-Power) > 1000) && supply = 0 then
                                                            'Voltage is same last stage
          if  ind = 1 then                                  'Check slope indicator
          Gosub Minus_duty                                  'Decrease actual duty cycle
          endif
          if  ind = 0 then                                  'Slope = -
          Gosub  Plus_duty                                  'Increase act duty
          endif
endif
*****************************Copy Data to Last Stage*****************************
Copy_dat:
```

```
        tmp = Power
        Power = Power_1                          'Copy value for next stage
        V_PV = V_PV_1
        I_PV = I_PV_2
        If ABS(tmp - Power_1) > 2*EP then
           INTCON2.7 = 0
           TRISB = %11110010                     ; PORTB as input
           TRISD = $00                           ; PORTD as output
           PORTD = %00001011
           if PORTB.5 = 0 then Ship
         ret_A2D = 1
         tmp = tmp-power_1
         Lcdout $fe, 1
         Lcdout #tmp
         pause 500
         tmp = (tmp*/14800)>>2
         gosub Mss_20
         Goto Main
        endif
Ship:    Gosub Display_duty
        Gosub Mode_sel
        Gosub Position_OK
        If Track_ind = 0 then
           Low PortC.5
        endif
        alpha = 1
        ret_A2D = 0
     If Man_Au = 1 then Scan_key
     goto Main
'*****************************Key Switch Enable*********************************
Mode_sel:
  INTCON2.7 = 0
  TRISB = %11110010                              ; PORTB as input
  TRISD = $00                                    ; PORTD as output
       PORTD = %00001011
   if  PORTB.5 = 0 then
```

```
            Gosub Mss_9
            goto Scan_key
            endif
        if   PORTB.4 = 0 then
            High PORTE.1
            Gosub Mss_18
            endif
        if   PORTB.7 = 0 then
            LR = 0
            Gosub Mss_19
            endif
        if  PORTB.6 = 0 then
            LR = 1
            Gosub Mss_19
            endif
       PORTD = %00000111
      if   PORTB.5 = 0 then
           duty = 10
           Gosub Mss_21
           endif
      if   PORTB.4 = 0 then
           supply = 1
           Gosub Mss_22
           endif
      if   PORTB.7 = 0 then
           supply = 0
           Gosub Mss_23
           endif
PORTD = %00001110
UP_DW_Au:  If PORTB.5 = 0 then
        High PORTC.5
        Low PORTB.1
        Track_ind = 1
        gosub Mss_32
       endif
       If PORTB.4 = 0 then
```

```
          Low PORTC.5
          Track_ind = 0
          Gosub Mss_32
         endif
       If PORTB.1 = 1 then Mss_31
       PORTD = %00001101
       If  PORTB.5 = 0 then Test_Track
CCW_P:   If  PORTB.4 = 0 then
           Pos_UD = Pos_UD + 1
           If Pos_UD  >= 200 then
             Pos_UD = 0
           endif
           Goto CCW_P
         endif
CCW_M:   If  PORTB.7 = 0 then
           Pos_UD = Pos_UD - 1
           If Pos_UD =< 0  then
             Pos_UD = 200
           endif
           Goto CCW_M
         endif
         return
**********Duty Adjust**********
Plus_duty:
         duty = duty - slope*alpha
         return
Minus_duty:
         duty = duty + slope*alpha
         return
Display_Duty:
      if Man_Au = 1 then
        gosub Mss_5
      endif
      Gosub Mss_3
      Gosub Mss_4
      return
```

```
Position_OK:
      if PORTB.1 = 1 then
        Low PORTC.5
        Track_ind = 0
      endif
      return
**********************************Manual Mode**********************************
Scan_key:
   INTCON2.7 = 0                                    ' pull-up enable PORTB
   I2CRead DPIN,CPIN,$71,[B0]
   PAUSE 20
 Man_Au = 1
 TRISB = %11110010                                  ; PORTB as input
 TRISD = $00                                        ; PORTD as output
       Gosub Mss_11
       pause 300
loop:  PORTD = %00001011
       if   PORTB.5 = 0 then
         Gosub Mss_12
         Man_Au = 0
         goto Main
         endif
      if   PORTB.4 = 0 then
         Plus_count = Plus_count + 1
         If Plus_count < 5 then
           alpha = 1
           endif
         Minus_count = 1
         if Plus_count = 5 then
           alpha = 10
           endif
         If Plus_count > 30 then
           Plus_count = 1
           alpha = 1
           endif
        Gosub Plus_duty
```

```
            Gosub Display_duty
            Gosub Mss_6
            Goto Main
            endif
        if   PORTB.7 = 0 then
            Minus_count = Minus_count + 1
            if Minus_count < 5 then
              alpha = 1
              endif
            Plus_count = 1
            if Minus_count = 5 then
              alpha = 10
              endif
            If Minus_count > 30  then
              Minus_count = 1
              alpha = 1
              endif
            Gosub Minus_duty
            Gosub Display_duty
            Gosub Mss_7
            Goto Main
            endif
        if   PORTB.6 = 0 then
            Timing = Timing + Time_step
           Gosub Mss_8
      endif
'*****************************************
      PORTD = %00000111
CCW2:  If (PORTB.5 = 1)&&(PORTB.4 = 1) then Man_U_D
      If (Go_Back = 0) && (PORTB.5 = 0) && (PORTB.4 = 1) then
          If (Pos_UD > 0) && ( Pos_UD < 200) then
             High PORTE.2
             Pause 300
             Low PORTE.2
             Pos_UD = Pos_UD+1
          endif
```

```
            If Pos_UD >= 200 then
                Go_back = 1
            endif
        endif
        If (PORTB.5 = 0) && (PORTB.4 = 0) then
            Low PORTE.2
            Low PORTB.0
            Goto Main
        endif
        Gosub Mss_35
        Goto CCW2
CW2:    If (PORTB.5 = 1)&&(PORTB.4 = 1) then Man_U_D
        If (Pos_UD >= 0) && (Go_back = 1)then
            If(PORTB.4 = 0)&& (PORTB.5 = 1) then
                High PORTB.0
                Pause 300
                Low PORTB.0
                Pos_UD = Pos_UD - 1
            endif
            If Pos_UD = 0 then
                Go_back = 0
            endif
        endif
        If (PORTB.4 = 0) && (PORTB.5 = 0) then
            Low PORTE.2
            Low PORTB.0
            Goto Main
        endif
        Gosub Mss_36
        Goto CW2
MAN_U_D:    If PORTB.7 = 0 then
            High PORTC.5
            Low PORTB.1
            Track_ind = 1
        endif
        If PORTB.6 = 0 then
```

```
            Low PORTC.5
            Track_ind = 0
          endif
'****************************************
     PORTD = %00001110
     if  PORTB.5 = 0 then
         Time_step = Time_step + 1
         Gosub Mss_16
         endif
     if  PORTB.4 = 0 then
         Gosub Mss_1
         endif
     if  PORTB.7 = 0 then
         Gosub Mss_3
         endif
     if  PORTB.6 = 0 then
         Gosub Mss_4
         endif
'*********************************************
     PORTD = %00001101
    if  PORTB.5 = 0 then
        if freq = 79 then
        ind_freq = -5
        endif
        if freq = 49 then
        ind_freq = 5
        endif
        if freq < 49 then
        freq = 49
        endif
        if freq >79 then
        freq = 79
        endif
        freq = freq + ind_freq
        tmp_freq = 10000/((freq+1)*4)
        Gosub Mss_24
```

```
            endif
        if   PORTB.4 = 0 then
            duty = 0
            duty_L = 10
            duty_U = 130
            Gosub Mss_25
            endif
        if   PORTB.7 = 0 then
            duty_L = duty_L - 1
            Gosub Mss_26
            endif
        if  PORTB.6 = 0 then
            duty_U = duty_U + 1
            Gosub Mss_27
            endif
       pause  300
       goto Main
*****************************Interrupt Vector Position*****************************
Switch: Gosub Mss_17
High_C5:  High PORTC.5
        Low PORTB.1
        Track_ind = 1
        Brojac = 0
        Brojac_1 = 0
        Timing = Timing + 1
       goto start
'****************************************
      Disable
ISR: Brojac_1 = Brojac_1+1
      Brojac = Brojac + 1                    'Increase Counter
      PIR1.0                                 'Reset flag for timer
      If Track_ind = 0 then
        Low PORTC.5
      endif
      Resume
      Enable
```

```
Test_Track:
 INTCON2.7 = 0                                  ' pull-up enable PORTB
TRISB = %11110010                               ; PORTB as input
 TRISD = $00                                    ; PORTD as output
 TRISC.5 = 0
      Gosub Mss_29
      pause 300
UP_DW:  If PORTB.5 = 0 then
         High PORTC.5
         Low PORTB.1
         Track_ind = 1
        gosub Mss_32
       endif
       If PORTB.4 = 0 then
         Low PORTC.5
         Track_ind = 0
         Gosub Mss_32
       endif
       If PORTB.1 = 1 then Mss_31
ORG:   PORTD = %00001101
      if  PORTB.5 = 0 then Main
      goto Test_Track
'************************************Main Program*******************************
Mss_1:  Lcdout $fe, 1
      Lcdout "V_batt: ", DEC (V_batt/100),".",DEC2 V_batt        'Display the decimal value
      pause 400
      return
Mss_2:  Lcdout $fe, 1
      Lcdout "Battery Full"
      pause 300
      return
Mss_3:  Lcdout $fe, 1                                  'Clear screen
      Lcdout "V_PV: ", DEC (tmp_V_PV/100),".",DEC2 tmp_V_PV        'Display the decimal value
      Pause 100
      return
Mss_4:  Lcdout $fe, $C0                                'Second line
```

```
        Lcdout "I_PV: ", DEC (I_PV_2/100),".",DEC2 I_PV_2                    'Display the decimal value
        Pause 400
        return
Mss_5:  tmp_duty = duty
        tmp_duty = 147 - duty
        tmp_duty = (tmp_duty*/52600)>>2
        Lcdout $fe, $C0                                    'Clear screen
        Lcdout "Duty cycle: ", DEC (tmp_duty/100),".",DEC2 tmp_duty          'Display the decimal value
        pause 400
        return
Mss_6:  Lcdout $fe, $C0
        Lcdout "Plus duty"
        Pause 400
        Return
Mss_7:  Lcdout $fe,$C0
        Lcdout "Minus Duty"
        Pause 400
        return
Mss_8:  Lcdout $fe, 1
        Lcdout "Set time:"
        LCDout $fe, $C0
        Lcdout #Timing
        pause 300
        return
Mss_9:  Lcdout $fe, 1
        Lcdout "Change to Manual"
        pause 400
        return
Mss_10: Lcdout $fe, 1
        Lcdout "Tracking CCW:", #Pos_UD
        pause 300
        return
Mss_11: Lcdout $fe, 1
        Lcdout "Scan key: "
        pause 300
        return
```

```
Mss_12: Lcdout $fe, 1
        Lcdout "Change to Auto"
        pause 300
        return
Mss_13: Lcdout $fe, 1
        Lcdout "Track CW:"
        Lcdout $fe,$C0, #Pos_UD
        pause 300
        return
Mss_14: Lcdout $fe, 1
        Lcdout "Track Left:", #Pos_LR
        pause 300
        return
Mss_15: Lcdout $fe, 1
        Lcdout "Track Right:",#Pos_LR
        pause 300
        return
Mss_16: Lcdout $fe, 1
        Lcdout "Set Time step", #Time_step
        pause 300
        return
Mss_17: LCDOut $fe, 1
        LCDOut "Tracking time"
        pause 300
        return
Mss_18: Lcdout $fe, 1, "Start Energy"
        Lcdout $fe, $C0,"Charge to Batt"
        pause 500
        return
Mss_19: Lcdout $fe, 1
        If LR = 0 then
        Lcdout "Turning Left"
        endif
        If LR = 1 then
        Lcdout "Turning Right"
        endif
```

```
        return
    Mss_20: Lcdout $fe, 1
        Lcdout "Diff_Power: ", DEC (temp/100),".",DEC2 temp
        pause 300
        return
    Mss_21: Lcdout $fe, 1
        Lcdout "Return Start Duty"
        pause 300
        return
    Mss_22: Lcdout $fe, 1
        Lcdout "Power Supply Mode"
        pause 300
        return
    Mss_23: Lcdout $fe, 1
        Lcdout "PV Supply Mode"
        pause 300
        return
    Mss_24: Lcdout $fe, 1
        Lcdout "Fregency Change"
        Lcdout $fe,$C0
        Lcdout "Frequency: ", DEC tmp_freq
        pause 300
        return
    Mss_25: Lcdout $fe, 1
        Lcdout "Duty 100%"
        pause 300
        return
    Mss_26: Lcdout $fe, 1
        Lcdout "+ UL duty cycle"
        pause 300
        return
    Mss_27: Lcdout $fe, 1
        Lcdout "- UL duty cycle"
        pause 300
        return
    Hello:  Lcdout $fe, 1
```

```
        Lcdout "Good Morning"
        Lcdout $fe,$C0
        Lcdout "How are you"
        pause 150
        return
Mss_28: Lcdout $fe, 1
        Lcdout "CWW Track Limit"
        pause 300
        return
Mss_29: Lcdout $fe, 1
        Lcdout "Test Cont. Track"
        pause 300
        return
Mss_30: Lcdout $fe, 1
        Lcdout "Test Track Mode"
        pause 300
        return
Mss_31: Lcdout $fe, 1
        Lcdout "POSITION OK"
        pause 300
        return
Mss_32: Lcdout $fe, 1
        If PORTC.5 = 1 then
          Lcdout "Light Check Mode"
        endif
        If PORTC.5 = 0 then
          Lcdout "UP-Down Manual"
        endif
        pause 300
        return
Mss_33: Lcdout $fe, 1
        Lcdout "Track CCW"
        return
Mss_34: Lcdout $fe, 1
        Lcdout "Return ORG"
        return
```

```
Mss_35: Lcdout $fe, 1
        Lcdout "Manual CCW"
        return
Mss_36: Lcdout $fe, 1
        Lcdout "Manual CW"
        return
End
```

```
'******************โปรแกรมควบคุมสำหรับระบบติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์**********************
'*********************************ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC 16F877*********************************
'* Name    :Tracker.BAS
'* Author  : SURIYA SURIYAKANONT
INCLUDE "modedefs.bas"
Define OSC    10
    duty VAR      WORD
    tmp var word
    TRISC.2 = 0
    duty = 46
    TRISD = %11100011
    TRISA = %111111
    TRISB = %10000110
    TRISE.0 = 0
    TRISE.1 = 0
    PORTE.0 = 0
    PORTE.1 = 0
    CCW_Count var byte
    CCW_Count = 0
    V_L var word
    V_R var word
    V_L = 0
    V_R = 0
    Vol_diff1 var word
    Vol_diff1 = 0
    V_UP var word
    V_DW var word
    symbol ComdB = PORTD.6
    symbol Comds = PORTD.4
    Start var bit
    Start = 0
    Vol_diff var byte
    Vol_diff = 150                          'Epsilon Voltage
    UP_L var bit
    UP_L = 0                                'Upper Limit Bit
    DW_L var bit                            'LOwer Limit Bit
```

```
DW_L = 0
TOP var byte
TOP = 0
R_ind var bit
L_ind var bit
R_ind = 0
L_ind = 0
L_L var bit
R_L var bit
L_L = 0
R_L = 0
Lowest var byte
UP_ind var bit
DW_ind var bit
UP_ind = 0
DW_ind = 0
Lowest = 0
LOW PORTD.4
LOW PORTD.2                    'Upper drive
LOW PORTD.3                    'Lower Drive
High PORTD.0                   'Upper Limit
High PORTD.1                   'Lower Limit
High PORTB.1
High PORTB.2
Low PORTE.0
Low PORTE.1

Main:
    CCP1CON = %00001100        ' Set CCP1 to PWM
    T2CON = %00000100          ' Turn on Timer2, Prescale=1
' Use formula to determine PR2 value for a 50KHz signal,
' 10MHz clock, and prescale=1. (10E6/(1*4*50E3))-1=49
    PR2 = 49                   ' Set PR2 to get 50KHz out
' Use formula to determine CCPR1L:CCP1CON<5:4> value for
' ends of range 20% to 80%.  (49+1)*4*0.2= 40(20% value)
' (49+1)*4*0.8= 160 (80% value)
```

```
      CCP1CON.4 = duty.0                    ' Store duty to registers as
      CCP1CON.5 = duty.1                    ' a 10-bit word
      CCPR1L = DUTY >> 2
Scan_key:
 OPTION_REG.7 = 0                           ; pull-up enable PORTB
 TRISB.7 = 1                                ; PORTB as input
 TRISB.5 = 0
 pause 30                                   ; PORTD as output
loop:  PORTB.7 = 1
     PORTB.5 = 0
     pause 5
     if   PORTB.7 = 0 then                  ' check key 1
        Duty = Duty-1
     endif
     pause 30
     If duty < 30 then
       duty = 46
     endif
     Low PORTD.4
     If ComdB = 0 then
       Start = 0
     endif
     If ComdB = 1 then
       Start = 1
     endif
     gosub A2D
     gosub A2D1
     gosub A2D2
     gosub A2D3
     If (V_R > 980) or (V_L > 980) or (V_DW > 980) or (V_UP > 980) then
       Start = 1
     endif
Man:   High PORTD.1
     High PORTD.0
     If Start = 0 then
     If (PORTD.1 = 1) && (PORTD.0 = 1) then
```

```
        LOW PORTD.2
        LOW PORTD.3
      endif
      If PORTD.0 = 0 then
          If PORTD.1 = 0 then
            LOW PORTD.2
            LOW PORTD.3
          endif
          High PORTD.3
          Low PORTD.2
        endif
      If PORTD.1 = 0 then
          If PORTD.0 = 0 then
          LOW PORTD.2
          LOW PORTD.3
          endif
          High PORTD.2
          Low PORTD.3
        endif
    endif
Man1:  High PORTB.2
    High PORTB.1
    If Start = 0 then
    If (PORTB.1 = 1) && (PORTB.2 = 1) then
      LOW PORTE.0
      LOW PORTE.1
    endif
    If PORTB.2 = 0 then
          If PORTB.1 = 0 then
            LOW PORTE.0
            LOW PORTE.1
          endif
          High PORTE.1
          Low PORTE.0
      endif
```

```
        If PORTB.1 = 0 then
            If PORTB.2 = 0 then
             LOW PORTE.0
             LOW PORTE.1
            endif
             High PORTE.0
             Low PORTE.1
          endif
        endif
Command:   If Start = 0 then
             Goto Main
          endif
          If Start = 1 then
            Low PORTD.4
            Gosub Voltage1
            Low PORTE.0
            Low PORTE.1
            Gosub Voltage
          endif
          Goto Main
Voltage1:  HIGH PORTB.2
         HIGH PORTB.1
         LOW PORTD.2
         LOW PORTD.3
         If PORTB.2 = 0 then
           Low PORTE.0
         endif
         If PORTB.1 = 0 then
           Low PORTE.1
         endif
           Gosub A2D2
           Gosub A2D3
        R_ind = 0
        L_ind = 0
Compare1:
       If R_ind = 1 then A2D3
```

```
        If L_ind = 1 then A2D2
        If (Vol_diff1 <= 15)then
           Low PORTE.0
           Low PORTE.1
           pause 500
           return
        endif
        If Start = 0 then Main
Dark1:
        If (V_R > 980) or (V_L > 980) then test1
        If (V_R > 81) && (V_L >81) then
           Low PORTE.0
           Low PORTE.1
           return
        endif
test1:
        If PORTB.2 = 1 then
           If (V_L > V_R) && (Vol_diff1 > 10) then R
        endif
        If PORTB.1 = 1 then
           If (V_R > V_L) && (Vol_diff1 > 10) then L
        endif
        goto  Voltage1
R:      If PORTB.2 = 1 then
           R_L = 0
        endif
        High PORTE.0
        Low PORTE.1
        CCW_Count = CCW_Count - 1
        If CCW_Count < 0 then
           CCW_Count = 0
        endif
        If CCW_Count >= 15 then
           pause 300
        endif
        R_ind = 1
```

```
            L_ind = 0
Right_L:    If PORTB.2 = 0 then
               LOW PORTE.0
               R_L = 1
               L_L = 0
               CCW_Count = 25
            endif
            Gosub A2D3
            If (Vol_diff1<=10)then
              Low PORTE.0
              Low PORTE.1
            endif
            Goto Compare1
L:          If PORTB.1 = 1 then
               L_L = 0
            endif
            High PORTE.1
            Low PORTE.0
            CCW_Count = CCW_Count + 1
            If CCW_Count > 30 then
               CCW_Count = 30
            endif
            If CCW_Count >=15 then
               pause 300
            endif
            R_ind = 0
            L_ind = 1
Left_L:     If PORTB.1 = 0 then
               Low PORTE.1
               L_L = 1
               R_L = 0
               CCW_Count = 0
            endif
            Gosub A2D2
            If (Vol_diff1 <=10)then
              Low PORTE.1
```

```
        Low PORTE.0
      endif
      Goto Compare1

Voltage:  HIGH PORTD.0
      HIGH PORTD.1
      LOW PORTE.0
      LOW PORTE.1
      If PORTD.0 = 0 then
        Low PORTD.2
      endif
      If PORTD.1 = 0 then
        Low PORTD.3
      endif
        Gosub A2D
        Gosub A2D1
      UP_ind = 0
      DW_ind = 0
Compare:
      If UP_ind = 1 then A2D1
      If DW_ind = 1 then A2D
      If (Vol_diff <= 8)then
        Low PORTD.2
        Low PORTD.3
        Gosub Pos_OK
        Goto Main
      endif
      If Start = 0 then Main
Dark:
      If (V_DW > 980) or (V_UP > 980) then Test
      If (V_DW > 40) && (V_UP > 40) then
        Low PORTD.2
        Low PORTD.3
        gosub Pos_OK
        goto Main
      endif
```

```
Test:
        If PORTD.0 = 1 then
            If (V_DW > V_UP) && (Vol_diff > 4) then UP
        endif
        If PORTD.1 = 1 then
            If (V_UP > V_DW) && (Vol_diff > 4) then DW
        endif
        Return
UP:     If PORTD.0 = 1 then
            UP_L = 0
        endif
        High PORTD.2
        Low PORTD.3
        UP_ind = 1
        DW_ind = 0
U_L:    If PORTD.0 = 0 then
            LOW PORTD.2
            UP_L = 1
            DW_L = 0
        endif
        Gosub A2D1
        If (Vol_diff <=4)then
          Low PORTD.2
          Low PORTD.3
        endif
        Goto Compare
DW:     If PORTD.1 = 1 then
            DW_L = 0
        endif
        High PORTD.3
        Low PORTD.2
        UP_ind = 0
        DW_ind = 1
D_L:    If PORTD.1 = 0 then
            Low PORTD.3
            DW_L = 1
```

```
            UP_L = 0
          endif
          Gosub A2D
          If (Vol_diff <=4)then
            Low PORTD.3
            Low PORTD.2
          endif
          Goto Compare
A2D:      If PORTD.0 = 0 then
            Low PORTD.2
          endif
          If PORTD.1 = 0 then
            Low PORTD.3
          endif
          ADCON1 = %10000100          ' Set PORTA analog and RIGHT justify result
          ADCON0 = %11000001          ' Configure and turn on A/D Module
          Pause 300
          Measure_UP: ADCON0.2 = 1    'Start Conversion
Sub_UP:   pause 5
if ADCON0.2 = 1 Then Sub_UP           'wait for low on bit-2 of ADCON0, conversion finished
            V_UP.highbyte = ADRESH    'move HIGH byte of result to adval
            V_UP.lowbyte = ADRESL     'move LOW byte of result to adval
          ADRESH = %00000000
          ADRESL = %00000000
          Vol_diff = ABS(V_DW-V_UP)
          return

A2D1:     If PORTD.0 = 0 then
            Low PORTD.2
          endif
          If PORTD.1 = 0 then
            Low PORTD.3
          endif
          ADCON1 = %10000100          ' Set PORTA analog and RIGHT justify result
          ADCON0 = %11001001          ' Configure and turn on A/D Module
          Pause 300                   ' Wait .5 second
```

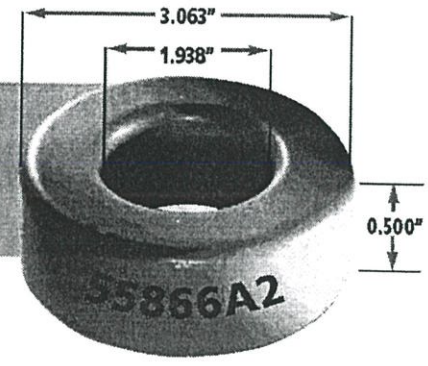
```
Measure_DW: ADCON0.2 = 1                    'Start Conversion
Sub_DW:             pause 5
        If ADCON0.2 = 1 Then Sub_DW         'wait for low on bit-2 of ADCON0, conversion finished
        V_DW.highbyte = ADRESH              'move HIGH byte of result to adval
        V_DW.lowbyte = ADRESL               'move LOW byte of result to adval
        ADRESH = %00000000
        ADRESL = %00000000
        Vol_diff = ABS(V_DW-V_UP)
        return
A2D2:   If PORTB.2 = 0 then
         Low PORTE.0
       endif
       If PORTB.1 = 0 then
         Low PORTE.1
       endif
        ADCON1 = %10000010                  ' Set PORTA analog and RIGHT justify result
        ADCON0 = %11010001                  ' Configure and turn on A/D Module
        Pause 300
        LOW PORTE.1                         ' Wait .5 second
Measure_R: ADCON0.2 = 1                     'Start Conversion
Sub_R:     pause 5
        if ADCON0.2 = 1 Then Sub_R          'wait for low on bit-2 of ADCON0, conversion finished
        V_R.highbyte = ADRESH               'move HIGH byte of result to adval
         V_R.lowbyte = ADRESL               'move LOW byte of result to adval
       ADRESH = %00000000
       ADRESL = %00000000
       Vol_diff1 = ABS(V_L-V_R)
       return
A2D3:   If PORTB.2 = 0 then
      Low PORTE.0
     endif
     If PORTB.1 = 0 then
       Low PORTE.1
     endif
      ADCON1 = %10000010                    ' Set PORTA analog and RIGHT justify result
      ADCON0 = %11011001                    ' Configure and turn on A/D Module
```

```
        Pause 300
        LOW PORTE.0                          ' Wait .5 second
Measure_L: ADCON0.2 = 1                      'Start Conversion
Sub_L:     pause 5
           If ADCON0.2 = 1 Then Sub_L        'wait for low on bit-2 of ADCON0, conversion finished
           V_L.highbyte = ADRESH             'move HIGH byte of result to adval
           V_L.lowbyte = ADRESL              'move LOW byte of result to adval
        ADRESH = %00000000
        ADRESL = %00000000
        Vol_diff1 = ABS(V_L-V_R)
        return
Pos_OK:
        High PORTD.4
        pause 1000
        start = 0
        return
end
```

ภาคผนวก ค.
เอกสารกำกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิคส์

ตารางที่ ค-1 คุณสมบัติของแกน TOROID ที่ใช้ในงานวิจัย

77.8mm OD
49.2mm ID x 12.7mm HT



Core Dimensions (after finish)

O.D. (max.)	78.9 mm	3.108 in
I.D. (min)	48.2 mm	1.898 in
HT. (max.)	13.84 mm	0.545 in

Permeability (μ)	A_L ± 8%	Part Number		
		MPP	High Flux	Kool Mμ
14	16	55869-A2	58869-A2	-
26	30	55868-A2	58868-A2	77868-A7
60	68	55867-A2	58867-A2	-
125	142	55866-A2	58866-A2	-

Physical Characteristics

Window Area	17.99 cm^2	3,550,000 c.mils
Cross Section	1.77 cm^2	0.274 in^2
Path Length	20.0 cm	7.72 in
Volume	34.7 cm^3	2.115 in^3
Weight- MPP	288 gm	0.635 lb
Weight- High Flux	272 gm	0.599 lb
Weight- Kool Mμ	213 gm	0.467 lb
Area Product	31.8 cm^4	0.765 in^4

Winding Turn Length

WINDING FACTOR	LENGTH/TURN	
100% (Unity)	10.40 cm	0.340 ft
60%	8.60 cm	0.282 ft
40%	6.90 cm	0.226 ft
20%	6.15 cm	0.202 ft
0%	5.90 cm	0.193 ft

Wound Coil Dimensions

Max. O.D. (u.w.f.)	112 mm	4.40 in
Max. HT. (u.w.f.)	54.3 mm	2.14 in

Surface Area

Unwound Core	117.5 cm^2	18.2 in^2
40% Winding Factor	203.1 cm^2	31.49 in^2

AWG Wire Size	Turns (u.w.f.)	Rdc (Ohms, Ω) (u.w.f.)	Single Layer Turns	Single Layer Rdc. (Ohms, Ω)
8	197	0.0422	41	0.00552
9	248	0.0664	47	0.00794
10	309	0.105	53	0.0113
11	388	0.1663	60	0.0162
12	486	0.262	67	0.0228
13	608	0.412	76	0.0325
14	760	0.65	84	0.0454
15	944	1.022	95	0.0646
16	1182	1.616	106	0.0912
17	1465	2.52	119	0.129
18	1830	3.98	134	0.183
19	2275	6.23	150	0.258
20	2840	9.8	168	0.364
21	3550	15.45	188	0.514
22	4390	24.2	211	0.732
23	5470	37.4	235	1.02
24	6770	59.2	263	1.3
25	8350	92	295	1.84
26	10450	145.8	330	2.61
27	13150	229	365	3.62

ตารางที่ ค-2 คุณสมบัติของขดลวด

Wire Table

AWG Wire Size	Resistance Ω/meter (x.305=Ω/ft)	Wire OD (cm) Heavy Build	Wire Area		Current Capacity, Amps (listed by columns of amps/sq.cm.)			
			Circ. Mils	sq. cm (x0.001)	200	400	600	800
8	.00207	.334	18,000	91.2	16.5	33.0	49.5	66.0
9	.00259	.298	14,350	72.7	13.1	26.2	39.3	52.4
10	.00328	.267	11,500	58.2	10.4	20.8	31.2	41.6
11	.00413	.238	9,160	46.4	8.23	16.4	24.6	32.8
12	.00522	.213	7,310	37.0	6.53	13.1	19.6	26.1
13	.00656	.1902	5,850	29.6	5.18	10.4	15.5	20.8
14	.00827	.1714	4,680	23.7	4.11	8.22	12.3	16.4
15	.01043	.1529	3,760	19.1	3.26	6.52	9.78	13.0
16	.01319	.1369	3,000	15.2	2.58	5.16	7.74	10.3
17	.01657	.1224	2,420	12.2	2.05	4.10	6.15	8.20
18	.0210	.1095	1,940	9.83	1.62	3.25	4.88	6.50
19	.0264	.0980	1,560	7.91	1.29	2.58	3.87	5.16
20	.0332	.0879	1,250	6.34	1.02	2.05	3.08	4.10
21	.0420	.0785	1,000	5.07	.812	1.63	2.44	3.25
22	.0531	.0701	810	4.11	.640	1.28	1.92	2.56
23	.0666	.0632	650	3.29	.511	1.02	1.53	2.04
24	.0843	.0566	525	2.66	.404	.808	1.21	1.62
25	.1063	.0505	425	2.15	.320	.641	.962	1.28
26	.1345	.0452	340	1.72	.253	.506	.759	1.01
27	.1686	.0409	270	1.37	.202	.403	.604	.806
28	.214	.0366	220	1.11	.159	318	.477	.636
29	.266	.0330	180	.912	.128	.255	.382	.510
30	.341	.0295	144	.730	.100	.200	.300	.400
31	.430	.0267	117	.593	.0792	.158	.237	.316
32	.531	.0241	96.0	.487	.0640	.128	.192	.256
33	.676	.0216	77.4	.392	.0504	.101	.152	.202
34	.856	.01905	60.8	.308	.0397	.0794	.119	.159
35	1.086	.01702	49.0	.248	.0314	.0627	.0940	.125
36	1.362	.01524	39.7	.201	.0250	.0500	.0750	.100
37	1.680	.01397	32.5	.165	.0203	.0405	.0608	.0810
38	2.13	.01245	26.0	.132	.0160	.0320	.0480	.0640
39	2.78	.01092	20.2	.102	.0123	.0245	.0368	.0490
40	3.51	.00965	16.0	.081	.00961	.0192	.0288	.0384
41	4.33	.00864	13.0	.066	.00785	.0157	.0236	.0314
42	5.45	.00762	10.2	.052	.00625	.0125	.0188	.0250
43	7.02	.00686	8.40	.043	.00484	.00968	.0145	.0194
44	8.50	.00635	7.30	.037	.00400	.00800	.0120	.0160
45	10.99	.00546	5.30	.027	.00309	.00618	.00927	.0124
46	13.81	.00498	4.40	.022	.00248	.00496	.00744	.00992
47	17.36	.00452	3.60	.018	.00194	.00388	.00582	.00776
48	22.1	.00394	2.90	.015	.00175	.00350	.00525	.00700
49	27.6	.00353	2.25	.011	.00150	.00300	.00450	.00600

ตารางที่ ค-3 คุณสมบัติของมอสเฟตในวงจร MPPT คอนเวอร์เตอร์

FAIRCHILD SEMICONDUCTOR®

RFG70N06, RFP70N06, RF1S70N06, RF1S70N06SM

Data Sheet **January 2002**

70A, 60V, 0.014 Ohm, N-Channel Power MOSFETs

These are N-Channel power MOSFETs manufactured using the MegaFET process. This process, which uses feature sizes approaching those of LSI circuits, gives optimum utilization of silicon, resulting in outstanding performance. They were designed for use in applications such as switching regulators, switching converters, motor drivers and relay drivers. These transistors can be operated directly from integrated circuits.

Formerly developmental type TA78440.

Ordering Information

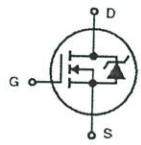
PART NUMBER	PACKAGE	BRAND
RFG70N06	TO-247	RFG70N06
RFP70N06	TO-220AB	RFP70N06
RF1S70N06	TO-262AA	F1S70N06
RF1S70N06SM	TO-263AB	F1S70N06

NOTE: When ordering use the entire part number. Add the suffix 9A to obtain the TO-263AB variant in tape and reel, e.g. RF1S70N06SM9A.

Features

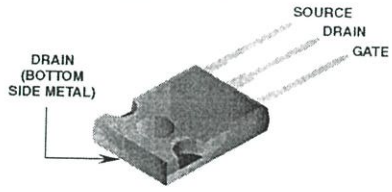
- 70A, 60V
- $r_{DS(on)} = 0.014\Omega$
- Temperature Compensated PSPICE® Model
- Peak Current vs Pulse Width Curve
- UIS Rating Curve (Single Pulse)
- 175°C Operating Temperature
- Related Literature
  - TB334 "Guidelines for Soldering Surface Mount Components to PC Boards"

Symbol

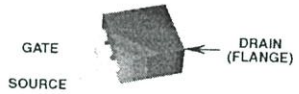


Packaging

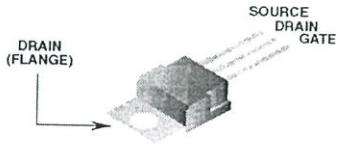
JEDEC STYLE TO-247



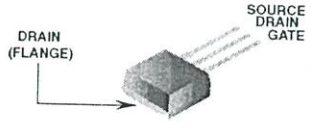
JEDEC TO-263AB



JEDEC TO-220AB



JEDEC TO-262AA



©2002 Fairchild Semiconductor Corporation

Absolute Maximum Ratings $T_C = 25^oC$, Unless Otherwise Specified

		RFG70N06, RFP70N06 RF1S70N06, RF1S70N06SM	UNITS
Drain to Source Voltage (Note 1)	V_{DSS}	60	V
Drain to Gate Voltage (R_{GS} = 20kΩ) (Note 1)	V_{DGR}	60	V
Continuous Drain Current	I_D	70	A
Pulsed Drain Current (Note 3)	I_{DM}	Refer to Peak Current Curve	
Gate to Source Voltage	V_{GS}	±20	V
Single Pulse Avalanche Rating	E_{AS}	Refer to UIS Curve	A
Power Dissipation	P_D	150	W
Linear Derating Factor		1.0	W/°C
Operating and Storage Temperature	T_J, T_{STG}	-55 to 175	°C
Maximum Temperature for Soldering			
Leads at 0.063in (1.6mm) from Case for 10s	T_L	300	°C
Package Body for 10s, See Techbrief 334	T_{pkg}	260	°C

CAUTION: Stresses above those listed in "Absolute Maximum Ratings" may cause permanent damage to the device. This is a stress only rating and operation of the device at these or any other conditions above those indicated in the operational sections of this specification is not implied.

NOTE:

1. $T_J = 25^oC$ to 150^oC.

Electrical Specifications $T_C = 25^oC$, Unless Otherwise Specified

PARAMETER	SYMBOL	TEST CONDITIONS		MIN	TYP	MAX	UNITS
Drain to Source Breakdown Voltage	BV_{DSS}	I_D = 250µA, V_{GS} = 0V (Figure 11)		60	-	-	V
Gate Threshold Voltage	$V_{GS(TH)}$	$V_{GS} = V_{DS}$, I_D = 250µA (Figure 10)		2	-	4	V
Zero Gate Voltage Drain Current	I_{DSS}	V_{DS} = 60V, V_{GS} = 0V		-	-	1	µA
		V_{DS} = 0.8 x Rated BV_{DSS}, $T_C = 150^oC$		-	-	25	µA
Gate to Source Leakage Current	I_{GSS}	V_{GS} = ±20V		-	-	±100	nA
Drain to Source On Resistance (Note 2)	$r_{DS(ON)}$	I_D = 70A, V_{GS} = 10V (Figure 9)		-	-	0.014	Ω
Turn-On Time	$t_{(ON)}$	V_{DD} = 30V, $I_D \approx$ 70A, R_L = 0.43Ω, V_{GS} = 10V, R_{GS} = 2.5Ω (Figure 13)		-	-	125	ns
Turn-On Delay Time	$t_{d(ON)}$			-	12	-	ns
Rise Time	t_r			-	50	-	ns
Turn-Off Delay Time	$t_{d(OFF)}$			-	40	-	ns
Fall Time	t_f			-	15	-	ns
Turn-Off Time	$t_{(OFF)}$			-	-	125	ns
Total Gate Charge	$Q_{g(TOT)}$	V_{GS} = 0V to 20V	V_{DD} = 48V, I_D = 70A, R_L = 0.68Ω, $I_{g(REF)}$ = 2.2mA (Figure 13)	-	185	215	nC
Gate Charge at 10V	$Q_{g(10)}$	V_{GS} = 0V to 10V		-	100	115	nC
Threshold Gate Charge	$Q_{g(TH)}$	V_{GS} = 0V to 2V		-	5.5	6.5	nC
Input Capacitance	C_{ISS}	V_{DS} = 25V, V_{GS} = 0V, f = 1MHz (Figure 12)		-	3000	-	pF
Output Capacitance	C_{OSS}			-	900	-	pF
Reverse Transfer Capacitance	C_{RSS}			-	300	-	pF
Thermal Resistance, Junction to Case	$R_{\theta JC}$			-	-	1.0	°C/W
Thermal Resistance, Junction to Ambient	$R_{\theta JA}$	TO-220 and TO-263		-	-	62	°C/W
		TO-247		-	-	30	°C/W

Source to Drain Diode Specifications

PARAMETER	SYMBOL	TEST CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
Source to Drain Diode Voltage	V_{SD}	I_{SD} = 70A		-	1.5	V
Reverse Recovery Time	t_{rr}	I_{SD} = 70A, dI_{SD}/dt = 100A/µs		-	125	ns

NOTES:

2. Pulse test: pulse width < 300ms, duty cycle < 2%.
3. Repetitive rating: pulse width is limited by maximum junction temperature. See Transient Thermal Impedance curve (Figure 3) and Peak Current Capability Curve (Figure 5).

ตารางที่ ค-4 คุณสมบัติของมอสเฟตในวงจรเพิ่มแรงดัน

intersil

IRF540, RF1S540SM

Data Sheet | **November 1999** | **File Number 2309.5**

28A, 100V, 0.077 Ohm, N-Channel Power MOSFETs

These are N-Channel enhancement mode silicon gate power field effect transistors. They are advanced power MOSFETs designed, tested, and guaranteed to withstand a specified level of energy in the breakdown avalanche mode of operation. All of these power MOSFETs are designed for applications such as switching regulators, switching convertors, motor drivers, relay drivers, and drivers for high power bipolar switching transistors requiring high speed and low gate drive power. These types can be operated directly from integrated circuits.

Formerly developmental type TA17421.

Ordering Information

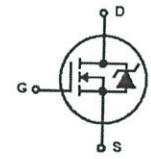
PART NUMBER	PACKAGE	BRAND
IRF540	TO-220AB	IRF540
RF1S540SM	TO-263AB	RF1S540SM

NOTE: When ordering, use the entire part number. Add the suffix 9A to obtain the TO-263AB variant in the tape and reel, i.e., RF1S540SM9A.

Features

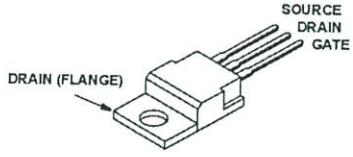
- 28A, 100V
- $r_{DS(ON)} = 0.077\Omega$
- Single Pulse Avalanche Energy Rated
- Nanosecond Switching Speeds
- Linear Transfer Characteristics
- High Input Impedance
- Related Literature
  - TB334 "Guidelines for Soldering Surface Mount Components to PC Boards"

Symbol



Packaging

JEDEC TO-220AB



JEDEC TO-263AB

CAUTION: These devices are sensitive to electrostatic discharge; follow proper ESD Handling Procedures.
1-888-INTERSIL or 321-724-7143 | Copyright © Intersil Corporation 1999

Absolute Maximum Ratings $T_C = 25^oC$, Unless Otherwise Specified

		IRF540, RF1S540SM	UNITS
Drain to Source Breakdown Voltage (Note 1)	V_{DS}	100	V
Drain to Gate Voltage (R_{GS} = 20kΩ) (Note 1)	V_{DGR}	100	V
Continuous Drain Current	I_D	28	A
$T_C = 100^oC$	I_D	20	A
Pulsed Drain Current (Note 3)	I_{DM}	110	A
Gate to Source Voltage	V_{GS}	±20	V
Maximum Power Dissipation	P_D	120	W
Dissipation Derating Factor		0.8	W/°C
Single Pulse Avalanche Energy Rating (Note 4)	E_{AS}	230	mJ
Operating and Storage Temperature	T_J, T_{STG}	-55 to 175	°C
Maximum Temperature for Soldering			
Leads at 0.063in (1.6mm) from Case for 10s	T_L	300	°C
Package Body for 10s, See Techbrief 334	T_{pkg}	260	°C

CAUTION: Stresses above those listed in "Absolute Maximum Ratings" may cause permanent damage to the device. This is a stress only rating and operation of the device at these or any other conditions above those indicated in the operational sections of this specification is not implied.

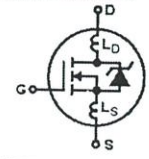
NOTE:

1. $T_J = 25^oC$ to $T_J = 150^oC$.

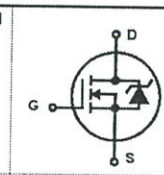
Electrical Specifications $T_C = 25^oC$, Unless Otherwise Specified

PARAMETER	SYMBOL	TEST CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
Drain to Source Breakdown Voltage	BV_{DSS}	I_D = 250μA, V_{GS} = 0V (Figure 10)	100	-	-	V
Gate to Threshold Voltage	$V_{GS(TH)}$	$V_{GS} = V_{DS}$, I_D = 250μA	2	-	4	V
Zero Gate Voltage Drain Current	I_{DSS}	V_{DS} = 95V, V_{GS} = 0V	-	-	25	μA
		V_{DS} = 0.8 x Rated BV_{DSS}, V_{GS} = 0V, $T_J = 150^oC$	-	-	250	μA
On-State Drain Current (Note 2)	$I_{D(ON)}$	$V_{DS} > I_{D(ON)} \times r_{DS(ON)\ MAX}$, V_{GS} = 10V (Figure 7)	28	-	-	A
Gate to Source Leakage Current	I_{GSS}	V_{GS} = ±20V	-	-	±100	nA
Drain to Source On Resistance (Note 2)	$r_{DS(ON)}$	I_D = 17A, V_{GS} = 10V (Figures 8, 9)	-	0.060	0.077	Ω
Forward Transconductance (Note 2)	g_{fs}	$V_{DS} \geq 50V$, I_D = 17A (Figure 12)	8.7	13	-	S
Turn-On Delay Time	$t_{d(ON)}$	V_{DD} = 50V, $I_D \approx$ 28A, $R_G \approx 9.1Ω$, R_L = 1.7Ω MOSFET Switching Times are Essentially Independent of Operating Temperature	-	15	23	ns
Rise Time	t_r		-	70	110	ns
Turn-Off Delay Time	$t_{d(OFF)}$		-	40	60	ns
Fall Time	t_f		-	50	83	ns
Total Gate Charge (Gate to Source + Gate to Drain)	$Q_{g(TOT)}$	V_{GS} = 10V, I_D = 28A, V_{DS} = 0.8 x Rated BV_{DSS}, $I_{g(REF)}$ = 1.5mA (Figure 14) Gate Charge is Essentially Independent of Operating Temperature	-	38	59	nC
Gate to Source Charge	Q_{gs}		-	8	-	nC
Gate to Drain "Miller" Charge	Q_{gd}		-	21	-	nC
Input Capacitance	C_{ISS}	V_{DS} = 25V, V_{GS} = 0V, f = 1MHz (Figure 11)	-	1450	-	pF
Output Capacitance	C_{OSS}		-	550	-	pF
Reverse Transfer Capacitance	C_{RSS}		-	100	-	pF
Internal Drain Inductance	L_D	Measured From the Contact Screw on Tab To Center of Die	-	3.5	-	nH
		Measured From the Drain Lead, 6mm (0.25in) from Package to Center of Die	-	4.5	-	nH
Internal Source Inductance	L_S	Measured From the Source Lead, 6mm (0.25in) From Header to Source Bonding Pad	-	7.5	-	nH
Thermal Resistance Junction to Case	$R_{\theta JC}$		-	-	1.25	°C/W
Thermal Resistance Junction to Ambient	$R_{\theta JA}$	Free Air Operation	-	-	80	°C/W
	$R_{\theta JA}$	RF1S540SM Mounted on FR-4 Board with Minimum Mounting Pad	-	-	62	°C/W

Modified MOSFET Symbol Showing the Internal Devices Inductances



Source to Drain Diode Specifications

PARAMETER	SYMBOL	TEST CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
Continuous Source to Drain Current	I_{SD}	Modified MOSFET Symbol Showing the Integral Reverse P-N Junction Diode 	-	-	28	A
Pulse Source to Drain Current (Note 3)	I_{SDM}		-	-	110	A
Source to Drain Diode Voltage (Note 2)	V_{SD}	T_J = 25°C, I_{SD} = 27A, V_{GS} = 0V (Figure 13)	-	-	2.5	V
Reverse Recovery Time	t_{rr}	T_J = 25°C, I_{SD} = 28A, dI_{SD}/dt = 100A/µs	70	150	300	ns
Reverse Recovery Charge	Q_{RR}	T_J = 25°C, I_{SD} = 28A, dI_{SD}/dt = 100A/µs	0.2	1.0	1.9	µC

NOTES:

2. Pulse test: pulse width ≤ 300µs, duty cycle ≤ 2%.
3. Repetitive rating: pulse width limited by maximum junction temperature. See Transient Thermal Impedance curve (Figure 3).
4. V_{DD} = 25V, starting T_J = 25°C, L = 440µH, R_G = 25Ω, peak I_{AS} = 28A.

Typical Performance Curves Unless Otherwise Specified

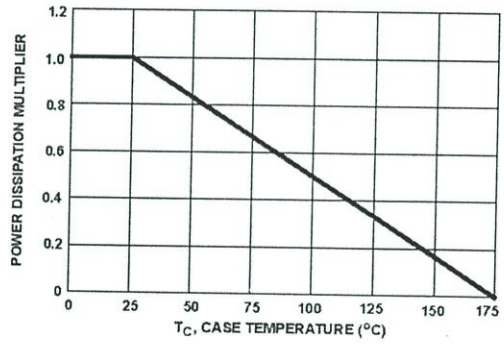


FIGURE 1. NORMALIZED POWER DISSIPATION vs CASE TEMPERATURE

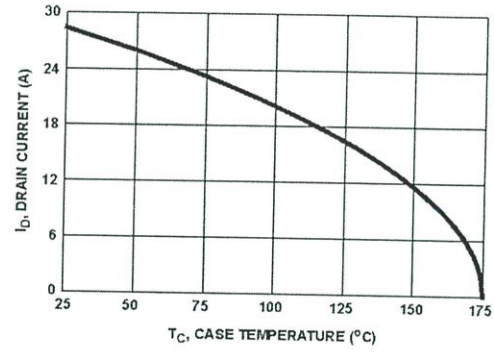


FIGURE 2. MAXIMUM CONTINUOUS DRAIN CURRENT vs CASE TEMPERATURE

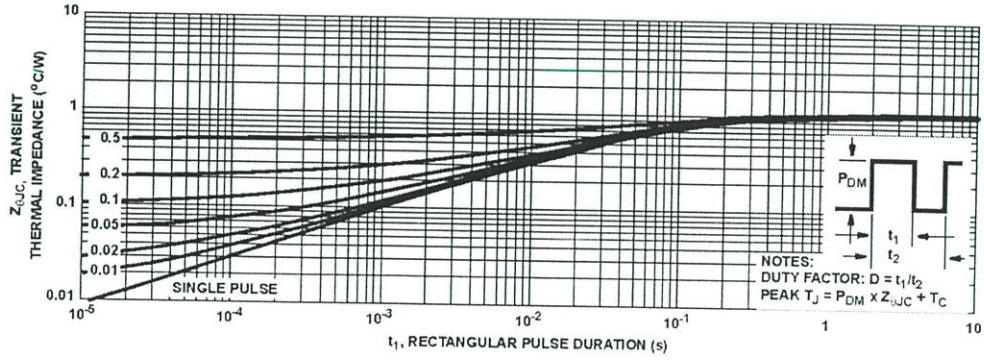


FIGURE 3. MAXIMUM TRANSIENT THERMAL IMPEDANCE

MICROCHIP

PIC16F87X

28/40-Pin 8-Bit CMOS FLASH Microcontrollers

Devices Included in this Data Sheet:

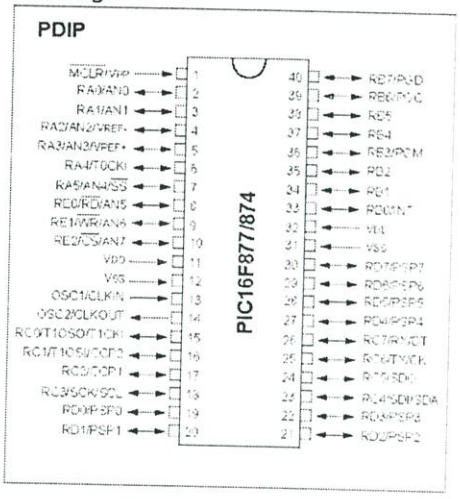
- PIC16F873
- PIC16F874
- PIC16F876
- PIC16F877

Microcontroller Core Features:

- High performance RISC CPU
- Only 35 single word instructions to learn
- All single cycle instructions except for program branches which are two cycle
- Operating speed: DC - 20 MHz clock input
  DC - 200 ns instruction cycle
- Up to 8K x 14 words of FLASH Program Memory,
  Up to 368 x 8 bytes of Data Memory (RAM)
  Up to 256 x 8 bytes of EEPROM Data Memory
- Pinout compatible to the PIC16C73B/74B/76/77
- Interrupt capability (up to 14 sources)
- Eight level deep hardware stack
- Direct, indirect and relative addressing modes
- Power-on Reset (POR)
- Power-up Timer (PWRT) and
  Oscillator Start-up Timer (OST)
- Watchdog Timer (WDT) with its own on-chip RC oscillator for reliable operation
- Programmable code protection
- Power saving SLEEP mode
- Selectable oscillator options
- Low power, high speed CMOS FLASH/EEPROM technology
- Fully static design
- In-Circuit Serial Programming™ (ICSP) via two pins
- Single 5V In-Circuit Serial Programming capability
- In-Circuit Debugging via two pins
- Processor read/write access to program memory
- Wide operating voltage range: 2.0V to 5.5V
- High Sink/Source Current: 25 mA
- Commercial, Industrial and Extended temperature ranges
- Low-power consumption:
  - < 0.6 mA typical @ 3V, 4 MHz
  - 20 µA typical @ 3V, 32 kHz
  - < 1 µA typical standby current

Pin Diagram

PDIP



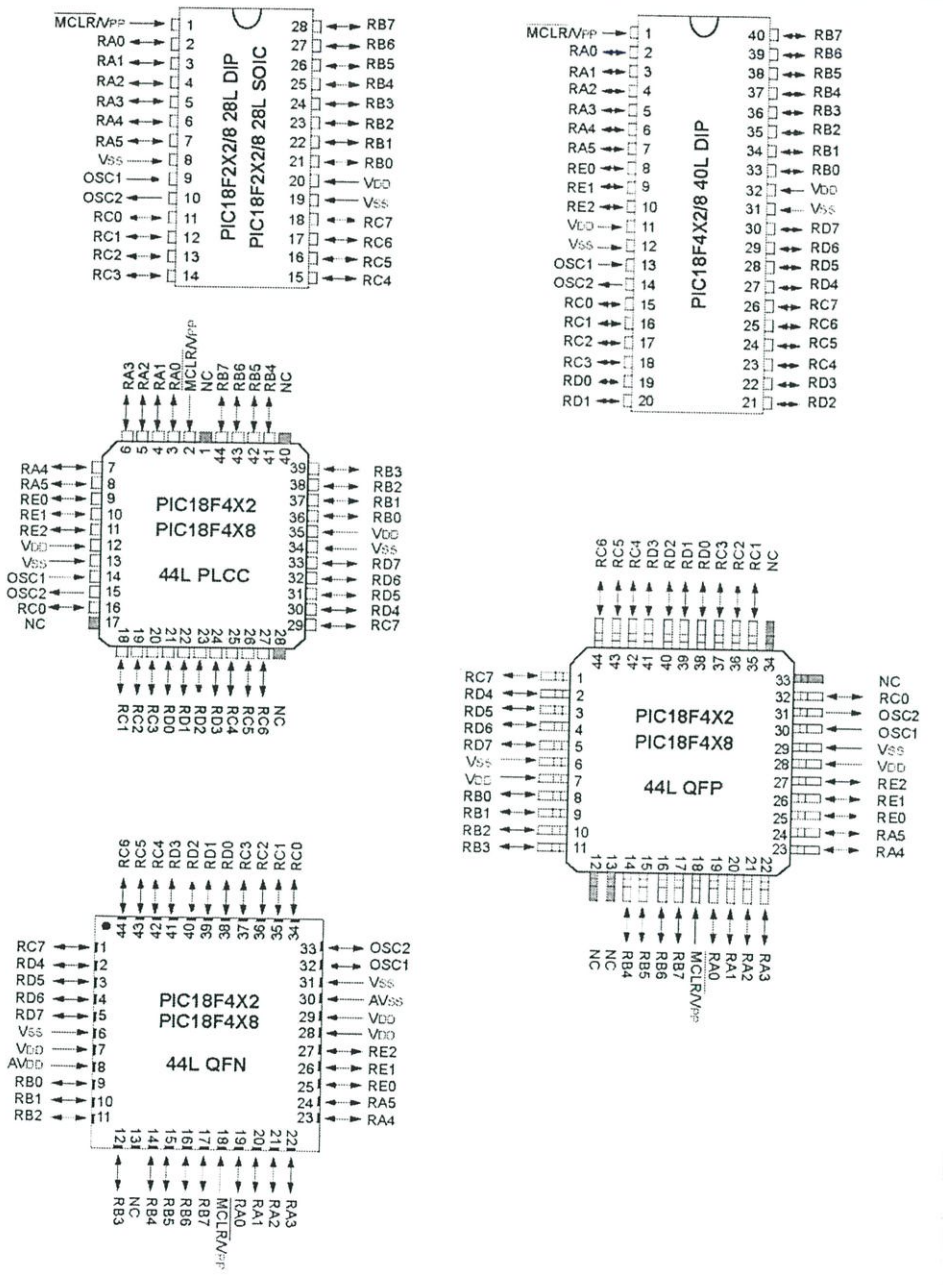
Peripheral Features:

- Timer0: 8-bit timer/counter with 8-bit prescaler
- Timer1: 16-bit timer/counter with prescaler, can be incremented during SLEEP via external crystal/clock
- Timer2: 8-bit timer/counter with 8-bit period register, prescaler and postscaler
- Two Capture, Compare, PWM modules
  - Capture is 16-bit, max. resolution is 12.5 ns
  - Compare is 16-bit, max. resolution is 200 ns
  - PWM max. resolution is 10-bit
- 10-bit multi-channel Analog-to-Digital converter
- Synchronous Serial Port (SSP) with SPI™ (Master mode) and I²C™ (Master/Slave)
- Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter (USART/SCI) with 9-bit address detection
- Parallel Slave Port (PSP) 8-bits wide, with external RD, WR and CS controls (40/44-pin only)
- Brown-out detection circuitry for Brown-out Reset (BOR)

© 2001 Microchip Technology Inc.

รูปที่ ค-1 PIC ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์16F877 อินพุท-เอาท์พุทไดอะแกรม

FIGURE 2-1: PIC18FXX2/XX8 FAMILY PIN DIAGRAMS



Note: Not all multiplexed pin definitions are shown. Refer to the appropriate data sheet for complete pin descriptions.

© 2002 Microchip Technology Inc

รูปที่ ค-2 PIC ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ 18F458 อินพุท-เอาท์พุทไดอะแกรม

ภาคผนวก ง.

การทดสอบตามมาตรฐาน IEEE 1513-2001

การทดสอบ I-V Scan แบบภาคสนาม

การทดสอบตามมาตรฐาน IEEE 1513-2001

การทดสอบ I-V Scan แบบภาคสนาม

1. หลักการและเหตุผล

หัวข้อนี้เป็นการเริ่มต้นการทดสอบในทางปฏิบัติ รวมทั้งการทดสอบในขั้นตอนสุดท้ายซึ่งการทดสอบ ขั้นตอนการวัดค่าจะเสร็จสิ้นสมบูรณ์เมื่อได้ข้อมูลคล้ายคลึงกันในแต่ละโมดูล ภายใต้ข้อกำหนดที่เป็นมาตรฐานอ้างอิงเดียวกัน

2. ทฤษฎีอ้างอิงและหลักการที่เกี่ยวข้อง

เมื่อโมดูลตั้งฉากกับแนวรังสีตรงของดวงอาทิตย์ เงื่อนไขการวิเคราะห์ตามมาตรฐานอ้างอิงคือการทำ I-V Scan ตามช่วงเวลาที่เหมาะสม และการวัดข้อมูลแวดล้อมอื่นๆเช่น อุณหภูมิเซลล์ และ/หรืออุณหภูมิของแผ่นระบายความร้อน, ความเข้มรังสีตรง (E_{DNI}), ความเข้มรังสีรวมที่ระนาบรับแสง (E_{POA}), อุณหภูมิตัวถัง และความเร็วลม ค่าที่ได้จากการทดสอบทำ I-V Scan คือกระแส และแรงดันที่จุดทำงานสูงสุด (I_{mp}, V_{mp}) รวมทั้งกระแสปิดวงจร (I_{sc}) กับแรงดันเปิดวงจร (V_{oc}) จำนวนข้อมูลทั้งหมดที่ต้องการในการทดสอบคือ 100 ข้อมูลหรืออย่างน้อยที่สุด 20 ข้อมูลโดยต้องครอบคลุมกลุ่มของความเข้มแสงประมาณ 150W/m^2 ความเข้มแสงน้อยที่สุดในการทดสอบคือ 600W/m^2 ดังนั้นไม่สามารถประมาณค่าภายนอกช่วงจาก V_{mp} และ V_{oc} เป็นค่าความเข้มแสงได้เนื่องจากค่าดังกล่าวต่ำกว่าค่าที่วัดได้ตามมาตรฐาน ช่วงความต่างของอุณหภูมิเซลล์ที่ทดสอบควรอยู่ระหว่าง 15°C ค่าแอร์แมสสัมบูรณ์มีค่าเปลี่ยนแปลงระหว่าง 1.5 หน่วย และต้องไม่เกิน 2 หน่วย

อาศัยสมการและปริมาณอื่นๆที่สำคัญในการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆของโมดูลเพื่อใช้หาความสัมพันธ์ระหว่างคุณลักษณะของโมดูลทดสอบกับความเข้มแสงดังนี้

$$I_{sc}(T_c, E_{DNI}, E_{DIF}, AM_a, AOI) = [(E_{DNI}/E_{DNIR}) * f_1(AM_a) * f_2(AOI) + C_6 E_{DIF}/E_{DIFR}] * \{[I_{sc_0}/(1+C_6)] + \alpha_{isc}(T_c - T_{cref})\} \quad (ง\text{-}1)$$

เมื่อกำหนดให้

$I_{sc_0} = I_{sc}$ ที่ภาวะอ้างอิง(A) (ง-2)

$E_e(E_{DNI}, E_{DIF}, AM_a, AOI) = I_{sc}(T_{cref}, E_{DNI}, E_{DIF}, AM_a, AOI)/I_{sc_0}$ (ง-3)

$I_{mp}(E_e, T_c) = C_1 + E_e * [C_2 + \alpha_{imp}(T_c - T_{cref})]$ (ง-4)

$V_{oc}(E_e, T_c) = V_{oc_0} + C_3 \ln(E_e) + \beta_{voc}(T_c - T_{cref})$ (ง-5)

$V_{mp}(E_e, T_c) = V_{mp_0} + C_4 \ln(E_e) + C_5[\ln(E_e)]^2 + \beta_{vmp}(T_c - T_{cref})$ (ง-6)

$I_{sc}(T_c, E_{DNI}, E_{DIF}, AM_a, AOI)$ คือกระแสลัดวงจรที่ภาวะที่ทดสอบ(A)

E_{DNI} คือความเข้มแสงตรง(W/m^2)

E_{DIF} คือความเข้มแสงกระจาย(W/m^2)

E_{DNIR} คือความเข้มแสงตรงอ้างอิง(W/m^2)

E_{DIFR} คือความเข้มแสงกระจายอ้างอิง(W/m^2)

$f_1(AM_a)$ คือแอร์แมสฟังก์ชัน

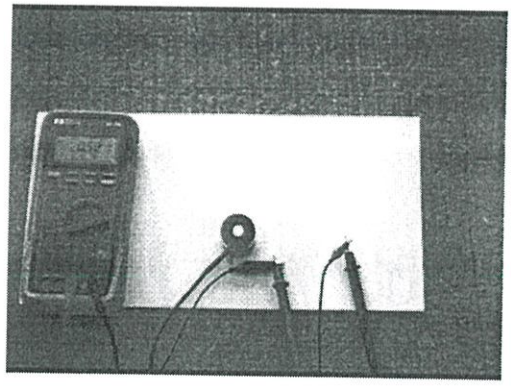
$f(AOI)$ คือฟังก์ชันของมุมตกกระทบจากรังสีตรง มีค่าเท่ากับ 1 เมื่อแผงรับตั้งฉากกับแนวรังสีตรง

T_c คืออุณหภูมิเซลล์(°C)

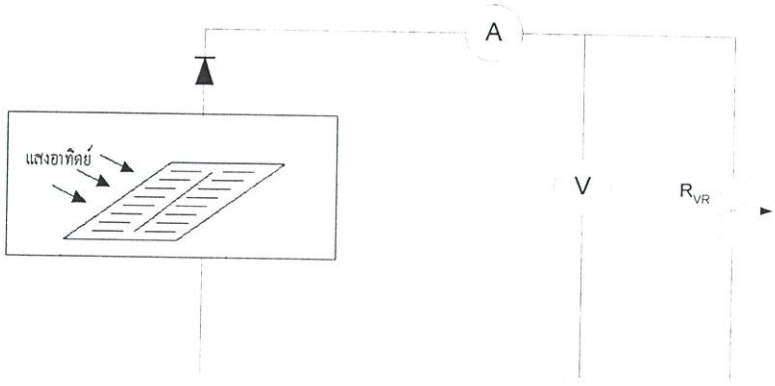
T_{cref} คืออุณหภูมิเซลล์อ้างอิง(°C)

3. อุปกรณ์การทดสอบ

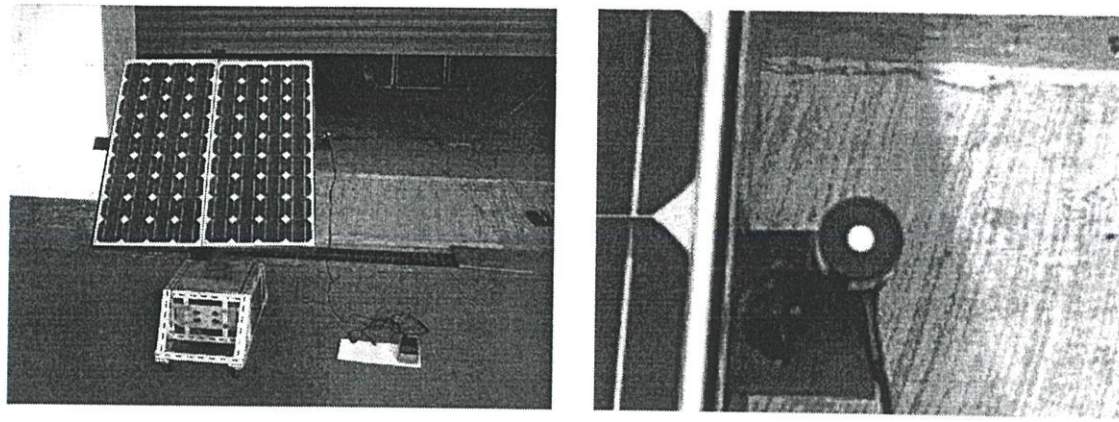
1. แอมป์มิเตอร์	จำนวน	2	เครื่อง
2. โวลท์มิเตอร์	จำนวน	1	เครื่อง
3. แผงเซลล์แสงอาทิตย์รุ่น BPTS1255HP SN:11	จำนวน	1	แผง
4. แผงโหลดภาระความต้านทาน	จำนวน	1	ชุด
6. เทอร์โมมิเตอร์	จำนวน	1	ลูก
7. ไพรานอมิเตอร์เซ็นเซอร์ SKS1110	จำนวน	1	เครื่อง



รูปที่ ง-1 อุปกรณ์วัดความเข้มแสงไพรานอมิเตอร์



รูปที่ ง-2 วงจรที่ใช้ทดสอบ I-V Scan



(ก) (ข)

รูปที่ ง-3 การทดสอบ I-V Scan ตามมาตรฐาน IEEE1513-2001(Out-door Test)

(ก) การติดตั้งไพรานอมิเตอร์กับระบบติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์

(ข) ภาพขยายตำแหน่งที่ติดตั้งไพรานอมิเตอร์

4. ขั้นตอนการทดสอบ

1) ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E1036-96 เพื่อหาค่า $\beta_{voc} = \Delta V_{oc} / \Delta T$ หรือใช้ค่าตามที่มาตรฐานของแผงที่นำมาทดสอบกำหนด

2) คำนวณแอร์แมส (AM) และแอร์แมสสัมบูรณ์ (AM_a) จากช่วงเวลาที่ทดสอบ จากสมการ

$$AM(Z_s) = \{\cos(Z_s) + 0.50572[96.07995 - Z_s(\deg r)]^{-1.634}\}^{-1} \quad \text{(ง-7)}$$

$$AM_a(Z_s, P/P_o) = (AM) * P/P_o \quad \text{(ง-8)}$$

เมื่อ

$P/P_o = e^{-0.0001184*h}$, โดย h คือความสูงจากระดับน้ำทะเลของสถานีทดสอบ(เมตร)

3) คำนวณหรือวัดอุณหภูมิเซลล์ (T_c) รวมทั้งองค์ประกอบที่เกี่ยวข้อง ถ้าไม่สามารถวัดอุณหภูมิเซลล์ได้ อาจประมาณค่าโดยใช้สมการดังต่อไปนี้

$$T_c = \{[1/N)(V_{oc} - V_{ocr})] + \beta_{voc} T_r\} / \{[(nk/q)\ln(I_{sc}/I_{scr})] + \beta_{voc}\} \quad \text{(ง-9)}$$

เมื่อกำหนด

N = จำนวนเซลล์ที่อนุกรมกันในแผงโซลาร์เซลล์

I_{SCr} = กระแสลัดวงจรที่อ้างอิงที่ T_r (A)

V_{ocr} = แรงดันเปิดวงจร T_r (V)

T_r = อุณภูมิเซลล์อ้างอิง(ควรเลือกใกล้เคียง T_c มากที่สุด) (K)

n = องค์ประกอบของเซลล์ไดโอด(เท่ากับ 1 สำหรับซิลิกอนเซลล์)

k = ค่าคงที่ของโบล์ทมานซ์, 1.38066×10^{-23} J/K

q = ขนาดประจุของอิเล็กตรอน, 1.60218×10^{-19}C

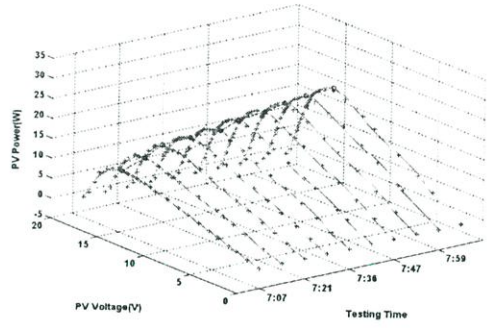
4) คำนวณ $f(AM_a)$ โดยใช้กรรมวิธีแบบ non-linear regression สมการที่ใช้ในมาตรฐานนี้ใช้สมการแบบ non-linear regression ของ Bevington ดังนี้

$Compute_amz = [AM(Z_s)\ \ 1.5]$ เป็นจุดของกลุ่มข้อมูล ที่ใช้ในการคำนวณสมการของ $f_1(AM_a)$ คือ

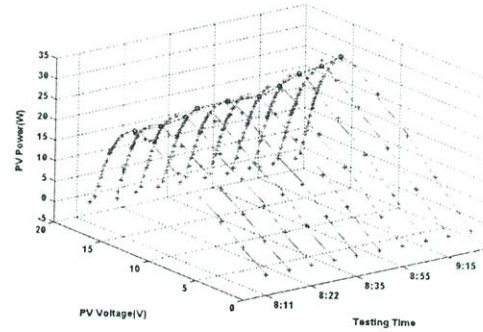
$$f_1(AM_a) = 1 + C_{11} * amz + C_{12} * amz^2 \qquad \text{(ง-10)}$$

5. ผลการทดสอบ

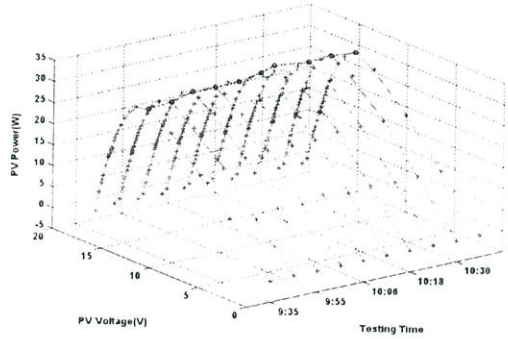
ผลการทดสอบจากการทำ I-V Scan เพื่อวัดค่ากระแส-แรงดันโดยอาศัยวงจรตามรูปที่ ง-2 และติดตั้งไพรานอมิเตอร์กับระบบติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์เพื่อควบคุม $f_2(AOI)$ ให้มีค่าเท่ากับ 1 ตามในรูปที่ ง-3 แสดงไว้ในรูปที่ ง-4 (ก)-(ญ) ดังนี้



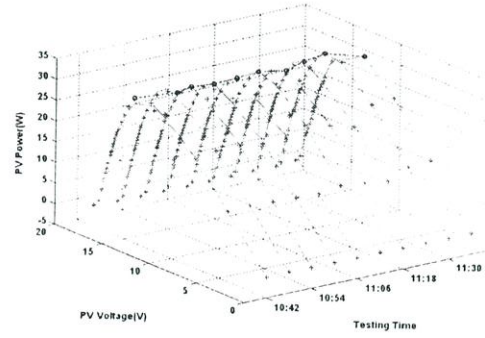
(ก)



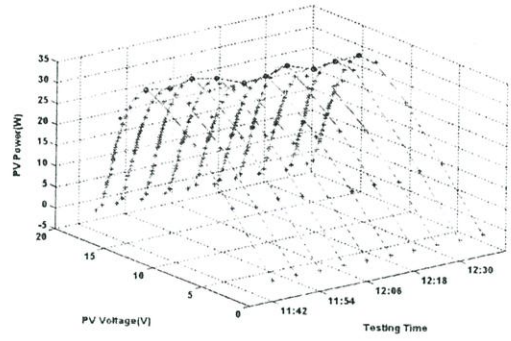
(ข)



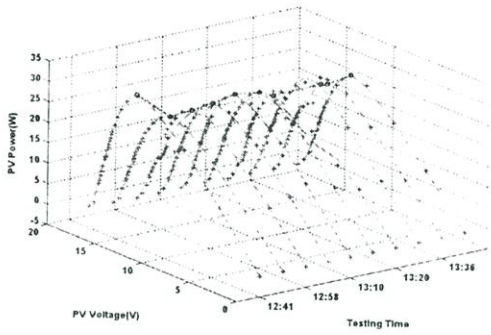
(ค)



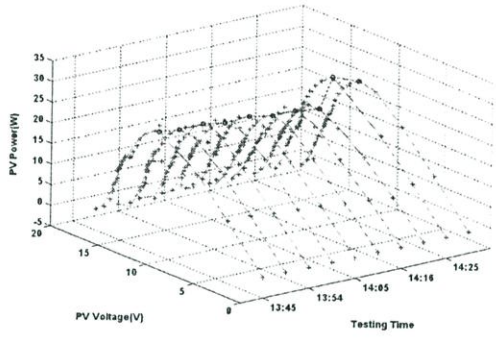
(ง)



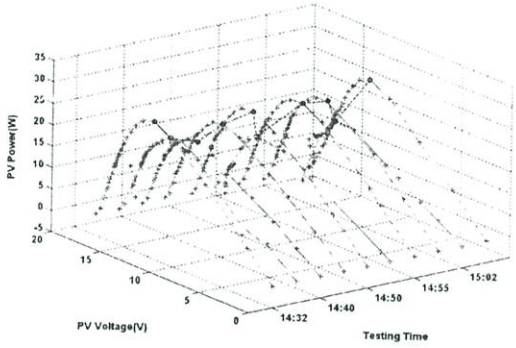
(จ)



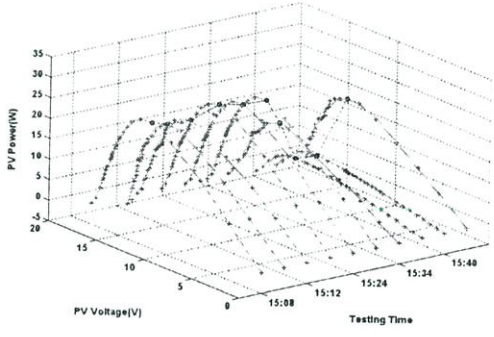
(ฉ)



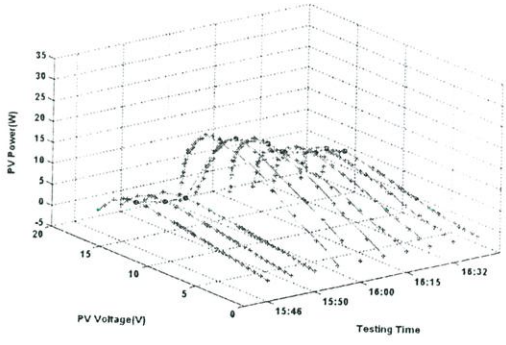
(ช)



(ซ)



(ฌ)



(ญ)

รูปที่ ง-4 ผลการทดสอบ I-V Scan แสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลัง-แรงดันในแต่ละช่วงเวลาทดสอบวันที่ 2 พฤศจิกายน 2546

(ก) ทดสอบระหว่างเวลา 7:00น.-7:59น. (ข) ทดสอบระหว่างเวลา 8:11น.-9:15น.

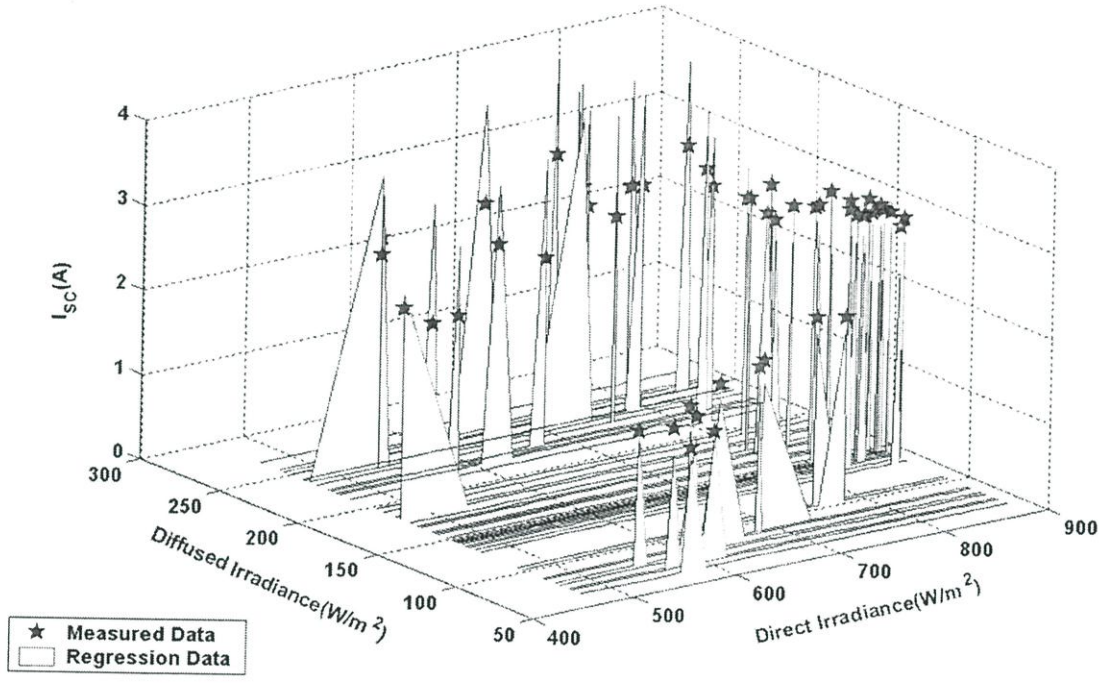
(ค) ทดสอบระหว่างเวลา 9:35น.-10:30น. (ง) ทดสอบระหว่างเวลา 10:42น.-11:30น.

(จ) ทดสอบระหว่างเวลา 11:42น.-12:30น. (ฉ) ทดสอบระหว่างเวลา 12:41น.-13:36น.

(ช) ทดสอบระหว่างเวลา 13:45น.-14:25น. (ซ) ทดสอบระหว่างเวลา 14:32น.-15:02น.

(ฌ) ทดสอบระหว่างเวลา 15:08น.-15:40น. (ญ) ทดสอบระหว่างเวลา 15:46น.-16:32น.

ข้อมูลที่ได้จากการทำ I-V Scan ตามตารางที่ ง-2 แสดงเป็นกราฟได้ตามรูปที่ ง-4 จำนวน 100 ข้อมูล จำนวนข้อมูลที่เหมาะสมตามเงื่อนไขที่ได้อธิบายไว้ในหลักการ และทฤษฎีของการทดสอบในหัวข้อที่ 2 มีจำนวนทั้งสิ้น 53 ข้อมูล ใช้วิธีประมาณค่าแบบ Non-linear Regression โดยอาศัยสมการที่ (ง-1) และสมการที่ (ง-10) เพื่อหาพารามิเตอร์ต่างๆของสมการดังแสดงไว้ในตารางที่ ง-1 จากนั้นพล็อต กราฟกระแสลัดวงจร-ความเข้มแสงเพื่อเปรียบเทียบกันระหว่างค่าที่ได้จากการวัดจริงกับค่าที่ได้จากกรรมวิธี Non-linear Regression ดังรูปที่ ง-5



รูปที่ ง-5 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของกระแสลัดวงจรที่สัมพันธ์กับความเข้มแสงค่าต่างๆระหว่างค่าที่ได้จากการวัดจริงกับค่าที่ได้จากกรรมวิธี Non-linear Regression โดย Least square fitting = 22.5763, ความแปรปรวน = 0.5506 และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน = 0.7421

6. สรุปและวิเคราะห์

จากการทดสอบเราสามารถใช้สมการที่ (ง-1) และ(ง-4) ร่วมกับพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องตามตารางที่ ง-1 เพื่อใช้ในการประมาณค่า ความเข้มแสง จากการทำ I-V Scan ได้ตามที่ต้องการ จากกราฟในรูปที่ ง-5 อธิบายได้ว่าหากการทดสอบอยู่ในช่วงที่มีอากาศแจ่มใสคือมีค่าความเข้มแสงจากรังสีกระจายไม่เกิน 10-20% ของความเข้มรังสีรวมการประมาณค่าที่ได้จะมีความถูกต้องมากโดยมีค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลจากการวัดและการทดสอบแต่ละจุดระหว่าง 0.01A-0.3A แต่จากมาตรฐาน IEEE1513-2001 นี้ยังสามารถประเมินคุณสมบัติของแผงโซลาร์เซลล์ที่ทดสอบในด้านกำลังไฟฟ้าของแผงโซลาร์เซลล์ได้โดยใช้วิธี Non-linear Regression เช่นกันดังรายละเอียดในขั้นตอนต่อไปนี้

1) คำนวณกระแส $I_{sc}(T_c = T_r, E_{DNI}, E_{DIF}, AM_a, AOI)$

จากสมการ $I_{sc}(T_c = T_r, E_{DNI}, E_{DIF}, AM_a, AOI) = I_{sc}(measured) - \alpha_{isc}(T_c - T_r)$ (ง-11)

แล้วหาค่า E_e จากสมการที่ (ง-2)

2) ใช้วิธี Regression ประมาณค่า C_1, C_2, α_{imp} โดยใช้สมการต่อไปนี้

$$I_{mp}(meas) = C_1 + E_e \times [C_2 + \alpha_{imp}(T_c - T_r)] \quad (ง-12)$$

คำนวณ $I_{mp0} = C_1 + C_2$

3) ใช้วิธี Regression ประมาณค่า $V_{oc0}, C_3, \beta_{voc}$ โดยใช้สมการต่อไปนี้

$$V_{oc}(meas) = V_{oc0} + C_3 \ln(E_e) + \beta_{voc} * K_\beta (T_c - T_r) \quad (ง-13)$$

4) ใช้วิธี Regression ประมาณค่า $V_{mp0}, C_4, C_5, \beta_{vmp}$ โดยใช้สมการต่อไปนี้

$$V_{mp}(meas) = V_{mp0} + C_4 \ln(E_e) + C_5[\ln(E_e)]^2 + \beta_{vmp}(T_c - T_r) \quad (ง-14)$$

5) คำนวณ $P_{\max 0}$ จาก $V_{mp0} \times I_{mp0}$

ตารางที่ ง-1 สัมประสิทธิ์หรือพารามิเตอร์ที่ได้จากกระบวนการ Regression ตามสมการในมาตรฐาน IEEE1513-2001

สัมประสิทธิ์	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_{11}	C_{12}
ค่า ส.ป.ส.	0.1233	2.8227	1.0156	9.2507	7.9416	0.9910	-159.6020	62.6736
สมการที่ใช้	(ง-4),(ง-12)	(ง-4),(ง-12)	(ง-5),(ง-13)	(ง-6),(ง-14)	(ง-6),(ง-14)	(ง-1)	(ง-1), (ง-10)	(ง-1), (ง-10)
สัมประสิทธิ์	α_{isc}	α_{imp}	β_{voc}	β_{vmp}	I_{mp0}	V_{mp0}	V_{oc0}	K_β (1)
ค่า ส.ป.ส.	0.0940	-0.6593	-0.1068	-6.5169	2.9460	14.4700	18.3761	35
สมการที่ใช้	(ง-1),(ง-11)	(ง-4),(ง-12)	(ง-5)	(ง-6),(ง-14)	(ง-12)	(ง-6),(ง-14)	(ง-5),(ง-13)	(ง-13)
			(ง-9),(ง-13)					

หมายเหตุ ใช้ Isc = 3.54A, Voc = 21V at Tc = 25°C, Voc = 18.09V at Tc = 52.6963°C (คำนวณจาก Voc at 21°C ใช้ β_{voc} จากมาตรฐานของแผง 0.5% ต่อองศาเซลเซียส), Etotal = 1000W/m^2, β_{voc} = -0.105V/T เป็นค่าอ้างอิงในการทำ Regression ซึ่งเป็นค่าจากมาตรฐานของแผงโซลาร์เซลล์

(1) เมื่อ K_β เป็นส.ป.ส.ความผิดพลาดจากการทำ Regression ซึ่งเกิดจากความผิดพลาดในการแทนค่าอุณหภูมิเซลล์อ้างอิงที่ถูกต้องควรมีค่าเป็น 1 ทำได้โดยการวัดอุณหภูมิเซลล์โดยตรง

เมื่อสามารถคำนวณสัมประสิทธิ์ทั้งหมดของสมการต่างๆ โดยใช้ค่าที่ได้จากการทดสอบแล้ว ก็สามารถประมาณค่า $V_{mp}, I_{mp}, I_{sc}, V_{oc}$ ได้โดยอาศัยสมการที่ (ง-2)-(ง-6) ซึ่งทำให้สามารถคำนวณกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้จากผลคูณของ I_{mp} กับ V_{mp} ได้อย่างแม่นยำมากขึ้นเป็นประโยชน์ต่อการประมาณการณ์พลังงานไฟฟ้าจากการใช้งานระบบพีวีเป็นอย่างยิ่ง

ตารางที่ ง-2 ข้อมูล I-V Scan และข้อมูลแวดล้อมใช้ในมาตรฐาน IEEE1513-2001ทดสอบวันที่ 2 พ.ย. 2546(V_{wind}(km/h):เป็นความเร็วลมเฉลี่ยตลอดวัน,ที่มา:กรมอุตุนิยมวิทยา)

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Item																				
V_{OC}(V)	18.88	18.92	18.93	18.88	18.88	18.80	18.81	18.74	18.76	18.73	18.65	18.15	18.58	18.61	18.62	18.46	18.44	18.54	18.46	18.51
I_{SC}(A)	0.79	0.93	1.05	1.15	1.25	1.33	1.44	1.51	1.58	1.65	1.71	1.78	1.86	1.93	2.00	2.18	2.16	2.31	2.38	2.49
P_{MAX}(W)	10.46	12.64	14.16	15.36	16.50	17.57	18.79	19.52	19.96	21.16	21.69	22.04	23.40	23.22	24.43	25.18	26.40	27.91	28.54	29.22
V_{MAX}(V)	14.48	14.55	14.51	14.28	14.26	14.33	13.95	14.21	14.40	13.83	14.07	13.69	13.45	12.79	13.86	12.97	13.15	13.54	13.53	13.93
I_{MAAX}(A)	0.72	0.87	0.98	1.08	1.16	1.23	1.35	1.37	1.39	1.53	1.54	1.61	1.74	1.82	1.76	1.94	2.01	2.06	2.11	2.10
E_{POA}(W/m^2)	334.00	490.00	503.00	540.00	533.00	588.00	640.00	678.00	632.00	638.00	665.00	674.00	726.00	770.00	775.00	865.00	885.00	913.00	928.00	966.00
E_{DIFF}(W/m^2)	49.00	69.00	69.00	61.00	59.00	65.00	65.00	71.00	82.00	71.00	73.00	79.00	88.00	90.00	90.00	106.00	103.00	120.00	112.00	131.00
E_{DNI}(W/m^2)	285.00	421.00	434.00	479.00	474.00	523.00	575.00	607.00	550.00	567.00	592.00	595.00	638.00	680.00	685.00	759.00	782.00	793.00	816.00	835.00
T_{amb}(^{o}C)	30.00	30.00	35.00	39.50	42.00	42.50	42.00	42.50	42.50	45.00	46.00	45.75	47.00	46.00	46.00	48.00	48.50	46.50	48.00	46.50
V_{wind}(km/h)	14.18	14.18	14.18	14.18	14.18	14.18	14.18	14.18	14.18	14.18	14.18	14.18	14.18	14.18	14.18	14.18	14.18	14.18	14.18	14.18
Time	7.07	7.15	7.21	7.29	7.36	7.41	7.47	7.53	7.59	8.05	8.11	8.16	8.22	8.30	8.35	8.45	8.55	9.05	9.15	9.25
No.	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
V_{OC}(V)	17.92	18.39	18.33	18.27	18.36	18.36	18.24	18.33	18.27	18.26	18.27	18.12	18.05	18.02	17.97	17.99	18.16	18.19	18.13	18.44
I_{SC}(A)	2.60	2.61	2.74	2.77	2.77	2.79	2.83	2.82	2.83	2.84	2.84	2.91	2.89	2.87	2.88	2.93	2.89	2.80	3.06	3.10
P_{MAX}(W)	29.12	29.70	30.79	30.41	30.62	31.31	30.77	31.48	31.78	31.38	29.91	32.03	31.37	30.87	31.04	31.31	30.99	31.58	32.13	31.86
V_{MAX}(V)	12.67	12.62	12.84	12.96	12.89	13.09	12.96	12.99	13.10	13.00	12.03	13.01	12.95	12.91	12.91	13.00	12.49	12.96	13.14	11.43
I_{MAAX}(A)	2.30	2.35	2.40	2.35	2.38	2.39	2.37	2.42	2.43	2.41	2.49	2.46	2.42	2.39	2.40	2.41	2.48	2.44	2.44	2.79
E_{POA}(W/m^2)	968.00	995.00	1004.00	1004.00	1018.00	1025.00	1003.00	1018.00	1025.00	1004.00	1028.00	1036.00	1027.00	1023.00	1027.00	1029.00	995.00	1037.00	968.00	1004.00
E_{DIFF}(W/m^2)	126.00	129.00	130.00	130.00	152.00	149.00	144.00	134.00	142.00	162.00	146.00	169.00	147.00	145.00	158.00	152.00	140.00	156.00	115.00	122.00
E_{DNI}(W/m^2)	842.00	866.00	874.00	874.00	866.00	876.00	859.00	884.00	883.00	842.00	882.00	867.00	880.00	878.00	869.00	877.00	855.00	881.00	853.00	882.00
T_{amb}(^{o}C)	46.00	46.50	46.00	45.00	43.00	42.00	47.00	49.00	50.50	49.50	50.00	52.00	52.50	51.50	52.00	52.00	49.00	48.50	52.00	51.50
V_{wind}(km/h)	14.18	14.18	14.18	14.18	14.18	14.18	14.18	14.18	14.18	14.18	14.18	14.18	14.18	14.18	14.18	14.18	14.18	14.18	14.18	14.18
Time	9.35	9.45	9.55	10.00	10.06	10.12	10.18	10.24	10.30	10.36	10.42	10.48	10.54	11.00	11.06	11.12	11.18	11.24	11.30	11.36

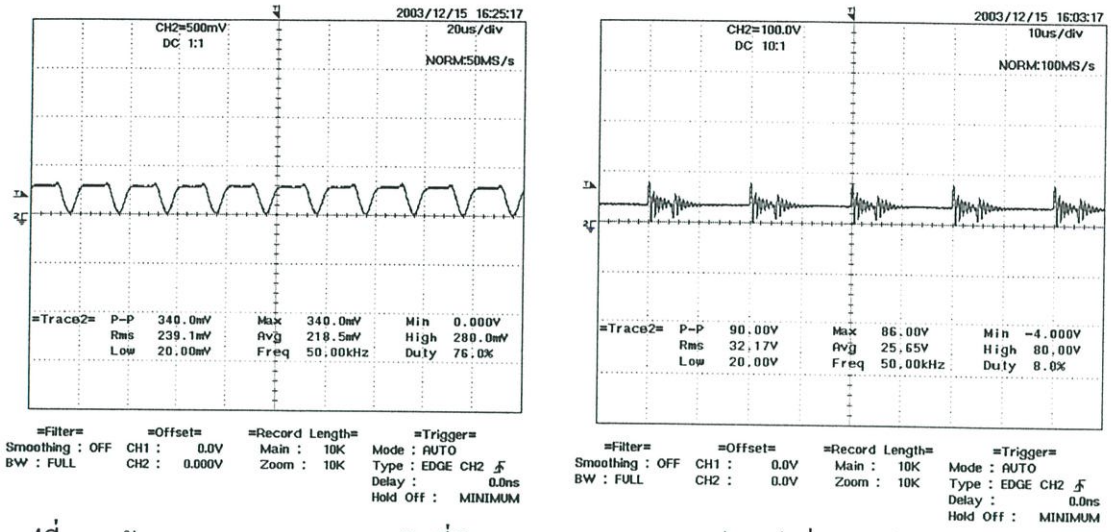
No.	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
Item																				
V_{OC}(V)	18.21	18.44	18.34	18.29	18.34	18.02	18.22	18.13	17.77	18.02	17.99	17.80	17.65	17.79	17.79	17.74	17.63	17.77	17.66	17.62
I_{SC}(A)	3.06	2.95	3.05	3.00	2.82	2.84	2.82	2.79	2.96	3.01	2.95	2.79	2.78	2.88	2.76	2.85	2.87	2.87	2.72	2.77
P_{MAX}(W)	33.48	32.70	33.48	32.45	30.58	30.92	31.99	30.18	30.65	30.93	32.10	26.56	26.87	27.24	28.09	27.49	24.57	28.80	25.98	27.04
V_{MAX}(V)	13.31	13.22	13.39	13.20	12.75	12.86	13.04	12.79	12.98	12.95	13.07	11.97	10.34	12.22	12.35	12.21	13.14	12.19	12.22	12.08
I_{MAAX}(A)	2.52	2.47	2.50	2.46	2.40	2.40	2.45	2.36	2.36	2.39	2.46	2.22	2.60	2.23	2.27	2.25	1.87	2.36	2.13	2.24
E_{POA}(W/m^2)	1002.00	1001.00	1006.00	976.00	1005.00	520.00	960.00	980.00	974.00	974.00	1019.00	971.00	1013.00	1024.00	1032.00	1056.00	1101.00	1040.00	1046.00	1075.00
E_{DIFF}(W/m^2)	127.00	125.00	133.00	138.00	171.00	152.00	160.00	171.00	175.00	149.00	185.00	239.00	192.00	270.00	213.00	225.00	250.00	258.00	221.00	257.00
E_{DNI}(W/m^2)	875.00	876.00	873.00	838.00	834.00	368.00	800.00	809.00	799.00	825.00	834.00	732.00	821.00	754.00	819.00	831.00	851.00	782.00	825.00	818.00
T_{amb}(°C)	52.50	50.50	51.50	51.00	53.50	52.00	53.50	52.00	54.50	53.50	53.00	45.00	45.50	46.00	46.00	47.00	47.50	48.00	46.00	50.00
V_{wind}(km/h)	14.18	14.18	14.18	14.18	14.18	14.18	14.18	14.18	14.18	14.18	14.18	14.18	14.18	14.18	14.18	14.18	14.18	14.18	14.18	14.18
Time	11.42	11.48	11.54	12.00	12.06	12.12	12.18	12.24	12.30	12.36	12.42	12.55	12.58	13.05	13.10	13.15	13.20	13.29	13.36	13.44
No.	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
V_{OC}(V)	17.65	17.63	17.84	17.87	17.77	17.69	17.67	17.72	17.82	17.48	17.88	17.84	17.91	18.03	17.71	16.70	17.73	17.63	16.10	17.99
I_{SC}(A)	2.66	2.62	2.59	2.61	2.54	2.49	2.40	2.36	2.62	2.71	2.51	2.07	1.76	2.18	2.50	1.40	2.47	2.52	1.61	2.49
P_{MAX}(W)	24.92	23.90	24.18	23.22	23.62	22.81	22.69	22.05	27.56	25.64	27.05	21.35	19.50	22.57	24.96	16.05	24.76	24.19	16.79	26.23
V_{MAX}(V)	11.13	11.44	11.34	11.39	11.24	11.07	11.13	11.00	12.03	11.74	12.05	11.57	12.46	12.37	11.67	13.70	11.54	12.59	11.00	11.96
I_{MAAX}(A)	2.24	2.09	2.13	2.04	2.10	2.06	2.04	2.00	2.29	2.18	2.24	1.85	1.57	1.82	2.14	1.17	2.15	1.92	1.53	2.19
E_{POA}(W/m^2)	1039.00	1036.00	1057.00	1040.00	1047.00	1010.00	992.00	996.00	923.00	776.00	776.00	744.00	782.00	905.00	987.00	327.00	921.00	724.00	407.00	977.00
E_{DIFF}(W/m^2)	234.00	249.00	267.00	243.00	250.00	255.00	234.00	251.00	258.00	239.00	239.00	197.00	222.00	227.00	243.00	130.00	224.00	194.00	155.00	234.00
E_{DNI}(W/m^2)	805.00	787.00	790.00	797.00	797.00	755.00	758.00	745.00	665.00	537.00	537.00	547.00	560.00	678.00	744.00	197.00	697.00	530.00	252.00	743.00
T_{amb}(°C)	49.50	50.50	49.50	49.00	51.00	52.00	53.00	51.00	53.00	54.00	54.00	52.00	52.00	53.00	56.00	41.00	56.00	55.00	49.50	54.00
V_{wind}(km/h)	14.18	14.18	14.18	14.18	14.18	14.18	14.18	14.18	14.18	14.18	14.18	14.18	14.18	14.18	14.18	14.18	14.18	14.18	14.18	14.18
Time	13.45	13.50	13.54	14.00	14.05	14.10	14.16	14.20	14.25	14.30	14.32	14.35	14.40	14.43	14.50	14.52	14.55	15.00	15.02	15.05

No.	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
Item																				
V_{OC}(V)	17.92	16.50	17.85	17.74	17.64	17.72	17.85	17.29	17.51	17.00	17.60	17.62	17.56	16.20	17.00	15.90	15.90	16.10	15.75	16.00
I_{SC}(A)	2.48	2.25	2.48	2.62	2.54	2.48	1.53	0.67	0.56	1.85	0.50	0.46	0.41	1.70	1.49	1.41	1.06	0.95	0.79	0.56
P_{MAX}(W)	25.50	23.27	23.09	26.17	25.28	25.11	17.45	6.99	6.24	19.52	5.61	5.17	4.55	17.94	16.63	15.11	11.25	10.75	9.40	7.20
V_{MAX}(V)	11.71	12.50	12.47	11.89	11.69	11.63	12.53	13.21	13.40	12.75	13.67	13.05	13.32	13.00	12.30	13.40	13.50	13.25	13.25	13.75
I_{MAAX}(A)	2.18	1.86	1.85	2.20	2.16	2.16	1.39	0.53	0.47	1.53	0.41	0.40	0.34	1.38	1.35	1.13	0.83	0.81	0.71	0.52
E_{POA}(W/m^2)	979.00	544.00	1003.00	1025.00	841.00	653.00	283.00	212.00	187.00	425.00	173.00	160.00	144.00	379.00	329.00	311.00	237.00	210.00	169.00	65.00
E_{DIFF}(W/m^2)	227.00	130.00	260.00	242.00	220.00	182.00	115.00	98.00	91.00	144.00	100.00	82.00	81.00	125.00	110.00	95.00	125.00	72.00	61.00	25.00
E_{DNI}(W/m^2)	752.00	414.00	743.00	783.00	621.00	471.00	168.00	114.00	96.00	281.00	73.00	78.00	63.00	254.00	219.00	216.00	112.00	138.00	108.00	40.00
T_{amb}(^{o}C)	54.50	52.00	55.00	57.00	57.00	56.00	52.50	46.50	43.00	40.50	40.50	39.50	39.00	50.00	48.00	47.00	45.00	48.00	41.00	40.00
V_{wind}(km/h)	14.18	14.18	14.18	14.18	14.18	14.18	14.18	14.18	14.18	14.18	14.18	14.18	14.18	14.18	14.18	14.18	14.18	14.18	14.18	14.18
Time	15.08	15.10	15.12	15.20	15.24	15.28	15.34	15.37	15.40	15.42	15.46	15.48	15.50	15.55	16.00	16.08	16.15	16.22	16.32	16.40

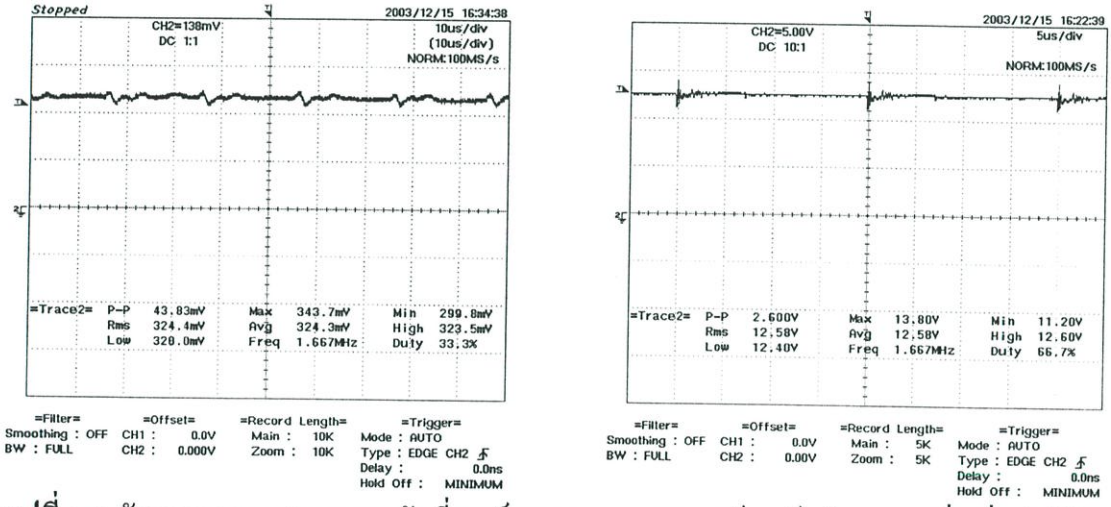
ตารางที่ ง-3 ค่ากลางทางสถิติของข้อมูลจากการทดสอบ I-V Scan

ค่ากลางทางสถิติ	สูงสุด	ต่ำสุด	ค่าเฉลี่ย	มัธยฐาน	STD	ช่วงข้อมูล
Voc	18.8100	17.4800	18.0919	18.0300	0.3509	1.3300
Isc	3.0100	1.4400	2.5157	2.7600	0.4499	1.5700
Im	2.6000	1.3500	2.1326	2.2300	0.3334	1.2500
Vm	14.4000	10.3400	12.6151	12.9100	0.8845	4.0600
Pm	32.4500	18.7900	26.7989	26.8700	4.1163	13.6600

ภาคผนวก จ.
ข้อมูลประกอบเพิ่มเติม



รูปที่ จ-1 สัญญาณกระแส และแรงดันที่อินพุท MPPT คอนเวอร์เตอร์ เมื่อต่อใช้งานร่วมกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ จ-2 สัญญาณกระแส และแรงดันที่เอาท์พุท MPPT คอนเวอร์เตอร์(เข้าแบตเตอรี่) เมื่อต่อใช้งานร่วมกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์

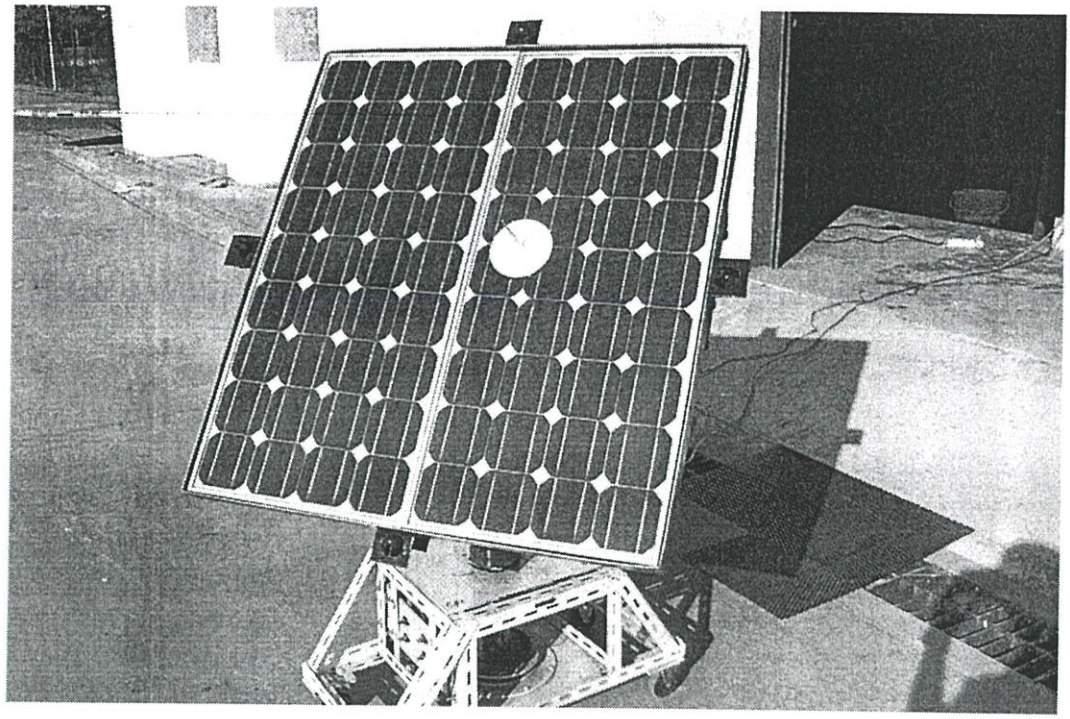
สมการทางสถิติที่สำคัญ

1. Least Square Value for Regression Technique $S_r = \sum (y_1 - f(x_i))^2$

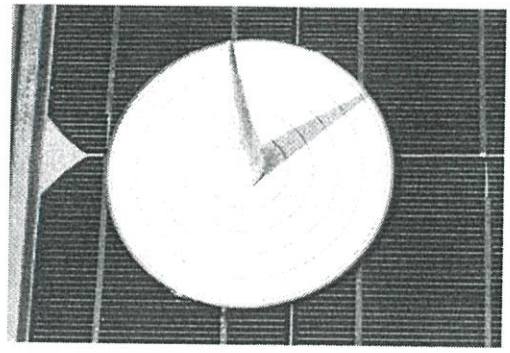
2. Sum of Residual square about the mean $S_t = \sum (y_i - \bar{y})^2$

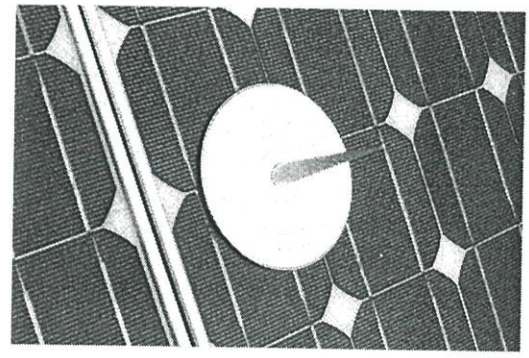
3. Relative Correlation Coefficient $r = \pm\sqrt{\frac{S_t - S_r}{S_t}}$, โดย $0 \le |r| < 1$

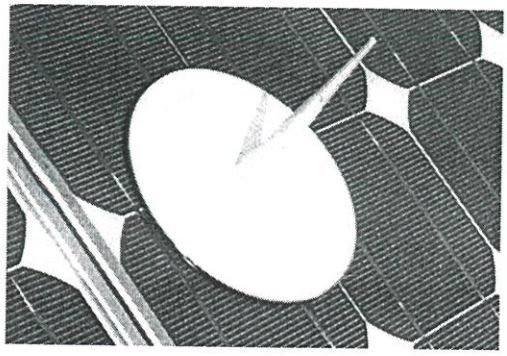
และ $|r|$ เข้าใกล้หนึ่งมากเท่าใดความน่าเชื่อถือของเส้นกราฟยิ่งมากเท่านั้น



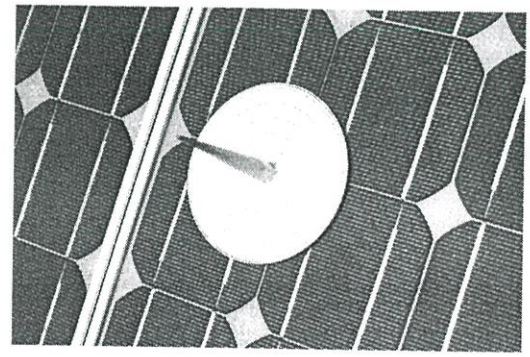
(ก)







(ข)



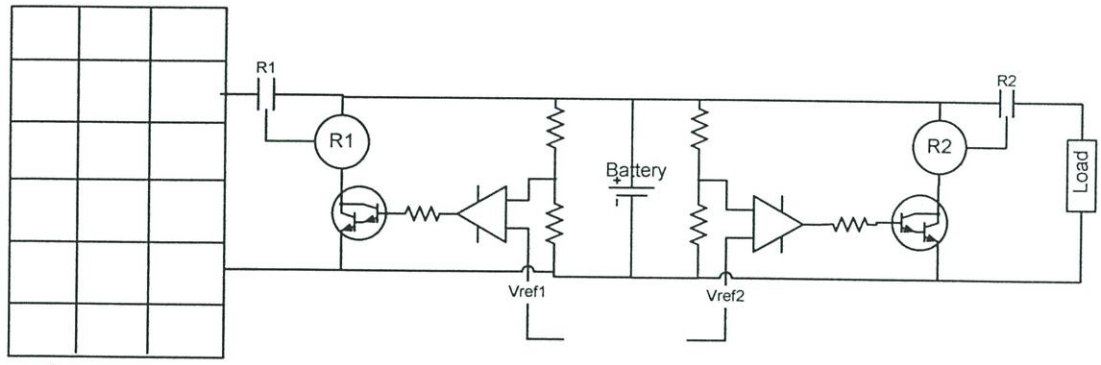
(ค)

รูปที่ จ-3 การทดสอบปรับ LDR โมดูลโดยอาศัยหลักการของนาฬิกาแดด

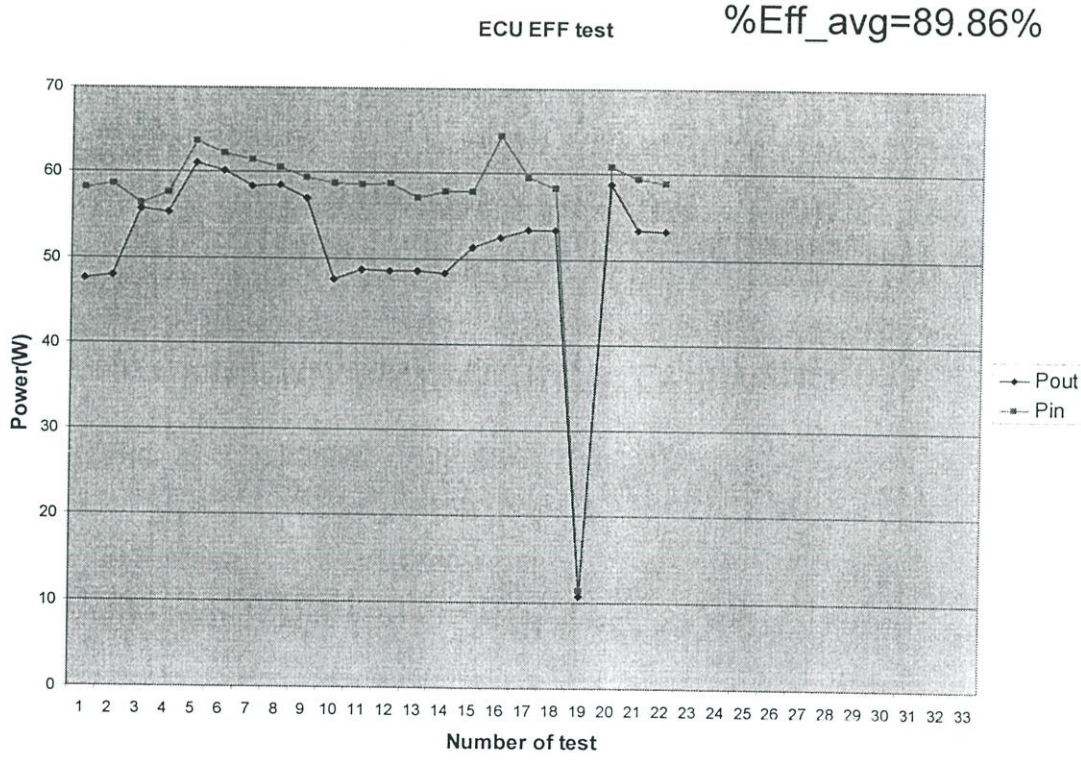
(ก) องค์ประกอบรวมของการทดสอบ

(ข) เมื่อมีเงาทอดลงบนแผงรับแสดงว่าโมดูลต้องการปรับเพิ่มเติม

(ค) เมื่อมีเงาทอดลงเฉพาะตำแน่งศูนย์กลางแสดงว่าการปรับตั้งโมดูลถูกต้อง



รูปที่ จ-4 วงจรรวมของ ECU ที่ใช้ในระบบอ้างอิง

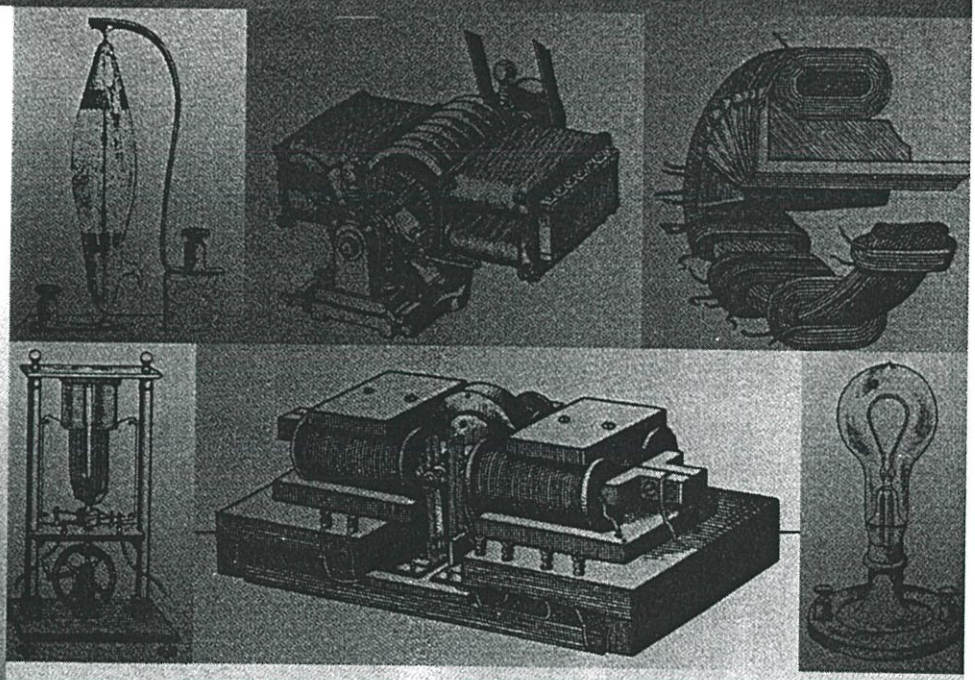


รูปที่ จ-5 การทดสอบประสิทธิภาพของ ECU ทดสอบในสภาวะอัดประจุให้แบตเตอรี่จากแผงโซลาร์เซลล์ที่ใช้ในงานวิจัย 2 แผงต่อขนานกัน

ภาคผนวก ฉ.
บทความที่ได้รับการตีพิมพ์

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 24

24th Electrical Engineering Conference (EECON-24)



Volume 1

สาขาบทความ

- ไฟฟ้ากำลัง (PW)
- อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (PE)
- ระบบควบคุมและการวัดคุม (CT)
- งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า (GN)

ดำเนินการโดย **คณะวิศวกรรมศาสตร์**

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

22-23 พฤศจิกายน 2544

โทร : 0-2739-2359 โทรสาร : 0-2326-9965

http://www.ladkrabang.com

การแปลงพลังงานของระบบพีวีโดยใช้วงจร MPPT คอนเวอร์เตอร์ ร่วมกับการเคลื่อนหมุนแผงพีวีทางกล

Energy Transfer from PV System by Using a Combination of MPPT Converter and Mechanical PV Panel Tracking

สุริยา สุริยกานนท์ ถนอมชัย เบ็ญจสมิตโยธิน และศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520
โทร/โทรสาร: (02)737-3000 ต่อ 3322 E-mail: s2061083@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้เสนอการรวมเทคนิคการแทรคหาจุดทำงานที่ดีที่สุดของระบบพีวี 2 เทคนิคเข้าด้วยกันคือ การใช้ MPPT คอนเวอร์เตอร์ (Maximum Power Point Tracking Converter) หรือ การปรับโดยวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังช่วยรักษาระดับแรงดันทำงาน ของแผงโซล่าร์เซลล์ให้ใกล้เคียงกับจุดกำลังสูงสุดมากที่สุดถึงแม้ว่าแรงดันโหลดจะเปลี่ยนไป ทำให้สามารถแปลงพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยต่อวันดีที่สุด เมื่อเทียบกับพิกัดของแผง ร่วมกับการปรับตำแหน่งทางกล (Mechanical Tracking) ของแผงโซล่าร์เซลล์ตามตำแหน่งดวงอาทิตย์ โดยอาศัยการปรับตำแหน่งทางกลเพื่อหัน และปรับมุมให้แผงมีโอกาสรับพลังงานเต็มที่ตลอดทั้งวันมากขึ้นจากการวิเคราะห์ผลการทดสอบเมื่อให้แรงดันโหลดมีการเปลี่ยนแปลงค่าพลังงานเฉลี่ยต่อวันที่ได้รับเพิ่มขึ้นประมาณ 10~20% เมื่อเทียบกับระบบแผงแบบทำมุมคงที่ (Static PV panel) และไม่ได้ใช้ MPPT คอนเวอร์เตอร์

Abstract

This paper presents a combination of two tracking techniques for the higher sunlight receiving capable and average energy conversion per day from PV system. The first technique is the MPPT converter (Maximum Power Point Tracking Converter), which can keep the panel operation voltage near the maximum panel voltage (Vmax) in case of unconstant load voltage, so the power will track near the peak of power line curve. The second technique is the mechanical PV Panel tracking structure, which can adjust a solar panel angle and face a solar panel to the light irradiation incidence to the solar panel, which will be higher than the static panel. The test results and analysis shown the combination of them could obtain more energy than static PV panel without tracking techniques about 10~20%.

Keywords: PV system, solar tracking, MPPT converter, solar energy.

1. บทนำ

การเพิ่มปริมาณพลังงานที่แปลงจากพลังงานแสงอาทิตย์เป็นกระแสไฟฟ้าจากโซล่าร์เซลล์นั้น ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพรวม โดยทั่วไปการนำโซล่าร์เซลล์ไปใช้งานในสภาวะแรงดันที่แตกต่างกันมีผลต่อประสิทธิภาพของแผงมาก การปรับหาจุดทำงานที่เหมาะสมของกระแส-แรงดัน โดยอาศัยคอนเวอร์เตอร์เพื่อรักษาระดับแรงดันของแผงโซล่าร์เซลล์ ให้ใกล้เคียงกับแรงดันทำงานที่จุดกำลังสูงสุดช่วยให้การแปลงพลังงานเพิ่มมากขึ้นด้วย [1-3]

ส่วนกระแสที่แผงโซล่าร์เซลล์สามารถจ่ายให้โหลด ขึ้นกับปริมาณความเข้มแสง และมุมแสงที่ตกกระทบแผงรวมทั้งปัจจัยทางภูมิอากาศอื่นๆด้วยการตั้งแผงทำมุมที่เหมาะสำหรับประเทศไทย (กรุงเทพฯ) คือ 15 องศาเทียบกับแนวราบ [4-5] โดยหันไปทางทิศเหนือหรือใต้เปลี่ยนไปตามฤดูกาล ดังนั้นการใช้แผงที่ปรับมุมเปลี่ยนตามความเข้มแสงมีความเหมาะสมที่สุดทั้งด้านพลังงานที่ได้ และเวลาที่ทำงานต่อวันที่มากกว่า โดยไม่ขึ้นกับสถานที่ และฤดูกาล[3, 5, 6]

ในบทความนี้เป็นการนำเสนอต้นแบบการแปลงพลังงานของระบบพีวีโดยใช้วงจร MPPT คอนเวอร์เตอร์ และการแทรคของแผงพีวีทางกล รวมทั้งนำผลการทดสอบมาวิเคราะห์เปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสียในการเลือกติดตั้ง และใช้งานในสถานที่ต่างๆกันในทางปฏิบัติ

2. ทฤษฎี

หลักการพื้นฐานของโซล่าร์เซลล์ในการกำเนิดกระแสไฟฟ้าเมื่อเซลล์ได้รับการกระตุ้นจากแสงอาทิตย์คือคุณลักษณะความสัมพันธ์ของกระแส-แรงดันพิจารณาได้จากวงจรเสมือนของโซล่าร์เซลล์รูปที่1[7]

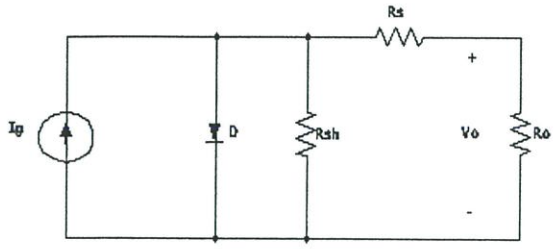
จากรูปสมการของกระแสและแรงดัน เมื่อละค่าความต้านทาน R_{sh} ภายในเขียนได้ตามสมการที่ (1) [7]

$$I_o = I_q - I_{sat}\{\exp[\frac{q}{AKT}(V_o + I_o R_s)] - 1\} \quad (1)$$

เมื่อ

I_q : กระแสที่ได้เมื่อแผงได้รับแสง(แอมป์) ; K : ค่าคงที่ของโบล์ทมาน

T : อุณหภูมิในหน่วยเคลวิน; R_s : ค่าความต้านทานอนุกรม(โอห์ม);
q : ประจุของอิเล็กตรอน(คูลอมบ์); A : แฟคเตอร์ของรูปทรง;
V_o : แรงดันที่เอาท์พุท(โวลต์); I_o : กระแสเอาท์พุท(แอมป์)



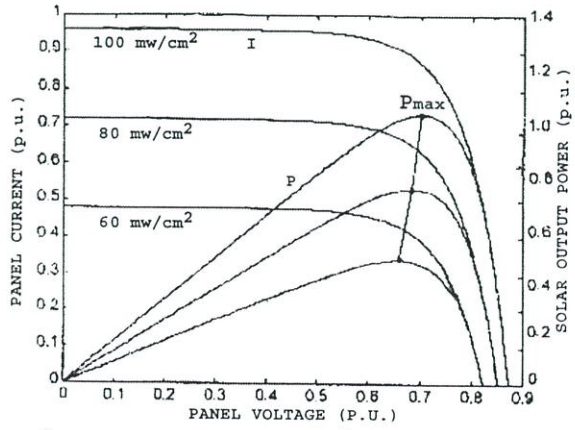
รูปที่ 1 วงจรเสมือน

จากสมการ (1) ความสัมพันธ์ของกระแสแรงดันเขียนได้ในสมการ(2)

$$V_o = -I_o R_s + \frac{AKT}{q} \ln[\frac{I_q - I_o + I_{sat}}{I_{sat}}] \qquad (2)$$

ความสัมพันธ์ระหว่าง กระแส-แรงดัน-กำลังไฟฟ้าแสดงได้ในรูปที่ 2 [3]

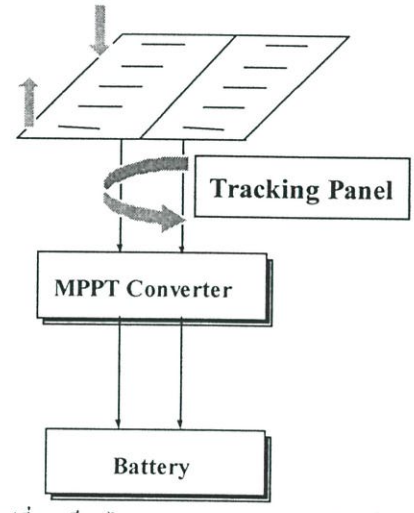
ในรูปที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ของแหล่งจ่ายพลังงานแบบไม่เป็นเชิงเส้น และค่ากำลังที่ได้เปลี่ยนแปลงไปตามค่าความเข้มแสงที่เปลี่ยนไป ที่จุดสูงสุดของเส้นกราฟกำลัง(P) คือจุดแรงดันทำงานที่ดีที่สุดของความเข้มแสงในขณะนั้นๆ และการใช้ MPPT คอนเวอร์เตอร์ช่วยรักษาระดับแรงดันที่แผงเอาไว้ให้ใกล้เคียงที่ $P_{\max}$ มากที่สุดไม่ว่าจะต่อกับภาระใดๆ คุณลักษณะดังกล่าวช่วยให้การแปลงพลังงานเพิ่มขึ้นมากที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ในช่วงเวลานั้น ส่วนเส้นกราฟกำลังที่เรียงลำดับจากด้านล่างไปด้านบนทั้ง 3 เส้นแสดงค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้มากขึ้นเมื่อความเข้มแสงที่ตกกระทบแผงมากขึ้นตามลำดับ ระบบแผงแบบเปลี่ยนมุมเองได้เพื่อหาตำแหน่งของดวงอาทิตย์ ณ เวลาหนึ่งๆ ในแต่ละวันมีส่วนช่วยให้แผงได้รับความเข้มแสงมากขึ้น



รูปที่ 2 คุณลักษณะกระแส และแรงดันที่ความเข้มแสงแตกต่างกัน

1. การออกแบบ

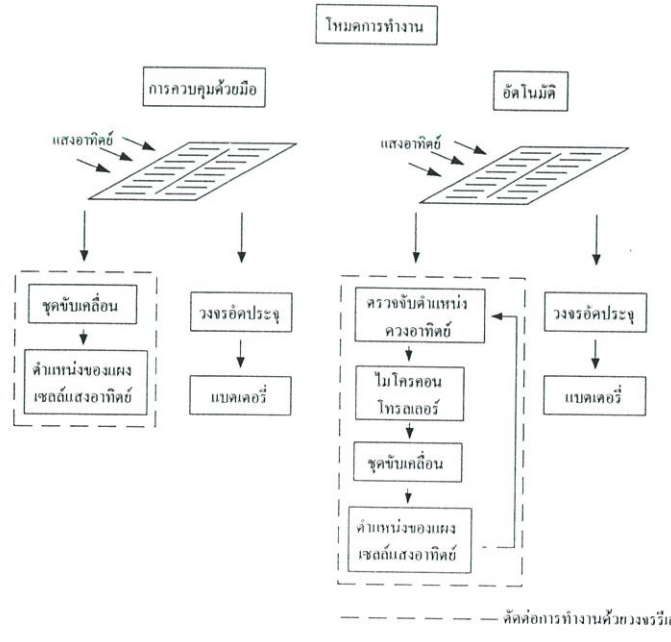
การต่ออุปกรณ์เพื่อทดสอบร่วมกันของทั้งสองระบบแสดงได้ดังรูปที่ 3 ประกอบด้วยส่วนหลัก 2 ส่วน คือระบบแผงที่เคลื่อนที่เปลี่ยนมุมแผงและโครงสร้างที่หมุนรอบได้ 360 องศา หรือเคลื่อนที่ได้ 2 แกนเพื่อหามุมรับความเข้มแสงอาทิตย์ได้สูงสุดกับ MPPT คอนเวอร์เตอร์ที่ช่วยรักษาแรงดันแผงเอาไว้ให้ได้การประจุกำลังที่แบตเตอรี่สูงสุด



รูปที่ 3 บล็อคไดอะแกรมแสดงการต่ออุปกรณ์

3.1 Mechanical Tracking

พิจารณารูปที่ 4 แสดงบล็อคไดอะแกรมการทำงานของระบบ Mechanical tracking ซึ่งสามารถควบคุมการทำงานได้ทั้ง การควบคุม



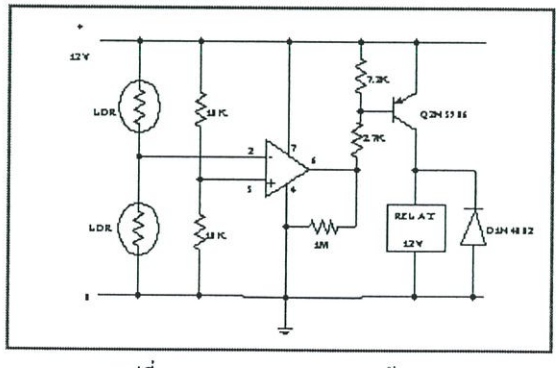
รูปที่ 4 บล็อคไดอะแกรมของระบบ Mechanical Tracking

ด้วยมือ และอัตโนมัติ การควบคุมด้วยมือใช้เพื่อปรับมุมแผงโซล่าร์เซลล์ก่อนเริ่มการทำงานแบบอัตโนมัติ ช่วยลดค่ากำลังงานในการหาตำแหน่งเริ่มต้นซึ่งอาจมีค่ามากถ้าตำแหน่งและมุมของแผงตรงกันข้ามกับตำแหน่งของดวงอาทิตย์ สำหรับการทำงานแบบอัตโนมัติเริ่มต้นจากวงจรตรวจจับตำแหน่งดวงอาทิตย์ในรูปที่ 5 โดยอาศัยหลักการบังเงาเปรียบเทียบความต้านทานของ LDR (Light decrease resistor)หรืออุปกรณ์ที่ค่าความต้านทานลดลงเมื่อได้รับความเข้มแสงมากขึ้น โดยตำแหน่งที่ติดตั้งชุดตรวจจับแสง มีทั้งหมด 4 จุดที่ขอบแผงแต่ละด้านแยกกัน 4 ชุด ทั้ง LDR และวงจรเพื่อให้ได้ค่าที่แม่นยำที่สุดสั่งให้โปรแกรมไมโครคอน โทรลเลอร์ประมวลผลตามโปรแกรม เพื่อส่งสัญญาณควบคุมไปที่ชุดขับมอเตอร์เพื่อปรับมุม และหมุนแผงอีกทั้งจะหยุดนิ่งรอเมื่ออยู่ในสถานะที่ความเข้มแสงเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใด เช่น มีเมฆมาบังดวงอาทิตย์ ชั่วระยะหนึ่งแผงก็จะไม่หมุนหาตำแหน่ง จะรอจนกว่าปริมาณแสงเข้าสู่สภาวะปกติโดยอาศัยการเปรียบเทียบจากลอจิกของชุดตรวจจับความเข้มแสงทั้ง 4 ชุดทำให้มีคำสั่งที่แตกต่างกันได้ 16 กรณีจึงไม่เสียพลังงานในการหมุนหาตำแหน่งโดยไม่จำเป็น

รายละเอียดเกี่ยวกับพิกัดต่างๆมอเตอร์ และความเร็วของแต่ละแกนแสดงไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 รายละเอียดพิกัดต่างๆ

รายละเอียด	การปรับมุม	การหมุนรอบ
แรงดันไฟเลี้ยง (V)	12	12
กำลัง (w)	60	120
ความเร็วมอเตอร์ (rev/m)	600	200
ความเร็วการเปลี่ยนมุม/การหมุน	55 cm/m	1.3 rev/m



รูปที่ 5 วงจรของชุดตรวจความเข้มแสง

จากวงจรตามรูปที่ 5 LDR ที่ขอบแผงใดได้รับแสงที่มีค่าความเข้มแสงเปลี่ยนไปก็ทำให้ ออป-แอมป์ส่งแรงดันทริกทรานซิสเตอร์ที่ควบคุมรีเลย์ เมื่อขดลวดรีเลย์ได้รับแรงดันก็จะเปลี่ยนหน้าสัมผัสส่งลอจิกให้ไมโครคอนโทรลเลอร์นำไปประมวลผลต่อไป และจะหยุดรอในเงื่อนไขที่เป็นไปไม่ได้ในทางปฏิบัติซึ่งได้โปรแกรมไว้ล่วงหน้าแล้ว จากนั้นจึงส่งสัญญาณควบคุมไปที่บัฟเฟอร์ไอซีเพื่อขยายกำลังของสัญญาณควบคุมและเป็นอินเตอร์เฟสระหว่างวงจรขับมอเตอร์กับไมโครคอนโทรลเลอร์ วงจรขับมอเตอร์ที่หมุนกลับทางได้โดยป้อนแรงดันทริกที่ แยกกันในแต่ละแกนดังนั้นเอาต์พุตของไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ต้องการน้อยที่สุดจึงเป็น 4 เอาต์พุต

การคำนวณค่าพลังงานสูญเสียในการขับมอเตอร์แสดงไว้ในสมการที่(3) [3],[6]

$$E_{loss}=\frac{V_{Batt}}{3600}\left[I_1\cdot\frac{t_1}{2}+I_{2u}\cdot t_{2u}+I_{2d}\cdot t_{2d}+I_s\cdot t_s\right] \qquad (3)$$

เมื่อ

E_{loss} = ค่าพลังงานสูญเสียต่ำสุด (วัตต์-ชั่วโมง)

V_{batt} = แรงดันแบตเตอรี่ที่จ่ายให้มอเตอร์ (โวลต์).

$\frac{t_1}{2}$ = เวลาน้อยที่สุดที่ใช้หมุน ต่อวัน(วินาที)

I_1 = กระแสที่ใช้ในการหมุนแผง(แอมป์)

I_{2u} = กระแสที่ใช้ปรับมุมขึ้น(แอมป์)

I_{2d} = กระแสที่ใช้ปรับมุมลง(แอมป์)

I_s = กระแสที่จ่ายให้วงจรควบคุม(แอมป์)

t_1 = เวลาที่ใช้ในการหมุนแผง(วินาที)

t_{2u} = เวลาที่ใช้ในการปรับมุมแผงขึ้น(วินาที)

t_{2d} = เวลาที่ใช้ในการปรับมุมแผงลง(วินาที)

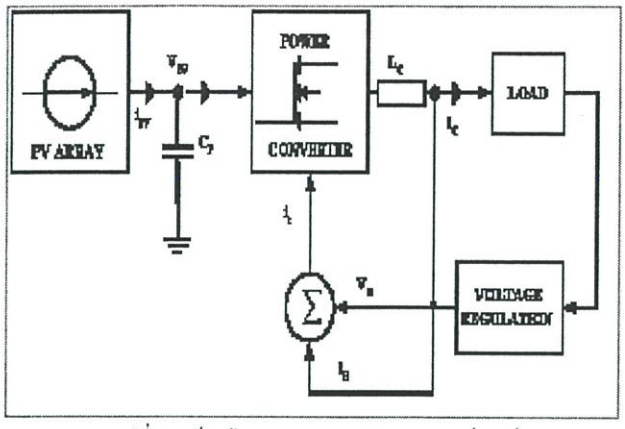
t_s = เวลาการทำงานของวงจรควบคุม(วินาที)

3.2 MPPT คอนเวอร์เตอร์

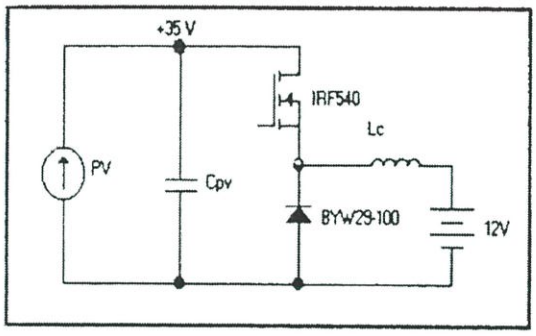
องค์ประกอบหลักของ MPPT คอนเวอร์เตอร์ตามบล็อคไดอะแกรมในรูปที่ 6 และวงจรรูปที่ 7 ทำงานโดยการป้อนพัลส์ทริกที่ Power converter Mosfet เพื่อตัดต่อพัลส์แรงดันสู่โหลด และชาร์จพลังงานที่อินดัคเตอร์(L_c) ส่วนพลังงานจากแผงพีวีในช่วงเทรินออฟของอุปกรณ์ Power Mosfet จะชาร์จพลังงานไว้ที่คาปาซิเตอร์ (C_p) เพื่อสะสมพลังงานไว้ช่วยจ่ายให้โหลด ในการเทรินออนในครั้งต่อไป สำหรับการปรับดิวตี้ไซเคิลเพื่อควบคุมอัตราส่วนแรงดันระหว่างแรงดันที่แผงพีวี และโหลดทำได้โดยการใช้ กระแสกับแรงดันที่โหลดมากำหนดขนาดดิวตี้ไซเคิลพัลส์ของสัญญาณ ทริก

การกำหนดความถี่ของคอนเวอร์เตอร์ ต้องคำนึงถึงทั้งประสิทธิภาพ และเสถียรภาพของระบบ ค่าความถี่ที่สูงขึ้นช่วยให้การรักษาระดับแรงดันของแผงดีขึ้น และอินดัคเตอร์มีขนาดเล็กลงแต่ค่าความถี่ของคอนเวอร์เตอร์ที่สูงมากๆเกินความจำเป็น มีผลเสียต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ทำให้พัลส์ของสัญญาณทริกที่ได้ผิดเพี้ยนไปจน

Power Mosfet เสียหายได้ ดังนั้นการพิจารณาถึงความถี่ที่สูงพอเหมาะจึงมีความ



รูปที่ 6 บล็อคไดอะแกรม MPPT คอนเวอร์เตอร์



รูปที่ 7 วงจร MPPT

สำคัญต่อเสถียรภาพรวมของระบบพีวี จากการทดสอบหาประสิทธิภาพของคอนเวอร์เตอร์ที่มี L_c เป็นอินดัคแตนซ์สะสมพลังงาน และ BYW29-100 เป็นฟรีวีลลิ่งไดโอด [1] ตามรูปที่ 7

ส่วนสมการของค่ากระแสเฉลี่ยที่โหลดเขียนได้ตามสมการที่ (3) [8]

$$I_L = \frac{1}{T}\int_0^T i_L dt = i_L(T_{ON}) - \frac{V_0 T_{OFF}}{2L_C} \qquad (3)$$

เมื่อ

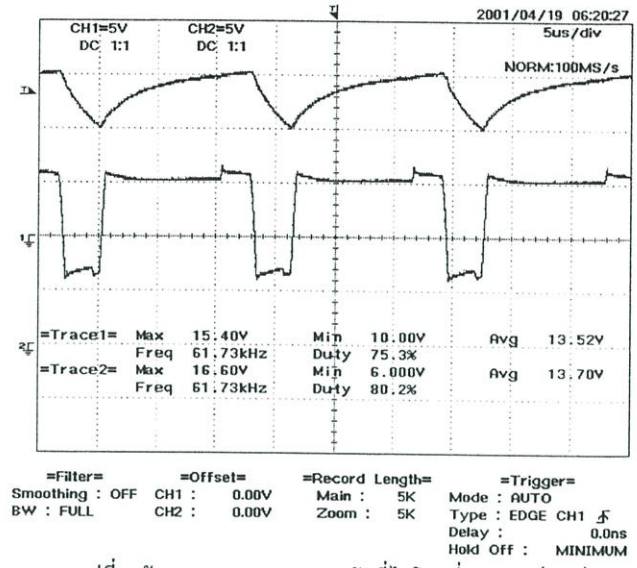
I_L : กระแสเฉลี่ยที่โหลด ; T : คาบเวลา

i_L : กระแสที่โหลดในขณะใดๆ ; $i_L(T_{ON})$: กระแสสูงสุดที่ T_{ON}

V_O : แรงดันที่เอาท์พุต ; T_{OFF} : เวลาช่วงเทรินออฟของ Mosfet

L_C : ค่าอินดัคแตนซ์

เมื่อทำการทดสอบเพื่อวัดสัญญาณได้ป้อนแรงดันที่อินพุตเป็น 16 โวลต์ วัดค่ากระแสอินพุทได้ 0.875 แอมป์ สามารถวัดค่ากระแสเอาท์พุทโดยการใช้ความต้านทานที่มีค่าวัดได้ 16.7 โอห์ม(รวมความต้านภายใน L_C) ซึ่งเป็นค่าความต้านทานที่เหมาะสมกับกำลังที่จ่ายมาจากอินพุทและสามารถแสดงสัญญาณกระแสได้ชัดเจน ต่ออนุกรมกับ L_C แล้ววัดค่าแรงดันที่ความต้านทาน เพื่อหาประสิทธิภาพของคอนเวอร์เตอร์ ในรูปที่ 8 ค่าแรงดันเฉลี่ยที่ความต้านทาน 16.7 โอห์มเท่ากับ



รูปที่ 8 สัญญาณกระแส และแรงดันที่ไดโอดที่คอนเวอร์เตอร์

13.52 โวลต์ พิจารณาจากรูปที่ 8 Trace1 ดังนั้นค่ากระแสเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 0.81 แอมป์ จากข้อมูลทั้งหมดสามารถนำมาคำนวณเพื่อหาประสิทธิภาพของคอนเวอร์เตอร์ได้ตามสมการที่ (4)

$$\eta_{pvc} = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\,\% \qquad (4)$$

$$\eta_{pvc} = \frac{0.81 \times 13.52}{0.875 \times 16} \times 100\,\% = 78.22\,\%$$

ตารางที่ 2 แสดงค่าประสิทธิภาพของแผงที่ดิวตี้ไซเคิลต่างๆ

ดิวตี้ไซเคิล	กำลังอินพุท	กำลังเอาท์พุท	ประสิทธิภาพ
ต่ำสุด 11.70%	5.5	4.5	82.12%
35%	9.0	7.5	83.33%
50%	11.5	8.75	76.09%
65%	12.2	9.01	73.89%
80%	14.0	11.0	78.57%
สูงสุด 95%	18.0	15.5	86.11%

จากตารางที่ 2 ค่าประสิทธิภาพของคอนเวอร์เตอร์อยู่ระหว่าง 74~86% และประสิทธิภาพเฉลี่ยเท่ากับ 80.12%

2. การทดลองระบบ และวิเคราะห์ผลการทดลอง

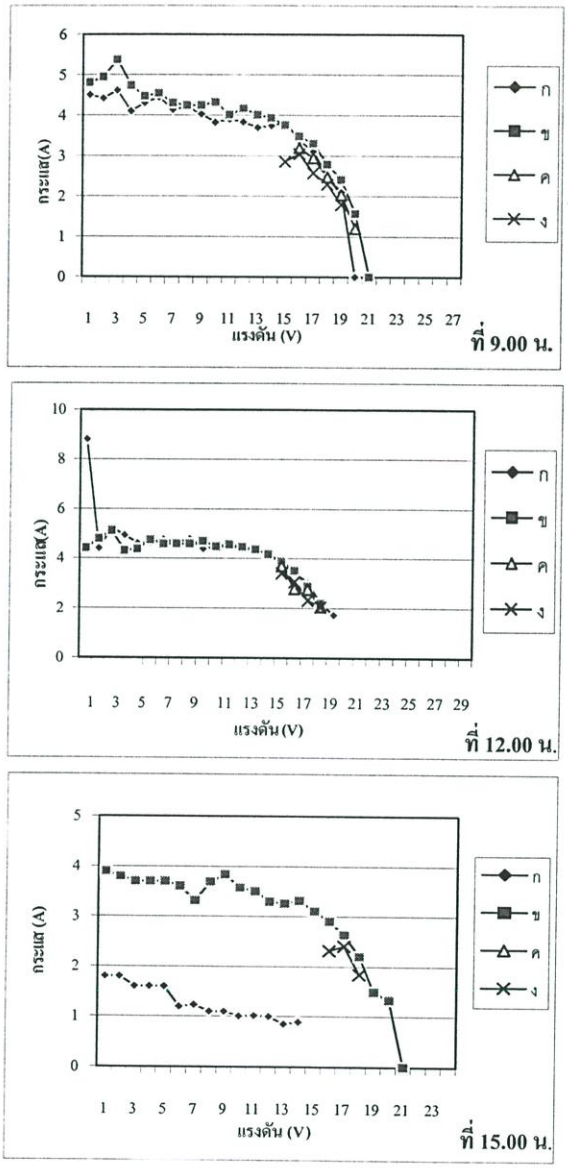
แผงในการทดสอบนี้เป็นแผงรุ่น US-64 ที่มีกำลังสูงสุด 64 วัตต์ แรงดันไฟฟ้าเมื่อเปิดวงจร 23.8 โวลต์ กระแสไฟฟ้าเมื่อลัดวงจร 4.8 แอมป์ การทดสอบเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพเปรียบเทียบกัน 4 ระบบ คือ ระบบที่แผงทำมุมคงที่กับ MPPT คอนเวอร์เตอร์

ก : ระบบที่แผงทำมุมคงที่

ข : ระบบปรับมุมแผงอัตโนมัติ

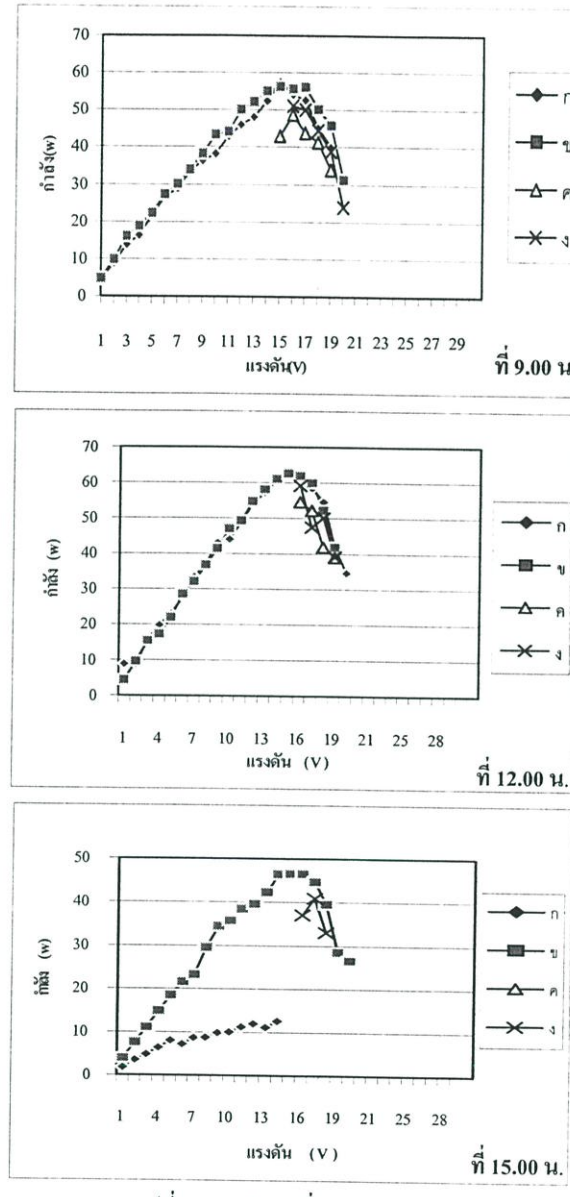
ค : ระบบที่แผงทำมุมคงที่กับ MPPT คอนเวอร์เตอร์

ง : ระบบปรับมุมแผงอัตโนมัติกับ MPPT คอนเวอร์เตอร์



รูปที่ 9 กราฟ V-I ที่เวลา 9.00น, 12.00น. และ 15.00น.ตามลำดับ

ผลการทดสอบโดยทดสอบระบบพีวีที่ต่อกับภาระความต้านทานเพื่อหาความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดัน โดยเปลี่ยนค่าความต้านทานจากน้อยไปมาก ที่เวลา 9.00น., 12.00น. และ 15.00น. แสดงไว้ในรูปที่ 9 เมื่อพิจารณาช่วงเวลาเริ่มต้นคือ เวลา 9.00น.-12.00น. ระบบ ก และ ข มีกราฟใกล้เคียงกัน เช่นเดียวกับ ระบบที่มี MPPT คอนเวอร์เตอร์ ค และ ง แต่เมื่อเวลาผ่านไปที่ 15.00น. แผงแบบหยุดนิ่งมีค่ากระแสและแรงดันที่แผงน้อยมาก เมื่อเทียบกับ ระบบแผงที่ปรับมุม และทิศทางตามแสงได้ เมื่อใช้งานระบบ ก ร่วมกับคอนเวอร์เตอร์ค่าพลังงานของแผงไม่สามารถกระตุ้นให้การตัดต่อวงจรคอนเวอร์เตอร์ได้ จึงไม่สามารถวัดค่ากระแสและแรงดันเพื่อนำมาแสดงผลในกราฟได้

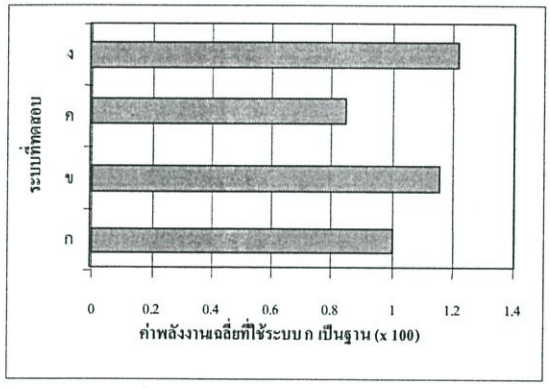


รูปที่ 10 กราฟ V-P ที่เวลา 9.00น, 12.00น. และ 15.00น.ตามลำดับ

จากนั้นนำค่ากระแส และแรงดันที่นำเสนอเปรียบเทียบ 3 ช่วงเวลาคือ 9.00 น, 12.00 น. และ 15.00 น. ภายในวันเดียวกันจากกราฟรูปที่ 10 มาวิเคราะห์ค่าพลังงานที่แผงสามารถจ่ายได้เมื่อโหลดมีค่าเปลี่ยนแปลงไป จากกราฟรูปที่ 10 แสดงว่า ในช่วงเวลา 9.00น. และ 12.00น. ค่ากำลังไฟฟ้ามีค่าใกล้เคียงกันทั้งระบบแผงแบบหยุดนิ่ง และแบบปรับมุมอัตโนมัติ แต่ช่วงเวลา 15.00น. ค่าพลังงานที่ได้จากระบบแผงแบบปรับมุมได้ สามารถรับแสงได้เต็มที่ ในขณะที่แผงที่ทำมุมคงที่สามารถจ่ายพลังงานได้น้อยมาก พิจารณาที่จุดสูงสุดของกราฟแต่ละระบบจะเป็นจุดที่เป็นการทำงานที่เหมาะที่สุด ได้พลังงานมากที่สุดของ

ระบบที่เวลานั้นดังนั้นไม่ว่าระบบใดก็ตามหากสามารถรักษาจุดที่ทำงานให้ใกล้เคียงกับจุดเหมาะสมดังกล่าวย่อมช่วยแปลงพลังงานได้เต็มที่ตามขนาดพิกัดเท่าที่เป็นไปได้ ซึ่งสามารถพิจารณาการรักษาตำแหน่งดังกล่าวได้จากเส้นกราฟ ค และ ง ในรูปที่ 10

ตามข้อมูลที่ได้จากราฟรูปที่ 10 นั้นเมื่อนำค่าพลังงานจากแผงโซลาร์เซลล์ของทั้งสามเวลา จากระบบทั้งสี่มารวมกันเพื่อหาค่าเฉลี่ยแล้วนำมาชดเชยค่าพลังงานสูญเสียจากการขับมอเตอร์ สำหรับระบบที่แผงปรับมุม และทิศทางอัตโนมัติ (ระบบ ข และ ง) ได้จากสมการที่ (3) กับนำมาคิดค่าพลังงานสูญเสียจากคอนเวอร์เตอร์โดยคิดค่าประสิทธิภาพของคอนเวอร์เตอร์ที่ 80% ตามค่าประสิทธิภาพเฉลี่ยจากตารางที่ 2 (ระบบ ค และ ง) แล้วนำมาเปรียบเทียบค่าพลังงานเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้น เมื่อใช้ค่าพลังงานที่ได้จากระบบแผงอยู่กับที่(ระบบ ก) เป็นค่าฐาน แสดงไว้ในรูปที่ 11 จากกราฟระบบ ค. มีค่ากำลังเฉลี่ยน้อยกว่าระบบแผงอยู่กับที่ (ก) เนื่องจากมีพลังงานไม่พอที่จะกระตุ้นการทำงานของคอนเวอร์เตอร์



รูปที่ 11 กราฟเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้า

5. สรุป

การใช้วงจร MPPT คอนเวอร์เตอร์ร่วมกับการเคลื่อนหมุนแผงพีวีทางกลช่วยในการควบคุมการแปลงกระแส-แรงดันของโซลาร์เซลล์นั้นทำให้ปริมาณพลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์มากขึ้นในระยะเวลาทำงานและขนาดพิกัดต่างๆแผงเท่าเดิม เมื่อนำมาคิดเป็นพลังงานต่อหน่วยแล้วจึงมีราคาต่ำลง แต่ปัจจัยที่ควรนำมาพิจารณาประกอบในการเลือกติดตั้งระบบพีวีต้องคำนึงถึงองค์ประกอบอื่นๆ เช่น ราคาการลงทุนที่สูงขึ้น, การบำรุงรักษาทั้งทางกลและทางอิเล็กทรอนิกส์กำลังและสถานที่สำหรับการใช้ PV เป็นระบบผลิตไฟฟ้าที่มีขนาดใหญ่ในอนาคตของประเทศไทย การทดสอบเพื่อหาข้อมูลทางสถิติของค่ากำลังไฟฟ้าของโซลาร์เซลล์ในระบบต่างๆที่ได้นำเสนอในงานวิจัยนี้นั้น เป็นข้อมูลที่มีความสำคัญอย่างยิ่งสำหรับข้อมูลการตัดสินใจลงทุน

6. เอกสารอ้างอิง

[1] J.H.R. Enslin, D.B. Snyman "Combined Low Cost, High Efficient Inverter, Peak Power Tracker and Regulator for PV Application", *IEEE Transaction on Power Electronics*, Vol.6, No.1, 1 January 1991

[2] SMM Wolf, JHR Enslin , Department of Electrical and Electronics Engineering University of Stellenbosh, Stellenbosh South Afarica, "Economic PV Maximum Power Point Tracking Regulator with Simplistic Controller, *IEEE Conferrence 1993*

[3] S. Suriyakanont, S. Potivejkul Department of Electrical Engineering, KMITL "Comparison of Maximum Power Transfer between Sunlight Solar Tracking and MPPT Converter" *IPEC'2001*, Nanyang University, Singapore, 15-17 May 2001.

[4] Sansak Deon, Siriwat Potivejkul, "Optimum PV panels setting analysis using numerical method technique", Department of Electrical Engineering, KMITL, *Electrical Engineering Conference 2543*, Agricultue University

[5] กฤดา เชาว์วัฒนาพานิช, กิตติพงษ์ เชียงทอง, กิตติฤทธิ์ จ่างจิต, เกรียงศักดิ์ บันดาลศิริกุล, "เซลล์แสงอาทิตย์ระบบเคลื่อนที่เปลี่ยนตำแหน่งตามดวงอาทิตย์โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์" ปริญญานิพนธ์ ปีการศึกษา 2543 ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล.

[6] จุติเลิศ สกุลศักดิ์ม พีรสิทธิ์ ลิขิตคุษฎีม สรรเพชญ พนัสเจริญม "เซลล์แสงอาทิตย์เคลื่อนที่เปลี่ยนตำแหน่งตามดวงอาทิตย์ ปริญญานิพนธ์ ปีการศึกษา 2542 ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล.

[7] Chihchiang Hua; Chihming Shen "Control of DC/DC converters for solar energy system with maximum power tracking", *IECON 97 23rd International Conference*

[8] France Lasnier and Tony Gan Ang, Photovoltaic Engineering Handbook Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand

ประวัติผู้เขียน

นายสุริยา สุริยกานนท์ จบการศึกษา วศ.บ.ไฟฟ้า จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปัจจุบันกำลังศึกษาต่อในระดับปริญญาโทที่สถาบันเดียวกัน โดยสนใจงานวิจัยเกี่ยวกับพลังงานแสงอาทิตย์, อิเล็กทรอนิกส์กำลัง

ถนอมชัย เบ็ญจสมิตโยธิน จบการศึกษา วศ.บ. ไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานครปัจจุบันกำลังศึกษาต่อในระดับปริญญาโท ที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยสนใจงานวิจัยเกี่ยวกับ พลังงานแสงอาทิตย์, Power Quality

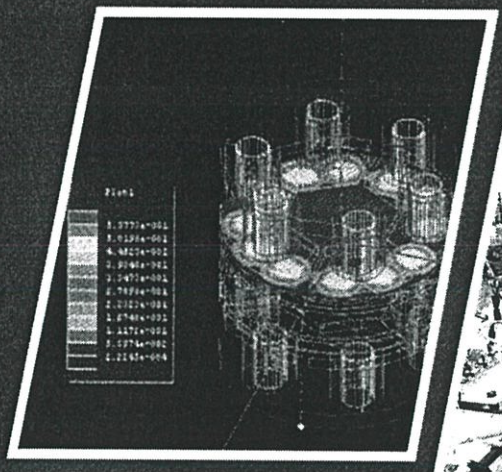
นายศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล จบการศึกษา วศ.บ.ไฟฟ้า และวศ.ม.ไฟฟ้าจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปัจจุบันดำรงตำแหน่งเป็นรองศาสตราจารย์ ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยทำงานวิจัยในด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง, การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง, การวิเคราะห์ฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลัง, และคุณภาพของกำลังไฟฟ้า.

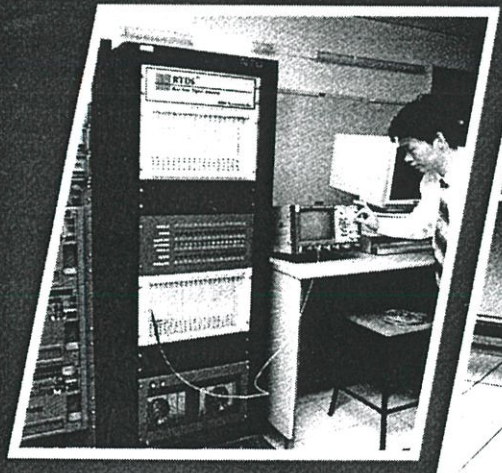
IPEC 2001

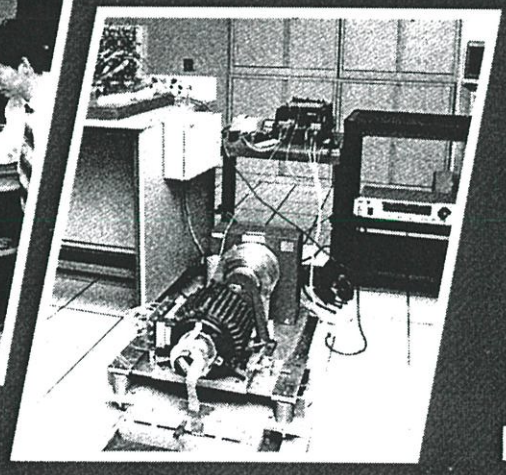
The Fifth International Power Engineering Conference

17-19 May 2001

Grand Copthorne Waterfront, Singapore







Proceedings Volume 1

NTU

Singapore Centre

SINGAPORE POWER

IES

NUS

IEEE Networking the World

PES

The Fifth International Power Engineering Conference (IPEC 2001)
17-19 May 2001, Singapore

Comparison of Maximum Power Transfer from PV System Between Sunlight Solar Tracking and MPPT Converter

Siriwat Potivejkul **Suriya Suriyakanont**
Electrical Engineering Department Faculty of Engineering Kingmongkute's Institute of Technology Ladkrabang
Chalongkrung Rd. Ladkrabang Bangkok 10520 Thailand Tel/Fax:3269902 E-mail : s2061083@kmitl.ac.th

Abstract

This paper presents the concept of power storage from solar panel by comparing two systems for power storage rate between the sunlight solar tracking and MPPT (Maximum Power Point Tracking) converter. The sunlight solar tracking moves to find the position to set the sun square with 2 axes independently and the energy is hardly wasted. The sensor device uses LDR (Light Decrease Resistor). For the MPPT converter system, it comprises a feedback control to check the appropriate open circuit voltages. The MPPT converter is connected to a fixed tilt angle solar panel at 15 degree. Note that the panel front will be changed to the north or the south, depending on the season. This fixed tilt angle is appropriate for Thailand latitude and longitude. When comparing two systems, the results indicate that the charged power to battery from the solar tracking system is higher than the MPPT converter system about 8~13%. The percentage increased power is not included the losses both a mechanical drive and a wrong direction rotation, which depend on the sunlight irradistion in each day.

Keywords

Solar energy, solar tracking, and MPPT converter.

1 INTRODUCTION

Maximum power transfer from photovoltaic (PV) cells depends on a V-I characteristic, which will be changed when environment conditions are changed. General battery characteristics comprise a charged and a discharged rated voltage that has a limited value in each battery type. MPPT converter can supply the optimum charged voltages for battery by resetting duty cycle, when PV open circuit voltage is changed. This strategy can increase power storage than directly charge through the cut-off battery charger. The charged power amounts depend on MPPT converter efficiency, duty cycle and input/output voltages ratio [1]. Two panels of the BP solar panel model HP1255 55w were chosen to connect in series. This can generate the open circuit voltages of 25V~35 V to charge through the MPPT converter. If the MPPT converter has 80% efficiency, the power storage of about 8~10% will be added in the non-uniform sunlight irradiation conditions [2]. The sunlight solar tracking system can transfer charged power to a battery higher than 15~20%, because excited currents from sunlight are higher at the same battery charged voltage. So the comparison of two systems found the tracking system could obtain the higher power storage, but it has to distribute some power to drive the mechanical model. The sunlight solar tracking can increase both the operation time and power transfer [3], because its electronics circuit can operate before the MPPT converter system during the both early morning and late evening.

2 BASIC CONCEPT

Solar cells characteristics are important to the MPPT converter system and the tracking system. The first solar cells concept is a V-I relation equivalent circuit.

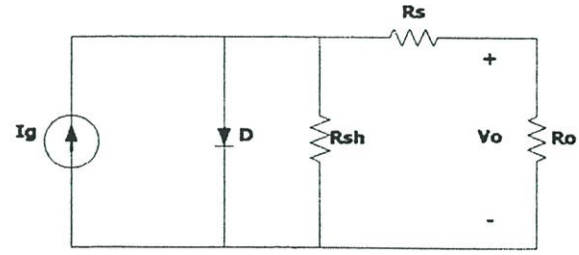


Figure 1: An equivalent circuit.

Solar cells I-V characteristic when neglecting the internal shunt resistor can be written in Equation (1)[4].

$$I_o = I_q - I_{sat}\{\exp[\frac{q}{AKT}(V_o + I_o R_s)] - 1\} \quad (1)$$

Where

I_q : generated current when received excitation light;
I_{sat} : saturated current ; K : Boltzman constant;
T : temp in K degrees; R_s : shunt resistance;
q : electron charge; A : dimension factor;
V_o : output voltage; I_o : output current;

From Equation (1) the V-I characteristic can be written as Equation (2).

$$V_o = -I_o R_s + \frac{AKT}{q}\ln[\frac{I_q - I_o + I_{sat}}{I_{sat}}] \quad (2)$$

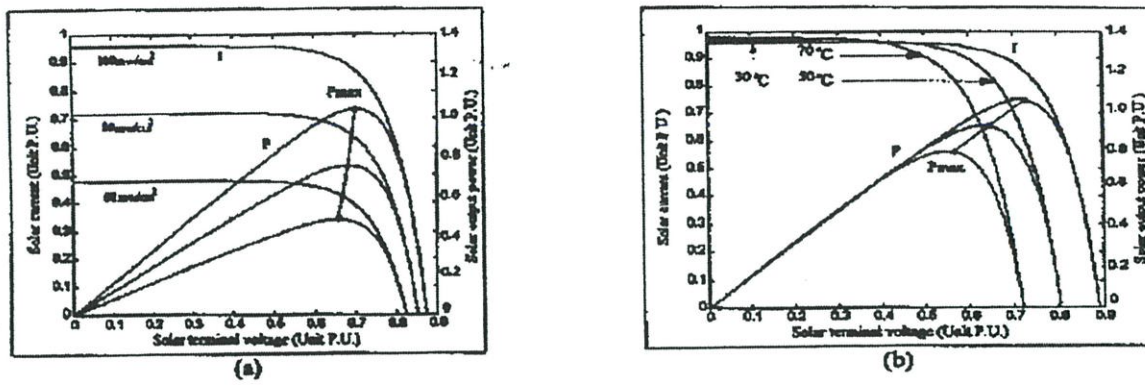


Figure 2 : General characteristics.
a) When light irradiation was changed. b) When cells temperature was changed.

V-I-P relation curves have been plotted from Equations (1) and (2), shown in Figures 2 a) and b). These figures show the non-linear power source behavior and the output power will be changed when light irradiation, temperature and load conditions parameters were changed. At the peak in each curve is the ideal operating point of the MPPT converter system, because its operating voltage will be tracked to the appropriate point to keep the panel voltage near the maximum power voltage by a close-loop circuit. The upper points in each curve that are on Pmax straight line in Figures 2 a) and b) can get by the solar tracking system, because the PV panel will track to the appropriate tilted angle.

3 POWER CONVERSION

3.1 Solar tracking system

The movement directions of the 2-axis solar tracking system are shown in Figure 3. Each axis has separate permanent magnet DC motor drive. Two units of the BP solar panel model Hp1255 55w rated 2 units were chosen in series connection. The total weight is 11.8kg. This model was based on difference reduction gear ratio to reduce motor torque. This design is advantage for motor size selection. The motor and model specifications are shown in the Table 1 [5].

Table 1: Model specifications

Model specification	Up/Down Axis	Left/Right Axis
DC voltage supply (V)	12	12
Output power (w)	60	120
Motor speed (rev/m)	600	200
Model speed average	55 cm/m	1.3 rev/m

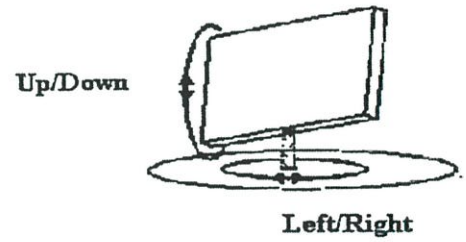


Figure 3 : Panel movement path

The panel in Figure 3 is 981x900 mm^2 in the panel dimension. Figure 4 and Figure 5 show the light sensors position and LDR (Light decrease resistor circuit. The comparison between two LDRs signal in each sensor circuit, which was separately attached in the lighting position and the shading position, will be sent to execute the PIC16F84 controller. After the sun moved, a LDR in the shading position would increase its resistance, then the resistance will be higher than the resistance from the lighting position [6].

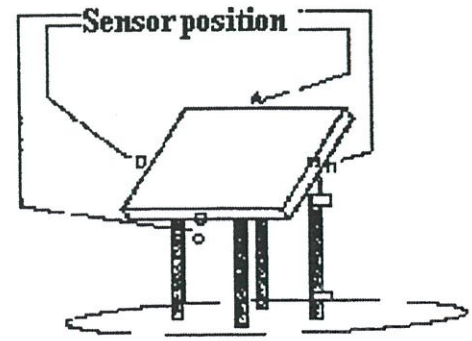


Figure 4 : Sensors position.

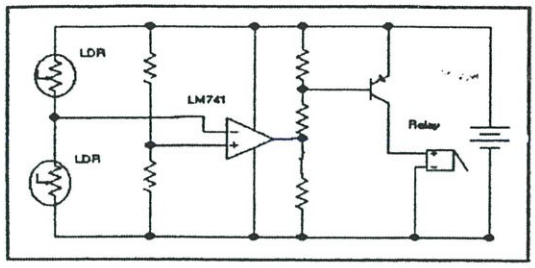


Figure 5 : LDR sensor circuit.

Though two and three commands from sensor circuits can send to compare in the PIC16F84 program, two signals of A and C or B and D cannot execute the command in the same time. These cases are not real in the sun movement path. If they happen, the controller will stop and wait the next commands from sensor circuits. The meaning of four signals from all A, B, C, D sensors is cloudy weather or sunlight not enough to execute LDRs. The tracking panel will stop and wait the next stage too.

3.2 The MPPT converter system

Figure 6 and Figure 7 have shown the MPPT converter. The main devices are MOSFET IRF540 and diode BYW29-100, which is a free wheeling diode. The 60 kHz chopped frequency is useful to the inductor size and the PV panel voltages. The appropriate frequency is required to keep the PV panel voltages near the optimum voltages, so if the chopped frequency is too low the voltages and charged power will be lower than the designed value. The frequency higher than 60 kHz is desired, but the system stability has to be taken into consideration.

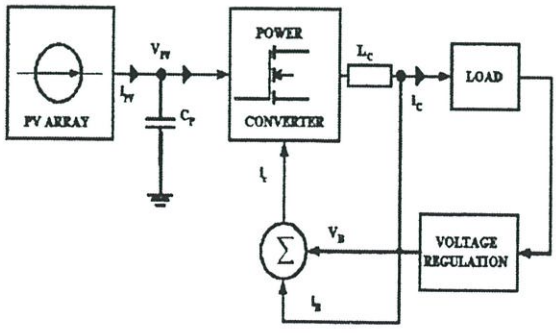


Figure 6 : MPPT diagram.

When the chopped frequency reaches 150 kHz, the MPPT converter will transfer a higher charged power, but the MPPT circuit and its accessories do not have stability enough due to device limitation. When the system shut down the charged power will be interrupted in a long period. It does not cover the cost of repair and the loss power, which interrupt during the shut down period. For the above reasons, the 60 kHz chopped frequency was chosen for the MPPT system.

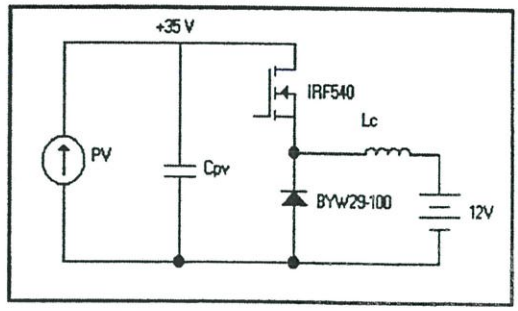


Figure 7 : MPPT circuit.

The MPPT converter has the open circuit self check voltage circuit that has an execution time of 30s/cycle. The PV simultaneous optimum voltages will be detected from this circuit. Load current and diode voltage are shown in Figure 7. The Load current is the MPPT converter current, which is equal to 1.85A in average at 13.5V charged voltage. The input current from the PV panel is approximately 1.43A at 22V PV voltage. The converter efficiency can be calculated from these input and output.

$$\eta_{pvc} = \frac{P_{out}}{P_{in}}$$

$$\eta_{Pvc} = \frac{1.85 \times 13.5}{1.43 \times 22} = 79.39\%$$

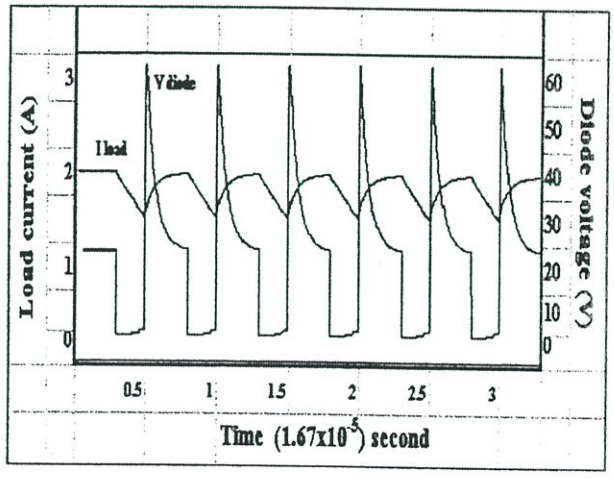


Figure 8 : Load current and diode voltage.

4 EFFICIENCY CONSIDERATION

The system loss and hence the power storage to a battery in each case will be considered. The power from three systems which include the solar tracking system, the MPPT converter and the fixed tilt angle PV panel with a simple charger connected is compared.

4.1 Solar tracking system

The motor drive and power supply currents are parameters for tracking power and energy. The current in each axis will be measured from driving test.

where;

I_1 = Left/right direction movement motor current. (A)

I_{2u} =Up direction movement motor current.(A)

I_{2d} = Down direction movement motor current.(A)

I_s = Supply current to tracking control circuit. (A)

t_1 = Left/right direction movement time. (h) (1 turn/day)

t_{2u} = Up direction movement time from 0~75 degrees. (h)

t_{2d} = Down direction movement time from 75~0 degrees. (h)

t_s = Control circuit operation time. (h)

In one day the solar tracking system has the minimum loss equals to Equation

$$E_{loss}=\frac{V_{Batt}}{3600}\left[I_1\cdot\frac{t_1}{2}+I_{2u}\cdot t_{2u}+I_{2d}\cdot t_{2d}+I_s\cdot t_s\right] \quad (3)$$

where E_{loss} = Minimum energy loss in watt-hour unit.

V_{batt} = Battery voltage (V).

$\frac{t_1}{2}$ = Minimum left/right direction movement time ½ turn/day.

$$\%\eta_{Tracking}=\frac{E_{max}-E_{loss}}{E_{max}}\times 100 \quad (4)$$

where; $\%\eta_{Tracking}$ = Solar tracking system maximum efficiency.

E_{max} = Maximum energy. (wh)

4.2 MPPT converter system

The efficiency of this system will be considered.

Let;

E_{out} = Charged energy to battery. (wh)

E_{in} = Input energy from PV panel. (wh)

$$\eta_{pvc}=\frac{E_{out}}{E_{in}} \quad (5)$$

The tested MPPT converter has average efficiency between 75~80%. The efficiency depends on the converter duty cycle, which changes when light and environment parameters are changed.

5 COMPARISON RESULTS

5.1 Testing and results

The solar tracking transferred energy will be subtracted from the total E_{loss} before comparing to other systems. The driving energy can be calculated by testing and measurement using the driven power parameters in Equation (3), and whose values are written below.

$I_1 = 2.5$ A $\quad t_1 = 45$ s

$I_{2u} = 5$ A $\quad t_{2u} = 90$ s

$I_{2d} = 2.5$ A $\quad t_{2d} = 75$ s The solar

$I_s = 2$ mA $\quad t_s = 9$ hour

$$E_{loss}=\frac{12}{3600}\left[2.5\times\frac{45}{2}+5\times 90+2.5\times 75+0.002\times 9\times 3600\right]$$

$E_{loss} = 2.52$ wh

In the actual test, the loss way movement has to be found and the measured loss in each test is approximate 5 times the minimum loss. So the total P_{loss} can be calculated approximately as follows.

$E_{loss}(total) = 2.52\times 5 = 12.60$ wh

However the MPPT converter power will be measured from the average output converter current and the battery voltage during the charge stage. This output power was compensated for the loss in the converter and can be compared with others. Another transfer power system that needs to be considered is the fixed tilt angle PV system which connects to the battery charger. This charger has the cut off relay contact when the current and voltage is higher than the safety charge point. The appropriated PV panel angles for the Thailand latitude and longitude is 15 degrees in horizontal and facing to the south and the north in January-March, October-December and in April-September respectively [7].

5.2 Analysis

The comparison results of these systems are shown in Table 2.

Table 2: Comparison results.

System	Energy (watt –hour)		
	a	*b*	*c*
15 degree fixed tilt angle	254.32	295.83	262.64
Sunlight solar tracking	292.47	344.55	302.91
Increased power	38.15	48.72	40.27
MPPT converter	279.67	328.12	289.55
Increased power	25.35	32.29	26.91

where
a= The 1st comparison was tested on March 22,2000.
b= The 2nd comparison was tested on March 29, 2000.
c= The 3rd comparison was tested on April 02, 2000.

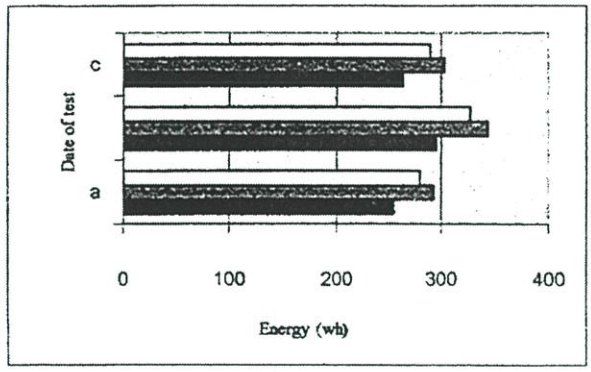


Figure 9 : Energy comparison graph

Figure 7 has shown the comparison power. The power from the solar tracking system is the highest but both of the tracking and the MPPT converter systems are higher than the fixed tilt angle PV panel. The little power in the tracking system is more than the MPPT converter. The other factors such as the cells temperature, wind, season, all days light etc have to be considered and controled to obtain the best comparison test results. The average higher power storage in each system is 15.0% in the tracking system and 9.5% in the converter system.

6 CONCLUSION

The result analysis has shown that the sunlight solar tracking system can generate the PV current and has the operation time higher than that other of systems. It means a higher charged power, but it has to spend some power to drive the mechanical model and the costs of the model driven units are high. However, the MPPT converter does not need to make a special structure. The most cost is the converter and its control. The power transfer of this system is higher than a fixed tilt angle PV system, but it can not use in general case of open circuit voltages, which will change, if changing PV panel type.

The other strong point of sunlight solar tracking system is the maximum operation rate, which does not depend on the rated PV panel that will be developed at the same weight. From this reason the solar tracking old model which has used at PV rate nowadays can generate the higher power if new products of PV panel are developed. The limit of MPPT converter is the operation rate, because it can not use in general. The input/output converter voltage specifies the rated MPPT converter. So it is suitable for a limited area, but the sunlight solar tracking is appropriate with the open area or on site area with the lightweight PV panel to reduce the driving load of the tracking model.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to express their sincere thanks to Dr. Vijitr Kinnares for his valuable comments.

REFERENCES

[1] J.H.R. Enslin, D.B. Snyman "Combined Low Cost, High Efficient Inverter, Peak Power Tracker and Regulator for PV Application IEEE Transaction on Power Electronics, Vol.6, No.1, 1 January 1991
[2] SMM Wolf, JHR Enslin , Department of Electrical and Electronics Engineering University of Stellenbosh, Stellenbosh South Afarica, "Economic PV Maximum Power Point Tracking Regulator with Simplistic Controller, IEEE Conferrence 1993
[3] S.Rahman Senior Member, and B.D. Kroposki Student Member, "Photovoltaic and Demand site Management Performance Analysis at a University Building", IEEE Transaction on Energy Conversion Vol.8, No.3 September.
[4] France Lasnier and Tony Gan Ang, Photovoltaic Engineering Handbook Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand
[5] J. Sakulsak, P. Likitdussadee, S. Panasjaroen. "Sunlight Solar Tracking", Electrical Engineering Project, Electrical Faculty, Kmitl, Thailand.
[6] Surachart Saesue, Siriwat Potivejkul, "The Sun-Tracking System for Flat Plate Solar Cells, Thailand Electrical Engineering Conference18th, 1995.
[7] Sansak Deon, Siriwat Potivejkul, "Optimum PV panels setting analysis using numerical method technique", Department of Electrical Engineering King Mongkute Institute Technology of Ladkrabang, Thailand, Agriculture University Conference, 1999.

ประวัติผู้เขียน

นายสุริยา สุริยกานนท์ เกิดเมื่อวันที่ 11 เมษายน พ.ศ. 2520 เขตดุสิต จังหวัดกรุงเทพมหานคร

ปี พ.ศ. 2538 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนมัธยมวัดธาตุทอง

ปี พ.ศ. 2542 สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

งานวิจัยที่สนใจ ระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ และเทคโนโลยีทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง

ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์

[1] S. Potivejkul, S. Suriyakanont Department of Electrical Engineering, KMITL "Comparison of Maximum Power Transfer between Sunlight Solar Tracking and MPPT Converter" IPEC'2001, Nanyang University, Singapore, 15-17 May 2001.

[2] สุริยา สุริยกานนท์ ถนอมชัย เบ็ญจสมิตโยธิน และ ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล "การแปลงพลังงานของระบบพีวีโดยใช้ MPPT คอนเวอร์เตอร์ร่วมกับการเคลื่อนหมุนแผงพีวีทางกล", การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 24, 2544, หน้า 471-476.