

การออกแบบวงจรจำลองการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้โฟโตไดโอด

DESIGN OF A SOLAR CELL SIMULATOR USING PHOTO DIODES



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2558

KMITL-2015-EN-M-020-116

การออกแบบวงจรจำลองการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้โฟโตไดโอด

DESIGN OF A SOLAR CELL SIMULATOR USING PHOTO DIODES



วิทยานพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2558

KMITL - 2015 - EN - M - 020 - 116

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DESIGN OF A SOLAR CELL SIMULATOR USING PHOTO DIODES.



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

2015

KMITL – 2015 – EN – M – 020 – 116

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2015



FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LACKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การออกแบบวงจรจำลองการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้โฟโตไดโอด
Thesis Title Design of a Solar Cell Simulator Using Photo Diodes
นักศึกษา นายสาริษฐ์ โสภา
รหัสประจำตัว 53610528
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.วิจิตร กิณเรศ
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2015-EN-M-020-116

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.ชัยยันต์ เจตนาเสน	
ดร.นิรุช จิรสวรรณกุล	
ผศ.ดร.บุญยั้ง ปลั่งกลาง	
ผศ.ดร.วรชาติ สุวรรณงาม	
รศ.ดร.วิจิตร กิณเรศ	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันอังคารที่ 14 กรกฎาคม พ.ศ. 2558 เวลา 13.00-15.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคารเฉลิมพระเกียรติใหม่ ห้อง HM-403

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนักเรียนได้เห็นใบเซอร์ใบนี้แล้ว
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งหากนำไปใช้
วันที่ 14 กรกฎาคม พ.ศ. 2558

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบวงจรจำลองการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์โดย ใช้โฟโตไดโอด
นักศึกษา	นายสาริษฐ์ โสภา
รหัสนักศึกษา	53610528
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2558
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.วิจิตร กิณเรศ

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการออกแบบและสร้างชุดจำลองวงจรเลียนแบบเซลล์แสงอาทิตย์ โดยใช้โฟโตไดโอดเป็นอินพุต ได้มีการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์โดยใช้โปรแกรม Orcad 9.1 ภายใต้เงื่อนไขของสภาพแวดล้อม เช่น ความเข้มแสงและ อุณหภูมิ ซึ่งข้อมูลที่ได้ นำมาสร้างวงจรที่สามารถให้คุณสมบัติที่เหมือนกับเซลล์แสงอาทิตย์จริง และแปรเปลี่ยนตามความเข้มแสงต่างๆ ชุดจำลองได้ถูกออกแบบขึ้นโดยใช้วงจรอนาล็อกเพื่อขยาย แรงดันและกระแส ซึ่งสามารถให้กำลังสูงสุด 50 วัตต์ ผลการทดสอบที่ได้แสดงให้เห็นถึงตัวจำลองที่ ได้ออกแบบ สามารถให้คุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ในสภาวะแวดล้อมต่างๆ เป็นที่น่าพอใจ

Thesis Title	Design of a solar cell simulator using photo diodes.
Student	Mr. Sarit Sopa
Student ID.	53610528
Degree	Master of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2015
Thesis advisor	Assoc. Prof. Dr.Vijit Kinneres

ABSTRACT

This thesis presents design and implementation of a solar cell characteristics simulator using photo diodes as input. Analysis using mathematical model and design of electronic circuit using Orcad 9.1 simulation program under various environment such as the insolation and temperature are given. The obtained results will be data creating electronic circuits which is able to give characteristics similar to realistic solar cells varying with various insolation values. The simulator is designed through analog circuits for voltage and current magnification with maximum power of 50 Watts. The test results show that the designed simulator is able to provide satisfactory electrical characteristics of the solar cell in various conditions of the environment conditions.

กิตติกรรมประกาศ

ผู้จัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร.วิจิตร กิณเรศ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ซึ่งให้คำแนะนำ คำปรึกษา จนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จลุล่วง

ขอกราบขอบพระคุณครู และอาจารย์ทุกท่านตั้งแต่ข้ามเจ้าได้ร่ำเรียนมาตั้งแต่อนุบาล จวบถึงปัจจุบันที่ได้ประสิทธิประสาทวิชาให้แก่ข้าพเจ้า

ขอกราบขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้สนับสนุนเครื่องมือ และอุปกรณ์สำหรับการวิจัย

ขอกราบขอบพระคุณ พี่ๆ น้องๆ ในห้องแลป PMC (Power Electronic and Machine Control Research Laboratory) ที่ให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำ คำปรึกษา ในการทำวงจรทดลอง รวมถึงเป็นกำลังใจแก่ข้าพเจ้าตลอดมา

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์นี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้บิดา มารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครู อาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิประสาทวิชาความรู้ และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้ข้าพเจ้า

สาริษฐ์ โสภา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญรูปภาพ.....	IX
สารบัญตาราง.....	XVIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	4
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	4
1.4 ขั้นตอนการศึกษา.....	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย.....	5
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 บทนำ.....	6
2.2 เซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic/PV).....	6
2.2.1 ทฤษฎีของเซลล์แสงอาทิตย์.....	6
2.2.1.1 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิกอน.....	7
2.2.1.2 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกโพลีซิลิกอน.....	7
2.2.1.3 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิกอน.....	8
2.2.2 หลักการทำงานโดยทั่วไปของเซลล์แสงอาทิตย์.....	8
2.2.3 คุณสมบัติและความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า ของเซลล์แสงอาทิตย์.....	10
2.2.4 ปัจจัยต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ประสิทธิภาพ ของเซลล์แสงอาทิตย์.....	15
2.3 ตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์.....	17
2.3.1 หลักการทำงาน.....	17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.2 ชุดขยายกำลังไฟฟ้า.....	17
2.3.3 ชุดสร้างสัญญาณอ้างอิง.....	18
2.3.3.1 เทคนิคการสร้างสัญญาณอ้างอิงโดยใช้สัญญาณอะนาล็อก.....	18
2.3.3.1.1 การสร้างสัญญาณอ้างอิงโดยใช้การเปลี่ยนโพล.....	18
2.3.3.1.2 การสร้างสัญญาณอ้างอิงโดยใช้วงจรสมมูลอย่างง่าย.....	20
2.3.3.2 เทคนิคการสร้างสัญญาณอ้างอิงโดยใช้สัญญาณดิจิทัล.....	21
2.3.3.2.1 การสร้างสัญญาณอ้างอิงด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	22
2.3.3.2.2 การสร้างสัญญาณอ้างอิงด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	25
2.3.3 การเปรียบเทียบเทคนิคการสร้างสัญญาณเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิง.....	26
2.4 แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์โดยสมการทางคณิตศาสตร์.....	27
2.5 วงจรการใช้งานพื้นฐานของออปแอมป์.....	30
2.5.1 วงจรขยายแบบไม่กลับเฟส.....	30
2.5.2 วงจรขยายแบบกลับเฟส.....	30
2.5.3 วงจรขยายแบบรวมสัญญาณ.....	31
2.5.4 วงจรแรงดันตาม.....	32
2.5.5 วงจรแปลงกระแสเป็นแรงดัน.....	33
2.5.6 วงจรอินทิเกรเตอร์.....	33
บทที่ 3 การออกแบบการทดลอง.....	35
3.1 บทนำ.....	35
3.2 วงจรสร้างสัญญาณเลียนแบบคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยใช้โฟโตไดโอด.....	35
3.3 การออกแบบวงจรสร้างสัญญาณเลียนแบบคุณลักษณะทางไฟฟ้าของ เซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้โฟโตไดโอดแบบอนุกรม.....	37
3.4 การออกแบบวงจรสร้างสัญญาณเลียนแบบคุณลักษณะทางไฟฟ้าของ เซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้โฟโตไดโอดแบบขนาน.....	38
3.5 การออกแบบวงจรสร้างสัญญาณเลียนแบบคุณลักษณะทางไฟฟ้า.....	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.5.1 เซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิงขนาดเล็ก.....	39
3.5.2 การออกแบบวงจรขยายกำลังไฟฟ้า (Power applier).....	39
3.5.3 การออกแบบวงจรตรวจจับกระแสเอาต์พุต (Current sensor 1).....	40
3.5.4 การออกแบบวงจรตรวจจับกระแสไฟโด้ (Current sensor 2).....	41
3.5.5 การออกแบบวงจร DC bias controller.....	42
3.5.6 การออกแบบวงจร Current summing sensor.....	43
3.6 การเลือกผลิตภัณฑ์ในการออกแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์.....	44
3.6.1 เซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิงขนาดเล็ก.....	44
3.6.2 IC ขยายกำลัง.....	45
3.6.3 วงจรอปแอมป์.....	45
3.6.4 LEM LTS 6-NP.....	46
3.6.5 IC L200.....	46
3.7 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซลล์แสงอาทิตย์.....	47
3.8. สรุป.....	54
บทที่ 4 ผลการจำลองคุณลักษณะทางไฟฟ้า.....	55
4.1 บทนำ.....	55
4.2 ผลการจำลองคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแบบจำลอง.....	55
4.2.1 ผลการจำลองคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแบบจำลองในรูปแบบเซลล์เดี่ยว.....	56
4.2.2 ผลการจำลองคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแบบจำลองไฟโด้ไดโอด เมื่อต่ออนุกรม.....	58
4.2.3 ผลการจำลองคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแบบจำลองไฟโด้ไดโอด เมื่อต่อขนาน.....	61
4.2.4. วงจรสร้างสัญญาณเลียนแบบคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยใช้ไฟโด้ไดโอด.....	63
4.2.4.1 วงจรสร้างสัญญาณเลียนแบบคุณลักษณะทางไฟฟ้าของ เซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้ไฟโด้ไดโอดแบบอนุกรม.....	64

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2.4.2 วงจรสร้างสัญญาณเลียนแบบคุณลักษณะทางไฟฟ้าของ เซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้โฟโต้ไดโอดแบบขนาน.....	69
4.3 สรุป.....	74
บทที่ 5 ผลการทดลอง.....	75
5.1 บทนำ.....	75
5.2 การทดสอบโฟโต้ไดโอดจริงในโหมด Photovoltaic.....	75
5.2.1 ผลการหาค่าความเข้มแสงเทียบกับแรงดันไฟฟ้า LED.....	75
5.2.2 ผลการทดสอบโฟโต้ไดโอด 1 เซลล์ ในโหมด Photovoltaic.....	76
5.2.3 ผลการทดสอบโฟโต้ไดโอด 4 เซลล์ ในโหมด Photovoltaic.....	79
5.2.3.1 ผลการทดสอบโฟโต้ไดโอด 4 เซลล์ เมื่อต่ออนุกรมในโหมด Photovoltaic.....	79
5.2.3.2 ผลการทดสอบโฟโต้ไดโอด 4 เซลล์ เมื่อต่อขนาน ในโหมด Photovoltaic.....	82
5.3 ผลการทดสอบวงจรสร้างสัญญาณเลียนแบบคุณลักษณะทางไฟฟ้า ของเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้โฟโต้ไดโอด.....	85
5.3.1 ผลการทดสอบวงจรสร้างสัญญาณเลียนแบบคุณลักษณะทางไฟฟ้า ของเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้โฟโต้ไดโอดแบบอนุกรม.....	85
5.3.1.1 ผลการทดสอบตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ในสภาวะเปิดวงจร.....	87
5.3.1.2 ผลการทดสอบตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ในสภาวะการเกิดกระแสลัดวงจร.....	88
5.3.1.3 ผลการทดลองสัญญาณเลียนแบบคุณลักษณะทางไฟฟ้าใช้ โฟโต้ไดโอดแบบอนุกรม.....	89
5.3.2 ผลการทดสอบวงจรสร้างสัญญาณเลียนแบบคุณลักษณะทางไฟฟ้า ของเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้โฟโต้ไดโอดแบบขนาน.....	93
5.3.2.1 ผลการทดสอบตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ในสภาวะเปิดวงจร.....	94
5.3.2.2 ผลการทดสอบตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ในสภาวะการเกิดกระแสลัดวงจร.....	96
5.3.2.3 ผลการทดลองสัญญาณเลียนแบบคุณลักษณะทางไฟฟ้าใช้ โฟโต้ไดโอดแบบขนาน.....	98

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.4 ผลการทดสอบจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์จริง.....	107
5.5 สรุป.....	113
บทที่ 6 สรุปผลการทดลอง.....	114
6.1 การศึกษาการทำงานของตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยโปรแกรม Orcad 9.1.....	114
6.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา.....	115
6.3 สรุป.....	116
เอกสารอ้างอิง.....	117
ภาคผนวก ก	118
ภาคผนวก ข	126
ภาคผนวก ค	135
ประวัติผู้เขียน	138

สารบัญญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 อัตราส่วนการใช้เชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้าของโลก.....	1
1.2 แผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับประเทศไทย.....	3
2.1 ลักษณะเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิกอน.....	7
2.2 ลักษณะเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกโพลีซิลิกอน.....	7
2.3 ลักษณะเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิกอน.....	8
2.4 การเคลื่อนที่ของประจุพาหะอิเล็กตรอน และโฮลภายใต้สนามไฟฟ้าที่สภาพปกติ.....	9
2.5 การเคลื่อนที่ของประจุพาหะอิเล็กตรอน และโฮลภายใต้สนามไฟฟ้าที่สภาวะสมดุล.....	9
2.6 การเคลื่อนที่ของประจุพาหะอิเล็กตรอน และโฮลภายใต้สนามไฟฟ้าที่สภาวะ Forward bias.....	9
2.7 การเคลื่อนที่ของประจุพาหะอิเล็กตรอน และโฮลภายใต้สนามไฟฟ้าที่สภาวะ Reverse bias.....	10
2.8 การต่อวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์.....	11
2.9 กราฟแสดงคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์.....	12
2.10 กราฟคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อไม่มีแสงตกกระทบ.....	13
2.11 กราฟคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อแสงตกกระทบเพียงเล็กน้อย.....	13
2.12 กราฟคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อแสงตกกระทบปริมาณมาก.....	13
2.13 กราฟคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อประพุดิตัวเป็นเซลล์แสงอาทิตย์จริง.....	14
2.14 ผลของความต้านทานอนุกรม และความต้านทาน Shunt ต่อลักษณะกระแสและแรงดันเซลล์แสงอาทิตย์.....	15
2.15 ผลของความเข้มแสงต่อลักษณะกระแสและแรงดันเซลล์แสงอาทิตย์.....	16
2.16 ผลของอุณหภูมิต่อลักษณะกระแสและแรงดันเซลล์แสงอาทิตย์.....	16
2.17 แสดงหลักการการทำงานของตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์.....	17
2.18 วงจรบั๊กคอนเวอร์เตอร์ที่นำมาใช้สร้างชุดขยายกำลังไฟฟ้า.....	17
2.19 วงจรฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ที่นำมาใช้สร้างชุดขยายกำลังไฟฟ้า.....	18
2.20 แสดงหลักการการทำงานของตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่อาศัยค่าที่ได้จากการวัดจริง.....	19
2.21 แสดงหลักการการทำงานของตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์โดยอาศัยวงจรสมมูลอย่างง่าย.....	21
2.22 แสดงหลักการการทำงานของตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่อาศัยค่าที่ได้จากกราฟ คุณลักษณะทางไฟฟ้า.....	22

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.23 หลักการทำงานของตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์.....	24
2.24 แสดงหลักการสร้างสัญญาณเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิงโดยใช้เทคนิคดิจิทัล โดยไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น TMS320F2808.....	25
2.25 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์อย่างง่าย.....	27
2.26 วงจรขยายไม่กลับเฟส.....	30
2.27 วงจรขยายแบบกลับเฟส.....	31
2.28 วงจรขยายแบบรวมสัญญาณ.....	31
2.29 วงจรแรงดันตาม.....	32
2.30 วงจรแปลงผันกระแสเป็นแรงดัน.....	33
2.31 วงจรอินทิเกรเตอร์.....	33
2.32 วงจรอินทิเกรเตอร์ ต่อร่วมกับตัวต้านทาน Shunt.....	34
3.1 ไดอะแกรมการทำงานของวงจรสร้างสัญญาณเลียนแบบเซลล์แสงอาทิตย์ โดยใช้โฟโต้ไดโอดอนุกรมเป็นอินพุต.....	36
3.2 ไดอะแกรมการทำงานของวงจรสร้างสัญญาณเลียนแบบเซลล์แสงอาทิตย์ โดยใช้โฟโต้ไดโอดขนานเป็นอินพุต.....	36
3.3 วงจรจำลองคุณลักษณะทางไฟฟ้าของโฟโต้ไดโอดอนุกรม.....	37
3.4 วงจรจำลองคุณลักษณะทางไฟฟ้าของโฟโต้ไดโอดอนุกรม.....	38
3.5 โฟโต้ไดโอดที่เลือกใช้เป็นเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิง BS250.....	39
3.6 วงจรขยายกำลังไฟฟ้า.....	40
3.7 วงจรตรวจจับกระแสเอาต์พุต 1.....	41
3.8 วงจรตรวจจับกระแสเอาต์พุต 2.....	42
3.9 วงจร DC bias controller.....	42
3.10 วงจร Current summing sensor.....	44
3.11 ลักษณะโฟโต้ไดโอดรุ่น BS520.....	44
3.12 ลักษณะไอซี OPA 544 ที่ใช้ในวงจรกำลังไฟฟ้า.....	45
3.13 ลักษณะ IC TL084.....	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.14 ตัวตรวจจับสนแสงแบบ Hall effect รุ่น LTS 6 NP.....	46
3.15 ลักษณะและรูปร่าง IC L200.....	46
3.16 วงจรใช้งานพื้นฐาน L200.....	47
3.17 วงจรสมมูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการวิเคราะห์ความต้านทานขนาน.....	48
3.18 แสดงคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เปลี่ยนแปลงตาม ความเข้มแสงและอุณหภูมิ.....	48
3.19 วงจรสมมูลเซลล์แสงอาทิตย์อย่างง่าย.....	49
3.20 วงจรสมมูลเซลล์แสงอาทิตย์ในสภาวะลัดวงจร.....	51
3.21 แบบจำลอง Photodiode 1 cell ในโปรแกรม Orcad 9.1.....	52
4.1 วงจรสมมูลเซลล์แสงอาทิตย์อย่างง่าย.....	55
4.2 แบบจำลอง Photodiode 1 cell ในโปรแกรม Orcad 9.1.....	56
4.3 ผลการจำลองกระแสไฟฟ้าของโฟโตไดโอด ในรูปแบบ I V characteristic ที่ความเข้มแสง 500, 1000, 1500 W/m ² อุณหภูมิ 25°C ในโปรแกรม Orcad 9.1.....	56
4.4 ผลการจำลองกระแสไฟฟ้าของโฟโตไดโอด ในรูปแบบ I V characteristic ที่ความเข้มแสง 1,000 W/m ² อุณหภูมิ 0, 25 และ 50°C ในโปรแกรม Orcad 9.1.....	57
4.5 ผลการจำลองกำลังไฟฟ้าของโฟโตไดโอด ในรูปแบบ I V characteristic ที่ความเข้มแสง 500, 1000, 1500 W/m ² ในโปรแกรม Orcad 9.1.....	57
4.6 ผลการจำลองกำลังไฟฟ้าของโฟโตไดโอด ในรูปแบบ I V characteristic ที่ความเข้มแสง 1,000 W/m ² อุณหภูมิ 0, 25 และ 50 °C ในโปรแกรม Orcad 9.1	57
4.7 วงจร Photodiode 4 Cell อนุกรมในโปรแกรม Orcad 9.1.....	58
4.8 ผลการจำลองกระแสไฟฟ้าของโฟโตไดโอด 4 เซลล์อนุกรม ในรูปแบบ I V characteristic ที่ความเข้มแสง 500, 1000, 1500 W/m ² ในโปรแกรม Orcad 9.1.....	59
4.9 ผลการจำลองกระแสไฟฟ้าของโฟโตไดโอด 4 เซลล์อนุกรม ในรูปแบบ I V characteristic ที่ความเข้มแสง 1,000 W/m ² อุณหภูมิ 0, 25 และ 50°C ในโปรแกรม Orcad 9.1.....	59
4.10 ผลการจำลองกำลังไฟฟ้าของโฟโตไดโอด 4 เซลล์อนุกรม ในรูปแบบ I V characteristic ที่ความเข้มแสง 500, 1000, 1500 W/m ² ในโปรแกรม Orcad 9.1.....	59

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.11 ผลการจำลองกำลังไฟฟ้าของโฟโตไดโอด 4 เซลล์อนุกรม ในรูปแบบ I V characteristic ที่ความเข้มแสง $1,000 \text{ W/m}^2$ อุณหภูมิ 0, 25 และ 50°C ในโปรแกรม Orcad 9.1.....	60
4.12 วงจร Photodiode 4 Cell ขนานในโปรแกรม Orcad 9.1.....	61
4.13 ผลการจำลองกระแสไฟฟ้าของโฟโตไดโอด 4 เซลล์ขนาน ในรูปแบบ I V characteristic ที่ความเข้มแสง 500, 1000, 1500 W/m^2 ในโปรแกรม Orcad 9.1.....	61
4.14 ผลการจำลองกระแสไฟฟ้าของโฟโตไดโอด 4 เซลล์ขนาน ในรูปแบบ I V characteristic ที่ความเข้มแสง $1,000 \text{ W/m}^2$ อุณหภูมิ 0, 25 และ 50°C ในโปรแกรม Orcad 9.1.....	62
4.15 ผลการจำลองกำลังไฟฟ้าของโฟโตไดโอด 4 เซลล์ขนาน ในรูปแบบ I V characteristic ที่ความเข้มแสง 500, 1000, 1500 W/m^2 ในโปรแกรม Orcad 9.1.....	62
4.16 ผลการจำลองกำลังไฟฟ้าของโฟโตไดโอด 4 เซลล์ขนาน ในรูปแบบ I V characteristic ที่ความเข้มแสง $1,000 \text{ W/m}^2$ อุณหภูมิ 0, 25 และ 50°C ในโปรแกรม Orcad 9.1.....	62
4.17 ไดอะแกรมการทำงานของวงจรสร้างสัญญาณเลียนแบบเซลล์แสงอาทิตย์ โดยใช้โฟโตไดโอดอนุกรมเป็นอินพุต.....	63
4.18 ไดอะแกรมการทำงานของวงจรสร้างสัญญาณเลียนแบบเซลล์แสงอาทิตย์ โดยใช้โฟโตไดโอดขนานเป็นอินพุต.....	64
4.19 วงจรจำลองคุณลักษณะทางไฟฟ้าของโฟโตไดโอดอนุกรม.....	64
4.20 ผลการจำลองกระแสและกำลังไฟฟ้าของโฟโตไดโอด ในรูปแบบ I V characteristic จากวงจรจำลองสัญญาณคุณลักษณะทางไฟฟ้าในรูปแบบอนุกรม เมื่อความเข้มแสง 500 W/m^2 อุณหภูมิ 25°C	65
4.21 ผลการจำลองกระแสและกำลังไฟฟ้าของโฟโตไดโอด ในรูปแบบ I V characteristic จากวงจรจำลองสัญญาณคุณลักษณะทางไฟฟ้าในรูปแบบอนุกรม เมื่อความเข้มแสง $1,000 \text{ W/m}^2$ อุณหภูมิ 25°C	66
4.22 ผลการจำลองกระแสและกำลังไฟฟ้าของโฟโตไดโอด ในรูปแบบ I V characteristic จากวงจรจำลองสัญญาณคุณลักษณะทางไฟฟ้าในรูปแบบอนุกรม เมื่อความเข้มแสง $1,500 \text{ W/m}^2$ อุณหภูมิ 25°C	66

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.23 ผลการจำลองกระแสและกำลังไฟฟ้าของโพลีไดโอด ในรูปแบบ I V characteristic จากวงจรจำลองสัญญาณคุณลักษณะทางไฟฟ้าในรูปแบบอนุกรม เมื่อความเข้มแสง 1,000 W/m ² อุณหภูมิ 0 °C.....	67
4.24 ผลการจำลองกระแสและกำลังไฟฟ้าของโพลีไดโอด ในรูปแบบ I V characteristic จากวงจรจำลองสัญญาณคุณลักษณะทางไฟฟ้าในรูปแบบอนุกรม เมื่อความเข้มแสง 1,000 W/m ² อุณหภูมิ 25 °C.....	67
4.25 ผลการจำลองกระแสและกำลังไฟฟ้าของโพลีไดโอด ในรูปแบบ I V characteristic จากวงจรจำลองสัญญาณคุณลักษณะทางไฟฟ้าในรูปแบบอนุกรม เมื่อความเข้มแสง 1,000 W/m ² อุณหภูมิ 50 °C.....	68
4.26 วงจรจำลองคุณลักษณะทางไฟฟ้าของโพลีไดโอดขนาน.....	69
4.27 ผลการจำลองกระแสและกำลังไฟฟ้าของโพลีไดโอด ในรูปแบบ I V characteristic จากวงจรจำลองสัญญาณคุณลักษณะทางไฟฟ้าในรูปแบบขนาน เมื่อความเข้มแสง 500 W/m ² อุณหภูมิ 25 °C.....	70
4.28 ผลการจำลองกระแสและกำลังไฟฟ้าของโพลีไดโอด ในรูปแบบ I V characteristic จากวงจรจำลองสัญญาณคุณลักษณะทางไฟฟ้าในรูปแบบขนาน เมื่อความเข้มแสง 1,000 W/m ² อุณหภูมิ 25 °C.....	70
4.29 ผลการจำลองกระแสและกำลังไฟฟ้าของโพลีไดโอด ในรูปแบบ I V characteristic จากวงจรจำลองสัญญาณคุณลักษณะทางไฟฟ้าในรูปแบบขนาน เมื่อความเข้มแสง 1,500 W/m ² อุณหภูมิ 25 °C.....	71
4.30 ผลการจำลองกระแสและกำลังไฟฟ้าของโพลีไดโอด ในรูปแบบ I V characteristic จากวงจรจำลองสัญญาณคุณลักษณะทางไฟฟ้าในรูปแบบขนาน เมื่อความเข้มแสง 1,000 W/m ² อุณหภูมิ 0 °C.....	72
4.31 ผลการจำลองกระแสและกำลังไฟฟ้าของโพลีไดโอด ในรูปแบบ I V characteristic จากวงจรจำลองสัญญาณคุณลักษณะทางไฟฟ้าในรูปแบบขนาน เมื่อความเข้มแสง 1,000 W/m ² อุณหภูมิ 25 °C.....	72

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.32 ผลการจำลองกระแสและกำลังไฟฟ้าของโพลีไดโอด ในรูปแบบ I V characteristic จากวงจรจำลองสัญญาณคุณลักษณะทางไฟฟ้าในรูปแบบขนาน เมื่อความเข้มแสง 1,000 W/m ² อุณหภูมิ 50 °C.....	73
5.1 วงจรการทดสอบเพื่อหาคุณลักษณะทางไฟฟ้าของโพลีไดโอด ในโหมด Photovoltaic.....	77
5.2 กราฟผลการทดสอบหากระแส และกำลังไฟฟ้าในรูปแบบ I V characteristic โพลีไดโอด 1 เซลล์ ที่ความเข้มแสง 500 W/m ²	77
5.3 กราฟผลการทดสอบหากระแส และกำลังไฟฟ้าในรูปแบบ I V characteristic โพลีไดโอด 1 เซลล์ ที่ความเข้มแสง 1,000 W/m ²	78
5.4 กราฟผลการทดสอบหากระแส และกำลังไฟฟ้าในรูปแบบ I V characteristic โพลีไดโอด 1 เซลล์ ที่ความเข้มแสง 1,500 W/m ²	79
5.5 วงจรการทดสอบเพื่อหาคุณลักษณะทางไฟฟ้าของโพลีไดโอด เมื่อต่อวงจรแบบอนุกรม ในโหมด Photovoltaic.....	79
5.6 กราฟผลการทดสอบหากระแส และกำลังไฟฟ้า ในรูปแบบ I V characteristic ของโพลีไดโอด 4 เซลล์เมื่อต่อวงจรแบบอนุกรม ที่ความเข้มแสง 500 W/m ²	80
5.7 กราฟผลการทดสอบหากระแส และกำลังไฟฟ้า ในรูปแบบ I V characteristic ของโพลีไดโอด 4 เซลล์เมื่อต่อวงจรแบบอนุกรม ที่ความเข้มแสง 1,000 W/m ²	81
5.8 กราฟผลการทดสอบหากระแส และกำลังไฟฟ้า ในรูปแบบ I V characteristic ของโพลีไดโอด 4 เซลล์เมื่อต่อวงจรแบบอนุกรม ที่ความเข้มแสง 1,500 W/m ²	82
5.9 วงจรจำลองขยายสัญญาณคุณลักษณะทางไฟฟ้าของโพลีไดโอดขนาน.....	82
5.10 กราฟผลการทดสอบหากระแส และกำลังไฟฟ้าในรูปแบบ I V characteristic ของโพลีไดโอด 4 เซลล์เมื่อต่อวงจรแบบขนาน ที่ความเข้มแสง 500 W/m ²	83
5.11 กราฟผลการทดสอบหากระแส และกำลังไฟฟ้าในรูปแบบ I V characteristic ของโพลีไดโอด 4 เซลล์เมื่อต่อวงจรแบบขนาน ที่ความเข้มแสง 1,000 W/m ²	84
5.12 กราฟผลการทดสอบหากระแส และกำลังไฟฟ้าในรูปแบบ I V characteristic ของโพลีไดโอด 4 เซลล์เมื่อต่อวงจรแบบขนาน ที่ความเข้มแสง 1,500 W/ m ²	85
5.13 วงจรจำลองขยายสัญญาณคุณลักษณะทางไฟฟ้าของโพลีไดโอดอนุกรม.....	86

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
XIV

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.14 ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรของโพลีไคโอดจำนวน 4 เซลล์ ต่ออนุกรม.....	87
5.15 ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรของวงจรจำลองสัญญาณเลียนแบบ คุณลักษณะทางไฟฟ้าใช้โพลีไคโอดแบบอนุกรม.....	88
5.16 ผลการทดสอบกระแสไฟฟ้ากระแสโพลีไคโอด 4 เซลล์ เมื่อต่อวงจรแบบอนุกรม ผ่านวงจรจำลองสัญญาณเลียนแบบ ที่ความเข้มแสง 500 W/m^2	89
5.17 ผลการทดสอบกระแสไฟฟ้ากระแสโพลีไคโอด 4 เซลล์ เมื่อต่อวงจรแบบอนุกรม ผ่านวงจรจำลองสัญญาณเลียนแบบ ที่ความเข้มแสง $1,000 \text{ W/m}^2$	89
5.18 ผลการทดสอบกระแสไฟฟ้ากระแสโพลีไคโอด 4 เซลล์ เมื่อต่อวงจรแบบอนุกรม ผ่านวงจรจำลองสัญญาณเลียนแบบ ที่ความเข้มแสง $1,500 \text{ W/m}^2$	90
5.19 ผลการทดสอบกระแสไฟฟ้า I-V characteristic จากวงจรจำลองสัญญาณเลียนแบบ คุณลักษณะทางไฟฟ้าแบบอนุกรม ที่ความเข้มแสง 500 W/m^2	90
5.20 ผลการทดสอบกระแสไฟฟ้า I-V characteristic จากวงจรจำลองสัญญาณเลียนแบบ คุณลักษณะทางไฟฟ้าแบบอนุกรม ที่ความเข้มแสง $1,000 \text{ W/m}^2$	91
5.21 ผลการทดสอบกระแสไฟฟ้า I-V characteristic จากวงจรจำลองสัญญาณเลียนแบบ คุณลักษณะทางไฟฟ้าแบบอนุกรมที่ความเข้มแสง $1,500 \text{ W/m}^2$	91
5.22 ผลการทดสอบกำลังไฟฟ้า I-V characteristic จากวงจรจำลองสัญญาณเลียนแบบ คุณลักษณะทางไฟฟ้าแบบอนุกรมที่ความเข้มแสง 500 W/m^2	92
5.23 ผลการทดสอบกำลังไฟฟ้า I-V characteristic จากวงจรจำลองสัญญาณเลียนแบบ คุณลักษณะทางไฟฟ้าแบบอนุกรมที่ความเข้มแสง $1,000 \text{ W/m}^2$	92
5.24 ผลการทดสอบกำลังไฟฟ้า I-V characteristic จากวงจรจำลองสัญญาณเลียนแบบ คุณลักษณะทางไฟฟ้าแบบอนุกรมที่ความเข้มแสง $1,500 \text{ W/m}^2$	93
5.25 วงจรจำลองขยายสัญญาณคุณลักษณะทางไฟฟ้าของโพลีไคโอดขนาน.....	94
5.26 ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรของโพลีไคโอดจำนวน 4 เซลล์ ต่อขนาน.....	95
5.27 ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรของวงจรจำลองสัญญาณเลียนแบบคุณลักษณะ ทางไฟฟ้าใช้โพลีไคโอดแบบขนาน.....	95

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.28 ผลการทดสอบกระแสไฟฟ้ากระแสโพลีไดโอด 4 เซลล์ เมื่อต่อวงจรแบบขนาน ผ่านวงจรจำลองสัญญาณเลียนแบบ ที่ความเข้มแสง 500 W/m^2 อุณหภูมิ 25°C	96
5.29 ผลการทดสอบกระแสไฟฟ้ากระแสโพลีไดโอด 4 เซลล์ เมื่อต่อวงจรแบบขนาน ผ่านวงจรจำลองสัญญาณเลียนแบบ ที่ความเข้มแสง $1,000 \text{ W/m}^2$ อุณหภูมิ 25°C	97
5.30 ผลการทดสอบกระแสไฟฟ้ากระแสโพลีไดโอด 4 เซลล์ เมื่อต่อวงจรแบบขนาน ผ่านวงจรจำลองสัญญาณเลียนแบบ ที่ความเข้มแสง $1,500 \text{ W/m}^2$ อุณหภูมิ 25°C	98
5.31 ผลการทดสอบกระแสไฟฟ้า I-V characteristic จากวงจรจำลองสัญญาณเลียนแบบ คุณลักษณะทางไฟฟ้าแบบขนานที่ความเข้มแสง 500 W/m^2	98
5.32 ผลการทดสอบกระแสไฟฟ้า I-V characteristic จากวงจรจำลองสัญญาณเลียนแบบ คุณลักษณะทางไฟฟ้าแบบขนานที่ความเข้มแสง $1,000 \text{ W/m}^2$	98
5.33 ผลการทดสอบกระแสไฟฟ้า I-V characteristic จากวงจรจำลองสัญญาณเลียนแบบ คุณลักษณะทางไฟฟ้าแบบขนานที่ความเข้มแสง $1,500 \text{ W/m}^2$	99
5.34 ผลการทดสอบกำลังไฟฟ้า I-V characteristic จากวงจรจำลองสัญญาณเลียนแบบ คุณลักษณะทางไฟฟ้าแบบอนุกรมที่ความเข้มแสง 500 W/m^2	99
5.35 ผลการทดสอบกำลังไฟฟ้า I-V characteristic จากวงจรจำลองสัญญาณเลียนแบบ คุณลักษณะทางไฟฟ้าแบบอนุกรมที่ความเข้มแสง $1,000 \text{ W/m}^2$	100
5.36 ผลการทดสอบกำลังไฟฟ้า I-V characteristic จากวงจรจำลองสัญญาณเลียนแบบ คุณลักษณะทางไฟฟ้าแบบอนุกรมที่ความเข้มแสง $1,500 \text{ W/m}^2$	100
5.37 กราฟระหว่าง แรงดันขาออก และแรงดันโพลีไดโอดอนุกรม.....	101
5.38 กราฟระหว่าง แรงดันขาออก และแรงดันโพลีไดโอดขนาน.....	102
5.39 กราฟระหว่างกระแสไฟฟ้าลัดวงจรขาออกและกระแสไฟฟ้าโพลีไดโอดอนุกรม.....	102
5.40 กราฟระหว่างกระแสไฟฟ้าลัดวงจรขาออกและกระแสไฟฟ้าโพลีไดโอดขนาน.....	102
5.41 กราฟคุณลักษณะทางไฟฟ้าระหว่างแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร และแรงดันไฟฟ้า Bias ของวงจรขยายสัญญาณคุณลักษณะทางไฟฟ้าในรูปแบบ อนุกรม และขนาน.....	103
5.42 กราฟคุณลักษณะทางไฟฟ้าระหว่างกระแสไฟฟ้าเปิดวงจร และแรงดันไฟฟ้าจาก Current sensor 1 ของวงจรขยายสัญญาณคุณลักษณะทางไฟฟ้าในรูปแบบอนุกรม และขนาน.....	103

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
XVI

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.43 กราฟคุณลักษณะทางไฟฟ้าระหว่างกระแสไฟฟ้าเปิดวงจร และแรงดันไฟฟ้าจาก Current sensor 2 ของวงจรขยายสัญญาณคุณลักษณะทางไฟฟ้าในรูปแบบอนุกรม.....	104
5.44 ลักษณะแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ รุ่น BS 40.....	107
5.45 กราฟเปรียบเทียบ I-V Characteristic ของแผงเซลล์อาทิตย์ กับวงจรจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ความเข้ม 700 วัตต์ต่อตารางเมตร.....	109
5.46 กราฟเปรียบเทียบ P-V Characteristic ของแผงเซลล์อาทิตย์ กับวงจรจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ความเข้ม 700 วัตต์ต่อตารางเมตร.....	110
5.47 กราฟเปรียบเทียบ I-V Characteristic ของแผงเซลล์อาทิตย์ กับวงจรจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ความเข้ม 300 วัตต์ต่อตารางเมตร.....	111
5.48 กราฟเปรียบเทียบ P-V Characteristic ของแผงเซลล์อาทิตย์ กับวงจรจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ความเข้ม 300 วัตต์ต่อตารางเมตร.....	112

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 กำลังผลิตไฟฟ้า แยกตามประเภทโรงไฟฟ้าที่ใช้ในปี 2553.....	2
2.1 แสดงจุดเด่นจุดด้อยในการสร้างสัญญาณเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิงด้วย เทคนิคการเปลี่ยนโพลด.....	20
2.2 แสดงจุดเด่นจุดด้อยในการสร้างสัญญาณเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิงด้วยเทคนิค การใช้วงจรมุมอย่างง่าย.....	21
2.3 แสดงจุดเด่นและจุดด้อยในการสร้างสัญญาณเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิง โดยใช้ค่ากราฟคุณลักษณะลักษณะทางไฟฟ้า.....	22
2.4 แสดงจุดเด่นและจุดด้อยในการสร้างสัญญาณเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิง โดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์.....	25
2.5 แสดงจุดเด่นและจุดด้อยในการสร้างสัญญาณเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิง โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์.....	26
2.6 แสดงการเปรียบเทียบเทคนิคในการสร้างสัญญาณเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิง.....	26
5.1 ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าแหล่งจ่าย LED กับความเข้มแสง.....	76
5.2 ผลการทดลองของโพลีโอด 1 เซลล์ เมื่อความเข้มแสง 500 W/m^2	77
5.3 ผลการทดลองของโพลีโอด 1 เซลล์ เมื่อความเข้มแสง $1,000 \text{ W/m}^2$	78
5.4 ผลการทดลองของโพลีโอด 1 เซลล์ เมื่อความเข้มแสง $1,500 \text{ W/m}^2$	78
5.5 ผลการทดลองของโพลีโอด 4 เซลล์ ต่อวงจรแบบอนุกรม เมื่อความเข้มแสง 500 W/m^2	80
5.6 ผลการทดลองของโพลีโอด 4 เซลล์ ต่อวงจรแบบอนุกรม เมื่อความเข้มแสง $1,000 \text{ W/m}^2$	81
5.7 ผลการทดลองของโพลีโอด 4 เซลล์ ต่อวงจรแบบอนุกรม เมื่อความเข้มแสง $1,500 \text{ W/m}^2$	81
5.8 ผลการทดลองของโพลีโอด 4 เซลล์ ต่อวงจรแบบขนาน เมื่อความเข้มแสง 500 W/m^2	83
5.9 ผลการทดลองของโพลีโอด 4 เซลล์ ต่อวงจรแบบขนาน เมื่อความเข้มแสง $1,000 \text{ W/m}^2$	84
5.10 ผลการทดลองของโพลีโอด 4 เซลล์ ต่อวงจรแบบขนาน เมื่อความเข้มแสง $1,500 \text{ W/m}^2$	84

สารบัญตาราง (ต่อ)

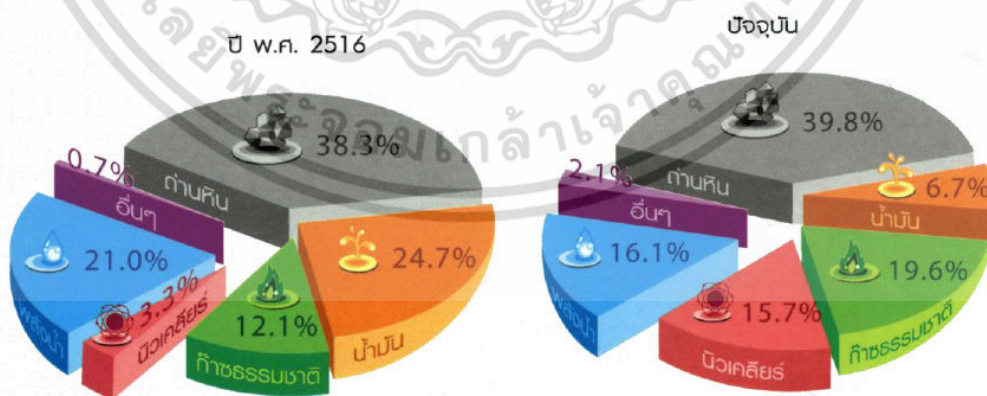
ตารางที่	หน้า
5.11 ผลการจำลองสัญญาณแรงดันเปิดวงจร , กระแสไฟฟ้าลัดวงจร และกำลังสูงสุดของโฟโต้ไดโอดแบบอนุกรม ที่ความเข้มแสง 500, 1,000, 1500 W/m ²	105
5.11 ผลการจำลองสัญญาณแรงดันเปิดวงจร , กระแสไฟฟ้าลัดวงจร และกำลังสูงสุดของโฟโต้ไดโอดแบบขนาน ที่ความเข้มแสง 500, 1,000, 1500 W/m ²	105
5.13 ผลการทดสอบ และอัตราการขยายของกระแสไฟฟ้าลัดวงจรของโฟโต้ไดโอด แบบอนุกรมและขนาน ที่ความเข้มแสง 500, 1,000, 1500 W/m ²	106
5.14 ผลการทดสอบ และอัตราการขยายของแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรของโฟโต้ไดโอด แบบอนุกรมและขนาน ที่ความเข้มแสง 500, 1,000, 1500 W/m ²	106
5.15 ค่าที่ได้พารามิเตอร์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 40 วัตต์.....	107
5.16 ข้อมูลเฉพาะของเซลล์แต่ละตัวที่ต่ออนุกรมกันในแผงเซลล์แสงอาทิตย์ BS 40.....	108
5.17 ค่าที่วัดจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ BS 40 ที่ความเข้มแสง 700 วัตต์ต่อตารางเมตร.....	108
5.18 ค่าที่วัดจากวงจรจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ความเข้มแสง 700 วัตต์ต่อตารางเมตร.....	109
5.19 ค่าที่วัดจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ BS 40 ที่ความเข้มแสง 300 วัตต์ต่อตารางเมตร.....	110
5.20 ค่าที่วัดจากวงจรจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ความเข้มแสง 300 วัตต์ต่อตารางเมตร.....	111

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในกลางศตวรรษที่ 20 จนถึงปัจจุบัน พลังงานหลักที่นำมาผลิตกระแสไฟฟ้า เช่น น้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ ถ่านหิน เป็นต้น ซึ่งทั้งสองเป็นทรัพยากรที่จำกัด นับวันจะมีปริมาณน้อยลงทุกที และคงจะต้องหมดลงในอนาคต นอกจากนี้ราคาของเชื้อเพลิงแต่ละประเภทมีแนวโน้มที่จะสูงขึ้นตามสถานการณ์ทางเศรษฐกิจและการเมืองของโลก จนไม่คุ้มที่จะเป็นเชื้อเพลิงหลักในการผลิตไฟฟ้า อีกต่อไป ถึงแม้จะมีการผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานน้ำ ซึ่งเป็นพลังงานหมุนเวียนก็ตามแต่ก็มีสัดส่วนที่น้อยมาก รวมทั้งแหล่งน้ำที่สามารถจะพัฒนาเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้ายังมีน้อยลง และต้องประสบกับปัญหาการคัดค้านขององค์กรกลุ่มต่างๆ อีกด้วย ดังนั้นจึงมีความพยายามที่จะคิดค้นแหล่งพลังงานใหม่ๆ ที่ประหยัดและไม่มีวันหมดสิ้น นั่นคือ พลังงานทางเลือก ซึ่งบางชนิดก็นำมาใช้บ้างแล้ว เช่น น้ำขึ้น-น้ำลง ความร้อนจากมหาสมุทร แสงอาทิตย์ ลม และความร้อนใต้พิภพ เป็นต้น แต่ยังคงมีข้อจำกัดในการพัฒนา เช่น ราคาแพง ใช้เวลานานในการก่อสร้าง หรือบางประเทศไม่มีศักยภาพของแหล่งพลังงานดังกล่าวเพียงพอ



รูปที่ 1.1 อัตราส่วนการใช้เชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้าของโลก [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประเทศไทย มีอัตราการเจริญเติบโตการใช้ไฟฟ้าค่อนข้างสูง ความต้องการในช่วง 5 ปีที่ผ่านมา เพิ่มขึ้นปีละ 6-8 % หรือ ประมาณปีละ 1,000-1,200 เมกะวัตต์ จากการพยากรณ์ ความต้องการไฟฟ้าในระยะ 15 ปี ข้างหน้า (พ.ศ. 2549-พ.ศ. 2564) ความต้องการไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้น เฉลี่ยร้อยละ 5.5 หรือ 1,500-2,000 เมกะวัตต์ต่อไป

ตารางที่ 1.1 กำลังผลิตไฟฟ้า แยกตามประเภทโรงไฟฟ้าที่ใช้ในปี 2553

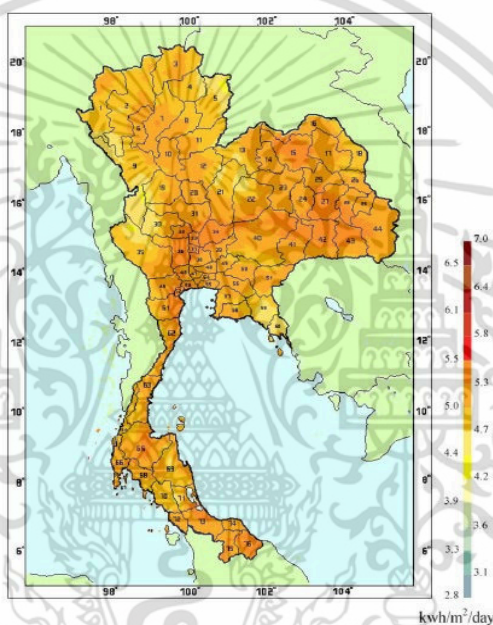
ประเภทโรงไฟฟ้า	รวมทั้งระบบ			แยกตามภาค		
	กำลังผลิต	ร้อยละ	ภาคกลาง	อีสาน	ภาคใต้	ภาคเหนือ
1. พลังน้ำ	3,424.18	11.07	1,078.11	744.21	313.29	1,288.57
2. พลังความร้อน	4,699.00	15.20	2,204.00	-	315.00	2,180.00
3. พลังความร้อนร่วม	6,866.00	22.21	5,506.00	650.00	710.00	-
4. ดีเซล	4.40	0.01	-	-	-	4.40
5. พลังงานทดแทน	4.54	0.01	0.02	3.51	0.19	0.82
6. ซื้อมาจากต่างประเทศ	1,588.00	5.14	-	1,288.00	300.00	-
7. ซื้อมาภายในประเทศ	14,333.89	46.36	13,364.99	92.30	29.00	29.50
รวม	30,920.01	100	22,153.12	2,778.02	2,485.58	3,503.29

พลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานหมุนเวียนที่สามารถนำมาใช้ได้อย่างไม่มีสิ้นสุดและมีลักษณะกระจายไปถึงผู้ใช้โดยตรง อีกทั้งยังเป็นแหล่งพลังงานที่สะอาดปราศจากมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม ตามปกติมนุษย์ใช้พลังงานแสงอาทิตย์ตามธรรมชาติในชีวิตประจำวันอยู่แล้ว และตลอดหลายปีมานี้ เทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ได้รับการพัฒนาอย่างมากจนถึงขั้นนำมาใช้งานได้จริง เช่น การพัฒนาใช้เซลล์แสงอาทิตย์เปลี่ยนพลังงานจากดวงอาทิตย์มาเป็นพลังงานไฟฟ้า และได้รับความนิยมแพร่หลายมากขึ้น

การวิจัยด้านพลังงานเป็นเรื่องที่สำคัญเรื่องหนึ่งของประเทศ โดยเฉพาะการวิจัยเกี่ยวกับพลังงานทางเลือกหรือพลังงานทดแทน โดยที่พลังงานแสงอาทิตย์ก็เป็นแหล่งพลังงานหนึ่งที่ได้รับ ความสนใจ ซึ่งในประเทศไทย ได้มีการทำวิจัยที่เกี่ยวกับเซลล์แสงอาทิตย์เป็นระยะเวลาหลายปี มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน่วยงานที่เกี่ยวข้อง ทั้งด้านการสนับสนุนให้ทุนในการดำเนินการวิจัย หน่วยงานวิจัยในด้านเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับการทำวิจัยในการนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ประโยชน์ด้วยการแปลงพลังงานจากแสงอาทิตย์มาเป็นพลังงานไฟฟ้าพิจารณาได้จากรูปที่ 1.1 แสดงถึงศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์เฉลี่ยรายปีในแต่ละเดือนนั้นการกระจายของความเข้มรังสีอาทิตย์ตามบริเวณต่างๆพื้นที่ส่วนใหญ่ของประเทศไทยได้รับรังสีอาทิตย์สูงสุดช่วงระหว่างเดือนเมษายนและพฤษภาคมโดยมีค่าอยู่ในช่วง 5.54 ถึง 6.65 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อตารางเมตร-วัน จะเห็นได้ชัดว่าประเทศไทยเป็นเมืองร้อนจึงเหมาะสมอย่างยิ่งในการใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์อย่างยิ่ง



รูปที่ 1.2 แผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับประเทศไทย
จัดทำในปีพ.ศ. 2542 (หน่วย : กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อตารางเมตร-วัน) [9]

จากนโยบายด้านพลังงานของภาครัฐที่มุ่งเน้นในการพัฒนาและวิจัยพลังงานทดแทนส่งผลให้เกิดการวิจัยทางด้านพลังงานทดแทนอย่างแพร่หลาย โดยหนึ่งในพลังงานที่มีมากและยังนำมาใช้ประโยชน์ได้ไม่มากเท่าที่ควรก็คือพลังงานแสงอาทิตย์ ในอดีตจนถึงปัจจุบันนั้นได้เริ่มมีการใช้ประโยชน์จากพลังงานแสงอาทิตย์กันอย่างแพร่หลายมากขึ้น ดังรูปที่ 1.2 จะเห็นได้ว่าในปี 2005-2010 มีการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในการผลิตกระแสไฟฟ้าสูงที่สุด แต่การทดลองในเรื่องตัวจำลองยังไม่แพร่หลายและมีราคาแพงจึงนำมาสู่การศึกษาและการทำปริญญานิพนธ์ในครั้งนี้ [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์และตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ในรูปแบบอนุกรม และขนาน
2. เพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้โปรแกรม Orcad 9.1 ในการออกแบบวงจร
3. เพื่อศึกษากราฟคุณลักษณะทางไฟฟ้าของวงจรจำลองเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับตัวเซลล์แสงอาทิตย์จริง
4. เพื่อศึกษาคุณลักษณะทางไฟฟ้าในสภาพแวดล้อมความเข้มแสง และอุณหภูมิต่างๆ
5. เพื่อส่งเสริมให้มีการพัฒนาพลังงานทดแทนในด้านพลังงานแสงอาทิตย์และส่งเสริมเทคโนโลยีประหยัดพลังงาน

1.3 ขอบเขตการวิจัย

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ โดยจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม Orcad 9.1 โดยการจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้าสูงสุด 50 วัตต์ โดยมีสัญญาณเอาต์พุตของตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่สามารถเปลี่ยนแปลงตามสภาพแวดล้อมได้ เพื่อพิจารณาค่าความเหมาะสมในการนำไปใช้ประโยชน์ในการจ่ายกำลังไฟฟ้า และการนำไปประยุกต์ใช้ในการตอบสนองต่อสภาพแวดล้อม

1.4 ขั้นตอนการศึกษา

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้ประกอบด้วย ขั้นตอนวิธีการศึกษาที่สำคัญดังต่อไปนี้

1. ศึกษาหาข้อมูลคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์ และแบบจำลองแสงอาทิตย์ในรูปแบบอนุกรม และขนาน รวมถึงศึกษาข้อมูลจากงานวิจัยในเรื่องใกล้เคียง
2. ทำการจำลองแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้โปรแกรม Orcad 9.1 ในการจำลองและวางแผนผังของวงจรการจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ในรูปแบบ อนุกรม และขนาน
3. ทำการทดลองจริงโดยสร้างแบบจำลองตามที่ได้ออกแบบไว้
4. ทำการวัดค่ากราฟคุณลักษณะทางไฟฟ้าโดยใช้ Oscilloscope ในการแสดงค่ากราฟคุณลักษณะเพื่อแสดงค่าที่ใกล้เคียงกับค่าจริงของแผงเซลล์แสงอาทิตย์
5. ทำการบันทึกค่าผลการทดลองและสรุปผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ประโยชน์คาดว่าจะได้รับการวิจัย

ในการศึกษาและทดลองวงจรจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ มีประโยชน์หลักๆ ดังนี้

1. ได้เรียนรู้ถึงการจำลองเซลล์แสงอาทิตย์โดยการเปรียบเทียบค่าทางคุณลักษณะทางไฟฟ้าของตัวเซลล์แสงอาทิตย์จริงในรูปแบบอนุกรม และขนาน
2. สามารถนำหลักการในการสร้างชุดจำลองเซลล์แสงอาทิตย์มาพัฒนา เพื่อสร้าง วงจรจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ ที่สามารถใช้ในการประเมินถึงความสภาวะแวดล้อม ก่อนสร้างโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ได้
3. เป็นการเพิ่มแนวทางการประยุกต์การใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์ในรูปแบบอนุกรม และขนาน เพื่อสามารถใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์ให้มีประสิทธิภาพ และประโยชน์สูงสุดต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

เนื้อหาในบทนี้ได้นำเสนอหลักการและทฤษฎีพื้นฐานต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการวิจัยซึ่งประกอบไปด้วยหัวข้อหลักๆดังต่อไปนี้

- เซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic/PV)
- ตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์
- แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซลล์แสงอาทิตย์
- วงจรการใช้งานพื้นฐานของออปแอมป์
- หลักการออกแบบวงจรขยายกระแสไฟโต้ไดโอด

2.2 เซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic/PV)

2.2.1 ทฤษฎีของเซลล์แสงอาทิตย์

เป็นสิ่งประดิษฐ์กรรมทางอิเล็กทรอนิกส์ ที่สร้างขึ้นเพื่อเป็นอุปกรณ์สำหรับเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า โดยการนำสารกึ่งตัวนำสองชนิด อาทิเช่น ซิลิกอน ซึ่งมีราคาถูกที่สุด และมีมากที่สุดบนพื้นโลกมาผ่านกระบวนการทางวิทยาศาสตร์เพื่อผลิตให้เป็นแผ่นบางบริสุทธิ์ และทันทีที่แสงตกกระทบบนแผ่นเซลล์ รังสีของแสงที่มีอนุภาคของพลังงานประกอบที่เรียกว่า โฟตอน (Proton) จะถ่ายเทพลังงานให้กับอิเล็กตรอน (Electron) คือ ปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิก (Photovoltaic) ในสารกึ่งตัวนำจะมีพลังงานมากพอที่จะกระโดดออกมาจากแรงดึงดูดของอะตอม (atom) และเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ ดังนั้นเมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ครบวงจรจะทำให้เกิดไฟฟ้ากระแสตรงขึ้น [4] , [8]

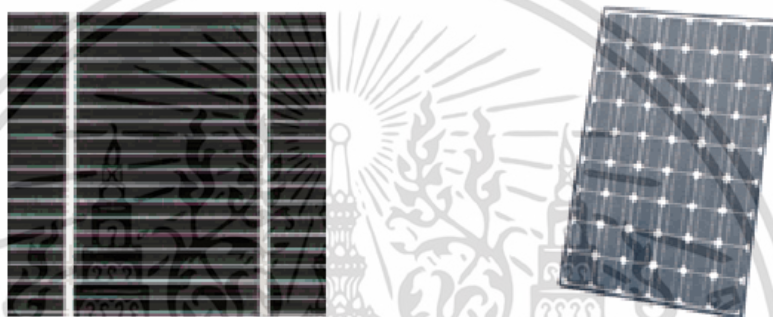
ปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์ มีอยู่หลายชนิด หลายรูปแบบ โดยแบ่งออกได้หลายชนิด ดังนี้

1. เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิกอน
2. เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกโพลีซิลิกอน
3. เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1.1 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิกอน

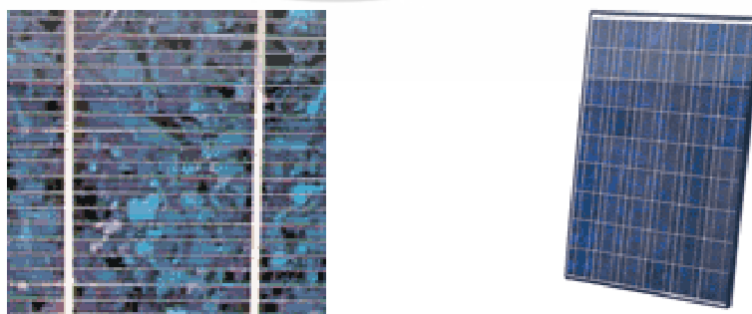
เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ปัจจุบันมีการผลิตใช้งานมากที่สุด ทำมาจากซิลิกอนที่มีระนาบเดียวกันตลอดทั้งชิ้นงาน โดยที่ความหนาของแผ่นซิลิกอนนั้น มีค่าน้อยมาก ทำให้มีน้ำหนักเบา และเป็นวัสดุที่ทนต่อแรงเค้นแม้จะมีความหนาเพียง 50 μm ก็ยังคงสภาพเป็นแผ่นได้ดีดังแสดงในรูป 2.1 เซลล์ชนิดนี้จะมีประสิทธิภาพมากกว่าเซลล์ชนิดอื่นๆ โดยที่ลักษณะสมบัติการผลิตไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงตามอายุการใช้งานน้อยมาก อายุการใช้งานนานถึง 20 ปี ซึ่งความก้าวหน้าในปัจจุบัน สามารถผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ให้มีประสิทธิภาพสูง 44% [4] ,[8]



รูปที่ 2.1 ลักษณะเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิกอน [4] ,[8]

2.2.1.2 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกโพลีซิลิกอน

เซลล์ชนิดนี้ทำมาจากซิลิกอนที่ในผลึกจะมีระนาบของผลึกหลายชนิดปะปนอยู่ในราวเดียวกัน ดังแสดงในรูป 2.2 เมื่อดูด้วยตาเปล่า จะเห็นความแตกต่างของสีในแต่ละระนาบ อย่างชัดเจน เทคโนโลยีในปัจจุบันสามารถผลิตโพลีซิลิกอน สามารถทำให้มีประสิทธิภาพสูงกว่า 14% ซึ่งมีราคา ถูกกว่าแบบผลึกเดี่ยว มีอายุการใช้งานถึง 20 ปี ซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันมากในปัจจุบัน [4] ,[8]



รูปที่ 2.2 ลักษณะเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกโพลีซิลิกอน [4] ,[8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1.3 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิกอน

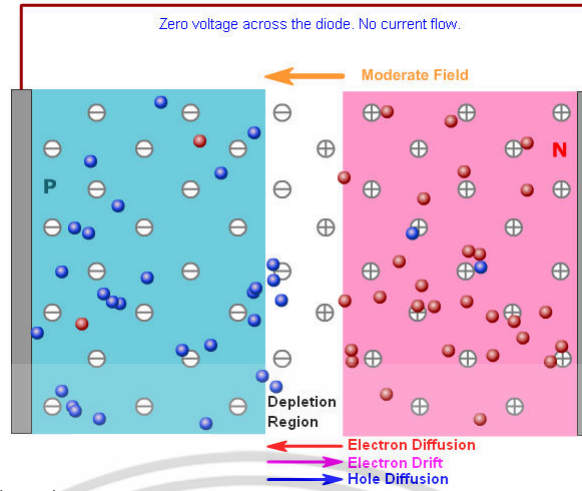
เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้จะเป็นแบบฟิล์มบาง ซึ่งผลิตจากอะมอร์ฟัสซิลิกอน ที่เรียงตัวกันแบบไม่เป็นระเบียบ ข้อดีของอะมอร์ฟัสซิลิกอน ก่อคือ มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ดี ผลิตได้ง่าย สามารถผลิตที่อุณหภูมิต่ำประมาณ 200 - 300 องศาเซลเซียส ราคาถูก ใช้ในพื้นที่ที่แสงน้อยได้ดี ประสิทธิภาพมีค่าอยู่ประมาณ 14% อายุการใช้งานอยู่ที่ประมาณ 10 ปี ส่วนมากจะใช้อยู่ใน เครื่องคิดเลข หรืออุปกรณ์พกพา [4] ,[8]



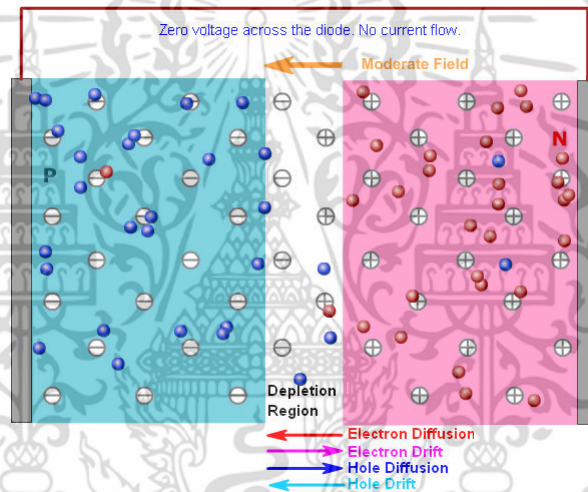
รูปที่ 2.3 ลักษณะเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิกอน [4] ,[8]

2.2.2 หลักการทำงานโดยทั่วไปของเซลล์แสงอาทิตย์

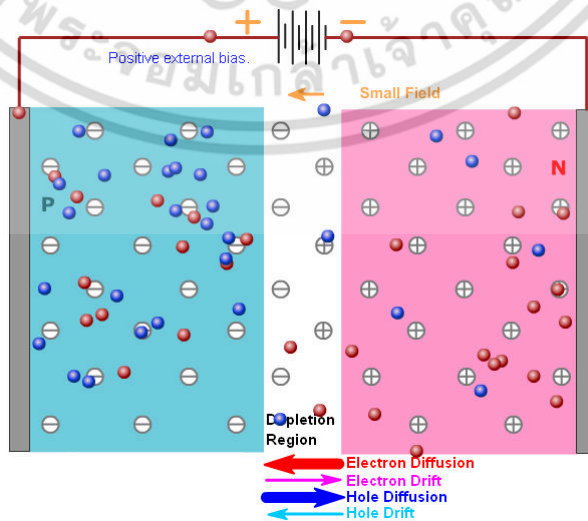
เมื่อสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น และชนิดพีมาต่อเข้าด้วยกัน จะได้ลักษณะของแถบพลังงานซึ่ง อยู่ในสถานะของสมดุลความร้อน และเมื่อมีแสงมาตกกระทบที่บริเวณปลอดพาหะ นั้นจะทำให้เกิด คู่ อิเล็กตรอนโฮลขึ้น ดังรูปที่ 2.4 ทั้งนี้ต้องขึ้นอยู่กับพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยว่า จะเพียงพอที่จะ กระตุ้นให้อิเล็กตรอนสามารถเปลี่ยนระดับพลังงานขึ้นไปยังแถบตัวนำได้หรือไม่ ถ้าพลังงานมากพอก็จะ กระตุ้นให้อิเล็กตรอนเปลี่ยนระดับพลังงานขึ้นไปยังแถบตัวนำ และเหลือโฮล ที่แถบวาเลนซ์ ที่บริเวณปลอดพาหะนั้นจะมีสนามไฟฟ้าอยู่ ซึ่งจะมีทิศทางจากสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ไปยังสารกึ่งตัวนำชนิดพี สนามไฟฟ้านี้เองจะเป็นตัวนำให้อิเล็กตรอนที่เกิดจากแสงให้เคลื่อนที่ ไปยังด้านเอ็น ในขณะที่โฮลก็จะเคลื่อนที่ไปยังด้านพี โดยการเคลื่อนที่ของประจุพาหะ อิเล็กตรอน ดังรูปที่ 2.6



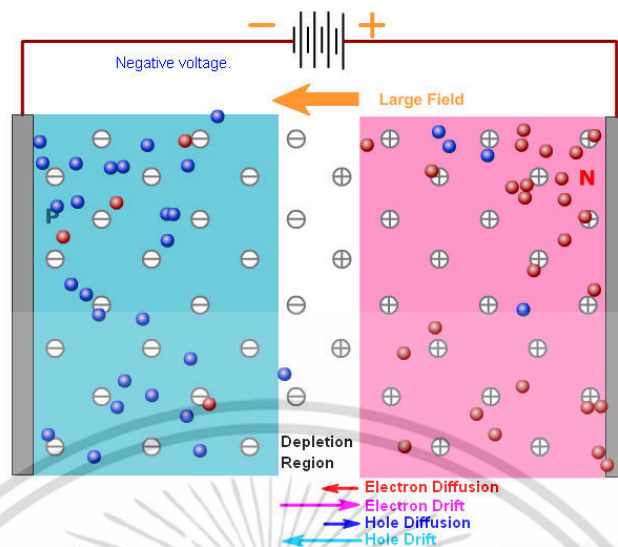
รูปที่ 2.4 การเคลื่อนที่ของประจุพาหะอิเล็กตรอน และโฮลภายใต้สนามไฟฟ้า สภาพปกติ



รูปที่ 2.5 การเคลื่อนที่ของประจุพาหะอิเล็กตรอน และโฮลภายใต้สนามไฟฟ้า ที่สภาวะสมดุล



รูปที่ 2.6 การเคลื่อนที่ของประจุพาหะอิเล็กตรอน และโฮลภายใต้สนามไฟฟ้า ที่สภาวะ Forward bias เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



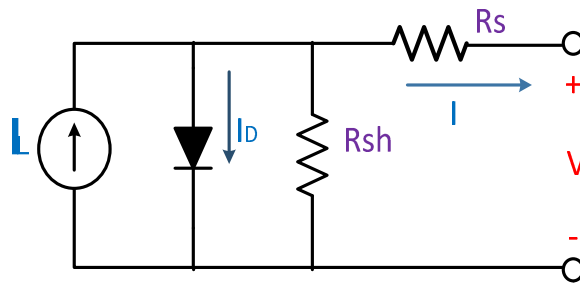
รูปที่ 2.7 การเคลื่อนที่ของประจุพาหะอิเล็กตรอน และโฮลภายใต้สนามไฟฟ้า ที่สภาวะ Reverse bias

การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนไปยังบริเวณผลึกชนิดเอ็นทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าได้ดังในรูปที่ 2.6 เมื่อต่อเข้ากับวงจรภายนอกจะทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านตลอดวงจรการเคลื่อนที่ไปยังวงจรมานอกของอิเล็กตรอน ในกรณีของสารกึ่งตัวนำโดยผ่านวัสดุตัวนำที่ติดอยู่กับผิวด้านหน้าของเซลล์ในเวลาเดียวกันโฮลจะเคลื่อนที่ไปในทิศทางตรงข้ามผ่านเนื้อเซลล์จนถึงวัสดุตัวนำอีกส่วนหนึ่งที่ติดติดอยู่กับด้านล่างของเซลล์ ทำให้ครบวงจรโดยร่วมกับอิเล็กตรอนที่อยู่อีกด้านหนึ่งของวงจรมานอกแต่ในทางตรงข้ามการไหลของอิเล็กตรอนจะไม่เกิดขึ้นหากไม่สามารถทำให้ครบวงจรได้ [3], [8]

2.2.3 คุณสมบัติและความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

จากลักษณะโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ ในรูปที่ 2.5 สามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ สามารถเขียนในรูปแบบของวงจรไฟฟ้าสมมูลเซลล์แสงอาทิตย์ดังแสดงรูปที่ 2.8 ประกอบไปด้วย แหล่งจ่ายกระแสที่เปลี่ยนแปลงตามแสงอาทิตย์จริง นั่นคือ กระแสของเซลล์แสงอาทิตย์ (I_L) ความต้านทานอนุกรมภายในเซลล์ (R_s) ความต้านทานขนาน (R_{sh}) และรอยต่อพีเอ็นของไดโอด โดยกระแส I_L ที่เกิดขึ้นจากแสงนี้จะถูกแบ่งให้ผ่านไดโอดและ R_{sh} และจึงไหลผ่านโหลด R_L กระแสที่ไหลผ่าน R_s และ R_L ให้มีค่าเป็น I_0 เขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ (2.1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 การต่อวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์

ในรูป 2.8 เป็นวงจรสมมูลที่ถูกใช้ในการคำนวณสำหรับเซลล์แต่ละตัว ซึ่งเซลล์แต่ละเซลล์ จะนำไปประกอบเป็นแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อให้เกิดกำลังไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งจะกล่าวถึงลักษณะ การต่อเซลล์ในหัวข้อถัดไป จากรูปที่ 2.8 สามารถแสดงความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ 5 ตัว ได้แก่ I_L , I_0 , R_s , R_{sh} ดังสมการที่ 2.1

$$I = I_L - I_D - I_{SH} = I_L - I_0 \left\{ \exp \left[\frac{V + IR_s}{a} \right] - 1 \right\} - \frac{(V + IR_s)}{R_{sh}} \quad (2.1)$$

- โดยที่ I คือ กระแสไฟฟ้าขาออกมีหน่วยเป็นแอมแปร์
 I_L คือ กระแสไฟฟ้าที่เกิดจากแหล่งพลังงานแสงมีหน่วยเป็นแอมแปร์
 I_D คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านไดโอดมีหน่วยเป็นแอมแปร์
 I_{SH} คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านความต้านทาน Shunt มีหน่วยเป็นแอมแปร์
 V คือ แรงดันไฟฟ้าขาออกมีหน่วยเป็นโวลต์
 I คือ กระแสไฟฟ้าขาออกมีหน่วยเป็นแอมแปร์
 R_s คือ ความต้านทานอนุกรมมีหน่วยเป็นโอห์ม

และแรงดันไฟฟ้าดังสมการ

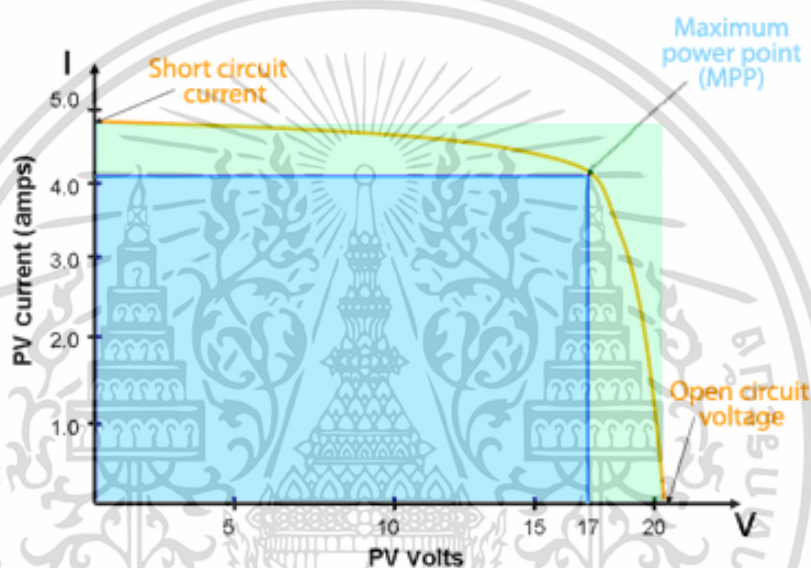
$$V_j = V + IR_s \quad (2.2)$$

และกำลังไฟฟ้าได้ดังสมการ

$$P = IV \quad (2.3)$$

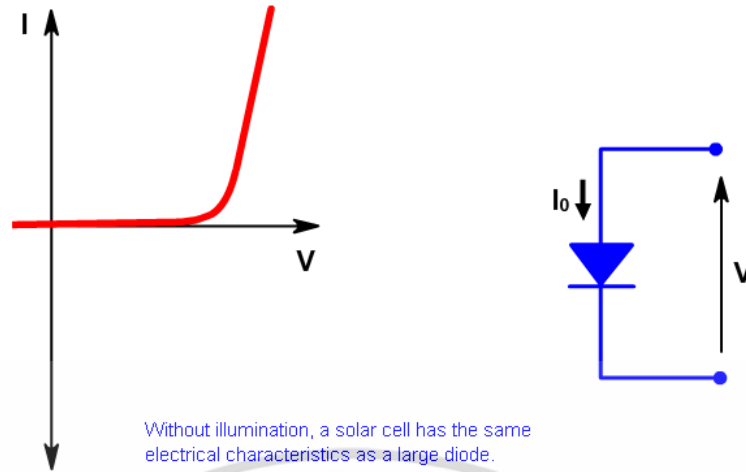
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พารามิเตอร์ที่บ่งบอกประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ประกอบด้วยกระแสลัดวงจร (I_{SC}) แรงดันเปิดวงจร (V_{OC}) รูปที่ 2.9 แสดงกระแสลัดวงจรและแรงดันเปิดวงจรคือ กระแสไฟฟ้าขณะที่แรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเป็นศูนย์เป็นค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุด และแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรคือ แรงดันไฟฟ้าขณะที่ไม่มีกระแสไฟฟ้า ซึ่งเป็นค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุด นอกจากนี้มีพารามิเตอร์เกี่ยวกับความต้านทานในเซลล์แสงอาทิตย์เป็นประโยชน์ต่อการติดตามพฤติกรรมของเซลล์แสงอาทิตย์ และการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์โดยคิดจากสัดส่วนระหว่างค่าแรงดันที่จุดสูงสุดต่อกระแสที่จุดทำงานสูงสุดหรืออาจใช้สัดส่วนระหว่างค่าแรงดันวงจรเปิดต่อกระแสลัดวงจร

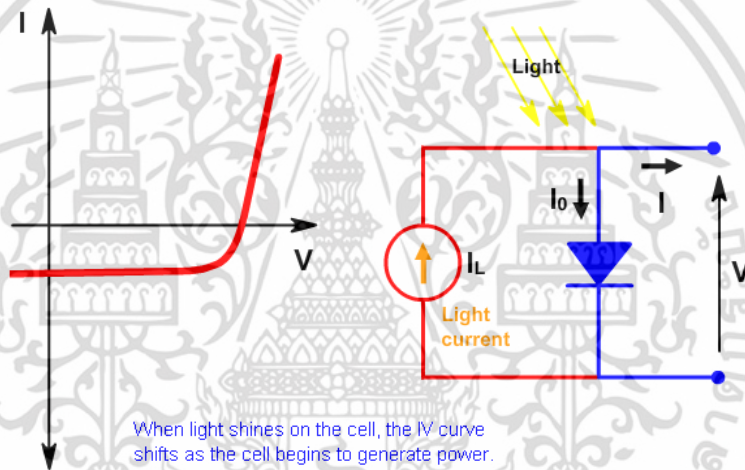


รูปที่ 2.9 กราฟแสดงคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ [3]

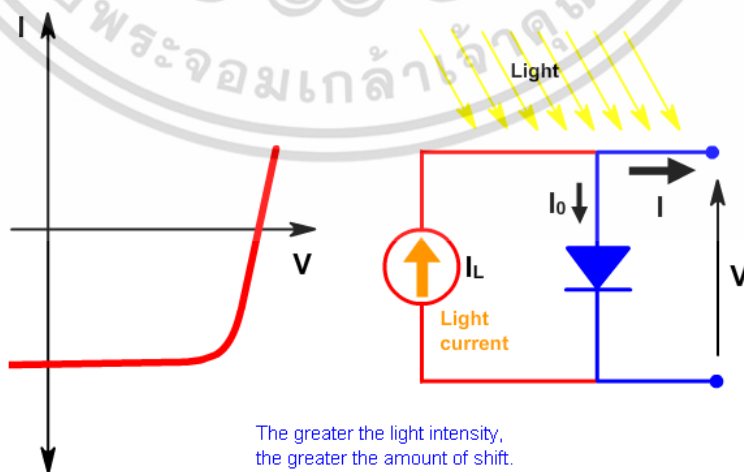
เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์มีโครงสร้างเป็นรอยต่อแบบพี - เอ็น เช่นเดียวกันรอยต่อภายในไดโอด ดังนั้นคุณสมบัติทางแสงของเซลล์ในขณะที่ยังไม่ได้รับแสงอาทิตย์ จึงเหมือนกับไดโอดทั่วไป เพียงแต่มีกระแสรั่วไหลที่รอยต่อมากกว่าเท่านั้น จากรูปที่ 2.10 - 2.13 ซึ่งแสดงลักษณะการเคลื่อนที่ของ ประจุพาหะอิเล็กตรอนและโฮลในสารกึ่งตัวนำที่สภาวะต่างๆไว้ นอกจากนี้เซลล์แสงอาทิตย์ยังมีพื้นที่รอยต่อมากกว่า ในขณะที่เซลล์ได้รับแสงทิศทางไหลของกระแสที่ผ่านรอยต่อของเซลล์จะตรงกันข้ามขณะที่ยังไม่ได้รับแสง โดยที่แรงดันยังมีลักษณะเหมือนเดิมดังรูปที่ 2.12 และ 2.13



รูปที่ 2.10 กราฟคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อไม่มีแสงตกกระทบ [3]

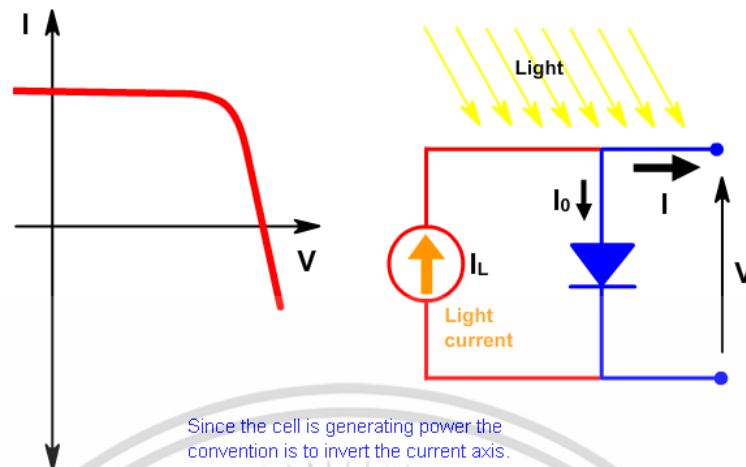


รูปที่ 2.11 กราฟคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อแสงตกกระทบเพียงเล็กน้อย [3]



รูปที่ 2.12 กราฟคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อแสงตกกระทบปริมาณมาก [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 กราฟคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อประพจน์ตัวเป็นเซลล์แสงอาทิตย์จริง [3]

ผลคูณของกระแส และแรงดันที่จุดพลังงานสูงสุดจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความชันในกราฟ คือ ถ้ากราฟมีความชันมากลักษณะที่ได้จะใกล้เคียงสี่เหลี่ยมมาก ผลคูณของกระแสและแรงดันจะมีค่าตามไปด้วย การที่กราฟของเซลล์แสงอาทิตย์มีความชันต่างกันนั้นเป็นผลมาจากความต้านทานภายในเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งแต่ละเซลล์จะมีค่าที่แตกต่างกัน จากกราฟคุณสมบัติของเซลล์นี้จะมีค่าๆ หนึ่งที่แสดงให้เห็นว่าเซลล์สามารถจ่ายพลังงานไฟฟ้าออกมาใกล้เคียงกับค่าในอุดมคติมากเท่าใด ค่านี้จะเรียกว่าค่า “ฟิลแฟกเตอร์” (FF. : Fill Factor) ดังแสดงในรูปที่ 2.9 และสมการ (2.4) [3]

$$F.F. = \frac{P_m}{P_o} = \frac{V_{mp} \times I_{mp}}{V_{oc} \times I_{sc}} \quad (2.4)$$

โดยที่	F.F.	คือ	ค่าฟิลแฟกเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์
	P_m	คือ	พลังงานสูงสุดที่ได้รับจากเซลล์จริง
	I_m	คือ	กระแสสูงสุดที่ได้รับจากเซลล์
	V_m	คือ	แรงดันสูงสุดที่ได้รับจากเซลล์
	P_o	คือ	พลังงานสูงสุดที่ได้รับจากเซลล์ในทางอุดมคติ
	I_{sc}	คือ	ค่ากระแสลัดวงจร
	V_{oc}	คือ	แรงดันขณะเปิดวงจร

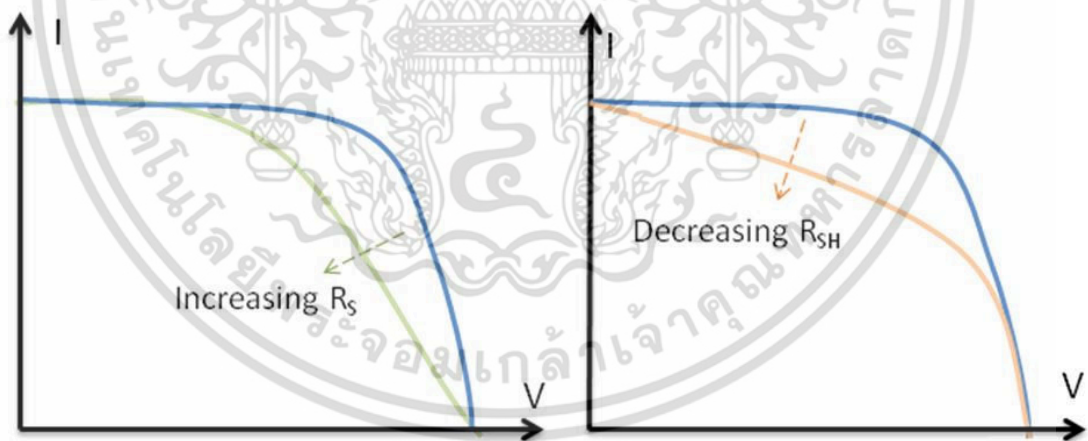
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ FF คือ ค่า Fill Factor เป็นค่าบอกถึง คุณภาพของรอยต่อ (ความต้านทาน) การรั่วไหลของกระแสที่รอยต่อ เป็นต้นถ้าค่า FF มีค่ามากและใกล้เคียง 1 หมายถึง เซลล์แสงอาทิตย์นั้นมีคุณภาพสูง ซึ่งส่งผลกับประสิทธิภาพดังสมการ

$$\eta = \frac{FF \times V_{oc} \times I_{sc}}{P_{in}} \quad (2.5)$$

2.2.4 ปัจจัยต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์

ปัจจัยต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์นั้น มีทั้งปัจจัยภายในและปัจจัยภายนอก อาทิ เช่น อุณหภูมิ ความเข้มรังสีอาทิตย์ ความต้านทาน Shunt และความต้านทานอนุกรม โดยปัจจัยภายในเซลล์ ได้แก่ ความต้านทานอนุกรม และความต้านทาน Shunt โดยที่ความต้านทานอนุกรมที่เพิ่มขึ้นจะทำให้แรงดันขาออกมีค่าลดลงแต่ไม่มีผลต่อค่าแรงดันเปิดวงจร แต่ความต้านทานอนุกรมจะทำให้ค่ากระแสลัดวงจรมีค่าลดลงและ I-V Curve เป็นเส้นตรง ค่าความต้านทาน Shunt ลดลงมากจะเป็นผลทำให้แรงดันเปิดวงจรและกระแสลัดวงจรมีค่าลดลง และค่าฟิลด์แฟกเตอร์ลดลง เช่นเดียวกับกรณีของความต้านทานอนุกรมรูปที่ 2.14

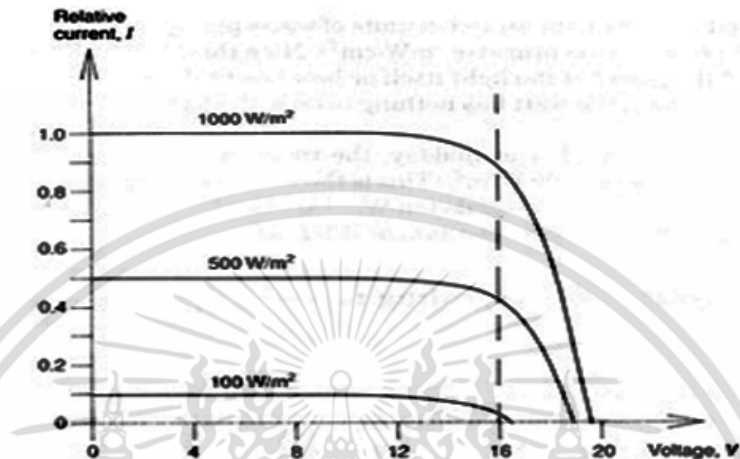


รูปที่ 2.14 ผลของความต้านทานอนุกรม และความต้านทาน Shunt ต่อลักษณะกระแสและแรงดันเซลล์แสงอาทิตย์ [3]

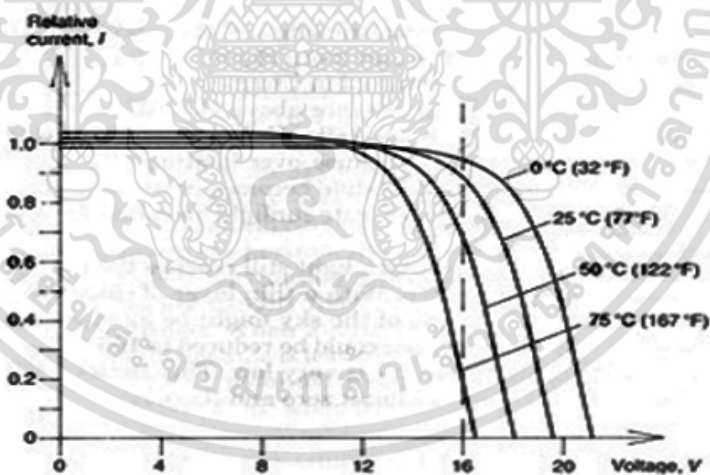
ปัจจัยภายนอกที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งปัจจัยนี้จะส่งผลโดยตรงต่อค่ากระแสลัดวงจร และแรงดันเปิดวงจร อาทิเช่น ความเข้มแสง และอุณหภูมิ โดยค่าของกระแสลัดวงจร จะแปรผันตามความเข้มแสง ถ้าความเข้มแสงมีค่าสูงขึ้น จะส่งผลให้ค่ากระแสลัดวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าสูงขึ้น ในอีกทางหนึ่ง ถ้าความเข้มแสงมีค่าลดลง ค่ากระแสลัดวงจรจะมีค่าน้อยลงตาม แต่จะส่งผลต่อแรงดันเปิดวงจรเพียงเล็กน้อย ดังรูปที่ 2.15 และแรงดันเปิดวงจรจะแปรผกผันตามกับอุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น จะส่งผลให้แรงดันเปิดวงจรมีค่าน้อยลง ค่ากระแสลัดวงจรมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.15 ผลของความเข้มแสงต่อลักษณะกระแสและแรงดันเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 2.16 ผลของอุณหภูมิต่อลักษณะกระแสและแรงดันเซลล์แสงอาทิตย์

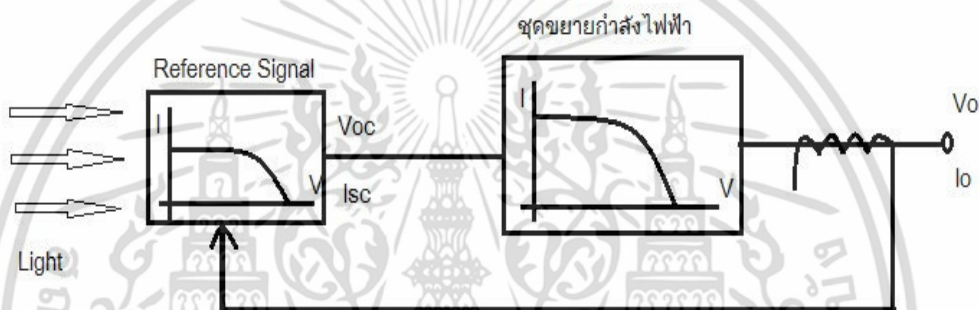
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 ตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์

2.3.1 หลักการทำงาน

จากทฤษฎีความเข้มแสงและอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง ทำให้เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีคุณลักษณะทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตาม ทำให้เกิดงานวิจัยเพื่อสร้างตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้สำหรับศึกษาคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

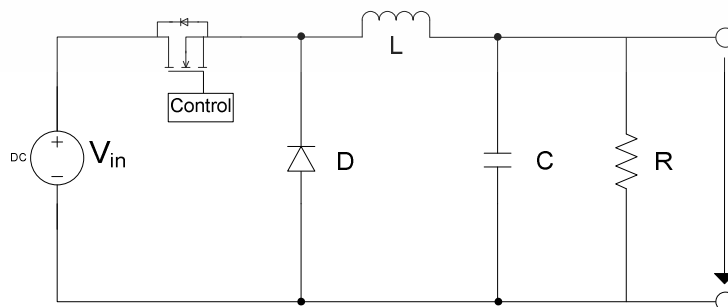
จากการศึกษาวิจัยที่ผ่านมาพบว่าตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์โดยทั่วไปอาศัยการขยายตัวกำลังไฟฟ้าของสัญญาณขนาดเล็กของเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิง โดยมีการควบคุมให้เซลล์แสงอาทิตย์ขนาดเล็กทำงานได้อย่างถูกต้อง มีส่วนประกอบสำคัญมีอยู่ 2 ส่วนด้วยกัน คือ



รูปที่ 2.17 แสดงหลักการทำงานของตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ [8], [9]

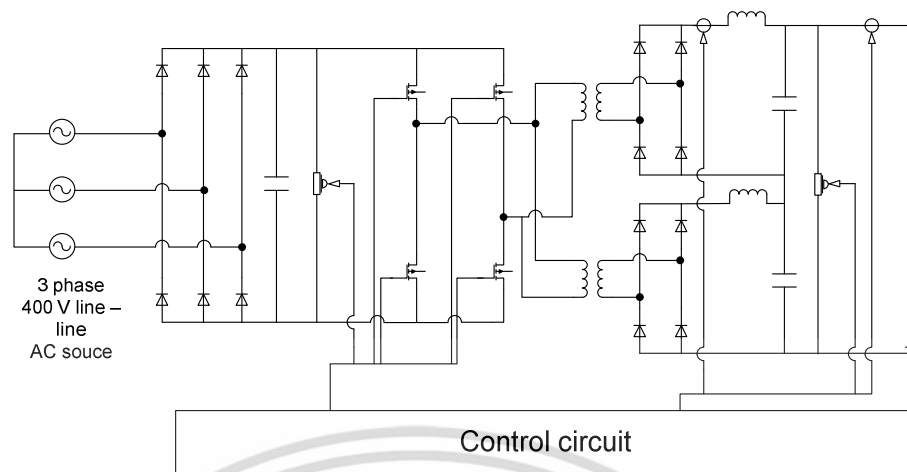
2.3.2 ชดชยายกำลังไฟฟ้า

ทำหน้าที่ขยายพิกัดกำลังไฟฟ้าให้ตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์สามารถจ่ายพิกัดกำลังไฟฟ้าได้สูงขึ้นตามการออกแบบไว้ ซึ่งพิจารณาจากขนาดพิกัด ของกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของตัวจำลอง เซลล์แสงอาทิตย์ โดยส่วนมากนิยมใช้วงจรบั๊กคอนเวอร์เตอร์ แบบฟูลบริดจ์ คอนเวอร์เตอร์ ที่จะให้ กำลังสูงสุดเทียบเท่ากับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า



รูปที่ 2.18 วงจรบั๊กคอนเวอร์เตอร์ที่นำมาใช้สร้างชดชยายกำลังไฟฟ้า [8], [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.19 วงจรฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ที่นำมาใช้สร้างชุดขยายกำลังไฟฟ้า [8], [9]

2.3.3 ชุดสร้างสัญญาณอ้างอิง

ใช้สำหรับสร้างสัญญาณ เซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิงให้กับชุดขยายกำลังไฟฟ้า โดยสัญญาณที่ถูกสร้างขึ้นจะเป็นสัญญาณที่มี คุณลักษณะทางไฟฟ้าเช่นเดียวกับเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งสัญญาณดังกล่าวสามารถ ควบคุมจุดทำงานได้ ด้วยการป้อนกลับจากเอาต์พุตของตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ พอว่าเทคนิค การสร้างสัญญาณอ้างอิง ของเซลล์แสงอาทิตย์สามารถแบ่งออกเป็น 2 เทคนิค คือ

2.3.3.1 เทคนิคการสร้างสัญญาณอ้างอิงโดยใช้สัญญาณอะนาล็อก

เป็นการสร้างสัญญาณแสงอาทิตย์อ้างอิงจากเซลล์แสงอาทิตย์จริง มีการใช้ ชุด วงจรอะนาล็อกเพื่อสร้างคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ แล้วจึงนำไปขยายกำลังไฟฟ้า ให้ มีพิกัดสูงขึ้น เงื่อนไขดังกล่าวทำให้นิยมใช้เทคนิคนี้ในการสร้างตัวจำลองที่มีขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้า ค่อนข้างต่ำ

2.3.3.1.1 การสร้างสัญญาณอ้างอิงโดยใช้การเปลี่ยนโหนด

วิธีนี้เป็นการควบคุมอุปกรณ์ เช่น มอสเฟต หรือทรานซิสเตอร์ มาเป็นโหนด ให้กับเซลล์แสงอาทิตย์ จากนั้นจึงนำสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากสภาวะการทำงานของ เซลล์แสงอาทิตย์ไปขยายกำลังไฟฟ้าให้สูงขึ้น ซึ่งเทคนิคนี้จะให้สัญญาณอ้างอิงใกล้เคียงกับคุณลักษณะทาง ไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์มาก แต่เนื่องจากอุปกรณ์ที่นำมาใช้เป็นโหนดต้องมีการออกแบบในโหมด ความต้านทาน ที่ต้องเหมาะสมกับจุดทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิง ทำให้การออกแบบซับซ้อน

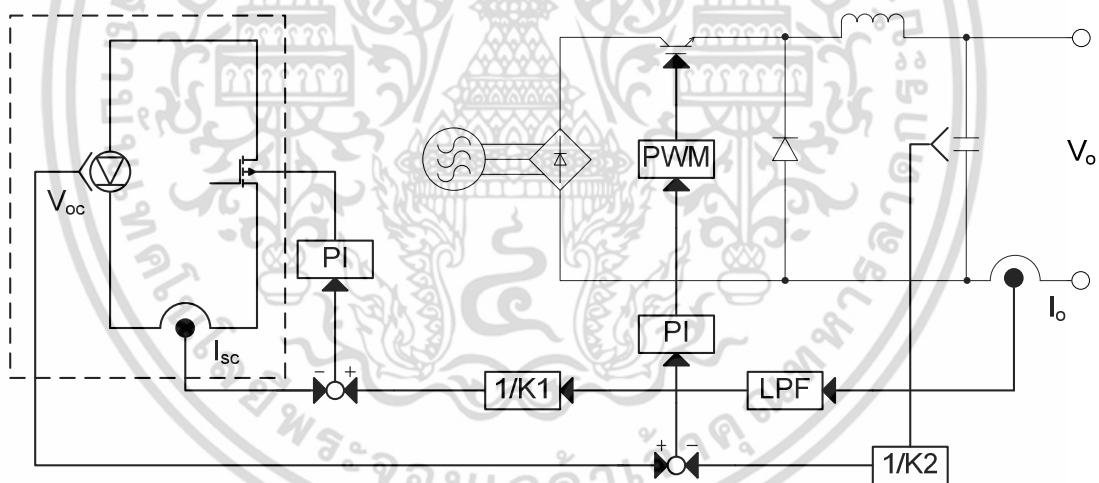
เพิ่มมากขึ้น ดังไดอะแกรมการทำงาน รูปที่ 2.20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.20 เป็นการนำมอสเฟตมาใช้แทนโหลดปรับค่าได้โดยควบคุมให้มอสเฟตทำงานที่โหมดความต้านทานโดยอาศัยการป้อนกลับจากกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต (I_o) ของ วงจรบีกคอนเวอร์เตอร์และกระแสป้อนกลับจากชุดสร้างสัญญาณเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิง (I_{sc}) ในขณะที่แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมจุดทำงานเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิงจะถูกขยายสัญญาณด้วยวงจร บีกคอนเวอร์เตอร์ โดยอัตราขยายแรงดันไฟฟ้า (K_2) ซึ่งใช้สำหรับควบคุมการทำงานของ IGBT ของวงจรบีกคอนเวอร์เตอร์ และอัตราขยายกระแสไฟฟ้า (K_1) ซึ่งเป็นกระแสที่จุดทำงานของ เซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิง สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.6) ,(2.7) โดยการสร้างสัญญาณด้วย

$$I_o = K_1 \cdot I_{sc} \quad (2.6)$$

$$V_o = K_2 \cdot V_{oc} \quad (2.7)$$



รูปที่ 2.20 แสดงหลักการทำงานของตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่อาศัยค่าที่ได้จากการวัดจริง [8], [9]

ขยายสัญญาณด้วยบีกคอนเวอร์เตอร์ อัตราส่วนขยายแรงดันไฟฟ้า (K_2) ใช้ควบคุมการทำงานของ IGBT ของวงจรบีกคอนเวอร์เตอร์ และอัตราส่วนขยายกระแสไฟฟ้า (K_1) เป็นกระแสที่จุดทำงานของ เซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิง การสร้างสัญญาณด้วยวิธีนี้จะมีจุดเด่นและจุดด้อยในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงจุดเด่นจุดด้อยในการสร้างสัญญาณเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิงด้วยเทคนิค
การเปลี่ยนโพลด

จุดเด่น	จุดด้อย
<ol style="list-style-type: none"> ใช้ระบบควบคุมแบบพื้นฐานสามารถออกแบบและใช้งานได้จริง สามารถแสดงคุณลักษณะทางไฟฟ้าใกล้เคียงกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์จริง ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของเซลล์แสงอาทิตย์ที่นำมาใช้ การออกแบบวงจรไม่ซับซ้อนทำให้มีขนาดเล็ก ใช้งบประมาณในการสร้างต่ำ เหมาะสำหรับสร้างตัวจำลองที่มีพิกัดกำลังไฟฟ้าต่ำๆ 	<ol style="list-style-type: none"> เนื่องจากการเป็นารควบคุมแบบอนาล็อกทำให้การปรับแต่งสัญญาณควบคุมยุ่งยาก การใช้งานยุ่งยากเนื่องจากการปรับสภาวะแวดล้อมของเซลล์แสงอาทิตย์จริงอาจมีผลกระทบให้สัญญาณผิดเพี้ยนได้

2.3.2.1.2 การสร้างสัญญาณอ้างอิงโดยใช้วงจรสมมูลอย่างง่าย

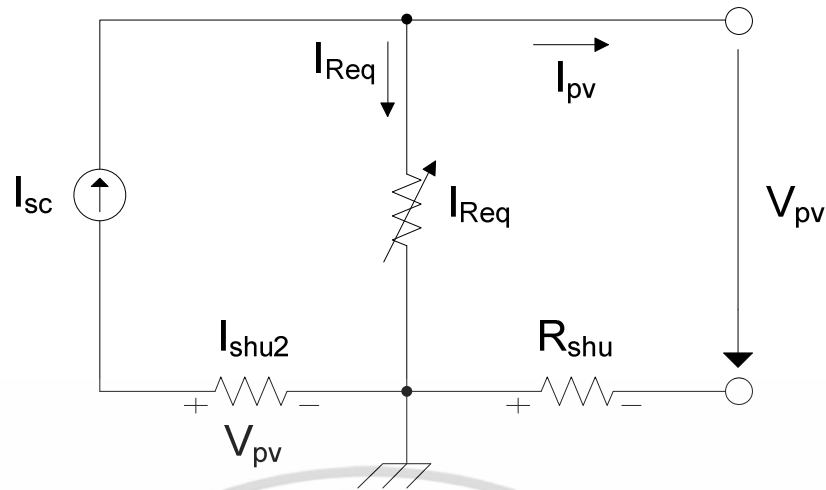
วิธีนี้จะอาศัยคุณสมบัติของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ไม่เป็นเชิงเส้น สามารถทำได้โดยเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าของชุดแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า โดยสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จะขึ้นกับการออกแบบค่าความต้านทาน R_{eq} ภายในวงจรตามสมการที่ (2.8) โดยกรณีที่มีการต่อสวิทช์ช้อนุกรมกับความต้านทาน R_{eq} ควบคุมด้วย Duty cycle (D) เพื่อใช้สำหรับควบคุมการทำงานของความต้านทาน R_{eq} ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต (I_{PV}) และแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต (V_{PV}) ของตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2.9) และสมการ (2.10) โดยหลักการทำงาน ของวิธีนี้สามารถแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.21 เมื่อพิจารณาจากวิธีนี้ พบว่าการกำหนดจุดทำงานเปรียบเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์จะอาศัยคุณสมบัติที่เกิดจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เป็นหลัก ไม่ใช่การใช้สัญญาณที่ได้จากการวัดจริง

$$R_{eq} = \frac{R_{shu}R_{shuz}}{R_{shu} + R_{shuz}D} \quad (2.8)$$

$$V_{PV} = I_{Req} \cdot R_{eq} \quad (2.9)$$

$$I_{Req} = I_{SC} \cdot I_{PV} \quad (2.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.21 แสดงหลักการทำงานของตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์โดยอาศัยวงจรสมมูลอย่างง่าย [8], [9]

ตารางที่ 2.2 แสดงจุดเด่นจุดด้อยในการสร้างสัญญาณเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิงด้วยเทคนิคการใช้วงจรสมมูลอย่างง่าย

จุดเด่น	จุดด้อย
<ol style="list-style-type: none"> 1 วงจรไม่ซับซ้อน 2 ใช้งบประมาณในการสร้างต่ำ 3 เหมาะสำหรับสร้างตัวจำลองที่มีพิกัดกำลังไฟฟ้าต่ำๆ 	<ol style="list-style-type: none"> 1 การเลือกใช้อุปกรณ์ที่มีผลต่อความถูกต้องของสัญญาณเอาต์พุตตัวจำลองเซลล์อาทิตย์ 2 การปรับเปลี่ยนแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าลัดวงจรไม่สามารถควบคุมให้เกิดตามความเข้มแสงที่เหมาะสมได้ 3 สัญญาณเอาต์พุตไม่สามารถให้ค่าที่ถูกต้องเมื่อเปรียบเทียบกับคุณลักษณะทางไฟฟ้าที่ได้จากแผงจริง

2.3.3.2 เทคนิคการสร้างสัญญาณอ้างอิงโดยใช้สัญญาณดิจิทัล

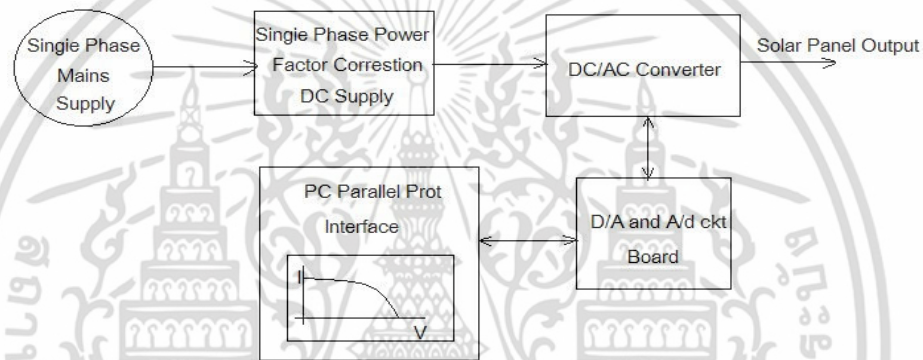
ในเทคนิคนี้จะไม่ใช่เซลล์แสงอาทิตย์จริง แต่จะใช้สัญญาณที่ผ่านการวัดจริง ได้จากการจำลองการทำงานแล้วทำการบันทึกหรือจัดเก็บข้อมูลในชุดสร้างสัญญาณเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิง แล้วจึงนำสัญญาณที่ได้ไปขยายด้วยชุดขยายกำลังไฟฟ้าเนื่องจากเป็นระบบควบคุมแบบดิจิทัลที่สามารถควบคุมสภาวะได้ง่ายเมื่อนำไปใช้งาน โดยการควบคุมแบบดิจิทัลสามารถแบ่งออกได้ 2 เทคนิคตามอุปกรณ์ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2.2.1 การสร้างสัญญาณอ้างอิงด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ในวิธีนี้จะอาศัยการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เช่น โปรแกรม C++ เป็นต้น ซึ่งการสร้างสัญญาณเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิงด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์แบ่งได้เป็นสองวิธีหลักคือ

- สัญญาณอ้างอิงโดยใช้ค่าจุดบนกราฟคุณลักษณะทางไฟฟ้า ที่ได้จากการวัดแผงเซลล์แสงอาทิตย์จริง เพื่อกำหนดจุดเริ่มต้นของสัญญาณอ้างอิง แล้วจึงใช้โปรแกรมในการคำนวณจุดทำงานเกินสัญญาณที่ป้อนกลับจากชุดควบคุมการทำงาน หลักการที่สามารถแสดงให้เห็นได้ดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 แสดงหลักการทำงานของตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่อาศัยค่าที่ได้จากกราฟคุณลักษณะทางไฟฟ้า [8], [9]

ตารางที่ 2.3 แสดงจุดเด่นและจุดด้อยในการสร้างสัญญาณเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิงโดยใช้ค่ากราฟคุณลักษณะลักษณะทางไฟฟ้า

จุดเด่น	จุดด้อย
1. การใช้งานง่ายเนื่องจากการใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการควบคุม	1. วงจรซับซ้อนต้องมีการออกแบบชุดเชื่อมต่อระหว่างคอมพิวเตอร์กับคอนเวอร์เตอร์
2. สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้สูง	2. ใช้งบประมาณในการสร้างสูง
	3. ใช้ค่าจากการวัดที่สภาวะมาตรฐานไม่สามารถเปลี่ยนแปลงสภาวะอุณหภูมิและความเข้มแสงได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การสร้างสัญญาณอ้างอิงโดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์สร้างสัญญาณเทคนิคนี้ จะอาศัยการสร้างสัญญาณจากการจำลองสถานะแวดล้อม โดยสามารถใช้ได้สองวิธี คือ การสร้างสัญญาณจากแบบจำลองพารามิเตอร์ (Parameter model) และการสร้างสัญญาณด้วยวิธีแบบจำลองความเสียหายเนื่องจากการแผ่รังสี (Radiation damage model) ดังแสดง หลักการทำงานของวงจรที่รูป 2.23 ซึ่งทั้งสามวิธีเป็นหลักการคำนวณที่ซับซ้อนโดยการใช้แบบจำลองพารามิเตอร์ จะอาศัยสมการดังนี้

$$I_{PH} = \alpha(1 + \beta T)\phi S \quad (2.11)$$

$$I_O = C_M S T^3 \exp\left(-\frac{E_{GO}}{kT}\right) \quad (2.12)$$

$$I = N_P I_{PH} - N_P I_O \left(\exp\left(B \left(\frac{V}{N_S} + \frac{I R_S}{N_P}\right) - 1\right) \right) \quad (2.13)$$

$$V = N_S \left[B \cdot \ln\left(\frac{(N_P I_{PH} - I)}{N_P I_O} + 1\right) - \frac{I R_S}{N_P} \right] \quad (2.14)$$

เมื่อ	I_{PH}	คือ	ค่ากระแสไฟฟ้ได้ (A)
	T	คือ	ค่าอุณหภูมิ (K)
	α	คือ	ค่า Temperature coefficients ของกระแสไฟฟ้ (% / °C)
	β	คือ	ค่า Temperature coefficients ของแรงดันไฟฟ้ (% / °C)
	ϕ	คือ	ค่าความเข้มแสง (W/m ²)
	S	คือ	พื้นที่แผง (cm ²)
	I_O	คือ	ค่ากระแสอิ่มตัวไดโอด
	E_{GO}	คือ	ค่าแถบความกว้างของพลังงาน (eV)
	K	คือ	ค่าคงที่ Boltzmann (J/K)
	R_S	คือ	ความต้านทานอนุกรม (Ω)
	N_S	คือ	จำนวนเซลล์ที่ต่ออนุกรมใน 1 แผง
	N_P	คือ	จำนวนเซลล์ที่ต่ออนุกรมใน 1 แผง

ในขณะที่แบบจำลองด้วย Interpolation จะใช้ในกรณีที่ไม่สามารถใช้แบบจำลองพารามิเตอร์ในการหาค่าได้ จึงได้มีการสร้างสมการเพื่อใช้ในการคำนวณค่าคงที่ C_1 และ C_2 ได้ดังนี้

$$C_1 = \left(1 - \frac{I_{mp}}{I_{sc}}\right) \cdot \exp\left(\frac{-V_{mp}}{C_2 V_{oc}}\right) \quad (2.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$C_2 = \frac{\left(\frac{V_{mp}}{V_{OC}} - 1\right)}{\ln\left(1 - \frac{I_{mp}}{I_{SC}}\right)} \quad (2.16)$$

โดยผลที่เกิดในพารามิเตอร์ไดโอด D_1 และ V_R จะเป็นผลที่เกิดในความสัมพันธ์ของอุณหภูมิ ดังแสดง ในสมการ

$$D_1 = \alpha\phi(T - T_{REF}) + I_{SC}(\phi - 1) \quad (2.17)$$

$$V_R = V + \beta(T - T_{REF}) + R_S D_1 \quad (2.18)$$

โดยวิธีนี้จะให้กระแสไฟฟ้าเอาต์พุตและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตได้จาก

$$I_{SC\psi} = I_{SC0} - C_i \cdot \log\left[1 + \frac{\psi}{\psi_x}\right] \quad (2.19)$$

$$V_{OC} = V_{OC0} - C_v \cdot \log\left[1 + \left(\frac{\psi}{\psi_x}\right)^{0.8}\right] \quad (2.20)$$

เมื่อ I_{SC0} คือ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจรที่ค่าเริ่มต้น (mA/cm^2)

$I_{SC\psi}$ คือ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจรที่ค่าเริ่มต้น (mA/cm^2)

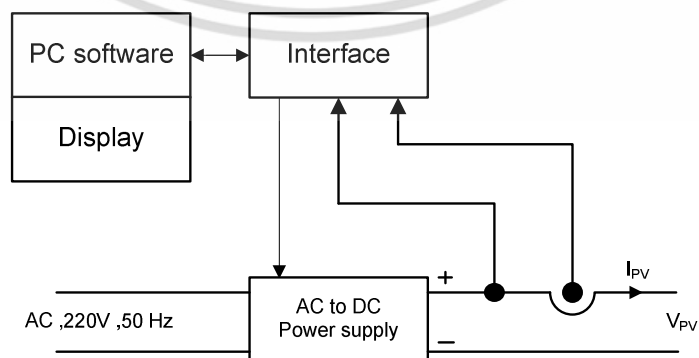
C_i คือ ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับชนิดของเซลล์

C_v คือ ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับชนิดของเซลล์

ψ คือ ค่าคลื่นรังสีที่ส่งผ่าน

ψ_x คือ ค่าคลื่นรังสีที่ส่งผ่านเริ่มต้น

ซึ่งทั้งสามวิธีขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งานในการสร้างสัญญาณ ซึ่งสัญญาณที่ได้จะมีลักษณะใกล้เคียงอุดมคติมาก และสามารถแสดงจุดเด่นและจุดด้อยได้ดังตารางที่ 2.4



รูปที่ 2.23 หลักการทำงานของตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ [8], [9]

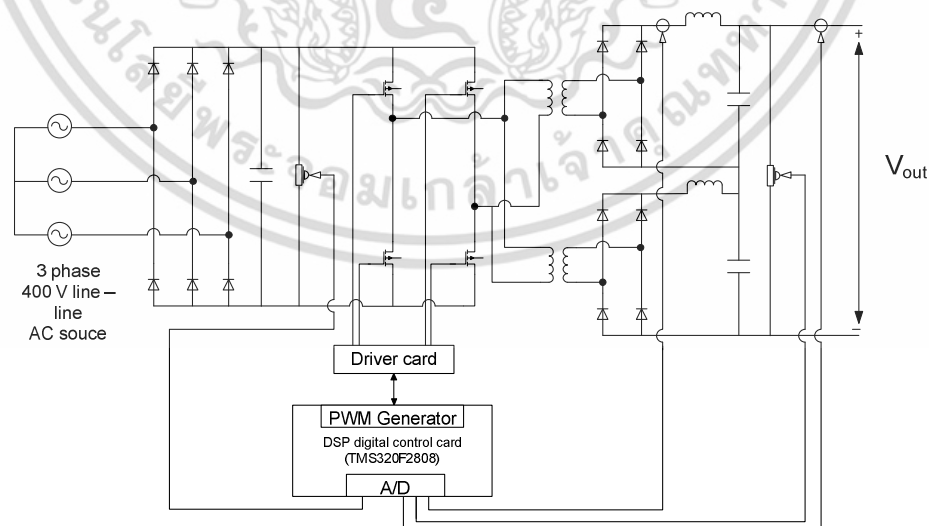
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 แสดงจุดเด่นและจุดด้อยในการสร้างสัญญาณเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิงโดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์

จุดเด่น	จุดด้อย
<ol style="list-style-type: none"> 1. การใช้งานง่ายเนื่องจากการใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการควบคุม 2. สามารถกำหนดค่าความเข้มแสง และ อุณหภูมิได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ 3. สัญญาณเอาต์พุตให้ค่าใกล้เคียงกับคุณลักษณะทางไฟฟ้าอุดมคติซึ่งมาจากการใช้สมการทางคณิตศาสตร์ 	<ol style="list-style-type: none"> 1. วงจรซับซ้อนต้องมีการออกแบบชุดเชื่อมต่อระหว่างคอมพิวเตอร์กับคอนเวอร์เตอร์ 2. ใช้งบประมาณในการสร้างสูง 3. ใช้คุณสมบัติเฉพาะ เช่น ค่า Energy band gap ของเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละประเภท ทำให้ใช้ยากในการหาข้อมูลในการออกแบบจริง

2.3.2.2.2 การสร้างสัญญาณอ้างอิงด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

จากเทคโนโลยีในปัจจุบันที่มีการพัฒนาชุดคำสั่งให้มีความรวดเร็วในการประมวลผล สัญญาณและการประยุกต์ใช้งานที่หลากหลายของไมโครคอนโทรลเลอร์ จึงได้มีการนำมาใช้เพื่อสร้าง สัญญาณอ้างอิงให้กับตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งข้อมูลที่นำมาใช้สร้างสัญญาณอ้างอิงได้จากข้อมูล การวัดแล้วจัดเก็บไว้ในหน่วยความจำ จากการที่ใช้งานง่าย จึงเป็นที่นิยม ในการนำมาสร้างตัวจำลอง เซลล์แสงอาทิตย์ที่ขนาดกำลังไฟฟ้าสูงๆ



รูปที่ 2.24 แสดงหลักการสร้างสัญญาณเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้เทคนิคดิจิทัลโดยไมโครคอนโทรลเลอร์

DSP รุ่น TMS320F2808 [8], [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.5 แสดงจุดเด่นและจุดด้อยในการสร้างสัญญาณเซลล์แสงอาทิตย์อ้ออิงโดยใช้ ไมโครคอนโทรลเลอร์

จุดเด่น	จุดด้อย
1. สามารถกำหนดค่าความเข้มแสงและอุณหภูมิได้อย่างแม่นยำ 2. ใช้งานง่าย สะดวก 3. สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้สูง เหมาะสมกับการทดสอบระบบขนาดใหญ่	1. การออกแบบวงจรควบคุมซับซ้อน 2. คุณลักษณะทางไฟฟ้าที่วัดได้ มีความคลาดเคลื่อนมาก 3. ราคาสูงเมื่อเทียบกับวิธีอื่นๆ

2.3.3 การเปรียบเทียบเทคนิคการสร้างสัญญาณเซลล์แสงอาทิตย์อ้ออิง

จากรูปแบบ เทคนิคการสร้างสัญญาณที่ได้นำเสนอมาข้างต้น จะมีหลักการทำงานที่คล้ายคลึงกัน แต่จะมีความแตกต่างทางด้านเทคนิคการสร้างสัญญาณเซลล์แสงอาทิตย์อ้ออิง โดยสามารถสรุปความแตกต่างของทั้งสองระบบได้ดังตารางที่ 2.6 [8], [9]

ตารางที่ 2.6 แสดงการเปรียบเทียบเทคนิคในการสร้างสัญญาณเซลล์แสงอาทิตย์อ้ออิง

หัวข้อการเปรียบเทียบ	เทคนิคการสร้างสัญญาณเซลล์แสงอาทิตย์อ้ออิง	
	เทคนิคอะนาล็อก	เทคนิคดิจิทัล
1. การออกแบบระบบควบคุม	ง่าย เนื่องจากใช้เทคนิคควบคุมพื้นฐาน	ยาก เนื่องจากการออกแบบระบบต้องสอดคล้องกับไมโครคอนโทรลเลอร์
2. ความสะดวกในการใช้งาน	ยุ่งยาก ในการควบคุมเวลาใช้งาน	ใช้งานง่าย เนื่องจากสามารถกำหนดจุดทำงานได้
3. ความแม่นยำการจำลอง	มีความแม่นยำสูง เพราะคุณลักษณะทางไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงตามความเข้มแสงจริงๆ	มีความแม่นยำ ใกล้เคียงกับข้อมูลที่ป้อนเท่านั้น

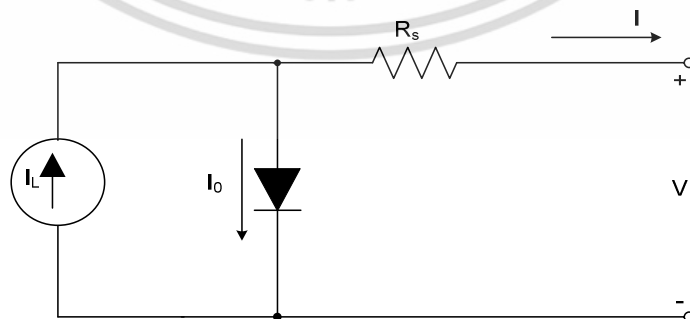
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.6 (ต่อ) แสดงการเปรียบเทียบเทคนิคในการสร้างสัญญาณเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิง

หัวข้อการเปรียบเทียบ	เทคนิคการสร้างสัญญาณเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิง	
	เทคนิคอะนาล็อก	เทคนิคดิจิทัล
1. ลักษณะวงจรควบคุม	ขนาดเล็ก เนื่องจากใช้ อุปกรณ์น้อย	ขนาดใหญ่ และซับซ้อน เนื่องจากต้องมีการสร้างชุด เชื่อมต่อ
2. ต้นทุนในการสร้าง	ต่ำ ใช้อุปกรณ์พื้นฐานที่ หา ง่าย	สูง เนื่องจากมีการใช้ ไมโครคอนโทรลเลอร์ ควบคุม

2.4 แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์โดยสมการทางคณิตศาสตร์

จากรูปที่ 2.25 คือ วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งเป็นวิเคราะห์จากพื้นฐานความสัมพันธ์ ระหว่างกระแสไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้า ซึ่งจากในรูปประกอบด้วย แหล่งจ่ายกระแสที่เปลี่ยนแปลงตามแสงอาทิตย์จริง นั่นคือ กระแสของเซลล์แสงอาทิตย์ (I_L) ความต้านทานอนุกรมภายในเซลล์ (R_s) ความต้านทานขนาน (R_{sh}) และรอยต่อพีเอ็นของไดโอด แต่ในการวิเคราะห์เซลล์แสงอาทิตย์นิยมใช้วงจรสมมูลแบบวิเคราะห์สมการไดโอดตัวเดียวที่มีความต้านทานที่มีความต้านทานที่อนุกรมเท่านั้น ส่วนความต้านทานขนานจะมีค่าสูงมาก จึงไม่นิยมมาใช้ในการวิเคราะห์ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.25 จากสมการที่ (2.1) สามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ (2.21)



รูปที่ 2.25 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์อย่างง่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I = I_L - I_0 \left[e^{\frac{V+IR_s}{nV_T}} - 1 \right] \quad (2.21)$$

- เมื่อ I_L คือ ค่ากระแสโฟโต้
 V_T คือ Thermal Voltage ไดโอด
 V คือ แรงดันเอาต์พุตของไดโอด
 I คือ ค่ากระแสในตัวของไดโอด
 n คือ ค่า Ideality factor ของไดโอด

เนื่องจากกระแสโฟโต้มีความสัมพันธ์กับความเข้มแสงจึงสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$I_L = \frac{I_{scm}}{1000} \times V_{irradiance} \quad (2.22)$$

- เมื่อ I_{scm} คือ กระแสลัดวงจรของแผงเซลล์แสงอาทิตย์
 $V_{irradiance}$ คือ ค่าความเข้มแสง

ในสภาวะลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์จะมีกระแสไหลผ่านไดโอดน้อยมาก กระแส $I_L = I_{scm}$ เมื่อแทนค่าในสมการที่ (2.22) สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$I = I_{scm} - I_0 \left[e^{\frac{V+IR_s}{nV_T}} - 1 \right] \quad (2.23)$$

จากรูปที่ 2.25 เป็นวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์เพียงเซลล์เดียว ดังนั้น แผงเซลล์แสงอาทิตย์จึงมีการนำเซลล์แสงอาทิตย์มาต่อขนานเมื่อต้องการกระแสสูงหรือมีการต่ออนุกรมเมื่อต้องการแรงดันที่สูง ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ในรูปสมการได้ดังนี้

$$I_m = N_p I \quad (2.24)$$

$$I_{scm} = I_{sc} \quad (2.25)$$

$$V_M = N_s V \quad (2.26)$$

$$V_{ocm} = N_s V_{oc} \quad (2.27)$$

$$R_{sm} = \frac{N_s}{N_p} R_s \quad (2.28)$$

- เมื่อ V_{oc} คือ แรงดันเปิดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์
 I_{sc} คือ กระแสลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์
 R_s คือ ความต้านทานอนุกรมของเซลล์แสงอาทิตย์
 M จะเป็นค่าทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อ
 N_s คือ จำนวนเซลล์ที่ต่ออนุกรมภายในแผง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

N_p คือ จำนวนเซลล์ที่ต่อขนานภายในแผง
นำสมการที่ (2.24) ,(2.25) ,(2.26) ,(2.27) ,(2.28) แทนค่าในสมการที่ (2.29)

$$I_M = I_{SCM} - N_{p0} \left[e^{\frac{V_M + I_M R_{SM}}{nN_s V_T}} - 1 \right] \quad (2.29)$$

ในสภาวะเปิดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์พบว่าในสมการที่ (2.23) กระแส $I = 0$ ดังนั้น
กระแสจะไหลผ่านไดโอดเท่านั้น ดังแสดงให้เห็นในสมการ

$$I_0 = \frac{I_{SCM}}{\left(\frac{V_{oc}}{enV_T} - 1 \right)} \quad (2.30)$$

นำสมการที่ (2.25) ,(2.27) แทนในสมการที่ (2.31) ได้ดังนี้

$$I_0 = \frac{I_{SCM}}{N_p \left(\frac{V_{ocM}}{enV_T N_s} - 1 \right)} \quad (2.31)$$

จากสมการที่ (2.27) ส่งผมให้ค่า V_{oc} มีความสัมพันธ์ที่เกิดจากสมการที่ (2.24) ,(2.25)
,(2.26) ,(2.27) ,(2.28) สามารถแสดงให้เห็นได้ดังสมการ

$$V_{oc} = \frac{V_{oc}}{nV_T} = \frac{V_{ocM}}{N_s nV_T} \quad (2.32)$$

ที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถคำนวณจากพารามิเตอร์ของเซลล์
แสงอาทิตย์ได้ดังนี้

$$P_{maxM} = FF_M V_{ocM} I_{SCM} \quad (2.33)$$

เมื่อ P_{maxM} คือ ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผง

FF_M คือ ค่า Fill Factor ของแผง

แต่เนื่องจากกำลังไฟฟ้ามีผลจากความต้านทานอนุกรมที่เกิดขึ้นภายในแผงเซลล์แสงอาทิตย์
ดังแสดงในสมการ

$$P_{maxM} = FF_M (1 - r_{SM}) V_{ocM} I_{SCM} \quad (2.34)$$

ดังนั้นสามารถหาค่าความต้านทานอนุกรมของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (r_{SM}) ได้จากการคำนวณ
ดังสมการ

$$r_{SM} = \frac{V_{ocM}}{I_{SCM}} = \frac{P_{maxM}}{FF_M I_{SCM}^2} \quad (2.35)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษา
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

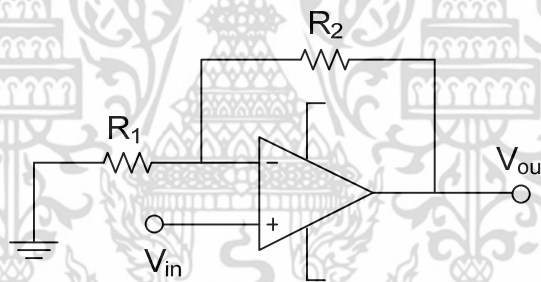
เมื่อ FF สามารถหาได้จาก [8]

$$FF_M = \frac{v_{oc} - \ln(V_{oc} + 0.72)}{1 + v_{oc}} \quad (2.36)$$

2.5 วงจรการใช่งานพื้นฐานของออปแอมป์

2.5.1 วงจรขยายแบบไม่กลับเฟส (Non-Inverting Amp)

วงจรขยายแบบไม่กลับเฟส สัญญาณขาออกที่ต้องการ จะได้เป็นเฟสเดียวกับสัญญาณขาเข้า เพราะว่าสัญญาณขาเข้าได้ป้อนเข้าที่ขาบวก โดยมีตัวต้านทาน R_1 ซึ่งเรียกว่า ตัวต้านทานขาเข้า และตัวต้านทาน R_2 เรียกว่า ตัวต้านทานป้อนกลับ การต่อตัวต้านทานป้อนกลับเข้าที่ขาเข้าด้านลบ แรงดันส่วนหนึ่งของขาออกที่ได้จะป้อนเข้าขาเข้าด้านลบด้วย และได้แรงดันขาออกเท่ากับสมการที่ (2.38) โดยอัตราขยายแรงดัน (Voltage gain) จะเท่ากับสมการที่ (2.37)



รูปที่ 2.26 วงจรขยายไม่กลับเฟส

$$Gain = \frac{V_o}{V_1} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \quad (2.37)$$

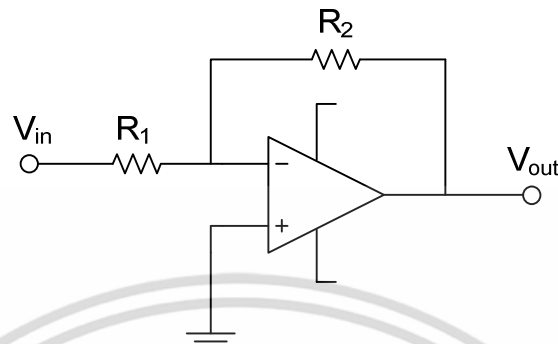
$$V_o = \left[\frac{1}{R_2/R_1}\right] V_1 \quad (2.38)$$

2.5.2 วงจรขยายแบบกลับเฟส (Inverting Amplifier)

วงจรขยายแบบกลับเฟส สัญญาณขาออกที่ได้ จะมีการกลับเฟสจากสัญญาณขาเข้า เนื่องจากขาเข้าด้านลบ ของออปแอมป์ โดยผ่านตัวต้านทาน R_1 ซึ่งเรียกว่า ตัวต้านทานด้านขาเข้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับ R_2 คือ ตัวต้านทานป้อนกลับ (Feedback element) ซึ่งแรงดันขาออกจะมีค่าดังสมการที่ (2.40) และอัตราขยายดังสมการที่ (2.39)



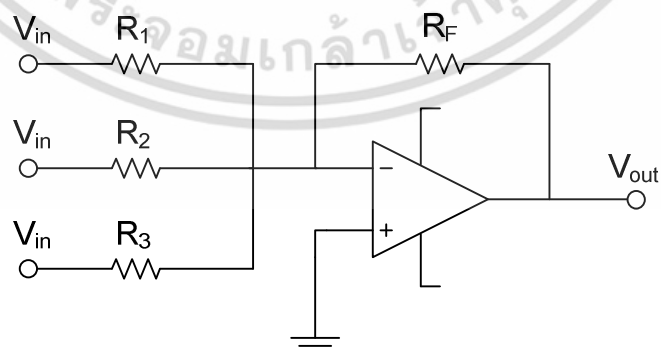
รูปที่ 2.27 วงจรขยายแบบกลับเฟส

$$Gain = -\frac{R_2}{R_1} = \frac{V_o}{V_1} \quad (2.39)$$

$$V_o = -\frac{R_2}{R_1} V_1 \quad (2.40)$$

2.5.3 วงจรขยายแบบรวมสัญญาณ (Summing Amplifier)

วงจรรวมสัญญาณ จะเป็นวงจรสำหรับรวมสัญญาณหลาย สัญญาณให้เป็นสัญญาณเดียว และเฟสของสัญญาณที่ขาออกจะเป็นตรงกันข้ามกัน ซึ่งสัญญาณขาออกจะได้ตามสมการที่ (2.41) ,(2.42)



รูปที่ 2.28 วงจรขยายแบบรวมสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_o = - \left[\left(\frac{R_F}{R_1} \right) V_1 + \left(\frac{R_F}{R_2} \right) V_2 + \left(\frac{R_F}{R_3} \right) V_3 \right] \quad (2.41)$$

$$V_o = -R_3 \left(\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \dots + \frac{V_n}{R_n} \right) \quad (2.42)$$

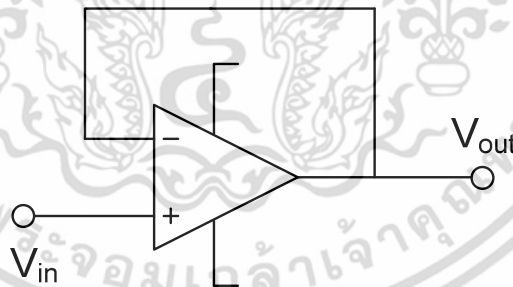
หรือเมื่อกำหนดให้ค่า R ทุกตัวมีค่าเท่ากันจะได้

$$V_o = -(V_1 + V_2 + \dots + V_n) \quad (2.43)$$

เอาที่พุดของวงจรรวมสัญญาณเป็นผลรวมของแรงดันอินพุต แต่ผลรวมของแรงดันอินพุตจะต้องไม่เกินไฟเลี้ยงที่จ่ายให้ออปแอมป์หรือ V_{sat} ของออปแอมป์

2.5.4 วงจรแรงดันตาม (Voltage Follower)

วงจรรขยายแรงดันตาม คือ วงจรที่มีอัตราขยายเป็น 1 มีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า บัฟเฟอร์ หรือวงจรรขยายอัตราเป็น 1 (Unity-Gain Amplifier) เปรียบเสมือนวงจรที่เพิ่มเสถียรภาพให้กับแหล่งจ่ายกำลัง เพื่อป้องกันแรงดันตก หรือแรงดันที่ไม่สม่ำเสมอ วงจรของสัญญาณแรงดันตาม แสดงได้ดังรูปที่ 2.29



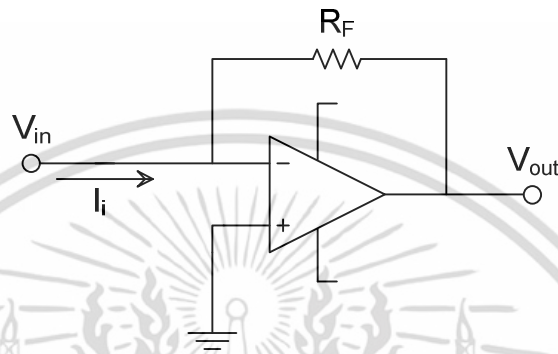
รูปที่ 2.29 วงจรแรงดันตาม

$$V_{input} = V_{output} \quad (2.44)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.5 วงจรแปลงกระแสเป็นแรงดัน (Current to voltage converter)

วงจรของการแปลงผันกระแสเป็นแรงดัน ยึดหลักพื้นฐานจากวงจรขยายกลับเฟสที่ไม่การต่อตัวต้านทานขาเข้า โดยกระแสขาเข้าที่ป้อน จะไหลเข้าที่ขาเข้าด้านลบของออปแอมป์โดยตรง เนื่องจากค่าความต้านทานภายในออปแอมป์มีค่าสูงมาก ดังนั้นกระแสจึงไหลไปทางตัวต้านทาน R_2 จะได้สมการแรงดันขาออกตามสมการที่ (2.45)



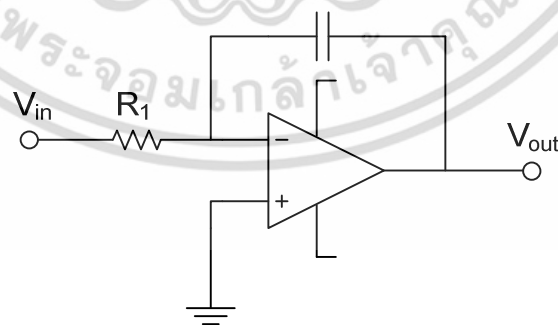
รูปที่ 2.30 วงจรแปลงผันกระแสเป็นแรงดัน

$$V_o = I_1 R$$

(2.45)

2.5.6 วงจรอินทิเกรเตอร์

วงจรอินทิเกรเตอร์ เป็นวงจรที่ประกอบด้วยตัวต้านทาน และตัวเก็บประจุในการประกอบวงจร ทำหน้าที่เป็นวงจรรวมสัญญาณทางคณิตศาสตร์ เหมือนการคำนวณหาพื้นที่ใต้เส้นกราฟ (Curve) นั้นเอง ดังสมการที่ (2.47)



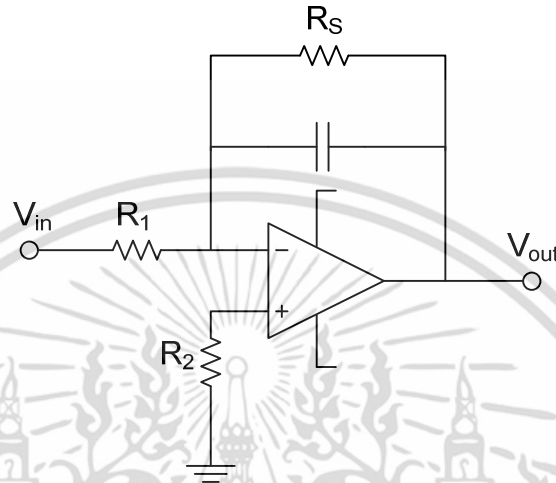
รูปที่ 2.31 วงจรอินทิเกรเตอร์

$$V_o = -\left(\frac{1}{R_1 C}\right) \int_0^t V_1 dt$$

(2.46)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถึงอย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติ วงจรอินทิเกรเตอร์ นิยมต่อตัวต้านทาน R_S คู่ร่วมกับ ตัวเก็บประจุ C เรียกว่า ตัวต้านทานชั้ (shunt resistance) เพื่อลดอัตราขยายแรงดัน ขณะความถี่ต่ำๆ ที่ถูกป้อนเข้ามา ซึ่งในทางปฏิบัติตัวต้านทาน R_S จะถูกกำหนดให้มีค่าประมาณ 10 เท่า ของ R_1 ดังแสดงในรูป



รูปที่ 2.32 วงจรอินทิเกรเตอร์ ต่อร่วมกับตัวต้านทานชั้

ตัวต้านทานชั้ R_S ทำหน้าที่ลดอัตราขยายแรงดัน ของวงจรขณะทำงานด้วยความถี่ต่ำ ดังนั้นแรงดันขาออกจากสมการ (2.47) จึงสามารถนำไปใช้กับงานความถี่ที่สูงกว่าความถี่ตามสมการที่ (2.48) เท่านั้น

$$f_c = \frac{1}{2\pi R_S C} \quad (2.47)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบการทดลอง

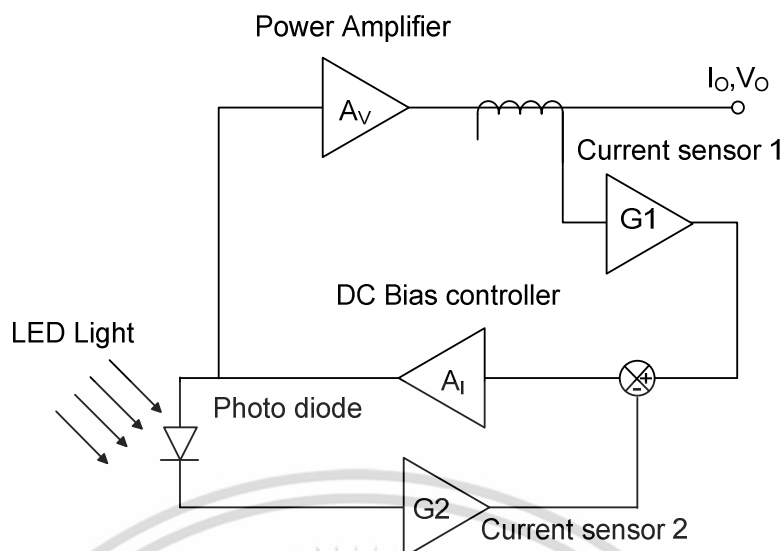
3.1 บทนำ

เนื้อหาของบทนี้จะกล่าวถึง การออกแบบวงจรจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ใช้วงจรออปแอมป์เป็นส่วนประกอบ ทำให้เกิดวงจรที่มีสัญญาณเอาต์พุตที่มีอัตราการขยายกระแสและแรงดันสอดคล้องกับเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิง และควบคุมการทำงานสอดคล้องกับภาระโหลดของตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวงจรชุด DC bias controller ดังนั้นในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์โดยมีหัวข้อหลักในการนำเสนอประกอบด้วย

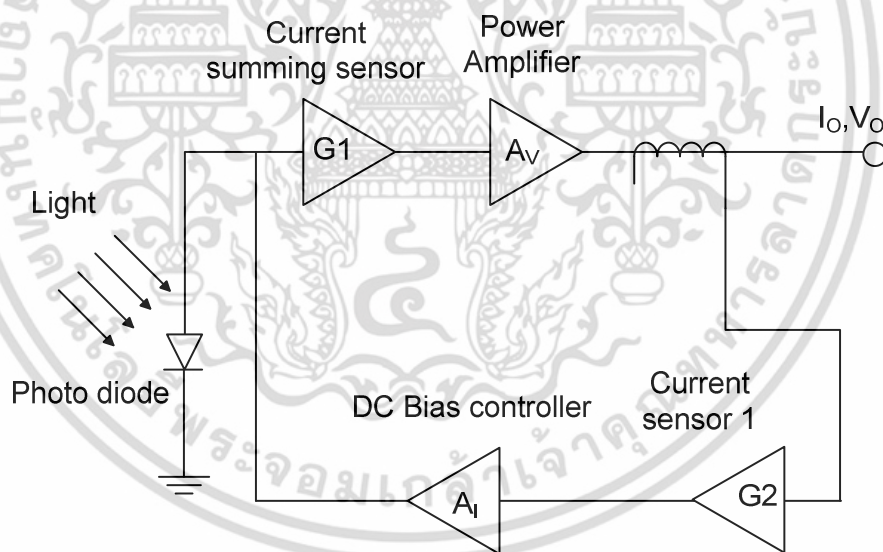
- การเลือกผลิตภัณฑ์ในการออกแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์
- การออกแบบวงจรจำลองสัญญาณเลียนแบบเซลล์แสงอาทิตย์ ทั้งในรูปแบบอนุกรมและขนาน

3.2 วงจรสร้างสัญญาณเลียนแบบคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้โฟโตไดโอด

โดยบทความนี้จะนำเสนอแบบจำลองที่แสดงคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ จากโฟโตไดโอด โดยคุณลักษณะทางไฟฟ้าง่ายๆสามารถวัดได้โดยใช้สัญญาณที่มาจากวงจรขยายสัญญาณได้โดยใช้ชุดขยาย Power Amplifier (A_v) ซึ่งทำให้สามารถหาพิกัดแรงดัน (V_o) และกระแส (I_o) มีขนาดที่สูงขึ้นตามการออกแบบ ขณะจ่ายโหลดสามารถควบคุมจุดทำงานได้ด้วยชุด DC Bias Controller โดยจะควบคุมจุดทำงานด้วยการตรวจจับกระแสเอาต์พุต ผ่านชุดขยายกระแส G_1 (Current Sensor 1) และ G_2 (Current Sensor 2) ดังรูปที่ 3.1 และรูปที่ 3.2



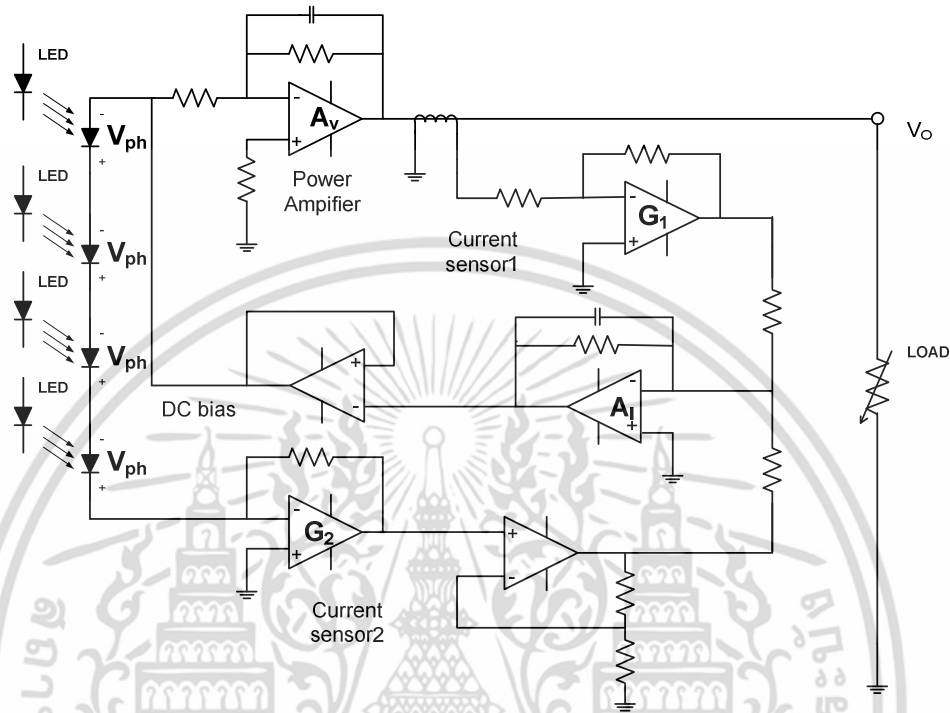
รูปที่ 3.1 ไดอะแกรมการทำงานของวงจรสร้างสัญญาณเลียนแบบเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้โฟโต้ไดโอดอนุกรมเป็นอินพุต



รูปที่ 3.2 ไดอะแกรมการทำงานของวงจรสร้างสัญญาณเลียนแบบเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้โฟโต้ไดโอดขนานเป็นอินพุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การออกแบบวงจรจำลองสัญญาณเลียนแบบคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้โฟโตนิกไดโอดแบบอนุกรม



รูปที่ 3.3 วงจรจำลองสัญญาณลักษณะทางไฟฟ้าของโฟโตนิกไดโอดอนุกรม

จากแบบจำลองทางที่สร้างขึ้นในรูปที่ 3.3 สามารถนำมาใช้เป็นสัญญาณอ้างอิงในการจำลองการทำงานของวงจรจำลองคุณลักษณะทางไฟฟ้า ได้โดยการออกแบบวงจรขยาย Power Amplifier รวมเข้ากับวงจรไบอัสกระแสตรง ในรูปแบบของเซลล์อนุกรม ซึ่งคำนวณได้จาก

$$A_1 = \frac{I_o}{I_{ph}} = \frac{G_1}{G_2} \quad (3.1)$$

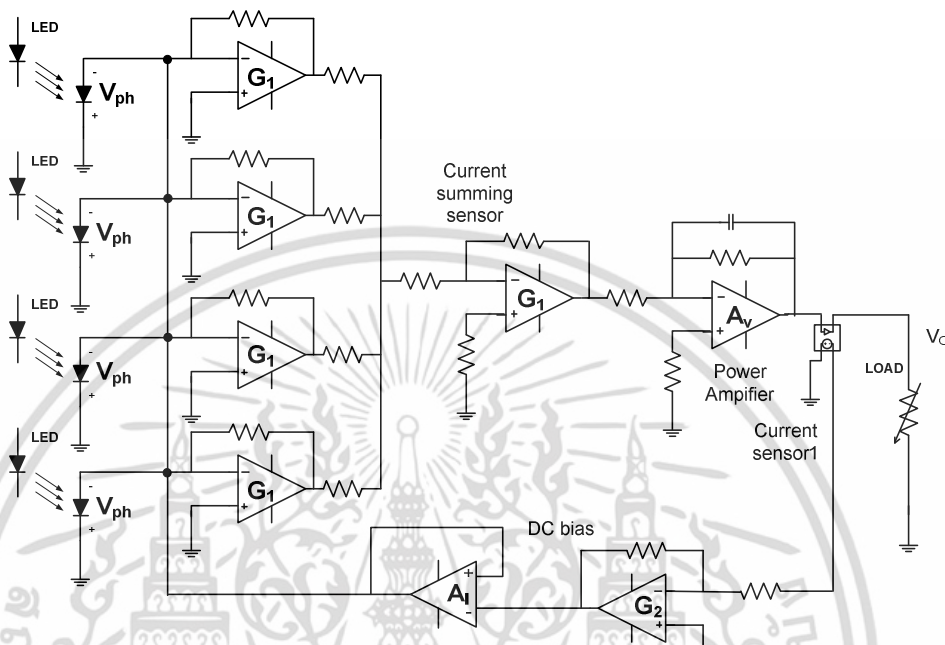
$$\text{กำหนดให้} \quad G_1 = \frac{V_{\text{sensor1}}}{I_o} \quad (3.2)$$

$$G_2 = \frac{V_{\text{sensor2}}}{I_{ph}} \quad (3.3)$$

เมื่อ I_o คือ กระแสเอาต์พุตของตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์

I_{ph} คือ กระแสเอาต์พุตจากเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิง
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การออกแบบวงจรจำลองสัญญาณเลียนแบบคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้โฟโตรีโอดแบบขนาน



รูปที่ 3.4 วงจรจำลองสัญญาณคุณลักษณะทางไฟฟ้าของโฟโตรีโอดแบบขนาน

และจากแบบจำลองในรูปที่ 3.4 สามารถสร้างสัญญาณอ้างอิงในรูปแบบของเซลล์ขนานได้ ซึ่งคำนวณได้จาก

$$V_o = A_v G_1 \quad (3.4)$$

$$V_{BIAS} = A_1 G_2 \quad (3.5)$$

กำหนดให้ $G_1 = \frac{V_{sensor1}}{I_{ph}}$ (3.6)

$$G_2 = \frac{V_{sensor2}}{I_o} \quad (3.7)$$

เมื่อ I_o คือ กระแสเอาต์พุตของตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์

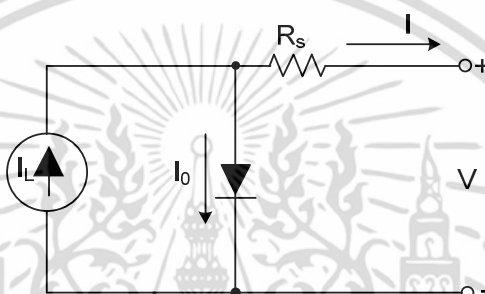
I_{ph} คือ กระแสเอาต์พุตจากเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 การออกแบบวงจรสร้างสัญญาณเลียนแบบคุณลักษณะทางไฟฟ้า [8] ,[12]

3.5.1 การเลือกเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิง (Current sensor 1)

ตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่นำมาใช้ในบทวิจัยนี้ ได้เลือกใช้โฟโตไดโอดของบริษัท Sharp รุ่น BS520 ซึ่งสามารถให้แรงดัน และกระแสได้เหมือนเซลล์แสงอาทิตย์จริง มีโครงสร้างแบบพี - เอ็น เช่นเดียวกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิกอน มีขนาดของแรงดันเปิดวงจรที่ 0.5 โวลต์ และกระแสลัดวงจรที่ 0.65 ไมโครแอมแปร์

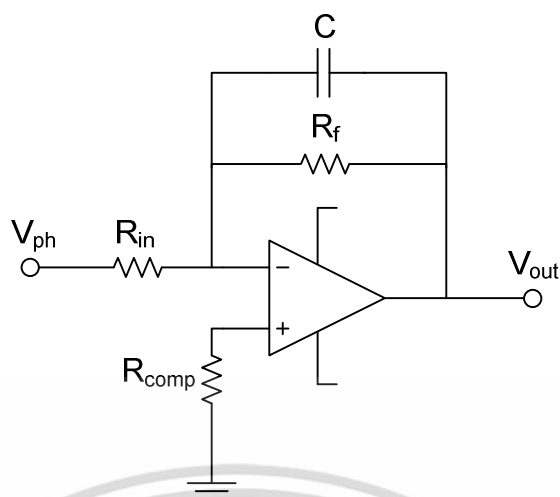


รูปที่ 3.5 โฟโตไดโอดที่เลือกใช้เป็นเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิง BS520

3.5.2 การออกแบบวงจรขยายกำลังไฟฟ้า (Power amplifier)

วงจขยายกำลังไฟฟ้า มีหน้าที่หลักในการขยายสัญญาณคุณลักษณะทางไฟฟ้าที่มาจาก เซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิง โดยที่อัตราการขยายกระแสและแรงดันจะขึ้นอยู่กับขีดจำกัดทางด้าน แรงดันและกระแสของตัวขยายเอง ซึ่งควรจะมีค่าที่สูงพอ ดังนั้นจึงเลือกใช้ไอซีขยายกำลัง (Power Amplifier) รุ่น OPA544 ที่สามารถทนแรงดันไฟฟ้าขาออกได้สูงสุด 120 โวลต์ และกระแสไฟฟ้า สูงสุดที่ 4 แอมแปร์ [8] ,[9]

ในการออกแบบ เลือกใช้วงจขยาย แบบกลับเฟส และพบว่ามึสัญญาณรบกวน จาก เซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิง จึงได้มีการเพิ่มวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 วงจรขยายกำลังไฟฟ้า

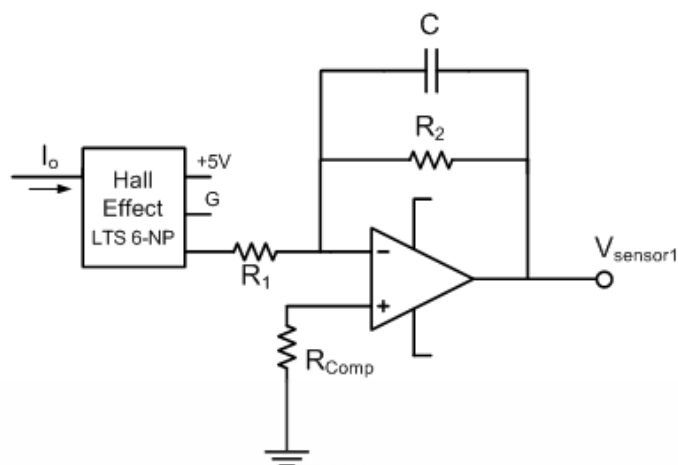
$$A_V = -\frac{R_f}{R_{in}} \quad (3.8)$$

$$f_0 = -\frac{1}{2\pi R_f C} \quad (3.9)$$

โดยที่ค่าของ R_f และ R_{in} ควรค่าที่เหมาะสม ซึ่งโดยใช้ค่าความต้านทานที่มากกว่ากิโลโหม์ขึ้นไป และค่าอัตราขยาย A_V ไม่ควรมีค่ามากกว่า 10 เนื่องจาก หากอัตราขยายมีค่ามาก จะทำให้ วงจรขยายกำลังไฟฟ้านี้ ขยายแรงดัน และกระแสไฟฟ้าไม่เป็นไปตามคุณลักษณะทางไฟฟ้าของโฟโต้ ไดโอด และ R_{comp} ที่เหมาะสมควรมีค่าความต้านทานที่ R_f และ R_{in} นำค่าความต้านทานมาขนานกัน

3.5.3 การออกแบบวงจรตรวจจับกระแสเอาต์พุต (Current sensor 1)

วงจรตรวจจับกระแสเอาต์พุต คือ วงจรตรวจจับกระแสเอาต์พุต จากออปแอมป์ที่ทำหน้าที่ขยายกำลัง ซึ่งได้ใช้ตัวตรวจจับ Hall effect รุ่น LTS - 6NP ซึ่งมีคุณสมบัติในการตรวจจับที่แม่นยำ เพื่อแยกแยะระหว่างวงจรควบคุม และวงจรถูกส่งออกจากกัน โดยวงจรตรวจจับกระแสนี้ จะทำงานสัมพันธ์ร่วมกับ วงจรตรวจจับกระแสโฟโต้ และวงจรรวมสัญญาณป้อนกลับ (DC bias controller)



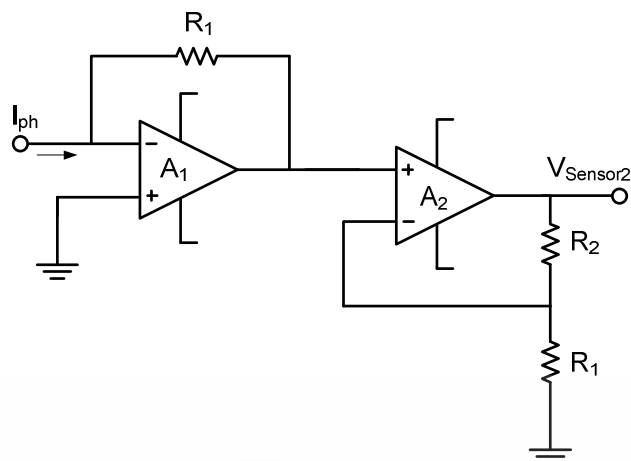
รูปที่ 3.7 วงจรตรวจจับกระแสเอาต์พุต 1

$$G_1 = \frac{V_{\text{sensor1}}}{I_o} \quad (3.10)$$

เมื่อ V_{sensor1} คือ แรงดันไฟฟ้าจากวงจรจับกระแสเอาต์พุต

3.5.4 การออกแบบวงจรตรวจจับกระแสไฟโต้ (Current sensor 2)

เป็นวงจรสำหรับตรวจจับกระแสไฟโต้ของเซลล์แสงอาทิตย์อั้งอิง หรือไฟโต้ไดโอด ซึ่งจะนำวงจรตรวจจับ ต่อเข้ากับตัวแสงอาทิตย์อั้งอิงโดยตรง และใช้วงจรเปลี่ยนกระแสเป็นแรงดัน เพื่อสามารถใช้แรงดันเป็นสัญญาณอั้งอิงได้ โดยเลือกใช้ออปแอมป์ TL084 เนื่องจากมีกระแสไบอัสอินพุตต่ำ นำวงจรมารวมเข้ากับวงจรขยายแบบไม่กลับเฟส เพื่อการควบคุมที่ง่ายขึ้น และนำสัญญาณที่ได้ไปรวมกับสัญญาณของวงจรตรวจจับกระแสเอาต์พุต โดยใช้วงจรรวมสัญญาณชุด DC bias controller ซึ่งลักษณะวงจรแสดงให้เห็นดังรูปที่ 3.8 โดยค่าที่เหมาะสมของ R_1 และ R_2 ควรมีค่าในหลักของกิโลโอห์ม และอัตราขยาย G_1 ควรมีค่าไม่เกิน 10 เช่นเดียวกับวงจรขยายกำลังไฟฟ้า แต่อัตราขยายนี้ต้องสัมพันธ์กับอัตราขยายของวงจร Current sensor 2 ด้วย [8] ,[9]



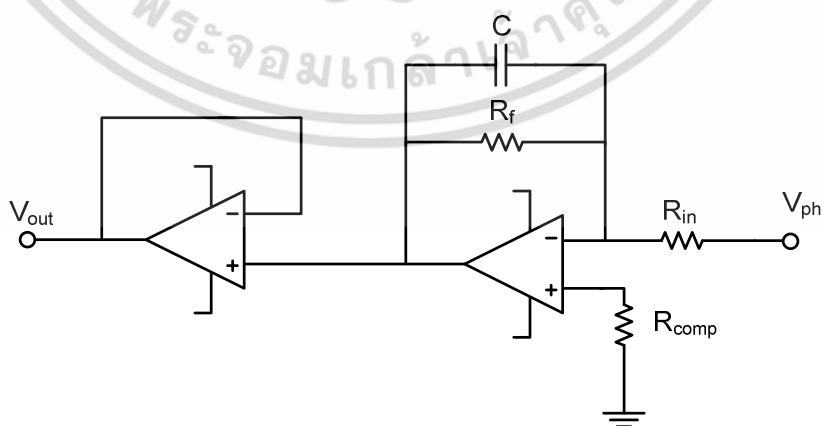
รูปที่ 3.8 วงจรตรวจจับกระแสเอาต์พุต 2

$$G_2 = \frac{V_{\text{sensor}2}}{I_o} \quad (3.11)$$

เมื่อ $V_{\text{sensor}2}$ คือ แรงดันไฟฟ้าจากวงจรจับกระแสโฟโต้

3.5.5 การออกแบบวงจร DC bias controller

วงจร bias controller เป็นวงจรสำหรับควบคุมจุดการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิง โดยอาศัยลักษณะของวงจร Integrete summing ที่มีอัตราขยายขึ้นกับอินพุตที่ขา Inverting ของออปแอมป์ที่เอาต์พุตของวงจรจะมีการต่อวงจรบัฟเฟอร์ไว้เพื่อป้องกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.9 [8] ซึ่งวงจรมีได้ใช้ในวงจรจำลองคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งในรูปแบบอนุกรม และขนาน โดยค่า R_f ที่เหมาะสมจะอยู่ช่วงประมาณ 0 – 500 กิโลโอห์ม



รูปที่ 3.9 วงจร DC bias controller

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์สามารถนำมาใช้เป็นสัญญาณอ้างอิงในการจำลองการทำงานของวงจรจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ โดยการออกแบบวงจรไบอัสกระแสตรง (A_i) ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 3.2 , 3.3 ,3.4 และได้กล่าวไว้ในบทที่ผ่านมา

$$A_i = \frac{I_o}{I_{ph}} = \frac{G_2}{G_1} \quad (3.12)$$

เมื่อ I_o คือ กระแสเอาต์พุทของตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์

I_{ph} คือ กระแสเอาต์พุทจากเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิง

I_{sc} คือ กระแสไฟฟ้าลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์

G_1 คือ อัตราการขยายของวงจรตรวจับกระแสเอาต์พุท

G_2 คือ อัตราการขยายของวงจรตรวจับกระแสโฟโต้

3.5.6 การออกแบบวงจร Current summing sensor

วงจร Current summing sensor นี้เป็นประกอบไปด้วย วงจรออปแอมป์ที่เปลี่ยนกระแสเป็นแรงดัน Current to voltage converter และนำสัญญาณมารวมกันผ่านวงจรออปแอมป์รวมสัญญาณขยายแบบกลับเฟส Summing voltage จะเป็นวงจรที่รวมสัญญาณของกระแสที่ได้ต่อขนานเข้าด้วยกัน เป็นสัญญาณเดียว เพื่อนำไปเป็นสัญญาณขาเข้าของวงจรขยายหลักต่อไป โดยค่าที่เหมาะสมกับการใช้งานอยู่ที่ R_f เท่ากับ 500 โอห์ม และอัตราการขยายควรมีค่าไม่มาก และไม่ควรมากเกิน 10 เท่า



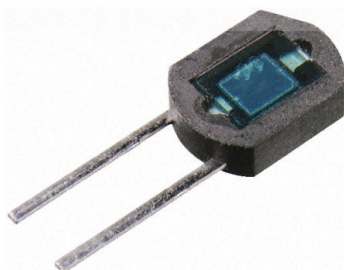
รูปที่ 3.10 วงจร Current summing sensor

$$G_1 = -\frac{R_f}{R_{in}} \quad (3.13)$$

$$V_o = -G_1[V_1 + V_2 + V_3 + \dots + V_n] \quad (3.14)$$

3.6 การเลือกผลิตภัณฑ์ในการออกแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ [9]

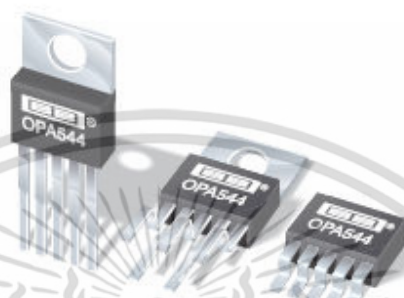
3.6.1 เซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิง จะเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดเล็กที่ให้คุณลักษณะทางไฟฟ้าใกล้เคียงกับเซลล์แสงอาทิตย์จริง และคุณสมบัติทางไฟฟ้าสามารถเปลี่ยนแปลงตามสภาพแวดล้อม ซึ่งมีโครงสร้างแบบพี-เอ็น เช่นเดียวกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิกอน ดังนั้นจึงได้เลือกใช้โฟโตไดโอด รุ่น BS520 โดยมีค่ากระแสลัดวงจร 0.65 ไมโครแอมป์ และแรงดันเปิดวงจร 500 มิลลิโวลต์ และทำงานได้ดีที่สุดที่ความยาวคลื่นของแสงตกกระทบเท่ากับ 560 nm.



รูปที่ 3.11 ลักษณะโฟโตไดโอดรุ่น BS520

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6.2 วงจรขยายกำลังหลัก หรือ Power amplifier คือ วงจรออปแอมป์ที่ทำหน้าที่ในการขยายแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าได้ ซึ่งสามารถขยายกำลังไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิงได้ ซึ่งในบทวิจัยนี้ได้เลือกใช้ IC ของออปแอมป์ Texas instrument รุ่น OPA544 ซึ่งมีขีดจำกัดในการขยายกำลังไฟฟ้าที่สูง โดยมีพิกัดสูงสุดที่ 120 โวลต์กระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ 4 แอมป์ ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 ลักษณะไอซี OPA 544 ที่ใช้ในวงจรกำลังไฟฟ้า

3.6.3 วงจรออปแอมป์ ที่ใช้เป็นส่วนประกอบวงจร อาทิเช่น วงจร Current sensor 1 ,Current sensor 2 และ DC bias controller ,Current summing sensor จะนำ TL084 มาเป็นส่วนประกอบของวงจร โดยออปแอมป์นี้ เป็นอีกหนึ่งทางเลือกของวงจรออปแอมป์ที่มีขอบเขตการทำงานที่มากกว่ารุ่นอื่นๆ อาทิเช่น ทำงานในขอบเขตแรงดันที่สูงขึ้น สามารถรับสัญญาณขาเข้าที่ไม่คงที่ได้มากขึ้น สัญญาณขาเข้าย้อนกลับที่น้อย มีแรงดันและกระแสไฟฟ้าชดเชย และทำงานอย่างมีประสิทธิภาพในขอบเขตอุณหภูมิต่างๆ ตั้งแต่ 0 องศาเซลเซียส จนถึง 70 องศาเซลเซียส ซึ่งเหมาะสมกับการทำงานในสภาวะแวดล้อม



รูปที่ 3.13 ลักษณะ IC TL084

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6.4 วงจรตรวจจับสัญญาณสัญญาณกระแสไฟฟ้า รุ่น LEM LTS 6-NP ทำหน้าที่ในการตรวจจับสัญญาณเอาต์พุตจากตัวออปแอมป์ โดย LEM LTS 6 NP นี้ มีจุดเด่นอยู่ที่ความแม่นยำ และขอบเขตการทำงานที่สามารถตรวจจับกระแสมีค่าน้อยๆ ได้



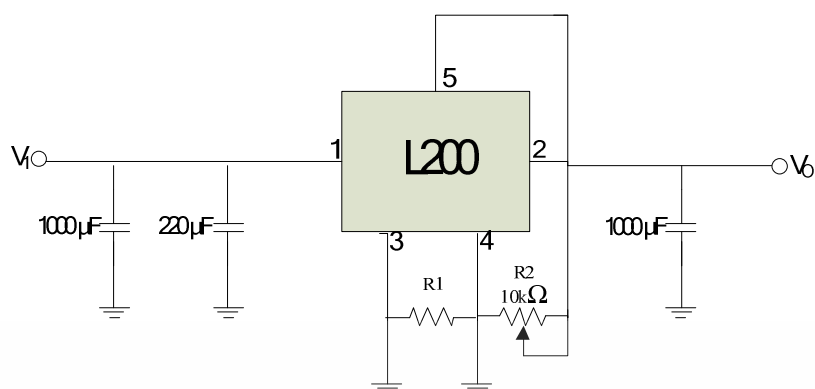
รูปที่ 3.14 ตัวตรวจจับกระแสแบบ Hall effect รุ่น LTS 6 NP

3.6.5 ไอซี L200C เป็น ไอซีเรกูเลเตอร์ที่ใช้สำหรับทำเป็นวงจรจ่ายแรงดันที่สามารถปรับค่าได้ ซึ่งสามารถปรับค่าแรงดันได้ตั้งแต่ 2.85 ถึง 36 โวลต์ และจำกัดกระแสทางเอาต์พุตได้สูงสุดถึง 2 แอมแปร์ ขึ้นอยู่กับหม้อแปลงที่ต่อรวม ดังแสดงในรูปที่ 3.15 ส่วนรูปที่ 3.16 แสดงวงจรใช้งานพื้นฐานของ L200



รูปที่ 3.15 ลักษณะและรูปร่างของ L200

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.16 วงจรใช้งานพื้นฐานของ L200

สูตรการคำนวณวงจรพื้นฐาน L200

$$V_o = V_{ref} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \quad (3.15)$$

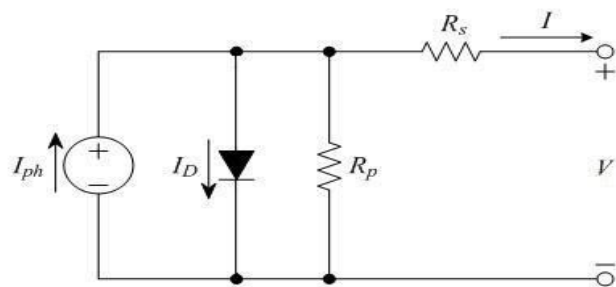
เมื่อ V_{ref} คือ แรงดันอ้างอิงของ L 200 มีค่า 2.77 โวลต์

3.7 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซลล์แสงอาทิตย์

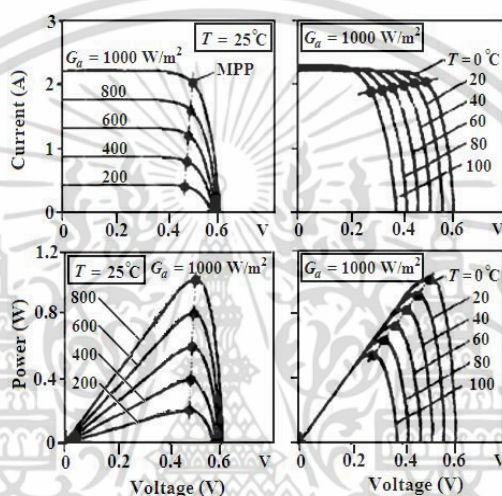
เซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้งานโดยทั่วไปจะผลิตจากสารกึ่งตัวนำแบบรอยต่อ (P-N Junction) ในการวิเคราะห์คุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์จึงนิยมใช้วงจรสมมูลที่ประกอบด้วยแหล่งจ่ายกระแส (I_{ph}) ที่เปลี่ยนแปลงตามความเข้มแสงต่อขนานกับไดโอด และความต้านทานขนาน (R_p) ซึ่งความต้านทานอนุกรม (R_s) ต่อกับเอาต์พุตของวงจรสมมูล ดังรูปที่ 3.17

จากวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ในรูปที่ 3.17 จะแสดงคุณลักษณะทางไฟฟ้าที่มีการตอบสนองของกระแสที่ตรงตามความเข้มแสง และแรงดันเปิดวงจรจะมีการตอบสนองตามอุณหภูมิ ดังแสดงในรูปที่ 3.18 และโดยทั่วไปความต้านทานขนาน (R_p) จะมีค่าสูงมากพอที่จะไม่นำมาพิจารณาผลที่เกิดขึ้นได้ ในขณะที่ความต้านทานอนุกรมจะมีค่าน้อยมากจึงจะไม่มีผลกระทบต่อเอาต์พุตของวงจรสมมูล จากหลักการดังกล่าวสามารถเขียนวงจรสมมูลใหม่ได้ดังรูปที่ 3.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



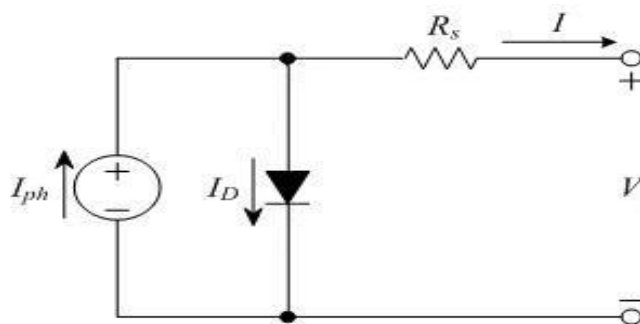
รูปที่ 3.17 วงจรสมมูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการวิเคราะห์ความต้านทาน



รูปที่ 3.18 แสดงคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เปลี่ยนแปลงตามความเข้มแสงและอุณหภูมิ

ในปัจจุบันวงจรสมมูลรูปที่ 3.17 ได้มีการนำมาใช้เพื่อวิเคราะห์ถึงคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์โดยการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปเช่น โปรแกรม MATLAB/SIMULINK, โปรแกรม Orcad 9.1 เป็นต้น ซึ่งผลที่ได้สามารถใช้ในการศึกษาการออกแบบเซลล์แสงอาทิตย์หรือใช้เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงให้กับแบบจำลองระบบไฟฟ้าที่ใช้เซลล์แสงอาทิตย์เป็นส่วนประกอบได้ เพื่อให้การจำลองการทำงานใกล้เคียงกับการออกแบบจริงมากที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.19 วงจรสมมูลเซลล์แสงอาทิตย์อย่างง่าย

$$I = I_{sc} - I_o \left(e^{\frac{V+IR_s}{nV_T}} - 1 \right) \quad (3.16)$$

เมื่อ I คือ กระแสเอาต์พุตของวงจรสมมูลมีหน่วยเป็นแอมแปร์ (A)

I_{sc} คือ กระแสไฟฟ้าลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์ มีหน่วยเป็นแอมแปร์ (A)

I_o คือ กระแสไหลผ่านตัวไดโอดมีหน่วยเป็นแอมแปร์ (A)

V คือ แรงดันเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์ มีหน่วยเป็นโวลต์ (V)

R_s คือ ความต้านทานอนุกรม มีหน่วยเป็นโอห์ม (Ω)

V_T คือ Thermal Voltage ของไดโอด มีหน่วยเป็นโวลต์ (V)

N คือ Ideality factor ของไดโอด

เมื่อ G-device สามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$g_{irrad} = \frac{I_{scm}}{1000} \times G \quad (3.17)$$

เมื่อ G คือ ค่าความเข้มแสงที่เซลล์แสงอาทิตย์ได้รับ

เนื่องจากวงจรสมมูลในรูปที่ 3.19 เป็นวงจรสมมูลที่ใช้สำหรับวิเคราะห์เซลล์แสงอาทิตย์เพียงหนึ่งเซลล์ ดังในการวิเคราะห์คุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์จึงมีการนำจำนวนของเซลล์ที่มีต่ออนุกรมและขนานกันภายในแผงมาคำนวณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้างี้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_M = N_p I \quad (3.18)$$

$$I_{scm} = N_p I_{SC} \quad (3.19)$$

$$V_M = N_s V \quad (3.20)$$

$$V_{OCM} = N_s V_{oc} \quad (3.21)$$

$$R_{SM} = \frac{N_s}{N_p} R_s \quad (3.22)$$

- เมื่อ I_M คือ กระแสเอาต์พุทของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ มีหน่วยเป็น แอมแปร์ (A)
- I_{SCM} คือ กระแสลัดวงจรของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีหน่วยเป็น แอมแปร์ (A)
- V_M คือ แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุทของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ มีหน่วยเป็น โวลต์ (V)
- V_{OCM} คือ แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ มีหน่วยเป็น โวลต์ (V)
- N_s คือ จำนวนเซลล์ที่ต่ออนุกรมภายในแผงเซลล์แสงอาทิตย์
- N_p คือ จำนวนเซลล์ที่ต่อขนานภายในแผงเซลล์แสงอาทิตย์
- R_{SM} คือ ความต้านทานอนุกรมของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ มีหน่วยเป็น โอห์ม (Ω)

นำสมการที่ (3.18) – (3.22) มาแทนในสมการที่ (3.16) จะได้ว่า

$$\frac{I_M}{N_p} = \frac{I_{SCM}}{N_p} - I_{o1} \left(e^{\frac{V_M + I_M \left(\frac{N_p}{N_s} R_{SM} \right)}{nV_T}} - 1 \right) \quad (3.23)$$

$$I_m = I_{SCM} - N_p I_{o1} \left(e^{\frac{V_M + I_M R_{SM}}{nN_s V_T}} - 1 \right) \quad (3.24)$$

ในกรณีที่วงจรสมมูลเปิดวงจรดังแสดงในรูปที่ 3.18 พบว่ากระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านไดโอดทั้งหมด ซึ่งสามารถคำนวณค่ากระแส I_o ได้จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_o = \frac{I_{sc}}{\frac{V_{OC}}{e^{nV_T} - 1}} \quad (3.25)$$

นำสมการที่ (3.19) และ (3.21) แทนค่าในสมการที่ (3.25) จะได้ว่า

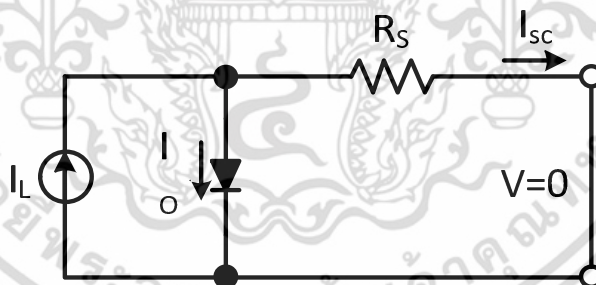
$$I_o = \frac{I_{SCM}}{\frac{V_{OCM}}{e^{nV_T N_s} - 1}} \quad (3.26)$$

ในขณะที่แรงดันเปิดวงจรสามารถคำนวณได้จาก

$$v_{OC} = \frac{V_{OC}}{nV_T} = \frac{V_{OCM}}{N_s nV_T} \quad (3.27)$$

ซึ่งสมการที่ (3.25) เป็นสมการที่ใช้สร้างแบบจำลองซึ่งต้องมีค่า I_{scm} และ V_{ocm} ที่ได้จากการวัดแผงเซลล์แสงอาทิตย์จริง

ในกรณีที่วงจรสมมูลลัตวงจรดังแสดงในรูปที่ 3.20 นั้น กระแสจะไหลผ่านความต้านทานอนุกรมเป็นส่วนมากทำให้กระแสที่ไหลผ่านไดโอดน้อยมาก จึงไม่นำมาพิจารณาคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ในกรณีลัตวงจร



รูปที่ 3.20 วงจรสมมูลเซลล์แสงอาทิตย์ในสภาวะลัตวงจร

เมื่อนำสมการที่ (3.26) แทนในสมการที่ (3.24) จะแสดงความสัมพันธ์ของกระแสของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ดังนี้

$$I_M = I_{SCM} - I_{SCM} \frac{\frac{V_M + R_{SM} I_M}{e^{\frac{V_M + R_{SM} I_M}{nV_T N_s}} - 1}}{\frac{V_{OCM}}{e^{nV_T N_s} - 1}} \quad (3.28)$$

เมื่อจัดรูปสมการแล้วจะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_M = I_{SCM} \left(1 - e^{\frac{V_M + R_{SM} I_M - V_{OCM}}{n V_T N_s}} \right) \quad (3.29)$$

เมื่อพิจารณาที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์พบว่าความสัมพันธ์ของกระแสลัดวงจรและแรงดันเปิดวงจร ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดมีการเปลี่ยนแปลงดังสมการที่ (3.30)

$$P_{maxm} = FF_M V_{OCM} I_{SCM} = FF_{OM} (1 - r_{SM}) V_{OCM} I_{SCM} \quad (3.30)$$

เมื่อค่า Fill Factor (FF) ของ แผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถคำนวณได้จาก

$$FF_O = \frac{v_{oc} - \ln(v_{oc} + 0.72)}{1 + v_{oc}} \quad (3.31)$$

และค่าความต้านทานอนุกรมของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (R_{SM}) สามารถหาได้จาก

$$R_{SM} = \frac{V_{OCM}}{I_{SCM}} - \frac{P_{maxm}}{FF_{OM} I_{SCM}^2} \quad (3.32)$$

จากสมการที่ (3.17) ,(3.26) ,(3.27) ,(3.32) สามารถนำมาเขียน Library ในโปรแกรม OrCAD ดังแสดงในรูปที่ 3.21

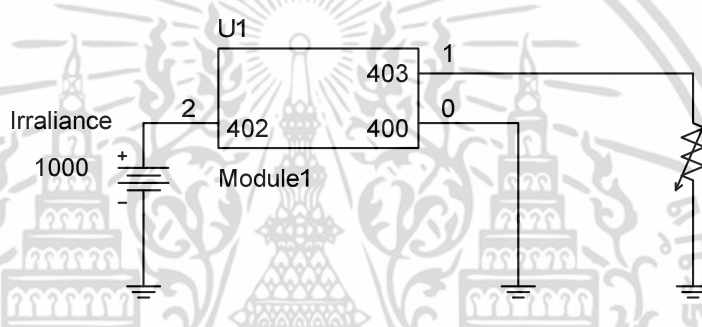
```
.subckt module_1 400 403 402 params: ta=1, tr=25, iscmr=0.65u, pmaxmr=0.218u, vocmr=0.5,
ns=1, np=1, nd=1
girradm400 401 value={{(iscmr/1000*v(402))}}
d1 401 400 diode
.model diode d(is={{iscmr/(np*exp(vocmr/(nd*ns*(8.66e-5*(tr+273))))}},n={{nd*ns}})
.funcuвет() {8.66e-5*(tr+273)}
.funcvocnorm() {vocmr/(nd*ns*uвет)}
.funcrsm() {vocmr/(iscmr)- pmaxmr*(1+vocnorm)/(iscmr**2*(vocnorm- + log((vocnorm)+0.72))}}
rs401 403 {rsm()}
.ends module_1
```

รูปที่ 3.21 code ของตัว model Photodiode ใน โปรแกรม OrCAD 9.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ t_a	คือ อุณหภูมิมาตรฐานของตัวอุปกรณ์ Photodiode
t_r	คือ อุณหภูมิห้องที่ทำการทดลอง
i_{scmr}	คือ กระแสลัดวงจรของโฟโต้ไดโอด
p_{maxmr}	คือ กำลังไฟฟ้าสูงสุดของ โฟโต้ไดโอด
V_{ocm}	คือ แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรของ โฟโต้ไดโอด

จากรูปภาพที่ 3.21 นำมาออกแบบเป็น Library ของโปรแกรม Orcad 9.1 เพื่อเป็นแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งได้ใช้พารามิเตอร์ของโฟโต้ไดโอดนำมาอ้างอิง ที่สภาวะความเข้มแสงมาตรฐานที่ $1,000 \text{ W/m}^2$, อุณหภูมิ $25 \text{ }^\circ\text{C}$, Air mass 1.5 [9],[15]



รูปที่ 3.22 แบบจำลอง Photodiode 1 cell ในโปรแกรม Orcad 9.1

จากการจำลองคุณลักษณะทางไฟฟ้านี้ ได้กำหนดให้โฟโต้ไดโอดมีขนาดกำลังสูงสุดที่ $0.217 \mu\text{W}$ กระแสลัดวงจรที่ $0.65 \mu\text{A}$ และแรงดันเปิดวงจรที่ 0.5 V โดยโฟโต้ไดโอดมีคุณลักษณะทางไฟฟ้าใกล้เคียงกับโฟโต้ไดโอดจริง และสามารถเปลี่ยนตามสภาวะแวดล้อม

3.8 สรุป

จากการออกแบบวงจรขยายสัญญาณทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ได้กล่าวถึง การออกแบบวงจรออปแอมป์ และการเลือกใช้อุปกรณ์ ในบทความนี้ได้เลือกใช้อุปกรณ์ที่ใช้แทนเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิง คือ โฟโตไดโอด ที่สามารถให้คุณลักษณะทางไฟฟ้าเทียบเคียงกับเซลล์แสงอาทิตย์ และมีกราฟคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ครบถ้วน และวงจรทั้งหมดได้จะการใช้อุปกรณ์ทางไฟฟ้าพื้นฐาน คือ ออปแอมป์ โดยมีจุดเด่น คือ สามารถใช้งานได้สะดวก ควบคุมง่าย และมีทางเลือกใช้งานที่หลากหลาย ในออปแอมป์บางชนิด สามารถนำมาขยายสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าได้สูง ได้อาศัยคุณลักษณะทางไฟฟ้านี้ มาใช้เป็นวงจรขยายสัญญาณไฟฟ้าหลัก ในบทความนี้ได้เลือกใช้อุปกรณ์ คือ ออปแอมป์รุ่น OPA544 ซึ่งออปแอมป์ชนิดนี้สามารถให้สัญญาณขาออกของแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าที่สูง ทำให้วงจขยายสัญญาณทางไฟฟ้านี้ สามารถให้สัญญาณทางไฟฟ้าเทียบเคียงกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการจำลองสัญญาณคุณลักษณะทางไฟฟ้า

4.1 บทนำ

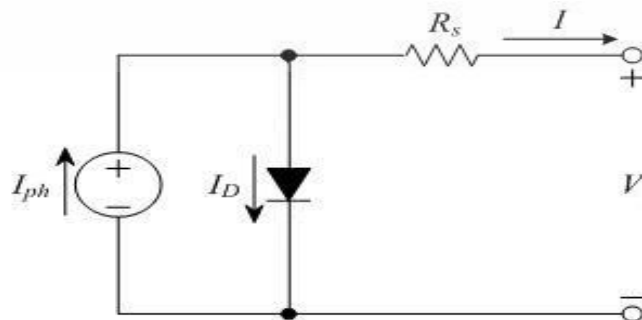
เนื้อหาของบทนี้จะกล่าวถึง การจำลองสัญญาณคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยโปรแกรม Orcad 9.1 ยังรวมถึงวงจรรขยายสัญญาณคุณลักษณะทางไฟฟ้า ทั้งในรูปแบบอนุกรม และขนาน เพื่อใช้สำหรับวิเคราะห์การออกแบบ โดยการจำลองทั้งหมด จำลองในสภาวะมาตรฐานที่ ความเข้มแสง $1,000 \text{ W/m}^2$ และอุณหภูมิที่ $25 \text{ }^\circ\text{C}$ และศึกษาการทำงานของตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้ออกแบบไว้ โดยหัวข้อหลักในบทนี้ ประกอบด้วย

- การจำลองสัญญาณคุณลักษณะทางไฟฟ้าของโฟโตไดโอด โดยโปรแกรม Orcad 9.1
- การจำลองวงจรรขยายสัญญาณคุณลักษณะทางไฟฟ้าของโฟโตไดโอด โดยโปรแกรม Orcad 9.1

4.2 ผลการจำลองคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแบบจำลอง

จากหัวข้อที่ 3.7 ในบทที่ 3 ได้กล่าวถึงการออกแบบตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ทางคณิตศาสตร์ที่ใช้โปรแกรม Orcad 9.1 โดยแบบจำลองนี้สามารถเปลี่ยนค่าพื้นฐานใช้งานได้ อาทิ เช่น แรงดันเปิดวงจร , กระแสลัดวงจร , อุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ , จำนวนบายพาสไดโอด เป็นต้น

ซึ่งในหัวข้อวิจัยนี้ ได้เลือกใช้โฟโตไดโอดรุ่น BS250 ซึ่งมีพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ค่ากระแสลัดวงจร 650 ไมโครแอมแปร์ , แรงดันเปิดวงจร 0.5 โวลต์ , กำลังไฟฟ้าสูงสุด 217 นาโนวัตต์ , ฟิสิกเตอร์ 0.85 เป็นต้น

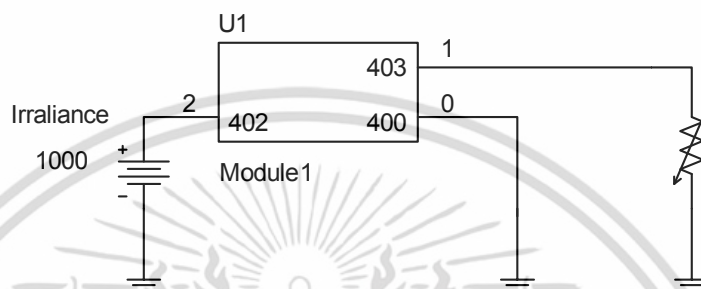


รูปที่ 4.1 วงจรสมมูลเซลล์แสงอาทิตย์อย่างง่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

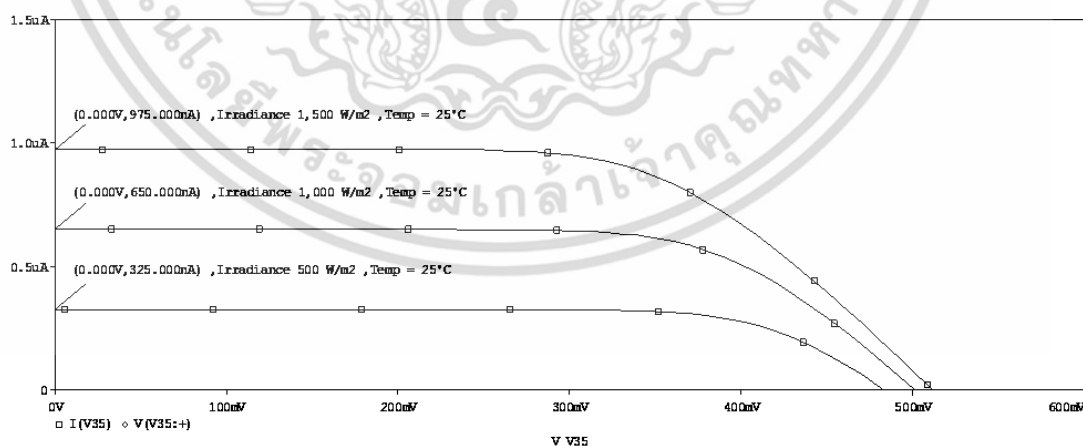
ซึ่งจากรูปภาพที่ 4.1 ในบทความนี้ ได้มีการทำการจำลองสัญญาณทางไฟฟ้าของ โฟโตไดโอด ผ่านแบบจำลองในสถานะแวลด์ลอมที่ต่างกัน คือ การเปลี่ยนความเข้มแสงที่ตกกระทบบนเซลล์แสงอาทิตย์ และอุณหภูมิแวลด์ลอม รวมถึงพารามิเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงไป เมื่อมีการต่อวงจรในรูปแบบที่ต่างกัน ดังต่อไปนี้

4.2.1 ผลการจำลองคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแบบจำลองในรูปแบบเซลล์เดียว



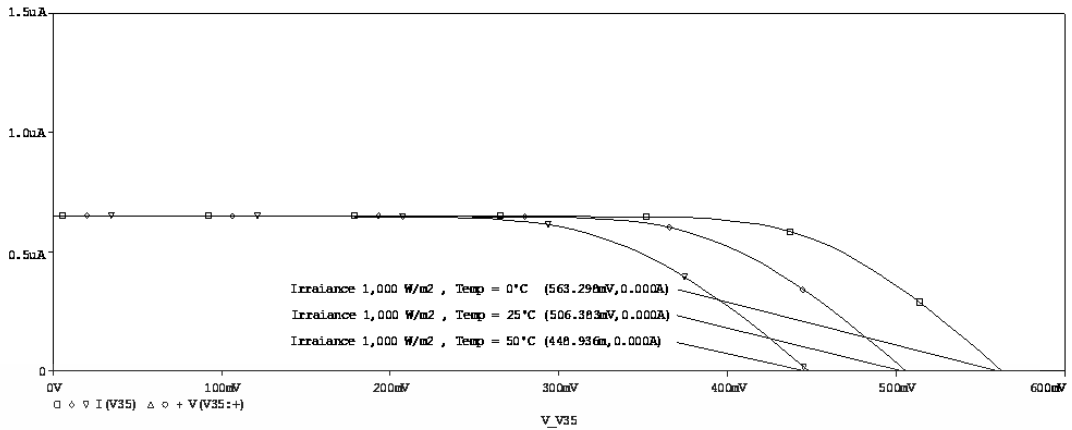
รูปที่ 4.2 แบบจำลอง Photodiode 1 cell ในโปรแกรม Orcad 9.1

จากภาพที่ 4.2 คือ การนำโฟโตไดโอด ที่มีขนาดกำลังสูงสุดที่ $0.217 \mu\text{W}$ กระแสลัดวงจรที่ $0.65 \mu\text{A}$ และแรงดันเปิดวงจรที่ 0.5V จำนวน 4 เซลล์ มาต่ออนุกรมรวมกัน ทำให้ขนาดของแรงดันเปิดวงจรมีค่าสูงขึ้น กำลังสูงสุดมีค่าสูงขึ้น แต่กระแสลัดวงจรไม่เปลี่ยนแปลง และมีผลการจำลองคุณสมบัติ ไฟฟ้า ดังนี้

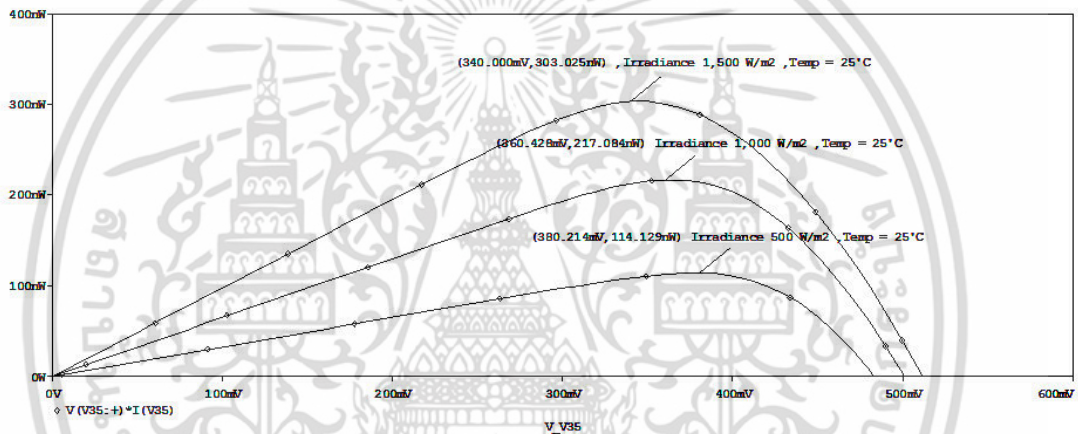


รูปที่ 4.3 ผลการจำลองกระแสไฟฟ้าของโฟโตไดโอด ในรูปแบบ I V characteristic ที่ความเข้มแสง 500, 1000, 1500 W/m^2 อุณหภูมิ 25°C ในโปรแกรม Orcad 9.1

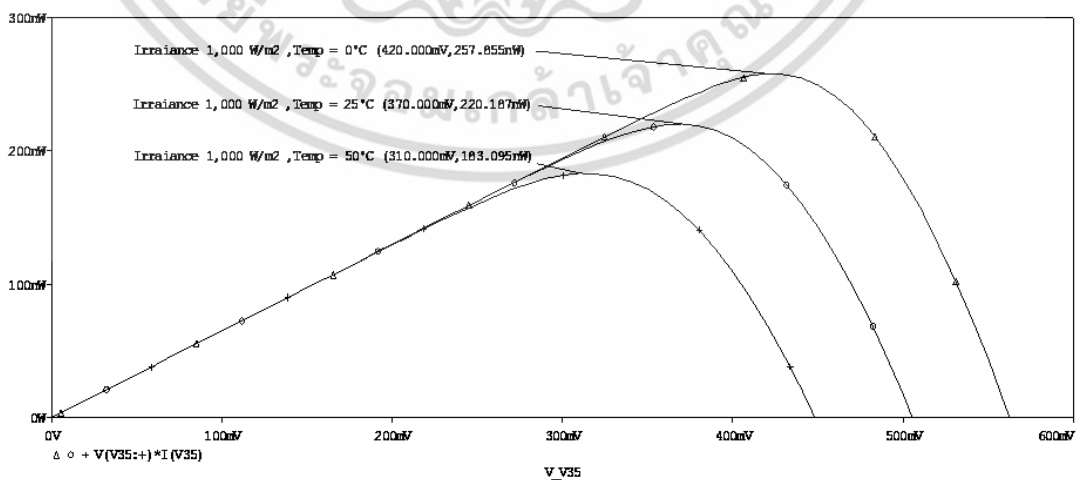
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 ผลการจำลองกระแสไฟฟ้าของโฟโต้ไดโอด ในรูปแบบ I V characteristic ที่ความเข้มแสง 1,000 W/m² อุณหภูมิ 0, 25 และ 50°C ในโปรแกรม Orcad 9.1



รูปที่ 4.5 ผลการจำลองกำลังไฟฟ้าของโฟโต้ไดโอด ในรูปแบบ I V characteristic ที่ความเข้มแสง 500, 1000, 1500 W/m² ในโปรแกรม Orcad 9.1



รูปที่ 4.6 ผลการจำลองกำลังไฟฟ้าของโฟโต้ไดโอด ในรูปแบบ I V characteristic ที่ความเข้มแสง 1,000 W/m² อุณหภูมิ 0, 25 และ 50 °C ในโปรแกรม Orcad 9.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

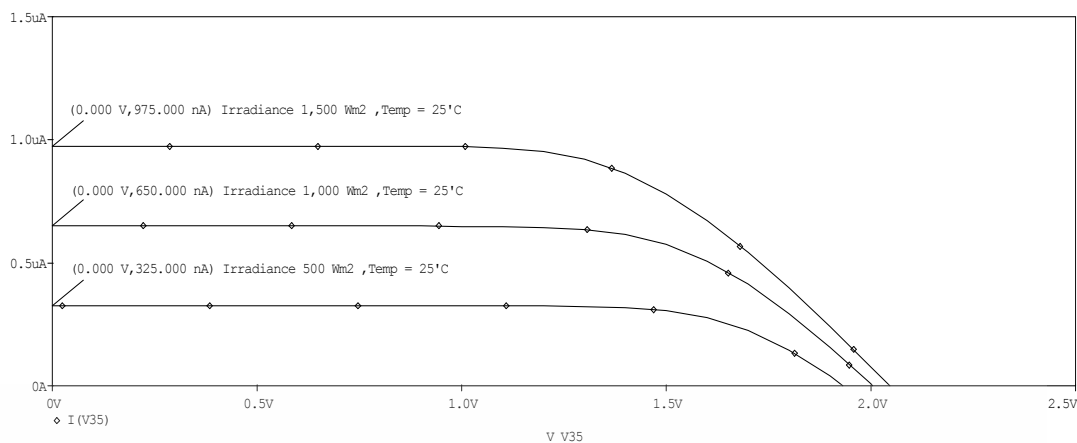
จากรูปภาพที่ 4.3 เมื่อจำลองการทำงาน โดยมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง เพิ่มขึ้น ในสถานะที่อุณหภูมิ 25°C พบว่ากระแสลัดวงจรจะมีค่าเพิ่มขึ้น แรงดันเปิดวงจรมีค่า เพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่งผลให้กำลังสูงสุด มีค่าเพิ่มขึ้น ดังรูปภาพที่ 4.5 และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิแบบจำลองเป็น 50 °C แบบจำลอง มีกระแสไฟฟ้าลัดวงจรไม่เปลี่ยนแปลง ในขณะที่แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรมีการเปลี่ยนแปลง ลดลงเป็น 420.00 mV ดังรูปภาพที่ 4.4 ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดมีค่าลดลง ดังรูปภาพที่ 4.6

4.2.2 ผลการจำลองคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแบบจำลองโฟโตไดโอด เมื่อต่ออนุกรม

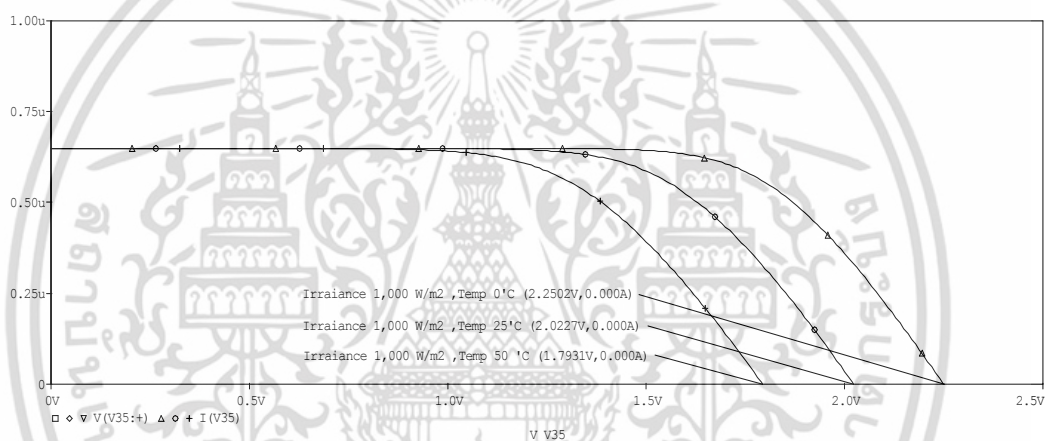


รูปที่ 4.7 วงจร Photodiode 4 Cell อนุกรมในโปรแกรม Orcad 9.1

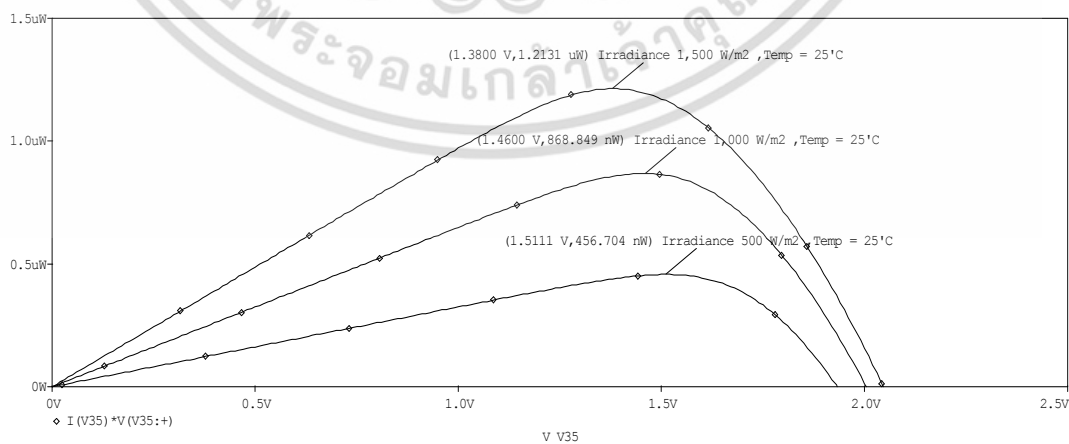
จากภาพที่ 4.7 คือ การนำโฟโตไดโอด ที่มีขนาดกำลังสูงสุดที่ 0.217 μW กระแสลัดวงจรที่ 0.65 μA และแรงดันเปิดวงจรที่ 0.5V จำนวน 4 เซลล์ มาต่ออนุกรมรวมกัน ทำให้ขนาดของแรงดันเปิดวงจรมีค่าสูงขึ้น กำลังสูงสุดมีค่าสูงขึ้น แต่กระแสลัดวงจรวงจรไม่เปลี่ยนแปลง และมีผลการจำลองคุณสมบัติ ไฟฟ้า ดังนี้



รูปที่ 4.8 ผลการจำลองกระแสไฟฟ้าของโฟโต้ไดโอด 4 เซลล์อนุกรมในรูปแบบ I V characteristic ที่ความเข้มแสง 500 , 1000 , 1500 W/m² ในโปรแกรม Orcad 9.1

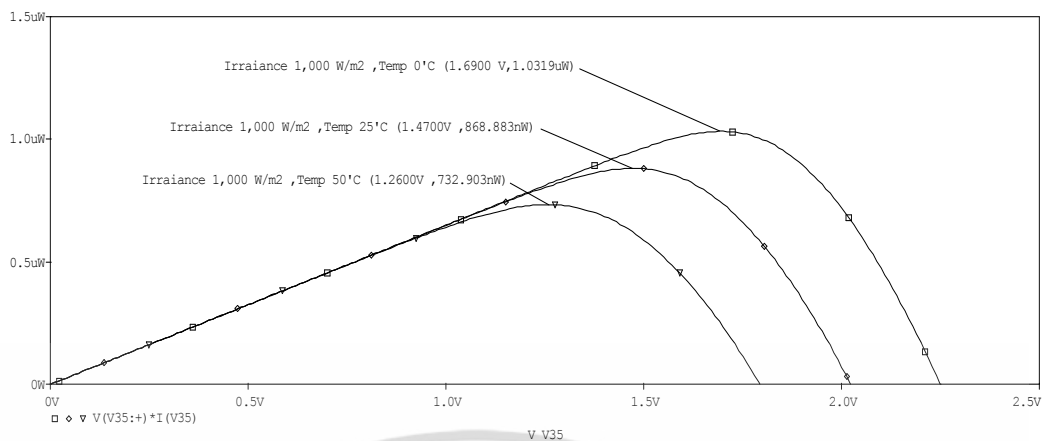


รูปที่ 4.9 ผลการจำลองกระแสไฟฟ้าของโฟโต้ไดโอด 4 เซลล์อนุกรม ในรูปแบบ I V characteristic ที่ความเข้มแสง 1,000 W/m² อุณหภูมิ 0 , 25 และ 50°C ในโปรแกรม Orcad 9.1



รูปที่ 4.10 ผลการจำลองกำลังไฟฟ้าของโฟโต้ไดโอด 4 เซลล์อนุกรม ในรูปแบบ I V characteristic ที่ความเข้มแสง 500 , 1000 , 1500 W/m² ในโปรแกรม Orcad 9.1

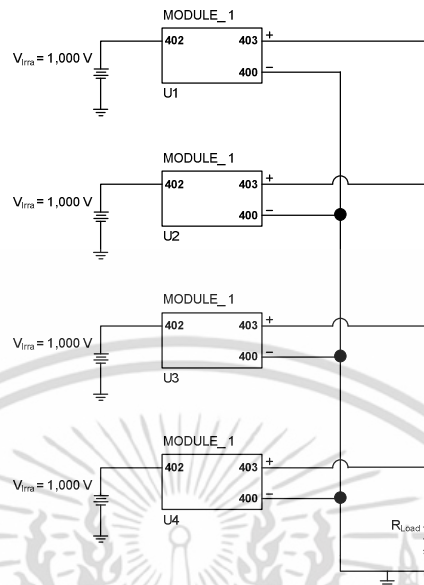
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 ผลการจำลองกำลังไฟฟ้าของโฟโต้ไดโอด 4 เซลล์อนุกรม ในรูปแบบ I V characteristic ที่ความเข้มแสง $1,000 \text{ W/m}^2$ อุณหภูมิ 0°C , 25°C และ 50°C ในโปรแกรม Orcad 9.1

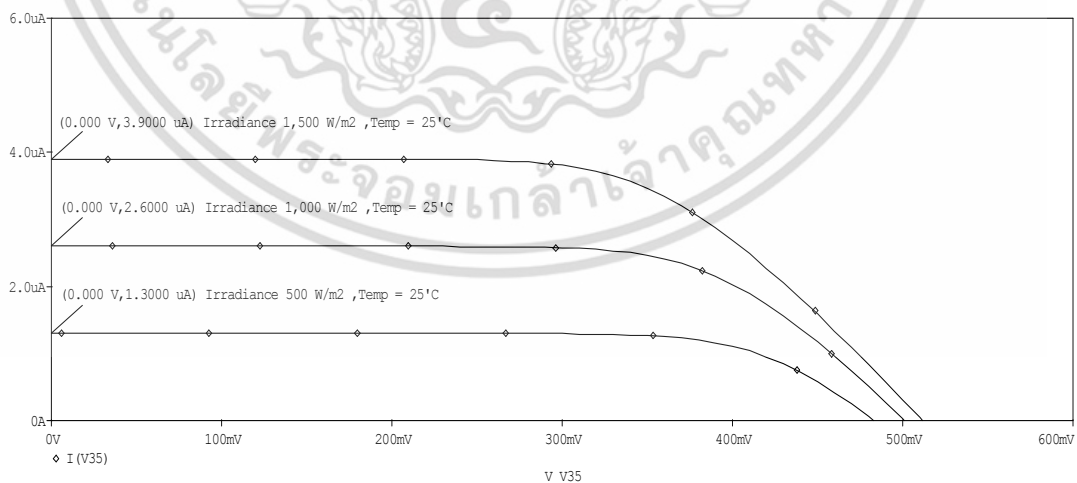
จากรูป ทั้งหมดเป็นกราฟแสดงการจำลองการทำงานของโฟโต้ไดโอด 4 เซลล์ต่ออนุกรม โดยเมื่อโฟโต้ไดโอดได้มีการต่ออนุกรม แรงดันเปิดวงจร และกำลังไฟฟ้ามักสูงขึ้น และกระแสลัดวงจร ไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งจากรูปที่ 4.9 และ 4.11 เป็นการจำลองสถานะการทำงานเมื่อมีการเปลี่ยน ความเข้มแสง ซึ่งกราฟของกระแสลัดวงจรมีการเปลี่ยนแปลงเหมือนสถานะทำงานจริง โดยเมื่อเพิ่ม ความเข้มแสงเป็น $1,500 \text{ W/m}^2$ ค่ากระแสลัดวงจรมีการเปลี่ยนแปลง เพิ่มขึ้นเป็น 975.00 nA จากเดิม 650.00 nA ค่าของแรงดันเปิดวงจรเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย กำลังไฟฟ้าสูงสุดมีค่าสูงขึ้นจาก 868.34 nW เป็น $1,212.21 \text{ nW}$ และเมื่อมีการลดอุณหภูมิเป็น 0°C ค่าของกระแสลัดวงจรไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่ค่าของแรงดันเปิดวงจรมีการเปลี่ยนแปลง จาก 2.0 V เป็น 2.5 V และกำลังไฟฟ้าสูงสุดเป็น $1,0319 \mu\text{W}$

4.2.3 ผลการจำลองคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแบบจำลองโฟโตนิกเมื่อต่อขนาน



รูปที่ 4.12 วงจร Photodiode 4 Cell ขนานในโปรแกรม Orcad 9.1

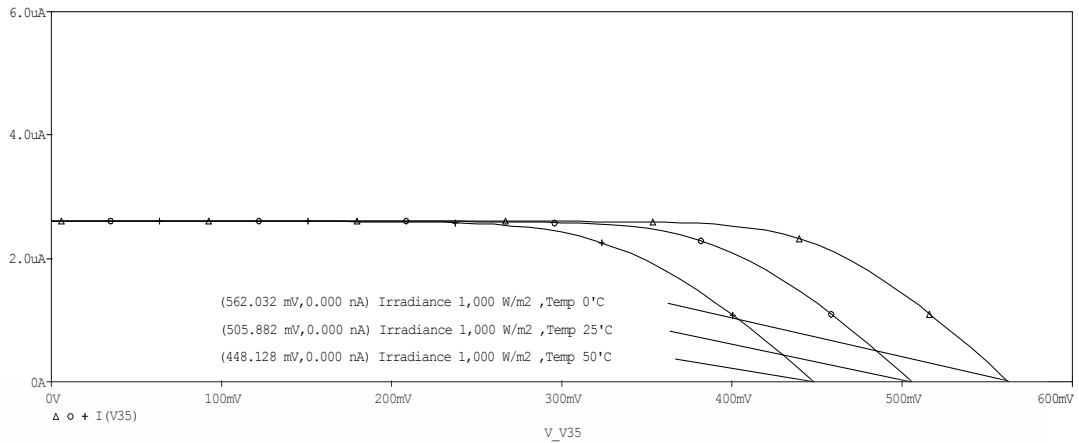
จากภาพที่ 4.12 คือ การนำโฟโตนิกที่มีขนาดกำลังสูงสุดที่ $0.217 \mu\text{W}$ กระแสลัดวงจรที่ $0.65 \mu\text{A}$ และแรงดันเปิดวงจรที่ 0.5V จำนวน 4 เซลล์ มาต่อขนานรวมกัน ส่งผลให้ขนาดกระแสลัดวงจร มีค่าสูงขึ้น กำลังสูงสุดมีค่าสูงขึ้น แต่แรงดันเปิดวงจรไม่เปลี่ยนแปลง และมีผลการจำลองคุณสมบัติไฟฟ้า ดังนี้



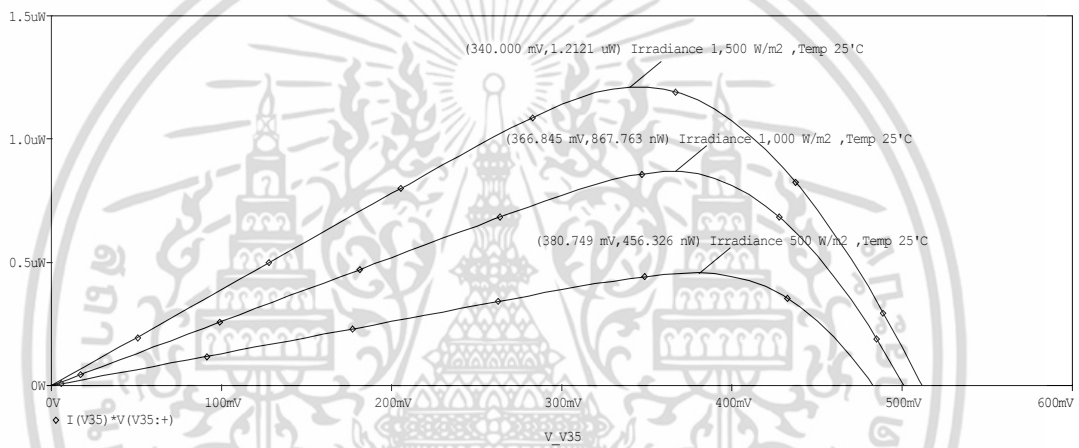
รูปที่ 4.13 ผลการจำลองกระแสไฟฟ้าของโฟโตนิก 4 เซลล์ขนาน ในรูปแบบ I V characteristic

ที่ความเข้มแสง $500, 1000, 1500 \text{ W/m}^2$ ในโปรแกรม Orcad 9.1

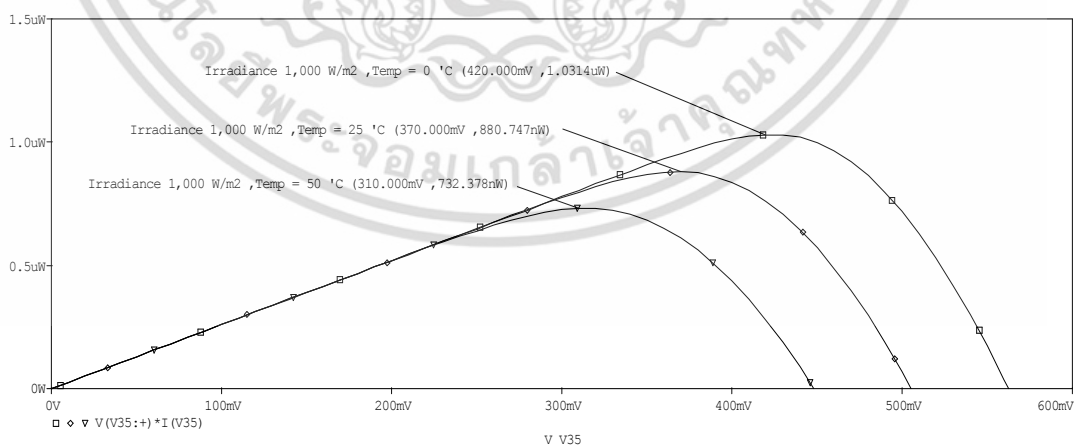
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 ผลการจำลองกระแสไฟฟ้าของโพลีไดโอด 4 เซลล์ขนาน ในรูปแบบ I V characteristic ที่ความเข้มแสง 1,000 W/m² อุณหภูมิ 0 , 25 และ 50°C ในโปรแกรม Orcad 9.1



รูปที่ 4.15 ผลการจำลองกำลังไฟฟ้าของโพลีไดโอด 4 เซลล์ขนาน ในรูปแบบ I V characteristic ที่ความเข้มแสง 500 , 1000 , 1500 W/m² ในโปรแกรม Orcad 9.1



รูปที่ 4.16 ผลการจำลองกำลังไฟฟ้าของโพลีไดโอด 4 เซลล์ขนาน ในรูปแบบ I V characteristic ที่ความเข้มแสง 1,000 W/m² อุณหภูมิ 0 , 25 และ 50 °C ในโปรแกรม Orcad 9.1

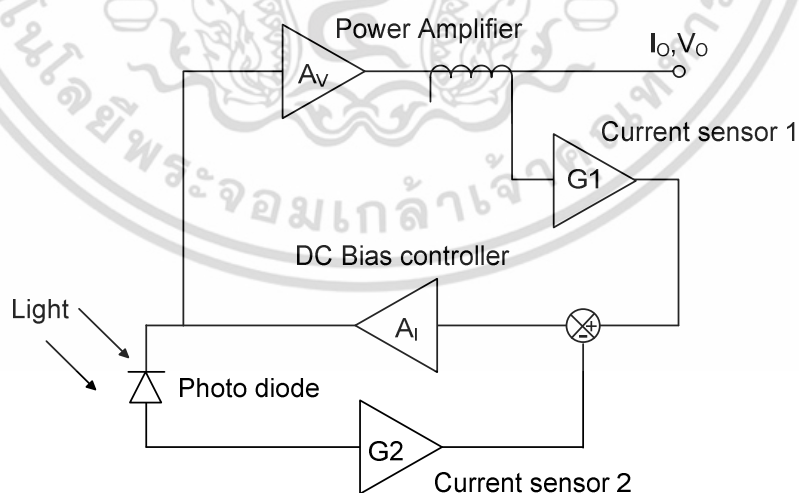
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป ทั้งหมดเป็นกราฟแสดงการจำลองการทำงานของโฟโตไดโอด 4 เซลล์ขนานกัน โดยเมื่อโฟโตไดโอดได้มีการต่อขนาน กระแสลัดวงจร และกำลังไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้น และแรงดันเปิดวงจร ไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งจากรูปที่ 4.13 และ 4.14 เป็นการจำลองสภาวะการทำงานเมื่อมีการเปลี่ยน ความเข้มแสง ซึ่งกราฟของกระแสลัดวงจรมีการเปลี่ยนแปลงเหมือนสภาวะทำงานจริง โดยเมื่อเพิ่ม ความเข้มแสงเป็น $1,500 \text{ W/m}^2$ ค่ากระแสลัดวงจรมีการเปลี่ยนแปลง เพิ่มขึ้นเป็น 3.90 nA จากเดิม 2.60 nA ค่าของแรงดันเปิดวงจรเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย กำลังไฟฟ้าสูงสุดมีค่าสูงขึ้นจาก 868.34 nW เป็น $1,212.21 \text{ nW}$ และเมื่อมีการลดอุณหภูมิเป็น $0 \text{ }^\circ\text{C}$ ค่าของกระแสลัดวงจรไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่ค่าของแรงดันเปิดวงจรมีการเปลี่ยนแปลง จาก 0.50 V เป็น 0.56 V และกำลังไฟฟ้าสูงสุดเป็น $1,030 \text{ nW}$

4.2.4. วงจรสร้างสัญญาณเลียนแบบคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

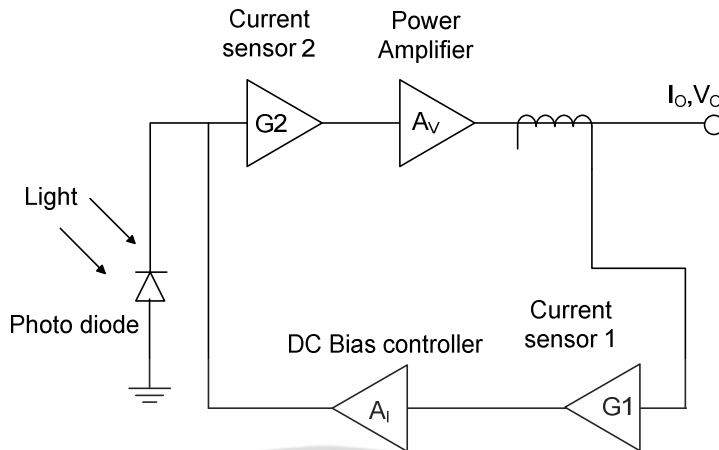
โดยใช้โฟโตไดโอด

โดยบทความนี้นำเสนอแบบจำลองที่แสดงคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ จากโฟโตไดโอด โดยคุณลักษณะทางไฟฟ้าดังกล่าวสามารถวัดได้โดยใช้สัญญาณที่มาจากรวมขยายสัญญาณ ได้โดยใช้ชุดขยาย Power Amplifier (A_v) ซึ่งทำให้สามารถหาพิคัดแรงดัน (V_o) และกระแส (I_o) มีขนาดที่สูงขึ้นตามการออกแบบ ขณะจ่ายโหลดสามารถควบคุมจุดทำงานได้ด้วยชุด DC Bias Controller โดยจะควบคุมจุดทำงานด้วยการตรวจจับกระแสเอาต์พุต ผ่านชุดขยายกระแส G_1 (Current Sensor 1) และ G_2 (Current Sensor 2) ดังรูปที่ 4.17 และ 4.18



รูปที่ 4.17 ไดอะแกรมการทำงานของวงจรสร้างสัญญาณเลียนแบบเซลล์แสงอาทิตย์ โดยใช้โฟโตไดโอดอนุกรมเป็นอินพุต

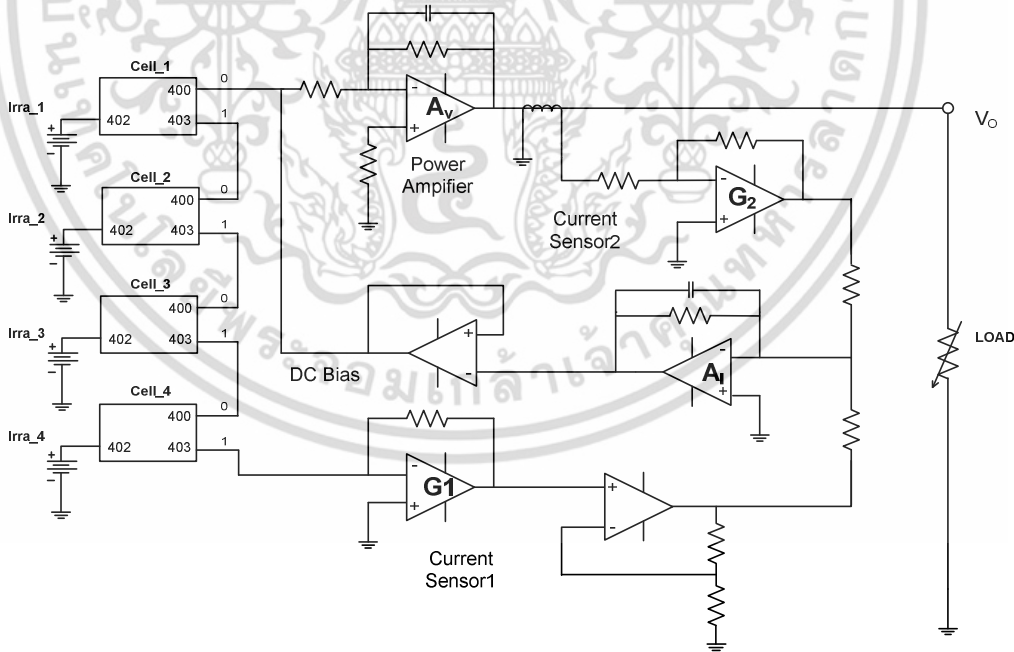
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 ไดอะแกรมการทำงานของวงจรถ่ายสัญญาณเลียนแบบเซลล์แสงอาทิตย์ โดยใช้โฟโต้ไดโอดขนานเป็นอินพุต

4.2.4.1 วงจรถ่ายสัญญาณเลียนแบบคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

โดยใช้โฟโต้ไดโอดแบบอนุกรม



รูปที่ 4.19 วงจรจำลองคุณลักษณะทางไฟฟ้าของโฟโต้ไดโอดอนุกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากแบบจำลองทางที่สร้างขึ้นในรูปที่ 4.19 สามารถนำมาใช้เป็นสัญญาณอ้างอิงในการจำลองการทำงานของวงจรจำลองคุณลักษณะทางไฟฟ้า ได้โดยการออกแบบวงจรขยาย Power Amplifier รวมเข้ากับวงจรไบอัสกระแสตรง ในรูปแบบของเซลล์อนุกรม ซึ่งคำนวณได้จาก

$$A_I = \frac{I_o}{I_{ph}} = \frac{G_1}{G_2} \quad (3.24)$$

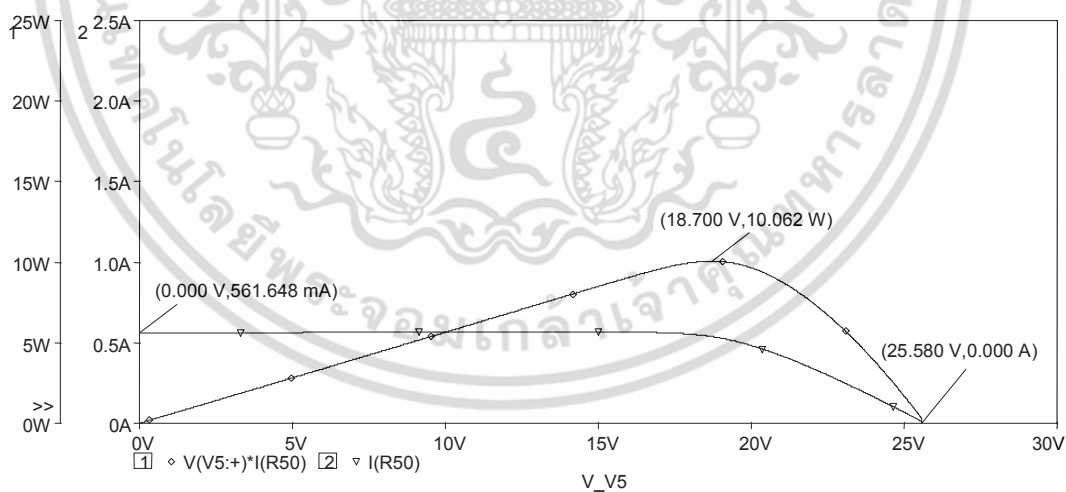
กำหนดให้ $G_1 = \frac{V_{\text{sensor1}}}{I_o}$ (3.25)

$$G_2 = \frac{V_{\text{sensor2}}}{I_{ph}} \quad (3.26)$$

เมื่อ I_o คือ กระแสเอาต์พุตของตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์

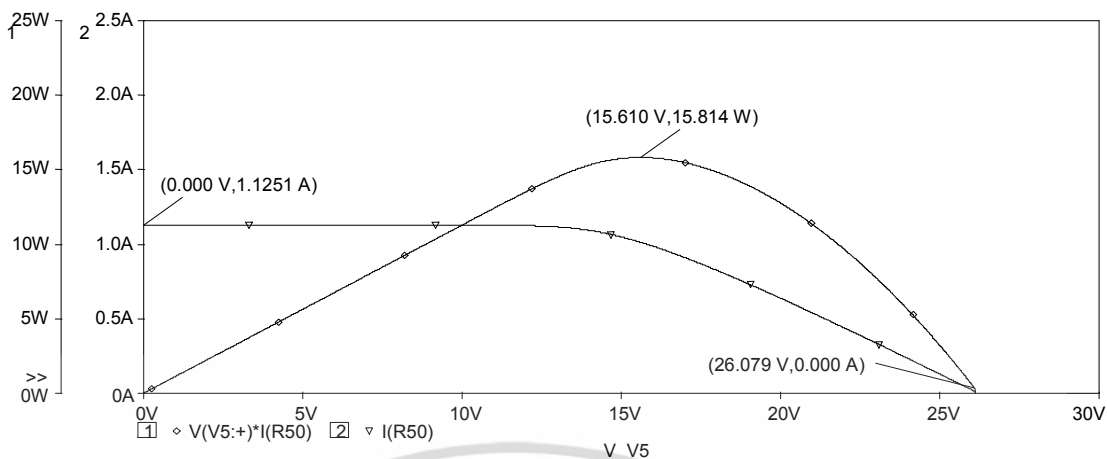
I_{ph} คือ กระแสเอาต์พุตจากเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิง

- ผลการจำลองสัญญาณเลียนแบบคุณลักษณะทางไฟฟ้าใช้โฟโต้ไดโอดแบบอนุกรม

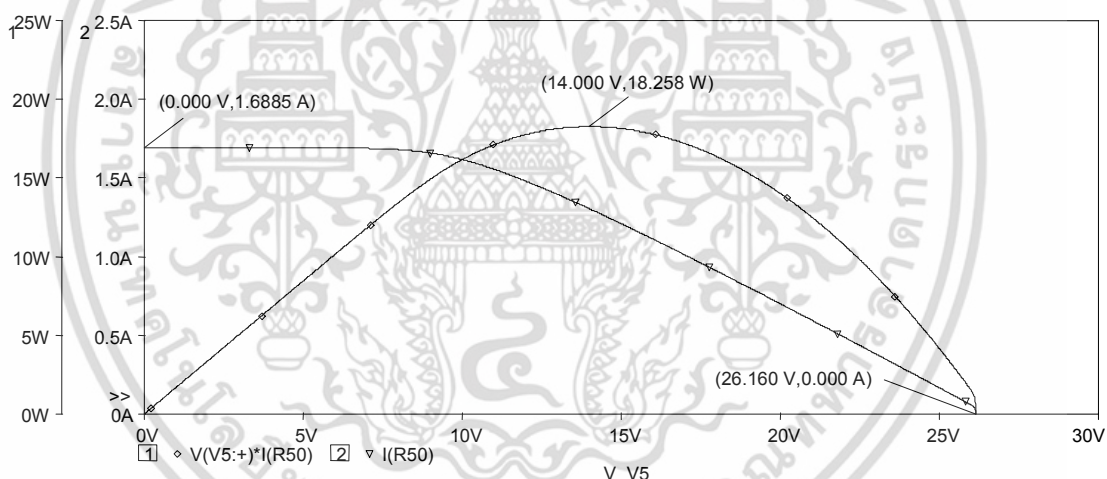


รูปที่ 4.20 ผลการจำลองกระแสและกำลังไฟฟ้าของโฟโต้ไดโอด ในรูปแบบ I V characteristic จากวงจรจำลองสัญญาณคุณลักษณะทางไฟฟ้าในรูปแบบอนุกรม เมื่อความเข้มแสง 500 W/m^2 อุณหภูมิ $25 \text{ }^\circ\text{C}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



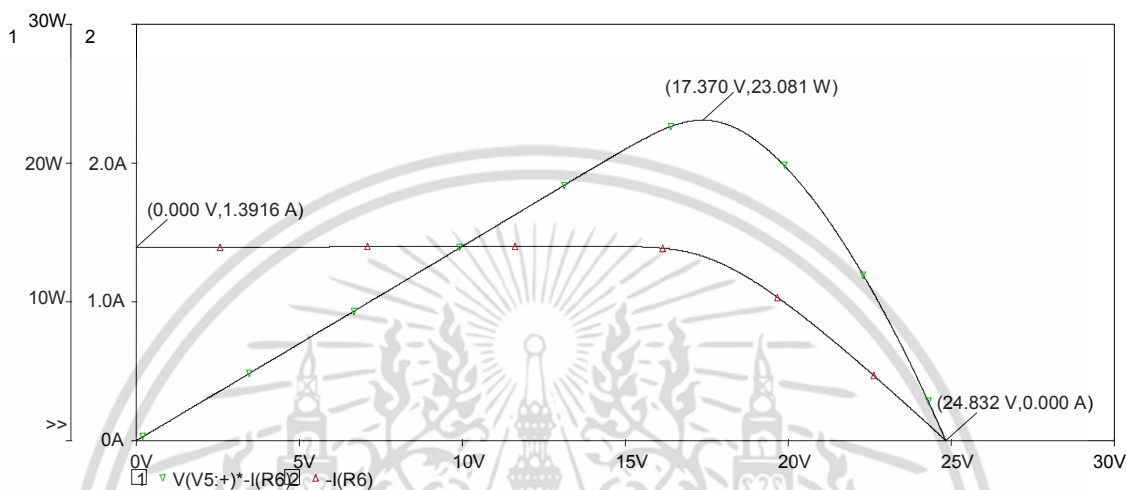
รูปที่ 4.21 ผลการจำลองกระแสและกำลังไฟฟ้าของโฟโต้ไดโอด ในรูปแบบ I V characteristic จากวงจรจำลองสัญญาณคุณลักษณะทางไฟฟ้าในรูปแบบอนุกรม เมื่อความเข้มแสง $1,000 \text{ W/m}^2$ อุณหภูมิ $25 \text{ }^\circ\text{C}$



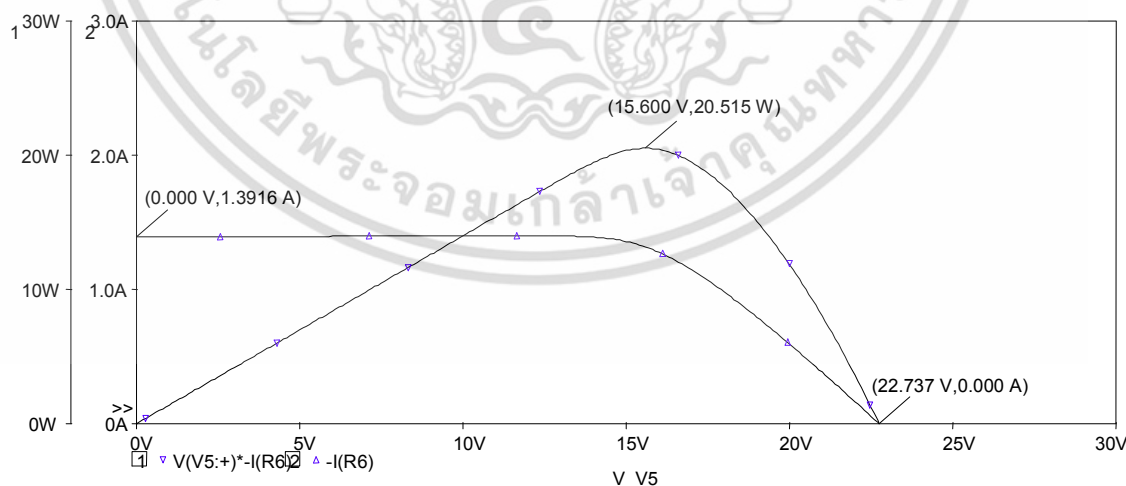
รูปที่ 4.22 ผลการจำลองกระแสและกำลังไฟฟ้าของโฟโต้ไดโอด ในรูปแบบ I V characteristic จากวงจรจำลองสัญญาณคุณลักษณะทางไฟฟ้าในรูปแบบอนุกรม เมื่อความเข้มแสง $1,500 \text{ W/m}^2$ อุณหภูมิ $25 \text{ }^\circ\text{C}$

จากรูปที่ 4.20 ,4.21 และ 4.22 ผลการจำลองคุณลักษณะทางไฟฟ้าโดยผ่านชุดวงจรขยายคุณลักษณะทางไฟฟ้า เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสภาวะความเข้มแสง จาก 500 W/m^2 เป็น $1,000 \text{ W/m}^2$ และ $1,500 \text{ W/m}^2$ สามารถสังเกตถึงการเปลี่ยนแปลงของค่ากระแสลัดวงจรที่มีการเปลี่ยนแปลงแปรผันตามความเข้มแสง อาทิเช่น จากสภาวะมาตรฐานความเข้มแสง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1,000 W/m² อุณหภูมิ 25°C ไปเป็นความเข้มแสง 1,500 W/m² อุณหภูมิ 25°C ส่งผลให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของค่ากระแสลัดวงจร จาก 1.125 A เป็น 1.685 A รวมถึงกำลังใช้งานที่มีค่าสูงขึ้น จาก 15.814 W เป็น 18.258 W และเมื่อเปลี่ยนความเข้มแสงเป็น 500 W/m² อุณหภูมิ 25°C ค่ากระแสลัดวงจรเปลี่ยนแปลงลดลงจาก 1.125 A เหลือ 541.648 A



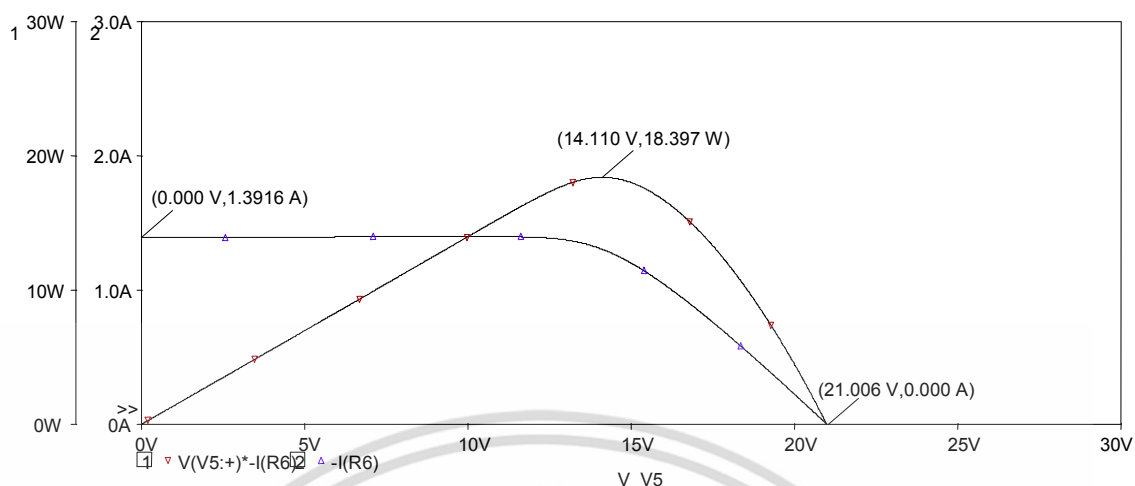
รูปที่ 4.23 ผลการจำลองกระแสและกำลังไฟฟ้าของโฟโต้ไดโอด ในรูปแบบ I V characteristic จากวงจรจำลองสัญญาณคุณลักษณะทางไฟฟ้าในรูปแบบอนุกรม เมื่อความเข้มแสง 1,000 W/m² อุณหภูมิ 0 °C



รูปที่ 4.24 ผลการจำลองกระแสและกำลังไฟฟ้าของโฟโต้ไดโอด ในรูปแบบ I V characteristic จากวงจรจำลองสัญญาณคุณลักษณะทางไฟฟ้าในรูปแบบอนุกรม เมื่อความเข้มแสง

1,000 W/m² อุณหภูมิ 25 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

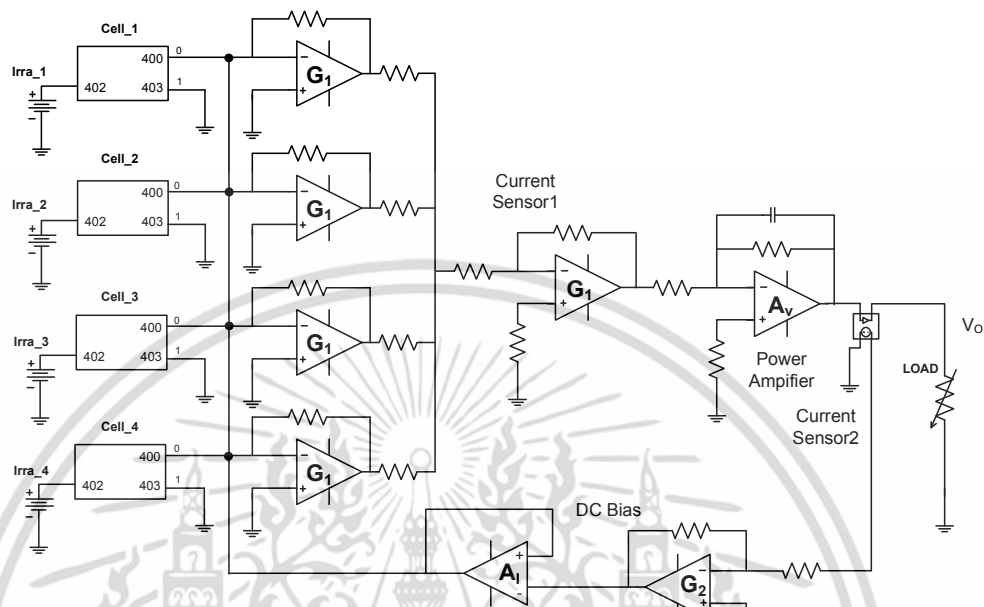


รูปที่ 4.25 ผลการจำลองกระแสและกำลังไฟฟ้าของโฟโตนิกไดโอด ในรูปแบบ I V characteristic จากวงจรจำลองสัญญาณคุณลักษณะทางไฟฟ้าในรูปแบบอนุกรม เมื่อความเข้มแสง $1,000 \text{ W/m}^2$ อุณหภูมิ $50 \text{ }^{\circ}\text{C}$

จากรูปที่ 4.23 ,4.24 และ 4.25 ผลการจำลองคุณลักษณะทางไฟฟ้าโดยผ่านชุดวงจรขยายคุณลักษณะทางไฟฟ้า เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์เป็น $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ และ $50 \text{ }^{\circ}\text{C}$ สามารถสังเกตเห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของค่าของแรงดันเปิดวงจร ที่มีการเปลี่ยนแปลงปรผันอุณหภูมิ อาทิเช่น จากสถานะมาตรฐานความเข้มแสง $1,200 \text{ W/m}^2$ อุณหภูมิ 25°C ไปเป็นอุณหภูมิ $50 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ส่งผลให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงค่าของแรงดันเปิดวงจร จาก 22.737 V เป็น 21.006 V รวมถึงกำลังใช้งานที่มีค่าสูงขึ้น จาก 20.515 W เป็น 18.373 W และเมื่อเปลี่ยนอุณหภูมิเป็น $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ค่าของแรงดันเปิดวงจรเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเป็น 24.828 V และค่ากำลังใช้งาน 23.001 W โดยการเปลี่ยนแปลงสถานะแวดล้อม ทั้งความเข้มแสง และอุณหภูมิ ผ่านวงจรขยายนี้ มีความสอดคล้องกับการจำลองคุณลักษณะทางไฟฟ้า ในรูปแบบของแบบจำลองเซลล์เดี่ยว ที่ไม่มีวงจรขยาย

4.2.4.2 วงจรสร้างสัญญาณเลียนแบบคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

โดยใช้โฟโตไดโอดแบบขนาน



รูปที่ 4.26 วงจรจำลองคุณลักษณะทางไฟฟ้าของโฟโตไดโอดขนาน

และจากแบบจำลองในรูปที่ 4.26 สามารถสร้างสัญญาณอ้างอิงในรูปแบบของเซลล์ขนานได้ ซึ่งคำนวณได้จาก

$$V_o = A_v G_1 \quad (3.27)$$

$$V_{BIAS} = A_1 G_2 \quad (3.28)$$

กำหนดให้
$$G_1 = \frac{V_{sensor1}}{I_{ph}} \quad (3.29)$$

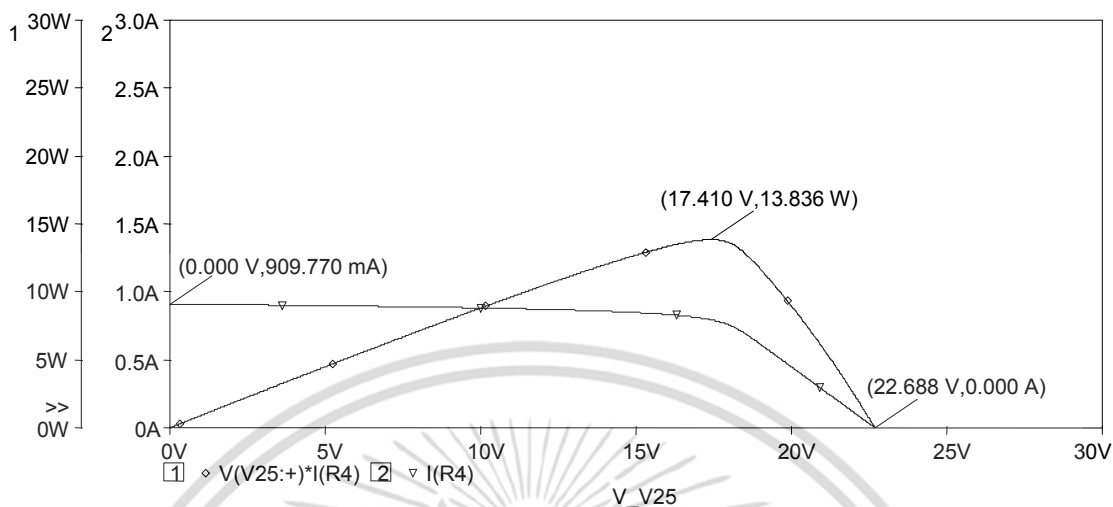
$$G_2 = \frac{V_{sensor2}}{I_o} \quad (3.30)$$

เมื่อ I_o คือ กระแสเอาต์พุตของตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์

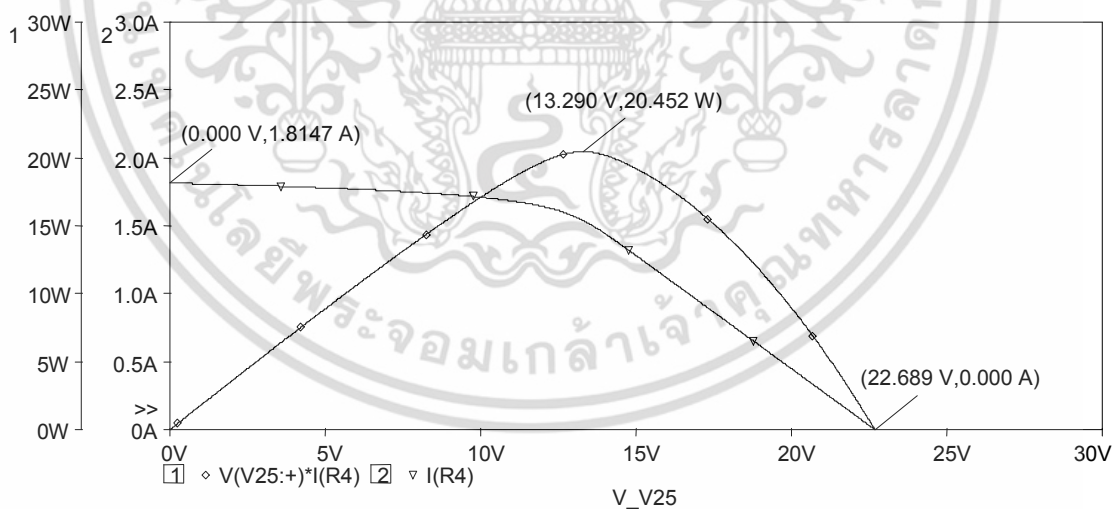
I_{ph} คือ กระแสเอาต์พุตจากเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ผลการจำลองสัญญาณเลียนแบบคุณลักษณะทางไฟฟ้าใช้โฟโต้ไดโอดแบบขนาน

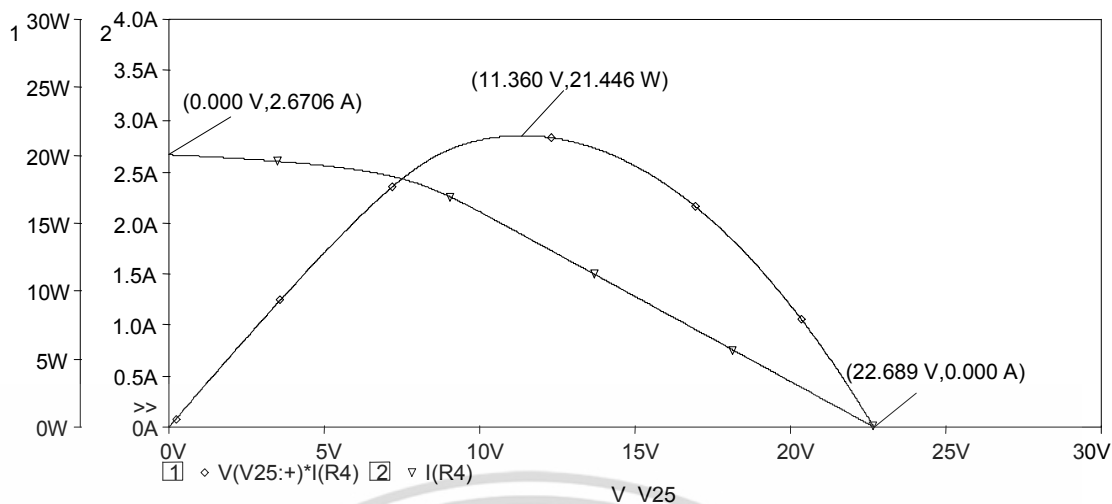


รูปที่ 4.27 ผลการจำลองกระแสและกำลังไฟฟ้าของโฟโต้ไดโอด ในรูปแบบ I V characteristic จากวงจรจำลองสัญญาณคุณลักษณะทางไฟฟ้าในรูปแบบขนาน เมื่อความเข้มแสง 500 W/m^2 อุณหภูมิ $25 \text{ }^\circ\text{C}$



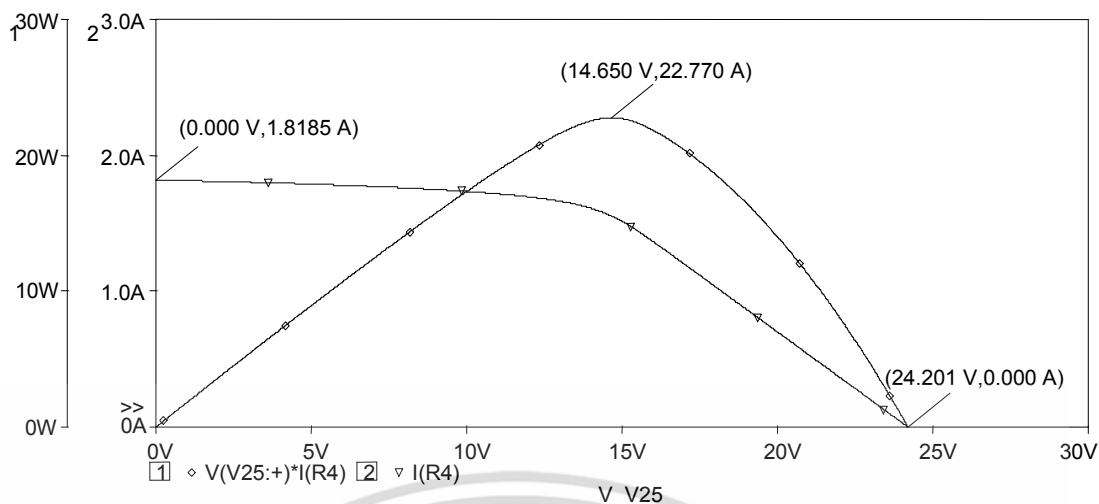
รูปที่ 4.28 ผลการจำลองกระแสและกำลังไฟฟ้าของโฟโต้ไดโอด ในรูปแบบ I V characteristic จากวงจรจำลองสัญญาณคุณลักษณะทางไฟฟ้าในรูปแบบขนาน เมื่อความเข้มแสง $1,000 \text{ W/m}^2$ อุณหภูมิ $25 \text{ }^\circ\text{C}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

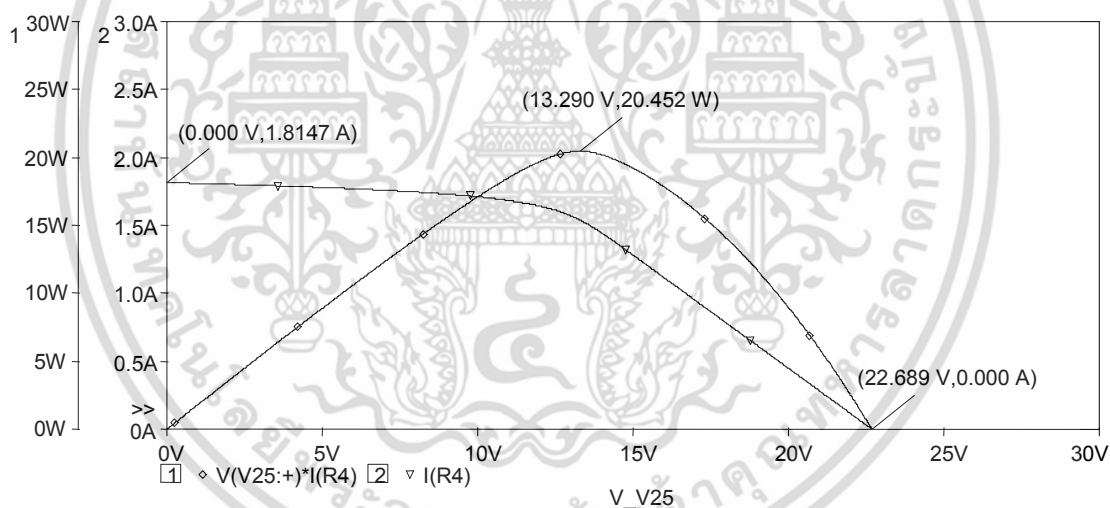


รูปที่ 4.29 ผลการจำลองกระแสและกำลังไฟฟ้าของโฟโตโวลตาอิก ในรูปแบบ I V characteristic จากวงจรจำลองสัญญาณคุณลักษณะทางไฟฟ้าในรูปแบบขนาน เมื่อความเข้มแสง $1,500 \text{ W/m}^2$ อุณหภูมิ 25°C

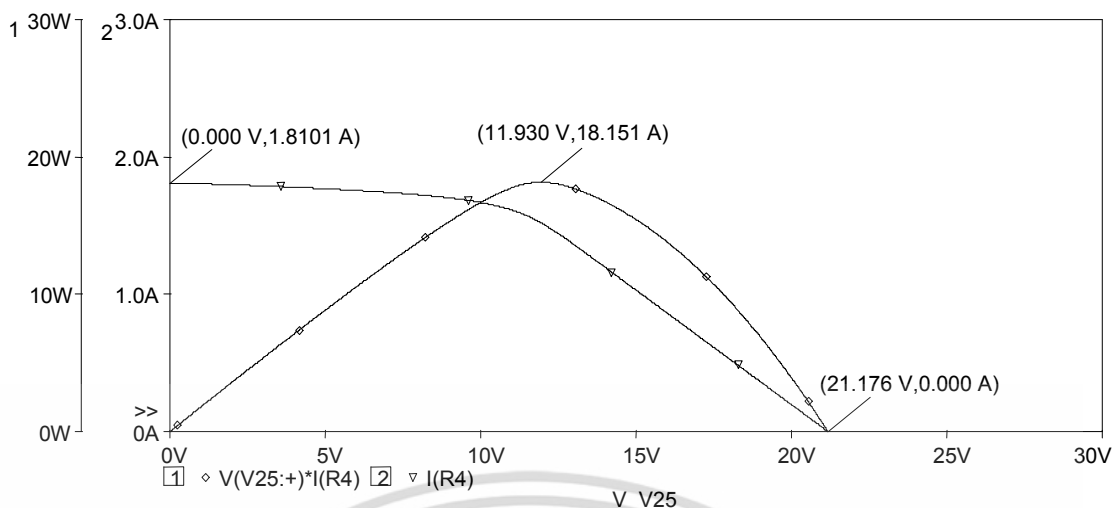
จากผลการจำลองสร้างสัญญาณในรูปแบบเซลล์อนุกรม ในรูปที่ 4.28 ,4.29 และ 4.30 ได้มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงเป็น $1,500 \text{ W/m}^2$ ค่ากระแสลัดวงจรมีค่า 1.6885 A ค่ากำลังใช้งานสูงสุด 18.258 W ตามลำดับ ซึ่งแตกต่างจากผลการจำลองสร้างสัญญาณในรูปแบบเซลล์ขนาน ที่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงเป็น $1,500 \text{ W/m}^2$ มีค่ากระแสลัดวงจรเท่ากับ 2.6706 A กำลังใช้งานสูงสุด 21.446 W ในสภาวะตั้งต้นที่มีค่ากำลังสูงสุดใช้งานใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นถึงรูปแบบขนาน มีรูปแบบลักษณะของกระแส รวมถึงค่ากระแสลัดวงจร ที่มีการเปลี่ยนแปลงตามสภาพแวดล้อมเด่นชัด มากกว่าแบบจำลองสร้างสัญญาณในรูปแบบเซลล์อนุกรม ดังแสดงในรูปภาพที่ 4.20 ,4.21 ,4.22 ,4.27 ,4.28 และ 4.29



รูปที่ 4.30 ผลการจำลองกระแสและกำลังไฟฟ้าของโฟโต้ไดโอด ในรูปแบบ I V characteristic จากวงจรจำลองสัญญาณคุณลักษณะทางไฟฟ้าในรูปแบบขนาน เมื่อความเข้มแสง $1,000 \text{ W/m}^2$ อุณหภูมิ $0 \text{ }^\circ\text{C}$



รูปที่ 4.31 ผลการจำลองกระแสและกำลังไฟฟ้าของโฟโต้ไดโอด ในรูปแบบ I V characteristic จากวงจรจำลองสัญญาณคุณลักษณะทางไฟฟ้าในรูปแบบขนาน เมื่อความเข้มแสง $1,000 \text{ W/m}^2$ อุณหภูมิ $25 \text{ }^\circ\text{C}$



รูปที่ 4.32 ผลการจำลองกระแสและกำลังไฟฟ้าของโฟโตโวลตาอิก ในรูปแบบ I V characteristic จากวงจรจำลองสัญญาณคุณลักษณะทางไฟฟ้าในรูปแบบขนาน เมื่อความเข้มแสง $1,000 \text{ W/m}^2$ อุณหภูมิ $50 \text{ }^\circ\text{C}$

จากรูปที่ 4.30 ,4.31 และ 4.32 เป็นผลการจำลองคุณลักษณะทางไฟฟ้า โดยผ่านชุดวงจรขยายคุณลักษณะทางไฟฟ้า เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์เป็น $0 \text{ }^\circ\text{C}$, $25 \text{ }^\circ\text{C}$ และ $50 \text{ }^\circ\text{C}$ โดยค่าของแรงดันเปิดวงจรจะมีการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ อาทิเช่น เมื่อเปลี่ยนอุณหภูมิจากสภาวะมาตรฐานความเข้มแสง $1,000 \text{ W/m}^2$ อุณหภูมิ 25°C ไปเป็นอุณหภูมิ $0 \text{ }^\circ\text{C}$ ส่งผลให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงค่าของแรงดันเปิดวงจรที่มีค่าเพิ่มขึ้น จาก 22.689 V เป็น 21.201 V รวมถึงกำลังใช้งานที่มีค่าสูงขึ้น จาก 20.452 W เป็น 22.770 W โดยการเปลี่ยนแปลงสภาวะแวดล้อม ทั้งความเข้มแสง และอุณหภูมิ ผ่านวงจรขยายนี้ มีความสอดคล้องกับการจำลองคุณลักษณะทางไฟฟ้าในรูปแบบของแบบจำลองเซลล์เดี่ยวที่ไม่มีวงจรถ่าย และเมื่อผ่านวงจรถ่ายสัญญาณในรูปแบบอนุกรมอีกด้วย

4.3 สรุป

การจำลองการทำงานของโฟโตนิกไดโอด จากสมการทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม OrCAD แสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ตอบสนองกับสภาพแวดล้อมต่างๆ เช่น ความเข้มแสง และ อุณหภูมิ โดยมีความใกล้เคียงกับโฟโตนิกไดโอดขนาด 220 nW และได้ใช้ชุดขยายสัญญาณ เพื่อศึกษาคุณสมบัติของโฟโตนิกไดโอด ให้มีความใกล้เคียงกับเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 30 W ทั้งในรูปแบบเซลล์ขนาน และอนุกรม เพื่อศึกษาพารามิเตอร์ต่างๆ อาทิเช่น ค่ากระแสลัดวงจร ค่าแรงดันเปิดวงจร ค่ากำลังสูงสุดใช้งาน ที่เปลี่ยนแปลงจากผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมต่างๆ ของโฟโตนิกไดโอด ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อการใช้งาน เพื่อศึกษาความแตกต่างระหว่างของรูปแบบเซลล์ขนานอนุกรม เพื่อเป็นการเพิ่มแนวทางในการใช้งานในอนาคต เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์ หรือ อาจรวมถึงเซลล์แสงอาทิตย์อื่นๆ ให้ได้ประโยชน์สูงสุด ต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

ผลการทดลอง

5.1 บทนำ

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดสอบตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่นำผลจากการจำลองในโปรแกรม Orcad 9.1 มาทำวงจรถจริง โดยเนื้อหาหลักๆ ในบทนี้จะประกอบเป็นหัวข้อดังต่อไปนี้

- ผลการทดสอบวงจรจำลองเซลล์แสงอาทิตย์จริงในรูปแบบ Photovoltaic
- ผลการทดสอบจากโฟโต้ไดโอดจริงในโหมด Photovoltaic
- ผลการทดสอบจากโฟโต้ไดโอดจริงผ่านวงจรขยายสัญญาณในโหมด Photovoltaic
- การสรุปผลการทดลอง เปรียบเทียบกับผลการทดลองจากวงจรจำลองเซลล์แสงอาทิตย์กับผลการทดลองเซลล์แสงอาทิตย์จริง

5.2 ผลการทดสอบจากโฟโต้ไดโอดจริงในโหมด Photovoltaic

จากการออกแบบการจำลองเซลล์อาทิตย์ ซึ่งเลือกการใช้โฟโต้ไดโอดในการสร้างสัญญาณอ้างอิงแทนเซลล์แสงอาทิตย์ เราจึงได้มีการทดสอบคุณลักษณะทางไฟฟ้าของโฟโต้ไดโอด เพื่อศึกษาว่าโฟโต้ไดโอดสามารถให้คุณลักษณะทางไฟฟ้าเหมือนเซลล์แสงอาทิตย์จริง เมื่อมีการทำงานในสภาวะการจ่ายโหลด โดยการทดสอบแบ่งออกได้เป็น โดยการทดสอบทั้งหมด ทดสอบในสภาวะมาตรฐานที่ความเข้มแสง $1,000 \text{ W/m}^2$ และอุณหภูมิที่ $25 \text{ }^\circ\text{C}$

- การหาค่าเทียบความเข้มแสง W/m^2 กับค่าแรงดันไฟฟ้า LED
- ทดสอบกระแสไฟฟ้าลัดวงจรเมื่อเปลี่ยนความเข้มแสง
- ทดสอบคุณลักษณะทางไฟฟ้าเมื่อมีการเปลี่ยนความเข้มแสง

5.2.1 ผลการหาค่าความเข้มแสงเทียบกับแรงดันไฟฟ้า LED

จากบทความวิจัยนี้ ได้ใช้หลอด LED สีขาว ทำหน้าที่ในการให้แสงสว่างแก่โฟโต้ไดโอด แทนหลอดไฟฟ้าแบบอื่นๆ ซึ่งจะทำให้ความเข้มที่เสถียร ไม่เกิดความร้อนจากหลอด ซึ่งจะไม่ผลเรื่องอุณหภูมิ และไม่มีค่าของความถี่จากแหล่งจ่ายเข้ามาเกี่ยวข้อง เนื่องจากหลอด LED นี้ใช้แหล่งจ่ายเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบกระแสตรงที่สามารถปรับค่าได้จาก IC L200 ซึ่งทำให้ผลการทดลองมีความคล้ายคลึงกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์รับพลังงานจากดวงอาทิตย์มากขึ้น โดยหน่วยของความเข้มแสงเป็นวัตต์ต่อตารางเมตร (Watt per area) ซึ่งเป็นหน่วยที่นิยมใช้อย่างแพร่หลาย บทความวิจัยนี้ได้ทำการหาค่าของแรงดันจากไอซี L200 ในแต่ละค่า กับความเข้มแสงในย่านต่างๆ จากสมการนี้

$$P = \frac{E_x \times A}{\eta} \quad (5.1)$$

เมื่อ P คือ กำลังไฟฟ้า (Watt)
 E_x คือ ลักซ์ (Lux)
 A คือ พื้นที่ (Area, m^2)
 η คือ ค่าคงที่แหล่งจ่าย (หลอด LED ,60 ต่อหลอด)

โดยจากสมการที่ (5.1) และผลการทดสอบ สามารถหาค่าของความเข้มแสงวัตต์ต่อตารางเมตร ในการปรับค่าแหล่งจ่ายแรงดัน LED ได้ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าแหล่งจ่าย LED กับความเข้มแสง

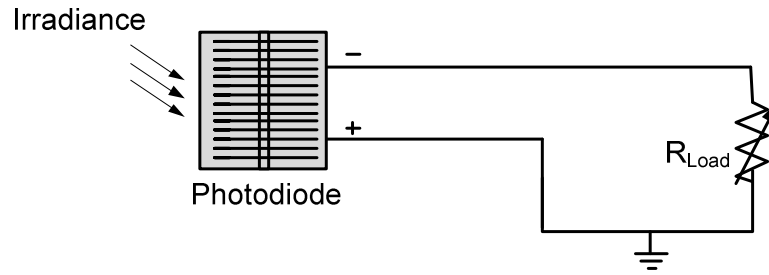
ลำดับ	แรงดันไฟฟ้า LED (โวลต์)	E (ลักซ์)	η (ลูเมน/วัตต์)	พื้นที่ (ตารางเมตร)	ความเข้มแสง (วัตต์ต่อตารางเมตร)
1	12.00	2,500.00	360.00	0.0025	2,777.78
2	8.00	1,000.00	360.00	0.0025	1,111.11
3	4.00	400.00	360.00	0.0025	444.44

จากตารางที่ 5.1 สามารถสังเกตได้ว่า ค่าแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่าย LED ที่ให้ค่ามาตรฐานการทดลองในบทความวิจัยนี้ ค่าความเข้มแสง 500 W/m^2 มีแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่หลอด LED ที่ 4.00 V, ค่าความเข้มแสง $1,000 \text{ W/m}^2$ มีแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่หลอด LED ที่ 8.00 V และค่าความเข้มแสง $1,500 \text{ W/m}^2$ มีแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่หลอด LED ที่ 12.00 V โดยประมาณ

5.2.2 ผลการทดสอบโฟโตนิกไดโอด 1 เซลล์ ในโหมด Photovoltaic

จากการออกแบบวงจรจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ ได้เลือกใช้ข้อมูลอ้างอิงของโฟโตนิกไดโอด BS250 ซึ่งมีค่าของกระแสลัดวงจร 650 nA ,แรงดันเปิดวงจร 0.5 V และกำลังสูงสุดที่ 220 nW จากหัวข้อวิจัยนี้ ได้ทำการทดลองเพื่อหาสัญญาณคุณลักษณะทางไฟฟ้าของโฟโตนิกไดโอดนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

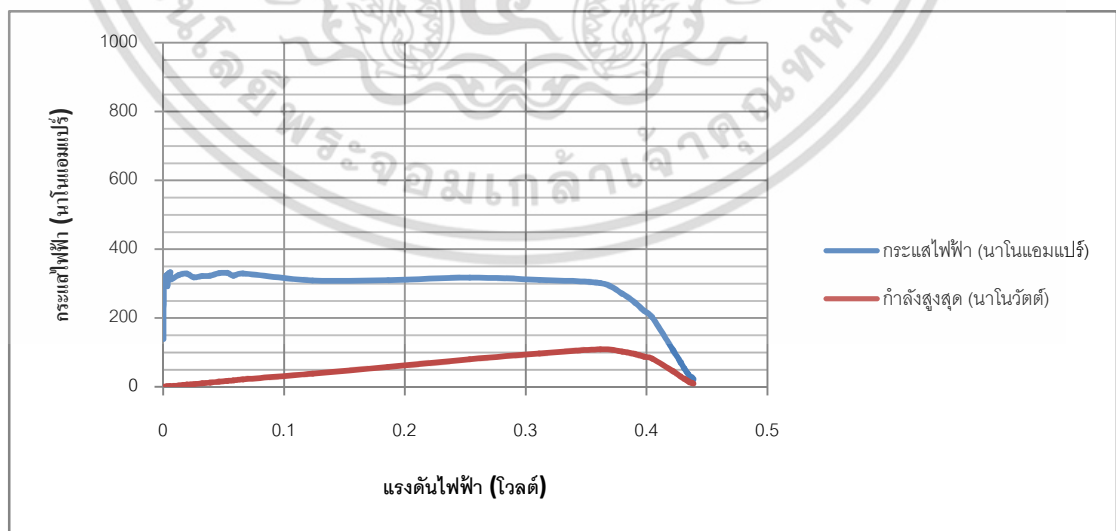


รูปที่ 5.1 วงจรการทดสอบเพื่อหาคุณลักษณะทางไฟฟ้าของโฟโต้ไดโอด ในโหมด Photovoltaic

เมื่อนำข้อมูลผลการทดสอบทั้งหมด มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ ซึ่งจะได้กราฟที่แสดงคุณลักษณะทางไฟฟ้าของโฟโต้ไดโอด 1 เซลล์ เพื่อนำไปใช้เปรียบเทียบกับสัญญาณขาออกของวงจรขยายคุณลักษณะทางไฟฟ้าต่อไป

ตารางที่ 5.2 ผลการทดลองของโฟโต้ไดโอด 1 เซลล์ เมื่อความเข้มแสง 500 W/m^2

ค่าความต้านทาน (โอห์ม)	แรงดันตกคร่อมโฟโต้ไดโอด (โวลต์)	กระแสไฟฟ้า (นาโนแอมแปร์)	กำลังสูงสุด (นาโนวัตต์)	หมายเหตุ
100	0.44	21.94	9.63	ค่าแรงดันเปิดวงจร
60	0.38	301.46	109.05	ค่ากำลังสูงสุด
0.7	0.00	330.00	1.52	ค่ากระแสลัดวงจร

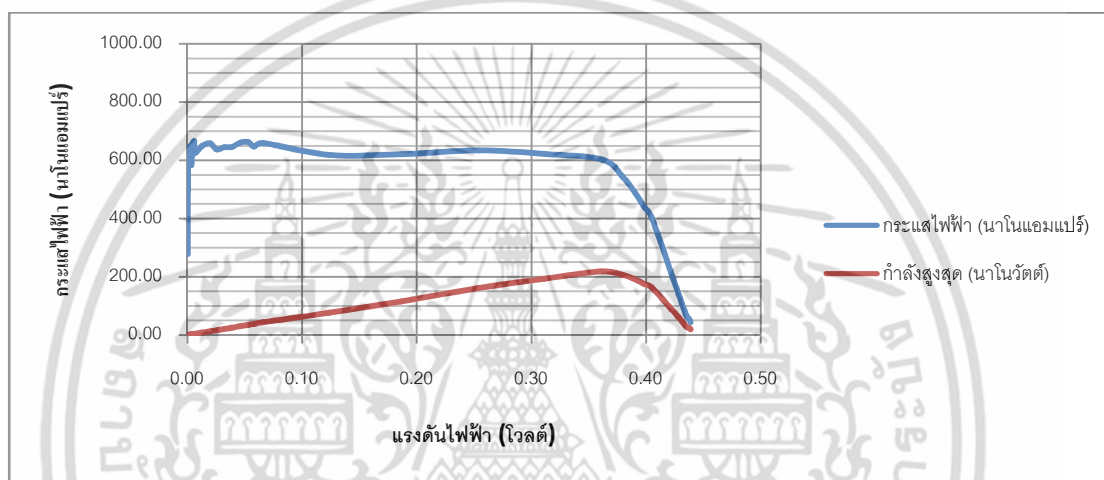


รูปที่ 5.2 กราฟผลการทดสอบหากระแส และกำลังไฟฟ้าในรูปแบบ I V characteristic

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.3 ผลการทดลองของโฟโตโวลตาอิก 1 เซลล์ เมื่อความเข้มแสง $1,000 \text{ W/m}^2$

ค่าความต้านทาน (โอห์ม)	แรงดันตกคร่อมโฟโตโวลตาอิก (โวลต์)	กระแสไฟฟ้า (นาโนแอมแปร์)	กำลังสูงสุด (นาโนวัตต์)	หมายเหตุ
100	0.44	43.88	19.25	ค่าแรงดันเปิดวงจร
60	0.36	602.92	218.11	ค่ากำลังสูงสุด
0.9	0.01	665.83	3.99	ค่ากระแสลัดวงจร

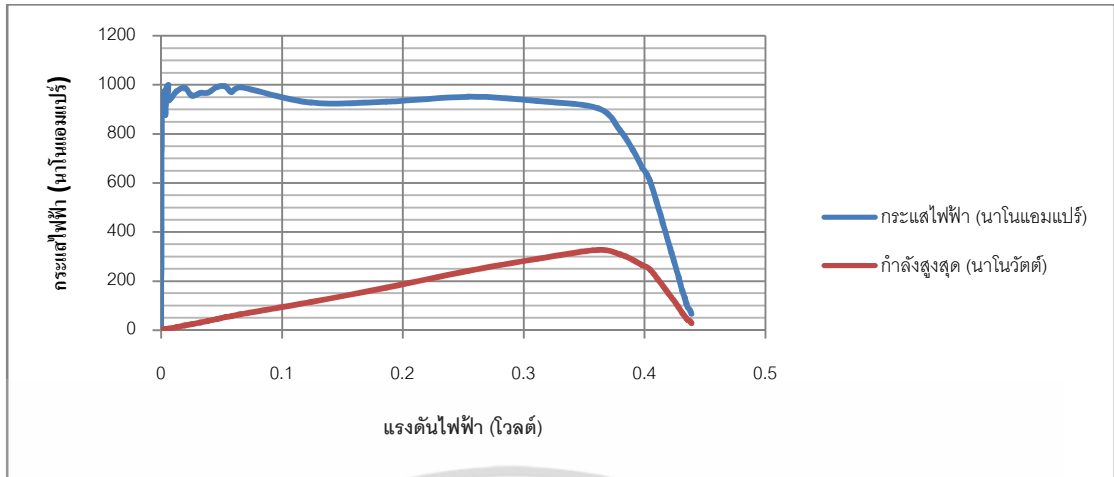


รูปที่ 5.3 กราฟผลการทดสอบหากระแส และกำลังไฟฟ้าในรูปแบบ I V characteristic โฟโตโวลตาอิก 1 เซลล์ ที่ความเข้มแสง $1,000 \text{ W/m}^2$

ตารางที่ 5.4 ผลการทดลองของโฟโตโวลตาอิก 1 เซลล์ เมื่อความเข้มแสง $1,500 \text{ W/m}^2$

ค่าความต้านทาน (โอห์ม)	แรงดันตกคร่อมโฟโตโวลตาอิก (โวลต์)	กระแสไฟฟ้า (นาโนแอมแปร์)	กำลังสูงสุด (นาโนวัตต์)	หมายเหตุ
100	0.44	65.81	28.88	ค่าแรงดันเปิดวงจร
60	0.34	933.75	290.63	ค่ากำลังสูงสุด
0.8	0.00	990.00	4.57	ค่ากระแสลัดวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

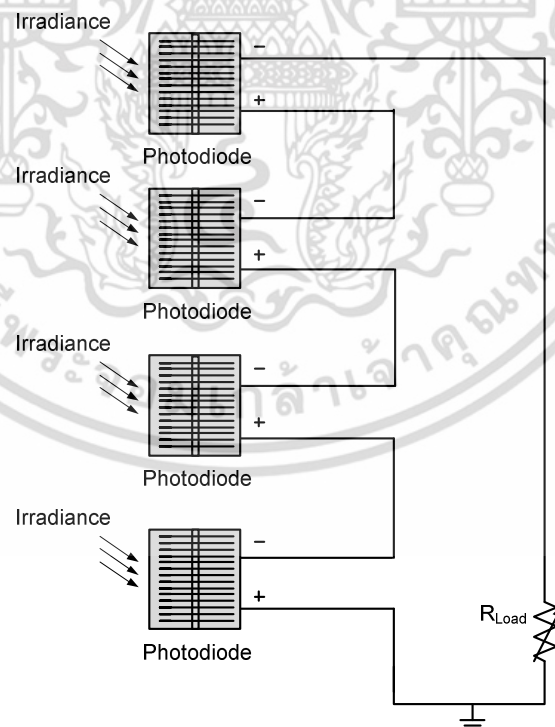


รูปที่ 5.4 กราฟผลการทดสอบหากระแส และกำลังไฟฟ้าในรูปแบบ I V characteristic

โพลีไดโอด 1 เซลล์ ที่ความเข้มแสง $1,500 \text{ W/m}^2$

5.2.3 ผลการทดสอบโพลีไดโอด 4 เซลล์ ในโหมด Photovoltaic

5.2.3.1 ผลการทดสอบโพลีไดโอด 4 เซลล์ เมื่อต่อแบบอนุกรม ในโหมด Photovoltaic



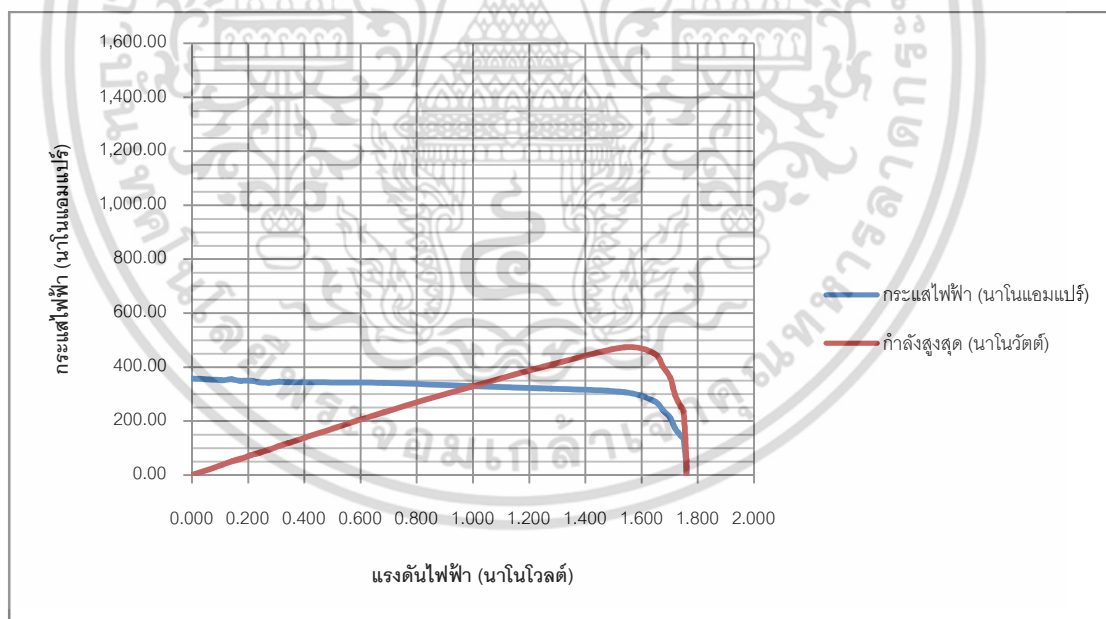
รูปที่ 5.5 วงจรการทดสอบเพื่อหาคุณลักษณะทางไฟฟ้าของโพลีไดโอด เมื่อต่อวงจรแบบอนุกรม ในโหมด Photovoltaic

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองวงจรจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบเซลล์เดี่ยว ในสภาวะ การเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง ถ้ามีการนำเซลล์แสงอาทิตย์มาต่อวงจรรวมกันในรูปแบบอนุกรม ซึ่งจะมีค่าของคุณลักษณะทางไฟฟ้าที่แตกต่างจากรูปแบบเซลล์เดี่ยว โดยการต่อแบบอนุกรมจะมี ค่าของแรงดันเปิดวงจรที่สูงขึ้น ขึ้นกับจำนวนของเซลล์ โดยในปฏิญญาฉบับนี้ จะเริ่มจากการต่อ วงจรจำนวน 4 เซลล์ ซึ่งจะมีคุณลักษณะทางไฟฟ้า ที่เปลี่ยนแปลงตามสภาวะความเข้มแสงดังนี้

ตารางที่ 5.5 ผลการทดลองของโฟโตไดโอด 4 เซลล์ ต่อวงจรแบบอนุกรม เมื่อความเข้มแสง 500 W/m^2

ค่าความต้านทาน (โอห์ม)	แรงดันตกคร่อมโฟโตไดโอด (โวลต์)	กระแสไฟฟ้า (นาโนแอมแปร์)	กำลังสูงสุด (นาโนวัตต์)	หมายเหตุ
1,600	1.760	0.002	0.003	ค่าแรงดันเปิดวงจร
500	1.539	307.78	473.64	ค่ากำลังสูงสุด
20	0.072	358.72	25.74	ค่ากระแสลัดวงจร

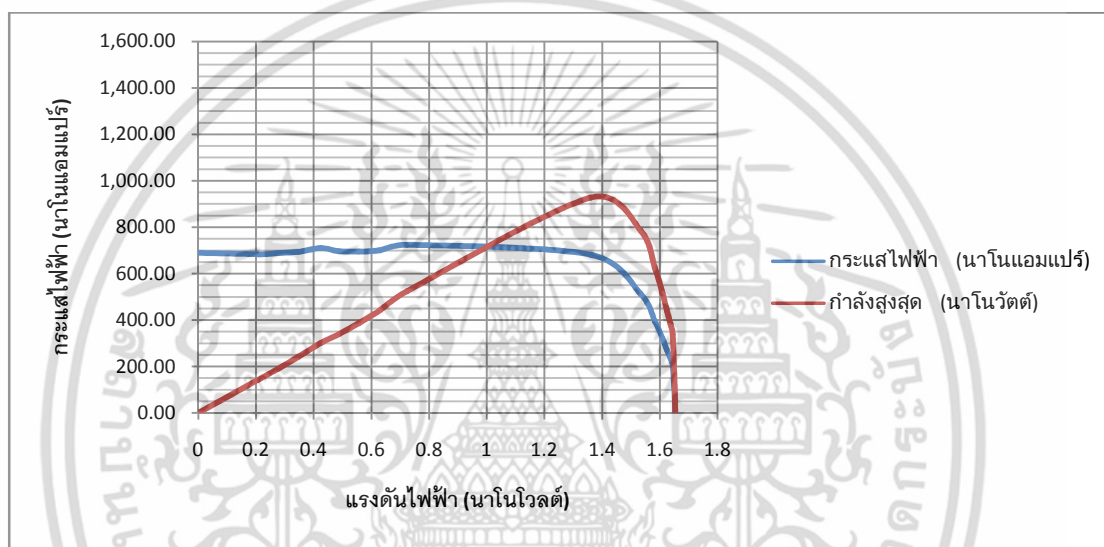


รูปที่ 5.6 กราฟผลการทดสอบหากระแส และกำลังไฟฟ้า ในรูปแบบ I V characteristic ของโฟโตไดโอด 4 เซลล์เมื่อต่อวงจรแบบอนุกรม ที่ความเข้มแสง 500 W/m^2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.6 ผลการทดลองของโฟโตโวลตาอิก 4 เซลล์ ต่อวงจรแบบอนุกรม เมื่อความเข้มแสง $1,000 \text{ W/m}^2$

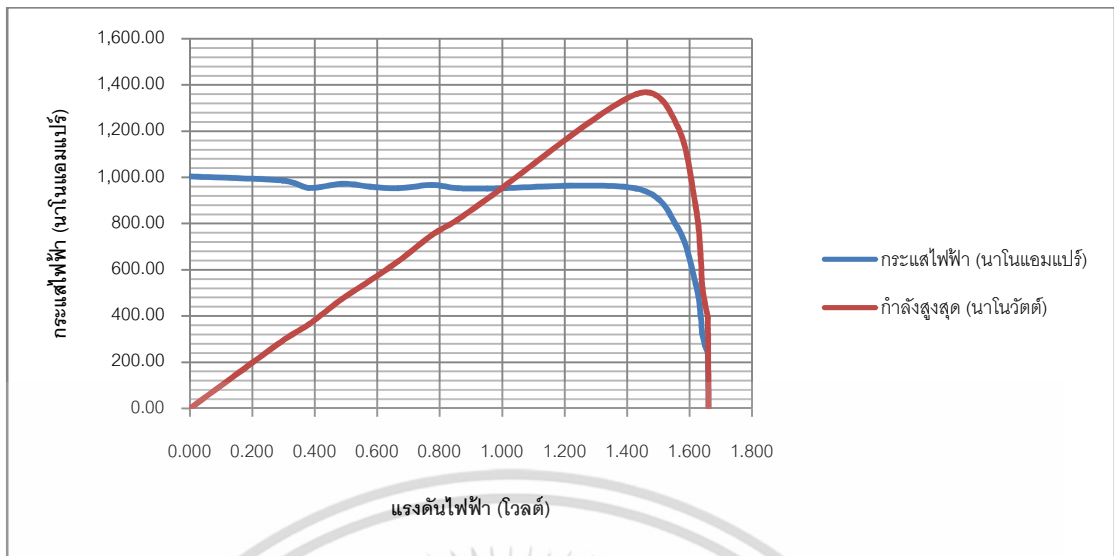
ค่าความต้านทาน (โอห์ม)	แรงดันตกคร่อมโฟโตโวลตาอิก (โวลต์)	กระแสไฟฟ้า (นาโนแอมแปร์)	กำลังสูงสุด (นาโนวัตต์)	หมายเหตุ
1000	1.654	0.003	0.004	ค่าแรงดันเปิดวงจร
200	1.362	681.00	927.52	ค่ากำลังสูงสุด
20	0.002	690.00	1.38	ค่ากระแสลัดวงจร



ตารางที่ 5.7 ผลการทดลองของโฟโตโวลตาอิก 4 เซลล์ ต่อวงจรแบบอนุกรม เมื่อความเข้มแสง $1,500 \text{ W/m}^2$

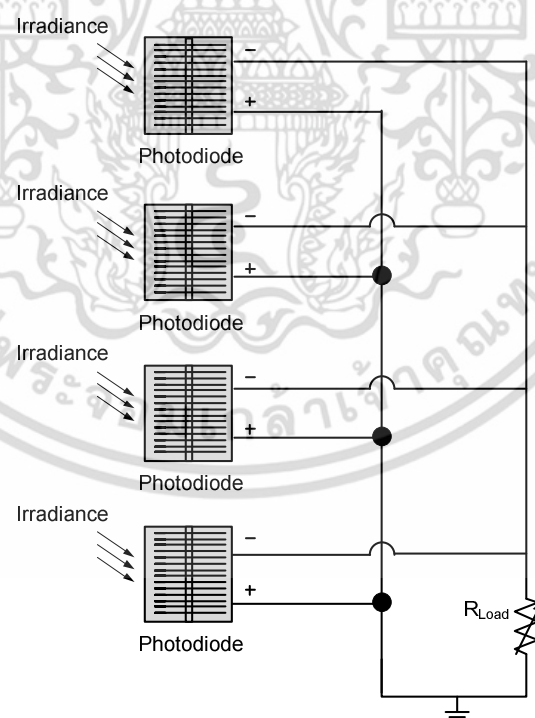
ค่าความต้านทาน (โอห์ม)	แรงดันตกคร่อมโฟโตโวลตาอิก (โวลต์)	กระแสไฟฟ้า (นาโนแอมแปร์)	กำลังสูงสุด (นาโนวัตต์)	หมายเหตุ
1,000	1.654	0.004	0.006	ค่าแรงดันเปิดวงจร
200	1.362	681.00	927.52	ค่ากำลังสูงสุด
20	0.138	690.00	95.22	ค่ากระแสลัดวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.8 กราฟผลการทดสอบหากระแส และกำลังไฟฟ้า ในรูปแบบ I V characteristic ของโฟโตไดโอด 4 เซลล์เมื่อต่อวงจรแบบอนุกรม ที่ความเข้มแสง $1,500 \text{ W/m}^2$

5.2.3.2 ผลการทดสอบโฟโตไดโอด 4 เซลล์ เมื่อต่อแบบขนาน ในโหมด Photovoltaic



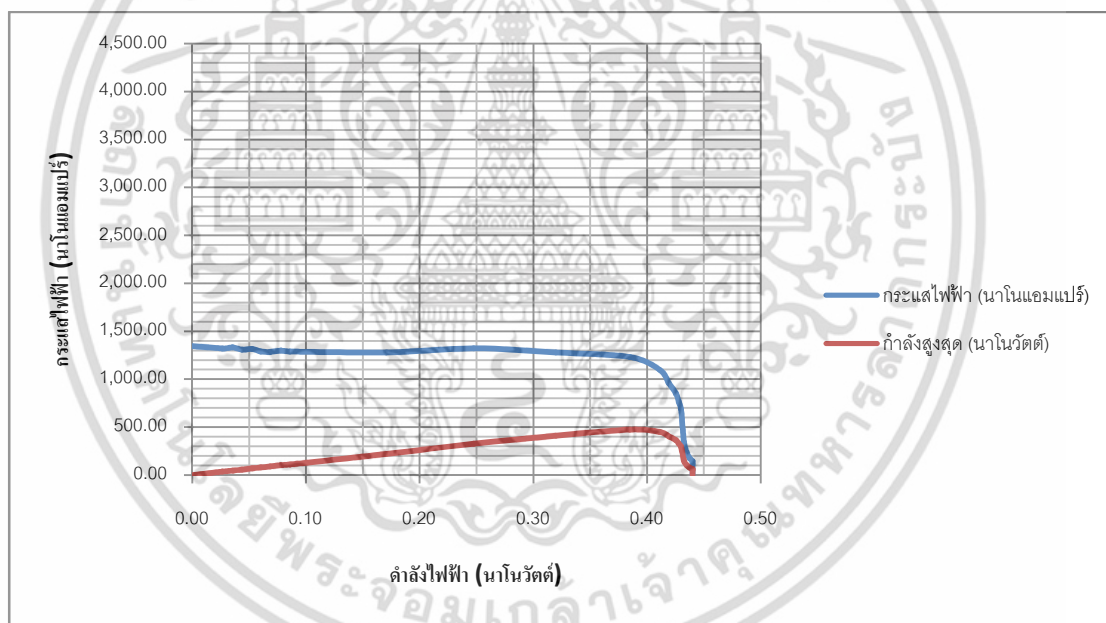
รูปที่ 5.9 วงจรการทดสอบเพื่อหาคุณลักษณะทางไฟฟ้าของโฟโตไดโอดเมื่อต่อวงจรแบบขนาน ในโหมด Photovoltaic

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองข้างต้น ได้ทำการเปลี่ยนรูปแบบการต่อของวงจร โดยจำลอง การทำงานเซลล์แสงอาทิตย์ 4 เซลล์ ในรูปแบบการต่อแบบขนาน โดยทำการเปลี่ยนสภาวะแวดล้อม ของความเข้มแสงแบบเดียวกัน กับการทดลองการต่อวงจรแบบอนุกรม ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 5.8 ผลการทดลองของโฟโตโวลตาอิก 4 เซลล์ ต่อวงจรแบบขนาน เมื่อความเข้มแสง 500 W/m^2

ค่าความต้านทาน (โอห์ม)	แรงดันตกคร่อมโฟโตโวลตาอิก (โวลต์)	กระแสไฟฟ้า (นาโนแอมแปร์)	กำลังสูงสุด (นาโนวัตต์)	หมายเหตุ
700	0.440	0.020	0.008	ค่าแรงดันเปิดวงจร
50	0.385	1,231.12	473.64	ค่ากำลังสูงสุด
2	0.018	1,345.20	24.13	ค่ากระแสลัดวงจร

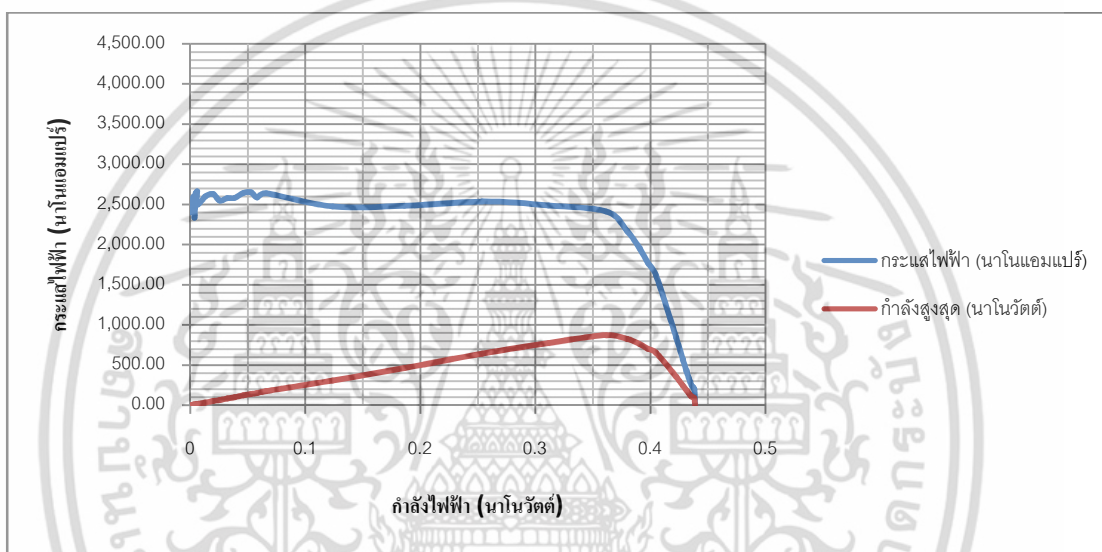


รูปที่ 5.10 กราฟผลการทดสอบหากระแส และกำลังไฟฟ้าในรูปแบบ I V characteristic ของโฟโตโวลตาอิก 4 เซลล์เมื่อต่อวงจรแบบขนาน ที่ความเข้มแสง 500 W/m^2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.9 ผลการทดลองของโฟโตไดโอด 4 เซลล์ ต่อวงจรแบบขนาน เมื่อความเข้มแสง $1,000 \text{ W/m}^2$

ค่าความต้านทาน (โอห์ม)	แรงดันตกคร่อมโฟโตไดโอด (โวลต์)	กระแสไฟฟ้า (นาโนแอมแปร์)	กำลังสูงสุด (นาโนวัตต์)	หมายเหตุ
1,000	0.43875	175.50	77.00	ค่าแรงดันเปิดวงจร
60	0.36175	2,411.67	872.42	ค่ากำลังสูงสุด
2	0.013	2,600.00	33.80	ค่ากระแสลัดวงจร

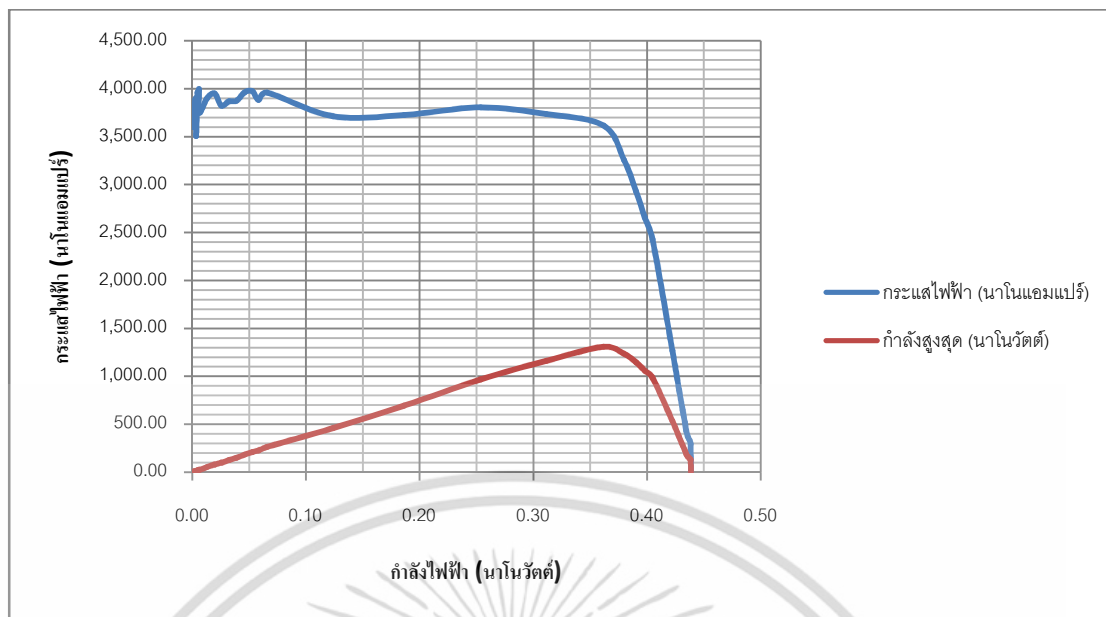


รูปที่ 5.11 กราฟผลการทดสอบหากระแส และกำลังไฟฟ้าในรูปแบบ I V characteristic ของโฟโตไดโอด 4 เซลล์เมื่อต่อวงจรแบบขนาน ที่ความเข้มแสง $1,000 \text{ W/m}^2$

ตารางที่ 5.10 ผลการทดลองของโฟโตไดโอด 4 เซลล์ ต่อวงจรแบบขนาน เมื่อความเข้มแสง $1,500 \text{ W/m}^2$

ค่าความต้านทาน (โอห์ม)	แรงดันตกคร่อมโฟโตไดโอด (โวลต์)	กระแสไฟฟ้า (นาโนแอมแปร์)	กำลังสูงสุด (นาโนวัตต์)	หมายเหตุ
1000	0.44	263.25	115.50	ค่าแรงดันเปิดวงจร
60	0.36	3,617.50	1,308.63	ค่ากำลังสูงสุด
3	0.02	3,950.00	78.01	ค่ากระแสลัดวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.12 กราฟผลการทดสอบหากระแส และกำลังไฟฟ้าในรูปแบบ I V characteristic ของโฟโต้ไดโอด 4 เซลล์เมื่อต่อวงจรแบบขนาน ที่ความเข้มแสง $1,500 \text{ W/m}^2$

5.3 ผลการทดสอบวงจรจำลองสัญญาณเลียนแบบคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้โฟโต้ไดโอด

นำเสนอแบบจำลองที่แสดงคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ จากโฟโต้ไดโอด โดยคุณลักษณะทางไฟฟ้างกล่าวสามารถวัดได้โดยใช้สัญญาณที่มาจากวงจรขยายสัญญาณ ได้โดยใช้ชุดขยาย Power Amplifier (A_v) ซึ่งทำให้สามารถหาศักย์แรงดัน (V_0) และกระแส (I_0) มีขนาดที่สูงขึ้นตามการออกแบบ ขณะจ่ายโหลดสามารถควบคุมจุดทำงานได้ด้วยชุด DC Bias Controller โดยจะควบคุมจุดทำงานด้วยการตรวจจับกระแสเอาต์พุต ผ่านชุดขยายกระแส G_1 (Current Sensor 1) และ G_2 (Current Sensor 2) เพื่อทำการขยายสัญญาณของโฟโต้ไดโอดให้มีขนาดเทียบเท่ากับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดสูงสุด 30 W และทำการศึกษาผลของการต่อวงจรโฟโต้ไดโอดในรูปแบบการต่อวงจรแบบอนุกรม และขนานต่อไป

5.3.1 ผลการทดสอบวงจรจำลองสัญญาณเลียนแบบคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้โฟโตไดโอดแบบอนุกรม

จากแบบจำลองทางที่สร้างขึ้นในรูปที่ 5.13 สามารถนำมาใช้เป็นสัญญาณอ้างอิงในการจำลองการทำงานของวงจรจำลองคุณลักษณะทางไฟฟ้า ได้โดยการออกแบบวงจรขยาย Power Amplifier รวมเข้ากับวงจรไบอัสกระแสตรง ในรูปแบบของเซลล์อนุกรม ซึ่งคำนวณได้จาก

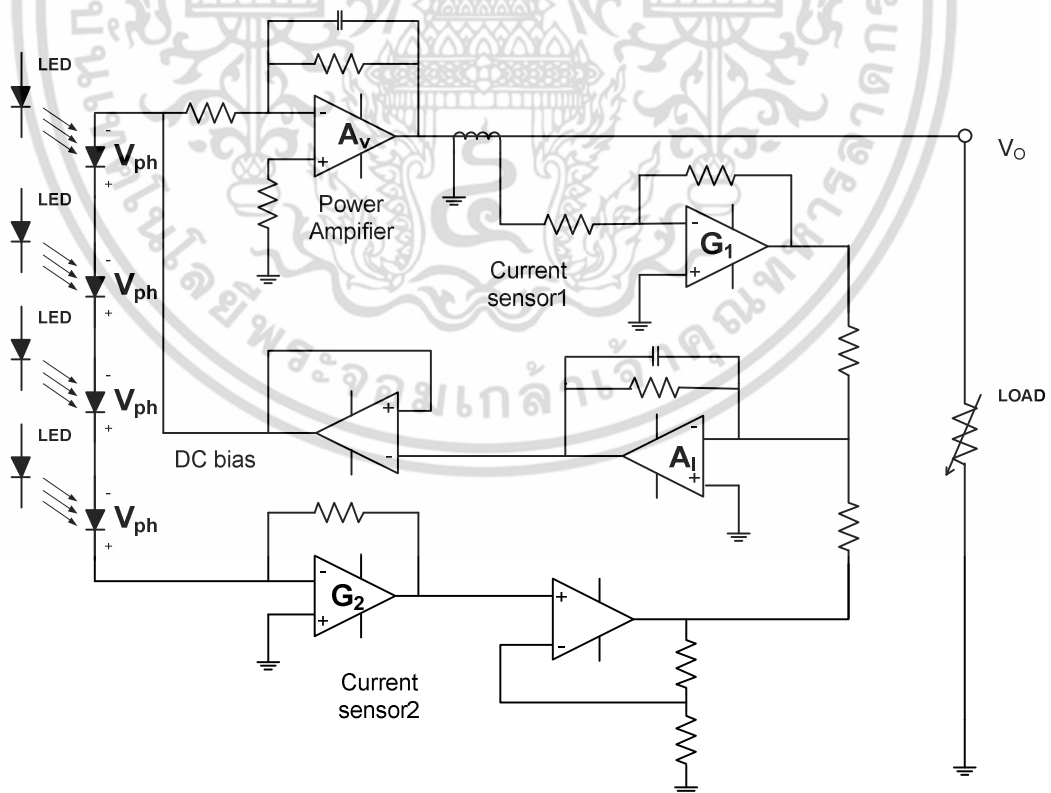
$$A_i = \frac{I_o}{I_{ph}} = \frac{G_1}{G_2} \quad (5.1)$$

$$\text{กำหนดให้} \quad G_1 = \frac{V_{\text{sensor1}}}{I_o} \quad (5.2)$$

$$G_2 = \frac{V_{\text{sensor2}}}{I_{ph}} \quad (5.3)$$

เมื่อ I_o คือ กระแสเอาต์พุตของตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์

I_{ph} คือ กระแสเอาต์พุตจากเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิง

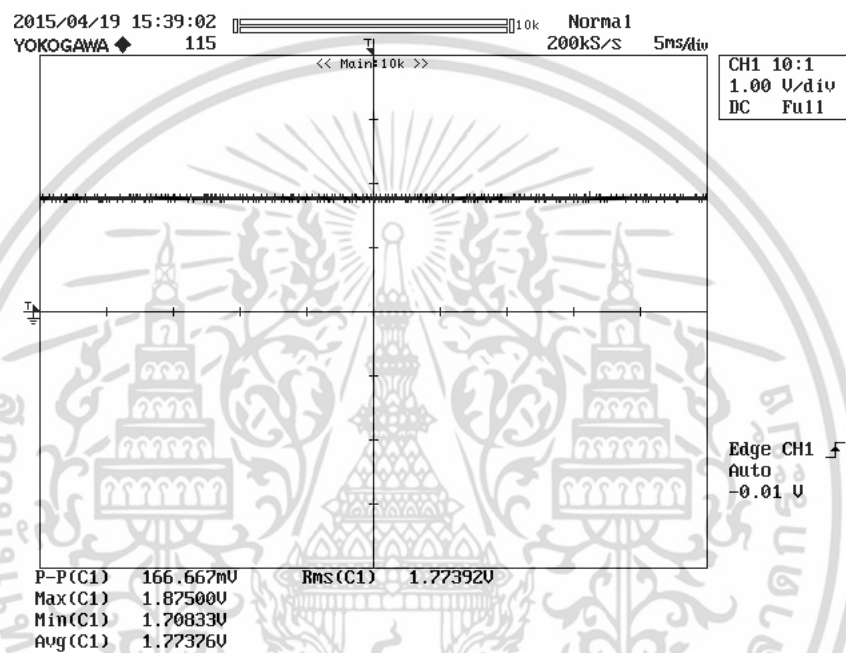


รูปที่ 5.13 วงจรจำลองขยายสัญญาณคุณลักษณะทางไฟฟ้าของโฟโตไดโอดอนุกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.1.1 ผลการทดสอบตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ในสภาวะเปิดวงจร

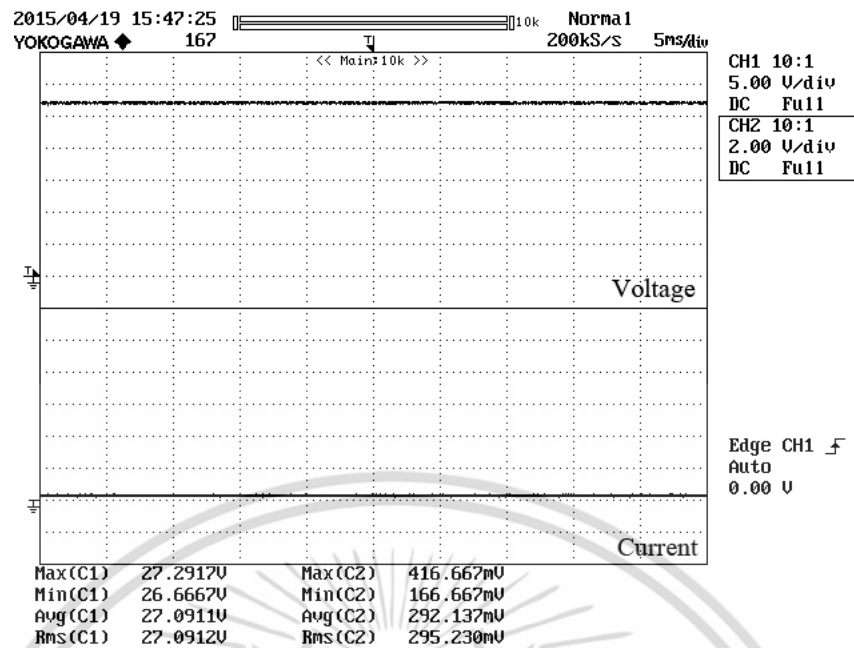
จากการออกแบบวงจรจำลองสัญญาณเลียนแบบเซลล์แสงอาทิตย์ เราเลือกใช้โฟโต้ไดโอดรุ่น BS250 ซึ่งมีแรงดันเปิดวงจรที่ 0.5 โวลต์ ต่อตัว และในวงจรนี้ได้ออกแบบให้ใช้โฟโต้ไดโอดจำนวน 4 เซลล์ นำมาต่อวงจรในรูปแบบอนุกรม ซึ่งจะทำให้แรงดันมีค่าสูงขึ้นเป็น 2.0 โวลต์ แต่จากการทดสอบ พบว่าแรงดันส่วนนี้จะหายไปเนื่องจากสายส่งสัญญาณมีค่าต้านทานสูงเกินกว่าโฟโต้ไดโอดจะส่งกำลังได้ 100% ทำให้แรงดันหายไป 0.3 โวลต์ โดยประมาณ ดังรูป



รูปที่ 5.14 ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรของโฟโต้ไดโอดจำนวน 4 เซลล์ ต่ออนุกรม

CH1 : 1 V/div

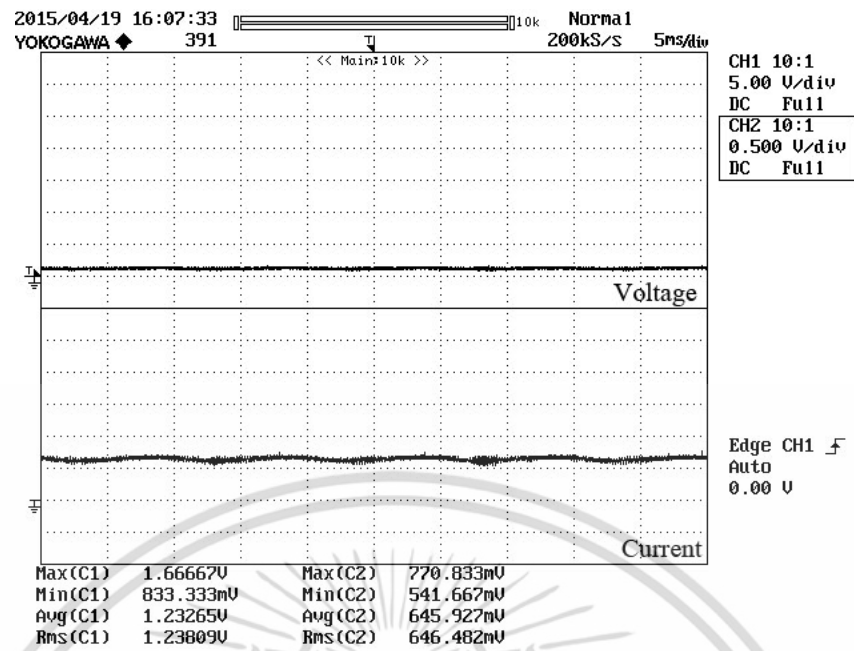
จากออกแบบวงจรจำลองสัญญาณเลียนแบบเซลล์แสงอาทิตย์ ได้ออกแบบให้ตัวจำลองมีสัญญาณแรงดันไม่เกิน 30 โวลต์ โดยที่วงจรจำลองมีขีดจำกัดในการสร้างแรงดันได้ถึง 70 โวลต์ ดังรูปที่ 5.16



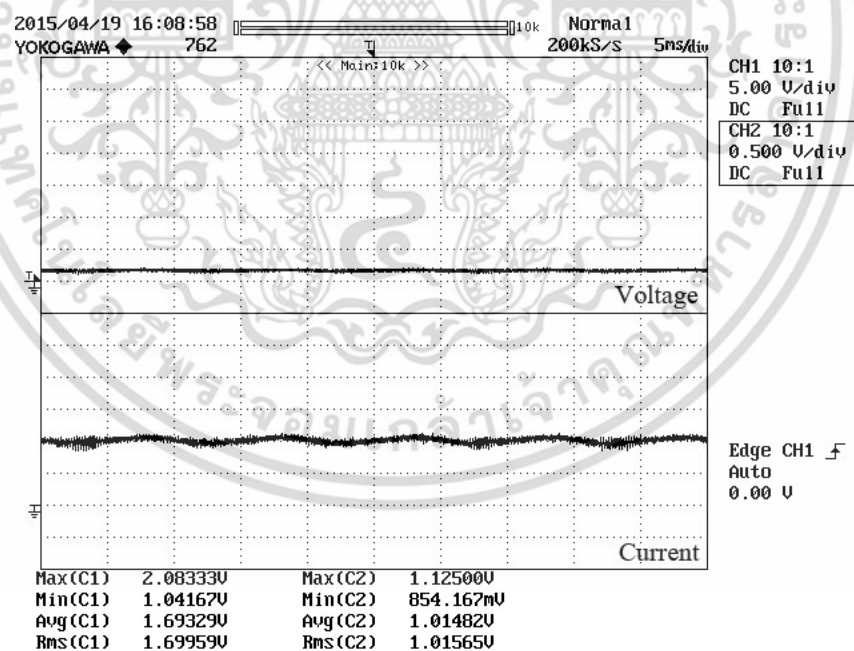
รูปที่ 5.15 ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรของวงจรจำลองสัญญาณเลียนแบบคุณลักษณะทางไฟฟ้าใช้ไฟโอดีโอดแบบอนุกรม ,CH1 : 5 V/div และ CH2 : 2 A/div

5.3.1.2 ผลการทดสอบตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ในสภาวะการเกิดกระแสลัดวงจร

จากการออกแบบการทดสอบวงจรจำลองสัญญาณคุณลักษณะไฟฟ้านี้ ให้แสดงผลของค่ากระแสลัดวงจรอยู่ 3 ค่า จากการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง ตามการจำลองด้วยโปรแกรม Orcad 9.1 คือ ค่าความเข้มแสงที่ 500 ,1,000 และ 1,500 W/m² ด้วยกันการทดสอบนี้ ได้ใช้ตัวต้านทานแบบปรับค่าได้ เปรียบเสมือนโหลดและทำการลดค่าความต้านทานลง พบว่า ค่าความต้านทานที่จะทำให้แรงดันมีค่าใกล้เคียงศูนย์ อยู่ที่ 3 โอห์ม

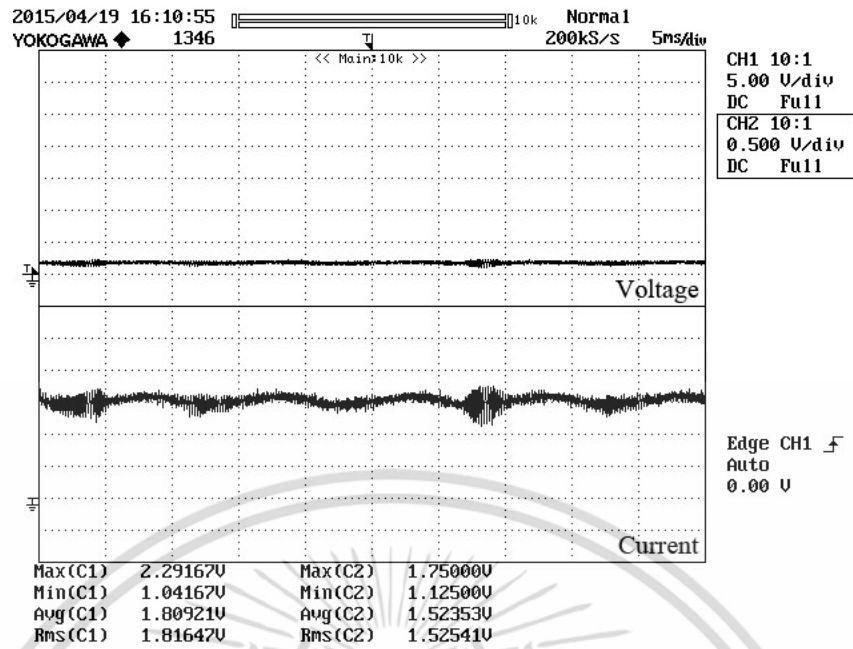


รูปที่ 5.16 ผลการทดสอบกระแสไฟฟ้าลัดวงจรจากวงจรจำลองสัญญาณเลียนแบบคุณลักษณะทางไฟฟ้าแบบอนุกรม ที่ความเข้มแสง 500 W/m^2 , CH1 : 5 V/div และ CH2 : 0.5 A/div



รูปที่ 5.17 ผลการทดสอบกระแสไฟฟ้าลัดวงจรจากวงจรจำลองสัญญาณเลียนแบบคุณลักษณะทางไฟฟ้าแบบอนุกรม ที่ความเข้มแสง $1,000 \text{ W/m}^2$, CH1 : 5 V/div และ CH2 : 0.5 A/div

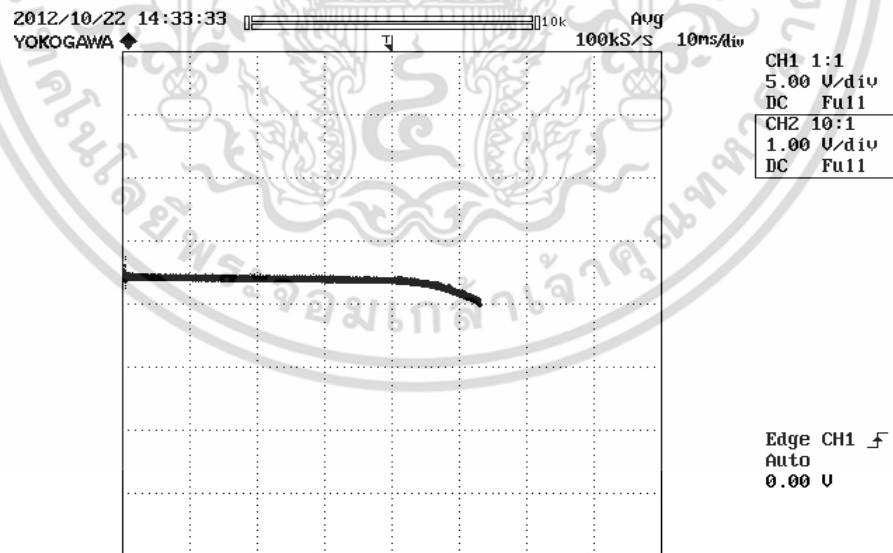
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.18 ผลการทดสอบกระแสไฟฟ้าลัดวงจรจากวงจรจำลองสัญญาณเลียนแบบคุณลักษณะทางไฟฟ้าแบบอนุกรม ที่ความเข้มแสง 1,500 W/m², CH1 : 5 V/div และ CH2 : 0.5 A/div

5.3.1.3 ผลการทดลองสัญญาณเลียนแบบคุณลักษณะทางไฟฟ้าใช้โฟโต้ไดโอด

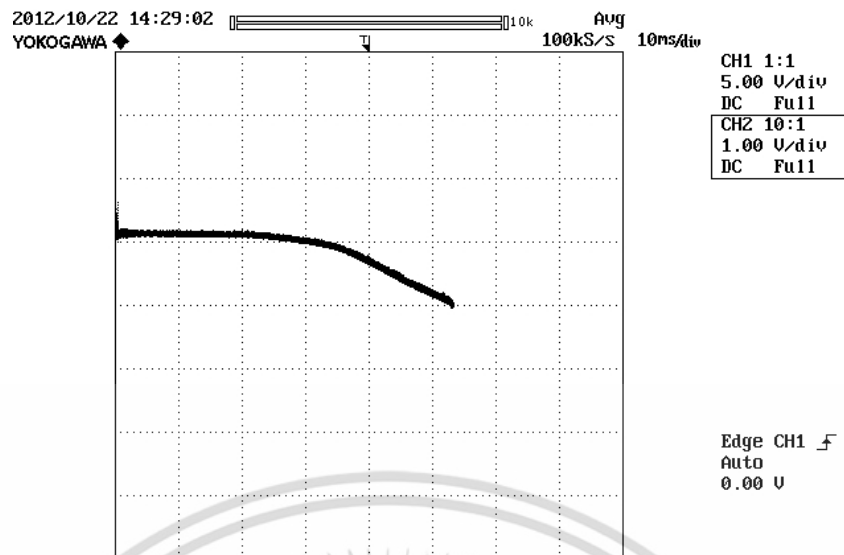
แบบอนุกรม



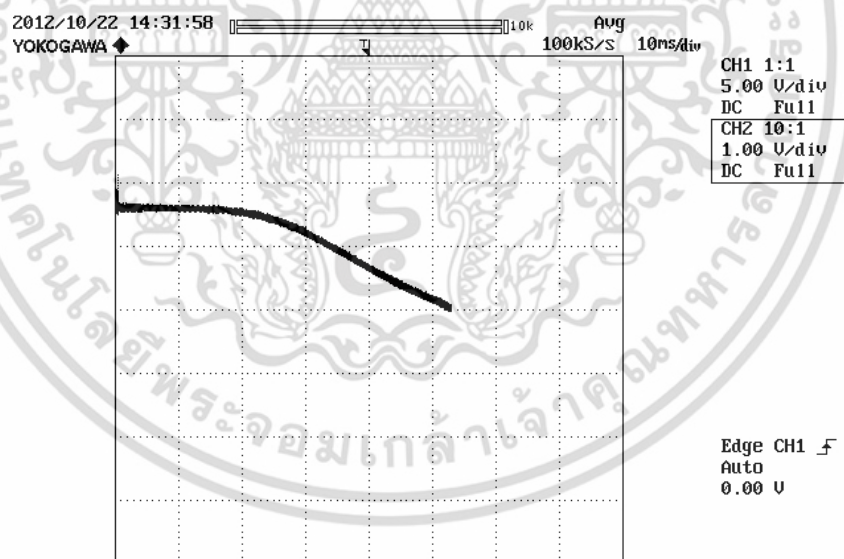
รูปที่ 5.19 ผลการทดสอบกระแสไฟฟ้า I-V characteristic จากวงจรจำลองสัญญาณเลียนแบบคุณลักษณะทางไฟฟ้าแบบอนุกรม ที่ความเข้มแสง 500 W/m²

CH1 : 5 V/div และ CH2 : 1 A/div

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

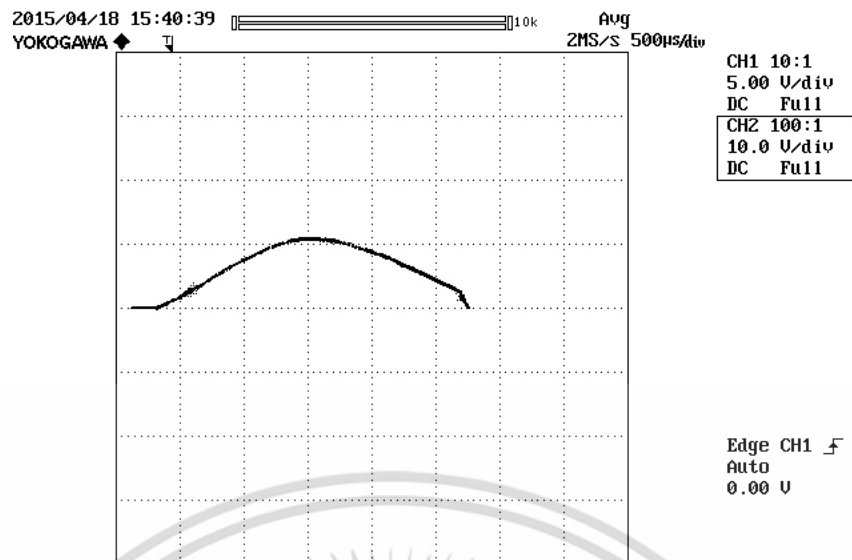


รูปที่ 5.20 ผลการทดสอบกระแสไฟฟ้า I-V characteristic จากวงจรจำลองสัญญาณเลียนแบบ
คุณลักษณะทางไฟฟ้าแบบอนุกรม ที่ความเข้มแสง $1,000 \text{ W/m}^2$
CH1 : 5 V/div และ CH2 : 1 A/div

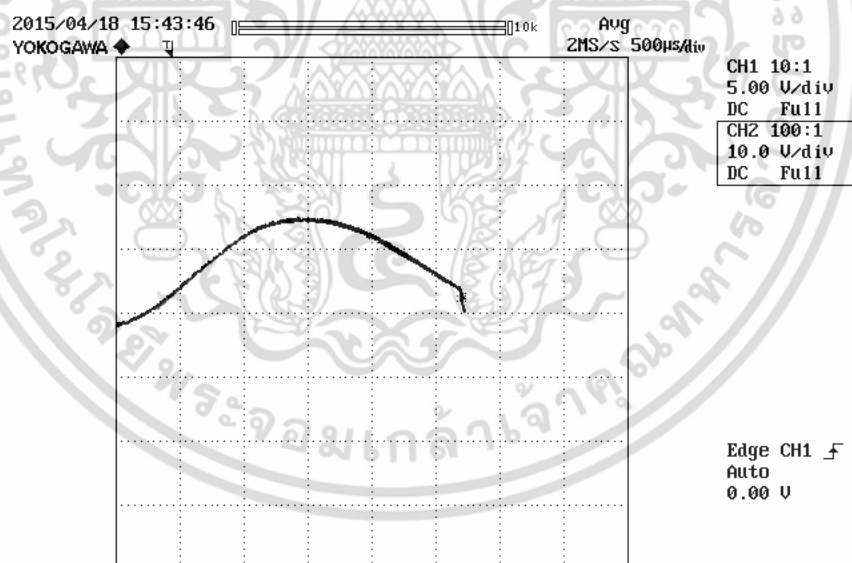


รูปที่ 5.21 ผลการทดสอบกระแสไฟฟ้า I-V characteristic จากวงจรจำลองสัญญาณเลียนแบบ
คุณลักษณะทางไฟฟ้าแบบอนุกรมที่ความเข้มแสง $1,500 \text{ W/m}^2$
CH1 : 5 V/div และ CH2 : 1 A/div

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

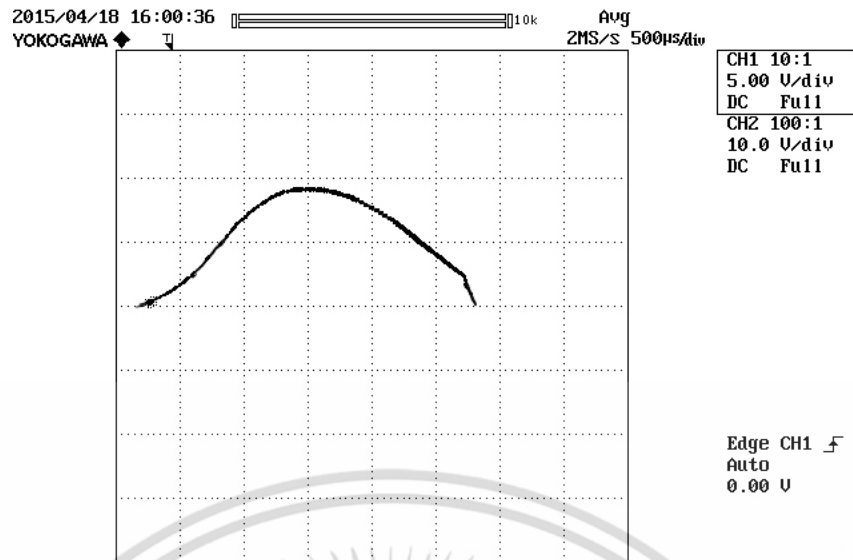


รูปที่ 5.22 ผลการทดสอบกำลังไฟฟ้า I-V characteristic จากวงจรจำลองสัญญาณเลียนแบบ
คุณลักษณะทางไฟฟ้าแบบอนุกรมที่ความเข้มแสง 500 W/m^2
CH1 : 5 V/div และ CH2 : 10 W/div



รูปที่ 5.23 ผลการทดสอบกำลังไฟฟ้า I-V characteristic จากวงจรจำลองสัญญาณเลียนแบบ
คุณลักษณะทางไฟฟ้าแบบอนุกรมที่ความเข้มแสง $1,000 \text{ W/m}^2$
CH1 : 5 V/div และ CH2 : 10 W/div

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.24 ผลการทดสอบกำลังไฟฟ้า I-V characteristic จากวงจรจำลองสัญญาณเลียนแบบ
คุณลักษณะทางไฟฟ้าแบบอนุกรมที่ความเข้มแสง $1,500 \text{ W/m}^2$
CH1 : 5 V/div และ CH2 : 10 W/div

5.3.2 ผลการทดสอบวงจรจำลองสัญญาณเลียนแบบคุณลักษณะทางไฟฟ้าของ เซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้โฟโตไดโอดแบบขนาน

และจากแบบจำลองในรูปที่ 4.17 สามารถสร้างสัญญาณอ้างอิงในรูปแบบของเซลล์
ขนานได้ ซึ่งคำนวณได้จาก

$$V_o = A_v G_1 \quad (5.2)$$

$$V_{\text{BIAS}} = A_i G_2 \quad (5.3)$$

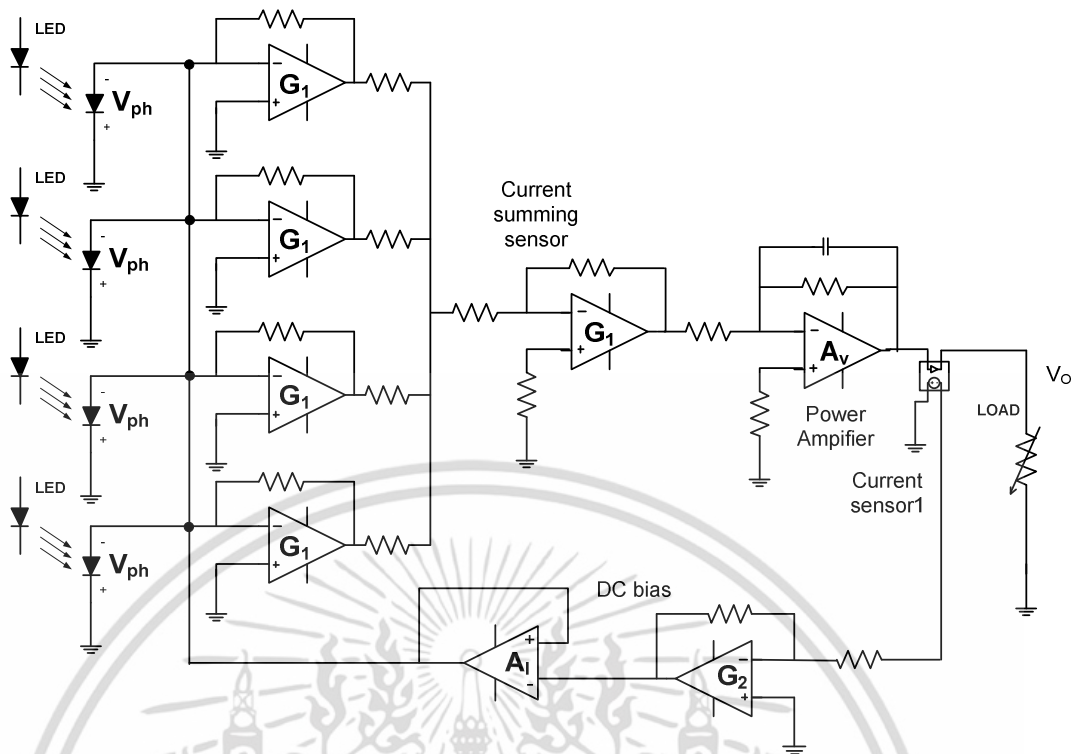
กำหนดให้ $G_1 = \frac{V_{\text{sensor1}}}{I_{ph}} \quad (5.4)$

$$G_2 = \frac{V_{\text{sensor2}}}{I_o} \quad (5.5)$$

เมื่อ I_o คือ กระแสเอาต์พุตของตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์

I_{ph} คือ กระแสเอาต์พุตจากเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิง

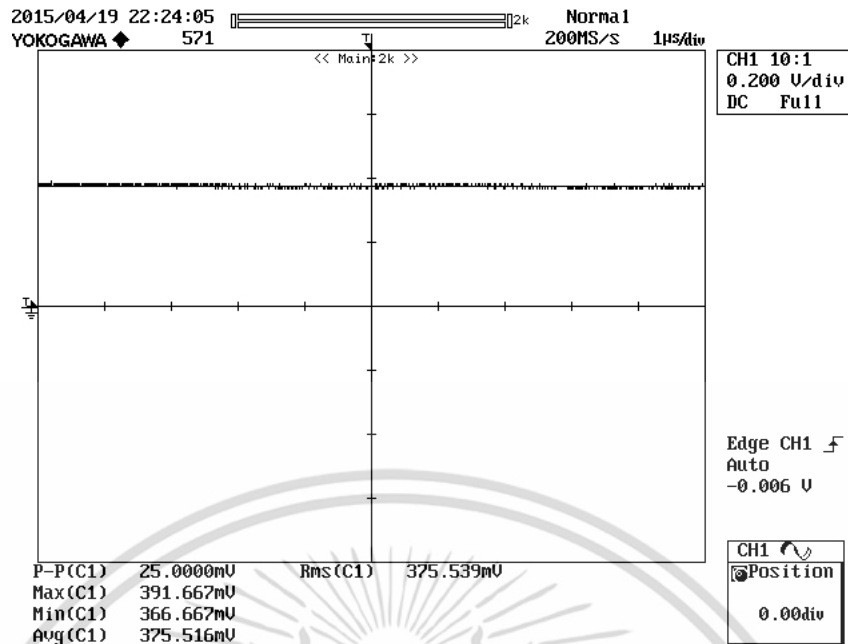
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.25 วงจรจำลองคุณลักษณะทางไฟฟ้าของโฟโต้ไดโอดขนาน

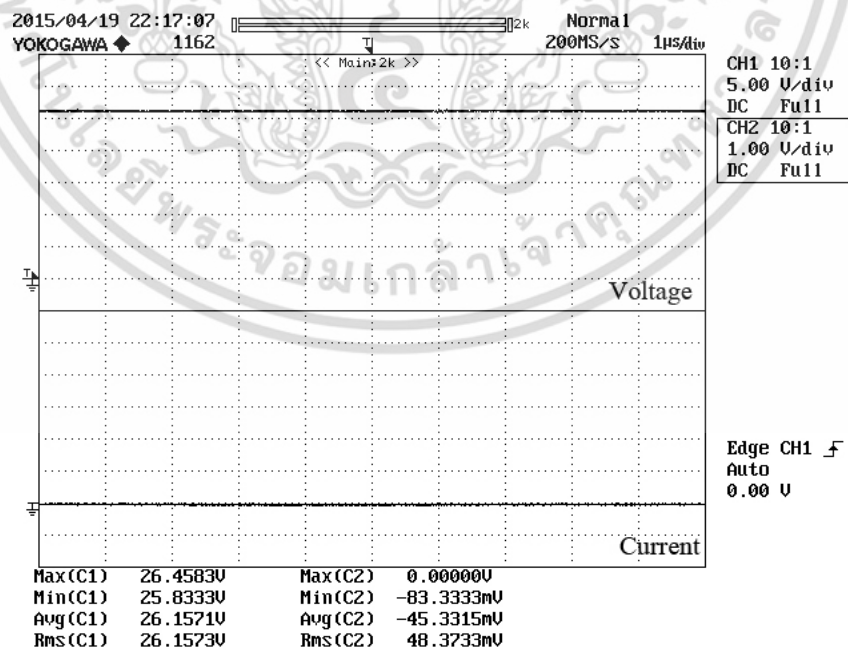
5.3.2.1 ผลการทดสอบตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ในสภาวะเปิดวงจร

จากการออกแบบวงจรจำลองสัญญาณเลียนแบบเซลล์แสงอาทิตย์ เราเลือกใช้โฟโต้ไดโอดรุ่น BS250 ซึ่งมีแรงดันเปิดวงจรที่ 0.5 โวลต์ ต่อตัว และในวงจรนี้ได้ออกแบบให้ใช้โฟโต้ไดโอดจำนวน 4 เซลล์ นำมาต่อวงจรในรูปแบบขนาน ซึ่งส่งผลให้แรงดันไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 0.5 โวลต์ แต่จะส่งผลต่อกระแสลัดวงจรที่สูงขึ้น แรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นไม่ถึง 0.5 โวลต์ มาจากแรงดันส่วนหนึ่งจะหายไปเนื่องจากสายส่งสัญญาณมีค่าต้านทานสูงเกินกว่าโฟโต้ไดโอดจะส่งกำลังได้ 100% ดังรูป



รูปที่ 5.26 ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรของไฟโตะไดโอดจำนวน 4 เซลล์ต่อขนาน CH1 : 0.2 V/div

จากออกแบบวงจรจำลองสัญญาณเลียนแบบเซลล์แสงอาทิตย์รูปแบบขนาน ได้ออกแบบให้ตัวจำลองมีสัญญาณแรงดันไม่เกิน 30 โวลต์ โดยที่วงจรจำลองมีขีดจำกัดในการสร้างแรงดันได้ถึง 70 โวลต์ ดังรูปที่ 5.25 เช่นเดียวกับวงจรจำลองสัญญาณเลียนแบบเซลล์แสงอาทิตย์ในรูปแบบอนุกรม

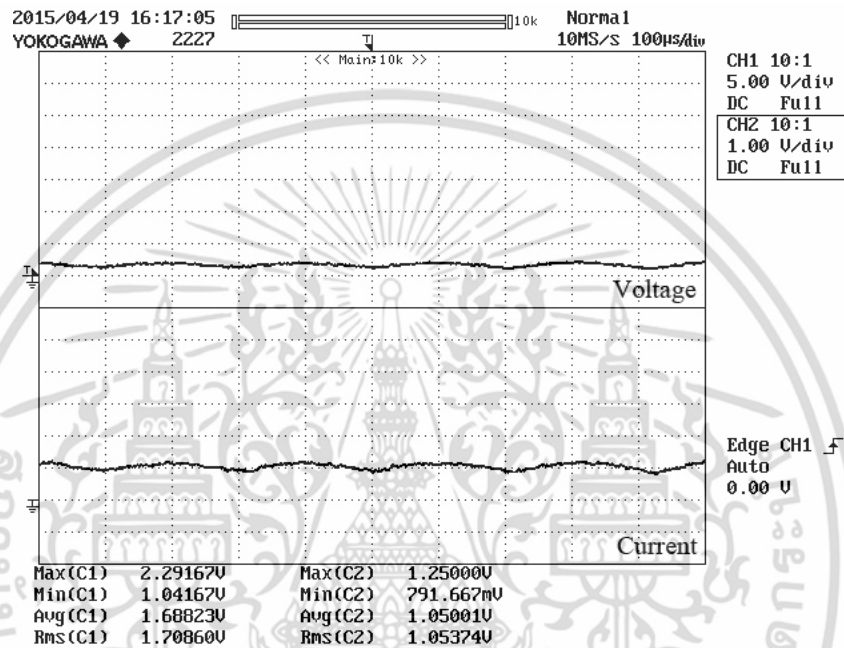


รูปที่ 5.27 ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรของวงจรจำลองสัญญาณเลียนแบบคุณลักษณะทาง

ไฟฟ้าใช้ไฟโตะไดโอดแบบขนาน ,CH1 : 5 V/div และ CH2 : 1 A/div
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้แก้ไขประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

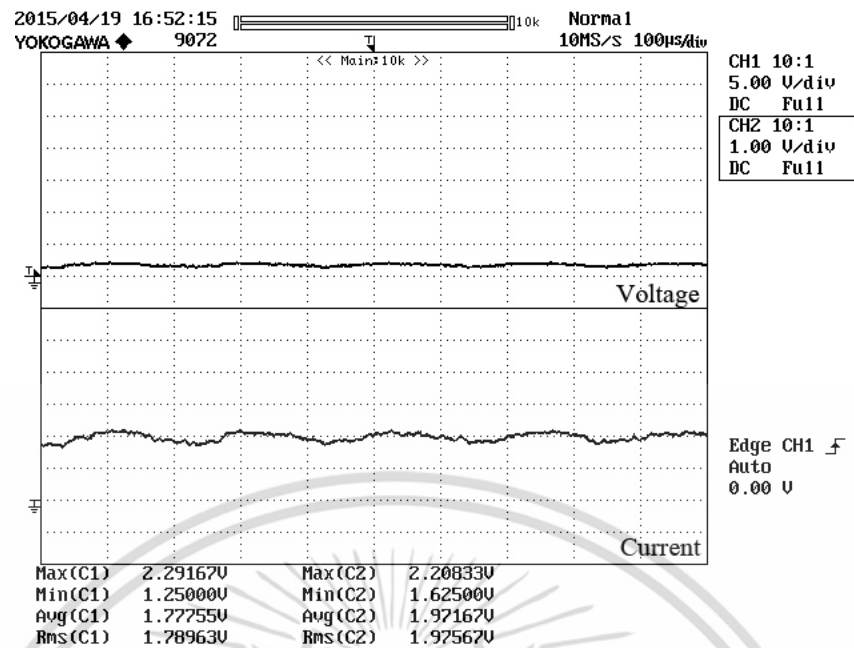
5.3.2.2 ผลการทดสอบตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ในสภาวะการเกิดกระแสลัดวงจร

การทดสอบนี้ได้มีการทดสอบเหมือนกับการทดสอบในวงจรจำลอง สัญญาณเลียนแบบคุณลักษณะทางไฟฟ้าอนุกรม โดยให้แสดงผลของค่ากระแสลัดวงจรอยู่ 3 ค่า จาก การเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง ตามการจำลองด้วยโปรแกรม Orcad 9.1 คือ ค่าความเข้มแสงที่ 500 ,1,000 และ 1,500 W/m²

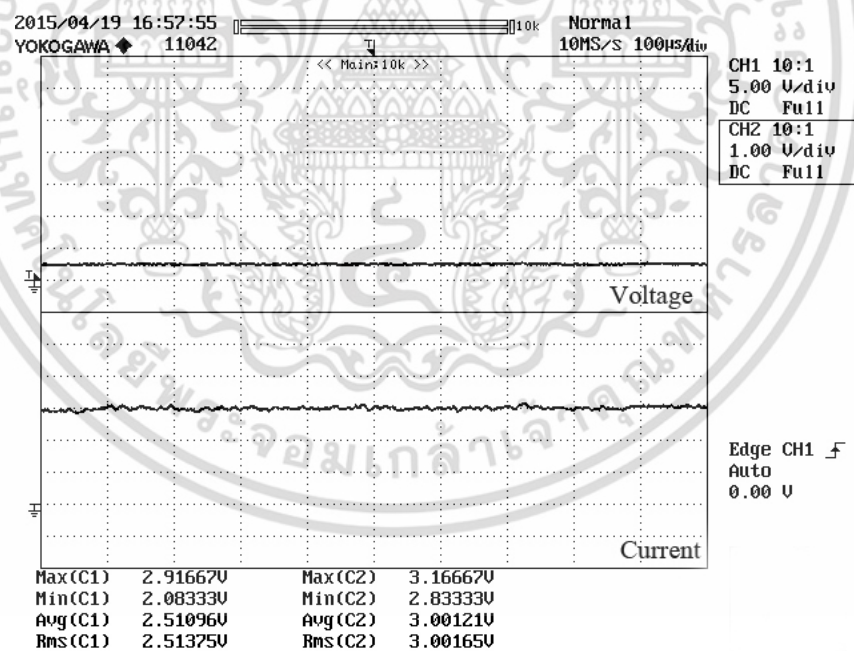


รูปที่ 5.28 ผลการทดสอบกระแสไฟฟ้าลัดวงจรจากวงจรจำลองสัญญาณเลียนแบบคุณลักษณะ

ทางไฟฟ้าแบบขนาน ที่ความเข้มแสง 500 W/m², CH1 : 5 V/div และ CH2 : 1 A/div



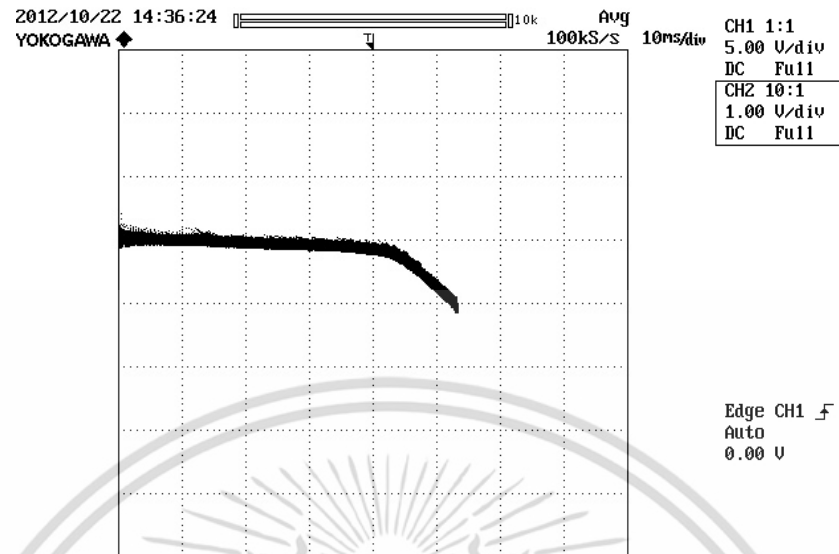
รูปที่ 5.29 ผลการทดสอบกระแสไฟฟ้าลัดวงจรจากวงจรจำลองสัญญาณเลียนแบบคุณลักษณะทางไฟฟ้าแบบขนาน ที่ความเข้มแสง $1,000 \text{ W/m}^2$, CH1 : 5 V/div และ CH2 : 1 A/div



รูปที่ 5.30 ผลการทดสอบกระแสไฟฟ้าลัดวงจรจากวงจรจำลองสัญญาณเลียนแบบคุณลักษณะทางไฟฟ้าแบบขนาน ที่ความเข้มแสง $1,500 \text{ W/m}^2$, CH1 : 5 V/div และ CH2 : 1 A/div

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

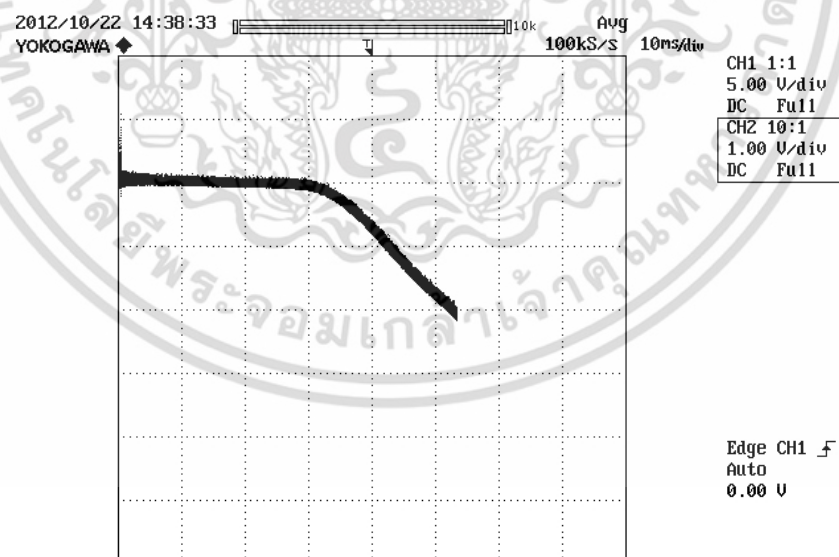
5.3.2.3 ผลการจำลองสัญญาณเลียนแบบคุณลักษณะทางไฟฟ้าใช้โฟโตไดโอดแบบขนาน



รูปที่ 5.31 ผลการทดสอบกระแสไฟฟ้า I-V characteristic จากวงจรจำลองสัญญาณเลียนแบบ

คุณลักษณะทางไฟฟ้าแบบขนาน ที่ความเข้มแสง 500 W/m^2

CH1 : 5 V/div และ CH2 : 1 A/div



รูปที่ 5.32 ผลการทดสอบกระแสไฟฟ้า I-V characteristic จากวงจรจำลองสัญญาณเลียนแบบ

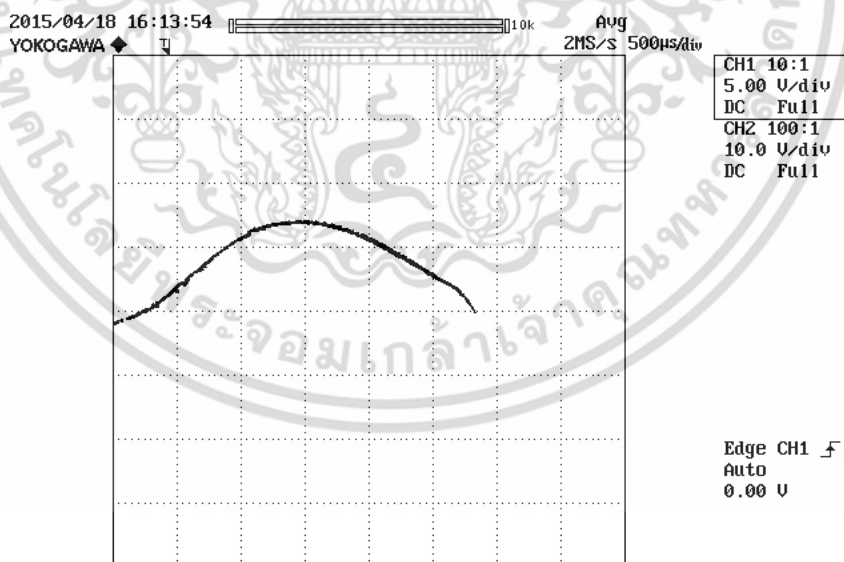
คุณลักษณะทางไฟฟ้าแบบอนุกรม ที่ความเข้มแสง $1,000 \text{ W/m}^2$

CH1 : 5 V/div และ CH2 : 1 A/div

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

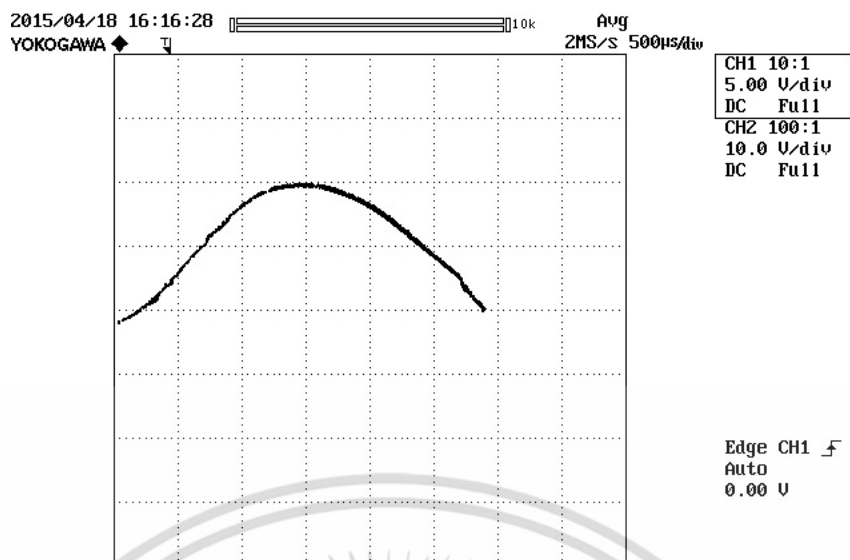


รูปที่ 5.33 ผลการทดสอบกระแสไฟฟ้า I-V characteristic จากวงจรจำลองสัญญาณเลียนแบบ
คุณลักษณะทางไฟฟ้าแบบอนุกรม ที่ความเข้มแสง $1,500 \text{ W/m}^2$
CH1 : 5 V/div และ CH2 : 1 A/div



รูปที่ 5.34 ผลการทดสอบกำลังไฟฟ้า I-V characteristic จากวงจรจำลองสัญญาณเลียนแบบ
คุณลักษณะทางไฟฟ้าแบบอนุกรม ที่ความเข้มแสง 500 W/m^2
CH1 : 5 V/div และ CH2 : 10 W/div

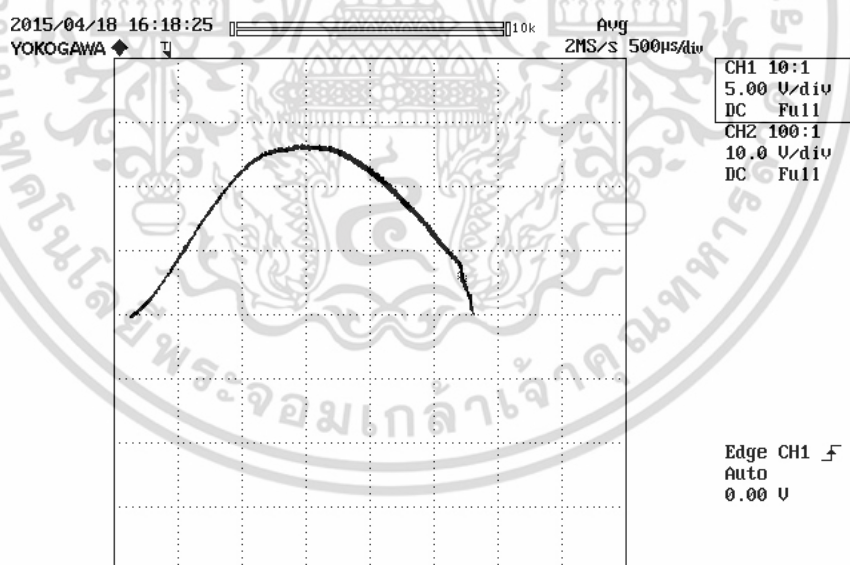
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.35 ผลการทดสอบกำลังไฟฟ้า I-V characteristic จากวงจรจำลองสัญญาณเลียนแบบ

คุณลักษณะทางไฟฟ้าแบบอนุกรม ที่ความเข้มแสง $1,000 \text{ W/m}^2$

CH1 : 5 V/div และ CH2 : 10 W/div



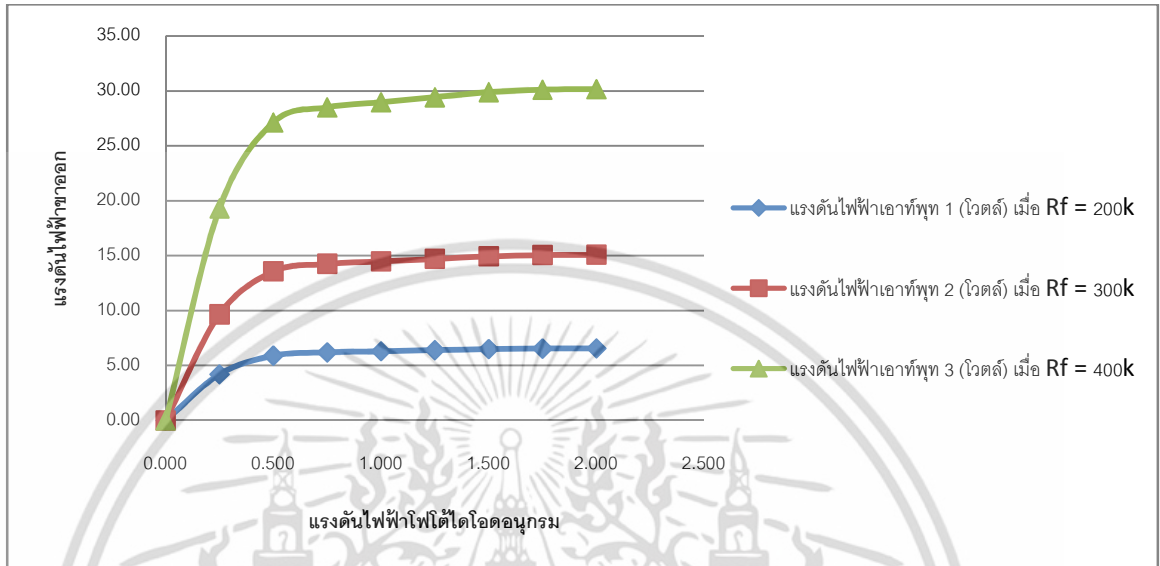
รูปที่ 5.36 ผลการทดสอบกำลังไฟฟ้า I-V characteristic จากวงจรจำลองสัญญาณเลียนแบบ

คุณลักษณะทางไฟฟ้าแบบอนุกรม ที่ความเข้มแสง $1,500 \text{ W/m}^2$

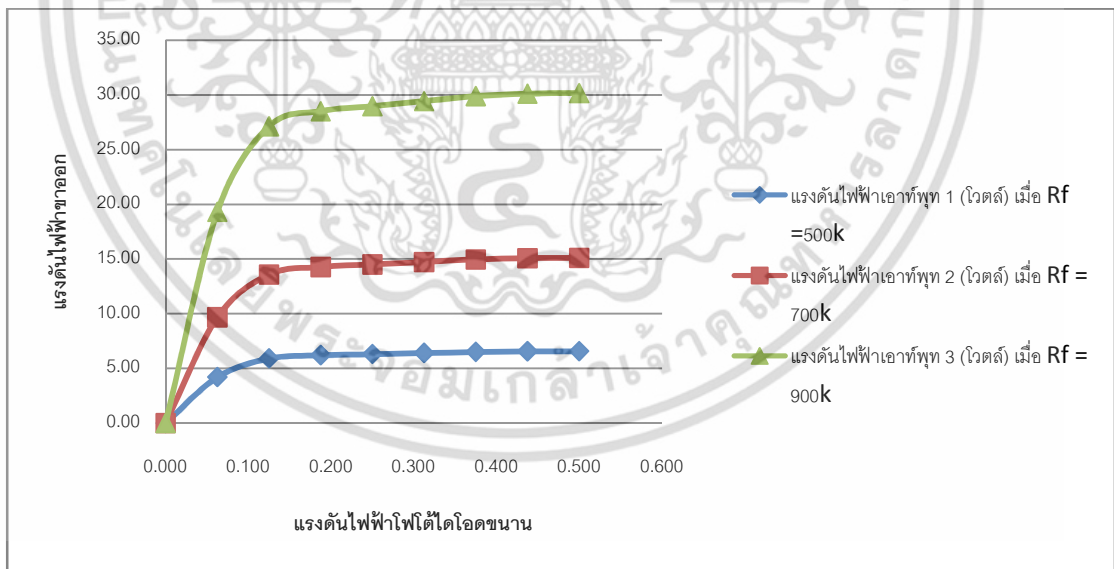
CH1 : 5 V/div และ CH2 : 10 W/div

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟผลการทดลองได้บ่งบอกคุณลักษณะทางไฟฟ้า ของกระแส ,แรงดัน และกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ในรูปแบบการต่ออนุกรม และขนาน โดยจากความสัมพันธ์นี้สามารถสร้างกราฟระหว่างแรงดันไฟฟ้าขาออกและแรงดันไฟฟ้าโตะไดโอดในรูปแบบต่างๆ

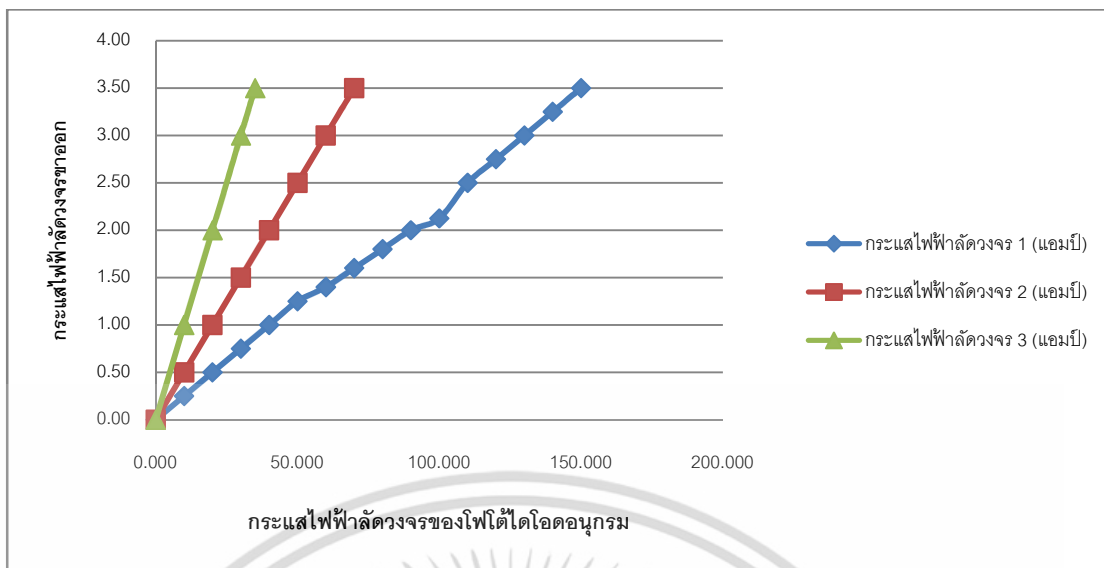


รูปที่ 5.37 กราฟระหว่างแรงดันขาออก และแรงดันโตะไดโอดอนุกรม

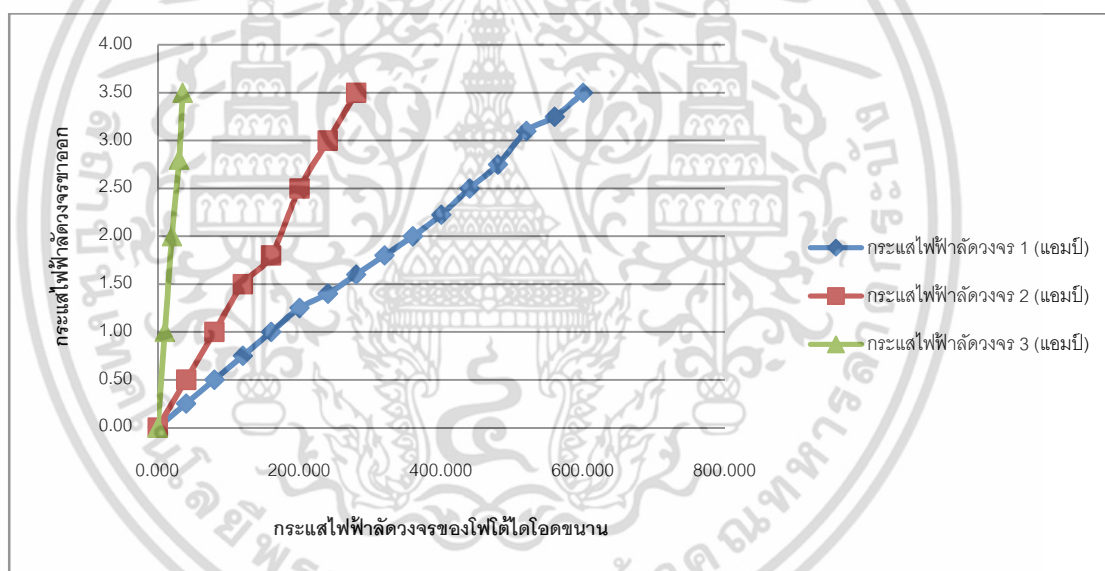


รูปที่ 5.38 กราฟระหว่างแรงดันขาออก และแรงดันโตะไดโอดขนาน

จากกราฟการทดลอง สามารถสังเกตได้ถึงขาของแรงดันขาออกในอัตราการขยายต่างๆ เมื่อแรงดันขาเข้ามีค่าสูงขึ้นจนถึงค่าๆ หนึ่ง ซึ่งจะทำให้แรงดันขาออกนั้นเข้าสู่ค่าสูงสุดได้เร็วขึ้นอยู่กับอัตราการขยายในช่วงนั้นๆ เปรียบเสมือนค่าทางทฤษฎีของวงจรรอบแอมป์แบบขยายกลับเฟส เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



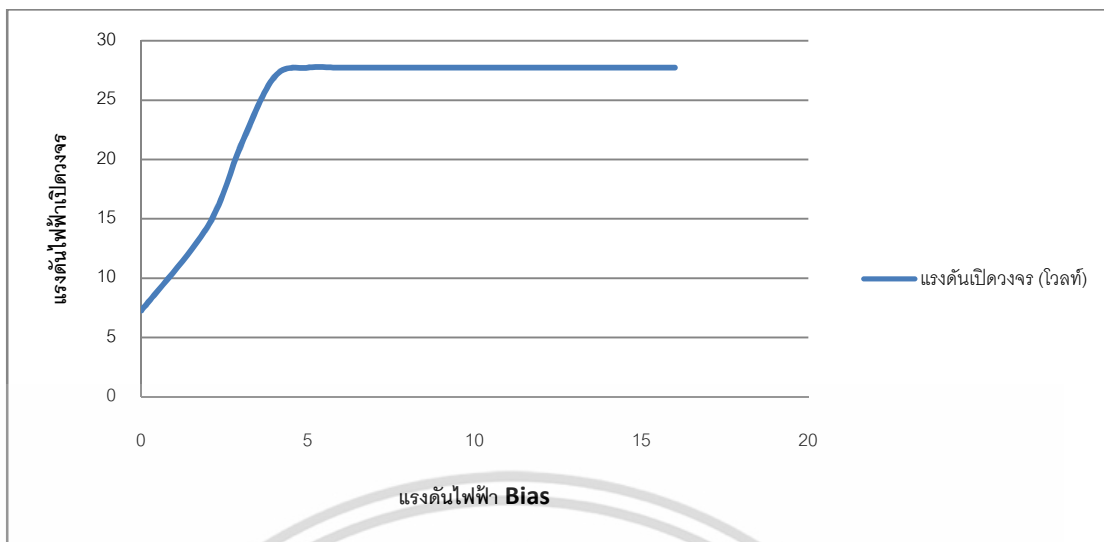
รูปที่ 5.39 กราฟระหว่างกระแสไฟฟ้าลัดวงจรขาออก และกระแสไฟฟ้าลัดวงจรของโตะไดโอดอนุกรม



รูปที่ 5.40 กราฟระหว่างกระแสไฟฟ้าลัดวงจรขาออก และกระแสไฟฟ้าลัดวงจรของโตะไดโอดขนาน

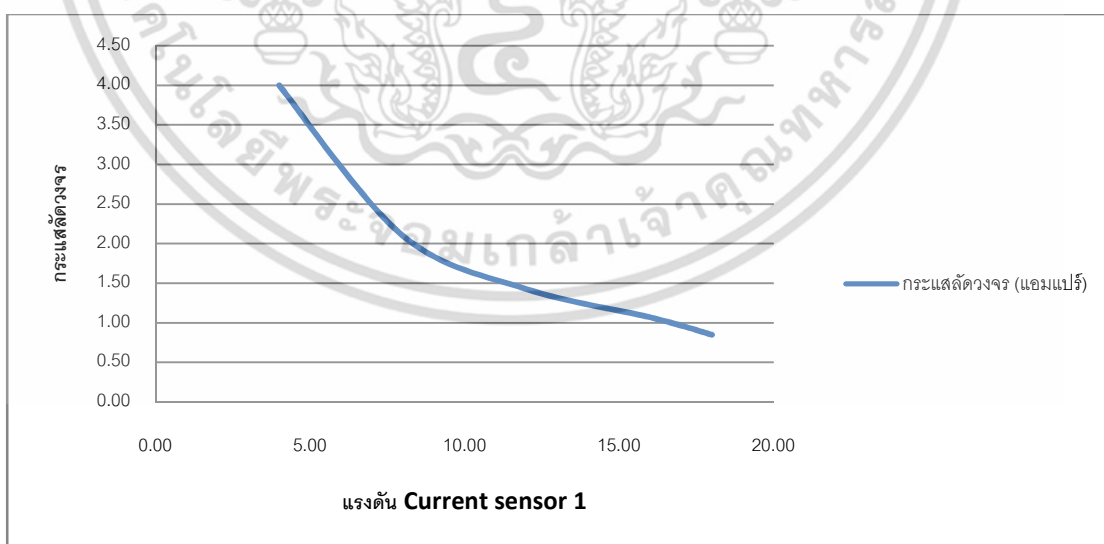
จากกราฟความสัมพันธ์ พบว่าเมื่อกระแสไฟฟ้าลัดวงจรของโตะไดโอดมีค่าสูงขึ้นจะส่งผลให้ วงจรเข้าสู่สถานะกระแสลัดวงจรเร็วขึ้น เมื่อทำการลดความต้านทานโหลดทั้งในรูปแบบอนุกรมและ ขนาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.41 กราฟคุณลักษณะทางไฟฟ้าระหว่างแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร และแรงดันไฟฟ้า Bias ของวงจรขยายสัญญาณคุณลักษณะทางไฟฟ้าในรูปแบบ อนุกรม และขนาน

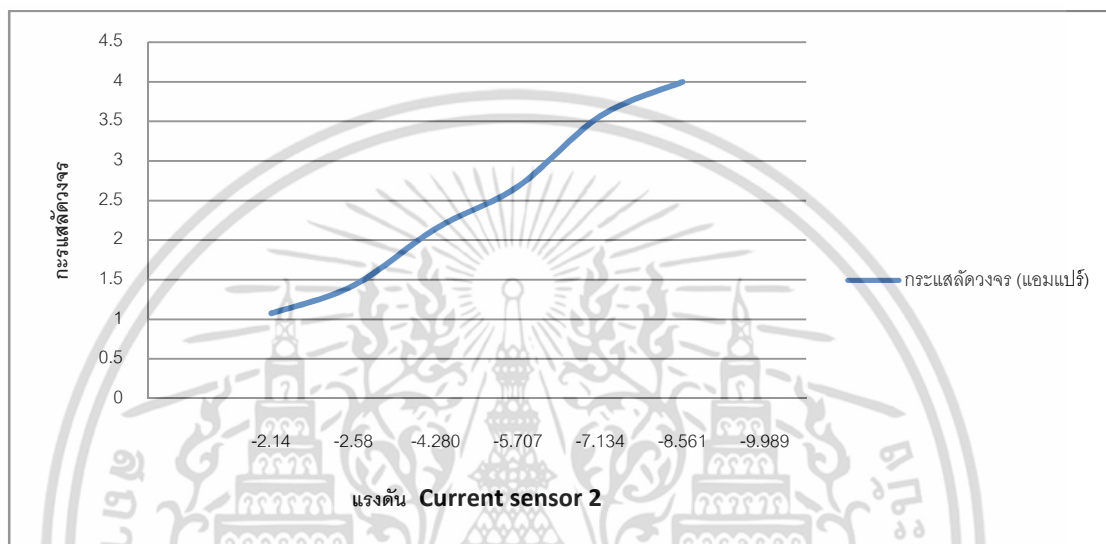
จากรูปที่ 5.42 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร และแรงดันไฟฟ้า Bias ผ่านวงจรออปแอมป์ Intergraded summing ซึ่งวงจรนี้ทำหน้าที่หลักในการบ่อนแรงดันเข้าไปที่แรงดันขาเข้าเพื่อเพิ่มค่ากำลังไฟฟ้าขาเข้าให้มีค่าสูงขึ้น และเมื่อแรงดันไฟฟ้า Bias มีค่าสูงขึ้นจนถึง 5 โวลต์ จะทำให้วงจรขยายที่อัตราขยายระดับมากกว่า 2 ขึ้นไป มีแรงดันขาออกที่เท่ากับแรงดันขิตจำกัดของออปแอมป์ขยายเอง



รูปที่ 5.42 กราฟระหว่างกระแสไฟฟ้าเปิดวงจร และแรงดันไฟฟ้าจาก Current sensor 1 ของวงจรขยายสัญญาณคุณลักษณะทางไฟฟ้าในรูปแบบอนุกรม และขนาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองในทดสอบการควบคุมกระแสลัดวงจรของวงจรขยายสัญญาณคุณลักษณะทางไฟฟ้า พบว่าการเพิ่มและลดอัตราขยายของ Current sensor 1 และ 2 มีผลกับค่าของกระแสลัดวงจร ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ได้สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสลัดวงจร ในแต่ละค่าของแรงดัน Current sensor 1 ตามรูปที่ 5.43 โดยทำการทดสอบในสภาวะค่าความเข้มแสง $1,000 \text{ W/m}^2$, แรงดัน Current sensor 2 เท่ากับ 4.00 โวลต์ และในวงจรขนาน



รูปที่ 5.43 กราฟคุณลักษณะทางไฟฟ้าระหว่างกระแสไฟฟ้าเปิดวงจร และแรงดันไฟฟ้าจาก Current sensor 2 ของวงจรขยายสัญญาณคุณลักษณะทางไฟฟ้าในรูปแบบอนุกรม

จากการทดลองในทดสอบการควบคุมกระแสลัดวงจรของวงจรขยายสัญญาณคุณลักษณะทางไฟฟ้ากับวงจร Current sensor 2 พบว่าเมื่อแรงดันของ Current sensor 2 มีการเปลี่ยนแปลงจะส่งผลต่อค่าของกระแสลัดวงจร เมื่อแรงดันของ Current sensor 2 มีค่าสูงขึ้น จะทำให้ค่าของกระแสลัดวงจรมีค่าน้อยลง โดยทำการทดสอบนี้ ทดสอบในสภาวะค่าความเข้มแสง $1,000 \text{ W/m}^2$ แรงดัน Current sensor 1 เท่ากับ 4.00 โวลต์

ซึ่งจากผลการทดลอง ทั้งรูปแบบของเซลล์แบบอนุกรม และขนาน สัญญาณคุณลักษณะทางไฟฟ้าที่ผ่านวงจรขยายมานั้น มีลักษณะที่แตกต่างกันออกไป โดยวงจรสร้างสัญญาณจำลองคุณลักษณะทางไฟฟ้าแบบอนุกรม จะให้สัญญาณแรงดันที่มากกว่า ซึ่งในทางตรงกันข้าม วงจรสร้างสัญญาณจำลองคุณลักษณะทางไฟฟ้าแบบขนาน จะให้สัญญาณกระแสที่มากกว่า โดยได้แสดง Gain ในการขยายกระแส และแรงดันตามลำดับดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.11 ผลการจำลองสัญญาณแรงดันเปิดวงจร ,กระแสไฟฟ้าลัดวงจร และกำลังสูงสุดของโฟโตไดโอดแบบอนุกรม ที่ความเข้มแสง 500 ,1,000 ,1500 W/m²

ความเข้มแสง W/m ²	แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่จุดกำลังสูงสุด (A)					
	เซลล์รูปแบบอนุกรม (Series Cell)			วงจรขยายแบบอนุกรม (Amplifier Series Cell)		
	I _{ph} (nA)	V _{cell} (V)	P _{max,cell} (μW)	I _o (A)	V _o (V)	P _{max,o} (W)
1,500	990.50	1.78	1,380.01	0.65	27.80	18.20
1,000	655.35	1.77	460.44	1.01	27.01	14.99
500	340.25	1.76	880.27	1.52	26.80	12.02

ตารางที่ 5.12 ผลการจำลองสัญญาณแรงดันเปิดวงจร ,กระแสไฟฟ้าลัดวงจร และกำลังสูงสุดของโฟโตไดโอดแบบขนาน ที่ความเข้มแสง 500 ,1,000 ,1500 W/m²

ความเข้มแสง W/m ²	แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่จุดกำลังสูงสุด (A)					
	เซลล์รูปแบบขนาน (Parallel Cell)			วงจรขยายแบบขนาน (Amplifier Parallel Cell)		
	I _{ph} (μA)	V _{cell} (V)	P _{max,cell} (nW)	I _o (A)	V _o (V)	P _{max,o} (W)
1,500	3.85	0.38	1,325.20	3.00	27.25	26.13
1,000	2.56	0.37	880.30	1.97	26.15	19.82
500	1.32	0.36	500.01	1.05	25.35	14.80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.13 ผลการทดสอบ และอัตราการขยายของกระแสไฟฟ้าลัดวงจรของโพลีไดโอดแบบอนุกรมและขนาน ที่ความเข้มแสง 500 , 1,000 ,1500 W/m²

ความเข้มแสง W/m ²	กระแสไฟฟ้าลัดวงจร (A)					
	วงจรอนุกรม (series)		A _I (dB)	วงจรขนาน (Parallel)		A _I (dB)
	I _{ph} (nA)	I _o (A)		I _{ph} (μA)	I _o (A)	
1,500	990.50	1.52	66.50	3.85	3.00	58.89
1,000	655.35	1.01	61.81	2.56	1.97	58.88
500	340.25	0.65	58.17	1.32	1.05	59.00

ตารางที่ 5.14 ผลการกระแสไฟฟ้าลัดวงจรของโพลีไดโอดแบบอนุกรมและขนาน ที่ความเข้มแสง 500 , 1,000 ,1500 W/m²

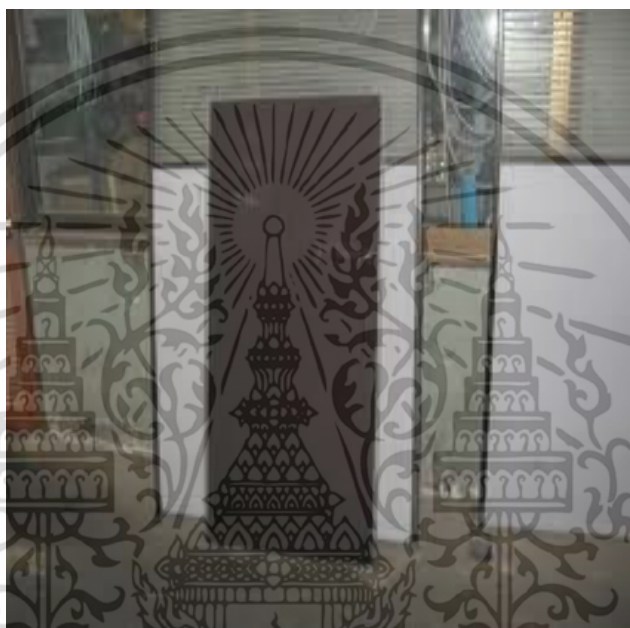
ความเข้มแสง W/m ²	แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (V)					
	วงจรอนุกรม (series)		A _V	วงจรขนาน (Parallel)		A _V
	V _{cell} (V)	V _o (V)		V _{cell} (V)	V _o (V)	
1,500	1.78	27.80	15.61	0.38	27.25	71.71
1,000	1.77	27.01	15.26	0.37	26.15	70.67
500	1.76	26.80	15.23	0.36	25.35	70.42

จากผลการทดลองในบทที่ 3 และ 4 สามารถสรุปค่าของกระแสลัดวงจร แรงดันเปิดวงจร และกำลังสูงสุดใช้งาน จากกราฟคุณลักษณะทางไฟฟ้าของโพลีไดโอดในแบบอนุกรม ,ขนาน และสัญญาณเลียนแบบคุณลักษณะทางไฟฟ้าผ่านวงจรขยายสัญญาณ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลง ความเข้มแสง 500 W/m² ,1,000 W/m² และ 1,500 W/m² อุณหภูมิ 25°C ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4 ผลการทดสอบจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์จริง

ในการจำลองได้เลือกใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์รุ่น BS40 ของบริษัท บางกอกโซลาร์ จำกัด ซึ่งเป็นเซลล์แบบอะมัลฟิซิลิกอนที่มีการต่อเซลล์แบบอนุกรมจำนวน 39 เซลล์ ซึ่งในแต่ละเซลล์แสงอาทิตย์จะมีโครงสร้างพื้นฐานเหมือนโฟโตไดโอดที่ใช้ในบทความวิจัย โดยค่าพารามิเตอร์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์นี้ มีค่าของกระแสลัดวงจรที่ 1.15 แอมแปร์ แรงดันเปิดวงจรที่ 62.5 โวลต์ และกำลังสูงสุดใช้งาน 40 วัตต์ ดังตารางที่ 5.15



รูปที่ 5.44 ลักษณะแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ รุ่น BS 40

ตารางที่ 5.15 ค่าที่ได้พารามิเตอร์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 40 วัตต์

พารามิเตอร์ทางไฟฟ้า	ค่าที่ได้จากการวัดจริง
ขนาดเซลล์แสงอาทิตย์	60x120 cm ²
แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (V_{oc})	62.5 V
กระแสไฟฟ้าลัดวงจร (I_{sc})	1.15 A
กำลังไฟฟ้าสูงสุด (P_{max})	40 w
แรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่รับได้ (V_p)	44 v
กระแสไฟฟ้าสูงสุดที่รับได้ (I_p)	0.90 A
Model	BS 40 VA
Fill Factor	0.55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.16 ข้อมูลเฉพาะของเซลล์แต่ละตัวที่ต่ออนุกรมกันในแผงเซลล์แสงอาทิตย์ BS 40

ข้อมูลเฉพาะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์	
กำลังไฟฟ้าสูงสุด	1.02วัตต์
แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร	1.59โวลต์
กระแสไฟฟ้าลัดวงจร	1.15 แอมป์

ในการจำลองการทำงานอาศัยแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่ออนุกรม 39 เซลล์ในแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ BS 40 จึงได้นำแผงเซลล์แสงอาทิตย์มาวัดค่าหาค่ากระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้า โดยวัดที่สภาพค่าความเข้มแสง 1,200 วัตต์ต่อตารางเมตร ดังแสดงค่าในตารางที่ 5.17 ส่วนตารางที่ 5.18 เป็นค่าที่วัดจากวงจรจำลองเซลล์แสงอาทิตย์

ตารางที่ 5.17 ค่าที่วัดจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ BS 40 ที่ความเข้มแสง 700 วัตต์ต่อตารางเมตร

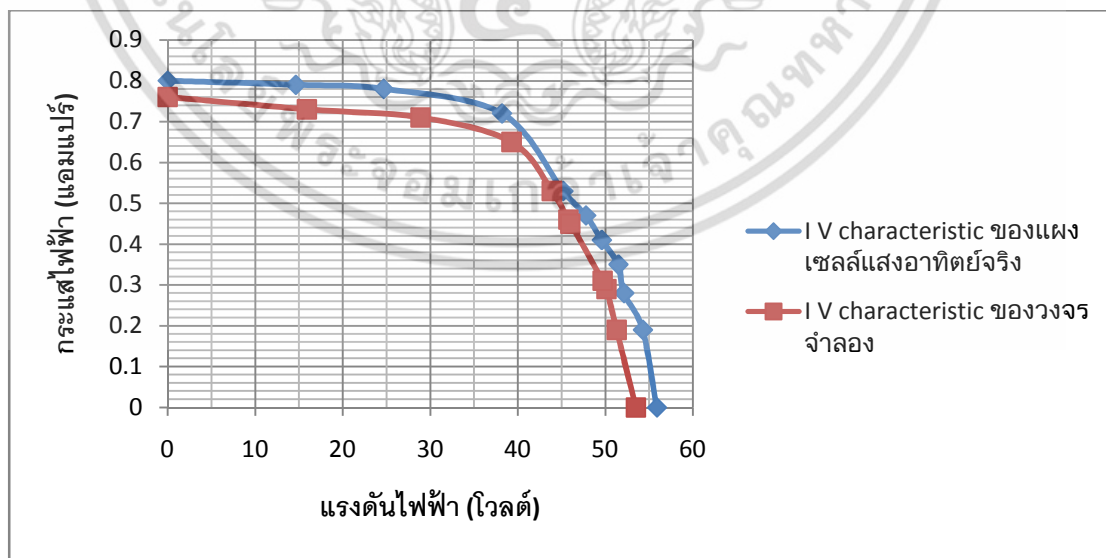
ค่าความต้านทาน (โอห์ม)	แรงดันไฟฟ้า (โวลต์)	กระแสไฟฟ้า (แอมป์)	กำลังไฟฟ้า (วัตต์)
200	55.9	0	0
180	54.3	0.19	10.317
160	52.15	0.28	14.602
140	51.5	0.35	18.025
120	49.6	0.41	20.336
100	47.8	0.47	22.466
80	45.2	0.53	23.956
60	38.2	0.72	27.504
40	24.68	0.78	19.2504
20	14.64	0.79	11.5656
0	0	0.8	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.18 ค่าที่วัดจากวงจรจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ความเข้มแสง 700 วัตต์ต่อตารางเมตร

ค่าความต้านทาน (โอห์ม)	แรงดันไฟฟ้า (โวลต์)	กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)	กำลังไฟฟ้า (วัตต์)
200	53.5	0	0
180	51.3	0.19	9.747
160	50.14	0.29	14.5406
140	49.7	0.31	15.407
120	45.8	0.46	21.068
100	46	0.45	20.700
80	43.9	0.53	23.267
60	39.3	0.65	25.545
40	28.9	0.71	20.519
20	15.9	0.73	11.607
0	0	0.76	0

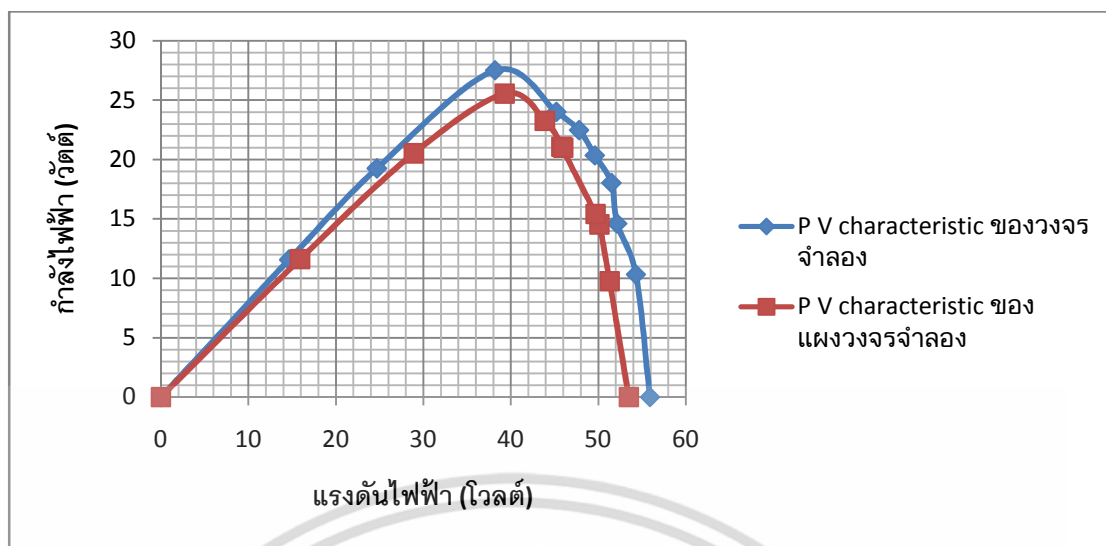
จากการวัดค่าทั้งจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์และวงจรจำลองเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อนำมาพล็อตเปรียบเทียบกัน ได้ดังแสดงในรูปที่ 5.45 เป็นการเปรียบเทียบค่ากราฟกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า ส่วนในรูปที่ 5.46 เป็นรูปเปรียบเทียบค่ากราฟกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า



รูปที่ 5.45 กราฟเปรียบเทียบ I-V Characteristic ของแผงเซลล์อาทิตย์กับวงจรจำลองเซลล์

แสงอาทิตย์ที่ความเข้ม 700 วัตต์ต่อตารางเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.46 กราฟเปรียบเทียบ P-V Characteristic ของแผงเซลล์อาทิตย์กับวงจรถ่ายเซลล์แสงอาทิตย์ที่ความเข้ม 700 วัตต์ต่อตารางเมตร

จากการวัดค่าหาพารามิเตอร์กระแสไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้าในช่วงค่าความเข้มแสง 700 วัตต์ต่อตารางเมตรนี้ ดังแสดงในรูปที่ 5.45 และ 5.46 ยังได้ทำการวัดค่าหาพารามิเตอร์กระแสไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้าในช่วงค่าความเข้มแสง 1,100 วัตต์ต่อตารางเมตร ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 5.19 ค่าที่วัดจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ BS 40 ที่ความเข้มแสง 300 วัตต์ต่อตารางเมตร

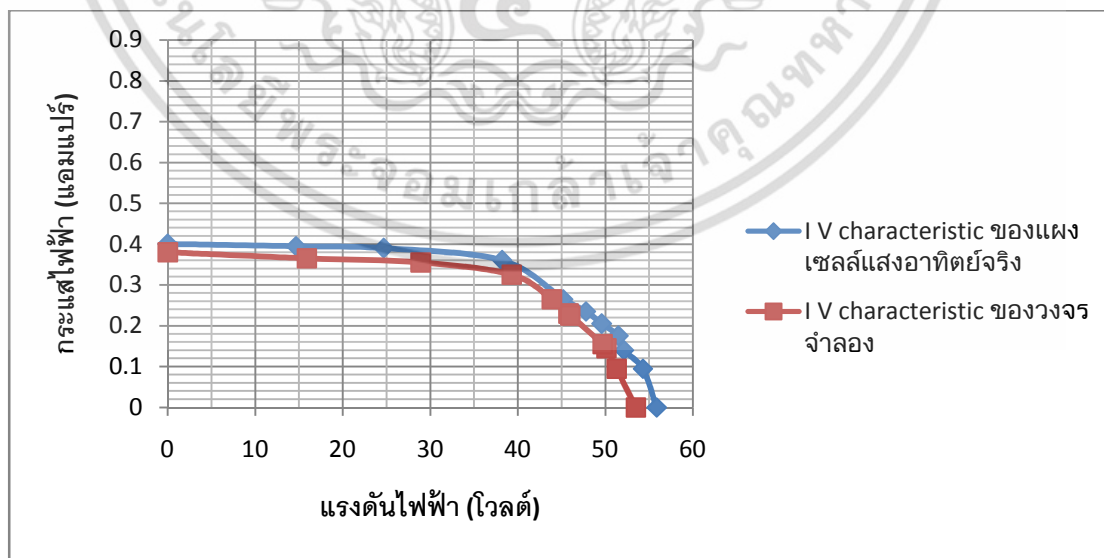
ค่าความต้านทาน (โอห์ม)	แรงดันไฟฟ้า (โวลต์)	กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)	กำลังไฟฟ้า (วัตต์)
200	55.9	0	0
180	54.3	0.095	13.92795
160	52.15	0.14	19.7127
140	51.5	0.175	24.33375
120	49.6	0.205	27.4536
100	47.8	0.235	30.3291
80	45.2	0.265	32.3406
60	38.2	0.36	37.1304
40	24.68	0.39	25.98804
20	14.64	0.395	15.61356
0	0	0.4	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.20 ค่าที่วัดจากวงจรจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ความเข้มแสง 300 วัตต์ต่อตารางเมตร

ค่าความต้านทาน (โอห์ม)	แรงดันไฟฟ้า (โวลต์)	กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)	กำลังไฟฟ้า (วัตต์)
200	53.5	0	0
180	51.3	0.095	13.6458
160	50.14	0.145	20.35684
140	49.7	0.155	21.5698
120	45.8	0.23	29.4952
100	46	0.225	28.98
80	43.9	0.265	32.5738
60	39.3	0.325	35.763
40	28.9	0.355	28.7266
20	15.9	0.365	16.2498
0	0	0.38	0

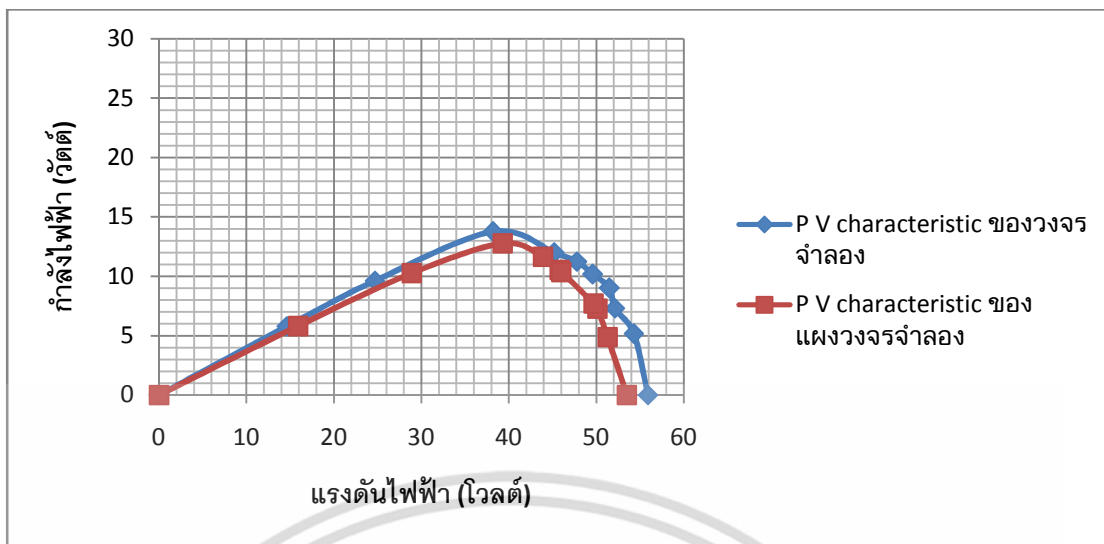
จากการวัดค่าทั้งจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์และวงจรจำลองเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อนำมาพล็อตเปรียบเทียบกันได้ดังแสดงในรูปที่ 5.47 เป็นการเปรียบเทียบค่ากราฟกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า ส่วนในรูปที่ 5.48 เป็นรูปเปรียบเทียบค่ากราฟกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า



รูปที่ 5.47 กราฟเปรียบเทียบ I-V Characteristic ของแผงเซลล์อาทิตย์กับวงจรจำลอง

เซลล์แสงอาทิตย์ที่ความเข้ม 300 วัตต์ต่อตารางเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.48 กราฟเปรียบเทียบ P-V Characteristic ของแผงเซลล์อาทิตย์กับวงจรรจำลอง

เซลล์แสงอาทิตย์ที่ความเข้ม 300 วัตต์ต่อตารางเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.5 สรุป

จากการจำลองสัญญาณคุณลักษณะทางไฟฟ้าของโฟโต้ไดโอดในรูปแบบอนุกรมและขนาน ในบทที่ 4 รวมถึงวงจรถยายสัญญาณทางไฟฟ้าเพื่อจำลองโฟโต้ไดโอดที่ให้ความคล้ายคลึง กับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 30 W กับผลการทดลองจริงในบทที่ 5 มีความสอดคล้องกัน และมี ความคลาดเคลื่อนน้อย แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองคุณลักษณะทางไฟฟ้าจากแบบจำลองทาง คณิตศาสตร์จากโปรแกรม Orcad 9.1 และวงจรถยายสัญญาณจำลองคุณลักษณะทางไฟฟ้า สามารถนำมาทดแทนเซลล์แสงอาทิตย์จริงขนาดสูงสุด 50 W เพื่อทดสอบการใช้งานได้จริง ในสภาวะแวดล้อมต่างๆ โดยในบทความนี้ได้แบ่งการจำลองสัญญาณเป็นรูปแบบอนุกรม และขนาน เพื่อเป็นการศึกษาถึงพารามิเตอร์ รวมถึงเพิ่มแนวทางการใช้งาน

จากผลการทดสอบพบว่า วงจรจำลองสัญญาณเลียนแบบทั้งในรูปแบบอนุกรม และขนาน สามารถให้สัญญาณคุณลักษณะทางไฟฟ้า ของโฟโต้ไดโอดที่มีขนาดเท่ากับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 30 W ได้ และวงจรถยายสัญญาณเลียนแบบในรูปแบบอนุกรม สามารถให้แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรได้มากกว่ารูปแบบขนาน จากอัตราขยายแรงดัน (A_v) ที่มีขนาดน้อยกว่า แต่ให้ค่าของกระแสลัดวงจรได้น้อยกว่ารูปแบบขนาน โดยทั้งหมดสามารถเพื่อเป็นการศึกษา และเพิ่มแนวทางวิธีการใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์ต่อไป

บทที่ 6

สรุปผลการทดลอง

จากการทำปริญญานิพนธ์เล่มนี้ ได้เสนอหลักการการจำลองวงจรเลียนแบบคุณลักษณะ ทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้โฟโต้ไดโอดเป็นอินพุต สรุปเป็นหัวข้อสำคัญดังนี้

- การศึกษาและออกแบบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยโปรแกรม Orcad 9.1
- การศึกษาและออกแบบการทำงานของวงจรจำลองสัญญาณเลียนแบบโฟโต้ไดโอดทั้งแบบอนุกรมและขนาน ด้วยโปรแกรม Orcad 9.1 ในสภาวะแวดล้อมต่างๆ
- การศึกษาและออกแบบการทำงานของวงจรจำลองสัญญาณเลียนแบบโฟโต้ไดโอดทั้งแบบอนุกรมและขนาน จากการทดลองจริง ในสภาวะแวดล้อมต่างๆ
- ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา

6.1 การศึกษาการทำงานของวงจรจำลองสัญญาณเซลล์แสงอาทิตย์

จากผลการทดลองพบว่าโฟโต้ไดโอดรุ่น BS520 สามารถใช้เป็นเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิงได้ แต่เนื่องจากการสร้างตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์สัญญาณที่ได้จากโฟโต้ไดโอดมีขนาดเล็กมากทำให้ไม่สามารถตรวจจับสัญญาณได้อย่างต่อเนื่องจะส่งผลกระทบต่ออัตราการขยายกระแสไฟฟ้าในการเลือกใช้อุปกรณ์ในวงจรขยายกำลังต้องใช้ออปแอมป์ที่สามารถทนแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าได้สูงเพื่อค่าเอาต์พุตที่ได้จะตรงตามทีออกแบบไว้

จากการออกแบบและการทดลองในบทที่ผ่านมา ซึ่งได้เลือกใช้โฟโต้ไดโอดมาเป็นสัญญาณอ้างอิงแทนเซลล์แสงอาทิตย์ พบว่าโฟโต้ไดโอดในโหมดการทดสอบ Photovoltaic ให้คุณลักษณะทางไฟฟ้าเหมือนเซลล์แสงอาทิตย์ และเมื่อนำโฟโต้ไดโอดเป็นสัญญาณเข้ารวมกับวงจรจำลองสัญญาณคุณลักษณะทางไฟฟ้า สามารถให้ผลคุณลักษณะทางไฟฟ้าคล้ายคลึงกับเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดสูงสุด 30 W

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม Orcad 9.1 ได้ทำการพบว่า เมื่อทำการทดสอบเมื่อเปลี่ยนสภาวะแวดล้อมทั้งความเข้มแสง และอุณหภูมิ แบบจำลองนี้เมื่อได้ทำการทดสอบในโหมด

Photovoltaic สามารถให้กราฟคุณลักษณะทางไฟฟ้า I-V Characteristics ใกล้เคียงกับ การทดสอบเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ขึ้นด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของโฟโต้ไดโอดจริง ในจะมีความคลาดเคลื่อนของกำลังไฟฟ้าสูงสุดเล็กน้อย เนื่องจากแบบจำลองเป็นการสร้างจากสมการของวงจรสมมูลอย่างง่ายซึ่งนำเอาลักษณะโครงสร้างของสารกึ่งตัวนำมาเป็นต้นแบบ

การจำลองแบบวงจรเซลล์แสงอาทิตย์ พบว่าแบบจำลองให้อัตราขยายตามแรงดันไฟฟ้าตามที่ได้ออกแบบไว้ ในการควบคุมจุดทำงานของแบบจำลองสามารถให้อัตราขยายกระแสที่ถูกต้องมีขีดจำกัดของกระแสที่กระแสไฟฟ้าลัดวงจรเท่านั้น และแบบจำลองสามารถแสดงเอาต์พุตได้ตามที่ออกแบบ

6.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา

จากการทดสอบพบว่าวงจรออปแอมป์ขยายกำลัง OPA544 พบว่าหากมีอัตราขยายที่สูงจะทำให้วงจรจำลองสัญญาณนี้ ไม่สามารถจำลองสัญญาณคุณลักษณะทางไฟฟ้าของโฟโต้ไดโอดได้ถูกต้อง จึงทำให้วงจรขยายนี้มีขีดจำกัดในการจำลองสัญญาณ ไม่สามารถขยายสัญญาณได้สูงสุดที่ 120 วัตต์ ตามขีดจำกัดสูงสุดของไอซีออปแอมป์นี้

แรงดันจากโฟโต้ไดโอดที่นำมาเป็นสัญญาณอ้างอิง ไม่สามารถส่งผ่านได้เต็ม 100 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากแรงดันเกิดแรงดันตกคร่อมที่สายประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ ทำให้สัญญาณขาเข้าที่ได้มีความคลาดเคลื่อน อาจส่งผลแก่สัญญาณขาออกมีความคลาดเคลื่อนไปด้วย จึงควรมีการทดสอบโฟโต้ไดโอดชนิดต่างๆ ที่สามารถส่งผ่านแรงดันได้ 100 เปอร์เซ็นต์

จากผลการทดสอบในบทที่ 5 พบว่า วงจรจำลองสัญญาณเลียนแบบเซลล์แสงอาทิตย์สามารถนำไปใช้เป็นแทนแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ได้ และยังมีมีความคลาดเคลื่อนน้อย แต่ยังสามารถทดสอบด้านอื่นๆ ที่ควรทดสอบเพิ่มเติม อาทิเช่น การบดบังแสงบางส่วน, การทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอื่นๆ และการทดสอบการจำลองสัญญาณ เมื่อเปลี่ยนอุณหภูมิเป็นต้น ซึ่งทั้งหมดนี้ควรมีการทดสอบต่อไป

6.3 สรุป

ในบทนี้แสดงให้เห็นถึง การนำโฟโตโวลตาอิกมาใช้เป็นเซลล์แสงอาทิตย์สามารถให้คุณลักษณะทางไฟฟ้า เช่นเดียวกับเซลล์แสงอาทิตย์ จากการผลการทดลองในบทที่ 4 และบทที่ 5 ซึ่งผลทดลองที่ได้ มีความสอดคล้องกันกับเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อมีการเปลี่ยนสภาวะแวดล้อม อาทิเช่น การเปลี่ยนความเข้มแสง ในบทที่ 5 ในขณะที่วงจรจำลอง สัญญาณเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำหน้าที่ในการขยายสัญญาณคุณลักษณะทางไฟฟ้าของโฟโตโวลตาอิก ยังสามารถให้สัญญาณคุณลักษณะทางไฟฟ้า เช่นเดียวกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์จริง ขนาดสูงสุด 50 W และในการวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงประโยชน์ของคุณลักษณะทางไฟฟ้าเมื่อมีการต่อวงจรโฟโตโวลตาอิกที่ต่างกัน โดยที่ปกติการใช้ประโยชน์จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะมีการใช้งานในการต่อแบบอนุกรม ซึ่งให้แรงดันไฟฟ้าที่มากกว่า แต่ในบทความวิจัยนี้พยายามศึกษาวิธีการที่จะใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์จะมีการใช้งานในการต่อแบบขนาน ซึ่งผลการของวงจรจำลองสัญญาณเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งสอง แสดงให้เห็นที่อัตราการขยายที่จำเป็นในการขยายกระแสไฟฟ้า ซึ่งจากการทดลองพบว่า ในรูปแบบของวงจรขนานสามารถให้กระแสลัดวงจร และกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่สูงกว่าการต่อวงจรแบบอนุกรมในอัตราการขยาย A_v เดียวกัน แต่ต้องใช้อัตราการขยายแรงดัน A_v ที่สูงกว่าเช่นเดียวกัน แต่ทั้งสองวงจรสามารถให้สัญญาณคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ได้อย่างครบถ้วน และสามารถนำไปพัฒนา หรือเพิ่มแนวทางการใช้งานในอนาคตได้ต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] [www.ti.com /support/amplifiers](http://www.ti.com/support/amplifiers)
- [2] http://www4.dede.go.th/dede/fileadmin/usr/bose/document/solar%20energy%20technology_paper.pdf
- [3] Honsberg and Stuart Boxden : <http://pveducation.org/pvcdrom/pn-junction/bias-of-pn-junction>
- [4] <http://www3.egat.co.th/re/solarcell/solarcell.htm>
- [5] <http://www.scan-inter.com/th/บทความ/ทำความเข้าใจกับพลังงานแสงอาทิตย์>
- [6] <http://www.kmutt.ac.th/รู้จักเซลล์แสงอาทิตย์>
- [7] Kalevi Hyypya and Klas Ericson “Low-Noise Photodiode-Amplifier Circuit”
- [8] เอก เอื้อตระการวิวัฒน์ “ตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้วงจรรขยายกระแส และแรงดัน” , วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พ.ศ. 2551 หน้า 1 – 32
- [9] นาวิ รุจิตามพ์ ,ยิ่งยศ ขวนยี่ ,วันสพล เทพาพันธ์ ,พงศ์ศรีณย์ ภาควิธีการ “ชุดจำลองเซลล์แสงอาทิตย์” วิทยานิพนธ์ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง หน้า 1 – 3 และ หน้า 27 - 32
- [10] Jerald Graeme , “Photodiode Amplifiers - op amp solutions” ,McGraw – Hill , Page 63 – 69
- [11] Ole-Morten Midtgard “A simple photovoltaic simulator for testing of power electronics” ,Agder University College.
- [12] Hiroshi Nagayoshi', Shinji Orio, Yuji Kono, and Hirotaka Nakajima ,“Novel PV Array Model I - V Curve Simulator Circuit” ,Shonan Institute of Technology 1-1-25, Nishikaigan, Fujisawa, Kanagawa. Japan
- [13] Hiroshi Nagayoshi and Mani Atesh Tokyo “Partial Shading Effect Emultaion Using Multi Small Scale Models Simulator Units” ,National College of Techndogy, 1220-2, Kunugida-machi, Hachioji, Tokyo, Japan
- [14] Hiroshi Nagayoshi, “I-V curve simulation by mutimodule simulator using I-V magnifier circuit,” Solar Energy Material & Solar ,page 159 – 167 ,2004
- [15] Luis Castaner ,Santiago Silvestre , “Modelling Photovoltaic Systems using Pspice” ,John Wiley & Sons Ltd., 2002

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก.
ผลงานวิจัยที่ได้รับการเผยแพร่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การจำลองวงจรเลียนแบบคุณลักษณะสัญญาณทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยใช้โฟโอดีโอดเป็นอินพุต

SIMULATION OF A SOLAR CELL SIMULATOR USING PHOTO DIODES AS INPUT

สาริษฐ์ โสภา¹ และ รศ.ดร.วิจิตร กิณเรศ²

¹สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1 หมู่ที่ 2 ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 โทรศัพท์ : 0-2326-4550 E-mail: s.sopa_15@hotmail.com

²สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1 หมู่ที่ 2 ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 โทรศัพท์ : 0-2326-4550 kkwijit@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการจำลองวงจรเลียนแบบเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้โฟโอดีโอดต่อแบบอนุกรม และขนานเป็นอินพุต โดยใช้ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อสร้างวงจรที่สามารถตอบสนองตามสภาพแวดล้อม ทั้งความเข้มแสง และอุณหภูมิ หรือคุณลักษณะทางไฟฟ้าต่างๆ ที่เปลี่ยนแปลงได้ ตัวจำลองได้ถูกออกแบบขึ้นโดยใช้วงจรอนาล็อกเพื่อขยายแรงดันและกระแส ผลที่ได้แสดงให้เห็นถึงตัวจำลองที่ได้ออกแบบ สามารถให้คุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ในสภาวะแวดล้อมต่างๆ ได้

คำสำคัญ : เซลล์แสงอาทิตย์ ,คุณลักษณะทางไฟฟ้า

Abstract

This paper presents the simulation of a solar cell simulator using series and parallel photo diodes as based on a mathematical model in order to create a circuit responding to the environment including insolation and temperature or variable electrical characteristics. The simulator is designed through analog circuits for voltage and current magnification. The simulated results show that the designed simulator is able to provide electrical characteristic of the solar cell in various conditions of the environment.

Key words: Solar cell / electrical characteristics.

1. บทนำ

จากคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ขึ้นกับสภาพแวดล้อมที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ตลอดเวลา จึงได้มีการศึกษา วิจัย และค้นคว้า เพื่อสร้างวงจรจำลองการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ ที่มีคุณลักษณะทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงเหมือนกับเซลล์

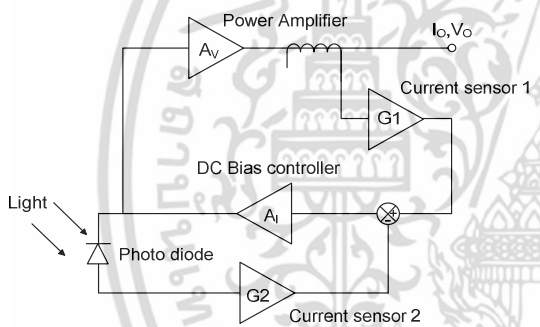
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสงอาทิตย์จริง เพื่อสามารถวิเคราะห์ หาสภาวะต่างๆ ที่มีปัจจัยกับการใช้งาน รวมถึงแนวทางการใช้เซลล์แสงอาทิตย์เพื่อให้ได้ประโยชน์สูงสุด

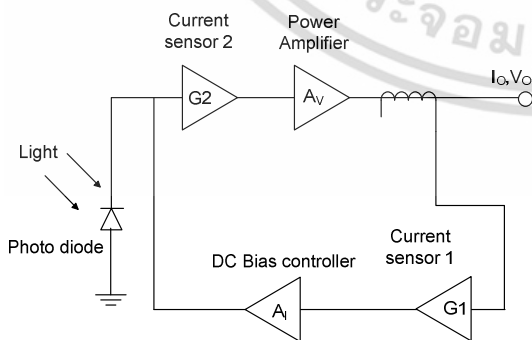
ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องมีการคิดค้นแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อสามารถวิเคราะห์หาแนวทางที่สามารถใช้ประโยชน์จากเซลล์แสงอาทิตย์ได้สูงสุด ใน

สภาวะแวดล้อมต่างๆ โดยรวมถึงเป็นแนวทางการพัฒนาการใช้ประโยชน์ของเซลล์แสงอาทิตย์ในอนาคตต่อไป

โดยบทความนี้นำเสนอแบบจำลองที่แสดงคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ จากโฟโต้ไดโอด โดยคุณลักษณะทางไฟฟ้างกล่าวสามารถวัดได้โดยใช้สัญญาณที่มาจากวงจรขยายสัญญาณ ได้โดยใช้ชุดขยาย Power Amplifier (A_v) ซึ่งทำให้สามารถหาพิคกิ้งแรงดัน (V_o) และกระแส (I_o) มีขนาดที่สูงขึ้นตามการออกแบบ ขณะจ่ายโหลดสามารถควบคุมจุดทำงานได้ด้วยชุด DC Bias Controller โดยจะควบคุมจุดทำงานด้วยการตรวจจับกระแสเอาท์พุท ผ่านชุดขยายกระแส G_1 (Current Sensor 1) และ G_2 (Current Sensor 2) เพื่อเข้าสู่ ดังรูปที่ 1 และรูปที่ 2



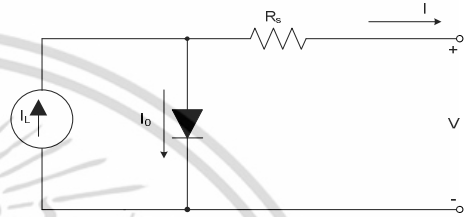
รูปที่ 1 ไดอะแกรมการทำงานของวงจรสร้างสัญญาณเลียนแบบเซลล์แสงอาทิตย์ โดยใช้โฟโต้ไดโอดอนุกรมเป็นอินพุต



รูปที่ 2 ไดอะแกรมการทำงานของวงจรสร้างสัญญาณเลียนแบบเซลล์แสงอาทิตย์ โดยใช้โฟโต้ไดโอดขนานเป็นอินพุต

2. แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์โดยสมการทางคณิตศาสตร์

ในการวิเคราะห์เซลล์แสงอาทิตย์นิยมใช้วงจรสมมูลแบบวิเคราะห์สมการไดโอดตัวเดียวที่มีความต้านทานที่มีความต้านทานอนุกรมเท่านั้น ส่วนความต้านทานขนานจะมีค่าสูงมากจึงไม่นิยมมาใช้ในการวิเคราะห์ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 3 ซึ่งสามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ (1) [2]



รูปที่ 3 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์อย่างง่าย

$$I = I_L - I_o \left[e^{\frac{V+IR_s}{nV_T}} - 1 \right] \quad (1)$$

เมื่อ I_L คือ ค่ากระแสโฟโต้
 V_T คือ Thermal Voltage ไดโอด
 V คือ แรงดันเอาท์พุทของไดโอด
 I คือ ค่ากระแสต่อตัวของไดโอด
 n คือ ค่า Ideality factor ของไดโอด
 เนื่องจากกระแสโฟโต้มีความสัมพันธ์กับความเข้มแสงจึงสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$I_L = \frac{I_{SCM}}{1000} \times V_{irradiance} \quad (2)$$

เมื่อ I_{scm} คือ กระแสลัดวงจรของแผงเซลล์แสงอาทิตย์
 $V_{irradiance}$ คือ ค่าความเข้มแสง
 ในสภาวะลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์จะมีกระแสไหลผ่านไดโอดน้อยมาก กระแส $I_L = I_{scm}$ เมื่อแทนค่าในสมการที่ (1) สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$I = I_{scm} - I_o \left[e^{\frac{V+IR_s}{nV_T}} - 1 \right] \quad (3)$$

จากรูปที่ 3 เป็นวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์เพียงเซลล์เดียว ดังนั้นแผงเซลล์แสงอาทิตย์จึงมีการนำเซลล์แสงอาทิตย์มาต่อขนานเมื่อต้องการกระแสสูงหรือมีการ

รหัสนี้บทความ

AE011

ต่ออนุกรมเมื่อต้องการแรงดันที่สูง ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ในรูปสมการได้ดังนี้

$$I_m = N_p I \quad (4)$$

$$I_{scm} = I_{sc} \quad (5)$$

$$V_M = N_s V \quad (6)$$

$$V_{ocm} = N_s V_{oc} \quad (7)$$

$$R_{sm} = \frac{N_s}{N_p} R_s \quad (8)$$

เมื่อ V_{oc} คือ แรงดันเปิดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์

I_{sc} คือ กระแสลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์

R_s คือ ความต้านทานอนุกรมของเซลล์แสงอาทิตย์

M จะเป็นค่าทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อ

N_s คือ จำนวนเซลล์ที่ต่ออนุกรมภายในแผง

N_p คือ จำนวนเซลล์ที่ต่อขนานภายในแผง นำสมการที่ (4) ,(5) ,(6) ,(7) ,(8) แทนค่าในสมการที่ (3)

$$I_m = I_{scm} - N_p I_o \left[e^{\frac{V_M + I_m R_{sm}}{n N_s V_T}} - 1 \right] \quad (9)$$

ในสภาวะเปิดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์พบว่า ในสมการที่ (3) กระแส $I = 0$ ดังนั้นกระแสจะไหลผ่านไดโอดเท่านั้น ดังแสดงให้เห็นในสมการ

$$I_o = \frac{I_{scm}}{\left(e^{n \frac{V_{oc}}{V_T}} - 1 \right)} \quad (10)$$

นำสมการที่ (5) ,(7) แทนในสมการที่ (10) ได้ดังนี้

$$I_o = \frac{I_{scm}}{N_p \left(e^{n \frac{V_{ocm}}{V_T N_s}} - 1 \right)} \quad (11)$$

จากสมการที่ (11) ส่งผลให้ค่า V_{oc} มีความสัมพันธ์ที่เกิดจากสมการที่ (4) ,(5) ,(6) ,(7) ,(8) สามารถแสดงให้เห็นได้ดังสมการ

$$V_{oc} = \frac{V_{oc}}{n V_T} = \frac{V_{ocm}}{N_s n V_T} \quad (12)$$

การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 9

8-10 พฤษภาคม 2556 จังหวัดนครนายก

ที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ สามารถคำนวณจากพารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ดังนี้

$$P_{maxM} = FF_M V_{ocm} I_{scm} \quad (13)$$

เมื่อ P_{maxM} คือ ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผง

FF_M คือ ค่า Fill Factor ของแผง

แต่เนื่องจากกำลังไฟฟ้ามีผลจากความต้านทานอนุกรมที่เกิดขึ้นภายในแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ดังแสดงในสมการ

$$P_{maxM} = FF_M (1 - r_{sm}) V_{ocm} I_{scm} \quad (14)$$

ดังนั้นสามารถหาค่าความต้านทานอนุกรมของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (r_{sm}) ได้จากการคำนวณดังสมการ

$$r_{sm} = \frac{V_{ocm}}{I_{scm}} = \frac{P_{maxM}}{FF_M I_{scm}^2} \quad (15)$$

เมื่อ FF สามารถหาได้จาก

$$FF_M = \frac{v_{oc} - \ln(V_{oc} + 0.72)}{1 + v_{oc}} \quad (16)$$

แบบจำลองสร้างจากสมการที่ (2) ,(11) ,(12) ,(16) นำมาเขียนโปรแกรมเพื่อสร้าง library ในโปรแกรม OrCAD ได้ดังนี้

```
.subckt module_1 400 403 402 params: ta=1, tr=25,
iscmr=0.65u, pmaxmr=0.2u, vocmr=0.5, ns=1, np=1, nd=1
girradm400 401 value={{(iscmr/1000*v(402))}}
d1 401 400 diode
.model diode d(is={iscmr/(np*exp(vocmr/(nd*ns*(8.66e-
5*(tr+273))))},n={nd*ns})
.funcuвет() {8.66e-5*(tr+273)}
.funcvocnorm() {vocmr/(nd*ns*uвет)}
.funcrsm() {vocmr/(iscmr)-
pmaxmr*(1+vocnorm)/(iscmr**2*(vocnorm- +
log((vocnorm)+0.72))}}
rs401 403 {rsm()}
.ends module_1
```

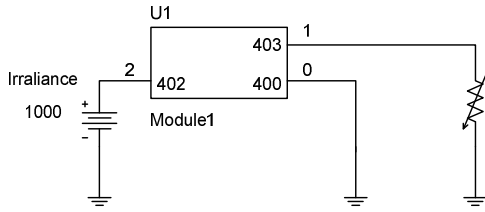
จากโปรแกรมสามารถแปลงเป็นไฟล์ library ที่ใช้จำลองการทำงานในโปรแกรม OrCAD ได้ดังรูปที่ 3 [2],[3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รหัสบทความ

AE011

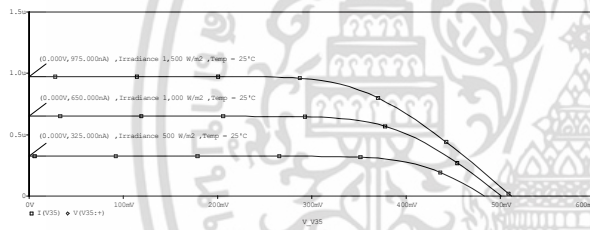
8-10 พฤศจิกายน 2556 จังหวัดนครนายก



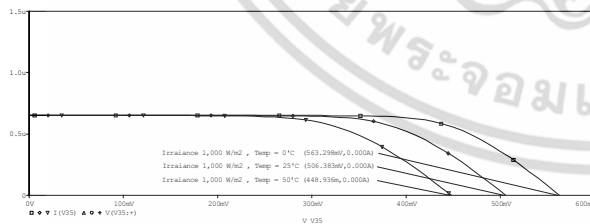
รูปที่ 4 แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างในโปรแกรม OrCad

ที่นี่ได้กำหนดให้โฟโตไดโอดมีขนาดกำลังสูงสุดที่ 0.2 uW กระแสลัดวงจรที่ 0.65 uA และแรงดันเปิดวงจรที่ 0.5 V

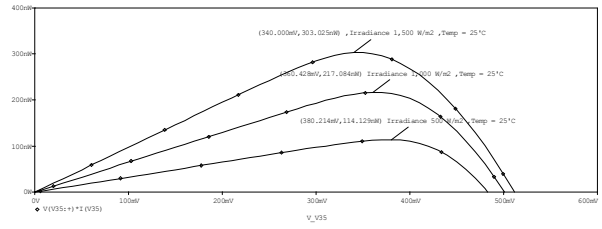
ผลของการจำลองในรูปที่ 5 ,6 ,7 และ 8 พบว่าแบบจำลอง โฟโตไดโอดมีคุณลักษณะทางไฟฟ้าใกล้เคียงกับโฟโตไดโอดจริง และสามารถเปลี่ยนตามสภาวะแวดล้อม ซึ่งส่งผลกระทบต่อพารามิเตอร์ต่างของโฟโตไดโอด [1],[2],[3]



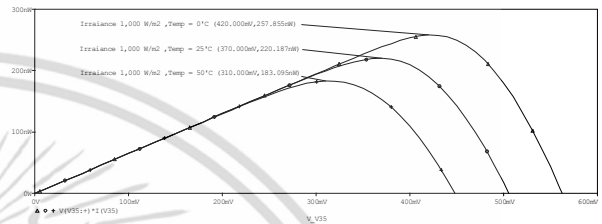
รูปที่ 5 ผลการจำลองกระแสไฟฟ้าของโฟโตไดโอด ที่ความเข้มแสง 500 ,1,000 และ 1,500 W/m² อุณหภูมิ 25 °C



รูปที่ 6 ผลการจำลองกระแสไฟฟ้าของโฟโตไดโอด ที่ความเข้มแสง 1,000 W/m² อุณหภูมิ 10 ,25 และ 50 °C



รูปที่ 7 ผลการจำลองกำลังไฟฟ้าของโฟโตไดโอด ที่ความเข้มแสง 500 ,1000 และ 1,500 W/m² อุณหภูมิ 25 °C



รูปที่ 8 ผลการจำลองกำลังไฟฟ้าของโฟโตไดโอด ที่ความเข้มแสง 1,000 W/m² อุณหภูมิ 10 ,25 และ 50 °C

เมื่อจำลองการทำงาน ความเข้มแสงเท่ากับ 1,500 W/m² กระแสไฟฟ้าลัดวงจรมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 0.975 uA ในขณะที่แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิแบบจำลองเป็น 50 °C แบบจำลอง มีกระแสไฟฟ้าลัดวงจรไม่เปลี่ยนแปลง ในขณะที่แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรมีการเปลี่ยนแปลงลดลงเป็น 0.448 V ดังรูปที่ 5 ,6 ,7 และ 8 [1],[2]

3. วงจรสร้างสัญญาณเลียนแบบคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้โฟโตไดโอด

จากแบบจำลองทางที่สร้างขึ้นในรูปที่ 4 สามารถนำมาใช้เป็นสัญญาณอ้างอิงในการจำลองการทำงานของวงจรจำลองคุณลักษณะทางไฟฟ้า ได้โดยการออกแบบวงจรขยาย Power Amplifier รวมเข้ากับวงจรไบอัสกระแสตรง ในรูปแบบของเซลล์อนุกรม ซึ่งคำนวณได้จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รหัสบทความ

AE011

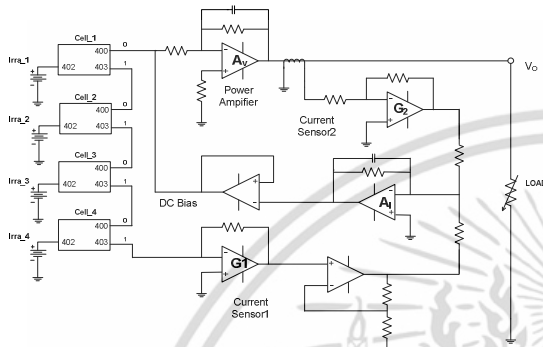
$$A_1 = \frac{I_o}{I_{ph}} = \frac{G_1}{G_2} \quad (7)$$

กำหนดให้ $G_1 = \frac{V_{sensor1}}{I_o} \quad (8)$

$$G_2 = \frac{V_{sensor2}}{I_{ph}} \quad (9)$$

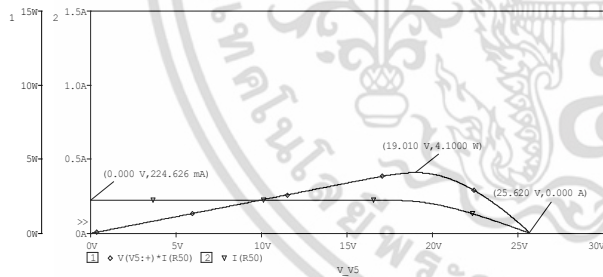
เมื่อ I_o คือ กระแสเอาต์พุตของตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์

I_{ph} คือ กระแสเอาต์พุตจากเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิง

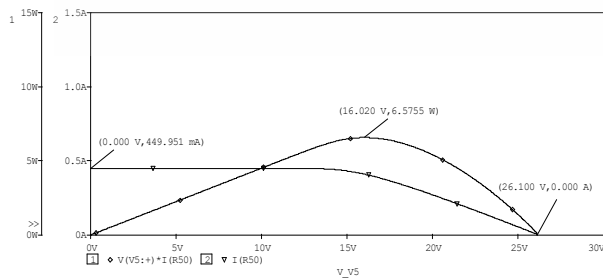


รูปที่ 9 วงจรจำลองคุณลักษณะทางไฟฟ้าของโฟโตโวลตาอิกแบบอนุกรม

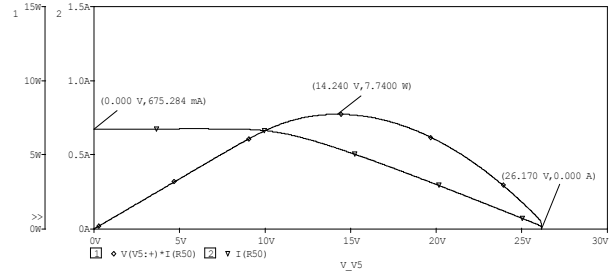
การจำลองคุณลักษณะทางไฟฟ้าของโฟโตโวลตาอิกแบบอนุกรม เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงที่ 500 , 1,000 และ 1,500 W/m² ที่อุณหภูมิ 25°C



รูปที่ 10 ผลการจำลองกำลังไฟฟ้าของโฟโตโวลตาอิกเมื่อความเข้มแสง 500 W/m² อุณหภูมิ 25°C

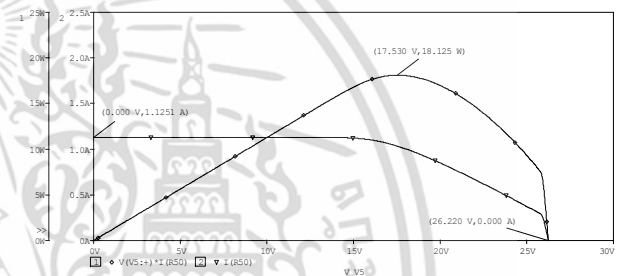


รูปที่ 11 ผลการจำลองกำลังไฟฟ้าของโฟโตโวลตาอิกเมื่อความเข้มแสง 1,000 W/m² อุณหภูมิ 25°C

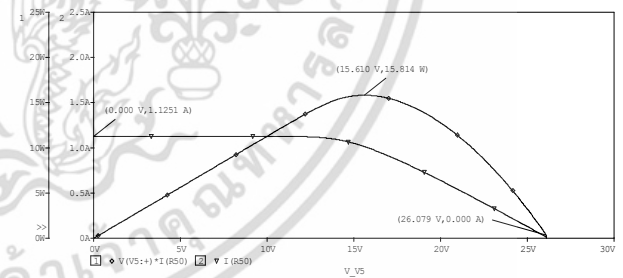


รูปที่ 12 ผลการจำลองกำลังไฟฟ้าของโฟโตโวลตาอิกเมื่อความเข้มแสง 1,500 W/m² อุณหภูมิ 25°C

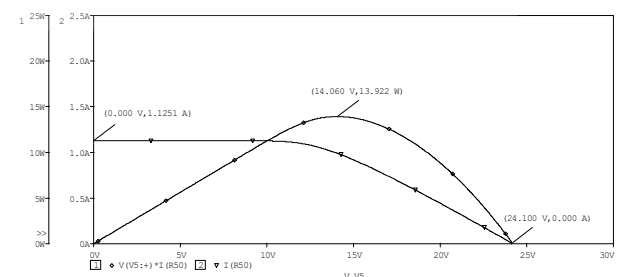
การจำลองคุณลักษณะทางไฟฟ้าของโฟโตโวลตาอิกแบบอนุกรม เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ 0 , 25 และ 50°C ที่ความเข้มแสง 1,000 W/m²



รูปที่ 13 ผลการจำลองกำลังไฟฟ้าของโฟโตโวลตาอิกเมื่อความเข้มแสง 1,000 W/m² อุณหภูมิ 0°C



รูปที่ 14 ผลการจำลองกำลังไฟฟ้าของโฟโตโวลตาอิกเมื่อความเข้มแสง 1,000 W/m² อุณหภูมิ 25°C



รูปที่ 15 ผลการจำลองกำลังไฟฟ้าของโฟโตโวลตาอิกเมื่อความเข้มแสง 1,000 W/m² อุณหภูมิ 50°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อยู่ภายใต้เงื่อนไขลิขสิทธิ์ใดๆ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รหัสบทความ

AE011

และจากแบบจำลองในรูปที่ 4 สามารถสร้างสัญญาณอ้างอิงในรูปแบบของเซลล์ขนานได้ ซึ่งคำนวณได้จาก

$$V_o = A_v G_1 \tag{10}$$

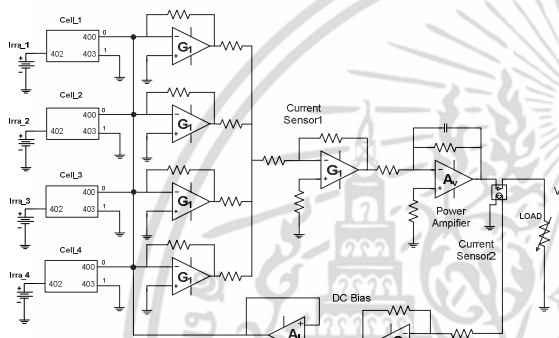
$$V_{BIAS} = A_i G_2 \tag{11}$$

กำหนดให้ $G_1 = \frac{V_{sensor1}}{I_{ph}}$ (12)

$$G_2 = \frac{V_{sensor2}}{I_o} \tag{13}$$

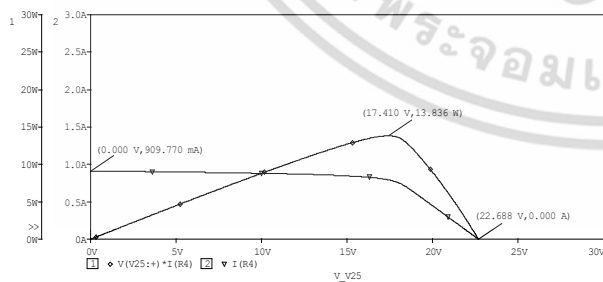
เมื่อ I_o คือ กระแสเอาต์พุตของตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์

I_{ph} คือ กระแสเอาต์พุตจากเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิง



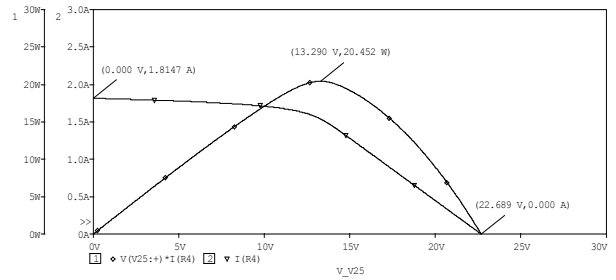
รูปที่ 16 วงจรจำลองคุณลักษณะทางไฟฟ้าของโฟโตไดโอดขนาน

จำลองคุณลักษณะทางไฟฟ้าของโฟโตไดโอดแบบขนาน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงที่ 500, 1,000 และ 1,500 W/m² ที่อุณหภูมิ 25°C



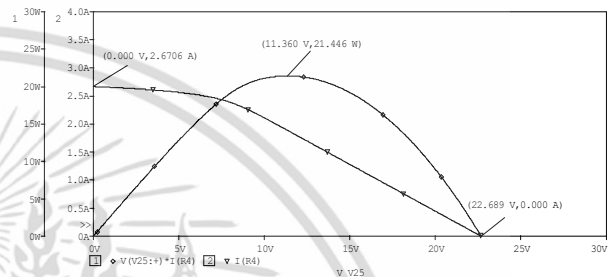
รูปที่ 17 ผลการจำลองกำลังไฟฟ้าของโฟโตไดโอด

เมื่อความเข้มแสง 500 W/m² อุณหภูมิ 25°C



รูปที่ 18 ผลการจำลองกำลังไฟฟ้าของโฟโตไดโอด

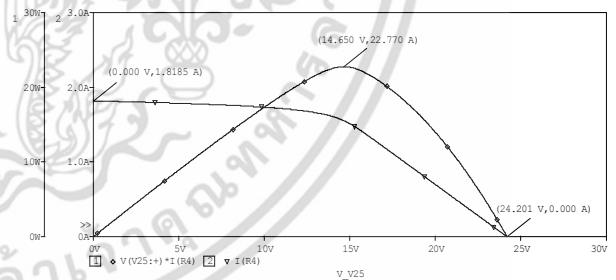
เมื่อความเข้มแสง 1,000 W/m² อุณหภูมิ 25°C



รูปที่ 19 ผลการจำลองกำลังไฟฟ้าของโฟโตไดโอด

เมื่อความเข้มแสง 1,500 W/m² อุณหภูมิ 25°C

การจำลองคุณลักษณะทางไฟฟ้าของโฟโตไดโอดแบบขนาน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ 0, 25 และ 50°C ที่ความเข้มแสง 1,000 W/m²



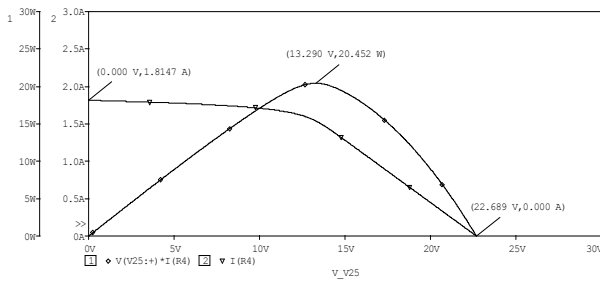
รูปที่ 20 ผลการจำลองกำลังไฟฟ้าของโฟโตไดโอด

เมื่อความเข้มแสง 1,000 W/m² อุณหภูมิ 0°C

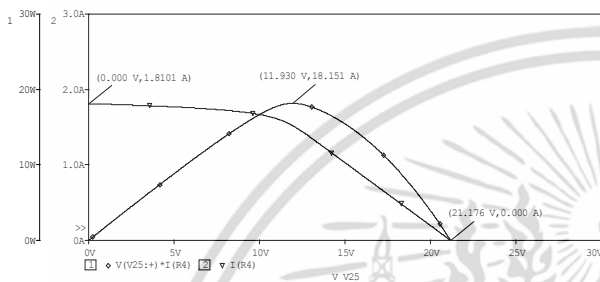
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รหัสบทความ

AE011



รูปที่ 21 ผลการจำลองกำลังไฟฟ้าของโฟลโตไดโอด
เมื่อความเข้มแสง $1,000 \text{ W/m}^2$ อุณหภูมิ 25°C



รูปที่ 22 ผลการจำลองกำลังไฟฟ้าของโฟลโตไดโอด
เมื่อความเข้มแสง $1,000 \text{ W/m}^2$ อุณหภูมิ 50°C

จากผลการจำลองสร้างสัญญาณในรูปแบบเซลล์อนุกรม ในรูปที่ 10, 11 และ 13 ได้มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก 500 , $1,000$ และ $1,500 \text{ W/m}^2$ ค่ากระแสลัดวงจรมีค่าเปลี่ยนแปลงจาก 0.224 , 0.449 และ 0.675 A ค่ากำลังใช้งานสูงสุด 4.1 , 6.57 และ 7.740 W ตามลำดับ ซึ่งแตกต่างจากผลการจำลองสร้างสัญญาณในรูปแบบเซลล์ขนาน ความเข้มแสงจาก 500 , $1,000$ และ $1,500 \text{ W/m}^2$ มีค่ากระแสลัดวงจรเท่ากับ 0.909 , 1.8147 และ 2.670 A กำลังใช้งานสูงสุด 13.876 , 20.542 และ 21.446 W แสดงให้เห็นถึงรูปแบบขนาน มีรูปแบบลักษณะของกระแส รวมถึงค่ากระแสลัดวงจร และค่าแรงดันเปิดวงจร ที่มีการเปลี่ยนแปลงตามสภาพแวดล้อมเด่นชัด มากกว่าแบบจำลองสร้างสัญญาณในรูปแบบเซลล์อนุกรม ดังแสดงในรูปที่ 10 ถึงรูปที่ 22

4. สรุป

การจำลองการทำงานของโฟลโตไดโอด จากสมการทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม OrCAD แสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ตอบสนองกับสภาพแวดล้อมต่างๆ เช่น ความเข้มแสง และอุณหภูมิ โดยมีความใกล้เคียงกับโฟลโตไดโอดขนาด 0.2 uW และได้ใช้ชุดขยายเพื่อศึกษาคุณสมบัติของโฟลโตไดโอด ให้ความใกล้เคียงกับเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 7 W ทั้งในรูปแบบเซลล์ขนาน และอนุกรม เพื่อศึกษา พารามิเตอร์ต่างๆ อาทิเช่น ค่ากระแสลัดวงจร ค่าแรงดันเปิดวงจร ค่ากำลังสูงสุดใช้งาน ที่เปลี่ยนแปลงจากผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมต่างๆ ของโฟลโตไดโอด ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อการใช้งาน โดยการจำลองการทำงานของโฟลโตไดโอดนี้ เป็นแนวทางในการศึกษา ค้นคว้า เพื่อการใช้ประโยชน์ของโฟลโตไดโอด หรืออาจรวมถึงเซลล์แสงอาทิตย์อื่นๆ ให้ได้ประโยชน์สูงสุด เพื่อนำไปใช้งานต่อไป

5. เอกสารอ้างอิง

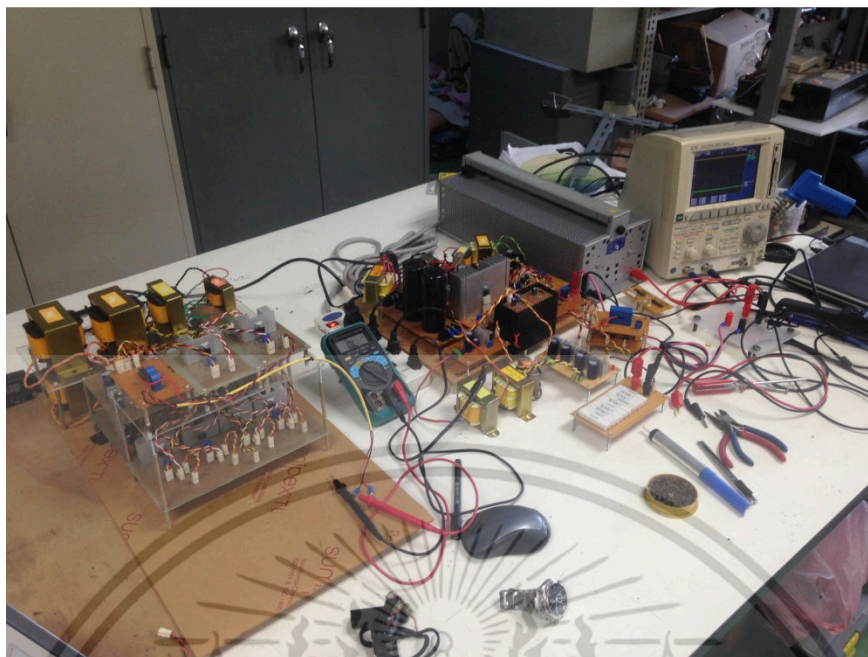
1. www.ti.com
2. เอก เอื้อตระกูลวิวัฒน์ , ชัยวุฒิ ชูรักษ์ , รศ.ดร. วิจิตร กิณเรศ , “ตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้วงจรขยายกระแส และแรงดัน” , วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พ.ศ. 2551
3. Luis Castaner , Santiago Silvestre , “Modelling Photovoltaic Systems using Pspice” , John Wiley & Sons Ltd., 2002
4. Jerald Graeme , “Photodiode Amplifiers - op amp solutions” , McGraw – Hill
5. Hiroshi Nagayoshi , “I-V curve simulation by mutimodule simulator using I-V magnifier circuit,” Solar Energy Material & Solar , pp

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

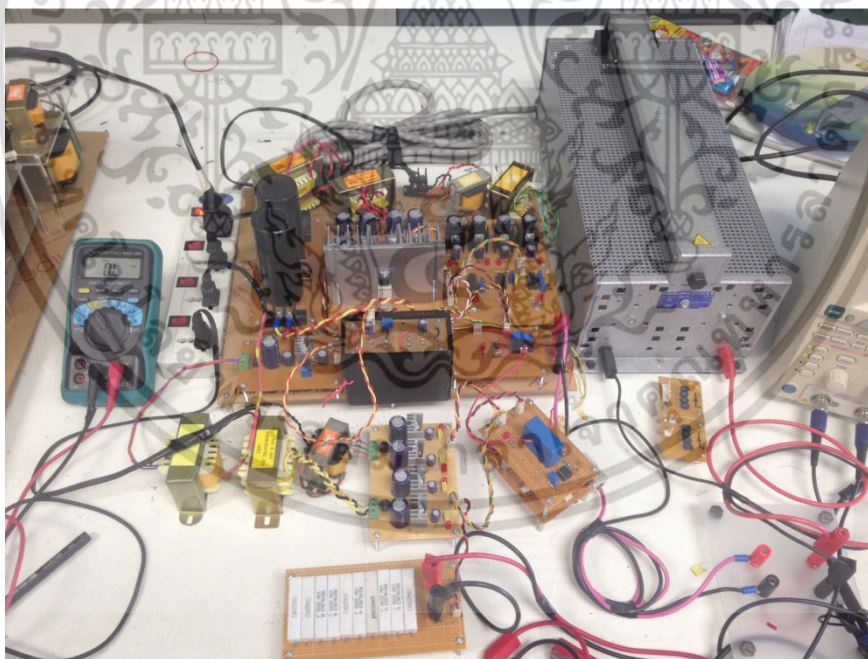
ภาคผนวก ข.
รูปถ่ายวงจรจำลองสัญญาณเลียนแบบคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง
รูปแบบอนุกรม และขนาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

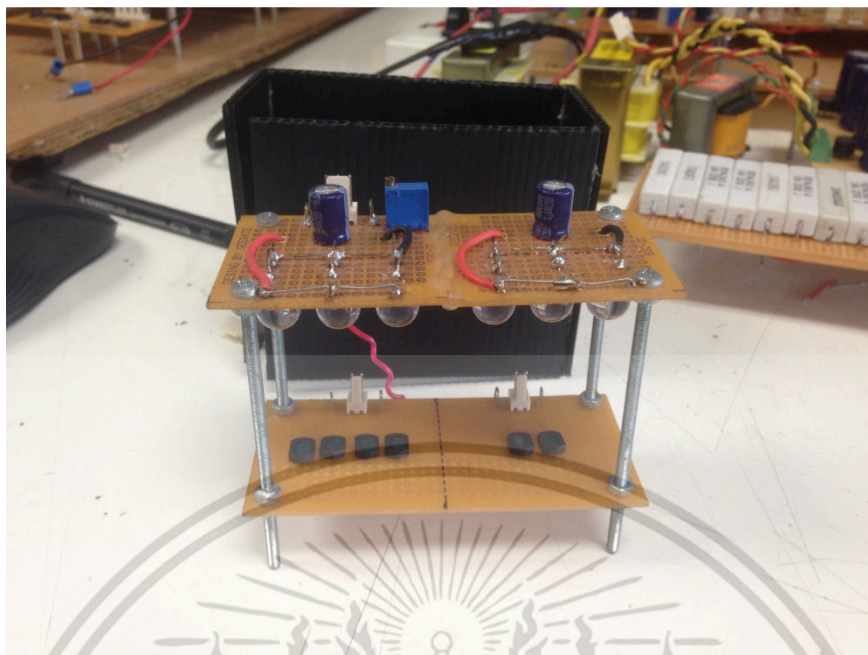


รูปถ่ายวงจรจำลองสัญญาณเลียนแบบคุณลักษณะทางไฟฟ้า
ของเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งรูปแบบอนุกรม และขนาน

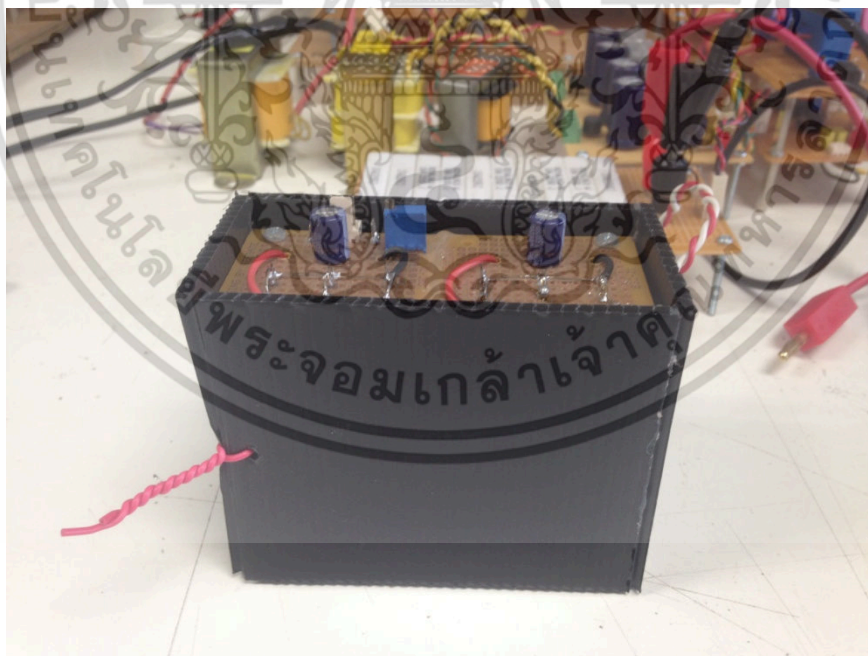


รูปถ่ายวงจรจำลองสัญญาณเลียนแบบคุณลักษณะทางไฟฟ้า
ของเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งรูปแบบอนุกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

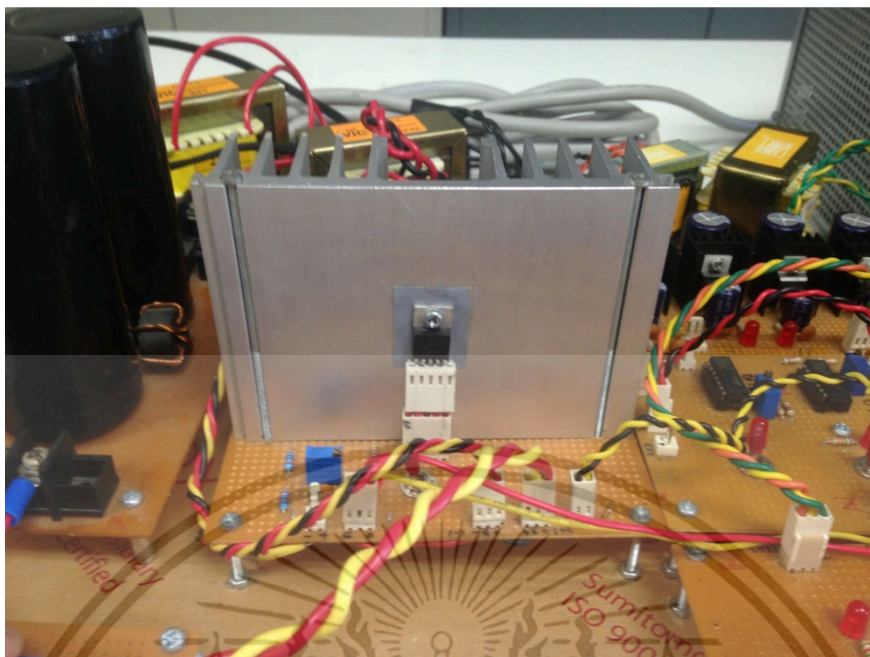


รูปถ่ายโฟโต้ไดโอด และชุดวงจรหลอด LED

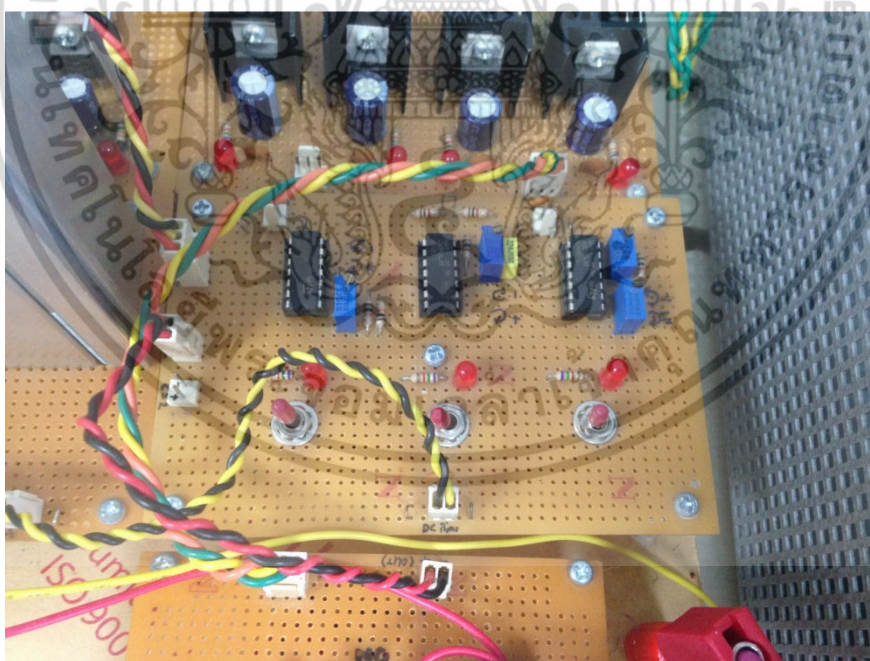


รูปถ่ายโฟโต้ไดโอด และชุดวงจรหลอด LED พร้อมแผงกันแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

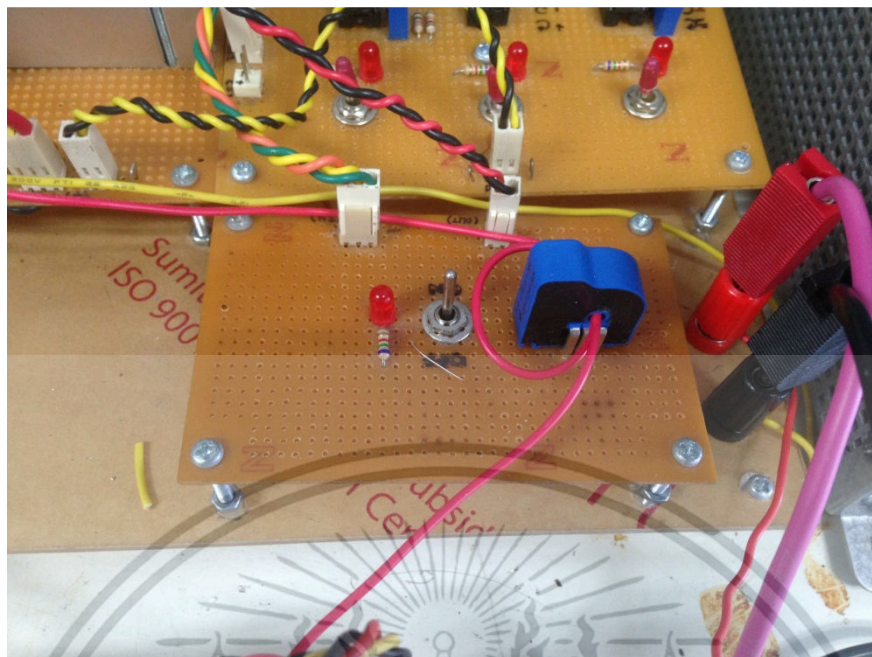


รูปถ่ายวงจรออปแอมป์ OPA544

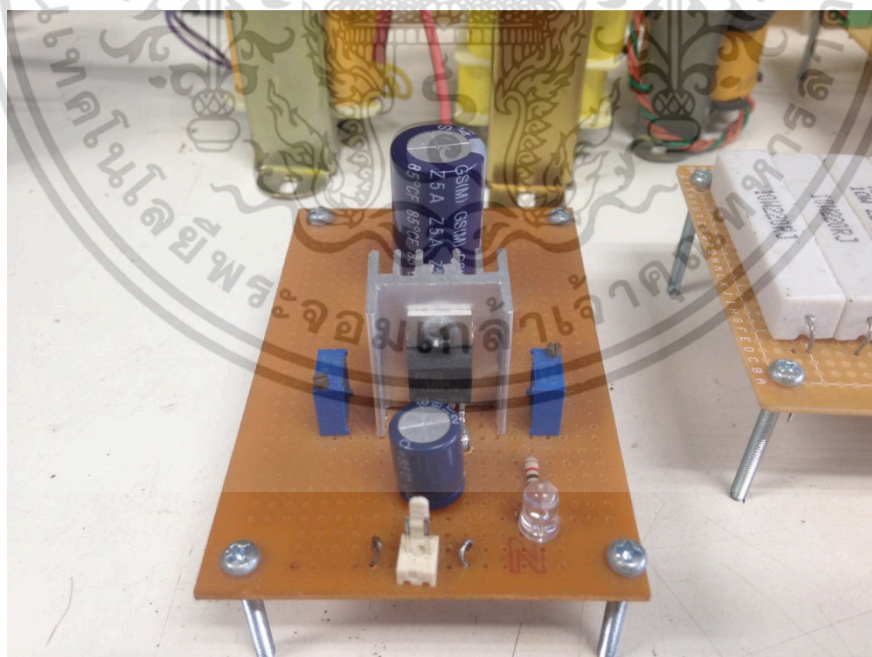


รูปถ่ายวงจร Current sensor 1 ,Current sensor 2 และวงจร DC Bias

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

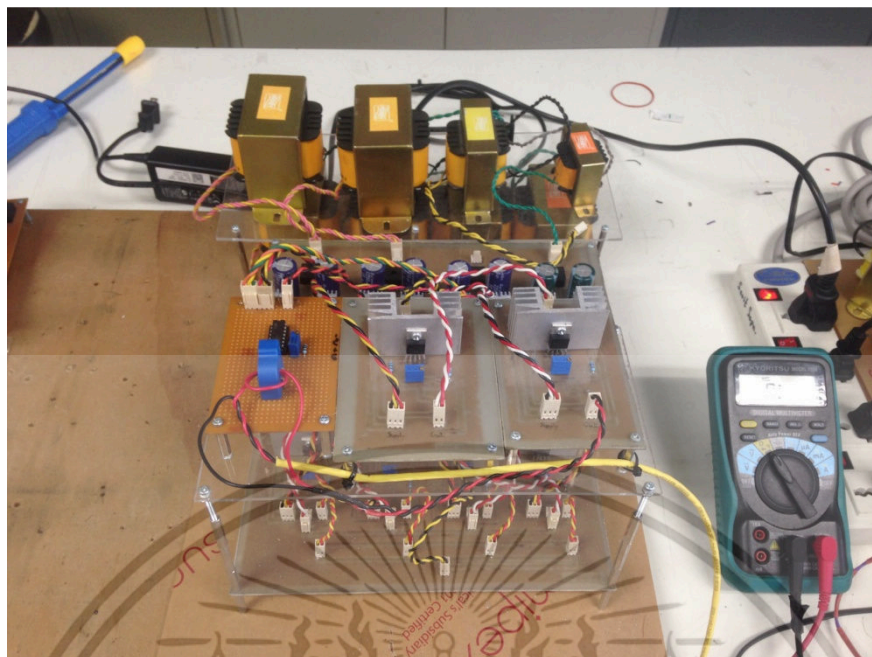


รูปถ่ายส่วนประกอบของวงจร Current sensor 1 ,LTS-6NP

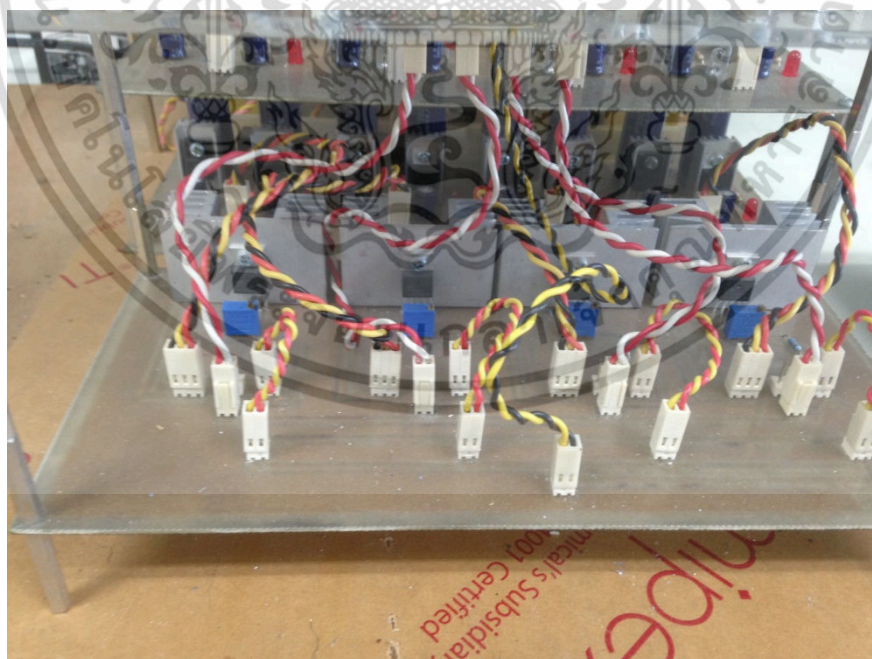


รูปถ่ายวงจรปรับแรงดัน L200 สำหรับปรับความเข้มแสง LED

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

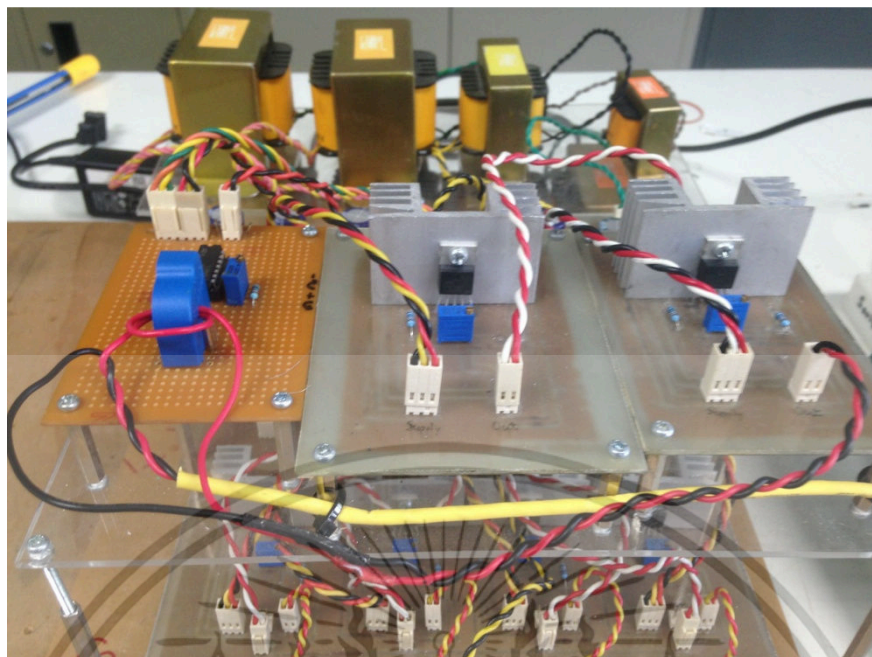


รูปถ่ายวงจรจำลองสัญญาณเลียนแบบคุณลักษณะทางไฟฟ้า
ของเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งรูปแบบขนาน

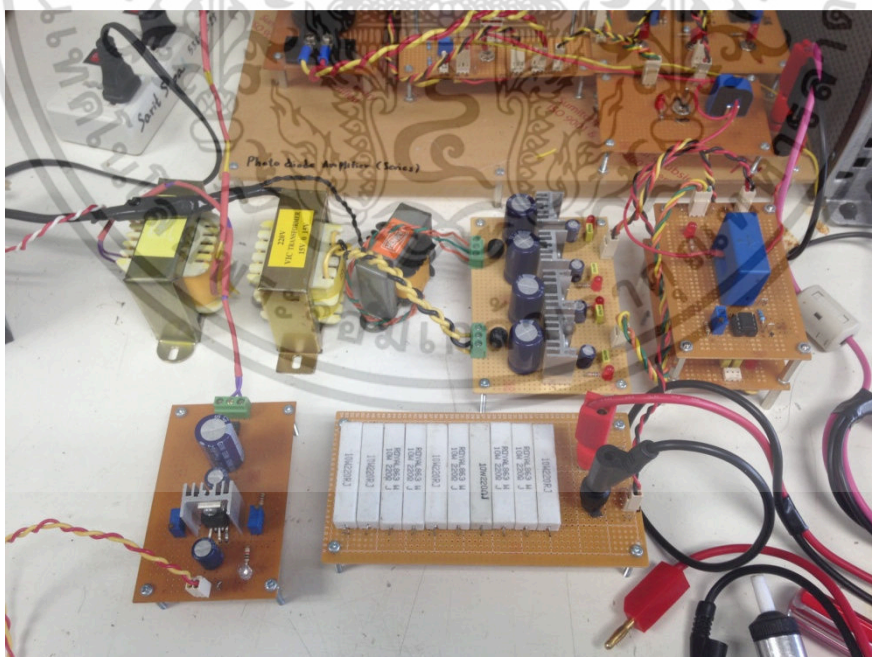


รูปถ่ายวงจรออปแอมป์ Current summing.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

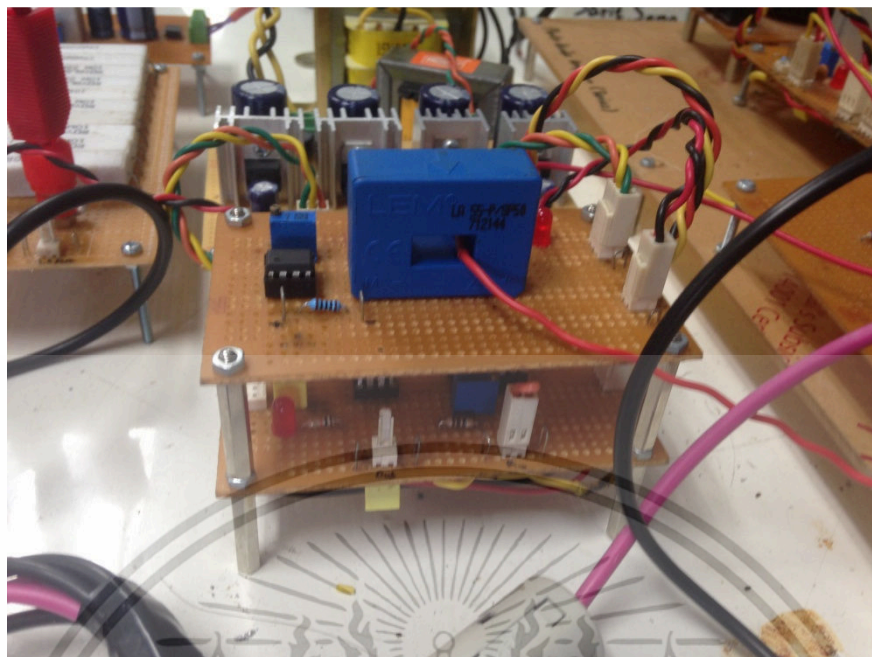


รูปถ่ายวงจร DC bias และวงจรขยายสัญญาณ

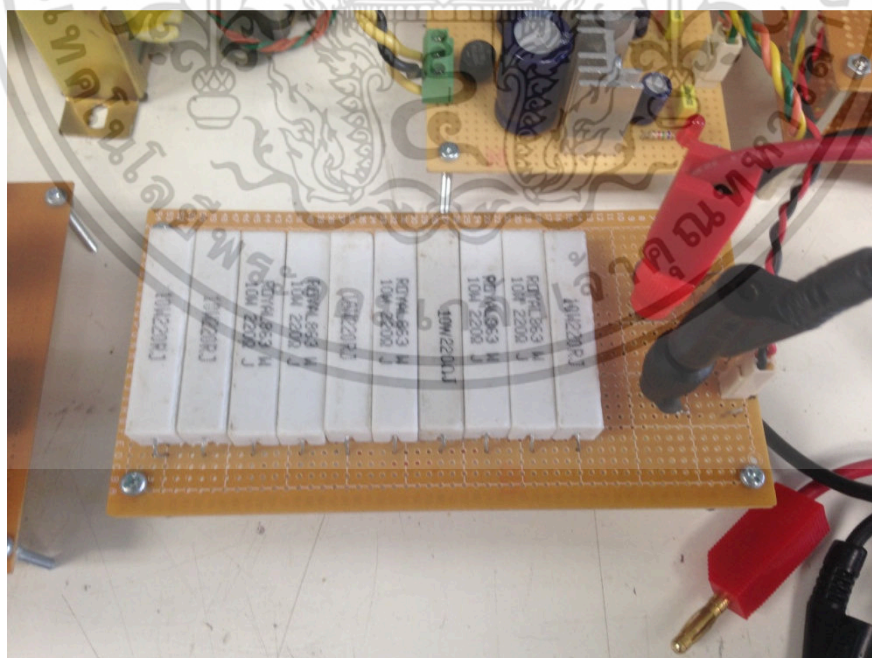


รูปถ่ายวงจรตรวจจับสัญญาณแรงดัน , กระแสไฟฟ้า
และวงจรคุณสัญญาณ AD633

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

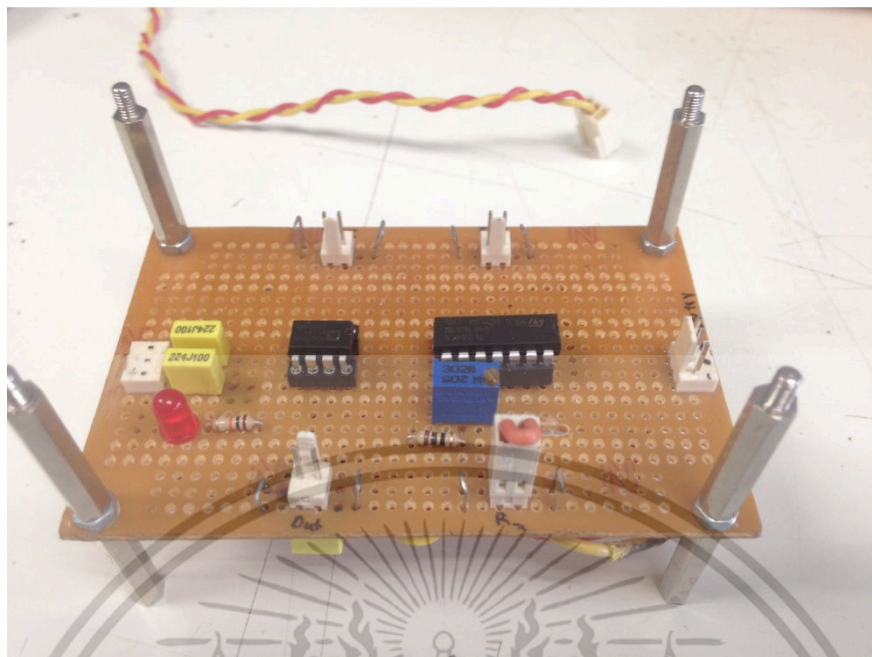


รูปถ่ายวงจรตรวจจับกระแสไฟฟ้าขาออก LA55-P



รูปถ่ายวงจร R divider สำหรับตรวจจับแรงดันไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปถ่ายวงจรออปแอมป์ AD633

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Fig. 1 Short Circuit Current vs. Illuminance

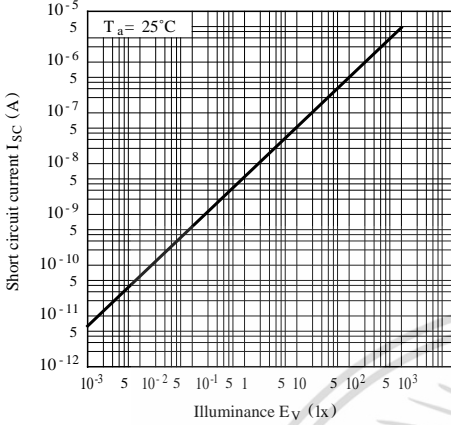


Fig. 2 Relative Short Circuit Current vs. Ambient Temperature

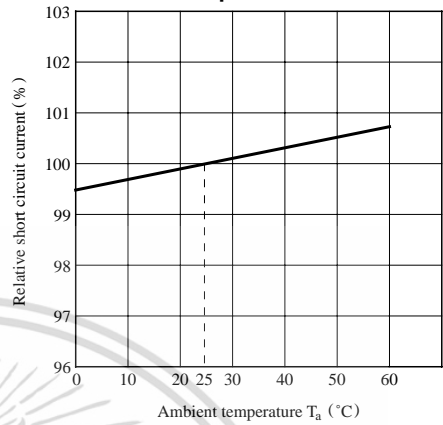


Fig. 3 Dark Current vs. Reverse Voltage

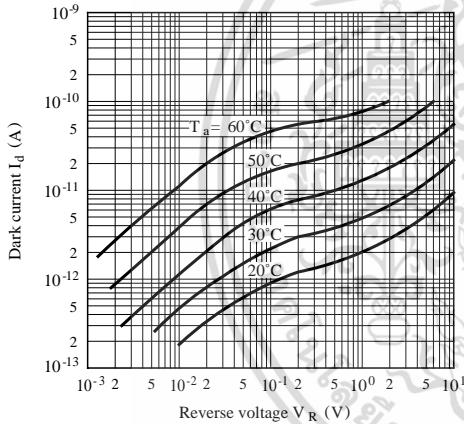


Fig. 4 Spectral Sensitivity

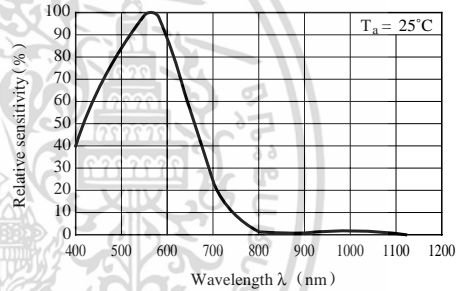
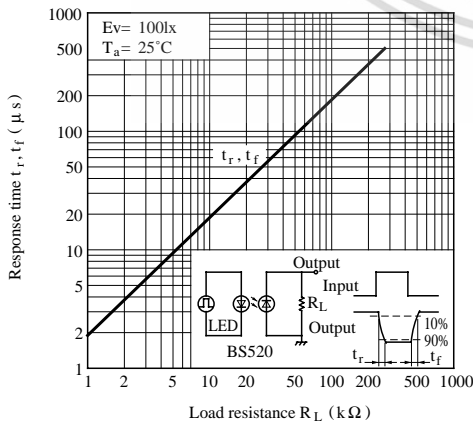


Fig. 5 Response Time vs. Load Resistance



This datasheet has been download from:

www.datasheetcatalog.com

Datasheets for electronics components.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน



ชื่อ - นามสกุล นายสาริษฐ์ โสภา
 วัน เดือน ปีเกิด 20 พฤศจิกายน 2529
 ที่อยู่ ซอยฉลองกรุง 4 แขวงลำปลาทิว เขตลาดกระบัง
 กรุงเทพฯ 10520
 ประวัติการศึกษา พ.ศ. 2552 : วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขา
 วิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง สถาบันเทคโนโลยี พระจอม
 เกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

- [1] สาริษฐ์ โสภา , “การจำลองสัญญาณเลียนแบบคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ โดย
 ใช้โฟโต้โอโอดเป็นอินพุต” ,การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 9 ,
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร