

ชุดจำลองเซลล์แสงอาทิตย์
PHOTOVOLTAIC SIMULATOR



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2555

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PHOTOVOLTAIC SIMULATOR



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

2012

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2555

ชุดจำลองเซลล์แสงอาทิตย์
PHOTOVOLTAIC SIMULATOR



อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร. วิจิตร กิณเรศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2555

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง ชุดจำลองเซลล์แสงอาทิตย์

ผู้จัดทำ

- 
1. นาย นาวี รุจิตามพ์
 2. นาย ยิ่งยศ ยวนยี
 3. นาย วันสพล เทพาจันทร์
 4. นาย พงศ์ศรัณย์ ภาควีรภัทร



..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์ ดร. วิจิตร กิณเรศ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชุดจำลองเซลล์แสงอาทิตย์

นาย นาวี รุจิตามพ์
นาย ยິงยศ ยวนยี
นาย วนัสพล เทพาจันทร์
นาย พงศ์ศรัณย์ ภักวีร์ภัทร
รศ.ดร. วิจิตร กิณเรศ อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2555

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เกี่ยวข้องกับวงจรแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่อาศัยหลักการ
ทำงานของวงจรถอานาล็อกในการขยายคุณลักษณะทางไฟฟ้าที่ได้จากโฟโตโวลตาอิกที่มีขนาดพิคโตวัตต์
กระแสมีค่าน้อยทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายต้นกำเนิด ซึ่งวงจรแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์นี้ ศึกษา
คุณลักษณะทางไฟฟ้าของวงจรแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งได้เลียนแบบแผงเซลล์แสงอาทิตย์จริง
เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของค่าความเข้มแสง ได้มีการเปรียบเทียบกับผลการจำลองผลผ่านโปรแกรม
OrCAD 9.1 เพื่อยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองวงจรเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้นำเสนอ นอกจากนี้ยัง
ได้พล็อตกราฟความสัมพันธ์ของคุณลักษณะทางไฟฟ้าระหว่างแรงดันกับกระแสและกำลังไฟฟ้ากับ
แรงดันโดยใช้ออสซิลโลสโคปที่มีการเก็บข้อมูลแบบดิจิทัล

PHOTOVOLTAIC SIMULATOR

Navee	Rujidam
Yingyot	Yuanyee
Wanassapon	Tepakhan
Phongsarun	Phakwiraphat
Assoc.Prof.Dr.Vijit	Kinnares Supervisor
Year 2012	

ABSTRACT

This thesis is concerned with photovoltaic simulator based on an analog circuit for electrical characteristic amplification from photodiodes. This photovoltaic simulator circuit is used for studying electrical characteristic of solar cell simulator which emulates the real solar cell panel when insolation is changed values. The experiment results are compared with the simulation results obtained from OrCAD 9.1 program package in order to confirm the correctness of the proposed solar cell simulator. In addition, V-I and P-V electrical characteristic curves are plotted by using digital storage oscilloscope.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยการช่วยเหลือจากหลายท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งต้องขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.วิจิตร กิณเรศ อาจารย์ที่ปรึกษา รวมไปถึง คุณสาริษฐ์ โสภา ที่ได้กรุณาให้ข้อเสนอแนะและข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อโครงการมาด้วยดี ตลอด และได้กรุณาตรวจแก้ไข ปริญญานิพนธ์จนสำเร็จเรียบร้อยเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ คุณฐปณีย์ นาจันทร์ และพี่ๆในห้องแลป PMC ที่ให้ความช่วยเหลือในการทดสอบและช่วยเหลือมาโดยตลอด

ทั้งนี้คณะผู้จัดทำ ขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดา และครอบครัวซึ่งให้การสนับสนุนในด้านการเงินและให้กำลังใจอีกทั้งเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ที่ให้ความช่วยเหลือในการจัดหาอุปกรณ์ต่างๆ ในการทำโครงการครั้งนี้จนสำเร็จได้ด้วยดี จึงขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

คณะผู้จัดทำ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูปภาพ	VII
สารบัญตาราง	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ	3
1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงการ	3
1.5 แผนการดำเนินโครงการ	3
1.5.1 แผนดำเนินงานภาคเรียนที่ 1	3
1.5.2 แผนดำเนินงานภาคเรียนที่ 2	4
1.6 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 บทนำ	6
2.2 เซลล์แสงอาทิตย์	6
2.2.1 ลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์	6
2.2.2 ประเภทของเซลล์แสงอาทิตย์	7
2.2.3 ลักษณะกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์	9
2.2.4 ปัจจัยที่ลดทอนประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์	11
2.3 ตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์	12
2.3.1 หลักการทำงาน	12
2.3.2 ชุดสร้างสัญญาณเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิง	12
2.3.2.1 เทคนิคการสร้างสัญญาณอ้างอิงโดยใช้สัญญาณอนาล็อก	12
2.3.2.1.1 การสร้างสัญญาณอ้างอิงโดยใช้การเปลี่ยนโพลด	12
2.3.2.1.2 การสร้างสัญญาณอ้างอิงโดยใช้วงจรสมมูล	
อย่างง่าย	13
2.3.2.2 เทคนิคการสร้างสัญญาณอ้างอิงโดยใช้สัญญาณดิจิทัล	14
2.3.2.2.1 การสร้างสัญญาณอ้างอิงด้วย	
โปรแกรมคอมพิวเตอร์	14
2.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซลล์แสงอาทิตย์	15
2.5 วงจรการใช้งานพื้นฐานของออปแอมป์	20
2.5.1 วงจรขยายแบบไม่กลับเฟส	20
2.5.2 วงจรขยายแบบกลับเฟส	21

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5.3 วงจรแรงดันตาม	21
2.5.4 วงจรขยายแบบรวมสัญญาณ	22
2.6 หลักการออกแบบวงจรขยายกระแสไฟโด้ไดโอด	23
2.6.1 การออกแบบวงจร DC bias controller	24
2.6.1.1 วงจรตรวจจับกระแสเอาท์พุท (current sensor 1)	26
2.6.1.2 วงจรตรวจจับกระแสไฟฟ้าลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์	26
บทที่ 3 การออกแบบการทดลอง	22
3.1 บทนำ	22
3.2 การเลือกผลิตภัณฑ์ในการออกแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์	28
3.2.1 เซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิงขนาดเล็ก	28
3.2.2 TL084 ออปแอมป์	29
3.2.3 IC ขยายกำลัง	29
3.2.4 LEM LTS 6-NP	30
3.2.5 ไอซี L200	30
3.3 การออกแบบวงจร DC bias controller	31
3.4 โปรแกรม Orcad 9.1	32
3.5 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซลล์แสงอาทิตย์	35
3.5.1 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยโปรแกรม Orcad 9.1	37
3.5.2 การออกแบบชุดไฟโด้ไดโอดโดยใช้โปรแกรม Orcad 9.1	42
3.5.2.1 กรณี Photodiode 1 ชุด	42
3.5.2.2 กรณี Photodiode 4 ชุด	42
3.5.3 วงจรชุดขยาย Photodiode 4 cell อนุกรม	46
3.6 สรุป	47
บทที่ 4 ผลการทดลอง	48
4.1 บทนำ	48
4.2 การทดสอบไฟโด้ไดโอดในโหมด Photovoltaic	48
4.2.1 การทดสอบกระแสไฟฟ้าลัดวงจรเมื่อเปลี่ยนความเข้ม	48
4.2.2 การทดสอบคุณลักษณะทางไฟฟ้าเมื่อทำการเปลี่ยนความเข้มแสง	49
4.3 การทดสอบตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ในสภาวะเปิดวงจร	50

สารบัญ (ต่อ)

4.4 ผลการทดลองจากวงจรจำลองเซลล์แสงอาทิตย์จริง	หน้า
4.5 ผลการทดสอบจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์จริง	51
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	66
5.1 การศึกษาการทำงานของตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยโปรแกรม Orcad 9.1	70
5.2 การออกแบบและสร้างตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์	70
5.3 การศึกษาการทำงานของตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์	71
5.4 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา	71
เอกสารอ้างอิง	XII
ภาคผนวก	XIII
ประวัติผู้เขียน	107



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 แผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับประเทศไทย จัดทำในปี พ.ศ. 2542	2
1.2 แสดงการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนในปี 2005-2010	2
2.1 โครงสร้างรอยต่อพี-เอ็นของสารกึ่งตัวนำซิลิกอน	6
2.2 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและโฮลของสารกึ่งตัวนำซิลิกอน	7
2.3 ไดอะแกรมเทคโนโลยีการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์	8
2.4 ตัวอย่างเซลล์แสงอาทิตย์	8
2.5 การต่อวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์	9
2.6 ลักษณะกระแสและ แรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ (IV-curve)	10
2.7 ผลของความต้านทานอนุกรมต่อลักษณะกระแสและแรงดัน	11
2.8 ผลของความต้านทาน Shunt ต่อลักษณะกระแสและแรงดัน	11
2.9 กราฟกระแสและแรงดันความเข้มแสงค่าต่าง	11
2.10 แสดงหลักการการทำงานของตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์	12
2.11 แสดงหลักการการทำงานของตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่อาศัยค่าที่ได้จากการวัดจริง	13
2.12 แสดงหลักการการทำงานของตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่อาศัยค่าที่ได้จากกราฟคุณลักษณะทางไฟฟ้า	15
2.13 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์อย่างง่าย	15
2.14 (a) วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์สภาวะลัดวงจร	18
2.14 (b) วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์สภาวะเปิดวงจร	18
2.15 คุณลักษณะเอาต์พุทของแผงเซลล์แสงอาทิตย์	19
2.16 วงจรขยายไม่กลับเฟส	21
2.17 วงจรขยายแบบกลับเฟสง่าย	21
2.18 วงจรแรงดันตาม	22
2.19 วงจรขยายแบบรวมสัญญาณ	22
2.20 หลักการออกแบบวงจรขยายกระแสไฟโต้ไดโอด	23
2.21 วงจร DC bias controller	24
2.22 วงจรตรวจจับกระแสเอาต์พุท	25
2.23 วงจรตรวจจับกระแสไฟฟ้าลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์	25
3.1 วงจรตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้โปรแกรม Orcad 9.1	27
3.2 ลักษณะไฟโต้ไดโอดรุ่น BS520	28
3.3 วงจรจำลองแบบไฟโต้ไดโอดอนุกรม	28
3.4 IC TL084	29
3.5 ลักษณะของวงจร IC TL084	29
3.6 ลักษณะไอซี OPA 549 ที่ใช้ในวงจรกำลังไฟฟ้า	29

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.7 ตัวตรวจจับสนับสนแบบ Hall effect รุ่น LTS 6 NP	30
3.8 ลักษณะและรูปร่างของ L200	30
3.9 วงจรใช้งานพื้นฐานของ L200	31
3.10 วงจร DC bias controller	31
3.11 โปรแกรม OrCad Lite (Capture CIS Lite Edition) ที่ติดตั้งพร้อมใช้งาน	33
3.12 วงจรตัวอย่างในการวิเคราะห์การทำงานของวงจร	34
3.13 การกำหนดรูปแบบการวิเคราะห์วงจร แบบ Bias Point	34
3.14 ผลการทดลองที่ได้จากโปรแกรม OrCad เวอร์ชัน Lite Edition ที่แสดงค่ากระแส แรงดันและค่ากำลังงานภายในวงจร	35
3.15 วงจรสมมูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการวิเคราะห์ความต้านทานขนาน	35
3.16 แสดงคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เปลี่ยนแปลงตามความเข้มแสง และอุณหภูมิ	36
3.17 วงจรสมมูลเซลล์แสงอาทิตย์อย่างง่าย	36
3.18 วงจรสมมูลในการสร้างแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยโปรแกรม Orcad 9.1	37
3.19 วงจรสมมูลเซลล์แสงอาทิตย์ในสภาวะลัดวงจร	40
3.20 code ของตัว model Photodiode ใน โปรแกรม OrCAD 9.1	41
3.21 แบบจำลอง Photodiode 1 cell ในโปรแกรม Orcad 9.1	42
3.22 กราฟ I-V Characteristic ของ Photodiode 1 cell ที่ความเข้มแสง 500 , 1000 , 1500 W/m ² ในโปรแกรม Orcad 9.1	42
3.23 กราฟ P-V Characteristic ของ Photodiode 1 cell ที่ความเข้มแสง 500 , 1000 , 1500 W/m ² ในโปรแกรม Orcad 9.1	43
3.24 วงจร Photodiode 4 Cell อนุกรมในโปรแกรม Orcad 9.1	44
3.25 กราฟ I-V Characteristic ของ Photodiode 4 cell อนุกรมที่ความเข้มแสง 500 , 1000 , 1500 W/m ² ในโปรแกรม Orcad 9.1	44
3.26 กราฟ P-V Characteristic ของ Photodiode 4 cell อนุกรมที่ความเข้มแสง 500 , 1000 , 1500 W/m ² ในโปรแกรม Orcad 9.1	45
3.27 วงจร ขยาย Photodiode 4 cell อนุกรม	46
3.28 กราฟ I-V Characteristic ของวงจขยาย Photodiode 4 cell ที่ความเข้มแสง 500 , 1000 , 1500 W/m ² ในโปรแกรม Orcad 9.1	46
3.29 กราฟ P-V Characteristic ของวงจขยาย Photodiode 4 cell อนุกรม ที่ความเข้มแสง 500 , 1000 , 1500 w/m ² ในโปรแกรม orcad 9.1	47

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าลัดวงจรกับแรงดันตกคร่อมหลอด LED	49
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้าของโฟโตนิกโวลตาอิก Photovoltaic	49
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับกำลังไฟฟ้าของโฟโตนิกโวลตาอิก Photovoltaic	50
4.4 ลักษณะการวัดแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรของโฟโตนิกโวลตาอิก	50
4.5 กราฟแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากโฟโตนิกโวลตาอิกในออสซิลโลสโคป	51
4.6 คุณลักษณะของโฟโตนิกโวลตาอิก 1 เซลล์	52
4.7 แบบจำลองโฟโตนิกโวลตาอิกที่สร้างในโปรแกรม Orcad 9.1	52
4.8 กราฟ I-V Characteristic ที่ความเข้มแสง 500 , 1000 , 1500 W/m ² ในโปรแกรม Orcad 9.1	53
4.9 คุณลักษณะของโฟโตนิกโวลตาอิก 4 เซลล์อนุกรม	54
4.10 คุณลักษณะทางไฟฟ้าของโฟโตนิกโวลตาอิกที่ผ่านวงจรขยายที่ความเข้ม 500 W/m ² . ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส	55
4.11 กราฟจากออสซิลโลสโคปแรงดันไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้า ในสภาพความเข้ม 500 W/m ² ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส	56
4.12 กราฟจากออสซิลโลสโคปกำลังไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า ในสภาพความเข้ม 500 W/m ² ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส	56
4.13 กราฟจากออสซิลโลสโคปแรงดันเปิดวงจร ในสภาพความเข้ม 500 W/m ² ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส	57
4.14 กราฟจากออสซิลโลสโคปกระแสลัดวงจร ในสภาพความเข้ม 500 W/m ² ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส	57
4.15 คุณลักษณะทางไฟฟ้าของโฟโตนิกโวลตาอิกที่ผ่านวงจรขยายที่ความเข้ม 1000 W/m ² ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส	58
4.16 กราฟจากออสซิลโลสโคปแรงดันไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้า ในสภาพความเข้ม 1000 W/m ² ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส	59
4.17 กราฟจากออสซิลโลสโคปแรงดันไฟฟ้ากับกำลังไฟฟ้า ในสภาพความเข้ม 1000 W/m ² ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส	59
4.18 กราฟจากออสซิลโลสโคปแรงดันเปิดวงจร ในสภาพความเข้ม 1000 W/m ² ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส	60
4.19 กราฟจากออสซิลโลสโคปกระแสลัดวงจรในสภาพความเข้ม 1000 W/m ² ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส	60
4.20 คุณลักษณะทางไฟฟ้าของโฟโตนิกโวลตาอิกที่ผ่านวงจรขยายที่ความเข้ม 1500 W/m ² ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส	61
4.21 กราฟจากออสซิลโลสโคปแรงดันไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้าในสภาพความเข้ม 1500 W/m ² ที่ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส	62

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.22 กราฟจากออสซิลโลสโคปกำลังไฟฟ้ากับแรงดัน ในสภาพความเข้ม 1500 W/m^2 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส	62
4.23 กราฟจากออสซิลโลสโคปแรงดันเปิดวงจร ในสภาพความเข้ม 1500 W/m^2 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส	63
4.24 กราฟจากออสซิลโลสโคปกระแสลัดวงจร ในสภาพความเข้ม 1500 W/m^2 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส	63
4.25 กราฟ I-V Characteristic ที่ความเข้มแสง 500 , 1000 , 1500 W/m^2	64
4.26 กราฟ P-V Characteristic ที่ความเข้มแสง 500 , 1000 , 1500 W/m^2	64
4.27 ลักษณะแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์	67
4.28 กราฟเปรียบเทียบ I-V Characteristic ของแผงเซลล์อาทิตย์กับวงจรจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ความเข้ม 700 วัตต์ต่อตารางเมตร	69
4.29 กราฟเปรียบเทียบ P-V Characteristic ของแผงเซลล์อาทิตย์กับวงจรจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ความเข้ม 700 วัตต์ต่อตารางเมตร	69

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แผนดำเนินงานภาคเรียนที่ 1	3
1.2 แผนดำเนินงานภาคเรียนที่ 2	4
2.1 แสดงจุดเด่นจุดด้อยในการสร้างสัญญาณเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิงด้วยเทคนิคการเปลี่ยนโพลด	18
2.2 แสดงจุดเด่นจุดด้อยในการสร้างสัญญาณเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิงด้วยเทคนิคการใช้วงจรมุมอย่างง่าย	19
2.3 แสดงจุดเด่นและจุดด้อยในการสร้างสัญญาณเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิงโดยใช้ค่ากราฟคุณลักษณะลักษณะทางไฟฟ้า	20
4.1 ผลการทดลองของโฟโต้ไดโอด 1 เซลล์	51
4.2 ผลการทดลองของโฟโต้ไดโอด 4 เซลล์	53
4.3 เปรียบเทียบค่าทางไฟฟ้าที่ได้จากการวัดโฟโต้ไดโอด 1 เซลล์กับผลที่ได้จากการวัดโฟโต้ไดโอด 4 เซลล์อนุกรมในแบบจำลองวงจรเซลล์แสงอาทิตย์	54
4.4 ผลการทดลองของโฟโต้ไดโอดที่ผ่านวงจรขยายที่ความเข้ม 500 W/m^2 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส	55
4.5 ผลการทดลองของโฟโต้ไดโอดที่ผ่านวงจรขยายที่ความเข้ม 1000 W/m^2 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส	58
4.6 ผลการทดลองของโฟโต้ไดโอดที่ผ่านวงจรขยายที่ความเข้ม 1500 W/m^2 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส	61
4.7 เปรียบเทียบค่าทางไฟฟ้าที่ได้จากการวัดเซลล์แสงอาทิตย์จริงที่สภาวะการทดสอบ	65
4.8 อัตราขยายกระแสไฟฟ้าลัดวงจรของตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ 40 W	65
4.9 อัตราขยายแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรของตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ 40 W	65
4.10 ค่าที่ได้พารามิเตอร์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 40 วัตต์	67
4.11 ข้อมูลเฉพาะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์รุ่น BS 40	67
4.12 ข้อมูลเฉพาะของเซลล์แต่ละตัวที่ต่ออนุกรมกันในแผงเซลล์แสงอาทิตย์ BS 40	67
4.13 ค่าที่วัดจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ BS 40 ที่ความเข้มแสง 700 วัตต์ต่อตารางเมตร	68
4.14 ค่าที่วัดจากวงจรจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ความเข้มแสง 700 วัตต์ต่อตารางเมตร	68

บทที่ 1

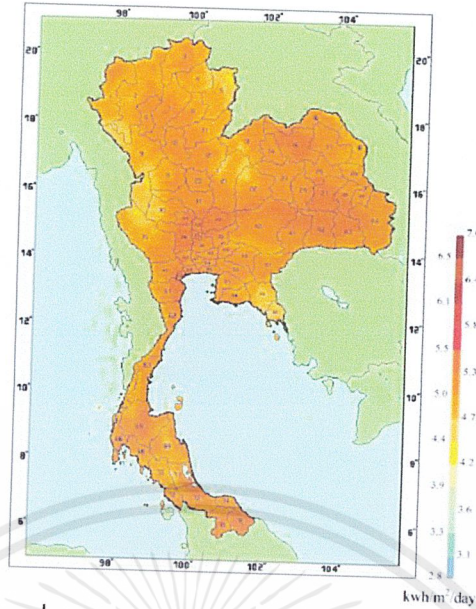
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

พลังงานเชื้อเพลิงต่างๆ ที่นำมาผลิตกระแสไฟฟ้า เช่น น้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ ถ่านหิน เป็นต้น นับวันจะมีปริมาณน้อยลงทุกทีและคงจะต้องหมดลงในอนาคต นอกจากนี้ราคาของเชื้อเพลิงแต่ละประเภทมีแนวโน้มที่จะสูงขึ้นตามสถานการณ์ทางเศรษฐกิจและการเมืองของโลก และถึงแม้จะมีการผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานน้ำ ซึ่งเป็นพลังงานหมุนเวียนก็ตามแต่ก็มีสัดส่วนที่น้อยมาก รวมทั้งแหล่งน้ำที่สามารถจะพัฒนาเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้ายังมีน้อยลง และต้องประสบกับปัญหาการคัดค้านขององค์กรกลุ่มต่างๆ อีกด้วย ดังนั้นจึงมีความพยายามที่จะคิดค้นแหล่งพลังงานใหม่ๆ ที่ประหยัดและไม่มีวันหมดสิ้น บางชนิดก็นำมาใช้บ้างแล้ว เช่น น้ำขึ้น-น้ำลง ความร้อนจากมหาสมุทร แสงอาทิตย์ ลมและความร้อนใต้พิภพ เป็นต้น แต่ยังคงมีข้อจำกัดในการพัฒนา เช่น ราคาแพง ใช้เวลานานในการก่อสร้าง หรือบางประเทศไม่มีศักยภาพของแหล่งพลังงานดังกล่าวเพียงพอ

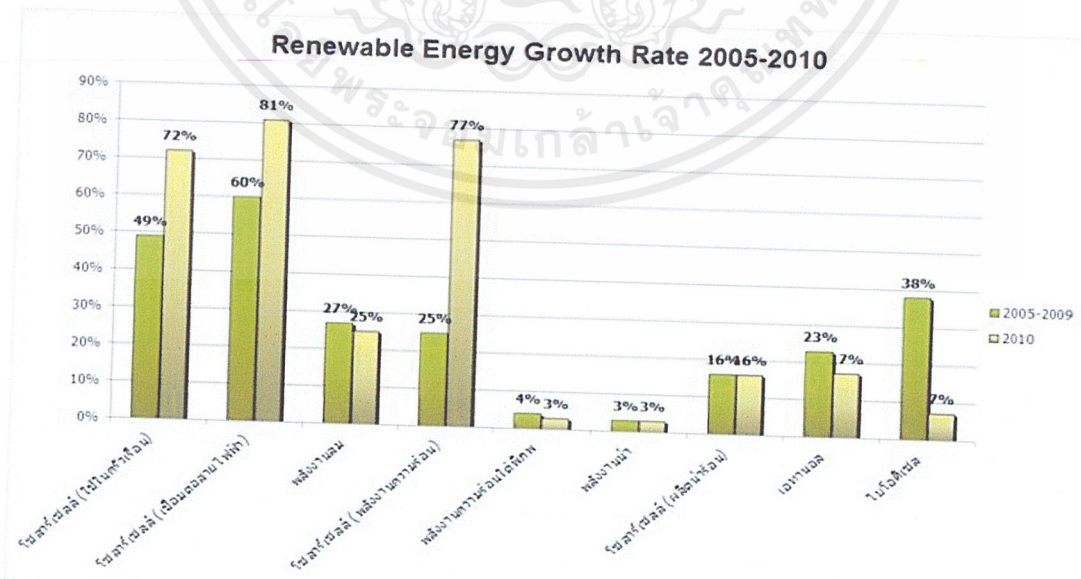
พลังงานแสงอาทิตย์ เป็นพลังงานหมุนเวียนที่สามารถนำมาใช้ได้อย่างไม่มีสิ้นสุดและมีลักษณะกระจายไปถึงผู้ใช้โดยตรง อีกทั้งยังเป็นแหล่งพลังงานที่สะอาดปราศจากมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม ตามปกติมนุษย์ใช้พลังงานแสงอาทิตย์ตามธรรมชาติในชีวิตประจำวันอยู่แล้ว และตลอดหลายปีมานี้ เทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ได้รับการพัฒนาอย่างมากจนถึงขั้นนำมาใช้งานได้จริง เช่น การพัฒนาใช้เซลล์แสงอาทิตย์เปลี่ยนพลังงานจากดวงอาทิตย์มาเป็นพลังงานไฟฟ้า และได้รับความนิยมแพร่หลายมากขึ้น

การวิจัยด้านพลังงานเป็นเรื่องที่สำคัญเรื่องหนึ่งของประเทศ โดยเฉพาะการวิจัยเกี่ยวกับพลังงานทางเลือกหรือพลังงานทดแทน โดยที่พลังงานแสงอาทิตย์ก็เป็นแหล่งพลังงานหนึ่งที่ได้รับ ความสนใจ ซึ่งในประเทศไทย ได้มีการทำวิจัยที่เกี่ยวกับ solar cell เป็นระยะเวลาหลายปี มีหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง ทั้งด้านการสนับสนุนเงินทุนในการดำเนินการวิจัย หน่วยงานวิจัย ในด้านเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับการทำวิจัยในการนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ประโยชน์ด้วยการแปลงพลังงานจากแสงอาทิตย์มาเป็นพลังงานไฟฟ้าพิจารณาได้จากรูปที่ 1.1 แสดงถึงศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์เฉลี่ยรายปี ในแต่ละเดือนนั้นการกระจายของความเข้มรังสีอาทิตย์ตามบริเวณต่างๆ พื้นที่ส่วนใหญ่ของประเทศไทยได้รับรังสีอาทิตย์สูงสุดช่วงระหว่างเดือนเมษายนและพฤษภาคม โดยมีค่าอยู่ในช่วง 5.54 ถึง 6.65 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อตารางเมตร-วัน จะเห็นได้ชัดว่าประเทศไทยเป็นเมืองร้อนจึงเหมาะสมอย่างยิ่งในการใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์อย่างยิ่ง



รูปที่ 1.1 แผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับประเทศไทย
จัดทำในปี พ.ศ. 2542 (หน่วย : กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อตารางเมตร-วัน)

จากนโยบายด้านพลังงานของภาครัฐที่มุ่งเน้นในการพัฒนาและวิจัยพลังงานทดแทน ส่งผลให้เกิดการวิจัยทางด้านพลังงานทดแทนอย่างแพร่หลาย โดยหนึ่งในพลังงานที่มีมากและยังนำมาใช้ประโยชน์ได้ไม่มากเท่าที่ควรก็คือพลังงานแสงอาทิตย์ ในอดีตจนถึงปัจจุบันนั้นได้เริ่มมีการใช้ประโยชน์จากพลังงานแสงอาทิตย์กันอย่างแพร่หลายมากขึ้น ดังรูปที่ 1.2 จะเห็นได้ว่าในปี 2005-2010 มีการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในการผลิตกระแสไฟฟ้าสูงที่สุด แต่การทดลองในเรื่องตัวจำลองยังไม่แพร่หลายและมีราคาแพงจึงนำมาสู่การศึกษาและการทำปริญญานิพนธ์ในครั้งนี้



รูปที่ 1.2 แสดงการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนในปี 2005-2010

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อศึกษาคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์และตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์
2. เพื่อสร้างตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้โปรแกรม Orcad 9.1 ในการออกแบบวงจร
3. เพื่อศึกษากราฟคุณลักษณะทางไฟฟ้าของวงจรจำลองเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับตัวเซลล์แสงอาทิตย์จริง
4. เพื่อศึกษาคุณลักษณะทางไฟฟ้าในสภาพแวดล้อมที่ต่างกัน
5. เพื่อส่งเสริมให้มีการพัฒนาพลังงานทดแทนในด้านพลังงานแสงอาทิตย์และส่งเสริมเทคโนโลยีประหยัดพลังงาน

1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ โดยจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม Orcad 9.1 โดยการจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้า 40 วัตต์ โดยมีสัญญาณเอาต์พุตของตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่สามารถเปลี่ยนแปลงตามสภาพแวดล้อมได้ เพื่อพิจารณาค่าความเหมาะสมในการนำไปใช้ประโยชน์ในการจ่ายกำลังไฟฟ้าและการนำไปประยุกต์ใช้ในด้านกรตบสนองต่อสภาพแวดล้อม

1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงการ

- ปริญญานิพนธ์เล่มนี้ประกอบด้วย ขั้นตอนวิธีการศึกษาที่สำคัญดังต่อไปนี้
1. ศึกษาหาข้อมูลคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์และแบบจำลองแสงอาทิตย์รวมถึงศึกษาข้อมูลจากงานวิจัยในเรื่องใกล้เคียง
 2. ทำการจำลองแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้โปรแกรม Orcad 9.1 ในการจำลองและวางแผนผังของวงจรการจำลองเซลล์แสงอาทิตย์
 3. ทำการทดลองจริงโดยสร้างแบบจำลองตามที่ได้ออกแบบไว้
 4. ทำการวัดค่ากราฟคุณลักษณะโดยใช้ Oscilloscope ในการแสดงค่ากราฟคุณลักษณะเพื่อแสดงค่าที่ใกล้เคียงกับค่าจริงของแผงเซลล์แสงอาทิตย์
 5. ทำการบันทึกค่าผลการทดลองและสรุปผลการทดลอง

1.5 แผนการดำเนินโครงการ

1.5.1 แผนดำเนินงานภาคเรียนที่ 1

แผนการดำเนินงานในภาคเรียนที่ 1 เป็นการวางกำหนดการทำงานตั้งแต่ช่วงเดือนมิถุนายน 2555 ถึง เดือนกันยายน 2555 ดังแสดงในตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 แผนดำเนินงานภาคเรียนที่ 1

ลำดับ ที่	ขั้นตอนการดำเนินงาน	ระยะเวลาทำงาน																							
		มิถุนายน				กรกฎาคม				สิงหาคม				กันยายน											
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4								
1	ศึกษาและรวบรวมข้อมูล	←————→																							
2	ศึกษา PV Simulator					←————→																			
3	จำลองวงจรใน Orcad 9.1									←————→															

1.5.2 แผนดำเนินงานภาคเรียนที่ 2

แผนการดำเนินงานในภาคเรียนที่ 2 เป็นการวางกำหนดการทำงานตั้งแต่ช่วงเดือน ตุลาคม 2555 ถึง เดือนกุมภาพันธ์ 2556 ดังแสดงในตารางที่ 1.2

ตารางที่ 1.2 แผนดำเนินงานภาคเรียนที่ 2

ลำดับที่	ขั้นตอนการดำเนินงาน	ระยะเวลาทำงาน																			
		ตุลาคม				พฤศจิกายน				ธันวาคม				มกราคม				กุมภาพันธ์			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1	จำลองวงจรใน Orcad 9.1	←————→																			
2	สร้างตัวจำลองเซลล์ แสงอาทิตย์					←————→															
3	ทดลองและปรับปรุงตัว จำลองเซลล์แสงอาทิตย์									←————→											
4	วิเคราะห์ผลและสรุปผล																	←————→			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

ในการศึกษาและทดลองวงจรจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ มีประโยชน์หลักๆ ดังนี้

1. ได้เรียนรู้ถึงการจำลองเซลล์แสงอาทิตย์โดยการเปรียบเทียบค่าทางคุณลักษณะทางไฟฟ้าของตัวเซลล์แสงอาทิตย์จริงและตัวจำลองเซลล์ที่ได้ทำการวิจัย
2. สามารถนำหลักการในการสร้างชุดจำลองเซลล์แสงอาทิตย์มาพัฒนาในระบบการศึกษา นำมาทำการทดลองในห้องแล็บ ในห้องที่มีความสว่างไม่มากพอ โดยที่เราไม่จำเป็นต้องใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์จริงๆ
3. ได้นำหลักการทางอิเล็กทรอนิกส์ หลักการทางคณิตศาสตร์และหลักการเขียนโปรแกรม มาผสมผสานกัน เพื่อให้แสดงค่าเอาต์พุตที่ตรงตามที่วิจัย



บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

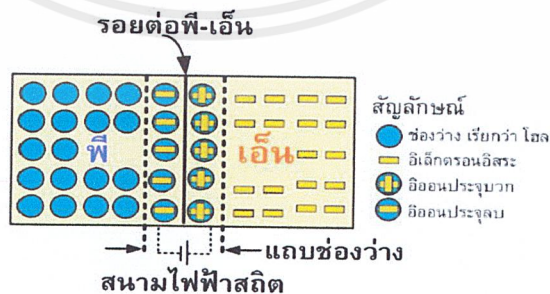
เนื้อหาในบทนี้ได้นำเสนอหลักการและทฤษฎีพื้นฐานต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยซึ่งประกอบไปด้วยหัวข้อหลักๆ ดังต่อไปนี้

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

2.2 เซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic/PV)

โฟโตโวลตาอิกเซลล์ (Photovoltaic/PV) เป็นการแปลงแสงอาทิตย์เป็นกระแสไฟฟ้าด้วยปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric) กับคุณสมบัติพิเศษของสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) ซึ่งเรียกรวมว่าปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิก (Photovoltaic effect) ซึ่งเป็นคุณสมบัติของวัสดุและแสง

2.2.1 ลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์ เซลล์แสงอาทิตย์เป็นอุปกรณ์ทางไฟฟ้าทำจากสารกึ่งตัวนำ ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานแสงไปเป็นไฟฟ้ากระแสตรง อาศัยกระบวนการโฟโตโวลตาอิก (Photovoltaic Effect) ซึ่งเกิดจากความต่างศักย์ไฟฟ้าภายในสารกึ่งตัวนำที่มีค่าแตกต่างกัน เมื่อเซลล์แสงอาทิตย์ได้รับแสงที่มีพลังงานมากพอ ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระ โครงสร้างที่สำคัญของเซลล์แสงอาทิตย์มีลักษณะเหมือนกับไดโอดทั่วไป ประกอบด้วยรอยต่อระหว่างวัสดุสารกึ่งตัวนำต่างชนิดกันสองชั้น ได้แก่ สารกึ่งตัวนำชนิดพีเป็นขั้วบวก และสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นเป็นขั้วลบ

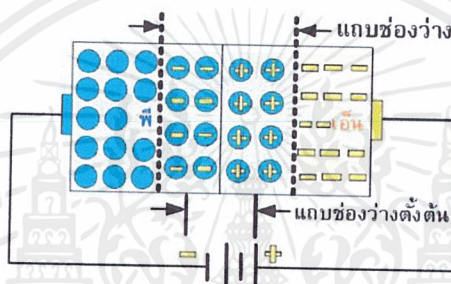
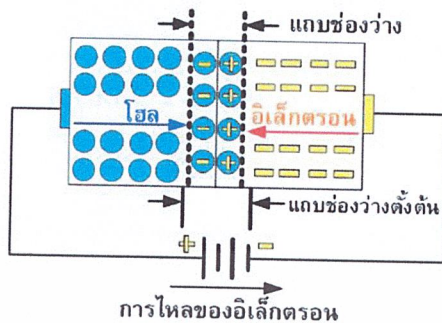


รูปที่ 2.1 โครงสร้างรอยต่อพี-เอ็นของสารกึ่งตัวนำซิลิกอน

การเชื่อมต่อกันของสารกึ่งตัวนำที่มีคุณสมบัติต่างกันจะทำให้เกิดสนามไฟฟ้า (Electrical field) ในบริเวณรอยต่อ โดยสนามไฟฟ้านี้มีลักษณะเหมือนกับสนามไฟฟ้าสถิต อันจะทำให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้เกิดอนุภาคของประจุลบเคลื่อนที่ไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง และอนุภาคของประจุบวกที่เคลื่อนที่ไปในทิศทางที่ตรงกันข้ามกับประจุลบ ตัวอย่างเช่น การใช้หัวแร้งกับเส้นขนสัตว์ เป็นต้น

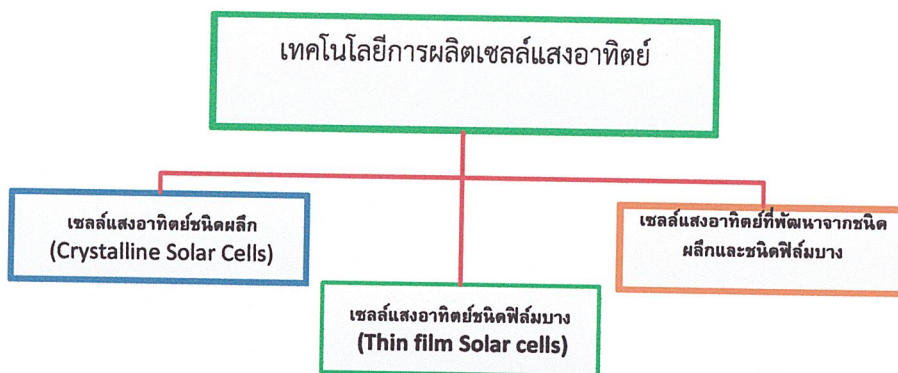


- สัญลักษณ์
- ช่องว่าง เรียกว่า โพล
 - ▭ อิเล็กตรอนอิสระ
 - ⊕ อีออนประจุบวก
 - ⊖ อีออนประจุลบ

รูปที่ 2.2 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและโพลของสารกึ่งตัวนำซิลิกอน

การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนไปยังบริเวณผลึกชนิดเอ็นทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าได้ดังในรูปที่ 2.2 เมื่อต่อเข้ากับวงจรภายนอกจะทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านตลอดวงจร การเคลื่อนที่ไปยังวงจรภายนอกของอิเล็กตรอนในกรณีของสารกึ่งตัวนำโดยผ่านวัสดุตัวนำที่ติดอยู่กับผิวด้านหน้าของเซลล์ ในเวลาเดียวกันโพลจะเคลื่อนที่ไปในทิศทางตรงข้ามผ่านเนื้อเซลล์จนถึงวัสดุตัวนำอีกส่วนหนึ่งที่ยึดติดอยู่กับด้านล่างของเซลล์ ทำให้ครบวงจรโดยร่วมกับอิเล็กตรอนที่อยู่อีกด้านหนึ่งของวงจรภายนอก แต่ในทางตรงข้าม การไหลของอิเล็กตรอนจะไม่เกิดขึ้นหากไม่สามารถทำให้ครบวงจรได้

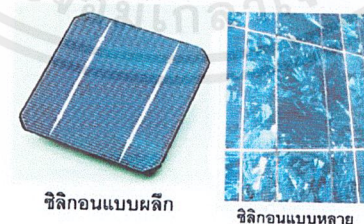
2.2.2 ประเภทของเซลล์แสงอาทิตย์ เทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เพื่อลดต้นทุนด้านวัสดุของเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งจะทำให้ราคาเซลล์แสงอาทิตย์ลดลง และมีประสิทธิภาพสูงขึ้น การแบ่งประเภทเทคโนโลยีของเซลล์แสงอาทิตย์ตามการผลิตแบ่งได้เป็น 3 กลุ่มดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 โดอะแกรมเทคโนโลยีการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึก (Crystalline Solar Cells) มีความแตกต่างกันตามชนิดของสารกึ่งตัวนำตั้งต้น (Semiconductor Material) เช่น ซิลิกอน (Si) และแกเลียม อาร์เซไนด์ (GaAs) เป็นต้น เซลล์แสงอาทิตย์ผลึกซิลิกอนมีกรรมวิธีในการผลิตหลายวิธี จึงมีให้เลือกใช้งานตามความเหมาะสม ขึ้นกับราคาและวัตถุประสงค์ของการใช้งาน ได้แก่ แบบผลึกเดี่ยว (Monocrystalline silicon cells) แบบแผ่นฟิล์มบาง (Silicon ribbon cells) แบบหลายผลึก (Polycrystalline silicon cells) และ แบบแผ่นบางหลายผลึก (Polycrystalline thin film silicon cells) เป็นต้น เซลล์แสงอาทิตย์ในกลุ่มนี้ได้รับการยอมรับในเชิงพาณิชย์และมีประสิทธิภาพ 10-15 เปอร์เซ็นต์ แต่ต้นทุนของวัสดุค่อนข้างสูง

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง (Thin film Solar cells) ประกอบด้วย เซลล์ที่ผลิตจากอะมอร์ฟัสซิลิกอน เซลล์ที่ผลิตจากแคดเมียมเทลลูไรด์ (CdTe) และ เซลล์ที่ผลิตจากคอปเปอร์อินเดียมไดเซเลเนียม (CIGS) มีการใช้งานในเชิงพาณิชย์และประสิทธิภาพที่ 6 - 10 เปอร์เซ็นต์ ถึงแม้ว่าประสิทธิภาพจะน้อยกว่าเซลล์ชนิดผลึก แต่มีข้อดีของราคาที่ถูกกว่า ส่วนการติดตั้งใช้งานในสภาวะจริง อายุการใช้งานและการเสื่อมสภาพของแผงเซลล์ในระยะยาวยังอยู่ระหว่างการศึกษาวิจัย

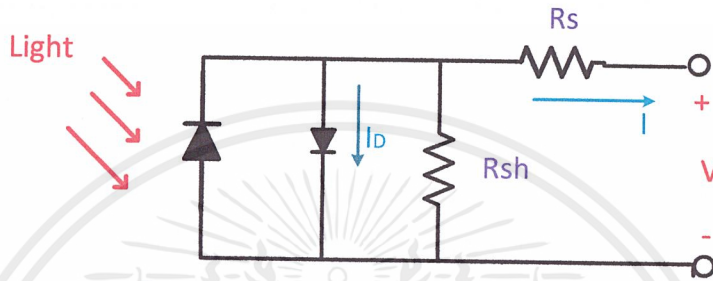


รูปที่ 2.4 ตัวอย่างเซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์ที่พัฒนาจากชนิดผลึกและชนิดฟิล์มบาง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ ลดการสร้างมลพิษและเพิ่มอายุการใช้งาน แบ่งตามการพัฒนาเทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์ได้เป็น 3 แบบ ได้แก่ ทรงกลม (Spherical Micro Solar Cells) ดายเซนซิไทซ์ (Dye-sensitized Solar Cells) และ ควอนตัมดอต (Quantum Dot Solar Cells)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยทั่วไปสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์แสดงในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้า เริ่มต้นที่วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ดังแสดงรูปที่ 2.5 เป็นการต่อขนานระหว่างแหล่งกำเนิดแสง ไดโอด (รอยต่อพี-เอ็น) และความต้านทาน Shunt และต่ออนุกรมกับความต้านทานอนุกรม ตามลำดับ เขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ (2.1) นั่นคือผลลัพธ์ของกระแสที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์เกิดมาจากแหล่ง



รูปที่ 2.5 การต่อวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์

พลังงานแสงที่กลับด้วยกระแสที่ไหลผ่านไดโอดและผ่านความต้านทาน Shunt ขณะกระแสไฟฟ้าไหล ผ่านทำให้เกิดค่าแรงดันไฟฟ้าในแต่ละจุดขึ้น

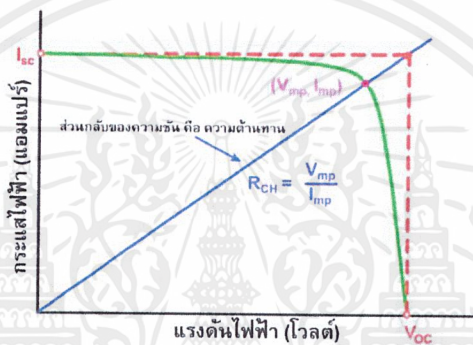
สมการที่ (2.2) แสดงแรงดันไฟฟ้า ณ จุดใดๆ เท่ากับแรงดันไฟฟ้าที่ขาออกบวกด้วยผลคูณระหว่าง กระแสไฟฟ้ากับความต้านทานอนุกรม

$$I = I_L - I_D - I_{SH} \quad (2.1)$$

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

- โดยที่
- I กระแสไฟฟ้าขาออก มีหน่วยเป็นแอมแปร์
 - I_L กระแสไฟฟ้าที่เกิดจากแหล่งพลังงานแสง มีหน่วยเป็นแอมแปร์
 - I_D กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านไดโอด มีหน่วยเป็นแอมแปร์
 - I_{SH} กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านความต้านทาน Shunt มีหน่วยเป็นแอมแปร์
 - V แรงดันไฟฟ้าขาออก มีหน่วยเป็นโวลต์
 - I กระแสไฟฟ้าขาออก มีหน่วยเป็นแอมแปร์
 - R_s ความต้านทานอนุกรม มีหน่วยเป็นโอห์ม

พารามิเตอร์ที่บ่งบอกประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ประกอบด้วย กระแสลัดวงจร (I_{sc}) แรงดันเปิดวงจร (V_{oc}) และฟิลด์แฟกเตอร์ (FF) รูปที่ 2.6 แสดงกระแสลัดวงจรและแรงดันเปิดวงจรคือกระแสไฟฟ้าขณะที่แรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเป็นศูนย์ เป็นค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุด และแรงดันไฟฟ้าขณะที่ไม่มีกระแสเป็นค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุด ส่วนฟิลด์แฟกเตอร์เป็นสัดส่วนระหว่างผลคูณแรงดันกับกระแสที่จุดทำงานสูงสุดและผลคูณของกระแสลัดวงจรกับแรงดันเปิดวงจรซึ่งมีค่าน้อยกว่า 1 นอกจากนี้มีพารามิเตอร์เกี่ยวกับความต้านทานในเซลล์แสงอาทิตย์เป็นประโยชน์ต่อการติดตามพฤติกรรมของเซลล์แสงอาทิตย์และการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ โดยคิดจากสัดส่วนระหว่างค่าแรงดันที่จุดสูงสุดต่อกระแสที่จุดทำงานสูงสุดหรืออาจใช้สัดส่วนระหว่างค่าแรงดันวงจรเปิดต่อกระแสลัดวงจร



รูปที่ 2.6 ลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ (I-V Curve)

จุดที่ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดคือที่จุด I_{mp} และ V_{mp} ซึ่งมีความสัมพันธ์กับ I_{sc} และ V_{oc} ดัง

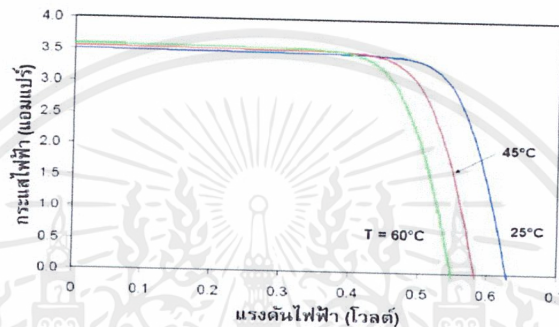
สมการ

$$FF = \frac{V_{mp} \times I_{mp}}{V_{oc} \times I_{sc}} \quad (2.3)$$

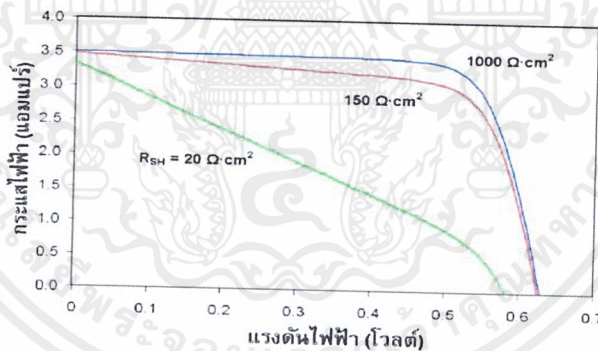
เมื่อ FF คือ ค่า Fill Factor เป็นค่าบอกถึง คุณภาพของรอยต่อ (ความต้านทาน) การรั่วไหลของกระแสที่รอยต่อ เป็นต้น ถ้าค่า FF มีค่ามากและใกล้เคียง 1 หมายถึง PV นั้นมีคุณภาพสูง ซึ่งส่งผลกับประสิทธิภาพดังสมการ

$$\eta = \frac{FF \times V_{oc} \times I_{sc}}{P_{in}} \quad (2.4)$$

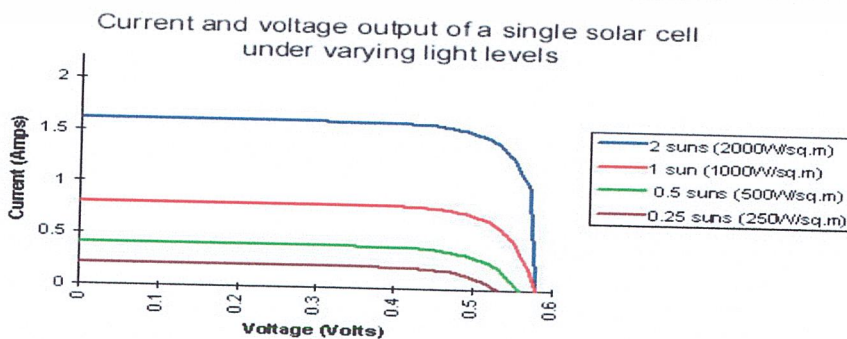
2.2.4 ปัจจัยที่ลดทอนประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ขึ้นกับปัจจัยภายนอกและสมบัติของเซลล์ ได้แก่ อุณหภูมิ ความเข้มรังสีอาทิตย์ ความต้านทาน Shunt และความต้านทานอนุกรม ความต้านทานอนุกรมที่เพิ่มขึ้นจะทำให้แรงดันขาออกมีค่าลดลง แต่ไม่มีผลต่อค่าแรงดันเปิดวงจร หรือกล่าวได้ว่า ความต้านทานอนุกรมทำให้ค่าฟิลด์แพกเตอร์ลดลง หากค่านี้มีค่ามากๆ จะทำให้ค่ากระแสลัดวงจรมีค่าลดลงและ I-V Curve เป็นเส้นตรงดังรูปที่ 2.7 ค่าความต้านทาน Shunt ลดลงมากจะเป็นผลทำให้แรงดันเปิดวงจรและกระแสลัดวงจรมีค่าลดลงดังรูปที่ 2.8 และค่าฟิลด์แพกเตอร์ลดลงเช่นเดียวกับกรณีของความต้านทานอนุกรม รูปที่ 2.9 เมื่อความเข้มแสงเพิ่มขึ้นโดยที่อุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลงจะทำให้กระแสแสงจลต์มีค่าเพิ่มขึ้น และแรงดันเปิดวงจรมีค่าสูงขึ้น เล็กน้อย



รูปที่ 2.7 ผลของความต้านทานอนุกรมต่อลักษณะกระแสและแรงดัน



รูปที่ 2.8 ผลของความต้านทาน Shunt ต่อลักษณะกระแสและแรงดัน



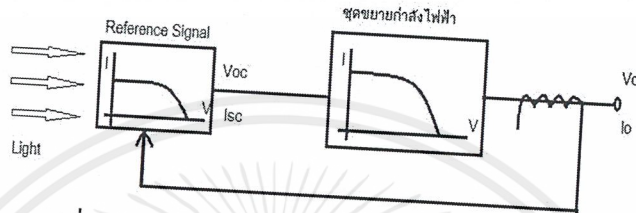
รูปที่ 2.9 กราฟกระแสและแรงดันความเข้มแสงค่าต่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 ตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์

2.3.1 หลักการทำงาน จากทฤษฎีความเข้มแสงและอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง ทำให้เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีคุณลักษณะทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตาม ทำให้เกิดงานวิจัยเพื่อสร้างตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้สำหรับศึกษาคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์โดยทั่วไปอาศัยการขยายตัวกำลังไฟฟ้าของสัญญาณขนาดเล็กของเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิง โดยมีการควบคุมให้เซลล์แสงอาทิตย์ขนาดเล็กทำงานได้อย่างถูกต้อง



รูปที่ 2.10 แสดงหลักการทำงานของตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์

ส่วนประกอบสำคัญมีอยู่ 2 ส่วนด้วยกัน คือ

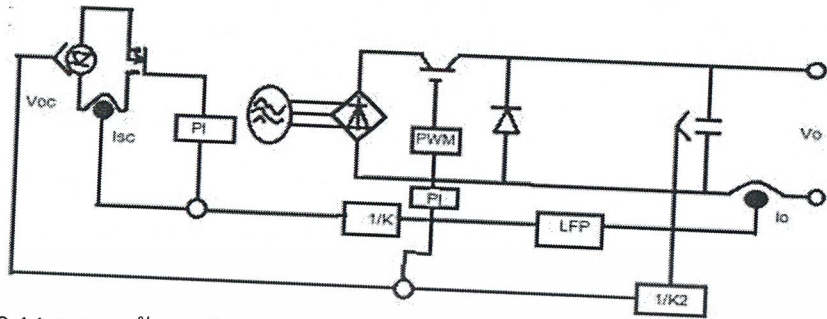
1. ชุดขยายกำลังไฟฟ้า ทำหน้าที่ขยายพิกัดกำลังไฟฟ้าให้ตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์สามารถจ่ายพิกัดกำลังไฟฟ้าได้สูงขึ้นตามการออกแบบไว้ โดยส่วนมากนิยมใช้วงจรคอนเวอร์เตอร์หรือวงจรถยายกำลังไฟฟ้า
2. ชุดสร้างสัญญาณอ้างอิง (Reference Signal) เป็นส่วนที่ใช้สำหรับสร้างสัญญาณเลียนแบบเซลล์แสงอาทิตย์

2.3.2 ชุดสร้างสัญญาณเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิง ใช้สำหรับสร้างเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิงให้กับชุดขยายกำลังไฟฟ้า โดยสัญญาณที่สร้างขึ้นจะเป็นสัญญาณที่มีคุณลักษณะทางไฟฟ้าเช่นเดียวกับเซลล์แสงอาทิตย์ สามารถควบคุมจุดการทำงานได้ด้วยการป้อนกลับจากเอาต์พุตของตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ ตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์สามารถแบ่งออกเป็น 2 เทคนิค ดังนี้

2.3.2.1 เทคนิคการสร้างสัญญาณอ้างอิงโดยใช้สัญญาณอนาล็อก การสร้างสัญญาณเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิง จำเป็นต้องใช้เซลล์แสงอาทิตย์จริงมาสร้างสัญญาณหรือมีการสร้างชุดวงจรอนาล็อกเพื่อสร้างคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ นำไปขยายกำลังไฟฟ้าให้มีพิกัดที่สูงขึ้นนิยมใช้เทคนิคนี้ในการสร้างตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้าต่ำๆ

2.3.2.1.1 การสร้างสัญญาณอ้างอิงโดยใช้การเปลี่ยนโหนด เป็นวิธีการควบคุมอุปกรณ์ มอสเฟตหรือทรานซิสเตอร์ มาใช้เป็นโหนดให้กับเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิง จากนั้นจึงนำสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่เกิดสภาวะการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ไปขยายกำลังไฟฟ้าให้สูงขึ้นซึ่ง

เทคนิคนี้จะช่วยให้สัญญาณอ้างอิงใกล้เคียงกับคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์มาก แต่การออกแบบซับซ้อน ซึ่งไดอะแกรมการทำงานสามารถแสดงได้ดังรูป 2.11



รูปที่ 2.11 แสดงหลักการทำงานของตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่อาศัยค่าที่ได้จากการวัดจริง

ขยายสัญญาณด้วยบีกอนเวอร์เตอร์ อัตราส่วนขยายแรงดันไฟฟ้า (K2) ใช้ควบคุมการทำงานของ IGBT ของวงจรบีกอนเวอร์เตอร์ และอัตราส่วนขยายกระแสไฟฟ้า (K1) เป็นกระแสที่จุดทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิง การสร้างสัญญาณด้วยวิธีนี้จะมีจุดเด่นและจุดด้อยในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงจุดเด่นจุดด้อยในการสร้างสัญญาณเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิงด้วยเทคนิคการเปลี่ยนโพลต

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

2.3.2.1.2 การสร้างสัญญาณอ้างอิงโดยใช้วงจรสมมูลอย่างง่าย วิธีนี้จะอาศัยคุณสมบัติของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ไม่เป็นเชิงเส้น สามารถทำได้โดยเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าของชุดแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า โดยสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จะขึ้นกับการออกแบบค่าความต้านทาน R_{eq} ภายในวงจรตามสมการที่ (2.12) ในกรณีที่มีการต่อสวิตชิ่งอนุกรมกับความต้านทาน R_{eq} ควบคุมด้วย Duty cycle (D) เพื่อใช้สำหรับควบคุมการทำงานของความต้านทาน R_{eq}

$$R_{eq} = \frac{R_{shu}R_{shuz}}{R_{shu}+R_{shuz}D} \quad (2.5)$$

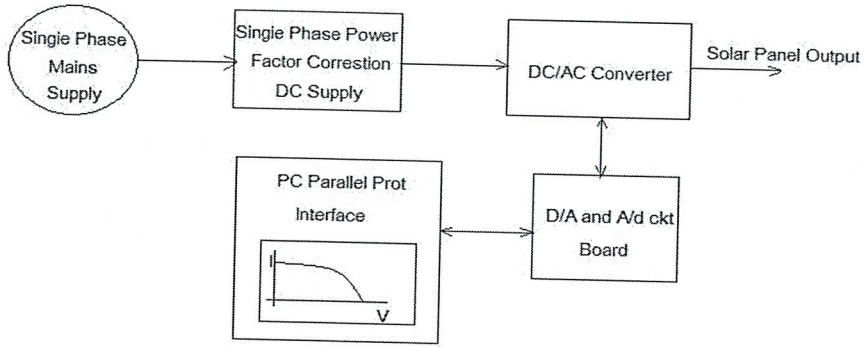
ตารางที่ 2.2 แสดงจุดเด่นจุดด้อยในการสร้างสัญญาณเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิงด้วยเทคนิคการใช้วงจรสมมูลอย่างง่าย

จุดเด่น	จุดด้อย
1 วงจรไม่ซับซ้อน 2 ใช้งบประมาณในการสร้างต่ำ 3 เหมาะสำหรับสร้างตัวจำลองที่มีพิกัดกำลังไฟฟ้าต่ำๆ	1 การเลือกใช้อุปกรณ์ที่มีผลต่อความถูกต้องของสัญญาณเอาต์พุตตัวจำลองเซลล์อาทิตย์ 2 การปรับเปลี่ยนแหล่งจ่ายกระแสไฟฟฟาลัดวงจรไม่สามารถควบคุมให้เกิดตามความเข้มแสงที่เหมาะสมได้ 3 สัญญาณเอาต์พุตไม่สามารถให้ค่าที่ถูกต้องเมื่อเปรียบเทียบกับคุณลักษณะทางไฟฟ้าที่ได้จากแผงจริง

2.3.2.2 เทคนิคการสร้างสัญญาณอ้างอิงโดยใช้สัญญาณดิจิทัล ในเทคนิคนี้จะไม่ใช้เซลล์แสงอาทิตย์จริง แต่จะใช้สัญญาณที่ผ่านการวัดจริง ได้จากการจำลองการทำงานแล้วทำการบันทึกหรือจัดเก็บข้อมูลในชุดสร้างสัญญาณเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิง แล้วจึงนำสัญญาณที่ได้ไปขยายด้วยชุดขยายกำลังไฟฟ้าเนื่องจากเป็นระบบควบคุมแบบดิจิทัลที่สามารถควบคุมสภาวะได้ง่ายเมื่อนำไปใช้งาน โดยการควบคุมแบบดิจิทัลสามารถแบ่งออกได้ 2 เทคนิคตามอุปกรณ์ดังนี้

2.3.2.2.1 การสร้างสัญญาณอ้างอิงด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ในวิธีนี้จะอาศัยการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เช่น โปรแกรม C++ , โปรแกรม Visual C++ เป็นต้น ซึ่งการสร้างสัญญาณเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิงด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์แบ่งได้เป็นสองวิธีหลักคือ

1. สัญญาณอ้างอิงโดยใช้ค่าจุดบนกราฟคุณลักษณะทางไฟฟ้าที่ได้จากการวัดแผงเซลล์แสงอาทิตย์จริง เพื่อกำหนดจุดเริ่มต้นของสัญญาณอ้างอิง แล้วจึงใช้โปรแกรมในการคำนวณจุดทำงานเกินสัญญาณที่ป้อนกลับจากชุดควบคุมการทำงาน หลักการที่สามารถแสดงให้เห็นได้ดังรูปที่ 2.12



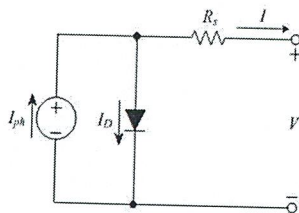
รูปที่ 2.12 แสดงหลักการทำงานของตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่อาศัยค่าที่ได้จากกราฟคุณลักษณะทางไฟฟ้า

ตารางที่ 2.3 แสดงจุดเด่นและจุดด้อยในการสร้างสัญญาณเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิงโดยใช้ค่ากราฟคุณลักษณะลักษณะทางไฟฟ้า

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

2.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซลล์แสงอาทิตย์

โดยเลือกพิจารณาวงจรมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ในรูปที่ 2.13 ซึ่งเป็นวงจรมูลอย่างง่ายที่ประกอบด้วยไดโอด 1 ตัวที่มีความต้านทานอนุกรมเพียงอย่างเดียว จากการศึกษาพบว่าในเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้งานค่าความต้านทานขนาน (R_p) จะมีค่าสูงมากพอที่ไม่นำมาพิจารณาผลที่เกิดขึ้น แต่ค่าความต้านทานอนุกรม (R_s) จะมีผลและบทบาทที่สำคัญต่อคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ ในการออกแบบลักษณะโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 2.13 วงจรมูลของเซลล์แสงอาทิตย์อย่างง่าย

จากวงจรสมมูลในรูปที่ 2.13 กระแสต้านเอาต์พุทของเซลล์แสงอาทิตย์จะเป็นค่าที่เปลี่ยนแปลงตามค่าแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$I = I_{ph} - I_D = I_{ph} - I_{sat} \left[e^{\frac{V+IR_s}{V_t}} - 1 \right] \quad (2.6)$$

เมื่อ I_{ph} คือ ค่ากระแสไฟฟ้าโฟโต้

V_t คือ Thermal Voltage

I_{sat} คือ ค่ากระแสอิ่มตัวของไดโอด

ในสภาวะลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์ (Short circuit condition) ในรูปที่ 2.14 (a) สามารถเขียนความสัมพันธ์ของกระแสโฟโต้ได้ดังสมการที่ (2.7)

$$I_{ph} = I_D + I_{sc} \quad (2.7)$$

กระแสจะไหลผ่านไดโอดน้อยมากจนไม่มีผลต่อการคำนวณที่สภาวะลัดวงจรได้แต่เนื่องจากกระแสโฟโต้เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มแสง ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการที่ (2.8)

$$I_{ph}(G_a, T) = I_{scs} \frac{G_a}{G_{as}} [1 + \Delta I_{sc}(T - T_s)] \quad (2.8)$$

เมื่อ G_a คือ ค่าของความเข้มแสง

T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (Kelvin)

I_{scs} คือ ค่ากระแสลัดวงจรที่ทดสอบภายใต้สภาวะมาตรฐาน (STC)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

G_{as} คือ ค่าความเข้มแสงมาตรฐาน (1000 W/m^2)

ΔV_{oc} คือ ค่ากระแสลัดวงจรที่มีการเปลี่ยนแปลงตามสัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิ

T_s คือ ค่าอุณหภูมิมาตรฐาน (298 K)

ในสภาวะเปิดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์ (Open circuit condition) จากวงจรสมมูลในรูปที่ 2.14 (b) สามารถคำนวณแรงดันเปิดวงจรได้ดังสมการที่ (2.9)

$$V_{oc}(T) = V_{ocs} + \Delta V_{oc}(T - T_s) \quad (2.9)$$

เมื่อ V_{ocs} คือค่าแรงดันเปิดวงจรที่ทดสอบภายใต้สภาวะมาตรฐาน และ ΔV_{oc} คือค่าแรงดันเปิดวงจรที่มีการเปลี่ยนแปลงตามสัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิ และจากวงจรสมมูลสามารถหาค่ากระแสไหลผ่านไดโอดได้ดังนี้

$$I_{ph}(G_a, T) = I_D(G_a, T) \quad (2.10)$$

ซึ่งสมการกระแสของไดโอดสามารถหาได้จาก

$$I_D(G_a, T) = I_{sat}(G_a, T) \times \left[e^{\frac{V_{oc}}{V_i}} - 1 \right] \quad (2.11)$$

เมื่อแรงดันที่ชั่วหาได้จาก $V_i(T) = \frac{AkT}{q}$

เมื่อ A คือ ค่า Ideality Factor

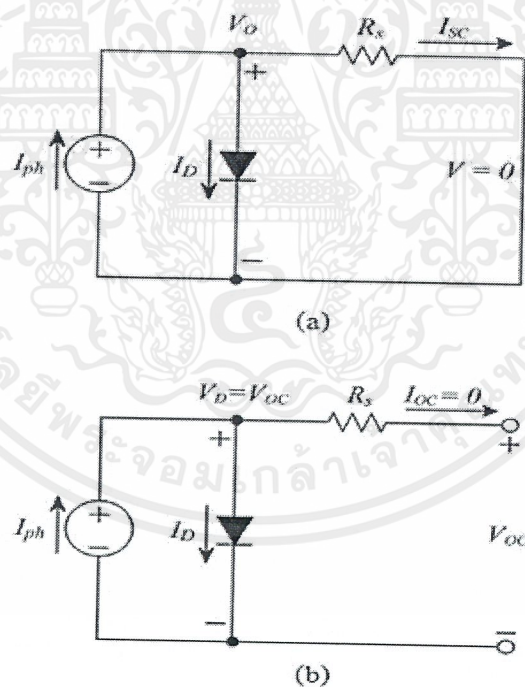
I_{sat} คือ ค่ากระแสอิ่มตัวของไดโอดที่มีการเปลี่ยนแปลงตามความเข้มแสงและอุณหภูมิ

q คือ ขนาดประจุมีค่า 1.602×10^{-19} คูลอมบ์

k คือ ค่าคงที่ Boltzman มีค่า 1.38×10^{-23} J/K

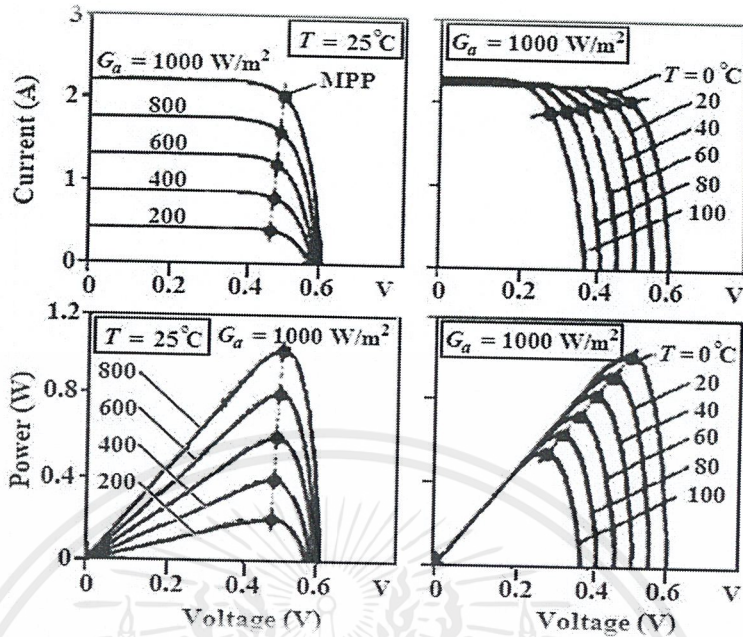
แทนสมการที่ (2.10) และ (2.11) เพื่อหาค่ากระแสอิ่มตัวของไดโอดได้จาก

$$I_{sat}(G_a, T) = \frac{I_{ph}(G_a, T)}{e \left(\frac{V_{oc}(T)}{V_i(T)} \right) - 1} \quad (2.12)$$



รูปที่ 2.14 (a) วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์สภาวะลัดวงจร
(b) วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์สภาวะเปิดวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15 คุณลักษณะเอาต์พุตของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

พิจารณาจุดที่ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับแรงดัน ในรูปที่ 2.15 แสดงให้เห็นถึงจุดที่ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดและสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$I_{mpp} = I_{ph} - I_{sat} \left[e^{\frac{V_{mpp} + IR_s}{V_t}} - 1 \right] \tag{2.13}$$

นำสมการที่ (2.12) แทนลงในสมการที่ (2.13) จะได้สมการกระแสที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด ดังนี้

$$I_{mpp} = I_{ph} - \frac{e^{\left(\frac{V_{mpp} + IR_s}{V_t}\right)} - 1}{e^{\left(\frac{V_{oc}}{V_t}\right)} - 1} I_{ph} \tag{2.14}$$

จากสมการที่ (2.14) สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานอนุกรม (R_s) และ Thermal Voltage (V_t) ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_s = \frac{V_t \ln \left[\left(1 - \frac{I_{mpp}}{I_{ph}} \right) e^{\left(\frac{V_{oc}}{V_t} \right)} + \frac{I_{mp}}{I_{ph}} \right] - V_{mpp}}{I_{mpp}} \quad (2.15)$$

เมื่อ Thermal Voltage (V_t) เป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับค่า Ideality factor (A) ผลจากอุณหภูมิที่มีต่อค่า Ideality factor ของไดโอดและค่าความต้านทานอนุกรม พิจารณาจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ จะหาได้จาก $\frac{dP}{dV} = 0$ เมื่อ $P = VI$ สามารถเขียนสมการได้ใหม่ดังนี้

$$\frac{dI}{dV} + \frac{I}{V} = 0 \quad (2.16)$$

$$\frac{dI}{dV} = -I_{sat} \left\{ e^{\frac{V+IR_s}{V_t}} \left[\frac{1}{V_t} + \left(\frac{R_s}{V_t} \right) \frac{dI}{dV} \right] \right\} \quad (2.17)$$

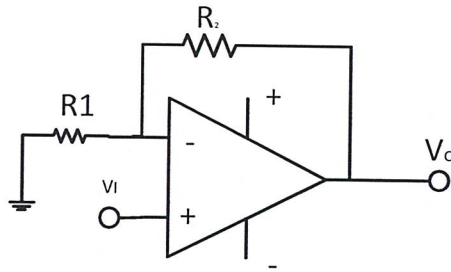
เมื่อนำสมการที่ (2.16) แทนค่าในสมการที่ (2.17) ดังนั้นจะได้ว่า

$$\left. \frac{dI}{dV} \right|_{V=V_{mpp}} = - \frac{\frac{I_{sat}}{V_t} e^{\frac{V_{mpp}+IR_s}{V_t}}}{1 + \frac{I_{sat} R_s}{V_t} e^{\frac{V_{mpp}+IR_s}{V_t}}} \quad (2.18)$$

2.5 วงจรการใช้งานพื้นฐานของออปแอมป์

2.5.1 วงจรขยายแบบไม่กลับเฟส (Non-Inverting Amp) วงจรขยายแบบไม่กลับเฟส จะมีเฟสเดียวกันกับอินพุตที่เข้ามา โดยที่ขาอินพุตจะถูกป้อนเข้าทางอินพุตบวก แต่ R_2 ก็ยังคงต่อเข้าทางอินพุตลบดังรูป 2.16 สามารถหาอัตราการขยายได้ดังสมการที่ (2.19)

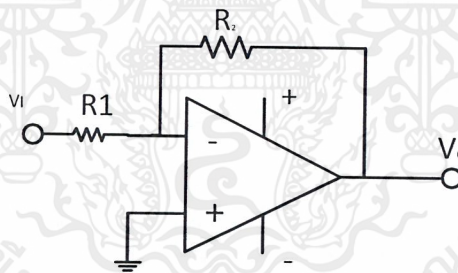
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 วงจรขยายไม่กลับเฟส

$$\text{Gain} = \frac{V_o}{V_i} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \quad (2.19)$$

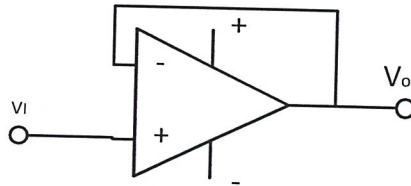
2.5.2 วงจรขยายแบบกลับเฟส (Inverting Amplifier) วงจรขยายแบบกลับเฟส แสดงในรูปที่ 2.17 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า แรงดันเอาต์พุต V_o คือแรงดันป้อนกลับจากอินพุตผ่าน R_2 และ R_1 โดยที่ R_2 คือตัวต้านทานป้อนกลับ สัญญาณอินพุต V_i จ่ายผ่าน R_1 เข้าทางอินพุตกลับและอินพุตไม่กลับต่อลงดิน



รูปที่ 2.17 วงจรขยายแบบกลับเฟส

$$V_o = -\frac{R_2}{R_1} V_i \quad (2.20)$$

2.5.3 วงจรแรงดันตาม (Voltage Follower) วงจรขยายแรงดันตาม คือ วงจรที่มีอัตราขยายเป็น 1 มีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า บัฟเฟอร์ หรือวงจรขยายอัตราเป็น 1 (Unity-Gain Amplifier) วงจรของสัญญาณแรงดันตาม แสดงได้ดังรูปที่ 2.18

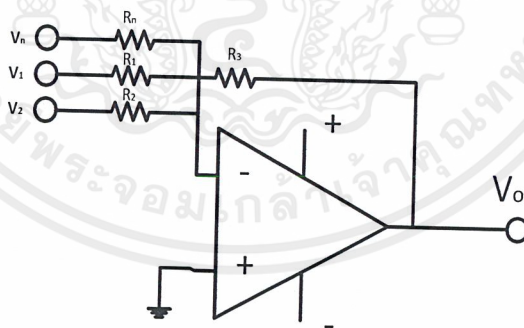


รูปที่ 2.18 วงจรแรงดันตาม

$$V_{input} = V_{output} \quad (2.21)$$

การใช้งานของวงจรมี ส่วนใหญ่ใช้เป็นวงจรบัฟเฟอร์ (Buffer) หรือวงจรขับกระแส อินพุต V_1 ต้องการเพียงแรงดันเท่านั้น ที่เอาต์พุต V_o จะทำให้แรงดันเท่ากับอินพุตแต่ให้กระแสสูงกว่า ดังนั้นไม่ว่าเอาต์พุตจะดึงกระแสมากเท่าไรก็ไม่ส่งผลต่ออินพุต ทำให้ระบบมีเสถียรภาพมากขึ้น

2.5.4 วงจรขยายแบบรวมสัญญาณ (Summing Amplifier) ลักษณะวงจรขยายแบบรวมสัญญาณในรูปที่ 2.19 จะเป็นวงจรขยายแบบกลับเฟสที่มีอินพุตหลายๆ อินพุต โดยสัญญาณเอาต์พุตของวงจรมีเกิดจากผลรวมของการอินทิเกรตสัญญาณอินพุตแต่ละตัว ดังแสดงในสมการที่ (2.22)



รูปที่ 2.19 วงจรขยายแบบรวมสัญญาณ

$$V_o = -R_3 \left(\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \dots + \frac{V_n}{R_n} \right) \quad (2.22)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

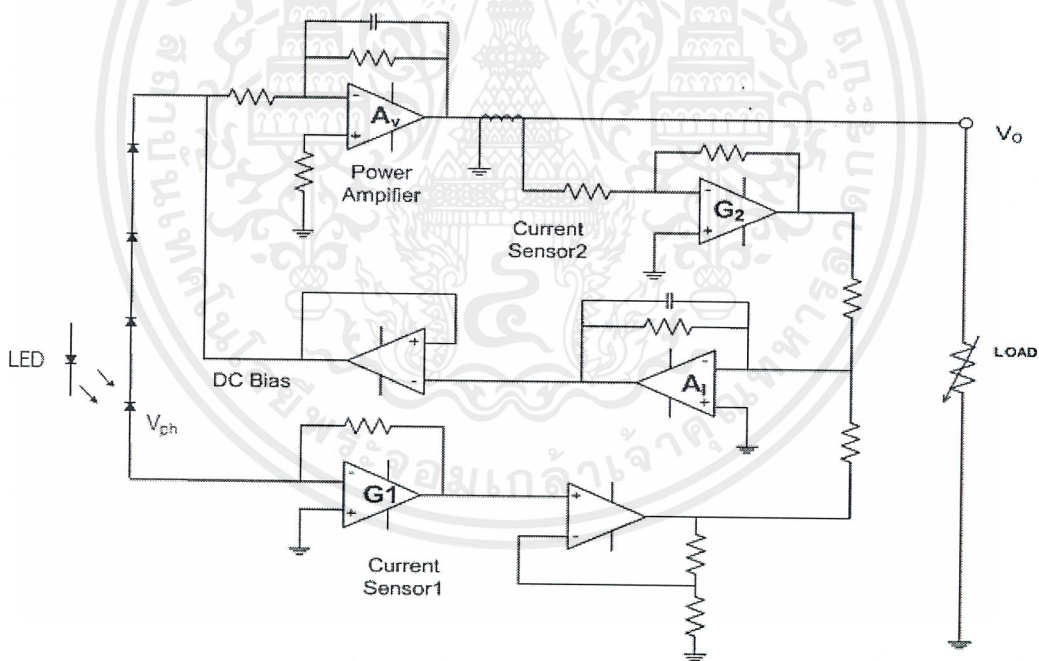
หรือเมื่อกำหนดให้ค่า R ทุกตัวมีค่าเท่ากันจะได้

$$V_o = (V_1 + V_2 + \dots + V_n) \tag{2.23}$$

เอาต์พุตของวงจรรวมสัญญาณเป็นผลรวมของแรงดันอินพุต แต่ผลรวมของแรงดันอินพุตจะต้องไม่เกินไฟเลี้ยงที่จ่ายให้ออปแอมป์หรือ V_{sat} ของออปแอมป์

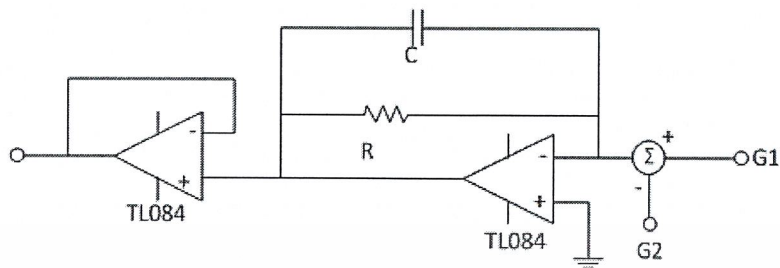
2.6 หลักการออกแบบวงจรขยายกระแสไฟโอดีโอด

การออกแบบวงจรขยายกระแสไฟโอดีโอด สามารถพิจารณาได้ตามหลักการดังนี้



รูปที่ 2.20 หลักการออกแบบวงจรขยายกระแสไฟโอดีโอด

2.6.1 การออกแบบวงจร DC bias controller



รูปที่ 2.21 วงจร DC bias controller

ในการคำนวณหาอัตราขยายกระแสของวงจร DC bias controller สามารถแสดงให้เห็นได้จากสมการที่ (2.24)

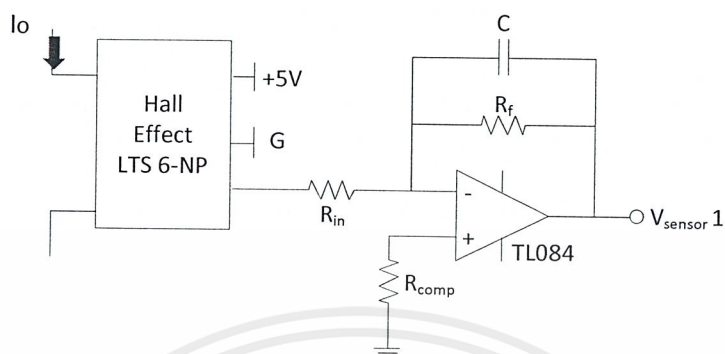
$$A_I = \frac{I_o}{I_{ph}} = \frac{G_2}{G_1} \tag{2.24}$$

- เมื่อ A_I คือ อัตราขยายกระแสของตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์
- I_o คือ กระแสไฟฟ้าเอาต์พุตของตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์
- I_{ph} คือ กระแสลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิง
- G_1 คือ อัตราขยายของวงจรตัวจับกระแสเอาต์พุต
- G_2 คือ อัตราขยายของวงจรตัวจับกระแสไฟโต้

ข้อกำหนดในการออกแบบวงจร DC bias controller

กำหนดให้สามารถจ่ายกระแสเอาต์พุตได้ที่ประมาณ 1.15 แอมป์ ที่พิกัดกระแสไฟฟ้ลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์ 170 ไมโครแอมป์

2.6.1.1 วงจรตรวจจ็ับกระแสเอาต์พุต (current sensor 1)

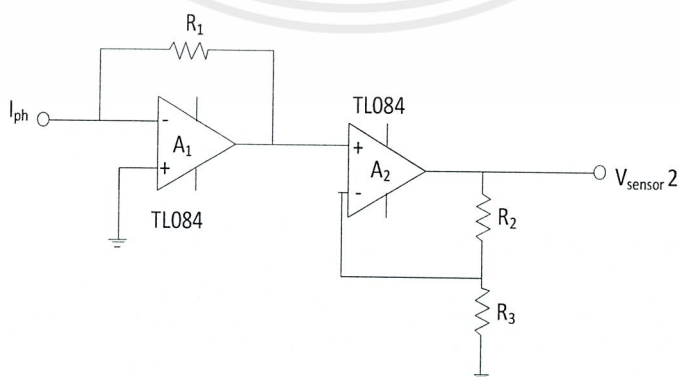


รูปที่ 2.22 วงจรตรวจจ็ับกระแสเอาต์พุต

$$G_1 = \frac{V_{\text{sensor}1}}{I_o} \quad (2.25)$$

ในการออกแบบวงจรตรวจจ็ับกระแสเอาต์พุต ในปริณูณานิพนธ์ที่นำเสนอนี้เลือกใช้ การตรวจจ็ับกระแสด้วยตัวตรวจจ็ับกระแสแบบ Hall Effect รุ่น LTS 6-NP เพื่อแยกชุดควบคุมและ ชุดขยายกำลังออกจากกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.22 เมื่อ $V_{\text{sensor}1}$ คือ แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจร ตรวจจ็ับกระแสเอาต์พุต

2.6.1.2 วงจรตรวจจ็ับกระแสไฟฟ้าลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 2.23 วงจรตรวจจ็ับกระแสไฟฟ้าลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$G_2 = \frac{V_{\text{sensor}2}}{I_{ph}} \quad (2.26)$$

เป็นวงจรที่ใช้สำหรับตรวจจذبกระแสไฟฟ้าโพโตของเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิง โดยการตรวจจذبจะอาศัยวงจรเปลี่ยนกระแสเป็นแรงดันดังนั้นการเลือกใช้ออปแอมป์เบอร์ TL084 เนื่องจากใช้กระแสไบอัสอินพุตต่ำ เมื่อได้สัญญาณแรงดันมาแล้วจะนำเข้าสู่วงจรมัลติเพลกซ์เพื่อ นำสัญญาณที่ได้เป็นอินพุตให้กับชุด DC bias controller ต่อไป ลักษณะวงจรสามารถแสดงได้ในรูปที่ 2.23 โดยกำหนดให้ $V_{\text{sensor}2}$ คือ แรงดันไฟฟ้าเอาท์พุทของวงจรตรวจจذبกระแสโพโต



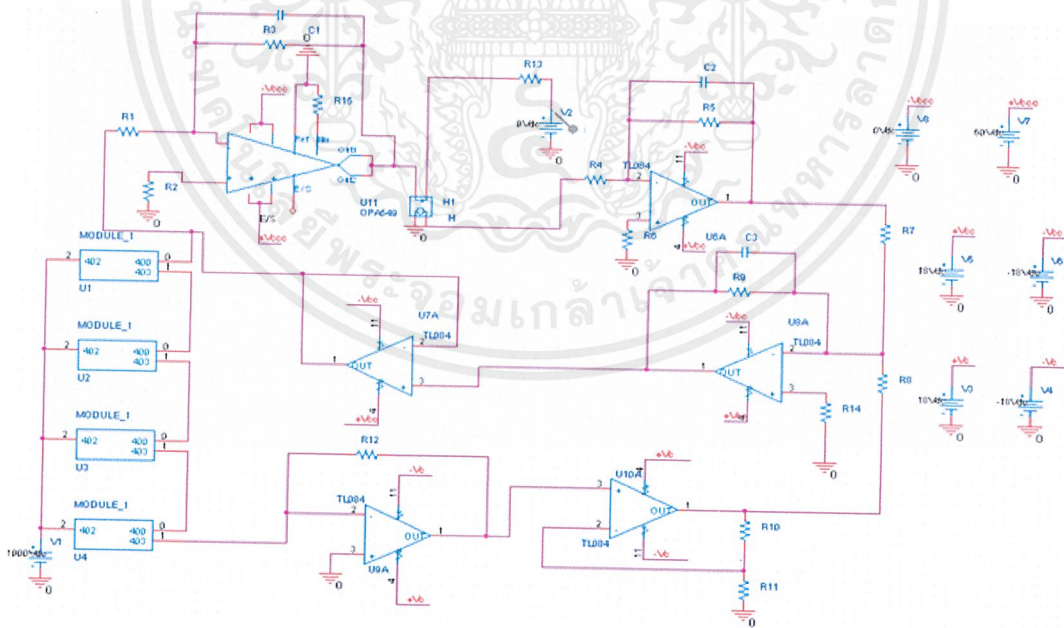
บทที่ 3

การออกแบบการทดลอง

3.1 บทนำ

จากการออกแบบวงจรจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ พบว่าตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์มีสัญญาณเอาต์พุตที่มีอัตราขยายกระแสและแรงดันสอดคล้องกับเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิง ดังนั้นในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์โดยมีหัวข้อหลักในการนำเสนอประกอบด้วย

- การเลือกผลิตภัณฑ์ในการออกแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์
- การออกแบบวงจร DC bias controller
- การใช้โปรแกรม Orcad 9.1 ในการออกแบบวงจรก่อนจะนำมาเป็นวงจรจำลองเซลล์แสงอาทิตย์จริง ดังแสดงในรูปที่ 3.1
- แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซลล์แสงอาทิตย์
- สรุปผลการออกแบบวงจรจำลองเซลล์แสงอาทิตย์

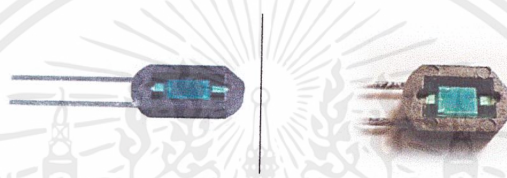


รูปที่ 3.1 วงจรตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้โปรแกรม Orcad 9.1

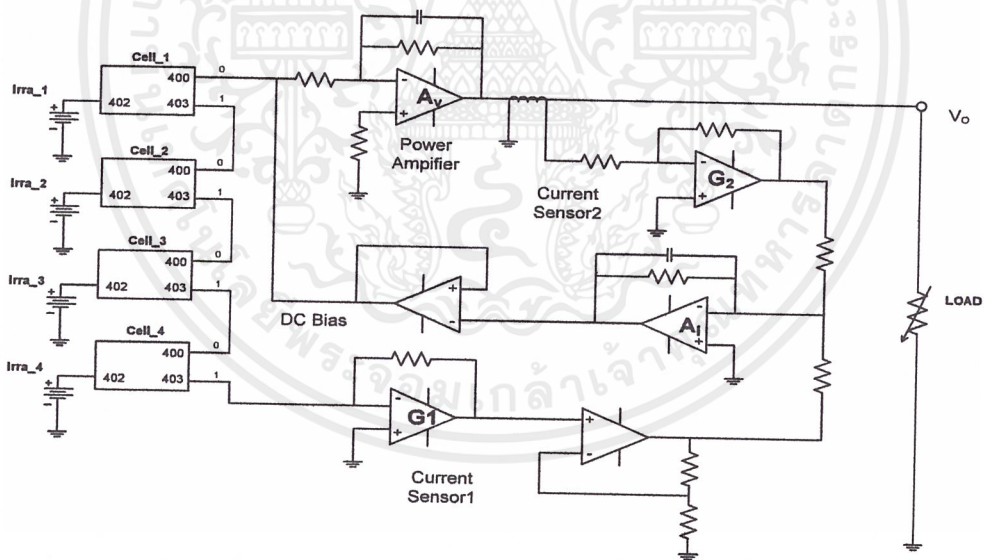
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การเลือกผลิตภัณฑ์ในการออกแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์

3.2.1 เซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิงขนาดเล็ก ตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่นำมาเป็นเซลล์แสงอาทิตย์นั้นจะเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดเล็กที่ให้คุณลักษณะทางไฟฟ้า เปลี่ยนแปลงตามสภาพแวดล้อม ดังนั้นจึงได้เลือกใช้โฟโต้ไดโอด รุ่น BS520 โดยโฟโต้ไดโอดรุ่น BS520 มีโครงสร้างแบบพี-เอชเอ็นเช่นเดียวกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิกอน มีกระแสลัดวงจร 0.65 ไมโครแอมป์ และแรงดันเปิดวงจร 500 มิลลิโวลต์ ในการออกแบบพิกัดกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตและพิกัดแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ พบว่าจะมีสัญญาณรบกวนเกิดขึ้นเนื่องจากผลของตัวเก็บประจุที่แฝงมาในโครงสร้างโฟโต้ไดโอดแสดง ดังรูป 3.2 ส่วนรูปที่ 3.3 เป็นการแสดงถึงวงจรจำลองคุณลักษณะของโฟโต้ไดโอดแบบอนุกรม 4 เซลล์ในโปรแกรม Orcad 9.1



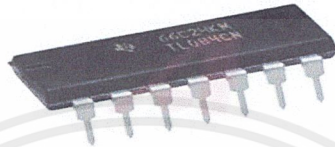
รูปที่ 3.2 ลักษณะโฟโต้ไดโอดรุ่น BS520



รูปที่ 3.3 วงจรจำลองแบบโฟโต้ไดโอดอนุกรม

จากรูปที่ 3.3 เป็นรูปวงจรจำลองการต่อโฟโต้ไดโอดแบบอนุกรม โดยจะมีค่ากระแสลัดวงจรเท่ากัน แต่ค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรจะมีค่ามากขึ้น

3.2.2 TL084 ออปแอมป์ วงจรรักษาระดับกระแสและแรงดันคงที่หรือเรกูเลเตอร์ ในลักษณะ Shunt regulate สำหรับวงจรเกี่ยวกับ solar cell เมื่อแรงดันเกินกำหนด IC TL084 ที่ ถูกกำหนดให้เป็นตัวตรวจจับแรงดัน รับรู้ว่ามีแรงดันสูงเกินไปแล้ว ควรจ่ายกระแสออกมาให้เพาเวอร์ มอสเฟตทำงานมากขึ้น เพื่อลดแรงดันที่จ่ายให้ไหลลดลง ในทางกลับกันหากแรงดันลดลง IC TL084 ก็ จะไม่รับรู้ใดๆ มอสเฟตจึงทำงานน้อยลงหรือหยุดการทำงานกระแสก็จะไหลผ่านโหลดได้อย่างเต็มที่ ลักษณะของ IC TL084 จะแสดงในรูปที่ 3.4 ส่วนในรูปที่ 3.5 แสดงถึงลักษณะของวงจร TL084

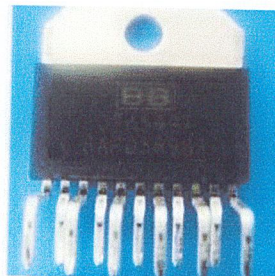
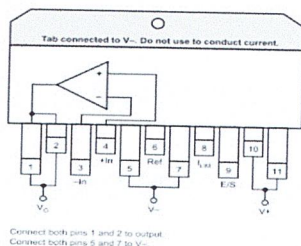


รูปที่ 3.4 IC TL084



รูปที่ 3.5 ลักษณะของวงจร IC TL084

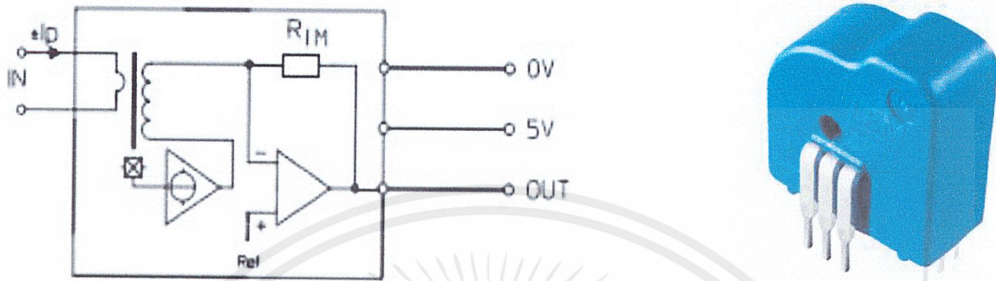
3.2.3 IC ขยายกำลัง หลักการทำงานของวงจรขยายกำลัง คือการขยาย คุณลักษณะทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นกับเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิง ด้วยเหตุผลดังกล่าวการออกแบบต้องใช้ ออปแอมป์ที่มีอัตราการขยายกระแสและแรงดันได้สูง จึงเลือกใช้ไอซีขยายกำลัง (Power Amplifier) ของบริษัทโกลบอลทรอนิกส์ รุ่น OPA549 ที่สามารถทนแรงดันเอาต์พุตได้สูงสุด 60 โวลต์ กระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ 10 แอมป์ ดังแสดงในรูปที่ 3.6 โดยตัว OPA549 มีชุดป้องกันวงจรกระแสไฟฟ้า เกินพิกัดที่ไอซีจะรับได้ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ลักษณะไอซี OPA 549 ที่ใช้ในวงจรกำลังไฟฟ้า

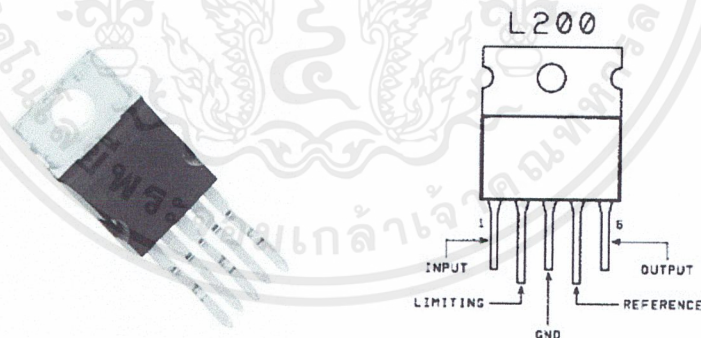
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.4 LEM LTS 6-NP ตัวตรวจจับสนกระแสในการ Feedback ในการจำลอง เซลล์แสงอาทิตย์ในส่วนของวงจรตรวจจับสนกระแสเอาต์พุท ในปริภูมิงานที่เล็มนี่ได้ทำการเลือกใช้ การตรวจจับสนกระแสด้วยตัวจับแบบ Hall Effect รุ่น LTS 6-NP เอาต์พุทจะออกมาเป็นแรงดันที่ 2.5-5 โวลต์โดยกระแสทางปฐมภูมิสูงสุด 6 แอมแปร์ เพื่อตรวจจับสนกระแสตรงและเปลี่ยนเป็นแรงดันวนรูป กลับไปควบคุมระบบ ดังแสดงในรูปที่ 3.7

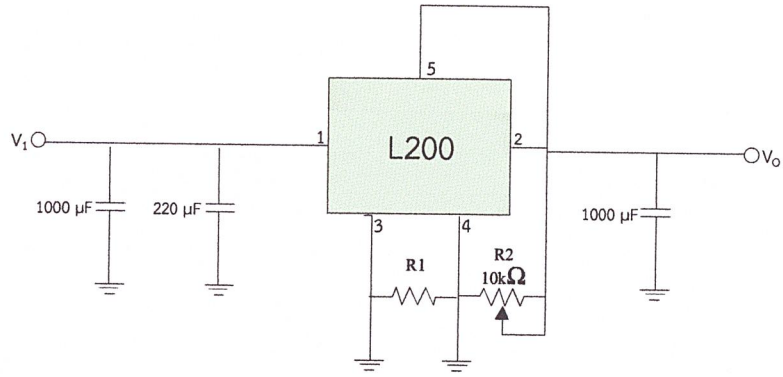


รูปที่ 3.7 ตัวตรวจจับสนกระแสแบบ Hall effect รุ่น LTS 6 NP

3.2.5 ไอซี L200C เป็นไอซีเรกูเลเตอร์ที่สามารถปรับค่าแรงดันได้ตั้งแต่ 2.85 ถึง 36 โวลต์ และจำกัดกระแสทางเอาต์พุทได้สูงสุดถึง 2 แอมแปร์ มีขาต่อใช้งาน 5 ขาโดยจะมีคุณสมบัติทาง ไฟฟ้าดังนี้ แรงดันเอาต์พุทสูงสุด 40 โวลต์ แรงดันเอาต์พุท 2.85 ถึง 36 โวลต์ กระแสเอาต์พุทสูงสุด 2 แอมแปร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.8 ส่วนรูปที่ 3.9 แสดงวงจรใช้งานพื้นฐานของ L200



รูปที่ 3.8 ลักษณะและรูปร่างของ L200



รูปที่ 3.9 วงจรใช้งานพื้นฐานของ L200

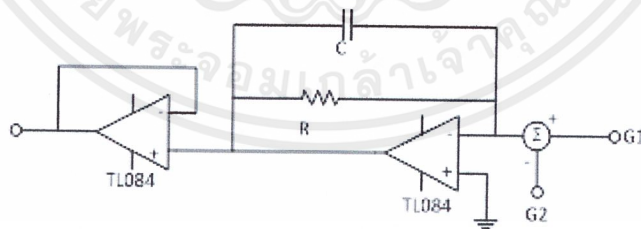
สูตรการคำนวณวงจรพื้นฐาน L200

$$V_o = V_{ref} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \tag{3.1}$$

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

3.3 การออกแบบวงจร DC bias controller

วงจร bias controller เป็นวงจรสำหรับควบคุมจุดการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิง โดยอาศัยลักษณะของวงจร Integrete summing ที่มีอัตราการขยายขึ้นกับอินพุตที่ขา Inverting ของออปแอมป์ที่เอาท์พุทของวงจรจะมีการต่อวงจรบัฟเฟอร์ไว้เพื่อป้องกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 วงจร DC bias controller

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

$$A_i = \frac{I_o}{I_{ph}} = \frac{G_2}{G_1} \quad (3.2)$$

กำหนดให้

$$G_1 = \frac{V_{sensor1}}{I_o} \quad (3.3)$$

$$G_2 = \frac{V_{sensor2}}{I_{ph}} \quad (3.4)$$

เมื่อ I_o คือ กระแสเอาต์พุตของตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์

I_{ph} คือ กระแสเอาต์พุตจากเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิง

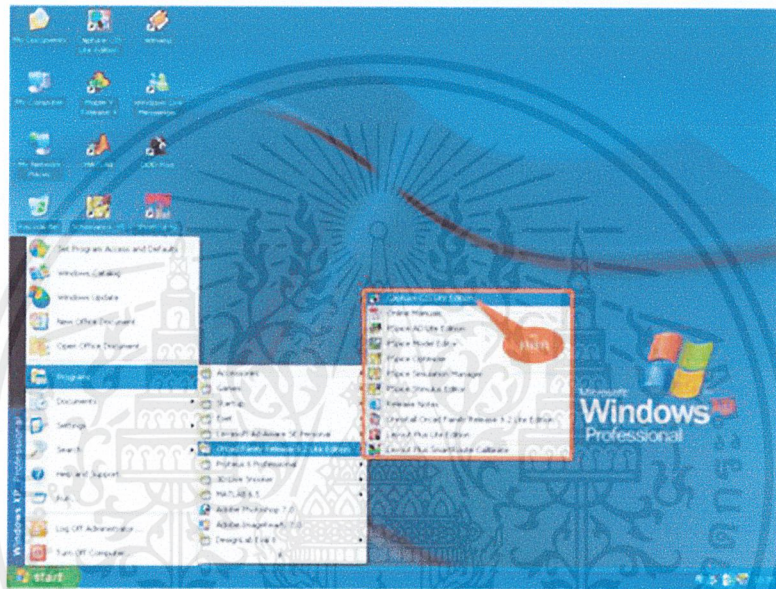
3.4 โปรแกรม Orcad 9.1

การออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์และการทดสอบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ได้ทำการออกแบบมานั้น ก่อนที่จะนำไปทำการสร้างเป็นวงจรจริง โดยในความเป็นจริงแล้ว เมื่อผู้สร้างทำการออกแบบวงจรแล้วจะต้องทำการทดสอบวงจรนั้นด้วยโปรแกรมก่อนเพื่อให้ทราบว่าวงจรที่ได้ออกแบบนั้นทำงานได้ตรงตามที่ต้องการ แล้วจึงนำวงจรที่ได้นั้นไปทำการสร้างเป็นวงจรจริงต่อจึงจะต้องตั้งนั้นในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงโปรแกรมที่ใช้ในการทดลอง การทดสอบและการจำลองการทำงานของวงจรทางด้านอิเล็กทรอนิกส์โปรแกรมหนึ่ง คือ โปรแกรม OrCad Lite (Capture CIS Lite Edition) ซึ่งก็ถือได้ว่าเป็นโปรแกรมที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในปัจจุบันและมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน สาเหตุที่มีผู้นิยมใช้งานก็เนื่องมาจากความสะดวกและรวดเร็วในการใช้งาน มีอุปกรณ์ให้เลือกใช้งานที่หลากหลาย และที่สำคัญก็คือความถูกต้องแม่นยำในผลการทดสอบที่ได้จากวงจรที่ทำการจำลองการทำงานต่างๆ โดยจะช่วยให้เราสามารถลดเวลาในการทำความเข้าใจในวงจรต่างๆ นั้นลงไปได้เพราะในส่วนของโปรแกรมนั้นสามารถที่จะแสดงถึงค่ากระแส ค่าแรงดันและค่าของกำลังงานที่จุดต่างๆ ของวงจรได้เป็นอย่างดี พร้อมกันนั้นยังสามารถที่จะดูลักษณะสัญญาณทั้งทางด้านโดเมนเวลา (Time Domain) และโดเมนความถี่ (Frequency Domain) และยังสามารถไปถึงการทดสอบวงจรเมื่อมีอุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลงไปได้ และถ้าจะกล่าวถึงประวัติความเป็นมาของโปรแกรม OrCad Lite (Capture CIS Lite Edition) ว่ามีความเป็นมาอย่างไร เริ่มแรกนั้นเจ้าของผลิตภัณฑ์ก็คือบริษัท Microsim ที่เป็นผู้สร้างโปรแกรมนี้ขึ้นมาในช่วงปี ค.ศ. 1980-1998 โดยใช้ชื่อโปรแกรมว่า MicroSim Designlab จากนั้นก็มีการพัฒนาขีดความสามารถของโปรแกรมให้สูงขึ้นไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามลำดับ จนมาถึงประมาณปี ค.ศ. 1998 ก็ได้มีการควบรวมบริษัทเป็นของ OrCad จนกลายมาเป็นโปรแกรม OrCad Lite (Capture CIS Lite Edition)

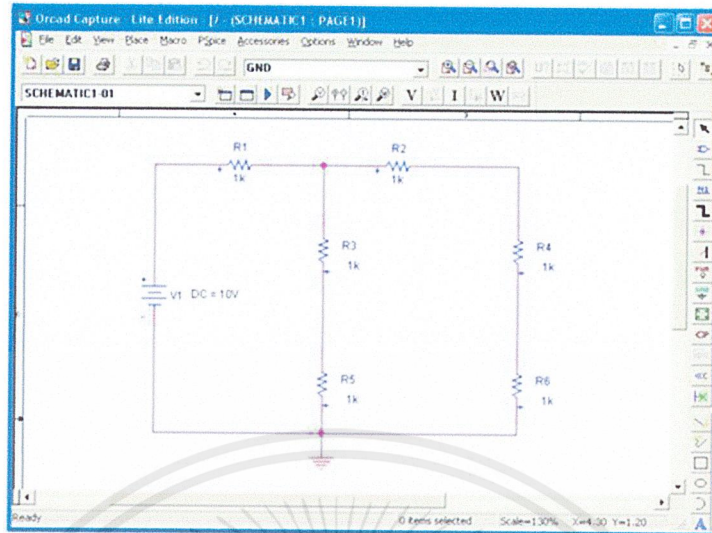
การใช้งานโปรแกรม Orcad 9.1 เบื้องต้น โปรแกรม OrCad version Lite Edition ที่ใช้งานซึ่งในการออกแบบวงจรจำลองเซลล์แสงอาทิตย์โปรแกรมที่นำมาใช้คือโปรแกรม OrCad เวอร์ชัน Lite Edition และหลังจากเมื่อได้ทำการติดตั้งโปรแกรมเสร็จแล้ว เราก็จะได้โปรแกรมกลุ่มของโปรแกรม OrCad เวอร์ชัน Lite Edition ดังแสดงในรูปที่ 3.11



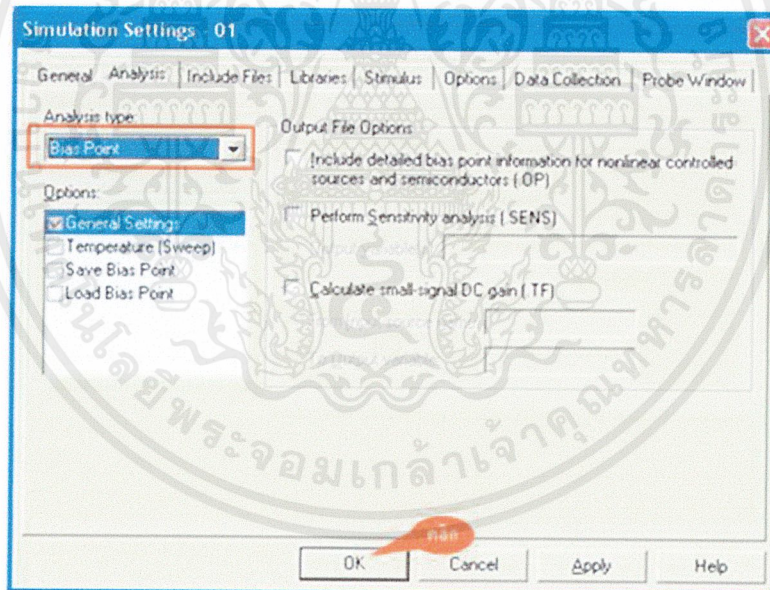
รูปที่ 3.11 โปรแกรม OrCad Lite (Capture CIS Lite Edition) ที่ติดตั้งพร้อมใช้งาน

การใช้งานโปรแกรม OrCad Lite Edition เราสามารถใช้โปรแกรมทดสอบวงจรเพื่อดูค่าของกระแส (I) แรงดัน (V) และกำลังงาน (W) ได้ ดังรูปที่ 3.12 ก็เป็นตัวอย่งการใช้งานเบื้องต้นในการสร้างวงจรแบบง่ายๆ เพื่อที่จะใช้โปรแกรมวิเคราะห์หาค่าของกระแส แรงดันและกำลังงานของวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

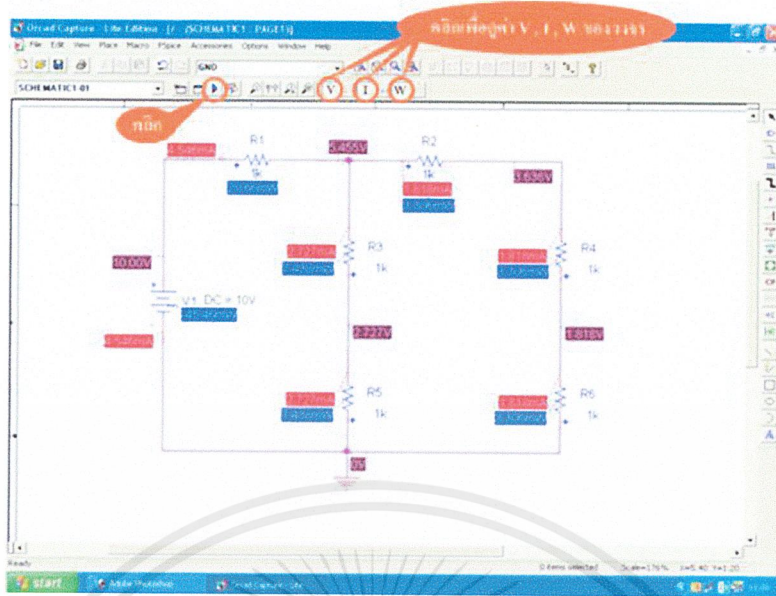


รูปที่ 3.12 ตัวอย่างวงจรตัวอย่างในการวิเคราะห์การทำงานของวงจร



รูปที่ 3.13 ตัวอย่างการกำหนดรูปแบบการวิเคราะห์วงจร แบบ Bias Point

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

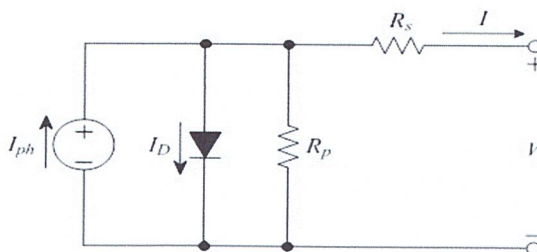


รูปที่ 3.14 ตัวอย่างผลการทดลองที่ได้จากโปรแกรม OrCad เวอร์ชัน Lite Edition ที่แสดงค่ากระแส แรงดันและค่ากำลังงานภายในวงจร

3.5 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซลล์แสงอาทิตย์

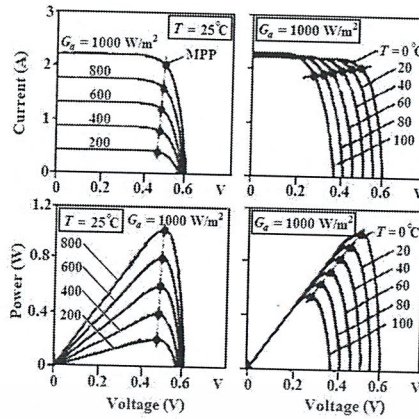
เซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้งานโดยทั่วไปจะผลิตจากสารกึ่งตัวนำแบบรอยต่อ (P-N Junction) ในการวิเคราะห์คุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์จึงนิยมใช้วงจรสมมูลที่ประกอบด้วยแหล่งจ่ายกระแส (I_{ph}) ที่เปลี่ยนแปลงตามความเข้มแสงต่อขนานกับไดโอดและความต้านทานขนาน (R_p) ซึ่งความต้านทานอนุกรม (R_s) ต่อกับเอาต์พุตของวงจรสมมูล ดังรูปที่ 3.15

จากวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ในรูปที่ 3.15 จะแสดงคุณลักษณะทางไฟฟ้าที่มีการตอบสนองของกระแสลัดวงจรตามความเข้มแสง และแรงดันเปิดวงจรจะมีการตอบสนองตามอุณหภูมิ ดังแสดงในรูปที่ 3.16 และโดยทั่วไปความต้านทานขนาน (R_p) จะมีค่าสูงมากพอที่จะไม่นำมาพิจารณาผลที่เกิดขึ้นได้ ในขณะที่ความต้านทานอนุกรมจะมีค่าน้อยมากจึงจะมีผลกระทบต่อเอาต์พุตของวงจรสมมูล จากหลักการดังกล่าวสามารถเขียนวงจรสมมูลใหม่ได้ดังรูปที่ 3.17



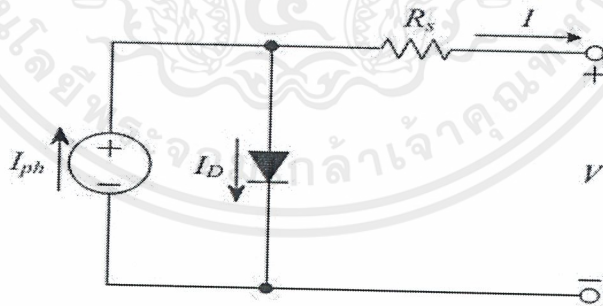
รูปที่ 3.15 วงจรสมมูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการวิเคราะห์ความต้านทานขนาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



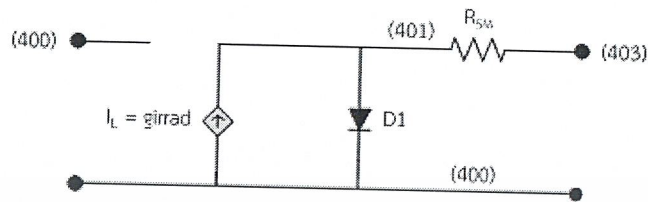
รูปที่ 3.16 แสดงคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เปลี่ยนแปลงตามความเข้มแสง และอุณหภูมิ

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



รูปที่ 3.17 วงจรสมมูลเซลล์แสงอาทิตย์อย่างง่าย

3.5.1 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเซลล์แสงอาทิตย์ด้วย Orcad
 9.1 การสร้างวงจรเซลล์แสงอาทิตย์ด้วย Orcad สามารถวิเคราะห์ได้จากสมการดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.18 วงจรสมมูลในการสร้างแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยโปรแกรม Orcad 9.1

$$I = I_{sc} - I_o \left(e^{\frac{V+IR_s}{nV_T}} - 1 \right) \quad (3.5)$$

- เมื่อ I คือ กระแสเอาต์พุทของวงจรสมมูล มีหน่วยเป็น แอมแปร์ (A)
 I_{sc} คือ กระแสไฟฟ้ลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์ มีหน่วยเป็น แอมแปร์ (A)
 I_o คือ กระแสไหลผ่านตัวไดโอด มีหน่วยเป็น แอมแปร์ (A)
 V คือ แรงดันเอาต์พุทของเซลล์แสงอาทิตย์ มีหน่วยเป็น โวลต์ (V)
 R_s คือ ความต้านทานอนุกรม มีหน่วยเป็น โอห์ม (Ω)
 V_T คือ Thermal Voltage ของไดโอด มีหน่วยเป็น โวลต์ (V)
 n คือ Ideality factor ของไดโอด

เมื่อ G-device สามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$girrad = \frac{I_{scm}}{1000} \times G \quad (3.6)$$

เมื่อ G คือค่าความเข้มแสงที่เซลล์แสงอาทิตย์ได้รับ ซึ่งในแบบจำลองจะแทนด้วยแหล่งจ่ายแรงดัน

เนื่องจากวงจรสมมูลในรูปที่ 3.17 เป็นวงจรสมมูลที่ใช้สำหรับวิเคราะห์เซลล์แสงอาทิตย์เพียงหนึ่งเซลล์ ดังในการวิเคราะห์คุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์จึงมีการนำจำนวนของเซลล์ที่มีต่ออนุกรมและขนานกันภายในแผงมาคำนวณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้างี้

$$I_M = N_p I \quad (3.7)$$

$$I_{scm} = N_p I_{sc} \quad (3.8)$$

$$V_M = N_s V \quad (3.9)$$

$$V_{OCM} = N_s V_{oc} \quad (3.10)$$

$$R_{SM} = \frac{N_s}{N_p} R_s \quad (3.11)$$

- เมื่อ I_M คือ กระแสเอาต์พุตของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ มีหน่วยเป็น แอมแปร์ (A)
- I_{scm} คือ กระแสลัดวงจรของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ มีหน่วยเป็น แอมแปร์ (A)
- V_M คือ แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 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)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำสมการที่ (3.10) มาแทนในสมการที่ (3.11) จะได้ว่า

$$\frac{I_M}{N_p} = \frac{I_{SCM}}{N_p} - I_{o1} \left(e^{\frac{V_M + I_M(N_p/N_S)R_{SM}}{nV_T}} - 1 \right) \quad (3.12)$$

$$I_m = I_{SCM} - N_p I_{o1} \left(e^{\frac{V_M + I_M R_{SM}}{nN_S V_T}} - 1 \right) \quad (3.13)$$

ในกรณีที่วงจรมูลเปิดวงจรดังแสดงในรูปที่ 3.17 พบว่ากระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านไดโอดทั้งหมด ซึ่งสามารถคำนวณค่ากระแส I_o ได้จาก

$$I_o = \frac{I_{SC}}{\frac{V_{OC}}{e^{nV_T} - 1}} \quad (3.14)$$

นำสมการที่ (3.5) และ (3.7) แทนค่าในสมการที่ (3.11) จะได้ว่า

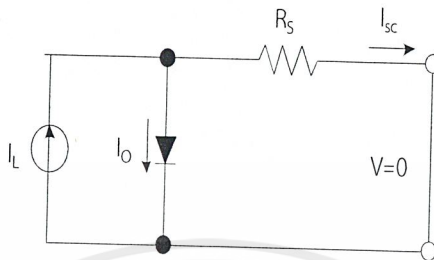
$$I_o = \frac{I_{SCM}}{\frac{V_{OCM}}{e^{nV_T N_S} - 1}} \quad (3.15)$$

ในขณะที่แรงดันเปิดวงจรสามารถคำนวณได้จาก

$$v_{OC} = \frac{V_{OC}}{nV_T} = \frac{V_{OCM}}{N_S nV_T} \quad (3.16)$$

ซึ่งสมการที่ (3.15) เป็นสมการที่ใช้สร้างแบบจำลองซึ่งต้องมีค่า I_{scm} และ V_{ocm} ที่ได้จากการวัดแผงเซลล์แสงอาทิตย์จริง

ในกรณีที่วงจรสมมูลลัดวงจรดังแสดงในรูปที่ 3.19 นั้น กระแสจะไหลผ่านความต้านทานอนุกรมเป็นส่วนมากทำให้กระแสที่ไหลผ่านไดโอดน้อยมาก จึงไม่นำมาพิจารณาคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ในกรณีลัดวงจร



รูปที่ 3.19 วงจรสมมูลเซลล์แสงอาทิตย์ในสภาวะลัดวงจร

เมื่อนำสมการที่ (3.15) แทนในสมการที่ (3.13) จะแสดงความสัมพันธ์ของกระแสของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ดังนี้

$$I_M = I_{SCM} - I_{SCM} \frac{e^{\frac{V_M + R_{SM} I_M}{nV_T N_s}} - 1}{\frac{V_{OCM}}{(e^{nV_T N_s} - 1)}} \tag{3.17}$$

เมื่อจัดรูปสมการแล้วจะได้

$$I_M = I_{SCM} \left(1 - e^{\frac{V_M + R_{SM} I_M - V_{OCM}}{nV_T N_s}} \right) \tag{3.18}$$

เมื่อพิจารณาที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์พบว่าความสัมพันธ์ของกระแสลัดวงจรและแรงดันเปิดวงจร ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดมีการเปลี่ยนแปลงดังสมการที่ (3.19)

$$P_{max m} = FF_M V_{OCM} I_{SCM} = FF_{OM} (1 - r_{SM}) V_{OCM} I_{SCM} \tag{3.19}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อค่า Fill Factor (FF) ของ แผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถคำนวณได้จาก

$$FF_0 = \frac{v_{oc} - \ln(v_{oc} + 0.72)}{1 + v_{oc}} \quad (3.20)$$

และค่าความต้านทานอนุกรมของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (R_{SM}) สามารถหาได้จาก

$$R_{SM} = \frac{V_{OCM}}{I_{SCM}} - \frac{P_{maxm}}{FF_{OM} I_{SCM}^2} \quad (3.21)$$

จากสมการที่ (3.6) , (3.15) , (3.16) , (3.21) สามารถนำมาเขียน Library ในโปรแกรม OrCAD ดังแสดงในรูปที่ 3.20

```
.subckt module_1 400 403 402 params: ta=1, tr=1, iscmr=1, pmaxmr=1, vocmr=1,
+ ns=1, np=1, nd=1
girradm 400 401 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}}
.func uvet() (8.66e-5*(tr+273))
.func vocnorm() (vocmr/(nd*ns*uvet))
.func rsm() (vocmr/(iscmr)- pmaxmr*(1+vocnorm)/(iscmr**2*(vocnorm-
+ log(vocnorm)+0.72)))
rs 401 403 {rsm()}
.ends module_1
```

รูปที่ 3.20 code ของตัว model Photodiode ใน โปรแกรม OrCAD 9.1

- เมื่อ t_a คือ อุณหภูมิมาตรฐานของตัวอุปกรณ์ Photodiode
- t_r คือ อุณหภูมิห้องที่ทำการทดลอง
- i_{scmr} คือ กระแสลัดวงจรของโฟโอดีโอด

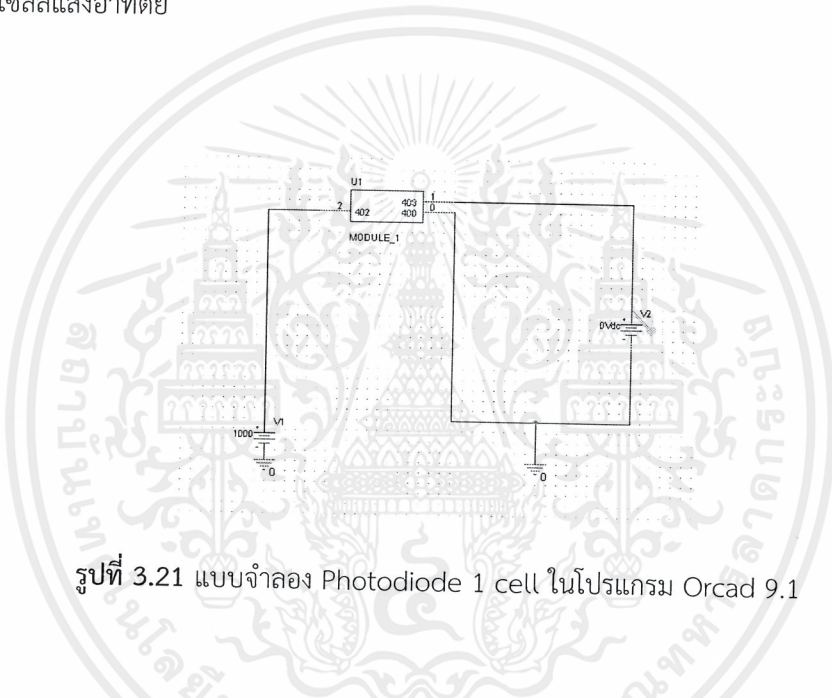
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

P_{maxmr} คือ กำลังไฟฟ้าสูงสุดของ โฟโอดีโอด

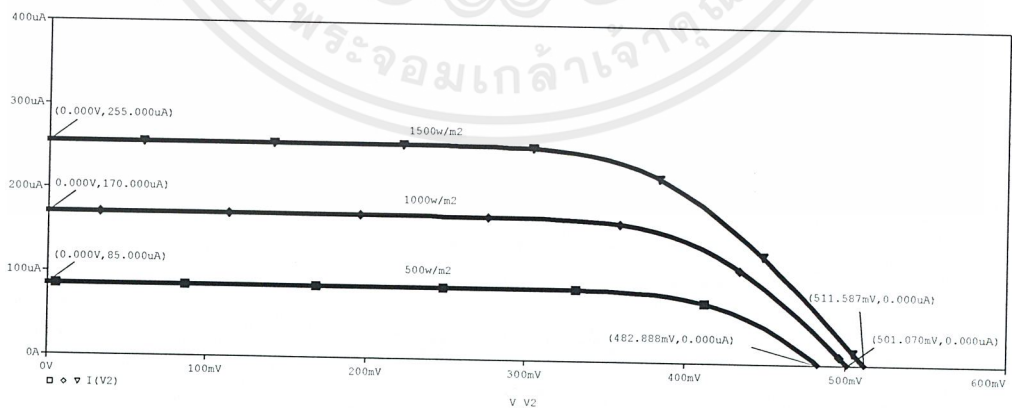
V_{ocm} คือ แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรของ โฟโอดีโอด

3.5.2 การออกแบบชุดโฟโอดีโอดโดยใช้โปรแกรม Orcad 9.1 ในการออกแบบ การจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ในปริณญาณิพนธ์เล่มนี้จะใช้แสงจากโฟโอดีโอดเปรียบเสมือนแสงจาก พลังงานดวงอาทิตย์จึงได้มีการออกแบบโฟโอดีโอดทั้งแบบเซลล์เดี่ยวและหลายเซลล์ ดังนี้

3.5.2.1 กรณี Photodiode 1 ชุด แบบจำลองสร้างจากสมการที่นำมาเขียน โปรแกรมเพื่อสร้าง library ในโปรแกรม OrCAD ดังแสดงในรูปที่ 3.21 และ รูปที่ 3.22 รูปแบบการ จำลองเซลล์แสงอาทิตย์



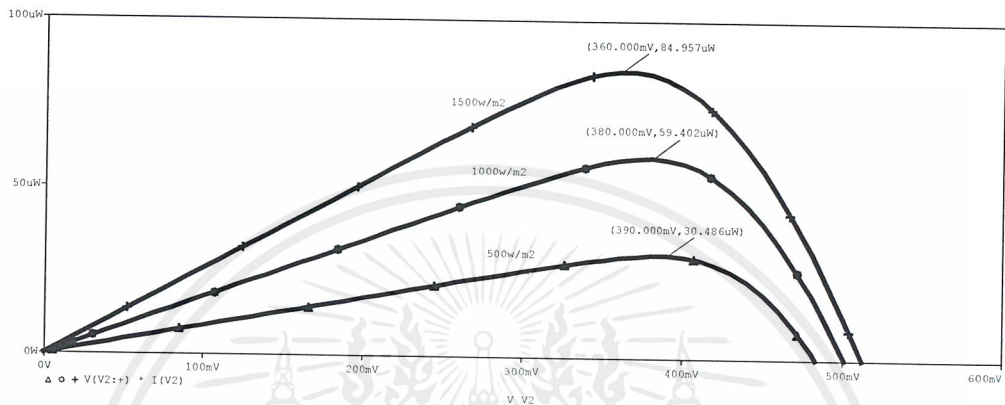
รูปที่ 3.21 แบบจำลอง Photodiode 1 cell ในโปรแกรม Orcad 9.1



รูปที่ 3.22 กราฟ I-V Characteristic ของ Photodiode 1 cell ที่ความเข้มแสง 500 , 1000 , 1500 W/m² ในโปรแกรม Orcad 9.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

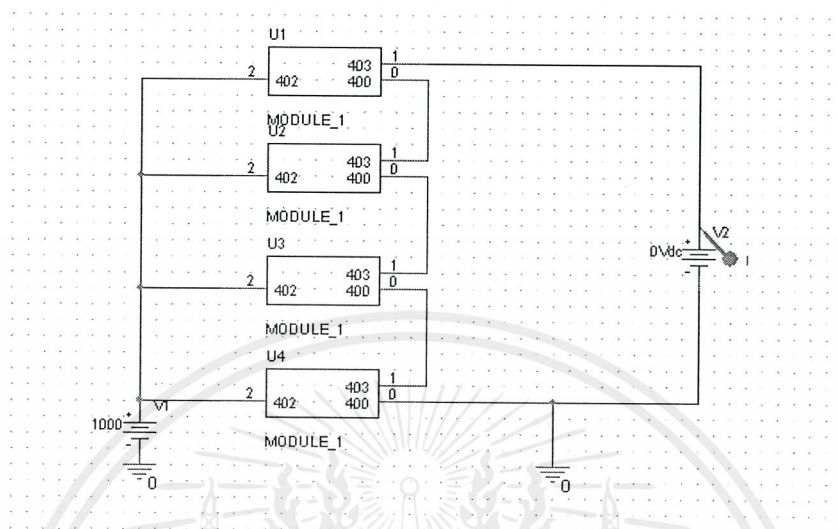
จากกราฟที่แสดง 3.22 เป็นกราฟแสดงกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของโฟโตรีโอด 1 ชุดเท่านั้นโดยแบ่งออกตามความเข้มของแสงคือ 500 , 1000 , 1500 W/m² พบว่าเมื่อความเข้มแสงเพิ่มขึ้นค่ากระแสลัดวงจรและแรงดันเปิดวงจรจะมีค่าเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นไปตามกราฟคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์



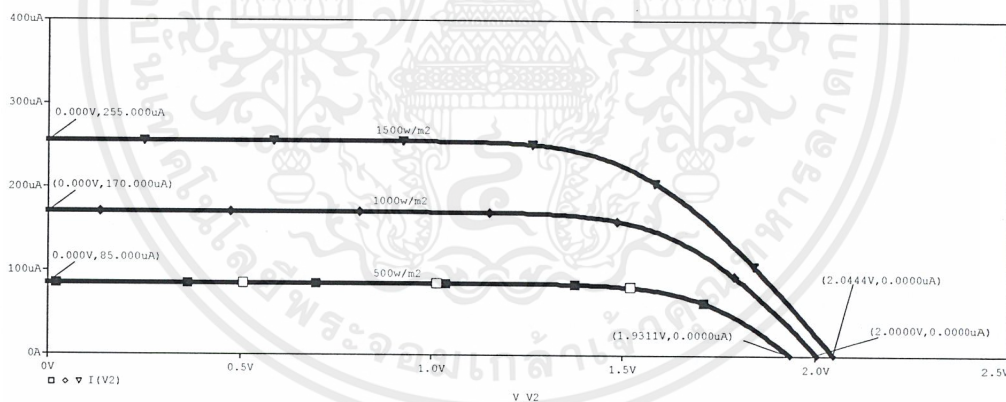
รูปที่ 3.23 กราฟ P-V Characteristic ของ Photodiode 1 cell ที่ความเข้มแสง 500 , 1000 , 1500 W/m² ในโปรแกรม Orcad 9.1

จากกราฟที่แสดง 3.23 เป็นกราฟแสดงกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของโฟโตรีโอด 1 ชุดเท่านั้นโดยแบ่งออกตามความเข้มของแสงคือ 500 , 1000 , 1500 w/m² พบว่าเมื่อความเข้มแสงเพิ่มขึ้นค่ากำลังทางไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นด้วยซึ่งเป็นไปตามกราฟคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

3.5.2.2 กรณี Photodiode 4 ชุด

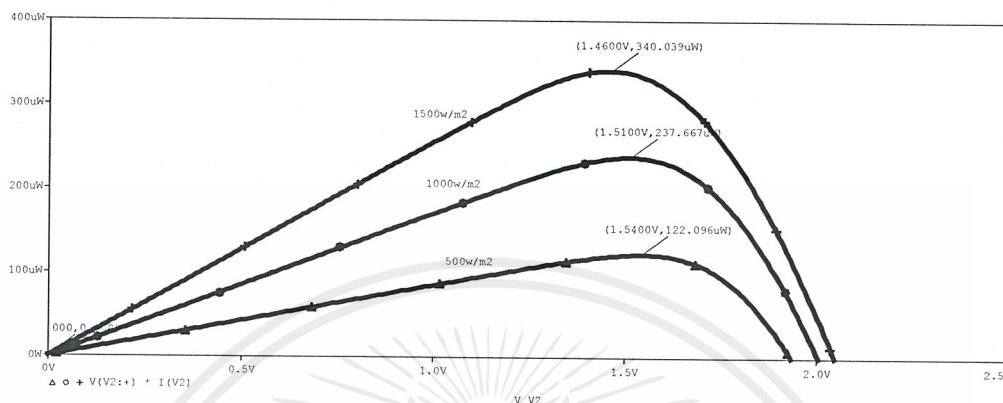


รูปที่ 3.24 วงจร Photodiode 4 Cell อนุกรมในโปรแกรม Orcad 9.1

รูปที่ 3.25 กราฟ I-V Characteristic ของ Photodiode 4 cell อนุกรมที่มีความเข้มแสง 500 , 1000 , 1500 W/m² ในโปรแกรม Orcad 9.1

จากกราฟที่แสดง 3.25 เป็นกราฟแสดงกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของโฟโตนิกไดโอด 4 cell อนุกรม โดยแบ่งออกตามความเข้มของแสงคือ 500 , 1000 , 1500 W/m² พบว่าเมื่อความเข้มแสงเพิ่มขึ้นค่ากระแสลัดวงจรและแรงดันเปิดวงจรจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ

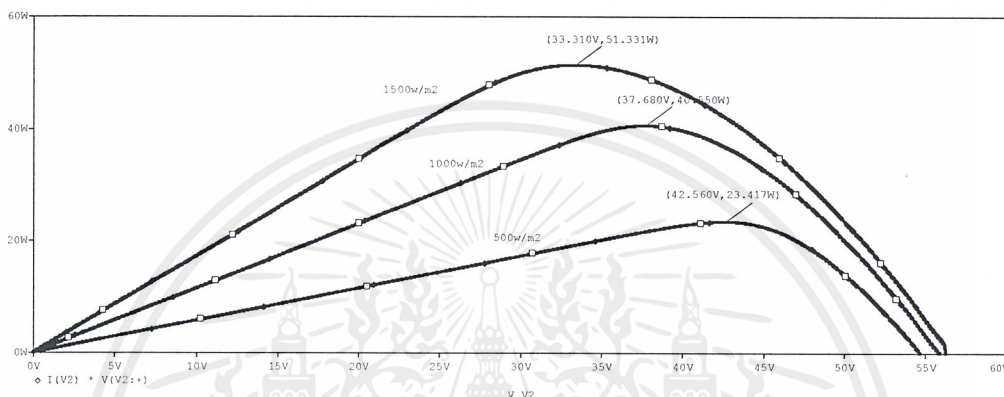
แบบเซลล์เดี่ยวพบว่า กระแสลัดวงจรจะมีค่าเท่ากันเพราะเป็นการต่ออนุกรมกัน ซึ่งเป็นไปตามกราฟคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 3.26 กราฟ P-V Characteristic ของ Photodiode 4 cell อนุกรม ที่ความเข้มแสง 500 , 1000 , 1500 W/m^2 ในโปรแกรม Orcad 9.1

จากกราฟที่แสดง 3.26 เป็นกราฟแสดงกำลังทางไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของโฟโตนิกไดโอด 4 cell อนุกรม โดยแบ่งออกตามความเข้มของแสงคือ 500 , 1000 , 1500 W/m^2 พบว่าเมื่อความเข้มแสงเพิ่มขึ้นค่ากำลังทางไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นไปตามกราฟคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

จากกราฟที่แสดง 3.27 เป็นวงจรรขยายโฟโต้ไดโอด 4 cell อนุกรมในโปรแกรม orcad 9.1 ส่วนในรูปที่ 3.28 เป็นกราฟแสดงกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของวงจรรขยายโฟโต้ไดโอด 4 cell อนุกรมโดยแบ่งออกตามความเข้มของแสงคือ 500 , 1000 , 1500 W/m² พบว่าเมื่อความเข้มแสงเพิ่มขึ้นค่ากระแสลัดวงจรและแรงดันเปิดวงจรจะมีค่าเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นไปตามกราฟคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 3.29 กราฟ P-V Characteristic ของวงจรรขยาย Photodiode 4 cell อนุกรม ที่ความเข้มแสง 500 , 1000 , 1500 W/m² ในโปรแกรม Orcad 9.1

จากกราฟที่แสดง 3.29 เป็นกราฟแสดงกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของวงจรรขยายโฟโต้ไดโอดโดยแบ่งออกตามความเข้มของแสงคือ 500 , 1000 , 1500 W/m² พบว่าเมื่อความเข้มแสงเพิ่มขึ้นค่ากำลังทางไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นไปตามกราฟคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

3.6 สรุป

จากการศึกษาคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ในบทนี้ พบว่าแนวโน้มที่จะเกิดปัจจัยสภาพแวดล้อมรอบข้าง เช่น ลักษณะการเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์ ความเข้มของแสง ซึ่งปัจจัยเหล่านี้ส่งผลต่อคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งนั้น ด้วยเหตุผลเหล่านี้ปริญาพนธ์เล่มนี้จึงได้ทำการจำลองวงจรรเซลล์แสงอาทิตย์ในโปรแกรมและสร้างวงจรรจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ขึ้นได้จริงโดยอาศัยหลักการออกแบบต่างๆ ดังที่ได้กล่าวมาในบทนี้

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 บทนำ

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดสอบตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่นำผลจากการจำลองในโปรแกรม Orcad 9.1 มาทำวงจรถจริง โดยเนื้อหาหลักๆ ในบทนี้จะประกอบเป็นหัวข้อดังต่อไปนี้

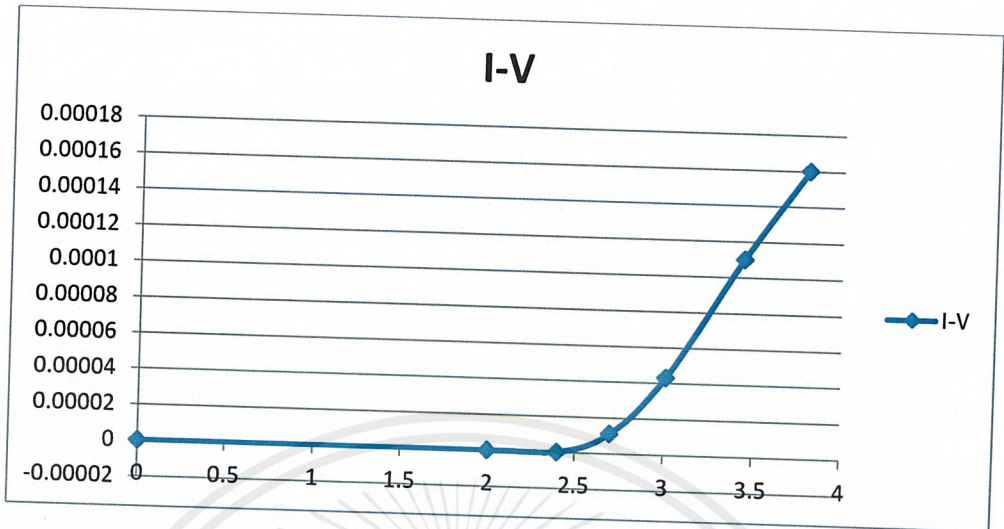
- การทดสอบโฟโตโวลตาอิกในโหมด Photovoltaic
- การทดสอบตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ในสภาวะเปิดวงจรถ
- ผลการทดลองจากวงจรถจำลองเซลล์แสงอาทิตย์จริง
- ผลการทดสอบจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์จริง
- การแสดงผลกราฟคุณลักษณะทางไฟฟ้าของวงจรถจำลองเซลล์แสงอาทิตย์

4.2 การทดสอบโฟโตโวลตาอิกในโหมด Photovoltaic

จากการออกแบบการจำลองเซลล์อาทิตย์ ซึ่งเลือกการใช้ใช้โฟโตโวลตาอิกในการสร้างสัญญาณอ้างอิงแทนเซลล์แสงอาทิตย์ เราจึงได้มีการทดสอบคุณลักษณะทางไฟฟ้าของโฟโตโวลตาอิกเพื่อศึกษาว่าโฟโตโวลตาอิกสามารถให้คุณลักษณะทางไฟฟ้าเหมือนเซลล์แสงอาทิตย์จริงเมื่อมีการทำงานในสภาวะการจ่ายโหลด โดยการทดสอบแบ่งออกได้เป็น

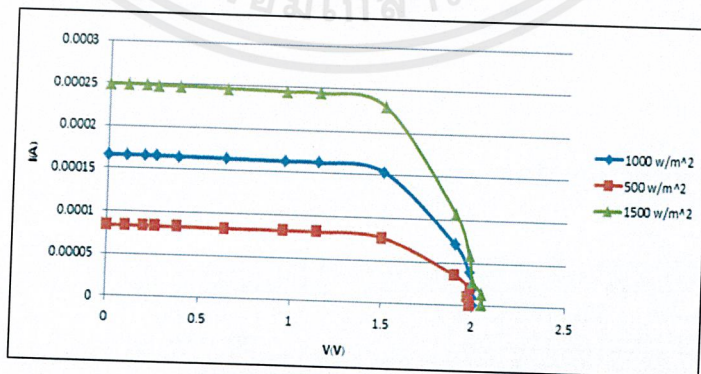
- ทดสอบกระแสไฟฟ้ลัดวงจรถเมื่อเปลี่ยนความเข้มแสง
- ทดสอบคุณลักษณะทางไฟฟ้าเมื่อมีการเปลี่ยนความเข้มแสง

4.2.1 การทดสอบกระแสไฟฟ้ลัดวงจรถเมื่อเปลี่ยนความเข้มแสง เมื่อเพิ่มค่าแรงดันไฟฟ้าให้กับ LED ปรากฏว่าความเข้มแสงที่ส่องสว่างไปยังตัวโฟโตโวลตาอิกมีค่าเพิ่มมากขึ้น เมื่อทำการวัดค่ากระแสลัดวงจรถพบว่ามีความเข้มแสงตามค่าความเข้มแสง ดังรูปที่ 4.1

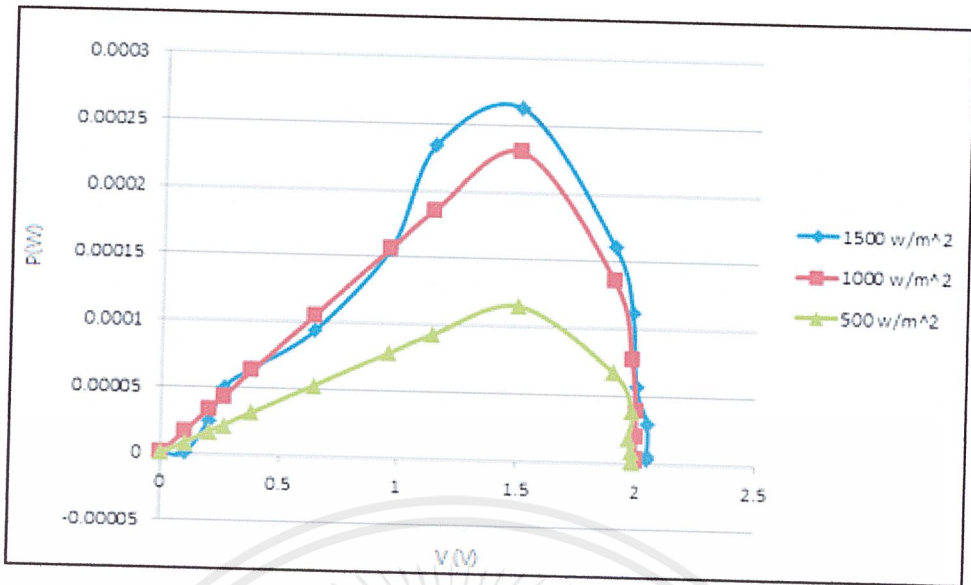


รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าลัดวงจรกับแรงดันตกคร่อมหลอด LED

4.2.2 การทดสอบคุณลักษณะทางไฟฟ้าเมื่อทำการเปลี่ยนความเข้มแสง การทดสอบโฟโตไดโอด เมื่อมีการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้ LED มากขึ้นจะทำให้ความเข้มแสงที่ส่องสว่างไปยังโฟโตไดโอดมีค่าเพิ่มมากขึ้นด้วย ซึ่งผลจะทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรของโฟโตไดโอดมีค่ามากขึ้น รวมไปถึงค่าแรงดันเปิดวงจรของโฟโตไดโอดมีค่าเพิ่มมากขึ้น เมื่อนำมาเก็บข้อมูลและทำการหาค่ากำลังไฟฟ้า นำมาพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับค่ากำลังไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า โดยแต่ละกราฟมีการเพิ่มค่าความเข้มแสงจะทำให้เราพบว่า การเพิ่มค่าความเข้มแสงสว่างก็จะทำให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดเพิ่มมากขึ้น ดังแสดงในรูป 4.2 และ 4.3



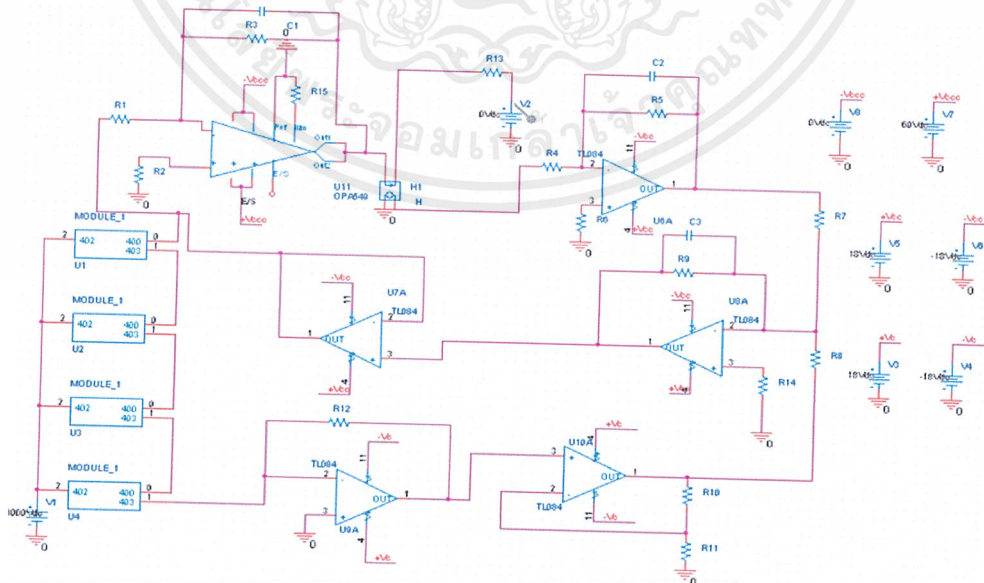
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้าของโฟโตไดโอดในโหมด Photovoltaic



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับกำลังไฟฟ้าของโฟโต้ไดโอดในโหมด Photovoltaic

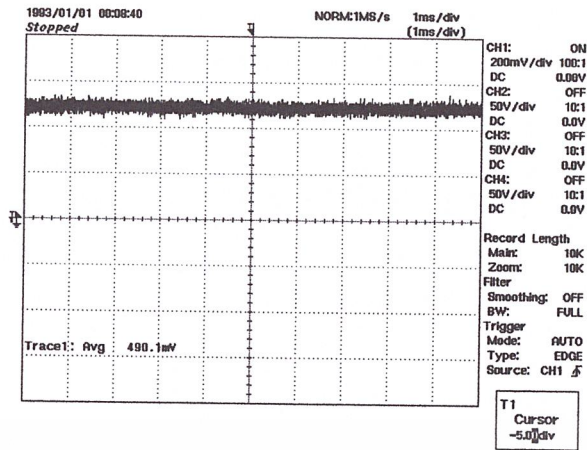
4.3 การทดสอบตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ในสภาวะเปิดวงจร

จากการออกแบบวงจรจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ เราเลือกออกแบบให้ตัวจำลองมีสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ 60 โวลต์ โดยในการทดสอบตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ในสภาวะเปิดวงจรนั้นแสดงในรูปที่ 4.4 เป็นการวัดสัญญาณแรงดันเอาต์พุตของโฟโต้ไดโอด ดังแสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.4 ลักษณะการวัดแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรของโฟโต้ไดโอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 กราฟแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากโฟโต้ไดโอดในออสซิลโลสโคป

4.4 ผลการทดลองจากวงจรจำลองเซลล์แสงอาทิตย์จริง

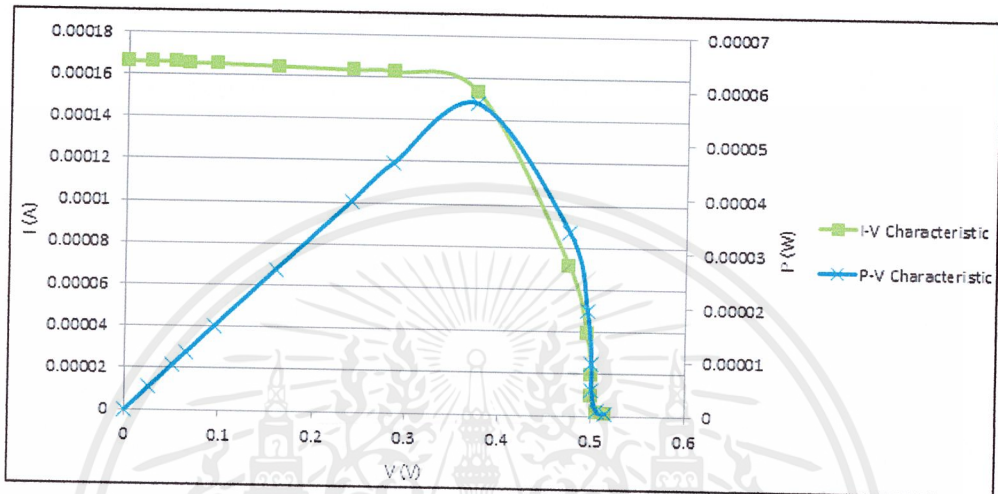
ในหัวข้อนี้จะเป็นการนำผลการทดสอบในสภาพแวดล้อมที่ต่างๆ กัน เช่น ความเข้มของแสงต่างกัน ซึ่งค่าที่ได้จากการทดลองมีผลดังนี้

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองของโฟโต้ไดโอด 1 เซลล์

I (A)	V (V)	P (W)
9E-07	0.515	4.635E-07
1.8E-06	0.505	0.00000909
9.7E-06	0.5	0.00000485
1.93E-05	0.5	0.00000965
3.92E-05	0.495	0.000019404
7.14E-05	0.475	0.000033915
0.000154	0.375	5.75625E-05
0.000163	0.285	0.000046341
0.000163	0.24	0.000039144
0.000164	0.16	0.000026288
0.000165	0.095	0.000015694
0.000165	0.065	1.07445E-05
0.000166	0.05	0.00000829
0.000166	0.025	4.1475E-06
0.000166	0	0

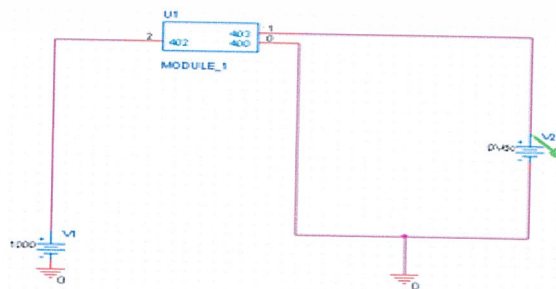
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.1 เป็นผลที่ได้จากการวัดค่ากระแสไฟฟ้า แรงดันทางไฟฟ้า แล้วหาค่ากำลังทางไฟฟ้าของตัวโฟโต้ไดโอด 1 ตัวจากกฎของโอห์มแล้วทำการบันทึกค่าในโปรแกรม Microsoft Excel ถ้าสังเกตค่าจากตารางจะพบว่าที่ระดับค่าความต้านทานต่างๆ แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า รวมไปถึงค่ากำลังทางไฟฟ้าจะมีค่าแปรผันกันดังแสดงในกราฟ



รูปที่ 4.6 คุณสมบัติของโฟโต้ไดโอด 1 เซลล์

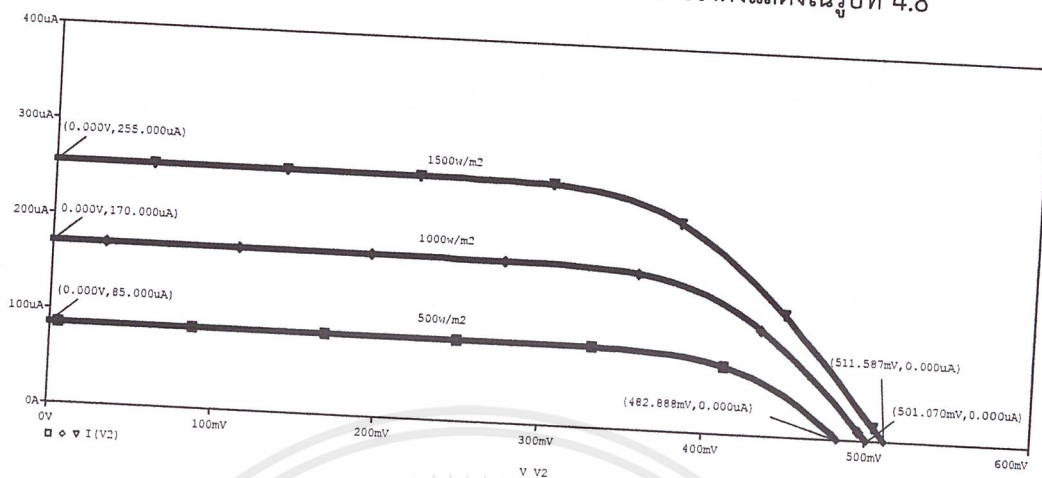
จากกราฟที่แสดง 4.6 เป็นกราฟแสดงกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้ากับกราฟแสดงกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของโฟโต้ไดโอดในสภาพแวดล้อมอุณหภูมิห้อง 25 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่อลดค่าความต้านทาน ค่ากระแสลัดวงจรและแรงดันเปิดวงจรจะมีค่าเพิ่มมากขึ้น และเมื่อพิจารณากราฟแรงดันทางไฟฟ้าและกำลังทางไฟฟ้าก็จะมีลักษณะเหมือนกันซึ่งเป็นไปตามกราฟคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 4.7 แบบจำลองโฟโต้ไดโอดที่สร้างในโปรแกรม Orcad 9.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการจำลองการทำงานของโฟโตไดโอดในรูปที่ 4.7 โฟโตไดโอดสามารถแสดงคุณลักษณะทางไฟฟ้าที่สภาวะการทดสอบได้ใกล้เคียงกับค่าที่วัดจริงดังแสดงในรูปที่ 4.8



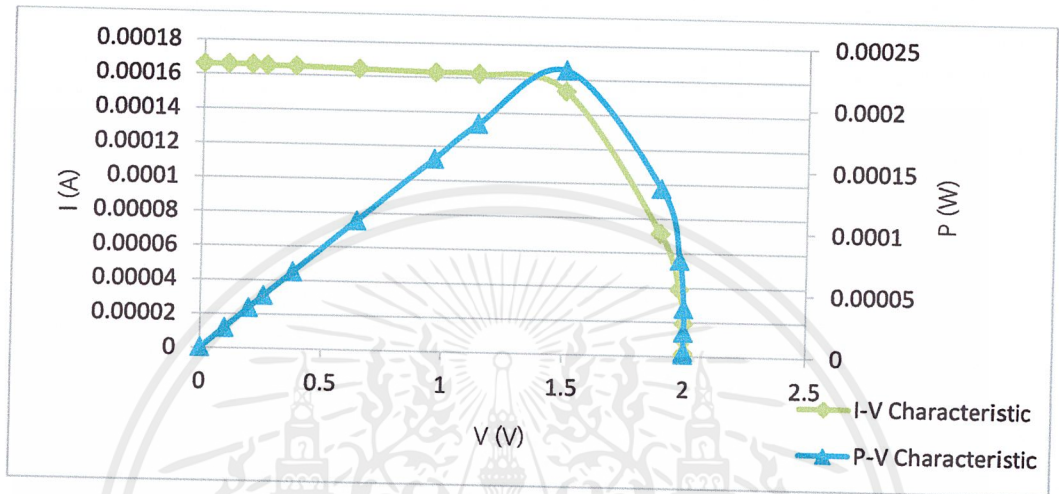
รูปที่ 4.8 กราฟ I-V Characteristic ที่ความเข้มแสง 500 , 1000 , 1500 W/m²
ในโปรแกรม Orcad 9.1

ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองของโฟโตไดโอด 4 เซลล์

I (A)	V (V)	P (W)
9E-07	2	0.0000018
1.8E-06	2	0.0000036
9.7E-06	2	0.0000194
1.93E-05	2	0.0000386
3.92E-05	1.98	0.000077616
7.14E-05	1.9	0.00013566
0.000154	1.5	0.00023025
0.000163	1.14	0.000185364
0.000163	0.96	0.000156576
0.000164	0.64	0.000105152
0.000165	0.38	0.000062776
0.000165	0.26	0.000042978
0.000166	0.2	0.00003316
0.000166	0.1	0.00001659
0.000166	0.002	3.318E-07

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.2 เป็นผลที่ได้จากการวัดค่ากระแสไฟฟ้า แรงดันทางไฟฟ้า แล้วหาค่ากำลังทางไฟฟ้าของตัวโพลีไดโอด 4 ตัวจากกฎของโอห์มแล้วทำการบันทึกค่าในโปรแกรม Microsoft Excell ถ้าสังเกตค่าจากตารางจะพบว่าที่ระดับค่าความต้านทานต่างๆ แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า รวมไปถึงค่ากำลังทางไฟฟ้าจะมีค่าแปรผันกัน



รูปที่ 4.9 คุณลักษณะของโพลีไดโอด 4 เซลล์อนุกรม

จากกราฟที่แสดง 4.9 เป็นกราฟแสดงกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้ากับกราฟแสดงกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของโพลีไดโอดในสภาพแวดล้อมอุณหภูมิห้อง 25 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่อลดค่าความต้านทาน ค่ากระแสลัดวงจรและแรงดันเปิดวงจรจะมีค่าเพิ่มมากขึ้น และเมื่อพิจารณากราฟแรงดันทางไฟฟ้าและกำลังทางไฟฟ้าก็จะมีลักษณะเหมือนกันซึ่งเป็นไปตามกราฟคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบค่าทางไฟฟ้าที่ได้จากการวัดโพลีไดโอด 1 เซลล์กับผลที่ได้จากการวัดโพลีไดโอด 4 เซลล์อนุกรมในแบบจำลองวงจรเซลล์แสงอาทิตย์

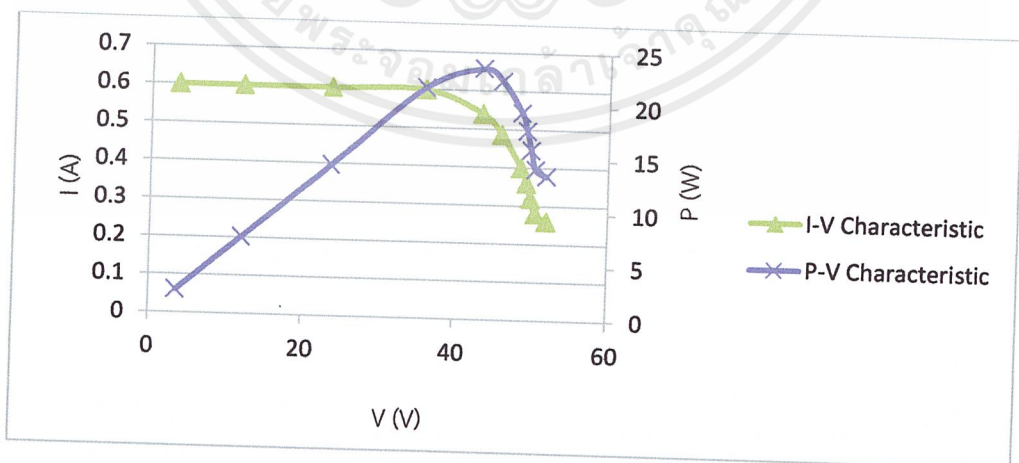
พารามิเตอร์ทางไฟฟ้า	ค่าที่ได้จากการวัดจริง 1 เซลล์	ค่าที่ได้จากแบบจำลองต่อ อนุกรมจำนวน 4 เซลล์
แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร	0.515 โวลต์	2 โวลต์
กระแสไฟฟ้าลัดวงจร	166 ไมโครแอมป์	166 ไมโครแอมป์
กำลังไฟฟ้าสูงสุด	57.5 ไมโครวัตต์	230 ไมโครวัตต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองของโฟโตโวลตาอิกที่ผ่านวงจรถายที่ความเข้ม 500 W/m^2 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

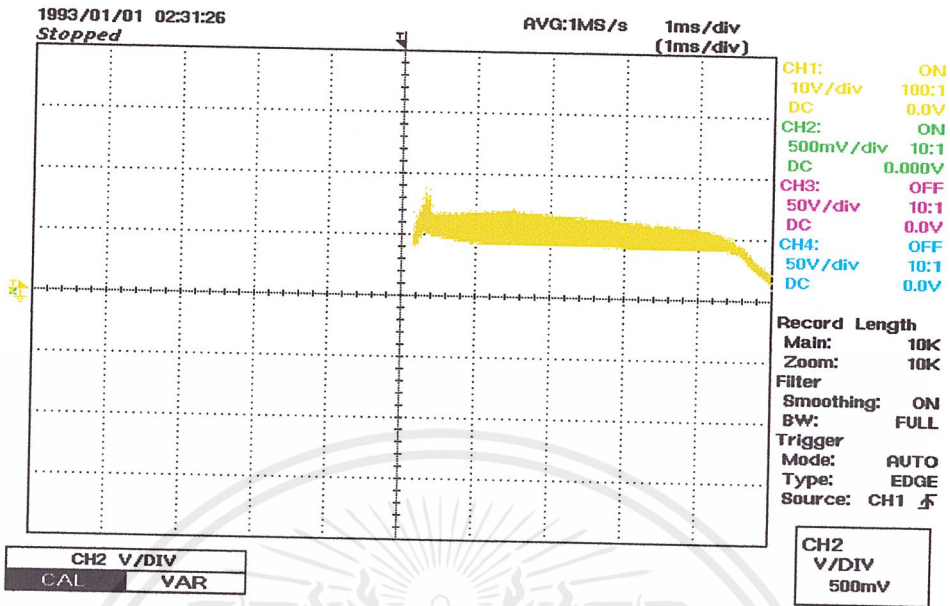
500 W/m ²			
R (Ohm)	V (V)	I (A)	P (W)
200	52	0.26	13.52
180	50.5	0.28	14.14
160	49.9	0.32	15.968
140	49.3	0.36	17.748
120	48.6	0.4	19.44
100	46	0.486	22.356
80	43.5	0.54	23.49
60	36	0.6	21.6
40	23.6	0.6	14.16
20	12	0.6	7.2
5	3.6	0.6	2.16

จากตารางที่ 4.4 เป็นผลที่ได้จากการวัดค่ากระแสไฟฟ้า แรงดันทางไฟฟ้า แล้วหาค่ากำลังทางไฟฟ้าของวงจรถายเซลล์แสงอาทิตย์ในสภาวะแวดล้อมที่มีความเข้มแสง 500 W/m^2 แล้วทำการบันทึกค่าในโปรแกรม Microsoft Excell ดังแสดงในรูปที่ 4.10 ส่วนในรูปที่ 4.11 , 4.12 เป็นรูปการแสดงความในออสซิลโลสโคปภายใต้ความเข้มเดียวกันและรูปที่ 4.13 , 4.14 เป็นการแสดงแรงดันเปิดวงจรและกระแสลัดวงจรภายใต้ค่าความเข้มแสงเท่ากัน ตามลำดับ

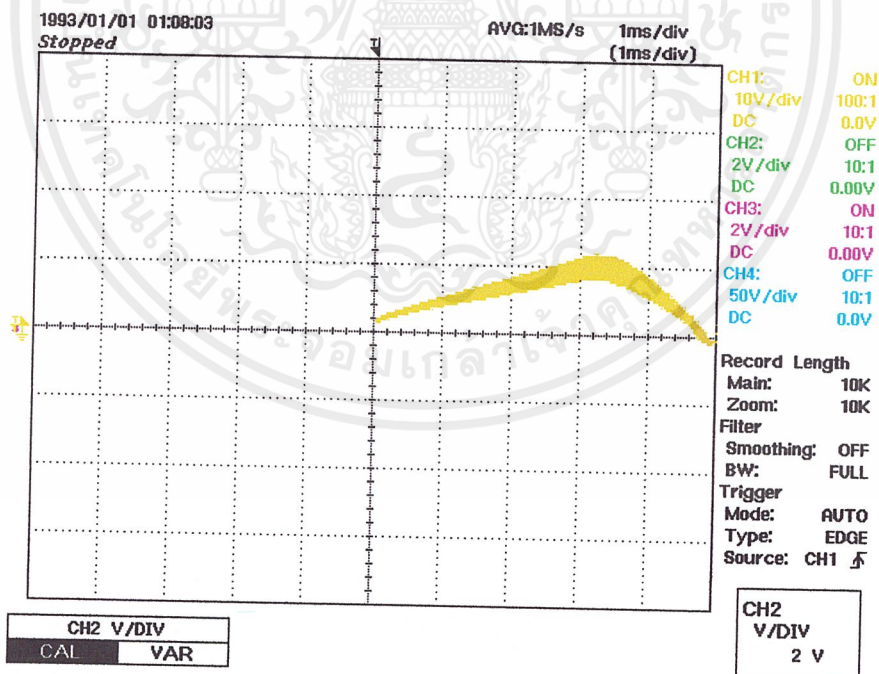


รูปที่ 4.10 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของโฟโตโวลตาอิกที่ผ่านวงจรถายที่ความเข้ม 500 W/m^2 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

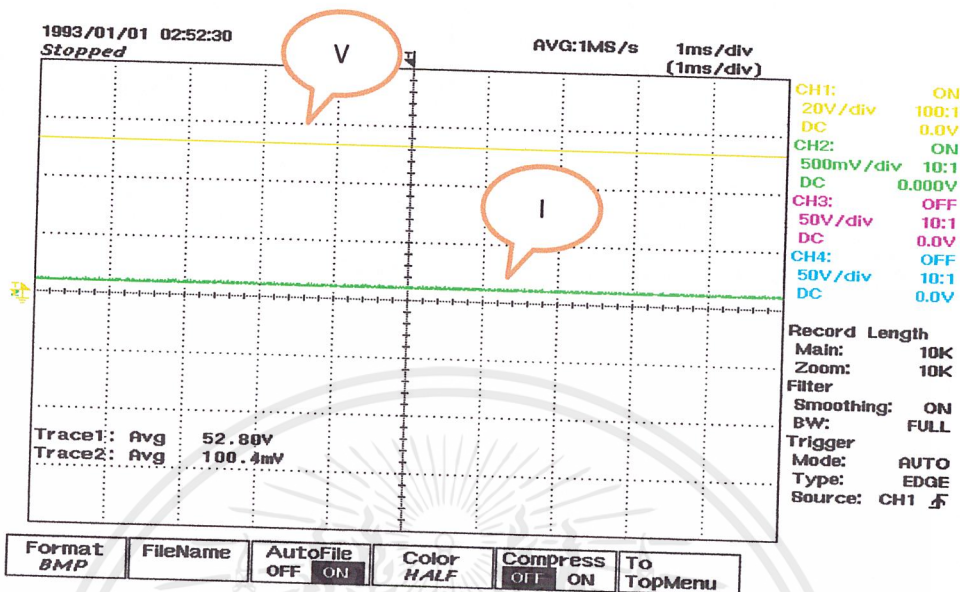


รูปที่ 4.11 กราฟจากออสซิลโลสโคปแรงดันไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้า ในสภาพความเข้ม 500 W/m^2 ที่
อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

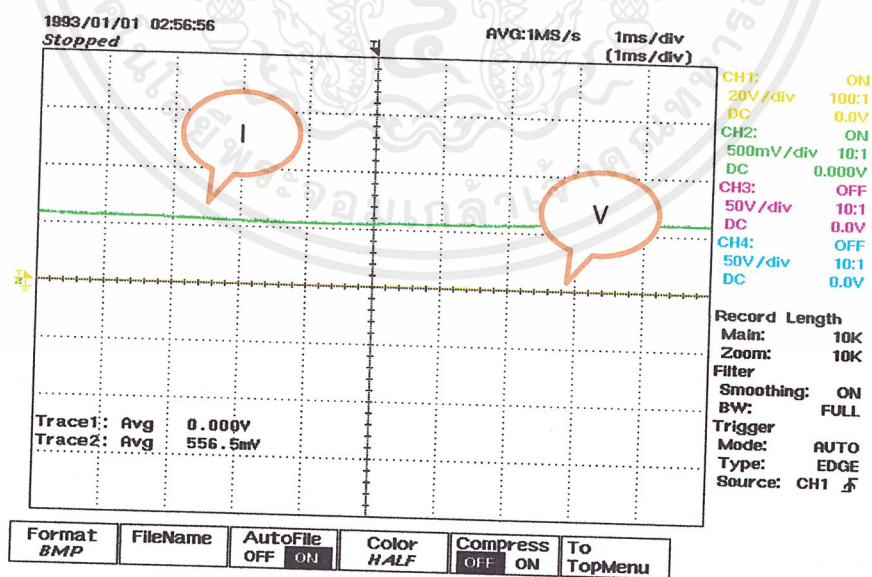


รูปที่ 4.12 กราฟจากออสซิลโลสโคปกำลังไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า ในสภาพความเข้ม 500 W/m^2 ที่
อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 กราฟจากออสซิลโลสโคปแรงดันเปิดวงจร ในสภาพความเข้ม 500 W/m^2 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส



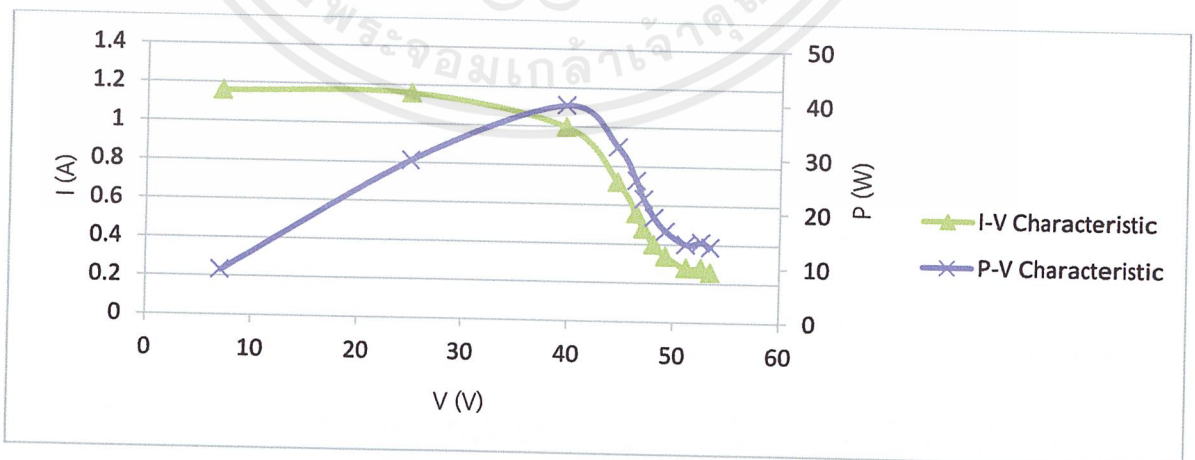
รูปที่ 4.14 กราฟจากออสซิลโลสโคปกระแสลัดวงจร ในสภาพความเข้ม 500 W/m^2 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 ผลการทดลองของโฟโตไดโอดที่ผ่านวงจรรขยายที่ความเข้ม 1000 W/m^2 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

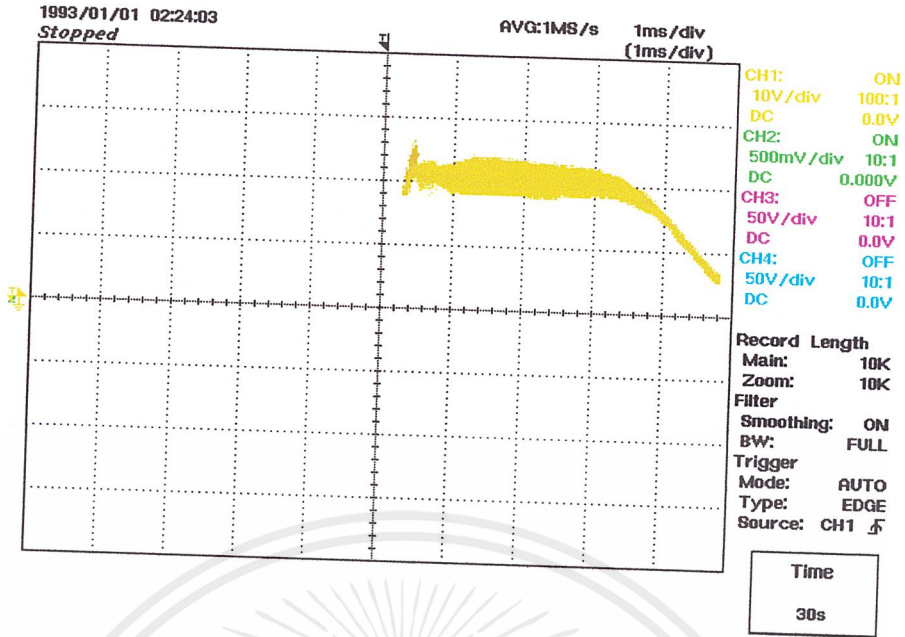
1000 W/m^2			
R (Ohm)	V (V)	P (W)	I (A)
200	53.5	13.91	0.26
180	52.6	14.728	0.28
160	51.2	14.336	0.34
140	49.4	16.728	0.37
120	48.7	19.24	0.4
100	47.1	22.608	0.48
80	46.4	25.984	0.56
60	44.6	32.112	0.72
40	39.7	39.6206	0.998
20	25	29	1.16
5	7.1	8.236	1.16

จากตารางที่ 4.5 เป็นผลที่ได้จากการวัดค่ากระแสไฟฟ้า แรงดันทางไฟฟ้า แล้วหาค่ากำลังทางไฟฟ้าของวงจรถ่วงเซลล์แสงอาทิตย์ในสภาพแวดล้อมที่มีความเข้มแสง 1000 W/m^2 แล้วทำการบันทึกค่าในโปรแกรม Microsoft Excell ดังแสดงในรูปที่ 4.15 ส่วนในรูปที่ 4.16 , 4.17 เป็นรูปการแสดงค่าในออสซิลโลสโคปภายใต้ความเข้มเดียวกัน และรูปที่ 4.18 , 4.19 เป็นการแสดงแรงดันเปิดวงจรและกระแสลัดวงจรภายใต้ค่าความเข้มแสงเท่ากัน ตามลำดับ

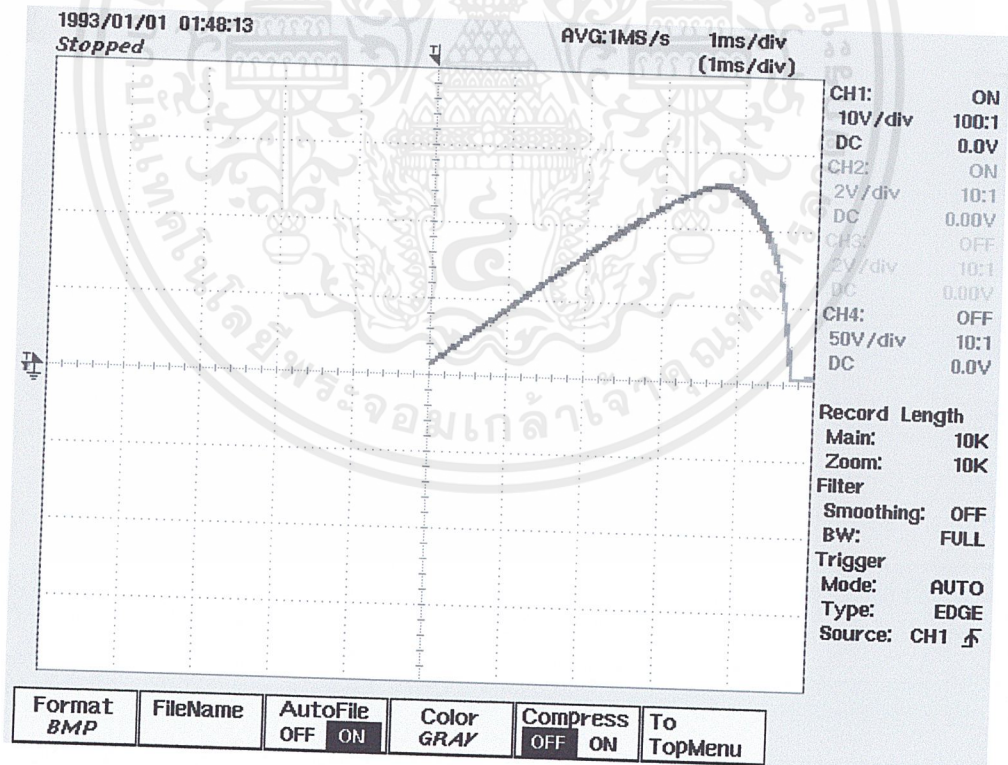


รูปที่ 4.15 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของโฟโตไดโอดที่ผ่านวงจรรขยายที่ความเข้ม 1000 W/m^2 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

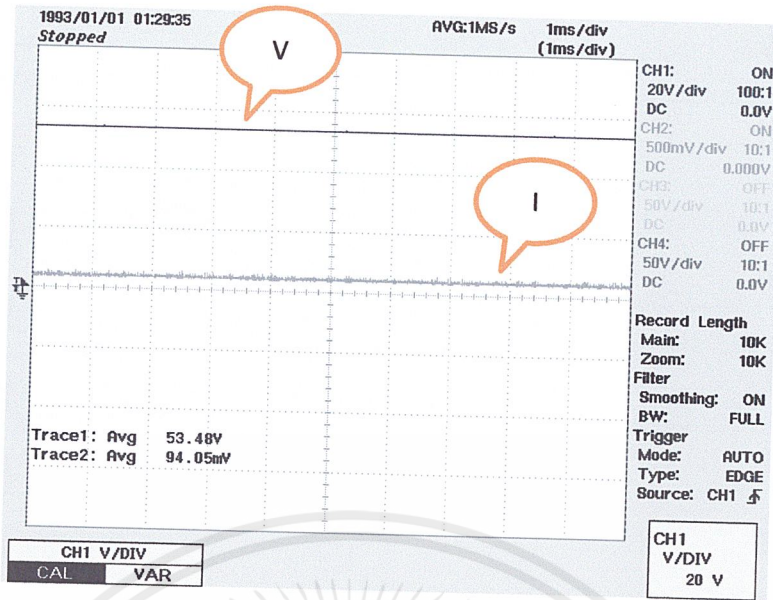


รูปที่ 4.16 กราฟจากออสซิลโลสโคปแรงดันไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้า ในสภาพความเข้ม 1000 W/m^2 ที่
อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

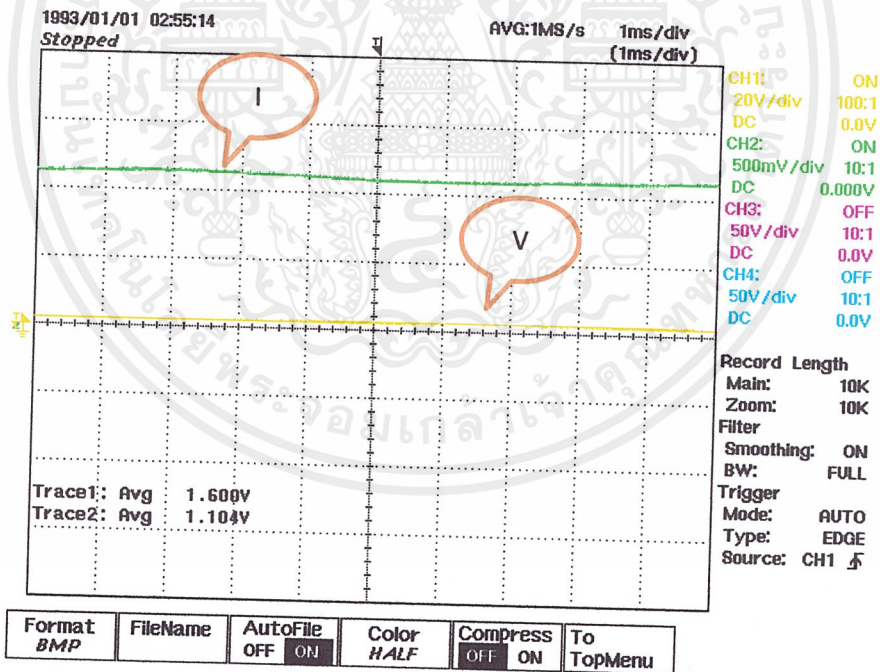


รูปที่ 4.17 กราฟจากออสซิลโลสโคปแรงดันไฟฟ้ากับกำลังไฟฟ้า ในสภาพความเข้ม 1000 W/m^2 ที่
อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 กราฟจากออสซิลโลสโคปแรงดันเปิดวงจร ในสภาพความเข้ม 1000 W/m^2 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส



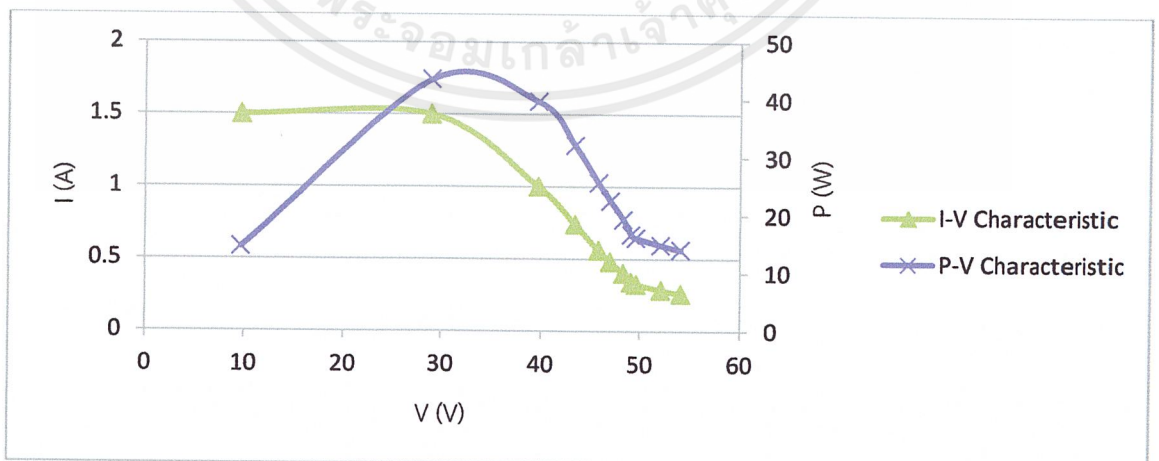
รูปที่ 4.19 กราฟจากออสซิลโลสโคปกระแสลัดวงจรในสภาพความเข้ม 1000 W/m^2 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 ผลการทดลองของโฟโต้ไดโอดที่ผ่านวงจรรขยายที่ความเข้ม 1500 W/m^2 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

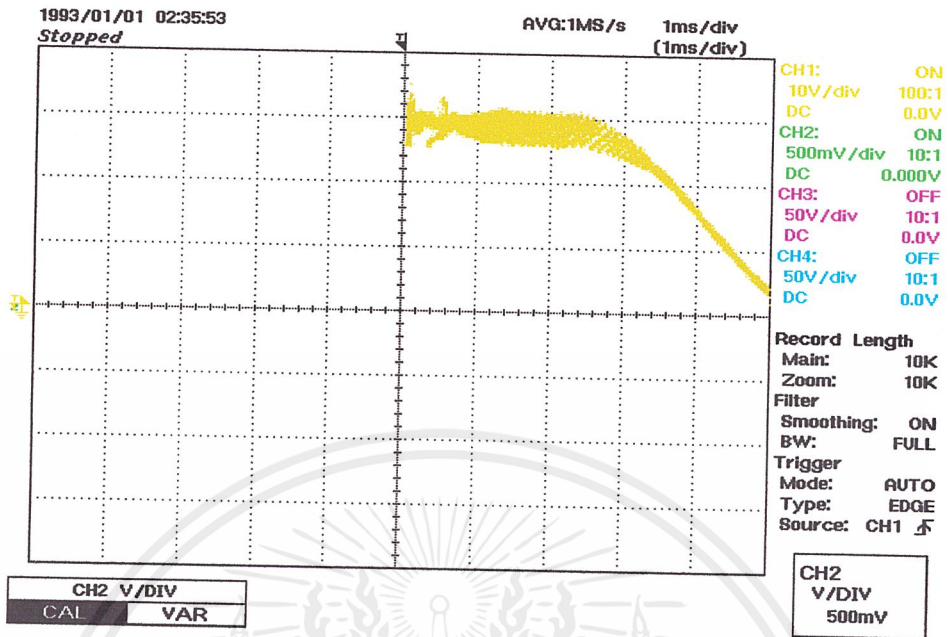
1500 W/m ²			
R (Ohm)	V (V)	P (W)	I (A)
200	54.1	14.066	0.26
180	52.8	14.78	0.286
160	51.4	16.756	0.326
140	49.5	16.83	0.34
120	48.9	19.56	0.4
100	47.5	22.8	0.48
80	46.8	26.208	0.56
60	43.4	32.116	0.74
40	39.7	39.7	1
20	29	43.5	1.5
5	9.7	14.55	1.5

จากตารางที่ 4.6 เป็นผลที่ได้จากการวัดค่ากระแสไฟฟ้า แรงดันทางไฟฟ้า แล้วหาค่ากำลังทางไฟฟ้าของวงจรจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ในสภาพแวดล้อมที่มีความเข้มแสง 1500 W/m^2 แล้วทำการบันทึกค่าในโปรแกรม Microsoft Excell ดังแสดงในรูปที่ 4.20 ส่วนรูปที่ 4.21, 4.22 เป็นรูปการแสดงค่าในออสซิลโลสโคปภายใต้ความเข้มเดียวกัน และรูปที่ 4.23 , 4.24 เป็นการแสดงแรงดันเปิดวงจรและกระแสลัดวงจรภายใต้ค่าความเข้มแสงเท่ากัน ตามลำดับ

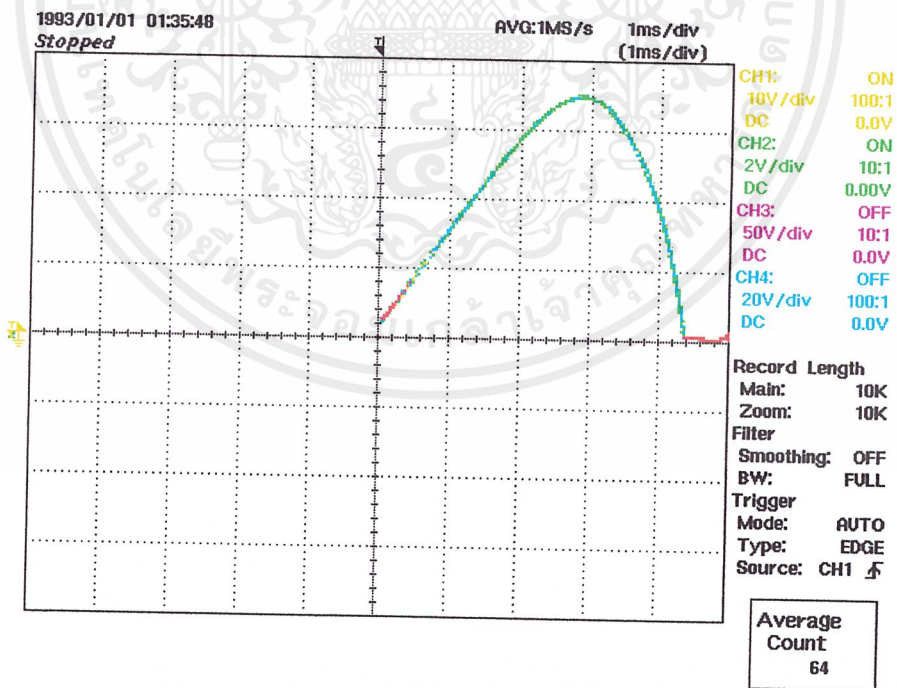


รูปที่ 4.20 คุณลักษณะทางไฟฟ้าของโฟโต้ไดโอดที่ผ่านวงจรรขยายที่ความเข้ม 1500 W/m^2 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

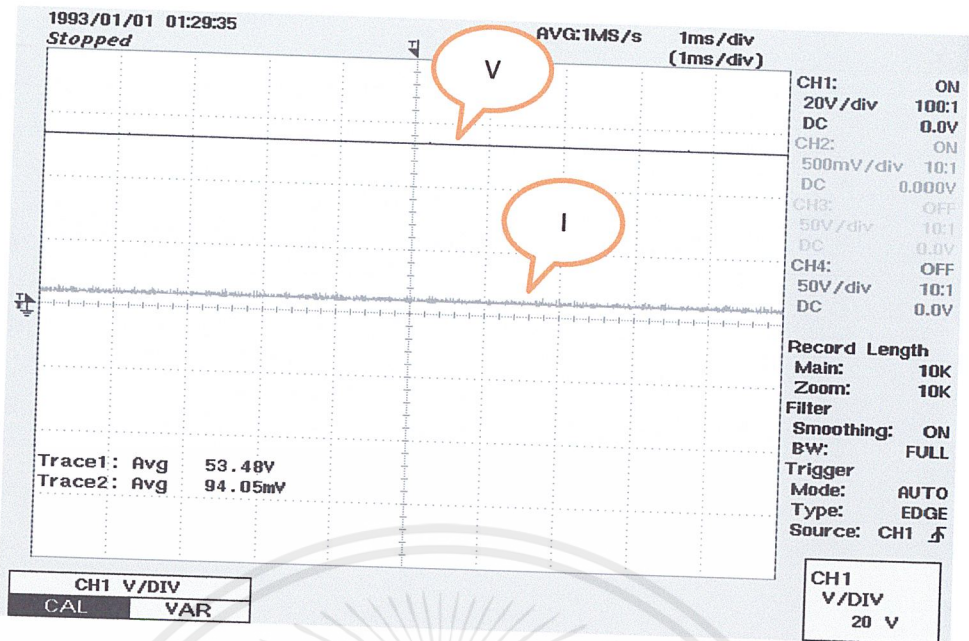


รูปที่ 4.21 กราฟจากออสซิลโลสโคประหว่างแรงดันไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้า ในสภาพความเข้ม 1500 W/m^2 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

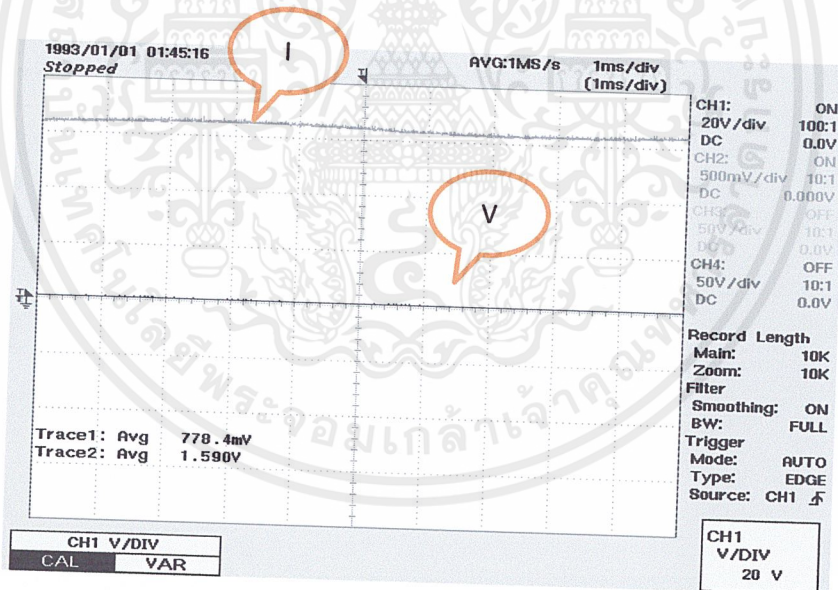


รูปที่ 4.22 กราฟจากออสซิลโลสโคประหว่างกำลังไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า ในสภาพความเข้ม 1500 W/m^2 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.23 กราฟจากออสซิลโลสโคปแรงดันเปิดวงจร ในสภาพความเข้ม 1500 W/m^2 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

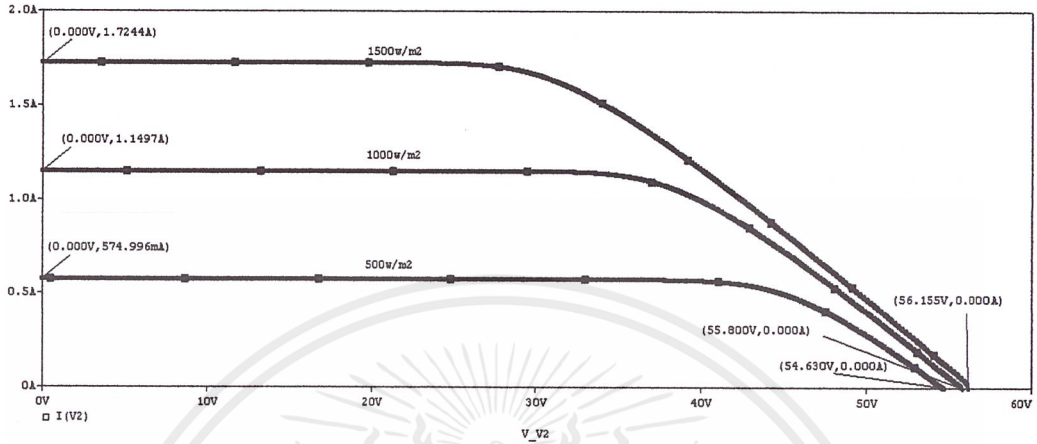


รูปที่ 4.24 กราฟจากออสซิลโลสโคปกระแสลัดวงจร ในสภาพความเข้ม 1500 W/m^2 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

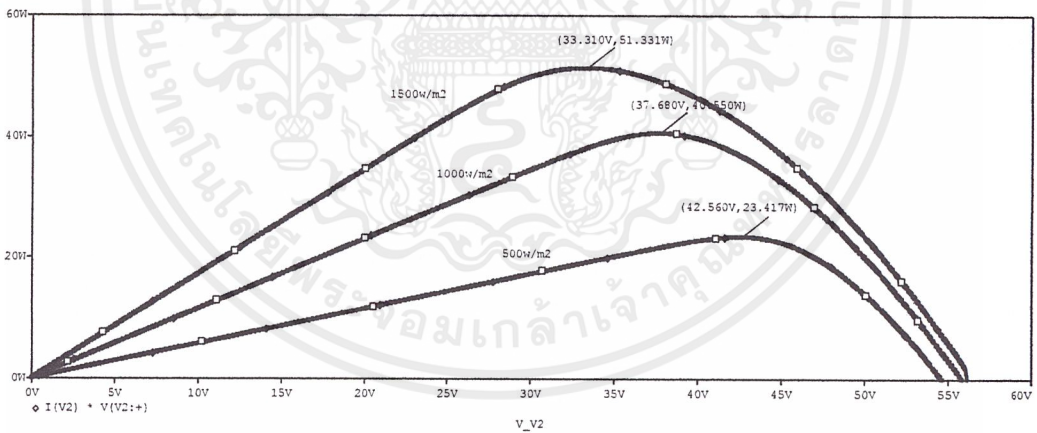
จากผลการทดลองที่กล่าวมาข้างบนเป็นการแสดงค่าในโปรแกรม Microsoft Excel และ ค่ากราฟที่ได้จากออสซิลโลสโคป พบว่ากราฟที่ได้จะมีค่าใกล้เคียงกับกราฟที่ได้จากวงจรที่เราจำลองใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรม Orcad 9.1 ดังแสดงในรูปที่ 4.25 กราฟแรงดันไฟฟ้ากับกับกระแสไฟฟ้า และ รูปที่ 4.26 กราฟกำลังไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า



รูปที่ 4.25 กราฟ I-V Characteristic ที่ความเข้มแสง 500 , 1000 , 1500 W/m² แสดงในโปรแกรม Orcad 9.1



รูปที่ 4.26 กราฟ P-V Characteristic ที่ความเข้มแสง 500 , 1000 , 1500 W/m² แสดงในโปรแกรม Orcad 9.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการจำลองการทำงานเซลล์แสงอาทิตย์มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงในระดับที่ต่างกัน กระแสลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นตามความเข้มแสงดังแสดงในรูปที่ 4.26 เมื่อพิจารณาที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่เป็นผลการจำลองเซลล์แสงอาทิตย์เปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จากการวัดเซลล์แสงอาทิตย์จริงพบว่ามีความคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ไม่มีการนำคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของเซลล์แสงอาทิตย์ ดังแสดงให้เห็นในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 เปรียบเทียบค่าทางไฟฟ้าที่ได้จากการวัดเซลล์แสงอาทิตย์จริงที่สภาวะการทดสอบ

พารามิเตอร์ทางไฟฟ้า	ค่าที่ได้จากการวัดจริง	ค่าที่ได้จากแบบจำลอง	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน
แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร	62.5 V	54 V	13.6
กระแสไฟฟ้าลัดวงจร	1.15A	1.15 A	0
กำลังไฟฟ้าสูงสุด	40 W	39.6 W	1

ตารางที่ 4.8 อัตราขยายกระแสไฟฟ้าลัดวงจรของตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ 40 W

ความเข้มแสง (W/m^2)	กระแสไฟฟ้าลัดวงจร (A)		
	โฟโตไดโอด	ตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์	อัตราขยาย A_i (dB)
1500	255×10^{-6}	1.7244	76.61
1000	170×10^{-6}	1.1497	76.60
500	85×10^{-6}	574.996×10^{-3}	76.60

ตารางที่ 4.9 อัตราขยายแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรของตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ 40 W

ความเข้มแสง (W/m^2)	แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (V)		
	โฟโตไดโอด	ตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์	อัตราขยาย A_v (dB)
1500	2.0450	56.150	28.77
1000	2.0000	55.630	28.89
500	1.9300	54.630	29.04

จากตารางที่ 4.8 และ 4.9 พบว่าตัวจำลองที่ได้ออกแบบไว้มีอัตราขยายแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าค่อนข้างคงที่ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมทั้งความเข้มแสง อุณหภูมิที่จุดทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ แต่ทั้งนี้ยังมีขีดจำกัดเรื่องอุปกรณ์ที่นำมาใช้เป็นชุดขยายกำลังทางไฟฟ้าซึ่งขีดจำกัดดังกล่าวส่งผลกระทบต่อโดยตรงกับเอาต์พุทของตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์

4.5 ผลการทดสอบจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์จริง

ในการจำลองได้เลือกใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์รุ่น BS40 ของบริษัท บางกอกโซลาร์ จำกัด ซึ่งเป็นเซลล์แบบอะมัลฟัสซิลิกอนที่มีการต่อเซลล์แบบอนุกรมจำนวน 39 เซลล์ ดังแสดงในรูปที่ 4.24 โดยค่าพารามิเตอร์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แสดงในตารางที่ 4.10 ในตารางที่ 4.11 จะเป็นตารางพิกัดไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ จากข้อมูลที่ได้จากตารางที่ 4.11 สามารถสร้างแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ให้มีคุณลักษณะทางไฟฟ้าเทียบเท่ากับเซลล์แสงอาทิตย์จริงได้ดังตารางที่ 4.12



รูปที่ 4.27 ลักษณะแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ รุ่น BS 40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.10 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
Max series fuse rating	4 A
Max system voltage	600 V
Fill Factor	0.55

ตารางที่ 4.11 ข้อมูลเฉพาะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์รุ่น BS 40

ข้อมูลเฉพาะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์รุ่น BS40	
กำลังไฟฟ้าสูงสุด	40 วัตต์
แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร	62.5 โวลต์
กระแสไฟฟ้าลัดวงจร	1.15 แอมป์

ตารางที่ 4.12 ข้อมูลเฉพาะของเซลล์แต่ละตัวที่ต่ออนุกรมกันในแผงเซลล์แสงอาทิตย์ BS 40

ข้อมูลเฉพาะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์	
กำลังไฟฟ้าสูงสุด	1.02 วัตต์
แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร	1.59 โวลต์
กระแสไฟฟ้าลัดวงจร	1.15 แอมป์

ในการจำลองการทำงานอาศัยแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่ออนุกรม 39 เซลล์ในแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ BS 40 จึงได้นำแผงเซลล์แสงอาทิตย์มาวัดค่าหาค่ากระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้า โดยวัดที่สภาพค่าความเข้มแสง 700 วัตต์ต่อตารางเมตรดังแสดงค่าในตารางที่ 4.13 ส่วนตารางที่ 4.14 เป็นค่าที่วัดจากวงจรจำลองเซลล์แสงอาทิตย์

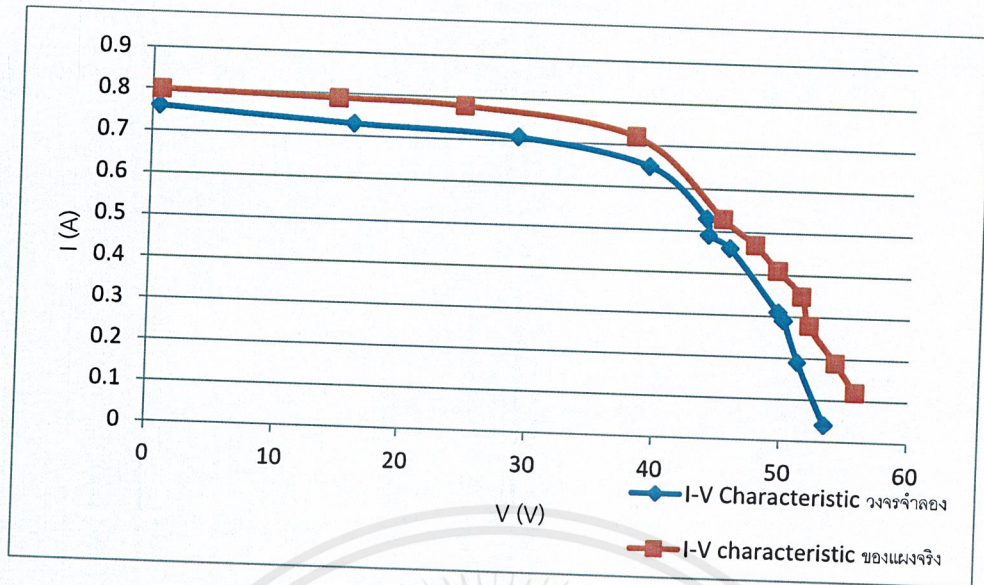
ตารางที่ 4.13 ค่าที่วัดจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ BS 40 ที่ความเข้มแสง 700 วัตต์ต่อตารางเมตร

R (Ohm)	V (V)	I (A)	P (W)
0	0.69	0.8	0.552
20	14.64	0.79	11.5656
40	24.68	0.78	19.2504
60	38.2	0.72	27.504
80	45.2	0.53	23.956
100	47.8	0.47	22.466
120	49.6	0.41	20.336
140	51.5	0.35	18.025
160	52.15	0.28	14.602
180	54.3	0.19	10.317
200	55.9	0.12	6.708

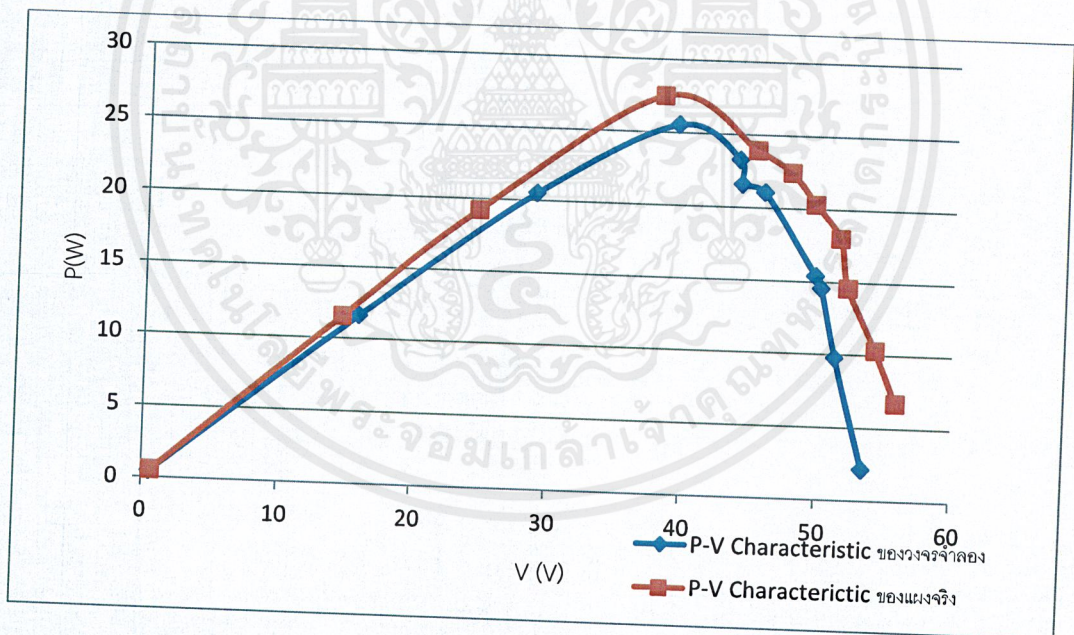
ตารางที่ 4.14 ค่าที่วัดจากวงจรจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ความเข้มแสง 700 วัตต์ต่อตารางเมตร

R	V	I	P
0	0.57	0.76	0.4332
20	15.9	0.73	11.607
40	28.9	0.71	20.519
60	39.3	0.65	25.545
80	43.9	0.53	23.267
100	44.1	0.49	21.609
120	45.8	0.46	21.068
140	49.7	0.31	15.407
160	50.14	0.29	14.5406
180	51.3	0.19	9.747
200	53.5	0.04	2.14

จากการวัดค่าทั้งจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์และวงจรจำลองเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อนำมาพล็อตเปรียบเทียบกัน ได้ดังแสดงในรูปที่ 4.28 เป็นการเปรียบเทียบค่ากราฟกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าส่วนในรูปที่ 4.29 เป็นรูปเปรียบเทียบค่ากราฟกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า



รูปที่ 4.28 กราฟเปรียบเทียบ I-V Characteristic ของแผงเซลล์อาทิตย์
กับวงจรจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ความเข้ม 700 วัตต์ต่อตารางเมตร



รูปที่ 4.29 กราฟเปรียบเทียบ P-V Characteristic ของแผงเซลล์อาทิตย์
กับวงจรจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ความเข้ม 700 วัตต์ต่อตารางเมตร

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

จากการทำปริญญานิพนธ์เล่มนี้ ได้เสนอหลักการออกแบบวงจรจำลองเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้เซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิงสรุปเป็นหัวข้อสำคัญดังนี้

- การศึกษาการทำงานของตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยโปรแกรม Orcad 9.1
- การออกแบบและสร้างตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์
- ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา

5.1 การศึกษาการทำงานของตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยโปรแกรม Orcad 9.1

การจำลองแบบวงจรเซลล์แสงอาทิตย์โดยต้องมีคุณลักษณะทางไฟฟ้าที่คล้ายกับเซลล์จำลองแสงอาทิตย์จริง ทำงานได้ตามสภาพที่เปลี่ยนไป แต่เนื่องจากแบบจำลองเป็นการสร้างจากสมการของวงจรสมมูลอย่างง่ายซึ่งไม่นำเอาลักษณะโครงสร้างของสารกึ่งตัวนำออกมาออกแบบทำให้อำนาจไฟฟ้าสูงสุดที่ได้จากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์มีความคลาดเคลื่อน

การจำลองแบบวงจรเซลล์แสงอาทิตย์ พบว่าแบบจำลองให้อัตราขยายตามแรงดันไฟฟ้าตามที่ได้ออกแบบไว้ ในการควบคุมจุดทำงานของแบบจำลองสามารถให้อัตราขยายกระแสที่ถูกต้องมีขีดจำกัดของกระแสที่กระแสไฟฟ้ลัดวงจรเท่านั้น และแบบจำลองสามารถแสดงเอาท์พุทได้ตามที่ออกแบบ แต่เนื่องจากแบบจำลองที่ได้ออกแบบในโปรแกรมเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ผลลัพธ์ที่ออกมาเป็นค่าทางคณิตศาสตร์ จึงไม่มีผลที่เกิดขึ้นจากสัญญาณรบกวน ดังนั้นในการออกแบบจึงต้องคำนึงด้วย

5.2 การออกแบบและสร้างตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์

จากผลการทดลองพบว่าโฟโตไดโอดรุ่น BS520 สามารถใช้เป็นเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิงได้ แต่เนื่องจากในการสร้างตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์สัญญาณที่ได้จากโฟโตไดโอดมีขนาดเล็กมากทำให้ไม่สามารถตรวจจับสัญญาณได้อย่างต่อเนื่องจะส่งผลกระทบต่ออัตราการขยายกระแสไฟฟ้า ในการเลือกใช้อุปกรณ์ในวงจรขยายกำลังต้องใช้โอปแอมป์ที่สามารถทนแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าได้สูงเพื่อค่าเอาท์พุทที่ได้จะตรงตามที่ได้ออกแบบไว้

จากการทดลองที่ค่าความเข้มแสง 700 วัตต์ต่อตารางเมตรพบว่า ค่ากระแสลัดวงจรมีค่าใกล้เคียงกัน แต่ค่าแรงดันเปิดวงจรจะมีค่าต่างกัน เนื่องจาก วงจรที่เราใช้จะใช้ LED เป็นตัวจ่ายแสงเมื่อมีการใช้งานในระยะเวลาที่นานขึ้นจะทำให้อุณหภูมิของโฟโตไดโอดสูงขึ้น เป็นเหตุให้ค่าแรงดันเปิดวงจรของวงจรจำลองมีค่าน้อยกว่าค่าจริงที่ได้ทดลองจากแผงเซลล์ ซึ่งค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ได้จากวงจรจำลองก็จะมีค่าน้อยกว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์จริงด้วยเช่นกัน

5.3 การศึกษาการทำงานของตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์

ในการทำวงจรตามที่ได้ออกแบบไว้ในโปรแกรม Orcad 9.1 จะได้ออกกราฟคุณลักษณะทางไฟฟ้าที่คล้ายกับผลการออกแบบในโปรแกรมโดยมีหลักการพิจารณาดังนี้

ในสภาพแวดล้อมที่มีค่าความเข้มไฟฟ้าที่ต่างๆ กัน เมื่อค่าความเข้มไฟฟ้ามีค่าเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลกระทบต่อ ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นด้วย

ในสภาพแวดล้อมที่มีค่าความต้านทานที่ต่างๆ กัน พบว่าเมื่อลดค่าความต้านทานทางไฟฟ้าค่ากระแสไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มมากขึ้น แต่ทางกลับกันค่าแรงดันทางไฟฟ้าจะมีค่าลดลงเป็นไปตามกฎของโอห์ม

5.4 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา

จากการจำลองพบว่าตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์สามารถนำไปใช้งานในการออกแบบการติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ เนื่องจากตัวจำลองสามารถแสดงคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ได้

ในการสร้างวงจรขยายกระแสไฟฟ้าควรมีการคำนวณเกี่ยวกับสัญญาณรบกวนเนื่องจากผลจากขนาดของสัญญาณเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิงที่มีขนาดเล็ก ซึ่งส่งผลต่อการออกแบบตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์โดยตรง

ในการปรับจูนพารามิเตอร์ต่างๆ ควรคำนึงถึงอุปกรณ์ ในกรณีแรงดันอินพุทและเอาต์พุทห้ามเกินขนาดที่กำหนด และการปรับค่าแรงดัน current sensor 1 และ current sensor 2 ควรมีความต่างกันน้อยมาก โดยให้ current sensor 1 มีค่ามากกว่า current sensor 2 ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจะมากขึ้นหรือขึ้นกับการตั้งค่าแรงดัน LED หากยังมีความเข้มแสงเริ่มต้นมากนั้นคือแรงดันตกคร่อมมาก ความคลาดเคลื่อนและค่าความผิดพลาดจะน้อยลง กราฟคุณลักษณะจะมีค่าความถูกต้องมากยิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

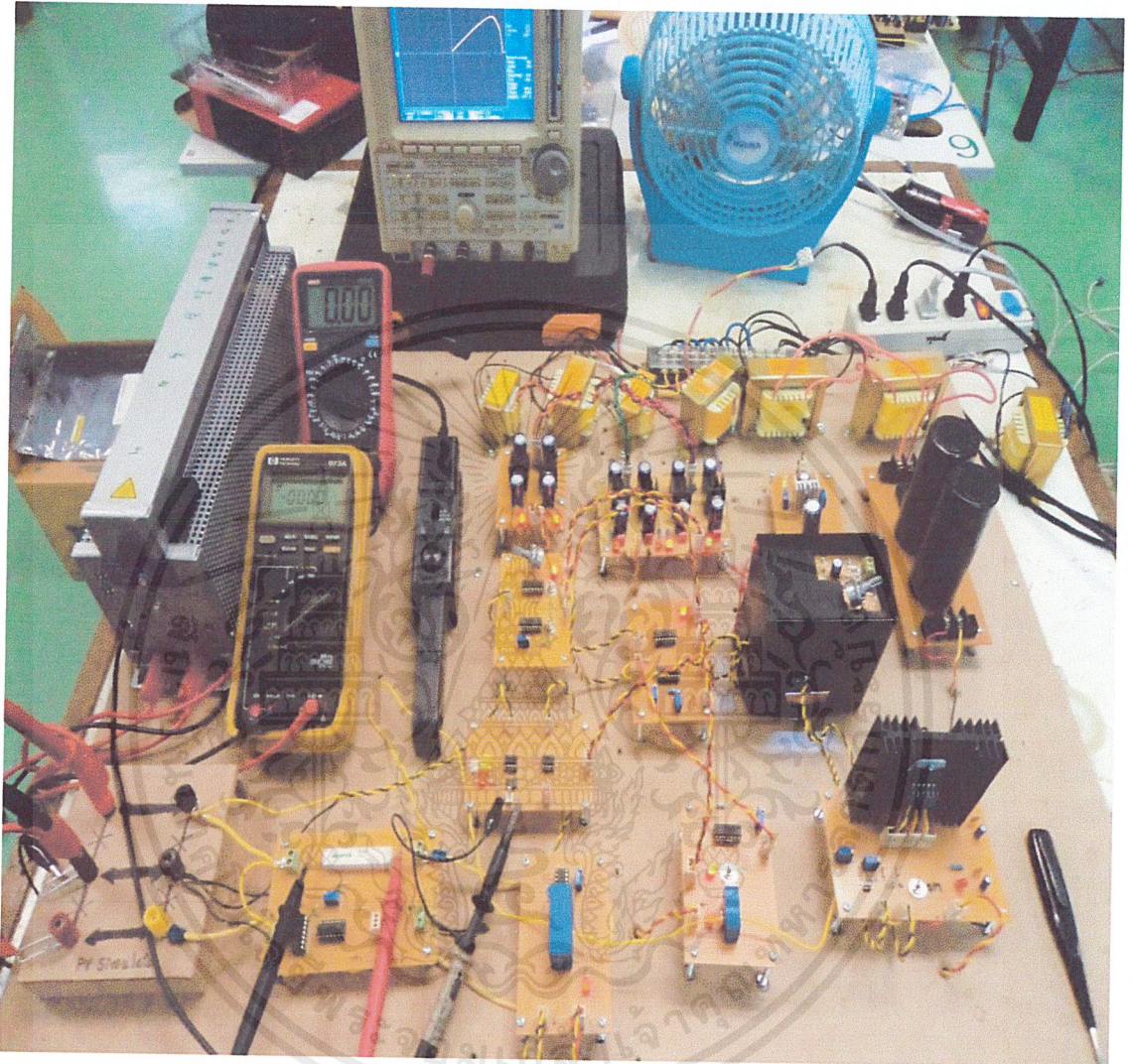
- [1] http://www.thaienergydata.in.th/econtent/upload_pic/1190198489.pdf
- [2] http://www.ces.kmutt.ac.th/cssc2012/cssc_tranning/doc/Installer_CH1toCH5.pdf
- [3] http://eng.rmutsv.ac.th/coen/sunya_web/pe/chapter7.pdf
- [4] เอก เอื้อตระการวิวัฒน์, วิมิชัย ชูรักัน, วิจิตร กิณเรศ “แบบจำลอง แหล่งจ่ายไฟจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกต้อง” ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [5] KAME KHOUZAM and KEITH HOFFMAN “**REAL-TIME SIMULATION OF PHOTOVOLTAIC MODULES**” Queensland University of Technology, School of Electrical and Electronic Systems Engineering, GPO Box 2434, Brisbane, QLD 4001, Australia
- [6] Isao Takahashi (IEEE member) Takashi Sakurai Itaru Andoh “Development of a Simple Photovoltaic System for Interconnection of Utility Power System” Isao Takahashi (IEEE member) Takashi Sakurai Itaru Andoh Department of electric and electronic engineering Nagaoka University of Technology 1603-1 Kamitomioka, Nagaoka, Japan 940-2 1 Phone :+81 -258-46-6000F,a x:+8 1-2.58-46-6506
- [7] Hiroshi Nagayoshi', Shinji Orio, Yuji Kono, and Hirotaka Nakajima “**NOVEL PV ARRAY(MODULE I-V CURVE SIMULATOR CIRCUIT**” Shonan Institute of Technology, 1-1-25, Nishikaigan, Fujisawa, Kanagawa. Japan
- [8] Brikishna Shankar Kukami, Senior Member, IEEE, Cham Yew Thean, Member, IEEE and Au Wing Kong, Eric “**A Novel PC Based Solar Electric Panel Simulator**” Electronics, Temasek Engineering School, Temasek Polytechnic, Singapore
- [9] Guillermo Martin-Segura, Joaquim López-Mestre, Miquel Teixidó-Casas, Antoni Sudrià-Andreu “Development of a Photovoltaic Array Emulator System based on a Full-Bridge Structure” Centre of Technological Innovation in Static Converters and Drives (CITCEA-UPC) Electrical Engineering Department , Polytechnic University of Catalonia Av. Diagonal, 647 2nd floor 08028 Barce guillermo.martin@citcea.upc.edu



ภาคผนวก ก.

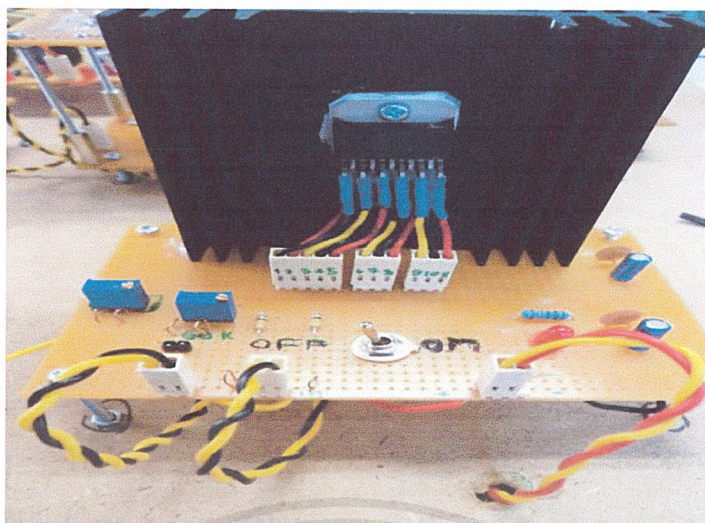
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปชุดทดลอง ชุดจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic Simulation)

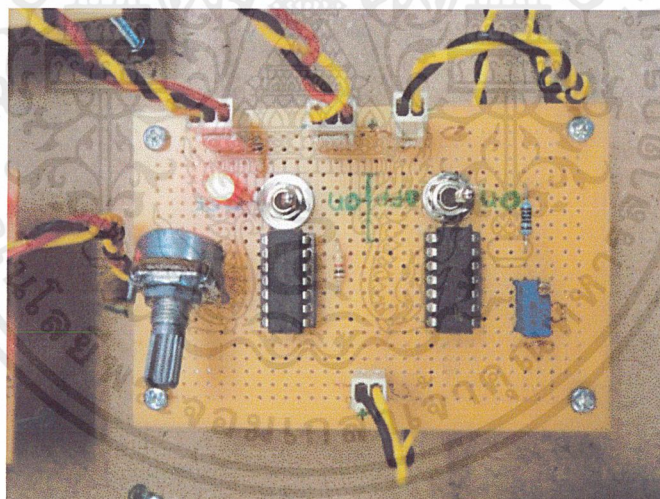


วงจรจำลองเซลล์แสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

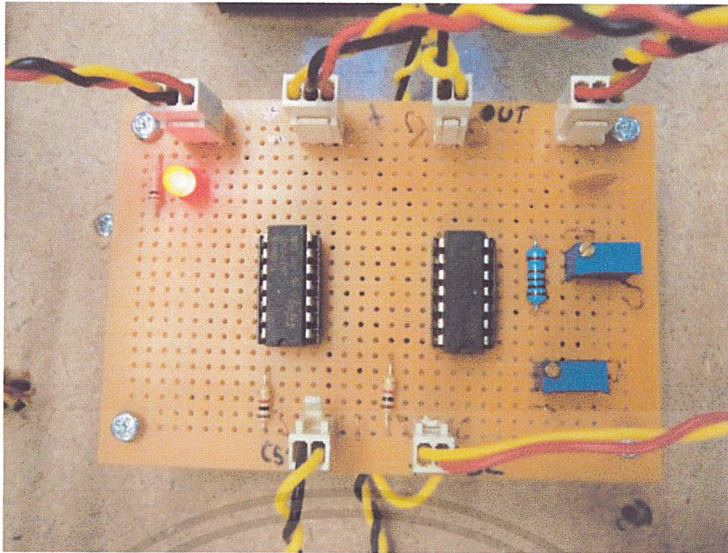


วงจขยายกำลัง OPA 549

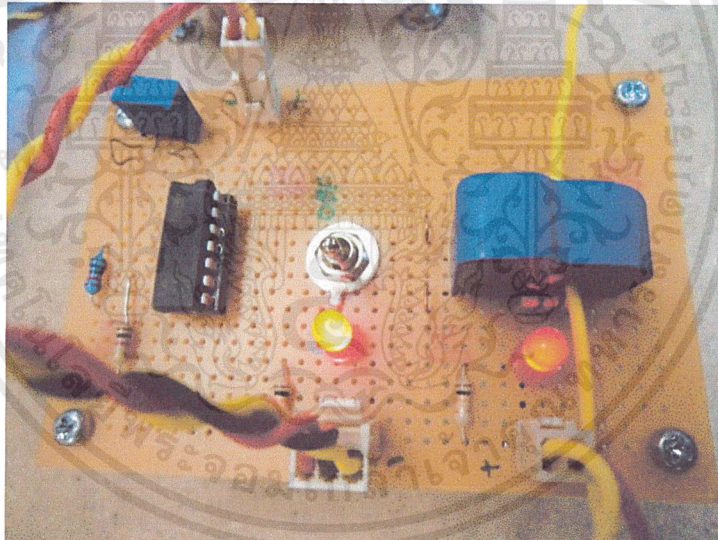


วงจรชุด Current sensor 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

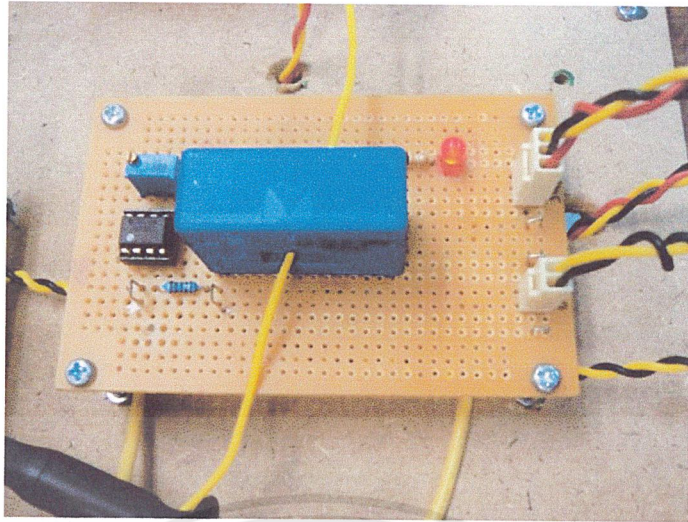


วงจรถูด DC BIAS

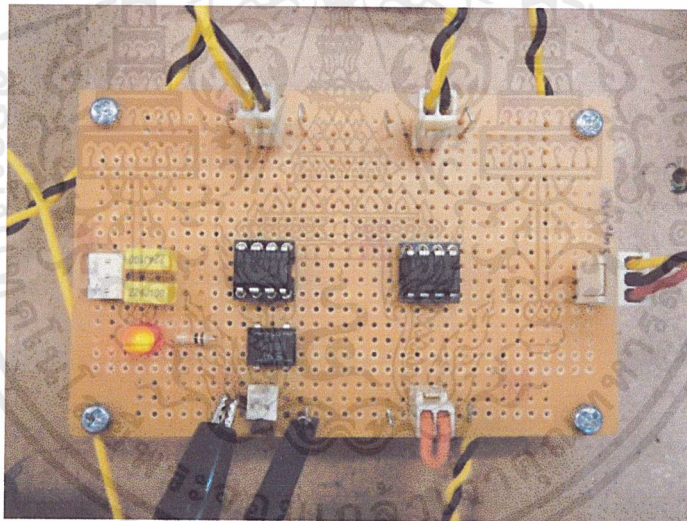


วงจรถูด Current sensor 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

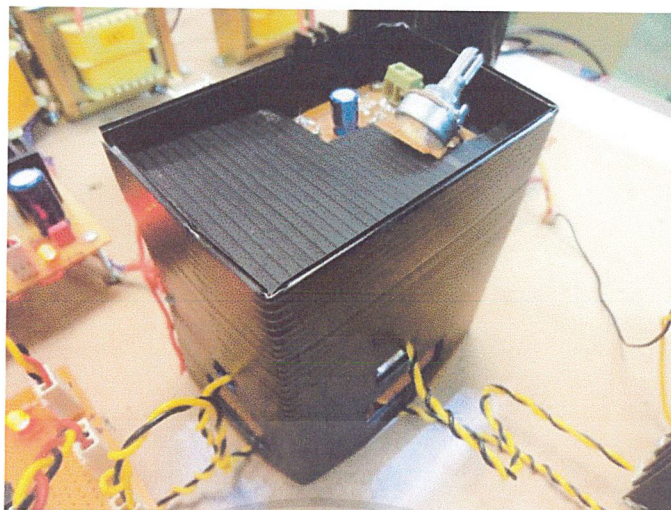


LEM วงจรตรวจจับกระแส



วงจรคูณแรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ชุดไฟโต้ไดโอด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



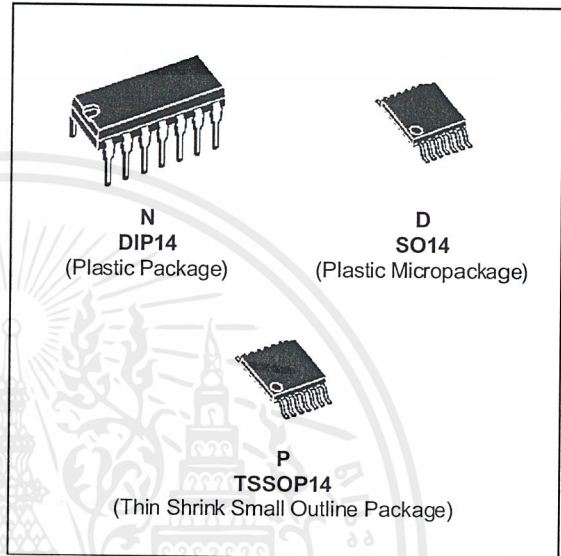
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



TL084 TL084A - TL084B

GENERAL PURPOSE J-FET QUAD OPERATIONAL AMPLIFIERS

- WIDE COMMON-MODE (UP TO V_{CC}^+) AND DIFFERENTIAL VOLTAGE RANGE
- LOW INPUT BIAS AND OFFSET CURRENT
- OUTPUT SHORT-CIRCUIT PROTECTION
- HIGH INPUT IMPEDANCE J-FET INPUT STAGE
- INTERNAL FREQUENCY COMPENSATION
- LATCH UP FREE OPERATION
- HIGH SLEW RATE : $16V/\mu s$ (typ)



DESCRIPTION

The TL084, TL084A and TL084B are high speed J-FET input quad operational amplifiers incorporating well matched, high voltage J-FET and bipolar transistors in a monolithic integrated circuit.

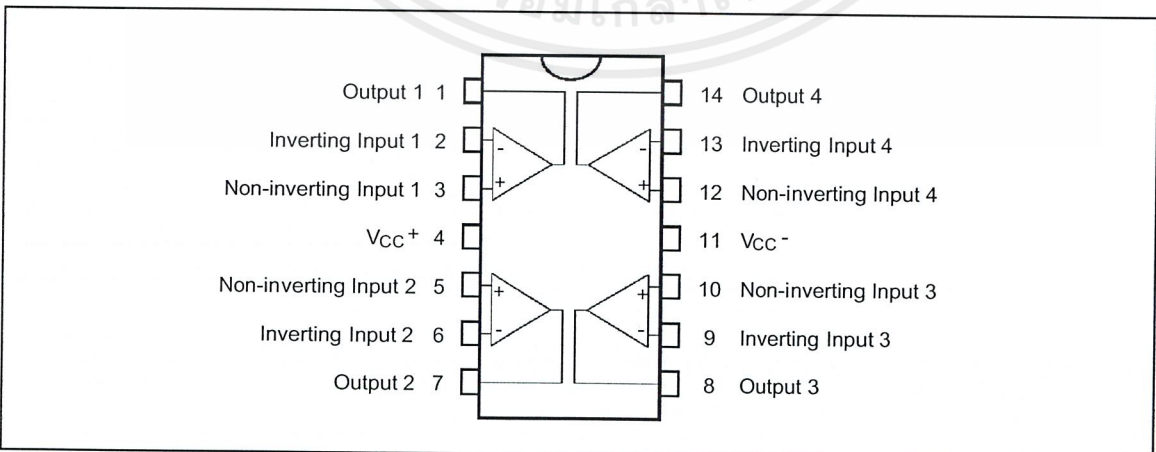
The devices feature high slew rates, low input bias and offset currents, and low offset voltage temperature coefficient.

ORDER CODES

Part Number	Temperature Range	Package		
		N	D	P
TL084M/AM/BM	-55°C, +125°C	•	•	•
TL084I/AI/BI	-40°C, +105°C	•	•	•
TL084C/AC/BC	0°C, +70°C	•	•	•

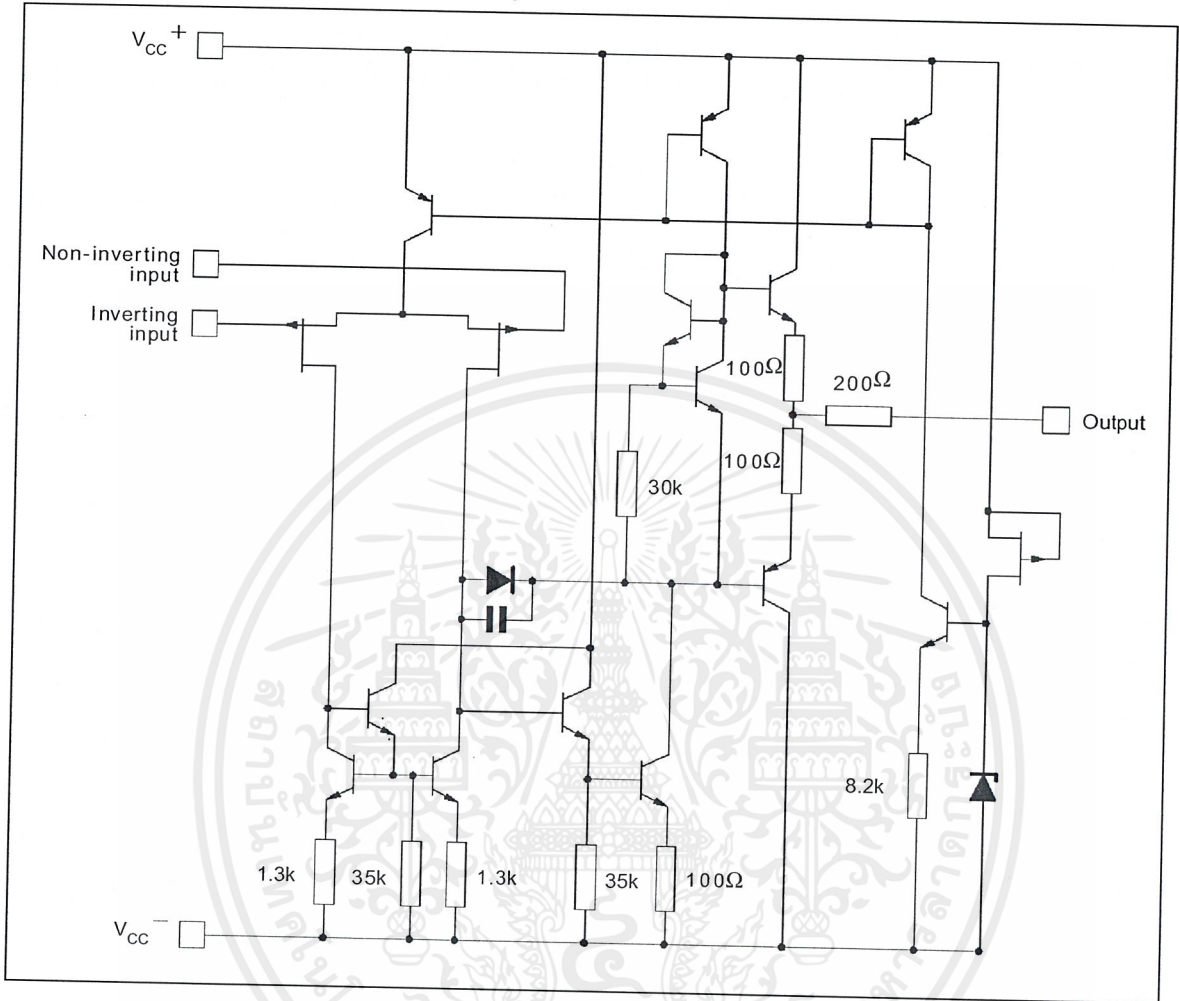
Examples : TL084CN, TL084CD

PIN CONNECTIONS (top view)



TL084 - TL084A - TL084B

SCHEMATIC DIAGRAM (each amplifier)



ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Symbol	Parameter	Value	Unit	
V _{cc}	Supply Voltage - (note 1)	±18	V	
V _i	Input Voltage - (note 3)	±15	V	
V _{id}	Differential Input Voltage - (note 2)	±30	V	
P _{tot}	Power Dissipation	680	mW	
	Output Short-circuit Duration - (note 4)	Infinite		
T _{oper}	Operating Free Air Temperature Range	TL084C,AC,BC TL084I,AI,BI TL084M,AM,BM	0 to 70 -40 to 105 -55 to 125	°C
T _{stg}	Storage Temperature Range		-65 to 150	°C

- Notes :
1. All voltage values, except differential voltage, are with respect to the zero reference level (ground) of the supply voltages where the zero reference level is the midpoint between V_{cc}⁺ and V_{cc}⁻.
 2. Differential voltages are at the non-inverting input terminal with respect to the inverting input terminal.
 3. The magnitude of the input voltage must never exceed the magnitude of the supply voltage or 15 volts, whichever is less.
 4. The output may be shorted to ground or to either supply. Temperature and /or supply voltages must be limited to ensure that the dissipation rating is not exceeded.

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

V_{CC} = ±15V, T_{amb} = 25°C (unless otherwise specified)

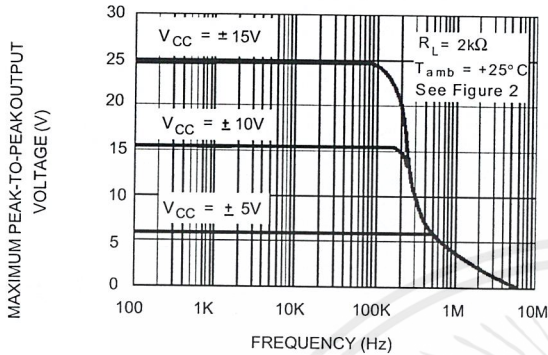
Symbol	Parameter	TL084I,M,AC,AI, AM,BC,BI,BM			TL084C			Unit
		Min.	Typ.	Max.	Min.	Typ.	Max.	
V _{io}	Input Offset Voltage (R _S = 50Ω) T _{amb} = 25°C T _{min.} ≤ T _{amb} ≤ T _{max.} TL084 TL084A TL084B TL084 TL084A TL084B		3 3 1	10 6 3 13 7 5		3	10 13	mV
DV _{io}	Input Offset Voltage Drift		10			10		μV/°C
I _{io}	Input Offset Current * T _{amb} = 25°C T _{min.} ≤ T _{amb} ≤ T _{max.}		5	100 4		5	100 4	pA nA
I _{ib}	Input Bias Current * T _{amb} = 25°C T _{min.} ≤ T _{amb} ≤ T _{max.}		20	200 20		30	400 20	pA nA
A _{vd}	Large Signal Voltage Gain (R _L = 2kΩ, V _O = ±10V) T _{amb} = 25°C T _{min.} ≤ T _{amb} ≤ T _{max.}	50 25	200		25 15	200		V/mV
SVR	Supply Voltage Rejection Ratio (R _S = 50Ω) T _{amb} = 25°C T _{min.} ≤ T _{amb} ≤ T _{max.}	80 80	86		70 70	86		dB
I _{cc}	Supply Current, per Amp, no Load T _{amb} = 25°C T _{min.} ≤ T _{amb} ≤ T _{max.}		1.4	2.5 2.5		1.4	2.5 2.5	mA
V _{icm}	Input Common Mode Voltage Range	±11	+15 -12		±11	+15 -12		V
CMR	Common Mode Rejection Ratio (R _S = 50Ω) T _{amb} = 25°C T _{min.} ≤ T _{amb} ≤ T _{max.}	80 80	86		70 70	86		dB
I _{os}	Output Short-circuit Current T _{amb} = 25°C T _{min.} ≤ T _{amb} ≤ T _{max.}	10 10	40	60 60	10 10	40	60 60	mA
±V _{OPP}	Output Voltage Swing T _{amb} = 25°C T _{min.} ≤ T _{amb} ≤ T _{max.} R _L = 2kΩ R _L = 10kΩ R _L = 2kΩ R _L = 10kΩ	10 12 10 12	12 13.5		10 12 10 12	12 13.5		V
SR	Slew Rate (V _{in} = 10V, R _L = 2kΩ, C _L = 100pF, T _{amb} = 25°C, unity gain)	8	16		8	16		V/μs
t _r	Rise Time (V _{in} = 20mV, R _L = 2kΩ, C _L = 100pF, T _{amb} = 25°C, unity gain)		0.1			0.1		μs
K _{ov}	Overshoot (V _{in} = 20mV, R _L = 2kΩ, C _L = 100pF, T _{amb} = 25°C, unity gain)		10			10		%
GBP	Gain Bandwidth Product (f = 100kHz, T _{amb} = 25°C, V _{in} = 10mV, R _L = 2kΩ, C _L = 100pF)	2.5	4		2.5	4		MHz
R _i	Input Resistance		10 ¹²			10 ¹²		Ω
THD	Total Harmonic Distortion (f = 1kHz, A _V = 20dB, R _L = 2kΩ, C _L = 100pF, T _{amb} = 25°C, V _O = 2V _{PP})		0.01			0.01		%
e _n	Equivalent Input Noise Voltage (f = 1kHz, R _S = 100Ω)		15			15		$\frac{nV}{\sqrt{Hz}}$
∅ _m	Phase Margin		45			45		Degrees
V _{O1} /V _{O2}	Channel Separation (A _V = 100)		120			120		dB

* The input bias currents are junction leakage currents which approximately double for every 10°C increase in the junction temperature.

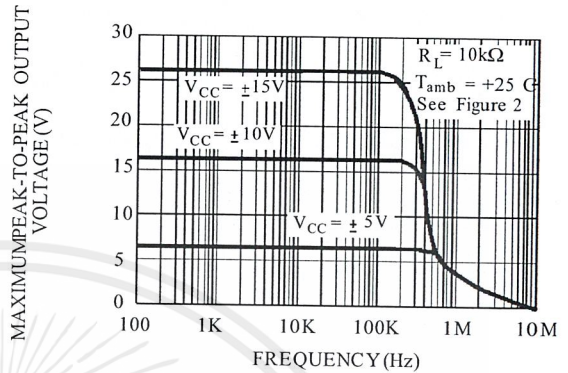


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

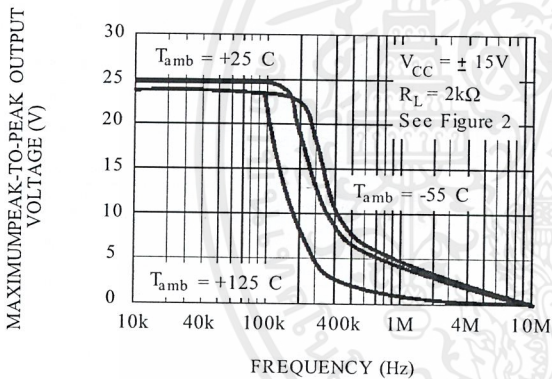
MAXIMUM PEAK-TO-PEAK OUTPUT VOLTAGE VERSUS FREQUENCY



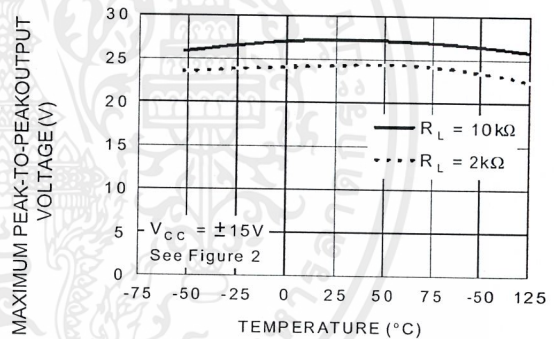
MAXIMUM PEAK-TO-PEAK OUTPUT VOLTAGE VERSUS FREQUENCY



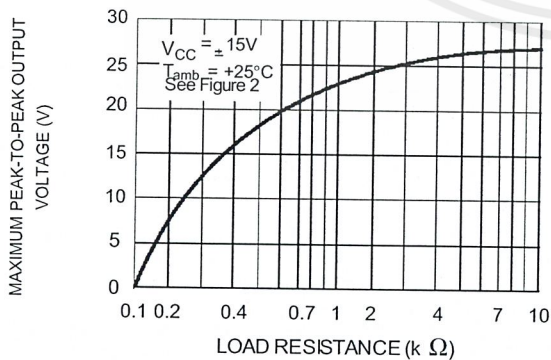
MAXIMUM PEAK-TO-PEAK OUTPUT VOLTAGE VERSUS FREQUENCY



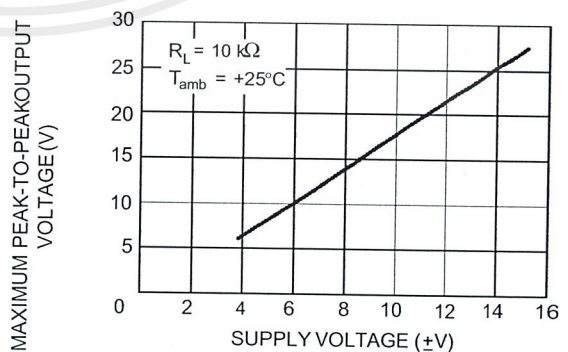
MAXIMUM PEAK-TO-PEAK OUTPUT VOLTAGE VERSUS FREE AIR TEMP.



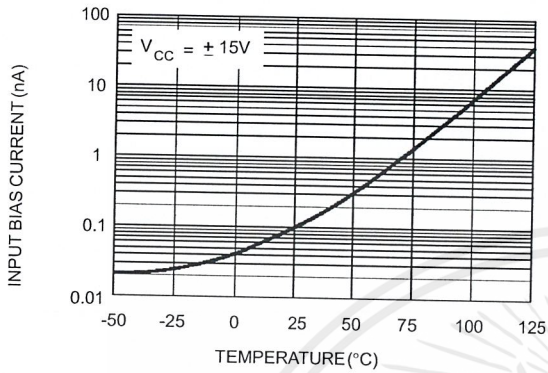
MAXIMUM PEAK-TO-PEAK OUTPUT VOLTAGE VERSUS LOAD RESISTANCE



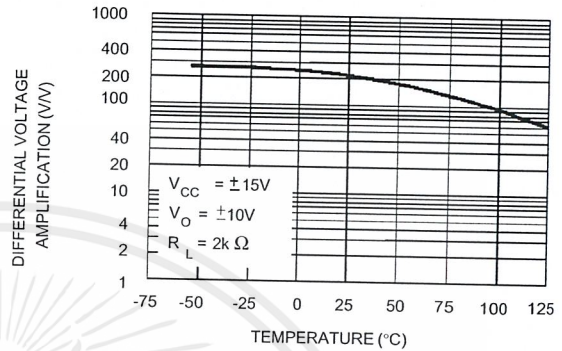
MAXIMUM PEAK-TO-PEAK OUTPUT VOLTAGE VERSUS SUPPLY VOLTAGE



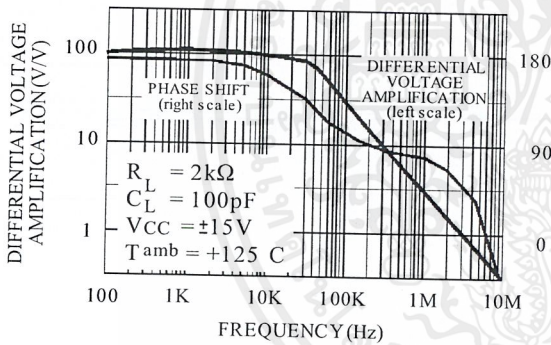
INPUT BIAS CURRENT VERSUS FREE AIR TEMPERATURE



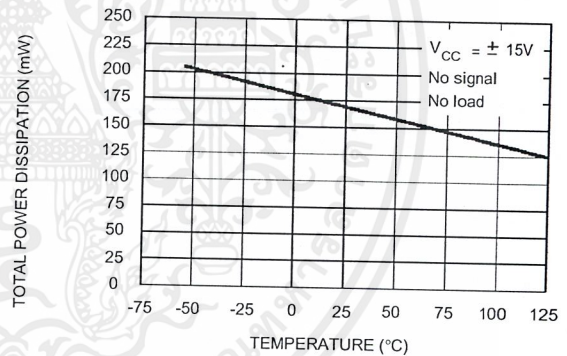
LARGE SIGNAL DIFFERENTIAL VOLTAGE AMPLIFICATION VERSUS FREE AIR TEMPERATURE



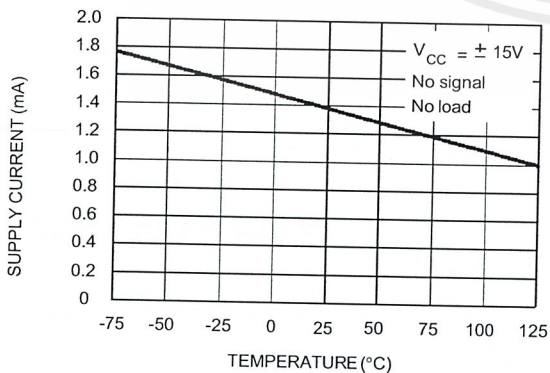
LARGE SIGNAL DIFFERENTIAL VOLTAGE AMPLIFICATION AND PHASE SHIFT VERSUS FREQUENCY



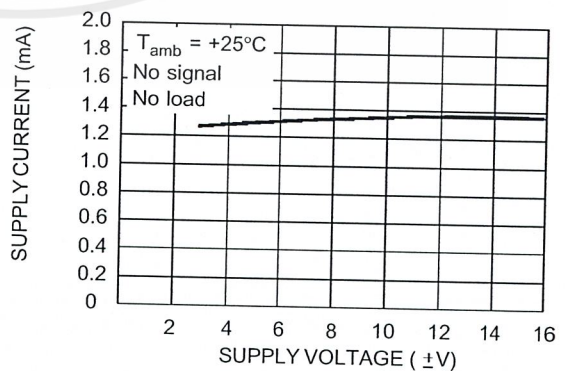
TOTAL POWER DISSIPATION VERSUS FREE AIR TEMPERATURE



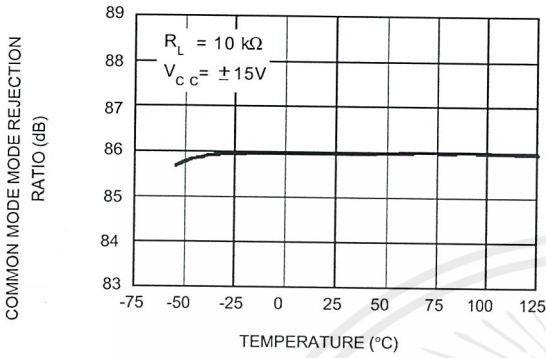
SUPPLY CURRENT PER AMPLIFIER VERSUS FREE AIR TEMPERATURE



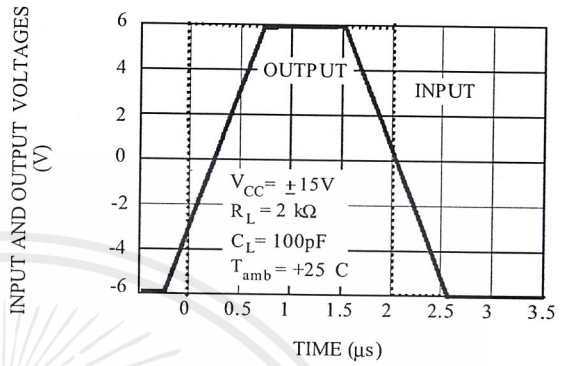
SUPPLY CURRENT PER AMPLIFIER VERSUS SUPPLY VOLTAGE



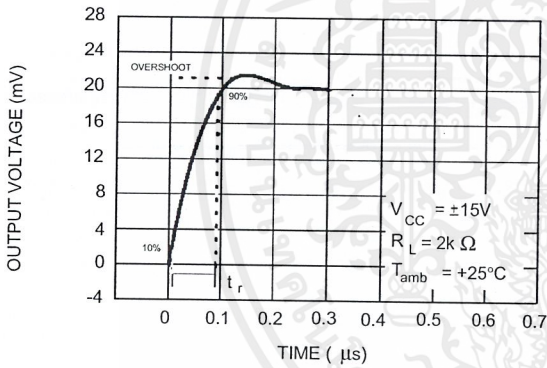
COMMON MODE REJECTION RATIO VERSUS FREE AIR TEMPERATURE



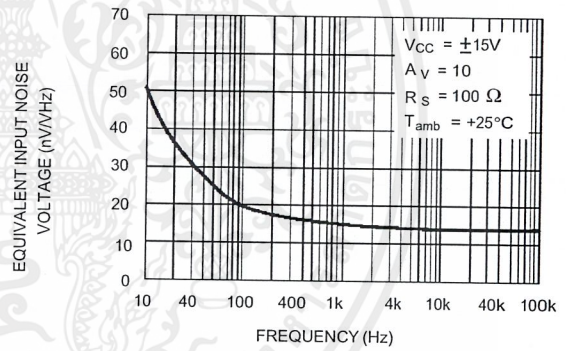
VOLTAGE FOLLOWER LARGE SIGNAL PULSE RESPONSE



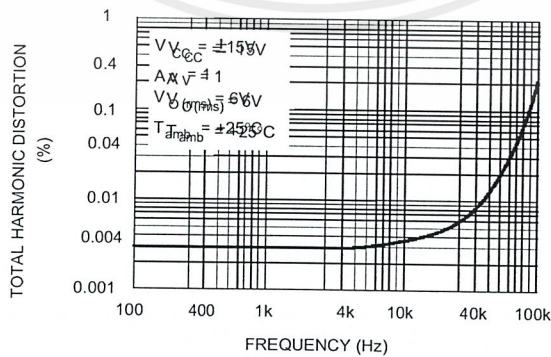
OUTPUT VOLTAGE VERSUS ELAPSED TIME



EQUIVALENT INPUT NOISE VOLTAGE VERSUS FREQUENCY



TOTAL HARMONIC DISTORTION VERSUS FREQUENCY



PARAMETER MEASUREMENT INFORMATION

Figure 1 : Voltage Follower

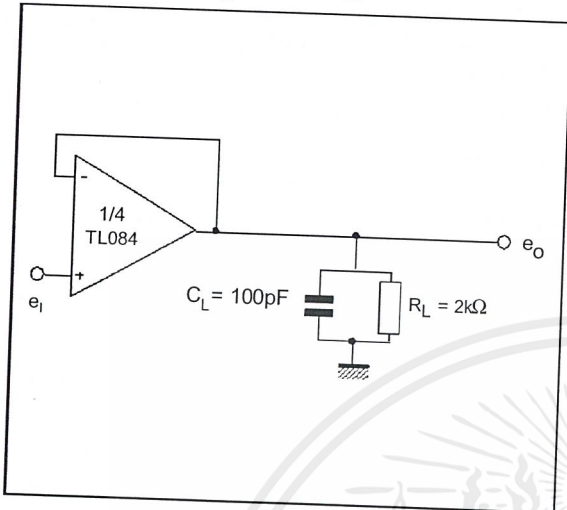
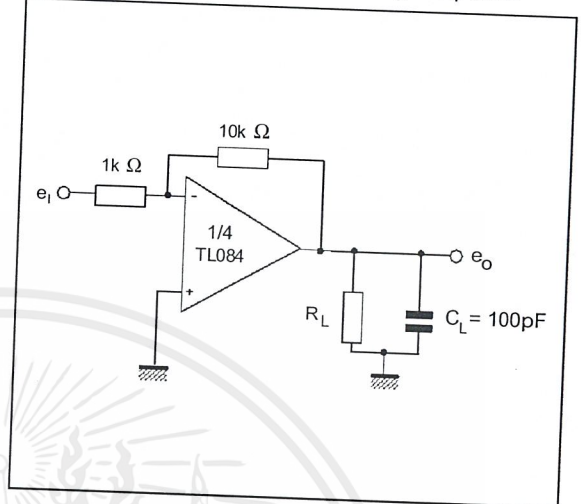
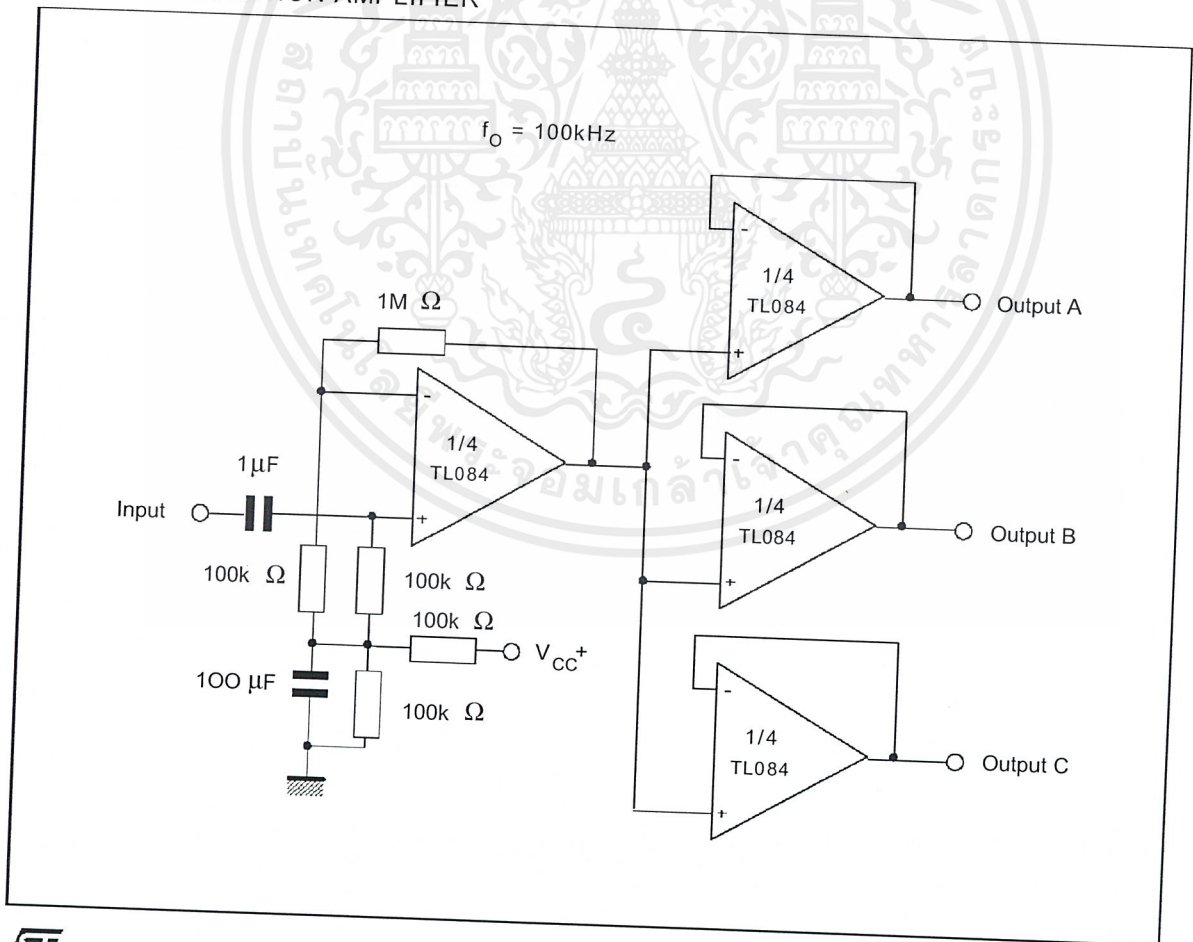


Figure 2 : Gain-of-10 Inverting Amplifier



TYPICAL APPLICATIONS

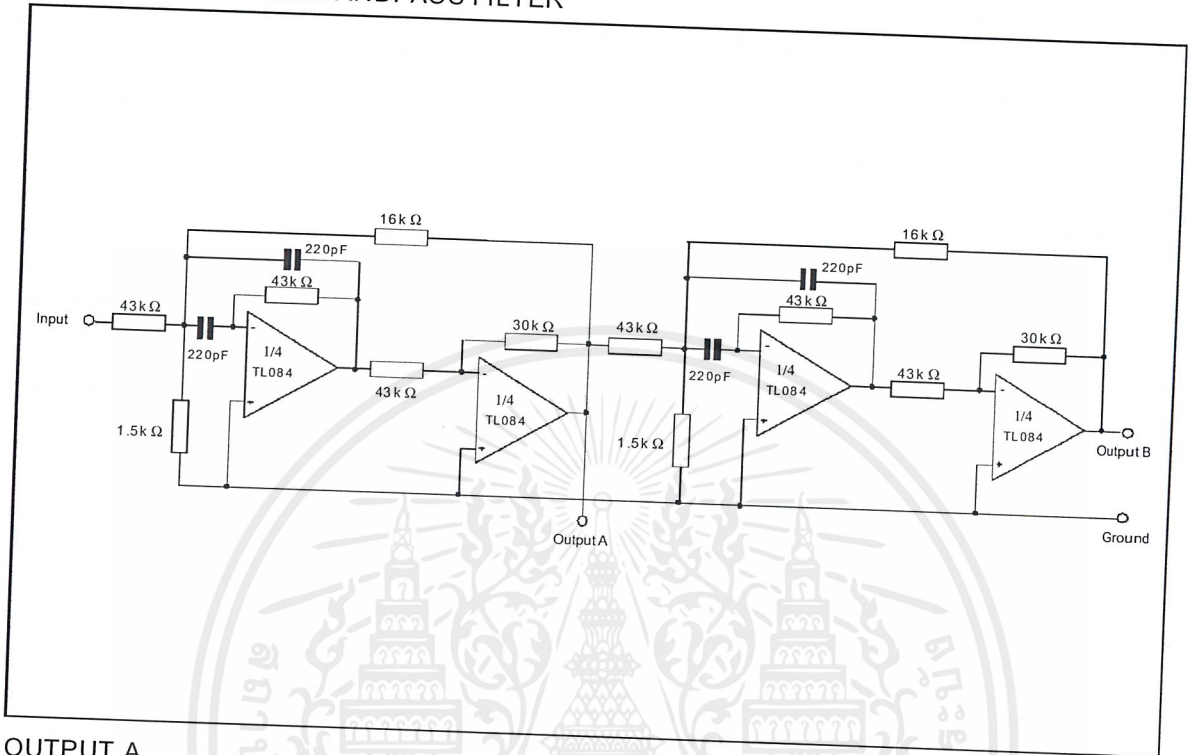
AUDIO DISTRIBUTION AMPLIFIER



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

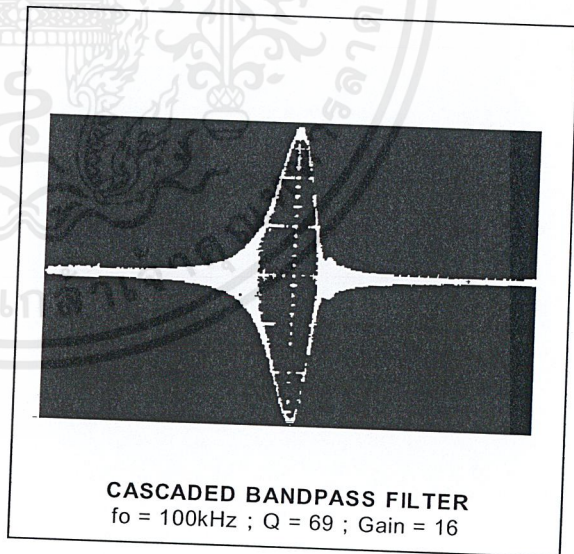
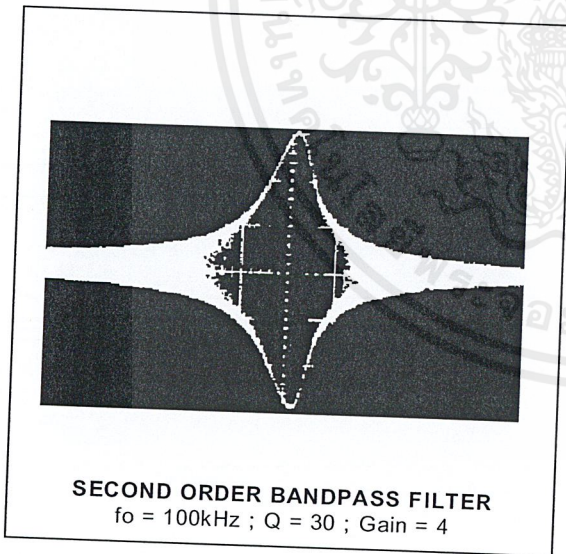
TYPICAL APPLICATIONS (continued)

POSITIVE FEEDBACK BANDPASS FILTER



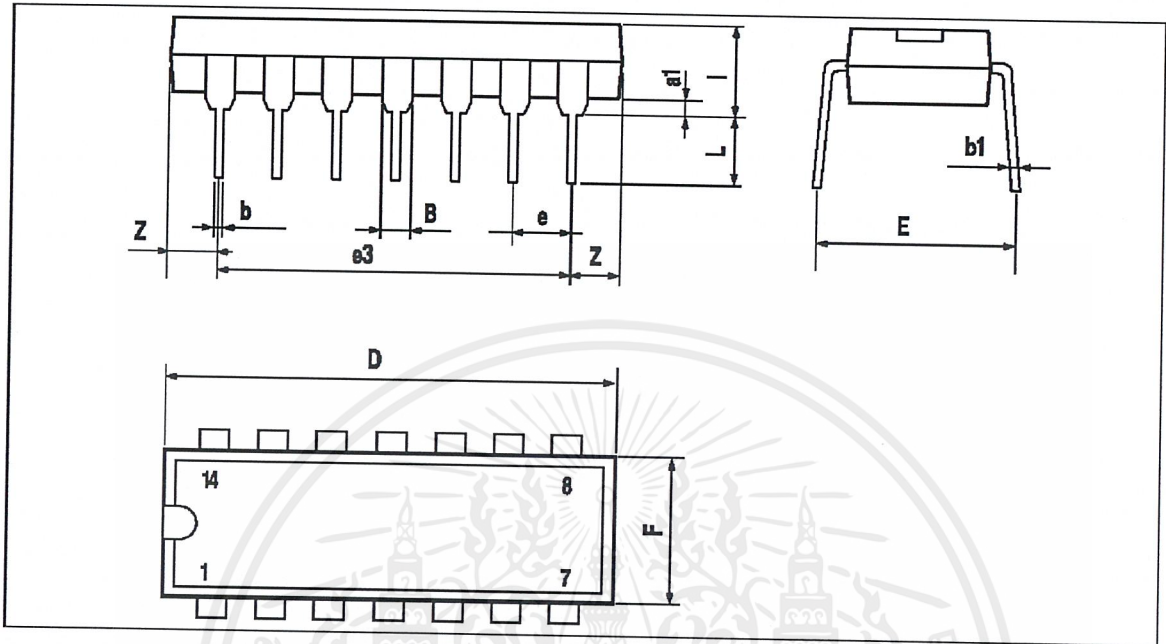
OUTPUT A

OUTPUT B



PACKAGE MECHANICAL DATA

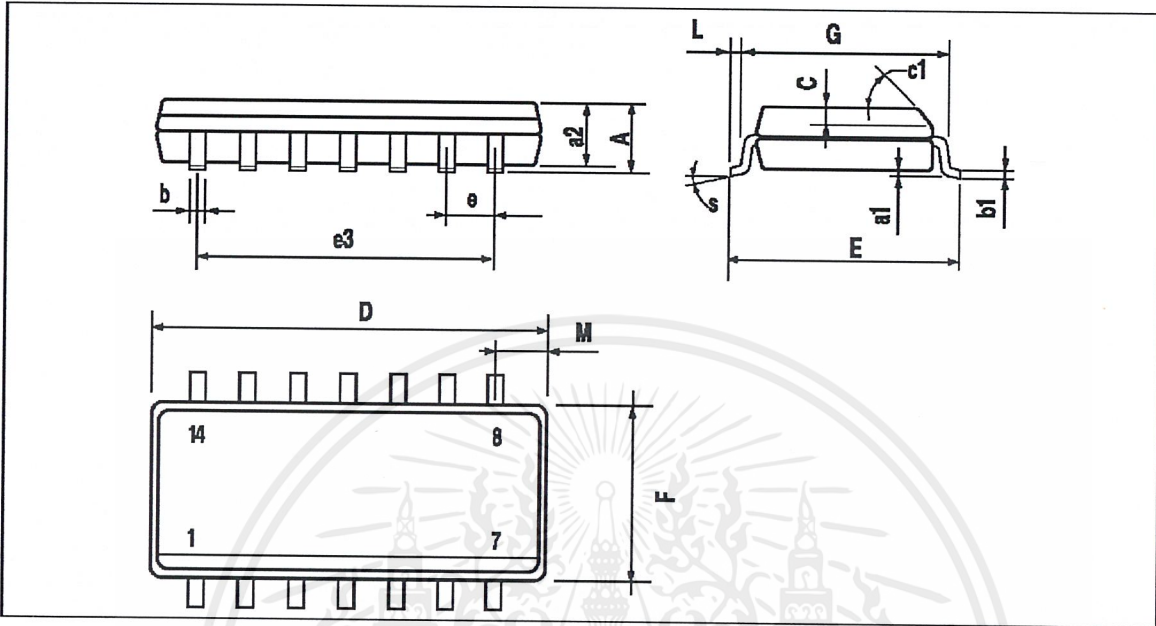
14 PINS - PLASTIC DIP



Dimensions	Millimeters			Inches		
	Min.	Typ.	Max.	Min.	Typ.	Max.
a1	0.51			0.020		
B	1.39		1.65	0.055		0.065
b		0.5			0.020	
b1		0.25			0.010	
D			20			0.787
E		8.5			0.335	
e		2.54			0.100	
e3		15.24			0.600	
F			7.1			0.280
i			5.1			0.201
L		3.3			0.130	
Z	1.27		2.54	0.050		0.100

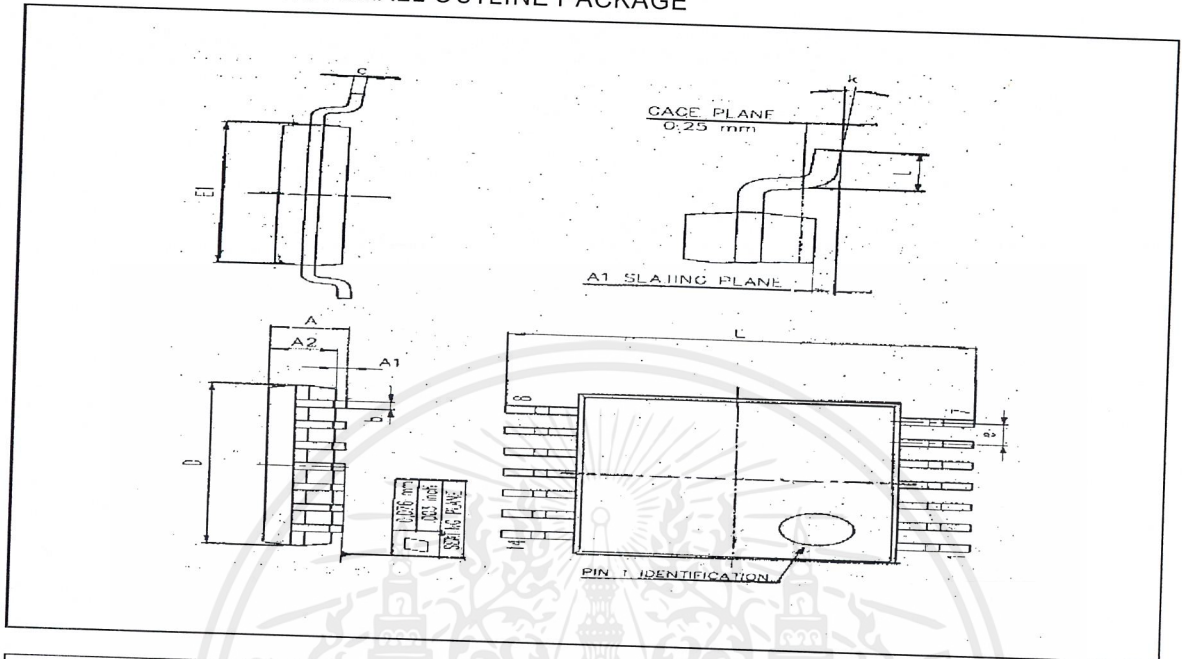
TL084 - TL084A - TL084B

PACKAGE MECHANICAL DATA
14 PINS - PLASTIC MICROPACKAGE (SO)



Dimensions	Millimeters			Inches		
	Min.	Typ.	Max.	Min.	Typ.	Max.
A			1.75			0.069
a1	0.1		0.2	0.004		0.008
a2			1.6			0.063
b	0.35		0.46	0.014		0.018
b1	0.19		0.25	0.007		0.010
C		0.5			0.020	
c1			45° (typ.)			
D	8.55		8.75	0.336		0.334
E	5.8		6.2	0.228		0.244
e		1.27			0.050	
e3		7.62			0.300	
F	3.8		4.0	0.150		0.157
G	4.6		5.3	0.181		0.208
L	0.5		1.27	0.020		0.050
M			0.68			0.027
S			8° (max.)			

PACKAGE MECHANICAL DATA
14 PINS - THIN SHRINK SMALL OUTLINE PACKAGE



Dim.	Millimeters			Inches		
	Min.	Typ.	Max.	Min.	Typ.	Max.
A			1.20			
A1	0.05		0.15	0.01		0.05
A2	0.80	1.00	1.05	0.031	0.039	0.006
b	0.19		0.30	0.007		0.041
c	0.09		0.20	0.003		0.15
D	4.90	5.00	5.10	0.192	0.196	0.012
E		6.40			0.252	0.20
E1	4.30	4.40	4.50	0.169	0.173	
e		0.65			0.025	0.177
k	0°		8°	0°		8°
l	0.50	0.60	0.75	0.09	0.0236	0.030

Information furnished is believed to be accurate and reliable. However, STMicroelectronics assumes no responsibility for the consequences of use of such information nor for any infringement of patents or other rights of third parties which may result from its use. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of STMicroelectronics. Specifications mentioned in this publication are subject to change without notice. This publication supersedes and replaces all information previously supplied. STMicroelectronics products are not authorized for use as critical components in life support devices or systems without express written approval of STMicroelectronics.

© The ST logo is a trademark of STMicroelectronics

© 1999 STMicroelectronics - Printed in Italy - All Rights Reserved

STMicroelectronics GROUP OF COMPANIES

Australia - Brazil - Canada - China - France - Germany - Italy - Japan - Korea - Malaysia - Malta - Mexico - Morocco
 The Netherlands - Singapore - Spain - Sweden - Switzerland - Taiwan - Thailand - United Kingdom - U.S.A.

© <http://www.st.com>





OPA549

For most current data sheet and other product information, visit www.burr-brown.com

High-Voltage, High-Current OPERATIONAL AMPLIFIER

FEATURES

- HIGH OUTPUT CURRENT:
8A Continuous
10A Peak
- WIDE POWER SUPPLY RANGE:
Single Supply: +8V to +60V
Dual Supply: $\pm 4V$ to $\pm 30V$
- WIDE OUTPUT VOLTAGE SWING
- FULLY PROTECTED:
Thermal Shutdown
Adjustable Current Limit
- OUTPUT DISABLE CONTROL
- THERMAL SHUTDOWN INDICATOR
- HIGH SLEW RATE: $9V/\mu s$
- CONTROL REFERENCE PIN
- 11-LEAD POWER ZIP PACKAGE

APPLICATIONS

- VALVE, ACTUATOR DRIVER
- SYNCHRO, SERVO DRIVER
- POWER SUPPLIES
- TEST EQUIPMENT
- TRANSDUCER EXCITATION
- AUDIO POWER AMPLIFIER

DESCRIPTION

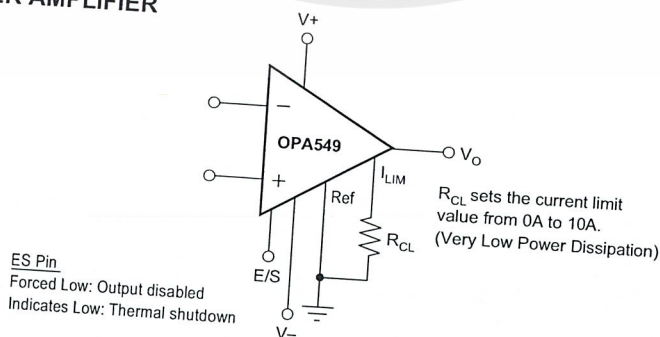
The OPA549 is a low-cost, high-voltage/high-current operational amplifier ideal for driving a wide variety of loads. This laser-trimmed monolithic integrated circuit provides excellent low-level signal accuracy, and high output voltage and current.

The OPA549 operates from either single or dual supplies for design flexibility. The input common-mode range extends below the negative supply.

The OPA549 is internally protected against over-temperature conditions and current overloads. In addition, the OPA549 provides an accurate, user-selected current limit. Unlike other designs which use a "power" resistor in series with the output current path, the OPA549 senses the load indirectly. This allows the current limit to be adjusted from 0A to 10A with a resistor/potentiometer, or controlled digitally with a voltage-out or current-out DAC.

The Enable/Status (E/S) pin provides two functions. It can be monitored to determine if the device is in thermal shutdown, and it can be forced low to disable the output stage and effectively disconnect the load.

The OPA549 is available in an 11-lead power ZIP package. Its copper tab allows easy mounting to a heat sink for excellent thermal performance. Operation is specified over the extended industrial temperature range, $-40^{\circ}C$ to $+85^{\circ}C$.



International Airport Industrial Park • Mailing Address: PO Box 11400, Tucson, AZ 85734 • Street Address: 6730 S. Tucson Blvd., Tucson, AZ 85706 • Tel: (520) 746-1111
Twx: 910-952-1111 • Internet: <http://www.burr-brown.com/> • Cable: BBRCORP • Telex: 066-6491 • FAX: (520) 889-1510 • Immediate Product Info: (800) 548-6132

©1999 Burr-Brown Corporation

PDS-1450A

Printed in U.S.A. November, 1999

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต การค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SPECIFICATIONS: $V_S = \pm 2.25V$ to $\pm 18V$

Boldface limits apply over the specified temperature range, $T_A = -40^\circ C$ to $+85^\circ C$
 At $T_{CASE} = +25^\circ C$, $V_S = \pm 30V$, Ref = 0V, and E/S pin open, unless otherwise noted.

PARAMETER	CONDITION	OPA549T			UNITS	
		MIN	TYP	MAX		
OFFSET VOLTAGE Input Offset Voltage vs Temperature vs Power Supply	V_{OS} dV_{OS}/dT PSRR	$V_{CM} = 0V, I_O = 0$ $T_{CASE} = -40^\circ C$ to $+85^\circ C$ $V_S = \pm 4V$ to $\pm 30V$, Ref = V-	± 1 ± 20 25		± 5	mV $\mu V/^\circ C$ $\mu V/V$
INPUT BIAS CURRENT(1) Input Bias Current(2) vs Temperature Input Offset Current	I_B I_{OS}	$V_{CM} = 0V$ $T_{CASE} = -40^\circ C$ to $+85^\circ C$ $V_{CM} = 0V$				nA $nA/^\circ C$ nA
NOISE Input Voltage Noise Density Current Noise Density	e_n i_n	$f = 1kHz$ $f = 1kHz$				nV/\sqrt{Hz} pA/\sqrt{Hz} nA
INPUT VOLTAGE RANGE Common-Mode Voltage Range: Positive Common-Mode Rejection Ratio	V_{CM} V_{CM} CMRR	Linear Operation Linear Operation $V_{CM} = (V-) - 0.1V$ to $(V+) - 3V$	$(V+) - 3$ $(V-) - 0.1$ 80	$(V+) - 2.3$ $(V-) - 0.2$ 95		V V dB
INPUT IMPEDANCE Differential Common-Mode						Ω pF V dB
OPEN-LOOP GAIN Open-Loop Voltage Gain	A_{OL}	$V_O = \pm 25V, R_L = 1k\Omega$ $V_O = \pm 25V, R_L = 4\Omega$		10^7 6 10^9 4		Ω pF Ω pF
FREQUENCY RESPONSE Gain Bandwidth Product Slew Rate Full Power Bandwidth Settling Time: $\pm 0.1\%$ Total Harmonic Distortion + Noise(3)	GBW SR THD+N	$G = 1, 50Vp-p$ Step, $R_L = 4\Omega$ $G = -10, 50V$ Step $f = 1kHz, R_L = 4\Omega, G = +3, Power = 25W$	100	110 100 0.9 9 See Typical Curve		dB dB MHz V/ μs μs %
OUTPUT Voltage Output, Positive Negative Positive Negative Negative Maximum Continuous Current Output: dc(4) ac(4) Output Current Limit Current Limit Range Current Limit Equation Current Limit Tolerance(1) Capacitive Load Drive (Stable Operation) Output Disabled Leakage Current Output Capacitance	$I_O = 2A$ $I_O = -2A$ $I_O = 8A$ $I_O = -8A$ $R_L = 8\Omega$ to V- Waveform Cannot Exceed 10A peak $R_{CL} = 7.5k\Omega$ ($I_{LIM} = \pm 5A$), $R_L = 4\Omega$ Output Disabled Output Disabled	$(V+) - 3.2$ $(V-) + 1.7$ $(V+) - 4.8$ $(V-) + 4.6$ $(V-) + 0.3$ ± 8 8 0 to ± 10 $I_{LIM} = 15800 \cdot 4.75V / (7500\Omega + R_{CL})$ ± 200 See Typical Curve ± 500 See Typical Curve 750		$(V+) - 2.7$ $(V-) + 1.4$ $(V+) - 4.3$ $(V-) + 3.9$ $(V-) + 0.1$		V V V V V A Arms A A mA pF
OUTPUT ENABLE /STATUS (E/S) PIN Shutdown Input Mode V_{ES} High (output enabled) V_{ES} Low (output disabled) I_{ES} High (output enabled) I_{ES} Low (output disabled) Output Disable Time Output Enable Time Thermal Shutdown Status Output Normal Operation Thermally Shutdown Junction Temperature, Shutdown Reset from Shutdown	E/S Pin Open or Forced High E/S Pin Forced Low E/S Pin Indicates High E/S Pin Indicates Low Sourcing 20 μA Sinking 5 μA , $T_J > 160^\circ C$	(Ref) + 2.4 -50 -55 1 3 (Ref) + 2.4 (Ref) + 3.5 (Ref) + 0.2 +160 +140 (Ref) + 0.8				V V μA μA μs μs V V $^\circ C$ $^\circ C$
Ref (Reference Pin for Control Signals) Voltage Range Current(2)			V-			V V $^\circ C$ $^\circ C$
POWER SUPPLY Specified Voltage Operating Voltage Range, (V+) - (V-) Quiescent Current Quiescent Current in Shutdown Mode	V_S I_Q			-3.5	$(V+) - 8$	V mA V mA mA
TEMPERATURE RANGE Specified Range Operating Range Storage Range Thermal Resistance, θ_{JC} Thermal Resistance, θ_{JA}		I_{LIM} Connected to Ref $I_O = 0$ I_{LIM} Connected to Ref No Heat Sink	8	± 30 ± 26 ± 6	60 ± 35	V V mA mA $^\circ C$ $^\circ C$ $^\circ C$ $^\circ C/W$ $^\circ C/W$

ES: (1) High-speed test at $T_J = +25^\circ C$. (2) Positive conventional current is defined as flowing into the terminal. (3) See "Total Harmonic Distortion + Noise vs Frequency" in the Typical Performance Curves section for additional power levels. (4) See "Safe Operating Area" (SOA) in the Typical Performance Curves section.



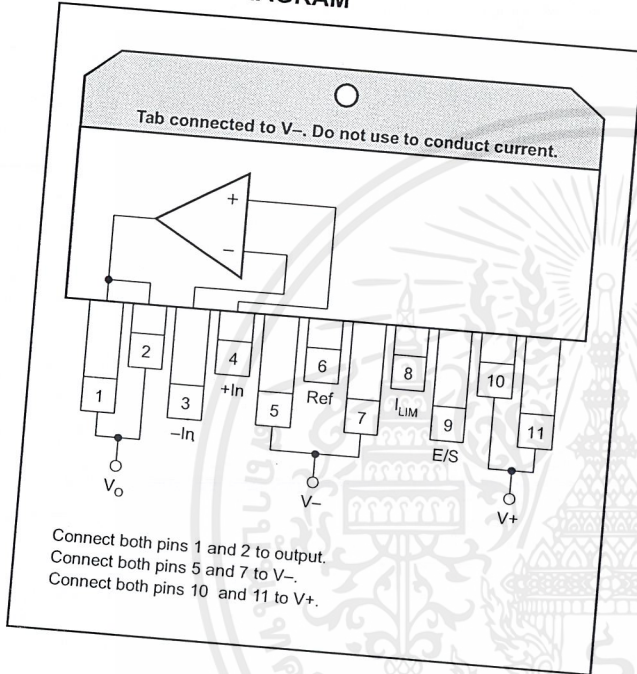
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS(1)

Output Current	See SOA Curve (Figure 6)
Supply Voltage, V_+ to V_-	60V
Input Voltage Range	$(V_-) - 0.5V$ to $(V_+) + 0.5V$
Input Shutdown Voltage	Ref - 0.5 to V_+
Operating Temperature	-40°C to +125°C
Storage Temperature	-55°C to +125°C
Junction Temperature	150°C
Lead Temperature (soldering, 10s)	300°C
ESD Capability (Human Body Model)	2000V

NOTE: (1) Stresses above these ratings may cause permanent damage. Exposure to absolute maximum conditions for extended periods may degrade device reliability.

CONNECTION DIAGRAM



PACKAGE/ORDERING INFORMATION

PRODUCT	PACKAGE	PACKAGE DRAWING NUMBER	TEMPERATURE RANGE
OPA549T	11-Lead Power ZIP	242	-40°C to +85°C



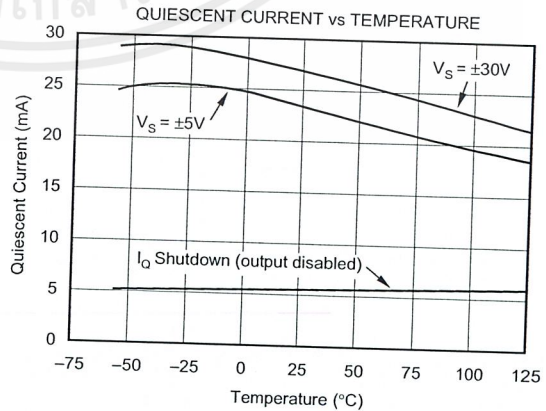
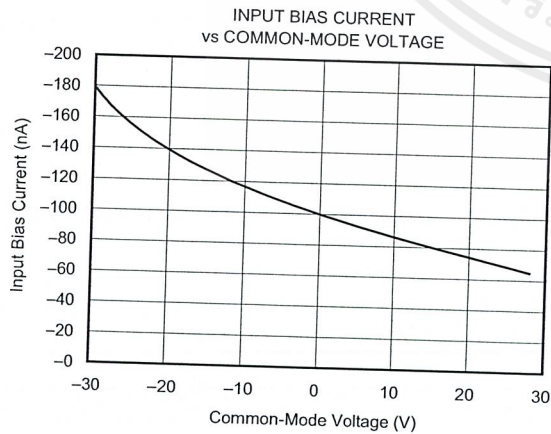
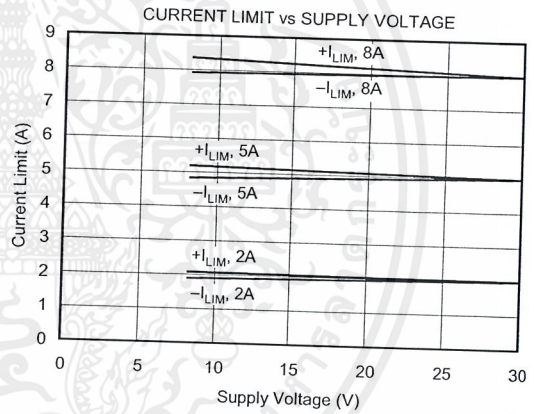
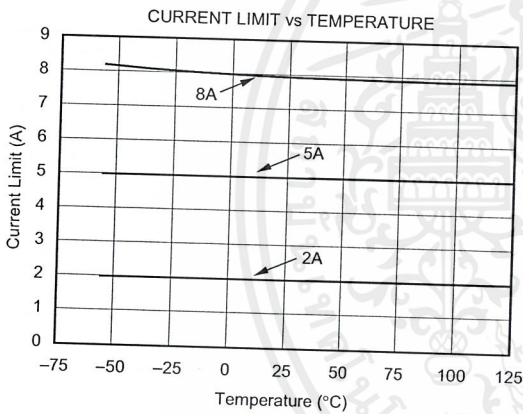
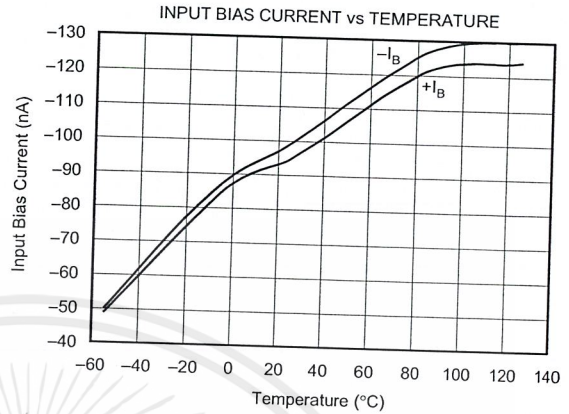
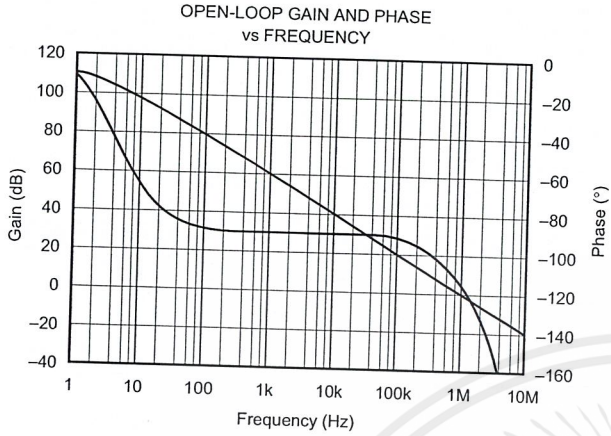
ELECTROSTATIC DISCHARGE SENSITIVITY

This integrated circuit can be damaged by ESD. Burr-Brown recommends that all integrated circuits be handled with appropriate precautions. Failure to observe proper handling and installation procedures can cause damage. ESD damage can range from subtle performance degradation to complete device failure. Precision integrated circuits may be more susceptible to damage because very small parametric changes could cause the device not to meet its published specifications.

The information provided herein is believed to be reliable; however, BURR-BROWN assumes no responsibility for inaccuracies or omissions. BURR-BROWN assumes no responsibility for the use of this information, and all use of such information shall be entirely at the user's own risk. Prices and specifications are subject to change without notice. No patent rights or licenses to any of the circuits described herein are implied or granted to any third party. BURR-BROWN does not authorize or warrant any BURR-BROWN product for use in life support devices and/or systems.

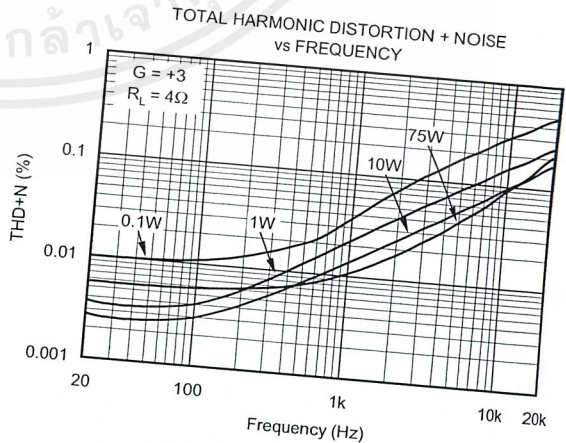
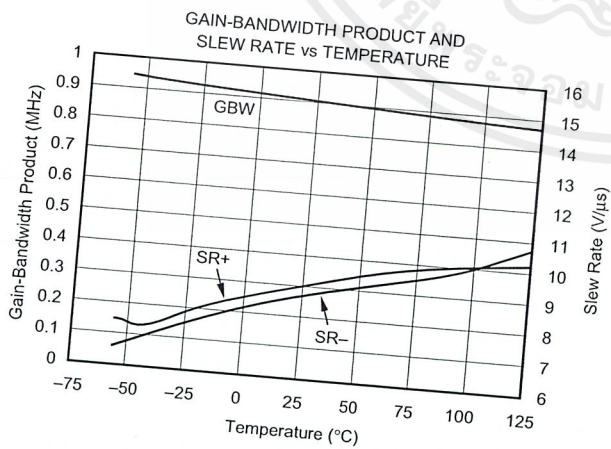
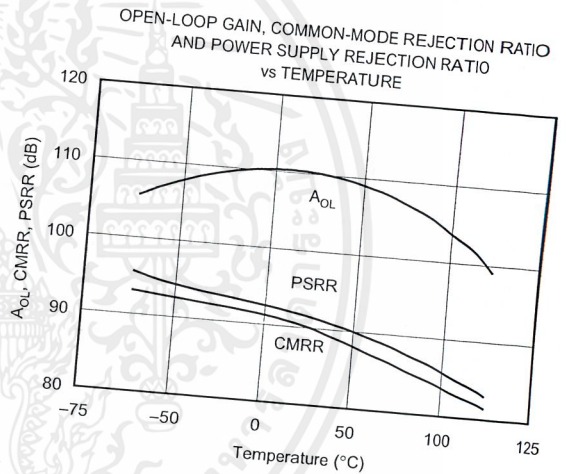
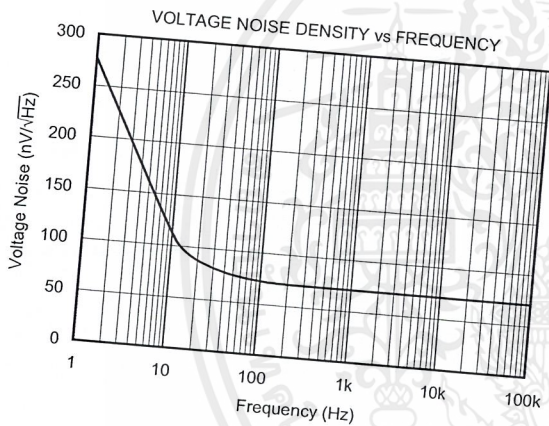
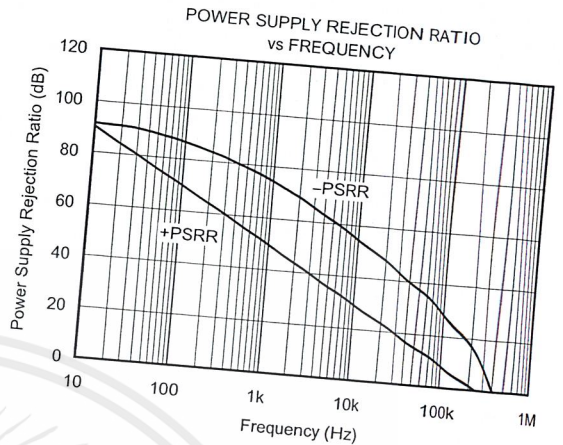
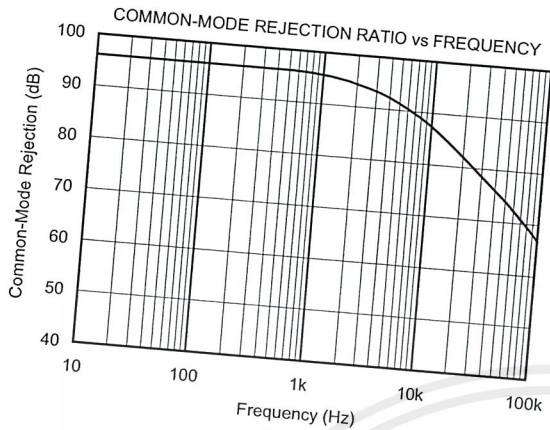
TYPICAL PERFORMANCE CURVES

At $T_{CASE} = +25^{\circ}C$, $V_S = \pm 30V$ and E/S pin open, unless otherwise noted.



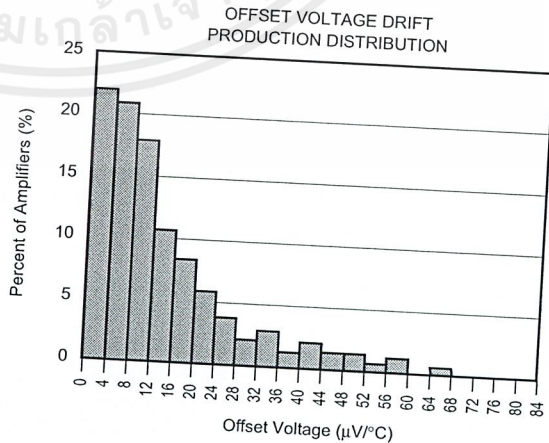
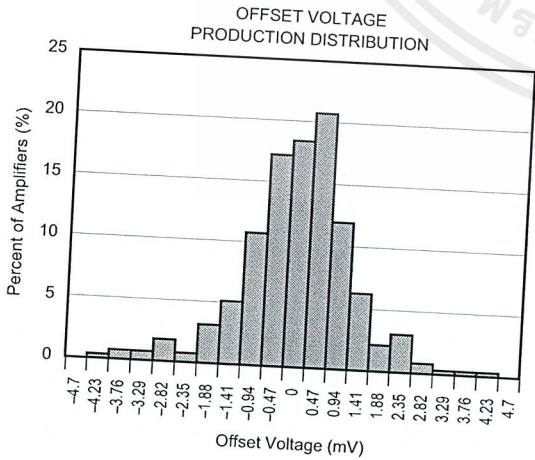
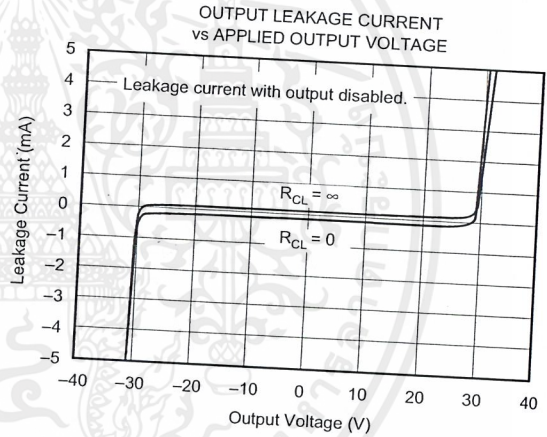
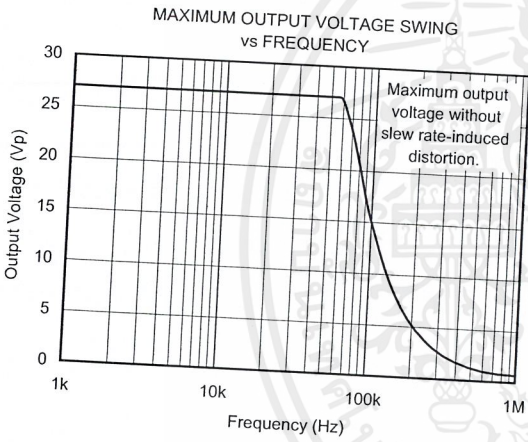
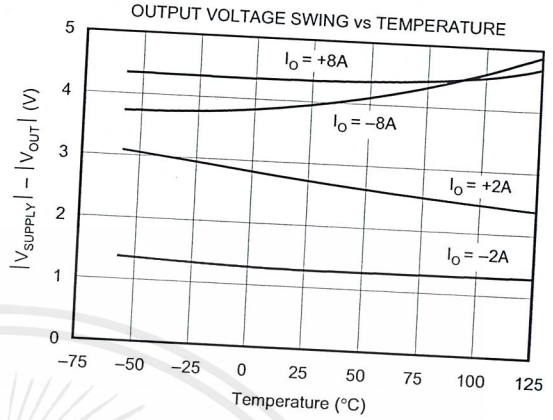
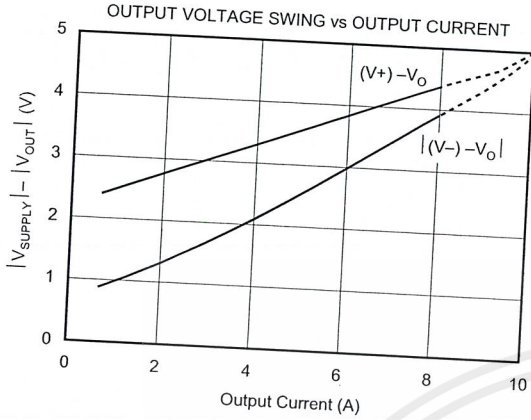
TYPICAL PERFORMANCE CURVES (Cont.)

At $T_{CASE} = +25^{\circ}C$, $V_S = \pm 30V$ and E/S pin open, unless otherwise noted.



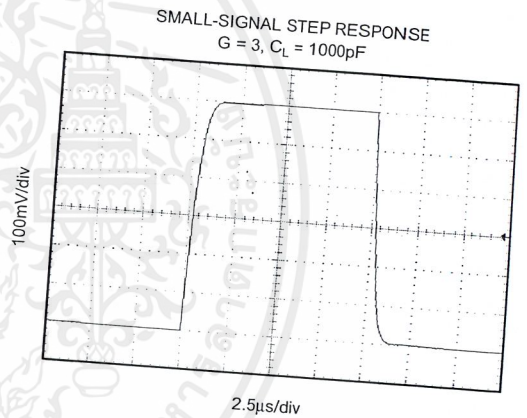
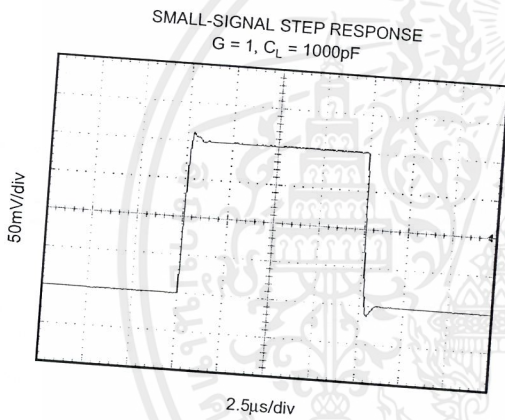
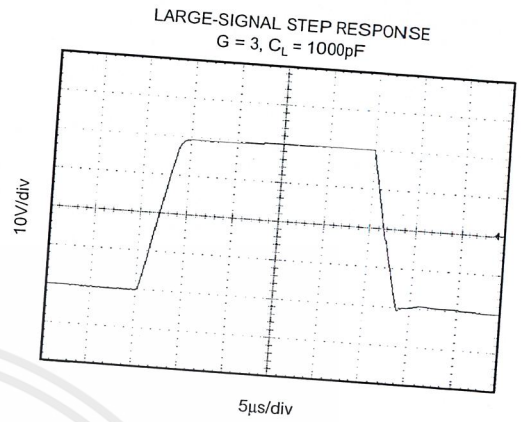
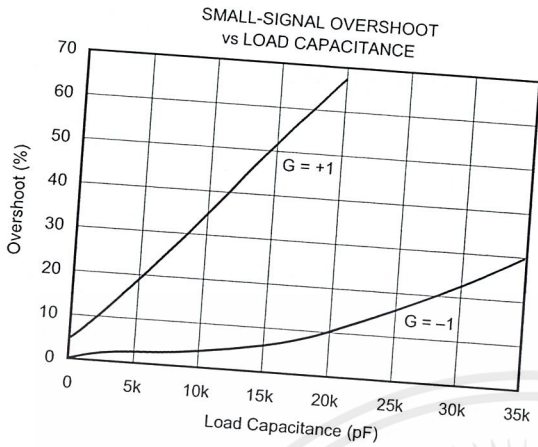
TYPICAL PERFORMANCE CURVES (Cont.)

At $T_{CASE} = +25^{\circ}C$, $V_S = \pm 30V$ and E/S pin open, unless otherwise noted.



TYPICAL PERFORMANCE CURVES (Cont.)

At $T_{CASE} = +25^{\circ}C$, $V_S = \pm 30V$ and E/S pin open, unless otherwise noted.



APPLICATIONS INFORMATION

Figure 1 shows the OPA549 connected as a basic non-inverting amplifier. The OPA549 can be used in virtually any op amp configuration.

Power supply terminals should be bypassed with low series impedance capacitors. The technique shown, using a ceramic and tantalum type in parallel, is recommended. Power supply wiring should have low series impedance.

Be sure to connect *both* output pins (pins 1 and 2).

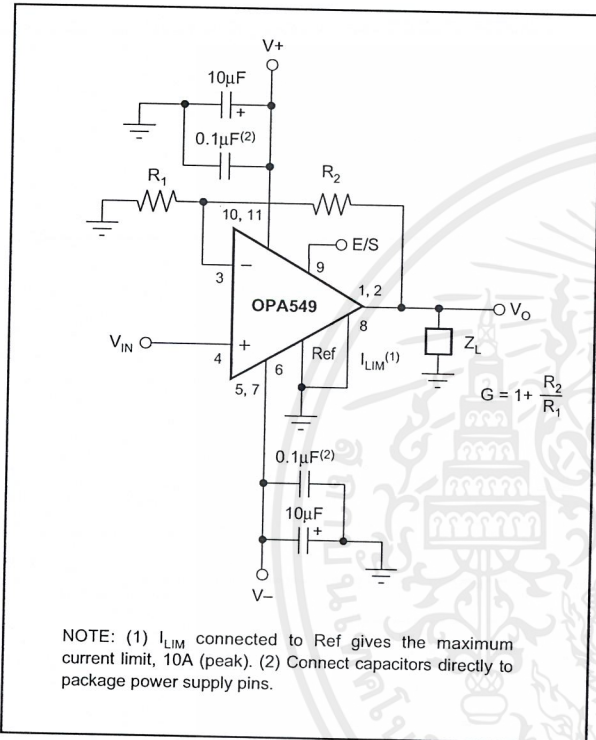


FIGURE 1. Basic Circuit Connections.

POWER SUPPLIES

The OPA549 operates from single (+8V to +60V) or dual ($\pm 4V$ to $\pm 30V$) supplies with excellent performance. Most behavior remains unchanged throughout the full operating voltage range. Parameters that vary significantly with operating voltage are shown in the Typical Performance Curves. Some applications do not require equal positive and negative output voltage swing. Power supply voltages do not need to be equal. The OPA549 can operate with as little as 8V between the supplies and with up to 60V between the supplies. For example, the positive supply could be set to 55V with the negative supply at -5V. **Be sure to connect both V_- pins (pins 5 and 7) to the negative power supply and both V_+ pins (pins 10 and 11) to the positive power supply. Package tab is internally connected to V_- , however, do use the tab to conduct current.**

CONTROL REFERENCE (Ref) PIN

The OPA549 features a reference (ref) pin to which the I_{LIM} and the Enable/Status (E/S) pin are referred. Ref simply provides a reference point accessible to the user that can be set to V_- , ground, or any reference of the user's choice. **Ref cannot be set below the negative supply or above $(V_+) - 8V$. If the minimum V_S is used, Ref must be set at V_- .**

ADJUSTABLE CURRENT LIMIT

The OPA549's accurate, user-defined current limit can be set from 0A to 10A by controlling the input to the I_{LIM} pin. Unlike other designs, which use a power resistor in series with the output current path, the OPA549 senses the load indirectly. This allows the current limit to be set with a $0\mu A$ to $633\mu A$ control signal. In contrast, other designs require a limiting resistor to handle the full output current (up to 10A in this case).

Although the design of the OPA549 allows output currents up to 10A, it is not recommended that the device be operated continuously at that level. The highest rated continuous current capability is 8A. Continuously running the OPA549 at output currents greater than 8A will degrade long-term reliability.

Operation of the OPA549 with current limit less than 1A results in reduced current limit accuracy. Applications requiring lower output current may be better suited to the OPA547 or OPA548.

Resistor-Controlled Current Limit

Figure 2a shows a simplified schematic of the internal circuitry used to set the current limit. Leaving the I_{LIM} pin open programs the output current to zero, while connecting I_{LIM} directly to Ref programs the maximum output current limit, typically 10A.

With the OPA549, the simplest method for adjusting the current limit uses a resistor or potentiometer connected between the I_{LIM} pin and Ref according to Equation 1:

$$R_{CL} = \frac{75kV}{I_{LIM}} - 7.5k\Omega \quad (1)$$

Commonly used values are shown in Figure 2.

Digitally-Controlled Current Limit

The low-level control signal ($0\mu A$ to $633\mu A$) also allows the current limit to be digitally controlled by setting either a current (I_{SET}) or voltage (V_{SET}). The output current I_{LIM} can be adjusted by varying I_{SET} according to Equation 2:

$$I_{SET} = I_{LIM}/15800 \quad (2)$$

Figure 2b demonstrates a circuit configuration implementing this feature.

The output current I_{LIM} can be adjusted by varying V_{SET} according to Equation 3:

$$V_{SET} = (\text{Ref}) + 4.75V - (7500\Omega)(I_{LIM})/15800 \quad (3)$$

Figure 11 demonstrates a circuit configuration implementing this feature.

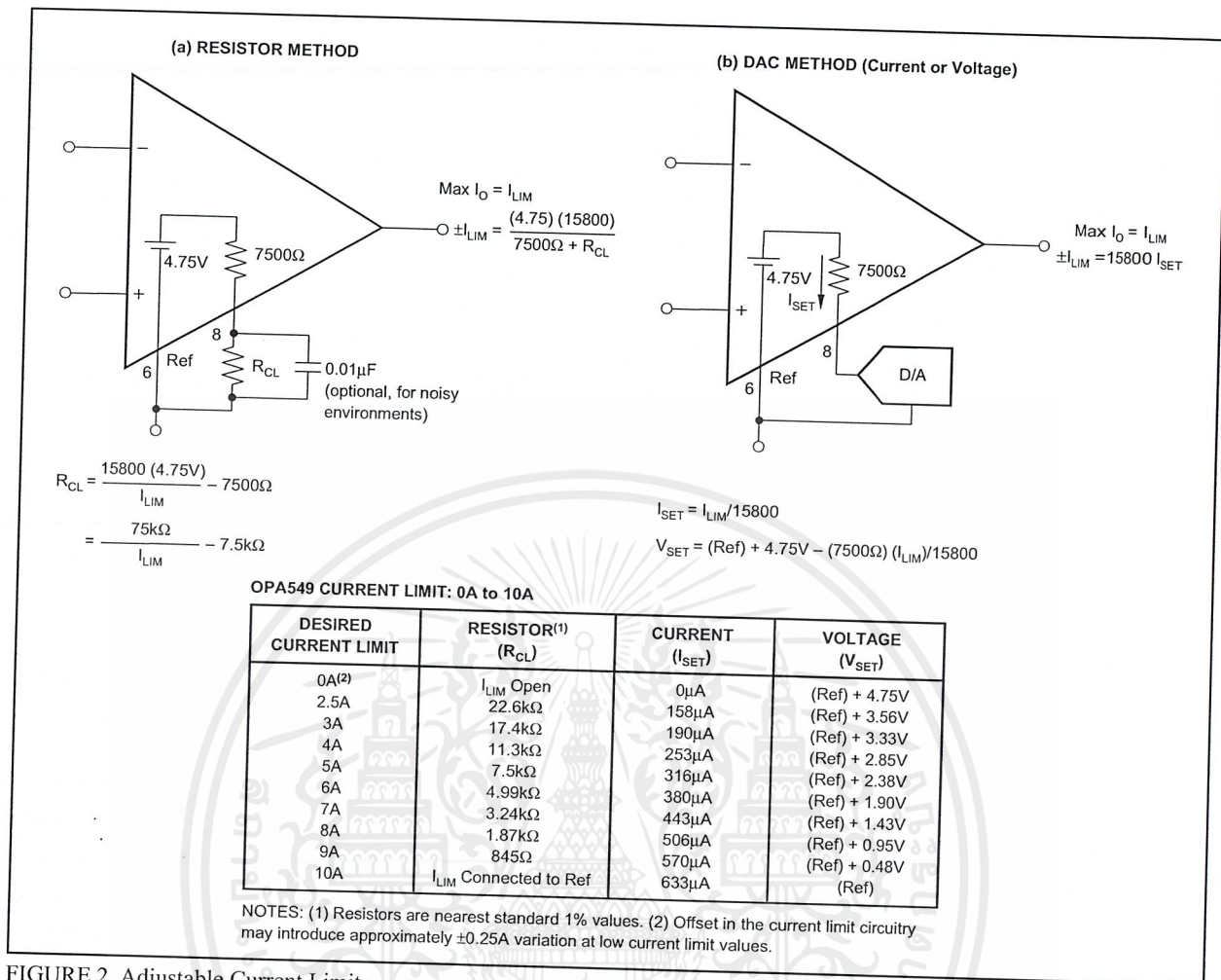


FIGURE 2. Adjustable Current Limit.

ENABLE/STATUS (E/S) PIN

The Enable/Status Pin provides two unique functions: 1) output disable by forcing the pin low and 2) thermal shutdown indication by monitoring the voltage level at the pin. Either or both of these functions can be utilized in an application. For normal operation (output enabled), the E/S pin can be left open or driven high (at least 2.4V above Ref). A small value capacitor connected between the E/S pin and C_{REF} may be required for noisy applications.

Output Disable

To disable the output, the E/S pin is pulled to a logic low (no greater than 0.8V above Ref). Typically the output is shut down in 1μs. To return the output to an enabled state, the E/S pin should be disconnected (open) or pulled to at least 2.4V above Ref. It should be noted that driving the E/S pin high (output enabled) *does not defeat internal thermal shutdown*; however, it does prevent the user from monitoring the thermal shutdown status. See Figure 3 for an example implementing this function.

This function not only conserves power during idle periods (quiescent current drops to approximately 6mA) but also allows multiplexing in multi-channel applications. Figure 12

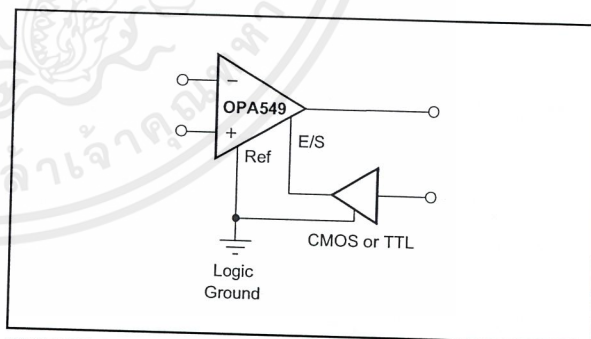


FIGURE 3. Output Disable.

shows two OPA549s in a switched amplifier configuration. The on/off state of the two amplifiers is controlled by the voltage on the E/S pin. Under these conditions, the disabled device will behave like a 750pF load. Slewing faster than 3V/μs will cause leakage current to rapidly increase in devices that are disabled, and will contribute additional load. At high temperature (125°C), the slewing threshold drops to approximately 2V/μs. Input signals must be limited to avoid excessive slewing in multiplexed applications.

Thermal Shutdown Status

The OPA549 has thermal shutdown circuitry that protects the amplifier from damage. The thermal protection circuitry disables the output when the junction temperature reaches approximately 160°C and allows the device to cool. When the junction temperature cools to approximately 140°C, the output circuitry is automatically re-enabled. Depending on load and signal conditions, the thermal protection circuit may cycle on and off. The E/S pin can be monitored to determine if the device is in shutdown. During normal operation, the voltage on the E/S pin is typically 3.5V above Ref. Once shutdown has occurred, this voltage drops to approximately 200mV above Ref. See Figure 4 for an example implementing this function.

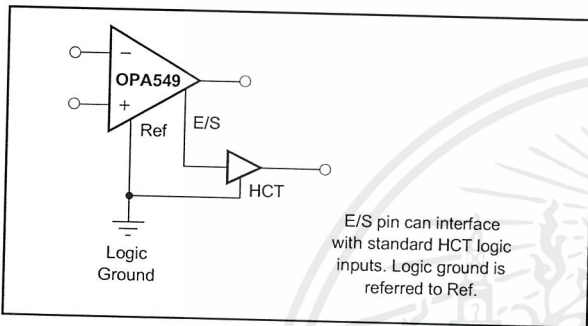


FIGURE 4. Thermal Shutdown Status.

External logic circuitry or an LED can be used to indicate if the output has been thermally shutdown, as demonstrated in Figure 10.

Output Disable and Thermal Shutdown Status

As mentioned earlier, the OPA549's output can be disabled and the disable status can be monitored simultaneously. Figure 5 provides an example of interfacing to the E/S pin.

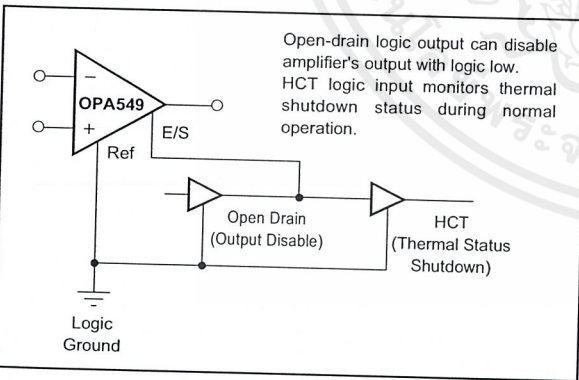


FIGURE 5. Output Disable and Thermal Shutdown Status.

SAFE OPERATING AREA

Stress on the output transistors is determined both by the output current and by the output voltage across the conducting output transistor, $V_S - V_O$. The power dissipated by the output transistor is equal to the product of the output current and the voltage across the conducting transistor, $V_S - V_O$.

The Safe Operating Area (SOA curve, Figure 6) shows the permissible range of voltage and current.

The safe output current decreases as $V_S - V_O$ increases. Output short circuits are a very demanding case for SOA. A short circuit to ground forces the full power supply voltage (V_+ or V_-) across the conducting transistor. Increasing the case temperature reduces the safe output current that can be tolerated without activating the thermal shutdown circuit of the OPA549. For further insight on SOA, consult Application Bulletin AB-039.

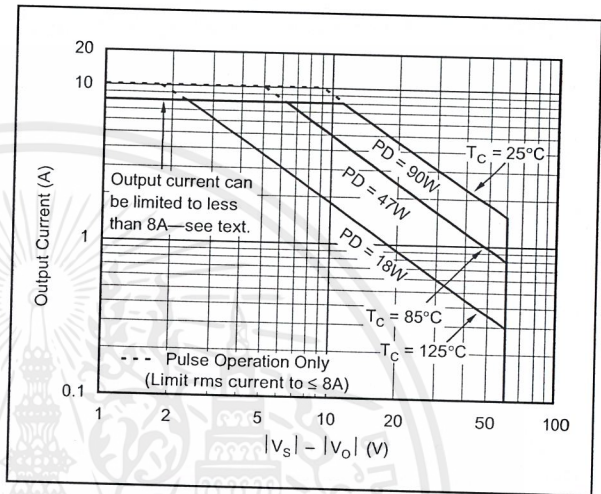


FIGURE 6. Safe Operating Area.

POWER DISSIPATION

Power dissipation depends on power supply, signal, and load conditions. For dc signals, power dissipation is equal to the product of output current times the voltage across the conducting output transistor. Power dissipation can be minimized by using the lowest possible power supply voltage necessary to assure the required output voltage swing.

For resistive loads, the maximum power dissipation occurs at a dc output voltage of one-half the power supply voltage. Dissipation with ac signals is lower. Application Bulletin AB-039 explains how to calculate or measure power dissipation with unusual signals and loads.

THERMAL PROTECTION

Power dissipated in the OPA549 will cause the junction temperature to rise. Internal thermal shutdown circuitry shuts down the output when the die temperature reaches approximately 160°C and resets when the die has cooled to 140°C. Depending on load and signal conditions, the thermal protection circuit may cycle on and off. This limits the dissipation of the amplifier but may have an undesirable effect on the load.

Any tendency to activate the thermal protection circuit indicates excessive power dissipation or an inadequate heat sink. For reliable operation, junction temperature should be limited to 125°C maximum. To estimate the margin of safety

in a complete design (including heat sink) increase the ambient temperature until the thermal protection is triggered. Use worst-case load and signal conditions. For good reliability, thermal protection should trigger more than 35°C above the maximum expected ambient condition of your application. This produces a junction temperature of 125°C at the maximum expected ambient condition.

The internal protection circuitry of the OPA549 was designed to protect against overload conditions. It was not intended to replace proper heat sinking. Continuously running the OPA549 into thermal shutdown will degrade reliability.

AMPLIFIER MOUNTING AND HEAT SINKING

Most applications require a heat sink to assure that the maximum operating junction temperature (125°C) is not exceeded. In addition, the junction temperature should be kept as low as possible for increased reliability. Junction temperature can be determined according to the Equations:

$$T_J = T_A + P_D \theta_{JA} \quad (4)$$

where

$$\theta_{JA} = \theta_{JC} + \theta_{CH} + \theta_{HA} \quad (5)$$

T_J = Junction Temperature (°C)

T_A = Ambient Temperature (°C)

P_D = Power Dissipated (W)

θ_{JC} = Junction-to-Case Thermal Resistance (°C/W)

θ_{CH} = Case-to-Heat Sink Thermal Resistance (°C/W)

θ_{HA} = Heat Sink-to-Ambient Thermal Resistance (°C/W)

θ_{JA} = Junction-to-Air Thermal Resistance (°C/W)

Figure 7 shows maximum power dissipation versus ambient temperature with and without the use of a heat sink. Using a heat sink significantly increases the maximum power dissipation at a given ambient temperature as shown.

The challenge in selecting the heat sink required lies in determining the power dissipated by the OPA549. For dc output, power dissipation is simply the load current times the voltage developed across the conducting output transistor, $P_D = I_L (V_S - V_O)$. Other loads are not as simple. Consult Application Bulletin AB-039 for further insight on calculating power dissipation. Once power dissipation for an application is known, the proper heat sink can be selected.

Heat Sink Selection Example—An 11-lead power ZIP package is dissipating 10 Watts. The maximum expected ambient temperature is 40°C. Find the proper heat sink to keep the junction temperature below 125°C (150°C minus 25°C safety margin).

Combining Equations (4) and (5) gives:

$$T_J = T_A + P_D (\theta_{JC} + \theta_{CH} + \theta_{HA}) \quad (6)$$

T_J , T_A , and P_D are given. θ_{JC} is provided in the Specifications Table, 1.4°C/W (dc). θ_{CH} can be obtained from the heat sink manufacturer. Its value depends on heat sink size, area, and material used. Semiconductor package type, mounting

screw torque, insulating material used (if any), and thermal joint compound used (if any) also affect θ_{CH} . A typical θ_{CH} for a mounted 11-lead power ZIP package is 0.5°C/W. Now we can solve for θ_{HA} :

$$\theta_{HA} = [(T_J - T_A)/P_D] - \theta_{JC} - \theta_{CH}$$

$$\theta_{HA} = [(125^\circ\text{C} - 40^\circ\text{C})/10\text{W}] - 1.4^\circ\text{C/W} - 0.5^\circ\text{C/W}$$

$$\theta_{HA} = 6.6^\circ\text{C/W}$$

To maintain junction temperature below 125°C, the heat sink selected must have a θ_{HA} less than 6.6°C/W. In other words, the heat sink temperature rise above ambient must be less than 66°C (6.6°C/W • 10W). For example, at 10W Thermalloy model number 6396B has a heat sink temperature rise of 56°C ($\theta_{HA} = 56^\circ\text{C}/10\text{W} = 5.6^\circ\text{C/W}$), which is below the required 66°C required in this example. Thermalloy model number 6399B has a sink temperature rise of 33°C ($\theta_{HA} = 33^\circ\text{C}/10\text{W} = 3.3^\circ\text{C/W}$), which is also below the required 66°C required in this example. Figure 7 shows power dissipation versus ambient temperature for a 11-lead power ZIP package with the Thermalloy 6396B and 6399B heat sinks.

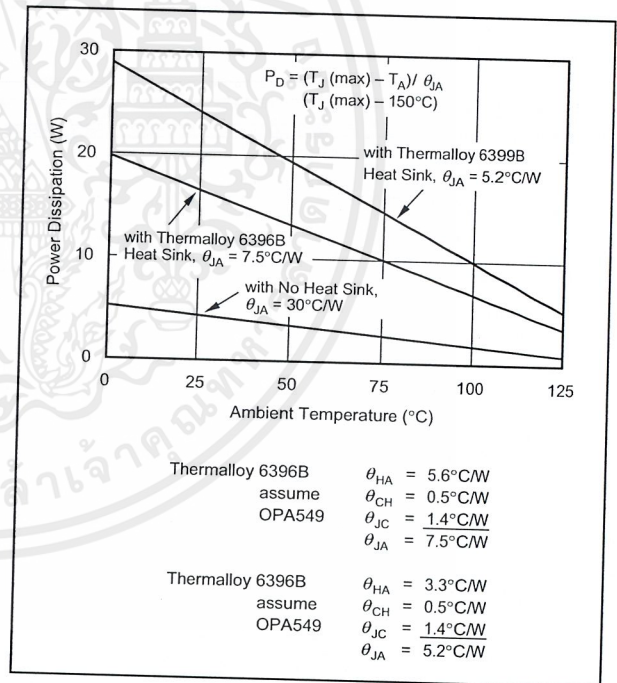


FIGURE 7. Maximum Power Dissipation vs Ambient Temperature.

Another variable to consider is natural convection versus forced convection air flow. Forced-air cooling by a small fan can lower θ_{CA} ($\theta_{CH} + \theta_{HA}$) dramatically. Some heat sink manufacturers provide thermal data for both of these cases. Heat sink performance is generally specified under idealized conditions that may be difficult to achieve in an actual application. For additional information on determining heat sink requirements, consult Application Bulletin AB-038.

As mentioned earlier, once a heat sink has been selected, the complete design should be tested under worst-case load and signal conditions to ensure proper thermal protection. Any tendency to activate the thermal protection circuitry may indicate inadequate heat sinking.

The tab of the 11-lead power ZIP package is electrically connected to the negative supply, V-. It may be desirable to isolate the tab of 11-lead power ZIP package from its mounting surface with a mica (or other film) insulator. For lowest overall thermal resistance, it is best to isolate the entire heat sink/OPA549 structure from the mounting surface rather than to use an insulator between the semiconductor and heat sink.

OUTPUT STAGE COMPENSATION

The complex load impedances common in power op amp applications can cause output stage instability. For normal operation, output compensation circuitry is typically not required. However, for difficult loads or if the OPA549 is intended to be driven into current limit, an R/C network may be required. Figure 8 shows an output R/C compensation (snubber) network which generally provides excellent stability.

A snubber circuit may also enhance stability when driving large capacitive loads (>1000pF) or inductive loads (motors, loads separated from the amplifier by long cables). Typically, 3Ω to 10Ω resistors in series with 0.01μF to 0.1μF capacitors is adequate. Some variations in circuit values may be required with certain loads.

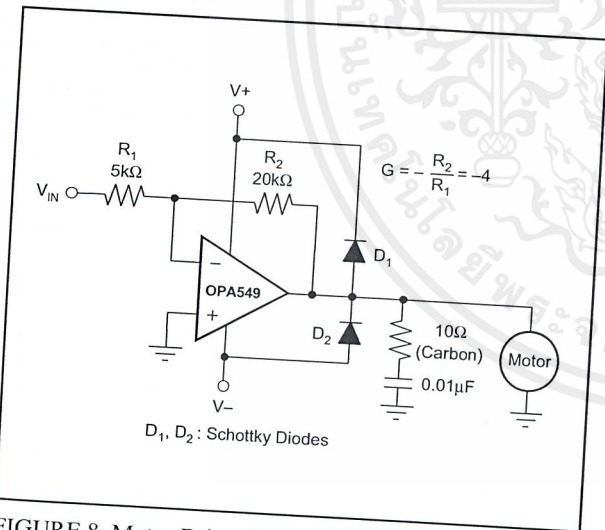


FIGURE 8. Motor Drive Circuit.

OUTPUT PROTECTION

Reactive and EMF-generating loads can return load current to the amplifier, causing the output voltage to exceed the power supply voltage. This damaging condition can be avoided with clamp diodes from the output terminal to the power supplies as shown in Figure 8. Schottky rectifier diodes with a 8A or greater continuous rating are recommended.

VOLTAGE SOURCE APPLICATION

Figure 9 illustrates how to use the OPA549 to provide an accurate voltage source with only three external resistors. First, the current limit resistor, R_{CL} , is chosen according to the desired output current. The resulting voltage at the I_{LIM} pin is constant and stable over temperature. This voltage, V_{CL} , is connected to the non-inverting input of the op amp and used as a voltage reference, thus eliminating the need for an external reference. The feedback resistors are selected to gain V_{CL} to the desired output voltage level.

PROGRAMMABLE POWER SUPPLY

A programmable source/sink power supply can easily be built using the OPA549. Both the output voltage and output current are user-controlled. Figure 10 shows a circuit using potentiometers to adjust the output voltage and current while Figure 11 uses digital-to-analog converters. An LED connected to the E/S pin through a logic gate indicates if the OPA549 is in thermal shutdown.

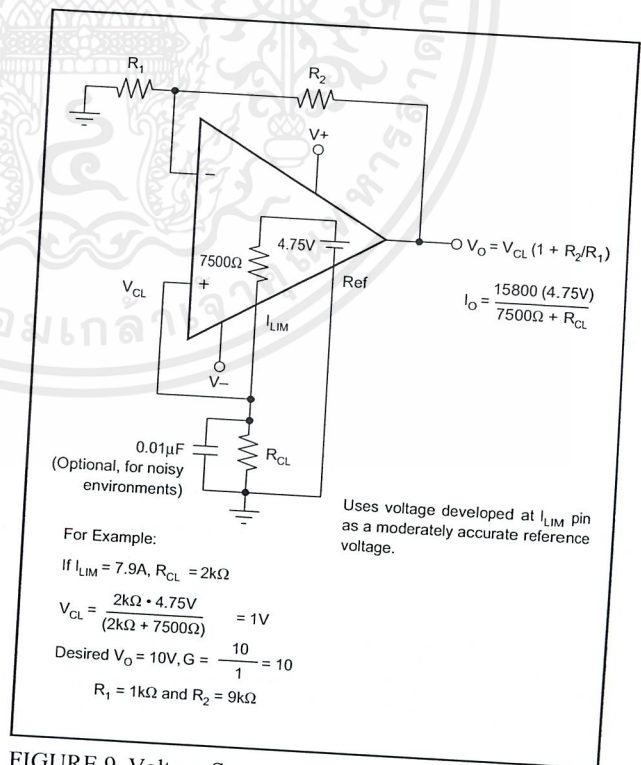


FIGURE 9. Voltage Source.

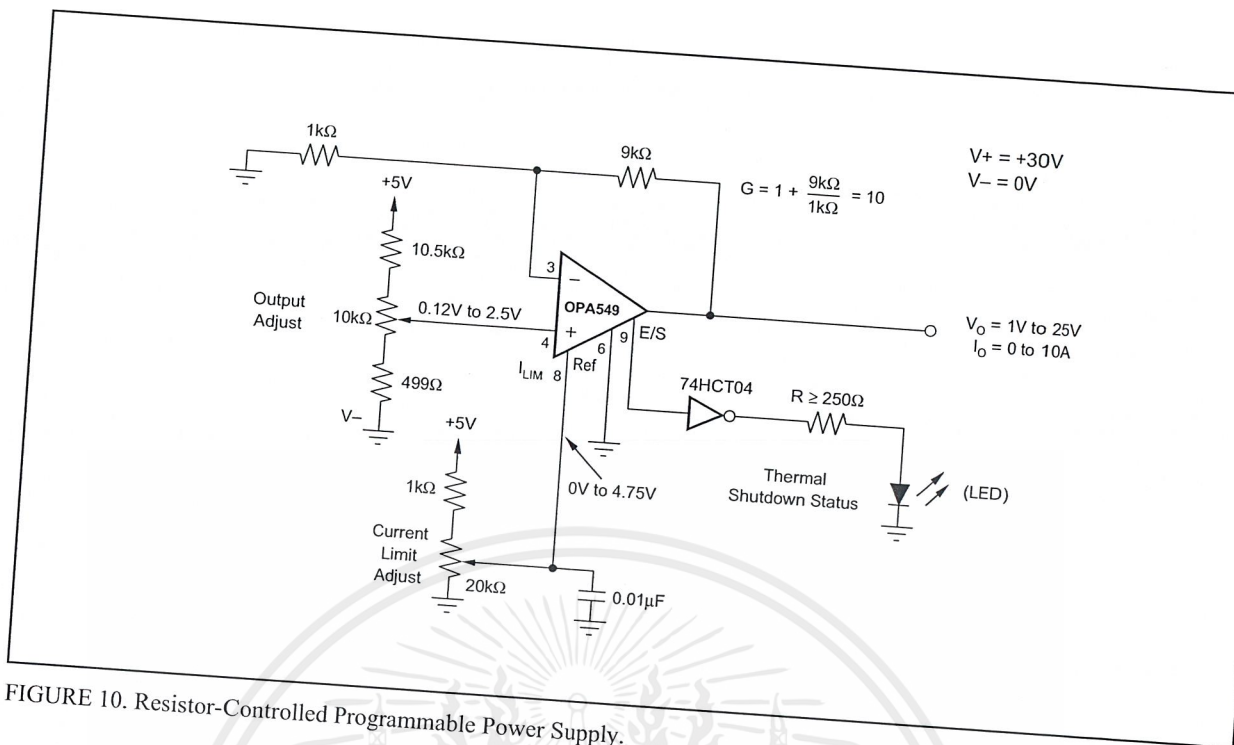
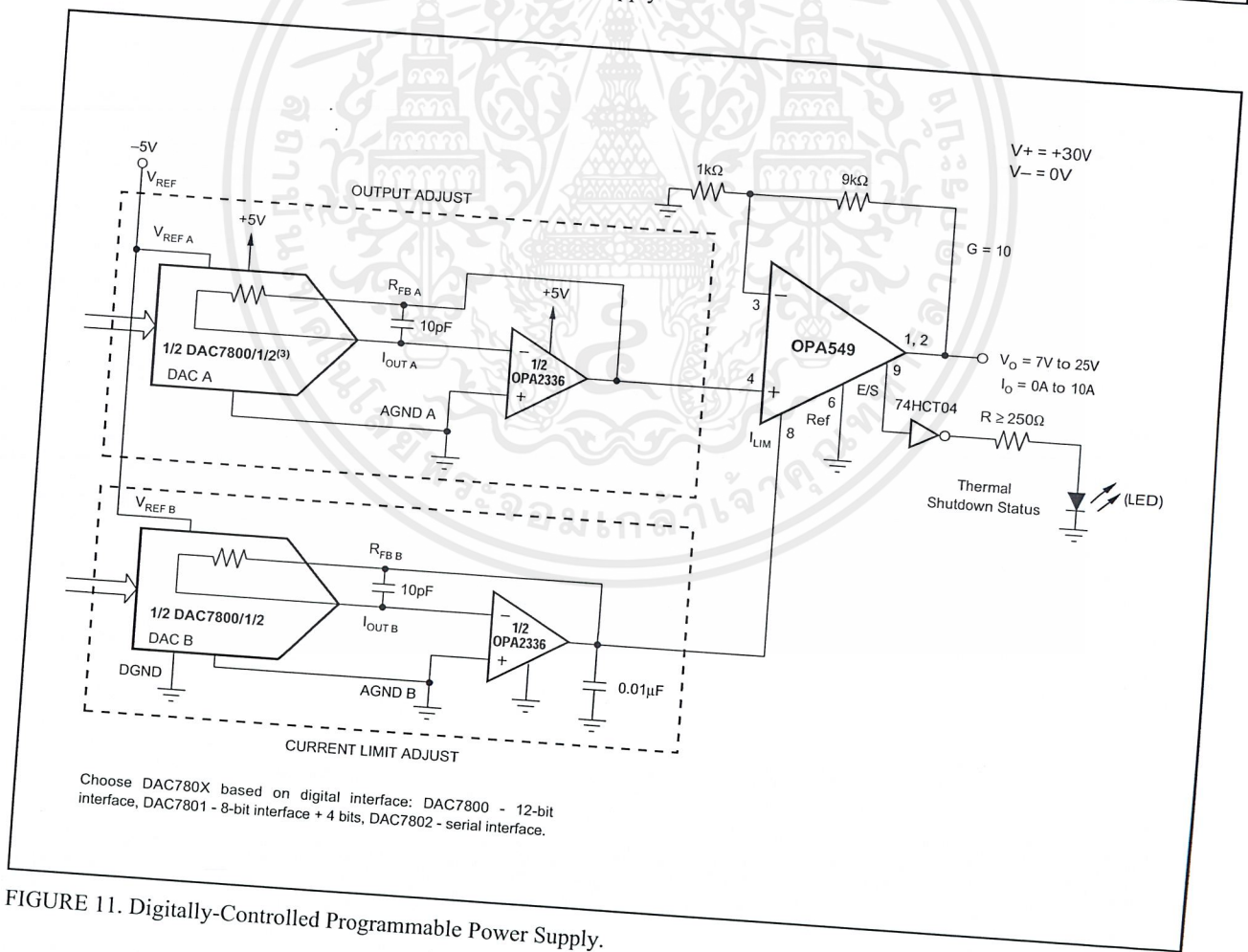


FIGURE 10. Resistor-Controlled Programmable Power Supply.



Choose DAC780X based on digital interface: DAC7800 - 12-bit interface, DAC7801 - 8-bit interface + 4 bits, DAC7802 - serial interface.

FIGURE 11. Digitally-Controlled Programmable Power Supply.

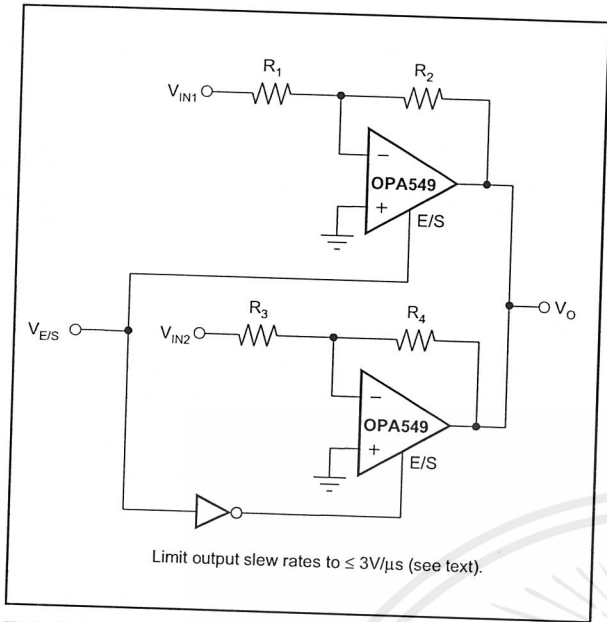


FIGURE 12. Switched Amplifier.

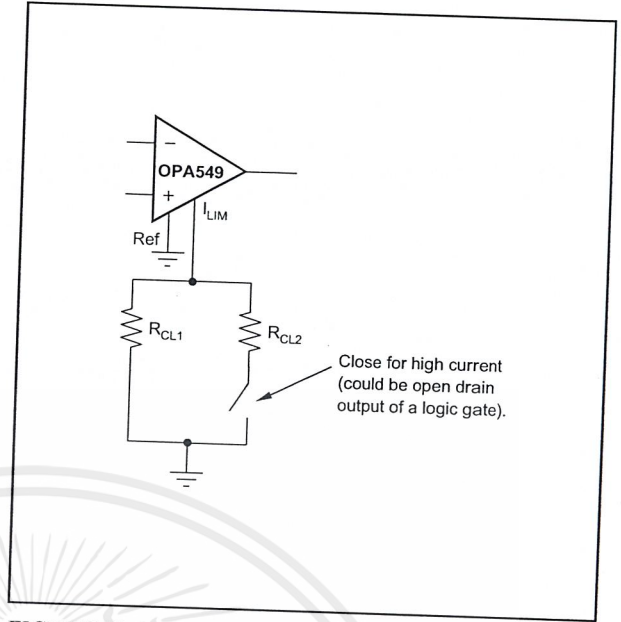


FIGURE 13. Multiple Current Limit Values.

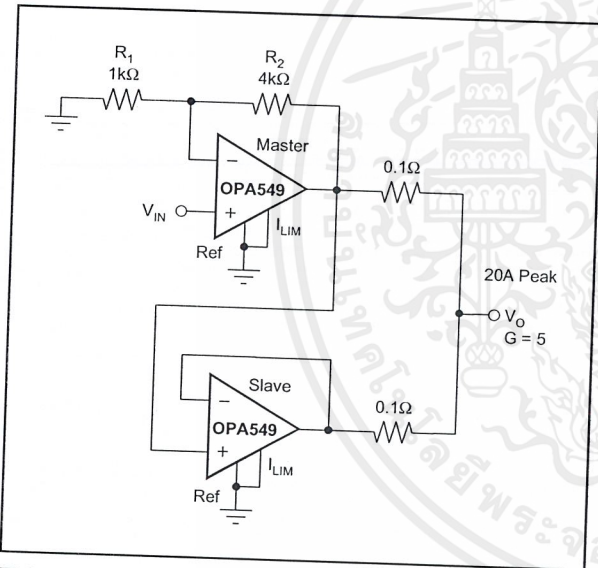


FIGURE 14. Parallel Output for Increased Output Current.

Current Transducer LTS 6-NP

$$I_{PN} = 6 \text{ At}$$

For the electronic measurement of currents : DC, AC, pulsed, mixed, with a galvanic isolation between the primary circuit (high power) and the secondary circuit (electronic circuit).



Electrical data

I_{PN}	Primary nominal r.m.s. current	6	At
I_P	Primary current, measuring range	0 .. ± 19.2	At
\hat{i}_{PDC}	Overload capability	250	At
V_{OUT}	Analog output voltage @ I_P	$2.5 \pm (0.625 \cdot I_P / I_{PN})$	V
	$I_P = 0$	2.5 ¹⁾	V
N_S	Number of secondary turns ($\pm 0.1\%$)	2000	
R_L	Load resistance	≥ 2	k Ω
R_M	Internal measuring resistance ($\pm 0.5\%$)	208.33	Ω
TCR_M	Thermal drift of R_M	< 50	ppm/K
V_C	Supply voltage ($\pm 5\%$)	5	V
I_C	Current consumption @ $V_C = 5 \text{ V}$	Typ $28 + I_S^{2) + (V_{OUT} / R_L)$	mA

Features

- Closed loop (compensated) multi-range current transducer using the Hall effect
- Unipolar voltage supply
- Compact design for PCB mounting
- Insulated plastic case recognized according to UL 94-V0
- Incorporated measuring resistance
- Extended measuring range.

Accuracy - Dynamic performance data

X	Accuracy @ I_{FN} , $T_A = 25^\circ\text{C}$	± 0.2	%
	Accuracy with R_M @ I_{FN} , $T_A = 25^\circ\text{C}$	± 0.7	%
ϵ_L	Linearity error	< 0.1	%
TCV_{OUT}	Thermal drift of V_{OUT} @ $I_P = 0$		
	-10°C .. +85°C	Typ 80	Max 200 ppm/K
	-40°C .. -10°C		250 ppm/K
$TC\epsilon_G$	Thermal drift of the gain		50 ³⁾ ppm/K
V_{OM}	Residual voltage @ $I_P = 0$, after an overload of $3 \times I_{PN}$		± 0.5 mV
	$5 \times I_{PN}$		± 2.0 mV
	$10 \times I_{PN}$		± 2.0 mV
t_{ra}	Reaction time @ 10 % of I_{PN}	< 100	ns
t_r	Response time @ 90 % of I_{PN}	< 400	ns
di/dt	di/dt accurately followed	> 15	A/ μs
f	Frequency bandwidth (0 .. -0.5 dB)	DC .. 100	kHz
	(-0.5 .. 1 dB)	DC .. 200	kHz

Advantages

- Excellent accuracy
- Very good linearity
- Very low temperature drift
- Optimized response time
- Wide frequency bandwidth
- No insertion losses
- High immunity to external interference
- Current overload capability.

Applications

- AC variable speed drives and servo motor drives
- Static converters for DC motor drives
- Battery supplied applications
- Uninterruptible Power Supplies (UPS)
- Switched Mode Power Supplies (SMPS)
- Power supplies for welding applications.

Application domain

- Industrial.

Copyright protected.

General data

T_A	Ambient operating temperature	-40 .. +85	°C
T_S	Ambient storage temperature	-40 .. +100	°C
	Insulating material group	III a	
m	Mass	10	g
	Standards ⁴⁾	EN 50178 : 1997	
		IEC 60950-1 : 2001	

Notes : 1) Absolute value @ $T_A = 25^\circ\text{C}$, $2.475 < V_{OUT} < 2.525$

2) Please see the operation principle on the other side

3) Only due to TCR_M

4) Specification according to IEC 61000-4-3 are not guaranteed between 95 and 110 MHz (value higher by 5% than the specification).

LEM reserves the right to carry out modifications on its transducers, in order to improve them, without previous notice.

LEM Components

Tope Co., Ltd. Tel: (02) 8228-0658 Fax: (02) 8228-0659

<http://www.sensor.com.tw>

e-mail: tope@ms1.hinet.net

050713/14
Page 1/3

www.lem.com

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Current Transducer LTS 6-NP

Isolation characteristics

V_d	R.m.s. voltage for AC isolation test, 50/60 Hz, 1 mn	3	kV
\hat{V}_w	Impulse withstand voltage 1.2/50 μ s	> 8	kV
V_e	R.m.s. voltage for partial discharge extinction @ 10pC	Min > 1.5	kV
dCp	Creepage distance ⁵⁾	Min 15.5	mm
dCl	Clearance distance ⁶⁾	6.35	mm
CTI	Comparative Tracking Index (Group III a)	175	

Application examples

According to EN 50178 and IEC 61010-1 standards and following conditions :

- Over voltage category OV 3
- Pollution degree PD2
- Non-uniform field

	EN 50178	IEC 61010-1
dCp, dCl, \hat{V}_w	Rated isolation voltage	Nominal voltage
Single isolation	600 V	600 V
Reinforced isolation	300 V	300 V

Notes : ⁵⁾ On housing

⁶⁾ On PCB with soldering pattern UTEC93-703.

Safety



This transducer must be used in electric/electronic equipment with respect to applicable standards and safety requirements in accordance with the following manufacturer's operating instructions.



Caution, risk of electrical shock

When operating the transducer, certain parts of the module can carry hazardous voltage (eg. primary busbar, power supply).

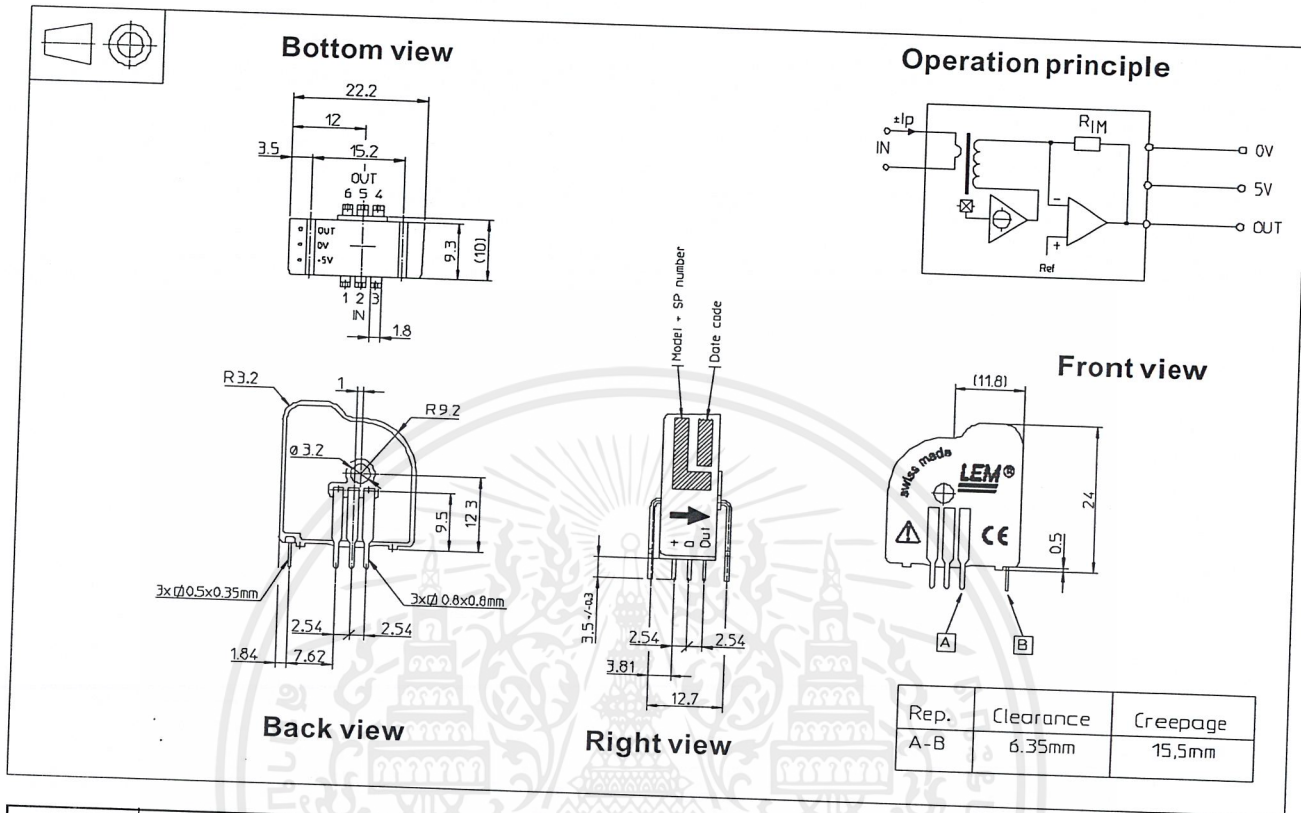
Ignoring this warning can lead to injury and/or cause serious damage.

This transducer is a built-in device, whose conducting parts must be inaccessible after installation.

protective housing or additional shield could be used.

Main supply must be able to be disconnected.

Dimensions LTS 6-NP (in mm. 1 mm = 0.0394 inch)



Number of primary turns	Primary nominal r.m.s. current I_{PN} [A]	Nominal output voltage V_{OUT} [V]	Primary resistance R_p [m Ω]	Primary insertion inductance L_p [μ H]	Recommended connections
1	± 6	2.5 ± 0.625	0.18	0.013	
2	± 3	2.5 ± 0.625	0.81	0.05	
3	± 2	2.5 ± 0.625	1.62	0.12	

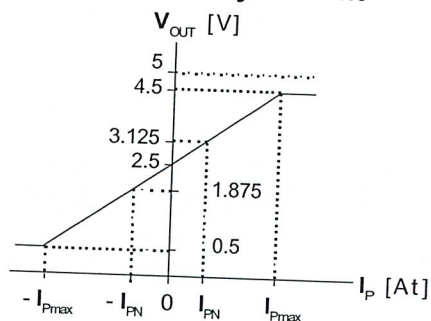
Mechanical characteristics

- General tolerance ± 0.2 mm
- Fastening & connection of primary
Recommended PCB hole 1.3 mm
- Fastening & connection of secondary
Recommended PCB hole 0.8 mm
- Additional primary through-hole $\varnothing 3.2$ mm

Remarks

- V_{OUT} is positive when I_p flows from terminals 1, 2, 3 to terminals 6, 5, 4.
- Temperature of the primary jumper should not exceed 100°C.

Output Voltage - Primary Current



ประวัติผู้เขียน



ชื่อ - นามสกุล : นายนาวิ รุจิตามพ์
 วัน เดือน ปีเกิด : 25 มกราคม 2534
 ที่อยู่ : 645/1 ถ.พิพิธ ต.บ้านโชด อ.เมืองชลบุรี จ.ชลบุรี
 ประวัติการศึกษา :
 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



ชื่อ - นามสกุล : นายยิ่งยศ ยวนยี่
 วัน เดือน ปีเกิด : 17 กรกฎาคม 2533
 ที่อยู่ : 2/2 ต.ต.จงเจริญ อ.คำเขื่อนแก้ว จ.ยโสธร
 ประวัติการศึกษา :
 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



ชื่อ - นามสกุล : นายวินัสพล เทพาพันธ์
 วัน เดือน ปีเกิด : 8 สิงหาคม 2533
 ที่อยู่ : 409/64 หมู่ 3 ต.ศิลา อ.เมือง จ.ขอนแก่น
 ประวัติการศึกษา :
 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



ชื่อ - นามสกุล : นายพงศ์ศรัณย์ ภัควีร์ภัทร
 วัน เดือน ปีเกิด : 9 ตุลาคม 2532
 ที่อยู่ : 177/2 หมู่ 2 ต.หนองบัวใต้ อ.เมือง จ.ตาก
 ประวัติการศึกษา :
 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ชุดจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ PHOTOVOLTAIC SIMULATOR

นางวี รุจิคามพ์ ยິงยศ ขวนยี่ วันสพล เทพachsen และ พงศ์ศรัณย์ ภักวีร์ภักตร์

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1 ซอย ฉลองกรุง 1 ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์ 02-329-8000 ต่อ 3925 E-Mail: prasopchok_ho@hotmail.com

บทคัดย่อ

ปริญญาโทฉบับนี้เกี่ยวข้องกับวงจรแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่อาศัยหลักการการทำงานของวงจรถอาน์ล็อกในการขยายคุณลักษณะทางไฟฟ้าที่ได้จากโฟโอดีโอดีที่มีขนาดพิกัดแรงดันกระแสมีค่าน้อยทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายต้นกำเนิด ซึ่งวงจรแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์นี้ ศึกษาคุณลักษณะทาง ไฟฟ้าของวงจรถอาน์ล็อกเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งได้เลียนแบบแผงเซลล์แสงอาทิตย์จริงเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของค่าความเข้มแสง ได้มีการเปรียบเทียบกับผลการจำลองผลผ่าน โปรแกรม OrCAD 9.1 เพื่อยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองวงจรถอาน์ล็อกเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้นำเสนอ นอกจากนี้ยังได้คัดลอกกราฟความสัมพันธ์ของคุณลักษณะทางไฟฟ้าระหว่างแรงดันกับกระแสและกำลังไฟฟ้ากับแรงดัน โดยใช้ซอฟต์แวร์สโอสโคปที่มีการเก็บข้อมูลแบบดิจิทัล

คำสำคัญ: แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์,คุณลักษณะทางไฟฟ้า,ค่าความเข้มแสง

Abstract

This thesis is concerned with photovoltaic simulator based on an analog circuit for electrical characteristic amplification from photodiodes. This photovoltaic simulator circuit is used for studying electrical characteristic of solar cell simulator which emulates the real solar cell panel when insolation is changed values. The experiment results are compared with the simulation results obtained from OrCAD 9.1 program package in order to confirm the correctness of the proposed solar cell simulator. In addition, V-I and P-V electrical characteristic curves are plotted by using digital storage oscilloscope.

Keywords: Photovoltaic Simulator, Electrical Characteristic, Insolation

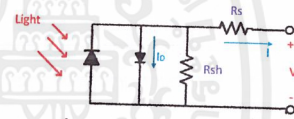
1. บทนำ

พลังงานแสงอาทิตย์ เป็นพลังงานหมุนเวียนที่สามารถนำมาใช้ได้อย่างไม่สิ้นสุดและมีลักษณะกระจายไปถึงผู้ใช้โดยตรง อีกทั้งยังเป็น

แหล่งพลังงานที่สะอาดปราศจากมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม ตามปกติมนุษย์ใช้พลังงานแสงอาทิตย์ตามธรรมชาติในชีวิตประจำวันอยู่แล้ว และตลอดหลายปีมานี้ เทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ได้รับการพัฒนาอย่างมากจนถึงขั้นนำมาใช้งานได้จริง เช่น การพัฒนาใช้เซลล์แสงอาทิตย์เปลี่ยนเป็นพลังงานจากดวงอาทิตย์มาเป็นพลังงานไฟฟ้า และได้รับความนิยมมากขึ้น

2. ทฤษฎีการทดลอง

2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 1 การต่อวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์

$$I = I_{ph} - I_0 = I_{ph} - I_{sat} \left(e^{\frac{V+IR_s}{V_t}} - 1 \right) \quad (1)$$

เมื่อ

I_{ph} คือ ค่ากระแสไฟฟ้าโฟโอดี

V_t คือ Thermal Voltage

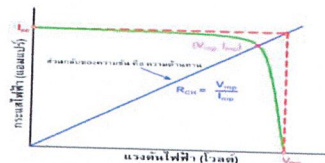
I_{sat} คือ ค่ากระแสอิ่มตัวของไดโอดี

I คือ ค่ากระแสไฟฟ้าเอาต์พุต

V คือ แรงดันเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์

R_s คือ ความต้านทานอนุกรม

พารามิเตอร์ที่บ่งบอกประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ประกอบด้วย กระแสลัดวงจร (ISC) แรงดันวงจรถัด (VOC) และฟิสิกส์แฟกเตอร์ (FF)



รูปที่ 2 ลักษณะกระแสและ แรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ จุดที่ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดคือที่จุด I_{mp} และ V_{mp}

$$FF = \frac{V_{mp} \times I_{mp}}{V_{oc} \times I_{sc}} \quad (2)$$

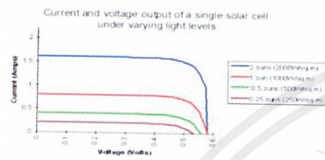
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ FF คือ ค่า Fill Factor เป็นค่าบอกระดับคุณภาพของรอยต่อ (ความต้านทาน) การรู้ค่าของกระแสที่รอยต่อเป็นต้น ถ้าค่า FF มีค่ามากและใกล้เคียงหนึ่ง หมายถึง PV นั้นมีคุณภาพสูง ซึ่งส่งผลกับประสิทธิภาพดังสมการ

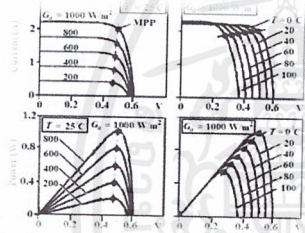
$$\eta = \frac{FF \times V_{oc} \times I_{sc}}{P_{in}} \quad (3)$$

2.2 ปัจจัยที่ลดทอนประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์

ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ขึ้นกับทั้งปัจจัยภายนอกและสมบัติของเซลล์ ได้แก่ อุณหภูมิ ความเข้มรังสีอาทิตย์ และความต้านทานอนุกรม



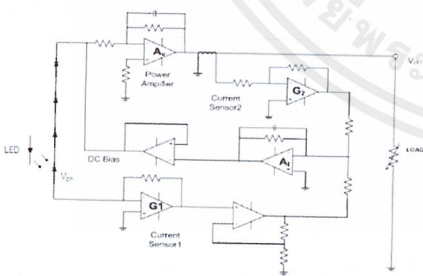
รูปที่ 3 กราฟกระแสและแรงดันความเข้มแสงค่าต่าง



รูปที่ 4 คุณสมบัติของเอาต์พุตของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

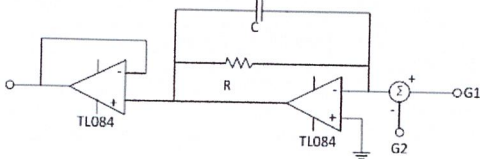
2.3 การออกแบบวงจรขยายไฟโด้ไดโอด

การออกแบบวงจรขยายกระแสไฟโด้ไดโอด สามารถพิจารณาได้ตามหลักการ ดังนี้



รูปที่ 5 หลักการออกแบบวงจรขยายกระแสไฟโด้ไดโอด

2.3.1 การออกแบบวงจร DC bias controller



รูปที่ 6 วงจร DC bias controller

ในการคำนวณหาอัตราขยายกระแสของวงจร DC bias controller สามารถแสดงให้เห็นได้จากสมการที่ 4

$$A_I = \frac{I_o}{I_{ph}} = \frac{G_2}{G_1} \quad (4)$$

เมื่อ A_I คือ อัตราขยายกระแสของตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์

I_o คือ กระแสไฟฟ้าเอาต์พุตของตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์

I_{ph} คือ กระแสลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิง

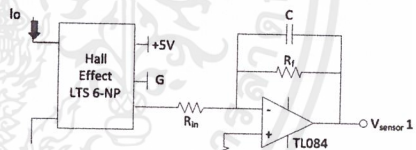
G_1 คือ อัตราขยายของวงจรตัวจับกระแสเอาต์พุต

G_2 คือ อัตราขยายของวงจรตัวจับกระแสไฟโด้

ข้อกำหนดในการออกแบบวงจร DC bias controller

กำหนดให้สามารถจ่ายกระแสเอาต์พุตได้ที่ประมาณ 1.15 A ที่พิกัดกระแสไฟโด้ลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์ 170 uA

2.3.1.1 วงจรตรวจจับกระแสเอาต์พุต (current sensor 1)

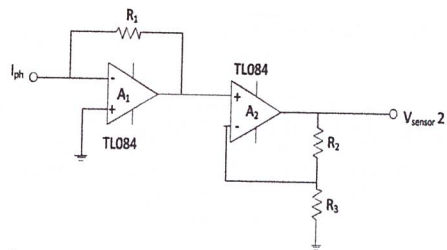


รูปที่ 7 วงจรตรวจจับกระแสเอาต์พุต

$$G_1 = \frac{V_{sensor 1}}{I_o}$$

เมื่อ $V_{sensor 1}$ คือ แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรตรวจจับกระแสเอาต์พุต

2.3.1.2 วงจรตรวจจับกระแสไฟโด้ลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์

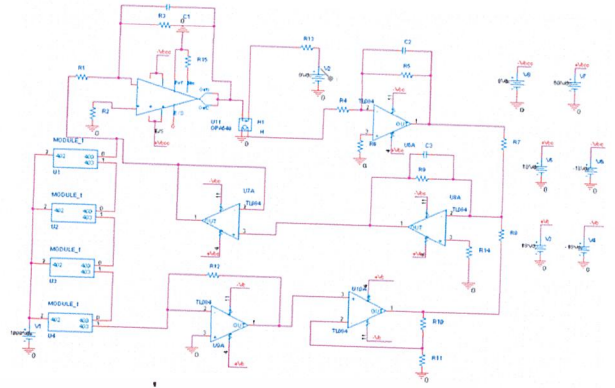


รูปที่ 8 วงจรตรวจจับกระแสไฟโด้ลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$G_2 = \frac{V_{sensor}^2}{I_{ph}} \quad (6)$$

เป็นวงจรที่ใช้สำหรับตรวจจับสนแสงไฟฟ้ไฟของเซลล์แสงอาทิตย์อั้งอิง โดยการตรวจจับสนจะอาศัยวงจรเปลี่ยนกระแสเป็นแรงดันคั้งนั้นการเลือกใช้ออปแอมป์เบอร์ TL084 โดยกำหนดให้ V_{sensor}^2 คือ แรงดันไฟฟ้ไฟเอาท์พุทของวงจรตรวจจับสนแสงไฟฟ้ไฟ



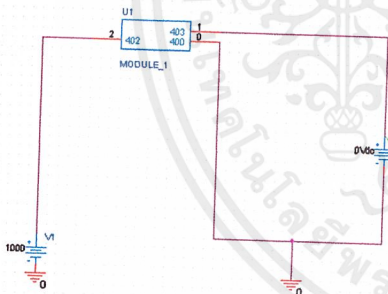
รูปที่ 12 วงจร ขยาย Photodiode 4 cell อนุกรม

3. การจำลองผลของโปรแกรม Orcad

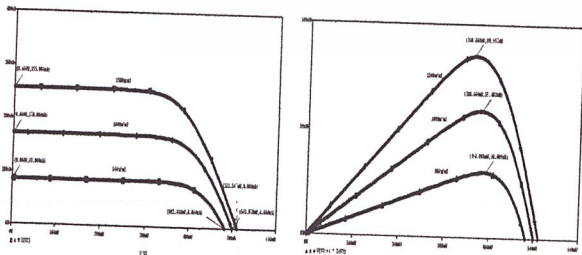
สามารถสร้างโค้ดโมเดลแบบจำลองคณิตศาสตร์ คั้งนี้

```
.subckt module_1 400 403 402 params: ta=1, tr=1, iscmr=1, pmaxmr=1, vocmr=1,
+ ns=1, np=1, nd=1
girradh 400 401 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))
.func uvet() (8.66e-5*(tr+273))
.func vocnorm() (vocmr/(nd*ns*uvet))
.func rsm() (vocmr/(iscmr)- pmaxmr*(1+vocnorm)/(iscmr**2*(vocnorm-
+ log((vocnorm)+0.72))))
rs 401 403 (rsm())
.ends module_1
```

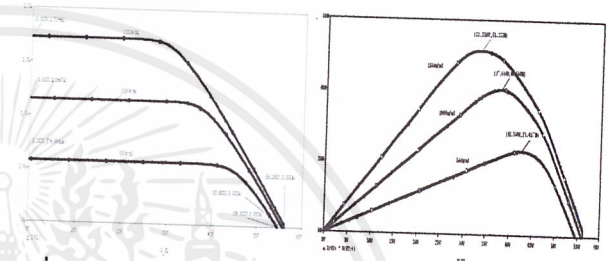
รูปที่ 9 code ของตัว model Photodiode ใน โปรแกรม OrcAD 9.1



รูปที่ 10 แบบจำลอง Photodiode 1 cell ในโปรแกรม Orcad 9.1



รูปที่ 11 กราฟคุณลักษณะทางไฟฟ้ไฟของวงจรไฟฟ้ไฟไดโอด 1 cell



รูปที่ 13 กราฟคุณลักษณะทางไฟฟ้ไฟของวงจรไฟฟ้ไฟไดโอด 4 cell อนุกรม

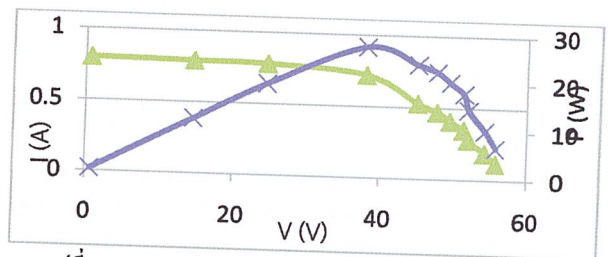
จากการพิจารณากราฟคุณลักษณะทางไฟฟ้ไฟของไฟฟ้ไฟไดโอดและกราฟคุณลักษณะของวงจรขยายพบว่า I V และ P มีคั้งขึ้นกับค่าความเข้มแสง

4. ผลการทดสอบวงจรจำลองเซลล์แสงอาทิตย์

แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่นำมาทดสอบคือ รุ่น BS40 โดยมีข้อมูล คั้งแสดงในตารางและรูปที่ 14 ที่ความเข้ม 700 วัตต์ต่อตารางเมตร

ตารางที่ 1 ข้อมูลเฉพาะของเซลล์แสงอาทิตย์รุ่น BS40

ข้อมูลเฉพาะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์รุ่น BS40	
กำลังไฟฟ้ไฟสูงสุด	40 วัตต์
แรงดันไฟฟ้ไฟเปิดวงจร	62.5 โวลต์
กระแสไฟฟ้ไฟลัดวงจร	1.15 แอมป์



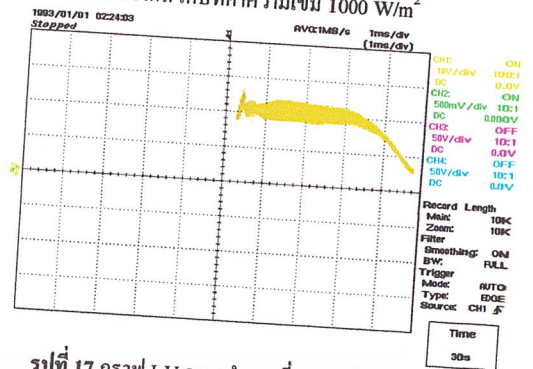
รูปที่ 14 กราฟคุณลักษณะไฟฟ้ไฟของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ BS40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกคั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2 ค่าคุณลักษณะไฟฟ้าแผงเซลล์แสงอาทิตย์

R (Ohm)	V (V)	I (A)	P (W)
0	0.69	0.8	0.552
20	14.64	0.79	11.5656
40	24.68	0.78	19.2504
60	38.2	0.72	27.504
80	45.2	0.53	23.956
100	47.8	0.47	22.466
120	49.6	0.41	20.336
140	51.5	0.35	18.025
160	52.15	0.28	14.602
180	54.3	0.19	10.317
200	55.9	0.12	6.708

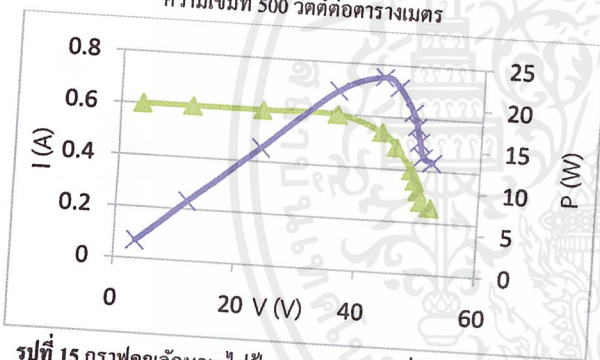
ผลการทดสอบจริงจากสโปกที่ค่าความเข้ม 1000 W/m²



รูปที่ 17 กราฟ I-V วงจรจำลองที่ความเข้ม 1000 W/m²

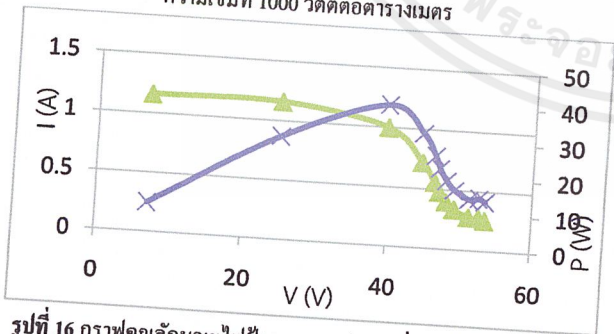
ผลการทดสอบวงจรจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ในสภาวะความเข้มแสงต่างๆ ดังนี้

- ความเข้มที่ 500 วัตต์ต่อตารางเมตร

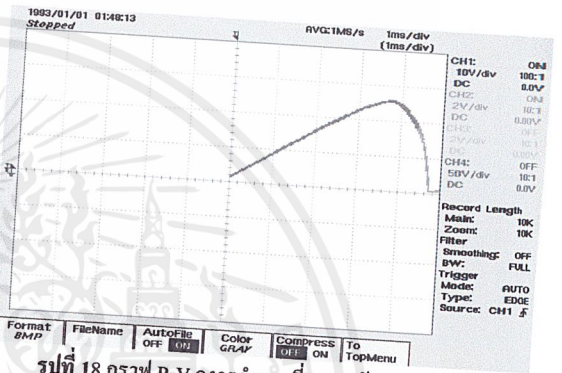


รูปที่ 15 กราฟคุณลักษณะไฟฟ้าของวงจรจำลองที่ความเข้ม 500 W/m²

- ความเข้มที่ 1000 วัตต์ต่อตารางเมตร



รูปที่ 16 กราฟคุณลักษณะไฟฟ้าของวงจรจำลองที่ความเข้ม 1000 W/m²



รูปที่ 18 กราฟ P-V วงจรจำลองที่ความเข้ม 1000 W/m²

5. สรุปผลการทดลอง

การจำลองแบบวงจรเซลล์แสงอาทิตย์ พบว่าแบบจำลองให้ อัตราขยายตามแรงดันไฟฟ้าตามที่ได้ออกแบบไว้ในการควบคุมจุดทำงานของแบบจำลองสามารถให้อัตราขยายกระแสที่ถูกต้องมีขีดจำกัดของกระแสที่กระแสไฟฟ้าลัดวงจรเท่านั้น และแบบจำลองสามารถแสดงเอาท์พุทได้ตามที่ออกแบบ แต่เนื่องจากแบบจำลองที่ได้ออกแบบในโปรแกรมเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ผลลัพธ์ที่ออกมาเป็นค่าทางคณิตศาสตร์ จึงไม่มีผลที่เกิดขึ้นจากสัญญาณรบกวน ดังนั้นในการออกแบบจึงต้องคำนึงด้วย

เอกสารอ้างอิง

- [1] เอก เอื้อตระการวิวัฒน์, วิศิษฐ์ ชูรักณ์, วิจิตร กิณเรศ "แบบจำลองแหล่งจ่ายไฟจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกต้อง" ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [2] Hiroshi Nagayoshi, Shinji Orio, Yuji Kono, and Hirota Nakajima "NOVEL PV ARRAYMODULE I-V CURVE SIMULATOR CIRCUIT" Shonan Institute of Technology, 1-1-25, Nishikaigan, Fujisawa, Kanagawa. Japan

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้