

อภิธานนาการ



สำนักหอสมุด

การติดตามจุดกำลังสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

โดยใช้วงจรทระดับแรงดัน

MAXIMUM-POWER-POINT TRACKING

BY USING A STEP-UP CONVERTER

17196787

นายวิริยา จันท์เขียว รหัส 55361007

นายวีระพล สายสุรินทร์ รหัส 55361014

นายอภิสิทธิ์ ประมูลวงศ์ รหัส 55364480

สำนักหอสมุด มหาวิทยาลัยนครสวรรค์

วันลงทะเบียน...12...ค.ย. 2558

เลขทะเบียน.....

เลขเรียกหนังสือ.....

พ  
ว 6940  
2558

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครสวรรค์

ปีการศึกษา 2558



## ใบรับรองปริญญาโท

ชื่อหัวข้อโครงการ การติดตามจุดกำลังสูงสุดของแฉงเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้วงจรทระดับแรงดัน

ผู้ดำเนินโครงการ นายวิริยา จันทร์เขียว รหัส 55361007  
นายวีระพล สายสุรินทร์ รหัส 55361014  
นายอภิสิทธิ์ ประมุขวงศ์ รหัส 55364480

ที่ปรึกษาโครงการ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นิพัทธ์ จันทร์มินทร์

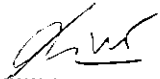
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

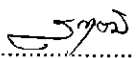
ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

ปีการศึกษา 2558

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อนุมัติให้ปริญญาโทฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

.....ที่ปรึกษาโครงการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นิพัทธ์ จันทร์มินทร์)

.....กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุภวรรณ พลพิทักษ์ชัย)

.....กรรมการ  
(ดร. สราวุธ วัฒนวงศ์พิทักษ์)

ชื่อหัวข้อโครงการ การติดตามจุดกำลังสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้วงจรทระดับแรงดัน

ผู้ดำเนินโครงการ นายวิริยา จันทร์เขียว รหัส 55361007  
นายวีระพล สายสุรินทร์ รหัส 55361014  
นายอภิสิทธิ์ ประมุขวงศ์ รหัส 55364480

ที่ปรึกษาโครงการ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นิพัทธ์ จันทรมินทร์

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

ปีการศึกษา 2558

### บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการติดตามจุดกำลังสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้วงจรทระดับแรงดันในการติดตามจุดกำลังสูงสุดผ่านตัวควบคุมแบบพีดับเบิลยูเอ็ม ซึ่งกระแสและแรงดันเอาต์พุตของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ถูกตรวจวัดผ่านตัวรับรู้และส่งค่าให้ไมโครคอนโทรลเลอร์คำนวณค่ากำลังไฟฟ้าแล้วประมวลผลตามหลักการพีแอนด์โอก่อนส่งสัญญาณควบคุมป้อนให้กับตัวควบคุมแบบพีดับเบิลยูเอ็มซึ่งนำไปใช้เปรียบเทียบกับสัญญาณอ้างอิงเพื่อปรับค่าดีวีไอซ์เกิลของมอสเฟตในวงจร ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนจุดทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้ขยับเข้าหาจุดกำลังสูงสุด จากผลการทดสอบการติดตามจุดกำลังสูงสุดที่ค่าความเข้มแสง  $300 \text{ W/m}^2$  พบว่าสามารถดึงกำลังไฟฟ้าได้เพิ่มขึ้นเป็น 3 เท่าจากเดิม และการติดตามจุดกำลังสูงสุดที่ค่าความเข้มแสง  $760 \text{ W/m}^2$  สามารถดึงกำลังไฟฟ้าได้เพิ่มขึ้นเป็น 4.5 เท่าจากเดิม นอกจากนี้ผลการทดสอบยังแสดงให้เห็นว่าวงจรสามารถติดตามจุดกำลังสูงสุดในขณะที่ความเข้มแสงเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วได้สำเร็จโดยใช้เวลาไม่เกิน 2 s

<b>Project title</b>	Maximum-Power-Point Tracking by Using a Step-Up Converter		
<b>Name</b>	Mr. Wiriya	Chankheaw	ID. 55361007
	Mr. Weeraphon	Saisurin	ID. 55361014
	Mr. Apisit	Pramoonwong	ID. 55364480
<b>Project advisor</b>	Asst. Prof. Niphat Jantharamin, Ph.D.		
<b>Major</b>	Electrical Engineering		
<b>Department</b>	Electrical and Computer Engineering		
<b>Academic year</b>	2015		

---

### Abstract

This thesis presents an extraction of maximum power from a Photovoltaic (PV) module by using a step-up converter. Output current and voltage of the PV panel are monitored via current and voltage sensors, and then fed into an Arduino UNO R3 for power calculation and maximum-power-point tracking according to the Perturb and Observe (P&O) method. Correspondingly, a control signal is generated by the microcontroller and then fed into a PWM controller where it is compared with a repetitive triangular waveform acted as a reference signal. As a result, a switch control signal is produced for regulating switching action of a MOSFET in a step-up converter in terms of duty cycle. In consequence, the operating point of the PV module is shifted towards the maximum power point. In this project, experimental results of maximum-power-point tracking show that the PV output power can be tripled under  $300 \text{ W/m}^2$  of irradiance and becomes 4.5 times higher under  $760 \text{ W/m}^2$  of irradiance, and this technique successfully provides PV power maximization even under quick change in irradiance by less than 2 s.

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้ดำเนินโครงการขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นิพัทธ์ จันทรมินทร์อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ซึ่งเป็นผู้ที่เอาใจใส่ในทุกรายละเอียดของการดำเนินโครงการ โดยให้ทั้งความรู้และคำแนะนำในการแก้ไขปัญหาต่างๆอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งโครงการสำเร็จลุล่วง รวมถึงแนะนำการเขียนปริญญานิพนธ์การใช้ภาษา และตรวจทานแก้ไขอย่างละเอียดจนได้ปริญญานิพนธ์เป็นรูปเล่มสมบูรณ์

ขอขอบคุณกรรมการสอบโครงการ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุภวรรณ พลพิทักษ์ชัย และ ดร. สรวุฒิ วัฒนวงศ์พิทักษ์ ซึ่งกรุณาให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ในการดำเนินโครงการ

ขอขอบคุณคุณอดิเรก บัวคำ (พี่ต๊อ) รุ่นพี่สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ที่คอยช่วยเหลือสนับสนุนอุปกรณ์ที่ใช้ในโครงการและสละเวลาส่วนตัวเพื่อให้ความรู้และคำแนะนำอันเป็นประโยชน์ยิ่งในการเลือกใช้อุปกรณ์ทำให้ผู้ดำเนินงานมีแนวทางในการสร้างชิ้นงานให้บรรลุตามวัตถุประสงค์ของโครงการที่ตั้งไว้

และขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ที่ให้อุปกรณ์วัดในการทดสอบชิ้นงานที่สร้างขึ้น โดยเฉพาะที่ร้อยตรีธานี โกสุม (พี่ตัน) ซึ่งเป็นรุ่นพี่สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า และปัจจุบันเป็นครูช่างของภาควิชาที่อำนวยความสะดวกในการยืมใช้อุปกรณ์จนกระทั่งการทดสอบต่างๆสิ้นสุดลง

รวมทั้งขอขอบคุณรัฐบาลไทยที่จัดตั้งกองทุนเงินให้กู้ยืมเพื่อการศึกษา (กยศ.) ซึ่งสนับสนุนให้ทุนการศึกษาแก่นายวิริยา จันท์เจียว และนายวีระพล สายสุรินทร์ เป็นระยะเวลา 3 ปี ในการศึกษาในระดับปริญญาตรี

ในท้ายที่สุดนี้ เหนือสิ่งอื่นใด ผู้ดำเนินโครงการขอกราบขอบพระคุณบิดาและมารดา ซึ่งให้การสนับสนุนในทุกด้านเกี่ยวกับการศึกษาของผู้ดำเนินโครงการ รวมทั้งมอบความเมตตา และคอยเป็นกำลังใจให้จนประสบความสำเร็จในวันนี้

นายวิริยา จันท์เจียว

นายวีระพล สายสุรินทร์

นายอภิสิทธิ์ ประมูลวงศ์

# สารบัญ

	หน้า
ใบรับรองปริญญาโท.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	2
1.3 ขอบเขตของโครงการ.....	2
1.4 ขั้นตอนและแผนการดำเนินงาน.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.6 งบประมาณ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 เซลล์แสงอาทิตย์.....	4
2.1.1 ความเป็นมาและหลักการทำงาน.....	4
2.1.2 โครงสร้างและหลักการทำงานพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์.....	4
2.1.3 การเคลื่อนที่ของประจุพาหะในซิลิกอนที่ถูกละเล.....	5
2.1.4 ผลของรอยต่อพีเอ็น.....	6
2.1.5 กระบวนการทางฟิสิกส์ในเซลล์แสงอาทิตย์.....	8
2.1.6 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ในอุดมคติ.....	10
2.1.7 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์จริง.....	11
2.1.8 เส้นโค้งคุณลักษณะกระแส-แรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์.....	12
2.1.9 ผลของความเข้มแสงต่อคุณลักษณะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์.....	13

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.1.10 ผลของอุณหภูมิต่อคุณลักษณะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์.....	15
2.1.11 เส้นโค้งคุณลักษณะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จากการทดสอบ .....	16
2.2 การติดตามจุดกำลังสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์.....	17
2.2.1 วิธีการการติดตามจุดกำลังสูงสุด.....	18
2.3 วงจรทบทระดับแรงดัน.....	24
2.4 สัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม .....	28
2.5 สัญญาณพีนเปลือยและสัญญาณสามเหลี่ยม .....	30
2.6 แผงวงจร Arduino .....	32
<b>บทที่ 3 การออกแบบและสร้างระบบติดตามจุดกำลังสูงสุด .....</b>	<b>34</b>
3.1 การออกแบบการทำงานของระบบติดตามจุดกำลังสูงสุด .....	34
3.2 วงจรทบทระดับแรงดัน.....	37
3.2.1 วงจรกำลังของวงจรทบทระดับแรงดัน .....	37
3.2.2 วงจรควบคุมของวงจรทบทระดับแรงดัน .....	40
3.3 แผนการเชื่อมต่อใช้งานวงจรในระบบติดตามจุดกำลังสูงสุด.....	45
3.3.1 วงจรทบทระดับแรงดัน .....	45
3.3.2 ไมโครคอนโทรลเลอร์ .....	46
3.3.3 ตัวรับรู้กระแสและแรงดัน.....	47
3.3.4 วงจรแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง .....	48
<b>บทที่ 4 ผลการทดสอบวงจรทบทระดับแรงดันและการติดตามจุดกำลังสูงสุด.....</b>	<b>50</b>
4.1 การทดสอบประสิทธิภาพวงจรทบทระดับแรงดัน.....	50
4.2 การทดสอบการติดตามจุดกำลังสูงสุด.....	53
4.2.1 การติดตามจุดกำลังสูงสุดที่ความเข้มแสงคงที่ .....	54
4.2.2 การติดตามจุดกำลังสูงสุดที่ความเข้มแสงเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว .....	57

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ .....	61
5.1 สรุปผลการดำเนินโครงการ .....	61
5.2 ปัญหาและแนวทางการแก้ไข .....	62
5.3 แนวทางการพัฒนาต่อไป .....	62
เอกสารอ้างอิง .....	63
ภาคผนวก ก รหัสต้นฉบับของโปรแกรมควบคุม .....	64
ภาคผนวก ข รายละเอียดของไมโครคอนโทรลเลอร์ ATmega328 .....	70
ภาคผนวก ค รายละเอียดของมอเตอร์หมายเลข IRFZ44N .....	75
ภาคผนวก ง รายละเอียดของไดโอดหมายเลข FR203 .....	80
ภาคผนวก จ รายละเอียดของไอซีหมายเลข LF351 .....	83
ประวัติผู้ดำเนินโครงการ .....	92



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ตารางสรุปอัลกอริทึมของวิธีป็นเนิน และวิธีพีแอนด์โอ.....	19
3.1 วิธีการติดตามจุดกำลังสูงสุดตามหลักการพีแอนด์โอ.....	35
4.1 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของวงจรทระดับแรงดัน.....	50
4.2 ผลการทดสอบวงจรทระดับแรงดัน โดยการเปลี่ยนค่าของความต้านทาน ที่ค่าตัวต่อไอซ์เคล็ดเดียวกัน.....	52



## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างทั่วไปของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากซิลิกอน.....	5
2.2 การใส่สารเจือลงในซิลิกอน .....	6
2.3 การกระจายประจุพาหะที่รอยต่อพีเอ็น และกระแสที่ไหลผ่านรอยต่อ .....	7
2.4 หลักการทำงานโดยสังเขปของเซลล์แสงอาทิตย์ .....	10
2.5 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ในอุดมคติที่ต่อกับภาระ .....	11
2.6 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์จริงที่ต่อกับภาระ.....	12
2.7 เส้นโค้งคุณลักษณะกระแส-แรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์.....	12
2.8 ตัวอย่างเส้น โค้งคุณลักษณะกำลัง-แรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ .....	13
2.9 ผลของความเข้มแสงต่อเส้น โค้งคุณลักษณะกระแส-แรงดัน .....	14
2.10 ผลของความเข้มแสงต่อเส้น โค้งคุณลักษณะกำลัง-แรงดัน .....	14
2.11 ผลของอุณหภูมิต่อเส้น โค้งคุณลักษณะกระแส-แรงดัน .....	15
2.12 ผลของอุณหภูมิต่อเส้น โค้งคุณลักษณะกำลัง-แรงดัน .....	16
2.13 เส้นโค้งคุณลักษณะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จากการทดลองจริง .....	16
2.14 เส้นโค้งคุณลักษณะกำลังของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จากการทดลองจริง .....	17
2.15 เส้น โค้งคุณลักษณะกำลังของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั่วไป .....	18
2.16 การเข้าสู่จุดกำลังสูงสุดของวิธีปีนเนิน และวิธีพีแอนด์โอ.....	20
2.17 อัลกอริทึมของการติดตามจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีความนำเพิ่มขึ้น.....	21
2.18 แผนภาพวงจรทระดับแรงดัน .....	24
2.19 แผนภาพวงจรสมมูลของวงจรทระดับแรงดันเมื่อสวิตช์นำกระแส.....	25
2.20 แผนภาพวงจรสมมูลของวงจรทระดับแรงดันเมื่อสวิตช์ไม่นำกระแส .....	26
2.21 รูปคลื่นสัญญาณในวงจรทระดับแรงดัน .....	27
2.22 อัตราขยายแรงดันไฟฟ้าของวงจรทระดับแรงดัน .....	28
2.23 แผนภาพโครงสร้างการกำเนิดสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม.....	29
2.24 การสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มทั่วไป .....	29
2.25 แผนภาพโครงสร้างการกำเนิดสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มอย่างง่าย.....	30
2.26 สัญญาณพินเปลือย .....	30
2.27 สัญญาณสามเหลี่ยม.....	31
2.28 ลักษณะของสัญญาณที่ได้จากเครื่องกำเนิดสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม .....	31

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.29 รูปของแผงวงจร Arduino รุ่น UNO R3.....	32
2.30 โครงสร้างไมโครคอนโทรลเลอร์ รุ่น ATmega328P-PU.....	33
3.1 แผนภาพวงจรของระบบติดตามจุดกำลังสูงสุดที่ออกแบบ.....	34
3.2 ฝั่งงานการประมวลผลของไมโครคอนโทรลเลอร์ตามหลักการพีแอนด์ไอ.....	36
3.3 วงจรทระดับแรงดัน.....	37
3.4 สัญญาณกระแสของตัวเหนี่ยวนำที่คัตไชเคิล 20%.....	39
3.5 สัญญาณกระแสของตัวเหนี่ยวนำที่คัตไชเคิล 50%.....	39
3.6 สัญญาณกระแสของตัวเหนี่ยวนำที่คัตไชเคิล 80%.....	39
3.7 หมายเลขและตำแหน่งขาของไอซีออปแอมป์หมายเลข LF351.....	40
3.8 แผนภาพวงจรสร้างสัญญาณสามเหลี่ยมด้วย LF351.....	41
3.9 สัญญาณสามเหลี่ยมที่ความถี่ 10 kHz.....	41
3.10 วงจรกรองความถี่ต่ำและวงจรขยายสามเท่า.....	42
3.11 แผนภาพวงจรเปรียบเทียบ.....	43
3.12 แผนภาพวงจรของตัวควบคุมแบบพีดับเบิลยูเอ็ม.....	43
3.13 สัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มที่คัตไชเคิล 20%.....	44
3.14 สัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มที่คัตไชเคิล 50%.....	44
3.15 สัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มที่คัตไชเคิล 80%.....	44
3.16 แผนการเชื่อมต่อใช้งานแผงวงจรทระดับแรงดันในระบบ.....	45
3.17 แผนภาพวงจรตัวแปลงผันกำลังกระแสตรงสองทิศทาง.....	46
3.18 แผนการเชื่อมต่อใช้งานตัวรับรู้กระแสในระบบ.....	47
3.19 แผนการเชื่อมต่อใช้งานตัวรับรู้กระแสในระบบ.....	48
3.20 แผนภาพวงจรแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง $\pm 15$ Vdc.....	48
3.21 วงจรแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง $\pm 15$ Vdc.....	48
3.22 แผงวงจรของระบบติดตามจุดกำลังสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์.....	49
4.1 ประสิทธิภาพของวงจรทระดับแรงดันที่คัตไชเคิลต่างๆ.....	51
4.2 ประสิทธิภาพของวงจรทระดับแรงดันที่ค่าโหลดตัวต้านทานต่างๆ.....	53
4.3 ผลการติดตามกำลังสูงสุดที่ค่าความเข้มแสง $300 \text{ W/m}^2$ .....	55
4.4 ผลการติดตามกำลังสูงสุดที่ค่าความเข้มแสง $760 \text{ W/m}^2$ .....	56

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.5 ผลการติดตามกำลังสูงสุดเมื่อความเข้มแสงเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว กรณีที่ 1.....	58
4.6 ผลการติดตามกำลังสูงสุดเมื่อความเข้มแสงเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว กรณีที่ 2.....	60



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ

ในสถานการณ์ปัจจุบันความต้องการใช้พลังงานทั่วโลกเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องส่งผลให้ปริมาณพลังงานสำรองลดลงและวิกฤติด้านพลังงานมีแนวโน้มเกิดเร็วขึ้น เนื่องจากพลังงานที่เราใช้ส่วนใหญ่ผลิตมาจากเชื้อเพลิงฟอสซิล (Fossil fuels) ได้แก่ ถ่านหิน น้ำมัน และก๊าซธรรมชาติ ซึ่งกระบวนการในการผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงประเภทนี้ส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมเพราะมีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) ซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักของก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse gases) ขึ้นสู่ชั้นบรรยากาศ เมื่อมีก๊าซชนิดนี้ในชั้นบรรยากาศสูงขึ้นทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยของโลกสูงขึ้น ซึ่งเรียกว่าภาวะโลกร้อน (Global warming) การใช้พลังงานทางเลือก (Alternative energy) แทนเชื้อเพลิงฟอสซิลจึงได้รับความสนใจมากขึ้น ได้แก่ พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานน้ำ เป็นต้น

พื้นที่ในประเทศไทยได้รับปริมาณพลังงานแสงอาทิตย์เฉลี่ยต่อปีในปริมาณสูง การแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรงสามารถทำได้โดยใช้เซลล์แสงอาทิตย์ แม้ระบบผลิตไฟฟ้าพลังแสงอาทิตย์อาจมีต้นทุนสูง แต่มีค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาน้อยเนื่องจากไม่มีส่วนเคลื่อนไหว และราคาของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีแนวโน้มถูกลงเรื่อยๆ และอายุการใช้งานไม่ต่ำกว่า 20 ปี โดยอาจแบ่งระบบดังกล่าวได้เป็นสองประเภทคือแบบอิสระ (Stand-alone photovoltaic systems) และแบบเชื่อมต่อการไฟฟ้า (Grid-connected photovoltaic systems) ระบบผลิตไฟฟ้าพลังแสงอาทิตย์แบบอิสระได้เข้ามามีความสำคัญมากขึ้นในการจ่ายไฟฟ้าในพื้นที่ที่ห่างไกลจากการไฟฟ้า

กำลังเอาต์พุตของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าขึ้นอยู่กับสภาพอากาศ นั่นคือ ความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิของแผง ส่งผลให้จุดทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์อาจไม่อยู่ที่จุดกำลังสูงสุด (Maximum power point: MPP) ซึ่งเป็นจุดทำงานที่ทำให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์จ่ายกำลังเอาต์พุตได้มากที่สุดสำหรับสภาพอากาศขณะนั้น การควบคุมให้จุดทำงานของแผงอยู่ที่จุดกำลังสูงสุด ซึ่งเรียกกระบวนการนี้ว่า “การติดตามจุดกำลังสูงสุด” (Maximum power point tracking: MPPT) นิยมใช้ตัวแปลงผันกำลัง (Power converters) ชนิดต่างๆ ซึ่งมีการทำงานเป็นวงจรสวิตชิง (Switching circuit) โดยในโครงการนี้ได้เลือกใช้วงจรทวิระดับแรงดัน (Step-up converter) เพื่อดึงกำลังสูงสุดจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์

### 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

โครงการนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อใช้วงจรทระดับแรงดันในการดึงกำลังไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้มากที่สุด โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุมการทำงาน

### 1.3 ขอบเขตของโครงการ

- 1) สร้างวงจรทระดับแรงดันเพื่อดึงกำลังไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 100 W และสัญญาณขับนำสวิทช์ด้วยหลักการพีคดับเบิลยูเอ็ม
- 2) ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์สร้างสัญญาณควบคุมให้สอดคล้องกับหลักการพีแอนด์ไอ เพื่อติดตามจุดกำลังสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์
- 3) วงจรสามารถติดตามจุดกำลังสูงสุดในขณะที่ความเข้มแสงคงที่และในขณะที่ความเข้มแสงเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว

### 1.4 ขั้นตอนและแผนการดำเนินงาน

รายละเอียด	พ.ศ. 2557					พ.ศ. 2558			
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.
1) ศึกษาการทำงานของวงจรทระดับแรงดันและวงจรสร้างสัญญาณพีคดับเบิลยูเอ็ม									
2) สร้างวงจรทระดับแรงดันและวงจรสร้างสัญญาณพีคดับเบิลยูเอ็ม									
3) เขียนโปรแกรมควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ตามหลักการติดตามจุดกำลังสูงสุด									
4) ทดสอบการใช้วงจรทระดับแรงดันเพื่อดึงกำลังสูงสุดจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์									
5) สรุปผลและจัดทำรูปเล่มปริิญาานิพนธ์									

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

โครงการนี้ได้ส่งเสริมการลดปริมาณการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลโดยใช้ประโยชน์จากพลังงานแสงอาทิตย์ซึ่งเป็นพลังงานทางเลือกชนิดหนึ่งที่เหมาะสมสำหรับประเทศไทยในการนำมาแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้า อีกทั้งวงจรและหลักการควบคุมที่ใช้ในโครงการสามารถดึงกำลังไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ในแต่ละสภาพอากาศ นอกจากนี้ หลักการดังกล่าวยังสามารถประยุกต์ใช้โดยไม่ขึ้นอยู่กับชนิดหรือพิกัดกำลังของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

## 1.6 งบประมาณ

1) วงจรทบระดับแรงดันและวงจรควบคุม	1,000 บาท
2) ตัวรีบูตแรงดันและตัวรีบูตกระแส	200 บาท
3) ไมโครคอนโทรลเลอร์	700 บาท
4) ค่าถ่ายเอกสารและเข้าเล่มปริญญาบัตร	800 บาท
5) วงจรแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง	300 บาท
รวมเป็นเงินทั้งสิ้น (สามพันบาทถ้วน)	<u>3,000 บาท</u>
หมายเหตุ: ถัวเฉลี่ยทุกรายการ	

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

ในโครงการนี้จุดทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ถูกควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ให้อยู่ที่จุดกำลังสูงสุด โดยที่ไมโครคอนโทรลเลอร์จะสร้างสัญญาณควบคุมสวิตช์ของตัวแปลงกำลัง (Power converter) ซึ่งในที่นี้ใช้วงจรทอนระดับแรงดันเพื่อควบคุมให้แรงดันด้านออกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเท่ากับแรงดันไฟฟ้าที่จุดกำลังสูงสุด ดังนั้นในส่วนนี้จะขอกล่าวถึงทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้องกับเซลล์แสงอาทิตย์ วงจรทอนระดับแรงดัน ไมโครคอนโทรลเลอร์ และการหาจุดกำลังสูงสุด

#### 2.1 เซลล์แสงอาทิตย์

##### 2.1.1 ความเป็นมาและหลักการทำงาน

เซลล์แสงอาทิตย์ถูกสร้างขึ้นมาครั้งแรกในปี พ.ศ. 2497 (ค.ศ. 1954) โดย แชปปีน (Chapin) ฟูลเลอร์ (Fuller) และเพียร์สัน (Pearson) แห่งเบลล์เทเลโฟน (Bell Telephone) ซึ่งค้นพบเทคโนโลยีการสร้างรอยต่อพี-เอ็น (p-n junction) โดยวิธีการแพร่สารเข้าไปในผลึกของซิลิกอนจนได้เซลล์แสงอาทิตย์ชิ้นแรกของโลกซึ่งมีประสิทธิภาพเพียง 6% ในระยะแรกเซลล์แสงอาทิตย์ส่วนใหญ่จะใช้สำหรับโครงการด้านอวกาศ ดาวเทียม โดยใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็นแหล่งกำเนิดพลังงานไฟฟ้า แต่หลังจากเกิดวิกฤตการณ์น้ำมันในปี พ.ศ. 2516 (ค.ศ. 1973) จึงได้มีการนำแผงเซลล์แสงอาทิตย์มาใช้กับงานบนพื้นโลกมากขึ้นตั้งแต่นั้นเป็นต้นมา

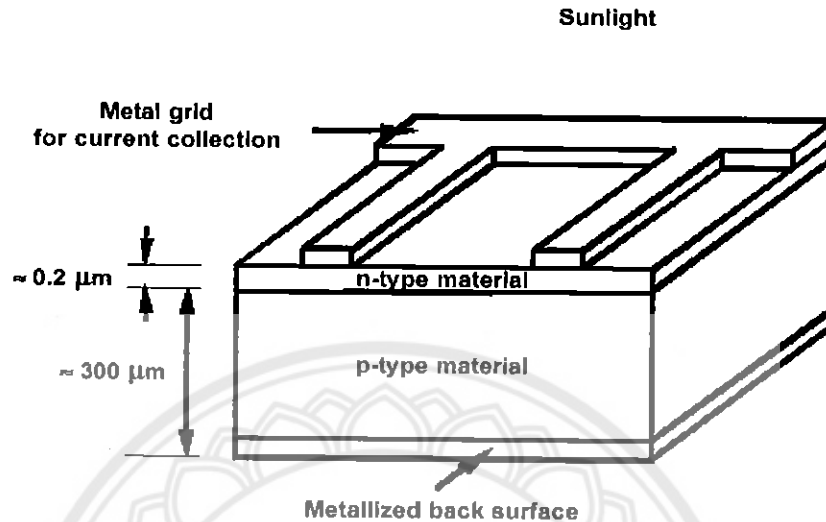
##### 2.1.2 โครงสร้างและหลักการทำงานพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์

การเปลี่ยนพลังงานการแผ่รังสีแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรง สามารถเป็นจริงได้ด้วยปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิก (Photovoltaic effect) โดยใช้เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cells) คำว่า "Photovoltaic" มักจะถูกเขียนย่อด้วย "PV" พลังงานการแผ่รังสีถูกส่งผ่านโดยตรงไปยังอิเล็กตรอนในเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยกระบวนการโฟโตอิเล็กทริก (Photoeffect) ด้วยปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิก จะมีแรงดันไฟฟ้าเกิดขึ้นอันเป็นผลมาจากการดูดกลืนพลังงานที่มากกระตุ้น

วัตถุดิบพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์เกือบทั้งหมดที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันคือ ซิลิกอน โครงสร้างทั่วไปของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากซิลิกอนถูกแสดงอย่างคร่าว ๆ ได้ดังรูปที่ 2.1 เวเฟอร์ซิลิกอนหนาประมาณ 300  $\mu\text{m}$  ประกอบด้วย 2 ชั้นที่มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าแตกต่างกัน ซึ่งส่วนมากถูกเจือด้วยโบรอนและฟอสฟอรัส ผิวด้านหลังของเซลล์ทำจากโลหะทั้งหมดเพื่อรวบรวมประจุ



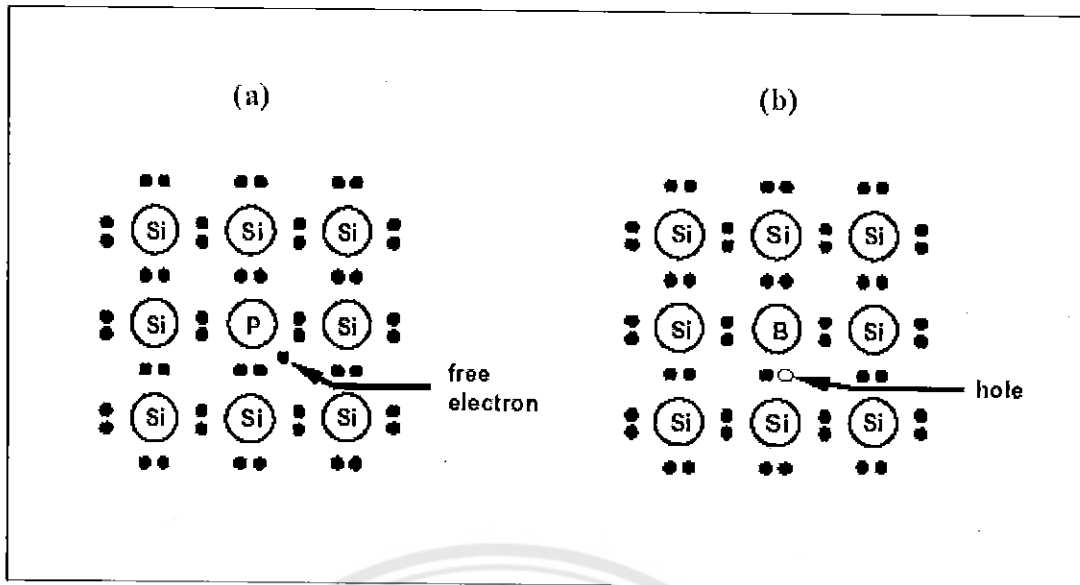
ในขณะที่ด้านหน้าซึ่งเป็นส่วนรับแสงที่จะมาตกกระทบ จะใช้เพียงกริดโลหะ 1 ชั้น เพื่อให้แสงผ่านเข้าสู่เซลล์ได้มากที่สุด โดยปกติผิวของเซลล์จะถูกเคลือบด้วยสารต้านการสะท้อน (Antireflection Coating) เพื่อลดความสูญเสียที่จะเกิดจากการสะท้อนให้เหลือน้อยที่สุด



รูปที่ 2.1 โครงสร้างทั่วไปของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากซิลิกอน [1]

### 2.1.3 การเคลื่อนที่ของประจุพาหะในซิลิกอนที่ถูกเจือ

ถ้าพิจารณาการเจือซิลิกอน ซึ่งเป็นธาตุที่มีอิเล็กตรอนวงนอก 4 ตัว (Tetravalent Element) และเป็นสารกึ่งตัวนำที่ถูกนำไปใช้งานมากที่สุดรวมถึงการนำไปใช้สร้างเซลล์แสงอาทิตย์ การแทนที่อะตอมของซิลิกอน 1 อะตอมด้วยอะตอมที่มีอิเล็กตรอนวงนอก 5 ตัว (Pentavalent Element) ดังรูปที่ 2.2a เช่น ฟอสฟอรัส (Phosphorus: P) หรือ สารหนู (Arsenic: As) 1 อะตอมทำให้เหลืออิเล็กตรอน 1 ตัวที่ยึดติดอย่างหลวม ๆ ด้วยแรงคูลอมบ์ (Coulomb Force) ซึ่งสามารถถูกทำลายด้วยพลังงานประมาณ  $0.002 \text{ eV}$  ปริมาณอิเล็กตรอนโวลต์ (eV) คือหน่วยของพลังงานซึ่งสอดคล้องกับค่าพลังงานที่อิเล็กตรอนได้รับเมื่อมีศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้น  $1 \text{ V}$  เนื่องจากธาตุที่มีอิเล็กตรอนวงนอก 5 ตัวให้อิเล็กตรอนอย่างง่ายดาย จึงถูกเรียกว่า “สารเจือผู้ให้ (Donor)” หลังจากให้อิเล็กตรอนแล้วอะตอมของสารเจือผู้ให้จะมีประจุบวก และเนื่องจากโดยปกติแล้วกระแสที่เกิดขึ้นจะเกิดจากอิเล็กตรอนเท่านั้น จึงเรียกลักษณะนี้ว่า “สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type material)”



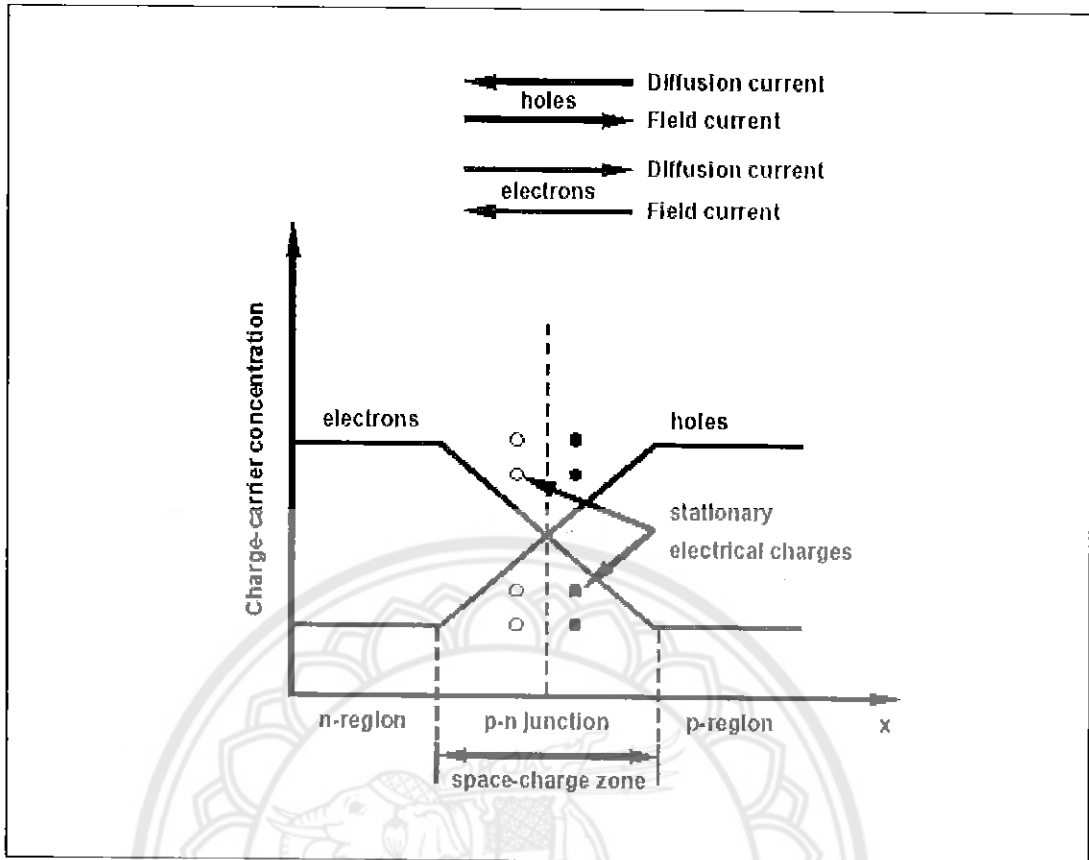
รูปที่ 2.2 การใส่สารเจือลงในซิลิกอน

(รูปซ้าย) อะตอมที่มีอิเล็กตรอนวงนอก 5 ตัว และ (รูปขวา) อะตอมที่มีอิเล็กตรอนวงนอก 3 ตัว [1]

ในทางกลับกัน การแทนที่อะตอมของซิลิกอน 1 อะตอมด้วยอะตอมที่มีอิเล็กตรอนวงนอก 3 ตัว (Trivalent Element) ดังรูปที่ 2.2b เช่น โบรอน (Boron: B) หรือ อลูมิเนียม (Aluminium: Al) หรือแกเลียม (Gallium: Ga) 1 อะตอมทำให้ขาดอิเล็กตรอน 1 ตัว หรือพูดได้ว่าเกิดโฮล (Hole) ขึ้น ในขณะนี้อิเล็กตรอนที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียงกับโฮลสามารถเข้าไปเติมในช่องว่างดังกล่าวนี้ได้ และทำให้เกิดโฮลที่ตำแหน่งเดิมของมันเป็นลำดับ กระบวนการนี้ก่อให้เกิดการนำกระแสโดยที่โฮลซึ่งมีประจุบวก ดังนั้นสารนี้จึงถูกเรียกว่า สารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type material) และเนื่องจากอะตอมของสารเจือในกรณีนี้รับอิเล็กตรอนอย่างง่ายดาย จึงถูกเรียกว่า “สารเจือผู้รับ (Acceptor)” อะตอมของสารเจือผู้รับจะถูกไอออไนซ์ (Ionized) เป็นประจุลบด้วยการรับอิเล็กตรอน โดยทั่วไปอะตอมของสารเจือผู้ให้ และของสารเจือผู้รับจะถูกไอออไนซ์แล้วที่อุณหภูมิห้อง

#### 2.1.4 ผลของรอยต่อพีเอ็น

โดยปกติรอยต่อพีเอ็น ถูกสร้างจากความจริงที่ว่าชั้นชนิดเอ็นเกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำชนิดพีด้วยการแพร่เข้าไปของสารเจือผู้ให้ที่อุณหภูมิสูง (ประมาณ  $850^{\circ}\text{C}$ ) ในทำนองเดียวกันกับกรณีของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น รอยต่อพีเอ็นสามารถถูกสร้างได้ด้วยการแพร่เข้าไปของสารเจือชนิดผู้รับ แม้ว่าจะเป็นที่นิยมน้อยกว่าก็ตาม ในบริเวณใกล้ ๆ กับผิวขอบของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นหรือพี จะเกิดปรากฏการณ์ดังต่อไปนี้ ในด้านเอ็น มีอิเล็กตรอนจำนวนมาก ในด้านที่มีโฮลจำนวนมาก ความแตกต่างในด้านปริมาณดังกล่าวนี้ ก่อให้เกิดผลที่ตามมาคือ อิเล็กตรอนจากด้านเอ็นแพร่เข้าไปยังด้านพี และโฮลแพร่จากด้านพีเข้าไปในด้านเอ็น ผลที่ตามมาคือ เกิดกระแสของอิเล็กตรอนที่เกิดจากการแพร่เข้าไปในด้านพี และกระแสจากการแพร่ของโฮลเข้าไปในด้านเอ็น จากรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การกระจายประจุพาหะที่รอยต่อพีเอ็น และกระแสที่ไหลผ่านรอยต่อ [1]

การไหลของพาหะประจุลบและบวก ทำให้เกิดการขาดประจุพาหะภายในบริเวณที่เคยเป็นกลางทางไฟฟ้า นั่นคือ เกิดประจุบวกภายในบริเวณสารเจือผู้ให้ และเกิดประจุลบภายในบริเวณสารเจือผู้รับ ดังนั้นจึงเกิดสนามไฟฟ้าขึ้นตรงผิวขอบและก่อให้เกิดกระแสจากประจุพาหะทั้งสองชนิด ซึ่งไหลต้านกระแสที่เกิดจากการแพร่ในสภาวะสมดุล ค่าของกระแสทั้งหมดที่ไหลผ่านผิวรอยต่อมีค่าเป็นศูนย์ นั่นคือกระแสที่เกิดจากสนามไฟฟ้าชดเชยกระแสที่เกิดจากการแพร่อย่างสมบูรณ์ นั่นคือกระแสโฮลชนิดชดเชยระหว่างกันอย่างสมบูรณ์ และกระแสอิเล็กตรอนก็เช่นกัน ดังรูปที่ 2.3

สนามไฟฟ้าสถิตที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อนี้ สอดคล้องกับค่าความต่างศักย์  $V_D$  ซึ่งถูกเรียกว่า “กำแพงศักย์ (Potential Barrier)” โดยมีค่าประมาณ 0.8 eV สนามไฟฟ้านี้ทำให้ประจุพาหะที่เป็นผลมาจากแสงที่ตกกระทบเซลล์นั้นแยกออกจากกัน ภายในบริเวณปลอดพาหะ (Depletion Region หรือ Space-Charge Zone) จะไม่มีประจุพาหะอิสระ ซึ่งบริเวณนี้มีค่าความต้านทานสูงมาก การป้อนแรงดันลบที่ด้านเอ็น ซึ่งเรียกว่า ไบอัสตรง (Forward Bias) ทำให้กำแพงศักย์มีค่าลดลง ส่งผลให้ความเข้มสนามไฟฟ้าและกระแสที่เกิดจากสนามไฟฟ้าลดลงตามไปด้วย ทำให้ขณะไม่สามารถชดเชยกับกระแสที่เกิดจากการแพร่ของอิเล็กตรอนและโฮลดังเช่นขณะที่ไม่มีการดันไฟฟ้าจากภายนอกได้อีกต่อไป ผลที่ตามมาคือ มีกระแสสุทธิที่เกิดจากการแพร่ของอิเล็กตรอนและโฮล

ไหลผ่านรอยต่อพีเอ็น ถ้าแรงดันจากภายนอกที่ป้อนเข้าไปมีค่าเท่ากับค่ากำแพงศักย์ จะไม่มีกระแสที่เกิดจากสนามไฟฟ้า และค่ากระแสจะถูกจำกัดด้วยค่าความต้านทานของสารเท่านั้น ในทางตรงกันข้าม การป้อนแรงดันบวกจากภายนอกเข้าที่ด้านลบ ซึ่งเรียกว่า ไบอัสย้อนกลับ (Reverse Bias) จะเพิ่มค่าแรงดันของกำแพงศักย์ ทำให้บริเวณปลอดพาหะมีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งส่งผลให้กระแสจากสนามไฟฟ้ามีค่ามากกว่ากระแสสุทธิตามที่ทฤษฎีไบอัสย้อนกลับจึงมีค่าน้อยมาก กระบวนการที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อพีเอ็นนำไปสู่สมการไดโอด นั่นคือ

### 2.1.5 กระบวนการทางฟิสิกส์ในเซลล์แสงอาทิตย์

#### 1) การดูดกลืนแสง (Optical Absorption)

ในขณะที่แสงตกลงบนเซลล์แสงอาทิตย์ แสงบางส่วนถูกสะท้อน บางส่วนถูกดูดกลืน ส่วนที่เหลือสามารถผ่านเซลล์ไปได้ เนื่องจากซิลิกอนมีดัชนีการหักเห (Refractive Index) สูง (มากกว่า 3.5) ทำให้กว่า 30% ของแสงที่ตกกระทบถูกสะท้อน ดังนั้นเซลล์แสงอาทิตย์จึงมักถูกเคลือบด้วยสารต้านการสะท้อน ซึ่งโดยปกตินิยมเคลือบเป็นชั้นบาง ๆ ด้วยไททาเนียมไดออกไซด์ ทำให้ลดความสูญเสียที่เกิดจากการสะท้อนเหลือประมาณ 10% โดยปกติโฟตอน หรือควอนต้าของแสงทำปฏิกิริยากับสารด้วยการกระตุ้นอิเล็กตรอน กระบวนการที่สำคัญทางด้านพลังงานที่ใช้กับเซลล์แสงอาทิตย์ เรียกว่า “การดูด-กลืนทางโฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric Absorption)” ด้วยเหตุนี้โฟตอนจึงถูกดูดกลืนอย่างสมบูรณ์แบบด้วยอิเล็กตรอนวงนอก อิเล็กตรอนได้รับพลังงานทั้งหมดจากโฟตอนแล้วกลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระ อย่างไรก็ตามในสารกึ่งตัวนำ โฟตอนจะสามารถถูกดูดกลืนก็ต่อเมื่อพลังงานของมันมีค่าสูงกว่าช่องว่างแถบพลังงาน (Bandgap) โฟตอนที่มีพลังงานน้อยกว่าช่องว่างแถบพลังงานจะผ่านทะลุสารกึ่งตัวนำและไม่สามารถก่อให้เกิดการแปลงพลังงาน อย่างไรก็ตามโฟตอนที่มีพลังงานสูงกว่าช่องว่างแถบพลังงานก็จัดเป็นความสูญเสียในด้านการแปลงพลังงาน เนื่องจากพลังงานส่วนที่เหลือจะถูกเปลี่ยนเป็นความร้อนในผลึกอย่างรวดเร็ว ในระหว่างการทำปฏิกิริยาระหว่างสเปกตรัมโดยทั่วไปของรังสีแสงอาทิตย์กับเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากซิลิกอน ในกระบวนการแปลงพลังงาน พลังงานจะสูญเสียประมาณ 60% เพราะมีโฟตอนจำนวนมากที่มีพลังงานทั้งที่ต่ำกว่าและสูงกว่าช่องว่างแถบพลังงาน

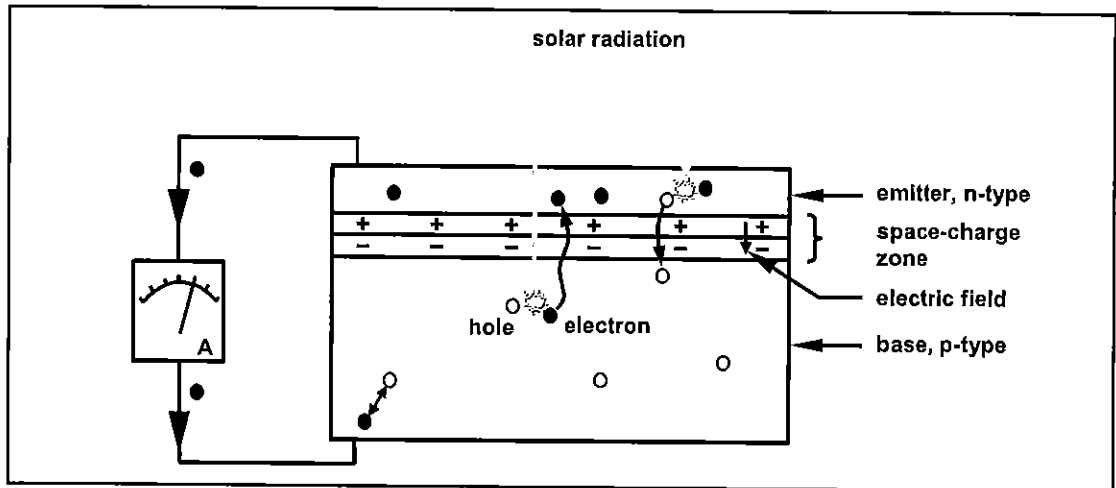
## 2) การรวมตัวของประจุพาหะ (Recombination of Charge Carriers)

การดูดกลืนแสงก่อให้เกิดคู่อิเล็กตรอน ดังนั้นในช่วงที่มีแสงปริมาณของประจุพาหะจึงมีค่ามากกว่าในช่วงเวลาที่มืด นั่นคือในขณะที่ไม่มีแสงปริมาณประจุพาหะจะมีค่าเท่ากับในช่วงเวลาที่มืด กระบวนการย้อนกลับนี้เรียกว่า “การรวมตัวของประจุพาหะ (Recombination)” และเป็นกระบวนการย้อนกลับจากกระบวนการสร้างประจุพาหะด้วยการดูดกลืนแสง การรวมตัวของประจุพาหะเกิดตามธรรมชาติแม้กระทั่งในกระบวนการสร้างประจุพาหะ ปริมาณของประจุพาหะสุทธิในขณะที่มีแสงจึงเป็นผลที่เกิดจากทั้งสองกระบวนการดังกล่าว

ในช่วงอายุขัย (Lifetime) ของประจุพาหะ ประจุพาหะสามารถเคลื่อนที่ในผลึกได้ในระยะทางที่แน่นอนก่อนที่จะเกิดการรวมตัว ระยะทางเฉลี่ยที่ประจุพาหะจะสามารถเดินทางได้ระหว่างจุดกำเนิดของประจุกับจุดที่เกิดการรวมตัว เรียกว่า “ระยะทางการแพร่ (Diffusion Length)” ปริมาณนี้มีบทบาทสำคัญในการอธิบายพฤติกรรมของเซลล์แสงอาทิตย์ และมีค่าขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์ของการแพร่ของสาร และอายุขัยของประจุพาหะ (ระยะเวลาที่ใช้จนกระทั่งประจุพาหะเกิดการรวมตัว)

## 3) เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีแสงตกกระทบ

ส่วนประกอบหลัก ๆ ของเซลล์แสงอาทิตย์ถูกแสดงไว้โดยสังเขปดังรูปที่ 2.4 อันได้แก่ อิมิตเตอร์ชนิดเอ็น (n-doped emitter) บริเวณปลอดพาหะ (Depletion Region) และ เบสชนิดพี (p-doped base) โฟตอนที่มีพลังงานเพียงพอตกลงบนผิวของเซลล์แสงอาทิตย์ ผ่านทะลุอิมิตเตอร์ และบริเวณปลอดพาหะ แล้วถูกดูดกลืนในเบสชนิดพี ก่อให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล เนื่องจากอิเล็กตรอนเป็นพาหะส่วนน้อยภายในเบสชนิดพี จึงถูกเรียกว่า “ประจุพาหะส่วนน้อย” ซึ่งตรงกันข้ามกับโฮลที่เป็นประจุพาหะส่วนใหญ่ในบริเวณนี้ อิเล็กตรอนนี้แพร่เข้าไปในเบสชนิดพีจนกระทั่งถึงขอบของบริเวณปลอดพาหะ สนามไฟฟ้าที่อยู่ในบริเวณเขตปลอดพาหะจะเร่งอิเล็กตรอนและพาอิเล็กตรอนไปยังด้านอิมิตเตอร์



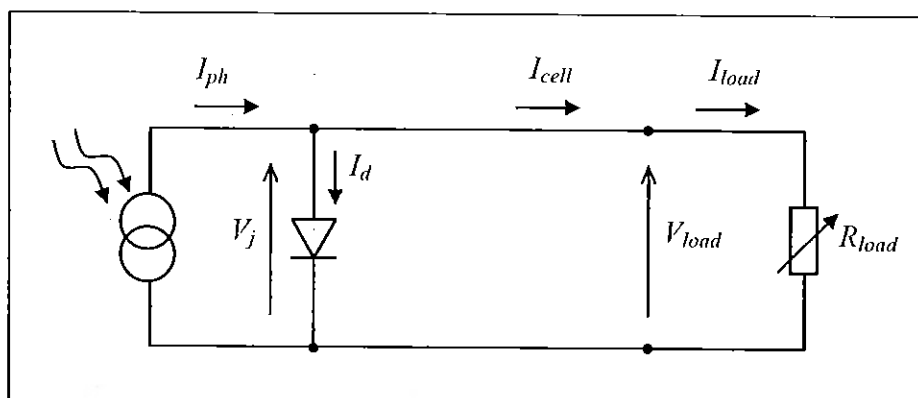
รูปที่ 2.4 หลักการทำงาน โดยสังเขปของเซลล์แสงอาทิตย์ [1]

ด้วยเหตุผลดังกล่าว การแยกออกจากกันของประจุพาหะจึงเกิดขึ้น ด้วยเหตุนี้สนามไฟฟ้าจึงทำงานคล้ายกับเป็นตัวกลางในการแยก แต่ข้อแม้คือ ระยะทางการแพร่ของอิเล็กตรอนจะต้องมากเพียงพอให้อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ไปจนถึงบริเวณปลอดพาหะ ในกรณีที่ระยะทางการแพร่สั้นเกินไป การรวมตัวของประจุพาหะจะเกิดขึ้นก่อนถึงบริเวณปลอดพาหะ ส่งผลให้เกิดการสูญเสียพลังงานการดูดกลืนควอนตัมของแสงในอิมิตเตอร์ก่อให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลเช่นกัน แต่เนื่องจากโฮลเป็นประจุพาหะส่วนน้อยในบริเวณอิมิตเตอร์ชนิดเอ็น ด้วยระยะทางการแพร่ที่มากเพียงพอ ทำให้โฮลเคลื่อนที่ไปจนถึงบริเวณปลอดพาหะ และถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า และถูกพาไปยังด้านเบสชนิดพี ถ้าการดูดกลืน ควอนตัมของแสงเกิดขึ้นในบริเวณปลอดพาหะ อิเล็กตรอนและโฮลจะถูกแยกออกจากกัน ทันทีด้วยสนามไฟฟ้าที่มีในบริเวณนั้นนั่นเอง ผลจากการมีแสงตกกระทบจะได้ว่า ถ้าปริมาณของอิเล็กตรอนทางด้านอิมิตเตอร์ชนิดเอ็นเพิ่มขึ้น ปริมาณของโฮลทางด้านเบสชนิดพีก็จะเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดแรงดันไฟฟ้า ถ้าอิมิตเตอร์ชนิดเอ็นและเบสชนิดพีถูกนำมาต่อกันผ่านตัวต้านทาน อิเล็กตรอนจากด้านอิมิตเตอร์ไหลผ่านตัวต้านทานไปยังเบสแล้วรวมตัวกับโฮลในบริเวณนั้น อย่างไรก็ตาม การไหลของกระแสหมายถึงกำลังด้านออก การไหลของกระแสที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องตรงเท่าที่ ยังคงมีแสงตกกระทบเซลล์ ผลก็คือพลังงานแสงอาทิตย์ถูกเปลี่ยนทันทีเป็นพลังงานไฟฟ้า

#### 2.1.6 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ในอุดมคติ

อย่างที่ได้อธิบายมาแล้วข้างต้น เซลล์อาทิตย์ที่ถูกแสงจะสร้างประจุพาหะอิสระ ซึ่งทำให้เกิดกระแสไหลผ่านภาระ (Load) ที่ต่ออยู่ ปริมาณประจุพาหะอิสระที่เกิดขึ้นแปรผันตามค่าความเข้มของแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบ เช่นเดียวกับกระแสพลังแสง (Photocurrent) ซึ่งเกิดขึ้นภายในเซลล์แสงอาทิตย์ ดังนั้นเซลล์อาทิตย์ในอุดมคติจึงสามารถถูกแสดงด้วยวงจรสมมูลอย่างง่ายในรูปที่ 2.5 ซึ่งประกอบด้วยไดโอดที่เกิดขึ้นจากรอยต่อพีเอ็นและแหล่งจ่ายกระแสพลังแสงที่มี

ค่ากระแสขึ้นอยู่กับค่าความเข้มของแสงอาทิตย์ ตัวต้านทานปรับค่าได้ถูกต่อเป็นภาระของเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 2.5 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ในอุดมคติที่ต่อกับภาระ [1]

จากรูปที่ 2.5 สามารถเขียนสมการของกระแสเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ดังนี้

$$I_{cell} = I_{ph} - I_D = I_{ph} - I_o \left[ \exp\left(\frac{qV_j}{AkT_{cell}}\right) - 1 \right] \quad (2.1)$$

โดยที่  $I_{cell}$  คือ กระแสเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์

$I_{ph}$  คือ กระแสพลังแสง

$I_D$  คือ กระแสไดโอด

$I_o$  คือ กระแสอิ่มตัวย้อนกลับ (Reverse saturation current)

$q$  คือ ประจุของอิเล็กตรอน

$V_j$  คือ แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมรอยต่อพีเอ็น

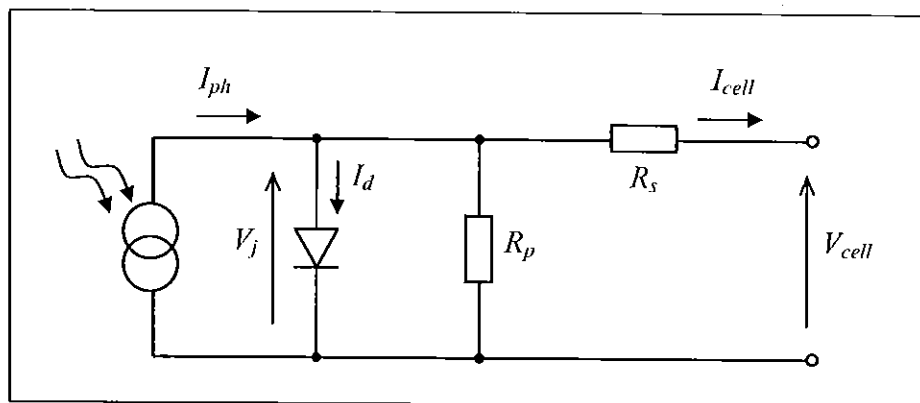
$A$  คือ ค่าความสมบูรณ์ของรอยต่อพีเอ็น

$k$  คือ ค่าคงที่ของโบลต์ซมันน์

$T_{cell}$  คือ อุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ ในหน่วย เคลวิน (Kelvin, K)

### 2.1.7 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์จริง

ในสภาพความเป็นจริง เนื้อสารกึ่งตัวนำและหน้าสัมผัสโลหะของเซลล์แสงอาทิตย์ก่อให้เกิดค่าความต้านทานอนุกรม  $R_s$  (Parasitic series resistance) ในวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ ในขณะที่กระแสรั่วรอบ ๆ ขอบของเซลล์ซึ่งเกิดจากความไม่สมบูรณ์ในผิวของเซลล์และตำหนิที่เกิดจากการเชื่อมต่อหน้าสัมผัสก่อให้เกิดค่าความต้านทานขนาน  $R_p$  (Parasitic parallel resistance) ดังแสดงในรูปที่ 2.6



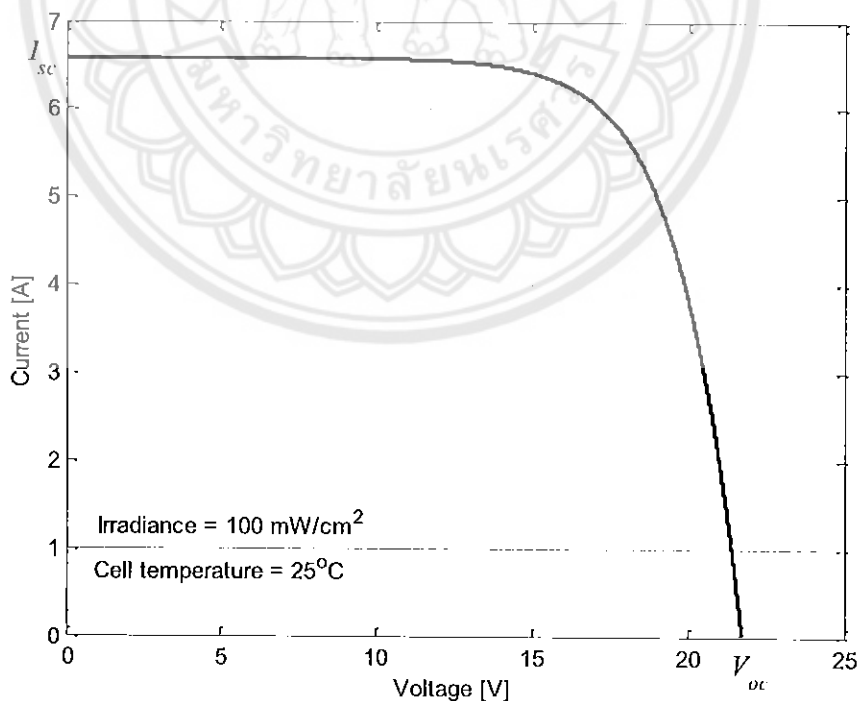
รูปที่ 2.6 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์จริงที่ต่อกับภาระ [1]

จากรูปที่ 2.6 เราสามารถเขียนสมการของกระแสเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ดังนี้

$$I_{cell} = I_{ph} - I_o \left[ \exp \left\{ \frac{q}{AkT_{cell}} (V_{cell} + R_s I_{cell}) \right\} - 1 \right] - \left( \frac{V_{cell} + R_s I_{cell}}{R_p} \right) \quad (2.2)$$

2.1.8 เส้นโค้งคุณลักษณะกระแส-แรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

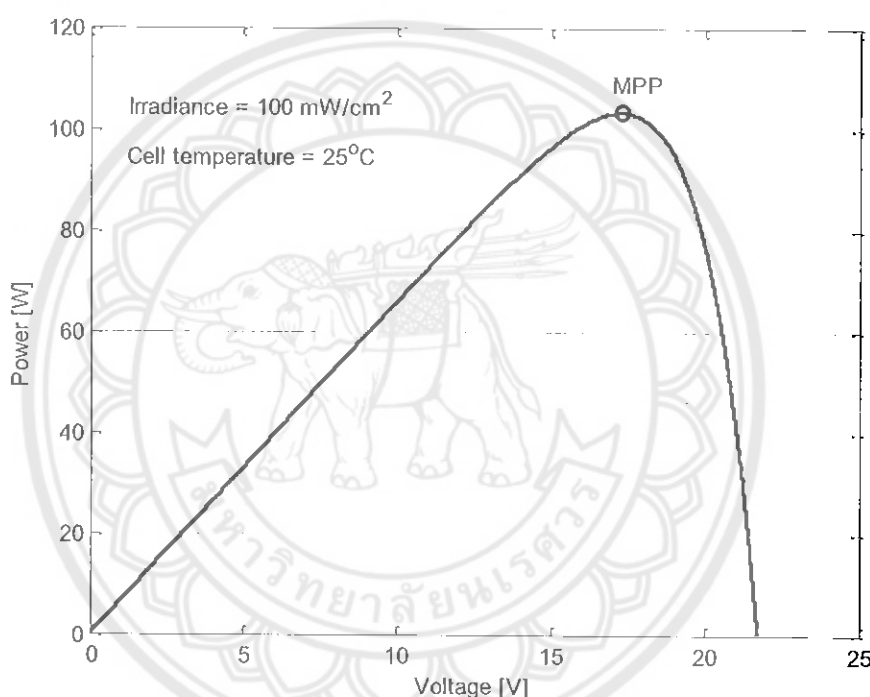
ลักษณะเส้นโค้งคุณลักษณะกระแส-แรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่ง ๆ สามารถแสดงได้รูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 เส้นโค้งคุณลักษณะกระแส-แรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์



ภายใต้สภาพอากาศหนึ่ง ๆ แผงเซลล์แสงอาทิตย์จ่ายกำลังด้านออกสูงสุดเมื่อทำงานที่จุดกำลังสูงสุด โดยเราสามารถคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าของแผงได้จากผลคูณของกระแสและแรงดันของแผงจากรูปที่ 2.7 เราสามารถสร้างเส้นโค้งคุณลักษณะกำลัง-แรงดันของแผงได้ดังรูปที่ 2.8 แผงเซลล์แสงอาทิตย์สร้างกระแสสูงสุดเท่ากับค่ากระแสลัดวงจร (Short-circuit current,  $I_{sc}$ ) เมื่อแรงดันของแผงมีค่าเท่ากับศูนย์ ซึ่งที่จุดนี้จะไม่มีการจ่ายกำลังด้านออกเนื่องจากผลคูณของกระแสกับแรงดันมีค่าเท่ากับศูนย์ ในทางกลับกัน ค่ากระแสด้านออกของแผงมีค่าเป็นศูนย์เมื่อแรงดันของแผงมีค่าเท่ากับแรงดันเปิดวงจร (Open-circuit voltage,  $V_{oc}$ ) ทำให้กำลังด้านออกมีค่าเป็นศูนย์เช่นกัน อย่างไรก็ตามระหว่างจุดทั้งสองดังกล่าว กำลังด้านออกของแผงมีค่ามากกว่าศูนย์ จากรูปที่ 2.8 จุดกำลังสูงสุดแสดงด้วยวงกลมเล็ก



รูปที่ 2.8 ตัวอย่างเส้นโค้งคุณลักษณะกำลัง-แรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

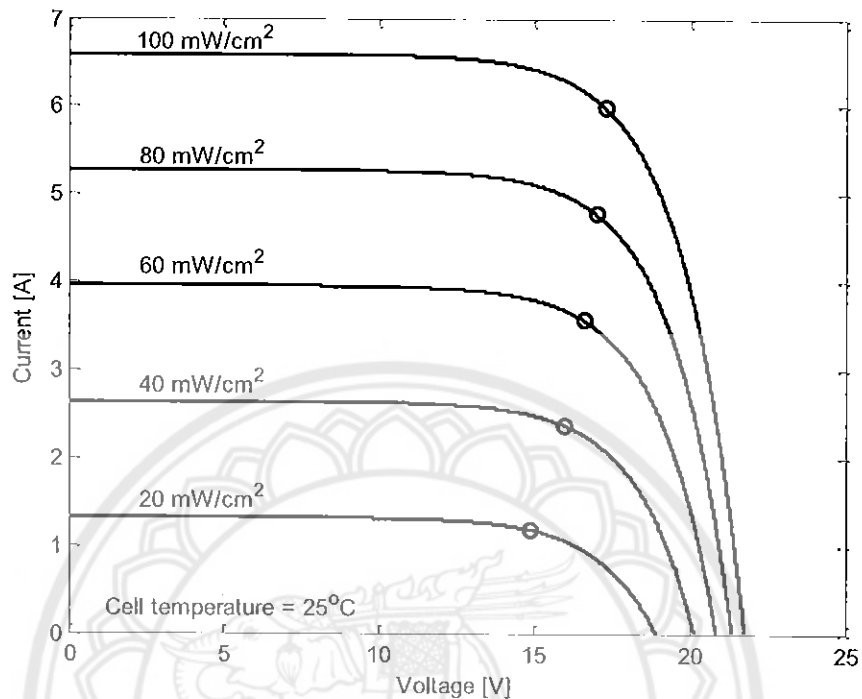
### 2.1.9 ผลของความเข้มแสงต่อคุณลักษณะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

เส้นโค้งคุณลักษณะกระแส-แรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ระดับความเข้มแสงต่างกันแสดงได้ดังรูปที่ 2.9 กระแสโฟโต้ เปลี่ยนแปลงแบบเชิงเส้นกับค่าความเข้มแสงเมื่ออุณหภูมิของเซลล์คงที่ ดังนั้นค่ากระแสลัดวงจรจึงแปรผันตรงกับค่าความเข้มแสง

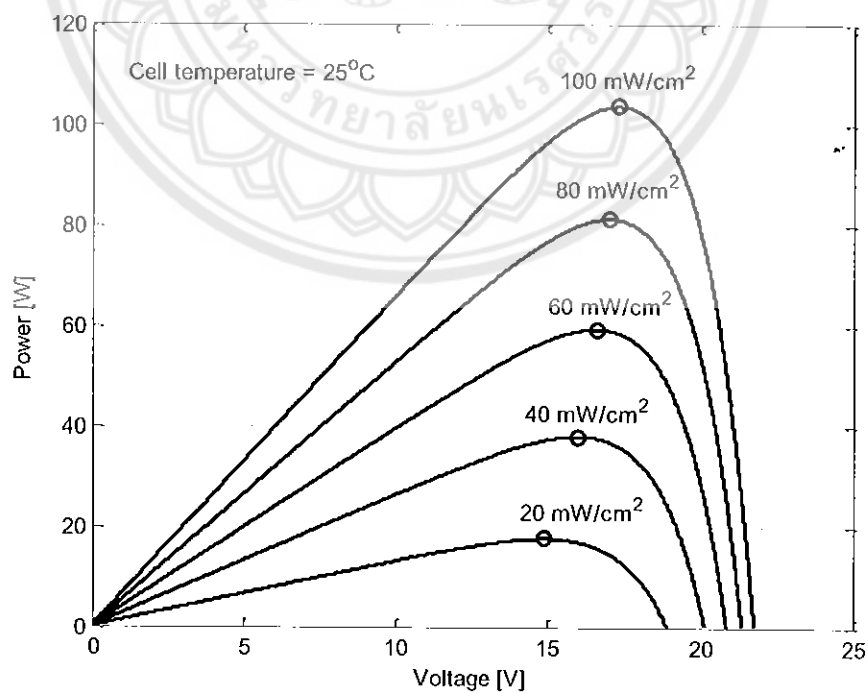
ภายใต้เงื่อนไขการเปิดวงจร (เมื่อไม่พิจารณาความต้านทานขนาน)

$$V_{oc} = \frac{n_s AkT_{cell}}{q} \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_o} + 1\right) \quad (2.3)$$

สมการ (2.3) แสดงให้เห็นว่าในขณะที่กระแสไฟได้แปรผันตรงกับความเข้มแสง แรงแดันเปิดวงจรจะแปรผันเป็นฟังก์ชันลอการิทึม เส้นโค้งคุณลักษณะกำลัง-แรงดันที่สัมพันธ์กับรูปที่ 2.9 แสดงได้ดังรูปที่ 2.10 โดยจะเห็นได้ชัดว่ากำลังด้านออกของแผงมีค่าลดลงตามความเข้มแสง



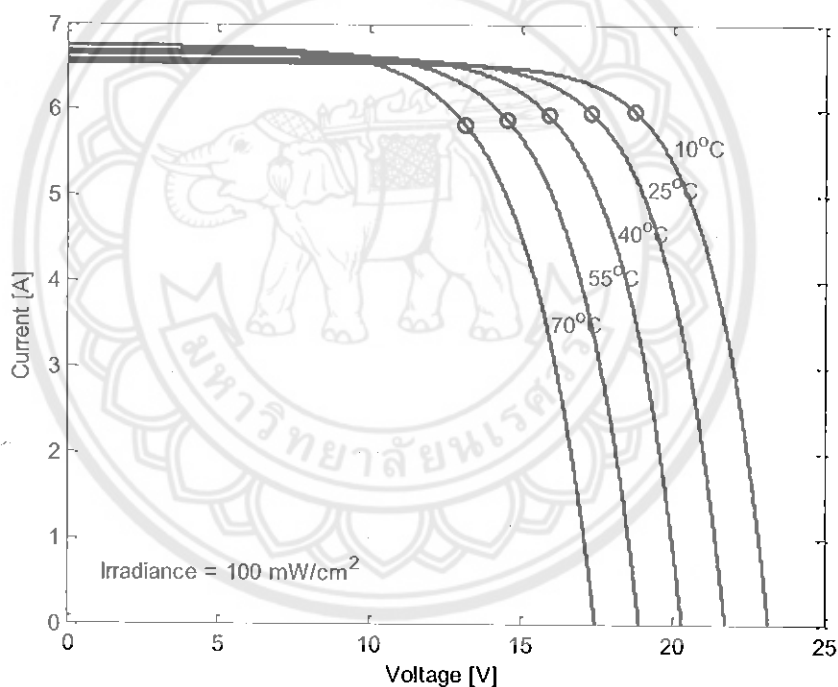
รูปที่ 2.9 ผลของความเข้มแสงต่อเส้นโค้งคุณลักษณะกระแส-แรงดัน



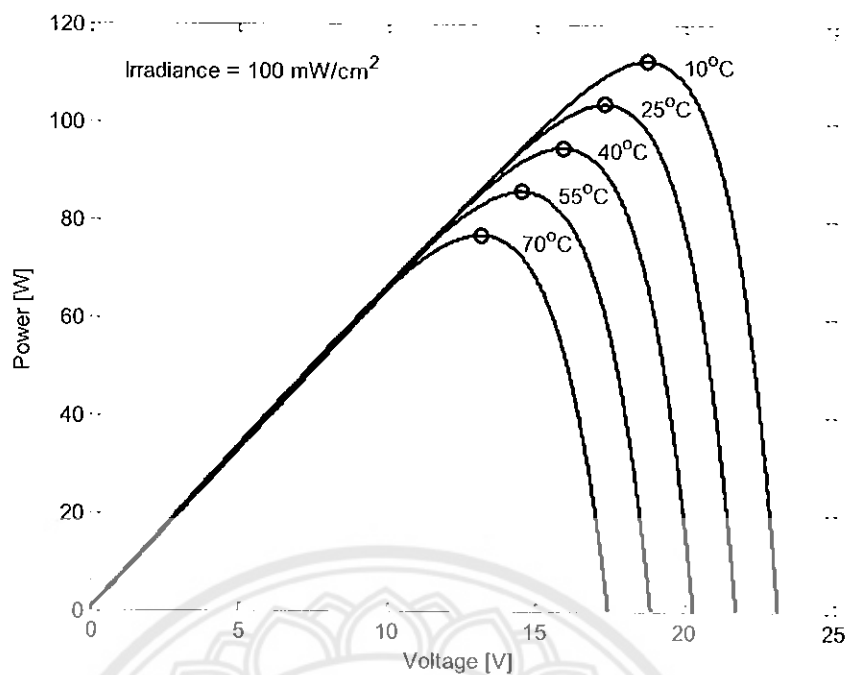
รูปที่ 2.10 ผลของความเข้มแสงต่อเส้นโค้งคุณลักษณะกำลัง-แรงดัน

### 2.1.10 ผลของอุณหภูมิต่อคุณลักษณะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

รูปที่ 2.11 แสดงเส้นโค้งคุณลักษณะกระแส-แรงดันสำหรับค่าอุณหภูมิของเซลล์ที่แตกต่างกัน กระแสไฟฟ้ได้ มีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิเนื่องจากแถบช่องว่างพลังงานแคบลงและระยะแพร่ของประจุพาหะมีค่าเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของเซลล์ส่งผลให้กระแสลัดวงจรมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย (ประมาณ  $0.07\%/^{\circ}\text{C}$  สำหรับเซลล์ที่ทำจากซิลิกอน) ในทางตรงกันข้ามแรงดันเปิดวงจรขึ้นอยู่กับอุณหภูมิอย่างมาก การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิทำให้กระแสอิ่มตัวย้อนกลับเพิ่มขึ้นอย่างมากและช่องว่างแถบพลังงานแคบลง ส่งผลให้แรงดันเปิดวงจรมีค่าลดลง จากการศึกษาให้เห็นใน แรงดันเปิดวงจรมีค่าลดลงตามอุณหภูมิในลักษณะค่อนข้างเชิงเส้นในอัตราประมาณ  $0.4\%/^{\circ}\text{C}$  สำหรับเซลล์ที่ทำจากซิลิกอนผลของอุณหภูมิที่มีต่อเส้นโค้งคุณลักษณะกำลัง-แรงดันแสดงได้ดังรูปที่ 2.12 จะเห็นว่าอุณหภูมิมิผลอย่างมากต่อค่ากำลังด้านออกที่ระดับแรงดันสูงกว่าแรงดันที่จุดกำลังสูงสุด [1]



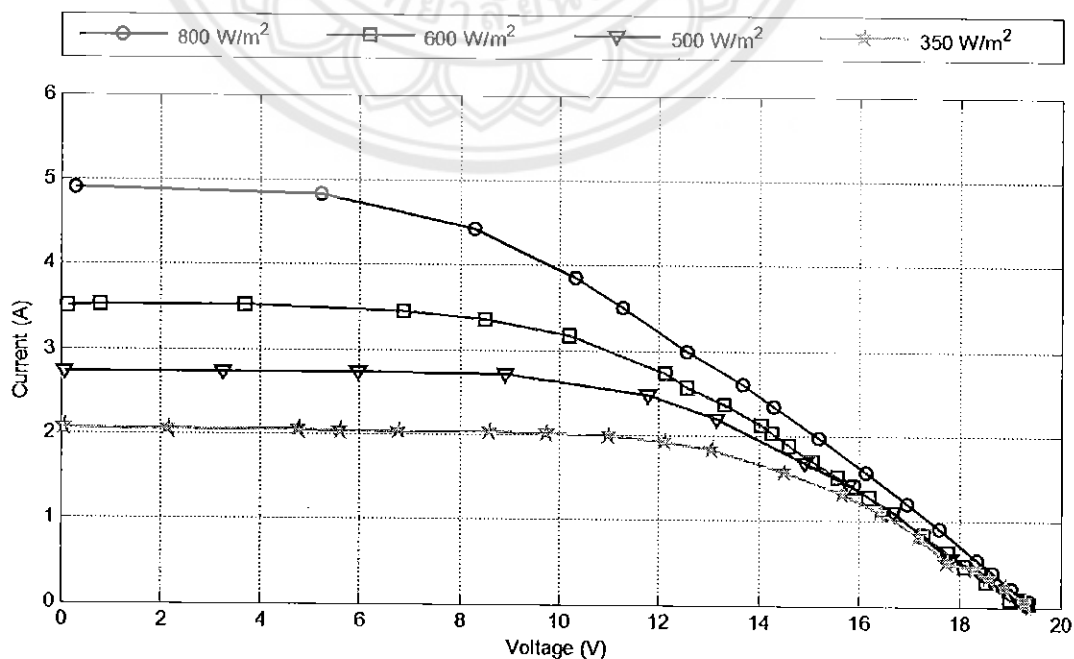
รูปที่ 2.11 ผลของอุณหภูมิต่อเส้นโค้งคุณลักษณะกระแส-แรงดัน



รูปที่ 2.12 ผลของอุณหภูมิต่อเส้นโค้งคุณลักษณะกำลัง-แรงดัน

### 2.1.11 เส้นโค้งคุณลักษณะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จากการทดสอบ

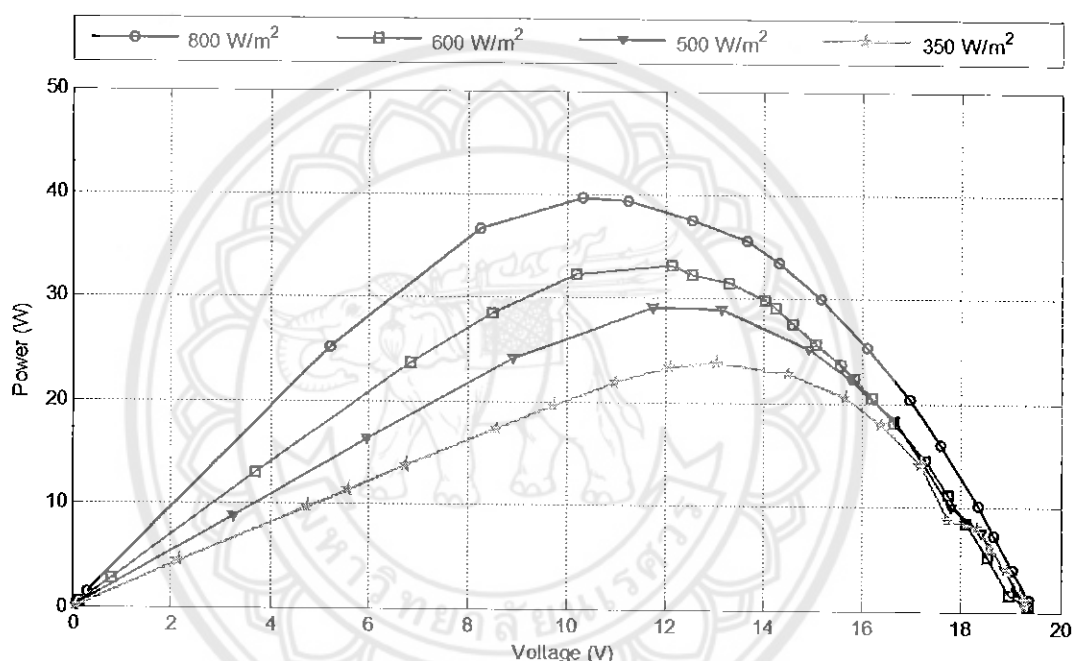
คุณสมบัติทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถแสดงได้โดยใช้เส้นโค้งคุณลักษณะ (I-V curve) ซึ่งใช้ตรวจสอบกำลังผลิตสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และในโครงการนี้ได้จัดทำเส้นโค้งคุณลักษณะที่ควบคุมเฉพาะความเข้มแสงเท่านั้น ไม่ควบคุมอุณหภูมิของเนื้อเซลล์เนื่องจากมีข้อจำกัดในการทำการทดสอบ เส้นโค้งคุณลักษณะแสดงดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 เส้นโค้งคุณลักษณะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จากการทดลองจริง

จากการทดลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์กับโหลดตัวต้านทานจะได้ค่ากระแสและแรงดันจากเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อมีการปรับค่าโหลดตัวต้านทาน เพื่อนำค่ากระแสและแรงดันที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้มาสร้างกราฟคุณลักษณะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ แต่การทดลองจริงจะเห็นว่า มีข้อจำกัดในการทดลอง เช่น การควบคุมปริมาณความเข้มแสง และข้อผิดพลาดของเครื่องมือวัด จึงทำให้กราฟคุณลักษณะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้มีความผิดเพี้ยนไปจากผู้ผลิต

รูปที่ 2.14 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่ากำลังไฟฟ้าและค่ากระแสที่แต่ละความเข้มแสง โดยจะแสดงจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด โดยจะเริ่มต้นจากค่ากระแสเปิดวงจรจนถึงค่ากระแสลัดวงจร



รูปที่ 2.14 เส้นโค้งคุณลักษณะกำลังของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จากการทดลองจริง

## 2.2 การติดตามจุดกำลังสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

โดยทั่วไปการติดตามจุดกำลังสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Maximum Power Point Tracking: MPPT) เป็นสิ่งจำเป็นในระบบโฟโตโวลตาอิก ด้วยเหตุนี้ วิธีหาจุดกำลังสูงสุดจำนวนมากจึงถูกพัฒนาขึ้นและนำไปใช้ แต่ละวิธีจะมีความแตกต่างในด้านต่าง ๆ ความซับซ้อน การใช้ตัวรับรู้ ความเร็ว ราคา ยานการใช้งานที่มีประสิทธิภาพ การนำไปสร้างชิ้นงาน ความนิยมใช้ เป็นต้น ในความเป็นจริง วิธีต่าง ๆ ถูกพัฒนาขึ้นเป็นจำนวนมากจนยากที่จะบอกว่าวิธีใดเหมาะสมที่สุดสำหรับระบบโฟโตโวลตาอิก ปัญหาสำหรับการติดตามจุดกำลังสูงสุดคือการหาตำแหน่ง (ค่า) ของแรงดันหรือกระแสของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำให้ได้กำลังด้านออกสูงสุดภายใต้ความเข้มแสงและอุณหภูมิที่กำหนด เป็นที่น่าสังเกตว่าภายใต้เงื่อนไขการเกิดเงาบางส่วน (Partial shading)

บนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ อาจทำให้เกิดจุดกำลังสูงสุดหลายจุด แต่โดยส่วนใหญ่จะมีเพียงจุดเดียวที่เป็นจุดกำลังสูงสุดที่แท้จริง

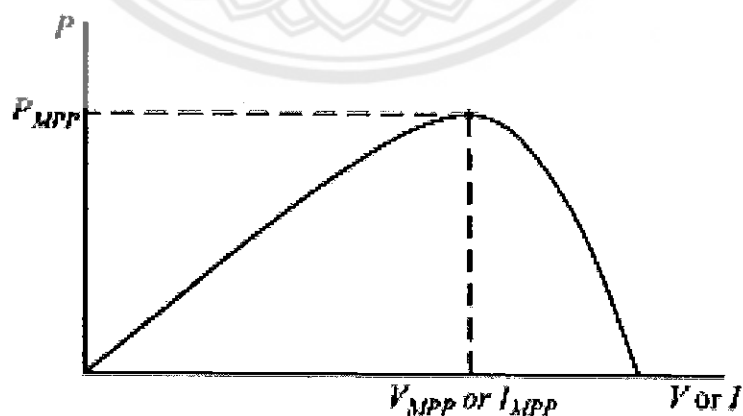
วิธีส่วนใหญ่ตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงทั้งค่าความเข้มแสงและอุณหภูมิ แต่บางวิธีจะได้ผลดีขึ้นถ้าอุณหภูมิคงที่ วิธีส่วนใหญ่ตอบสนองโดยอัตโนมัติต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพของแผงเนื่องจากอายุการใช้งาน แต่บางวิธีจำเป็นต้องมีการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์เป็นระยะ ๆ เพื่อคงความแม่นยำ

### 2.2.1 วิธีการติดตามจุดกำลังสูงสุด

#### ก) วิธีปีนเนินและวิธีพีแอนด์โอ

ผลงานวิจัยส่วนใหญ่มุ่งเน้นไปที่วิธีปีนเนิน (Hill-climbing technique) และวิธีพีแอนด์โอ (Perturb and Observe technique: P&O) วิธีปีนเนินอาศัยการขยับค่าตัวชี้ประสิทธิภาพของตัวแปลงกำลัง (Power converter) ในขณะที่วิธีพีแอนด์โออาศัยการขยับค่า (Perturbation) ของแรงดันไฟฟ้าที่จุดทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ในกรณีที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่เชื่อมต่อกับตัวแปลงกำลัง การปรับค่าตัวชี้ประสิทธิภาพจะส่งผลให้แรงดันของแผงเปลี่ยนแปลง ดังนั้นจึงถือได้ว่าวิธีปีนเนินและวิธีพีแอนด์โอ มีหลักการทำงานเดียวกัน

จากรูปที่ 2.15 ถ้าจุดทำงานของแผงอยู่ด้านซ้ายของจุดกำลังสูงสุด การเพิ่มขึ้น (หรือลดลง) ของแรงดันไฟฟ้าทำให้กำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้น (หรือลดลง) ในขณะที่ถ้าจุดทำงานของแผงอยู่ด้านขวาของจุดกำลังสูงสุด การลดลง (หรือเพิ่มขึ้น) ของแรงดันไฟฟ้าทำให้กำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้น (หรือลดลง) ดังนั้นถ้ากำลังไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น การขยับค่าแรงดันจะคงในทิศทางเดิมจนกระทั่งพบจุดกำลังสูงสุด แต่ถ้ากำลังไฟฟ้าลดลง การขยับค่าแรงดันจะกลับทิศทาง



รูปที่ 2.15 เส้นโค้งคุณลักษณะกำลังของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั่วไป

อัลกอริทึมนี้แสดงในตารางที่ 2.1 โดยจะเห็นว่าอัลกอริทึมนี้ยังคงใช้งานได้ในกรณีที่ใช้ค่าขณะใดขณะหนึ่ง (Instantaneous value) ของกระแสหรือแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

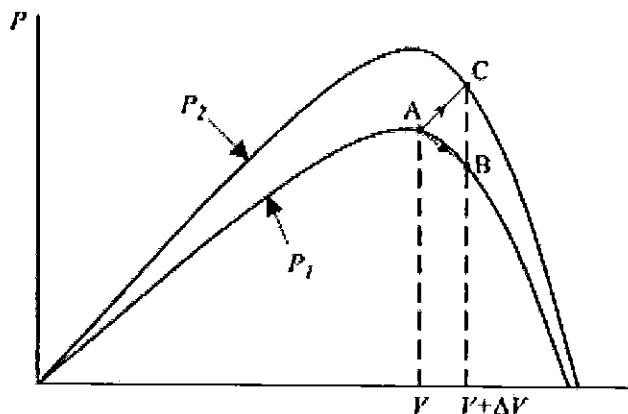
(แทนที่จะเป็นค่าเฉลี่ย) ตรวจจับที่การชักตัวอย่าง (Sampling) เกิดขึ้นเพียงครั้งเดียวในแต่ละคาบสวิตซิง (Switching cycle)

ตารางที่ 2.1 ตารางสรุปอัลกอริทึมของวิธีป็นเนิน และวิธีพีแอนด์โอ

การขยับค่า	การเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้า	การขยับค่าถัดไป
บวก	บวก	บวก
บวก	ลบ	ลบ
ลบ	บวก	ลบ
ลบ	ลบ	บวก

กระบวนการนี้จะถูกทำซ้ำเป็นระยะ ๆ จนกระทั่งพบจุดกำลังสูงสุด หลังจากนั้นจุดทำงานจะแกว่งอยู่รอบ ๆ จุดกำลังสูงสุด เราสามารถทำให้การแกว่งลดลงได้โดยการลดขนาดในการขยับค่า (Perturbation step size) แต่จะเป็นลดความเร็วในการติดตามจุดกำลังสูงสุด วิธีแก้ไขวิธีหนึ่งคือการปรับขนาดในการขยับค่าให้มีขนาดเล็กลงเมื่อเข้าใกล้จุดกำลังสูงสุด [2] ในบทความ [3] ได้ใช้อัลกอริทึมสองช่วงเพื่อเพิ่มความเร็วในการค้นหาในช่วงแรก จากนั้นค้นหาจุดกำลังสูงสุดอย่างละเอียดในช่วงที่สอง

วิธีป็นเนินและวิธีพีแอนด์โอ อาจทำงานล้มเหลวในกรณีที่สภาพอากาศเปลี่ยนแปลงฉับพลัน ดังแสดงในรูปที่ 2.16 เริ่มจากจุดทำงาน A ถ้าสภาพอากาศค่อนข้างคงที่ (เปลี่ยนแปลงน้อยมาก) การขยับค่า  $\Delta V$  ของแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะทำให้ได้จุดทำงานใหม่คือจุด B และการขยับค่าจะกลับทิศเนื่องจากการลดลงของค่ากำลังด้านออก อย่างไรก็ตาม ถ้าค่าความเข้มแสงเพิ่มขึ้นและเลื่อนเส้น โคงกำลังจาก P1 ไปเป็น P2 ภายในหนึ่งคาบการชักตัวอย่าง (Sampling) จุดทำงานจะย้ายจากจุด A ไปเป็นจุด C ซึ่งยังคงทำให้ได้กำลังด้านออกมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้การขยับค่ายังคงไปในทิศทางเดิม ผลที่ตามมาคือ ถ้าความเข้มแสงมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง จุดทำงานจะเคลื่อนที่ออกห่างจากจุดกำลังสูงสุดที่แท้จริงไปเรื่อย ๆ [2]



รูปที่ 2.16 การลู่เข้าสู่จุดกำลังสูงสุดของวิธีป็นเนิน และวิธีพีแอนด์ไอ [2]

บทความ [4] เสนอวิธีหาจุดกำลังสูงสุดภายใต้การเปลี่ยนแปลงระดับพลังของความเข้มแสงด้วยการเปรียบเทียบจุดทำงาน 3 จุด โดยเปรียบเทียบจุดทำงานปัจจุบันกับจุดทำงานสองจุดก่อนหน้านี้ก่อนตัดสินใจว่าจะขยับค่าไปในทิศทางใด โดยปกติจะใช้ตัวรับรู้สองตัวเพื่อวัดค่าแรงดันและกระแสของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งทำให้สามารถคำนวณค่ากำลังด้านออก แต่ในบางกรณียังสามารถใช้ตัวรับรู้เพียงตัวเดียวเพื่อวัดค่าแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ แล้วใช้ค่าแรงดันที่วัดได้เพื่อประมาณค่ากระแสของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

บ) วิธีความนำเพิ่มขึ้น

วิธีนี้ใช้หลักการที่ว่า ความชันของเส้นโค้งกำลังของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเท่ากับศูนย์ที่จุดกำลังสูงสุด มีค่าเป็นบวกถ้าจุดทำงานอยู่ด้านซ้ายของจุดกำลังสูงสุด และมีค่าเป็นลบถ้าจุดทำงานอยู่ด้านขวาของจุดกำลังสูงสุด

$$\frac{dP}{dV} \begin{cases} = 0, & \text{at MPP} \\ > 0, & \text{left of MPP} \\ < 0, & \text{right of MPP} \end{cases} \quad (2.4)$$

เนื่องจาก

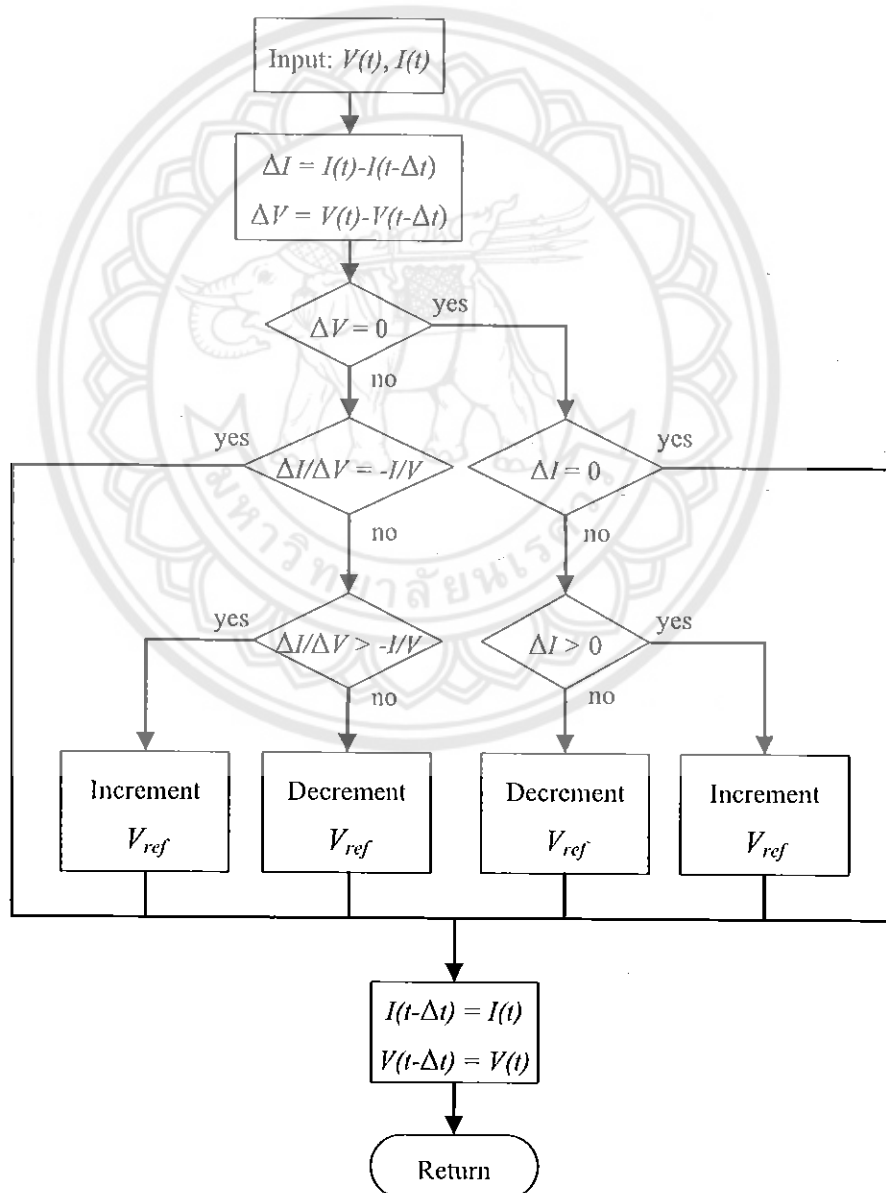
$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(IV)}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} \cong I + V \frac{\Delta I}{\Delta V} \quad (2.5)$$

เราสามารถเขียนสมการที่ (2.7) ได้ว่า

$$\frac{\Delta I}{\Delta V} \begin{cases} = -\frac{I}{V}, & \text{at MPP} \\ > -\frac{I}{V}, & \text{left of MPP} \\ < -\frac{I}{V}, & \text{right of MPP} \end{cases} \quad (2.6)$$



ด้วยอัลกอริทึมนี้ เราสามารถหาจุดกำลังสูงสุดโดยเปรียบเทียบค่าความนำขณะใดขณะหนึ่ง  $I/V$  กับค่าความนำเพิ่มขึ้น  $\Delta I/\Delta V$  ดังแสดงในแผนภาพ ดังรูปที่ 2.17 แรงดัน  $V_{ref}$  คือแรงดันอ้างอิงที่เราต้องการให้เป็นจุดทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่จุดกำลังสูงสุด  $V_{ref}$  จะมีค่าเท่ากับ  $V_{MPP}$  ทันทีที่พบจุดกำลังสูงสุด การทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะถูกรักษาไว้ที่จุดนี้จนกว่าจะพบการเปลี่ยนแปลงค่าของกระแส  $\Delta I$  ซึ่งบ่งบอกถึงการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศ อัลกอริทึมจะลดหรือเพิ่มค่า  $V_{ref}$  เพื่อตามหาจุดกำลังสูงสุด ขนาดในการขยับค่าจะเป็นตัวกำหนดความเร็วในการติดตามจุดกำลังสูงสุด ถ้าการขยับค่ามีขนาดใหญ่จะเพิ่มความเร็วในการติดตามจุดกำลังสูงสุด แต่ท้ายสุดแล้วจุดทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์อาจจะแกว่งอยู่รอบ ๆ แทนที่จะอยู่ที่จุดกำลังสูงสุด



รูปที่ 2.17 อัลกอริทึมของการติดตามจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีความนำเพิ่มขึ้น [2]

ก) วิธีเศษส่วนแรงดันวงจรเปิด

มีหลักการพื้นฐานมาจากความสัมพันธ์ที่ค่อนข้างเชิงเส้นระหว่าง  $V_{MPP}$  กับ  $V_{oc}$  ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้การเปลี่ยนแปลงของความเข้มแสงและอุณหภูมิ

$$V_{MPP} \cong k_v \cdot V_{oc} \quad (2.7)$$

โดย  $k_v$  คือค่าคงที่ของการแปรผัน

เนื่องจากค่า  $k_v$  ขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละแผง เราจึงคำนวณหาค่า  $k_v$  ล่วงหน้า โดยการหาความสัมพันธ์ระหว่าง  $V_{MPP}$  กับ  $V_{oc}$  จากการทดลองกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่สนใจที่ระดับความเข้มแสงและอุณหภูมิต่าง ๆ กัน โดยทั่วไป  $k_v$  มีค่าอยู่ระหว่าง 0.71-0.78 หลังจากได้ค่า  $k_v$  แล้ว เราสามารถคำนวณหาค่า  $V_{MPP}$  ได้จากผลคูณในสมการที่ (2.7). โดยมีการวัดค่า  $V_{oc}$  เป็นระยะ ๆ ด้วยการเปิดวงจรช่วงเวลาที่ชั่วขณะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์อย่างไรก็ตาม ข้อเสียคือทำให้เกิดกำลังสูญเสียในระหว่างที่เปิดวงจรเพื่อวัดค่า  $V_{oc}$ . นอกจากนี้สมการที่ (2.7) เป็นเพียงการประมาณค่าเท่านั้น ทำให้จริง ๆ แล้วจุดทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แทบจะไม่อยู่ที่จุดกำลังสูงสุด แต่ในการประยุกต์กับงานบางประเภท อัลกอริทึมนี้ก็เพียงพอต่อการใช้งาน แม้ว่าวิธีเศษส่วนแรงดันวงจรเปิดจะไม่ใช้การติดตามจุดกำลังสูงสุดที่แท้จริง แต่ก็เป็นวิธีที่ง่ายและราคาถูกในการนำไปใช้งาน อย่างไรก็ตามวิธีนี้ใช้ไม่ได้กับกรณีที่เกิดเงาบางส่วน (มีจุดกำลังสูงสุดหลายจุด)

ง) วิธีเศษส่วนกระแสวงจรปิด

มีหลักการพื้นฐานมาจากความสัมพันธ์ที่ค่อนข้างเชิงเส้นระหว่าง  $I_{MPP}$  กับ  $I_{sc}$  ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้การเปลี่ยนแปลงของความเข้มแสงและอุณหภูมิ

$$I_{MPP} \cong k_i \cdot I_{sc} \quad (2.8)$$

โดย  $k_i$  คือค่าคงที่ของการแปรผัน

ทำนองเดียวกับวิธีเศษส่วนแรงดันวงจรเปิด ค่า  $k_i$  ขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละแผง เราจึงคำนวณหาค่า  $k_i$  ล่วงหน้า โดยการหาความสัมพันธ์ระหว่าง  $I_{MPP}$  กับ  $I_{sc}$  จากการทดลองกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่สนใจที่ระดับความเข้มแสงและอุณหภูมิต่าง ๆ กัน โดยทั่วไป  $k_i$  มีค่าอยู่ระหว่าง 0.78-0.92

โดยปกติการวัดค่า  $I_{sc}$  ในระหว่างที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ทำงานอยู่ จะใช้สวิทช์ที่เพิ่มเข้าไปในตัวแปลงกำลังเพื่อลัดวงจรแผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็นระยะ ๆ แล้วใช้ตัวรับรู้กระแสวัดค่า  $I_{sc}$  ซึ่งเป็นการเพิ่มจำนวนอุปกรณ์และราคาารวมของระบบ แต่ในกรณีของวงจรทบระดับแรงดันเราสามารถใส่สวิทช์ของวงจรเพื่อลัดวงจรแผงได้ ข้อเสียของวิธีนี้คือ ในระหว่างที่วัดค่า  $I_{sc}$  จะทำให้กำลังด้านออกของแผงลดต่ำลง นอกจากนั้นเรายังไม่สามารถหาจุดกำลังสูงสุดที่แท้จริงได้

### จ) วิธีการควบคุมฟัซซี่ลอจิก

การใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ทำให้การควบคุมฟัซซี่ลอจิกเป็นที่นิยมในการติดตามจุดกำลังสูงสุดในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา โดยทั่วไปฟัซซี่ลอจิกประกอบด้วย 3 ขั้นตอนคือ การฟัซซี่ฟิเคชัน (Fuzzification) การเทียบตารางกฎ (Rule base table lookup) และการดีฟัซซี่ฟิเคชัน (Defuzzification) ในระหว่างการฟัซซี่ฟิเคชัน ตัวแปรอินพุตที่เป็นตัวเลข (Numerical input variables) จะถูกเปลี่ยนเป็นตัวแปรภาษา (Linguistic variables) โดยขึ้นอยู่กับฟังก์ชันสมาชิก อินพุตของตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิกสำหรับการติดตามจุดกำลังสูงสุดมักจะเป็นค่าผิดพลาด (Error) และการเปลี่ยนแปลงของค่าผิดพลาด ผู้ใช้สามารถเลือกวิธีการคำนวณหาค่าผิดพลาดและการเปลี่ยนแปลงของค่าผิดพลาด ทันทีที่คำนวณค่าผิดพลาดและการเปลี่ยนแปลงของค่าผิดพลาดได้และถูกเปลี่ยนเป็นตัวแปรภาษาแล้ว เอาท์พุตของตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิกซึ่งมักจะเป็นการเปลี่ยนแปลงของค่าตัวชี้เคลื่อนของตัวแปลงกำลังจะถูกเทียบหาจากในตารางกฎ (Rule base table)

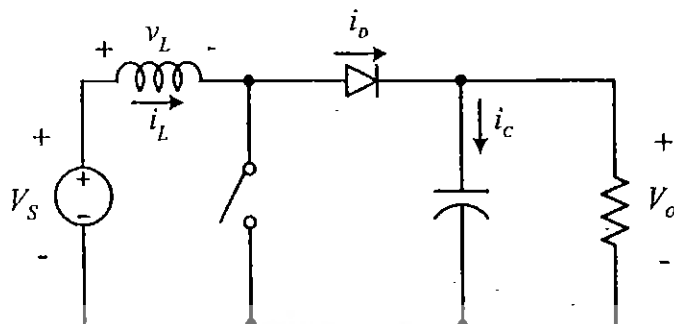
ในขั้นตอนของการดีฟัซซี่ฟิเคชัน เอาท์พุตของตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิกจะถูกเปลี่ยนจากตัวแปรภาษาเป็นตัวเลข โดยยังคงใช้ฟังก์ชันสมาชิก ซึ่งจะได้สัญญาณอนาล็อกไปควบคุมตัวแปลงกำลังเพื่อหาจุดกำลังสูงสุด ตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิกมีข้อดีคือสามารถทำงานได้กับอินพุตที่ไม่แม่นยำ และไม่จำเป็นต้องใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่แม่นยำ รวมทั้งสามารถรับมือกับความไม่เป็นเชิงเส้นได้ อย่างไรก็ตาม ความมีประสิทธิภาพของตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิกจะขึ้นอยู่กับความรู้ของผู้ใช้ในการออกแบบตารางกฎ (Rule base table)

### ฉ) วิธีโครงข่ายประสาทเทียม

วิธีโครงข่ายประสาทเทียมเป็นอีกวิธีหนึ่งที่เหมาะสมจะใช้กับไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยปกติโครงข่ายประสาทเทียมประกอบด้วย 3 ชั้นคือ ชั้นอินพุต (Input layer) ชั้นที่ถูกซ่อน (Hidden layer) และ ชั้นเอาท์พุต (Output layer) จำนวนโนดในแต่ละชั้นอาจแตกต่างกันและถูกกำหนดโดยผู้ใช้ ในการวิธีโครงข่ายประสาทสำหรับการติดตามจุดกำลังสูงสุด ตัวแปรอินพุตอาจเป็นพารามิเตอร์ของแรงแชลล์แสงอาทิตย์ เช่น  $V_{oc}$  และ  $I_{sc}$  ข้อมูลของสภาพอากาศ เช่น ความเข้มแสงและอุณหภูมิ ในขณะที่เอาท์พุตมักจะเป็นสัญญาณอ้างอิง (หนึ่งตัวหรือหลายตัว) เช่น ตัวชี้เคลื่อนซึ่งใช้ขับเคลื่อนตัวแปลงกำลังเพื่อให้ทำงานที่ (หรือใกล้เคียงกับ) จุดกำลังสูงสุด การที่จุดทำงานของแรงแชลล์แสงอาทิตย์จะใกล้เคียงกับจุดกำลังสูงสุดมากเพียงใดนั้นขึ้นอยู่กับอัลกอริทึมที่ใช้ในชั้นที่ถูกซ่อนและขึ้นอยู่กับข้อมูลที่ป้อนให้โครงข่ายประสาทเทียมเรียนรู้ เนื่องจากแรงแชลล์แสงอาทิตย์ส่วนมากมีคุณลักษณะแตกต่างกัน จึงให้โครงข่ายประสาทเทียมเรียนรู้ข้อมูลที่เฉพาะเจาะจงสำหรับแรงแชลล์แสงอาทิตย์แต่ละแผง และเนื่องจากการเปลี่ยนสภาพของแผงตามอายุการใช้งาน โครงข่ายประสาทเทียมจึงเรียนรู้ข้อมูลใหม่เป็นระยะ ๆ เพื่อคงความแม่นยำในการติดตามจุดกำลังสูงสุด [2]

## 2.3 วงจรทบทระดับแรงดัน

แผนภาพของวงจรทบทระดับแรงดันแสดงได้ดังรูปที่ 2.18 ซึ่งเป็นตัวแปลงผันกำลังที่สร้างแรงดันเอาต์พุตให้มีระดับสูงกว่าแรงดันอินพุตของวงจร



รูปที่ 2.18 แผนภาพวงจรทบทระดับแรงดัน [5]

- โดยที่  $V_s$  คือแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่าย  
 $V_L$  คือแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ  
 $i_L$  คือกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ  
 $i_D$  คือกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านไดโอด  
 $i_C$  คือกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ  
 $V_o$  คือแรงดันเอาต์พุต

การวิเคราะห์การทำงานของวงจรทบทระดับแรงดันในช่วงสถานะอยู่ตัว จะมีการกำหนดเงื่อนไขการทำงานของวงจรทบทระดับแรงดัน เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ ดังนี้

1) กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ ( $i_L$ ) ตำแหน่งเดียวกันในแต่ละคาบมีค่าเท่ากัน และมีค่าเป็นบวกเสมอ

2) แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำในแต่ละคาบจะเท่ากับศูนย์หมายถึงผลรวมของผลคูณระหว่างแรงดันไฟฟ้ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำกับเวลาในแต่ละคาบจะเท่ากับศูนย์

3) ตัวเก็บประจุต้องมีขนาดใหญ่พอ เพื่อให้แรงดันเอาต์พุต ( $V_o$ ) มีค่าคงที่

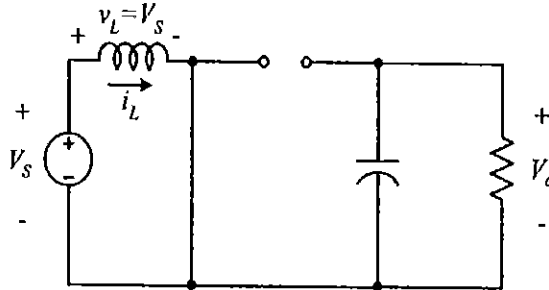
4) กำลังอินพุตเท่ากับกำลังเอาต์พุต กรณีนี้ไม่คำนึงถึงการสูญเสีย เนื่องจากการทำงานของวงจร โดยให้อุปกรณ์ทุกตัวเป็นอุดมคติ ทำให้สรุปได้ว่าประสิทธิภาพของวงจรเป็น 100%

หลักการการทำงานของวงจรทบทระดับแรงดันเพื่อให้ได้แรงดันเอาต์พุตตามที่ต้องการ เริ่มต้นจากข้อกำหนดที่ว่า แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำในแต่ละคาบเวลาจะมีค่าเท่ากับศูนย์ และสามารถหากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำได้โดยวิเคราะห์การทำงานของสวิตช์ในแต่ละช่วงการทำงาน ทั้งนี้การทำงานต้องอยู่ในช่วงสถานะอยู่ตัวดังนี้



ขณะสวิตช์นำกระแส เมื่อสวิตช์นำกระแส กระแสไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง จะไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำโดยผ่านสวิตช์ ขณะเดียวกันไดโอดจะถูกไบแอสย้อนกลับ ทำให้ไดโอดสามารถนำกระแสได้ แสดงแผนภาพดังรูปที่ 2.19

.12 ต.ค. 2560



รูปที่ 2.19 แผนภาพวงจรสมมูลของวงจรทระดับแรงดันเมื่อสวิตช์นำกระแส [5]

จากกฎของเคอร์ชอฟฟ์จะได้สมการของแรงดันไฟฟ้าดังนี้

$$-V_s + V_L = 0$$

$$V_L = V_s = L \frac{di_L}{dt}$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_s}{L}$$

ขณะที่สวิตช์นำกระแส  $dt = DT$

โดยที่  $D$  คือค่าดีวตีไซเคิล (Duty cycle)

เมื่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าคงที่ อาจจะได้ว่าการเพิ่มของกระแสไฟฟ้าเป็นเชิงเส้น ทำให้สามารถคำนวณได้จาก

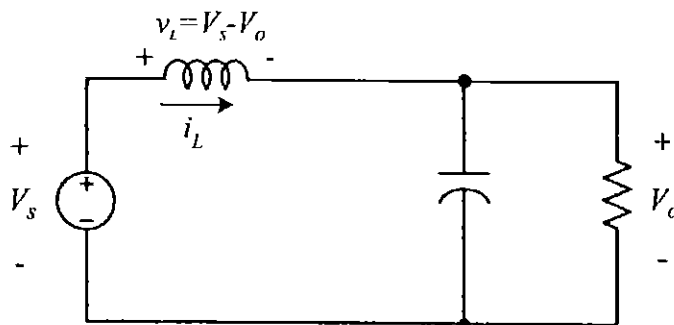
$$\frac{di_{L,on}}{dt} = \frac{V_s}{L}$$

$$\frac{\Delta i_{L,on}}{\Delta t} = \frac{V_s}{L}$$

$$\Delta i_{L,on} = \frac{V_s DT}{L} \quad (2.9)$$

โดยที่  $\Delta i_{L,on}$  คืออัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสตัวเหนี่ยวนำขณะสวิตช์นำกระแส

ขณะสวิตช์ไม่นำกระแส กระแสไฟฟ้าในตัวเหนี่ยวนำไม่เปลี่ยนแปลงทันทีทันใด ไดโอดถูกไบแอสไปข้างหน้าเพื่อนำกระแส ทำให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำอย่างต่อเนื่อง สมมุติแรงดันไฟฟ้าที่เอาต์พุตมีค่าคงที่ดังแผนภาพในรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 แผนภาพวงจรสมมูลของวงจรทระดับแรงดันเมื่อสวิตช์ไม่นำกระแส [5]

จากกฎของเคอร์ชอฟที่จะได้สมการของแรงดันไฟฟ้าดังนี้

$$-V_s + v_L + V_o = 0$$

$$v_L = L \frac{di_L}{dt}$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_s - V_o}{L}$$

ขณะที่สวิตช์หยุดนำกระแส  $dt = (1-D)T$  ดังรูปที่ 2.21(ก) อัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำมีค่าคงที่ และถือว่าการลดลงของกระแสไฟฟ้าเป็นเชิงเส้นดังแสดงในรูปที่ 2.21(ข) สามารถคำนวณได้จาก

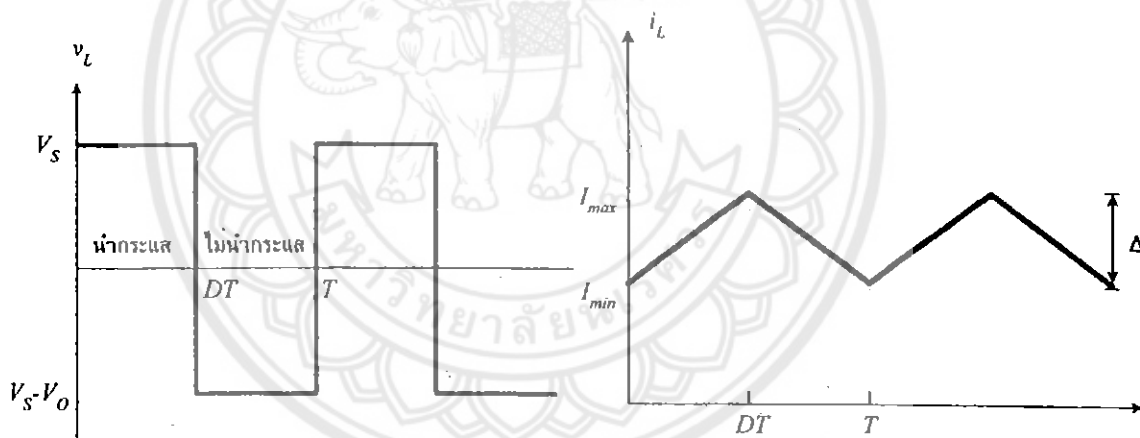
$$\Delta i_{L,off} = \left( \frac{V_s - V_o}{L} \right) (1-D)T \quad (2.10)$$

โดยที่  $\Delta i_{L,off}$  คืออัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสตัวเหนี่ยวนำขณะสวิตช์ไม่นำกระแส

ในสถานะอยู่ตัว การเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำสุทธิมีค่าเท่ากับศูนย์ นั่นคือ

$$\begin{aligned} \Delta i_{L,on} + \Delta i_{L,off} &= 0 \\ \left(\frac{V_s}{L}\right)DT + \frac{(V_s - V_o)(1-D)T}{L} &= 0 \\ V_s D + (V_s - V_o)(1-D) &= 0 \\ V_s - V_o(1-D) &= 0 \\ \frac{V_o}{V_s} = \frac{I_s}{I_o} = \frac{1}{1-D} & \quad (2.11) \end{aligned}$$

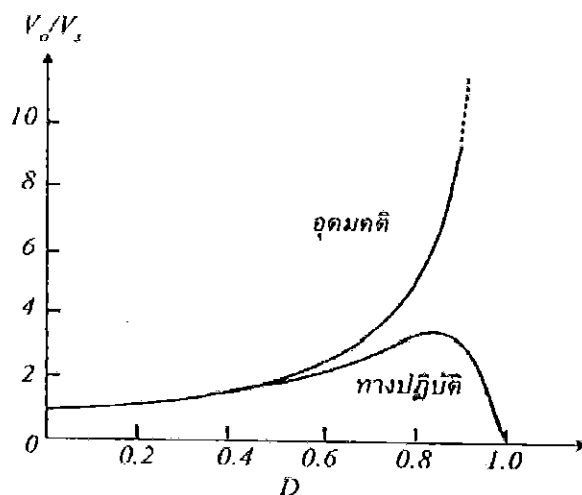
ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราขยายแรงดันของวงจรทระดับแรงดันกับค่าดีไอซีเคิลแสดงได้ดังรูปที่ 2.22 โดยจะเห็นว่า เมื่อค่า  $D$  เพิ่มขึ้นถ้าอัตราขยายแรงดันไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นแบบไม่เชิงเส้นในทางปฏิบัตินิยมปรับอัตราการขยายแรงดันไฟฟ้าไม่เกิน 4 เท่า ทั้งนี้เพื่อให้วงจรมีเสถียรภาพ โดยอัตราขยายแรงดันไฟฟ้าขั้นต่ำสุดคือหนึ่ง หรือแรงดันเอาต์พุตเท่ากับแรงดันอินพุตในทางทฤษฎี แต่ในทางปฏิบัติแรงดันเอาต์พุตจะน้อยกว่าแรงดันอินพุตเล็กน้อย เนื่องจากค่าความสูญเสียจากแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมไดโอดและตัวอุปกรณ์สวิตซ์



(ก) แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ

(ข) กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ

รูปที่ 2.21 รูปคลื่นสัญญาณในวงจรทระดับแรงดัน [5]



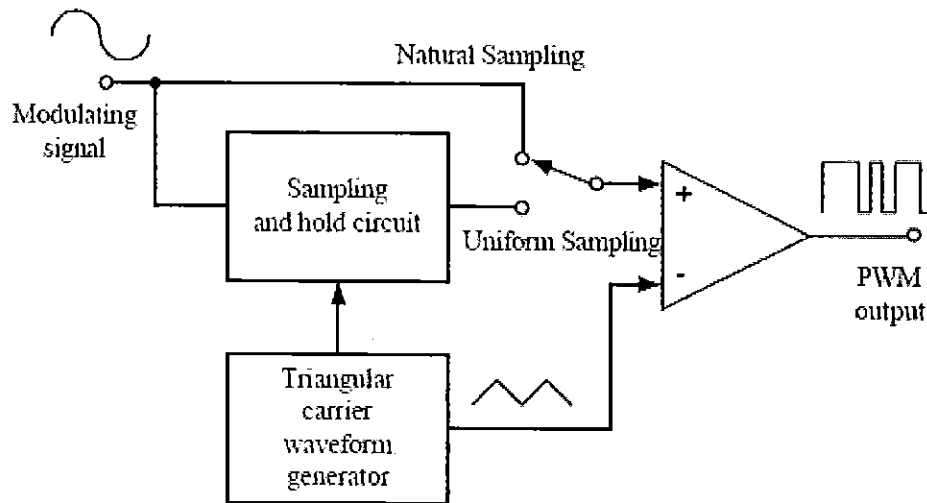
รูปที่ 2.22 อัตราขยายแรงดันไฟฟ้าของวงจรทระดับแรงดัน [5]

การสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มเพื่อควบคุมการทำงานของสวิตช์ในขณะที่ควบคุมการอัดประจุและคลายประจุของแบตเตอรี่นั้น เราได้เลือกใช้ออปแอมป์เป็นอุปกรณ์หลักในวงจรสร้างสัญญาณ โดยจะทำการสร้างสัญญาณสามเหลี่ยมเพื่อเปรียบเทียบกับสัญญาณอ้างอิงที่ควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์

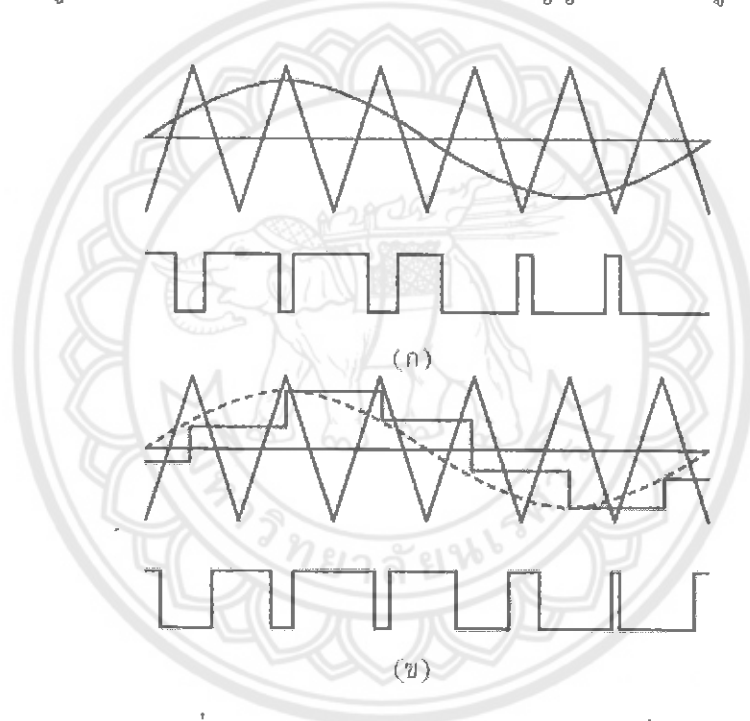
## 2.4 สัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม

สัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม (Pulse width modulation, PWM) คือสัญญาณที่สามารถปรับความกว้างของพัลส์ (Pulse) ซึ่งเรียกว่าค่าดีวตี้ไซเคิลได้จึงสามารถกำหนดปริมาณของพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายให้กับอุปกรณ์ เช่น ปรับความสว่างของหลอดไฟฟ้า ควบคุมความเร็วของมอเตอร์ สัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มสามารถแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบใหญ่ๆ แบบแรกคือสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มที่เกิดจากการสุ่มแบบธรรมชาติ (Natural sampling) โดยสัญญาณนี้เรียกว่าสัญญาณเอ็นพีดับเบิลยูเอ็ม (NPWM) อีกแบบหนึ่งคือสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มที่เกิดจากการสุ่มแบบยูนิฟอร์ม (Uniform sampling) เรียกว่าสัญญาณยูพีดับเบิลยูเอ็ม (UPWM) การสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มทั้งสองแบบแสดงด้วยแผนภาพในรูปที่ 2.23





รูปที่ 2.23 แผนภาพโครงสร้างการกำเนิดสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม [6]

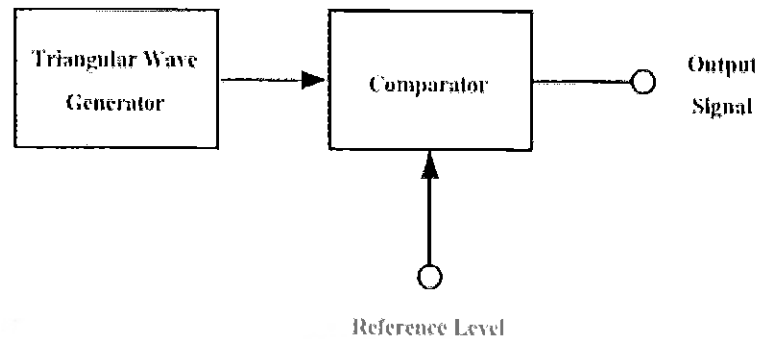


รูปที่ 2.24 การสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มทั่วไป

(ก) สัญญาณเอนพีดับเบิลยูเอ็ม (ข) สัญญาณยูพีดับเบิลยูเอ็ม [6]

กรณีการกำหนดสัญญาณเอนพีดับเบิลยูเอ็ม สัญญาณไซน์จะถูกเปรียบเทียบแรงดันกับสัญญาณสามเหลี่ยม สัญญาณที่ได้จากวงจรเปรียบเทียบแรงดันก็จะเป็นสัญญาณเอนพีดับเบิลยูเอ็มเช่นกัน ส่วนในกรณีของสัญญาณยูพีดับเบิลยูเอ็ม สัญญาณไซน์จะผ่านวงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณ (Sample and hold) ก่อนเข้าเปรียบเทียบแรงดันกับสัญญาณสามเหลี่ยมจึงได้สัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มทั้งสองแบบแสดงดังรูปที่ 2.24

โครงสร้างสัญญาณพีคดับเบิลยูเอ็มอย่างง่ายโดยทั่วไปแสดงเป็นแผนภาพได้ดังรูปที่ 2.25 ซึ่งสัญญาณพีคดับเบิลยูเอ็มที่ได้เป็นการเปรียบเทียบแรงดันระหว่างสัญญาณสามเหลี่ยมกับระดับอ้างอิง (Reference level)



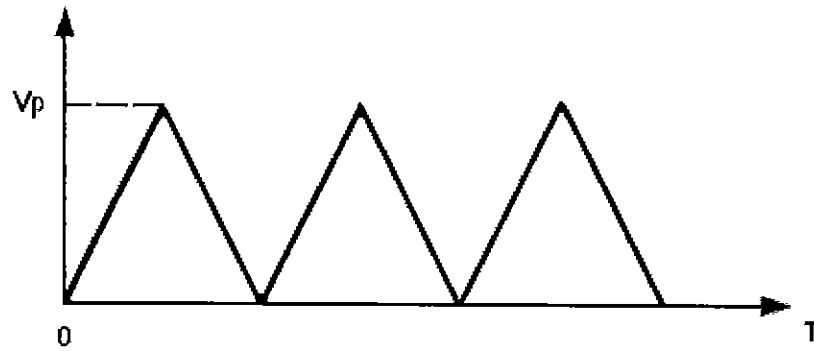
รูปที่ 2.25 แผนภาพโครงสร้างการกำเนิดสัญญาณพีคดับเบิลยูเอ็มอย่างง่าย [6]

## 2.5 สัญญาณฟันเลื่อยและสัญญาณสามเหลี่ยม

โดยหลักการแล้วการสร้างสัญญาณพีคดับเบิลยูเอ็มนั้น ใช้การเปรียบเทียบสัญญาณไฟกระแสดตรงและสัญญาณฟันเลื่อย ซึ่งสัญญาณฟันเลื่อยมีคาบสัญญาณคงที่ โดยมีความชันบวกน้อยและมีความชันทางลบมากเกือบ  $90^\circ$  ดังรูปที่ 2.26 แต่ในการสร้างวงจรเครื่องกำเนิดพีคดับเบิลยูเอ็มนั้นสามารถสร้างจากการเปรียบเทียบสัญญาณระหว่างสัญญาณไฟกระแสดตรงและสัญญาณสามเหลี่ยมได้เช่นกันซึ่งลักษณะของสัญญาณสามเหลี่ยมก็จะมีลักษณะความชันทางบวกและทางลบเท่ากันและมีคาบสัญญาณคงที่ดังแสดงในรูปที่ 2.27 ซึ่งโดยหลักการแล้วเมื่อมีการเปรียบเทียบสัญญาณไฟกระแสดตรงกับสัญญาณไม่ว่าจะเป็นสัญญาณฟันเลื่อยหรือสัญญาณสามเหลี่ยมย่อมได้สัญญาณที่สามารถปรับค่าควิตซ์ไซเคิลได้เหมือนกันเพราะว่าสัญญาณทั้งสองมีคาบสัญญาณคงที่



รูปที่ 2.26 สัญญาณฟันเลื่อย [6]



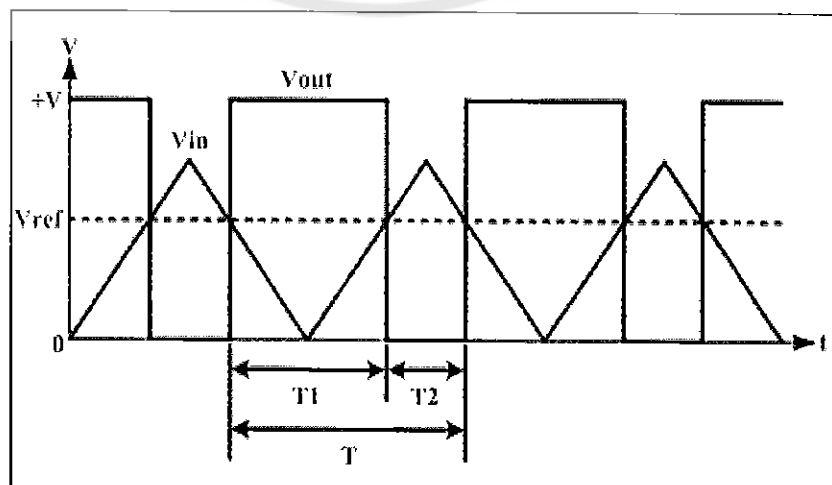
รูปที่ 2.27 สัญญาณสามเหลี่ยม [6]

ในการใช้งานสามารถเลือกใช้สัญญาณทั้งสองแทนกันได้ แต่เหตุผลที่เลือกใช้งานสัญญาณสามเหลี่ยมแทนสัญญาณฟันเลื่อยคือ ในการสร้างสัญญาณฟันเลื่อยให้มีความชันด้านลบมีค่าเป็น  $90^\circ$  โดยสมบูรณ์นั้นทำได้ยาก แต่การสร้างสัญญาณสามเหลี่ยมให้เป็นสัญญาณที่สมบูรณ์ทำได้ง่ายกว่า เพราะฉะนั้นในการสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มจากวงจรสัญญาณสามเหลี่ยมจึงเป็นทางเลือกที่ดีกว่า

เมื่อนำสัญญาณสามเหลี่ยมและสัญญาณไฟกระแสดตรงมาเปรียบเทียบสัญญาณแล้ว ลักษณะของสัญญาณต่างๆแสดงดังรูปที่ 2.28 พบว่ามีค่าแรงดันอยู่สามค่าด้วยกันซึ่งแรงดันทั้งหมดนี้จะมีความสัมพันธ์กัน นั่นคือ แรงดันสามเหลี่ยม ( $V_{in}$ ) แรงดันอ้างอิง ( $V_{ref}$ ) และแรงดันด้านออก ( $V_{out}$ ) ดังนั้นถ้าทำการพิจารณาถึงลักษณะรูปสัญญาณจะพบว่า

ถ้าแรงดัน  $V_{ref}$  นั้นมีค่ามากกว่าค่าของแรงดัน  $V_{in}$  จะได้ค่าแรงดันสัญญาณด้าน ( $V_{out}$ ) ออกมามีค่าเท่ากับ  $+V$

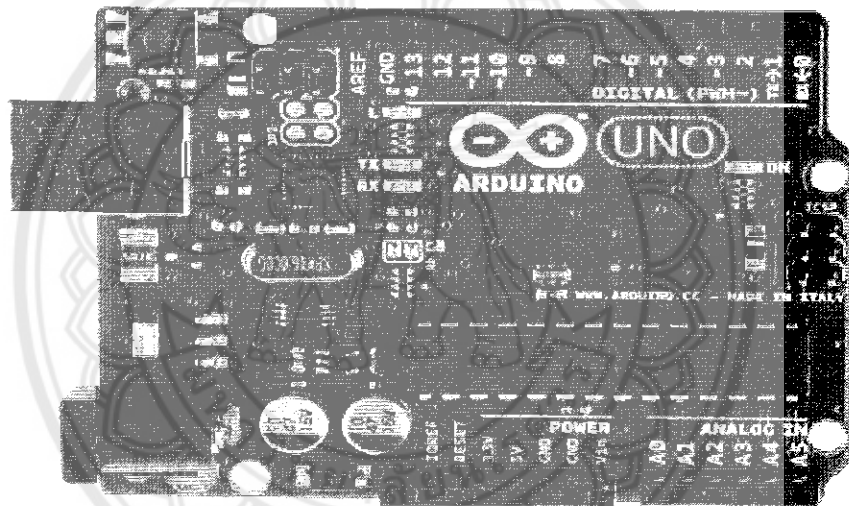
ถ้าแรงดัน  $V_{ref}$  นั้นมีค่าน้อยกว่าค่าของแรงดัน  $V_{in}$  จะได้ค่าแรงดันสัญญาณด้าน ( $V_{out}$ ) ออกมามีค่าเท่ากับ  $0\text{ V}$



รูปที่ 2.28 ลักษณะของสัญญาณที่ได้จากเครื่องกำเนิดสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม [6]

## 2.6 แผงวงจร Arduino

ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ในโครงงานนี้เป็นแผงวงจร Arduino รุ่น UNO R3 จัดอยู่ในตระกูลเอวีอาร์ (AVR) ขนาด 28 ขา ซึ่งใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์หมายเลข ATmega328 ดังแสดงในรูปที่ 2.29 โดยไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino เป็นแพลตฟอร์ม (Platform) ของอินพุตและเอาต์พุต (I/O) ขั้นพื้นฐานที่พอเพียงกับการใช้งานและการเรียนรู้ โดยตัวแผงวงจรมีชุดคำสั่งที่ใช้ควบคุมพอร์ตอินพุตและเอาต์พุต รวมถึงพอร์ตดิจิทัล พอร์ตแอนะล็อกพีดีบีเบิลยูเอ็มและพอร์ตอนุกรมซึ่งแผงวงจร Arduino ทำให้คอมพิวเตอร์สามารถรับสัญญาณจากภายนอกและส่งสัญญาณไปควบคุมอุปกรณ์ภายนอกได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าการใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ ตัวแผงวงจรออกแบบจากไมโครคอมพิวเตอร์เดี่ยวและมีโปรแกรมพัฒนาสำหรับให้แผงวงจร Arduino สามารถรับสัญญาณจากสวิตช์หรือตัวรับรู้หรืออุปกรณ์อื่น ๆ



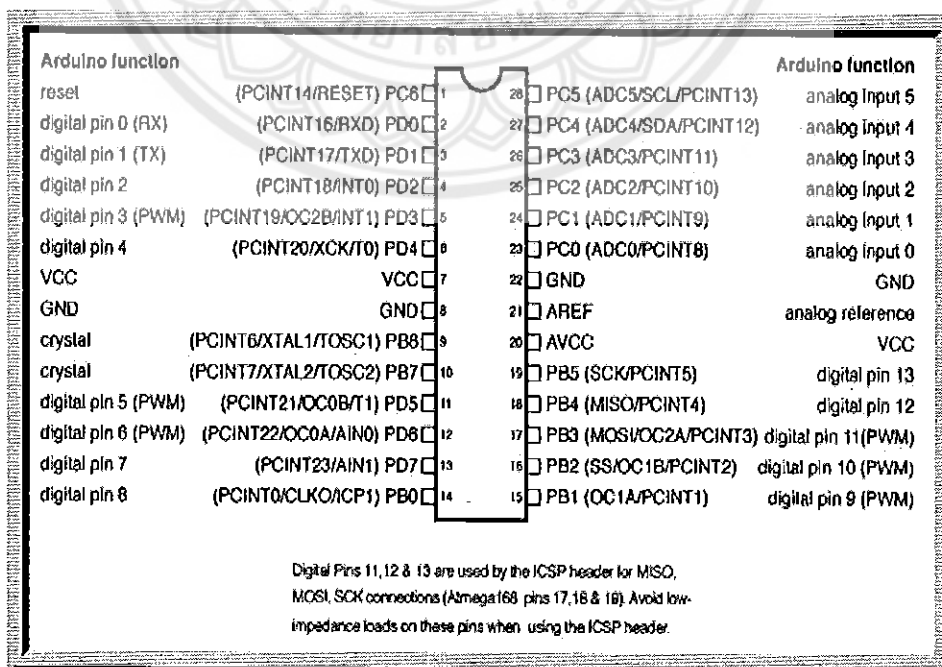
รูปที่ 2.29 รูปของแผงวงจร Arduino รุ่น UNO R3 [7]

แผงวงจร Arduino มีจุดเด่นในเรื่องของความง่ายต่อการเรียนรู้และใช้งานเนื่องจากได้มีการออกแบบคำสั่งต่าง ๆ ขึ้นมาสนับสนุนการใช้งานด้วยรูปแบบที่ง่ายไม่ซับซ้อนและมีข้อดีกว่าบอร์ดสำเร็จรูปตัวอื่นคือใช้งานง่ายมีโปรแกรมพัฒนาที่ไม่ซับซ้อนมีโปรแกรมพัฒนา Arduino ใช้งานง่ายสำหรับมือใหม่และมีความสามารถครบตามความต้องการของนักพัฒนามืออาชีพซึ่งแผงวงจร Arduino เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ตัวประมวลผลตระกูลเอวีอาร์ขนาดเล็กเหมาะสำหรับนำไปใช้ในการศึกษาเรียนรู้ระบบไมโครคอนโทรลเลอร์และสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานเกี่ยวกับการควบคุมอุปกรณ์อินพุตและเอาต์พุตได้มากมาย ภาษาในการเขียนโปรแกรมลงบน Arduino ใช้ภาษา C++ ซึ่งเป็นรูปแบบของโปรแกรมภาษาซีประยุกต์แบบหนึ่งมีโครงสร้างของตัวภาษาโดยรวมใกล้เคียงกับภาษาซีมาตรฐาน เพียงแต่ได้มีการปรับปรุงรูปแบบในการเขียนโปรแกรมบางส่วนที่ผิดเพี้ยนไปจากมาตรฐานเล็กน้อยเพื่อให้ลดความยุ่งยากในการเขียน

โปรแกรมและให้ผู้ใช้เขียนโปรแกรมสามารถเขียนโปรแกรมได้ง่ายและสะดวกมากขึ้นกว่าการเขียนภาษาซีตามแบบมาตรฐานโดยตรง

ตัวแผงวงจร Arduino ที่ใช้ในโครงงานนี้จะกล่าวถึงสถาปัตยกรรมของเอวีอาร์ขนาด 8 bits โดยเป็นตัวประมวลผลแบบ RISC (Reduced instruction set computer) และมีหน่วยความจำแบบฮาร์วาร์ด (Harvard) ซึ่งแยกหน่วยความจำโปรแกรมและหน่วยความจำข้อมูลออกจากกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.30 โดยใช้หน่วยความจำแบบแฟลช (Flash) เป็นหน่วยความจำโปรแกรมและใช้หน่วยความจำแบบ SRAM สำหรับเป็นหน่วยความจำข้อมูล นอกจากนี้ยังมีหน่วยความจำแบบ EEPROM ซึ่งสามารถเก็บข้อมูลได้โดยไม่ต้องมีไฟเลี้ยงซึ่งมีคุณสมบัติดังนี้ [7]

- 1) หน่วยความจำโปรแกรมแบบ FLASH ขนาด 32 kb
- 2) หน่วยความจำข้อมูลแบบ SRAM ขนาด 2 kb
- 3) หน่วยความจำข้อมูลแบบ EEPROM ขนาด 1 kb
- 4) พอร์ตอินพุตและเอาต์พุตจำนวน 23 bits
- 5) วงจรแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิตอลขนาด 10 bits ในตัวจำนวน 8 ช่อง
- 6) ทำงานได้ตั้งแต่ย่านแรงดัน 1.8 - 5.5 V
- 7) ความถี่ใช้งานสูงสุด 20 MHz
- 8) วงจรสื่อสารอนุกรม
- 9) ตัวจับเวลาและตัวนับขนาด 8 bits จำนวน 2 ตัว และ U3586 ขนาด 16 bits
- 10) สนับสนุนช่องสัญญาณสำหรับสร้างสัญญาณเฟดแบ็คเบิลยูเอ็ม (PWM) จำนวน 6 ช่อง



รูปที่ 2.30 โครงสร้างไมโครคอนโทรลเลอร์ รุ่น ATmega328P-PU [7]

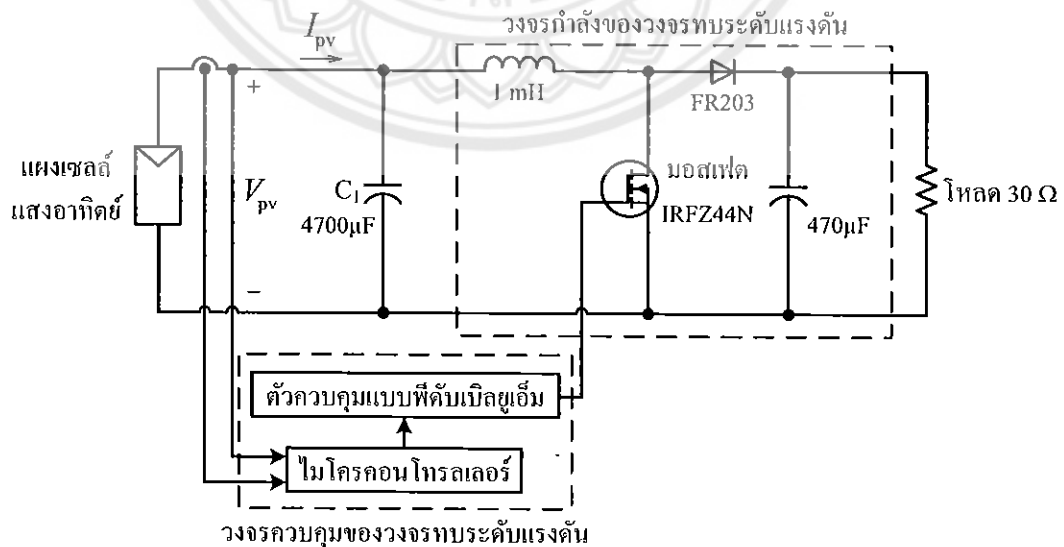
### บทที่ 3

#### การออกแบบและสร้างระบบติดตามจุดกำลังสูงสุด

ในโครงการนี้ได้ออกแบบและสร้างระบบติดตามจุดกำลังสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยมีการออกแบบและสร้างวงจรทบทระดับแรงดัน รวมทั้งวงจรสร้างสัญญาณควบคุมการทำงานของสวิตช์ด้วยหลักการพีดับเบิลยูเอ็มเพื่อขับนำสวิตช์ในตัวแปลงผันกำลังที่ใช้ในระบบ

##### 3.1 การออกแบบการทำงานของระบบติดตามจุดกำลังสูงสุด

การทำงานของระบบนี้ถูกออกแบบให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์จ่ายโหลดตัวต้านทานโดยแสดงได้ดังรูปที่ 3.1 ซึ่งในระบบการติดตามจุดกำลังสูงสุดนี้ใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 100 W ที่มีกระแสลัดวงจร 6.26 A และแรงดันเปิดวงจร 22.6 V กำลังไฟฟ้าที่ได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ถูกส่งผ่านวงจรทบทระดับแรงดันเพื่อจ่ายให้โหลดตัวต้านทาน  $30 \Omega$  โดยต่อตัวเก็บประจุ  $C_1$  เพื่อลดความพลัวและควบคุมแรงดันเอาต์พุตของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ก่อนเข้าวงจรทบทระดับแรงดัน ค่ากระแสและแรงดันเอาต์พุตของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ถูกตรวจวัดด้วยตัวรับรู้กระแสและตัวรับรู้แรงดันเพื่อส่งค่าไปให้ไมโครคอนโทรลเลอร์คำนวณเป็นค่ากำลังไฟฟ้า และประมวลผลตามหลักการพีแอนด์โอโดยสร้างสัญญาณควบคุมให้กับตัวควบคุมแบบพีดับเบิลยูเอ็ม เพื่อเพิ่มหรือลดค่าดิวตี้ไซเคิลสำหรับควบคุมการทำงานของวงจรทบทระดับแรงดันเพื่อดึงกำลังไฟฟ้าสูงสุดจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้ได้มากที่สุด ในสภาวะอากาศขณะนั้น



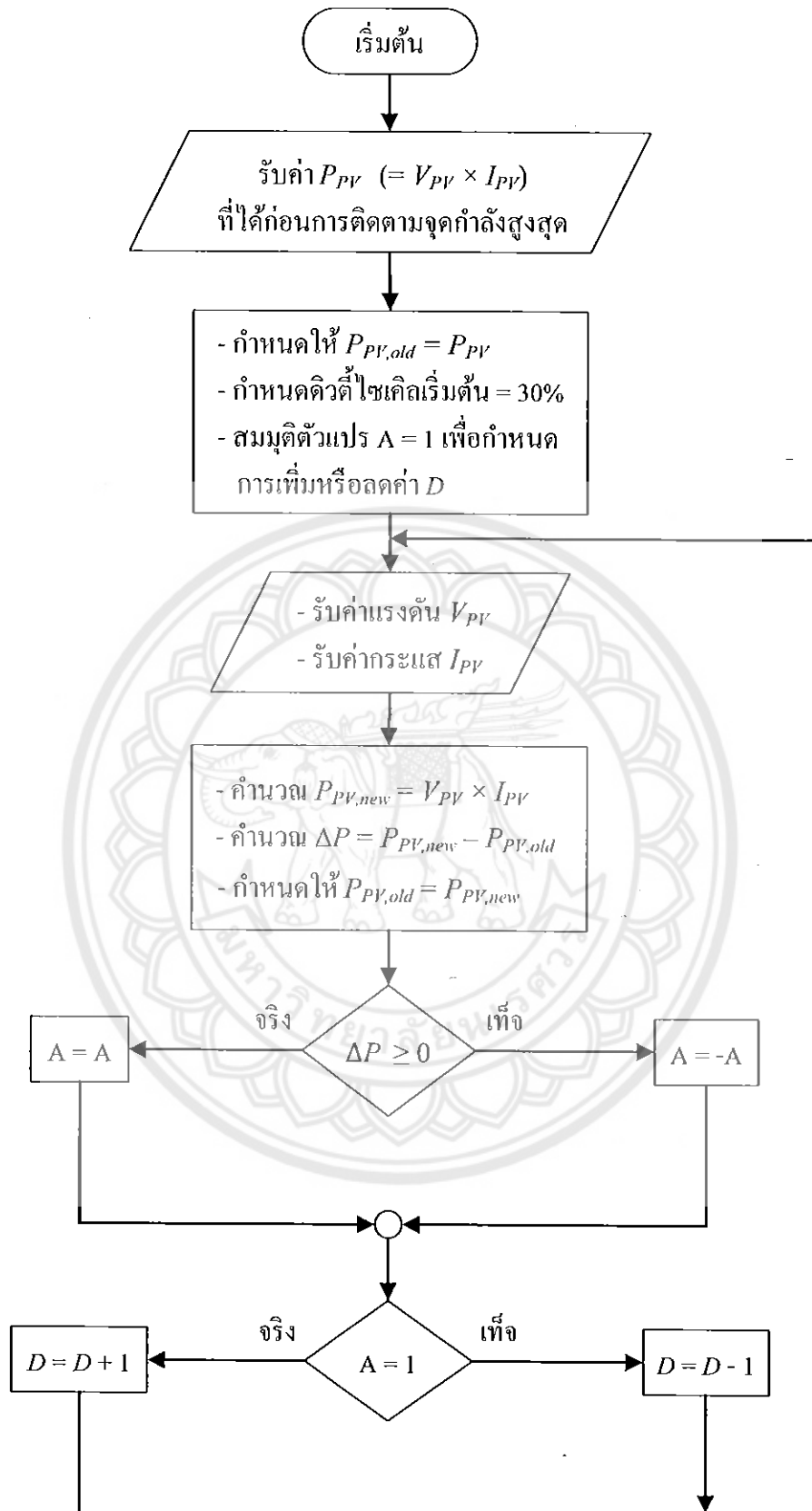
รูปที่ 3.1 แผนภาพวงจรของระบบติดตามจุดกำลังสูงสุดที่ออกแบบ

วิธีการปรับค่าความถี่ไซเคิลเพื่อติดตามจุดกำลังสูงสุดตามหลักการพีแอนด์โอแสดงดังตารางที่ 3.1 โดยแบ่งออกได้เป็น 4 กรณี กรณีที่ 1 เมื่อให้ค่าความถี่ไซเคิลเพิ่มขึ้นแล้วทำให้กำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นต้องให้เพิ่มค่าความถี่ไซเคิลต่อไป กรณีที่ 2 ให้ค่าความถี่ไซเคิลเพิ่มขึ้นแต่กำลังไฟฟ้าลดลงต้องให้ลดค่าความถี่ไซเคิล กรณีที่ 3 เมื่อให้ค่าความถี่ไซเคิลลดลงแล้วทำให้กำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นต้องให้ลดค่าความถี่ไซเคิลต่อไป และกรณีสุดท้ายให้ค่าความถี่ไซเคิลลดลงแล้วส่งผลทำให้กำลังไฟฟ้าลดลงตามต้องให้เพิ่มค่าความถี่ไซเคิล

ตารางที่ 3.1 วิธีการติดตามจุดกำลังสูงสุดตามหลักการพีแอนด์โอ

ปรับค่าความถี่ไซเคิล	กำลังไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลง	การปรับค่าความถี่ไซเคิลในรอบต่อไป
เพิ่มความถี่ไซเคิล	กำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้น	เพิ่มความถี่ไซเคิล
เพิ่มความถี่ไซเคิล	กำลังไฟฟ้าลดลง	ลดความถี่ไซเคิล
ลดความถี่ไซเคิล	กำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้น	ลดความถี่ไซเคิล
ลดความถี่ไซเคิล	กำลังไฟฟ้าลดลง	เพิ่มความถี่ไซเคิล

จากวิธีการติดตามจุดกำลังสูงสุดสามารถนำมาเขียนผังงานการติดตามจุดกำลังสูงสุดของโครงการนี้ได้ดังแสดงในรูปที่ 3.2 เริ่มต้นจากเมื่อกดปุ่มสวิตซ์การทำงาน ไมโครคอนโทรลเลอร์ได้รับค่ากำลังไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ก่อนเริ่มการติดตามจุดกำลังสูงสุด โดยคำนวณจากค่ากระแสและแรงดันจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ค่าความถี่ไซเคิล 0% แล้วเก็บค่ากำลังไฟฟ้าให้เป็นกำลังไฟฟ้าค่าเก่า จากนั้นไมโครคอนโทรลเลอร์สร้างสัญญาณควบคุมเพื่อให้ระบบเริ่มติดตามจุดกำลังสูงสุดที่ค่าความถี่ไซเคิล 30% และมีการกำหนดตัวแปรที่ใช้สำหรับกำหนดการเพิ่มหรือลดค่าความถี่ไซเคิล ซึ่งกำหนดให้ตัวแปรนั้นคือ A มีค่าเท่ากับ 1 เป็นทิศทางอ้างอิง ถัดจากนั้นไมโครคอนโทรลเลอร์ทำการเก็บค่ากระแสและแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์และทำการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าค่าใหม่เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับกำลังไฟฟ้าค่าเก่า ถ้าผลต่างกำลังไฟฟ้ามีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 0 ให้ A คูณ 1 แต่ถ้าน้อยกว่า 0 ให้ A คูณ -1 จากนั้นให้ทำการตรวจสอบตัวแปร A ว่ามีค่าเท่ากับ 1 หรือ -1 ถ้า A เท่ากับ 1 ให้เพิ่มความถี่ไซเคิล 1% แต่ถ้า A เท่ากับ -1 ให้ลดค่าความถี่ไซเคิลลง 1% แล้วจึงกลับไปปรับค่ากำลังไฟฟ้าในรอบถัดไป

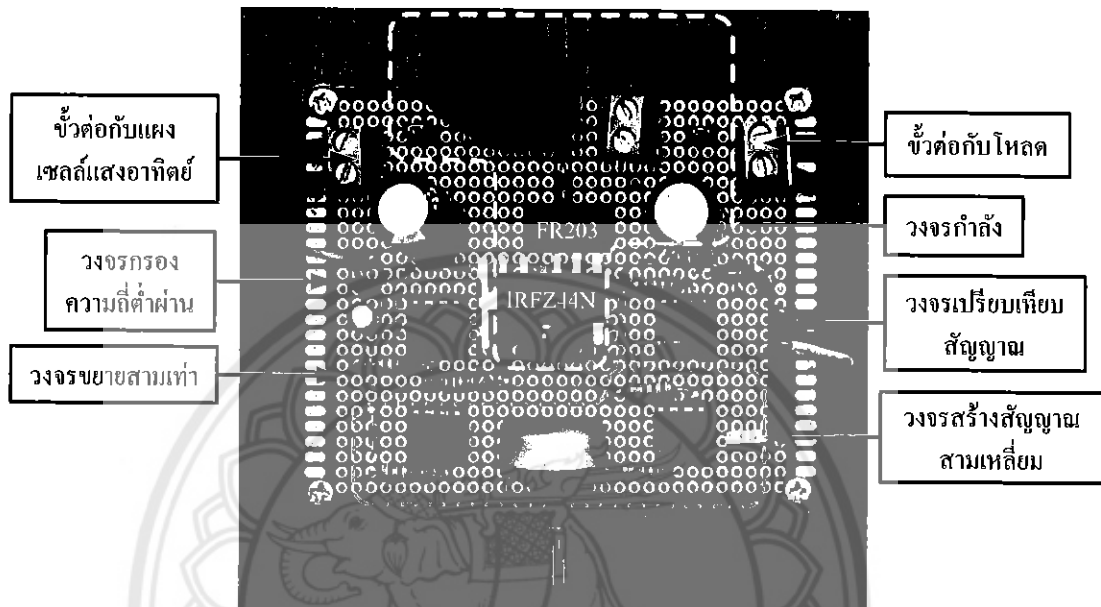


รูปที่ 3.2 ฟังก์ชันการประมวลผลของไมโครคอนโทรลเลอร์ตามหลักการพีแอนด์โอ



### 3.2 วงจรทบทระดับแรงดัน

การทำงานของวงจรทบทระดับแรงดันสามารถควบคุมได้โดยการควบคุมสวิตช์ ซึ่งสัญญาณที่ใช้ในวงจรทบทระดับแรงดันนี้สร้างจากหลักการพีดับเบิลยูเอ็มที่เกิดจากการเปรียบเทียบสัญญาณอ้างอิงและสัญญาณควบคุม โดยที่วงจรทบทระดับแรงดันแสดงได้ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 วงจรทบทระดับแรงดัน

#### 3.2.1 วงจรกำลังของวงจรทบทระดับแรงดัน

วงจรทบทระดับแรงดันเป็นกลไกหลักที่ทำให้สามารถติดตามจุดกำลังสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งวงจรกำลังของวงจรทบทระดับแรงดันมีอุปกรณ์หลักในวงจร ได้แก่ มอสเฟต ตัวเหนี่ยวนำ ไดโอด และตัวเก็บประจุ

##### ก) มอสเฟต

ตัวควบคุมแบบพีดับเบิลยูเอ็มสร้างสัญญาณขับนำการสวิตชิงให้แก่มอสเฟต เพื่อควบคุมการทำงานของวงจรทบทระดับแรงดัน โดยเลือกใช้มอสเฟตหมายเลข IRFZ44N เนื่องจากมอสเฟตชนิดนี้สามารถทนแรงดันสูงสุดได้ถึง 55 Vdc และทนกระแสสูงสุดได้ถึง 49 A (ที่อุณหภูมิ 25°C) อีกทั้งยังสามารถถูกขับนำสวิตช์ด้วยควิตีไซเคิลต่ำสุดที่ 2% ส่งผลให้มีการเลือกตัวเหนี่ยวนำให้สอดคล้องกับการขับนำสวิตช์ด้วยค่าควิตีไซเคิลต่างๆ เพื่อให้อยู่ในภาคกระแสต่อเนื่อง

## ข) ตัวเหนี่ยวนำ

การออกแบบวงจรทบระดับแรงดันให้ทำงานมีประสิทธิภาพเป็นไปตามหลักการและทฤษฎีนั้น ค่ากระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำต้องอยู่ในภาวะกระแสต่อเนื่อง ซึ่งใช้คิวดี้ไซเคลต่ำสุดในการติดตามจุดกำลังสูงสุดที่ 10% จึงสามารถคำนวณค่าความเหนี่ยวนำต่ำสุดได้ดังสมการที่ (3.1) เพื่อเลือกใช้ค่าตัวเหนี่ยวนำที่เหมาะสมสำหรับวงจรทบระดับแรงดัน

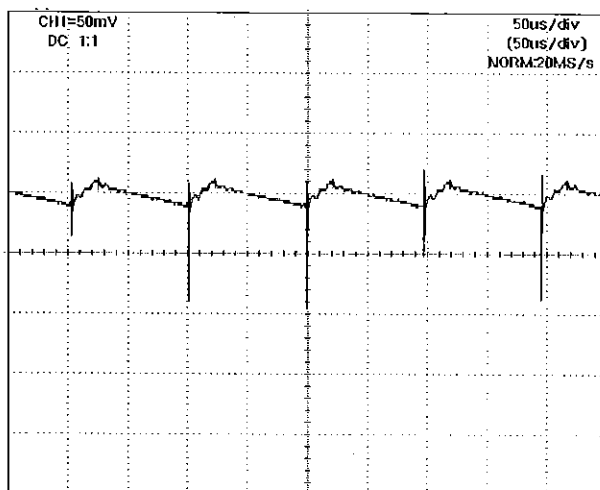
ค่าตัวเหนี่ยวนำต่ำสุดในภาวะกระแสต่อเนื่อง [5] สามารถคำนวณได้จาก

$$L_{\min} = \frac{D(1-D)^2 R}{2f} \quad (3.1)$$

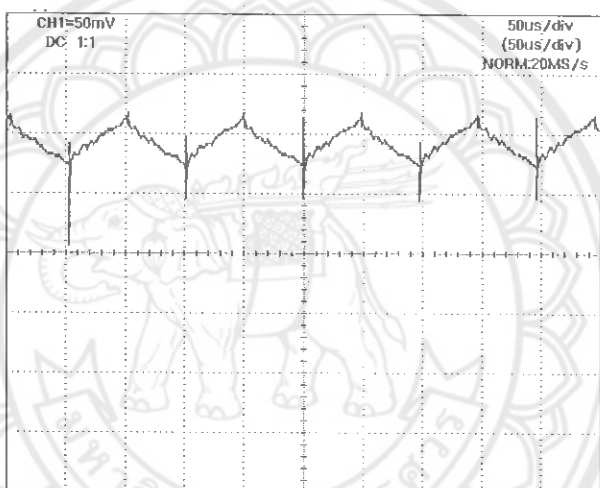
ดังนั้น จากสมการที่ (3.1) ที่  $f = 10 \text{ kHz}$   $D = 10\%$  และ  $R = 30 \Omega$  จะได้

$$L_{\min} = \frac{D(1-D)^2 R}{2f} = \frac{0.1(1-0.1)^2 \times 30}{2 \times 10 \times 10^3} = 0.122 \text{ mH}$$

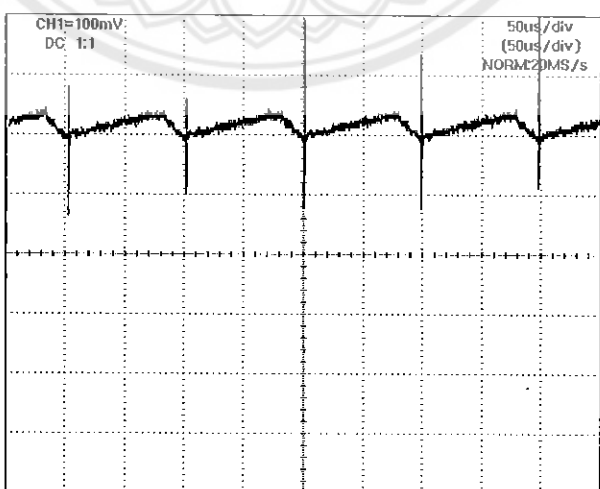
ดังนั้นเพื่อให้วงจรทำงานในภาวะกระแสต่อเนื่องและลดความพลัวของกระแสของตัวเหนี่ยวนำ [5] ในโครงการนี้จึงเลือกใช้ตัวเหนี่ยวนำขนาด 1 mH จากนั้นทำการทดสอบการไหลของกระแสของตัวเหนี่ยวนำในภาวะกระแสต่อเนื่องที่คิวดี้ไซเคล 20% 50% และ 80% ดังแสดงในรูปที่ 3.4 3.5 และ 3.6 ตามลำดับ โดยกำหนดแรงดันอินพุต 12 V จ่ายโหลดตัวต้านทาน 30  $\Omega$  และใช้ออสซิลโลสโคปจับค่ากระแสของตัวเหนี่ยวนำผ่านการจับสัญญาณแรงดันตกคร่อมตัวต้าน 0.1  $\Omega$  ที่ต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำนั้น โดยที่คิวดี้ไซเคล 20% สามารถวัดค่ากระแสเฉลี่ยของตัวเหนี่ยวนำได้ 0.49 A (รูปที่ 3.4) ซึ่งมีความพลัวของกระแสตัวเหนี่ยวนำ 0.2 A คิดเป็น 40.81% ในทำนองเดียวกันที่คิวดี้ไซเคล 50% วัดค่ากระแสเฉลี่ยของตัวเหนี่ยวนำได้ 0.92 A (รูปที่ 3.5) ซึ่งมีความพลัวของกระแสตัวเหนี่ยวนำ 0.4 A คิดเป็น 43.48% และคิวดี้ไซเคล 80% สามารถคำนวณกระแสเฉลี่ยของตัวเหนี่ยวนำได้ 2.22 A (รูปที่ 3.6) ซึ่งมีความพลัวของกระแสตัวเหนี่ยวนำ 0.4 A คิดเป็น 18.02% สังเกตเห็นว่าการไหลของกระแสในแต่ละคาบการทำงานไม่มีกระแสส่วนใดมีค่าต่ำกว่าหรือเท่ากับ 0 แสดงว่าการไหลของกระแสของตัวเหนี่ยวนำอยู่ในช่วงการทำงานภาวะกระแสต่อเนื่อง



รูปที่ 3.4 สัญญาณกระแสของตัวเหนี่ยวนำที่คิวตี้ไซเคิล 20%



รูปที่ 3.5 สัญญาณกระแสของตัวเหนี่ยวนำที่คิวตี้ไซเคิล 50%



รูปที่ 3.6 สัญญาณกระแสของตัวเหนี่ยวนำที่คิวตี้ไซเคิล 80%

### ค) ไดโอด

ไดโอดในวงจรทระดับแรงดันทำหน้าที่เป็นเส้นทางกรไหลของกระแสเมื่อสวิตช์เปิด วงจรเพราะถูกไบแอสตรง และป้องกันการไหลของกระแสย้อนกลับเมื่อสวิตช์ปิดวงจรเนื่องจากถูกไบแอสย้อนกลับ ซึ่งไดโอดที่ได้เลือกใช้ในระบบนี้คือ ไดโอดหมายเลข FR203 สามารถทนแรงดันสูงสุดได้ 200 Vdc และทนกระแสสูงสุดได้ 60 A

### ง) ตัวเก็บประจุ

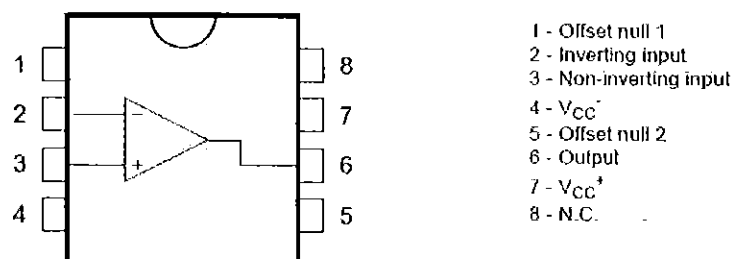
วงจรทระดับแรงดันได้ใช้ตัวเก็บประจุเพื่อลดความพลัวของแรงดันเอาท์พุทก่อนไปตกคร่อมโหลด ซึ่งตัวเก็บประจุที่ได้เลือกใช้ในวงจรมนี้คือ ตัวเก็บประจุขนาด 470  $\mu\text{F}$  มีพีคัดแรงดัน 50 Vdc

### 3.2.2 วงจรควบคุมของวงจรทระดับแรงดัน

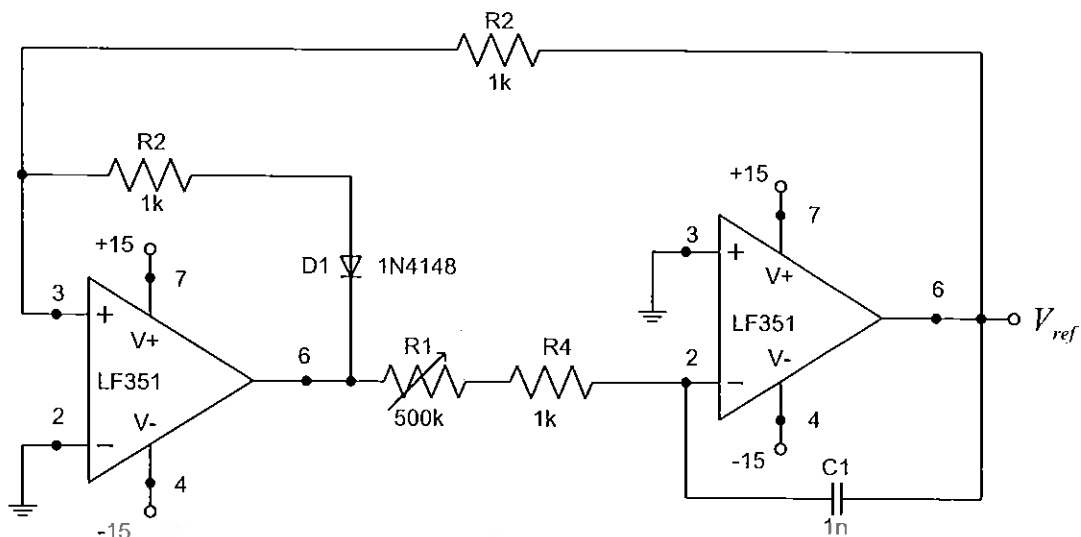
การขั้บนำมอสเฟตในวงจรทระดับแรงดัน โครงงานนี้ใช้ตัวควบคุมแบบพีดับเบิลยูเอ็มซึ่งประกอบด้วย 3 วงจร คือ วงจรสร้างสัญญาณสามเหลี่ยม วงจรขยายสามเท่า และวงจรเปรียบเทียบสัญญาณ

#### ก) วงจรสร้างสัญญาณสามเหลี่ยม

วงจรสร้างสัญญาณสามเหลี่ยมสร้างสัญญาณเพื่อกำหนดความถี่ของสัญญาณควบคุมการทำงานสวิตช์ให้มีความถี่สวิตซ์ตามต้องการ โดยอุปกรณ์หลักในการสร้างสัญญาณคือออปแอมป์หมายเลข LF351 ซึ่งมีขาต่อใช้งานแสดงดังรูปที่ 3.7 โดย LF351 สร้างสัญญาณสี่เหลี่ยมขึ้นจากหลักการป้อนกลับแรงดัน และสามารถวิเคราะห์การเกิดสัญญาณสามเหลี่ยมได้คือ ช่วงแรกที่สัญญาณสี่เหลี่ยมมีค่าเป็นบวก แรงดันเอาท์พุทของสัญญาณอินทิเกรเตอร์ลดลงอย่างคงที่ แต่เมื่อสัญญาณสี่เหลี่ยมมีค่าเป็นศูนย์ แรงดันเอาท์พุทของสัญญาณอินทิเกรเตอร์เพิ่มขึ้นด้วยความชันขนาดเท่ากับที่ลดลง วงจรการทำงานที่ออกแบบขึ้นสามารถแสดงเป็นแผนภาพได้ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.7 หมายเลขและตำแหน่งขาของไอซีออปแอมป์หมายเลข LF351 [5]



รูปที่ 3.8 แผนภาพวงจรสร้างสัญญาณสามเหลี่ยมด้วย LF351 [5]

ความถี่ของสัญญาณสามเหลี่ยมสามารถคำนวณได้จาก

$$f = \frac{1}{2R_1C_1} \tag{3.2}$$

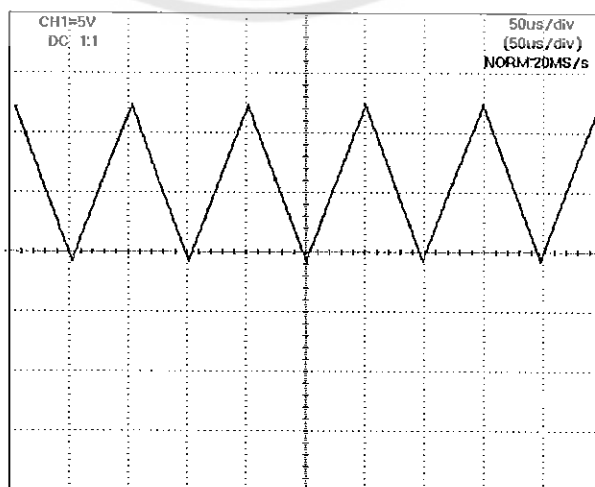
ดังนั้น จากสมการที่ (3.2) ที่  $f = 1 \text{ kHz}$  และ  $C_1 = 1 \text{ nF}$  จะได้

$$R_1 = \frac{1}{2fC_1} = \frac{1}{2 \times (1 \times 10^3) \times (1 \times 10^{-9})} = 500 \text{ k}\Omega$$

ที่  $f = 100 \text{ kHz}$  และ  $C_1 = 1 \text{ nF}$  จะได้

$$R_1 = \frac{1}{2fC_1} = \frac{1}{2 \times (100 \times 10^3) \times (1 \times 10^{-9})} = 5 \text{ k}\Omega$$

ดังนั้น จึงได้ช่วงค่าความต้านทานที่ทำให้ได้ความถี่ในย่าน 1-100 kHz คือ 5-500 kΩ

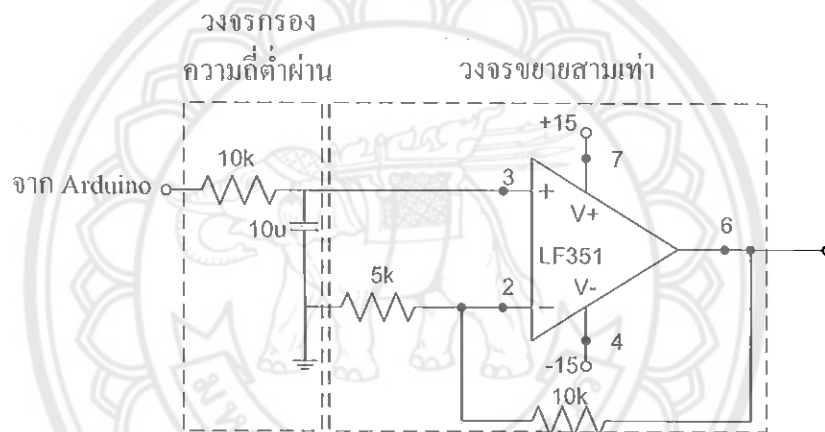


รูปที่ 3.9 สัญญาณสามเหลี่ยมที่ความถี่ 10 kHz

ในการเลือกค่าความถี่หากเลือกค่าที่สูงเกินไปทำให้เกิดกำลังสูญเสียในการขับนำสวิทช์ และหากเลือกค่าที่ต่ำเกินไปทำให้ความพลัวของสัญญาณสูงส่งผลให้วงจรกรองต้องมีขนาดใหญ่ ในโครงการนี้จึงเลือกค่าความถี่ที่ไม่สูงและต่ำมากเกินไปโดยเลือกค่าความถี่เท่ากับ 10 kHz ทำให้รูปสัญญาณสามเหลี่ยมที่ได้จากการสร้างวงจรที่ความถี่ 10 kHz แสดงดังรูปที่ 3.9

#### ข) วงจรขยายสามเท่า

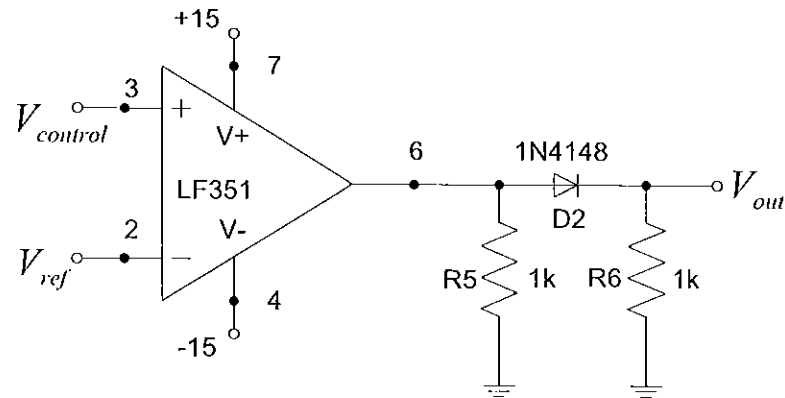
วงจรขยายสามเท่าสร้างขึ้นเพื่อขยายสัญญาณควบคุม เนื่องจากสัญญาณควบคุมที่ไมโครคอนโทรลเลอร์ส่งมานั้นมีค่าสูงสุดอยู่ที่ 5 V แต่วงจรต้องการสัญญาณควบคุมอยู่ที่ 12 V ดังนั้นต้องทำการขยายสัญญาณควบคุม จึงได้เลือกใช้วงจรขยายสามเท่าเพื่อให้สัญญาณควบคุมมีพิคแอมพลิจูดอยู่ที่ 15 V นอกจากนี้ยังได้เพิ่มวงจรกรองความถี่ต่ำเพื่อให้สัญญาณควบคุมที่ส่งมาจากไมโครคอนโทรลเลอร์มีความพลัวน้อยลงก่อนเข้าวงจรขยายสามเท่า แสดงดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 วงจรกรองความถี่ต่ำและวงจรขยายสามเท่า [5]

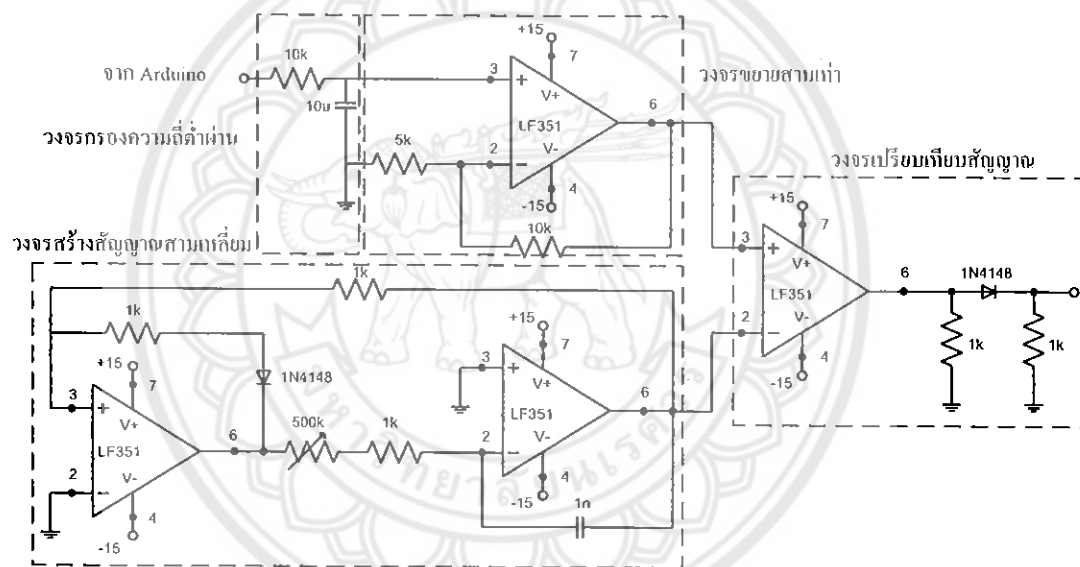
#### ค) วงจรเปรียบเทียบสัญญาณ

จากหลักการพีคดับเบิลยูเอ็ม สัญญาณควบคุมการทำงานของสวิทช์สร้างขึ้นจาก 2 สัญญาณ โดยการเปรียบเทียบสัญญาณควบคุมที่เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง กับสัญญาณอ้างอิงซึ่งเป็นสัญญาณสามเหลี่ยมที่สร้างขึ้น ในส่วนของวงจรเปรียบเทียบได้เลือกใช้ออปแอมป์หมายเลข LF351 เพื่อให้การทำงานของวงจรสอดคล้องกับค่าแรงดันและความถี่ของสัญญาณสามเหลี่ยม โดยวงจรเปรียบเทียบที่ออกแบบขึ้นสามารถแสดงเป็นแผนภาพได้ดังรูปที่ 3.11



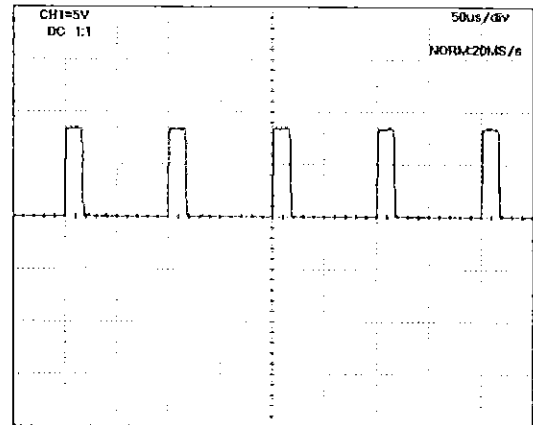
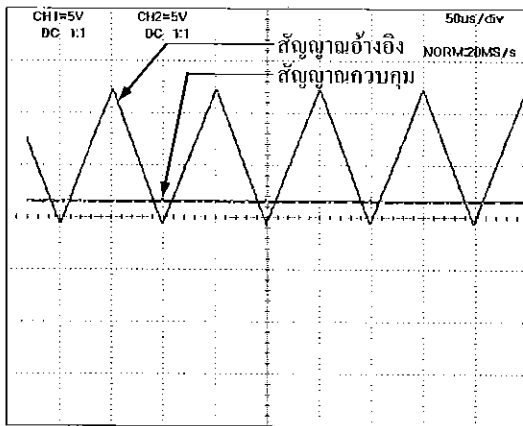
รูปที่ 3.11 แผนภาพวงจรเปรียบเทียบ [5]

เมื่อนำวงจรสร้างสัญญาณสามเหลี่ยม วงจรขยายสามเท่า และวงจรเปรียบเทียบสัญญาณ มาต่อเข้าด้วยกันเป็นตัวควบคุมแบบพีดีบีเบิลยูเอ็ม สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 แผนภาพวงจรของตัวควบคุมแบบพีดีบีเบิลยูเอ็ม [5]

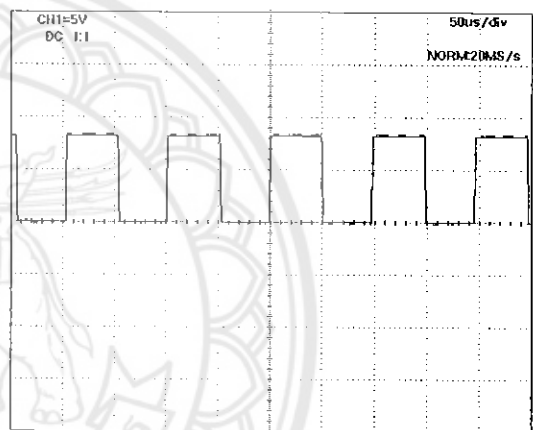
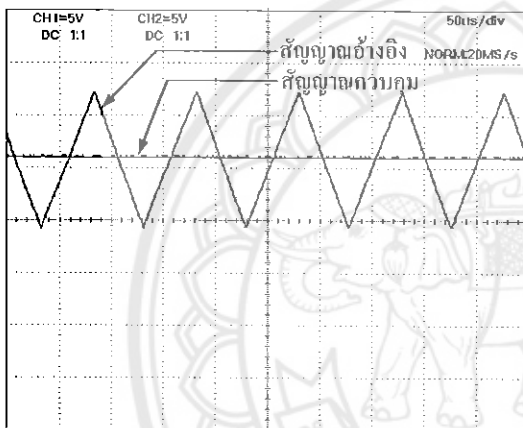
วงจรเปรียบเทียบสัญญาณทำงานโดยการรับสัญญาณสามเหลี่ยมซึ่งเป็นสัญญาณอ้างอิง จากวงจรสร้างสัญญาณสามเหลี่ยมเข้ามาที่ขา 2 ของวงจรเปรียบเทียบสัญญาณ และรับสัญญาณควบคุมจากไมโครคอนโทรลเลอร์เข้าที่ขา 3 แต่ก่อนเข้าที่ขา 3 ของวงจรเปรียบเทียบสัญญาณนั้น ต้องผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำและวงจรขยายสามเท่าก่อน จากนั้นวงจรเปรียบเทียบสัญญาณทำการเปรียบเทียบสัญญาณทั้งสองออกมาในรูปแบบสัญญาณพัลส์ ซึ่งได้แสดงการเปรียบเทียบสัญญาณที่ค่าตัวที่ไซเคิล 3 ค่าคือ 20% 50% และ 80% ดังแสดงในรูปที่ 3.13 3.14 และ 3.15 ตามลำดับ โดยการทดสอบเป็นการนำสัญญาณควบคุมจากไมโครคอนโทรลเลอร์เทียบกับสัญญาณอ้างอิงได้เป็นสัญญาณขับนำเพื่อไปควบคุมการทำงานของสวิทช์ในวงจรทบระดับแรงดัน



ก) อินพุตของวงจรเปรียบเทียบ

ข) เอาท์พุตของวงจรเปรียบเทียบ

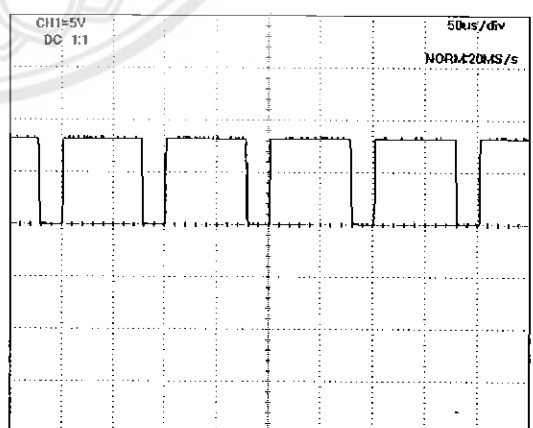
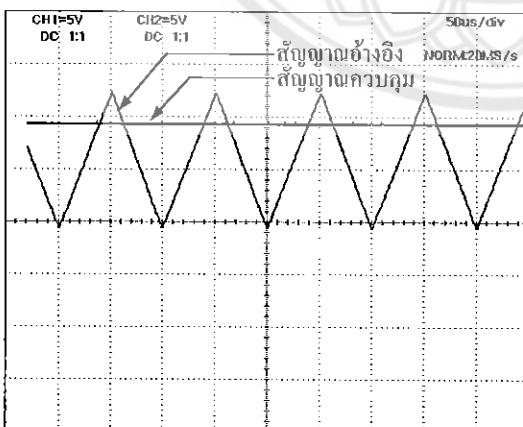
รูปที่ 3.13 สัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มที่ควัตซ์เฮิรตซ์ 20%



ก) อินพุตของวงจรเปรียบเทียบ

ข) เอาท์พุตของวงจรเปรียบเทียบ

รูปที่ 3.14 สัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มที่ควัตซ์เฮิรตซ์ 50%



ก) อินพุตของวงจรเปรียบเทียบ

ข) เอาท์พุตของวงจรเปรียบเทียบ

รูปที่ 3.15 สัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มที่ควัตซ์เฮิรตซ์ 80%

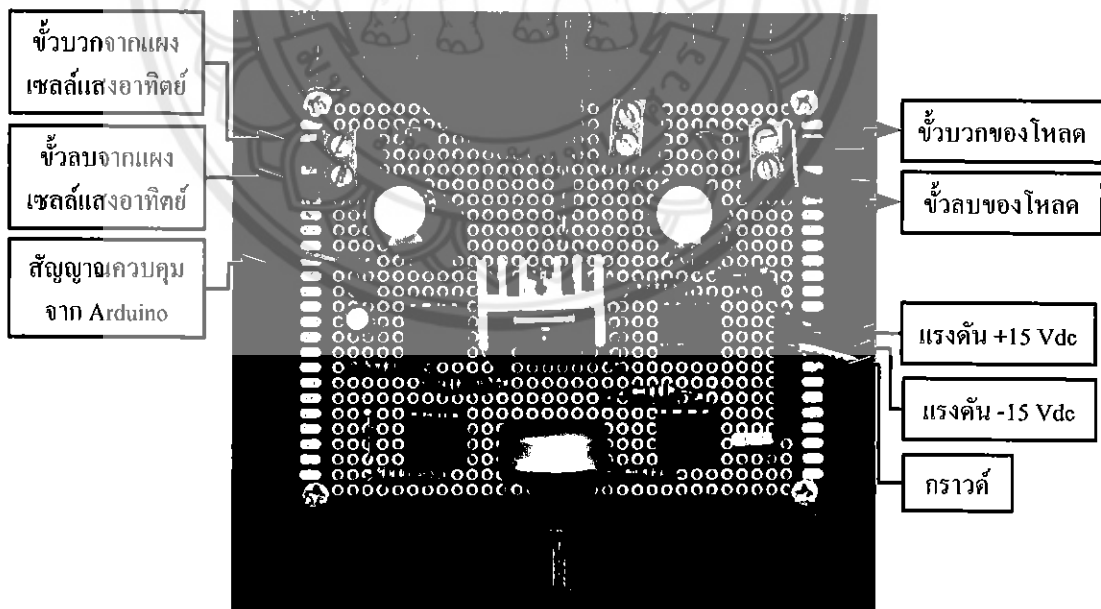


### 3.3 แผนการเชื่อมต่อใช้งานวงจรในระบบติดตามจุดกำลังสูงสุด

จากการออกแบบการทำงานของระบบติดตามจุดกำลังสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ แต่ละวงจรมีการเชื่อมต่อกันตามการออกแบบ ซึ่งประกอบด้วย วงจรทบทระดับแรงดัน วงจรควบคุมแบบพีคดับเบิลยูเอ็ม ไมโครคอนโทรลเลอร์ ตัวรับรู้กระแส ตัวรับรู้แรงดัน วงจรแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง และอุปกรณ์เสริมต่างๆ เป็นไปตามการเชื่อมต่อแสดงดังต่อไปนี้

#### 3.3.1 วงจรทบทระดับแรงดัน

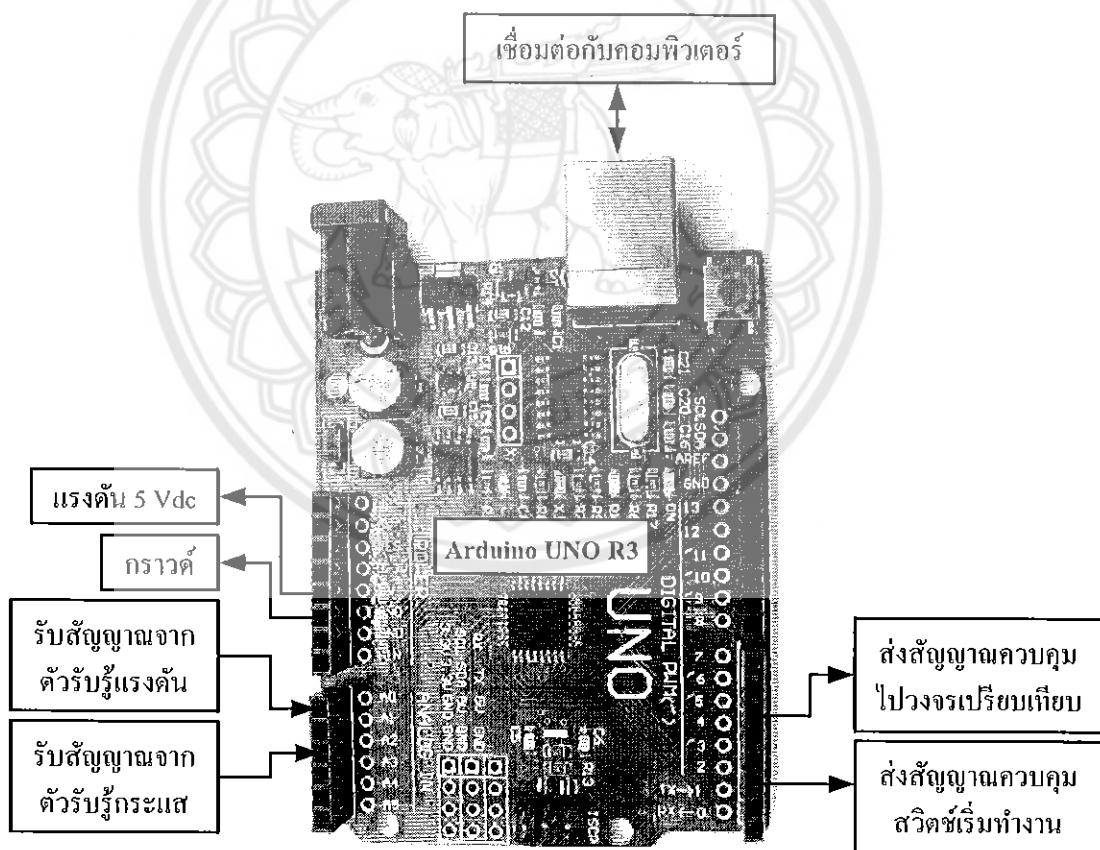
วงจรทบทระดับแรงดันรับกำลังไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยมีตัวรับรู้ตรวจจับกระแสและแรงดันก่อนเข้าวงจรทบทระดับแรงดัน เพื่อให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ประมวลผลตามหลักการพีแอนด์โอและส่งสัญญาณควบคุมมาที่ตัวควบคุมแบบพีคดับเบิลยูเอ็มเพื่อสร้างสัญญาณขับนำสวิตช์ควบคุมการทำงานของวงจรทบทระดับแรงดันในการดึงกำลังสูงสุดจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไปสู่โหลด ซึ่งการทำงานของตัวควบคุมแบบพีคดับเบิลยูเอ็มต้องการไฟเลี้ยงกระแสตรงขนาด  $\pm 15$  Vdc จากวงจรแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง เนื่องจากตัวควบคุมแบบพีคดับเบิลยูเอ็มประกอบด้วยออปแอมป์หมายเลข LF351 ซึ่งต้องการขับนำแรงดันกระแสตรงขนาด  $\pm 15$  Vdc แผนการเชื่อมต่อใช้งานของวงจรทบทระดับแรงดันและตัวควบคุมแบบพีคดับเบิลยูเอ็มสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 แผนการเชื่อมต่อใช้งานแผงวงจรทบทระดับแรงดันในระบบ

### 3.3.2 ไมโครคอนโทรลเลอร์

ไมโครคอนโทรลเลอร์มีการเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์โดยผ่านช่องทางอนุกรม ทำให้มีการแลกเปลี่ยนข้อมูลซึ่งกันและกัน อีกทั้งคอมพิวเตอร์ช่วยจ่ายไฟเลี้ยงขนาด 5 Vdc ให้แก่ไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยการใช้งานช่องทางเชื่อมต่อกับภายนอกของไมโครคอนโทรลเลอร์มี 2 แบบ คือ ช่องทางเชื่อมต่อแบบแอนะล็อกและดิจิทัล ซึ่งการเชื่อมต่อแบบแอนะล็อกในระบบติดตามจุดกำลังสูงสุดนี้เป็นการรับสัญญาณจากตัวรับรู้กระแสและแรงดัน โดยช่องทางการเชื่อมต่อที่ช่องทางอินพุตได้แก่ A0 และ A1 ตามลำดับ อีกทั้งยังสามารถส่งเป็นสัญญาณแอนะล็อกออกจากไมโครคอนโทรลเลอร์ เป็นสัญญาณควบคุมไปยังวงจรควบคุมแบบพีดีบีลยูเอ็มเพื่อสร้างสัญญาณขับนำสวิทช์ และช่องทางการเชื่อมต่อแบบดิจิทัลใช้ในการตรวจจับสัญญาณจากสวิทช์เริ่มการทำงานเพื่อควบคุมสถานะการทำงานของการติดตามจุดกำลังสูงสุด นอกจากนี้ยังใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์จ่ายไฟเลี้ยงแรงดันกระแสตรงขนาด 5 Vdc ให้แก่ตัวรับรู้กระแสและแรงดันอีกด้วย แผนการเชื่อมต่อใช้งานของไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.17



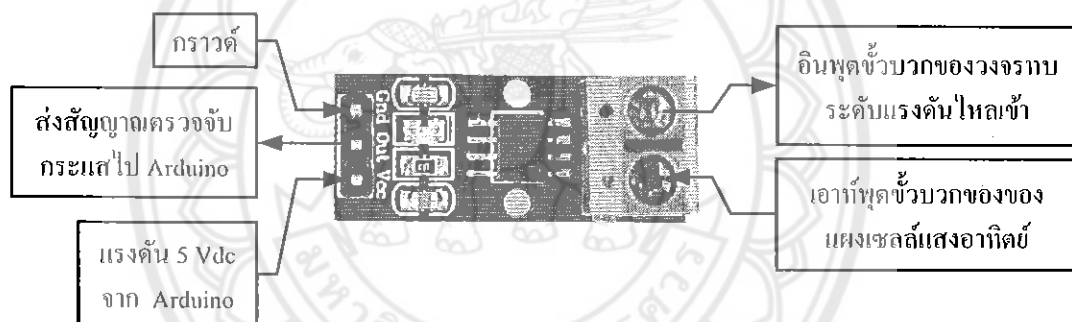
รูปที่ 3.17 แผนการเชื่อมต่อใช้งาน Arduino UNO R3 ในระบบ

### 3.3.3 ตัวรับรู้กระแสและแรงดัน

กำลังไฟฟ้าที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตคำนวณได้จากผลคูณระหว่างกระแสและแรงดันเอาต์พุตของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งถูกวัดค่าด้วยตัวรับรู้กระแสและแรงดันก่อนเข้าสู่วงจรทบทระดับแรงดัน โดยตัวรับรู้กระแสถูกต่ออนุกรมกับขั้วบวกระหว่างแผงเซลล์แสงอาทิตย์กับขั้วบวกของวงจรทบทระดับแรงดันและตัวรับรู้แรงดันถูกต่ออยู่ระหว่างขั้วบวกและขั้วลบของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ปริมาณกระแสและแรงดันที่ตรวจวัดได้ถูกส่งไปประมวลผลที่ไมโครคอนโทรลเลอร์ตามหลักการพีแอนดีโอเพื่อให้ได้กำลังสูงสุดที่เป็นไปได้ขณะนั้น

#### ก) ตัวรับรู้กระแส

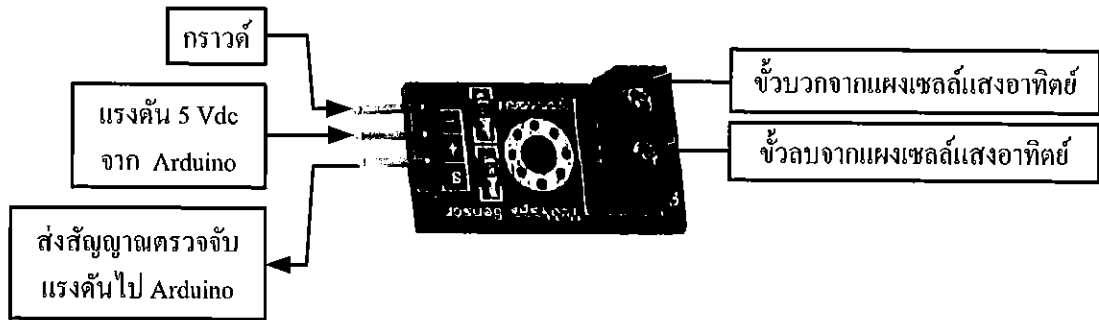
ตัวรับรู้กระแสตรวจวัดกระแสที่ไหลผ่านไปยังวงจรทบทระดับแรงดัน ดังนั้นจึงมีช่องทางการเชื่อมต่อระหว่างขั้วบวกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์กับวงจรทบทระดับแรงดัน ซึ่งปริมาณที่วัดได้ถูกแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัลเพื่อส่งไปให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ตัวรับรู้กระแสทำงานด้วยไฟเลี้ยงขนาด 5 Vdc จากไมโครคอนโทรลเลอร์ดังแสดงในรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 แผนการเชื่อมต่อใช้งานตัวรับรู้กระแสในระบบ

#### ข) ตัวรับรู้แรงดัน

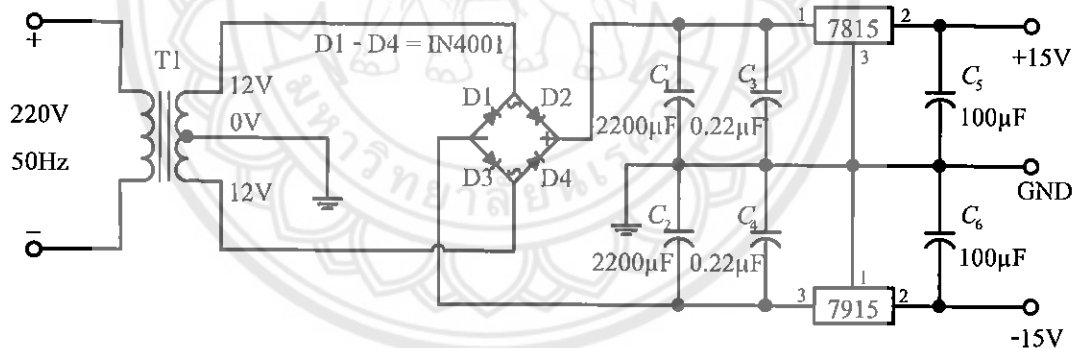
ตัวรับรู้แรงดันสามารถตรวจจับแรงดันจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยการตรวจจับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วบวกกับขั้วลบของแผงเซลล์แสงอาทิตย์หรือวงจรทบทระดับ โดยตัวรับรู้แรงดันนี้สามารถรับแรงดันอินพุตได้ 0 ถึง 25 Vdc จากนั้นแปลงแรงดันเอาต์พุตให้เหลือ 0 ถึง 5 Vdc เพื่อให้สอดคล้องกับการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ในรูปของสัญญาณดิจิทัล ตัวรับรู้แรงดันทำงานได้ด้วยไฟเลี้ยงขนาด 5 Vdc จากไมโครคอนโทรลเลอร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.19



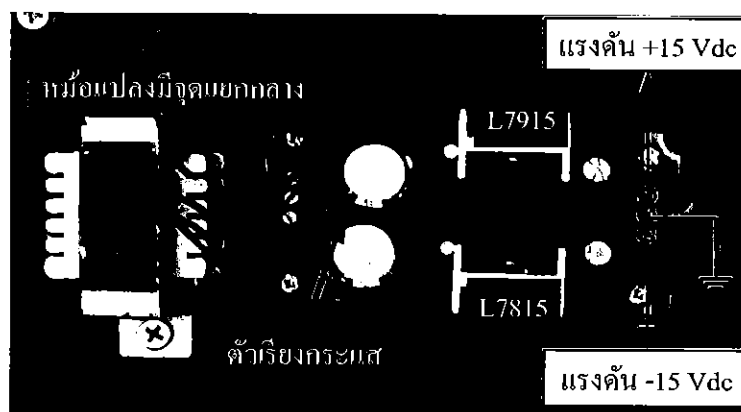
รูปที่ 3.19 แผนการเชื่อมต่อใช้งานตัวรับรู้แรงดันในระบบ

### 3.3.4 วงจรแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง

ตัวควบคุมแบบพีดีบีเบิลยูเอ็มใช้อปแอมป์หมายเลข LF351 ซึ่งต้องการไฟเลี้ยง  $\pm 15$  Vdc จึงมีการสร้างวงจรแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงดังแผนภาพในรูปที่ 3.20 โดยแปลงแรงดันกระแสสลับจาก 220 V เป็น 12 V จากนั้นแปลงไฟกระแสตรงด้วยตัวเรียงกระแสและลดความพลั่วรวมทั้งกรองสัญญาณรบกวนด้วยตัวเก็บประจุขนาด 2200  $\mu$ F และ 0.22  $\mu$ F แล้วใช้ไอซีหมายเลข L7815 และ L7915 ในการคงค่าแรงดันอินพุตให้เป็น +15 Vdc และ -15Vdc และใช้ตัวเก็บประจุขนาด 100  $\mu$ F ลดความพลั่วของแรงดันเอาต์พุตก่อนจ่ายให้กับตัวควบคุมแบบพีดีบีเบิลยูเอ็ม โดยวงจรที่ประกอบขึ้นแสดงดังรูปที่ 3.21

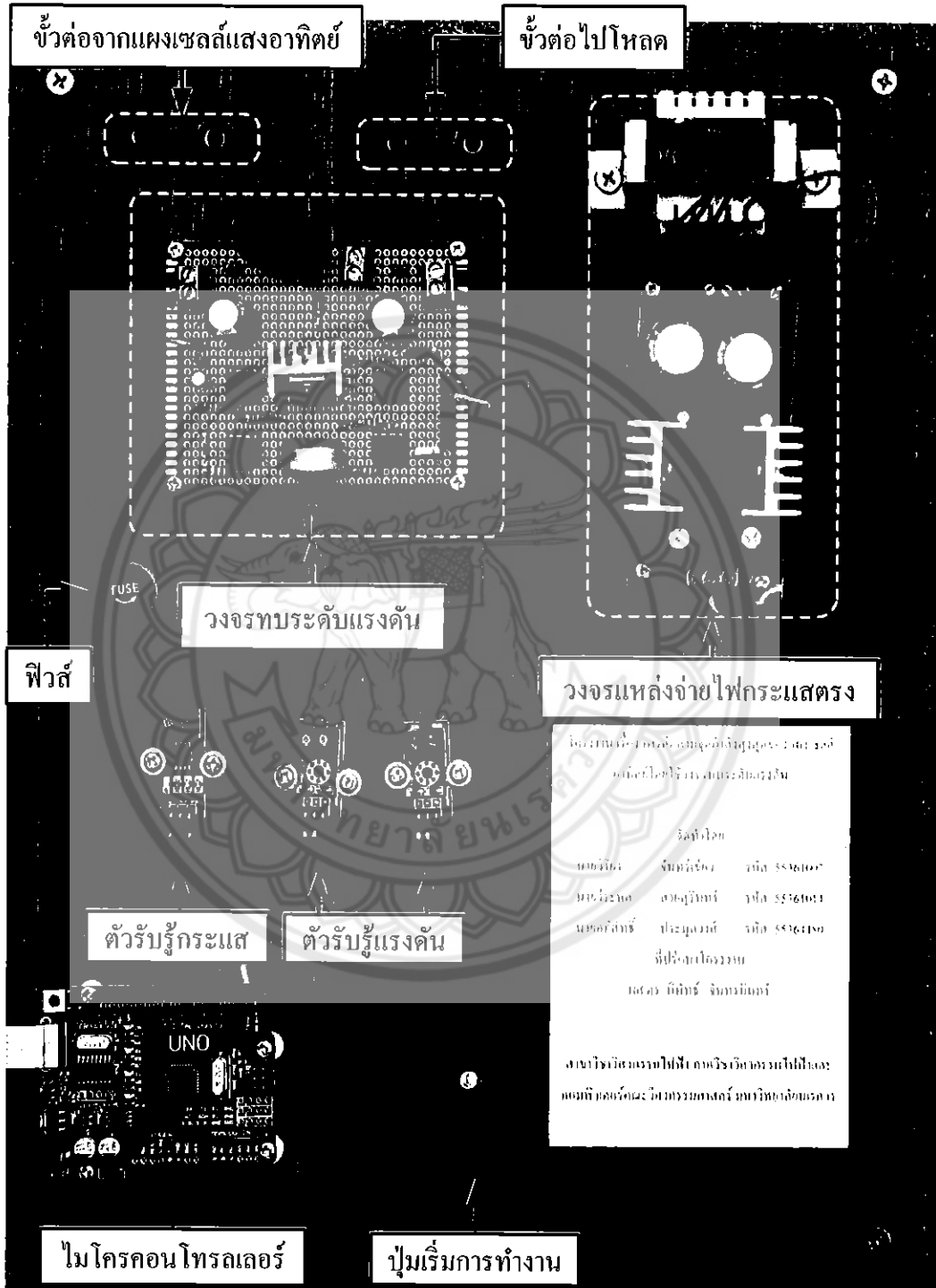


รูปที่ 3.20 แผนภาพวงจรแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง  $\pm 15$  Vdc



รูปที่ 3.21 วงจรแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง  $\pm 15$  Vdc

เมื่อนำวงจรทระดับแรงดัน ไมโครคอนโทรลเลอร์ ตัวรับรู้กระแส ตัวรับรู้แรงดัน และ วงจรแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงมาเชื่อมต่อกันให้เป็นระบบติดตามจุดกำลังของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ได้ดังรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.22 แผงวงจรของระบบติดตามจุดกำลังสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

## บทที่ 4

### ผลการทดสอบวงจรทระดับแรงดันและการติดตามจุดกำลังสูงสุด

การทดสอบการทำงานของวงจรตามหลักการติดตามจุดกำลังสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วนดังนี้

- 1) การทดสอบการทำงานของวงจรทระดับแรงดันที่มีแรงดันอินพุตคงที่ และหาประสิทธิภาพของวงจรทระดับแรงดัน
- 2) การทดสอบการติดตามจุดกำลังสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 2 กรณีคือ ขณะที่ค่าความเข้มแสงคงที่และขณะที่ค่าความเข้มแสงเปลี่ยนแปลงกับพลัน

#### 4.1 การทดสอบประสิทธิภาพวงจรทระดับแรงดัน

ในการทดสอบเพื่อหาประสิทธิภาพของวงจรทระดับแรงดันใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงจ่ายแรงดันอินพุต (พิกัดกระแส 3 A) ให้กับวงจรเพื่อจ่ายโหลดตัวต้านทาน  $85.5 \Omega$  และใช้แหล่งจ่ายไฟกระแสตรงในการจ่ายสัญญาณควบคุมผ่านวงจรขยายสามเท่าก่อนนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณอ้างอิง เพื่อให้ได้สัญญาณขับนำสวิตช์แบบพีดีบีเบิลยูเอ็มสำหรับการสวิตชิงของมอสเฟต และส่งผลให้แรงดันเอาต์พุตของวงจรทระดับแรงดันเปลี่ยนแปลงตามตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบวงจรทระดับแรงดัน

D (%)	$V_{in}$ (V)	$I_{in}$ (A)	$V_{out}$ (V)		$P_{in}$ (W)	$P_{out}$ (W)		R ( $\Omega$ )	$\eta$ (%)
			ทดลอง	คำนวณ		ทดลอง	คำนวณ		
10	12	0.16	12.41	13.33	1.92	1.80	2.07	85.50	93.81
20	12	0.20	13.70	15.00	2.40	2.19	2.63	85.50	91.46
30	12	0.27	15.83	17.14	3.24	2.93	3.43	85.50	90.45
40	12	0.39	18.66	20.00	4.68	4.07	4.67	85.50	87.01
50	12	0.53	21.59	24.00	6.36	5.45	6.73	85.50	85.71
60	12	0.88	27.31	30.00	10.56	8.72	10.52	85.50	82.60
70	12	1.35	32.90	40.00	16.20	12.65	18.71	85.50	78.14
80	12	2.95	43.50	60.00	35.40	22.13	42.10	85.50	62.51

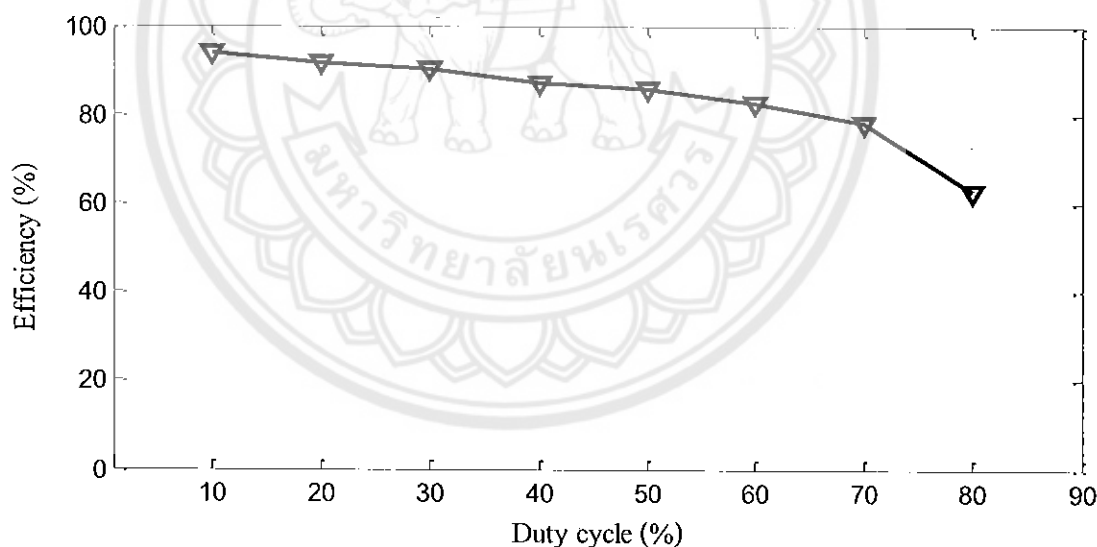
โดยที่

$D$ (%)	คือ ค่าดิวตี้ไซเคิล
$V_{in}$ (V)	คือ แรงดันอินพุตของวงจรทระดับแรงดัน
$I_{in}$ (A)	คือ กระแสอินพุตของวงจรทระดับแรงดัน
$V_{out}$ (V)	คือ แรงดันเอาต์พุตของวงจรทระดับแรงดัน
$P_{in}$ (W)	คือ กำลังอินพุตของวงจรทระดับแรงดัน
$P_{out}$ (W)	คือ กำลังเอาต์พุตของวงจรทระดับแรงดัน
$R$ ( $\Omega$ )	คือ โหลดความต้านทานของวงจรทระดับแรงดัน
$\eta$ (%)	คือ ค่าประสิทธิภาพของวงจรทระดับแรงดัน

ค่าประสิทธิภาพของวงจรทระดับแรงดันหาได้จากสมการที่ (4.1)

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 \quad (4.1)$$

จากผลการทดสอบการทำงานของวงจรทำให้ได้เห็นแนวโน้มประสิทธิภาพของวงจรทระดับแรงดันที่ค่าดิวตี้ไซเคิลต่างกันดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ประสิทธิภาพของวงจรทระดับแรงดันที่ดิวตี้ไซเคิลต่างๆ

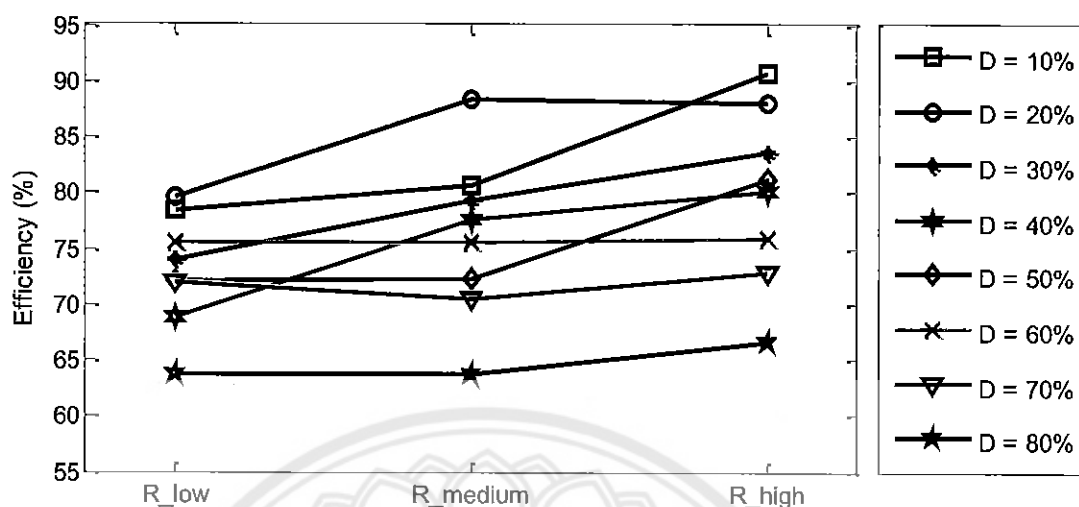
การทดสอบนี้ใช้แรงดันอินพุต 12 Vdc ในการทดสอบและต่อโหลดตัวต้านทานขนาด 85.5  $\Omega$  โดยเปลี่ยนค่าดิวตี้ไซเคิลจาก 10% ถึง 80% ซึ่งทำการเปลี่ยนทีละ 10% เนื่องจากที่ค่าดิวตี้ไซเคิลสูงทำให้มีกระแสไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำปริมาณมาก จึงเกิดความสูญเสียภายในวงจรทระดับแรงดันมาก อีกทั้งที่ค่าดิวตี้ไซเคิลสูงจะได้แรงดันเอาต์พุตจากการทดลองมีค่าต่ำกว่าที่ได้จากการคำนวณมากขึ้น จึงส่งผลให้ที่ค่าดิวตี้ไซเคิลสูงวงจรททำงานมีประสิทธิภาพต่ำลง

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบวงจรทบทระดับแรงดัน โดยการเปลี่ยนค่าของความต้านทานที่ค่า  
คิวตี้ไอเกิดเดียวกัน

$D$ (%)	$R$ ( $\Omega$ )	$V_{in}$ (V)	$I_{in}$ (A)	$V_{out}$ (V)	$P_{in}$ (W)	$P_{out}$ (W)	$\eta$ (%)
10	5	12	2.20	10.27	26.40	20.68	78.33
	10	12	1.17	10.63	14.04	11.30	80.48
	16	12	0.77	11.76	9.24	8.38	90.71
20	10	12	1.40	11.56	16.80	13.36	79.54
	16	12	0.95	12.88	11.40	10.05	88.19
	20	12	0.81	13.07	9.72	8.54	87.87
30	10	12	1.87	12.88	22.44	16.59	73.92
	16	12	1.32	14.39	15.84	12.55	79.22
	20	12	1.11	14.91	13.32	11.10	83.44
40	10	12	2.38	14.01	28.56	19.63	68.72
	16	12	1.66	15.95	19.92	15.42	77.40
	20	12	1.44	16.64	17.28	13.80	80.11
50	16	12	2.44	18.66	29.28	21.10	72.07
	20	12	2.15	19.31	25.80	18.64	72.26
	40	12	1.10	20.70	13.20	10.70	81.15
60	40	12	1.81	25.60	21.72	16.38	75.43
	50	12	1.54	26.51	18.48	13.94	75.45
	60	12	1.31	26.81	15.72	11.90	75.70
70	85	12	1.60	34.30	19.20	13.84	72.08
	90	12	1.54	34.22	18.48	13.01	70.40
	100	12	1.38	34.73	16.56	12.10	72.83
80	85	12	2.92	43.56	35.04	22.32	63.70
	90	12	2.82	44.00	33.84	21.51	63.56
	100	12	2.58	45.36	30.96	20.60	66.45



จากการทดสอบประสิทธิภาพของวงจรทระดับแรงดันในข้างต้น สามารถแสดงแนวโน้มประสิทธิภาพของวงจรทระดับแรงดัน ได้ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ประสิทธิภาพของวงจรทระดับแรงดันที่ค่าโหลดตัวต้านทานต่างๆ

เมื่อทดสอบประสิทธิภาพของวงจรทระดับแรงดันที่ค่าตัวชี้ไขเคลเดียวกัน โดยเปลี่ยนค่าโหลดตัวต้านทาน 3 ค่า โดยที่การเลือกค่าตัวต้านทานในแต่ละตัวชี้ไขเคลพิจารณาจากพิคกกระแสแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงขณะนั้นจ่ายกระแสได้สูงสุด 3 A ดังนั้นจึงเลือกค่าความต้านทานต่ำสุดในแต่ละตัวชี้ไขเคลที่ดึงกระแสไม่เกิน 3 A เห็นได้ว่าที่ความต้านทานโหลดสูงทำให้ได้ประสิทธิภาพของระบบที่สูงกว่าความต้านทานโหลดต่ำ เนื่องจากความต้านทานของโหลดสูงขึ้นทำให้กระแสของตัวเหนี่ยวนำต่ำลง จึงส่งผลให้เกิดความสูญเสียในระบบต่ำลง ประสิทธิภาพของวงจรทระดับแรงดันจึงสูงขึ้น

#### 4.2 การทดสอบการติดตามจุดกำลังสูงสุด

จากการศึกษาที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 2.1.9 และ 2.1.10 ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขึ้นอยู่กับสภาพอากาศในแต่ละขณะ โดยเฉพาะค่าความเข้มแสงที่ตกกระทบแผงเซลล์แสงอาทิตย์และอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ แต่เนื่องจากการดำเนินงานของโครงการนี้ได้ทำการทดสอบกลางแจ้ง ส่งผลให้อุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์นอกจากขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของอากาศรอบข้างแล้วยังได้รับผลจากค่าความเข้มแสงที่ตกกระทบและความเร็วลมในขณะนั้นด้วย จึงไม่สามารถควบคุมค่าอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ให้มีค่าตามต้องการได้ด้วยข้อจำกัดของสถานที่และอุปกรณ์ที่มีใช้ ดังนั้นเงื่อนไขการทดสอบในที่นี้จึงอ้างอิงจากค่าความเข้มแสงอาทิตย์ที่วัดได้เป็นหลัก

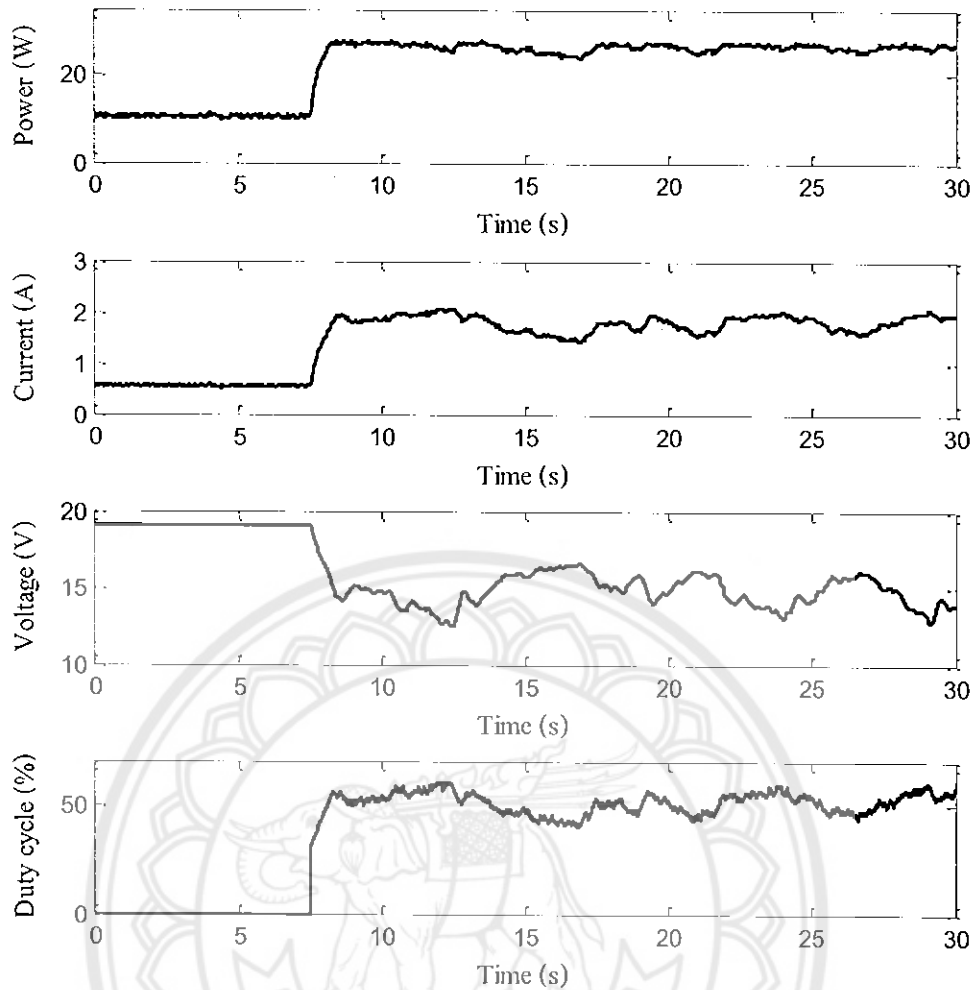
การติดตามจุดกำลังสูงสุดใน โคร่งงานนี้ในช่วงจรทระดับแรงดันเชื่อมต่อระหว่างแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 100 W และ โหลดตัวต้านทาน  $30 \Omega$  ในการทดสอบมีการกำหนดการทำงานของวงจรทระดับแรงดันเพื่อเปรียบเทียบค่ากำลังเอาต์พุตของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในช่วงก่อนและหลังการติดตามจุดกำลังสูงสุด โดยค่ากำลังเอาต์พุตขณะที่ยังไม่เริ่มการติดตามจุดกำลังสูงสุดนั้นถูกวัดในขณะที่วงจรทระดับแรงดันยังไม่เริ่มทำงาน นั่นคือในช่วงที่กำหนดให้ค่าดิวิตีไซเคิลของวงจรเท่ากับ 0 และในขณะที่เริ่มการติดตามจุดกำลังสูงสุดดิวิตีไซเคิลถูกตั้งค่าให้เริ่มต้นที่ 30% เพื่อช่วยให้จุดทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เข้าสู่หาจุดกำลังสูงสุดได้เร็วขึ้น โดยมีการทดสอบทั้งในขณะที่ความเข้มแสงคงที่และในขณะที่ความเข้มแสงเปลี่ยนอย่างรวดเร็ว

#### 4.2.1 การติดตามจุดกำลังสูงสุดที่ความเข้มแสงคงที่

การทดสอบการติดตามจุดกำลังสูงสุดในขณะที่ความเข้มแสงคงที่ที่ถูกแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ การติดตามจุดกำลังสูงสุดในขณะที่ความเข้มแสงมีค่าต่ำและในขณะที่มีค่าสูง

ในกรณีที่ความเข้มแสงมีค่าต่ำได้ดำเนินการทดสอบในวันที่ 6 มีนาคม 2559 เวลาประมาณ 15.00 น. อุณหภูมิโดยรอบ  $34^{\circ}\text{C}$  ซึ่งค่าความเข้มแสงอาทิตย์ที่วัดได้จากไพรานอมิเตอร์มีค่าประมาณ  $300 \text{ W/m}^2$  โดยการเปลี่ยนแปลงค่าเอาต์พุตของแผงเซลล์แสงอาทิตย์รวมทั้งค่าดิวิตีไซเคิลของวงจรในขณะที่ทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.3 ซึ่งพบว่าในช่วงที่วงจรยังไม่ทำงาน (ดิวิตีไซเคิลมีค่าเท่ากับ 0) แผงเซลล์แสงอาทิตย์จ่ายกำลังเอาต์พุตเท่ากับ 10 W

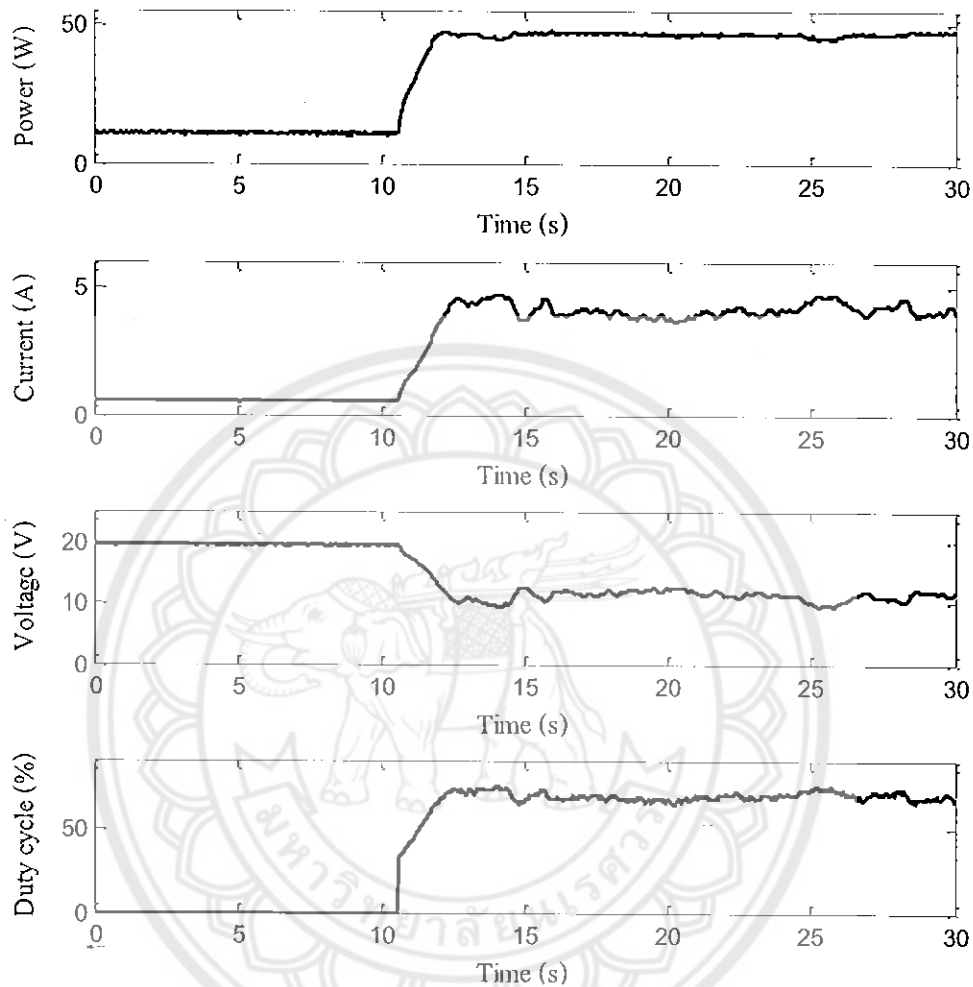
หลังจากเวลาผ่านไปประมาณ 7.5 s การติดตามจุดกำลังสูงสุดด้วยหลักการพีแอนด์โอเริ่มต้นขึ้น ดิวิตีไซเคิลของวงจรทระดับแรงดันถูกตั้งค่าให้เริ่มต้นที่ 30% ไมโครคอนโทรลเลอร์พบว่าจุดทำงานของแผงอยู่ทางขวาของจุดกำลังสูงสุด แสดงว่าแรงดันเอาต์พุตมีค่าสูงกว่าแรงดันที่จุดกำลังสูงสุด จึงสั่งเพิ่มค่าดิวิตีไซเคิล ทำให้มีอสเฟตในวงจรนำกระแสเพิ่มขึ้นในแต่ละคาบสวิตชิงเพื่อดึงประจุออกจากตัวเก็บประจุ  $C_1$  (ดูรูปที่ 3.1 ประกอบ) มากขึ้น ส่งผลให้แรงดันของ  $C_1$  ซึ่งเป็นตัวกำหนดแรงดันเอาต์พุตของแผงเซลล์แสงอาทิตย์นั้นมีค่าลดลง นั่นคือจุดทำงานของแผงได้ขยับไปทางซ้ายของเส้นโค้งคุณลักษณะ (ดูรูปที่ 2.14) ในขณะนี้นี้กระแสเอาต์พุตเพิ่ม โดยผลคูณของกระแสและแรงดันเอาต์พุตทำให้กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตสูงขึ้น ไมโครคอนโทรลเลอร์จึงสั่งให้เพิ่มค่าดิวิตีไซเคิลต่อไปจนกระทั่งจุดทำงานอยู่ใกล้และขยับอยู่รอบ ๆ จุดกำลังสูงสุด โดยใช้เวลาในการติดตามจุดกำลังสูงสุดประมาณ 1.1 s และแผงเซลล์แสงอาทิตย์จ่ายกำลังเอาต์พุตเพิ่มขึ้นเป็น 30 W นั่นคือในกรณีนี้กลไกการติดตามจุดกำลังสูงสุดช่วยให้สามารถดึงกำลังเอาต์พุตจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้เพิ่มขึ้นเป็น 3 เท่าจากเดิม



รูปที่ 4.3 ผลการติดตามกำลังสูงสุดที่ค่าความเข้มแสง  $300 \text{ W/m}^2$

ในกรณีที่ความเข้มแสงมีค่าสูงได้ดำเนินการทดสอบในวันที่ 8 มีนาคม 2559 เวลาประมาณ 10.45 น. อุณหภูมิโดยรอบ  $34.5^{\circ}\text{C}$  ซึ่งค่าความเข้มแสงอาทิตย์ที่วัดได้จากไพรานอมิเตอร์มีค่าประมาณ  $760 \text{ W/m}^2$  โดยการเปลี่ยนแปลงค่าอาทิจุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์รวมทั้งค่าดิวิตีไซเคิลของวงจรในขณะทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.4 ซึ่งพบว่าในช่วงที่วงจรยังไม่ทำงาน (ดิวิตีไซเคิลมีค่าเท่ากับ 0) แผงเซลล์แสงอาทิตย์จ่ายกำลังเอาต์พุตเท่ากับ 10 W หลังจากเวลาผ่านไปประมาณ 11 s การติดตามจุดกำลังสูงสุดด้วยหลักการพีแอนด์โอเริ่มตื้นขึ้น ดิวิตีไซเคิลของวงจรทระดับแรงดันถูกตั้งค่าให้เริ่มต้นที่ 30% ไมโครคอนโทรลเลอร์พบว่าจุดทำงานของแผงอยู่ทางขวาของจุดกำลังสูงสุด แสดงว่าแรงดันเอาต์พุตมีค่าสูงกว่าแรงดันที่จุดกำลังสูงสุด จึงสั่งเพิ่มค่าดิวิตีไซเคิล ทำให้มอสเฟตในวงจรนำกระแสมากขึ้นในแต่ละคาบสวิทชิงเพื่อดึงประจุออกจากตัวเก็บประจุ  $C_1$  (รูปที่ 3.1 ประกอบ) มากขึ้น ส่งผลให้แรงดันเอาต์พุตของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าลดลง นั่นคือจุดทำงานของแผงได้ขยับไปทางซ้ายของเส้นโค้งคุณลักษณะ (รูปที่ 2.14) ในขณะนี้กระแสเอาต์พุตเพิ่มทำให้ค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตสูงขึ้น ไมโครคอนโทรลเลอร์จึงสั่งให้เพิ่มค่าดิวิตีไซเคิลต่อไปจนกระทั่งจุดทำงานของแผงอยู่ใกล้และขยับอยู่รอบ ๆ จุดกำลังสูงสุด โดยใช้เวลาในการติดตามจุด

กำลังสูงสุดประมาณ 1.5 s และแผงเซลล์แสงอาทิตย์จ่ายกำลังเอาต์พุตเพิ่มขึ้นเป็น 45 W นั่นคือในกรณีนี้กลไกการติดตามจุดกำลังสูงสุดช่วยให้สามารถดึงกำลังเอาต์พุตจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้เพิ่มขึ้นเป็น 4.5 เท่าจากเดิม



รูปที่ 4.4 ผลการติดตามกำลังสูงสุดที่ค่าความเข้มแสง  $760 \text{ W/m}^2$

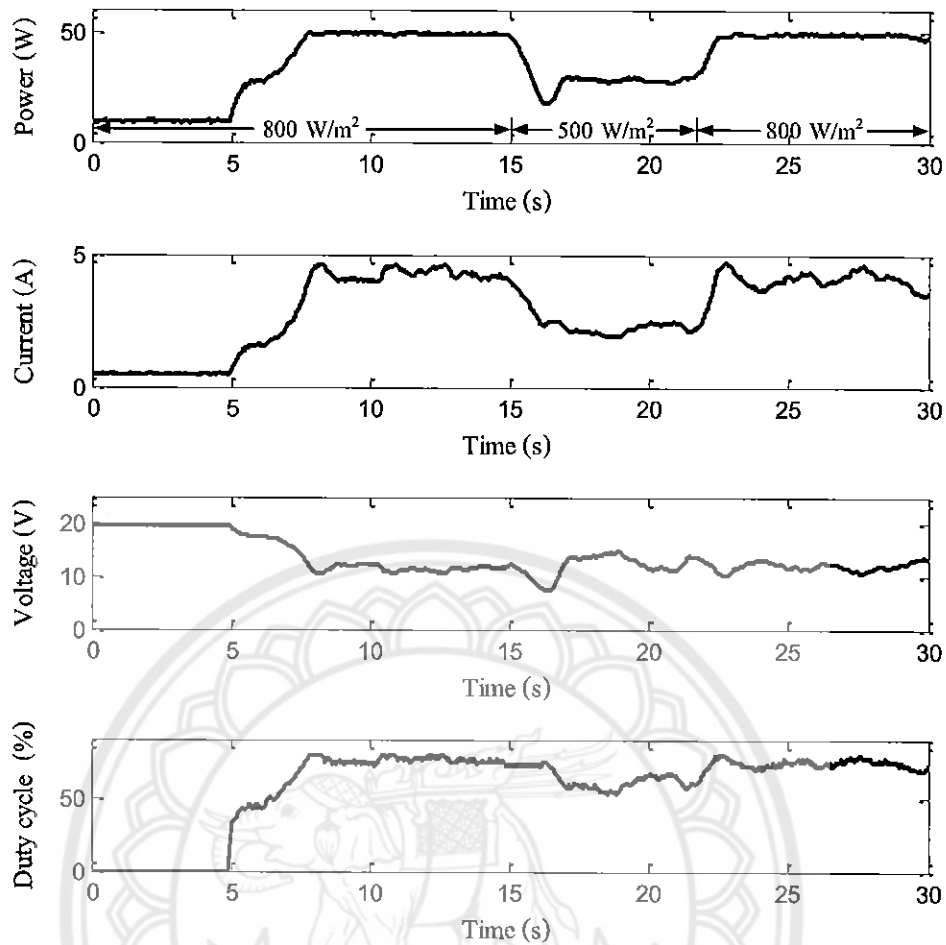
#### 4.2.2 การติดตามจุดกำลังสูงสุดที่ความเข้มแสงเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว

การติดตามจุดกำลังสูงสุดที่ความเข้มแสงเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ได้ทำการทดสอบแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ

กรณีที่ 1 ทดสอบโดยจำลองสถานการณ์ขณะที่ห้องฟ้าก่อนข้างปลดโปรงมีเมฆน้อยและความเข้มแสงที่ตกกระทบแผงในขณะนั้นมีค่าสูง เมื่อเมฆเคลื่อนตัวมาบังแสงอย่างรวดเร็วจึงทำให้ค่าความเข้มแสงที่ตกกระทบลดลงอย่างรวดเร็วและเมื่อเมฆผ่านไปความเข้มแสงที่ตกกระทบจึงกลับมามีค่าสูงเท่าเดิม

ทำการทดสอบในวันที่ 13 มีนาคม 2559 เวลาประมาณ 13.00 น. อุณหภูมิโดยรอบ  $34.5^{\circ}\text{C}$  ซึ่งค่าความเข้มแสงอาทิตย์ที่วัดได้จากไพรานอมิเตอร์ในขณะเริ่มต้นมีค่าประมาณ  $800 \text{ W/m}^2$  และมีการลดลงของค่าความเข้มแสงอย่างรวดเร็วเป็น  $500 \text{ W/m}^2$  โดยการเปลี่ยนแปลงค่าเอาต์พุตของแผงเซลล์แสงอาทิตย์รวมทั้งค่าดีวีดีไซเคิลของวงจรในขณะทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.5 ซึ่งพบว่าในช่วงที่วงจรยังไม่ทำงาน (ดีวีดีไซเคิลมีค่าเท่ากับ 0) แผงเซลล์แสงอาทิตย์จ่ายกำลังเอาต์พุตเท่ากับ 10 W หลังจากเวลาผ่านไปประมาณ 5 s การติดตามจุดกำลังสูงสุดด้วยหลักการพีแอนด์ไอเริ่มต้นขึ้น ดีวีดีไซเคิลของวงจรหระดับแรงดันถูกตั้งค่าให้เริ่มต้นที่ 30% ไมโครคอนโทรลเลอร์พบว่าจุดทำงานของแผงอยู่ทางขวาของจุดกำลังสูงสุด แสดงว่าแรงดันเอาต์พุตมีค่าสูงกว่าแรงดันที่จุดกำลังสูงสุด จึงสั่งเพิ่มค่าดีวีดีไซเคิล ทำให้ออสเฟดในวงจรนำกระแสเพิ่มขึ้นในแต่ละคาบสวิตชิงเพื่อดึงประจุออกจากตัวเก็บประจุ  $C_1$  (ดูรูปที่ 3.1 ประกอบ) มากขึ้น ส่งผลให้แรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าลดลง นั่นคือจุดทำงานของแผงได้ขยับไปทางซ้ายของเส้นโค้งคุณลักษณะ (ดูรูปที่ 2.14) ในขณะนี้นี้กระแสเอาต์พุตเพิ่มทำให้ค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตสูงขึ้น ไมโครคอนโทรลเลอร์จึงสั่งให้เพิ่มค่าดีวีดีไซเคิลต่อไปจนกระทั่งจุดทำงานของแผงอยู่ใกล้และขยับอยู่รอบ ๆ จุดกำลังสูงสุด โดยใช้เวลาในการติดตามจุดกำลังสูงสุดประมาณ 3 s และแผงเซลล์แสงอาทิตย์จ่ายกำลังเอาต์พุตเพิ่มขึ้นเป็น 50 W นั่นคือในขณะนี้นักทดลองการติดตามจุดกำลังสูงสุดช่วยให้สามารถดึงกำลังเอาต์พุตจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้เพิ่มขึ้นเป็น 5 เท่าจากเดิม

เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 15 s มีการลดลงของค่าความเข้มแสงอย่างรวดเร็วเป็น  $500 \text{ W/m}^2$  โดยค่าความเข้มแสงลดลงจากค่าสูงมาค่าต่ำส่งผลให้เกิดการลดลงของกระแสอย่างรวดเร็วตามไปด้วย ซึ่งค่าดีวีดีไซเคิลในขณะนี้นี้ยังมีค่าสูงจากค่าความเข้มแสงเดิมจึงส่งผลให้ตัวเก็บประจุ  $C_1$  ยังมีการคายประจุมากในขณะที่มีกระแสในการอัดประจุน้อยลง จึงทำให้แรงดันเอาต์พุตของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ลดลง ส่งผลให้ค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของแผงลดลงเป็นอย่างมาก เมื่อไมโครคอนโทรลเลอร์พบว่าจุดทำงานของแผงอยู่ทางซ้ายของจุดกำลังสูงสุด แสดงว่าแรงดันเอาต์พุตมีค่าต่ำกว่าแรงดันที่จุดกำลังสูงสุด จึงสั่งลดค่าดีวีดีไซเคิล ทำให้ระยะเวลาที่กระแสมีค่าลดลงในแต่ละคาบสวิตชิง ทำให้การคายประจุของตัวเก็บประจุ  $C_1$  น้อยลงส่งผลให้แรงดันเอาต์พุตของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.5 ผลการติดตามกำลังสูงสุดเมื่อความเข้มแสงเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว กรณีที่ 1

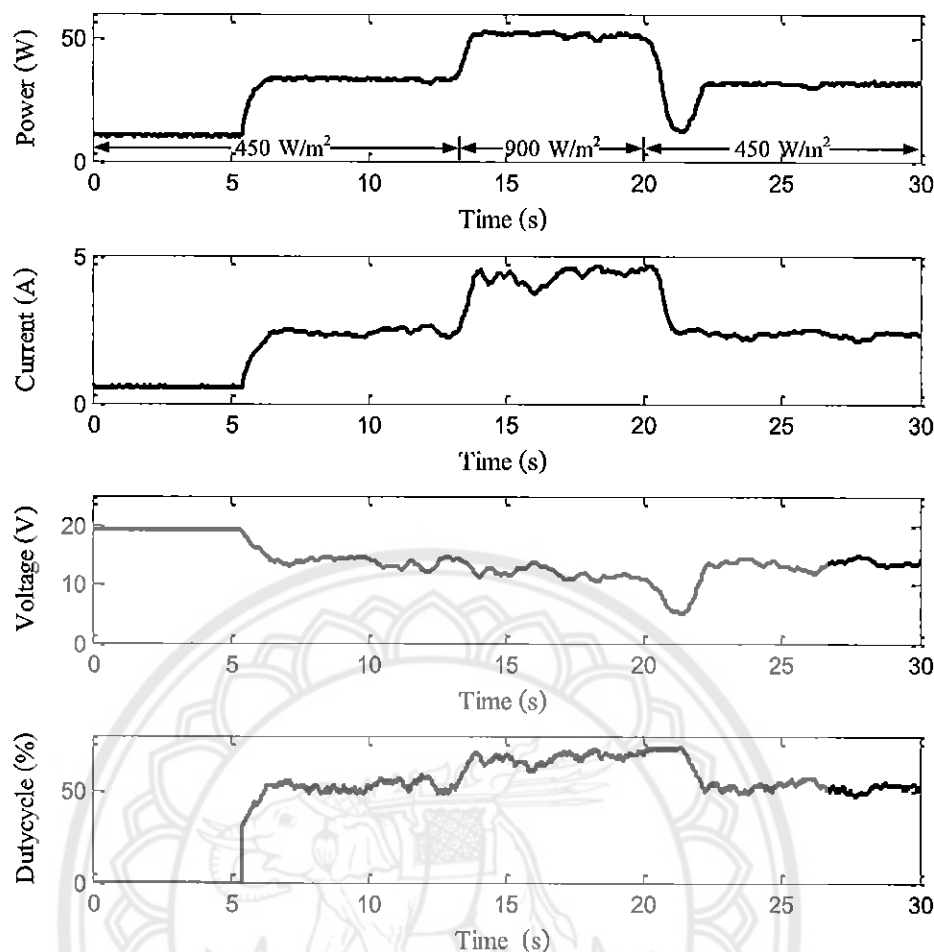
นั่นคือจุดทำงานของแฉงได้ขยับไปทางขวาของเส้นโค้งคุณลักษณะทำให้ค่ากำลังไฟฟ้าเอาท์พุทของแฉงสูงขึ้น ไมโครคอนโทรลเลอร์จึงสั่งให้ลดค่าดีวีไอซ์เกิดต่อไปจนกระทั่งจุดทำงานของแฉงอยู่ใกล้และขยับอยู่รอบ ๆ จุดกำลังสูงสุด โดยใช้เวลาในการติดตามจุดกำลังสูงสุดประมาณ 2 s และแฉงเซลล์แสงอาทิตย์จ่ายกำลังเอาท์พุทในขณะนั้นเป็น 30 W

เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 20 s มีการเพิ่มขึ้นของค่าความเข้มแสงอย่างรวดเร็วกลับเป็น 800 W/m<sup>2</sup> โดยค่าความเข้มแสงเพิ่มขึ้นส่งผลให้กระแสเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจึงทำให้กำลังไฟฟ้าของแฉงเซลล์แสงอาทิตย์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเช่นกัน เมื่อไมโครคอนโทรลเลอร์พบว่าจุดทำงานของแฉงอยู่ทางขวาของจุดกำลังสูงสุด แสดงว่าแรงดันเอาท์พุทมีค่าสูงกว่าแรงดันที่จุดกำลังสูงสุด จึงสั่งเพิ่มค่าดีวีไอซ์เกิด ทำให้มีออสเฟดในวงจรนำกระแสเพิ่มขึ้นในแต่ละคาบสวิตซิงทำให้ตัวเก็บประจุ C<sub>1</sub> คายประจุมากขึ้นแรงดันเอาท์พุทของแฉงจึงลดลง นั่นคือจุดทำงานของแฉงได้ขยับไปทางซ้ายของเส้นโค้งคุณลักษณะทำให้ค่ากำลังไฟฟ้าเอาท์พุทสูงขึ้น ไมโครคอนโทรลเลอร์จึงสั่งให้เพิ่มค่าดีวีไอซ์เกิดต่อไปจนกระทั่งจุดทำงานของแฉงอยู่ใกล้และขยับอยู่รอบ ๆ จุดกำลังสูงสุด โดยใช้เวลาในการติดตามจุดกำลังสูงสุดประมาณ 1 s และแฉงเซลล์แสงอาทิตย์จ่ายกำลังเอาท์พุทเพิ่มขึ้นเป็น 50 W

กรณีที่ 2 ทดสอบ โดยจำลองสถานการณ์ขณะที่ห้องฟ้าค่อนข้างมีเมฆมาก และความเข้มแสงที่ตกกระทบแผงในขณะนั้นมีค่าต่ำ เมื่อเมฆเคลื่อนตัวออกจากการบังแสง ทำให้ความเข้มแสงที่ตกกระทบสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว และเมื่อเมฆเคลื่อนตัวกลับมาบังอีกครั้งความเข้มแสงที่ตกกระทบจึงกลับมามีค่าต่ำเท่าเดิม

ทำการทดสอบในวันที่ 13 มีนาคม 2559 เวลาประมาณ 13.30 น. อุณหภูมิโดยรอบ  $34.5^{\circ}\text{C}$  ซึ่งค่าความเข้มแสงอาทิตย์ที่วัดได้จากไพรานอมิเตอร์ในขณะเริ่มต้นมีค่าประมาณ  $450\text{ W/m}^2$  และมีการเพิ่มขึ้นของค่าความเข้มแสงอย่างรวดเร็วเป็น  $900\text{ W/m}^2$  โดยการเปลี่ยนแปลงค่าเอาต์พุตของแผงเซลล์แสงอาทิตย์รวมทั้งค่าดิฟฟิไซเทิลของวงจรในขณะทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.6 ซึ่งพบว่าในช่วงที่วงจรยังไม่ทำงาน (ดิฟฟิไซเทิลมีค่าเท่ากับ 0) แผงเซลล์แสงอาทิตย์จ่ายกำลังเอาต์พุตเท่ากับ  $10\text{ W}$  หลังจากเวลาผ่านไปประมาณ  $5\text{ s}$  การติดตามจุดกำลังสูงสุดด้วยหลักการพีแอนด์โอเริ่มต้นขึ้น ดิฟฟิไซเทิลของวงจรทบระดับแรงดันถูกตั้งค่าให้เริ่มต้นที่ 30% ไมโครคอนโทรลเลอร์พบว่าจุดทำงานของแผงอยู่ทางขวาของจุดกำลังสูงสุด แสดงว่าแรงดันเอาต์พุตมีค่าสูงกว่าแรงดันที่จุดกำลังสูงสุด จึงสั่งเพิ่มค่าดิฟฟิไซเทิล ทำให้มอสเฟตในวงจรนำกระแสเพิ่มขึ้นในแต่ละคาบสวิตชิงเพื่อดึงประจุออกจากตัวเก็บประจุ  $C_1$  (ดูรูปที่ 3.1 ประกอบ) มากขึ้น ส่งผลให้แรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าลดลง นั่นคือจุดทำงานของแผงได้ขยับไปทางซ้ายของเส้นโค้งคุณลักษณะ (ดูรูปที่ 2.14) ในขณะนี้นักเรียนเพิ่มทำให้ค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตสูงขึ้น ไมโครคอนโทรลเลอร์จึงสั่งให้เพิ่มค่าดิฟฟิไซเทิลต่อไปจนกระทั่งจุดทำงานของแผงอยู่ใกล้และขยับอยู่รอบ ๆ จุดกำลังสูงสุด โดยใช้เวลาในการติดตามจุดกำลังสูงสุดประมาณ  $1\text{ s}$  และแผงเซลล์แสงอาทิตย์จ่ายกำลังเอาต์พุตเพิ่มขึ้นเป็น  $30\text{ W}$  นั่นคือในขณะนี้กลไกการติดตามจุดกำลังสูงสุดช่วยให้สามารถดึงกำลังเอาต์พุตจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้เพิ่มขึ้นเป็น 3 เท่าจากเดิม

เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ  $13\text{ s}$  มีการเพิ่มค่าความเข้มแสงอย่างรวดเร็วเป็น  $900\text{ W/m}^2$  โดยค่าความเข้มแสงเพิ่มขึ้นส่งผลให้กระแสเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจึงทำให้กำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเช่นกัน เมื่อไมโครคอนโทรลเลอร์พบว่าจุดทำงานของแผงอยู่ทางขวาของจุดกำลังสูงสุด แสดงว่าแรงดันเอาต์พุตมีค่าสูงกว่าแรงดันที่จุดกำลังสูงสุด จึงสั่งเพิ่มค่าดิฟฟิไซเทิล ทำให้มอสเฟตในวงจรนำกระแสเพิ่มขึ้นในแต่ละคาบสวิตชิงทำให้ตัวเก็บประจุ  $C_1$  คายประจุมากขึ้นแรงดันเอาต์พุตของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จึงลดลง นั่นคือจุดทำงานของแผงได้ขยับไปทางซ้ายของเส้นโค้งคุณลักษณะทำให้ค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตสูงขึ้น ไมโครคอนโทรลเลอร์จึงสั่งให้เพิ่มค่าดิฟฟิไซเทิลต่อไปจนกระทั่งจุดทำงานของแผงอยู่ใกล้และขยับอยู่รอบ ๆ จุดกำลังสูงสุด โดยใช้เวลาในการติดตามจุดกำลังสูงสุดประมาณ  $0.75\text{ s}$  และแผงเซลล์แสงอาทิตย์จ่ายกำลังเอาต์พุตเพิ่มขึ้นเป็น  $50\text{ W}$



รูปที่ 4.6 ผลการติดตามกำลังสูงสุดเมื่อความเข้มแสงเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว กรณีที่ 2

เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 20 s มีการลดลงของค่าความเข้มแสงอย่างรวดเร็วเป็น  $450 \text{ W/m}^2$  โดยค่าความเข้มแสงลดลงจากค่าสูงมาค่าต่ำส่งผลให้เกิดการลดลงของกระแสอย่างรวดเร็วตามไปด้วย ซึ่งค่าตัวดีไซ์เกิลในขณะนี้มีค่าสูงจากค่าความเข้มแสงเดิมจึงส่งผลให้ตัวเก็บประจุ  $C_1$  ยังมีการคายประจุมากในขณะที่มีกระแสในการอัดประจุน้อยลง จึงทำให้แรงดันเอาต์พุตของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ลดลง ส่งผลให้ค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ลดลงเป็นอย่างมาก เมื่อไมโครคอนโทรลเลอร์พบว่าจุดทำงานของแผงอยู่ทางซ้ายของจุดกำลังสูงสุด แสดงว่าแรงดันเอาต์พุตมีค่าต่ำกว่าแรงดันที่จุดกำลังสูงสุด จึงสั่งลดค่าตัวดีไซ์เกิล ทำให้ระยะเวลานำกระแสมาอสเฟดมีค่าน้อยลงในแต่ละคาบสวิตซิง ทำให้การคายประจุของตัวเก็บประจุ  $C_1$  น้อยลงส่งผลให้แรงดันเอาต์พุตของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพิ่มขึ้น นั่นคือจุดทำงานของแผงได้ขยับไปทางขวาของเส้นโค้งคุณลักษณะทำให้ค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของแผงสูงขึ้น ไมโครคอนโทรลเลอร์จึงสั่งให้ลดค่าตัวดีไซ์เกิลต่อไปจนกระทั่งจุดทำงานของแผงอยู่ใกล้และขยับอยู่รอบ ๆ จุดกำลังสูงสุด โดยใช้เวลาในการติดตามจุดกำลังสูงสุดประมาณ 2 s และแผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถจ่ายกำลังเอาต์พุตในขณะนั้นเป็น 30 W



## บทที่ 5

### สรุปผลและข้อเสนอแนะ

จากการดำเนินโครงการสามารถสรุปผลที่ได้จากการทดสอบพร้อมทั้งชี้แจงปัญหาที่เกิดขึ้นในการดำเนินงาน ตลอดจนข้อเสนอแนะแนวทางแก้ปัญหาในการพัฒนาโครงการขั้นต่อไปให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น

#### 5.1 สรุปผลการดำเนินโครงการ

ในโครงการนี้ได้ออกแบบและสร้างระบบติดตามจุดกำลังสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 100 W ที่จ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดตัวต้านทาน 30  $\Omega$  โดยใช้วงจรทระดับแรงดันในการเปลี่ยนจุดทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และสร้างตัวควบคุมแบบพีดีบีเบิลยูเอ็ม โดยที่ไม่โครคอนโทรลเลอร์ส่งสัญญาณควบคุมให้กับตัวควบคุมแบบพีดีบีเบิลยูเอ็มเพื่อนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณสามเหลี่ยมที่เป็นสัญญาณอ้างอิงทำให้ได้ค่าตัวดีไซเกิลสำหรับควบคุมการสวิทชิงของมอสเฟตในวงจรทระดับแรงดันเพื่อเปลี่ยนจุดทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตามหลักการพีแอนดีโอโดยรับค่ากระแสและแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ผ่านตัวรับรู้มาคำนวณเป็นค่ากำลังไฟฟ้าเพื่อใช้เปรียบเทียบแล้วปรับค่าตัวดีไซเกิล โดยกำหนดให้วงจรเริ่มต้นทำงานที่ค่าตัวดีไซเกิล 30% เพื่อให้ผู้เข้าหาจุดกำลังสูงสุดได้เร็วขึ้น จากนั้นปรับตัวดีไซเกิลทีละ 1% ระบบที่สร้างขึ้นสามารถติดตามจุดกำลังสูงสุดได้ภายใต้เงื่อนไขที่ค่าความเข้มแสงคงที่และค่าความเข้มแสงเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว

ในการทดสอบการทำงานของวงจรทระดับแรงดัน พบว่าเมื่อค่าตัวดีไซเกิลเพิ่มสูงขึ้นทำให้ได้ค่าประสิทธิภาพของวงจรลดลงซึ่งเกิดจากการสูญเสียภายในอุปกรณ์ของวงจรทำให้ได้ค่าของแรงดันเอาต์พุตต่ำกว่าค่าที่คำนวณได้ตามทฤษฎี และเมื่อค่าความต้านทานของโหลดมากขึ้นทำให้ได้ค่าประสิทธิภาพสูงขึ้น เพราะค่าความต้านทานสูงทำให้กระแสไหลผ่านได้น้อยส่งผลให้เกิดความสูญเสียน้อยกว่าจึงทำให้ได้ค่าประสิทธิภาพสูงกว่าที่ค่าความต้านทานต่ำ

โครงการนี้สามารถใช้อัลกอริทึมของวิธีพีแอนดีโอในการติดตามจุดกำลังสูงสุดได้สำเร็จในการทดสอบที่ค่าความเข้มแสงคงที่ โดยกรณีที่ 1 ใช้เวลาในการติดตามจุดกำลังสูงสุด 1.1 s ถึงกำลังไฟฟ้าได้เพิ่มขึ้นเป็น 3 เท่าจากเดิม และกรณีที่ 2 ใช้เวลาในการติดตามจุดกำลังสูงสุด 1.5 s ถึงกำลังไฟฟ้าได้เพิ่มขึ้น 4.5 เท่าจากเดิม ส่วนการติดตามจุดกำลังสูงสุดที่ค่าความเข้มแสงเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว วงจรสามารถติดตามจุดกำลังสูงสุดได้ทั้งในกรณีที่ค่าความเข้มแสงที่ตกกระทบแผงมีค่าเพิ่มขึ้นและในกรณีที่ค่าลดลงอย่างรวดเร็วโดยใช้เวลาในการติดตามไม่เกิน 2 s

## 5.2 ปัญหาและแนวทางการแก้ไข

- 1) การทดสอบเส้นโค้งคุณลักษณะและการติดตามจุดกำลังสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในโครงการนี้ได้ทดสอบกับสภาพอากาศจริง อุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของอากาศรอบข้าง ค่าความเข้มแสงที่ตกกระทบและความเร็วลมในขณะนั้นด้วย จึงไม่สามารถควบคุมค่าอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ให้มีค่าตามต้องการได้ ถ้าต้องการหลีกเลี่ยงปัญหาเรื่องอุณหภูมิในการทดสอบสามารถทำได้ในห้องปฏิบัติการที่สามารถควบคุมความเข้มแสงและอุณหภูมิได้
- 2) ตัวรับรู้กระแสและตัวรับรู้แรงดันที่ใช้งานในระบบติดตามจุดกำลังสูงสุดในโครงการนี้มีค่าความคลาดเคลื่อนและการแกว่งของค่าที่วัด ส่งผลให้การนำค่าที่ได้มาคำนวณเป็นกำลังไฟฟ้าเพื่อเป็นเงื่อนไขในการประมวลผลตามหลักการพีแอนด์โอเกิดความผิดพลาดในการติดตามจุดกำลังสูงสุด ดังนั้นต้องทำการเฉลี่ยค่าเพื่อให้ได้ค่าที่แม่นยำทำให้เวลาในการประมวลผลต่อรอบการทำงานช้าลง สามารถใช้ตัวรับรู้ที่มีความแม่นยำและประสิทธิภาพสูงกว่าเข้ามาแทนเพื่อลดความผิดพลาดจากตัวรับรู้
- 3) เนื่องจากออกแบบให้สัญญาณควบคุมที่ออกจากไมโครคอนโทรลเลอร์มีค่า 0 ถึง 4 V ซึ่งต่ำกว่าสัญญาณอ้างอิงที่มีจุดยึดอยู่ที่ 12 V จึงทำให้ไม่สามารถใช้งานวงจรที่ค่าตัวดีไซ์เกิลสูงได้ จึงจำเป็นต้องใช้วงจรขยาย 3 เท่า เพื่อขยายสัญญาณควบคุมอย่างไรก็ตามความคลาดเคลื่อนของค่าที่ได้จากวงจรขยายดังกล่าวส่งผลให้ค่าตัวดีไซ์เกิลมีความคลาดเคลื่อนไปจากค่าที่ต้องการ ในกรณีนี้สามารถลดปัญหาข้างต้นได้โดยการใช้ไอซีสำเร็จรูปที่สร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม เช่น TL494 เป็นต้น

## 5.3 แนวทางการพัฒนาต่อไป

- 1) การประยุกต์ใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์จ่ายไฟเลี้ยงกระแสตรงให้ตัวควบคุมแบบพีดับเบิลยูเอ็ม และใช้งานร่วมกับแบตเตอรี่ (Battery) เพื่อให้สามารถจ่ายโหลดได้ในขณะที่ค่าความเข้มแสงต่ำหรือไม่มีแสง เมื่อสามารถดึงกำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ออกมาได้มากย่อมทำให้ประหยัดเวลาการอัดประจุเข้าแบตเตอรี่
- 2) การประยุกต์ใช้หลักการติดตามจุดกำลังสูงสุดเพื่อควบคุมสวิทช์ในอินเวอร์เตอร์ (Inverter) เพื่อจ่ายโหลดกระแสสลับ
- 3) การเพิ่มส่วนบันทึกข้อมูล ได้แก่ แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า หรือกำลังไฟฟ้าในระบบเพื่อใช้ประกอบการวิเคราะห์การทำงานของระบบและการเพิ่มส่วนหน้าจอแสดงผลเพื่อแสดงค่ากำลังไฟฟ้าช่วงเวลาต่างๆ

## เอกสารอ้างอิง

- [1] H. Schmidt, "From the solar to the PV generator" In: Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems: Course book for the seminar: Photovoltaic Systems, Freiburg, 1995.
- [2] T. Esum and P. L. Chapman, "Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques", IEEE Transactions on Energy Conversion, June 2007.
- [3] S. Jain and V. Agarwal, "A new algorithm for rapid tracking of approximate maximum power point in photovoltaic systems", IEEE Power Electronics Letter, vol. 2, no. 1, pp. 16-19, March 2004.
- [4] Y.-T. Hsiao and C.-H. Chen, "Maximum power tracking for photovoltaic power system", Conference Record of the 2002 IEEE Industry Applications Conference 37<sup>th</sup> IAS Annual Meeting, 2002, pp. 1035-1040.
- [5] วีระเชษฐ์ ชันเงิน และวุฒิพล ธาราธีรเศรษฐ์, "อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (Power Electronics)", ห้างหุ้นส่วนจำกัด วิ.เจ. พรินตติ้ง, กรุงเทพฯ, 2550.
- [6] เอกพจน์ อิ่มเขียว และสุรพงศ์ มะหิณีแก้ว, "เครื่องกำเนิดสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม" ปรินตุนิพนธ์ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ปีการศึกษา 2553.
- [7] Arduino UnoBoard "Overview arduinouno R3", สืบค้นเมื่อวันที่ 10 ตุลาคม 2557 จาก <http://arduino.cc/en/Main/arduinoBoardUno>



```

//ประกาศตัวแปร
int buttonPin = 2;
int buttonState = 0;
float V_sensor1_raw;
float V_pv;
float I_sensor_raw;
float I_sensor_cal;
float I_sensor_sum;
float I_sensor_average;
float I_pv;
float P_pv;
float P_pv_old;
float P_pv_new;
float DP_pv;
int A=1; //กำหนดทิศทางของดิ้วดีไซเกิล
float Duty_cycle;
float V_ref;
float Time=0;
void setup()
{
  Serial.begin(9600); //เปิดการใช้งานพอร์ตอนุกรม
  pinMode(buttonPin, INPUT_PULLUP); //ใช้งานสวิตช์แบบต่อไฟค้าง
}
void loop()
{
  buttonState = digitalRead(buttonPin); //รับค่าลอจิกของสวิตช์
  if (buttonState == HIGH) //ถ้าสวิตช์มีลอจิกสูงให้ทำงานในลูป
  {
    {
      V_sensor1_raw = analogRead(A1); //ให้รับค่าแรงดันจากขาแอนะล็อก A1
      V_pv = V_sensor1_raw/37.5; //แปลงค่าแรงดันให้ตรงกับความเป็นจริง
    }
  }
}

```

```

{
for(int i=0;i<3;i++) //ค่ากระแสรวมกัน 3 รอบ
{
I_sensor_raw = analogRead(A0); //รับค่ากระแสจากพอร์ตแอนะล็อก A0
I_sensor_cal=I_sensor_raw-512; //ปรับค่าเริ่มต้นกระแสให้เป็น 0
if(I_sensor_cal<0) //ป้องกันไม่ให้ค่ากระแสเริ่มต้นน้อยกว่า 0
{
I_sensor_cal=0;
}
I_sensor_sum=I_sensor_sum+I_sensor_cal;
delay(1);
}
I_sensor_average=I_sensor_sum/3; //หาค่าเฉลี่ยของกระแส
I_pv=((I_sensor_average*5)/1023)/0.175; //แปลงค่ากระแสให้ตรงกับค่ากระแสจริง
I_sensor_sum=0; //ล้างการเก็บข้อมูลของค่ากระแสก่อนจะไปรับค่าใหม่
}
{
P_pv=V_pv*I_pv; //คำนวณค่ากำลังไฟฟ้า
Duty_cycle = 0; //กำหนดค่าดีวตี้ไซเคิลเท่ากับ 0
V_ref=map(Duty_cycle,0,100,0,204); //คำนวณแรงดันสัญญาณควบคุม
analogWrite(5,V_ref); //จ่ายสัญญาณควบคุมที่ขา 5
}
{
Time=Time+0.0285; //เวลาการทำงานจริงต่อรอบ
}
Serial.print("Time = ");
Serial.print(Time); //แสดงเวลาการทำงาน
Serial.print(" s");
Serial.print("\n");
Serial.print("V_pv = ");
Serial.print(V_pv); //แสดงค่าแรงดัน
Serial.print(" V");

```

```

Serial.print("\t");
Serial.print("I_pv = ");
Serial.print(I_pv); //แสดงค่ากระแส
Serial.print(" A");
Serial.print("\t");
Serial.print("P_pv = ");
Serial.print(P_pv); //แสดงค่ากำลังไฟฟ้า
Serial.print(" W");
Serial.print("\t");
Serial.print("D = ");
Serial.println(Duty_cycle); //แสดงค่าตัวตัดไฟเกิด
Serial.println(" %")
}
if(buttonState == LOW) //ถ้าสวิตช์มีลอจิกต่ำให้ทำงานในรูป
{
Duty_cycle=30; //กำหนดค่าตัวตัดไฟเกิดเริ่มต้นที่ 30%
P_pv_old=P_pv; //กำหนดค่ากำลังไฟฟ้าตัวเก่า
while(1)
{
{
V_sensor1_raw = analogRead(A1); //ให้รับค่าแรงดันจากขาแอนะล็อก A1
V_pv = V_sensor1_raw/37.5; //แปลงค่าแรงดันให้ตรงกับความเป็นจริง
}
}
for(int i=0;i<3;i++) //ค่ากระแสรวมกัน 3 รอบ
{
I_sensor_raw = analogRead(A0); //รับค่ากระแสจากพอร์ตแอนะล็อก A0
I_sensor_cal=I_sensor_raw-512; //ปรับค่าเริ่มต้นกระแสให้เป็น 0
if(I_sensor_cal<0) //ป้องกันไม่ให้ค่ากระแสเริ่มต้นน้อยกว่า 0
{
I_sensor_cal=0;
}
}

```

```

I_sensor_sum=I_sensor_sum+I_sensor_cal;
delay(1);
}
I_sensor_average=I_sensor_sum/3; //หาค่าเฉลี่ยของกระแส
I_pv=((I_sensor_average*5)/1023)/0.175); //แปลงค่ากระแสให้ตรงกับค่ากระแสจริง
I_sensor_sum=0; //ล้างการเก็บข้อมูลของค่ากระแสก่อนจะไปปรับค่าใหม่
}
P_pv_new=V_pv*I_pv; //คำนวณค่ากำลังไฟฟ้าตัวใหม่
DP_pv=P_pv_new-P_pv_old; //หาผลต่างกำลังไฟฟ้าตัวใหม่กับตัวเก่า
if(DP_pv<0.00) //ถ้าผลต่างกำลังไฟฟ้าต่ำกว่า 0 ให้ A คูณ -1
{
A=A*(-1);
}
if(A==1) //ถ้า A เท่ากับ 1 ให้ตัวชี้ไซเคลบวก 1%
{
Duty_cycle=Duty_cycle+1;
}
if(A==-1) //ถ้า A เท่ากับ -1 ให้ตัวชี้ไซเคลลบ 1%
{
Duty_cycle=Duty_cycle-1;
}
if(Duty_cycle<10) //ถ้าตัวชี้ไซเคลต่ำกว่า 10% ให้ตัวชี้ไซเคลบวก 1%
{
Duty_cycle=Duty_cycle+1;
}
if(Duty_cycle>80) //ถ้าตัวชี้ไซเคลมากกว่า 80% ให้ตัวชี้ไซเคลลบ 1%
{
Duty_cycle=Duty_cycle-1;
}
V_ref=map(Duty_cycle,0,100,0,204); //คำนวณแรงดันสัญญาณควบคุม
analogWrite(5,V_ref); //จ่ายสัญญาณควบคุมที่ขา 5
P_pv_old=P_pv_new; //กำหนดค่ากำลังไฟฟ้าตัวเก่า

```



```

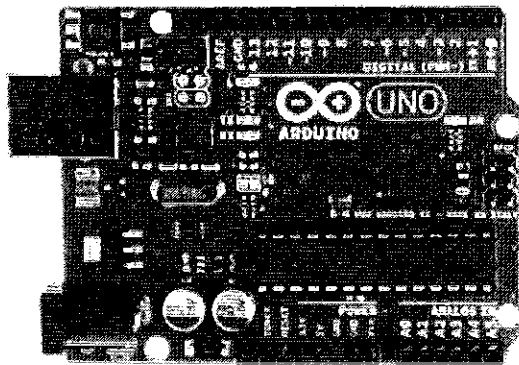
{
    Time=Time+0.0285; //เวลาการทำงานจริงต่อรอบ
}
Serial.print("Time = ");
Serial.print(Time); //แสดงเวลาการทำงาน
Serial.print(" s");
Serial.print("\t");
Serial.print("V_pv = ");
Serial.print(V_pv); //แสดงค่าแรงดัน
Serial.print(" V");
Serial.print("\t");
Serial.print("I_pv = ");
Serial.print(I_pv); //แสดงค่ากระแส
Serial.print(" A");
Serial.print("\t");
Serial.print("P_pv = ");
Serial.print(P_pv); //แสดงค่ากำลังไฟฟ้า
Serial.print(" W");
Serial.print("\t");
Serial.print("D = "); //แสดงค่าตัวตัดไซเคิล
Serial.println(Duty_cycle);
Serial.println(" %")
DP_pv=0; //ล้างค่าผลต่างกำลังไฟฟ้า
buttonState = digitalRead(buttonPin); //รับค่าลอจิกของสวิตช์
    if (buttonState == HIGH) //ถ้าสวิตช์เป็นลอจิกสูงให้ออกจากลูป
    {
return;
    }
}
}
}
}
}

```

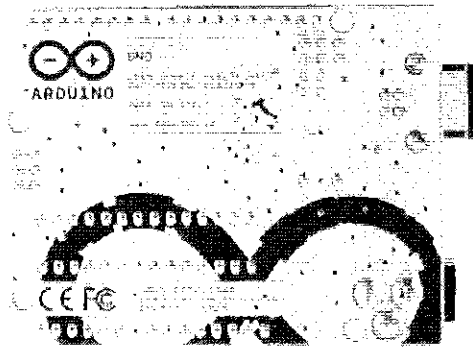


ภาคผนวก ข  
รายละเอียดของไมโครคอนโทรลเลอร์ ATmega328

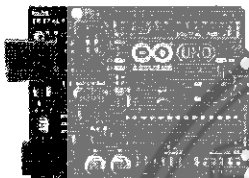
## Arduino Uno



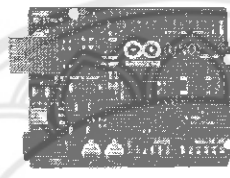
Arduino Uno R3 Front



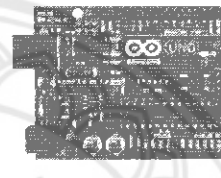
Arduino Uno R3 Back



Arduino Uno R2 Front



Arduino Uno SMD



Arduino Uno Front



Arduino Uno Back

### Overview

The Arduino Uno is a microcontroller board based on the ATmega328 ([datasheet](#)). It has 14 digital input/output pins (of which 6 can be used as PWM outputs), 6 analog inputs, a 16 MHz ceramic resonator, a USB connection, a power jack, an ICSP header, and a reset button. It contains everything needed to support the microcontroller; simply connect it to a computer with a USB cable or power it with a AC-to-DC adapter or battery to get started.

The Uno differs from all preceding boards in that it does not use the FTDI USB-to-serial driver chip. Instead, it features the Atmega16U2 (Atmega8U2 up to version R2) programmed as a USB-to-serial converter.

**Revision 2** of the Uno board has a resistor pulling the 8U2 HWB line to ground, making it easier to put into [DFU mode](#).

**Revision 3** of the board has the following new features:

- **1.0 pinout:** added SDA and SCL pins that are near to the AREF pin and two other new pins placed near to the RESET pin, the IOREF that allow the shields to adapt to the voltage provided from the board. In future, shields will be compatible both with the board that use the AVR, which operate with 5V and with the Arduino Due that operate with 3.3V. The second one is a not connected pin, that is reserved for future purposes.
- Stronger RESET circuit.
- Atmega 16U2 replace the 8U2.

"Uno" means one in Italian and is named to mark the upcoming release of Arduino 1.0. The Uno and version 1.0 will be the reference versions of Arduino, moving forward. The Uno is the latest in a series of USB Arduino boards, and the reference model for the Arduino platform; for a comparison with previous versions, see the [index of Arduino boards](#).

### Summary

Microcontroller	ATmega328
Operating Voltage	5V
Input Voltage (recommended)	7-12V

Input Voltage (limits)	6-20V
Digital I/O Pins	14 (of which 6 provide PWM output)
Analog Input Pins	6
DC Current per I/O Pin	40 mA
DC Current for 3.3V Pin	50 mA
Flash Memory	32 KB (ATmega328) of which 0.5 KB used by bootloader
SRAM	2 KB (ATmega328)
EEPROM	1 KB (ATmega328)
Clock Speed	16 MHz

## Schematic & Reference Design

EAGLE files: [arduino-uno-Rev3-reference-design.zip](#) (NOTE: works with Eagle 6.0 and newer)

Schematic: [arduino-uno-Rev3-schematic.pdf](#)

**Note:** The Arduino reference design can use an Atmega8, 168, or 328, Current models use an ATmega328, but an Atmega8 is shown in the schematic for reference. The pin configuration is identical on all three processors.

## Power

The Arduino Uno can be powered via the USB connection or with an external power supply. The power source is selected automatically.

External (non-USB) power can come either from an AC-to-DC adapter (wall-wart) or battery. The adapter can be connected by plugging a 2.1mm center-positive plug into the board's power jack. Leads from a battery can be inserted in the Gnd and Vin pin headers of the POWER connector.

The board can operate on an external supply of 6 to 20 volts. If supplied with less than 7V, however, the 5V pin may supply less than five volts and the board may be unstable. If using more than 12V, the voltage regulator may overheat and damage the board. The recommended range is 7 to 12 volts.

The power pins are as follows:

- **VIN.** The input voltage to the Arduino board when it's using an external power source (as opposed to 5 volts from the USB connection or other regulated power source). You can supply voltage through this pin, or, if supplying voltage via the power jack, access it through this pin.
- **5V.** This pin outputs a regulated 5V from the regulator on the board. The board can be supplied with power either from the DC power jack (7 - 12V), the USB connector (5V), or the VIN pin of the board (7-12V). Supplying voltage via the 5V or 3.3V pins bypasses the regulator, and can damage your board. We don't advise it.
- **3V3.** A 3.3 volt supply generated by the on-board regulator. Maximum current draw is 50 mA.
- **GND.** Ground pins.

## Memory

The ATmega328 has 32 KB (with 0.5 KB used for the bootloader). It also has 2 KB of SRAM and 1 KB of EEPROM (which can be read and written with the [EEPROM library](#)).

## Input and Output

Each of the 14 digital pins on the Uno can be used as an input or output, using [pinMode\(\)](#), [digitalWrite\(\)](#), and [digitalRead\(\)](#) functions. They operate at 5 volts. Each pin can provide or receive a maximum of 40 mA and has an internal pull-up resistor (disconnected by default) of 20-50 kOhms. In addition, some pins have specialized functions:

- **Serial: 0 (RX) and 1 (TX).** Used to receive (RX) and transmit (TX) TTL serial data. These pins are connected to the corresponding pins of the ATmega8U2 USB-to-TTL Serial chip.
- **External Interrupts: 2 and 3.** These pins can be configured to trigger an interrupt on a low value, a rising or falling edge, or a change in value. See the [attachInterrupt\(\)](#) function for details.
- **PWM: 3, 5, 6, 9, 10, and 11.** Provide 8-bit PWM output with the [analogWrite\(\)](#) function.

- **SPI: 10 (SS), 11 (MOSI), 12 (MISO), 13 (SCK).** These pins support SPI communication using the [SPI library](#).
- **LED: 13.** There is a built-in LED connected to digital pin 13. When the pin is HIGH value, the LED is on, when the pin is LOW, it's off.

The Uno has 6 analog inputs, labeled A0 through A5, each of which provide 10 bits of resolution (i.e. 1024 different values). By default they measure from ground to 5 volts, though it is possible to change the upper end of their range using the AREF pin and the [analogReference\(\)](#) function. Additionally, some pins have specialized functionality:

- **TWI: A4 or SDA pin and A5 or SCL pin.** Support TWI communication using the [Wire library](#).

There are a couple of other pins on the board:

- **AREF.** Reference voltage for the analog inputs. Used with [analogReference\(\)](#).
- **Reset.** Bring this line LOW to reset the microcontroller. Typically used to add a reset button to shields which block the one on the board.

See also the [mapping between Arduino pins and ATmega328 ports](#). The mapping for the ATmega8, 168, and 328 is identical.

## Communication

The Arduino Uno has a number of facilities for communicating with a computer, another Arduino, or other microcontrollers. The ATmega328 provides UART TTL (5V) serial communication, which is available on digital pins 0 (RX) and 1 (TX). An ATmega16U2 on the board channels this serial communication over USB and appears as a virtual com port to software on the computer. The '16U2 firmware uses the standard USB COM drivers, and no external driver is needed. However, [on Windows, a .inf file is required](#). The Arduino software includes a serial monitor which allows simple textual data to be sent to and from the Arduino board. The RX and TX LEDs on the board will flash when data is being transmitted via the USB-to-serial chip and USB connection to the computer (but not for serial communication on pins 0 and 1).

A [SoftwareSerial library](#) allows for serial communication on any of the Uno's digital pins.

The ATmega328 also supports I2C (TWI) and SPI communication. The Arduino software includes a [Wire library](#) to simplify use of the I2C bus; see the [documentation](#) for details. For SPI communication, use the [SPI library](#).

## Programming

The Arduino Uno can be programmed with the Arduino software ([download](#)). Select "Arduino Uno from the **Tools > Board** menu (according to the microcontroller on your board). For details, see the [reference](#) and [tutorials](#).

The ATmega328 on the Arduino Uno comes preburned with a [bootloader](#) that allows you to upload new code to it without the use of an external hardware programmer. It communicates using the original STK500 protocol ([reference](#), [C header files](#)).

You can also bypass the bootloader and program the microcontroller through the ICSP (In-Circuit Serial Programming) header; see [these instructions](#) for details.

The ATmega16U2 (or 8U2 in the rev1 and rev2 boards) firmware source code is available. The ATmega16U2/8U2 is loaded with a DFU bootloader, which can be activated by:

- On Rev1 boards: connecting the solder jumper on the back of the board (near the map of Italy) and then resetting the 8U2.
- On Rev2 or later boards: there is a resistor that pulling the 8U2/16U2 HWB line to ground, making it easier to put into DFU mode.

You can then use [Atmel's FLIP software](#) (Windows) or the [DFU programmer](#) (Mac OS X and Linux) to load a new firmware. Or you can use the ISP header with an external programmer (overwriting the DFU bootloader). See [this user-contributed tutorial](#) for more information.

## Automatic (Software) Reset

Rather than requiring a physical press of the reset button before an upload, the Arduino Uno is designed in a way that allows it to be reset by software running on a connected computer. One of the hardware flow control lines (DTR) of the ATmega8U2/16U2 is connected to the reset line of the ATmega328 via a 100 nanofarad capacitor. When this line is asserted (taken low), the reset line drops long enough to reset the chip. The Arduino software uses this capability to allow you to upload code by simply pressing the upload button in the Arduino environment. This means that the bootloader can have a shorter timeout, as the lowering of DTR can be well-coordinated with the start of the upload. This setup has other implications. When the Uno is connected to either a computer running Mac OS X or Linux, it resets each time a connection is made to it from software (via USB). For the following half-second or so, the bootloader is running on the Uno. While it is programmed to ignore malformed data (i.e. anything besides an upload of new code), it will intercept the first few bytes of data sent to the board after a connection is opened. If a sketch running on the board receives one-time configuration or other data when it first starts, make sure that the software with which it communicates waits a second after opening the connection and before sending this data. The Uno contains a trace that can be cut to disable the auto-reset. The pads on either side of the trace can be soldered together to re-enable it. It's labeled "RESET-EN". You may also be able to disable the auto-reset by connecting a 110 ohm resistor from 5V to the reset line; see [this forum thread](#) for details.

### USB Overcurrent Protection

The Arduino Uno has a resettable polyfuse that protects your computer's USB ports from shorts and overcurrent. Although most computers provide their own internal protection, the fuse provides an extra layer of protection. If more than 500 mA is applied to the USB port, the fuse will automatically break the connection until the short or overload is removed.

### Physical Characteristics

The maximum length and width of the Uno PCB are 2.7 and 2.1 inches respectively, with the USB connector and power jack extending beyond the former dimension. Four screw holes allow the board to be attached to a surface or case. Note that the distance between digital pins 7 and 8 is 160 mil (0.16"), not an even multiple of the 100 mil spacing of the other pins.



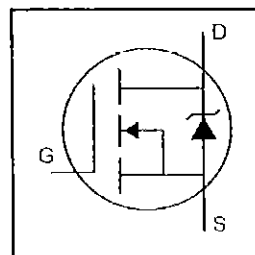
International  
**IOR** Rectifier

PD - 94053

**IRFZ44N**

HEXFET® Power MOSFET

- Advanced Process Technology
- Ultra Low On-Resistance
- Dynamic dv/dt Rating
- 175°C Operating Temperature
- Fast Switching
- Fully Avalanche Rated



$$V_{DS} = 55V$$

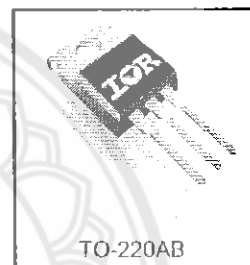
$$R_{DS(on)} = 17.5m\Omega$$

$$I_D = 49A$$

### Description

Advanced HEXFET® Power MOSFETs from International Rectifier utilize advanced processing techniques to achieve extremely low on-resistance per silicon area. This benefit, combined with the fast switching speed and ruggedized device design that HEXFET power MOSFETs are well known for, provides the designer with an extremely efficient and reliable device for use in a wide variety of applications.

The TO-220 package is universally preferred for all commercial-industrial applications at power dissipation levels to approximately 50 watts. The low thermal resistance and low package cost of the TO-220 contribute to its wide acceptance throughout the industry.



TO-220AB

### Absolute Maximum Ratings

	Parameter	Max.	Units
$I_D @ T_C = 25^\circ C$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10V$	49	A
$I_D @ T_C = 100^\circ C$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10V$	35	
$I_{DM}$	Pulsed Drain Current ①	160	
$P_D @ T_C = 25^\circ C$	Power Dissipation	94	W
	Linear Derating Factor	0.63	W/°C
$V_{GS}$	Gate-to-Source Voltage	$\pm 20$	V
$I_{AR}$	Avalanche Current ②	25	A
$E_{AR}$	Repetitive Avalanche Energy ②	9.4	mJ
dv/dt	Peak Diode Recovery dv/dt ③	5.0	V/ns
$T_J$	Operating Junction and Storage Temperature Range	-55 to +175	°C
$T_{STG}$	Soldering Temperature, for 10 seconds	300 (1.6mm from case)	
	Mounting torque, 6-32 or M3 screw	10 lbf·in (1.1N·m)	

### Thermal Resistance

	Parameter	Typ.	Max.	Units
$R_{\theta JC}$	Junction-to-Case	—	1.5	°C/W
$R_{\theta CS}$	Case-to-Sink, Flat, Greased Surface	0.50	—	
$R_{\theta JA}$	Junction-to-Ambient	—	62	



## IRFZ44N

International  
IGR RectifierElectrical Characteristics @  $T_J = 25^\circ\text{C}$  (unless otherwise specified)

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
$V_{(BR)DSS}$	Drain-to-Source Breakdown Voltage	55	—	—	V	$V_{GS} = 0V, I_D = 250\mu A$
$\Delta V_{(BR)DSS}/\Delta T_J$	Breakdown Voltage Temp. Coefficient	—	0.058	—	V/°C	Reference to $25^\circ\text{C}, I_D = 1mA$
$R_{DS(on)}$	Static Drain-to-Source On-Resistance	—	—	17.5	mΩ	$V_{GS} = 10V, I_D = 25A$ ③
$V_{GS(th)}$	Gate Threshold Voltage	2.0	—	4.0	V	$V_{DS} = V_{GS}, I_D = 250\mu A$
$g_{fs}$	Forward Transconductance	19	—	—	S	$V_{DS} = 25V, I_D = 25A$ ③
$I_{DSS}$	Drain-to-Source Leakage Current	—	—	25	μA	$V_{DS} = 55V, V_{GS} = 0V$ $V_{DS} = 44V, V_{GS} = 0V, T_J = 150^\circ\text{C}$
$I_{GSS}$	Gate-to-Source Forward Leakage	—	—	100	nA	$V_{GS} = 20V$
	Gate-to-Source Reverse Leakage	—	—	-100	nA	$V_{GS} = -20V$
$Q_g$	Total Gate Charge	—	—	63	nC	$I_D = 25A$
$Q_{gs}$	Gate-to-Source Charge	—	—	14	nC	$V_{DS} = 44V$
$Q_{gd}$	Gate-to-Drain ("Miller") Charge	—	—	23	nC	$V_{GS} = 10V$ , See Fig. 6 and 13
$t_{d(on)}$	Turn-On Delay Time	—	12	—	ns	$V_{DD} = 28V$
$t_r$	Rise Time	—	60	—	ns	$I_D = 25A$
$t_{d(off)}$	Turn-Off Delay Time	—	44	—	ns	$R_G = 12\Omega$
$t_f$	Fall Time	—	45	—	ns	$V_{GS} = 10V$ , See Fig. 10 ④
$L_D$	Internal Drain Inductance	—	4.5	—	nH	Between lead, 6mm (0.25in.) from package and center of die contact
$L_S$	Internal Source Inductance	—	7.5	—	nH	
$C_{iss}$	Input Capacitance	—	1470	—	pF	$V_{DS} = 0V$
$C_{oss}$	Output Capacitance	—	360	—	pF	$V_{DS} = 25V$
$C_{riss}$	Reverse Transfer Capacitance	—	88	—	pF	$f = 1.0MHz$ , See Fig. 5
$E_{AS}$	Single Pulse Avalanche Energy ②	—	530	150	mJ	$I_{AS} = 25A, L = 0.47mH$

## Source-Drain Ratings and Characteristics

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
$I_S$	Continuous Source Current (Body Diode)	—	—	49	A	MOSFET symbol showing the integral reverse p-n junction diode
$I_{SM}$	Pulsed Source Current (Body Diode) ①	—	—	160	A	
$V_{SD}$	Diode Forward Voltage	—	—	1.3	V	$T_J = 25^\circ\text{C}, I_S = 25A, V_{GS} = 0V$ ④
$t_{rr}$	Reverse Recovery Time	—	63	95	ns	$T_J = 25^\circ\text{C}, I_F = 25A$
$Q_{rr}$	Reverse Recovery Charge	—	170	260	nC	$di/dt = 100A/\mu s$ ④
$t_{on}$	Forward Turn-On Time	—	—	—	ns	Intrinsic turn-on time is negligible (turn-on is dominated by $L_S + L_D$ )

## Notes:

- ① Repetitive rating; pulse width limited by max. junction temperature. (See fig. 11)
- ② Starting  $T_J = 25^\circ\text{C}$ ,  $L = 0.48mH$   
 $R_G = 25\Omega, I_{AS} = 25A$ . (See Figure 12)

- ③  $I_{SD} \leq 25A, di/dt \leq 230A/\mu s, V_{DD} \leq V_{(BR)DSS}, T_J \leq 175^\circ\text{C}$

- ④ Pulse width  $\leq 400\mu s$ ; duty cycle  $\leq 2\%$ .

- ⑤ This is a typical value at device destruction and represents operation outside rated limits.

- ⑥ This is a calculated value limited to  $T_J = 175^\circ\text{C}$ .

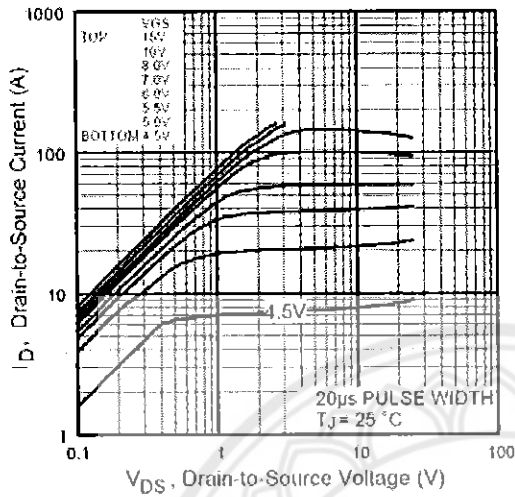


Fig 1. Typical Output Characteristics

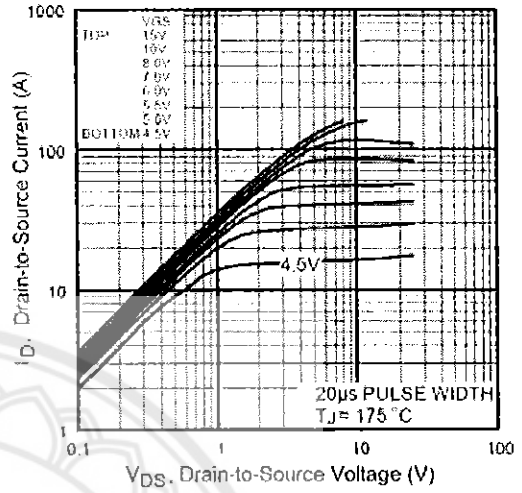


Fig 2. Typical Output Characteristics

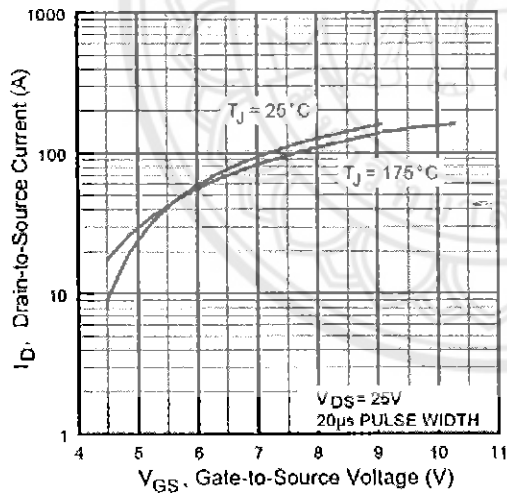


Fig 3. Typical Transfer Characteristics

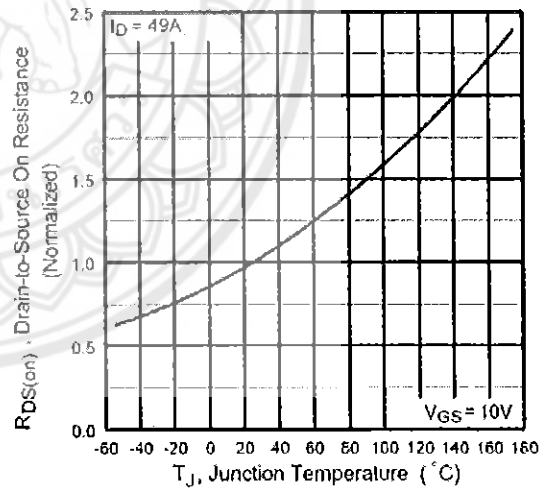


Fig 4. Normalized On-Resistance Vs. Temperature

# IRFZ44N

International  
IOR Rectifier

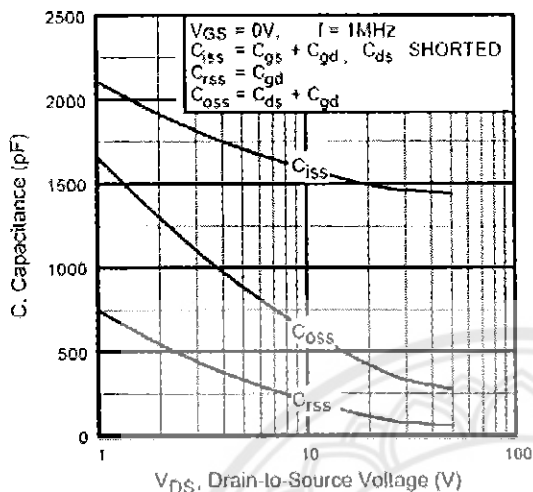


Fig 5. Typical Capacitance Vs. Drain-to-Source Voltage

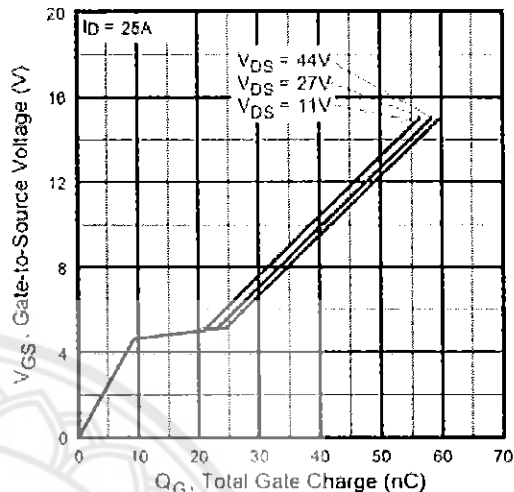


Fig 6. Typical Gate Charge Vs. Gate-to-Source Voltage

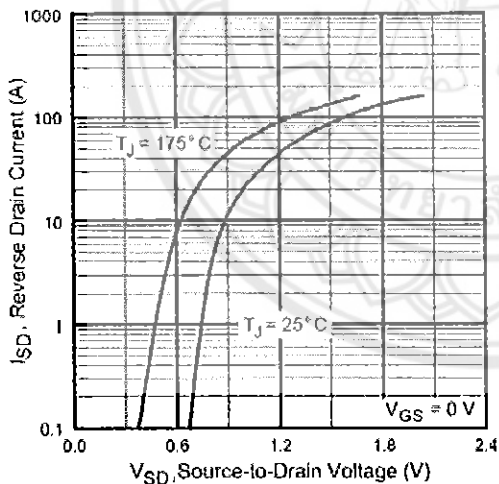


Fig 7. Typical Source-Drain Diode Forward Voltage

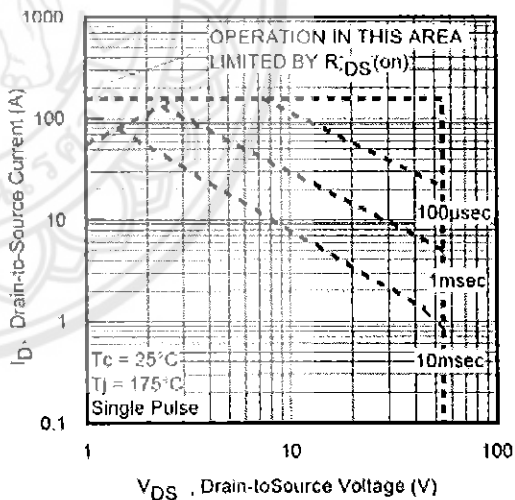


Fig 8. Maximum Safe Operating Area



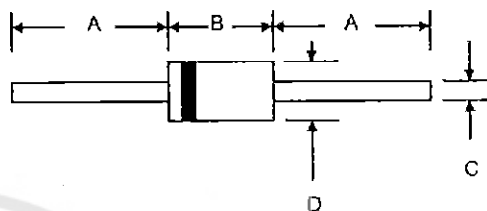


## FR201 – FR207

### 2.0A FAST RECOVERY RECTIFIER

#### Features

- Diffused Junction
- Low Forward Voltage Drop
- High Current Capability
- High Reliability
- High Surge Current Capability



#### Mechanical Data

- Case: Molded Plastic
- Terminals: Plated Leads Solderable per MIL-STD-202, Method 208
- Polarity: Cathode Band
- Weight: 0.40 grams (approx.)
- Mounting Position: Any
- Marking: Type Number

Dim	DO-15	
	Min	Max
A	25.4	—
B	5.50	7.62
C	0.71	0.864
D	2.60	3.80

All Dimensions in mm

#### Maximum Ratings and Electrical Characteristics @ $T_A=25^\circ\text{C}$ unless otherwise specified

Single Phase, half wave, 60Hz, resistive or inductive load.  
For capacitive load, derate current by 20%.

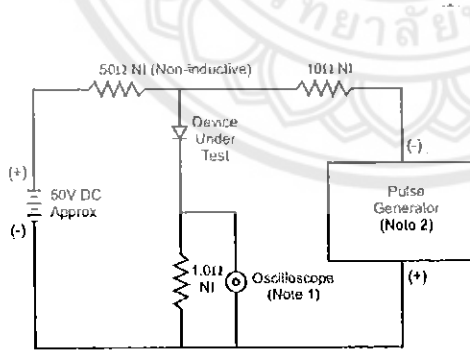
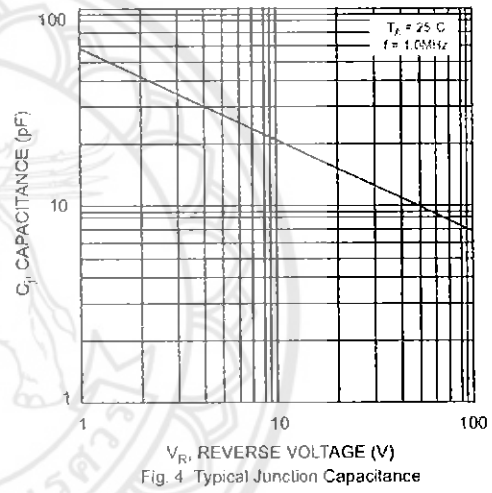
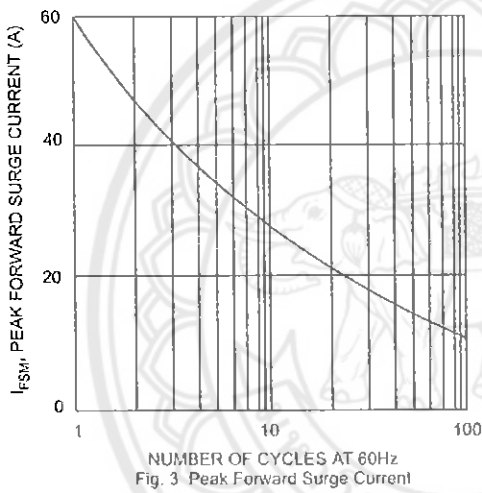
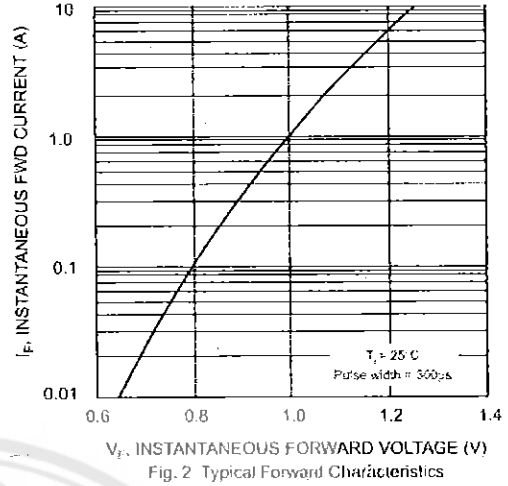
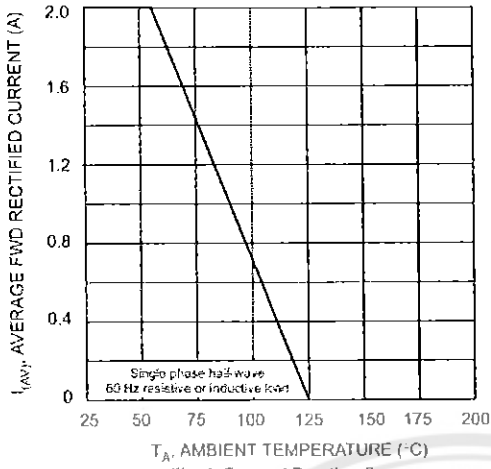
Characteristic	Symbol	FR201	FR202	FR203	FR204	FR205	FR206	FR207	Unit
Peak Repetitive Reverse Voltage	$V_{RRM}$	50	100	200	400	800	800	1000	V
Working Peak Reverse Voltage	$V_{RWM}$								
DC Blocking Voltage	$V_R$								
RMS Reverse Voltage	$V_{R(RMS)}$	35	70	140	280	420	560	700	V
Average Rectified Output Current (Note 1)	$I_o$				2.0				A
Non-Repetitive Peak Forward Surge Current 8.3ms Single half sine-wave superimposed on rated load (JEDEC Method)	$I_{FSM}$				60				A
Forward Voltage @ $I_f = 2.0\text{A}$	$V_{FM}$				1.2				V
Peak Reverse Current @ $T_A = 25^\circ\text{C}$ At Rated DC Blocking Voltage @ $T_A = 100^\circ\text{C}$	$I_{RM}$				5.0 100				$\mu\text{A}$
Reverse Recovery Time (Note 2)	$t_{rr}$	150			250	500			nS
Typical Junction Capacitance (Note 3)	$C_j$				30				pF
Operating Temperature Range	$T_J$				-65 to +125				$^\circ\text{C}$
Storage Temperature Range	$T_{STG}$				-65 to +150				$^\circ\text{C}$

\*Glass passivated forms are available upon request

Note: 1. Leads maintained at ambient temperature at a distance of 9.5mm from the case

2. Measured with  $I_F = 0.5\text{A}$ ,  $I_R = 1.0\text{A}$ ,  $I_{RR} = 0.25\text{A}$ . See figure 5.

3. Measured at 1.0 MHz and applied reverse voltage of 4.0V D.C.



Notes:  
 1. Rise Time = 7.0ns max. Input Impedance = 1.0MΩ, 22pF.  
 2. Rise Time = 10ns max. Input Impedance = 50Ω.

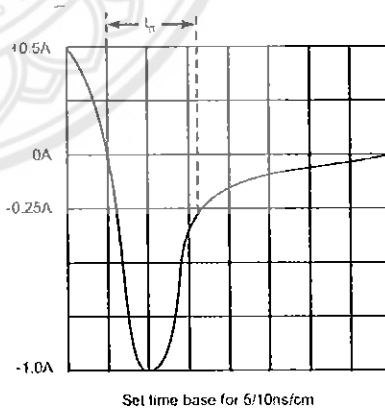


Fig. 5 Reverse Recovery Time Characteristic and Test Circuit

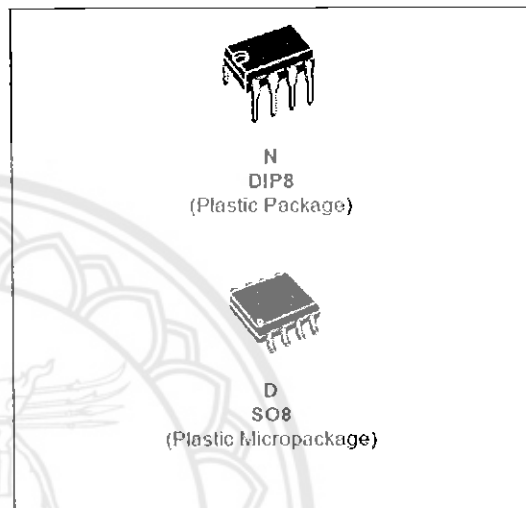




LF151  
LF251 - LF351

## WIDE BANDWIDTH SINGLE J-FET OPERATIONAL AMPLIFIER

- INTERNALLY ADJUSTABLE INPUT OFFSET VOLTAGE
- LOW POWER CONSUMPTION
- 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)

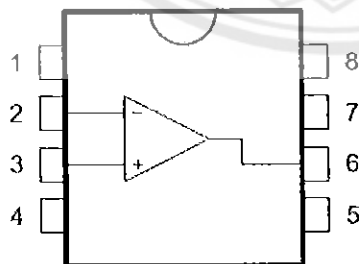


### DESCRIPTION

These circuits are high speed J-FET input single-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.

### PIN CONNECTIONS (top view)



- 1 - Offset null 1
- 2 - Inverting input
- 3 - Non-inverting input
- 4 -  $V_{CC}^-$
- 5 - Offset null 2
- 6 - Output
- 7 -  $V_{CC}^+$
- 8 - N.C.

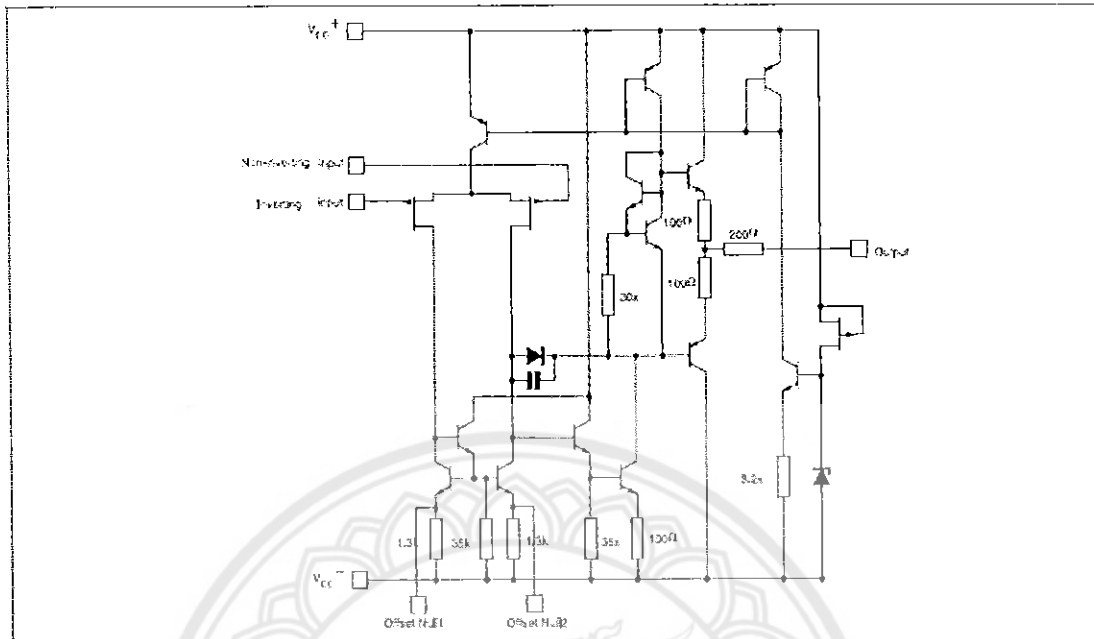
### ORDER CODE

Part Number	Temperature Range	Package	
		N	D
LF351	0°C, +70°C	•	•
LF251	-40°C, +105°C	•	•
LF151	-55°C, +125°C	•	•

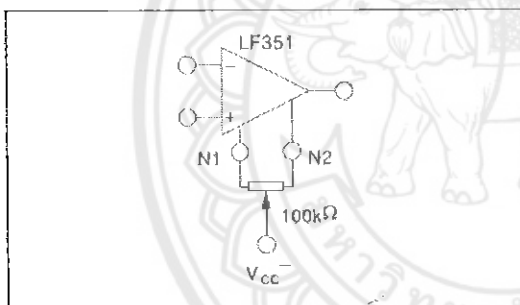
N = Dual in Line Package (DIP)  
D = Small Outline Package (SO) - also available in Tape & Reel (DT)



## SCHEMATIC DIAGRAM



## INPUT OFFSET VOLTAGE NULL CIRCUIT



## ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Symbol	Parameter	LF151	LF251	LF351	Unit
$V_{CC}$	Supply voltage - note <sup>1)</sup>		$\pm 18$		V
$V_I$	Input Voltage - note <sup>2)</sup>		$\pm 15$		V
$V_{id}$	Differential Input Voltage - note <sup>3)</sup>		$\pm 30$		V
$P_{tot}$	Power Dissipation		680		mW
	Output Short-circuit Duration - note <sup>4)</sup>		Infinite		
$T_{oper}$	Operating Free-air Temperature Range	-55 to +125	-40 to +105	0 to +70	$^{\circ}C$
$T_{sig}$	Storage Temperature Range		-65 to +150		$^{\circ}C$

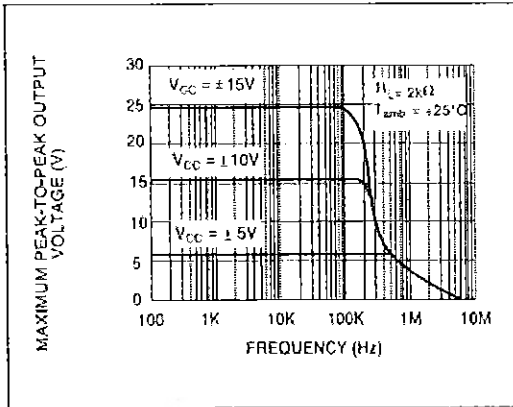
1. All voltage values, except differential voltage, are with respect to the zero reference level (ground) of the supply voltages where the zero reference level is the midpoint between  $V_{CC+}$  and  $V_{CC-}$ .
2. The magnitude of the input voltage must never exceed the magnitude of the supply voltage or 15 volts, whichever is less.
3. Differential voltages are the non-inverting input terminal with respect to the inverting input terminal.
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** $V_{CC} = \pm 15V$ ,  $T_{amb} = +25^{\circ}C$  (unless otherwise specified)

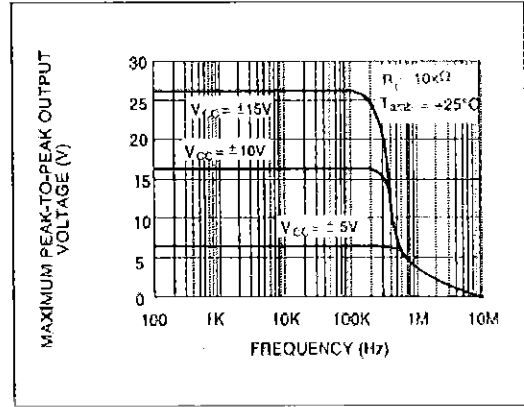
Symbol	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Unit
$V_{io}$	Input Offset Voltage ( $R_S = 10k\Omega$ ) $T_{amb} = +25^{\circ}C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$		3	10 13	mV
$\Delta V_{io}$	Input Offset Voltage Drift		10		$\mu V/^{\circ}C$
$I_{io}$	Input Offset Current- note 1) $T_{amb} = +25^{\circ}C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$		5	100 4	pA nA
$I_{ib}$	Input Bias Current -note 1 $T_{amb} = +25^{\circ}C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$		20	200 20	nA
$A_{vd}$	Large Signal Voltage Gain ( $R_L = 2k\Omega$ , $V_o = \pm 10V$ ) $T_{amb} = +25^{\circ}C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$	50 25	200		V/mV
SVR	Supply Voltage Rejection Ratio ( $R_S = 10k\Omega$ ) $T_{amb} = +25^{\circ}C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$	80 80	86		dB
$I_{CC}$	Supply Current, no load $T_{amb} = +25^{\circ}C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$		1.4	3.4 3.4	mA
$V_{icm}$	Input Common Mode Voltage Range	$\pm 11$	+15 -12		V
CMR	Common Mode Rejection Ratio ( $R_S = 10k\Omega$ ) $T_{amb} = +25^{\circ}C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$	70 70	86		dB
$I_{OS}$	Output Short-circuit Current $T_{amb} = +25^{\circ}C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$	10 10	40	60 60	mA
$\pm V_{opp}$	Output Voltage Swing $T_{amb} = +25^{\circ}C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$		10 12 10 12	12 13.5	V
SR	Slew Rate $V_i = 10V$ , $R_L = 2k\Omega$ , $C_L = 100pF$ , $T_{amb} = +25^{\circ}C$ , unity gain	12	16		V/ $\mu s$
$t_r$	Rise Time $V_i = 20mV$ , $R_L = 2k\Omega$ , $C_L = 100pF$ , $T_{amb} = +25^{\circ}C$ , unity gain		0.1		$\mu s$
$K_{ov}$	Overshoot $V_i = 20mV$ , $R_L = 2k\Omega$ , $C_L = 100pF$ , $T_{amb} = +25^{\circ}C$ , unity gain		10		%
GBP	Gain Bandwidth Product $f = 100kHz$ , $T_{amb} = +25^{\circ}C$ , $V_{in} = 10mV$ , $R_L = 2k\Omega$ , $C_L = 100pF$	2.5	4		MHz
$R_i$	Input Resistance		$10^{12}$		$\Omega$
THD	Total Harmonic Distortion ( $f = 1kHz$ , $A_V = 20dB$ $R_L = 2k\Omega$ , $C_L = 100pF$ , $T_{amb} = +25^{\circ}C$ , $V_o = 2V_{pp}$ )		0.01		
$e_n$	Equivalent Input Noise Voltage $R_S = 100\Omega$ , $f = 1kHz$		15		$\frac{nV}{\sqrt{Hz}}$
$\phi_m$	Phase Margin		45		Degrees

1. The input bias currents are junction leakage currents which approximately double for every  $10^{\circ}C$  increase in the junction temperature.**MAXIMUM PEAK-TO-PEAK OUTPUT**

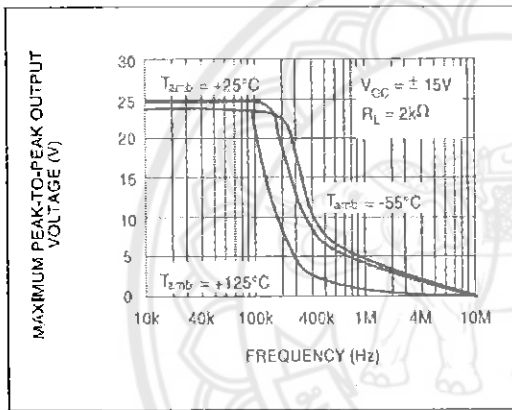
VOLTAGE versus FREQUENCY



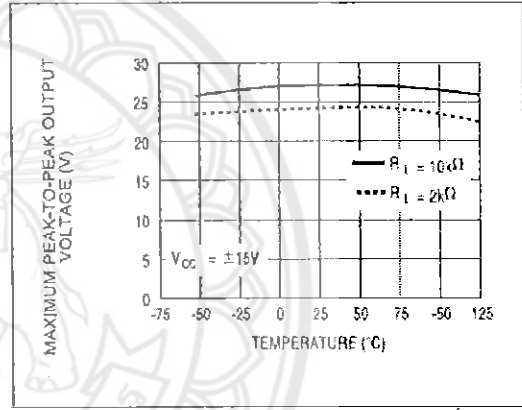
VOLTAGE versus FREQUENCY



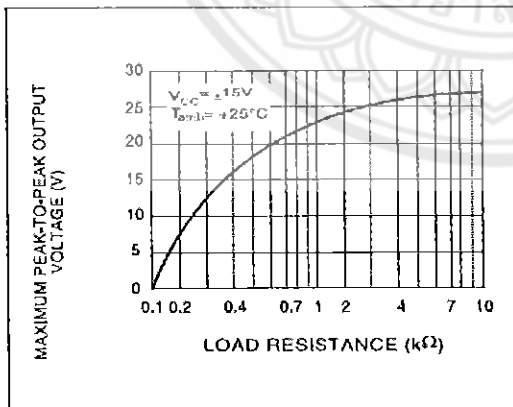
MAXIMUM PEAK-TO-PEAK OUTPUT VOLTAGE versus FREQUENCY



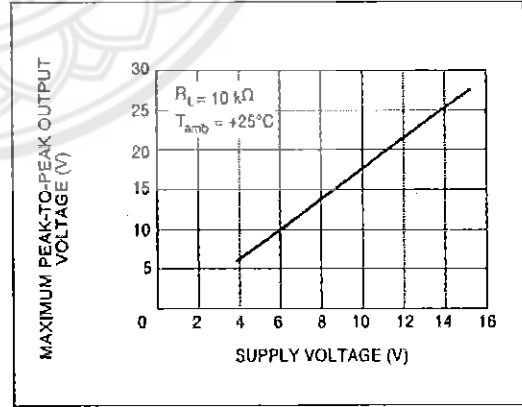
MAXIMUM PEAK-TO-PEAK OUTPUT VOLTAGE versus FREE AIR TEMP.



MAXIMUM PEAK-TO-PEAK OUTPUT VOLTAGE versus LOAD RESISTANCE



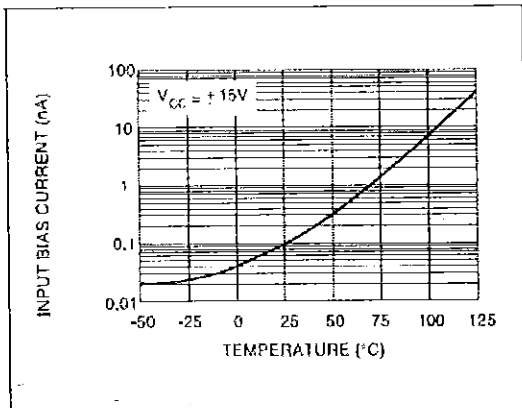
MAXIMUM PEAK-TO-PEAK OUTPUT VOLTAGE versus SUPPLY VOLTAGE



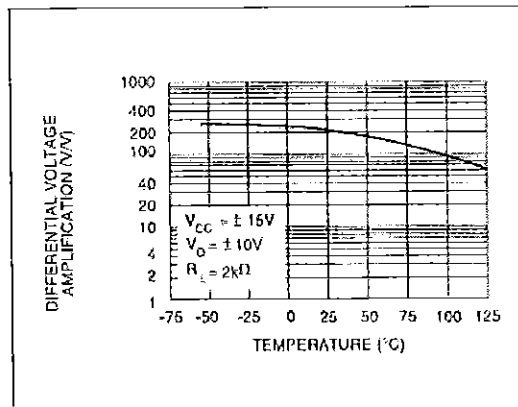
MAXIMUM PEAK-TO-PEAK OUTPUT

INPUT BIAS CURRENT versus FREE AIR

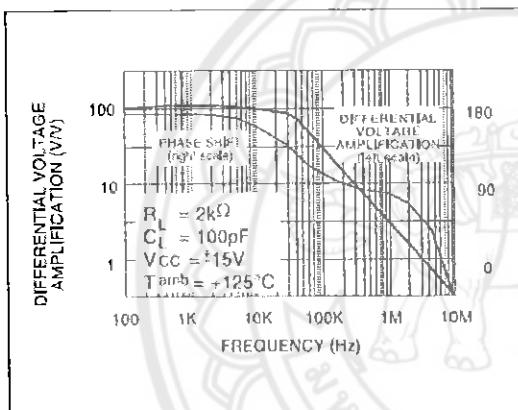
TEMPERATURE



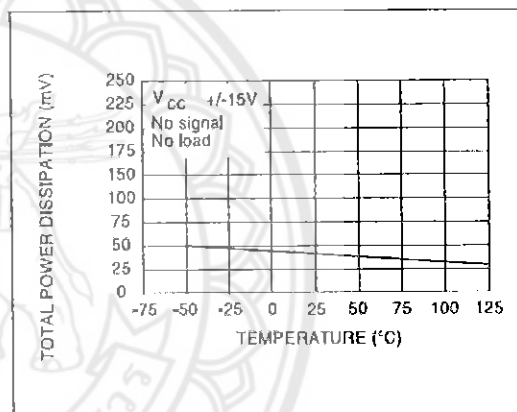
AMPLIFICATION versus FREE AIR TEMP.



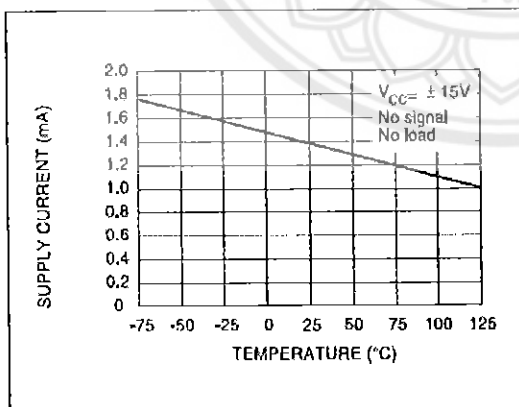
LARGE SIGNAL DIFFERENTIAL VOLTAGE AMPLIFICATION AND PHASE SHIFT versus FREQUENCY



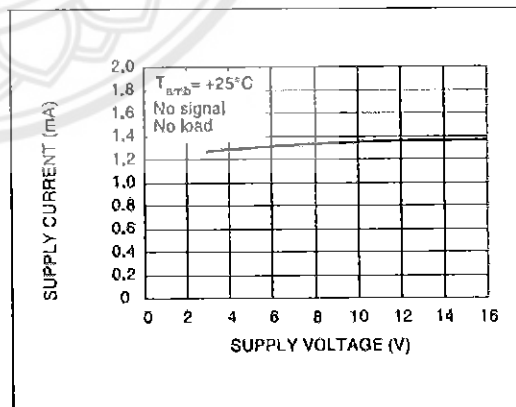
TOTAL POWER DISSIPATION versus FREE AIR TEMPERATURE



SUPPLY CURRENT PER AMPLIFIER versus FREE AIR TEMPERATURE



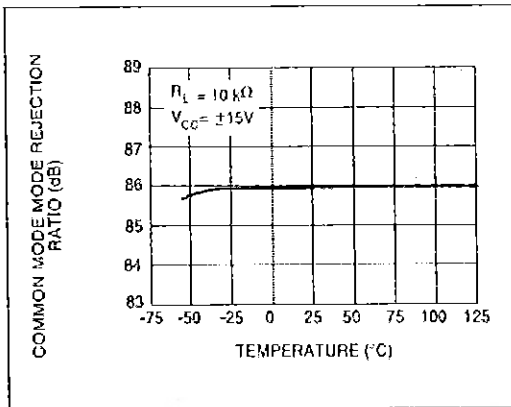
SUPPLY CURRENT PER AMPLIFIER versus SUPPLY VOLTAGE



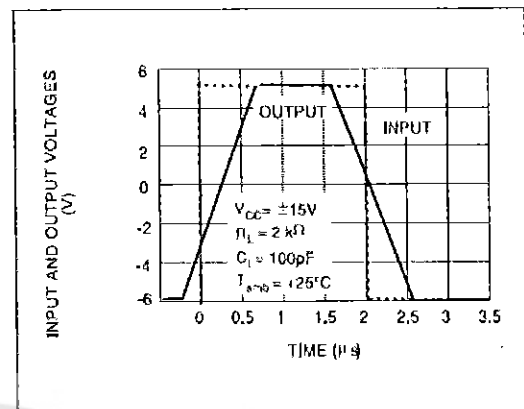
LARGE SIGNAL DIFFERENTIAL VOLTAGE

COMMON MODE REJECTION RATIO versus

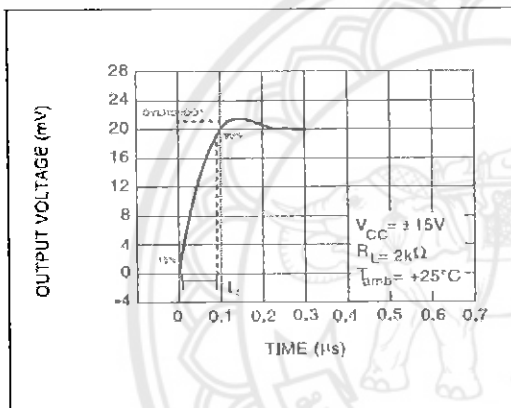
FREE AIR TEMPERATURE



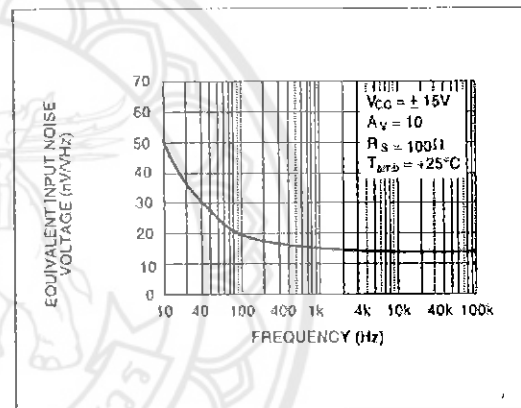
VOLTAGE FOLLOWER LARGE SIGNAL PULSE RESPONSE



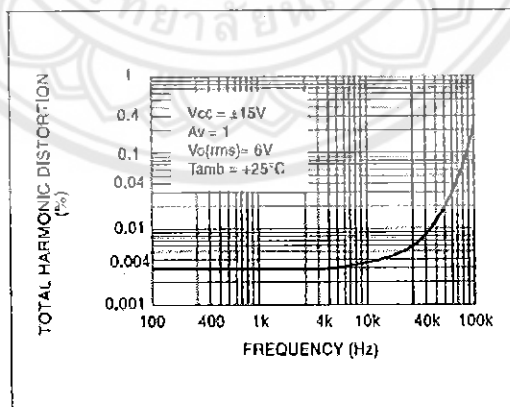
OUTPUT VOLTAGE versus ELAPSED TIME



EQUIVALENT INPUT NOISE VOLTAGE versus FREQUENCY



TOTAL HARMONIC DISTORTION versus FREQUENCY



PARAMETER MEASUREMENT INFORMATION

Figure 1 : Voltage Follower

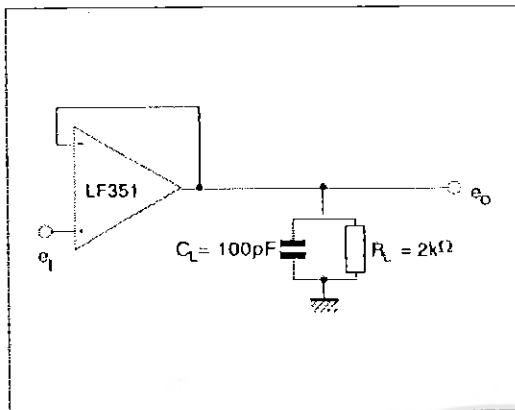
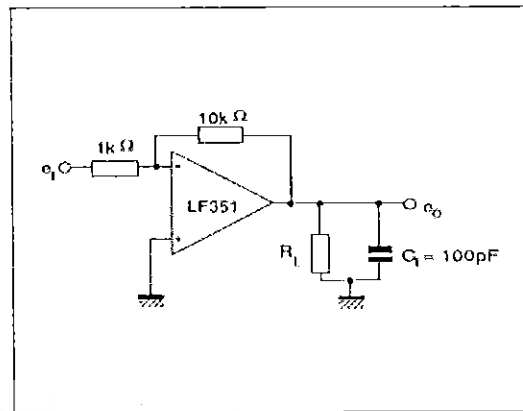
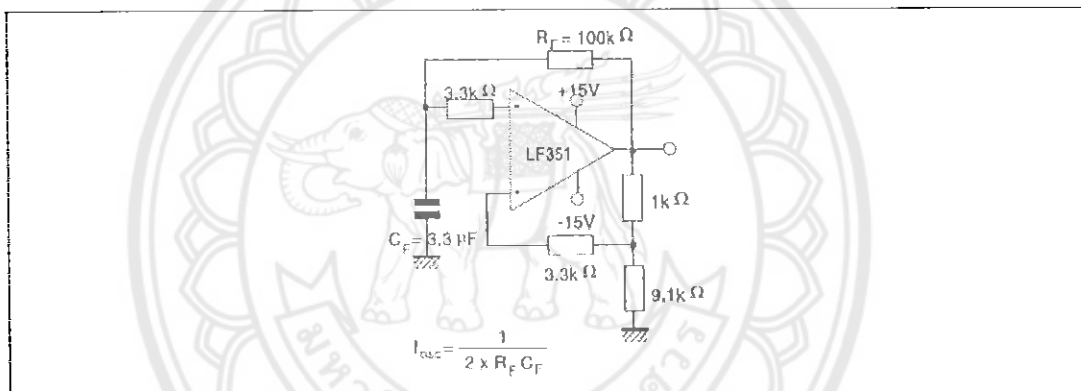


Figure 2 : Gain-of-10 inverting amplifier

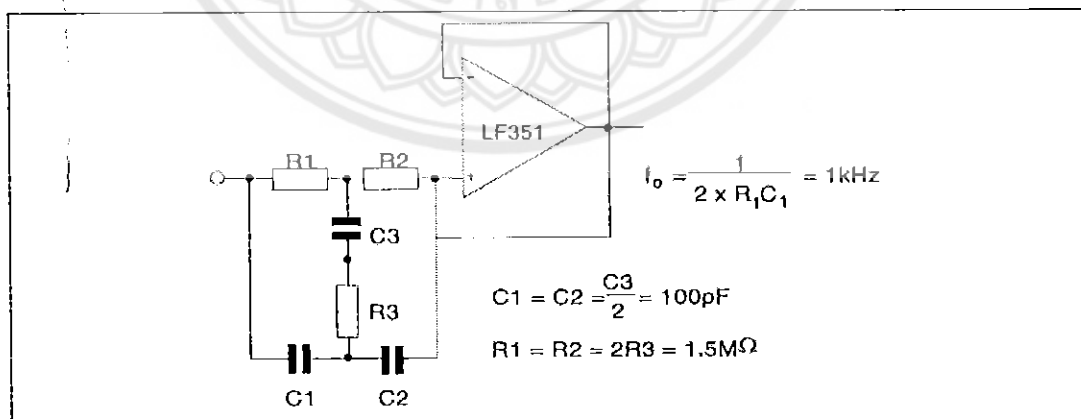


TYPICAL APPLICATION

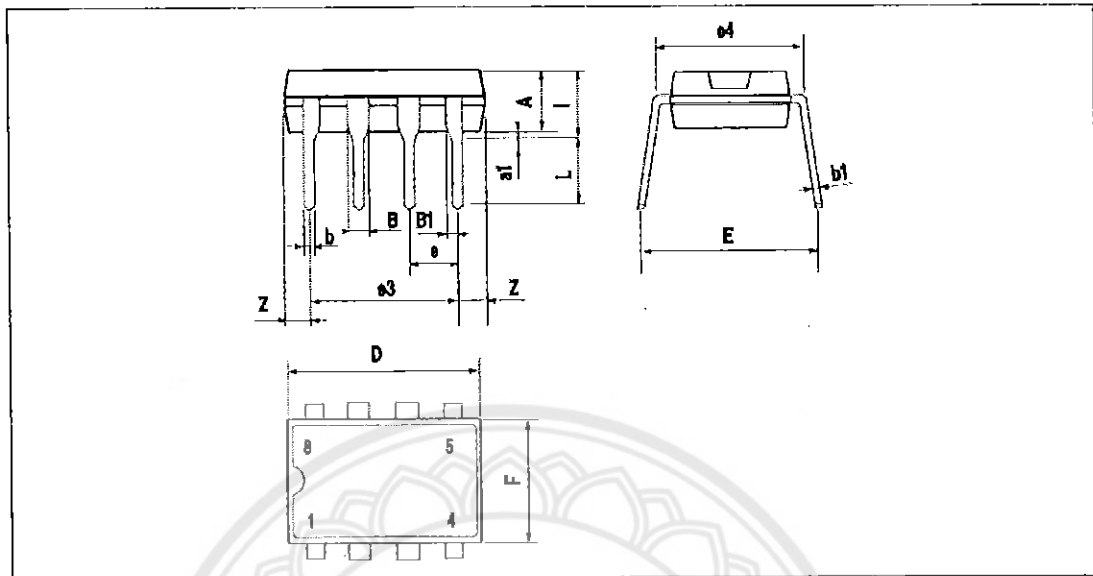
(0.5Hz) SQUARE WAVE OSCILLATOR



HIGH Q NOTCH FILTER



**PACKAGE MECHANICAL DATA**  
**8 PINS - PLASTIC DIP**



Dim.	Millimeters			Inches		
	Min.	Typ.	Max.	Min.	Typ.	Max.
A		3.32			0.131	
a1	0.51			0.020		
B	1.15		1.65	0.045		0.065
b	0.356		0.55	0.014		0.022
b1	0.204		0.304	0.008		0.012
D			10.92			0.430
E	7.95		9.75	0.313		0.384
e		2.54			0.100	
e3		7.62			0.300	
e4		7.62			0.300	
F			6.6			0.260
i			5.08			0.200
L	3.18		3.81	0.125		0.150
Z			1.52			0.060

## ประวัติผู้ดำเนินโครงการ



- ชื่อ นายวิริยา จันทร์เจิว  
 ภูมิลำเนา 240 ม.1 ต.นิคมเขาบ่อแก้ว อ.พยุหะคีรี จ.นครสวรรค์  
 ประวัติการศึกษา
- จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนพยุหะพิทยาคม
  - ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรี ชั้นปีที่ 4 สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

E-mail: [wiriya-555@hotmail.com](mailto:wiriya-555@hotmail.com)



- ชื่อ นายวีระพล สายสุรินทร์  
 ภูมิลำเนา 99/5 ม.1 ต.สารจิตร อ.ศรีสำชนาลัย จ.สุโขทัย  
 ประวัติการศึกษา
- จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนบ้านแก่งวิทยา
  - ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรี ชั้นปีที่ 4 สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

E-mail: [weeraphon.saisurin@gmail.com](mailto:weeraphon.saisurin@gmail.com)



- ชื่อ นายอภิสิทธิ์ ประมูณวงศ์  
 ภูมิลำเนา 247 ม.4 ต.ป่าแดง อ.ชาติตระการ จ.พิษณุโลก  
 ประวัติการศึกษา
- จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนชาติตระการวิทยา
  - ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรี ชั้นปีที่ 4 สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

E-mail: [Apisit.pramoonwong@gmail.com](mailto:Apisit.pramoonwong@gmail.com)