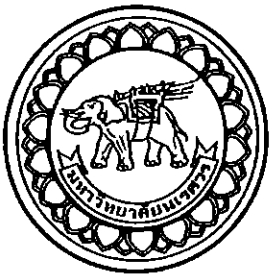


ระบบติดตามแสงอาทิตย์แบบแกนเดียว ร่วมกับตัวควบคุมการอัดประจุและคายประจุแบตเตอรี่

SINGLE-AXIS SOLAR TRACKING SYSTEM WITH BATTERY CHARGE-DISCHARGE CONTROLLER

นายทนงศักดิ์ โก๊ะกอย รหัส 53362723

นายธีรุตม์ ชุดบุญธรรม รหัส 53362792

นายวัชระ วันแก้ว รหัส 53363058

นายอนุรักษ์ เทียนแป้น รหัส 53363201

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์
วันที่รับ 19 / พ.ย. / 57
เลขทะเบียน 1658943
เลขเรียกหนังสือ ปร.
มหาวิทยาลัยนเรศวร ท 128 ร 2556

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

ปีการศึกษา 2556

ใบรับรองปริญญานิพนธ์

ชื่อหัวข้อโครงงาน	ระบบติดตามแสงอาทิตย์แบบแกนเดี่ยวร่วมกับตัวควบคุมการอัดประจุและคายประจุแบตเตอรี่	
ผู้ดำเนินโครงงาน	นายทนงศักดิ์ โก๊ะกอย	รหัส 53362723
	นายธีรุตม์ ชุดบุญธรรม	รหัส 53362792
	นายวัชระ วันแก้ว	รหัส 53363058
	นายอนุรักษ์ เทียนแป้น	รหัส 53363201
ที่ปรึกษาโครงงาน	ดร. นิพัทธ์ จันทรมินทร์	
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า	
ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์	
ปีการศึกษา	2556	

.....

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อนุมัติให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

..... ที่ปรึกษาโครงงาน
(ดร. นิพัทธ์ จันทรมินทร์)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศุภวรรณ พลพิทักษ์ชัย)

..... กรรมการ
(ดร. พนัส นัถฤทธิ์)

ชื่อหัวข้อโครงงาน	ระบบติดตามแสงอาทิตย์แบบแกนเดี่ยวร่วมกับตัวควบคุมการอัดประจุและคายประจุแบตเตอรี่	
ผู้ดำเนินโครงงาน	นายทนงศักดิ์ โก๊ะกอย	รหัส 53362723
	นายธีรุตม์ ชุดบุญธรรม	รหัส 53362792
	นายวัชระ วันแก้ว	รหัส 53363058
	นายอนุรักษ์ เทียนแป้น	รหัส 53363201
ที่ปรึกษาโครงงาน	ดร. นิพัทธ์ จันทรมินทร์	
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า	
ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์	
ปีการศึกษา	2556	

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการออกแบบและสร้างระบบติดตามแสงอาทิตย์แบบแกนเดี่ยว โดยพัฒนาใช้งานร่วมกับตัวแปลงผันกำลังกระแสตรงสองทิศทางเพื่อควบคุมการอัดและคายประจุของแบตเตอรี่ และใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์หมายเลข ATmega328 ควบคุมการทำงานของระบบซึ่งแบ่งออกเป็นสองช่วงคือช่วงการติดตามแสงอาทิตย์และช่วงการอัดประจุแบตเตอรี่ โดยการทำงานช่วงการติดตามแสงอาทิตย์แบตเตอรี่คายพลังงานผ่านตัวแปลงผันกำลังกระแสตรงสองทิศทางซึ่งในขณะนี้ทำงานเป็นวงจรทบระดับแรงดันเพื่อปรับเพิ่มค่าแรงดันไฟฟ้าได้จากแบตเตอรี่และรักษาให้คงที่เท่ากับ 20 V สำหรับใช้ขับเคลื่อนมอเตอร์ให้หมุนแผงเซลล์แสงอาทิตย์วงจรเปรียบเทียบแสงซึ่งติดตั้งอยู่บนระนาบเดียวกันกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทำการเปรียบเทียบความเข้มแสงที่ตกกระทบโดยใช้แอลดีอาร์จำนวน 2 ตัวทำหน้าที่เป็นตัวรับรู้แสง และทันทีที่แรงดันไฟฟ้าจากแอลดีอาร์ทั้งสองมีค่าเท่ากันไมโครคอนโทรลเลอร์จึงสั่งให้มอเตอร์หยุดหมุน ซึ่งเกิดขึ้นในขณะที่หน้าแผงเซลล์แสงอาทิตย์หันตรงกับลำแสงของดวงอาทิตย์ หลังจากนั้นกำลังเอาท์พุตจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ถูกป้อนผ่านตัวแปลงผันกำลังกระแสตรงซึ่งในขณะนี้ทำงานเป็นวงจรทอนระดับแรงดันโดยปรับลดค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์และรักษาให้คงที่เท่ากับ 14.4 V สำหรับใช้อัดประจุแบตเตอรี่

Project title	Single-Axis Solar Tracking System With Battery Charge-Discharge Controller		
Name	Mr. Thanongsak	Kohkoy	ID. 53362723
	Mr. Theerut	Chudboontham	ID. 53362792
	Mr.Watchara	Wankaew	ID. 53363058
	Mr. Anurak	Tienpan	ID. 53363201
Project advisor	Mr. Niphat Jantharamin, Ph.D.		
Major	Electrical Engineering		
Department	Electrical and Computer Engineering		
Academic year	2013		

Abstract

This thesis presents the design and construction of a single-axis solar tracking system which cooperates with a battery charge-discharge controller that is based on a bi-directional DC converter. The system is designed to operate in two modes: solar tracking and battery charging modes, dictated by an ATmega328 microcontroller. In the solar tracking mode the battery discharges via the converter, which acts as a step-up converter. The converter regulates its output voltage to 22 V and drive a DC motor, which turns a PV panel. A light comparator circuit, which uses two LEDs as light sensors, is mounted in the same plane as the panel. As soon as the output voltage values of the LDRs are equal, the microcontroller stops the motor, i.e. the panel faces right to the sun beam. Then the output power of the panel is fed through the converter, which works now as a step-down converter. The converter regulates its output voltage to 14.4 for charging the battery.

กิตติกรรมประกาศ

ผู้ดำเนินโครงงานขอขอบคุณ ดร. นิพัทธ์ จันทรมินทร์อาจารย์ปรึกษาโครงงาน ซึ่งเป็นผู้ที่เอาใจใส่ในทุกรายละเอียดของการดำเนินโครงงาน โดยให้ทั้งความรู้และคำแนะนำในการแก้ไขปัญหาต่างๆอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งโครงงานสำเร็จลุล่วง รวมถึงแนะนำการเขียนปริญญานิพนธ์ การใช้ภาษา และตรวจทานแก้ไขอย่างละเอียดจนได้ปริญญานิพนธ์เป็นรูปเล่มสมบูรณ์

ขอขอบคุณคุณพลวัฒน์ ทองบัวบาน (พี่เกม) รุ่นพี่สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ปัจจุบันดำรงตำแหน่งวิศวกรระดับ 4 แผนกควบคุมการจ่ายไฟ กองควบคุมและบำรุงรักษา ฝ่ายปฏิบัติการเครือข่ายเขต 2 ภาค 1 การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค จ.พิษณุโลก ที่สละเวลาส่วนตัวเพื่อให้ความรู้และคำแนะนำอันเป็นประโยชน์ยิ่งในการเลือกใช้อุปกรณ์และการสร้างวงจร ทำให้ผู้ดำเนินโครงงานมีแนวทางในการสร้างชิ้นงานให้บรรลุตามวัตถุประสงค์ของโครงงานที่ตั้งไว้

และขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ที่ให้ยืมเครื่องวัดในการทดสอบชิ้นงานที่สร้างขึ้นโดยเฉพาะว่าที่ร้อยตรีธานี โกสุม (พี่ต้น) รวมทั้งคุณปวันรัตน์ มั่นนุช (พี่โบว์) ซึ่งเป็นรุ่นพี่สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและปัจจุบันเป็นครูช่างของภาควิชาฯที่อำนวยความสะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการและการยืมใช้เครื่องมือวัดจนกระทั่งการทดสอบต่างๆสิ้นสุดลง

นอกจากนี้ยังขอขอบคุณคุณชรินทร์ (พี่ริน) ช่างซ่อมรถจักรยานยนต์ ที่อนุเคราะห์ให้ใช้เครื่องมือสำหรับสร้างโครงสร้าง และยังคอยช่วยแนะแนวทางในการประกอบโครงสร้างให้จนเสร็จสมบูรณ์

รวมทั้งขอขอบคุณรัฐบาลไทยที่จัดตั้งกองทุนเงินให้กู้ยืมเพื่อการศึกษา (กยศ.) ซึ่งสนับสนุนให้ทุนการศึกษาแก่คณะผู้ดำเนินโครงงานตลอดระยะเวลาการศึกษาในระดับปริญญาตรี

ในท้ายที่สุดนี้ เหนือสิ่งอื่นใด ผู้ดำเนินโครงงานขอกราบขอบพระคุณบิดาและมารดา ซึ่งให้การสนับสนุนในทุกด้านเกี่ยวกับการศึกษาของผู้ดำเนินโครงงาน รวมทั้งมอบความเมตตา และคอยเป็นกำลังใจให้จนประสบความสำเร็จในวันนี้

นายทนงศักดิ์ โก๊ะกอย
นายธีรุตม์ ชุดบุญธรรม
นายวัชระ วันแก้ว
นายอนุรักษ์ เทียนแป้น

สารบัญ

หน้า

ใบรับรองปริญญานิพนธ์ ..... ก
บทคัดย่อภาษาไทย ..... ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... ค
กิตติกรรมประกาศ ..... ง
สารบัญ ..... ง
สารบัญตาราง ..... จ
สารบัญรูป ..... ฉ

บทที่ 1 บทนำ 1
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงงาน 1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน 2
1.3 ขอบเขตของโครงงาน 2
1.4 ขั้นตอนและแผนการดำเนินงาน 3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงงาน 3
1.6 งบประมาณ 4

บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง 5
2.1 เซลล์แสงอาทิตย์ 5
2.1.1 กระบวนการทางฟิสิกส์ในเซลล์แสงอาทิตย์ 6
2.1.2 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในโครงงาน 14
2.2 ทิศทางการรับแสงจากดวงอาทิตย์ 16
2.3 ระบบติดตามแสงอาทิตย์ 18
2.4 ตัวต้านทานไวแสง 20
2.5 การควบคุมการหมุนของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 23
2.5.1 การทำงานเป็นมอเตอร์ไฟฟ้า 23
2.5.2 การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง 24
2.6 ไมโครคอนโทรลเลอร์ 26

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.7 แหล่งพลังงานที่ใช้ในการขับมอเตอร์กระแสตรง 28
2.7.1 โครงสร้างของแบตเตอรี่แบบตะกั่ว 28
2.7.2 ปฏิกิริยาทางเคมีในแบตเตอรี่แบบตะกั่ว 29
2.7.3 อัตราการคายประจุ 31
2.8 ตัวควบคุมการอัดประจุและคายประจุ 33
2.8.1 วงจรทอนระดับแรงดัน 34
2.8.2 วงจรทบระดับแรงดัน 37
2.8.3 แผนภาพวงจรของตัวแปลงผันกำลังกระแสตรงสองทิศทาง 42
2.8.4 ตัวสร้างสัญญาณควบคุมการทำงานของสวิตช์ 43

บทที่ 3 การออกแบบและสร้างระบบติดตามแสงอาทิตย์ 44
3.1 การออกแบบขั้นตอนการทำงานของระบบ 44
3.2 วงจรเปรียบเทียบแสงโดยใช้แอลดีอาร์ 45
3.3 วงจรควบคุมทิศทางการหมุนของมอเตอร์ 47
3.4 ตัวแปลงผันกำลังกระแสตรงสองทิศทาง 48
3.4.1 ตัวแปลงผันกำลังกระแสตรงสองทิศทางในช่วงการติดตามแสง 50
3.4.2 ตัวแปลงผันกำลังกระแสตรงสองทิศทางในช่วงอัดประจุแบตเตอรี่ 51
3.5 วงจรของระบบติดตามแสงอาทิตย์ 52
3.6 โครงสร้างของระบบติดตามแสงอาทิตย์ 54

บทที่ 4 ผลการทดสอบ 56
4.1 การทดสอบการทำงานของตัวแปลงผันกำลังกระแสตรงสองทิศทาง 56
4.1.1 การทำงานเป็นวงจรทอนระดับแรงดัน 56
4.1.2 การทำงานเป็นวงจรทบระดับแรงดัน 60
4.2 การทดสอบการทำงานของระบบติดตามแสงอาทิตย์แบบแกนเดี่ยว 61
4.2.1 ช่วงการอัดประจุแบตเตอรี่ 62
4.2.2 ช่วงการติดตามแสงอาทิตย์ 66

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ 69

5.1 สรุปผลการดำเนินงาน 69

5.2 ปัญหาและแนวทางในการแก้ไข 69

5.3 แนวทางในการพัฒนาต่อไป 70

เอกสารอ้างอิง 71

ภาคผนวก ก รหัสต้นฉบับของโปรแกรมควบคุม 72

ภาคผนวก ข รายละเอียดของไมโครคอนโทรลเลอร์ATMEGA328 75

ภาคผนวก ค รายละเอียดไอซีหมายเลข TLT494 82

ภาคผนวก ง รายละเอียดของมอสเฟตหมายเลข IRFZ44N 90

ภาคผนวก จ รายละเอียดของทรานซิสเตอร์หมายเลข TIP32C 95

ภาคผนวก ฉ รายละเอียดของไดโอดหมายเลข FR204 99

ภาคผนวก ช รายละเอียดของรีเลย์หมายเลข HRS4H-S-DC5V 102

ประวัติผู้ดำเนินโครงงาน 106

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

4.1 ผลการทดสอบการทอนระดับแรงดันและการคงค่าแรงดัน 57
4.2 ผลการทดสอบการจำกัดกระแสของวงจรทอนระดับแรงดัน 59
4.3 ผลการทดสอบการทบระดับแรงดันและการคงค่าแรงดัน 61
4.4 ผลการทดสอบการทำงานของระบบในช่วงการอัดประจุแบตเตอรี่ 63
4.5 ผลการทดสอบการทำงานของระบบในช่วงการติดตามแสง 67

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

2.1 โครงสร้างทั่วไปของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำมาจากซิลิกอน....5
2.2 หลักการทำงานโดยสังเขปของเซลล์แสงอาทิตย์....7
2.3 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ในอุดมคติที่ต่อกับภาระ....8
2.4 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์จริงที่ต่อกับภาระ....9
2.5 เส้นโค้งคุณลักษณะกระแส-แรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์....10
2.6 ตัวอย่างเส้นโค้งคุณลักษณะกำลังและแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์....11
2.7 ผลของความเข้มแสงต่อเส้นโค้งคุณลักษณะกระแสและแรงดัน....12
2.8 ผลของความเข้มแสงต่อเส้นโค้งคุณลักษณะกำลังและแรงดัน....12
2.9 ผลของอุณหภูมิต่อเส้นโค้งคุณลักษณะกระแสและแรงดัน....13
2.10 ผลของอุณหภูมิต่อเส้นโค้งคุณลักษณะกำลังและแรงดัน....14
2.11 เส้นโค้งคุณลักษณะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์รุ่น STP010S-12/kb....15
2.12 การรับแสงจากดวงอาทิตย์ในขณะที่แกนโลกเอียงประมาณ 23.5° 16
2.13 มุมลาดเอียงในหนึ่งปี....17
2.14 การรับแสงของโลกในขณะโคจรรอบดวงอาทิตย์....17
2.15 ตำแหน่งของดวงอาทิตย์บนท้องฟ้าแต่ละช่วงเวลาในหนึ่งวัน....18
2.16 โครงสร้างของตัวต้านทานไวแสง....20
2.17 ความไวต่อแสงของตัวต้านทานไวแสง....21
2.18 การเปลี่ยนค่าความต้านทานของตัวต้านทานไวแสง....22
2.19 ส่วนประกอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง....23
2.20 หลักการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง....24
2.21 การขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงด้วยตัวเรียงกระแสแบบควบคุมเฟส....25
2.22 การขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงด้วยตัวแปลงผันกำลังกระแสตรง....25
2.23 แผงวงจร Arduino....26
2.24 ซีพียู ATmega328 ขนาด 28 ขา....28
2.25 โครงสร้างภายในของแบตเตอรี่แบบตะกั่ว....29
2.26 การเกิดปฏิกิริยาภายในแบตเตอรี่เมื่อคายประจุ....29
2.27 การคายประจุของแบตเตอรี่....30
2.28 การเกิดปฏิกิริยาภายในแบตเตอรี่เมื่ออัดประจุ....30

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

2.29 กราฟคุณลักษณะการคายประจุของแบตเตอรี่ NP4-12....32
2.30 กราฟเปรียบเทียบความลึกในการคายประจุกับอายุการใช้งาน....32
2.31 แผนภาพวงจรทอนระดับแรงดัน....34
2.32 วงจรสมมูลของวงจรทอนระดับแรงดันเมื่อสวิตช์นำกระแส....35
2.33 วงจรสมมูลวงจรทอนระดับแรงดันขณะสวิตช์ไม่นำกระแส....36
2.34 แผนภาพวงจรทบระดับแรงดัน....38
2.35 วงจรสมมูลของวงจรทบระดับแรงดันเมื่อสวิตช์นำกระแส....39
2.36 วงจรสมมูลของวงจรทบระดับแรงดันเมื่อสวิตช์ไม่นำกระแส.... 40
2.37 รูปคลื่นสัญญาณในวงจรทบระดับแรงดัน....41
2.38 อัตราขยายแรงดันไฟฟ้าของวงจรทบระดับแรงดัน....42
2.39 แผนภาพวงจรแปลงผันกำลังกระแสตรงสองทิศทาง....42
2.40 แผนภาพวงจรภายในวงจรรวมหมายเลข TL494....43
3.1 แผนภาพหลักการทำงานของระบบในช่วงการติดตามแสงอาทิตย์....44
3.2 แผนภาพหลักการทำงานของระบบในช่วงการอัดประจุแบตเตอรี่....45
3.3 แผนภาพวงจรเปรียบเทียบแสงโดยใช้แอลดีอาร์....46
3.4 การติดตั้งแอลดีอาร์เพื่อเปรียบเทียบแสง....46
3.5 แผนภาพวงจรควบคุมทิศทางการหมุนของมอเตอร์....47
3.6 การเชื่อมต่อวงจรของตัวแปลงผันกำลังกระแสตรงสองทิศทางกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ มอเตอร์ และแบตเตอรี่....48
3.7 แผนภาพวงจรกำลังและวงจรควบคุมในช่วงการติดตามแสงอาทิตย์....51
3.8 แผนภาพวงจรกำลังและวงจรควบคุมในช่วงการอัดประจุแบตเตอรี่....52
3.9 แผนภาพวงจรกำลังและวงจรควบคุมของระบบติดตามแสงอาทิตย์....53
3.10 ส่วนประกอบในวงจรกำลังและวงจรควบคุมของระบบติดตามแสงอาทิตย์.... 54
3.11 โครงสร้างของระบบติดตามแสงอาทิตย์แบบแกนเดี่ยว.... 55
4.1 แรงดันเอาท์พุตของวงจรทอนระดับแรงดัน....58
4.2 ประสิทธิภาพของวงจรทอนระดับแรงดัน....58
4.3 ประสิทธิภาพของวงจรทอนระดับแรงดันเมื่อกระแสเอาท์พุตถูกจำกัดที่ 1 A....60
4.4 กำลังเอาท์พุตของแผงเซลล์แสงอาทิตย์....64

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.5 กำลังไฟฟ้าที่ใช้อัดประจุแบตเตอรี่ 65
4.6 ประสิทธิภาพของตัวแปลงผันกำลังฯในช่วงอัดประจุแบตเตอรี่ 65
4.7 กำลังไฟฟ้าจากแบตเตอรี่และกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์ในช่วงการติดตามแสง 68
4.8 ประสิทธิภาพของตัวแปลงผันกำลังฯในช่วงการติดตามแสง 68

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงงาน

ในปัจจุบันพลังงานไฟฟ้าที่เราใช้นั้นส่วนใหญ่ผลิตมาจากเชื้อเพลิงฟอสซิล (Fossil fuel) ซึ่งการใช้เชื้อเพลิงชนิดนี้จะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเนื่องจากกระบวนการในการผลิตพลังงานไฟฟ้าโดยใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลนั้นจะเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักของก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse gas) และถ้ามีก๊าซชนิดนี้มากเกินไปจะทำให้อุณหภูมิของโลกสูงขึ้นตามมา ดังนั้นในปัจจุบันจึงมีการหันมาใช้พลังงานทางเลือกแทนโดยมีหลากหลายชนิด เช่น พลังงานลม พลังงานน้ำ และที่กำลังนิยมใช้เป็นอย่างมากอีกชนิดหนึ่งคือพลังงานแสงอาทิตย์ซึ่งเป็นพลังงานที่สะอาด และมีอยู่ทั่วโลกแต่ในการใช้งานพลังงานชนิดนี้จำเป็นที่จะต้องมีอุปกรณ์ที่ใช้เปลี่ยนพลังงานแสงให้เป็นพลังงานไฟฟ้าคือเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cell) ซึ่งอุปกรณ์ชนิดนี้สามารถเปลี่ยนพลังงานแสงให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรงโดยไม่ต้องผ่านกระบวนการแปลงพลังงานให้อยู่ในรูปอื่นก่อนจึงเกิดการสูญเสียพลังงานน้อยกว่าพลังงานทางเลือกชนิดอื่นๆ

ในโครงงานนี้ได้เล็งเห็นปัญหาในการใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์รับแสง เนื่องจากช่วงเวลากลางวัน และกลางคืนของแต่ละวันรวมทั้งช่วงเวลาในแต่ละฤดูกาลส่งผลต่อการสร้างกำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เนื่องจากได้รับความเข้มแสงในช่วงเวลาต่างๆไม่เท่ากัน ดังนั้นเพื่อให้เซลล์แสงอาทิตย์ได้รับปริมาณแสงมากที่สุดของช่วงเวลานั้นๆ จึงควบคุมให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์นั้นหันหน้าตรงกับลำแสงที่ตกกระทบ หลักการดังกล่าวรู้จักกันในชื่อของ "การติดตามแสงอาทิตย์ (Solar tracking)" โดยเมื่อนำระบบติดตามแสงอาทิตย์มาใช้งานจะทำให้ได้แสงมาผลิตกำลังไฟฟ้ามากกว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่ติดตามแสง ซึ่งระบบติดตามแสงอาทิตย์ในปัจจุบันส่วนใหญ่มีการควบคุมการหมุนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ใน 2 แกน คือหมุนรอบแกนนอนและรอบแกนดิ่งซึ่งต้องใช้มอเตอร์สองตัว ทำให้ต้องใช้พลังงานจากแบตเตอรี่มาก และเมื่อใช้อุปกรณ์จำนวนมากขึ้นย่อมส่งผลให้เกิดการสูญเสียกำลังไฟฟ้าในอุปกรณ์มากขึ้นด้วย ดังนั้นในโครงงานนี้จึงลดการใช้มอเตอร์เหลือเพียงหนึ่งตัวโดยควบคุมให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์หมุนรอบแกนดิ่งเท่านั้น ในขณะที่การปรับตำแหน่งรอบแกนนอนหรือมุมเอียงของแผงนั้นเราทำการปรับด้วยมือให้เหมาะสมสำหรับแต่ละฤดูกาล พลังงานที่สร้างได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะเก็บสะสมไว้ในแบตเตอรี่เพื่อนำมาใช้ขับเคลื่อนมอเตอร์สำหรับหมุนแผงเซลล์แสงอาทิตย์นั่นเอง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีตัวควบคุมการอัดประจุและคายประจุของแบตเตอรี่ที่ยอมให้กำลังไฟฟ้าไหลผ่านได้ทั้งสองทิศทาง ซึ่งในโครงงานนี้

ได้เลือกใช้ตัวแปลงผันกำลังกระแสตรงสองทิศทาง (Bi-directional converter) โดยการทำงานของระบบถูกควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน

เพื่อสร้างระบบขับเคลื่อนมอเตอร์สำหรับหมุนแผงเซลล์แสงอาทิตย์รอบแกนดิ่ง ให้แผงหันหน้าตรงกับลำแสงจากดวงอาทิตย์โดยใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ จากนั้นจึงใช้พลังงานไฟฟ้าที่ได้จากแผงเซลล์อาทิตย์ในการอัดประจุแบตเตอรี่

1.3 ขอบเขตของโครงงาน

1) ออกแบบและสร้างระบบติดตามแสงอาทิตย์แบบแกนเดียวซึ่งควบคุมการทำงานโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์
2) ควบคุมมอเตอร์กระแสตรงขนาด 24 V โดยใช้พลังงานจากแบตเตอรี่แบบตะกั่วขนาด 12V เพื่อหมุนแผงเซลล์แสงอาทิตย์รอบแกนดิ่ง
3) สร้างตัวแปลงผันกำลังกระแสตรงสองทิศทางในการอัดประจุและคายประจุแบตเตอรี่
4) ใช้ตัวต้านทานไวแสงตรวจจับและเปรียบเทียบความเข้มแสงเพื่อหาตำแหน่งของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งหันหน้าตรงกับลำแสงที่ตกกระทบ

1.4 ขั้นตอนและแผนการดำเนินงาน

รายละเอียด	พ.ศ. 2556								
	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
1) ศึกษาหลักการของระบบติดตามแสงร่วมกับตัวอัดประจุและคายประจุแบตเตอรี่แบบตะกั่ว									
2) ออกแบบระบบติดตามแสงแบบแกนเดี่ยวและตัวแปลงผันกำลังกระแสตรงสองทิศทาง									
3) สร้างแบบจำลองโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุมการทำงานของระบบ									
4) ทดสอบและปรับปรุงชิ้นงาน									
5) สรุปผลและจัดทำรูปเล่มปริญญานิพนธ์									

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงงาน

ระบบติดตามแสงอาทิตย์แบบแกนเดี่ยวที่สร้างขึ้นในโครงงานสามารถปรับตำแหน่งของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้หันหน้าตรงกับลำแสงที่ตกกระทบในแต่ละช่วงเวลา โดยพลังงานที่ใช้ในการขับเคลื่อนมาจากแบตเตอรี่ที่ถูกอัดประจุโดยใช้พลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ผ่านตัวควบคุมหลังจากปรับตำแหน่งเรียบร้อยร่วมกับตัวควบคุมการอัดประจุและคายประจุที่สร้างขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถนำระบบดังกล่าวไปใช้เป็นแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าสำหรับระบบแสงสว่างหรือปั๊มน้ำในชุมชนเพื่อเป็นการประหยัดพลังงานและลดการใช้พลังงานเชื้อเพลิงจากฟอสซิล รวมทั้งยังสามารถนำไปใช้กับพื้นที่ที่ห่างไกลจากการไฟฟ้าฯได้

1.6 งบประมาณ

1) โครงสร้างแบบจำลองของระบบติดตามแสง	1,000 บาท
2) มอเตอร์กระแสตรง พิกัด 24 V	850 บาท
3) อุปกรณ์ในการสร้างวงจร	850 บาท
4) ไมโครคอนโทรลเลอร์ Ardoino	500 บาท
5) ค่าถ่ายเอกสารและเข้าเล่มปริญญานิพนธ์	800 บาท
รวมเป็นเงินทั้งสิ้น (สี่พันบาทถ้วน)	4,000 บาท

หมายเหตุ: ถัวเฉลี่ยทุกรายการ

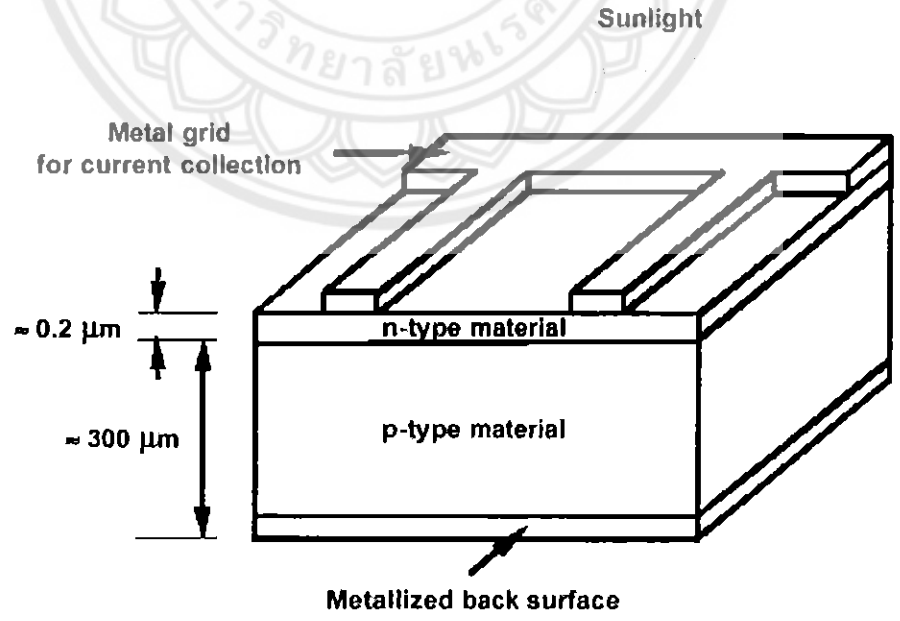
มหาวิทยาลัยนเรศวร

บทที่ 2
หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในปัจจุบันเนื่องจากเกิดภาวะโลกร้อน ความสนใจในการหันมาใช้พลังงานทนแทนจึงเพิ่มขึ้นอย่างมาก และพลังงานทดแทนที่น่าสนใจเป็นอย่างมากคือพลังงานแสงอาทิตย์แต่พลังงานที่ผลิตได้ไม่คุ้มค่าต่อการลงทุน จึงมีการคิดวิธีเพิ่มการผลิตกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีติดตามแสง (Tracking) ในโครงงานนี้จึงได้อธิบายทฤษฎีและหลักการทำงานพื้นฐานที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับระบบดังกล่าว

2.1 เซลล์แสงอาทิตย์

การเปลี่ยนพลังงานการแผ่รังสีแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรง สามารถเป็นจริงได้ด้วยปรากฏการณ์แรงดันไฟฟ้าพลังแสง (Photovoltaic effect) โดยใช้เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cells) พลังงานการแผ่รังสีถูกส่งผ่านโดยตรงไปยังอิเล็กตรอนในเซลล์แสงอาทิตย์จากการดูดกลืนเนื่องจากปรากฏการณ์ไฟฟ้าพลังแสง (Photoelectric absorption) จะมีแรงดันไฟฟ้าเกิดขึ้นอันเป็นผลมาจากการดูดกลืนพลังงานที่มากระตุ้นวัตถุดิบพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์เกือบทั้งหมดที่ใช้งานกันอยู่ในปัจจุบันคือซิลิกอน โครงสร้างโดยทั่วไปของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำมาจากซิลิกอนซึ่งถูกแสดงได้ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างทั่วไปของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำมาจากซิลิกอน [1]

เวเฟอร์ซิลิกอนหนาประมาณ 300 μm ประกอบด้วย 2 ชั้นที่มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าแตกต่างกัน ซึ่งส่วนมากถูกเจือด้วยโบรอนและฟอสฟอรัส ผิวด้านหลังของเซลล์ทำจากโลหะทั้งหมดเพื่อรวบรวมประจุ ในขณะที่ด้านหน้าซึ่งเป็นส่วนรับแสงที่จะมาตกกระทบ ใช้กริดโลหะเพียง 1 ชิ้น เพื่อให้แสงผ่านเข้าสู่เซลล์ได้มากที่สุด โดยปกติผิวของเซลล์จะถูกเคลือบด้วยสารต้านการสะท้อนแสง (Antireflection coating) เพื่อลดความสูญเสียจากการสะท้อนให้เหลือน้อยที่สุด

2.1.1 กระบวนการทางฟิสิกส์ในเซลล์แสงอาทิตย์

1) การดูดกลืนแสง (Optical Absorption)

ในขณะที่แสงตกลงบนเซลล์แสงอาทิตย์ แสงบางส่วนถูกสะท้อน บางส่วนถูกดูดกลืนและส่วนที่เหลือสามารถผ่านเซลล์ไปได้ เนื่องจากซิลิกอนมีดัชนีการหักเห (Refractive Index) สูง (มากกว่า 3.5) ทำให้กว่า 30% ของแสงที่ตกกระทบถูกสะท้อน ดังนั้นเซลล์แสงอาทิตย์จึงมักถูกเคลือบด้วยสารต้านการสะท้อน ซึ่งโดยปกตินิยมเคลือบเป็นชั้นบางๆ ด้วยไททาเนียมไดออกไซด์ ทำให้ลดความสูญเสียที่เกิดจากการสะท้อนเหลือประมาณ 10% โดยปกติโฟตอนหรือควอนต้าของแสงทำปฏิกิริยากับสารด้วยการกระตุ้นอิเล็กตรอน กระบวนการที่สำคัญทางด้านพลังงานที่ใช้กับเซลล์แสงอาทิตย์เรียกว่า "การดูด-กลืนทางโฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric Absorption)" ด้วยเหตุนี้โฟตอนจึงถูกดูดกลืนอย่างสมบูรณ์แบบด้วยอิเล็กตรอนวงนอก อิเล็กตรอนได้รับพลังงานทั้งหมดจากโฟตอนแล้วกลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระ อย่างไรก็ตามในสารกึ่งตัวนำโฟตอนจะสามารถถูกดูดกลืนก็ต่อเมื่อพลังงานของมันมีค่าสูงกว่าช่องว่างแถบพลังงาน (Bandgap) โฟตอนที่มีพลังงานน้อยกว่าช่องว่างแถบพลังงานจะผ่านทะลุสารกึ่งตัวนำและไม่สามารถก่อให้การแปลงพลังงานอย่างไรก็ตามโฟตอนที่มีพลังงานสูงกว่าช่องว่างของแถบพลังงานก็จัดเป็นความสูญเสียอีกรูปแบบหนึ่งในด้านการแปลงพลังงาน เนื่องจากพลังงานส่วนที่เหลือจะถูกเปลี่ยนเป็นความร้อนในผลึกอย่างรวดเร็ว ในช่วงการทำปฏิกิริยาระหว่างสเปกตรัมโดยทั่วไปของรังสีแสงอาทิตย์กับเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากซิลิกอน ในกระบวนการแปลงพลังงาน พลังงานจะสูญเสียประมาณ 60% เพราะมีโฟตอนจำนวนมากมีพลังงานทั้งที่ต่ำกว่าและสูงกว่าช่องว่างแถบพลังงาน

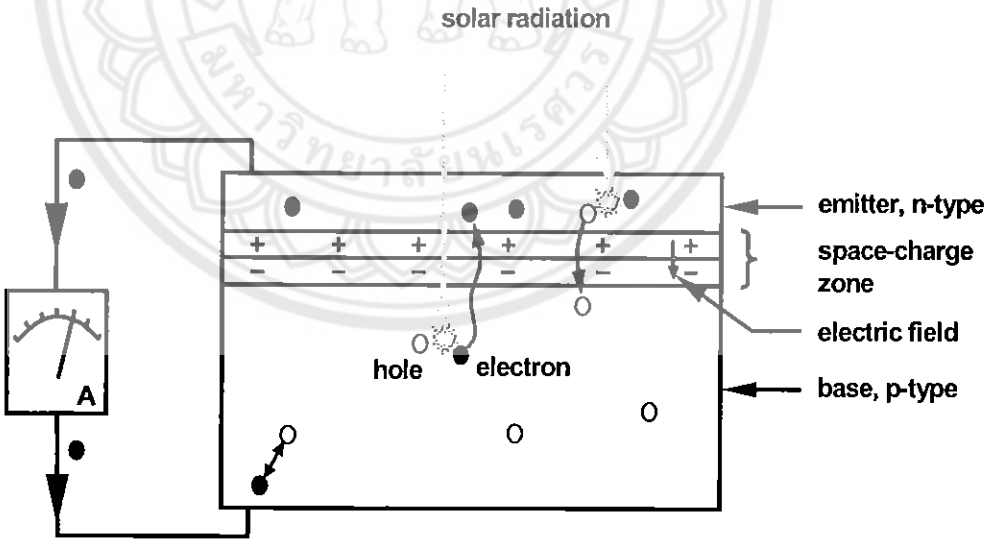
2) การรวมตัวของประจุพาหะ (Recombination of Charge Carriers)

การดูดกลืนแสงก่อให้เกิดคู่อิเล็กตรอน ดังนั้นในช่วงที่มีแสงปริมาณของประจุพาหะจึงมีค่ามากกว่าในช่วงเวลาที่มืด นั่นคือในขณะที่ไม่มีแสงปริมาณประจุพาหะจะมีค่าเท่ากับในช่วงเวลาที่มืด กระบวนการย้อนกลับนี้เรียกว่า "การรวมตัวของประจุพาหะ (Recombination)" และเป็นกระบวนการย้อนกลับจากกระบวนการสร้างประจุพาหะด้วยการดูดกลืนแสง การรวมตัวของประจุพาหะเกิดตามธรรมชาติแม้กระทั่งในกระบวนการสร้างประจุพาหะ ปริมาณของประจุพาหะสุทธิในขณะที่มีแสงจึงเป็นผลที่เกิดจากทั้งสองกระบวนการดังกล่าว

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

3) เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีแสงตกกระทบ

ส่วนประกอบหลักๆ ของเซลล์แสงอาทิตย์จะถูกแสดงไว้โดยสังเขปดังรูปที่ 2.2 อันได้แก่ อีมิตเตอร์ชนิดเอ็น (n-doped emitter) เบสชนิดพี (p-doped base) และบริเวณปลอดพาหะ (Depletion Region) โฟตอนที่มีพลังงานเพียงพอตกลงบนผิวของเซลล์แสงอาทิตย์ ผ่านทะลุอีมิตเตอร์ และบริเวณปลอดพาหะ แล้วถูกดูดกลืนในเบสชนิดพี ก่อให้เกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮล เนื่องจากอิเล็กตรอนเป็นพาหะส่วนน้อยภายในเบสชนิดพี จึงถูกเรียกว่า "ประจุพาหะส่วนน้อย" ซึ่งตรงกันข้ามกับโฮลที่เป็นประจุพาหะส่วนใหญ่ในบริเวณนี้ อิเล็กตรอนนี้แพร่เข้าไปในเบสชนิดพีจนกระทั่งถึงขอบของบริเวณปลอดพาหะ สนามไฟฟ้าในบริเวณเขตปลอดพาหะจะเร่งอิเล็กตรอนและพาอิเล็กตรอนไปยังด้านอีมิตเตอร์



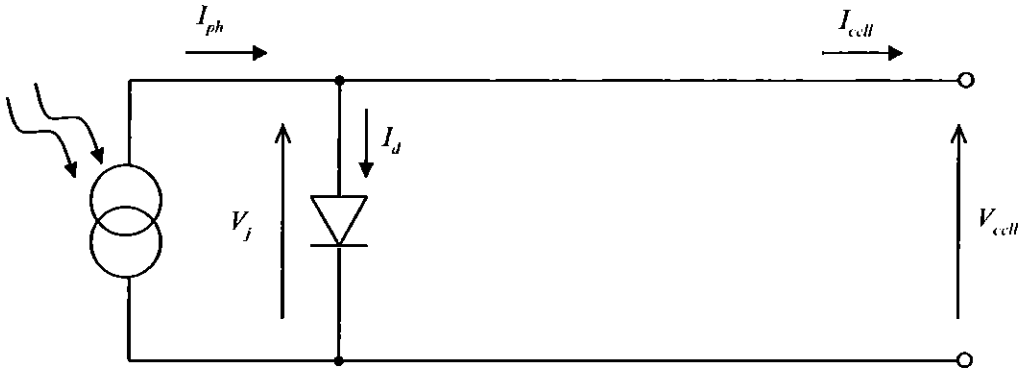
รูปที่ 2.2 หลักการทำงานโดยสังเขปของเซลล์แสงอาทิตย์ [2]

ด้วยเหตุผลดังกล่าว การแยกออกจากกันของประจุพาหะจึงเกิดขึ้น ด้วยเหตุนี้สนามไฟฟ้าจึงทำงานคล้ายกับเป็นตัวกลางในการแยก แต่ข้อแม้คือ ระยะทางการแพร่ของอิเล็กตรอนต้องมากเพียงพอให้อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ไปถึงบริเวณปลอดพาหะ ในกรณีที่ระยะทางการแพร่สั้น

เกินไป การรวมตัวของประจุพาหะจะเกิดขึ้นก่อนถึงบริเวณปลอดพาหะ ส่งผลให้เกิดการสูญเสียพลังงานการดูดกลืนควอนต้าของแสงในอีมิตเตอร์ก่อให้เกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮลเช่นกัน แต่เนื่องจากโฮลเป็นประจุพาหะส่วนน้อยในบริเวณอีมิตเตอร์ชนิดเอ็น ด้วยระยะทางการแพร่ที่มากเพียงพอ ทำให้โฮลเคลื่อนที่ไปจนถึงบริเวณปลอดพาหะ และถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า และถูกพาไปยังด้านเบสชนิดพี ถ้าการดูดกลืนควอนต้าของแสงเกิดขึ้นในบริเวณปลอดพาหะ อิเล็กตรอนและโฮลจะถูกแยกออกจากกันทันทีด้วยสนามไฟฟ้าที่มีในบริเวณนั้นนั่นเอง ผลจากการมีแสงตกกระทบจะได้ว่า ถ้าปริมาณของอิเล็กตรอนทางด้านอีมิตเตอร์ชนิดเอ็นเพิ่มขึ้น ปริมาณของโฮลทางด้านเบสชนิดพีก็จะเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดแรงดันไฟฟ้า ถ้าอีมิตเตอร์ชนิดเอ็นและเบสชนิดพีถูกนำมาต่อกันผ่านตัวต้านทาน อิเล็กตรอนจากด้านอีมิตเตอร์ไหลผ่านตัวต้านทานไปยังเบสแล้วรวมตัวกับโฮลในบริเวณนั้น อย่างไรก็ตาม การไหลของกระแสหมายถึงกำลังเอาท์พุต การไหลของกระแสนี้เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องตราบเท่าที่ยังคงมีแสงตกกระทบเซลล์ ผลก็คือพลังงานแสงอาทิตย์ถูกเปลี่ยนทันทีเป็นพลังงานไฟฟ้า

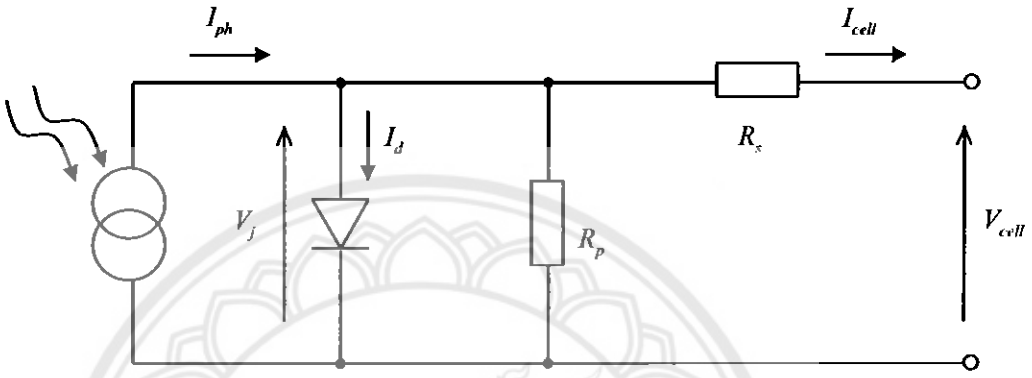
ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น เซลล์อาทิตย์ที่ถูกแสงจะสร้างประจุพาหะอิสระ ซึ่งทำให้เกิดกระแสไหลผ่านภาระ (Load) ที่ต่ออยู่ ปริมาณประจุพาหะอิสระที่เกิดขึ้นแปรผันตามค่าความเข้มของแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบ เช่นเดียวกับกระแสพลังแสง (I_{PH}) ซึ่งเกิดภายในเซลล์แสงอาทิตย์ ดังนั้นเซลล์แสงอาทิตย์ในอุดมคติจึงสามารถถูกแสดงด้วยวงจรสมมูลอย่างง่ายในรูปที่ 2.3 ซึ่งประกอบด้วยไดโอดที่เกิดขึ้นจากรอยต่อพีเอ็นและแหล่งจ่ายกระแสพลังแสง ที่มีค่ากระแสขึ้นอยู่กับค่าความเข้มของแสงอาทิตย์ ตัวต้านทานปรับค่าได้ถูกต่อเป็นภาระของเซลล์แสงอาทิตย์ กระบวนการทางคณิตศาสตร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ในอุดมคติที่ถูกแสงนำไปสู่สมการต่อไปนี้

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



รูปที่ 2.3 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ในอุดมคติที่ต่อกับภาระ [1]

ในสภาพความเป็นจริง เนื้อสารกึ่งตัวนำและหน้าสัมผัสโลหะของเซลล์แสงอาทิตย์ก่อให้เกิดค่าความต้านทานอนุกรม R_S (Parasitic series resistance) ในวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ในขณะที่กระแสรั่วรอบๆขอบของเซลล์ซึ่งเกิดจากความไม่สมบูรณ์ในผิวของเซลล์และตำหนิที่เกิดจากการเชื่อมต่อหน้าสัมผัสก่อให้เกิดค่าความต้านทานขนาน R_P (Parasitic parallel resistance) ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์จริงที่ต่อกับภาระ [1]

กระแสที่ไหลผ่านไดโอดในรูปที่ 2.4 สามารถอธิบายด้วยสมการไดโอดต่อไปนี้

$$I_d = I_o\left[\exp\left(\frac{qV_j}{AkT_{cell}}\right)-1\right] \tag{2.2}$$

โดยที่ I_o คือ กระแสอิ่มตัวย้อนกลับ (Reverse saturation current) (A)

q คือ ประจุของอิเล็กตรอน (1.6x10-19 C)

V_j คือ แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมรอยต่อพีเอ็น (V)

k คือ ค่าคงที่ของโบลท์ซมันน์ (8.65x10-5eV/K)

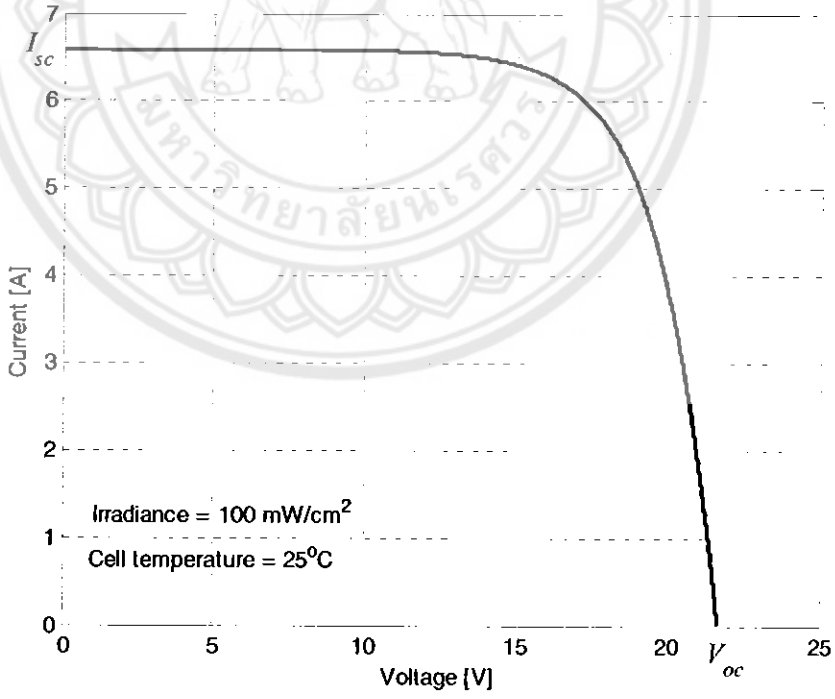
T_{cell} คือ อุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ (K)

A คือ ค่าความสมบูรณ์ของรอยต่อพีเอ็น

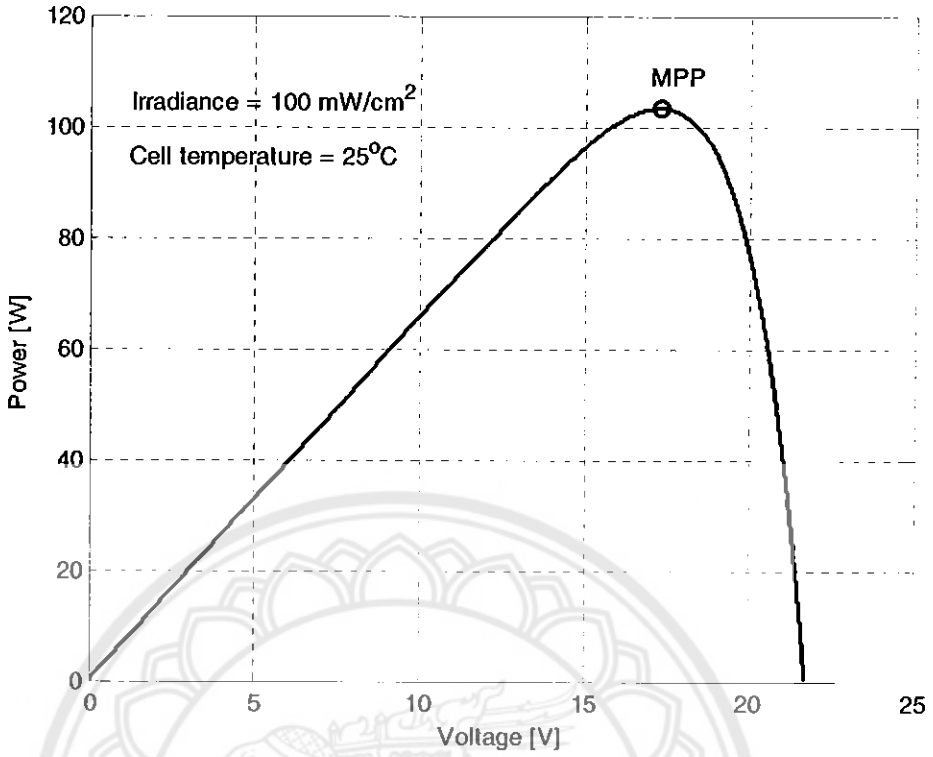
เราสามารถเขียนสมการของกระแสของเซลล์แสงอาทิตย์ I_{cell} ได้ดังนี้

$$I_{cell} = I_{ph} - I_o \cdot \left[\exp\left\{ \frac{q}{AkT_{cell}} \left(V_{cell} + R_s I_{cell} \right) \right\} - 1 \right] - \left(\frac{V_{cell} + R_s I_{cell}}{R_p} \right) \quad (2.3)$$

ลักษณะเส้นโค้งคุณลักษณะกระแสและแรงดันของแผงเซลล์อาทิตย์หนึ่งๆสามารถแสดงดังในรูปที่ 2.5 ภายใต้สภาพอากาศหนึ่งๆแผงเซลล์แสงอาทิตย์จ่ายกำลังเอาท์พุตสูงสุดเมื่อทำงานที่จุดกำลังสูงสุด (Maximum power point : MPP) โดยเราคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าของแผง จากผลคูณของกระแสและแรงดันของแผงจากรูปที่ 2.5 เราสามารถสร้างเส้นโค้งคุณลักษณะกำลังและแรงดันของแผงได้ดังรูปที่ 2.6 แผงเซลล์แสงอาทิตย์สร้างกระแสสูงสุดเท่ากับค่ากระแสลัดวงจร (Short-circuit current, I_{SC}) เมื่อแรงดันของแผงมีค่าเท่ากับศูนย์ ซึ่งที่จุดนี้จะไม่มีกำลังเอาท์พุตออกมา เนื่องจากผลคูณของกระแสกับแรงดันมีค่าเท่ากับศูนย์ ในทางกลับกันค่ากระแสเอาท์พุตของแผงมีค่าเป็นศูนย์เมื่อแรงดันของแผงมีค่าเท่ากับแรงดันเปิดวงจร (Open-circuit voltage, V_{OC}) ทำให้กำลังเอาท์พุตมีค่าเป็นศูนย์เช่นกัน อย่างไรก็ตามระหว่างจุดทั้งสองดังกล่าว กำลังเอาท์พุตของแผงมีค่ามากกว่าศูนย์ โดยจุดกำลังสูงสุดถูกแสดงด้วยวงกลมเล็กในรูป



รูปที่ 2.5 เส้นโค้งคุณลักษณะกระแสและแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์



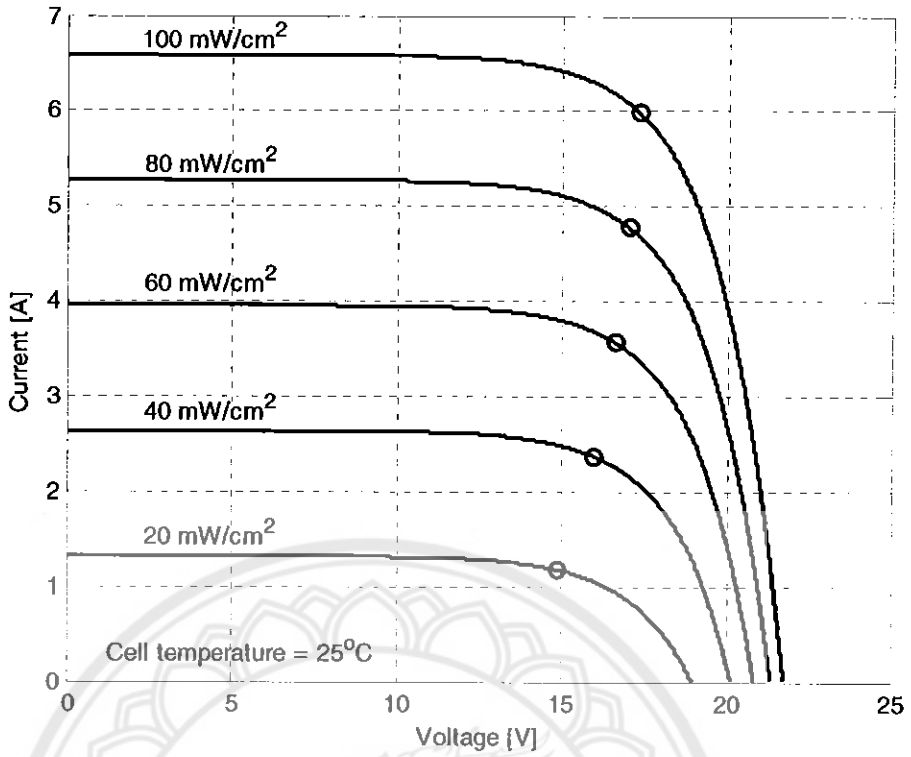
รูปที่ 2.6 ตัวอย่างเส้นโค้งคุณลักษณะกำลังและแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

เส้นโค้งคุณลักษณะกระแสและแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ระดับความเข้มแสงต่างๆ แสดงได้ดังรูปที่ 2.7 กระแสพลังแสงเปลี่ยนแปลงแบบเชิงเส้นกับค่าความเข้มแสงเมื่ออุณหภูมิของเซลล์คงที่ ดังนั้นค่ากระแสลัดวงจรจึงแปรผันตรงกับค่าความเข้มแสง

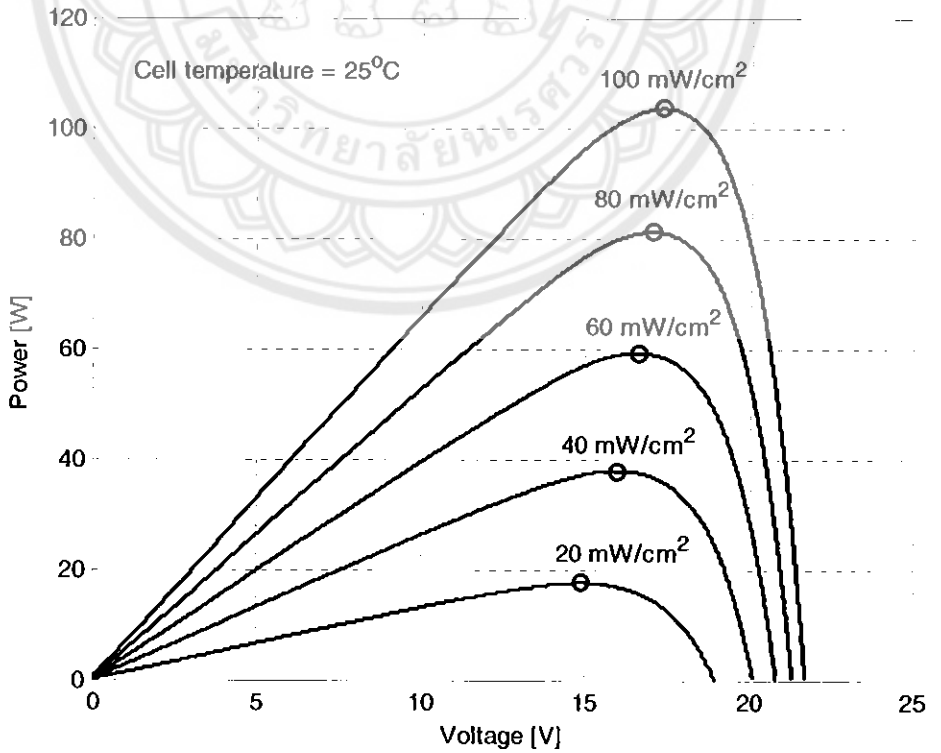
ภายใต้เงื่อนไขการเปิดวงจร (เมื่อไม่พิจารณาค่าความต้านทานขนาน) จะได้

$$V_{OC} = \frac{n_S AkT_{cell}}{q} \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_o}\right) \tag{2.4}$$

เนื่องจากกระแสพลังแสงมีค่าแปรผันตรงกับความเข้มของแสงดังสมการที่ (2.1) ดังนั้นแรงดันเปิดวงจรจึงแปรผันเป็นฟังก์ชันลอกอริทึม เส้นโค้งคุณลักษณะกำลังและแรงดันที่สัมพันธ์กับรูปที่ 2.7 แสดงได้ดังรูปที่ 2.8 โดยจะเห็นว่ากำลังเอาท์พุตของแผงมีค่าลดลงตามค่าความเข้มแสง

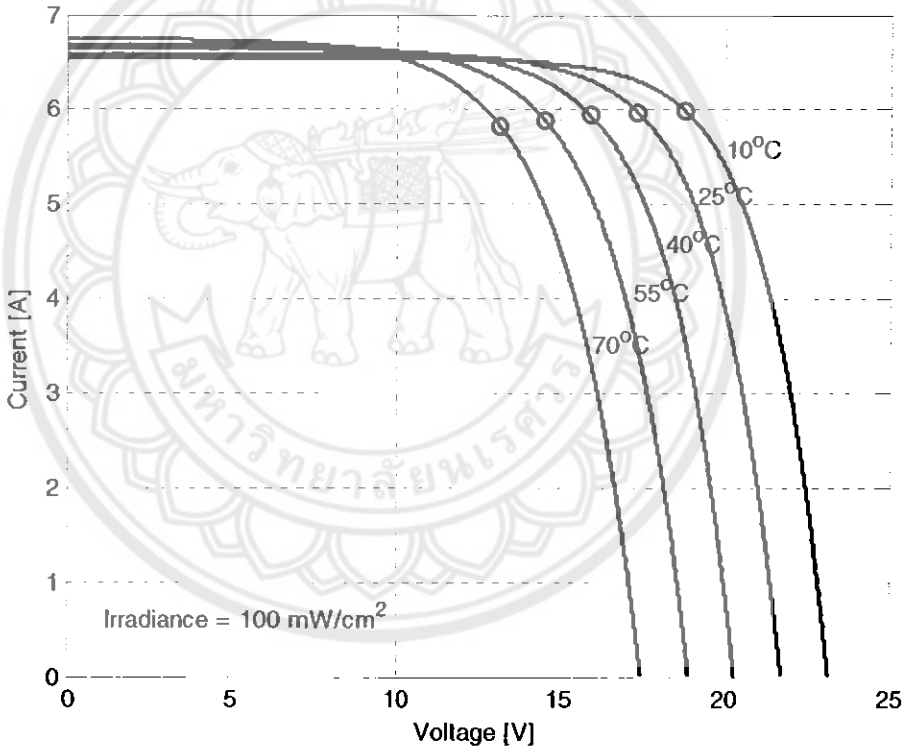


รูปที่ 2.7 ผลของความเข้มแสงต่อเส้นโค้งคุณลักษณะกระแสและแรงดัน

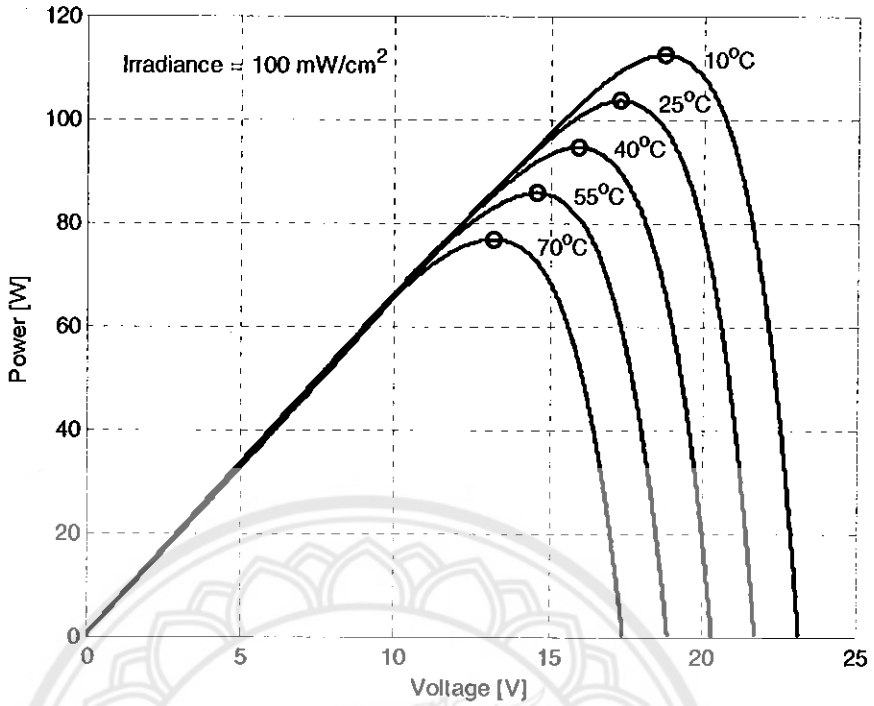


รูปที่ 2.8 ผลของความเข้มแสงต่อเส้นโค้งคุณลักษณะกำลังและแรงดัน

คุณลักษณะของกระแสและแรงดันสำหรับค่าอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ที่แตกต่างกันแสดงได้ดังรูปที่ 2.9 ในขณะที่อุณหภูมิสูงขึ้นกระแสพลังแสงมีค่าเพิ่มขึ้นตามเพราะแถบช่องว่างพลังงานแคบลงและระยะแพร่ของประจุพาหะมีค่าเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของเซลล์ส่งผลให้กระแสลัดวงจรมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย (ประมาณ 0.07%/°C สำหรับเซลล์ที่ทำจากซิลิกอน) ในทางตรงกันข้าม แรงดันเปิดวงจรขึ้นอยู่กับอุณหภูมิอย่างมาก การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิทำให้กระแสอิ่มตัวย้อนกลับเพิ่มขึ้นอย่างมาก และช่องว่างแถบพลังงานแคบลง ส่งผลให้แรงดันเปิดวงจรมีค่าลดลง จากการแสดงให้เห็นในรูป แรงดันเปิดวงจรมีค่าลดลงตามอุณหภูมิในลักษณะค่อนข้างเชิงเส้นในอัตราประมาณ 0.4%/°C สำหรับเซลล์ที่ทำจากซิลิกอน ผลของอุณหภูมิที่มีต่อเส้นโค้งคุณลักษณะกำลังและแรงดันแสดงได้ดังรูปที่ 2.10 จะเห็นว่าอุณหภูมิมีผลอย่างมากต่อค่ากำลังเอาท์พุตที่ระดับแรงดันสูงกว่าแรงดันที่จุดกำลังสูดสุด [1, 2]



รูปที่ 2.9 ผลของอุณหภูมิต่อเส้นโค้งคุณลักษณะกระแสและแรงดัน



รูปที่ 2.10 ผลของอุณหภูมิต่อเส้นโค้งคุณลักษณะกำลังและแรงดัน

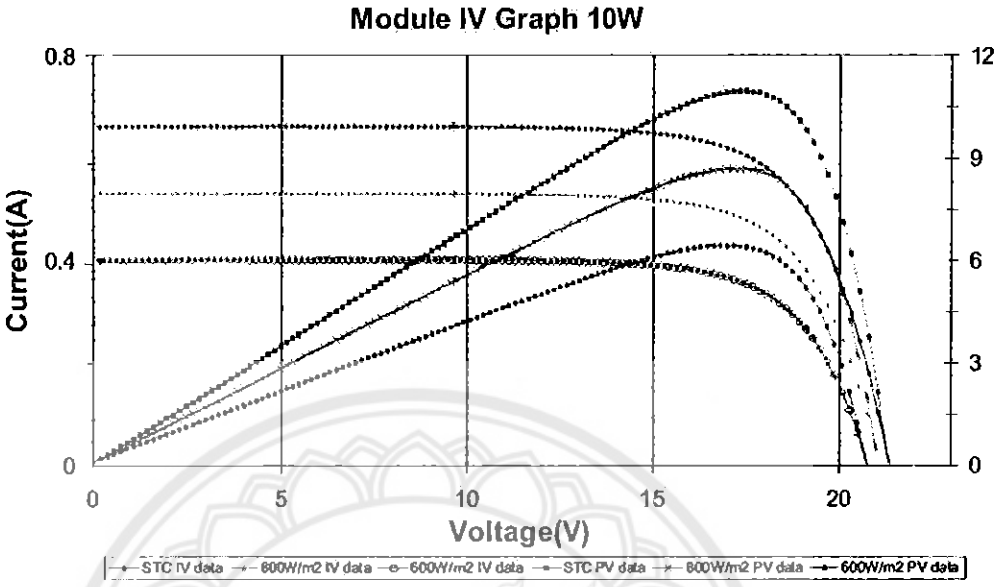
2.1.2 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในโครงงาน

แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่นำมาใช้ในโครงงานนี้เป็นชนิดซิลิกอนผลึกเดี่ยว (Mono-crystalline silicon) ของบริษัท SuntechPower รุ่น STP010S-12/kb ซึ่งมีคุณสมบัติดังนี้

ชนิดของเซลล์ (Cell type)	ซิลิกอนผลึกเดี่ยว
ขนาด กว้างxยาวxสูง (Dimension)	310x366x18 mm
น้ำหนัก (Weight)	1.5 kg
จำนวนเซลล์และการเชื่อมต่อ (No. of cells and connections)	36 (4x9)
แรงดันเปิดวงจร (Open circuit voltage: Voc)	21.6 V
แรงดันที่จุดกำลังสูงสุด (Optimum operating point voltage: Vmpp)	17.2 V
กระแสลัดวงจร (Short circuit current: Isc)	0.66 A
กระแสที่จุดกำลังสูงสุด (Optimum operating point current: Impp)	0.58 A
กำลังสูงสุดภายใต้เงื่อนไข STC (Maximum power at STC: Pmpp)	10 Wp
อุณหภูมิขณะใช้งาน (Operating temperature)	-40 – 80°C
ระดับแรงดันสูงสุดของระบบ (Maximum system voltage)	715 V

หมายเหตุ STC: ความเข้มแสง 1000 W/m^2 อุณหภูมิของแผง 25°C และมวลอากาศ = 1.5

เส้นโค้งคุณลักษณะของกระแสและแรงดันรวมทั้งเส้นโค้งคุณลักษณะของกำลังและแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์รุ่น STP010S-12/kb แสดงได้รูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 เส้นโค้งคุณลักษณะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์รุ่น STP010S-12/kb

ที่มา: Suntech Power

เซลล์แสงอาทิตย์เป็นการเปลี่ยนพลังงานการแผ่รังสีแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า โดยจะเห็นได้ว่าพลังงานที่ได้ออกมานั้นขึ้นอยู่กับค่าความเข้มของแสงและอุณหภูมิ ค่าความเข้มของแสงมากจะทำให้ได้กำลังไฟฟ้าออกมามาก ส่วนอุณหภูมิสูงนั้นจะทำให้ได้พลังงานที่ออกมาลดลง ซึ่งค่าความเข้มแสงและอุณหภูมิในแต่ละวันมีค่าไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับเวลา สภาพอากาศและสถานที่ การที่ทำให้เซลล์แสงอาทิตย์ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุด ณ เวลาหนึ่งๆนั้นจำเป็นจะต้องให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์หันหน้าตรงกับลำแสงที่มาตกกระทบจึงได้มีการคิดค้นระบบการติดตามแสงอาทิตย์ขึ้นมาเพื่อที่จะได้ผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุดที่สอดคล้องกับ วัน เวลา สภาพอากาศและสถานที่ต่างๆ

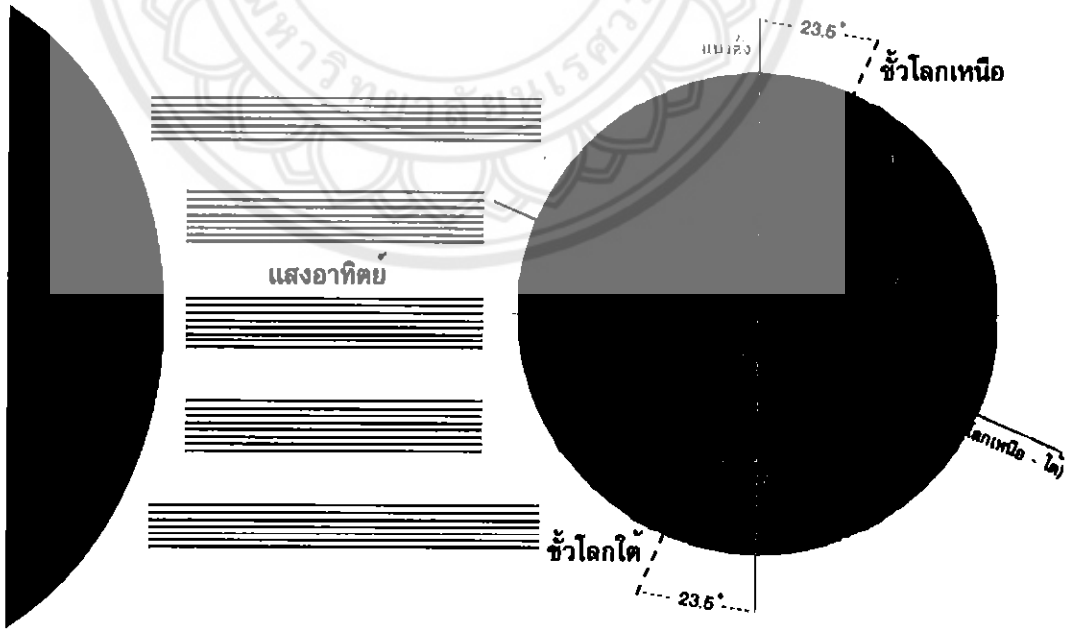
2.2 ทิศทางการรับแสงจากดวงอาทิตย์

โลกโคจรรอบดวงอาทิตย์ด้วยแกนโลกที่เอียงประมาณ 23.5° จากแนวตั้งดังรูปที่ 2.12 มุมที่เกิดขึ้นระหว่างเส้นที่เชื่อมจุดศูนย์กลางของดวงอาทิตย์และโลกกับภาพฉาย (Projection) ของเส้นดังกล่าวบนระนาบที่ล้อมรอบด้วยเส้นศูนย์สูตร (Equatorial plane) มีชื่อเรียกว่า "มุมลาดเอียง" (Declination angle: δ) โดยนิยามดังกล่าวเกิดมาจากความจริงที่ว่า โลกหมุนรอบแกนหนึ่งซึ่งทำมุมประมาณ 66.5° กับระนาบของการโคจรรอบดวงอาทิตย์ มุมลาดเอียงมีค่าเปลี่ยนแปลงจากค่าสูงสุดประมาณ +23.5° ในวันที่ 21 มิถุนายน จนถึงค่าต่ำสุดประมาณ -23.5° ในวันที่ 21 ธันวาคม และมีค่าเท่ากับศูนย์ในวันที่ 21 มีนาคม และ 22 กันยายน โดยมีสมการคำนวณหาค่ามุมลาดเอียง [3] คือ

$$\delta = 23.45 \sin\left[\frac{360}{365}(264 + n)\right] \tag{2.5}$$

โดยที่ δ คือมุมลาดเอียง (°)

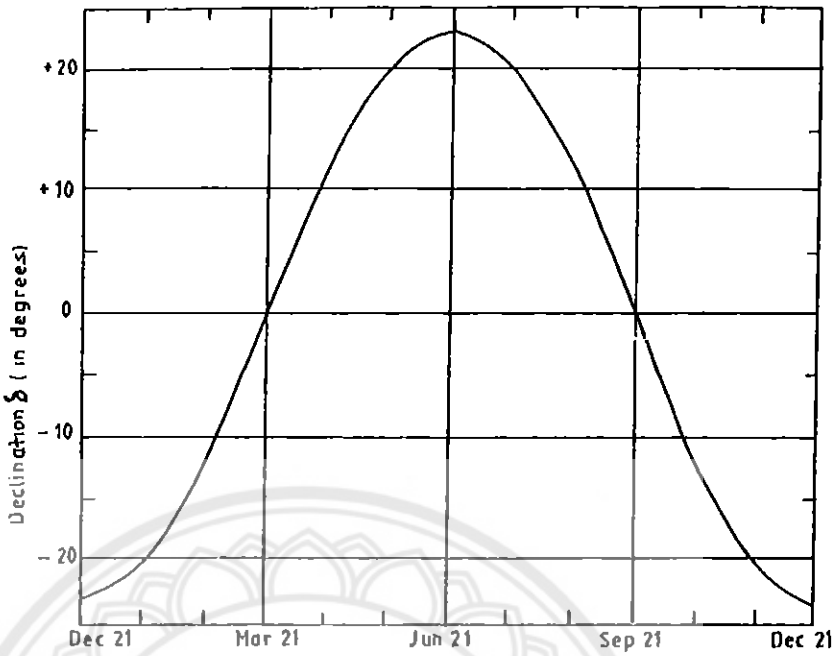
n คือลำดับวันในรอบปี



รูปที่ 2.12 การรับแสงจากดวงอาทิตย์ในขณะที่แกนโลกเอียงประมาณ 23.5°

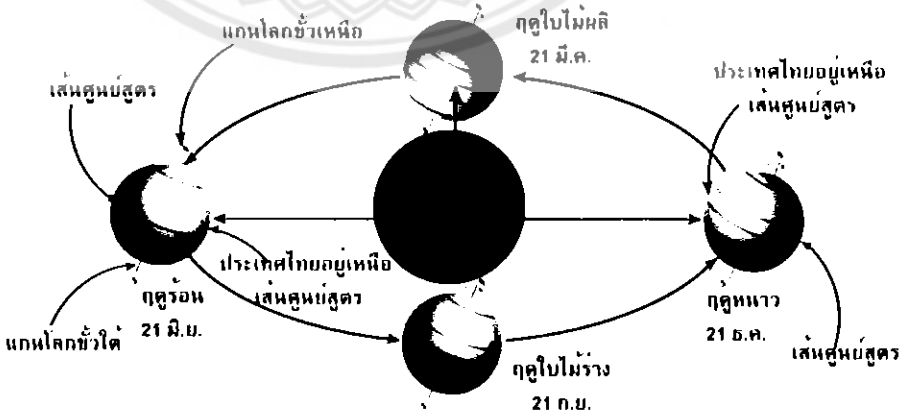
ที่มา: http://www.myfirstbrain.com

จากสมการข้างต้นสามารถแสดงกราฟมุมลาดเอียงในหนึ่งปีได้ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 มุมลาดเอียงในหนึ่งปี [3]

เมื่อแกนโลกเอียง ทำให้มีผลต่อการรับแสงของโลกซึ่งในแต่ละฤดูกาลจะรับแสงแตกต่างกันออกไปดังรูปที่ 2.14 เมื่อพิจารณาตำแหน่งของจังหวัดพิษณุโลกซึ่งอยู่ที่ละติจูดที่ประมาณ 16.7° N ตอนเที่ยงวันในฤดูหนาวตำแหน่งของจังหวัดพิษณุโลกจึงทำมุมเพิ่มอีกประมาณ 23.5° กับลำแสงของดวงอาทิตย์ และตอนเที่ยงวันในฤดูร้อนทำมุมลดลงประมาณ 23.5° กับลำแสงของดวงอาทิตย์ทำให้อยู่ใต้แนวเส้นที่เชื่อมจุดศูนย์กลางของดวงอาทิตย์และโลก

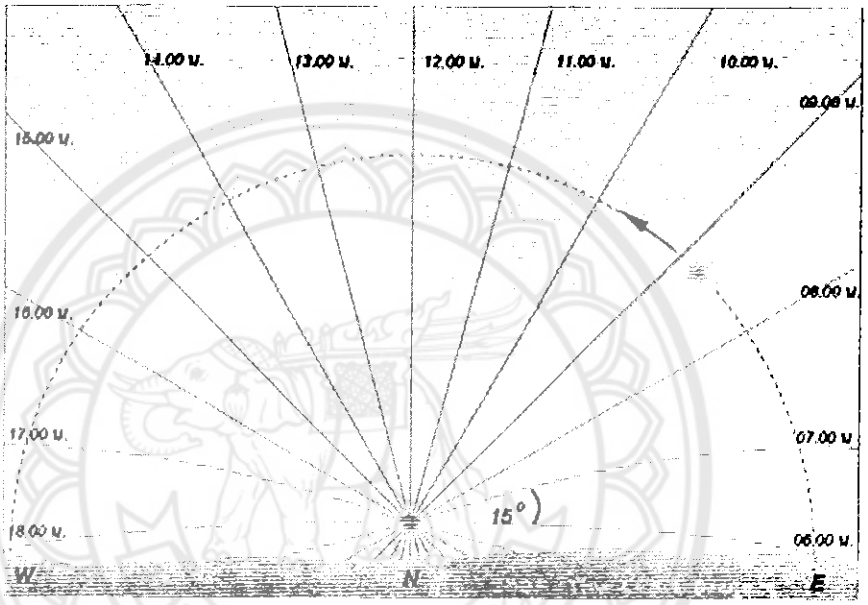


รูปที่ 2.14 การรับแสงของโลกในขณะโคจรรอบดวงอาทิตย์

ที่มา: http://www.baannatura.com

จากข้อมูลข้างต้น การติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้ตั้งฉากกับลำแสงของดวงอาทิตย์ช่วงกลางวันในฤดูหนาวของจังหวัดพิษณุโลกควรทำมุมกับแนวระดับเท่ากับ 16.7° + 23.5° = 40.2° หรือประมาณ 40° และหันแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไปทางทิศใต้ ในขณะที่ช่วงฤดูร้อนคือ 16.7° - 23.5° = -6.8° หรือประมาณ 7° โดยหันแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไปทางทิศเหนือ

การหมุนรอบตัวเองและการโคจรรอบดวงอาทิตย์ของโลกทำให้ตำแหน่งของดวงอาทิตย์บนท้องฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงตลอดทั้งวันดังแสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 ตำแหน่งของดวงอาทิตย์บนท้องฟ้าแต่ละช่วงเวลาในหนึ่งวัน

ที่มา: www.lesa.biz

2.3 ระบบติดตามแสงอาทิตย์

ระบบในการติดตามแสงอาทิตย์ในปัจจุบัน มีด้วยกัน 2 ระบบ คือ ระบบติดตามแสงอาทิตย์แบบแกนเดี่ยว และระบบติดตามแสงอาทิตย์แบบสองแกน ในระบบแกนเดี่ยวนั้นจะมีการติดตามแสงอาทิตย์จากทิศตะวันออกไปยังทิศตะวันตกโดยมีจุดหมุนเพียงจุดเดียว ส่วนระบบสองแกนจะมีการเคลื่อนที่ที่เพิ่มขึ้นมาจากระบบหนึ่งแกนนอกจากทิศตะวันออกไปยังทิศตะวันตกแล้วยังสามารถเอียงในแนวทิศเหนือไปยังทิศใต้ได้อีกด้วยรูปแบบจึงเป็นแบบติดตามแสงอาทิตย์ตลอดเวลา ส่วนในระบบแกนเดี่ยวนั้นจะเคลื่อนที่เป็นรูปแบบที่ค่อนข้างแน่นอนโดยอยู่บนพื้นฐานการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ใน 1 ปี ดังนั้นในช่วงเวลาที่มีเมฆหนาซึ่งแสงอาทิตย์จะกระจัดกระจายเต็มท้องฟ้าจึงยังคงสามารถเคลื่อนที่ใกล้เคียงตำแหน่งจริงของดวงอาทิตย์ ส่วนระบบสองแกนนั้นจะไม่สามารถหาตำแหน่งที่แท้จริงของดวงอาทิตย์ได้จึงทำให้เกิดการสูญเสียกำลังไฟฟ้ามากกว่า

ระบบแกนเดียวในกรณีดังกล่าวซึ่งระบบติดตามแสงอาทิตย์แบบแกนเดี่ยวนั้นมีอยู่ 3 รูปแบบและมีลักษณะที่แตกต่างกันออกไป ดังนี้

ก) ระบบติดตามแสงอาทิตย์แบบแกนเดี่ยว มีหลายประเภทได้แก่ แบบแกนนอน (Horizontal single axis tracker, HSAT) แบบแกนดิ่ง (Vertical single axis tracker, VSAT) และแกนเอียง (Tilted single axis tracker, TSAT) เป็นต้น

ข) ในระบบติดตามแสงอาทิตย์แบบแกนนอน แกนหมุนอยู่ในแนวนอนเทียบกับพื้นดินและวางตัวตามแนวทิศเหนือ-ใต้ ในกรณีที่ติดตั้งหลายระบบสามารถใช้เสาแต่ละด้านของแกนหมุนรวมกันได้เพื่อลดต้นทุนการสร้าง

ค) ในระบบติดตามแสงอาทิตย์แบบแกนดิ่ง แกนหมุนอยู่ในแนวดิ่งเทียบกับพื้นดิน ในรอบหนึ่งวันระบบจะหมุนจากทิศตะวันออกไปตะวันตก ในการติดตั้งใช้งานในพื้นที่ที่มีละติจูดสูง ระบบแบบแกนดิ่งจะเหมาะสมกว่าระบบแบบแกนนอน แผงเซลล์แสงอาทิตย์อาจติดตั้งในระนาบดิ่ง หรือด้วยมุมเอียงที่คงที่หรือปรับค่าได้สำหรับแต่ละฤดูกาล ระบบดังกล่าวเหมาะกับพื้นที่ในละติจูดสูงซึ่งมีเส้นทางการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์บนท้องฟ้าไม่สูงนัก และมีช่วงเวลาในฤดูร้อนยาวนาน

ง) ในระบบติดตามแสงอาทิตย์แบบแกนเอียง แกนหมุนถูกติดตั้งโดยมีมุมเอียงจากแนวระดับ ในทางปฏิบัติการติดตั้งมุมเอียงของแกนมีค่าจำกัดเพื่อลดความสูงของปลายแกนที่ต้องยกขึ้นและลดการปะทะกับแรงลม [4]

คุณสมบัติของระบบติดตามแสงอาทิตย์แบบแกนเดี่ยว

1) การเคลื่อนที่ติดตามแสงอาทิตย์ของระบบจะเคลื่อนที่จากทิศตะวันออกไปยังทิศตะวันตันโดยใช้จุดหมุนเพียงจุดเดียว
2) ได้พลังงานเพิ่มขึ้นมากกว่าระบบที่ไม่ติดตามแสงอาทิตย์ 34%
3) ง่ายต่อการออกแบบระบบ
4) ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาต่ำ
5) ราคาต่ำกว่าเมื่อเทียบกับระบบติดตามแสงอาทิตย์แบบสองแกน
6) โอกาสที่ระบบจะทำงานผิดพราดต่ำ

คุณสมบัติของระบบติดตามแสงอาทิตย์แบบสองแกน

1) การเคลื่อนที่ติดตามแสงอาทิตย์ของระบบจะเคลื่อนที่จากทิศตะวันออกไปยังทิศตะวันตกและเอียงในแนวเหนือใต้โดยใช้จุดหมุนสองจุดหมุน
2) ได้พลังงานเพิ่มขึ้นมากกว่าระบบที่ไม่ติดตามแสงอาทิตย์ 37%
3) มีความยุ่งยากในการออกแบบระบบเนื่องจากใช้มอเตอร์และตัวรับรู้มาก

4) ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาสูง

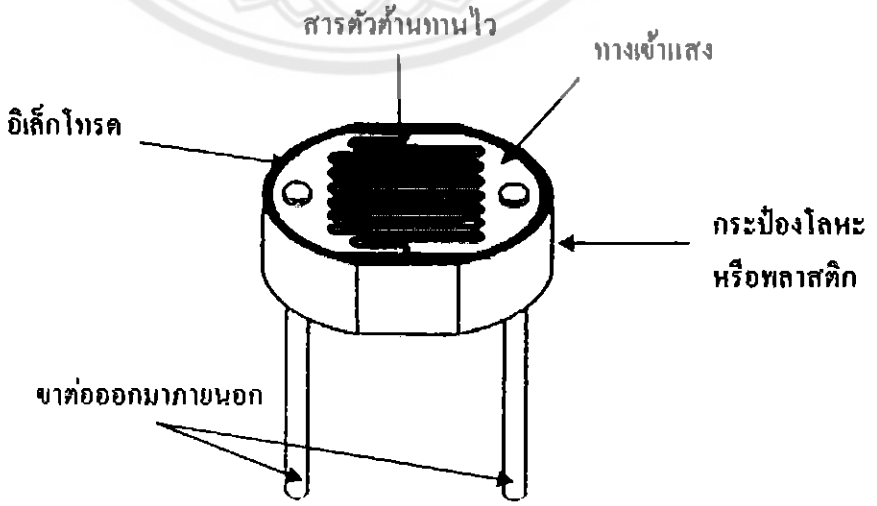
5) ราคาอุปกรณ์และค่าใช้จ่ายในการติดตั้งที่สูง

6) โอกาสที่ระบบจะทำงานผิดพราดสูง เนื่องจากอุปกรณ์มากกว่า

ดร.ลูบิท (Dr.Lubitz) จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกวลฟ์ (University of Guelph) ได้ทำการศึกษาระบบการติดตามแสงอาทิตย์ 217 แห่งในอเมริกาเหนือและได้เขียนรายงานผลการศึกษาซึ่งได้พบว่าความแตกต่างระหว่างการใช้ระบบติดตามแสงอาทิตย์แบบแบบแกนเดี่ยวและแบบสองแกน ทำให้ได้พลังงานแตกต่างกันเพียง 3-4% ถึงแม่ว่าระบบติดตามแสงอาทิตย์แบบสองแกนจะมีความแม่นยำในการติดตามแสงมากกว่าแต่เมื่อมองภาพรวมแล้วระบบการติดตามแสงอาทิตย์แบบแกนเดี่ยวจะมีประสิทธิภาพดีเมื่อพิจารณาการใช้งานในระยะยาวดังนั้นจากเหตุผลดังกล่าวแล้วโครงงานชิ้นนี้จึงได้เลือกการใช้ระบบติดตามแสงอาทิตย์แบบแกนเดี่ยว [4]

2.4 ตัวต้านทานไวแสง

ตัวทานไวแสง สามารถเปลี่ยนสภาพทางความต้านทานไฟฟ้าได้เมื่อมีแสงมาตกกระทบดังนั้นจึงถูกเรียกว่า โฟโตรีซีสเตอร์ (Photoresistor) หรือ โฟโตคอนดัคเตอร์ (Photoconductor) ซึ่งเป็นตัวต้านทานที่ทำมาจากสารกึ่งตัวนำ สามารถแบ่งออกได้เป็นประเภทแคดเมียมซัลไฟด์ (Cadmium sulfide: Cds) และแคดเมียมซิลินายด์ (Cadmium selenide: CdSe) โดยนำมาฉาบบนแผ่นเซรามิกที่ใช้เป็นฐานรองแล้วต่อขาจากสารที่ฉาบไว้ดังรูปที่ 2.16 ส่วนที่ขดเป็นแนวเล็กๆทำหน้าที่เป็นตัวต้านทานไวแสง โดยเส้นแนวนี้จะแบ่งพื้นที่ออกเป็นสองส่วน ซึ่งส่วนที่ทำหน้าที่เป็นตัวนำไฟฟ้าที่สัมผัสกับตัวต้านทานไวแสงใช้สำหรับต่อขาออกมาภายนอก เรียกว่า อิเล็กโทรด [2]

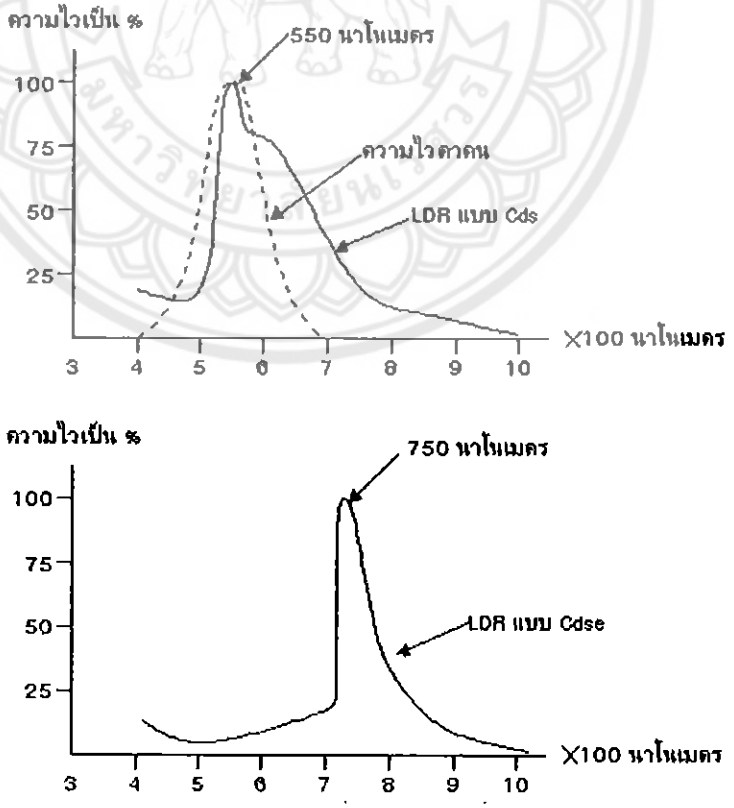


รูปที่ 2.16 โครงสร้างของตัวต้านทานไวแสง [2]

เนื่องจากตัวต้านทานไวแสงทำมาจากวัสดุสารกึ่งตัวนำ ทำให้เมื่อแสงตกกระทบจะถ่ายทอดพลังงานให้สารที่ฉาบอยู่ และเกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮลขึ้น (Electron-hole pair) การที่เกิดโฮลและอิเล็กตรอนอิสระมาก จะทำให้ความต้านทานไฟฟ้าลดลง ดังนั้นยิ่งมีค่าความเข้มของแสงที่มาตกกระทบมากเท่าไร ความต้านทานจะยิ่งลดลงแปรตามแสงนั้น โดยตัวต้านทานไวแสงแต่ละประเภทจะมีความไวต่อแสงในความถี่ที่ต่างกัน สามารถแสดงได้ดังซึ่งแสดงค่าแสงความถี่ต่างๆ ของตัวต้านทานไวแสงแต่ละประเภท

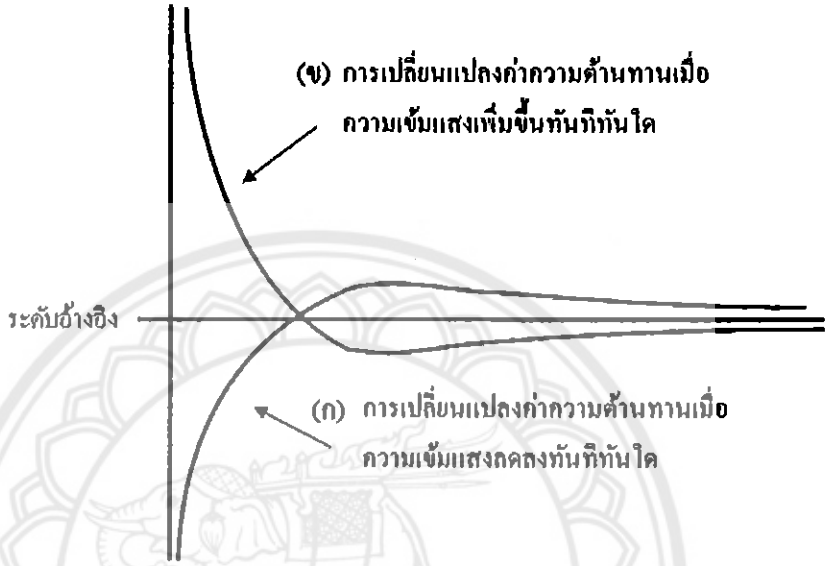
ในส่วนของแสงที่ตกกระทบนั้นแสงในช่วงความยาวคลื่นที่มีค่าประมาณ 400-1,000 nm เท่านั้นที่สามารถใช้ได้ ซึ่งเป็นช่วงคลื่นที่แคบๆ เมื่อเทียบกับการทำงานของอุปกรณ์ไวแสงประเภทอื่นๆ อย่างไรก็ตามแสงในช่วงคลื่นนี้มีอยู่ในแสงอาทิตย์ แสงจากหลอดไส้และแสงจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ซึ่งมีช่วงความยาวคลื่นหลายค่าที่ตัวต้านทานไวแสงสามารถตอบสนองได้ไวที่สุด [2]

โดยทั่วไปตัวต้านทานไวแสงที่ทำจากแคดเมียมซัลไฟด์จะไวต่อแสงที่มีความยาวคลื่นที่อยู่ในช่วง 500 nm ซึ่งเรามองเห็นเป็นสีเขียวไปจนถึงสีเหลือง สำหรับตัวต้านทานไวแสงบางตัวความยาวคลื่นที่ไวที่สุดมีค่าใกล้เคียงกับความยาวคลื่นที่ดวงตาคนตอบสนองได้ไวที่สุด จึงถูกใช้ทำเป็นตัววัดแสงในกล้องถ่ายรูป ในกรณีที่ตัวต้านทานไวแสงทำจากแคดเมียมซิลินายด์มีความไวต่อความยาวคลื่นในช่วง 700 nm ซึ่งอยู่ในช่วงแสงอินฟราเรด [2]



รูปที่ 2.17 ความไวต่อแสงของตัวต้านทานไวแสง [2]

อัตราส่วนระหว่างความต้านทานของตัวต้านทานไวแสงขณะที่ไม่มีแสงและมีแสง มีค่าแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับรุ่น โดยทั่วไปค่าความต้านทานในขณะที่ไม่มีแสงจะมีค่ามากกว่า 0.5 MΩ ในขณะที่มืดสนิทอาจขึ้นไปได้มากกว่า 2 MΩ ในขณะที่มีแสงตกกระทบจะมีค่าไม่เกิน 10 – 20 kΩ หรือในบางรุ่นอาจมีค่าลดลงจนเหลือน้อยกว่า 1 Ω โดยปกติตัวต้านทานไวแสงสามารถทนแรงดันสูงสุดได้ไม่ต่ำกว่า 100 V และมีกำลังสูญเสียประมาณ 50 mW

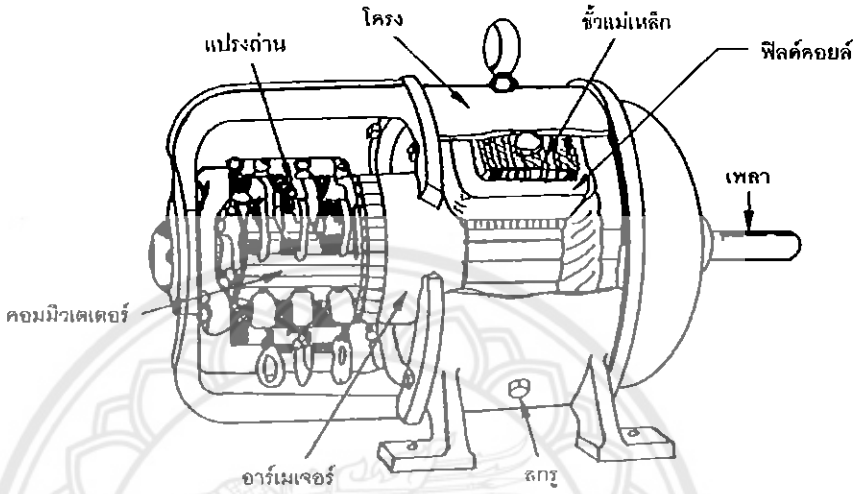


รูปที่ 2.18 การเปลี่ยนค่าความต้านทานของตัวต้านทานไวแสง [2]

นอกเหนือจากลักษณะสมบัติต่างๆที่กล่าวมาข้างต้น คุณลักษณะอีกอย่างหนึ่งที่สำคัญคือปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเมื่อความเข้มแสงเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลัน ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.18 (ก) ถ้าหากตัวต้านทานไวแสงได้รับแสงที่มีความเข้มสูงขึ้น ความต้านทานจะมีค่าต่ำและในทันทีที่ความเข้มของแสงถูกลดลงเหลือเพียงระดับอ้างอิง ความต้านทานมีค่าค่อยๆเพิ่มขึ้นไปจนมากกว่าระดับอ้างอิงก่อนจะลดลงมาอยู่ในระดับอ้างอิง ในทำนองเดียวกันถ้าความเข้มแสงมีค่าน้อยแล้วเปลี่ยนความเข้มเป็นระดับอ้างอิงทันทีดังรูปที่ 2.18 (ข) ความต้านทานจะลดต่ำลงกว่าระดับอ้างอิงก่อนจะเพิ่มกลับไปอยู่ในระดับอ้างอิง ในความเข้มแสงเท่ากันตัวต้านทานไวแสงแบบแคดเมียมซิลินายด์จะใช้เวลาในการเข้าสู่สถานะอยู่ตัวน้อยกว่าแบบแคดเมียมซัลไฟต์ แต่เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานเลยระดับอ้างอิงไปมากกว่า และใช้เวลานานกว่าในการเปลี่ยนระดับความต้านทานจากค่าหนึ่งไปอีกค่าหนึ่ง [2]

2.5 การควบคุมการหมุนของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

การหมุนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้ไปในทิศทางที่ต้องการในโครงงานนี้เลือกใช้มอเตอร์กระแสตรงในการหมุนเพื่อให้สอดคล้องกับกระแสไฟฟ้าที่สร้างจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โครงสร้างโดยทั่วไปของมอเตอร์กระแสตรงแสดงได้ดังรูปที่ 2.19

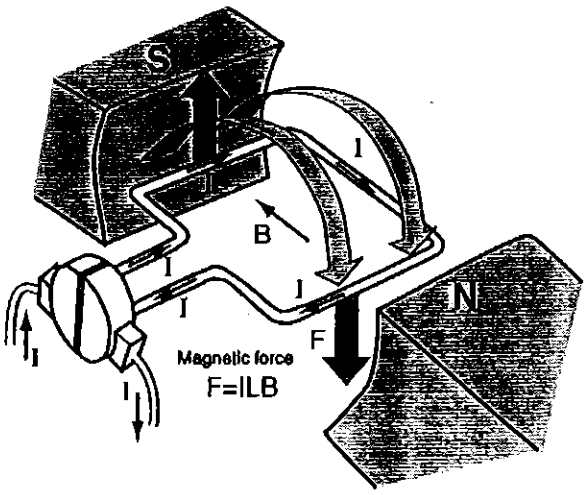


รูปที่ 2.19 ส่วนประกอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง [5]

ส่วนหลักๆที่สำคัญสำหรับมอเตอร์ได้แก่ สเตเตอร์ (Stator) เป็นส่วนของมอเตอร์ไฟฟ้าที่อยู่กับที่ มีขั้วสนามแม่เหล็ก (Fieldpoles) ซึ่งเป็นส่วนที่ใช้ในการสร้างฟลักซ์แม่เหล็กเมื่อตัวนำในอาร์เมเจอร์หมุนตัดผ่าน ฟลักซ์แม่เหล็กนี้ก็จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำขึ้น และอีกส่วนคือโรเตอร์ (Rotor) เป็นส่วนที่ทำให้เกิดกำลังงานซึ่งมีแกนวางอยู่ในรองลื่น (Bearing) ประกอบอยู่ในแผ่นปิดหัวท้าย (End plate) ของมอเตอร์ [5]

2.5.1 การทำงานเป็นมอเตอร์ไฟฟ้า

มอเตอร์ไฟฟ้าคือเครื่องจักรกลที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลโดยอาศัยหลักการคือ เมื่อมีกระแสไหลผ่านตัวนำที่วางอยู่ในสนามแม่เหล็กจะทำให้ลวดตัวนำเกิดการเคลื่อนที่ หลักการของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแสดงดังรูปที่ 2.20



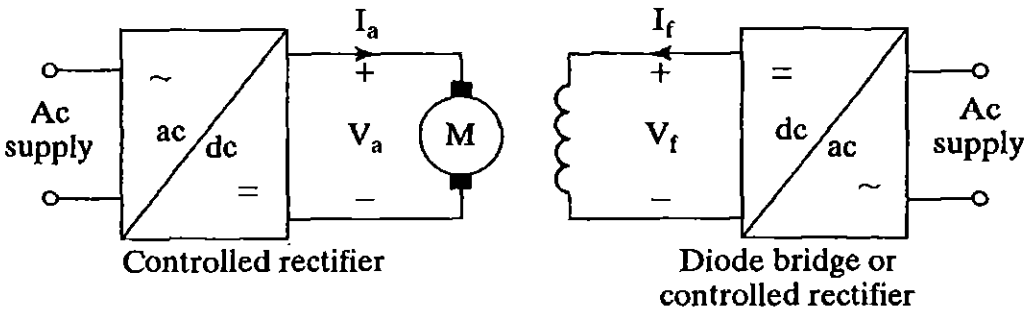
รูปที่ 2.20 หลักการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

ที่มา: http://www.rmutphysics.com

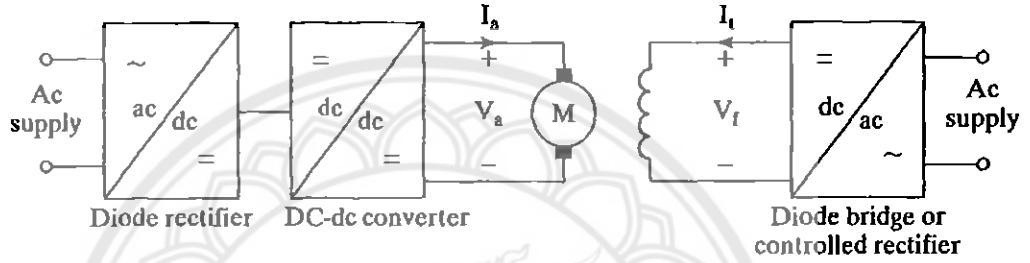
จากรูปที่ 2.20 เมื่อมีแรงดันไฟฟ้าจ่ายผ่านแปรงถ่านไปคอมมิวเตเตอร์และขดลวดตัวนำที่อาร์เมเจอร์ ทำให้ขดลวดอาร์เมเจอร์เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้น ทางด้านขวามือเป็นขั้วเหนือ (N) และด้านซ้ายมือเป็นขั้วใต้ (S) เหมือนกับขั้วแม่เหล็กถาวรที่วางอยู่ใกล้ๆกันทำให้เกิดอำนาจแม่เหล็กผลักดันกัน อาร์เมเจอร์หมุนไปในทิศทางตามเข็มนาฬิกา พร้อมกับคอมมิวเตเตอร์หมุนตามไปด้วย แปรงถ่านสัมผัสกับส่วนของคอมมิวเตเตอร์เปลี่ยนไปในอีกปลายหนึ่งของขดลวด แต่มีผลทำให้เกิดขั้วแม่เหล็กที่อาร์เมเจอร์เหมือนกับขั้วแม่เหล็กถาวรที่อยู่ใกล้ๆอีกครั้ง ทำให้อาร์เมเจอร์ยังคงถูกผลักให้หมุนไปในทิศทางตามเข็มนาฬิกาตลอดเวลา ส่งผลให้เกิดการหมุนของอาร์เมเจอร์ ซึ่งหมายถึงเครื่องจักรกลกำลังทำงานเป็นมอเตอร์ไฟฟ้า [5]

2.5.2 การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

การขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงจากตัวเรียงกระแสแบบควบคุมเฟสสร้างแรงดันเอาท์พุตกระแสตรงที่ปรับค่าได้จากแรงดันไฟกระแสสลับที่มีค่าคงที่ ในขณะที่ตัวแปลงผันกำลังกระแสตรงสร้างแรงดันไฟกระแสตรงที่ปรับค่าได้จากแรงดันกระแสตรงที่มีค่าคงที่ ด้วยคุณสมบัติในการสร้างแรงดันไฟกระแสตรงที่ปรับค่าได้อย่างต่อเนื่อง ตัวเรียงกระแสแบบควบคุมเฟสและตัวแปลงผันกำลังกระแสตรงจึงก่อให้เกิดวิวัฒนาการทางด้านอุปกรณ์ควบคุมและการขับเคลื่อนมอเตอร์แบบปรับความเร็วรอบได้ในอุตสาหกรรมสมัยใหม่ที่มีระดับกำลังไฟฟ้าตั้งแต่ไม่กี่แรงม้าจนถึงหลายเมกะวัตต์ ตัวเรียงกระแสแบบควบคุมเฟสนิยมใช้ในการปรับความเร็วรอบของมอเตอร์กระแสตรงดังรูปที่ 2.21 อีกหนึ่งทางเลือกคือการใช้ตัวเรียงกระแสแบบไดโอดร่วมกับตัวแปลงผันกำลังกระแสตรงดังรูปที่ 2.22 [6]



รูปที่ 2.21 การขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงด้วยตัวเรียงกระแสแบบควบคุมเฟส [6]



รูปที่ 2.22 การขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงด้วยตัวแปลงผันกำลังกระแสตรง [6]

สมการที่เกี่ยวข้องกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงได้แก่

$$V_a = R_a I_a + E_g \tag{2.6}$$

$$E_g = k \cdot I_f \cdot \omega \tag{2.7}$$

$$T_d = k \cdot I_f \cdot I_a = B\omega + T_L \tag{2.8}$$

โดยที่ E_g คือแรงเคลื่อนไฟฟ้าตีกลับ (Back emf) มีหน่วย (V)

V_a คือแรงดันตกคร่อมอาร์เมเจอร์ มีหน่วย (V)

K คือค่าคงที่ของมอเตอร์ มีหน่วย (V/A.rad/s)

I_f คือกระแสสนาม (Field current) มีหน่วย (A)

I_a คือกระแสอาร์เมเจอร์ (Armature current) มีหน่วย(A)

ω คือความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์ มีหน่วย (rad/s)

R_a คือความต้านทานของขดลวดอาร์เมเจอร์ มีหน่วย (Ω)

T_d คือแรงบิด (Developed torque) มีหน่วย (N·m)

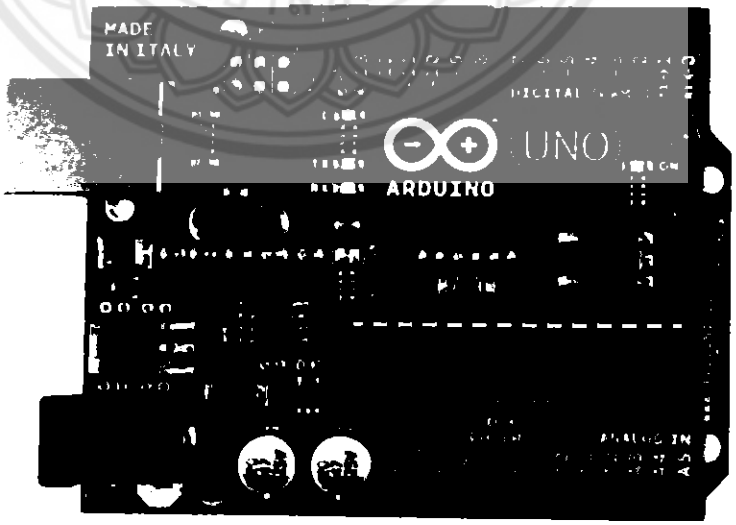
T_L คือแรงบิดโหลด (Load torque) มีหน่วย (N·m)

B คือค่าคงที่แรงเสียดทาน มีหน่วย (N·m/rad/s)

จากสมการที่ (2.8) จะเห็นว่าเราสามารถกลับทิศทางการหมุนของมอเตอร์ได้ 2 วิธีคือ การเปลี่ยนทิศการไหลของกระแสอาร์เมเจอร์ I_a หรือการเปลี่ยนทิศการไหลของกระแสสนาม I_f แต่เนื่องจากมอเตอร์กระแสตรงที่เลือกใช้นั้นสร้างสนามแม่เหล็กด้วยแม่เหล็กถาวร ดังนั้นในโครงงานนี้จึงเลือกใช้วิธีการกลับทิศการหมุนของมอเตอร์ด้วยการกลับทิศการไหลของกระแสอาร์เมเจอร์ โดยกลับขั้วของแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับมอเตอร์

2.6 ไมโครคอนโทรลเลอร์

ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ในโครงงานนี้เป็นแผงวงจร Arduino จัดอยู่ในตระกูล AVR ขนาด 28 ขา ซึ่งใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์หมายเลข ATmega328 แสดงดังรูปที่ 2.23 โดยไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino เป็นแพลตฟอร์ม (Platform) ของอินพุต/เอาท์พุต (I/O) ขั้นพื้นฐานที่พอเพียงกับการใช้งานและการเรียนรู้ โดยตัวแผงวงจรมีชุดคำสั่งที่ใช้ควบคุมพอร์ต อินพุต/เอาท์พุต ไม่ว่าจะเป็นพอร์ตดิจิตอล พอร์ตแอนะล็อกพีดับเบิลยูเอ็มและพอร์ตอนุกรมซึ่งแผงวงจร Arduino ทำให้คอมพิวเตอร์สามารถรับสัญญาณจากภายนอกและส่งสัญญาณไปควบคุมอุปกรณ์ภายนอกได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าการใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ ตัวแผงวงจรออกแบบจากไมโครคอมพิวเตอร์ชิพเดี่ยวและมีโปรแกรมพัฒนาสำหรับเขียนโปรแกรมให้แผงวงจร Arduino สามารถรับสัญญาณจากสวิตช์หรือตัวรับรู้และควบคุมหลอดไฟมอเตอร์หรืออุปกรณ์อื่นๆแผงวงจร Arduino สามารถทำงานอิสระหรือทำงานติดต่อกับโปรแกรมที่ทำงานบนเครื่องคอมพิวเตอร์



รูปที่ 2.23 แผงวงจร Arduino [7]

แผงวงจร Arduino ซึ่งมีจุดเด่นในเรื่องของความง่ายต่อการเรียนรู้และใช้งาน เนื่องจากมีการออกแบบคำสั่งต่างๆเพื่อสนับสนุนการใช้งานด้วยรูปแบบที่ง่ายไม่ซับซ้อนคือเน้นการโปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นหลัก แผงวงจร Arduino เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์โดยใช้ AVR ขนาดเล็กซึ่งเป็นตัวประมวลผลและสั่งงานเหมาะสำหรับนำไปใช้ในการศึกษาเรียนรู้ระบบไมโครคอนโทรลเลอร์ และนำไปประยุกต์ใช้งานเกี่ยวกับการควบคุมอุปกรณ์ อินพุต/เอาท์พุต ต่างๆได้มากมายทั้งในแบบที่เป็นการทำงานตัวเดียวอิสระ หรือเชื่อมต่อสั่งงานร่วมกับอุปกรณ์อื่นๆเช่นคอมพิวเตอร์ทั้งนี้เนื่องมาจากว่า Arduino สนับสนุนการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์อินพุต/เอาท์พุต ต่างๆได้มากมาย ทั้งแบบดิจิตอล (Digital) และแอนะล็อก (Analog) เช่น การรับค่าจากสวิตช์ หรือตัวรับรู้แบบต่างๆรวมไปถึงการควบคุมอุปกรณ์เอาท์พุตต่างๆ ส่วนภาษาในการเขียนโปรแกรมลงบนแผงจงจร Arduino นั้นจะใช้ภาษา C++ ซึ่งเป็นรูปแบบของโปรแกรมภาษาซีประยุกต์แบบหนึ่ง ทีมโครงสร้างของตัวภาษาโดยรวมใกล้เคียงกันกับภาษาซีมาตรฐาน (ANSI-C) แต่ได้มีการปรับปรุงรูปแบบในการเขียนโปรแกรมบางส่วนที่ผิดเพี้ยนไปจาก ANSI-C เล็กน้อย เพื่อช่วยลดความยุ่งยากในการเขียนโปรแกรมและยังสามารถเขียนโปรแกรมได้ง่ายและสะดวกมากขึ้นกว่าการเขียนภาษาซีตามแบบมาตรฐานของ ANSI-C โดยตรง

ตัวแผงวงจร Arduino ที่ใช้ในโครงงานนี้จะกล่าวถึงสถาปัตยกรรมของเอวีอาร์ (AVR) ขนาด 8 บิต โดยเป็นซีพียูแบบ RISC (Reduced InstructionSet Computer) มีสถาปัตยกรรมการต่อหน่วยความจำแบบฮาวาร์ด (Harvard) ซึ่งแยกหน่วยความจำโปรแกรมและหน่วยความจำข้อมูลออกจากกันโดยเด็ดขาด ดังแสดงในรูปที่ 2.24 โดยใช้หน่วยความจำแบบแฟรต (Flash) สำหรับเป็นหน่วยความจำโปรแกรม และใช้หน่วยความจำแบบ SRAM สำหรับหน่วยความจำข้อมูลและนอกจากนี้ยังมีหน่วยความจำแบบ EEPROM ซึ่งสามารถเก็บข้อมูลเอาไว้ได้โดยไม่จำเป็นต้องมีไฟเลี้ยงอีกด้วย ATmega328 ซึ่งมีคุณสมบัติเด่น [7] ดังนี้

1) ทำงานได้ตั้งแต่ย่านแรงดัน 1.8-5.5 V

2) หน่วยความจำข้อมูลแบบ SRAM ขนาด 2 kb

3) หน่วยความจำข้อมูลแบบ EEPROM ขนาด 1 kb

4) สนับสนุนการเชื่อมต่อแบบ I2C bus

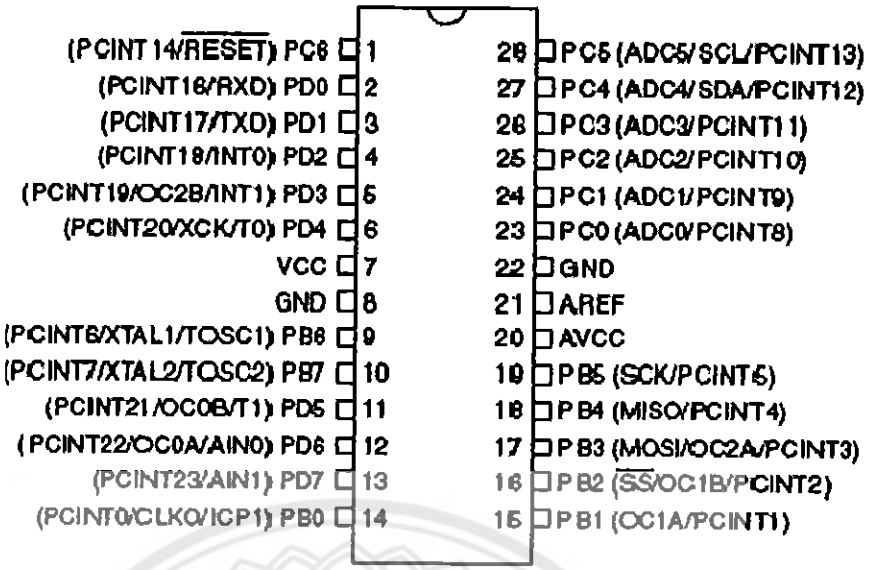
5) พอร์ตอินพุตเอาท์พุตจำนวน 23 bit

6) วงจรสื่อสารอนุกรม

7) ตัวจับเวลา/ตัวนับ ขนาด 8 บิต จำนวน 2 ตัวและ U3586 ขนาด 16 บิตจำนวน 1 ตัว

8) สนับสนุนช่องสัญญาณสำหรับสร้าง สัญญาณพีดับเบิลยู (PWM) จำนวน 6 ช่อง

9) วงจรแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิตอลขนาด 10 บิตในตัวจำนวน 8 ช่อง



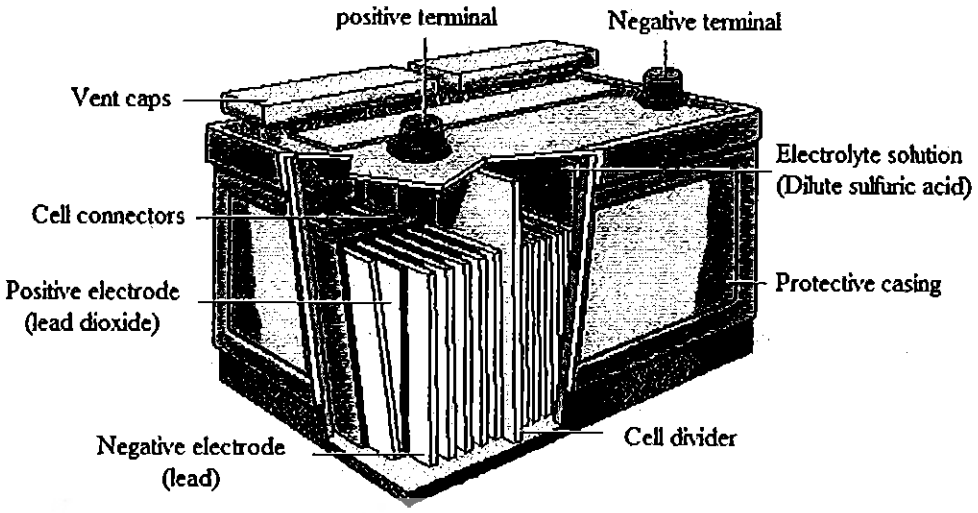
รูปที่ 2.24 ซีพียู ATmega328 ขนาด 28 ขา [7]

2.7 แหล่งพลังงานที่ใช้ในการขับมอเตอร์กระแสตรง

ในโครงงานนี้ได้เลือกใช้มอเตอร์กระแสตรงเพื่อใช้ในการหมุนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ให้เคลื่อนที่ไปตามแสงอาทิตย์ และในการขับมอเตอร์จำเป็นต้องมีแหล่งพลังงานที่เป็นไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อจ่ายพลังงานให้กับมอเตอร์กระแสตรงดังนั้นในโครงงานนี้เราจะเลือกใช้แบตเตอรี่แบบตะกั่ว (Lead-acid battery) เป็นแหล่งพลังงาน ซึ่งแบตเตอรี่ชนิดนี้มีข้อดีคือมีราคาถูก สามารถหาซื้อได้ทั่วไป มีให้เลือกหลายขนาดและยังสามารถให้กระแสอัดประจุได้มาก

2.7.1 โครงสร้างของแบตเตอรี่แบบตะกั่ว

ส่วนประกอบของแบตเตอรี่แบบตะกั่วมีส่วนต่างๆ ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 2.25 ซึ่งประกอบด้วยแผ่นธาตุ (Plates) ในแบตเตอรี่มี 2 ชนิดคือแผ่นบวกและแผ่นลบ แผ่นธาตุบวกทำจากตะกั่วออกไซด์ (PbO_2) และแผ่นธาตุลบทำจากตะกั่ว (Pb) วางเรียงสลับกันจนเต็มในแต่ละเซลล์แล้วกั้นไม่ให้แตะกันด้วยแผ่นกั้น (Separators)ทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้ธาตุบวกและธาตุลบแตะกันเพราะจะทำให้เกิดการลัดวงจรขึ้น ซึ่งแผ่นกั้นนี้มีลักษณะเป็นรูพรุนเพื่อให้น้ำกรดหรือน้ำหรือน้ำยาอิเล็กโตรไลต์ (Electrolyte)ไหลถ่ายเทไปมาได้ และมีขนาดความกว้างยาวเท่ากับแผ่นธาตุบวกและแผ่นลบ น้ำยาอิเล็กโตรไลต์ในแบตเตอรี่เป็นน้ำกรดกำมะถันเจือจางประกอบด้วยกรดกำมะถัน (H_2SO_4) ประมาณ 38% ความถ่วงจำเพาะของน้ำกรดมีค่า 1.26-1.28 ที่อุณหภูมิ 20°C

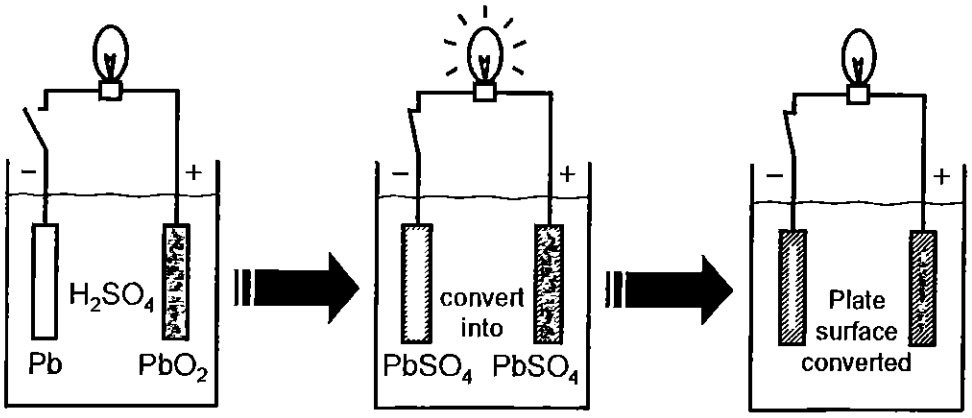


รูปที่ 2.25 โครงสร้างภายในของแบตเตอรี่แบบตะกั่ว [8]

เซลล์ (Cell) ในแบตเตอรี่คือช่องที่บรรจุแผ่นธาตุบวกและธาตุลบซึ่งวางสลับกันและกั้นด้วยแผ่นกั้นแล้วจุ่มลงในกรด โดยทั่วไปแบตเตอรี่จะสร้างให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้า 2 V ต่อเซลล์ ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่แต่ละลูกจึงขึ้นอยู่กับจำนวนเซลล์ในแบตเตอรี่นั้นๆ เช่น แบตเตอรี่ที่มี 6 เซลล์จะให้แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย 12 V [8]

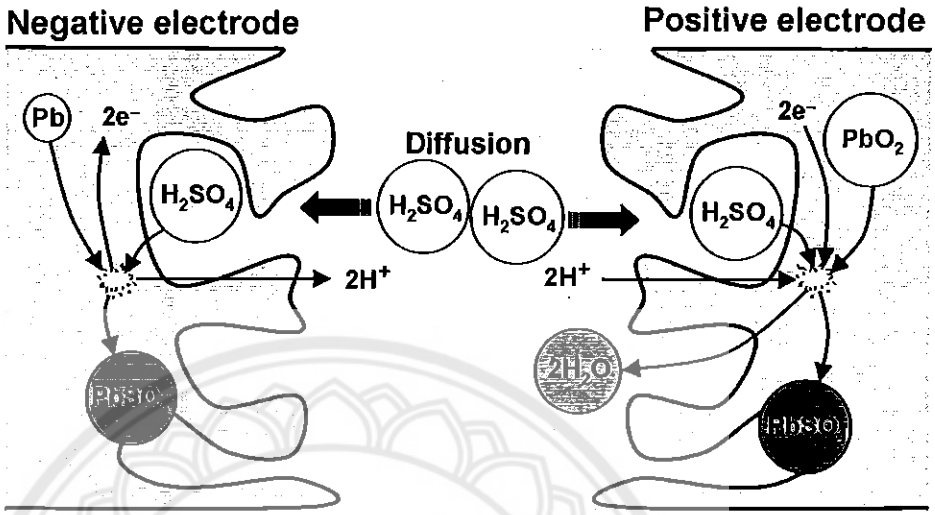
2.7.2 ปฏิกิริยาทางเคมีในแบตเตอรี่แบบตะกั่ว

เราสามารถอธิบายปฏิกิริยาเคมีแบตเตอรี่แบบตะกั่วได้ดังรูปที่ 2.26 กำหนดให้แบตเตอรี่มีประจุเต็ม (Fully charged condition) ก่อนต่อโหลด เนื้อสารที่ขั้วลบจะเป็นตะกั่วส่วนขั้วบวกเป็นตะกั่วออกไซด์ หลังจากนั้นนำโหลดมาต่อ แบตเตอรี่จะเริ่มคายประจุโดยเนื้อสารที่ขั้วลบและขั้วบวกจะทำปฏิกิริยากับสารละลายอิเล็กโตรไลต์จนกลายเป็นตะกั่วซัลเฟต การคายประจุของแบตเตอรี่จะสิ้นสุดลงเมื่อเนื้อสารทั้งขั้วลบและขั้วบวกกลายเป็นตะกั่วซัลเฟตทั้งหมด



รูปที่ 2.26 การเกิดปฏิกิริยาภายในแบตเตอรี่เมื่อคายประจุ

ในระหว่างที่แบตเตอรี่กำลังคายประจุจะเกิดการไหลของอิเล็กตรอนจากขั้วลบไปยังขั้วบวก ดังแสดงในรูปที่ 2.27 จึงเกิดกระแสไหลผ่านโหลด ซึ่งค่ากระแสที่แบตเตอรี่จ่ายได้ขึ้นอยู่กับพื้นผิวที่เนื้อสารสัมผัสกับน้ำกรด

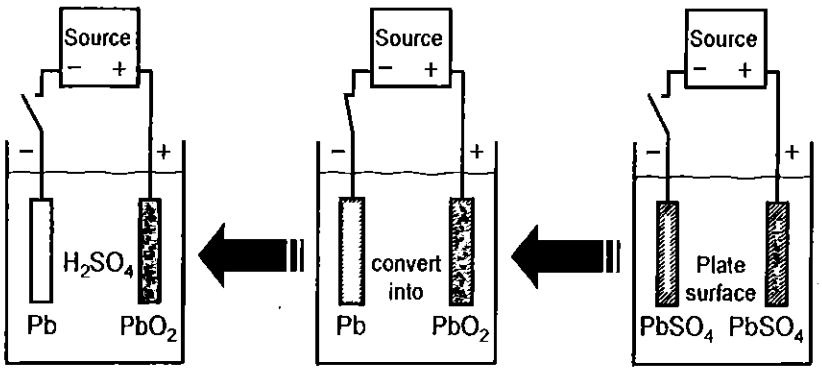


รูปที่ 2.27 การคายประจุของแบตเตอรี่

การเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่เกิดขึ้นภายในแบตเตอรี่เป็นปฏิกิริยาชนิดย้อนกลับได้ (Reversible reaction) ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังสมการเคมีต่อไปนี้

$$Pb + PbO_2 + 2H_2SO_4 \Leftrightarrow 2PbSO_4 + 2H_2O \qquad (2.9)$$

จากสมการที่ (2.9) การคายประจุสามารถอธิบายได้โดยการเปลี่ยนแปลงทางเคมีจากซ้ายไปขวา ในขณะที่การอัดประจุแบตเตอรี่จะอธิบายได้โดยการเปลี่ยนแปลงทางเคมีในสมการจากขวาไปซ้ายเมื่อต่อแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงเข้ากับแบตเตอรี่ โดยเนื้อสารที่อยู่ภายในเกิดการเปลี่ยนแปลงย้อนกลับจากการอัดประจุ [9] แสดงดังรูปที่ 2.28



รูปที่ 2.28 การเกิดปฏิกิริยาภายในแบตเตอรี่เมื่ออัดประจุ

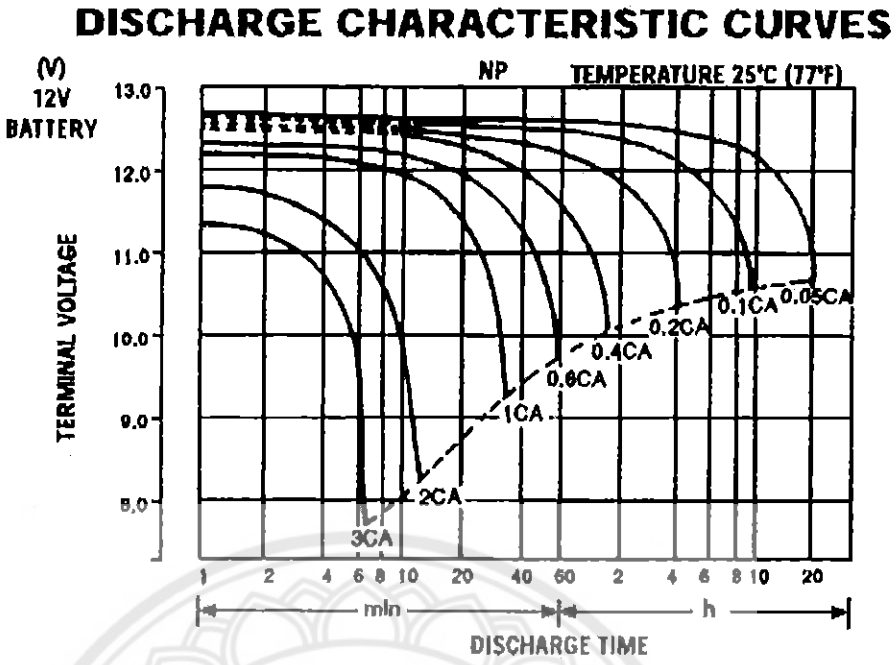
2.7.3 อัตราการคายประจุ

อัตราการคายประจุ หรือที่เรียกว่า ซีเรต (Crate) ของแบตเตอรี่แบบตะกั่วไม่ควรเกิน 0.2 C หรือ 20% ของความจุ ถ้าอัตราการคายประจุมากขึ้นประสิทธิภาพของมันจะลดลง แต่อย่างไรก็ตามเราไม่ควรจะคายประจุในอัตราที่มากกว่า 1 C

รอบของการใช้งานโดยทั่วไปอยู่ที่ประมาณ 200 ถึง 300 รอบ ขึ้นอยู่กับลักษณะความลึกของการคายประจุ (Depth of discharge: DOD) การอัดประจุ การบำรุงรักษาและอุณหภูมิที่ใช้งาน สาเหตุหลักที่ทำให้แบตเตอรี่มีอายุการใช้งานลดลงคือแผ่นธาตุบวกถูกกัดกร่อนซึ่งการกัดกร่อนนี้จะเกิดมากขึ้นที่อุณหภูมิสูงขึ้นการใช้งานแบตเตอรี่จำเป็นต้องศึกษาปริมาณต่างๆที่เกี่ยวข้องกับแบตเตอรี่ ได้แก่

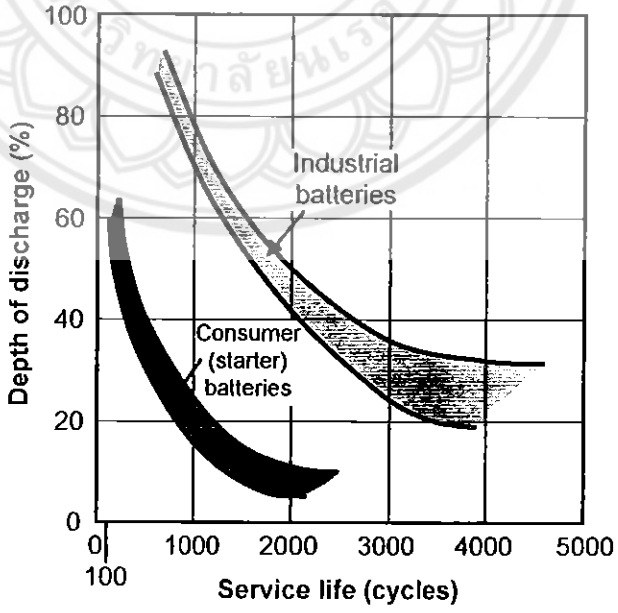
1) ความจุของแบตเตอรี่ (Battery capacity) มีหน่วยคือ "แอมแปร์-ชั่วโมง" (Ah) หรือ "วัตต์-ชั่วโมง" (Wh) ซึ่งบ่งบอกถึงพลังงานที่แบตเตอรี่จ่ายได้ เราสามารถคำนวณหาความจุของแบตเตอรี่ได้ด้วยการคายประจุของแบตเตอรี่ความจุที่ใช้งานได้จะขึ้นอยู่กับปัจจัยทางโครงสร้าง ซึ่งเชื่อมโยงกับการออกแบบแบตเตอรี่ ได้แก่ ปริมาณของตะกั่ว ตะกั่วออกไซด์น้ำกรดความหนาของแผ่นโลหะ และผิวสัมผัสของโลหะ นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่ลักษณะการนำไปใช้งาน ได้แก่ อุณหภูมิ ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นความจุของแบตเตอรี่จะเพิ่มขึ้นเนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีสูงขึ้น แต่จะทำให้อายุการใช้งานสั้นลง ค่าพลังงานสูงสุดที่แบตเตอรี่จ่ายได้ ณ ค่ากระแส และอุณหภูมิค่าหนึ่งที่กำหนดโดยผู้ผลิต เรียกว่า พิกัดความจุ (Rated capacity หรือ Nominal capacity) ของแบตเตอรี่

2) จุดสิ้นสุดของการคายประจุ (End of discharge) คือระดับแรงดันที่เรายอมให้แบตเตอรี่คายประจุได้ก่อนจะสิ้นสุดกระบวนการคายประจุ จุดสิ้นสุดของการคายประจุจะขึ้นอยู่กับค่ากระแสคายประจุ ถูกกำหนดโดยผู้ผลิตดังรูปที่ 2.29 กราฟคุณลักษณะการคายประจุของแบตเตอรี่แบบตะกั่ว NP4-12 ซึ่งค่าพิกัดความจุมีค่า 4 Ah ที่กระแส 0.2 A (0.05C) อุณหภูมิ 25°C และจุดสิ้นสุดการคายประจุที่ 10.7 V จะเห็นว่าถ้าแบตเตอรี่คายประจุที่กระแสสูงกว่า 0.2 A จุดสิ้นสุดการคายประจุจะต่ำกว่าเนื่องจากยังมีเนื้อสารที่สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำกรดต่อได้อีก แต่ค่าความจุที่ใช้งานได้จะลดลงจากค่าพิกัด



รูปที่ 2.29 กราฟคุณลักษณะการคายประจุของแบตเตอรี่ NP4-12

3) อายุการใช้งาน (Service life) ของแบตเตอรี่ถูกกำหนดในรูปของจำนวนรอบการอัดและคายประจุ (Charge-discharge cycle) ซึ่งอายุการใช้งานของแบตเตอรี่จะขึ้นอยู่กับความลึกในการคายประจุแต่ละครั้งดังแสดงในรูปที่ 2.30 ถ้าความลึกในการคายประจุมีค่าสูงจะทำให้อายุการใช้งานสั้นลง



รูปที่ 2.30 กราฟเปรียบเทียบความลึกในการคายประจุกับอายุการใช้งาน

การคายประจุจนต่ำกว่าจุดสิ้นสุดของการคายประจุ (Deep discharge) จะทำให้แบตเตอรี่ทำงานหนักเกินไป หากเกิดเหตุการณ์เช่นนี้ต้องรีบอัดประจุคืนให้เต็ม มิฉะนั้นจะเหลือผลึกตะกั่วซัลเฟตที่ขั้วบวกและขั้วลบ หากปล่อยไว้นานผลึกเหล่านี้จะโตขึ้นจนยากต่อการเปลี่ยนกลับคืนเป็นตะกั่วและตะกั่วออกไซด์ได้อีก ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า "การเกิดซัลเฟชั่น" (Sulphation) ซึ่งทำให้อายุการใช้งานของแบตเตอรี่นั้นสั้นลงเนื่องจากสูญเสียเนื้อสารที่จะทำปฏิกิริยา ดังนั้นในทางปฏิบัติจึงต้องมีการป้องกันการคายประจุลึกกว่าจุดสิ้นสุดการคายประจุ (Deep discharge protection) โดยวิธีที่ง่ายและเป็นที่นิยมคือการวัดค่าและตรวจสอบแรงดันของแบตเตอรี่อยู่ตลอดเวลา

4) จุดสิ้นสุดการอัดประจุ (End of charge) ในการอัดประจุแต่ละครั้งจำเป็นต้องใช้แรงดันของแหล่งจ่ายสูงกว่า เช่น ประมาณ 14.4 V สำหรับแบตเตอรี่ขนาด 12 V เมื่ออัดประจุจนแรงดันของแบตเตอรี่เพิ่มสูงขึ้นถึงระดับหนึ่งจะทำให้น้ำในน้ำกรดแตกตัวเป็นก๊าซไฮโดรเจนที่ขั้วลบและก๊าซออกซิเจนที่ขั้วบวก ถ้าอัดประจุนานเกินไปจะทำให้ปริมาณน้ำที่อยู่ในแบตเตอรี่ลดลง นอกจากนี้การอัดประจุด้วยกระแสที่สูงยังทำให้เกิดความเครียดในเนื้อสาร ซึ่งทำให้การเกาะตัวของโมเลกุลในเนื้อสารแย่ลงจนส่งผลให้เนื้อสารบางส่วนหลุดออกจากขั้ว ซึ่งนำไปสู่การสูญเสียความจุที่ใช้ได้ของแบตเตอรี่ดังนั้นในระหว่างการอัดประจุจึงต้องมีการจำกัดแรงดันและกระแส เช่น การอัดประจุด้วยกระแสไม่เกิน 1 A และใช้แรงดันในการอัดประจุประมาณ 2.3-2.4 V/cell หรือ 14.4 V (สำหรับแบตเตอรี่ 12V) ที่อุณหภูมิ 20°C [9]

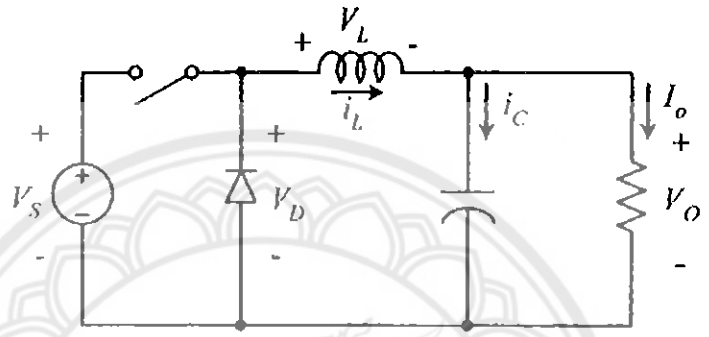
เมื่อแบตเตอรี่แบบตะกั่วจ่ายพลังงานให้กับมอเตอร์กระแสตรงเพื่อให้ไปหมุนแผงเซลล์แสงอาทิตย์จนหันหน้าตรงกับลำแสงจากดวงอาทิตย์ แล้วมอเตอร์ก็จะหยุดหมุน ในขณะที่มอเตอร์หยุดหมุนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ก็จะผลิตพลังงานไฟฟ้าออกมาแล้วไปผ่านกระบวนการอัดประจุเพื่อเก็บพลังงานไว้ในแบตเตอรี่ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีวงจรควบคุมการอัดและคายประจุ

2.8 ตัวควบคุมการอัดประจุและคายประจุ

ตัวควบคุมการอัดประจุและคายประจุในโครงงานนี้เราได้เลือกใช้ตัวแปลงผันกำลังกระแสตรงสองทิศทางที่ถูกสร้างขึ้นจากวงจรพื้นฐานสองวงจรคือ วงจรทอนระดับแรงดันและวงจรทบระดับแรงดันซึ่งตัวแปลงผันกำลังกระแสตรงสองทิศทางถูกนำไปใช้ควบคุมการทำงานของแบตเตอรี่โดยวงจรจะทำงานในสองโหมดคือ โหมดการอัดประจุ (Charging mode) ซึ่งวงจรจะทำงานเป็นวงจรทอนระดับแรงดัน และโหมดการคายประจุ (Discharging mode) ซึ่งวงจรจะทำงานเป็นวงจรทบระดับแรงดัน

2.8.1 วงจรทอนระดับแรงดัน

วงจรทอนระดับแรงดัน คือ วงจรที่ทำให้ระดับแรงดันเอาท์พุตมีค่าต่ำกว่าแรงดันอินพุต และเพื่อให้ได้แรงดันเอาท์พุตที่มีความเป็นกระแสตรงมากๆจะนิยมใช้วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low pass filter) ซึ่งโดยมากจะเลือกใช้วงจรกรองแบบ LC เพราะอัตราการลดทอนสัญญาณรบกวนที่ไม่ต้องการ ผกผันกับกำลังสองของความถี่ แสดงวงจรได้ดังรูปที่ 2.31



รูปที่ 2.31 แผนภาพวงจรทอนระดับแรงดัน [10]

การวิเคราะห์การทำงานของวงจรทอนระดับแรงดัน ในช่วงที่เป็นสถานะอยู่ตัว (Steady state) จะมีการกำหนดเงื่อนไขการทำงานของวงจรทอนระดับแรงดันดังนี้

ก. กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ (i_L) ในแต่ละคาบเวลา (T) จะมีค่าเท่ากัน

$$i_L(t+T) = i_L(t)$$

หมายถึงกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำจะมีค่าเท่ากัน ณ ตำแหน่งเดียวกันทุกคาบเวลา

ข. แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ (V_L) ในแต่ละคาบเวลาจะมีค่าเท่ากับศูนย์

$$V_L = \frac{1}{T}\int_{t}^{t+T} v_L(\tau)d\tau = 0 \qquad (2.10)$$

หมายถึง ผลรวมของผลคูณระหว่างแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำกับเวลา (Volt-second) ในแต่ละคาบเวลาจะมีค่าเท่ากับศูนย์

ค. กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของตัวเก็บประจุ (I_C) มีค่าเท่ากับศูนย์

$$I_C = \frac{1}{T}\int_{t}^{t+T} i_C(\tau)d\tau = 0 \qquad (2.11)$$

หมายถึง ประจุที่ถูกอัดและคายของตัวเก็บประจุในแต่ละคาบเวลาจะต้องเท่ากัน

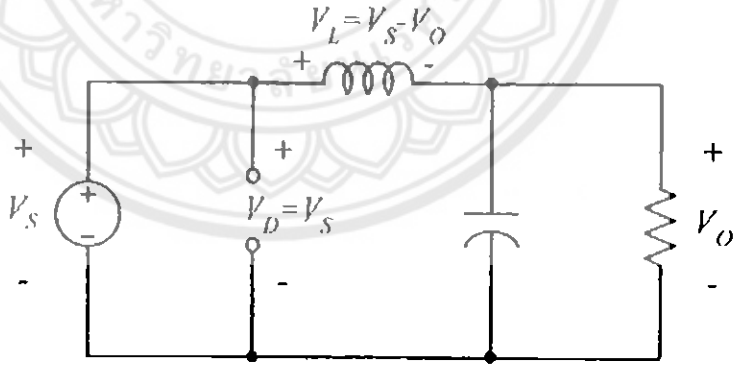
ง. กำลังอินพุต (P_S) มีค่าเท่ากับกำลังเอาท์พุต (P_O)

$$P_S = P_O \qquad (2.12)$$

กรณีนี้กำหนดให้อุปกรณ์ทุกตัวเป็นอุดมคติ ทำให้ไม่มีการสูญเสียเนื่องจากการทำงานของวงจร ประสิทธิภาพของวงจรจึงเท่ากับ 100%

การออกแบบให้ได้ค่าเฉลี่ยของแรงดันเอาท์พุตตามที่ต้องการสามารถเริ่มจากเงื่อนไขที่ว่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำในแต่ละคาบมีค่าเท่ากับศูนย์ จากนั้นสามารถคำนวณหาอัตราขยายแรงดันของวงจรได้ การวิเคราะห์การทำงานของสวิตช์ในแต่ละโหมดต้องวิเคราะห์ในสถานะอยู่ตัวดังนี้

ขณะสวิตช์นำกระแส กระแสไฟฟ้าที่ไหลจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงจะไหลผ่านสวิตช์ผ่านตัวเหนี่ยวนำไปยังโหลด โดยที่กระแสไฟฟ้าส่วนหนึ่งจะไปเก็บอยู่ที่ตัวเก็บประจุ แสดงวงจรดังรูปที่ 2.32



รูปที่ 2.32 วงจรสมมูลของวงจรทอนระดับแรงดันเมื่อสวิตช์นำกระแส [10]

จากกฎของเคอร์ชอฟฟ์สำหรับแรงดันไฟฟ้า สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$-V_S + V_L + V_O = 0$$

$$V_L = V_S - V_O$$

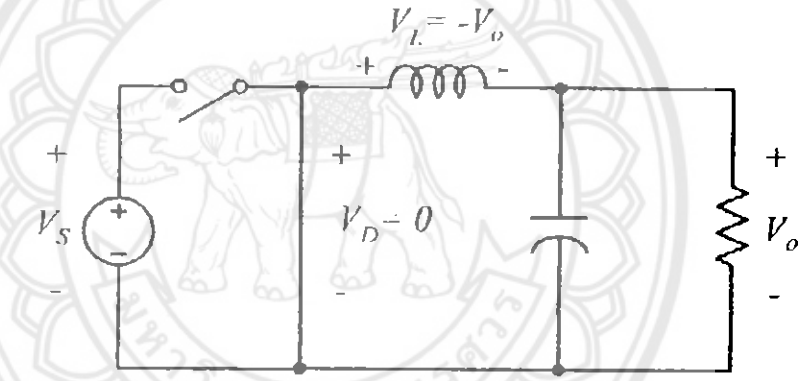
$$V_L = L\frac{di_L}{dt}$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_S - V_O}{L}$$

dt ในกรณีอยู่ในช่วงเวลานำกระแส คือ $dt = DT$

$$\Delta i_{L,on} = (\frac{V_S - V_O}{L})DT \qquad (2.13)$$

ขณะสวิตช์ไม่นำกระแส เมื่อสวิตช์ไม่นำกระแส ไดโอดจะถูกไบแอสไปหน้า (Forward bias) ให้นำกระแส ทำให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำเกิดการไหลอย่างต่อเนื่องแสดงได้ดังรูปที่ 2.33 จากกฎของเคอร์ชอฟฟ์ จะได้สมการของแรงดันไฟฟ้าดังนี้



รูปที่ 2.33 วงจรสมมูลวงจรทอนระดับแรงดันขณะสวิตช์ไม่นำกระแส [10]

$$V_L = -V_O$$

$$V_L = -V_O = L\frac{di_L}{dt}$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{di_{L,off}}{\Delta t} = \frac{-V_O}{L} \qquad (2.14)$$

ความหมายของสมการที่ (2.14) คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำจะค่อยๆมีค่าลดลง เพราะการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าของตัวเหนี่ยวนำต่อเวลามีค่าเป็นลบ

dt ในกรณีอยู่ในช่วงเวลาหยุดนำกระแส คือ $dt = (1-D)T$ ดังนั้นจากสมการที่ (2.14) สามารถจัดรูปใหม่ได้เป็น

$$\Delta i_{L,off} = -\left(\frac{V_o}{L}\right)(1-D)T \tag{2.15}$$

ในสถานะอยู่ตัว การเปลี่ยนแปลงที่เพิ่มขึ้นของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำขณะที่สวิตช์นำกระแสเท่ากับการเปลี่ยนแปลงที่ลดลงของกระแสไฟฟ้าที่ผ่านตัวเหนี่ยวนำในขณะที่สวิตช์ไม่นำกระแส หรืออาจจะกล่าวได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำสุทธิมีค่าเท่ากับศูนย์ นั่นคือ

$$\begin{aligned}
\Delta i_{L,on} &= \Delta i_{L,off} = 0 \\
\left(\frac{V_S - V_o}{L}\right)DT + \left(-\left(\frac{V_o}{L}\right)(1-D)T\right) &= 0 \\
\left(\frac{V_S - V_o}{L}\right)DT - \left(\frac{V_o}{L}\right)(1-D)T &= 0 \\
(V_S - V_o)D - V_o(1-D) &= 0 \\
\frac{V_o}{V_S} &= D
\end{aligned} \tag{2.16}$$

จากสมการที่ (2.12) จะได้

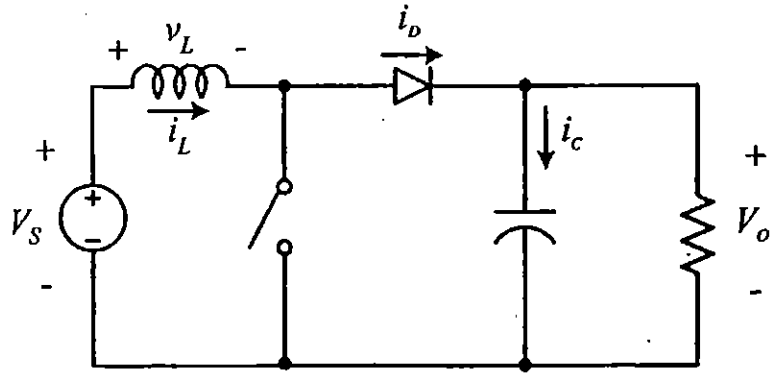
$$V_S I_S = V_o I_o$$

$$\frac{V_o}{V_S} = \frac{I_S}{I_o} = D \tag{2.17}$$

จากสมการที่ (2.17) จะเห็นว่าความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้าเหมือนกรณีหม้อแปลงไฟฟ้า นั่นคือเราสามารถกล่าวได้ว่าวงจรทอนระดับแรงดันมีวงจรสมมูลเปรียบได้กับหม้อแปลงไฟฟ้ากระแสตรง [10]

2.8.2 วงจรทบระดับแรงดัน

แผนภาพของวงจรทบระดับแรงดันแสดงได้ดังรูปที่ 2.34 ซึ่งเป็นตัวแปลงกำลังที่สร้างแรงดันเอาท์พุตให้มีระดับสูงกว่าแรงดันอินพุตของวงจร



รูปที่ 2.34 แผนภาพวงจรทบระดับแรงดัน [10]

โดยที่ V_S คือแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่าย,
v_L คือแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ,
i_L คือกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ,
i_D คือกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านไดโอด,
i_C คือกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ
V_O คือแรงดันเอาท์พุต

การวิเคราะห์การทำงานของวงจรทบระดับแรงดันในช่วงสถานะอยู่ตัว จะมีการกำหนดเงื่อนไขการทำงานของวงจรทบระดับแรงดัน เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ ดังนี้

ก. กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ (i_L) ตำแหน่งเดียวกันในแต่ละคาบมีค่าเท่ากันและมีค่าเป็นบวกเสมอ

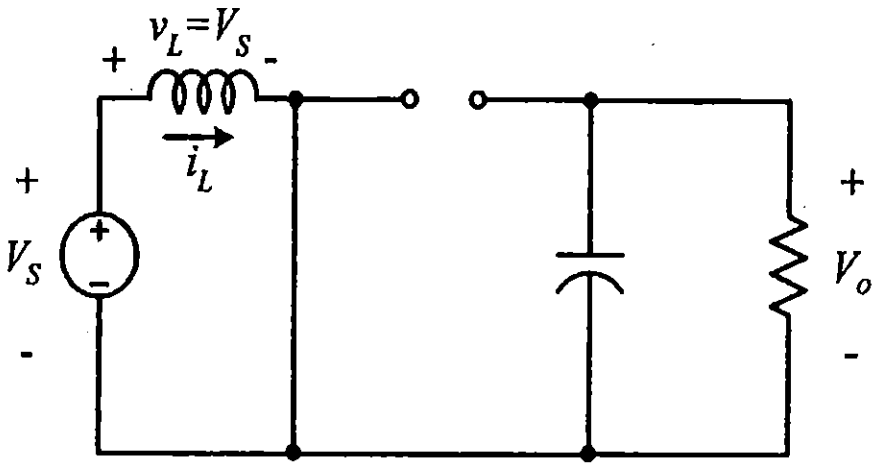
ข. แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำในแต่ละคาบจะเท่ากับศูนย์หมายถึงผลรวมของผลคูณระหว่างแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำกับเวลาในแต่ละคาบจะเท่ากับศูนย์

ค. ตัวเก็บประจุต้องมีขนาดใหญ่พอ เพื่อทำให้แรงดันเอาท์พุต (V_o) มีค่าคงที่

ง. กำลังอินพุตเท่ากับกำลังเอาท์พุต กรณีนี้ไม่คำนึงถึงการสูญเสีย เนื่องจากการทำงานของวงจร โดยให้อุปกรณ์ทุกตัวเป็นอุดมคติ ทำให้สรุปได้ว่าประสิทธิภาพของวงจรเป็น 100%

หลักการทำงานของวงจรทบระดับแรงดันเพื่อให้ได้แรงดันเอาท์พุตตามที่ต้องการ เริ่มต้นจากข้อกำหนดที่ว่า แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำในแต่ละคาบเวลาจะมีค่าเท่ากับศูนย์ และสามารถหากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำได้โดยวิเคราะห์การทำงานของสวิตช์ในแต่ละช่วงการทำงาน ทั้งนี้การต้องอยู่ในช่วงสถานะอยู่ตัวดังนี้

ขณะสวิตช์นำกระแส เมื่อสวิตช์นำกระแส กระแสไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงจะไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำโดยผ่านสวิตช์ ขณะเดียวกันไดโอดจะถูกไบแอสย้อนกลับทำให้ไม่สามารถนำกระแสได้ดังแสดงในรูปที่ 2.35



รูปที่ 2.35 วงจรสมมูลของวงจรทบระดับแรงดันเมื่อสวิตช์นำกระแส [10]

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 คือค่าดิวตี้ไซเคิล (Duty cycle)

เมื่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าคงที่ อาจจะถือว่าการเพิ่มของกระแสไฟฟ้าเป็นเชิงเส้น ทำให้สามารถคำนวณได้จาก

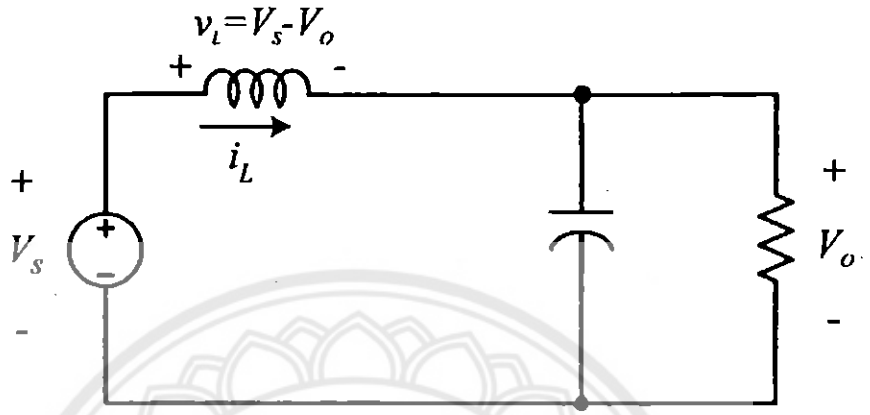
$$\frac{di_{L.on}}{dt} = \frac{V_S}{L}$$

$$\frac{\Delta i_{L.on}}{\Delta t} = \frac{V_S}{L}$$

$$\Delta i_{L.on} = \frac{V_S DT}{L} \qquad (2.18)$$

โดยที่ $\Delta i_{L.on}$ คืออัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าในตัวเหนี่ยวนำขณะสวิตช์นำกระแส

ขณะสวิตช์ไม่นำกระแส กระแสไฟฟ้าในตัวเหนี่ยวนำไม่เปลี่ยนแปลงทันทีทันใด ไดโอดถูกไบแอสไปข้างหน้าเพื่อให้นำกระแส ทำให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำอย่างต่อเนื่อง สมมุติแรงดันไฟฟ้าที่เอาท์พุตมีค่าคงที่ดังแสดงในรูปที่ 2.36



รูปที่ 2.36 วงจรสมมูลของวงจรทบระดับแรงดันเมื่อสวิตช์ไม่นำกระแส [10]

จากกฎของเคอร์ชอฟฟ์จะได้สมการของแรงดันไฟฟ้าดังนี้

$$-V_S + v_L + V_O = 0$$

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

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_S - V_O}{L}$$

ขณะที่สวิตช์หยุดนำกระแส $dt = (1-D)T$ ดังรูปที่ 2.37 (ก) อัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำมีค่าคงที่ และถือว่าการลดลงของกระแสไฟฟ้าเป็นเชิงเส้นดังแสดงในรูปที่ 2.37 (ข) สามารถคำนวณได้จาก

$$\Delta i_{L.off} = \left(\frac{V_S - V_O}{L}\right)(1-D)T \qquad (2.19)$$

โดยที่ $\Delta i_{L.off}$ คืออัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าในตัวเหนี่ยวนำขณะสวิตช์ไม่นำกระแส

ในสถานะอยู่ตัว การเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำสุทธิมีค่าเท่ากับศูนย์ นั่นคือ

$$\Delta i_{L.on} + \Delta i_{L.off} = 0$$

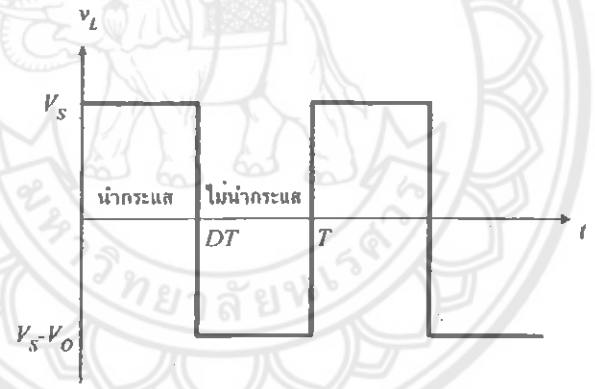
$$\left(\frac{V_S}{L}\right)DT + \frac{(V_S - V_O)(1-D)T}{L} = 0$$

$$V_S D + (V_S - V_O)(1-D) = 0$$

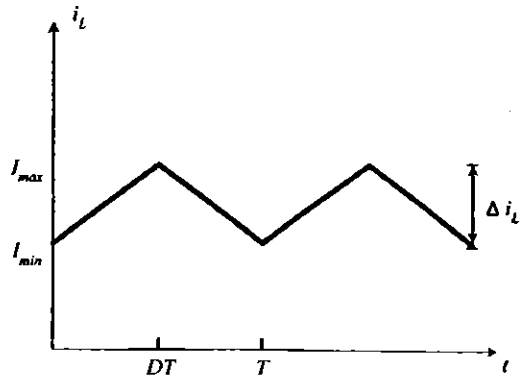
$$V_S - V_O(1-D) = 0$$

$$\frac{V_O}{V_S} = \frac{1}{1-D} \qquad (2.20)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราขยายแรงดันของวงจรทบระดับแรงดันกับค่าดิวตี้ไซเคิลแสดงได้ดังรูปที่ 2.38 โดยจะเห็นว่า เมื่อค่า D เพิ่มขึ้นถ้าอัตราขยายแรงดันไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นแบบไม่เชิงเส้นในทางปฏิบัตินิยมปรับอัตราการขยายแรงดันไฟฟ้าไม่เกิน 4 เท่า ทั้งนี้เพื่อให้วงจรมีเสถียรภาพ โดยอัตราขยายแรงดันไฟฟ้าขั้นต่ำสุดคือหนึ่ง หรือแรงดันเอาท์พุตเท่ากันกับแรงดันอินพุตในทางทฤษฎี แต่ในทางปฏิบัติแรงดันเอาท์พุตจะน้อยกว่าแรงดันอินพุตเล็กน้อย เนื่องจากค่าความสูญเสียจากแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมไดโอดและตัวอุปกรณ์สวิตช์

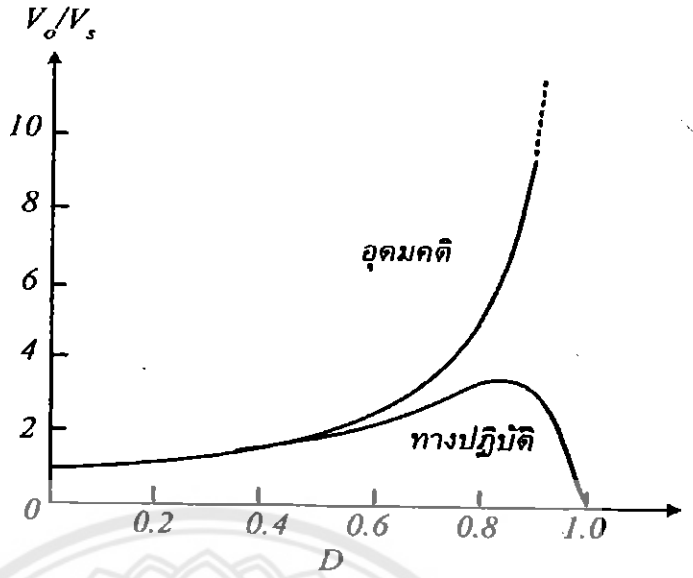


(ก) แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ



(ข) กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ

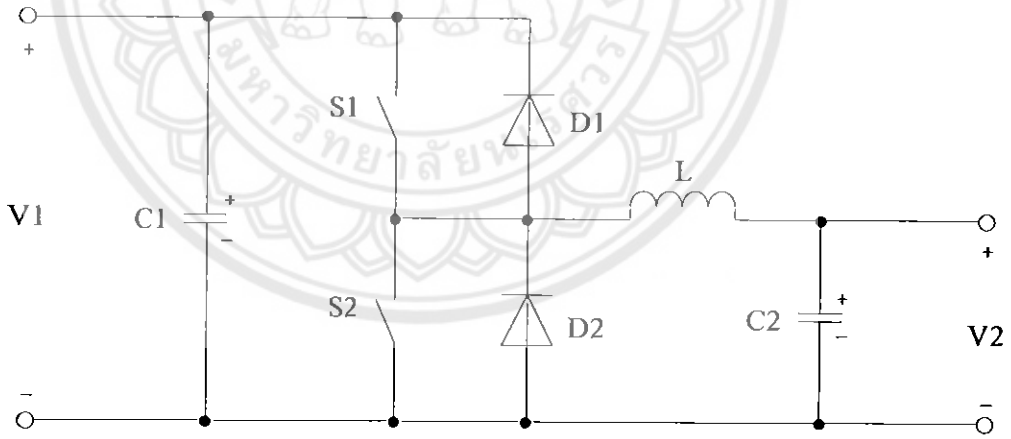
รูปที่ 2.37 รูปคลื่นสัญญาณในวงจรทบระดับแรงดัน [10]



รูปที่ 2.38 อัตราขยายแรงดันไฟฟ้าของวงจรทบระดับแรงดัน [10]

2.8.3 แผนภาพวงจรของตัวแปลงผันกำลังกระแสตรงสองทิศทาง

เมื่อนำโครงสร้างของวงจรทอนระดับและวงจรทบระดับแรงดันมารวมกัน สามารถสร้างตัวแปลงผันกำลังกระแสตรงสองทิศทาง (Bidirectional DC-DC Converter) ได้ดังรูปที่ 2.39

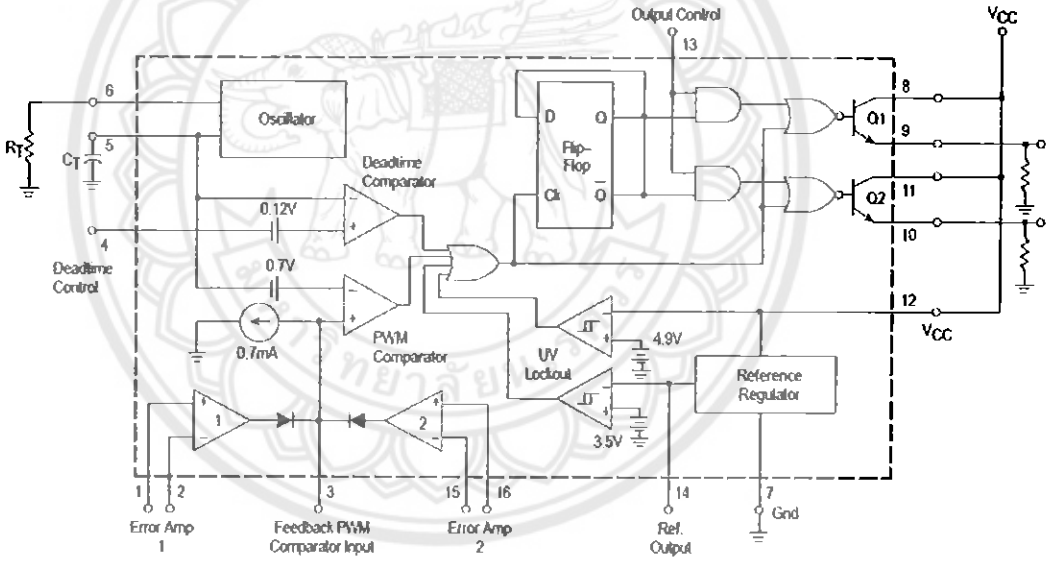


รูปที่ 2.39 แผนภาพวงจรแปลงผันกำลังกระแสตรงสองทิศทาง

เมื่อต้องการให้กำลังไฟฟ้าไหลผ่านตัวแปลงผันฯจากซ้ายไปขวา เราสามารถทำได้โดยควบคุมสวิตช์ S1 เท่านั้นที่ทำงาน ส่งผลให้สวิตช์ S2 และไดโอด D2 ไม่นำกระแสจึงทำงานเป็นวงจรทอนระดับแรงดัน และเมื่อต้องการให้กำลังไฟฟ้าไหลผ่านตัวแปลงผันฯจากขวาไปซ้าย สามารถควบคุมสวิตช์ S2 ทำงาน ส่งผลให้สวิตช์ S1 และไดโอด D1 ไม่นำกระแสจึงทำงานเป็นวงจรทบระดับแรงดัน

2.8.4 ตัวสร้างสัญญาณควบคุมการทำงานของสวิตช์

ในการสร้างวงจรควบคุมแรงดันเอาท์พุตและจำกัดกระแสแบตเตอรี่เราเลือกใช้ไอซีหมายเลข TL494 สร้างสัญญาณควบคุมการทำงานของสวิตช์โดยใช้หลักการพีดับเบิลยูเอ็ม (Pulse width modulation: PWM) แผนภาพวงจรภายในของไอซีหมายเลข TL494 ดังแสดงในรูปที่ 2.40 สัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มนี้สร้างจากสัญญาณรูปคลื่นฟันเลื่อย (Sawtooth waveform) ที่ได้จากวงจรกำเนิดสัญญาณ (Oscillator) เปรียบเทียบกับสัญญาณควบคุมที่เกิดจากวงจรขยายความผิดพลาด (Error amplifier) 2 วงจร ทำให้ความกว้างของสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มเปลี่ยนแปลงได้ ส่งผลให้ค่าดิวตี้ไซเคิลเปลี่ยนแปลงเช่นกัน โดยเราสามารถปรับความถี่ของสัญญาณรูปคลื่นฟันเลื่อยได้ด้วยการเลือกค่าของตัวเก็บประจุ C_T และตัวต้านทาน R_T ที่ต่อกับขาที่ 5และ 6 ตามลำดับนอกจากนี้ TL494 ยังให้แรงดันคงที่ 5 V ออกมายังขาที่ 14 ซึ่งใช้เป็นแรงดันอ้างอิงในการควบคุมแรงดันเอาท์พุตและจำกัดกระแสแบตเตอรี่ โดยไอซีหมายเลข TL494 สามารถรับแรงดันเข้ามาผ่านขาที่ 12 (VCC) ในช่วง 7 –40 V

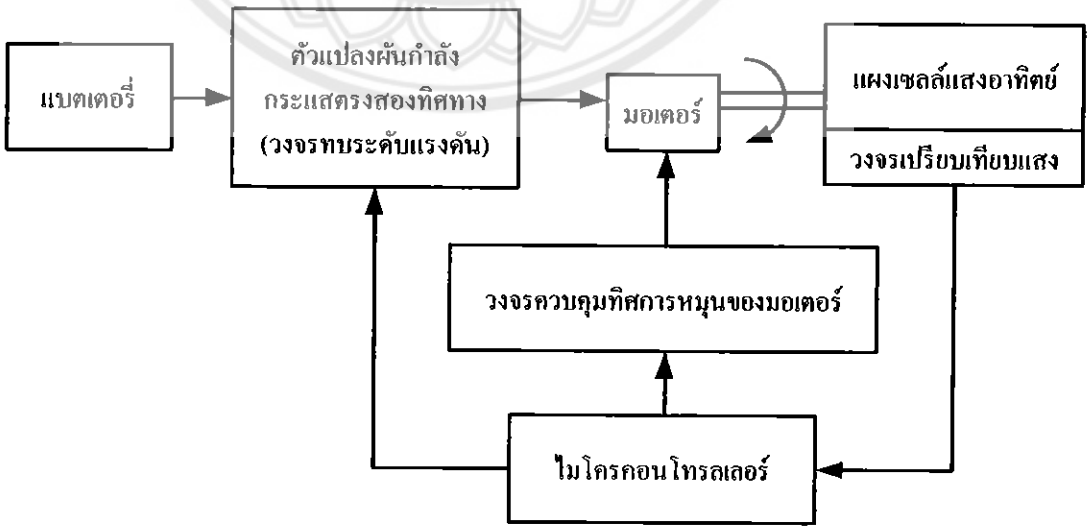


รูปที่ 2.40 แผนภาพวงจรภายในวงจรรวมหมายเลข TL494

บทที่ 3
การออกแบบและสร้างระบบติดตามแสงอาทิตย์

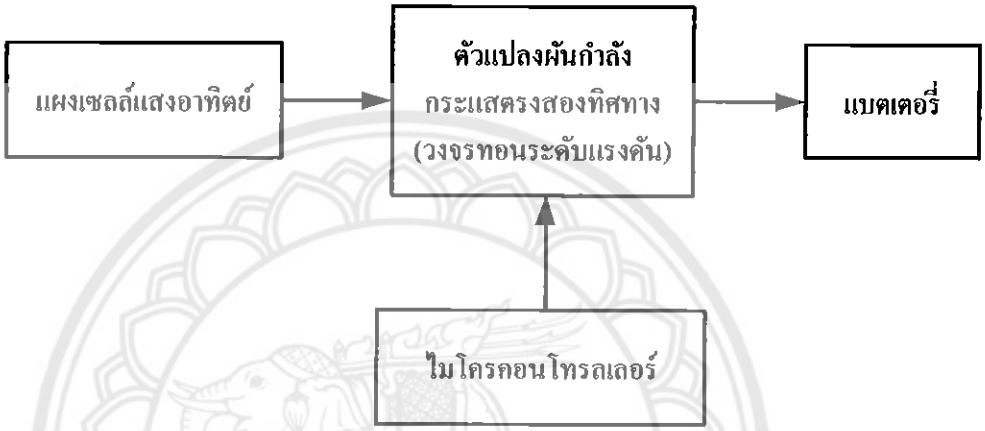
3.1 การออกแบบขั้นตอนการทำงานของระบบ

การทำงานของระบบติดตามแสงอาทิตย์แบบแกนเดี่ยวสามารถแบ่งออกเป็นสองช่วงคือ ช่วงการติดตามแสงอาทิตย์และช่วงการอัดประจุแบตเตอรี่ โดยการทำงานช่วงการติดตามแสงอาทิตย์สามารถแสดงด้วยแผนภาพดังรูปที่ 3.1 ไมโครคอนโทรลเลอร์กำหนดการทำงานของรีเลย์ในระบบเพื่อทำให้แบตเตอรี่คายพลังงานผ่านตัวแปลงผันกำลังกระแสตรงสองทิศทาง ซึ่งในขณะนี้ทำงานเป็นวงจรทบระดับแรงดันเพื่อปรับเพิ่มค่าแรงดันไฟฟ้าได้จากแบตเตอรี่และรักษาให้คงที่ 20 V สำหรับใช้ขับเคลื่อนมอเตอร์ให้หมุนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ วงจรเปรียบเทียบแสงซึ่งติดตั้งอยู่บนระนาบเดียวกันกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทำการเปรียบเทียบความเข้มแสงที่ตกกระทบโดยใช้แอลดีอาร์จำนวน 2 ตัว ทำหน้าที่เป็นตัวรับรู้แสง ค่าแรงดันเอาท์พุตของแอลดีอาร์ทั้งสองถูกเปรียบด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ถ้าแอลดีอาร์ทั้งสองได้รับความเข้มแสงต่างกันจะทำให้ไมโครคอนโทรลเลอร์กำหนดการทำงานของรีเลย์ในวงจรควบคุมทิศการหมุนเพื่อให้มอเตอร์ขับเคลื่อนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไปในทิศทางที่จะลดความแตกต่างของค่าความเข้มแสงที่แอลดีอาร์ทั้งสองได้รับ จนกระทั่งแรงดันที่ได้รับจากแอลดีอาร์ทั้งสองมีค่าเท่ากันไมโครคอนโทรลเลอร์จึงกำหนดการทำงานของรีเลย์เพื่อให้มอเตอร์หยุดหมุนซึ่งเกิดขึ้นในขณะที่หน้าแผงเซลล์แสงอาทิตย์หันหน้าตรงกับลำแสงของดวงอาทิตย์



รูปที่ 3.1 แผนภาพหลักการทำงานของระบบในช่วงการติดตามแสงอาทิตย์

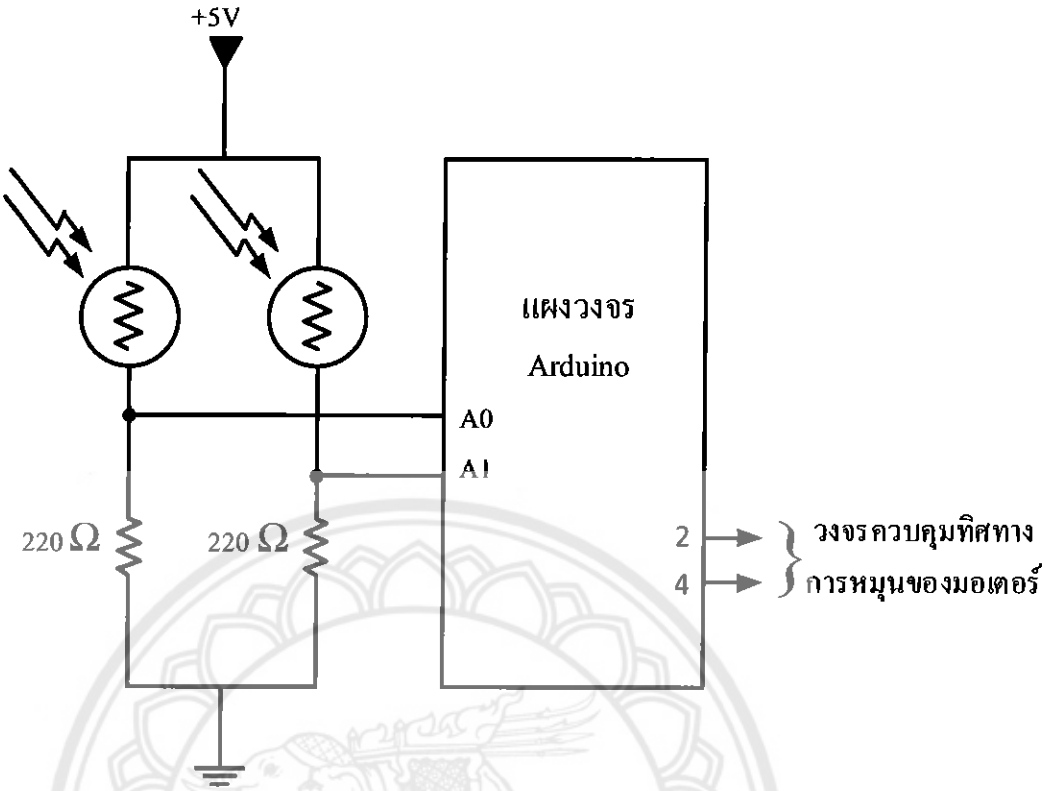
การทำงานของจงจรควบคุมในช่วงการอัดประจุแบตเตอรี่สามารถแสดงด้วยแผนภาพดังรูปที่ 3.2 โดยการทำงานในช่วงนี้เกิดขึ้นหลังจากช่วงการติดตามแสงอาทิตย์ นั้นคือหลังจากที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์หันหน้าตรงกับลำแสงของดวงอาทิตย์และมอเตอร์หยุดหมุนแล้ว ไมโครคอนโทรลเลอร์กำหนดการทำงานของรีเลย์ในระบบเพื่อรับกำลังเอาท์พุตจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ผ่านตัวแปลงผันกำลังกระแสตรงซึ่งในขณะนี้ทำงานเป็นวงจรทอนระดับแรงดันโดยปรับลดค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์และรักษาให้คงที่ 14.4 V สำหรับใช้อัดประจุแบตเตอรี่



รูปที่ 3.2 แผนภาพหลักการทำงานของระบบในช่วงการอัดประจุแบตเตอรี่

3.2 วงจรเปรียบเทียบแสงโดยใช้แอลดีอาร์

วงจรเปรียบเทียบแสงในรูปที่ 3.3 ประกอบด้วยแอลดีอาร์จำนวน 2 ตัวทำหน้าที่รับรู้แสงแล้วเปลี่ยนเป็นแรงดันจากนั้นค่าแรงดันเอาท์พุตของแอลดีอาร์ทั้งสองจะถูกส่งมาเปรียบเทียบค่าที่ไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อกำหนดการทำงานในวงจรควบคุมทิศการหมุนของมอเตอร์ ในการรับแสงจะใช้แอลดีอาร์ต่ออนุกรมกับตัวต้านทาน 220 Ω และป้อนแรงดันให้ 5V เมื่อมีแสงตกกระทบตัวแอลดีอาร์จะสร้างแรงดันและส่งให้ไมโครคอนโทรลเลอร์เปรียบเทียบค่าโดยป้อนเข้าที่ขา A0 และ A1 ในแผงวงจร Arduino ซึ่งเป็นพอร์ตสำหรับรับอินพุตที่เป็นสัญญาณแอนะล็อก เมื่อเปรียบเทียบแล้ว ค่าจะถูกนำมากำหนดการทำงานของวงจรควบคุมทิศการหมุนของมอเตอร์ที่ขา 1 และขา 2 ของไมโครคอนโทรลเลอร์ตามกรณีการเปรียบเทียบแสงจากแอลดีอาร์ดังรูปที่ 3.4 ในกรณีที่ตัวแอลดีอาร์ตัวที่ 1 รับแสงมากกว่าแอลดีอาร์ตัวที่ 2 ทำให้มอเตอร์หมุนไปด้านหนึ่ง ส่วนในกรณีที่ตัวแอลดีอาร์ตัวที่ 2 รับแสงมากกว่าแอลดีอาร์ตัวที่ 1 ทำให้มอเตอร์หมุนกลับทิศ และในกรณีที่แอลดีอาร์รับแสงที่เท่ากันจะทำให้มอเตอร์หยุดหมุน

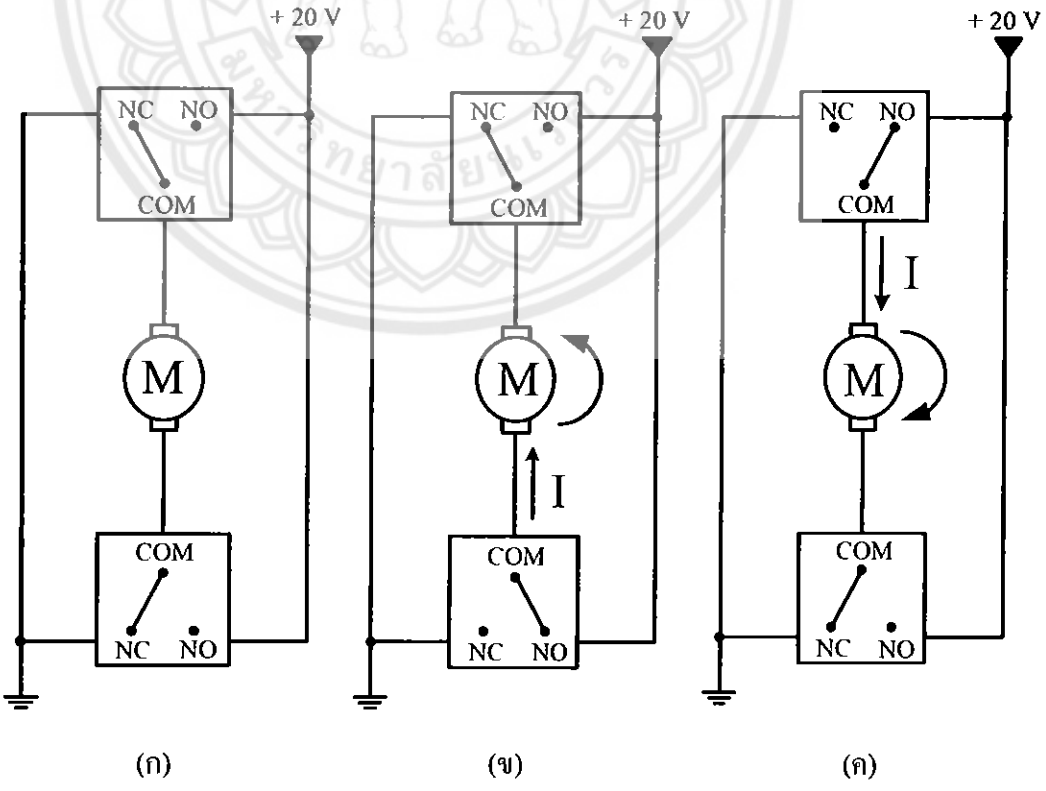


รูปที่ 3.3 แผนภาพวงจรเปรียบเทียบแสงโดยใช้แอลดีอาร์

รูปที่ 3.4 การติดตั้งแอลดีอาร์เพื่อเปรียบเทียบแสง

3.3 วงจรควบคุมทิศทางการหมุนของมอเตอร์

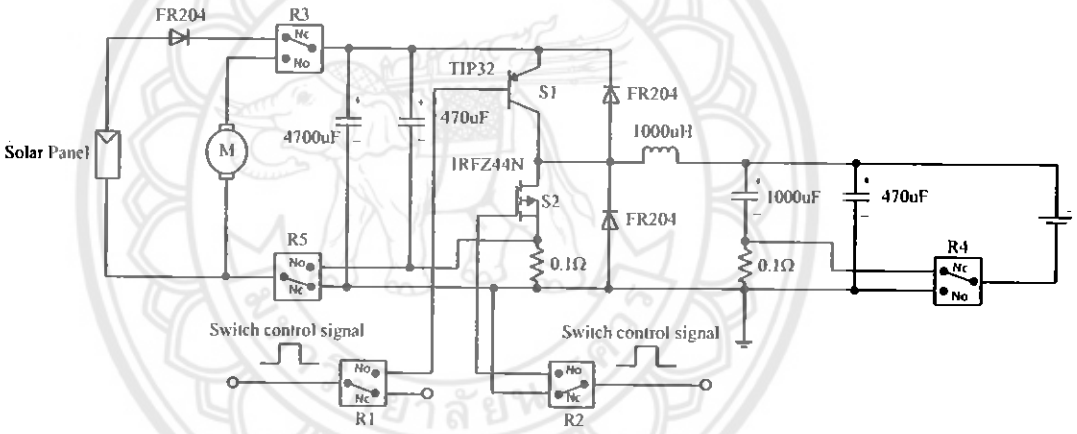
วงจรควบคุมทิศทางการหมุนของมอเตอร์ในรูปที่ 3.5 จะถูกกำหนดการทำงานโดยไมโครคอนโทรลเลอร์ที่เปรียบเทียบค่าแรงดันจากวงจรเปรียบเทียบแสงและส่งค่าออกมาที่ขา 2 และขา 4 เพื่อมาควบคุมรีเลย์ในวงจรควบคุมทิศการหมุนของมอเตอร์ ในการควบคุมทิศการหมุนของมอเตอร์จะประกอบไปด้วยรีเลย์ 2 ตัวซึ่งมี 2 ชุดหน้าสัมผัสคือหน้าสัมผัสแบบปกติเปิด (Normally Opened : NO) และหน้าสัมผัสแบบปกติปิด (Normally Closed : NC) ที่หน้าสัมผัสของรีเลย์ทั้งสองตัวนี้โดยหน้าสัมผัสแบบปกติเปิดจะต่อกับไฟ 20 V ซึ่งมาจากตัวแปลงผันกำลังกระแสตรงสองทิศทางส่วนหน้าสัมผัสแบบปกติปิดจะต่อกราวด์ ในสภาวะปกติในรูปที่ 3.5 (ก) หน้าสัมผัสของรีเลย์ทั้งสองตัวจะอยู่ที่หน้าสัมผัสแบบปกติปิดมอเตอร์จะไม่หมุน และในกรณีที่แอลดีอาร์ตัวที่ 1 รับแสงมากกว่าแอลดีอาร์ตัวที่ 2 มีรูปการทำงานดังรูปที่ 3.5 (ข) รีเลย์ตัวที่ 1 หน้าสัมผัสอยู่ที่แบบปกติเปิดส่วนรีเลย์ตัวที่ 2 มีหน้าสัมผัสอยู่ที่ปกติปิดทำให้มอเตอร์หมุนไปด้านหนึ่ง ในกรณีที่แอลดีอาร์ตัวที่ 2 รับแสงมากกว่าแอลดีอาร์ตัวที่ 1 มีรูปการทำงานดังรูปที่ 3.5 (ค) ซึ่งตรงกันข้ามกับกรณีแรกจึงทำให้มอเตอร์หมุนกลับทิศ ส่วนในกรณีที่แอลดีอาร์รับค่าแสงเท่ากันหน้าสัมผัสของรีเลย์ทั้งสองจะอยู่ที่หน้าสัมผัสแบบปกติปิดกลับไปสู่การทำงานในสภาวะปกติทำให้มอเตอร์หยุดหมุน



รูปที่ 3.5 แผนภาพวงจรควบคุมทิศทางการหมุนของมอเตอร์

3.4 ตัวแปลงผันกำลังกระแสตรงสองทิศทาง

ตัวแปลงผันกำลังกระแสตรงสองทิศทางดังแสดงในรูปที่ 3.6 แบ่งช่วงทำงานออกเป็นสองช่วงคือช่างการติดตามแสงอาทิตย์และช่วงการอัดประจุแบตเตอรี่ แต่ละช่วงการทำงานจะถูกกำหนดด้วยรีเลย์ที่ควบคุมโดยไมโครคอนโทรลเลอร์การทำงานในช่วงการติดตามแสงตัวแปลงผันกำลังกระแสตรงสองทิศทางจะทำหน้าที่เป็นวงจรทบระดับแรงดันเพื่อปรับเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ 12 V ให้เป็น 20 V สำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์ให้หมุนแผงเซลล์แสงอาทิตย์การทำงานในช่วงอัดประจุแบตเตอรี่ตัวแปลงผันกำลังกระแสตรงสองทิศทางจะทำหน้าที่เป็นวงจรทอนระดับแรงดันเพื่อปรับลดค่าแรงดันที่ได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้เหลือ 14.4 V เพื่อใช้สำหรับอัดประจุแบตเตอรี่ 12 V การทำให้แรงดันเอาท์พุตของตัวแปลงผันกำลังกระแสตรงสองทิศทางให้คงที่และจำกัดการแสของแบตเตอรี่ในสองช่วงการทำงานเราจะใช้วงจรสร้างสัญญาณ TL 494 ควบคุมสวิตช์ของตัวแปลงผันกำลังการะแสตรงสองทิศทาง



รูปที่ 3.6 การเชื่อมต่อวงจรของตัวแปลงผันกำลังกระแสตรงสองทิศทางกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ มอเตอร์ และแบตเตอรี่

การออกแบบควบคุมการทำงานของตัวแปลงผันกำลังกระแสตรงสองทิศทางในรูปที่ 3.6 สามารถออกแบบได้ดังนี้

1) สวิตช์ S1 (ทรานซิสเตอร์) ทำหน้าที่เป็นสวิตช์เลือกการทำงานในช่วงอัดประจุให้แก่แบตเตอรี่โดยควบคุมการทำงานด้วยรีเลย์ R1
2) สวิตช์ S2 (มอสเฟต) ทำหน้าที่เป็นสวิตช์เลือกการทำงานในช่วงติดตามแสงของแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยควบคุมการทำงานด้วยรีเลย์ R2
3) รีเลย์ R1 ทำหน้าที่ตัดและต่อวงจรระหว่างสัญญานจากไอซีหมายเลข TL494 กับขาเบสของทรานซิสเตอร์หมายเลข TIP32C

4) รีเลย์ R2 ทำหน้าที่ตัดและต่อวงจรระหว่างสัญญานจากไอซีหมายเลข TL494 และขาเกตของมอสเฟตหมายเลข IRFZ44N

5) รีเลย์ R3 ทำหน้าที่เปลี่ยนหน้าสัมผัสเพื่อเลือกจะต่อกับมอเตอร์ในสถานะเป็นวงจรทบระดับแรงดัน หรือจะต่อกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในสถานะเป็นวงจรทอนระดับแรงดัน

6) รีเลย์ R4 ทำหน้าที่ในการตัดต่อวงจรกับตัวตามทาน 0.1 Ω ที่ใช้เป็นตัวรับรู้กระแสช่วงเป็นวงจรทบระดับแรงดัน

7) รีเลย์ R5 ทำหน้าที่ในการตัดต่อวงจรกับตัวตามทาน 0.1 Ω ที่ใช้เป็นตัวรับรู้กระแสช่วงเป็นวงจรทบระดับแรงดัน

การควบคุมแรงดันเอาท์พุตและจำกัดกระแสแบตเตอรี่ที่ในโครงงานนี้เราจะใช้วงจรสร้างสัญญาณ TL494 ควบคุมสวิตช์ตัวแปลงผันกำลังการะแสตรงสองทิศทางจากรูปที่ 3.6 ในช่วงการติดตามแสงและช่วงการอัดประจุแบตเตอรี่สามารถแสดงรูปวงจรสร้างสัญญาณได้ดังรูปที่ 3.7 และรูปที่ 3.8 ในการควบคุมแรงดันเอาต์พุตเราเลือกใช้วงจรขยายความผิดพลาดตัวที่ 1 โดยขาที่ 1 รับแรงดันตกคร่อมตัวต้านทาน R_V เข้ามาเปรียบเทียบกับแรงดันอ้างอิงที่ขาที่ 2 เพื่อจำกัดค่าแรงดันอัดประจุไม่ให้สูงเกินค่าที่ออกแบบไว้ ส่วนการควบคุมการจำกัดกระแสของแบตเตอรี่เราได้เลือกใช้วงจรขยายความผิดพลาดตัวที่ 2 โดยขาที่ 16 รับค่าแรงดันตกคร่อมตัวต้านทาน 0.1 Ω ซึ่งเป็นตัวรับรู้ค่ากระแส (Current sensor) โดยให้ค่าแรงดันที่สอดคล้องกับค่ากระแสอัดประจุเข้ามาเปรียบเทียบกับแรงดันอ้างอิงที่ขาที่ 15 ซึ่งเกิดจากการแบ่งแรงดันโดยการปรับค่าตัวต้านทาน R_I เพื่อจำกัดค่ากระแสอัดประจุไม่ให้สูงเกินค่าที่ออกแบบไว้

การกำหนดแรงดันเอาท์พุตในวงจรรูปที่ 3.7 และรูปที่ 3.8 สามารถทำได้โดยเลือกค่าความต้านทานของ R_V ตามขนาดแรงดันเอาท์พุตซึ่งหาได้จากสมการที่ (3.1) โดยค่าแรงดัน $V_{ref\ 2}$ เท่ากับ 2.5 V ซึ่งเกิดจากการแบ่งแรงดันของตัวต้านทาน 12 kΩ กับตัวต้านทาน 12 kΩที่ต่อกับขา $V_{ref\ 2}$ (ขาที่ 14) ที่มีค่าแรงดันคงที่ 5 V ดังนั้นแรงดันที่ขาที่ 1 จึงเท่ากับ 2.5 V หาค่า R_V โดยใช้หลักการแบ่งแรงดันของตัวต้านทาน 12 kΩ กับตัวต้านทาน R_V

$$V_{ref\,2} = \left(\frac{R_V}{R_V + 12000} \right) \cdot V_{out}$$

$$R_V = \frac{12000 \cdot V_{ref\,2}}{V_{out} - V_{ref\,2}} \qquad (3.1)$$

โดยที่ V_{out} คือแรงดันอัดประจุ (V) และ V_{ref2} คือ แรงดันอ้างอิง (= 2.5 V)

การกำหนดค่าจำกัดกระแสของแบตเตอรี่ในวงจรรูปที่ 3.7และรูปที่ 3.8 ทำได้โดยเลือกค่าความต้านทานของ R_lตามค่ากระแสที่ต้องการจำกัดค่าซึ่งหาจากสมการที่ (3.2) โดยกำหนดแรงดัน V_{ref} เท่ากับ 5 V ซึ่งต่อกับขา V_{ref} (ขาที่14)หาค่า R_lโดยใช้หลักการการแบ่งแรงดันที่ขาที่ 15 ซึ่งทำให้แรงดันตกคร่อมตัวต้านทาน R_l เท่ากับแรงดันตกคร่อมตัวต้านทาน 0.1 Ω

$$0.1 \cdot I_{out} = \left(\frac{R_l}{12000 + R_l} \right) \cdot V_{ref}$$

$$R_l = \frac{1200 \cdot I_{out}}{V_{ref} - 0.1 \cdot I_{out}} \qquad (3.2)$$

โดยที่ I_{out} คือ กระแสที่ต้องการจำกัดค่า (A)

V_{ref} คือ แรงดันอ้างอิง (= 5 V)

3.4.1 ตัวแปลงผันกำลังกระแสตรงสองทิศทางในช่วงการติดตามแสง

ตัวแปลงผันกำลังกระแสตรงสองทิศทางจากรูปที่ 3.6 ในช่วงการติดตามแสงเราจะเลือกควบคุมรีเลย์ R2 ให้อยู่หน้าสัมผัสแบบปกติเปิดเพื่อทำให้สวิตช์ S2 รับค่าสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มจาก TL494 สร้างแรงดันเอาท์พุตคง และควบคุมรีเลย์ R3, R4 และ R5 ให้อยู่ที่หน้าสัมผัสแบบปกติเปิดทำให้ครบวงจร ซึ่งขณะนี้ตัวแปลงผันกำลังฯ ทำหน้าที่เป็นวงจรทบระดับแรงดันมีรูปวงจรสมมูลดังรูปที่ 3.7 เพื่อปรับเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ 12 V ให้เป็น 20 V สำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์ให้หมุนแผงเซลล์แสงอาทิตย์การทำให้แรงดันเอาท์พุตคงค่าที่ 20 V ในรูปที่ 3.7 เราสามารถทำได้โดยการปรับค่า $R_{l'}$ จากสมการที่ (3.1)

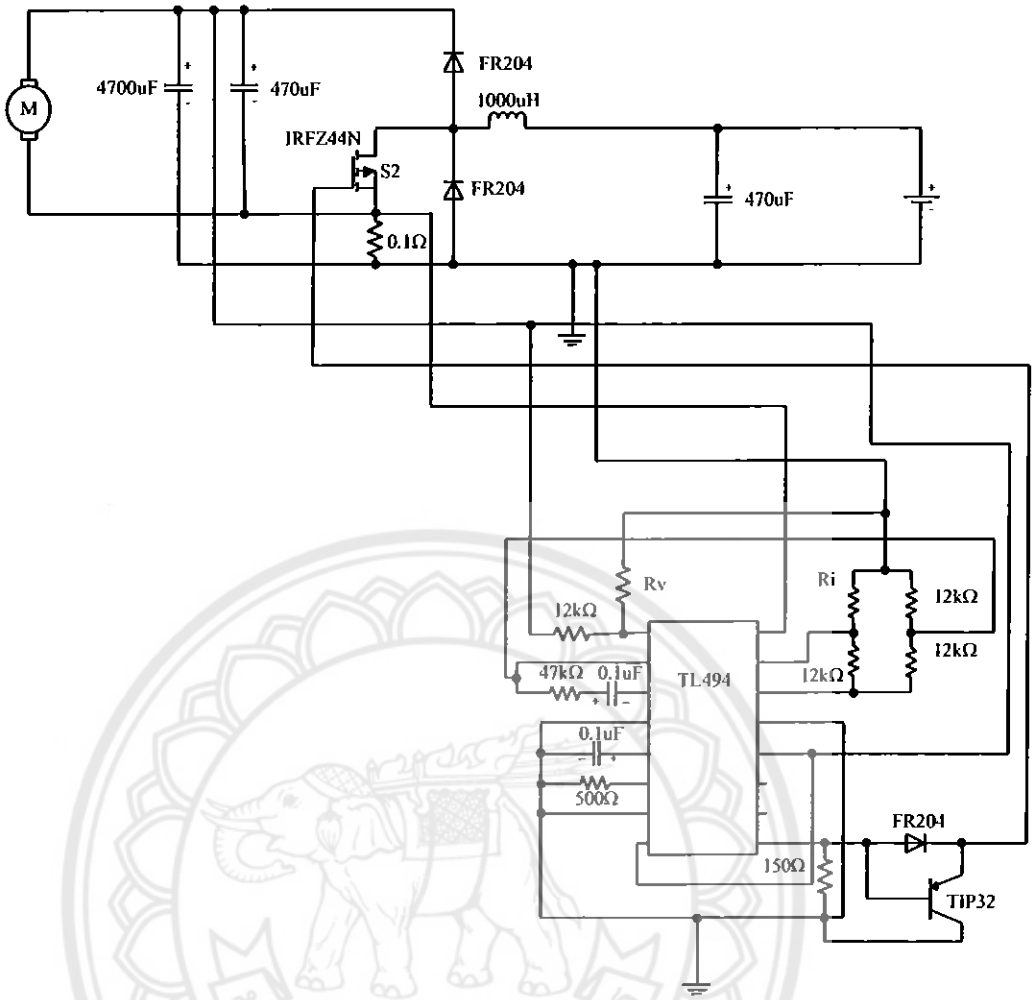
ที่ V_{out} = 20 V จะได้ $R_{l'}$ = 1.714 kΩ ≈ 1.7 kΩ

ดังนั้นจึงเลือกใช้ตัวต้านทาน $R_{l'}$ เท่ากับ 1.7 kΩ เพื่อคงค่าแรงดันเอาท์พุตที่ 20 V

การจำกัดกระแสแบตเตอรี่ในช่วงนี้เราต้องการจำกัดกระแสไว้ที่ 1 A เราสามารถปรับค่า R_l เพื่อให้ได้กระแสที่ต้องการตามสมการที่ (3.2)

ที่ I_{out} = 1 A จะได้ R_l = 244.898 Ω ≈ 245 Ω

ดังนั้นจึงเลือกใช้ตัวต้านทาน R_l เท่ากับ 245 Ω เพื่อจำกัดกระแสไม่เกิน 1A



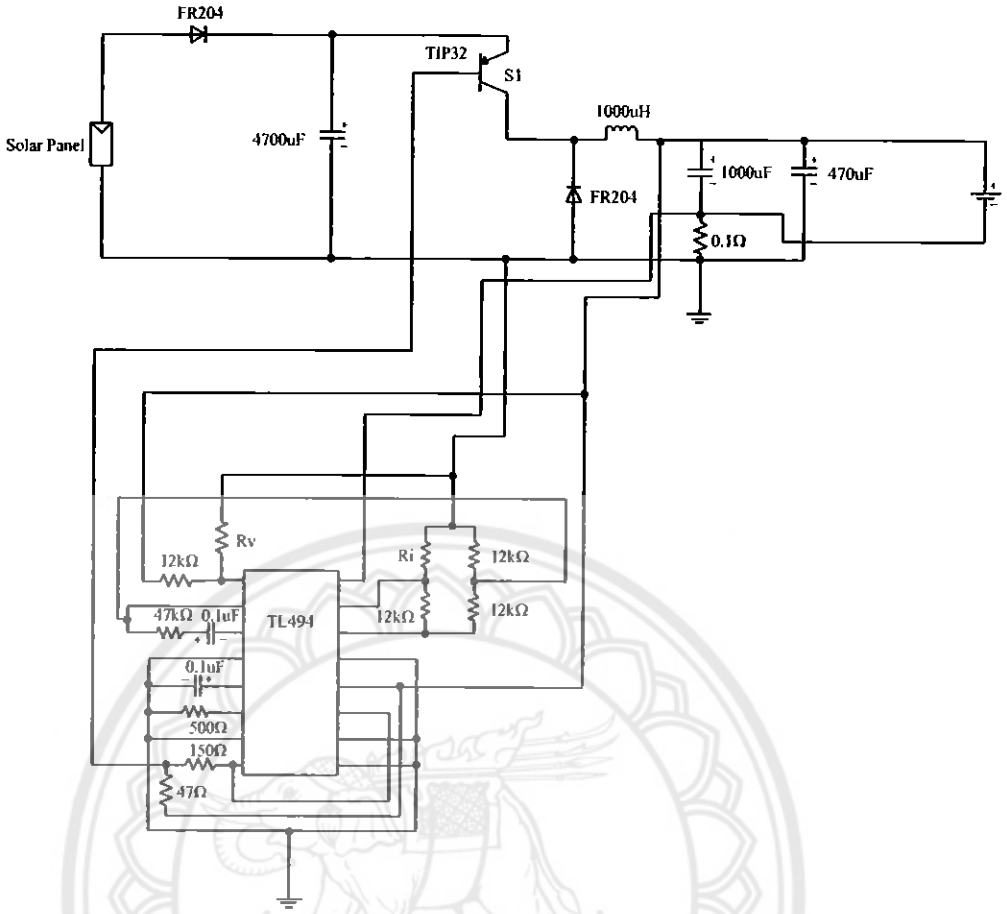
รูปที่ 3.7 แผนภาพวงจรกำลังและวงจรควบคุมในช่วงการติดตามแสงอาทิตย์

3.4.2 ตัวแปลงผันกำลังกระแสตรงสองทิศทางในช่วงอัดประจุแบตเตอรี่

ตัวแปลงผันกำลังกระแสตรงสองทิศทางจากรูปที่ 3.8 ในช่วงอัดประจุแบตเตอรี่จะเลือกควบคุมรีเลย์ R1 ให้อยู่ที่หน้าสัมผัสแบบปกติเปิดเพื่อทำให้สวิตช์ S1 รับค่าสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มจาก TL494 สร้างแรงดันเอาท์พุตคงที่และควบคุมรีเลย์ R3, R4, R5 ให้อยู่ที่หน้าสัมผัสแบบปกติปิดทำให้ครบวงจร ซึ่งขณะนี้ตัวแปลงผันกำลังกระแสตรงสองทิศทางทำหน้าที่เป็นวงจรทอนระดับแรงดันมีรูปวงจรสมมูลดังรูปที่ 3.7 เพื่อปรับลดค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้เหลือ 14.4 V สำหรับอัดประจุแบตเตอรี่ การทำให้แรงดันเอาท์พุตคงค่าที่ 14.4 V ในรูปที่ 3.8 สามารถทำได้โดยการปรับค่า R_1 จากสมการที่ (3.1)

ที่ V_{out} = 14.4 V จะได้ R_1 = 2.521 kΩ ≈ 2.5 kΩ

ดังนั้นจึงเลือกใช้ตัวต้านทาน R_1 เท่ากับ 2.5 kΩ เพื่อคงค่าแรงดันเอาท์พุตที่ 14.4 V



รูปที่ 3.8 แผนภาพวงจรกำลังและวงจรควบคุมในช่วงการอัดประจุแบตเตอรี่

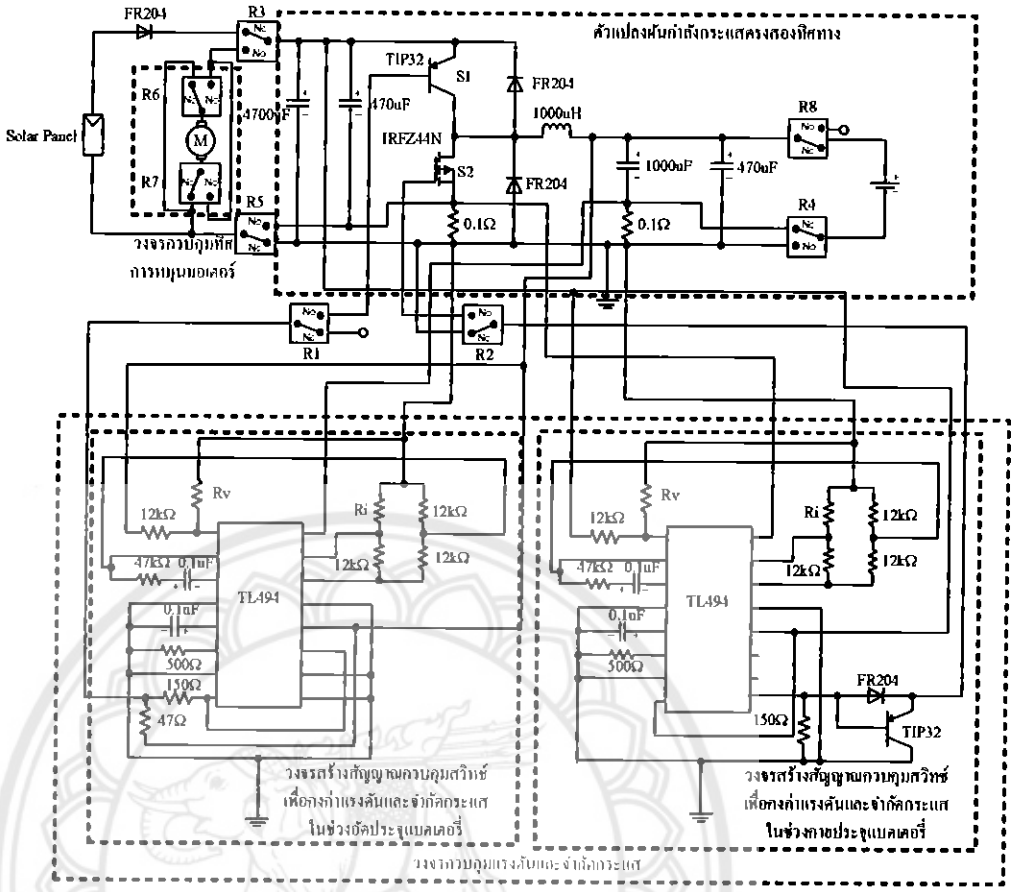
การจำกัดกระแสแบตเตอรี่ในช่วงนี้เราต้องการจำกัดกระแสไว้ที่ 1 A เราสามารถปรับค่า R_l เพื่อให้ได้กระแสที่ต้องการตามสมการที่ (3.2)

ที่ I_{out} = 1 A จะได้ $R_l = 244.898\,\Omega \approx 245\,\Omega$

ดังนั้นจึงเลือกใช้ตัวต้านทาน R_l เท่ากับ 245 Ω เพื่อจำกัดกระแสไม่เกิน 1A

3.5 วงจรของระบบติดตามแสงอาทิตย์

วงจรของระบบติดตามแสงอาทิตย์ที่ออกแบบในโครงงานนี้ซึ่งประกอบขึ้นจาก วงจรเปรียบเทียบความเข้มแสง วงจรควบคุมทิศการหมุนของมอเตอร์ ตัวแปลงผันกำลังกระแสตรงสองทิศทาง วงจรสร้างสัญญาณควบคุมสวิตช์เพื่อคงค่าแรงดันและจำกัดกระแส สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.9



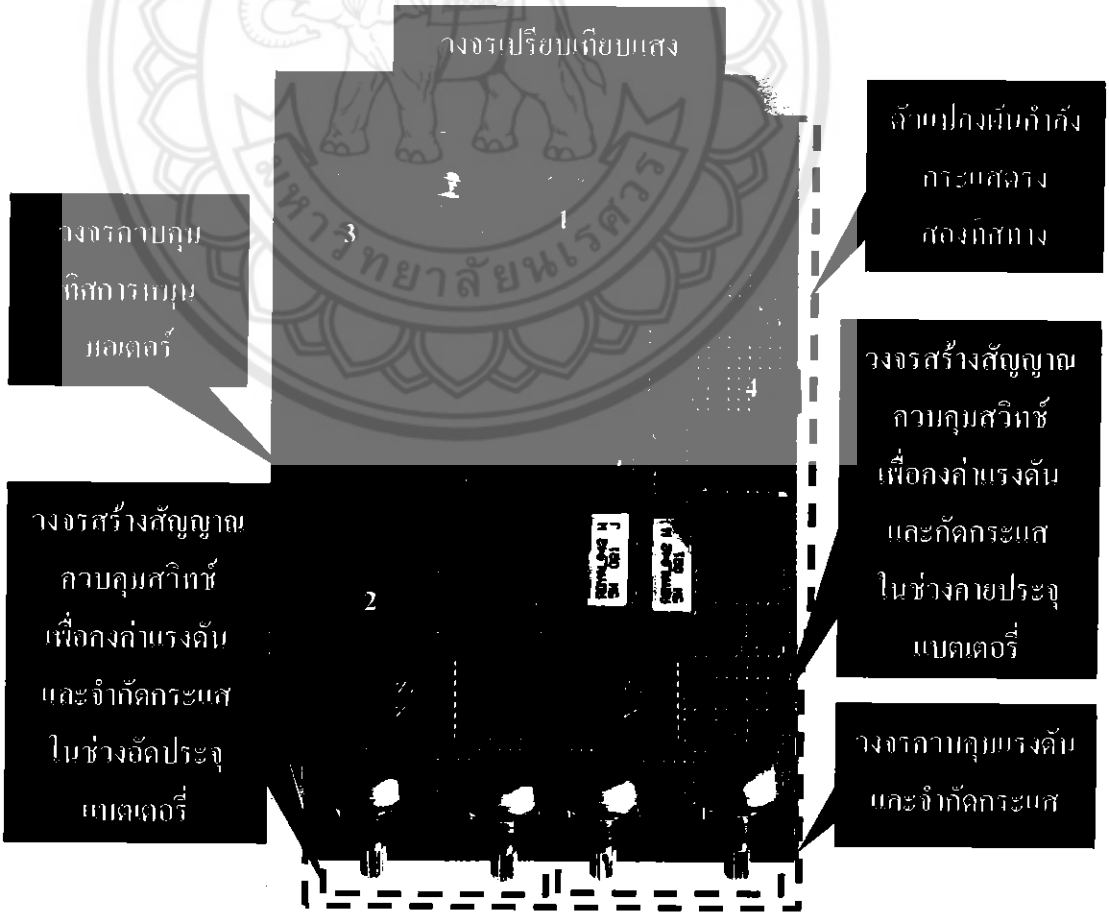
รูปที่ 3.9 แผนภาพวงจรกำลังและวงจรควบคุมของระบบติดตามแสงอาทิตย์

วงจรเปรียบเทียบความเข้มแสงทำหน้าที่รับค่าแรงดันจากแอลดีอาร์มาเปรียบเทียบกันที่ไมโครคอนโทรลเลอร์ค่าจะถูกส่งไปให้วงจรควบคุมทิศทางการหมุนของมอเตอร์เพื่อทำให้แผงหมุนไปในทิศทางระนาบเดียวกับดวงอาทิตย์ ตัวแปลงผันกำลังกระแสตรงสองทิศทางทำหน้าเป็นวงจรทบระดับแรงดันเพื่อใช้ในการขับมอเตอร์และทำหน้าที่เป็นวงจรทอนระดับเพื่ออัดประจุให้แบตเตอรี่วงจรสร้างสัญญาณควบคุมสวิตช์เพื่อคงค่าแรงดันและจำกัดกระแสจะใช้ TL494 เพื่อสร้างสัญญาณดับเบิ้ลยูพีเอ็มควบคุมสวิตช์ S1 และสวิตช์ S2 ของตัวแปลงผันกำลังกระแสตรงสองทิศทางโดย TL494 เป็นไอซีที่สร้างสัญญาณควบคุมโดยสามารถให้ค่าดิวตี้ไซเคิลสูงสุดที่ 0.5 ในช่วงอัดประจุแบตเตอรี่มีการใช้ขาที่ 8 ของไอซีซึ่งเป็นขาคอลเลคเตอร์ของทรานซิสเตอร์ภายในตัวไอซีเชื่อมต่อกับวงจรแบ่งแรงดันระหว่าง 47 Ω และ150 Ω แล้วนำแรงดันที่ได้ไปเป็นแรงดันเทียบเคียงกับแรงดันขาอีมิตเตอร์ของสวิตช์ S1 ซึ่งเป็นทรานซิสเตอร์ชนิด PNP ส่งผลให้เอาท์พุตที่ได้เป็นแบบกลับค่าระหว่างลอจิกสูงและลอจิกต่ำทำให้ได้ค่าดิวตี้ไซเคิลอยู่ในช่วง $0.5 < D < 1$ โดยลักษณะการทำงานของสวิตช์ S1 นั้นมีหลักการทำงานคือ ในกรณีที่สวิตช์ S1 จะทำการนำกระแสได้นั้นเกิดจากทรานซินซิสเตอร์ภายในตัวไอซีปิดวงจรส่งผลให้เชื่อมต่อตัวตานทาน 150 Ω ลงกราวด์ทำให้ความต่างของแรงดันที่ระหว่างขาอีมิตเตอร์และขาเบสของ S1 น้อยกว่า 0.7 V และใน

กรณีที่ S1 นำกระแสได้นั้นเกิดจากทรานซิสเตอร์ภายในตัวไอซีเปิดวงจรส่งผลให้ตัวต้านทาน 150 Ω ถูกตัดออกจากวงจรทำให้ได้แรงดันที่ขาอีมิตเตอร์มีค่าแรงดันมากกว่าแรงดันขาเบสตั้งแต่ 0.7 V ขึ้นในช่วงคายประจุแบตเตอรี่นั้นจะใช้เอาต์พุทขาที่ 9 ของไอซีในการควบคุมสวิตช์ S2 ทำให้สัญญาณควบคุมที่ค่าดิวตี้ไซเคิลในช่วง 0 < D < 0.5 สำหรับใช้ควบคุมสวิตช์ S2 โดยสวิตช์ S2 เป็นมอสเฟต หมายเลข IRFZ44N มีโครงสร้างของขาเกตเทียบกับแหล่งกำเนิดเป็นเสมือนตัวเก็บประจุ ซึ่งมีช่วงเวลาขณะเริ่มนำกระแสที่น้อยแต่และมีช่วงเวลาขณะเริ่มหยุดนำกระแสที่มากมอสเฟตร้อน และได้มีการแก้ปัญหาในช่วงขณะเริ่มหยุดนำกระแสให้หยุดได้รวดเร็วขึ้นโดยการต่อทรานซิสเตอร์ หมายเลข TIP32C ร่วมกับไดโอดเพื่อช่วยเพิ่มความรวดเร็วในการคายประจุลงสู่กราวด์

3.6 โครงสร้างของระบบติดตามแสงอาทิตย์

ในโครงสร้างของระบบติดตามแสงอาทิตย์ มีส่วนประกอบที่สร้างขึ้นได้แสดงดังรูปที่ 3.10 ซึ่งประกอบด้วย ส่วนของวงจรเปรียบเทียบแสงอาทิตย์ ส่วนของวงจรควบคุมทิศการหมุนของมอเตอร์ส่วนของวงจรควบคุมแรงดันเอาท์พุตคงที่และวงจรจำกัดกระแสจากแบตเตอรี่

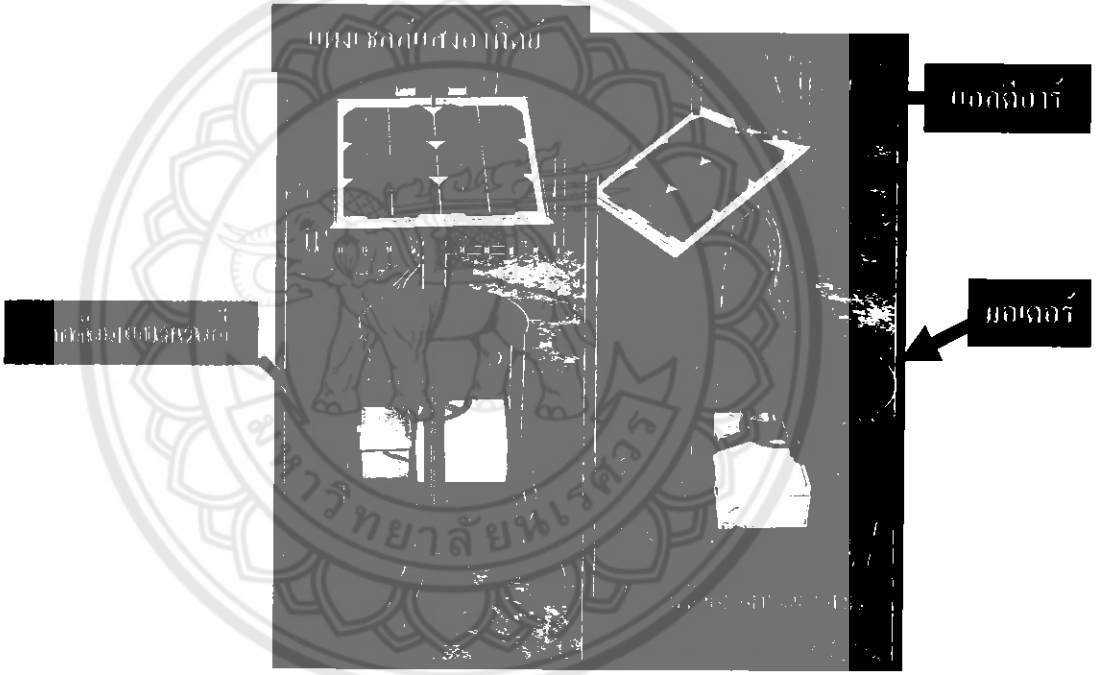


รูปที่ 3.10 ส่วนประกอบในวงจรกำลังและวงจรควบคุมของระบบติดตามแสงอาทิตย์

ในส่วนของวงจรกำลังประกอบด้วยวงจรเปรียบเทียบแสงซึ่งมีขั้วต่อสำหรับใส่แอลดีอาร์ตัวที่ 1 และแอลดีอาร์ตัวที่ 2 ที่หมายเลข 1 ในส่วนของวงจรควบคุมทิศทางการหมุนของมอเตอร์ มีขั้วต่อสำหรับต่อกับมอเตอร์ที่หมายเลข 2 ในส่วนของตัวแปลงผันกำลังกระแสตรงสองทิศทางมีขั้วสำหรับต่อกับเซลล์แสงอาทิตย์ที่หมายเลข 3 และขั้วสำหรับต่อกับแบตเตอรี่อยู่ที่หมายเลข 4

ในส่วนของวงจรควบคุมประกอบด้วยวงควบคุมแรงดันเอาท์พุตคงที่และจำกัดกระแสแบตเตอรี่แบ่งส่วนควบคุมออกเป็นสองส่วนคือส่วนการควบคุมขณะอัดประจุให้แก่แบตเตอรี่ และส่วนการควบคุมขณะหมุนแผงเซลล์แสงอาทิตย์

เมื่อเรานำส่วนวงจรของระบบติดตามแสงอาทิตย์ มาตอร่วมกับโครงสร้างที่ใช้สำหรับติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เราจะได้รูปโครงสร้างทั้งหมดดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 โครงสร้างของระบบติดตามแสงอาทิตย์แบบแกนเดี่ยว

ในการทำงานของแบบจำลองในโครงงานนี้เป็นโครงสร้างหมุนแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบแกนเดี่ยว ซึ่งสามารถปรับองศาเองตามฤดูกาลในแนวแกนนอนและควบคุมการหมุนอัตโนมัติในแนวแกนดิ่งตามช่วงเวลาของแต่ละวันโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์

บทที่ 4
ผลการทดสอบ

การทดสอบระบบติดตามแสงอาทิตย์แบบแกนเดี่ยวที่สร้างแบ่งออกเป็น 2 ส่วนดังนี้

1) การทดสอบตัวแปลงผันกำลังกระแสตรงสองทิศทาง ในการคุมค่าระดับแรงดันและจำกัดกระแสเอาท์พุตในช่วงการทำงานเป็นวงจรทอนระดับแรง และคุมค่าแรงดันเอาท์พุตในช่วงการทำงานเป็นวงจรทบระดับแรงดันตามค่าที่ได้ออกแบบไว้
2) การทดสอบการทำงานของระบบติดตามแสงอาทิตย์แบบแกนเดี่ยวในช่วงการทำงานอัดประจุแบตเตอรี่และช่วงการทำงานติดตามแสงอาทิตย์

4.1 การทดสอบการทำงานของตัวแปลงผันกำลังกระแสตรงสองทิศทาง

ตัวแปลงผันกำลังกระแสตรงสองทิศทางสามารถทำงานเป็นได้ทั้งวงจรทอนระดับแรงดันและวงจรทบระดับแรงดัน โดยถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าผ่านวงจรได้ทั้งสองทิศทาง (กลับทิศได้) การทดสอบนี้ใช้โหลดตัวต้านทานและป้อนแรงดันอินพุตค่าต่าง ๆ และวัดค่าแรงดันและกระแสในวงจรเพื่อนำมาคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าและค่าประสิทธิภาพของวงจรโดยใช้สมการที่ (4.1)

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{V_{out} \times I_{out}}{V_{in} \times I_{in}} = \frac{V_{out}^2 / R}{V_{in} \times I_{in}} \qquad (4.1)$$

โดยที่ η คือค่าประสิทธิภาพของตัวแปลงผันกำลังฯ

P_{out}, P_{in} คือค่ากำลังเอาท์พุตและกำลังอินพุตของวงจร (W)

V_{out}, V_{in} คือค่าแรงดันเอาท์พุตและแรงดันอินพุตของวงจร (V)

I_{out}, I_{in} คือค่ากระแสเอาท์พุตและกระแสอินพุตของวงจร (A)

R คือค่าความต้านทานของโหลด (Ω)

4.1.1 การทำงานเป็นวงจรทอนระดับแรงดัน

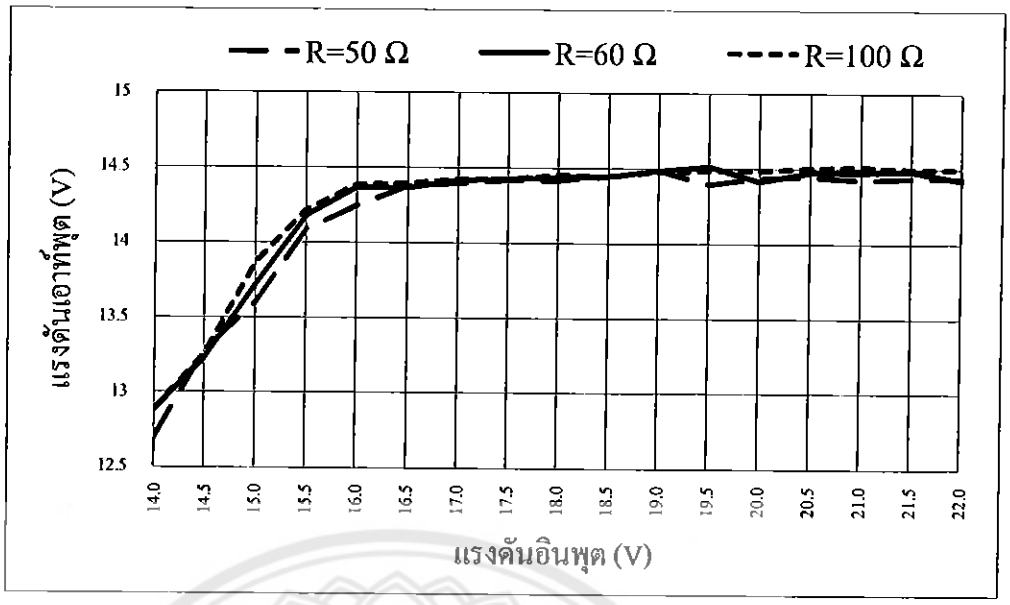
ตัวแปลงผันกำลังกระแสตรงสองทิศทางในระบบติดตามแสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้นทำงานเป็นวงจรทอนระดับแรงดันในช่วงการอัดประจุแบตเตอรี่ด้วยแรงดันคงที่เท่ากับ 14.4 V และกระแสอัดประจุไม่เกิน 1 A ดังนั้นการทดสอบนี้จึงเป็นการตรวจสอบการทำงานเป็นวงจรทอนระดับแรงดันโดยคงค่าแรงดันเอาท์พุตและจำกัดกระแสเอาท์พุตไว้ไม่เกินค่าดังกล่าว การทดสอบแรกเป็นการคงค่าแรงดันของวงจรทอนระดับแรงดันแสดงดังตารางที่ 4.1 โดยจ่ายกำลังไฟฟ้าให้

โหลดตัวต้านทาน 3 ค่า คือ 50 Ω, 60 Ω และ 100 Ω และค่ากระแสเอาท์พุตยังไม่เกินค่าที่ออกแบบไว้ (1 A)

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบการทอนระดับแรงดันและการคงค่าแรงดัน

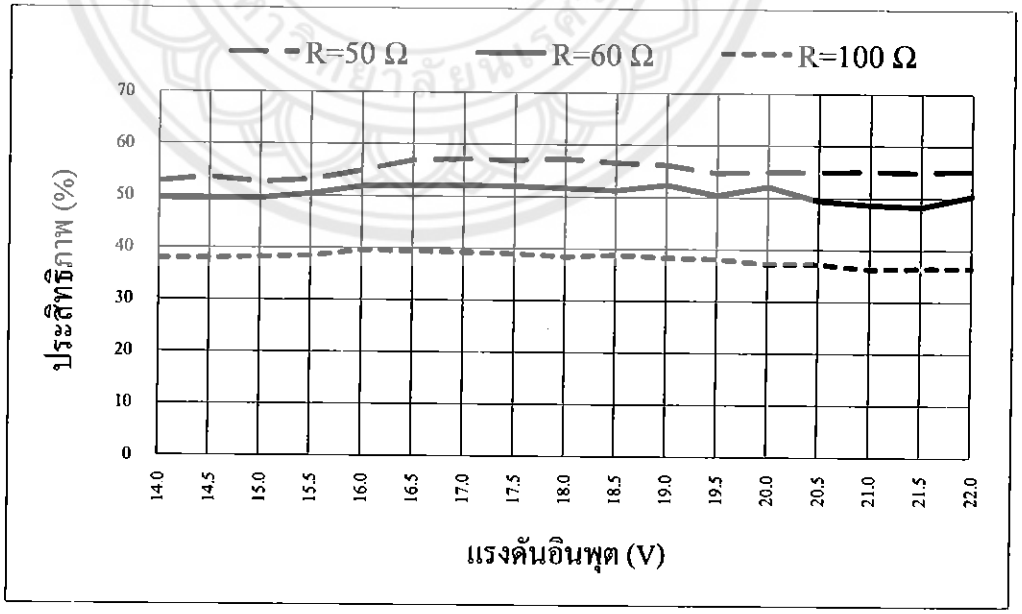
V_{in} (V)	$R = 50\ \Omega$			$R = 60\ \Omega$			$R = 100\ \Omega$		
	I_{in} (A)	V_{out} (V)	η (%)	I_{in} (A)	V_{out} (V)	η (%)	I_{in} (A)	V_{out} (V)	η (%)
14.00	0.436	12.69	52.76	0.398	12.88	49.62	0.312	12.88	37.98
14.50	0.453	13.28	53.70	0.407	13.23	49.43	0.319	13.26	38.01
15.00	0.468	13.6	52.70	0.422	13.72	49.56	0.336	13.87	38.17
15.50	0.482	14.09	53.15	0.429	14.18	50.40	0.339	14.22	38.48
16.00	0.461	14.25	55.06	0.414	14.37	51.96	0.327	14.39	39.58
16.50	0.440	14.38	56.97	0.401	14.37	52.02	0.318	14.40	39.52
17.00	0.426	14.40	57.27	0.391	14.42	52.14	0.312	14.43	39.26
17.50	0.417	14.42	56.99	0.381	14.43	52.05	0.305	14.43	39.01
18.00	0.403	14.42	57.33	0.374	14.44	51.62	0.302	14.46	38.46
18.50	0.399	14.45	56.57	0.367	14.45	51.26	0.291	14.45	38.79
19.00	0.393	14.49	56.24	0.351	14.49	52.47	0.288	14.48	38.32
19.50	0.388	14.40	54.81	0.357	14.52	50.48	0.283	14.49	38.05
20.00	0.379	14.44	55.02	0.332	14.42	52.19	0.282	14.49	37.23
20.50	0.370	14.45	55.06	0.345	14.48	49.41	0.276	14.51	37.21
21.00	0.360	14.43	55.09	0.342	14.48	48.66	0.277	14.52	36.24
21.50	0.353	14.44	54.95	0.337	14.49	48.30	0.268	14.50	36.49
22.00	0.343	14.44	55.26	0.313	14.43	50.40	0.262	14.50	36.48

ความสามารถในการคงค่าแรงดันเอาท์พุตที่ 14.4 V ของวงจรทอนระดับแรงดันที่แรงดันอินพุตต่าง ๆ ที่ค่าโหลดทั้งสามดังกล่าวสามารถแสดงด้วยกราฟในรูปที่ 4.1 จะเห็นว่าถ้าแรงดันอินพุตต่ำกว่า 16 V วงจรไม่สามารถรักษาค่าระดับแรงดันไว้ที่ 14.4 V ตามที่ต้องการได้เนื่องจากแรงดันอินพุตมีค่าสูงกว่าค่าแรงดันเอาท์พุตที่ต้องการเพียงเล็กน้อยส่งผลให้วงจรต้องทำงานที่ค่าดิวตี้ไซเคิลสูงกว่า 0.9 ซึ่งเป็นข้อจำกัดในทางปฏิบัติของวงจร ถ้าแรงดันอินพุตมีค่าสูงกว่า 16 V จะพบว่าวงจรสามารถคงค่าระดับแรงดันไว้ที่ 14.4 V ได้ตามที่ออกแบบโดยมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยไม่เกิน 1%



รูปที่ 4.1 แรงดันเอาท์พุตของวงจรทอนระดับแรงดัน

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของวงจรทอนระดับแรงดันที่ค่าแรงดันอินพุตต่างๆแสดงดังรูปที่ 4.2 จะเห็นว่าสำหรับค่าโหลดตัวต้านทานหนึ่งๆวงจรทำงานด้วยประสิทธิภาพค่อนข้างคงที่ อย่างไรก็ตาม ในกรณีที่โหลดตัวต้านทานมีค่าต่ำวงจรทำงานที่ค่าประสิทธิภาพสูงกว่าเนื่องจากวงจรมีการคงค่าแรงดันเอาท์พุตทำให้กระแสเอาท์พุตมีค่าสูงกว่าจึงได้กำลังเอาท์พุตสูงกว่า



รูปที่ 4.2 ประสิทธิภาพของวงจรทอนระดับแรงดัน

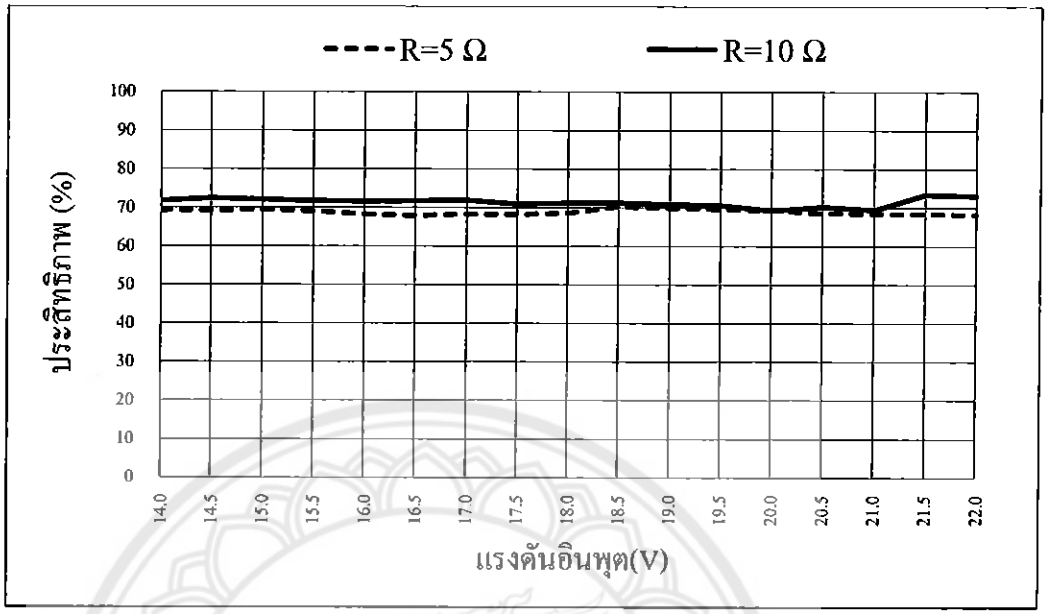
การทดสอบที่สองคือ การคงค่าแรงดันของวงจรทอนระดับแรงดันในสภาวะที่กระแสเอาท์พุตมีโอกาสสูงเกินแต่ถูกจำกัดไว้ที่ 1 A แสดงในตารางที่ 4.2 โดยใช้โหลดเป็นความต้านทาน 5 Ω และ 10 Ω จากกฎของโอห์มจะเห็นว่าถ้าวงจรสร้างและรักษาระดับแรงดันเอาท์พุตไว้ที่ 14.4 V จะทำให้เกิดกระแสเอาท์พุตสูงกว่า 1 A ไหลผ่านโหลดทั้งสอง แต่จากตารางจะพบว่าเมื่อกระแสเอาท์พุตถูกจำกัดวงจรจึงไม่สามารถสร้างและรักษาระดับแรงดันไว้ที่ 14.4 V ได้โดยค่าแรงดันเอาท์พุตของวงจรที่สร้างขึ้นจริงยังคงสอดคล้องตามกฎของโอห์ม

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบการจำกัดกระแสของวงจรทอนระดับแรงดัน

V_{in}	$R = 5\ \Omega$				$R = 10\ \Omega$			
(V)	I_{in} (A)	V_{out} (V)	I_{out} (A)	η (%)	I_{in} (A)	V_{out} (V)	I_{out} (A)	η (%)
14.00	0.586	5.34	1.016	69.39	1.038	10.22	1.009	71.87
14.50	0.564	5.33	1.016	69.40	0.995	10.23	1.010	72.54
15.00	0.549	5.35	1.016	69.51	0.968	10.24	1.011	72.22
15.50	0.534	5.35	1.017	69.26	0.939	10.23	1.010	71.90
16.00	0.520	5.33	1.017	68.34	0.911	10.22	1.008	71.66
16.50	0.507	5.34	1.018	68.10	0.880	10.22	1.008	71.93
17.00	0.492	5.35	1.018	68.37	0.854	10.23	1.008	72.08
17.50	0.491	5.42	1.019	68.40	0.840	10.22	1.007	71.05
18.00	0.475	5.42	1.019	68.72	0.812	10.22	1.008	71.46
18.50	0.456	5.45	1.024	70.32	0.793	10.23	1.008	71.34
19.00	0.448	5.46	1.026	69.99	0.775	10.23	1.008	71.07
19.50	0.439	5.46	1.026	69.75	0.760	10.24	1.008	70.75
20.00	0.434	5.50	1.031	69.60	0.754	10.23	1.008	69.40
20.50	0.423	5.46	1.028	68.68	0.727	10.24	1.009	70.36
21.00	0.413	5.45	1.028	68.59	0.716	10.23	1.007	69.60
21.50	0.406	5.47	1.029	68.51	0.665	10.25	1.010	73.48
22.00	0.397	5.47	1.030	68.44	0.653	10.26	1.010	73.28

ประสิทธิภาพการทำงานของวงจรทอนระดับแรงดันในกรณีที่กระแสเอาท์พุตถูกจำกัดไว้ที่ 1 A แสดงดังรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าสำหรับโหลดค่าหนึ่งๆค่าประสิทธิภาพของวงจรจะมีค่า

ค่อนข้างคงที่ อย่างไรก็ตามที่โหลดค่าสูงกว่าวงจรทำงานมีประสิทธิภาพสูงกว่าเพราะสามารถสร้างแรงดันเอาท์พุตได้สูงกว่าส่งผลให้ได้กำลังเอาท์พุตสูงกว่า



รูปที่ 4.3 ประสิทธิภาพของวงจรทอนระดับแรงดันเมื่อกระแสเอาท์พุตถูกจำกัดที่ 1 A

ประสิทธิภาพการทำงานของวงจรทอนระดับแรงดันในกรณีที่กระแสเอาท์พุตถูกจำกัดไว้ที่ 1 A แสดงดังรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าสำหรับโหลดค่าหนึ่งๆค่าประสิทธิภาพของวงจรมีค่าค่อนข้างคงที่ อย่างไรก็ตามที่โหลดค่าสูงกว่าวงจรทำงานมีประสิทธิภาพสูงกว่าเพราะสามารถสร้างแรงดันเอาท์พุตได้สูงกว่าส่งผลให้ได้กำลังเอาท์พุตสูงกว่า

4.1.2 การทำงานเป็นวงจรทบระดับแรงดัน

ตัวแปลงผันกำลังกระแสตรงสองทิศทางในระบบติดตามแสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้นทำงานเป็นวงจรทบระดับแรงดันในช่วงการติดตามแสงอาทิตย์โดยมีการขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงด้วยแรงดันคงที่ 20 V ดังนั้นการทดสอบนี้จึงเป็นการตรวจสอบการทำงานเป็นวงจรทบระดับแรงดันโดยคงค่าแรงดันเอาท์พุตที่ค่าดังกล่าว ผลการทดสอบการสร้างและรักษาระดับแรงดันเอาท์พุตเมื่อป้อนค่าแรงดันอินพุตต่างๆแสดงได้ดังตารางที่ 4.3 โดยจ่ายโหลดตัวต้านทาน 100 Ω เพื่อให้เกิดกระแสเอาท์พุต 0.2 A ซึ่งไม่น้อยกว่าค่ากระแสจริงสำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์ที่ใช้ในโครงงานนี้ ในการทดสอบได้ป้อนค่าแรงดันอินพุตในช่วง 8 – 16 V ซึ่งครอบคลุมสถานการณ์ของค่าแรงดันไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ขณะใช้งานในระบบ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าวงจรสามารถคงค่าแรงดันเอาท์พุตได้ที่ 20 V ตามต้องการโดยมีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 0.7% นอกจากนี้การทดสอบยังแสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพในการแปลงผันกำลังไฟฟ้าของวงจรมีค่าค่อนข้างคงที่โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 77%

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบการทบระดับแรงดันและการคงค่าแรงดัน

V_{in} (V)	I_{in}(A)	V_{out}(V)	ค่าความคลาดเคลื่อน (%)	η (%)
8.0	0.657	20.06	+ 0.30	76.56
8.5	0.614	20.07	+ 0.35	77.18
9.0	0.580	20.08	+ 0.40	77.24
9.5	0.551	20.09	+ 0.45	77.11
10.0	0.528	20.10	+ 0.50	76.52
10.5	0.500	20.11	+ 0.55	77.03
11.0	0.481	20.11	+ 0.55	76.43
11.5	0.460	20.12	+ 0.60	76.52
12.0	0.439	20.12	+ 0.60	76.84
12.5	0.421	20.13	+ 0.65	77.00
13.0	0.407	20.13	+ 0.65	76.59
13.5	0.393	20.13	+ 0.65	76.38
14.0	0.375	20.14	+ 0.70	77.26
14.5	0.362	20.14	+ 0.70	77.28
15.0	0.349	20.14	+ 0.70	77.48
15.5	0.337	20.14	+ 0.70	77.65
16.0	0.325	20.14	+ 0.70	78.00

4.2 การทดสอบการทำงานของระบบติดตามแสงอาทิตย์แบบแกนเดี่ยว

ระบบติดตามแสงอาทิตย์แบบแกนเดี่ยวที่สร้างขึ้นถูกออกแบบให้ทำงาน 2 รูปแบบคือ การทำงานในช่วงการอัดประจุแบตเตอรี่และช่วงการติดตามแสงอาทิตย์โดยทำงานแต่ละช่วงสลับกันอย่างต่อเนื่อง โดยในการทดสอบนี้แผงเซลล์อาทิตย์ถูกติดตั้งด้วยมุมเอียง 16° จากแนวราบ

4.2.1 ช่วงการอัดประจุแบตเตอรี่

ในการทดสอบการทำงานในช่วงการอัดประจุแบตเตอรี่ได้มีการวัดค่าแรงดันและกระแสในระบบเพื่อคำนวณหาค่ากำลังเอาท์พุตของแผงเซลล์แสงอาทิตย์และกำลังไฟฟ้าที่ใช้อัดประจุแบตเตอรี่ในแต่ละช่วงเวลาของวัน โดยค่าประสิทธิภาพของตัวแปลงผันกำลังฯ คำนวณหาได้จาก

$$\eta = \frac{P_B}{P_{PV}} = \frac{V_B \times I_B}{V_{PV} \times I_{PV}} \tag{4.2}$$

โดยที่ η คือค่าประสิทธิภาพของตัวแปลงผันกำลังฯ ขณะอัดประจุแบตเตอรี่

P_B คือค่ากำลังไฟฟ้าที่แบตเตอรี่ได้รับ (W)

P_{PV} คือค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (W)

V_B, I_B คือค่าแรงดัน (V) และกระแส (A) ที่ใช้อัดประจุแบตเตอรี่

V_{PV}, I_{PV} คือค่าแรงดัน (V) และกระแส (A) ที่ได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์

นอกจากนี้ยังได้เปรียบเทียบค่ากำลังเอาท์พุตของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในระบบติดตามแสงที่สร้างขึ้นกับค่าที่ได้จากกรณีติดตั้งแผงอยู่กับที่ ผลการทดสอบในแต่ละช่วงเวลาของวันที่ 17 ธันวาคม 2556 แสดงในตารางที่ 4.4 โดยความแตกต่างระหว่างค่ากำลังเอาท์พุตของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในระบบติดตามแสงและค่าที่ได้ในกรณีติดตั้งแผงอยู่กับที่แสดงในรูปที่ 4.4

จากรูปที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถสร้างกำลังเอาท์พุตได้มากน้อยตามความเข้มแสงที่ตกกระทบ นั่นคือกำลังเอาท์พุตมีค่าสูงในช่วงกลางวันและมีค่าน้อยในช่วงเช้าและเย็น นอกจากนี้จะพบว่าตามเส้นทางการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์บนท้องฟ้าจากทิศตะวันออกไปทางตะวันตกในช่วงเวลา 8:00 – 11:00 น. และ 13:00 – 17:00 น. โดยมีการเคลื่อนที่อ้อมไปในทางใต้ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ในระบบติดตามแสงฯสร้างกำลังไฟฟ้าได้มากกว่ากรณีที่แผงอยู่กับที่เพราะในช่วงเวลาดังกล่าวตำแหน่งของดวงอาทิตย์ทำมุมเฉียงกับหน้าแผงที่ติดตั้งอยู่กับที่ (ซึ่งหันหน้าไปทางทิศใต้) แต่ในช่วงเวลา 11:00 – 13:00 น. ดวงอาทิตย์อยู่ในตำแหน่งสูงบนท้องฟ้าส่งผลให้กำลังไฟฟ้าที่แผงสร้างได้จากทั้งสองกรณีมีค่าใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาโดยรวมแล้วจะเห็นได้ชัดว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในระบบติดตามแสงสามารถสร้างกำลังเอาท์พุตได้มากกว่ากรณีที่ติดตั้งแผงอยู่กับที่ ค่าพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ย (W_{PV}) ในหน่วย Wh ที่ได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตลอดช่วงระยะเวลาการทดสอบข้างต้นสามารถคำนวณหาได้จากค่ากำลังไฟฟ้าในแต่ละช่วงเวลา (P_{PV}) ซึ่งคำนวณมาจากผลคูณของค่าแรงดันและกระแสที่วัดค่าทุกครึ่งชั่วโมง (0.5 h)

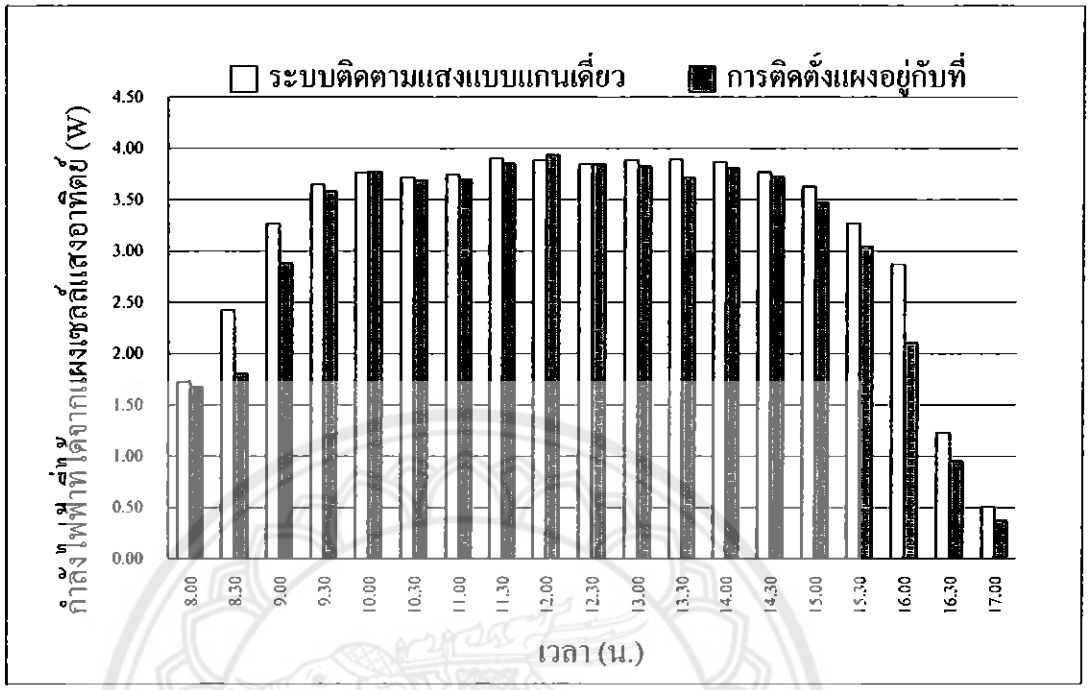
ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบการทำงานของระบบในช่วงการอัดประจุแบตเตอรี่

เวลา (น.)	ระบบติดตามแสงแบบแกนเดี่ยว			การติดตั้งแผงอยู่กับที่			ผลต่างของ
	V_{PV} (V)	I_{PV} (A)	P_{PV} (V)	V_{PV} (V)	I_{PV} (A)	P_{PV} (V)	กำลังไฟฟ้า (W)
08:00	13.49	0.128	1.73	13.49	0.124	1.67	0.06
08:30	13.94	0.174	2.43	13.91	0.13	1.81	0.62
09:00	15.28	0.214	3.27	14.96	0.193	2.89	0.38
09:30	17.79	0.205	3.65	17.23	0.208	3.58	0.07
10:00	18.2	0.207	3.77	18.23	0.207	3.77	0.00
10:30	18.59	0.2	3.72	18.63	0.198	3.69	0.03
11:00	18.56	0.202	3.75	18.6	0.199	3.70	0.05
11:30	18.94	0.206	3.90	18.8	0.205	3.85	0.05
12:00	18.16	0.214	3.89	18.3	0.215	3.93	-0.04
12:30	18.4	0.209	3.85	18.59	0.207	3.85	0.00
13:00	18.61	0.209	3.89	18.49	0.207	3.83	0.06
13:30	18.27	0.213	3.89	18.04	0.206	3.72	0.17
14:00	18.15	0.213	3.87	18.05	0.211	3.81	0.06
14:30	18.03	0.209	3.77	17.84	0.209	3.73	0.04
15:00	17.53	0.207	3.63	16.46	0.211	3.47	0.16
15:30	15.5	0.211	3.27	15.15	0.201	3.05	0.22
16:00	13.94	0.206	2.87	13.94	0.151	2.10	0.77
16:30	13.53	0.191	2.58	13.44	0.171	2.30	0.28
17:00	12.92	0.139	1.80	12.87	0.129	1.66	0.14

$$W_{PV} = \sum (P_{PV} \times 0.5) \tag{4.3}$$

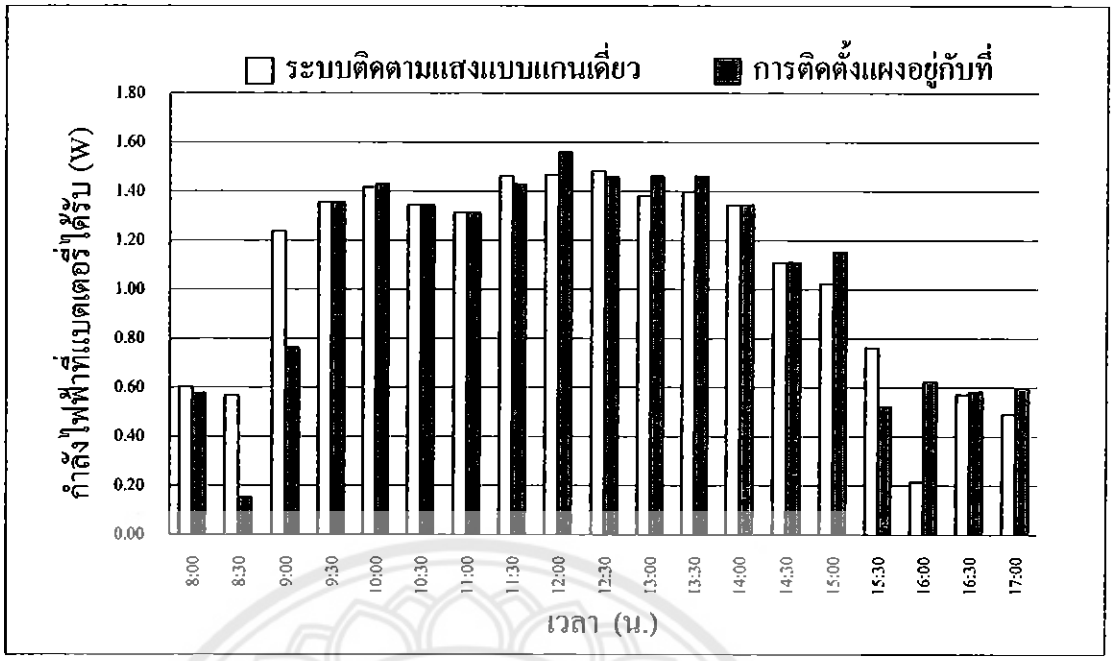
จากสมการที่ (4.3) พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยที่ได้รับจากแผงเซลล์อาทิตย์ในระบบติดตามแสงอาทิตย์ฯและค่าที่ได้จากกรณีติดตั้งแผงอยู่กับที่มีค่าเท่ากับ 31.75 Wh และ 30.21 Wh ตามลำดับ จะเห็นได้ระบบติดตามแสงอาทิตย์แบบแกนเดี่ยวที่สร้างในโครงงานนี้ซึ่งทดสอบใช้กับแผงเซลล์

แสงอาทิตย์ขนาดพิกัด 10 W สามารถเพิ่มค่าพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยที่แผงสร้างได้ 5.11 % ในวันที่ทดสอบ

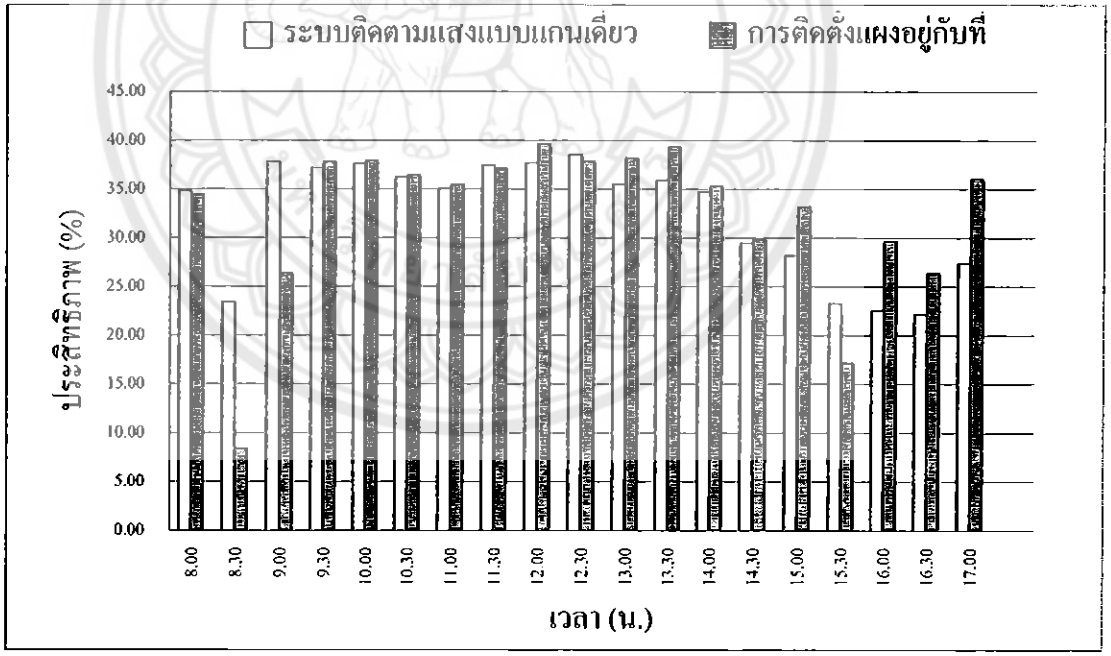


รูปที่ 4.4 กำลังเอาท์พุตของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

การเพิ่มขึ้นและลดลงของปริมาณกำลังไฟฟ้าที่แบตเตอรี่ได้รับในแต่ละช่วงเวลาของวันสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นและลดลงของปริมาณกำลังไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ โดยค่าของกำลังไฟฟ้าที่ใช้อัดประจุแบตเตอรี่จากระบบติดตามแสงฯและจากกรณีที่ติดตั้งแผงอยู่กับที่มีค่าใกล้เคียงกันในแต่ละช่วงเวลาดังแสดงในรูปที่ 4.5 เพราะเป็นการอัดประจุแบตเตอรี่ลูกเดียวกันและแรงดันอัดประจุ (แรงดันเอาท์พุตของตัวแปลงผันกำลังฯ) มีค่าเท่ากันและมีค่าคงที่ที่ 14.4 V นอกจากนี้ประสิทธิภาพโดยรวมของตัวแปลงผันกำลังฯในช่วงการอัดประจุแบตเตอรี่ของทั้งสองกรณีมีค่าใกล้เคียงกันดังแสดงรูปที่ 4.6 แต่ประสิทธิภาพในกรณีติดตามแสงฯมีแนวโน้มต่ำกว่าเล็กน้อย ทั้งนี้เมื่อพิจารณาสมการที่ (4.2) จะเห็นว่าตัวแปลงผันกำลังฯทั้งสองกรณีจ่ายกำลังไฟฟ้าเพื่ออัดประจุแบตเตอรี่ด้วยค่าใกล้เคียงกันในขณะที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ในระบบติดตามแสงฯสามารถสร้างกำลังไฟฟ้า (ซึ่งเป็นกำลังอินพุตของตัวแปลงผันกำลังฯ) ได้มากกว่า จึงทำให้ได้ค่าของประสิทธิภาพต่ำกว่า



รูปที่ 4.5 กำลังไฟฟ้าที่ใช้อัดประจุแบตเตอรี่



รูปที่ 4.6 ประสิทธิภาพของตัวแปลงผันกำลังฯในช่วงอัดประจุแบตเตอรี่

4.2.2 ช่วงการติดตามแสงอาทิตย์

ในการทดสอบการทำงานในช่วงการติดตามแสงอาทิตย์ได้มีการวัดค่าแรงดันและกระแสในระบบเพื่อคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าที่แบตเตอรี่จ่ายออกมาและกำลังไฟฟ้าที่ใช้ขับเคลื่อนมอเตอร์ในแต่ละช่วงเวลาของวัน ผลการทดสอบแสดงได้ดังตารางที่ 4.5 โดยประสิทธิภาพของตัวแปลงผันกำลังฯ ในขณะนี้คำนวณหาค่าได้จาก

$$\eta = \frac{P_M}{P_B} = \frac{V_M \times I_M}{V_B \times I_B} \tag{4.4}$$

โดยที่ η คือค่าประสิทธิภาพของตัวแปลงผันกำลังฯ ขณะติดตามแสงอาทิตย์

P_M คือค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้ขับเคลื่อนมอเตอร์ (W)

P_B คือค่ากำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกจากแบตเตอรี่ (W)

V_M, I_M คือค่าแรงดัน (V) และกระแส (A) ที่ใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์

V_B, I_B คือค่าแรงดัน (V) และกระแส (A) ที่จ่ายออกจากแบตเตอรี่

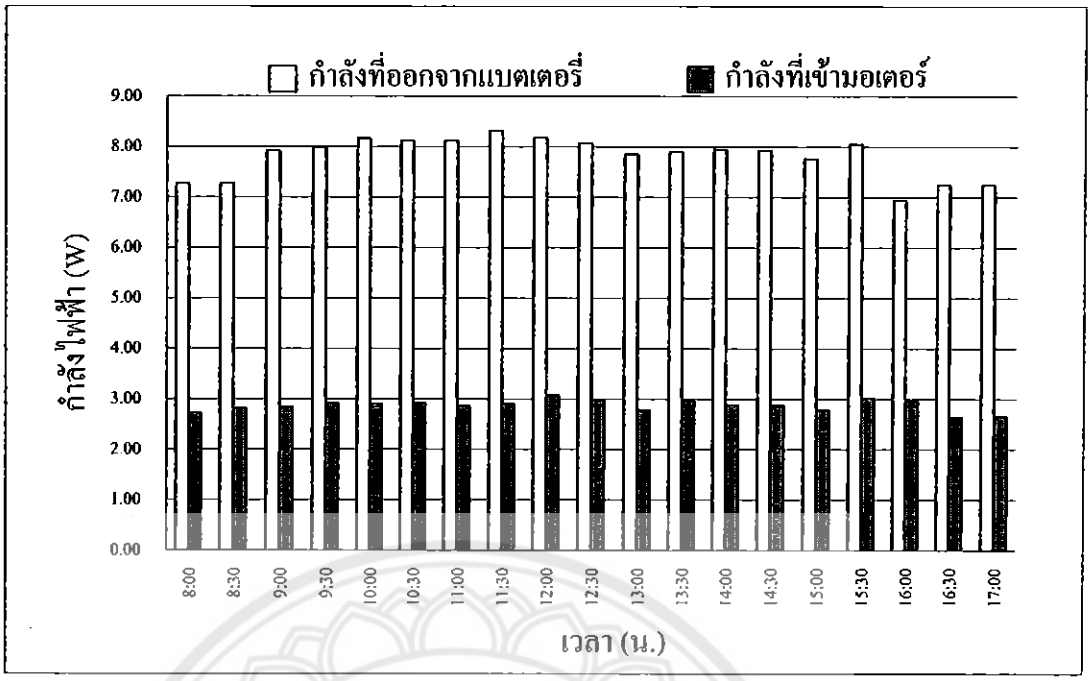
ปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ใช้ขับเคลื่อนมอเตอร์และกำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกจากแบตเตอรี่ในแต่ละครั้งมีค่าค่อนข้างคงที่ โดยค่ากำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกจากแบตเตอรี่มีค่ามากกว่าสองเท่าของค่าของกำลังไฟฟ้าที่มอเตอร์ได้รับดังแสดงในรูปที่ 4.7 ส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพในการแปลงผันกำลังไฟฟ้าในขณะนี้ค่อนข้างคงที่ที่ค่าต่ำ (ประมาณ 37%) ดังรูปที่ 4.8

จากรูปที่ 4.7 จะเห็นได้ว่ากำลังไฟฟ้าที่ออกจากแบตเตอรี่มีค่าสูงกว่า กำลังไฟฟ้าที่เข้าสู่มอเตอร์ในช่วงเวลาต่างๆ ซึ่งมอเตอร์จะมีการใช้กำลังไฟฟ้าทุกๆ 30 นาที ในการหันแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อติดตามแสง ซึ่งถือว่าเป็นการใช้กำลังไฟฟ้าที่ค่อนข้างน้อย เมื่อเทียบกับกำลังไฟฟ้าที่ออกจากแบตเตอรี่ในแต่ละช่วงเวลา

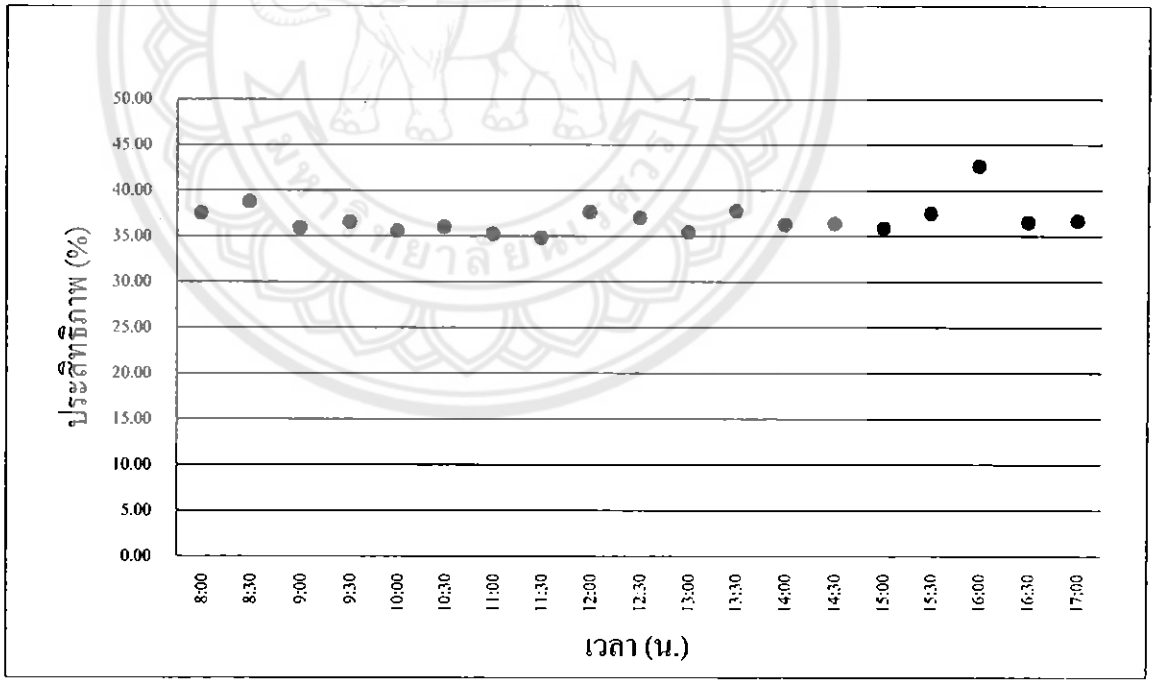
จากรูปที่ 4.8 จะเห็นได้ว่าค่าประสิทธิภาพในแต่เวลาของการติดตามแสงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำเนื่องจากกำลังไฟฟ้าที่ออกจากแบตเตอรี่มีค่าสูง เมื่อเทียบกับกำลังไฟฟ้าที่มอเตอร์ได้รับเพื่อใช้ในการขับเคลื่อนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งเป็นมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (4.4) และค่าประสิทธิภาพที่ได้มีค่าค่อนข้างคงที่เนื่องจากมอเตอร์มีการใช้แรงดัน และกระแสค่อนข้างคงที่ ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าที่มอเตอร์ได้รับค่อนข้างคงที่คงที่

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบการทำงานของระบบในช่วงการติดตามแสง

เวลา (น.)	V_B (V)	I_B (A)	V_M (V)	I_M (A)	η (%)
08:00	12.07	0.602	20.07	0.136	37.56
08:30	12.00	0.606	20.15	0.140	38.79
09:00	13.04	0.607	20.17	0.141	35.93
09:30	13.18	0.606	20.15	0.145	36.58
10:00	13.28	0.615	20.19	0.144	35.60
10:30	13.27	0.612	20.18	0.145	36.03
11:00	13.28	0.611	20.16	0.142	35.28
11:30	13.28	0.626	20.27	0.143	34.87
12:00	13.26	0.617	20.27	0.152	37.66
12:30	13.19	0.612	20.19	0.148	37.02
13:00	13.27	0.592	20.33	0.137	35.45
13:30	13.25	0.596	20.31	0.147	37.81
14:00	13.27	0.599	20.31	0.142	36.28
14:30	13.31	0.596	20.34	0.142	36.41
15:00	13.29	0.584	20.32	0.137	35.87
15:30	13.31	0.605	20.28	0.149	37.53
16:00	12.78	0.543	20.15	0.147	42.68
16:30	12.37	0.586	20.06	0.132	36.53
17:00	12.25	0.591	20.13	0.132	36.70



รูปที่ 4.7 กำลังไฟฟ้าจากแบตเตอรี่และกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์ในช่วงการติดตามแสง



รูปที่ 4.8 ประสิทธิภาพของตัวแปลงผันกำลังฯในช่วงการติดตามแสง

บทที่ 5
สรุปผลและข้อเสนอแนะ

จากการดำเนินโครงงานสามารถสรุปผล และชี้แจงปัญหาในการดำเนินโครงงาน รวมทั้งเสนอแนะแนวทางแก้ไขปัญหา และให้ข้อเสนอแนะในการนำโครงงานไปพัฒนาต่อไปดังนี้

5.1 สรุปผลการดำเนินงาน

ในการดำเนินโครงงานนี้ได้ออกแบบและสร้างระบบติดตามแสงอาทิตย์แบบแกนเดี่ยวร่วมกับตัวควบคุมการอัดประจุและคายประจุแบตเตอรี่ โดยติดตั้งแผงเซลล์อาทิตย์ด้วยมุมเอียงค่าหนึ่ง และระบบสามารถทำงานได้ 2 รูปแบบคือ การติดตามแสงอาทิตย์ และการอัดประจุแบตเตอรี่ โดยมีไมโครคอนโทรลเลอร์เปรียบเทียบแรงดันเอาท์พุตของแอลดีอาร์ 2 ตัวในวงจรเปรียบเทียบแสงแล้วควบคุมการทำงานของรีเลย์เพื่อกำหนดรูปแบบการทำงานดังกล่าวของระบบ ถ้าแรงดันเอาท์พุตของแอลดีอาร์ทั้งสองมีค่าต่างกัน ระบบจะทำงานในรูปแบบการติดตามแสงโดยขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยแรงดันคงที่ 20 V เพื่อหมุนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้หันหน้าเข้าหาลำแสงและทำให้แรงดันไฟฟ้าทั้งสองมีค่าเท่ากันไมโครคอนโทรลเลอร์จึงสั่งให้มอเตอร์หยุดทำงาน จากนั้นระบบจะทำงานในรูปแบบการอัดประจุแบตเตอรี่นาน 30 นาทีด้วยแรงดันคงที่ 14.4 V และจำกัดค่ากระแสอัดประจุไว้ไม่เกิน 1 A ก่อนเริ่มทำงานในรูปแบบการติดตามแสงอาทิตย์อีกครั้ง

นอกจากนี้ยังพบว่าการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 10 W ที่เลือกใช้ในโครงงานนี้ด้วยมุมเอียง 16° ระบบติดตามแสงอาทิตย์ฯที่สร้างขึ้นสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยต่อวันได้ 31.75 Wh และสูงกว่ากรณีติดตั้งแผงอยู่กับที่ 5.11%

5.2 ปัญหาและแนวทางในการแก้ไข

แอลดีอาร์ 2 ตัวที่ใช้ในการเปรียบเทียบแสงสร้างแรงดันเอาท์พุตออกมาไม่เท่ากันจึงส่งผลให้เมื่อมอเตอร์หยุดหมุนตำแหน่งของแผงเซลล์แสงอาทิตย์อาจคลาดเคลื่อนเล็กน้อยจากตำแหน่งที่ตรงกับดวงอาทิตย์ และถึงแม้เราอาจลดค่าความแตกต่างระหว่างแรงดันเอาท์พุตทั้งสองได้โดยใช้ตัวต้านทานแปรค่าได้ต่ออนุกรมกับแอลดีอาร์ แต่เนื่องจากคุณลักษณะการตอบสนองต่อแสงของแอลดีอาร์นั้นไม่เชิงเส้น จึงไม่สามารถทำให้แรงดันเอาท์พุตของแอลดีอาร์ทั้งสองมีค่าเท่ากันในทุกสภาวะการใช้งานได้

5.3 แนวทางในการพัฒนาต่อไป

โครงสร้างของระบบติดตามแสงอาทิตย์แบบแกนเดี่ยวร่วมกับตัวควบคุมการอัดประจุและคายประจุที่สร้างขึ้นในโครงงานนี้สามารถประยุกต์ใช้กับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีขนาดใหญ่ขึ้นหรือพิกัดกำลังมากขึ้นได้โดยอาจปรับค่าความต้านทาน R_p และ R_j ในวงจรเพื่อกำหนดแรงดันและกระแสเอาท์พุตของตัวแปลงผันกำลังกระแสตรงสองทิศทางให้สอดคล้องกับงานที่ต้องการ รวมถึงเลือกพิกัดของทรานซิสเตอร์ มอสเฟต และตัวเก็บประจุในส่วนของวงจรกำลังให้เหมาะสม นอกจากนี้ยังสามารถพัฒนาให้เป็นระบบติดตามแสงอาทิตย์แบบแกนคู่โดยเพิ่มจำนวนมอเตอร์แอลดีอาร์ และพัฒนาโปรแกรมควบคุมการทำงาน รวมถึงการใช้หลักการติดตามจุดกำลังสูงสุด (Maximum power point tracking: MPPT) เพื่อเพิ่มปริมาณกำลังไฟฟ้าเอาท์พุตของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในแต่ละสภาพอากาศ

เอกสารอ้างอิง

[1] G. Hille, W. Roth, and H. Schmidt, "Course book for the seminar – Photovoltaic Systems", Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, Freiburg, Germany, 1995.

[2] H. Schmidt, "From the solar to the PV generator", In: Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems: Course book for the seminar: Photovoltaic Systems, Freiburg, Germany, 1995.

[3] B. S. Magal, "Solar Power Engineering", Tata McGraw-Hil, New Delhi, 1990.

[4] Dr.David Lubitz, "Single Axis Tracker and Dual Axis Tracker". สืบค้นเมื่อ 8 สิงหาคม 2556 จาก http://www.altenergymag.com/

[5] ไชยชาญ หินเกิด, "เครื่องกลไฟฟ้า 1", บริษัทประชาชน, กรุงเทพฯ, 2537.

[6] Muhammad H. Rashid, "Power Electronics Circuits, Devices and Applications", Pearson Education, Inc., Third Edition, 2004.

[7] ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา. สืบค้นเมื่อ 8 สิงหาคม 2556 จาก http://www.ee.buu.ac.th.

[8] กรมสรรพสามิต, "แบตเตอรี่", สามิตสาร ปีที่ 5 ฉบับที่ 5, กรมสรรพสามิต, กรุงเทพฯ, 2542.

[9] G. Hille, W. Roth, and H. Schmidt, "Course book for the seminar Photovoltaic Systems", Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, Freiburg, Germany, 1995.

[10] วีระเชษฐ์ ขันเงิน และวุฒิพล ธาราธีรเศรษฐ์, "อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (Power Electronics)", ห้างหุ้นส่วนจำกัด วี.เจ. พริ้นติ้ง, กรุงเทพฯ, 2550.

ภาคผนวก ก

รหัสต้นฉบับของโปรแกรมควบคุม

```
void setup()
{
pinMode(2,OUTPUT);
pinMode(4,OUTPUT);
pinMode(6,OUTPUT);
pinMode(7,OUTPUT);
pinMode(8,OUTPUT);
pinMode(10,OUTPUT);
pinMode(12,OUTPUT);
pinMode(13,OUTPUT);
}
void loop()
    {
    int analogValue1 = analogRead(A0);
    float Vin1 = analogValue1 * (5.015/1024.0);
    int analogValue2 = analogRead(A1);
    float Vin2 = analogValue2 * (5.015/1024.0);
    int analogValue3 = analogRead(A5);
    float Vin3 = analogValue3 * (5.015/1024.0);

      if(Vin1>Vin2)
    {
    digitalWrite(2,LOW);
    digitalWrite(4,HIGH);
    digitalWrite(6,HIGH);
    digitalWrite(7,HIGH);
    digitalWrite(8,HIGH);
    digitalWrite(12,LOW);
    digitalWrite(13,HIGH);
    }
```

กำหนดพอร์ตเอาท์พุต

รับค่าแรงดันไฟฟ้าจากแอลดีอาร์

รับค่าแรงดันไฟฟ้าจาก
แผงเซลล์แสงอาทิตย์

ควบคุมทิศการหมุนของมอเตอร์

ควบคุมการทำงานของรีเลย์
ในช่วงการทำงานเป็นวงจรทบ
ระดับแรงดันเพื่อขับมอเตอร์

```
    if(Vin1<Vin2)
{
digitalWrite(2,HIGH);
digitalWrite(4,LOW);
digitalWrite(6,HIGH);
digitalWrite(7,HIGH);
digitalWrite(8,HIGH);
digitalWrite(12,LOW);
digitalWrite(13,HIGH);
}
    if((Vin1<=Vin2)&&(Vin1>=Vin2))
{
digitalWrite(12,HIGH);
digitalWrite(2,LOW);
digitalWrite(4,LOW);
digitalWrite(6,LOW);
digitalWrite(7,LOW);
digitalWrite(8,LOW);
digitalWrite(13,LOW);
delay(1800000);
    }
    if(Vin3 < 3)
{digitalWrite(10,HIGH);
delay(300000);
digitalWrite(10,LOW);
    }
}
```

ควบคุมการกลับทิศของมอเตอร์

ควบคุมการทำงานของรีเลย์ในช่วงการทำงานเป็นวงจรทบระดับแรงดันเพื่อขับมอเตอร์

ควบคุมการทำงานของรีเลย์ในช่วงการทำงานเป็นวงจรทอนระดับแรงดันเพื่ออัดประจุแบตเตอรี่

หน่วงเวลาการทำงาน 30 นาทีสำหรับอัดประจุแบตเตอรี่

ควบคุมรีเลย์เพื่อตัดการเชื่อมต่อจากแบตเตอรี่

ภาคผนวก ข

รายละเอียดของไมโครคอนโทรลเลอร์ATMEGA328

Features

- High Performance, Low Power AVR® 8-Bit Microcontroller
- Advanced RISC Architecture
  - 131 Powerful Instructions – Most Single Clock Cycle Execution
  - 32 x 8 General Purpose Working Registers
  - Fully Static Operation
  - Up to 20 MIPS Throughput at 20 MHz
  - On-chip 2-cycle Multiplier
- High Endurance Non-volatile Memory Segments
  - 4/8/16/32K Bytes of In-System Self-Programmable Flash progam memory (ATmega48PA/88PA/168PA/328P)
  - 256/512/512/1K Bytes EEPROM (ATmega48PA/88PA/168PA/328P)
  - 512/1K/1K/2K Bytes Internal SRAM (ATmega48PA/88PA/168PA/328P)
  - Write/Erase Cycles: 10,000 Flash/100,000 EEPROM
  - Data retention: 20 years at 85°C/100 years at 25°C[1]
  - Optional Boot Code Section with Independent Lock Bits
    - In-System Programming by On-chip Boot Program
    - True Read-While-Write Operation
  - Programming Lock for Software Security
- Peripheral Features
  - Two 8-bit Timer/Counters with Separate Prescaler and Compare Mode
  - One 16-bit Timer/Counter with Separate Prescaler, Compare Mode, and Capture Mode
  - Real Time Counter with Separate Oscillator
  - Six PWM Channels
  - 8-channel 10-bit ADC in TQFP and QFN/MLF package
    - Temperature Measurement
  - 6-channel 10-bit ADC in PDIP Package
    - Temperature Measurement
  - Programmable Serial USART
  - Master/Slave SPI Serial Interface
  - Byte-oriented 2-wire Serial Interface (Philips I²C compatible)
  - Programmable Watchdog Timer with Separate On-chip Oscillator
  - On-chip Analog Comparator
  - Interrupt and Wake-up on Pin Change
- Special Microcontroller Features
  - Power-on Reset and Programmable Brown-out Detection
  - Internal Calibrated Oscillator
  - External and Internal Interrupt Sources
  - Six Sleep Modes: Idle, ADC Noise Reduction, Power-save, Power-down, Standby, and Extended Standby
- I/O and Packages
  - 23 Programmable I/O Lines
  - 28-pin PDIP, 32-lead TQFP, 28-pad QFN/MLF and 32-pad QFN/MLF
- Operating Voltage:
  - 1.8 - 5.5V for ATmega48PA/88PA/168PA/328P
- Temperature Range:
  - -40°C to 85°C
- Speed Grade:
  - 0 - 20 MHz @ 1.8 - 5.5V
- Low Power Consumption at 1 MHz, 1.8V, 25°C for ATmega48PA/88PA/168PA/328P:
  - Active Mode: 0.2 mA
  - Power-down Mode: 0.1 µA
  - Power-save Mode: 0.75 µA (Including 32 kHz RTC)

ATMEL®

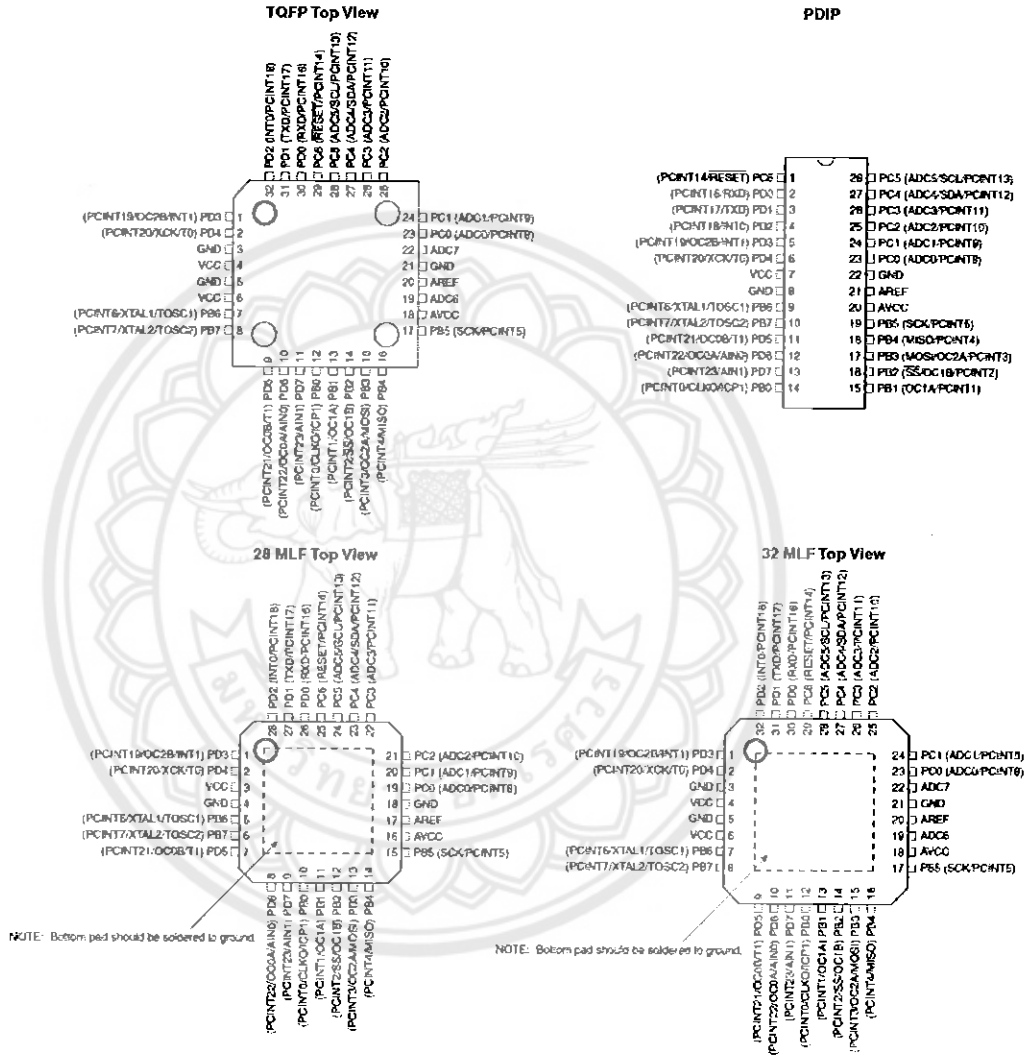
8-bit AVR® Microcontroller with 4/8/16/32K Bytes In-System Programmable Flash

ATmega48PA
ATmega88PA
ATmega168PA
ATmega328P

Summary

1. Pin Configurations

Figure 1-1. Pinout ATmega48PA/88PA/168PA/328P



1.1 Pin Descriptions

1.1.1 VCC

Digital supply voltage.

1.1.2 GND

Ground.

1.1.3 Port B (PB7:0) XTAL1/XTAL2/TOSC1/TOSC2

Port B is an 8-bit bi-directional I/O port with internal pull-up resistors (selected for each bit). The Port B output buffers have symmetrical drive characteristics with both high sink and source capability. As inputs, Port B pins that are externally pulled low will source current if the pull-up resistors are activated. The Port B pins are tri-stated when a reset condition becomes active, even if the clock is not running.

Depending on the clock selection fuse settings, PB6 can be used as input to the inverting Oscillator amplifier and input to the internal clock operating circuit.

Depending on the clock selection fuse settings, PB7 can be used as output from the inverting Oscillator amplifier.

If the Internal Calibrated RC Oscillator is used as chip clock source, PB7..6 is used as TOSC2..1 input for the Asynchronous Timer/Counter2 if the AS2 bit in ASSR is set.

The various special features of Port B are elaborated in "Alternate Functions of Port B" on page 76 and "System Clock and Clock Options" on page 26.

1.1.4 Port C (PC5:0)

Port C is a 7-bit bi-directional I/O port with internal pull-up resistors (selected for each bit). The PC5..0 output buffers have symmetrical drive characteristics with both high sink and source capability. As inputs, Port C pins that are externally pulled low will source current if the pull-up resistors are activated. The Port C pins are tri-stated when a reset condition becomes active, even if the clock is not running.

1.1.5 PC6/$\overline{\text{RESET}}$

If the RSTDISBL Fuse is programmed, PC6 is used as an I/O pin. Note that the electrical characteristics of PC6 differ from those of the other pins of Port C.

If the RSTDISBL Fuse is unprogrammed, PC6 is used as a Reset input. A low level on this pin for longer than the minimum pulse length will generate a Reset, even if the clock is not running. The minimum pulse length is given in Table 28-3 on page 308. Shorter pulses are not guaranteed to generate a Reset.

The various special features of Port C are elaborated in "Alternate Functions of Port C" on page 79.

1.1.6 Port D (PD7:0)

Port D is an 8-bit bi-directional I/O port with internal pull-up resistors (selected for each bit). The Port D output buffers have symmetrical drive characteristics with both high sink and source capability. As inputs, Port D pins that are externally pulled low will source current if the pull-up resistors are activated. The Port D pins are tri-stated when a reset condition becomes active, even if the clock is not running.

The various special features of Port D are elaborated in "Alternate Functions of Port D" on page 82.

1.1.7 AV_{CC}

AV_{CC} is the supply voltage pin for the A/D Converter, PC3:0, and ADC7:6. It should be externally connected to V_{CC}, even if the ADC is not used. If the ADC is used, it should be connected to V_{CC} through a low-pass filter. Note that PC6..4 use digital supply voltage, V_{CC}.

1.1.8 AREF

AREF is the analog reference pin for the A/D Converter.

1.1.9 ADC7:6 (TQFP and QFN/MLF Package Only)

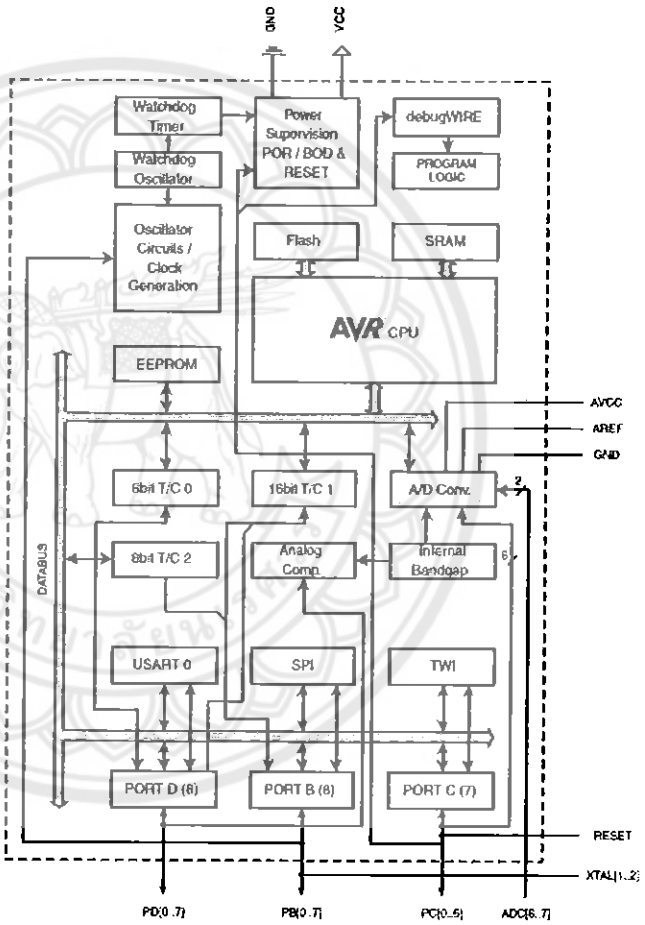
In the TQFP and QFN/MLF package, ADC7:6 serve as analog inputs to the A/D converter. These pins are powered from the analog supply and serve as 10-bit ADC channels.

2. Overview

The ATmega48PA/88PA/168PA/328P is a low-power CMOS 8-bit microcontroller based on the AVR enhanced RISC architecture. By executing powerful instructions in a single clock cycle, the ATmega48PA/88PA/168PA/328P achieves throughputs approaching 1 MIPS per MHz allowing the system designer to optimize power consumption versus processing speed.

2.1 Block Diagram

Figure 2-1. Block Diagram



The AVR core combines a rich instruction set with 32 general purpose working registers. All the 32 registers are directly connected to the Arithmetic Logic Unit (ALU), allowing two independent registers to be accessed in one single instruction executed in one clock cycle. The resulting

architecture is more code efficient while achieving throughputs up to ten times faster than conventional CISC microcontrollers.

The ATmega48PA/88PA/168PA/328P provides the following features: 4/8/16/32K bytes of In-System Programmable Flash with Read-While-Write capabilities, 256/512/512/1K bytes EEPROM, 512/1K/1K/2K bytes SRAM, 23 general purpose I/O lines, 32 general purpose working registers, three flexible Timer/Counters with compare modes, internal and external interrupts, a serial programmable USART, a byte-oriented 2-wire Serial Interface, an SPI serial port, a 6-channel 10-bit ADC (8 channels in TQFP and QFN/MLF packages), a programmable Watchdog Timer with internal Oscillator, and five software selectable power saving modes. The Idle mode stops the CPU while allowing the SRAM, Timer/Counters, USART, 2-wire Serial Interface, SPI port, and interrupt system to continue functioning. The Power-down mode saves the register contents but freezes the Oscillator, disabling all other chip functions until the next interrupt or hardware reset. In Power-save mode, the asynchronous timer continues to run, allowing the user to maintain a timer base while the rest of the device is sleeping. The ADC Noise Reduction mode stops the CPU and all I/O modules except asynchronous timer and ADC, to minimize switching noise during ADC conversions. In Standby mode, the crystal/resonator Oscillator is running while the rest of the device is sleeping. This allows very fast start-up combined with low power consumption.

The device is manufactured using Atmel's high density non-volatile memory technology. The On-chip ISP Flash allows the program memory to be reprogrammed In-System through an SPI serial interface, by a conventional non-volatile memory programmer, or by an On-chip Boot program running on the AVR core. The Boot program can use any interface to download the application program in the Application Flash memory. Software in the Boot Flash section will continue to run while the Application Flash section is updated, providing true Read-While-Write operation. By combining an 8-bit RISC CPU with In-System Self-Programmable Flash on a monolithic chip, the Atmel ATmega48PA/88PA/168PA/328P is a powerful microcontroller that provides a highly flexible and cost effective solution to many embedded control applications.

The ATmega48PA/88PA/168PA/328P AVR is supported with a full suite of program and system development tools including: C Compilers, Macro Assemblers, Program Debugger/Simulators, In-Circuit Emulators, and Evaluation kits.

2.2 Comparison Between ATmega48PA, ATmega88PA, ATmega168PA and ATmega328P

The ATmega48PA, ATmega88PA, ATmega168PA and ATmega328P differ only in memory sizes, boot loader support, and interrupt vector sizes. Table 2-1 summarizes the different memory and interrupt vector sizes for the three devices.

Table 2-1. Memory Size Summary

Device	Flash	EEPROM	RAM	Interrupt Vector Size
ATmega48PA	4K Bytes	256 Bytes	512 Bytes	1 instruction word/vector
ATmega88PA	8K Bytes	512 Bytes	1K Bytes	1 instruction word/vector
ATmega168PA	16K Bytes	512 Bytes	1K Bytes	2 instruction words/vector
ATmega328P	32K Bytes	1K Bytes	2K Bytes	2 instruction words/vector

ATmega88PA, ATmega168PA and ATmega328P support a real Read-While-Write Self-Programming mechanism. There is a separate Boot Loader Section, and the SPM instruction can only execute from there. In ATmega48PA, there is no Read-While-Write support and no separate Boot Loader Section. The SPM instruction can execute from the entire Flash.

7.3 ATmega168PA

Speed (MHz)[3]	Power Supply	Ordering Code[2]	Package[1]	Operational Range
20	1.8 - 5.5	ATmega168PA-AU ATmega168PA-MMH[4] ATmega168PA-MU ATmega168PA-PU	32A 28M1 32M1-A 28P3	Industrial (-40°C to 85°C)

Note:
1. This device can also be supplied in wafer form. Please contact your local Atmel sales office for detailed ordering information and minimum quantities.
2. Pb-free packaging complies to the European Directive for Restriction of Hazardous Substances (RoHS directive). Also Halide free and fully Green.
3. See "Speed Grades" on page 312.
4. NiPdAu Lead Finish.

9.4 Errata ATmega328P

The revision letter in this section refers to the revision of the ATmega328P device.

9.4.1 Rev D

No known errata.

9.4.2 Rev C

Not sampled.

9.4.3 Rev B

- **Unstable 32 kHz Oscillator**

1. **Unstable 32 kHz Oscillator**
   The 32 kHz oscillator does not work as system clock.

   The 32 kHz oscillator used as asynchronous timer is inaccurate.

   Problem Fix/ Workaround
   None

9.4.4 Rev A

- **Unstable 32 kHz Oscillator**

1. **Unstable 32 kHz Oscillator**
   The 32 kHz oscillator does not work as system clock.

   The 32 kHz oscillator used as asynchronous timer is inaccurate.

   Problem Fix/ Workaround
   None

ภาคผนวก ค

รายละเอียดไอซีหมายเลข TLT494

Order this document by TL494/D

MOTOROLA

TL494

SWITCHMODE™ Pulse Width Modulation Control Circuit

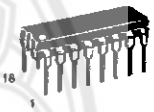
The TL494 is a fixed frequency, pulse width modulation control circuit designed primarily for SWITCHMODE power supply control.

- Complete Pulse Width Modulation Control Circuitry
- On–Chip Oscillator with Master or Slave Operation
- On–Chip Error Amplifiers
- On–Chip 5.0 V Reference
- Adjustable Deadtime Control
- Uncommitted Output Transistors Rated to 500 mA Source or Sink
- Output Control for Push–Pull or Single–Ended Operation
- Undervoltage Lockout

SWITCHMODE
PULSE WIDTH MODULATION
CONTROL CIRCUIT

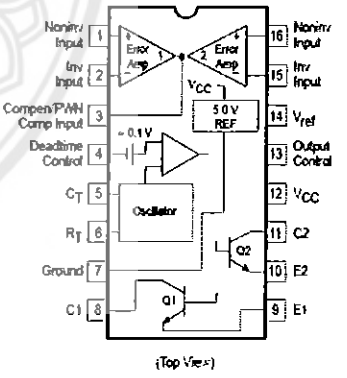
SEMICONDUCTOR
TECHNICAL DATA

D SUFFIX
PLASTIC PACKAGE
CASE 751B
(SO–16)



N SUFFIX
PLASTIC PACKAGE
CASE 648

PIN CONNECTIONS



(Top View)

MAXIMUM RATINGS (Full operating ambient temperature range applies, unless otherwise noted.)

Rating	Symbol	TL494C	TL494I	Unit
Power Supply Voltage	V_{CC}	42		V
Collector Output Voltage	V_{C1}, V_{C2}	42		V
Collector Output Current (Each transistor) (Note 1)	I_{C1}, I_{C2}	500		mA
Amplifier Input Voltage Range	V_{IR}	–0.3 to +42		V
Power Dissipation @ $T_A \leq 45°C$	P_D	1000		mW
Thermal Resistance, Junction–to–Ambient	$R_{\theta JA}$	80		°C/W
Operating Junction Temperature	T_J	125		°C
Storage Temperature Range	T_{stg}	–55 to +125		°C
Operating Ambient Temperature Range TL494C TL494I	T_A	 0 to +70 –25 to +85		°C
Derating Ambient Temperature	T_A	45		°C

NOTE: 1. Maximum thermal limits must be observed.

ORDERING INFORMATION

Device	Operating Temperature Range	Package
TL494CD	$T_A = 0°$ to $+70°C$	SO–16
TL494CN		Plastic
TL494IN	$T_A = -25°$ to $+85°C$	Plastic

TL494

RECOMMENDED OPERATING CONDITIONS

Characteristics	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Power Supply Voltage	V_{CC}	7.0	15	40	V
Collector Output Voltage	V_{C1}, V_{C2}	–	30	40	V
Collector Output Current (Each transistor)	I_{C1}, I_{C2}	–	–	200	mA
Amplified Input Voltage	V_{in}	–0.3	–	V_{CC} – 2.0	V
Current Into Feedback Terminal	I_{fb}	–	–	0.3	mA
Reference Output Current	I_{ref}	–	–	10	mA
Timing Resistor	R_T	1.8	30	500	kΩ
Timing Capacitor	C_T	0.0047	0.001	10	μF
Oscillator Frequency	f_{osc}	1.0	40	200	kHz

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (V_{CC} = 15 V, C_T = 0.01 μF, R_T = 12 kΩ, unless otherwise noted.)

For typical values T_A = 25°C, for min/max values T_A is the operating ambient temperature range that applies, unless otherwise noted.

Characteristics	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
REFERENCE SECTION					
Reference Voltage (I_O = 1.0 mA)	V_{ref}	4.75	5.0	5.25	V
Line Regulation (V_{CC} = 7.0 V to 40 V)	Reg_{line}	–	2.0	25	mV
Load Regulation (I_O = 1.0 mA to 10 mA)	Reg_{load}	–	3.0	15	mV
Short Circuit Output Current (V_{ref} = 0 V)	I_{SC}	15	35	75	mA
OUTPUT SECTION					
Collector Off–State Current (V_{CC} = 40 V, V_{CE} = 40 V)	$I_{C(off)}$	–	2.0	100	μA
Emitter Off–State Current V_{CC} = 40 V, V_C = 40 V, V_E = 0 V)	$I_{E(off)}$	–	–	–100	μA
Collector–Emitter Saturation Voltage (Note 2)					V
Common–Emitter (V_E = 0 V, I_C = 200 mA)	$V_{sat(C)}$	–	1.1	1.3	
Emitter–Follower (V_C = 15 V, I_E = –200 mA)	$V_{sat(E)}$	–	1.5	2.5	
Output Control Pin Current					
Low State ($V_{OC} \le$ 0.4 V)	I_{OCL}	–	10	–	μA
High State (V_{OC} = V_{ref})	I_{OCH}	–	0.2	3.5	mA
Output Voltage Rise Time	t_r				ns
Common–Emitter (See Figure 12)		–	100	200	
Emitter–Follower (See Figure 13)		–	100	200	
Output Voltage Fall Time	t_f				ns
Common–Emitter (See Figure 12)		–	25	100	
Emitter–Follower (See Figure 13)		–	40	100	

NOTE: 2. Low duty cycle pulse techniques are used during test to maintain junction temperature as close to ambient temperature as possible.

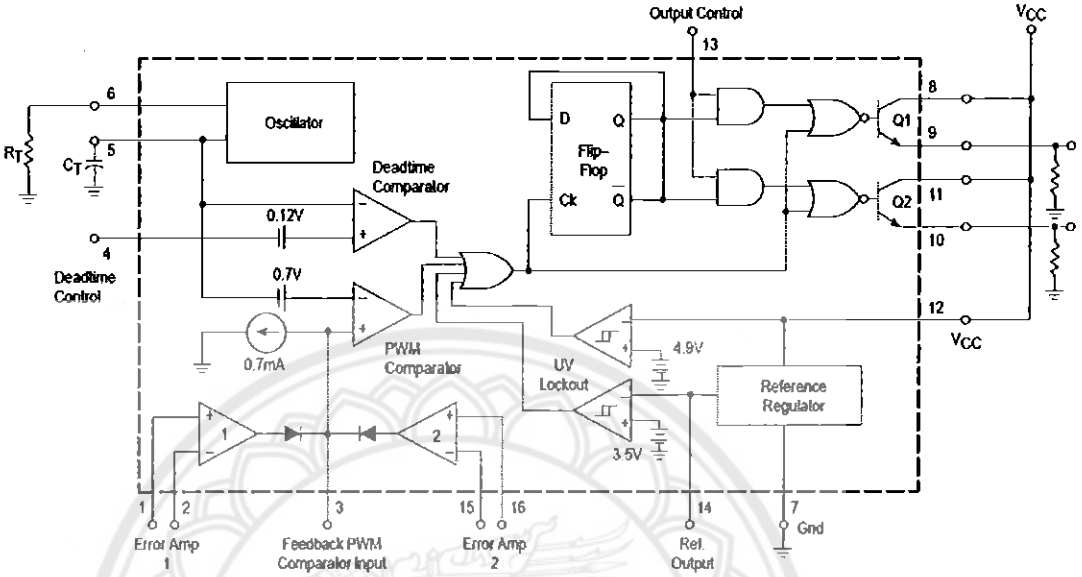
TL494

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (V_{CC} = 15 V, C_T = 0.01 μF, R_T = 12 kΩ, unless otherwise noted.)
For typical values T_A = 25°C, for min/max values T_A is the operating ambient temperature range that applies, unless otherwise noted.

Characteristics	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
ERROR AMPLIFIER SECTION					
Input Offset Voltage ($V_{O\ (Pin\ 3)}$ = 2.5 V)	V_{IO}	–	2.0	10	mV
Input Offset Current ($V_{O\ (Pin\ 3)}$ = 2.5 V)	I_{IO}	–	5.0	250	nA
Input Bias Current ($V_{O\ (Pin\ 3)}$ = 2.5 V)	I_{IB}	–	–0.1	–1.0	μA
Input Common Mode Voltage Range (V_{CC} = 40 V, T_A = 25°C)	V_{ICR}	–0.3 to V_{CC}–2.0			V
Open Loop Voltage Gain (ΔV_O = 3.0 V, V_O = 0.5 V to 3.5 V, R_L = 2.0 kΩ)	A_{VOL}	70	95	–	dB
Unity–Gain Crossover Frequency (V_O = 0.5 V to 3.5 V, R_L = 2.0 kΩ)	f_{C-}	–	350	–	kHz
Phase Margin at Unity–Gain (V_O = 0.5 V to 3.5 V, R_L = 2.0 kΩ)	ϕ_m	–	65	–	deg.
Common Mode Rejection Ratio (V_{CC} = 40 V)	CMRR	65	90	–	dB
Power Supply Rejection Ratio (ΔV_{CC} = 33 V, V_O = 2.5 V, R_L = 2.0 kΩ)	PSRR	–	100	–	dB
Output Sink Current ($V_{O\ (Pin\ 3)}$ = 0.7 V)	I_{O-}	0.3	0.7	–	mA
Output Source Current ($V_{O\ (Pin\ 3)}$ = 3.5 V)	I_{O+}	2.0	–4.0	–	mA
PWM COMPARATOR SECTION (Test Circuit Figure 11)					
Input Threshold Voltage (Zero Duty Cycle)	V_{TH}	–	2.5	4.5	V
Input Sink Current ($V_{(Pin\ 3)}$ = 0.7 V)	I_{I-}	0.3	0.7	–	mA
DEADTIME CONTROL SECTION (Test Circuit Figure 11)					
Input Bias Current (Pin 4) ($V_{Pin\ 4}$ = 0 V to 5.25 V)	$I_{IB\ (DT)}$	–	–2.0	–10	μA
Maximum Duty Cycle, Each Output, Push–Pull Mode ($V_{Pin\ 4}$ = 0 V, C_T = 0.01 μF, R_T = 12 kΩ) ($V_{Pin\ 4}$ = 0 V, C_T = 0.001 μF, R_T = 30 kΩ)	DC_{max}	 45 –	 48 45	 50 50	%
Input Threshold Voltage (Pin 4) (Zero Duty Cycle) (Maximum Duty Cycle)	V_{th}	 – 0	 2.8 –	 3.3 –	V
OSCILLATOR SECTION					
Frequency (C_T = 0.001 μF, R_T = 30 kΩ)	f_{osc}	–	40	–	kHz
Standard Deviation of Frequency* (C_T = 0.001 μF, R_T = 30 kΩ)	σf_{osc}	–	3.0	–	%
Frequency Change with Voltage (V_{CC} = 7.0 V to 40 V, T_A = 25°C)	Δf_{osc} (ΔV)	–	0.1	–	%
Frequency Change with Temperature (ΔT_A = T_{low} to T_{high}) (C_T = 0.01 μF, R_T = 12 kΩ)	Δf_{osc} (ΔT)	–	–	12	%
UNDERVOLTAGE LOCKOUT SECTION					
Turn–On Threshold (V_{CC} increasing, I_{ref} = 1.0 mA)	V_{th}	5.5	6.43	7.0	V
TOTAL DEVICE					
Standby Supply Current (Pin 6 at V_{ref}, All other inputs and outputs open) (V_{CC} = 15 V) (V_{CC} = 40 V)	I_{CC}	 – –	 5.5 7.0	 10 15	mA
Average Supply Current (C_T = 0.01 μF, R_T = 12 kΩ, $V_{(Pin\ 4)}$ = 2.0 V) (V_{CC} = 15 V) (See Figure 12)		–	7.0	–	mA

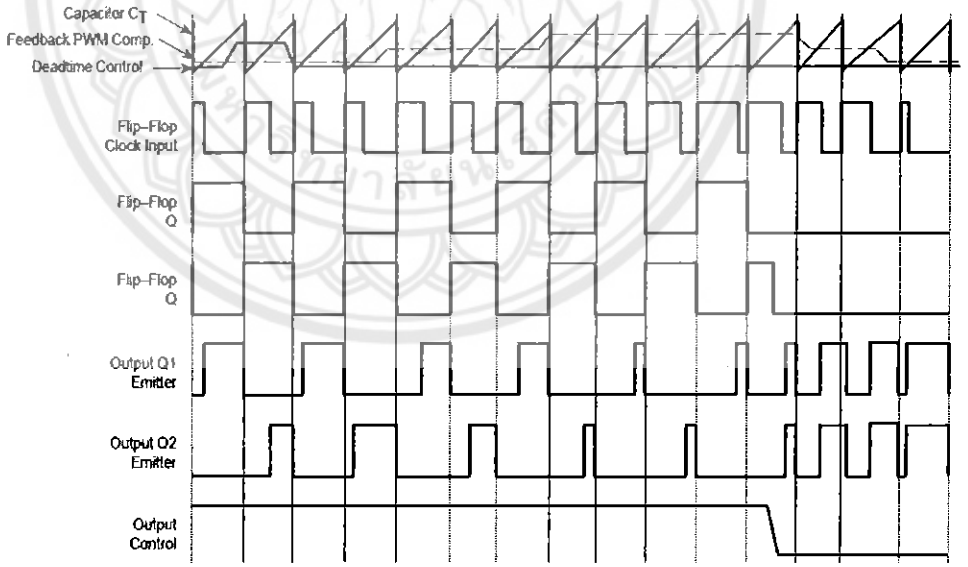
* Standard deviation is a measure of the statistical distribution about the mean as derived from the formula, $\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{N} (X_n - \bar{X})^2}{N-1}}$

Figure 1. Representative Block Diagram



This device contains 46 active transistors.

Figure 2. Timing Diagram



TL494

APPLICATIONS INFORMATION

Description

The TL494 is a fixed–frequency pulse width modulation control circuit, incorporating the primary building blocks required for the control of a switching power supply. (See Figure 1.) An internal–linear sawtooth oscillator is frequency–programmable by two external components, R_T and C_T. The approximate oscillator frequency is determined by:

$$f_{osc} \approx \frac{1.1}{R_T \bullet C_T}$$

For more information refer to Figure 3.

Output pulse width modulation is accomplished by comparison of the positive sawtooth waveform across capacitor C_T to either of two control signals. The NOR gates, which drive output transistors Q1 and Q2, are enabled only when the flip–flop clock–input line is in its low state. This happens only during that portion of time when the sawtooth voltage is greater than the control signals. Therefore, an increase in control–signal amplitude causes a corresponding linear decrease of output pulse width. (Refer to the Timing Diagram shown in Figure 2.)

The control signals are external inputs that can be fed into the deadtime control, the error amplifier inputs, or the feedback input. The deadtime control comparator has an effective 120 mV input offset which limits the minimum output deadtime to approximately the first 4% of the sawtooth–cycle time. This would result in a maximum duty cycle on a given output of 96% with the output control grounded, and 48% with it connected to the reference line. Additional deadtime may be imposed on the output by setting the deadtime–control input to a fixed voltage, ranging between 0 V to 3.3 V.

Functional Table

Input/Output Controls	Output Function	$\frac{f_{out}}{f_{osc}}$ =
Grounded	Single–ended PWM @ Q1 and Q2	1.0
@ V_{ref}	Push–pull Operation	0.5

The pulse width modulator comparator provides a means for the error amplifiers to adjust the output pulse width from the maximum percent on–time, established by the deadtime control input, down to zero, as the voltage at the feedback pin varies from 0.5 V to 3.5 V. Both error amplifiers have a common mode input range from –0.3 V to (V_{CC} – 2V), and may be used to sense power–supply output voltage and current. The error–amplifier outputs are active high and are ORed together at the noninverting input of the pulse–width modulator comparator. With this configuration, the amplifier that demands minimum output on time, dominates control of the loop.

When capacitor C_T is discharged, a positive pulse is generated on the output of the deadtime comparator, which clocks the pulse–steering flip–flop and inhibits the output transistors, Q1 and Q2. With the output–control connected to the reference line, the pulse–steering flip–flop directs the modulated pulses to each of the two output transistors alternately for push–pull operation. The output frequency is equal to half that of the oscillator. Output drive can also be taken from Q1 or Q2, when single–ended operation with a maximum on–time of less than 50% is required. This is desirable when the output transformer has a ringback winding with a catch diode used for snubbing. When higher output–drive currents are required for single–ended operation, Q1 and Q2 may be connected in parallel, and the output–mode pin must be tied to ground to disable the flip–flop. The output frequency will now be equal to that of the oscillator.

The TL494 has an internal 5.0 V reference capable of sourcing up to 10 mA of load current for external bias circuits. The reference has an internal accuracy of ±5.0% with a typical thermal drift of less than 50 mV over an operating temperature range of 0° to 70°C.

Figure 3. Oscillator Frequency versus Timing Resistance

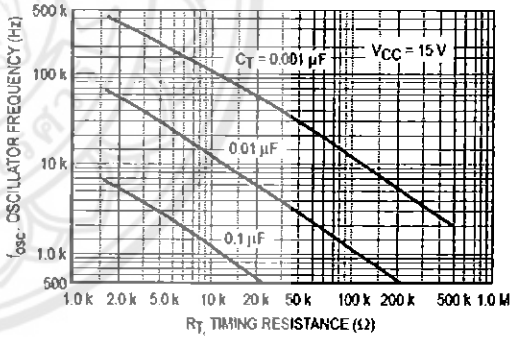


Figure 4. Open Loop Voltage Gain and Phase versus Frequency

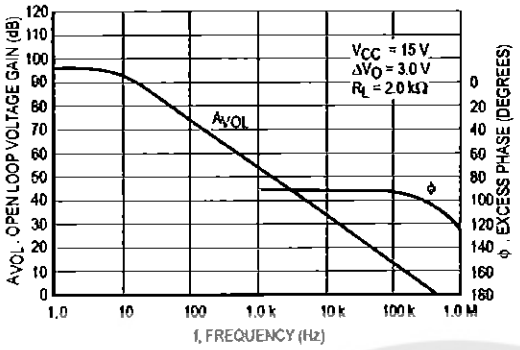


Figure 5. Percent Deadtime versus Oscillator Frequency

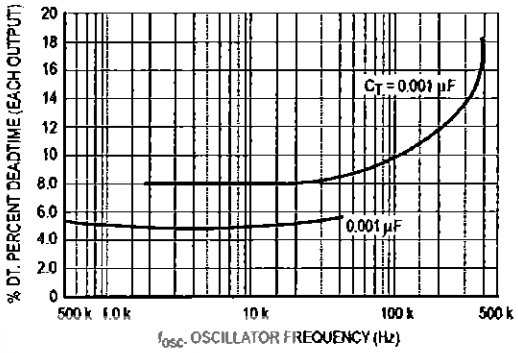


Figure 6. Percent Duty Cycle versus Deadtime Control Voltage

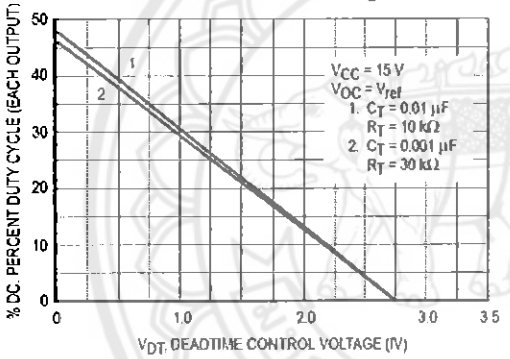


Figure 7. Emitter–Follower Configuration Output Saturation Voltage versus Emitter Current

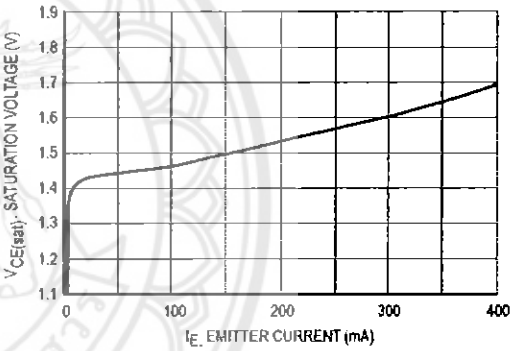


Figure 8. Common–Emitter Configuration Output Saturation Voltage versus Collector Current

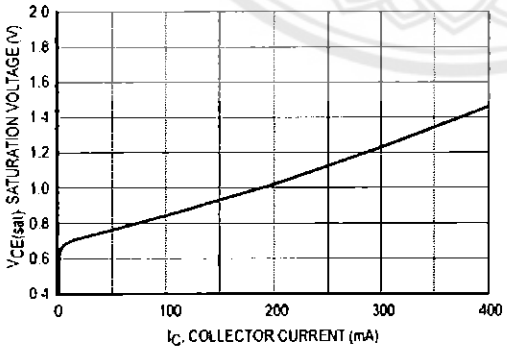


Figure 9. Standby Supply Current versus Supply Voltage

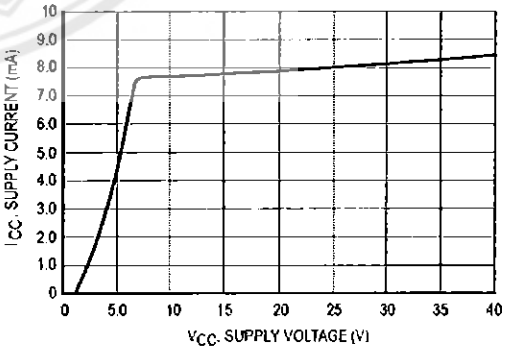
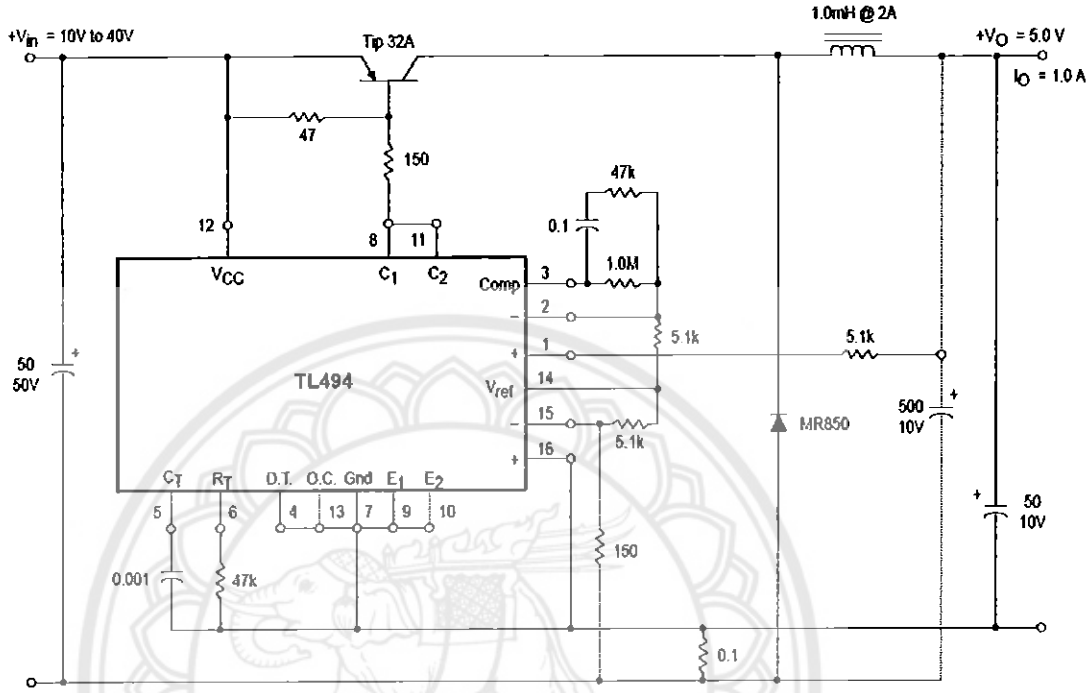


Figure 21. Pulse Width Modulated Step–Down Converter



Test	Conditions	Results
Line Regulation	V_{in} = 8.0 V to 40 V	3.0 mV 0.01%
Load Regulation	V_{in} = 12.6 V, I_O = 0.2 mA to 200 mA	5.0 mV 0.02%
Output Ripple	V_{in} = 12.6 V, I_O = 200 mA	40 mV pp P.A.R.D.
Short Circuit Current	V_{in} = 12.6 V, R_L = 0.1 Ω	250 mA
Efficiency	V_{in} = 12.6 V, I_O = 200 mA	72%

ภาคผนวก ง

รายละเอียดของมอสเฟตหมายเลข IRFZ44N

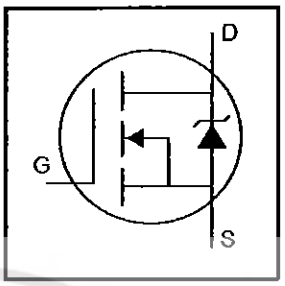
International
IOR Rectifier

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_{DSS} = 55V

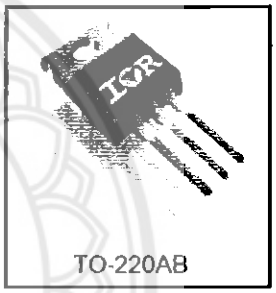
$R_{DS(on)}$ = 17.5mΩ

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°C	Continuous Drain Current, V_{GS} @ 10V	49	A
I_D @ T_C = 100°C	Continuous Drain Current, V_{GS} @ 10V	35	
I_{DM}	Pulsed Drain Current ①	160	
P_D @T_C = 25°C	Power Dissipation	94	W
	Linear Derating Factor	0.63	W/°C
V_{GS}	Gate-to-Source Voltage	± 20	V
I_{AR}	Avalanche Current①	25	A
E_{AR}	Repetitive Avalanche Energy①	9.4	mJ
dv/dt	Peak Diode Recovery dv/dt ③	5.0	V/ns
T_J T_{STG}	Operating Junction and Storage Temperature Range	-55 to + 175	°C
	Soldering Temperature, for 10 seconds	300 (1.6mm from case)	
	Mounting torque, 6-32 or M3 srew	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
IOR Rectifier

Electrical Characteristics @ T_J = 25°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 = 250μA
$\Delta V_{(BR)DSS}/\Delta T_J$	Breakdown Voltage Temp. Coefficient	—	0.058	—	V/°C	Reference to 25°C, I_D = 1mA
$R_{DS(on)}$	Static Drain-to-Source On-Resistance	—	—	17.5	mΩ	V_{GS} = 10V, I_D = 25A ④
$V_{GS(th)}$	Gate Threshold Voltage	2.0	—	4.0	V	V_{DS} = V_{GS}, I_D = 250μA
g_{fs}	Forward Transconductance	19	—	—	S	V_{DS} = 25V, I_D = 25A④
I_{DSS}	Drain-to-Source Leakage Current	—	—	25	μA	V_{DS} = 55V, V_{GS} = 0V
		—	—	250		V_{DS} = 44V, V_{GS} = 0V, T_J = 150°C
I_{GSS}	Gate-to-Source Forward Leakage	—	—	100	nA	V_{GS} = 20V
	Gate-to-Source Reverse Leakage	—	—	-100		V_{GS} = -20V
Q_g	Total Gate Charge	—	—	63	nC	I_D = 25A
Q_{gs}	Gate-to-Source Charge	—	—	14		V_{DS} = 44V
Q_{gd}	Gate-to-Drain ("Miller") Charge	—	—	23		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	—		I_D = 25A
$t_{d(off)}$	Turn-Off Delay Time	—	44	—		R_G = 12Ω
t_f	Fall Time	—	45	—		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	—		
C_{iss}	Input Capacitance	—	1470	—	pF	V_{GS} = 0V
C_{oss}	Output Capacitance	—	360	—		V_{DS} = 25V
C_{rss}	Reverse Transfer Capacitance	—	88	—		f = 1.0MHz, See Fig. 5
E_{AS}	Single Pulse Avalanche Energy②	—	530⑤	150⑥	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		
V_{SD}	Diode Forward Voltage	—	—	1.3	V	T_J = 25°C, I_S = 25A, V_{GS} = 0V ④
t_{rr}	Reverse Recovery Time	—	63	95	ns	T_J = 25°C, I_F = 25A
Q_{rr}	Reverse Recovery Charge	—	170	260	nC	di/dt = 100A/μs ④
t_{on}	Forward Turn-On Time	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°C, L = 0.48mH R_G = 25Ω, I_{AS} = 25A. (See Figure 12)

③ I_{SD} ≤ 25A, di/dt ≤ 230A/μs, V_{DD} ≤ $V_{(BR)DSS}$, T_J ≤ 175°C

④ Pulse width ≤ 400μs; duty cycle ≤ 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°C .

International
IOR Rectifier

IRFZ44N

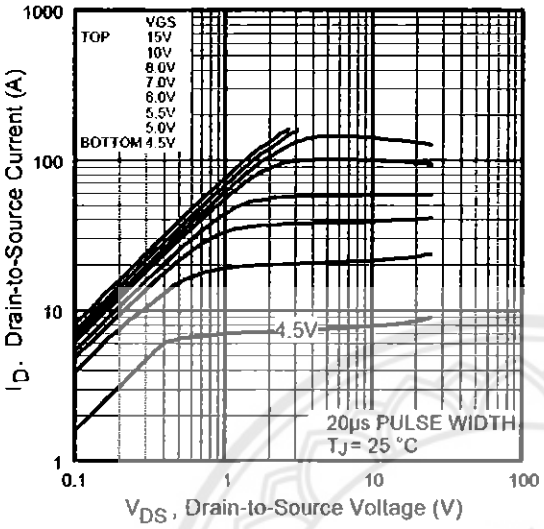


Fig 1. Typical Output Characteristics

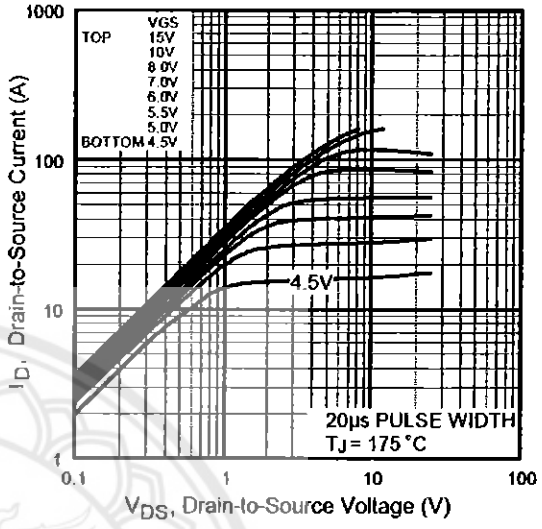


Fig 2. Typical Output Characteristics

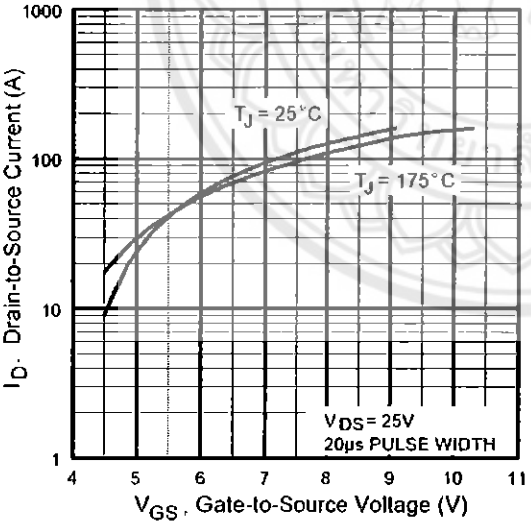


Fig 3. Typical Transfer Characteristics

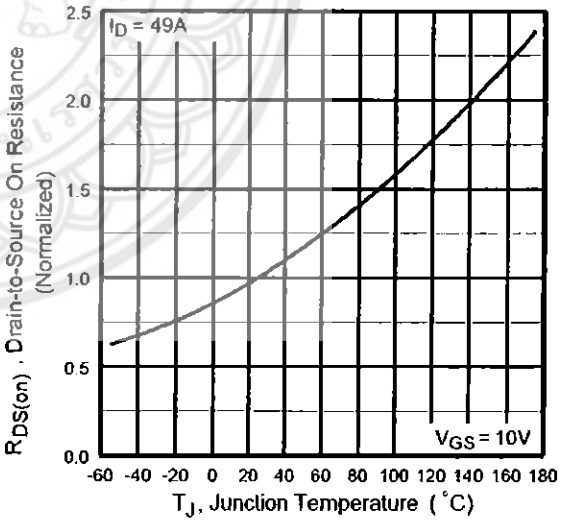


Fig 4. Normalized On-Resistance Vs. Temperature

IRFZ44N

International
IOR Rectifier

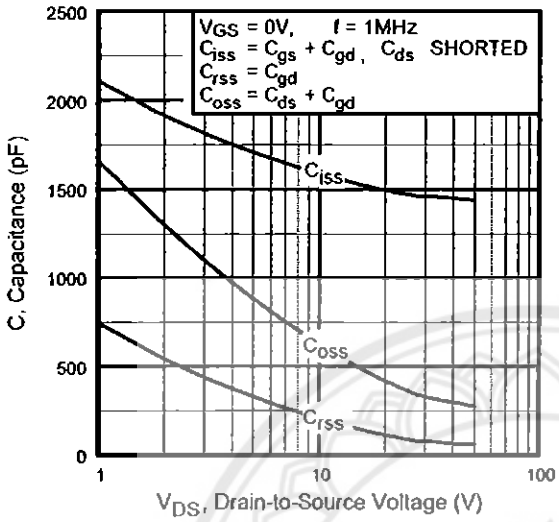


Fig 5. Typical Capacitance Vs. Drain-to-Source Voltage

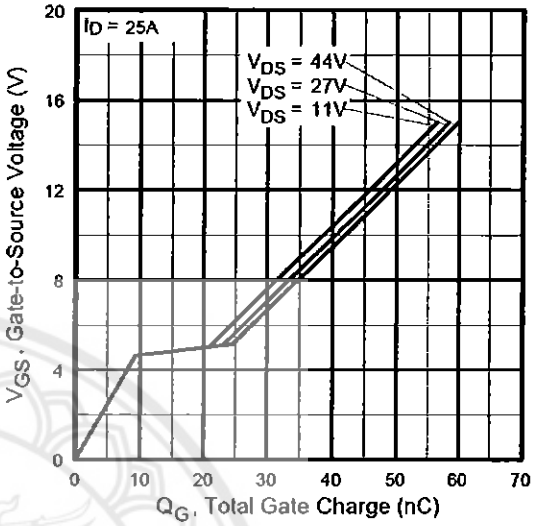


Fig 6. Typical Gate Charge Vs. Gate-to-Source Voltage

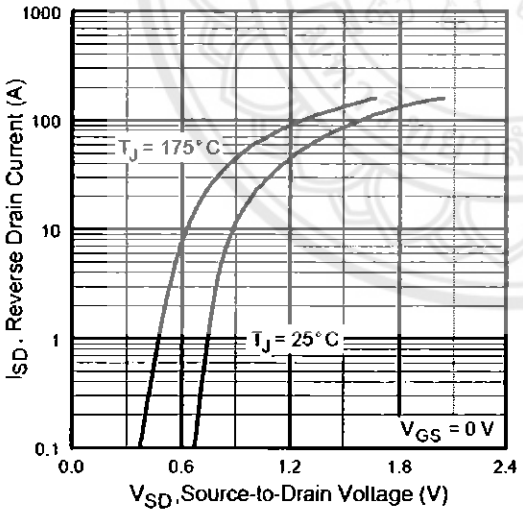


Fig 7. Typical Source-Drain Diode Forward Voltage

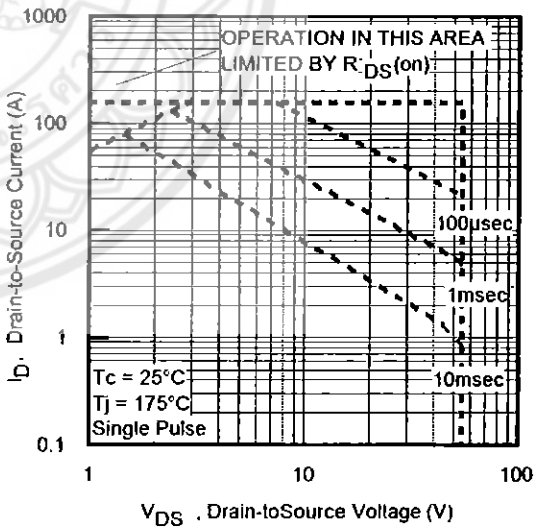


Fig 8. Maximum Safe Operating Area

ภาคผนวก จ

รายละเอียดของทรานซิสเตอร์หมายเลข TIP32C

FAIRCHILD
SEMICONDUCTOR

July 2008

TIP32/TIP32A/TIP32B/TIP32C
PNP Epitaxial Silicon Transistor

Features
- Complementary to TIP31/TIP31A/TIP31B/TIP31C

1. Base 2. Collector 3. Emitter

Absolute Maximum Ratings T_C=25°C unless otherwise noted

Symbol	Parameter	Value	Units
V_{CBO}	Collector-Base Voltage : TIP32	- 40	V
	: TIP32A	- 60	V
	: TIP32B	- 80	V
	: TIP32C	- 100	V
V_{CEO}	Collector-Emitter Voltage : TIP32	- 40	V
	: TIP32A	- 60	V
	: TIP32B	- 80	V
	: TIP32C	-100	V
V_{EBO}	Emitter-Base Voltage	- 5	V
I_C	Collector Current (DC)	- 3	A
I_{CP}	Collector Current (Pulse)	- 5	A
I_B	Base Current	- 3	A
P_C	Collector Dissipation (T_C=25°C)	40	W
	Collector Dissipation (T_a=25°C)	2	W
T_J	Junction Temperature	150	°C
T_{STG}	Storage Temperature	- 65 ~ 150	°C

Electrical Characteristics T_C=25°C unless otherwise noted

Symbol	Parameter	Test Condition	Min.	Max.	Units
V_{CEO}(sus)	* Collector-Emitter Sustaining Voltage : TIP32 : TIP32A : TIP32B : TIP32C	I_C = - 30mA, I_B = 0	 -40 -60 -80 -100		 V V V V
I_{CEO}	Collector Cut-off Current : TIP32/32A : TIP32B/32C	 V_{CE} = - 30V, I_B = 0 V_{CE} = - 60V, I_B = 0		 - 0.3 - 0.3	 mA mA
I_{CES}	Collector Cut-off Current : TIP32 : TIP32A : TIP32B : TIP32C	 V_{CE} = - 40V, V_{EB} = 0 V_{CE} = - 60V, V_{EB} = 0 V_{CE} = - 80V, V_{EB} = 0 V_{CE} = - 100V, V_{CE} = 0		 - 200 - 200 - 200 - 200	 μA μA μA μA
I_{EBO}	Emitter Cut-off Current	V_{EB} = - 5V, I_C = 0		- 1	mA
h_{FE}	* DC Current Gain	V_{CE} = - 4V, I_C = - 1A V_{CE} = - 4V, I_C = - 3A	25 10	 50	
V_{CE}(sat)	* Collector-Emitter Saturation Voltage	I_C = - 3A, I_B = - 375mA		- 1.2	V
V_{BE}(sat)	* Base-Emitter Saturation Voltage	V_{CE} = - 4V, I_C = - 3A		- 1.8	V
f_T	Current Gain Bandwidth Product	V_{CE} = - 10V, I_C = - 500mA, f = 1MHz	3.0		MHz

* Pulse Test: PW≤300ms, Duty Cycle≤2%

Typical Characteristics

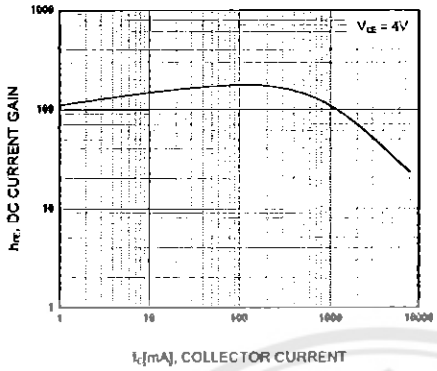


Figure 1. DC current Gain

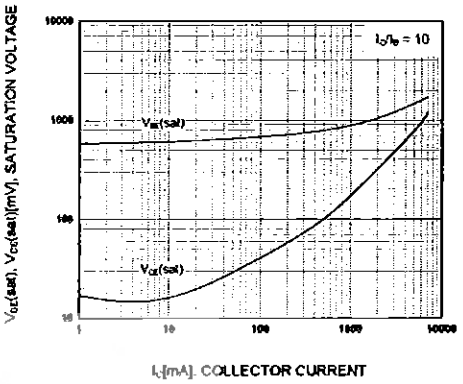


Figure 2. Base-Emitter Saturation Voltage
Collector-Emitter Saturation Voltage

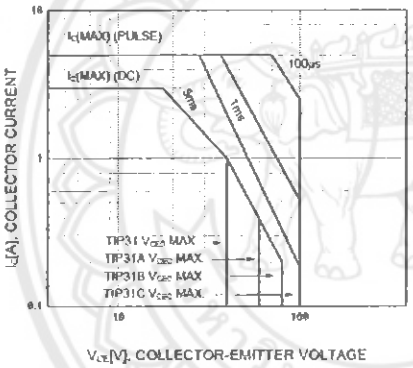


Figure 3. Safe Operating Area

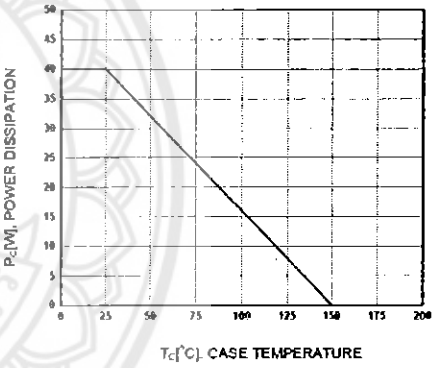


Figure 4. Power Derating

ภาคผนวก ฉ

รายละเอียดของไดโอดหมายเลข FR204

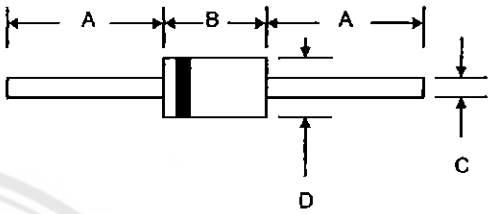
WTE
POWER SEMICONDUCTORS

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

DO-15		
Dim	Min	Max
A	25.4	—
B	5.50	7.62
C	0.71	0.864
D	2.60	3.60
All Dimensions in mm		

Maximum Ratings and Electrical Characteristics @T_A=25°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 Working Peak Reverse Voltage DC Blocking Voltage	V_{RRM} V_{RWM} V_R	50	100	200	400	600	800	1000	V
RMS Reverse Voltage	$V_{R(RMS)}$	35	70	140	280	420	560	700	V
Average Rectified Output Current (Note 1) @T_A = 55°C	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 = 2.0A	V_{FM}	1.2							V
Peak Reverse Current @T_A = 25°C At Rated DC Blocking Voltage @T_A = 100°C	I_{RM}	5.0 100							μA
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							°C
Storage Temperature Range	T_{STG}	-65 to +150							°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 IF = 0.5A, IR = 1.0A, IRR = 0.25A. See figure 5.
3. Measured at 1.0 MHz and applied reverse voltage of 4.0V D.C.

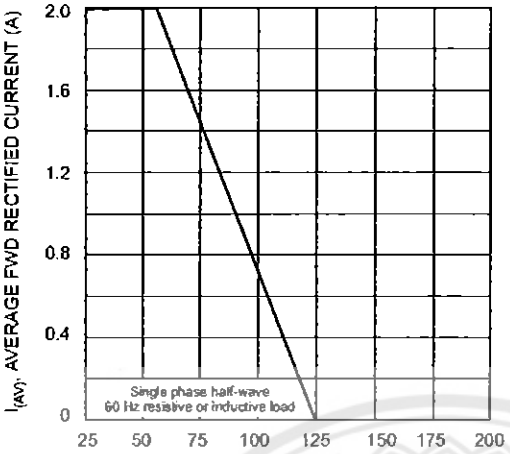


Fig. 1 Forward Derating Curve

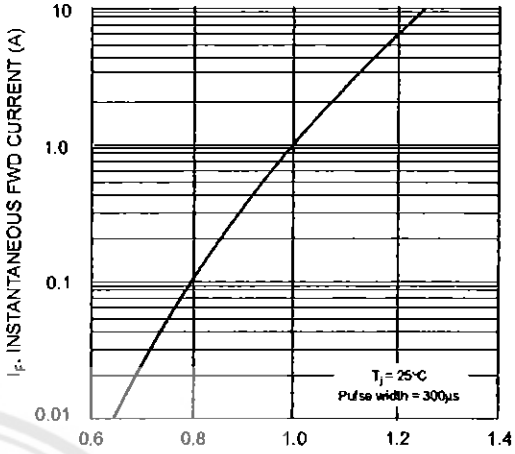


Fig. 2 Typical Forward Characteristics

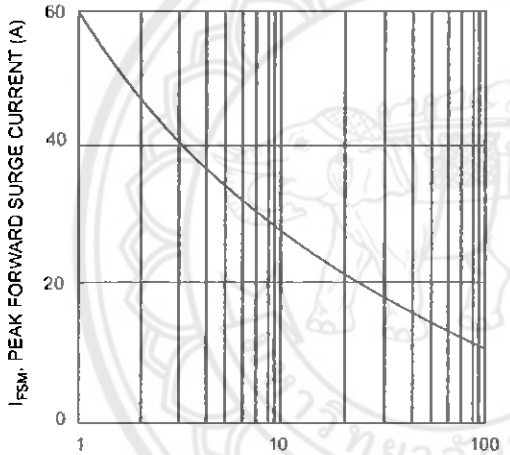


Fig. 3 Peak Forward Surge Current

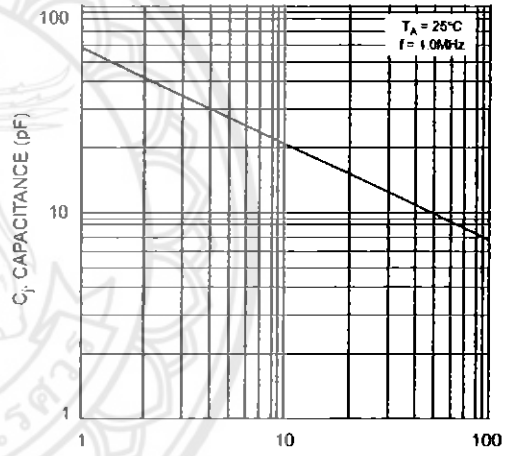
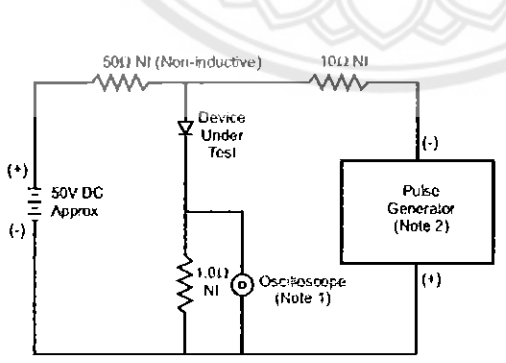


Fig. 4 Typical Junction Capacitance



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

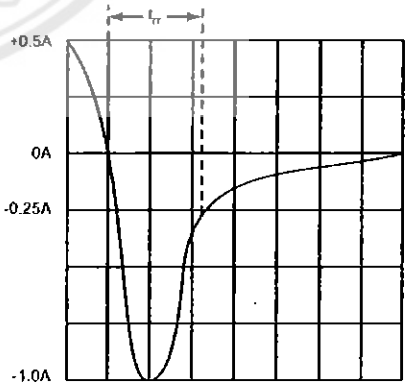


Fig. 5 Reverse Recovery Time Characteristic and Test Circuit

ภาคผนวก ช

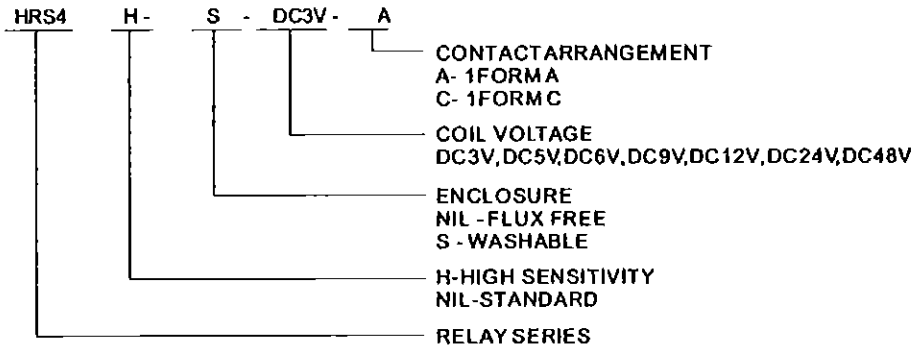
รายละเอียดของรีเลย์หมายเลข HRS4H-S-DC5V

HRS4(H) Relay

HRS4(H) Relay

1.COIL DATA	
1-1.Nominal Voltage	3 to 48VDC
1-2.Coil Resistance	Refer to Table 1
1-3.Operate Voltage	Refer to Table 1
1-4.Release Voltage	Refer to Table 1
1-5.Nominal Power Consumption	360 to 450 mW
2.CONTACT DATA	
2-1.Contact Arrangement	1 Form A, 1 Form C
2-2.Contact Material	AgAlloy
2-3.Contact Rating	10A 120VAC/24VDC, 10A/6A 250VAC(1C)
	15A 120VAC/24VDC, 10A 250VAC(1A)
	TV-5
2-4.Max.Switching Voltage	110VDC/240VAC
2-5.Max.Switching Current	15A
2-6.Max.Switching Power	1800VA, 360W
2-7.Contact Resistance(Initial)	≤50mΩ, at 6VDC 1A
2-8.Life Expectancy	
Electrical	100,000 operations at nominal load
Mechanical	10,000,000 operations
3.GENERAL DATA	
3-1.Insulation Resistance	Min.1000MΩ, at 500VDC
3-2.Dielectric Strength	750VAC, 1min between open contacts
	1,500VAC, 1min between contacts and coil
3-3.Operate Time	Max.10ms
3-4.Release Time	Max.5ms
3-5.Temperature Range	-30 to +85°C
3-6.Shock Resistance	
Endurance	1,000m/s^2
Misoperation	100m/s^2
3-7.Vibration Resistance	
Endurance	10 to 55Hz, 1.5mm Double Amplitude
Misoperation	10 to 55Hz, 1.5mm Double Amplitude
3-8.Heating	80±2°C 96hs
3-9.Cold	-40±2°C 96hs
3-10.Humidity	35% to 85%RH
3-11.Weight	12gr.
3-12.Safety Standard	UL NO.E164730
	TUV NO.50036455
	CSA NO.LR109368
	CQC NO.02001001299

4. ORDERING CODE



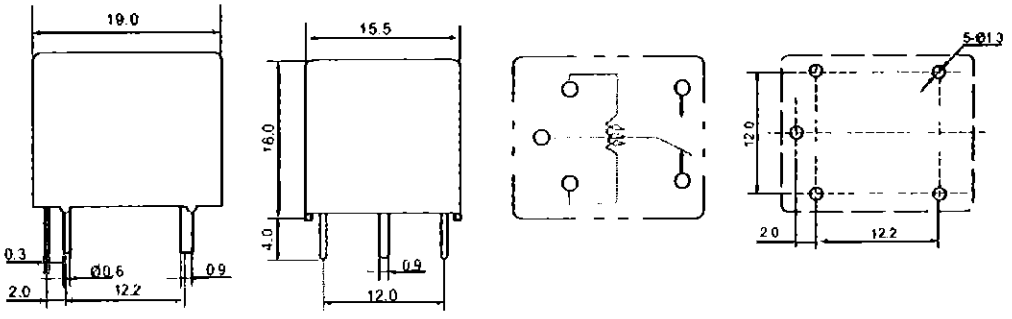
5. COIL DATA CHART

at 20°C

ORDERING CODE	COIL VOLTAGE VDC	COIL RESISTANCE ±/-10%	OPERATE VOLTAGE VDC	RELEASE VOLTAGE VDC	POWER CONSUMPTION mW
HRS4-(S)-DC3V	3	20	2.1	0.30	450
HRS4-(S)-DC5V	5	50	3.5	0.50	
HRS4-(S)-DC6V	6	80	4.2	0.60	
HRS4-(S)-DC9V	9	180	6.3	0.90	
HRS4-(S)-DC12V	12	320	8.4	1.20	
HRS4-(S)-DC24V	24	820	16.8	2.40	
HRS4-(S)-DC48V	48	5200	33.6	4.80	
HRS4H-(S)-DC3V	3	25	2.1	0.30	360
HRS4H-(S)-DC5V	5	70	3.5	0.50	
HRS4H-(S)-DC6V	6	100	4.2	0.60	
HRS4H-(S)-DC9V	9	225	6.3	0.90	
HRS4H-(S)-DC12V	12	400	8.4	1.20	
HRS4H-(S)-DC24V	24	1600	16.8	2.40	
HRS4H-(S)-DC48V	48	6400	33.6	4.80	

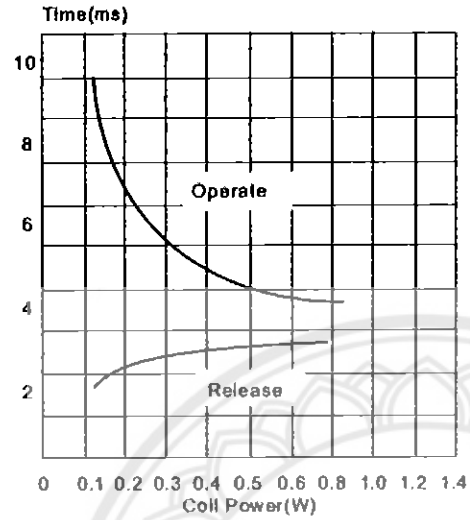
Table 1

6. DIMENSIONS (In mm)

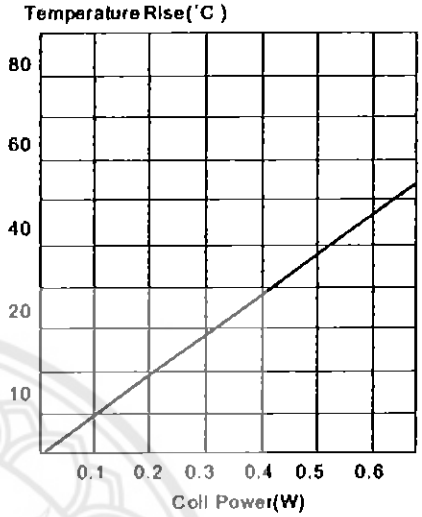


7.HRS4(H) CHARACTERISTIC DATA

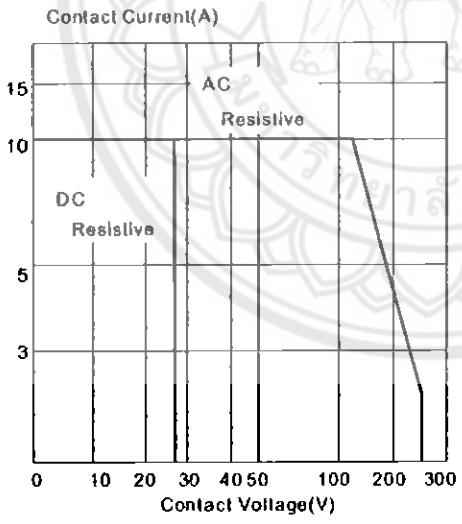
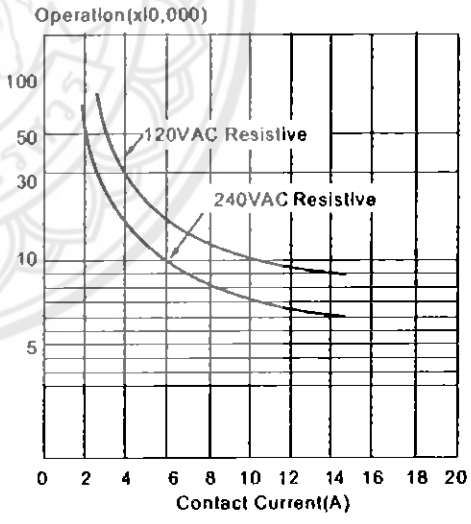
Timing



Coil Temperature Rise



Maximum Switching Power



Life Curve