



ตัวอัดประจุแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนแบบชาร์จแรงดัน
และกระแสได้หลายค่า

A LITHIUM-ION BATTERY CHARGER WITH MULTIPLE VOLTAGE
AND CURRENT LIMITS



นายชนานนท์ อัดดาวิ รหัส 52361673

นายพิสิฐ ร่มโพธิ์ รหัส 52362069

นายสถาพร หมั่นสุดตา รหัส 52362274

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์	
วันที่รับ.....	12/ก.ย. 2556
เลขทะเบียน.....	16381406
เลขเรียกหนังสือ.....	ฟร.
มหาวิทยาลัยนเรศวร 6/47 ต. 2555	

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

ปีการศึกษา 2555



ใบรับรองปริญญาานิพนธ์

ชื่อหัวข้อโครงการ ตัวอัลประจุแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนแบบจำกัดแรงดันและกระแส
ได้หลายค่า

ผู้ดำเนินโครงการ นายชนานนท์ อัคราวิ รหัส 52361673
 นายพิสิฐ ร่มโพธิ์ รหัส 52362069
 นายสถาพร หมื่นสุคตา รหัส 52362274

ที่ปรึกษาโครงการ ดร. นิพัทธ์ จันทรมินทร์
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์
ปีการศึกษา 2555

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อนุมัติให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

.....ที่ปรึกษาโครงการ
(ดร. นิพัทธ์ จันทรมินทร์)

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

.....กรรมการ
(ดร. พันธ์ นัฏฤทธิ)

ชื่อหัวข้อโครงการ ตัวอัดประจุแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนแบบจำกัดแรงดันและกระแสได้
หลายค่า

ผู้ดำเนินโครงการ นายชนานนท์ อัดดาวิ รหัส 52361673
 นายพิสิฐ ร่มโพธิ์ รหัส 52362069
 นายสถาพร หมั่นสุตตา รหัส 52362274

ที่ปรึกษาโครงการ คร. นิพัทธ์ จันทรมินทร์

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

ปีการศึกษา 2555

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการออกแบบและสร้างตัวควบคุมการอัดประจุสำหรับแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนซึ่งนิยมใช้ในโทรศัพท์เคลื่อนที่และกล้องถ่ายภาพดิจิทัล โดยตัวควบคุมการอัดประจุสามารถเลือกค่าแรงดันอัดประจุได้ทั้งหมด 3 ค่า คือ 4.2 V 5 V และ 8.4 V นอกจากนี้ยังสามารถจำกัดค่ากระแสอัดประจุอยู่ในช่วง 0.3 – 2 A และได้ออกแบบการเลือกค่ากระแสอัดประจุเพื่อให้เหมาะสมกับขนาดแบตเตอรี่ที่ต้องการอัดประจุ โดยตัวควบคุมการอัดประจุสามารถรองรับพลังงานจากแหล่งจ่ายได้ 3 ประเภท คือ ไฟกระแสสลับขนาดแรงดัน 220 V และความถี่ 50 Hz จากการไฟฟ้า ไฟกระแสตรงจากแบตเตอรี่ขนาดแรงดัน 12 V ผ่านตัวจุกนุหรีในรถยนต์และไฟกระแสตรงจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ให้แรงดันเปิดวงจรในช่วง 15 – 40 V รวมทั้งออกแบบให้การอัดประจุสิ้นสุดลงเมื่อกระแสอัดประจุมีค่าต่ำกว่าค่ากระแสตัดวงจรที่ผู้ใช้ปรับตั้งได้ และสร้างตัวควบคุมการอัดประจุให้มีขนาดเล็กสามารถพกพาไปยังสถานที่ต่างๆ ได้ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าเราสามารถควบคุมแรงดันและกระแสอัดประจุตามค่าที่ได้ออกแบบไว้

Project title A Lithium-Ion Battery Charger with Multiple Voltage and Current Limits
Name Mr. Chananon Oatthawi ID. 52361673
Mr. Pisit Rompho ID. 52362069
Mr. Sataporn Muensudta ID. 52362274
Project advisor Mr. Niphat Jantharamin, Ph.D.
Major Electrical Engineering
Department Electrical and Computer Engineering
Academic year 2012

Abstract

This thesis presents a design and construction of a charger for Li-ion batteries which have been widely used in mobile phones and digital cameras. This charger provided three regulated levels of output voltage, namely 4.2 V 5 V and 8.4 V. It was able to limit the charging current to a range of 0.3 – 2 A as needed, whereas recommendation of charging current limit depending upon battery capacity was also devised. Hereby, the charger was designed to allow three possible groups of energy source, i.e. the 220V 50Hz line voltage, 12V batteries via a car cigarette lighter, and solar panels providing an open-circuit voltage in a range of 15 – 40 V. Moreover the charging process was designed to be ended when charging current became lower than a user-defined cutoff current. In addition, the charger was compact and therefore portable. The testing results showed that it was capable of regulating the output voltage and limiting the charging current as designed.

กิตติกรรมประกาศ

ผู้ดำเนินโครงการขอขอบคุณ ดร. นิพัทธ์ จันทรมินทร์ อาจารย์ปรึกษาโครงการ ซึ่งเอาใจใส่ในรายละเอียดทุกขั้นตอนของการดำเนินโครงการ โดยให้คำปรึกษาและคำแนะนำในการแก้ไข ปัญหาต่างๆอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งโครงการสำเร็จลุล่วง รวมถึงแนะนำหลักการเขียนปริญญานิพนธ์และตรวจทานแก้ไขอย่างละเอียดจนได้ปริญญานิพนธ์เป็นรูปเล่มสมบูรณ์

ขอขอบคุณคุณพลวัฒน์ ทองบัวบาน (พี่เกม) รุ่นพี่สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ปัจจุบันดำรงตำแหน่งวิศวกรระดับ 4 แผนกควบคุมการจ่ายไฟ กองควบคุมและบำรุงรักษา ฝ่ายปฏิบัติการเครื่องข่ายเขต 2 ภาค 1 การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค จ.พิษณุโลก ที่สละเวลาส่วนตัวเพื่อให้ความรู้และคำแนะนำอันเป็นประโยชน์ยิ่งในการเลือกใช้อุปกรณ์และการสร้างวงจร ทำให้ผู้ดำเนินโครงการมีแนวทางในการสร้างชิ้นงานให้บรรลุตามวัตถุประสงค์ของโครงการที่ตั้งไว้

และขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ที่ให้ยืมใช้เครื่องมือวัดในการทดสอบชิ้นงานที่สร้างขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งขอขอบคุณว่าที่ร้อยตรีธานี โกสุม (พี่ดัน) รวมทั้งคุณปวันรัตน์ มั่นนุช (พี่โบว์) ซึ่งเป็นรุ่นพี่สาขาวิศวกรรมไฟฟ้าและปัจจุบันดำรงตำแหน่งครูช่างของภาควิชาฯ ที่อำนวยความสะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการและการยืมใช้เครื่องมือวัดจนกระทั่งการทดสอบต่างๆสิ้นสุดลง

นอกจากนี้ยังขอขอบคุณคุณอนิรุทธิ์ ทองสุคดี (บิว) เพื่อนสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ที่อนุเคราะห์ให้ใช้ตัวจุบหรือในรถยนต์ส่วนตัวในการทดสอบชิ้นงานที่สร้างขึ้น ทำให้มีผลการทดสอบที่สมบูรณ์

รวมทั้งขอขอบคุณรัฐบาลไทยที่จัดตั้งกองทุนเงินให้กู้ยืมเพื่อการศึกษา (กยศ.) ซึ่งสนับสนุนด้านทุนทรัพย์แก่นายสถาพร หมั่นสุตตา ตลอดระยะเวลาการศึกษาในระดับปริญญาตรี

ในท้ายที่สุดนี้ เหนือสิ่งอื่นใด ผู้ดำเนินโครงการขอกราบขอบพระคุณบิดาและมารดา ซึ่งให้การสนับสนุนในทุกด้านเกี่ยวกับการศึกษาของผู้ดำเนินโครงการ รวมทั้งมอบความรัก ความเมตตา และคอยเป็นกำลังใจให้จนประสบความสำเร็จในวันนี้

นายชนานนท์ อัคราวิ

นายพิสิฐ ร่มโพธิ์

นายสถาพร หมั่นสุตตา

สารบัญ

หน้า

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

บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ.....	2
1.4 ขั้นตอนและแผนการดำเนินงาน.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการ.....	3
1.6 งบประมาณ.....	3

บทที่ 2 แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนและหลักการอัดประจุ.....	4
2.1 แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน.....	4
2.1.1 คุณสมบัติทางเคมีแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน.....	5
2.1.2 การคายประจุของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน.....	7
2.1.3 การอัดประจุของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน.....	8
2.2 แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนพอลิเมอร์.....	12
2.2.1 การคายประจุของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนพอลิเมอร์.....	13
2.2.2 การอัดประจุของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนพอลิเมอร์.....	15
2.3 หลักการอัดประจุแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนและลิเทียมไอออนพอลิเมอร์.....	16
2.4 แหล่งจ่ายพลังงานที่ให้ค่าแรงดันไฟฟ้าไม่คงที่.....	17
2.4.1 แบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว (Lead-acid batteries).....	17
2.4.2 เซลล์แสงอาทิตย์.....	20

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.5 วงจรทอนระดับแรงดัน	28
บทที่ 3 การออกแบบและสร้างตัวควบคุมการอัดประจุ.....	33
3.1 การออกแบบการทำงานของตัวควบคุมการอัดประจุ.....	33
3.2 โครงสร้างและหลักการทำงานของตัวควบคุมการอัดประจุ.....	34
3.3 วงจรควบคุมแรงดันและกระแสอัดประจุ.....	36
3.4 วงจรตัดกระแสอัดประจุ.....	39
3.5 การประกอบตัวควบคุมการอัดประจุ.....	43
บทที่ 4 ผลการทดสอบ	45
4.1 การทดสอบการทำงานของวงจรทอนระดับแรงดัน	45
4.1.1 การควบคุมค่าแรงดันและจำกัดค่ากระแสด้านออก.....	45
4.1.2 การวัดค่าความถี่ที่เกิดโดยใช้ออสซิลโลสโคป	47
4.1.3 การทดสอบหาค่าประสิทธิภาพ.....	49
4.2 การทดสอบวงจรตัดกระแสอัดประจุ.....	53
4.2.1 การทดสอบวงจรขยายไม่กลับขั้ว.....	53
4.2.2 การทดสอบวงจรเปรียบเทียบแรงดัน	54
4.2.3 การควบคุมการทำงานของรีเลย์	56
4.3 การทดสอบตัวควบคุมการอัดประจุ	57
4.3.1 การอัดประจุแบบเตอรีโดยตรง.....	57
4.3.2 การอัดประจุแบบเตอรีในโทรศัพท์เคลื่อนที่.....	60
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	63
5.1 สรุปผลการดำเนินงาน.....	63
5.2 ปัญหาและแนวทางแก้ไข	65
5.3 แนวทางในการพัฒนาต่อไป.....	65
เอกสารอ้างอิง	66

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก ก ตารางผลการทดสอบการอัปเดตประเภทเตอรี	67
ภาคผนวก ข รายละเอียดของวงจรรวมหมายเลข TL494	75
ภาคผนวก ค รายละเอียดของทรานซิสเตอร์หมายเลข Tip 32C	83
ภาคผนวก ง รายละเอียดของทรานซิสเตอร์หมายเลข BD139 และ BD140	86
ภาคผนวก จ รายละเอียดของวงจรรวมหมายเลข LM324	91
ภาคผนวก ฉ รายละเอียดของไดโอดหมายเลข FR204	96
ภาคผนวก ช รายละเอียดของตัวคุมค่าแรงดันหมายเลข L7805CV	99
ภาคผนวก ซ รายละเอียดของรีเลย์หมายเลข HRS2H-S-DC5V	103
ประวัติผู้ดำเนินโครงการ	107

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ข้อดีและข้อเสียของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน.....	5
2.2 คุณสมบัติการทำงานโดยทั่วไปของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน.....	7
4.1 แรงดันและกระแสต้านออกของวงจรควบคุมแรงดันและกระแสอัดประจุ.....	46
4.2 ค่าความถี่เกิลของวงจรทอนระดับแรงดัน.....	47
4.3 ประสิทธิภาพของวงจรทอนระดับแรงดันเมื่อใช้ไฟบ้านจ่ายผ่านอะแดปเตอร์ และต่อโหลดตัวต้านทาน 2.5 Ω	49
4.4 ประสิทธิภาพของวงจรทอนระดับแรงดันเมื่อใช้ไฟบ้านจ่ายผ่านอะแดปเตอร์ และต่อโหลดตัวต้านทาน 5 Ω	50
4.5 ประสิทธิภาพของวงจรทอนระดับแรงดันเมื่อจ่ายไฟด้วยแบตเตอรี่รถยนต์ และต่อโหลดตัวต้านทาน 2.5 Ω	51
4.6 ประสิทธิภาพของวงจรทอนระดับแรงดันเมื่อจ่ายไฟด้วยแบตเตอรี่รถยนต์ และต่อโหลดตัวต้านทาน 5 Ω	51
4.7 ประสิทธิภาพของวงจรทอนระดับแรงดันเมื่อจ่ายไฟด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และต่อโหลดตัวต้านทาน 2.5 Ω	52
4.8 ประสิทธิภาพของวงจรทอนระดับแรงดันเมื่อจ่ายไฟด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และต่อโหลดตัวต้านทาน 5 Ω	52
4.9 ผลการทดสอบการควบคุมการทำงานของรีเลย์.....	56

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 กระบวนการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีในเซลล์ของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน.....	6
2.2 การเปรียบเทียบแรงดันกับความจุสำหรับเซลล์ INCP 61/16/78 7 Ah เมื่อคายประจุด้วย กระแสที่ 25°C หลังจากการอัดประจุ (a) 4.1 V (b) 4.2 V ที่กระแส 1 A.....	8
2.3 การเปรียบเทียบแรงดันกับพลังงานสำหรับเซลล์ INCP 61/16/78 7 Ah เมื่อคายประจุ ด้วยกระแสที่ 25°C หลังจากการอัดประจุ (a) 4.1 V (b) 4.2 V ที่กระแส 1 A.....	9
2.4 ความจุของเซลล์ INCP 160/61/78 เมื่อใช้งานครบรอบด้วยกระแสที่ 1 A และ 6 A สำหรับการอัดประจุระหว่าง 4.1 V กับ 4.2 V และการคายประจุระหว่าง 2.5 V กับ 3.0 V ที่ 25°C.....	10
2.5 ความจุของเซลล์ INCP 160/61/78 เมื่ออัดประจุที่ 4.1 V กับ 4.2 V และคายประจุ ที่ 2.5 V กับ 3.0 V ที่ 25°C ที่ 1 A กับ 6 A โดยเซลล์ที่ใช้กระแส 1 A ใช้งานแล้ว 300 รอบ แต่เซลล์ที่ใช้กระแส 6 A ใช้งานแล้ว 3,000 รอบ.....	10
2.6 ข้อมูลของแรงดัน เปอร์เซ็นต์จำนวนประจุและกระแสอัดประจุสำหรับเซลล์ชนิด C/LiMnO ₂ และเซลล์ชนิด C/LiCoO ₂ 18650 ในการอัดประจุแบบกระแสที่แรงดันคงที่ เป็นเวลา 2.5 ชั่วโมง ด้วยกระแสสูงสุดที่ 1.4 A กับ 1.65 A และแรงดันสูงสุดที่ 4.2 V.....	11
2.7 โครงสร้างของเซลล์ชนิดลิเทียมไอออนพอลิเมอร์.....	12
2.8 แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนพอลิเมอร์ 0.57 Ah.....	12
2.9 การคายประจุของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนพอลิเมอร์ชนิด C/LiCoO ₂ ขนาด 0.120 Ah ที่ค่ากระแสคายประจุ 0.2C – 0.3C ที่อุณหภูมิ 20°C.....	13
2.10 การคายประจุแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนพอลิเมอร์ชนิด C/LiCoO ₂ ขนาด 0.120 Ah ค่ากระแสคายประจุ 1C ที่อุณหภูมิตั้งแต่ -20°C – +25°C.....	14
2.11 ค่าความจุในแต่ละจำนวนรอบการใช้งานของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนพอลิเมอร์ ชนิด C/LiCoO ₂ ขนาด 0.57 Ah.....	14
2.12 การอัดประจุแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนพอลิเมอร์ชนิด C/LiCoO ₂ ขนาด 0.120 Ah ที่ค่ากระแสอัดประจุ 0.7C 1C และ 1.3C ที่อุณหภูมิ 21°C.....	15
2.13 การอัดประจุแบบกระแสที่-แรงดันคงที่ (CCCV).....	16
2.14 โครงสร้างภายในของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว.....	17
2.15 การเกิดปฏิกิริยาภายในแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วเมื่อคายประจุ.....	18
2.16 เส้นโค้งคุณลักษณะการคายประจุของแบตเตอรี่ NP4-12.....	19

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.17 โครงสร้างทั่วไปของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำมาจากซิลิกอน.....	20
2.18 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ในอุดมคติที่ต่อกับภาระ.....	21
2.19 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์จริงที่ต่อกับภาระ.....	21
2.20 เส้นโค้งคุณลักษณะกระแส-แรงดันของแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์.....	23
2.21 ตัวอย่างเส้นโค้งคุณลักษณะกำลัง-แรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์.....	23
2.22 ผลของความเข้มแสงต่อเส้นโค้งคุณลักษณะกระแส-แรงดัน.....	24
2.23 ผลของความเข้มแสงต่อเส้นโค้งคุณลักษณะกำลัง-แรงดัน.....	25
2.24 ผลของอุณหภูมิต่อเส้นโค้งคุณลักษณะกระแส-แรงดัน.....	26
2.25 ผลของอุณหภูมิต่อเส้นโค้งคุณลักษณะกำลัง-แรงดัน.....	26
2.26 เส้นโค้งคุณลักษณะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์รุ่น STP010S-12/kb.....	27
2.27 แผนภาพวงจรทอนระดับแรงดัน.....	28
2.28 รูปสัญญาณแรงดันด้านออกของวงจรทอนระดับแรงดันเมื่อไม่มีวงจรกรอง.....	28
2.29 วงจรสมมูลของวงจรทอนระดับแรงดันเมื่อสวิตช์ปิด.....	29
2.30 วงจรสมมูลของวงจรทอนระดับแรงดันเมื่อสวิตช์เปิด.....	30
2.31 แรงดันและกระแสของตัวเหนี่ยวนำในวงจรทอนระดับแรงดันในสถานะอยู่ตัว.....	30
2.32 ความพลัวของแรงดันด้านออกในวงจรทอนระดับแรงดัน.....	32
3.1 แผนภาพกรอบแสดงส่วนประกอบของตัวควบคุมการอัดประจุ.....	34
3.2 แผนภาพวงจรของตัวควบคุมการอัดประจุ.....	35
3.3 แผนภาพวงจรภายในวงจรรวมหมายเลข TL494.....	36
3.4 แผนภาพวงจรควบคุมแรงดันและกระแสอัดประจุ.....	37
3.5 แผนภาพวงจรตัดกระแสอัดประจุ.....	39
3.6 แผนภาพวงจรไฟเลี้ยง 5 V.....	40
3.7 ส่วนประกอบของตัวควบคุมการอัดประจุ.....	43
3.8 สวิตช์ควบคุม ปุ่มปรับค่า และไฟสัญญาณของตัวควบคุมการอัดประจุ.....	44
4.1 รูปสัญญาณแรงดันและกระแสด้านออกของวงจรทอนระดับแรงดัน.....	48
4.2 ผลการทดสอบวงจรขยายไม่กลับขั้ว.....	54
4.3 ผลการทดสอบวงจรเปรียบเทียบแรงดัน.....	55

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.4 การเปลี่ยนแปลงของแรงดันในระหว่างอัดประจุแบตเตอรี่ของโทรศัพท์เคลื่อนที่ ขนาดความจุ 1,260 mAh โดยตั้งค่าแรงดันที่ 4.2 V และกระแสสูงสุดที่ 0.7 A.....	58
4.5 การเปลี่ยนแปลงของกระแสในระหว่างอัดประจุแบตเตอรี่ของโทรศัพท์เคลื่อนที่ ขนาดความจุ 1,260 mAh โดยตั้งค่าแรงดันที่ 4.2 V และกระแสสูงสุดที่ 0.7 A.....	58
4.6 การเปลี่ยนแปลงของแรงดันในระหว่างอัดประจุแบตเตอรี่ของกล้องถ่ายภาพดิจิทัล ขนาดความจุ 800 mAh โดยตั้งค่าแรงดันที่ 4.2 V และกระแสสูงสุดที่ 0.4 A.....	59
4.7 การเปลี่ยนแปลงของกระแสในระหว่างอัดประจุแบตเตอรี่ของกล้องถ่ายภาพดิจิทัล ขนาดความจุ 800 mAh โดยตั้งค่าแรงดันที่ 4.2 V และกระแสสูงสุดที่ 0.4 A.....	60
4.8 การเปลี่ยนแปลงของแรงดันในระหว่างอัดประจุแบตเตอรี่ขนาดความจุ 1,200 mAh ภายในโทรศัพท์เคลื่อนที่ โดยตั้งค่าแรงดันที่ 5 V และกระแสสูงสุดที่ 0.7 A.....	61
4.9 การเปลี่ยนแปลงของกระแสในระหว่างอัดประจุแบตเตอรี่ขนาดความจุ 1,200 mAh ภายในโทรศัพท์เคลื่อนที่ โดยตั้งค่าแรงดันที่ 5 V และกระแสสูงสุดที่ 0.7 A.....	61

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในปัจจุบันโทรศัพท์เคลื่อนที่ (Mobile phone) เป็นอุปกรณ์สื่อสารที่มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายเนื่องจากกลายเป็นสิ่งจำเป็นรวมทั้งเพื่ออำนวยความสะดวกในชีวิตประจำวันของคนส่วนใหญ่ในสังคม เทคโนโลยีของโทรศัพท์เคลื่อนที่ถูกพัฒนาให้ก้าวหน้าไปอย่างรวดเร็ว จนในปัจจุบันสามารถใช้งานโทรศัพท์เคลื่อนที่ได้หลากหลายรูปแบบ นอกจากการใช้เพื่อสื่อสารแล้วยังมีการใช้งานในรูปแบบอื่นๆ เช่น การใช้งานอินเทอร์เน็ต (Internet) การใช้สื่อหลายชนิดในคอมพิวเตอร์ หรือมัลติมีเดีย (Multimedia) รวมไปถึงการใช้งานเพื่อความบันเทิงต่างๆ จึงทำให้โทรศัพท์เคลื่อนที่ที่ถูกใช้งานอย่างต่อเนื่องเป็นเวลานาน แต่ด้วยข้อจำกัดด้านรูปลักษณะของโทรศัพท์เคลื่อนที่ในปัจจุบัน ทำให้แบตเตอรี่ (Battery) มีขนาดเล็กและบางลง ปริมาณพลังงานของแบตเตอรี่จึงมีจำกัด ส่งผลให้ระยะเวลาการใช้งานโทรศัพท์เคลื่อนที่นั้นสั้นลง ไม่สามารถตอบสนองการใช้งานได้อย่างเพียงพอ โดยเฉพาะในกรณีที่ต้องอยู่ห่างไกลจากการไฟฟ้าฯ หรือไม่สามารถใช้พลังงานจากการไฟฟ้าฯ ได้

โครงการนี้จึงได้สร้างตัวควบคุมการอัดประจุแบตเตอรี่ของโทรศัพท์เคลื่อนที่และกล้องถ่ายภาพดิจิทัล ซึ่งใช้แสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานในการอัดประจุแทนการใช้พลังงานจากการไฟฟ้าฯ ได้ โดยใช้เซลล์แสงอาทิตย์ในการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า และใช้ตัวควบคุมการอัดประจุในการลดและควบคุมแรงดันไฟฟ้าให้เหมาะสมสำหรับอัดประจุแบตเตอรี่ นอกจากนี้ยังได้ออกแบบวงจรให้สามารถใช้ได้ทั้งพลังงานจากการไฟฟ้าฯ พลังงานไฟฟ้าจากตัวจุลบุหรีในรถยนต์และพลังงานแสงอาทิตย์ เป็นแหล่งกำเนิดพลังงาน และได้ออกแบบขนาดของอุปกรณ์ที่ใช้ให้มีขนาดกะทัดรัด เพื่อให้สามารถใช้งานได้ตามวัตถุประสงค์และสะดวกแก่การพกพาไปใช้งาน

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

เพื่อออกแบบและสร้างตัวควบคุมการอัดประจุแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนและลิเทียมไอออนพอลิเมอร์ที่ต้องการแรงดันอัดประจุ 5 V ในกรณีใช้กับโทรศัพท์เคลื่อนที่ และที่ต้องการแรงดันอัดประจุ 4.2 V และ 8.4 V ในกรณีใช้กับกล้องถ่ายภาพดิจิทัล โดยสามารถอัดประจุด้วยพลังงานทั้งจากไฟฟ้าบ้าน จากแบตเตอรี่ผ่านตัวจุลบุหรีในรถยนต์ และจากแสงอาทิตย์ได้

}

- 1

1

รายละเอียด	พ.ศ. 2555							พ.ศ. 2556		
	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.
1) ศึกษาข้อมูลและคุณสมบัติของแปดเตอร์สำหรับโทรศัพท์เคลื่อนที่และกล้องถ่ายภาพดิจิทัล										
2) ศึกษาหลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์และแบตเตอรี่รถยนต์										
3) ศึกษาหลักการอัดประจุสำหรับแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนและลิเทียมไอออนพอลิเมอร์										
4) ออกแบบและสร้างตัวควบคุมการอัดประจุ										
5) ทดสอบการทำงานและปรับปรุงชิ้นงาน										
6) สรุปผลและจัดทำรูปเล่มปฏิญานินทร์										

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการ

ตัวควบคุมการอัดประจุแบตเตอรี่ที่สร้างขึ้น สามารถนำไปใช้ในการอัดประจุแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนและลิเทียมไอออนพอลิเมอร์ของโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่ต้องการแรงดันอัดประจุ 5 V และกล้องถ่ายภาพดิจิทัลที่ต้องการแรงดันอัดประจุ 4.2 V และ 8.4 V สามารถปรับค่ากระแสที่ใช้ในการอัดประจุแบตเตอรี่ได้อย่างเหมาะสม ซึ่งอัดประจุได้ด้วยพลังงานทั้งจากไฟฟ้าบ้าน จากแบตเตอรี่รถยนต์ และจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ นอกจากนี้ยังสามารถพกพาไปใช้งานในสถานที่ต่างๆ ได้

1.6 งบประมาณ

1) วงจรทอนระดับแรงดัน	50 บาท
2) วงจรควบคุมแรงดันและกระแสอัดประจุ	100 บาท
3) วงจรตัดกระแสอัดประจุ	200 บาท
4) อุปกรณ์ต่อพ่วงกับขั้วต่อด้านเข้าและด้านออก	200 บาท
5) แผงเซลล์แสงอาทิตย์รุ่น STP010S-12/kb	900 บาท
6) อะแดปเตอร์ 19 V 4.74 A	200 บาท
7) ค่าถ่ายเอกสารและเข้าเล่มปริณิฎณานิพนธ์	1,000 บาท
รวมเป็นเงินทั้งสิ้น (สองพันหกร้อยห้าสิบบาทถ้วน)	<u>2,650 บาท</u>
หมายเหตุ: ถัวเฉลี่ยทุกรายการ	

บทที่ 2

แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนและหลักการอัดประจุ

การอัดประจุแบตเตอรี่ในโรงงานนี้ได้ใช้ไฟจากการไฟฟ้าฯ แบตเตอรี่รถยนต์ และแผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงาน โดยออกแบบตัวควบคุมการอัดประจุให้สามารถทำงานได้อย่างเหมาะสมสำหรับอัดประจุแบตเตอรี่โทรศัพท์เคลื่อนที่และกล้องถ่ายภาพดิจิทัลซึ่งเป็นแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนและลิเทียมไอออนพอลิเมอร์ ดังนั้นในบทนี้จึงเขียนอธิบายเนื้อหาเกี่ยวกับคุณสมบัติและหลักการอัดประจุของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนและลิเทียมไอออนพอลิเมอร์ แหล่งพลังงานสำหรับอัดประจุโดยเฉพาะหลักการทำงานของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วและเซลล์แสงอาทิตย์ รวมทั้งการแปลงผันพลังงานเพื่ออัดประจุโดยใช้วงจรทอนระดับแรงดัน

2.1 แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน

แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน (Li-ion) ประกอบด้วยเซลล์ที่ใช้สารประกอบของลิเทียมเป็นวัสดุในการสร้างขั้วบวกและขั้วลบ โดยแบตเตอรี่จะมีกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนของลิเทียม (Li^+) ระหว่างขั้วบวกและขั้วลบซึ่งเคลื่อนที่ไปมาระหว่างขั้วบวกและขั้วลบในระหว่างการอัดประจุและคายประจุของเซลล์แบตเตอรี่ โดยทั่วไปวัสดุของขั้วบวกเป็นออกไซด์ของโลหะที่มีโครงสร้างเป็นชั้น เช่น ลิเทียมโคบอลต์ออกไซด์ (LiCoO_2) หรือวัสดุที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุน เช่น ลิเทียมแมงกานีสออกไซด์ (LiMn_2O_4) และมีการสะสมกระแสไฟฟ้าที่แผ่นอะลูมิเนียมบาง โดยทั่วไปขั้วลบสร้างจากแกรไฟต์ (Graphite) หรือวัสดุที่มีโครงสร้างเป็นชั้นและมีการสะสมกระแสไฟฟ้าที่แผ่นทองแดง ในขั้นตอนการอัดประจุและการคายประจุ ไอออนของลิเทียมจะถูกแทรกหรือถูกดึงออกจากช่องว่างเล็กๆระหว่างชั้นอะตอมภายในวัสดุเนื้อสาร

แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนมีค่าพลังงานจำเพาะ (Specific energy) และค่าความหนาแน่นของพลังงาน (Energy density) สูง ทำให้แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนเหมาะสำหรับการใช้งานที่ให้ความสำคัญกับน้ำหนักหรือปริมาตร แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนมีอัตราการคายประจุเอง (Self-discharge) ต่ำ มีอายุการใช้งาน (Cycle life) ยาวนาน และช่วงอุณหภูมิของการทำงานกว้าง ทำให้มีความหลากหลายในด้านการใช้งาน ขนาดและรูปร่างซึ่งขึ้นอยู่กับผู้ผลิต โดยทั่วไปหนึ่งเซลล์ของแบตเตอรี่ชนิดนี้มีค่าแรงดันใช้งานอยู่ในช่วง 2.5-4.2 V ซึ่งมากกว่าประมาณสามเท่าของแรงดันที่ได้จากแบตเตอรี่นิกเกิลแคดเมียม (NiCd) หรือนิกเกิลเมทัลไฮไดรด์ (NiMH)

อย่างไรก็ตาม ข้อเสียของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน คือการเสื่อมสภาพลงเมื่อใช้งานจนแรงดันต่ำกว่า 2 V และปล่อยประจุออกเมื่อเกิดการอัดประจุเกิน (Overcharge) ซึ่งแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนไม่มีกลไกทางเคมีในการจัดการกับการอัดประจุเกินซึ่งแตกต่างจากคุณสมบัติทางเคมีของแบตเตอรี่ชนิดน้ำ โดยทั่วไปแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนจึงต้องมีวงจรและอุปกรณ์ตัดการเชื่อมต่อทางกลเพื่อป้องกันการเกิดการคายประจุเกิน (Deep discharge) และการอัดประจุเกิน รวมทั้งสถานะอุณหภูมิสูงเกิน แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนจะมีการสูญเสียความสามารถอย่างถาวรที่อุณหภูมิสูง (65°C) แม้ว่าอัตราคายประจุต่ำกว่ามากเมื่อเทียบกับแบตเตอรี่ชนิดนิกเกิลแคดเมียมหรือนิกเกิลเมทัลไฮไดรด์ [1] ข้อดีและข้อเสียของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนได้สรุปไว้ในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ข้อดีและข้อเสียของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน [1]

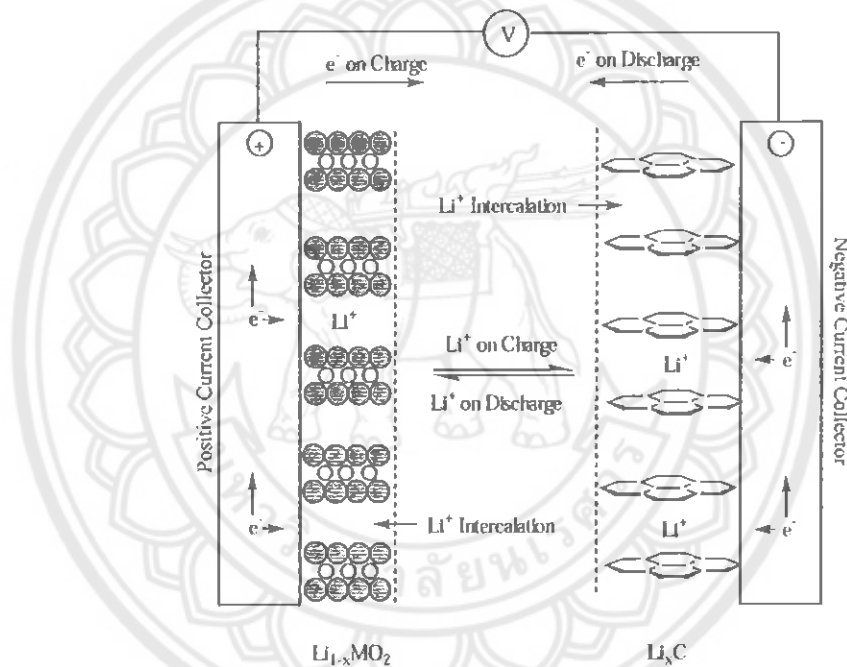
ข้อดี	ข้อเสีย
1) เซลล์ปิดผนึกไม่จำเป็นต้องมีการบำรุงรักษา	1) ราคาค่อนข้างแพง
2) อายุการใช้งานนาน	2) เสื่อมลงเมื่อใช้งานที่อุณหภูมิสูง
3) ช่วงอุณหภูมิของการทำงานกว้าง	3) ต้องการวงจรป้องกัน
4) มีอายุการเก็บรักษาได้นาน	4) สูญเสียความจุหรือเกิดความร้อนออกมาเมื่อมีการอัดประจุเกิน
5) อัตราการคายประจุเองต่ำ	5) เมื่อเกิดความเสียหายจะมีการปล่อยประจุและความร้อนออกมา
6) สามารถอัดประจุได้อย่างรวดเร็ว	6) การออกแบบรูปทรงกระบอกจะมีความหนาแน่นของพลังงานต่ำกว่านิกเกิลแคดเมียมหรือนิกเกิลเมทัลไฮไดรด์
7) ความสามารถในการคายประจุออกมาอัตราที่สูงและกำลังสูง	
8) ประสิทธิภาพทางประจุและพลังงานสูง	
9) พลังงานจำเพาะและความหนาแน่นของพลังงานสูง	
10) ไม่มีผลหน่วยความจำ (Memory effect)	

2.1.1 คุณสมบัติทางเคมีแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน

แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนที่ใช้สารประกอบออกไซด์ของโลหะลิเทียมเป็นวัสดุในการสร้างขั้วบวก ซึ่งได้แก่ลิเทียมโคบอลต์ออกไซด์ ลิเทียมแมงกานีสออกไซด์ และลิเทียมนิกเกิลออกไซด์ (LiNiO₂) แต่ที่นิยมใช้กันมากที่สุดคือ ลิเทียมโคบอลต์ออกไซด์เพราะให้ค่าความหนาแน่นพลังงานสูงที่สุด ส่วนขั้วลบใช้คาร์บอนที่มีความพรุนสูง เช่น แกรไฟต์เป็นส่วนประกอบ อิเล็กโทรไลต์ของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนใช้เกลือของลิเทียมหรือฟอสเฟสของลิเทียมที่ละลาย

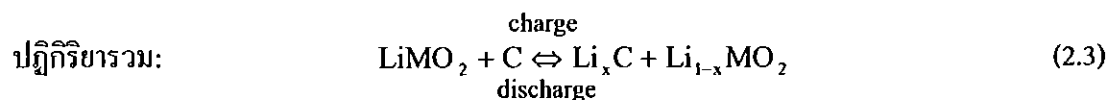
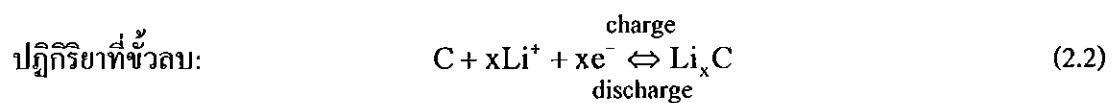
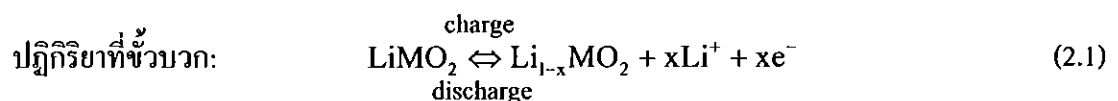
ในสารละลายอินทรีย์ ในขณะที่ตัวกั้น (Separator) นิยมทำมาจากพลาสติก เช่น โพลีโพรพิลีน (Polypropylene: PP) หรือโพลีเอทิลีน (Polyethylene: PE)

ปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาที่ย้อนกลับได้ โดยขณะที่อัดประจุ ออกไซด์ของโลหะลิเทียมที่ขั้วบวกแตกตัวให้อิออนของลิเทียมและอิเล็กตรอน (e^-) ออกมา อิออนของลิเทียมเคลื่อนที่ออกจากขั้วบวกผ่านอิเล็กโทรไลต์แล้วแทรกตัวอยู่ในชั้นของคาร์บอนที่ขั้วลบ ส่วนอิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากขั้วบวกผ่านวงจรภายนอกไปยังขั้วลบเพื่อรวมตัวกับอิออนของลิเทียม และขณะที่คายประจุจะเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับลิเทียมอิออนและอิเล็กตรอนแยกตัวออกมา อิออนของลิเทียมเคลื่อนที่ออกจากขั้วลบผ่านอิเล็กโทรไลต์ไปยังขั้วบวกและอิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากขั้วลบผ่านวงจรภายนอกไปยังขั้วบวกเพื่อรวมตัวกับอิออนของลิเทียมอีกครั้ง [1] ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 กระบวนการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีในเซลล์ของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน [1]

ปฏิกิริยาของการอัดและคายประจุในเซลล์แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน [1] มีดังนี้



2.1.2 การคายประจุของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน

คุณลักษณะในการทำงานโดยทั่วไปของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน ได้ระบุไว้ในตารางที่ 2.2 โดยทั่วไปแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนให้แรงดันสูงอยู่ในช่วง 2.5 – 4.2 V ซึ่งมากกว่าประมาณสามเท่าของแบตเตอรี่ชนิดนิกเกิลแคดเมียมหรือนิกเกิลเมทัลไฮไดรด์ โดยมีค่าพลังงานจำเพาะมากกว่า 150 Wh/Kg และค่าความหนาแน่นพลังงานมากกว่า 400 Wh/L สามารถคายประจุได้ในอัตราสูงถึง 5C อย่างต่อเนื่องหรือกระแสพัลส์ 25C มีค่าความหนาแน่นของกำลังสูงและมีอัตราการคายประจุเองต่ำนอกจากนี้ยังมีอายุการใช้งานหลายปีไม่มีผลหน่วยความจำและมีช่วงอุณหภูมิในการทำงานกว้างโดยสามารถอัดประจุในช่วงอุณหภูมิ 20°C – 60°C และคายประจุในช่วงอุณหภูมิ -40°C – 65°C [1]

หมายเหตุ: ค่า C คือ จำนวนเท่าของความจุแบตเตอรี่ เช่น ถ้าแบตเตอรี่มีความจุ 650 mAh กระแส 1C มีค่าเท่ากับ $1 \times 650 = 650$ mA ในขณะที่กระแส 0.8 C มีค่าเท่ากับ $0.8 \times 650 = 520$ mA

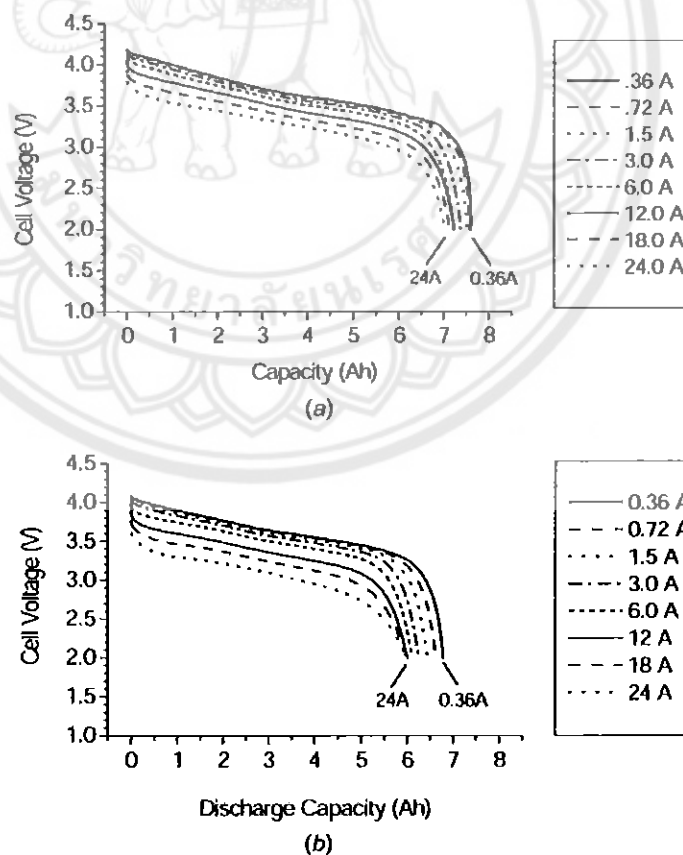
ตารางที่ 2.2 คุณลักษณะการทำงานโดยทั่วไปของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน [1]

คุณลักษณะ	สมรรถนะ
แรงดันของเซลล์ที่ใช้งาน	2.5 V – 4.2 V
ค่าพลังงานจำเพาะ	100 – 158 Wh/kg
ค่าความหนาแน่นของพลังงาน	245 – 430 Wh/L
ความสามารถในการคายประจุ	ใช้งานปกติได้ 1C, สูงสุดได้ 5C
ความสามารถในการจ่ายกระแสพัลส์ (Pulse rate capability)	สูงถึง 25C
อายุการใช้งานที่ 100% ของความลึกของการคายประจุ (Depth of discharge: DoD)	โดยทั่วไป 3,000 รอบการอัดประจุ
อายุการใช้งานที่ 20% – 40% ของความลึกของการคายประจุ	มากกว่า 20,000 รอบการอัดประจุ
อายุการใช้งาน	มากกว่า 5 ปี
อัตราการคายประจุเอง	2% – 10% ต่อเดือน
ช่วงอุณหภูมิในการทำงาน	-40°C – 65°C
ผลหน่วยความจำ (Memory effect)	ไม่มี
ค่าความหนาแน่นของกำลัง (Power density)	2,000 – 3,000 W/L
ค่ากำลังเฉพาะ (Specific power)	700 – 1,300 W/Kg

2.1.3 การอัดประจุของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน

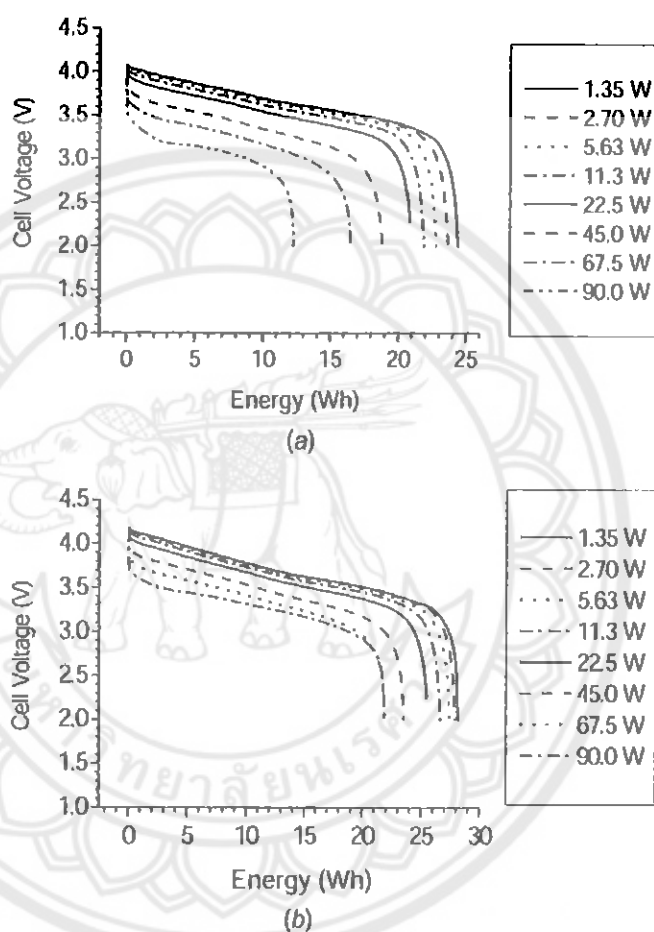
โดยทั่วไปการอัดประจุเซลล์ของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนนิยมใช้หลักการอัดประจุแบบกระแสคงที่ (Constant current: CC) หรือกระแสคงที่-แรงดันคงที่ (Constant current-constant voltage: CCCV) โดยใช้วงจรควบคุมการอัดประจุแบตเตอรี่ที่อัตราการอัดประจุต่ำ (0.2C) การอัดประจุแบบกระแสคงที่ให้ผลเดียวกันกับการอัดประจุแบบกระแสคงที่-แรงดันคงที่ เมื่อแรงดันของเซลล์มีค่าเท่ากับพิกัดแรงดันแสดงว่าเซลล์ถูกอัดประจุจนเต็ม

โดยทั่วไปแรงดันที่ใช้สำหรับอัดประจุเซลล์ชนิดลิเทียมไอออนอยู่ที่ 4.1 V หรือ 4.2 V ขณะที่เซลล์ชนิดลิเทียมโคบอลต์ออกไซด์สามารถใช้ได้กับทั้งสองแรงดัน แรงดันสิ้นสุดการอัดประจุส่งผลต่อสมรรถนะของเซลล์ชนิดลิเทียมนิกเกิลโคบอลต์ออกไซด์ ($\text{LiNi}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_2$) เมื่ออัดประจุเซลล์ที่ 4.2 V โดยวัสดุขั้วบวกสามารถให้ความจุสูงขึ้น แต่อายุการใช้งานและเสถียรภาพในการสะสมพลังงานลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมโคบอลต์ออกไซด์ที่อัดประจุด้วยแรงดัน 4.1 V ความจุของเซลล์คาร์บอนลิเทียมนิกเกิลโคบอลต์ออกไซด์ที่อัดประจุด้วยแรงดัน 4.1 V และ 4.2 V สำหรับการคายประจุแบบกระแสคงที่แสดงในรูปที่ 2.2



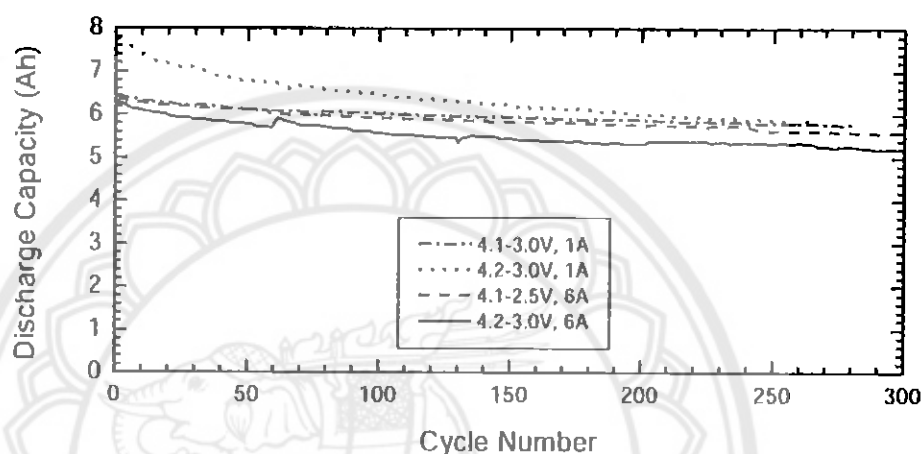
รูปที่ 2.2 การเปรียบเทียบแรงดันกับความสามารถสำหรับเซลล์ INCP 61/16/78 7 Ah เมื่อคายประจุด้วยกระแสคงที่ ที่ 25°C หลังจากการอัดประจุ (a) 4.1 V (b) 4.2 V ที่กระแส 1 A [1]

ความสามารถในการจ่ายพลังงานในช่วงการคายประจุด้วยกระแสที่แสดงในรูปที่ 2.3 จะเห็นว่าที่อัตราการอัดประจุต่ำ (0.1C) เซลล์ที่ถูกอัดประจุด้วยแรงดัน 4.2 V จ่ายพลังงานได้มากกว่าเซลล์ที่อัดประจุด้วยแรงดัน 4.1 V ประมาณ 14% และที่อัตราการอัดประจุสูง (2C) สามารถให้พลังงานมากกว่า 18% อย่างไรก็ตาม เมื่อใช้แรงดันการอัดประจุสูงขึ้น ทำให้เซลล์จ่ายพลังงานได้มากขึ้น แต่ส่งผลให้การเสื่อมสภาพของเซลล์สูงขึ้นเช่นกัน

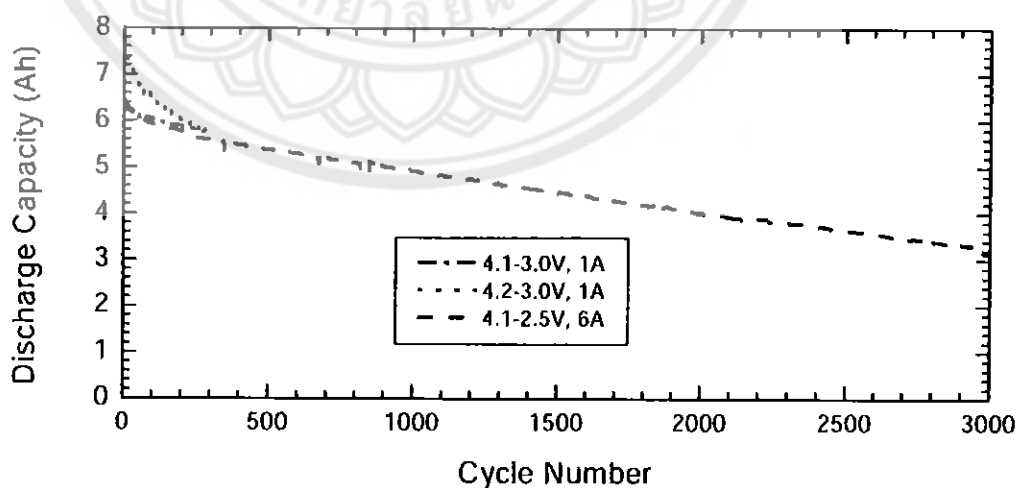


รูปที่ 2.3 การเปรียบเทียบแรงดันกับพลังงานสำหรับเซลล์ INCP 61/16/78 7 Ah เมื่อคายประจุด้วยกระแสที่ 25°C หลังจากการอัดประจุ (a) 4.1 V (b) 4.2 V ที่กระแส 1 A [1]

ความจุของเซลล์เมื่อคายประจุที่กระแสดังที่แสดงในรูปที่ 2.4 และรูปที่ 2.5 จะพบว่า ถึงแม้อัตราการเสื่อมสภาพของเซลล์ที่ถูกอัดประจุด้วยแรงดัน 4.2 V มีค่าสูงกว่าในช่วงการใช้งาน 300 รอบ ข้อมูลที่แสดงนี้บอกถึงสมรรถนะของเซลล์ชนิดลิเทียมไอออนที่ใช้อัตราการอัดประจุสูง (6 A) หรืออัตราการอัดประจุต่ำ (1 A) เซลล์ที่ใช้อัตราการอัดประจุต่ำจะให้พลังงานสูงกว่า อย่างไรก็ตาม ความแตกต่างนี้ลดลงหลังจากใช้งาน 300 รอบ เพราะอัตราการเสื่อมสภาพของเซลล์มีค่าใกล้เคียงกัน

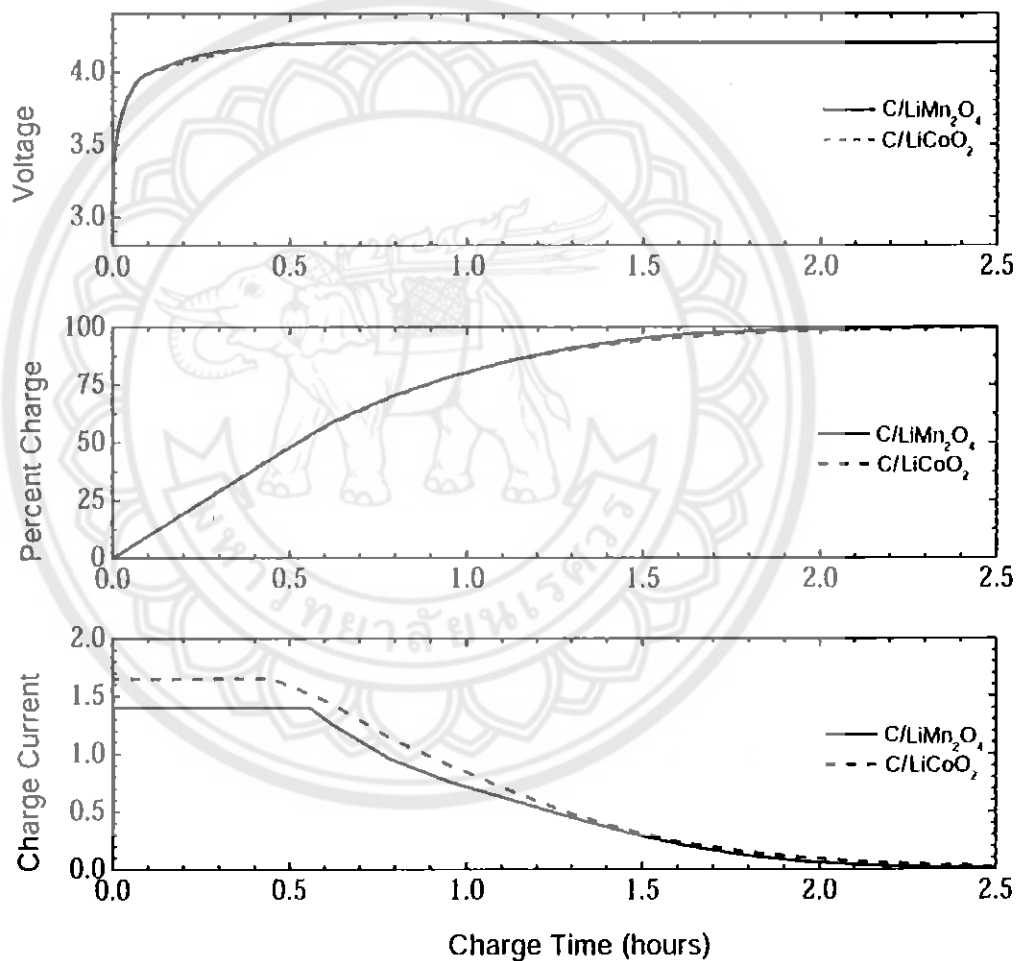


รูปที่ 2.4 ความจุของเซลล์ INCP 160/61/78 เมื่อใช้งานครบรอบด้วยกระแสที่ 1 A และ 6 A สำหรับการอัดประจุระหว่าง 4.1 V กับ 4.2 V และการคายประจุระหว่าง 2.5 V กับ 3.0 V ที่ 25°C [1]



รูปที่ 2.5 ความจุของเซลล์ INCP 160/61/78 เมื่ออัดประจุที่ 4.1 V กับ 4.2 V และคายประจุที่ 2.5 V กับ 3.0 V ที่ 25°C ที่ 1 A กับ 6 A โดยเซลล์ที่ใช้กระแส 1 A ใช้งานแล้ว 300 รอบ แต่เซลล์ที่ใช้กระแส 6 A ใช้งานแล้ว 3,000 รอบ [1]

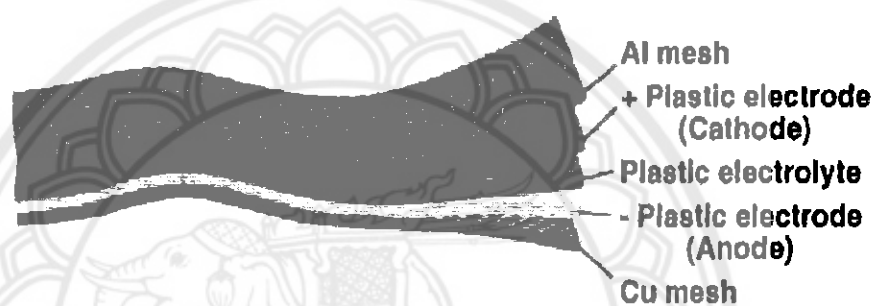
รูปที่ 2.6 แสดงข้อมูลของแรงดัน เฟอร์เซ็นต์จำนวนประจุ และกระแสสำหรับการอัดประจุแบบกระแสดังที่-แรงดันคงที่ของเซลล์คาร์บอนลิเทียมแมงกานีสออกไซด์ 18650 ที่ 1.4 A โดยจำกัดแรงดันอัดประจุที่ 4.2 V และเซลล์คาร์บอนลิเทียมโคบอลต์ออกไซด์ที่ 1.65 A และ 4.2 V ในขณะที่เซลล์ถูกอัดประจุในช่วงกระแสดังที่ จำนวนประจุเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นจนกระทั่งขณะแรงดันเซลล์เข้าใกล้ 4.2 V ในการอัดประจุช่วงแรงดันคงที่ กระแสมีค่าลดลงจนกระทั่งเซลล์ถูกอัดประจุจนเต็ม เซลล์ชนิดลิเทียมไอออนมีประสิทธิภาพทางด้านประจุสูง (99.9%) และมีประสิทธิภาพทางด้านพลังงานสูง (95 – 98%) เพราะในปฏิกิริยาเคมีของเซลล์ไม่มีกระบวนการสร้างแก๊สดังที่พบในเซลล์ที่มีน้ำ



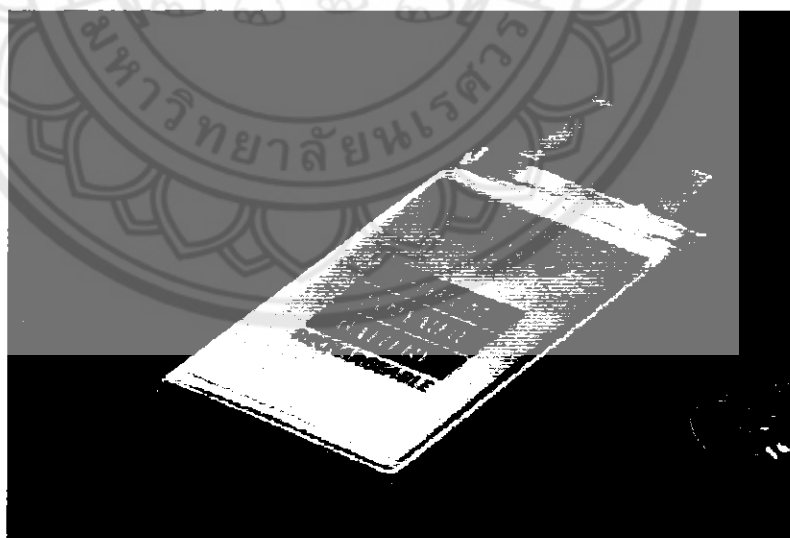
รูปที่ 2.6 ข้อมูลแรงดัน เฟอร์เซ็นต์จำนวนประจุ และกระแสอัดประจุ สำหรับเซลล์ชนิด C/LiMn₂O₄ และเซลล์ชนิด C/LiCoO₂ 18650 ในการอัดประจุแบบกระแสดังที่-แรงดันคงที่เป็นเวลา 2.5 ชั่วโมง ด้วยกระแสสูงสุดที่ 1.4 A กับ 1.65 A และแรงดันสูงสุดที่ 4.2 V [1]

2.2 แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนพอลิเมอร์

แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนพอลิเมอร์มีค่าพลังงานจำเพาะและความหนาแน่นของพลังงานสูง นิยมประยุกต์ใช้งานในอุปกรณ์สื่อสารชนิดพกพาได้และอุปกรณ์คอมพิวเตอร์ที่ต้องการความบาง เซลล์ชนิดลิเทียมไอออนพอลิเมอร์ใช้วัสดุเนื้อสารเหมือนกับเซลล์ชนิดลิเทียมไอออน ขั้วบวกและขั้วลบภายในเซลล์มีลักษณะแบนเรียบและติดกันเพื่อให้สามารถสร้างเซลล์ที่บางได้และบรรจุในฟิล์มกันดังรูปที่ 2.7 ซึ่งต่างจากการใช้เหล็กหรืออะลูมิเนียมในเซลล์ชนิดลิเทียมไอออน ที่แสดงชั้นต่างๆภายในโครงสร้าง ตัวอย่างผลิตภัณฑ์แบตเตอรี่ชนิดนี้แสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.7 โครงสร้างของเซลล์ชนิดลิเทียมไอออนพอลิเมอร์ [1]



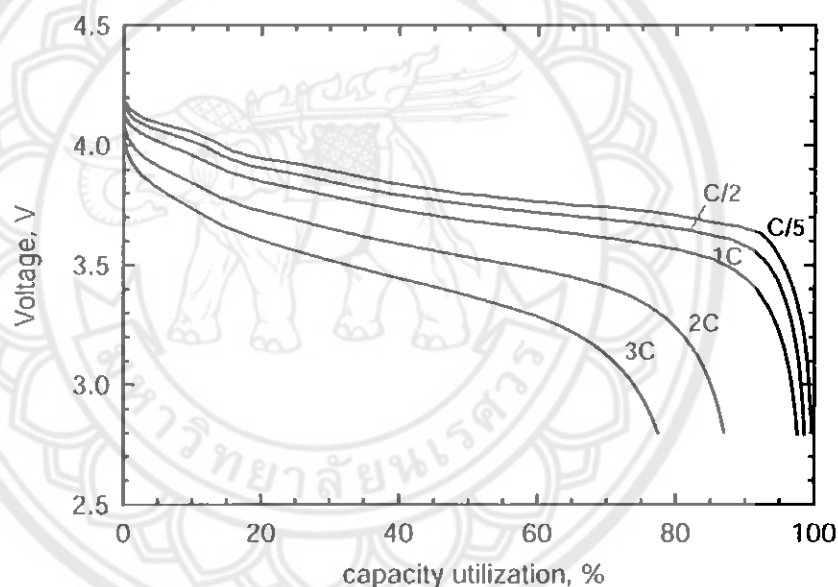
รูปที่ 2.8 แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนพอลิเมอร์ 0.57 Ah [1]

ปัจจุบันเทคโนโลยีของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนพอลิเมอร์ทำให้ได้ค่าพลังงานจำเพาะและความหนาแน่นของพลังงานค่อนข้างสูงกว่าชนิดลิเทียมไอออนชนิดอิเล็กทรอนิกส์เหลว แต่คุณสมบัติด้านไฟฟ้าเคมี ปริมาตร และสัดส่วนน้ำหนักของส่วนประกอบต่างๆในเทคโนโลยี

สองอย่างนั้นยังคงเดิม ซึ่งอาจเหมาะสำหรับใช้งานในอวกาศมากขึ้นเพราะใช้วัสดุห่อหุ้มเบาและบางกว่าที่ใช้ในแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไฮดรอกไซด์

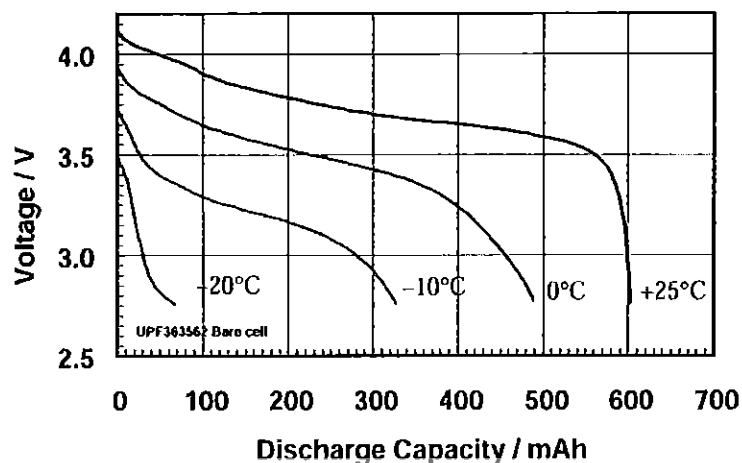
2.2.1 การคายประจุของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไฮดรอกไซด์

ความสามารถในการคายประจุของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไฮดรอกไซด์ชนิด $C/LiCoO_2$ แสดงในรูปที่ 2.9 จากรูปจะเห็นได้ว่าการคายประจุที่ค่ากระแส 1C ได้พลังงาน 95% และค่าแรงดันเฉลี่ยที่ 3.8 V การคายประจุที่ค่า 2C ได้พลังงาน 87% และค่าแรงดันเฉลี่ยที่ 3.55 V ส่วนการคายประจุที่ค่า 3C ได้ค่าพลังงานเพียง 77% และค่าแรงดันเฉลี่ยที่ 3.45 V จากรูปจะเห็นว่าการคายประจุที่กระแสสูงทำให้ได้ค่าพลังงานและแรงดันเฉลี่ยขณะคายประจุน้อยลง โดยทั่วไปแบตเตอรี่สามารถให้พลังงานได้มากกว่า 80% ของค่าที่กักเก็บไว้ที่กระแสคายประจุน้อยกว่า 2C



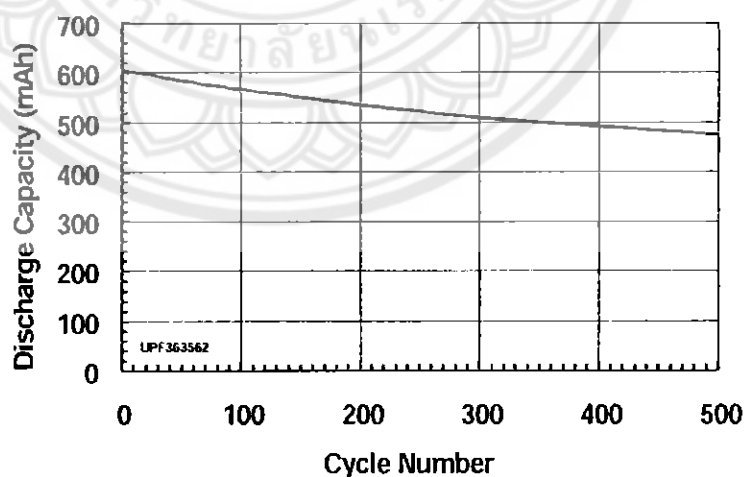
รูปที่ 2.9 การคายประจุของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไฮดรอกไซด์ชนิด $C/LiCoO_2$ ขนาด 0.120 Ah ที่ค่ากระแสคายประจุ 0.2 – 3C ที่อุณหภูมิ 21°C [1]

คุณลักษณะของการคายประจุของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิค่าแสดงในรูปที่ 2.10 ซึ่งเป็นการทดสอบการคายประจุของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไฮดรอกไซด์ชนิด $C/LiCoO_2$ ขนาด 0.57 Ah ที่กระแสคายประจุ 1C และระดับอุณหภูมิตั้งแต่ -20°C – +25°C จากรูปจะเห็นได้ว่าแบตเตอรี่ให้พลังงานได้น้อยลงถ้าถูกใช้งานที่อุณหภูมิค่า โดยสามารถให้พลังงานได้เพียง 58% ที่อุณหภูมิ -10°C



รูปที่ 2.10 การคายประจุแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนพอลิเมอร์ชนิด C/LiCoO₂ ขนาด 0.120 Ah ค่ากระแสคายประจุ 1C ที่อุณหภูมิตั้งแต่ -20°C – +25°C [1]

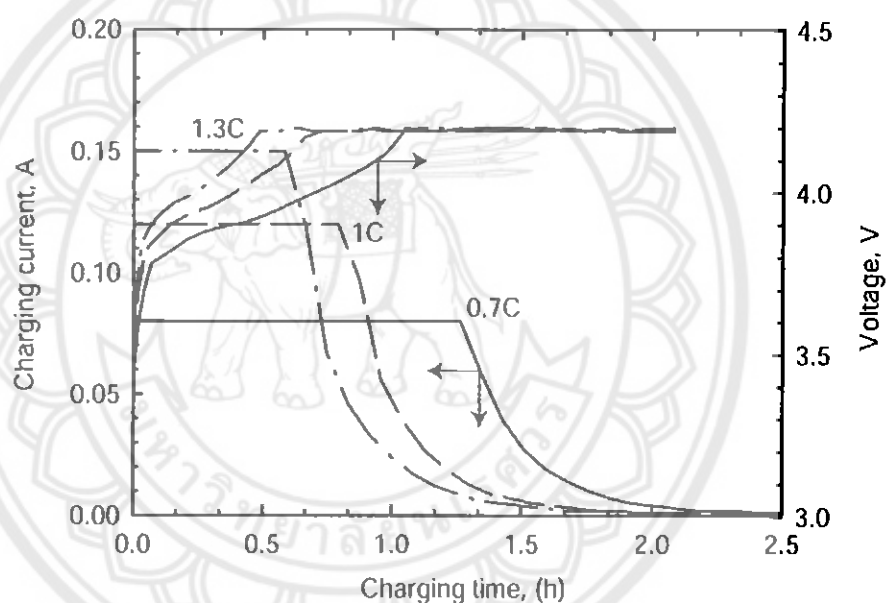
สมรรถนะด้านจำนวนรอบการใช้งานของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนพอลิเมอร์ชนิด C/LiCoO₂ ขนาด 0.57 Ah แสดงในรูปที่ 2.11 ซึ่งทดสอบโดยอัดประจุด้วยวิธี CCCV ที่แรงดัน 4.2 V ค่ากระแสอัดประจุ 1C และคายประจุที่ค่า 1C จนแรงดันของแบตเตอรี่มีค่าต่ำกว่า 2.57 V จึงหยุดการคายประจุ จากรูปจะเห็นได้ว่าค่าความจุของแบตเตอรี่ลดลงเพียงเล็กน้อยถึงแม้ว่ามีจำนวนรอบการใช้งานที่สูง จึงทำให้แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนพอลิเมอร์เป็นแบตเตอรี่ที่มีอายุการใช้งานยาวนาน [1]



รูปที่ 2.11 ค่าความจุในแต่ละจำนวนรอบการใช้งานของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนพอลิเมอร์ชนิด C/LiCoO₂ ขนาด 0.57 Ah [1]

2.2.2 การอัดประจุของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนพอลิเมอร์

แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนพอลิเมอร์ชนิด $C/LiCoO_2$ สามารถอัดประจุโดยวิธีใช้กระแสคงที่หรือกระแสคงที่-แรงดันคงที่ กระแสและแรงดันอัดประจุสำหรับแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนพอลิเมอร์ขนาด 0.012 Ah ที่กระแสอัดประจุ 0.7C 1C และ 1.3C แสดงในรูปที่ 2.12 ในแต่ละกรณีแบตเตอรี่ถูกอัดประจุด้วยกระแสคงที่จนมีแรงดันถึงค่าพักที่ 4.2 V หลังจากนั้นจึงอัดประจุด้วยแรงดันคงที่จนกระแสอัดประจุมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ จึงถือว่าแบตเตอรี่เต็ม จากรูปจะเห็นได้ว่าการอัดประจุแบตเตอรี่ที่กระแสสูงไม่ได้ช่วยให้แบตเตอรี่เต็มเร็ว เพียงแต่ช่วยให้ในช่วงแรกแรงดันของแบตเตอรี่เพิ่มสูงถึงค่าพักได้เร็วขึ้นเท่านั้น จากทั้ง 3 กราฟจะเห็นได้ว่าเวลาที่ใช้ในการอัดประจุให้เต็มนั้นมีค่าใกล้เคียงกัน



รูปที่ 2.12 การอัดประจุแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนพอลิเมอร์ชนิด $C/LiCoO_2$ ขนาด 0.012 Ah ที่ค่ากระแสอัดประจุ 0.7C 1C และ 1.3C ที่อุณหภูมิ 21°C [1]

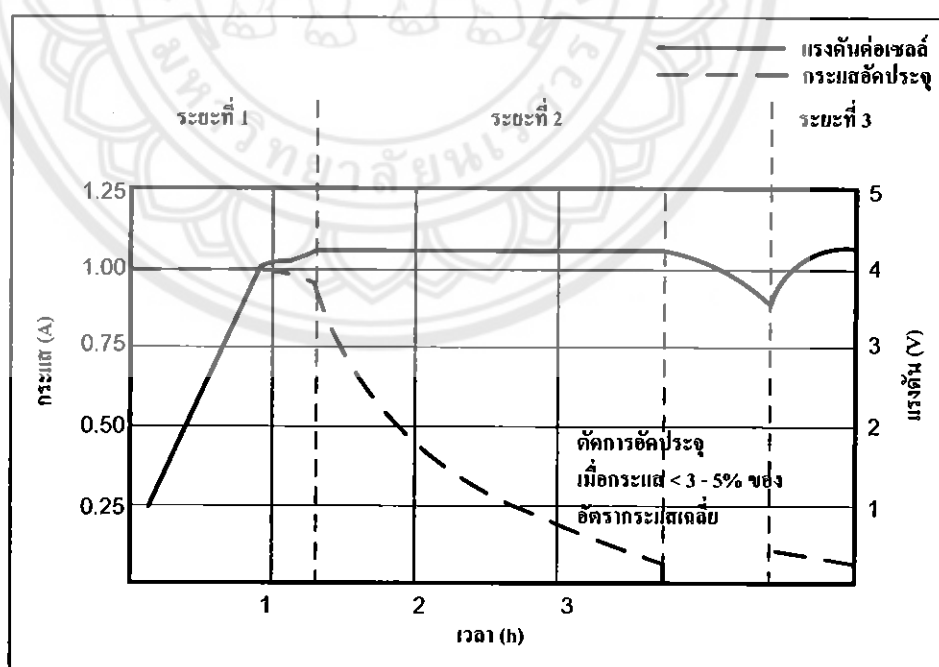
2.3 หลักการอัดประจุแบบเตอรีชนิดลิเทียมไอออนและลิเทียมไอออนพอลิเมอร์

เซลล์ชนิดลิเทียมไอออนส่วนใหญ่ถูกอัดประจุที่แรงดัน $4.2 \text{ V} \pm 0.05 \text{ V}$ (วงจรควบคุมการอัดประจุ จะตัดวงจรที่ 4.3 V หรือหากอุณหภูมิขึ้นถึง 90°C) กระบวนการอัดประจุแบ่งออกเป็น 3 ระยะดังนี้

ระยะที่ 1: การอัดประจุด้วยกระแสคงที่ โดยจำกัดค่ากระแสสูงสุด จนเซลล์มีแรงดันสูงถึงค่าที่กำหนดไว้ ซึ่งกระแสอัดประจุที่เหมาะสมไม่ควรเกิน 1 เท่าของค่าความจุแบตเตอรี่ (1C)

ระยะที่ 2: การอัดประจุด้วยแรงดันคงที่ เพื่อให้แรงดันของแต่ละเซลล์ในแบตเตอรี่มีค่าสูงถึงระดับแรงดันสูงสุด ในช่วงนี้กระแสอัดประจุมีค่าลดลงซึ่งแสดงด้วยเส้นประในรูปที่ 2.13 จนกระทั่งเข้าสู่สภาวะอัดประจุเต็มเมื่อกระแสอัดประจุมีค่าต่ำกว่า 3 – 5% ของอัตรากระแสเฉลี่ยแล้วจึงตัดวงจรการอัดประจุ

ระยะที่ 3: การอัดประจุแบบเติมเต็มเป็นครั้งคราว (Occasional topping charge) หลังจากที่มีแรงดันแบตเตอรี่ลดลงหลังจากตัดวงจรการอัดประจุแล้ว เพื่อรักษาแรงดันของแบตเตอรี่ให้เต็มอยู่ตลอดเวลาด้วยการเติมประจุประมาณ 1 ครั้งทุก 500 ชั่วโมง [2]



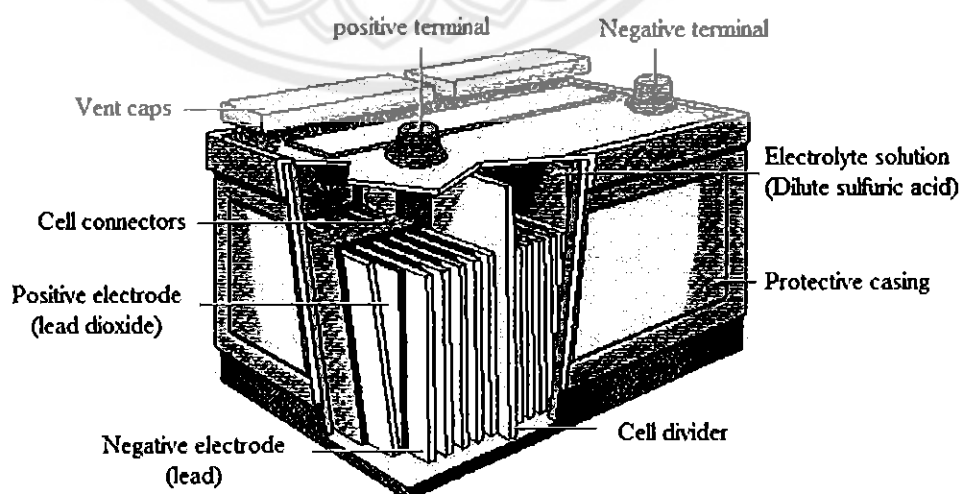
รูปที่ 2.13 การอัดประจุแบบกระแสคงที่-แรงดันคงที่ (CCCV) [2]

2.4 แหล่งจ่ายพลังงานที่ให้ค่าแรงดันไฟฟ้าไม่คงที่

ในโครงการนี้ได้ออกแบบให้ตัวควบคุมการอัดประจุสามารถเชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายพลังงาน 3 ประเภท คือ ไฟกระแสสลับขนาดแรงดัน 220 V ความถี่ 50 Hz จากการไฟฟ้า ไฟกระแสตรงจากแบตเตอรี่รถยนต์ขนาดแรงดัน 12 V และไฟกระแสตรงจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ไฟกระแสสลับที่ได้จากการไฟฟ้า หรือไฟบ้าน ถือได้ว่าเป็นแหล่งจ่ายพลังงานที่ให้แรงดันคงที่ ในที่นี้ไฟบ้านจะถูกแปลงด้วยอะแดปเตอร์ให้เป็นไฟกระแสตรงขนาด 19 V ก่อนป้อนให้กับตัวควบคุมการอัดประจุ อย่างไรก็ตาม แบตเตอรี่รถยนต์และแผงเซลล์แสงอาทิตย์ถือว่าเป็นแหล่งจ่ายพลังงานที่ให้แรงดันไม่คงที่ โดยขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการใช้งานรวมถึงชนิดและขนาดของโหลด ดังนั้นผู้ดำเนินโครงการจึงศึกษาหลักการทำงานของแหล่งจ่ายพลังงานทั้งสอง ซึ่งจะได้กล่าวต่อไป

2.4.1 แบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว (Lead-acid batteries)

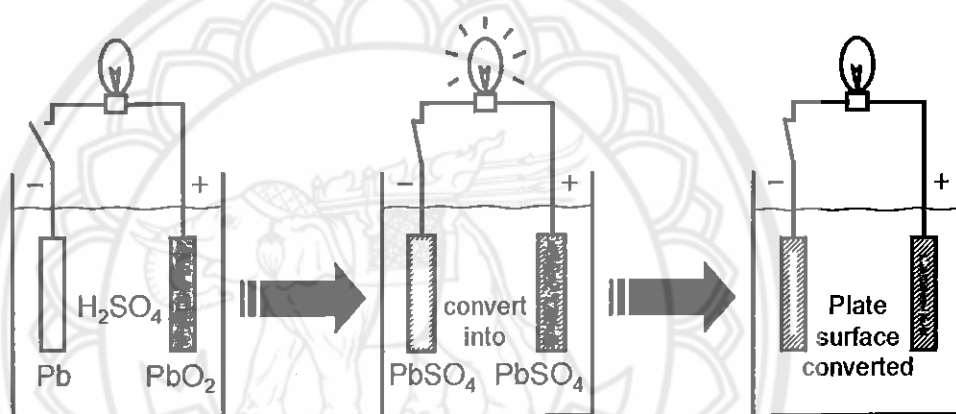
แบตเตอรี่ที่ใช้รถยนต์เป็นแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว ซึ่งมีส่วนประกอบแสดงได้ดังรูปที่ 2.14 แผ่นธาตุ (Plates) ในแบตเตอรี่มี 2 ชนิดคือแผ่นบวกและแผ่นลบ แผ่นธาตุบวกทำจากตะกั่วออกไซด์ (PbO_2) และแผ่นธาตุลบทำจากตะกั่ว (Pb) วางเรียงสลับกันและกันไม่ให้แตะกันด้วยแผ่นกั้น (Separators) ซึ่งมีลักษณะเป็นรูพรุนเพื่อให้น้ำกรดหรือน้ำหรือน้ำยาอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) สามารถไหลถ่ายเทไปมาได้ และมีขนาดความกว้างยาวเท่ากับแผ่นธาตุบวกและแผ่นลบ น้ำยาอิเล็กโทรไลต์ในแบตเตอรี่เป็นน้ำกรดกำมะถันเจือจางประกอบด้วยกรดกำมะถัน (H_2SO_4) ประมาณ 38% ความถ่วงจำเพาะของน้ำกรดมีค่า 1.26 – 1.28 ที่อุณหภูมิ $20^{\circ}C$



รูปที่ 2.14 โครงสร้างภายในของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว
ที่มา: สามิตสาร ปีที่ 5 ฉบับที่ 5, กรมสรรพสามิต, 2542

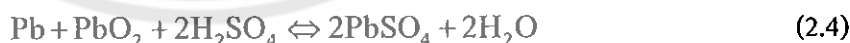
เซลล์ (Cell) ในแบตเตอรี่คือช่องที่บรรจุแผ่นธาตุบวกและธาตุลบซึ่งวางสลับกันและกันด้วยแผ่นกั้นแล้วจุ่มลงในกรด โดยทั่วไปแบตเตอรี่จะสร้างให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้า 2 V ต่อเซลล์ ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่แต่ละลูกจึงขึ้นอยู่กับจำนวนเซลล์ในแบตเตอรี่นั้นๆ เช่น แบตเตอรี่ที่มี 6 เซลล์จะให้แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย 12 V

การเปลี่ยนแปลงทางเคมีภายในแบตเตอรี่ขณะคายประจุแสดงดังรูปที่ 2.15 ถ้ากำหนดให้แบตเตอรี่มีประจุเต็ม (Fully charged condition) ก่อนต่อกับโหลด เนื้อสารที่ขั้วลบเป็นตะกั่ว ส่วนขั้วบวกเป็นตะกั่วออกไซด์ หลังจากนำโหลดมาต่อทำให้แบตเตอรี่เริ่มคายประจุโดยเนื้อสารที่ขั้วลบและขั้วบวกทำปฏิกิริยากับสารละลายอิเล็กโทรไลต์จนกลายเป็นตะกั่วซัลเฟต การคายประจุของแบตเตอรี่สิ้นสุดลงเมื่อเนื้อสารทั้งขั้วลบและขั้วบวกกลายเป็นตะกั่วซัลเฟตทั้งหมด



รูปที่ 2.15 การเกิดปฏิกิริยาภายในแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วเมื่อคายประจุ [3]

การเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่เกิดขึ้นภายในแบตเตอรี่เป็นปฏิกิริยาชนิดย้อนกลับได้ (Reversible reaction) ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังสมการเคมีต่อไปนี้



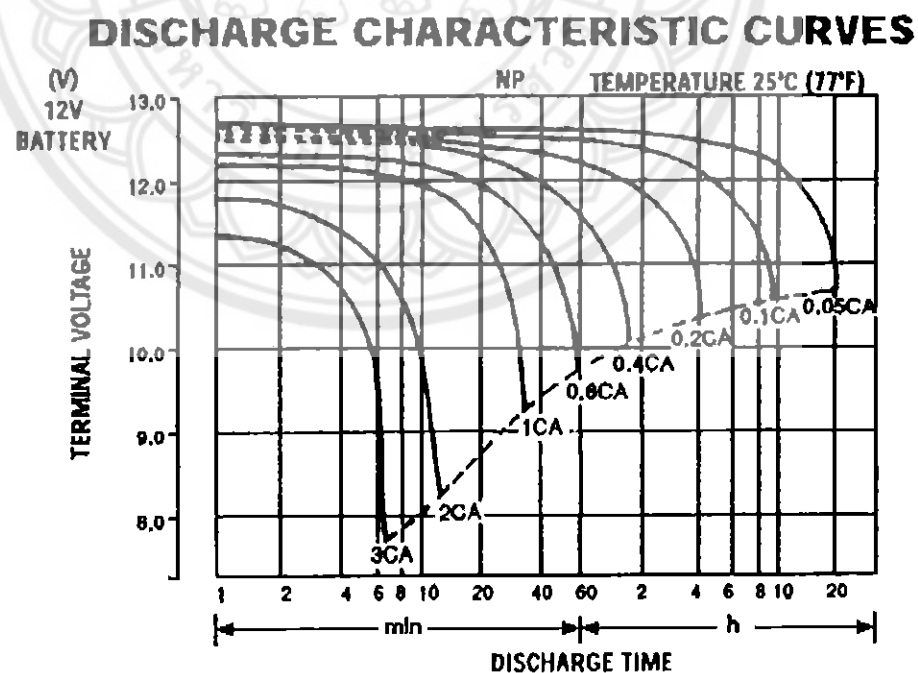
จากสมการที่ (2.4) การคายประจุจะอธิบายได้โดยการเปลี่ยนแปลงทางเคมีจากซ้ายไปขวา ในขณะที่การอัดประจุแบตเตอรี่จะอธิบายได้โดยการเปลี่ยนแปลงทางเคมีในสมการจากขวาไปซ้ายเมื่อต่อแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงเข้ากับแบตเตอรี่

อัตราการคายประจุของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วไม่ควรเกิน 0.2C หรือ 20% ของความจุ ถ้าอัตราการคายประจุมากขึ้นประสิทธิภาพของมันจะลดลง แต่อย่างไรก็ตามเราไม่ควรจะคายประจุในอัตราที่มากกว่า 1C

การใช้งานแบตเตอรี่จำเป็นต้องศึกษาปริมาณต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับแบตเตอรี่ ได้แก่

1) ความจุของแบตเตอรี่ (Battery capacity) มีหน่วยคือ “แอมแปร์-ชั่วโมง” (Ah) หรือ “วัตต์-ชั่วโมง” (Wh) ซึ่งบ่งบอกถึงพลังงานที่แบตเตอรี่จ่ายได้ เราสามารถคำนวณหาความจุของแบตเตอรี่ได้ด้วยการคายประจุของแบตเตอรี่ความจุที่ใช้งานได้จะขึ้นอยู่กับปัจจัยทางโครงสร้างซึ่งเชื่อมโยงกับการออกแบบแบตเตอรี่ ได้แก่ ปริมาณของตะกั่ว ตะกั่วออกไซด์ น้ำกรด ความหนาของแผ่นโลหะ และผิวสัมผัสของโลหะ นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับลักษณะการนำไปใช้งาน ได้แก่ อุณหภูมิ ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นความจุของแบตเตอรี่จะเพิ่มขึ้นเนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีจะสูงขึ้น แต่จะทำให้อายุการใช้งานสั้นลง ค่าพลังงานสูงสุดที่แบตเตอรี่จ่ายได้ ณ ค่ากระแส และอุณหภูมิค่าหนึ่งที่กำหนดโดยผู้ผลิต เรียกว่า พิกัดความจุ (Rated capacity หรือ Nominal capacity) ของแบตเตอรี่

2) จุดสิ้นสุดของการคายประจุ (End of discharge) คือระดับแรงดันที่เรายอมให้แบตเตอรี่คายประจุได้ก่อนจะสิ้นสุดกระบวนการคายประจุจุดสิ้นสุดของการคายประจุขึ้นอยู่กับค่ากระแสคายประจุที่กำหนดโดยผู้ผลิตดังรูปที่ 2.16 ซึ่งกราฟคุณลักษณะการคายประจุของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว NP4-12 ซึ่งค่าพิกัดความจุมีค่า 4 Ah ที่กระแส 0.2 A (0.05C) อุณหภูมิ 25°C และจุดสิ้นสุดการคายประจุที่ 10.7 V จะเห็นว่าถ้าแบตเตอรี่คายประจุที่กระแสสูงกว่า 0.2 A จุดสิ้นสุดการคายประจุจะต่ำกว่าเนื่องจากยังมีเนื้อสารที่สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำกรดต่อได้อีก แต่ค่าความจุที่ใช้งานได้จะลดลงจากค่าพิกัด [3]



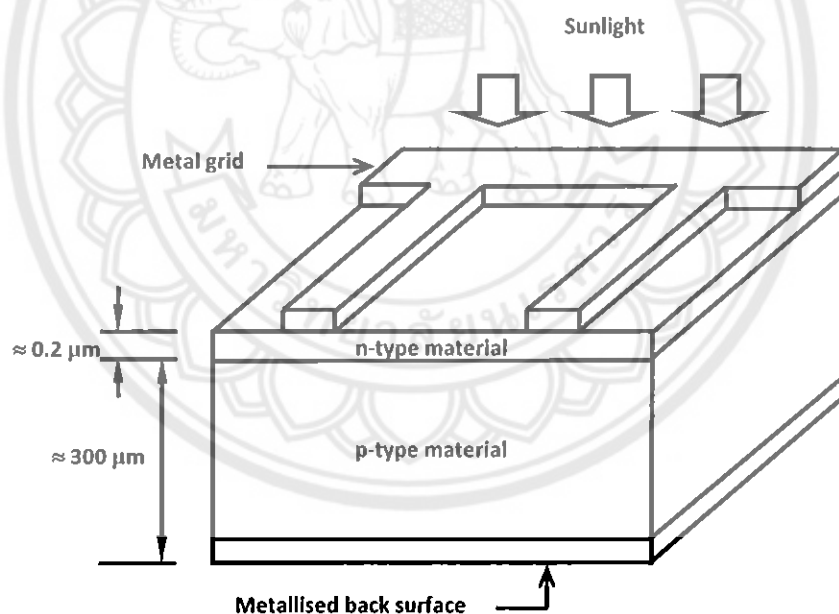
รูปที่ 2.16 เส้นโค้งคุณลักษณะการคายประจุของแบตเตอรี่ NP4-12

ที่มา: www.yuasabatteries.com

2.4.2 เซลล์แสงอาทิตย์

การเปลี่ยนพลังงานการแผ่รังสีแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรง สามารถเป็นจริงได้ด้วยปรากฏการณ์แรงดันไฟฟ้าพลังแสง (Photovoltaic effect) โดยใช้เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cells) พลังงานการแผ่รังสีถูกส่งผ่านโดยตรงไปยังอิเล็กทรอนิกส์ในเซลล์แสงอาทิตย์จากการดูดกลืนเนื่องจากปรากฏการณ์ไฟฟ้าพลังแสง (Photoelectric absorption) จะมีแรงดันไฟฟ้าเกิดขึ้นอันเป็นผลมาจากการดูดกลืนพลังงานที่มากกระตุ้นวัตถุคิบนพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์เกือบทั้งหมดที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันคือ ซิลิกอน โครงสร้างโดยทั่วไปของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำมาจากซิลิกอนถูกแสดงได้ดังรูปที่ 2.17

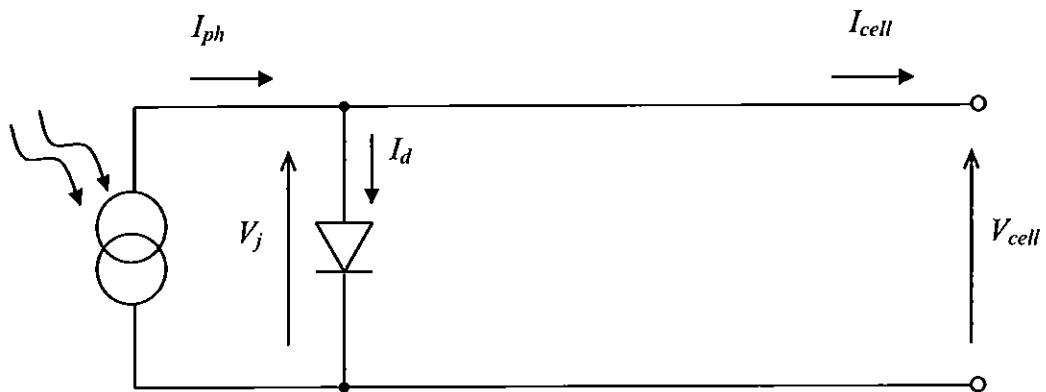
เวเฟอร์ซิลิกอนหนาประมาณ 300 μm ประกอบด้วย 2 ชั้นที่มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าแตกต่างกัน ซึ่งส่วนมากถูกเจือด้วยโบรอนและฟอสฟอรัส ผิวด้านหลังของเซลล์ทำจากโลหะทั้งหมดเพื่อรวบรวมประจุ ในขณะที่ด้านหน้าซึ่งเป็นส่วนรับแสงที่จะมาตกกระทบ จะใช้เพียงกริดโลหะ 1 ชั้น เพื่อให้แสงผ่านเข้าสู่เซลล์ได้มากที่สุด โดยปกติผิวของเซลล์จะถูกเคลือบด้วยสารต้านการสะท้อนแสง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



Source: Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems

รูปที่ 2.17 โครงสร้างทั่วไปของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำมาจากซิลิกอน [4]

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น เซลล์อาทิตย์ที่ถูกแสงจะสร้างประจุพาหะอิสระ ซึ่งทำให้เกิดกระแสไหลผ่านภาระ (Load) ที่ต่ออยู่ ปริมาณประจุพาหะอิสระที่เกิดขึ้นแปรผันตามค่าความเข้มของแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบ เช่นเดียวกับกระแสพลังแสง (I_{ph}) ซึ่งเกิดภายในเซลล์แสงอาทิตย์ ดังนั้นเซลล์แสงอาทิตย์ในอุดมคติจึงสามารถถูกแสดงด้วยวงจรสมมูลอย่างง่ายในรูปที่ 2.18

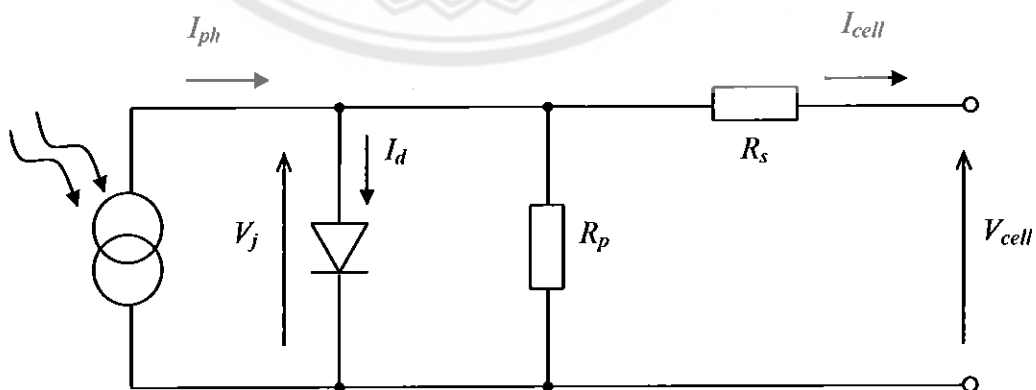


รูปที่ 2.18 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ในอุดมคติที่ต่อกับภาระ [4]

จากรูปที่ 2.18 ซึ่งประกอบด้วยไดโอดที่เกิดขึ้นจากรอยต่อพีเอ็นและแหล่งจ่ายกระแสพลังแสง ที่มีค่ากระแสขึ้นอยู่กับการแผ่รังสีของแสงอาทิตย์ ตัวต้านทานปรับค่าได้ถูกต่อเป็นภาระของเซลล์แสงอาทิตย์กระบวนการทางคณิตศาสตร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ในอุดมคติที่ถูกแสงนำไปสู่สมการต่อไปนี้

$$I_{cell} = I_{ph} - I_D = I_{ph} - I_o \cdot \left[\exp\left(\frac{qV_j}{AkT_{cell}}\right) - 1 \right] \quad (2.5)$$

ในสภาพความเป็นจริง เนื้อสารกึ่งตัวนำและหน้าสัมผัสโลหะของเซลล์แสงอาทิตย์ก่อให้เกิดค่าความต้านทานอนุกรม R_s (Parasitic series resistance) ในวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ในขณะที่กระแสรั่วรอบ ๆ ขอบของเซลล์ซึ่งเกิดจากความไม่สมบูรณ์ในผิวของเซลล์และตำหนิที่เกิดจากการเชื่อมต่อหน้าสัมผัสก่อให้เกิดค่าความต้านทานขนาน R_p (Parasitic parallel resistance) ดังแสดงในรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์จริงที่ต่อกับภาระ [4]

กระแสที่ไหลผ่านไดโอดในรูปที่ 2.19 สามารถอธิบายด้วยสมการไดโอดต่อไปนี้

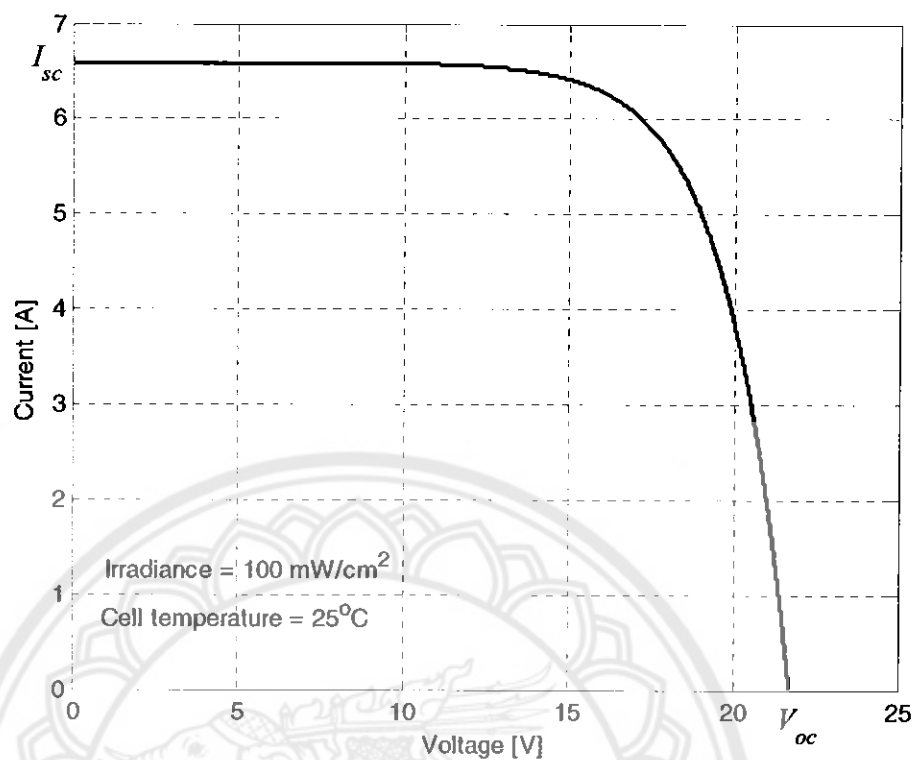
$$I_d = I_o \left[\exp\left(\frac{qV_j}{AkT_{cell}}\right) - 1 \right] \quad (2.6)$$

- โดยที่ I_o คือ กระแสอิ่มตัวย้อนกลับ (Reverse saturation current) (A)
 q คือ ประจุของอิเล็กตรอน (1.6×10^{-19} C)
 V_j คือ แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมรอยต่อพีเอ็น (V)
 k คือ ค่าคงที่ของโบลท์ซมันน์ (8.65×10^{-5} eV/K)
 T_{cell} คือ อุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ (K)
 A คือ ค่าความสมบูรณ์ของรอยต่อพีเอ็น

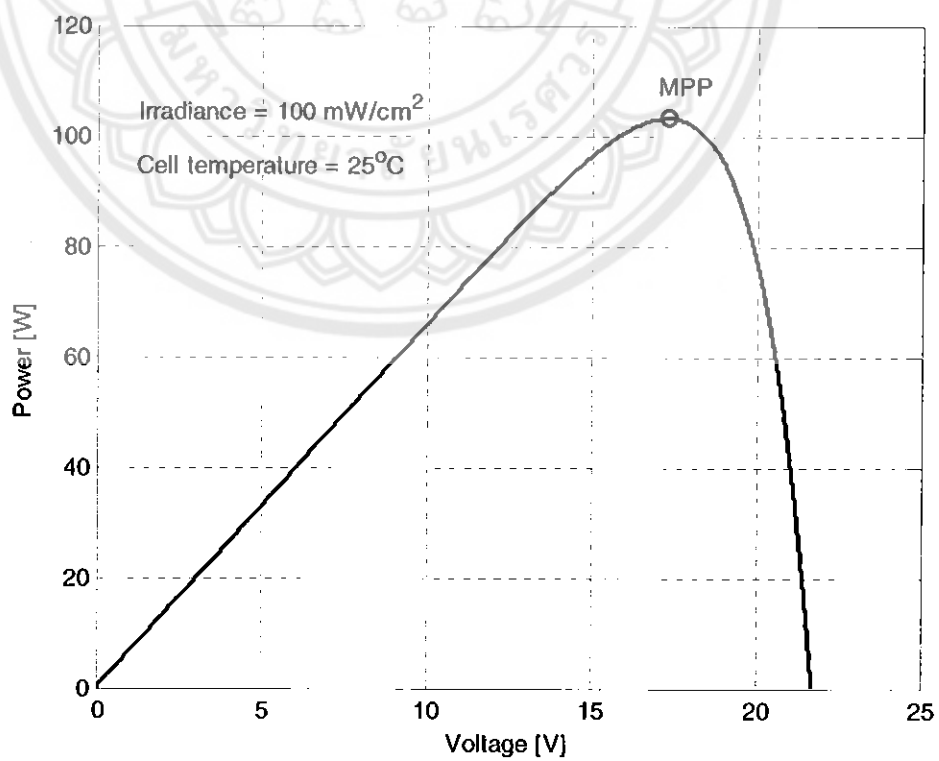
เราสามารถเขียนสมการของกระแสของเซลล์แสงอาทิตย์ I_{cell} ได้ดังนี้

$$I_{cell} = I_{ph} - I_o \cdot \left[\exp\left\{\frac{q}{AkT_{cell}}(V_{cell} + R_s I_{cell})\right\} - 1 \right] - \left(\frac{V_{cell} + R_s I_{cell}}{R_p} \right) \quad (2.7)$$

ลักษณะเส้นโค้งคุณลักษณะกระแส-แรงดันของแผงเซลล์อาทิตย์หนึ่ง ๆ สามารถแสดงดังในรูปที่ 2.20 ภายใต้สภาพอากาศหนึ่ง ๆ แผงเซลล์แสงอาทิตย์จะจ่ายกำลังด้านออกสูงสุดเมื่อทำงานที่จุดกำลังสูงสุด โดยเรากำหนดค่ากำลังไฟฟ้าของแผงได้จากผลคูณของกระแสและแรงดันของแผงจากรูปที่ 2.20 เราสามารถสร้างเส้นโค้งคุณลักษณะกำลัง-แรงดันของแผงได้ดังรูปที่ 2.21 แผงเซลล์แสงอาทิตย์สร้างกระแสสูงสุดเท่ากับค่ากระแสลัดวงจร (Short-circuit current, I_{sc}) เมื่อแรงดันของแผงมีค่าเท่ากับศูนย์ ซึ่งที่จุดนี้จะไม่มีการจ่ายกำลังด้านออกเนื่องจากผลคูณของกระแสกับแรงดันมีค่าเท่ากับศูนย์ ในทางกลับกัน ค่ากระแสด้านออกของแผงมีค่าเป็นศูนย์เมื่อแรงดันของแผงมีค่าเท่ากับแรงดันเปิดวงจร (Open-circuit voltage, V_{oc}) ทำให้กำลังด้านออกมีค่าเป็นศูนย์เช่นกัน อย่างไรก็ตามระหว่างจุดทั้งสองดังกล่าว กำลังด้านออกของแผงมีค่ามากกว่าศูนย์ โดยจุดกำลังสูงสุดถูกแสดงด้วยวงกลมเล็กในรูป



รูปที่ 2.20 เส้นโค้งคุณลักษณะกระแส-แรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์



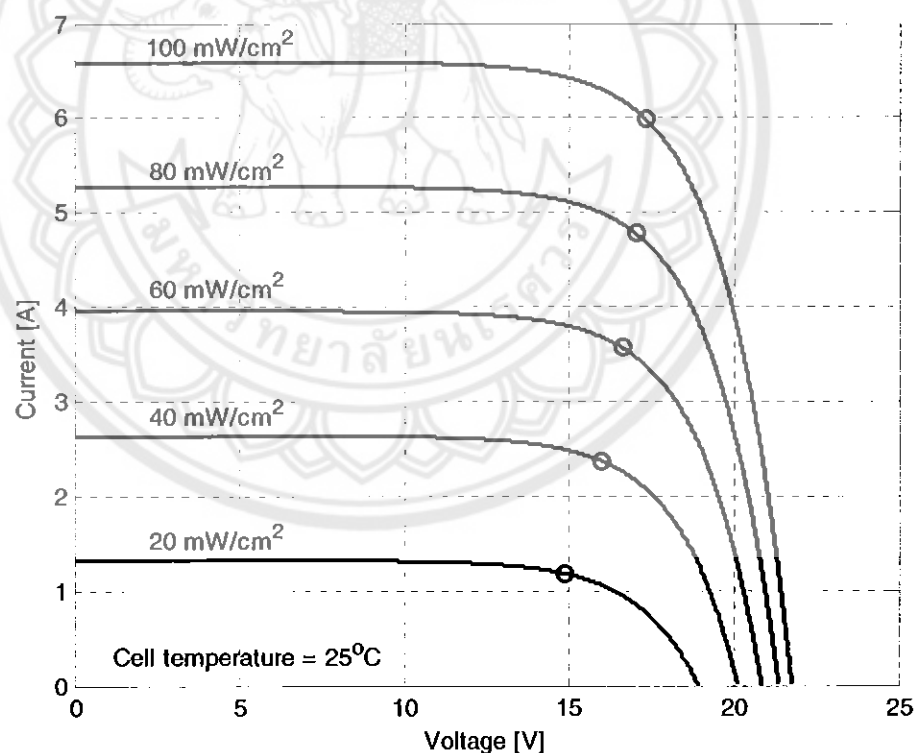
รูปที่ 2.21 ตัวอย่างเส้นโค้งคุณลักษณะกำลัง-แรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

เส้นโค้งคุณลักษณะกระแส-แรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ระดับความเข้มแสงต่าง ๆ กันแสดงได้ดังรูปที่ 2.22 กระแสพลังแสงเปลี่ยนแปลงแบบเชิงเส้นกับค่าความเข้มแสงเมื่ออุณหภูมิของเซลล์คงที่ ดังนั้นค่ากระแสลัดวงจรจึงแปรผันตรงกับค่าความเข้มแสง

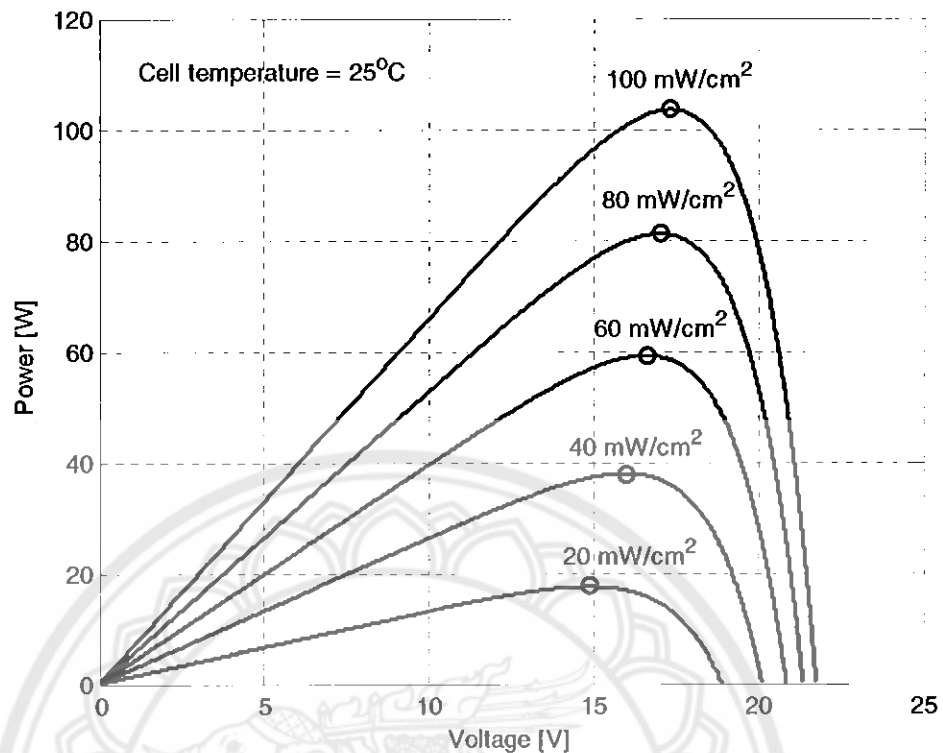
ภายใต้เงื่อนไขการเปิดวงจร (เมื่อไม่พิจารณาค่าความต้านทานขนาน) จะได้

$$V_{oc} = \frac{n_s A k T_{cell}}{q} \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_o} \right) \quad (2.8)$$

สมการที่ (2.8) แสดงให้เห็นว่าในขณะที่กระแสพลังแสงมีค่าแปรผันตรงกับค่าความเข้มแสง แรงดันเปิดวงจรจะแปรผันเป็นฟังก์ชันลอการิทึม เส้นโค้งคุณลักษณะกำลัง-แรงดันที่สัมพันธ์กับรูปที่ 2.22 แสดงได้ดังรูปที่ 2.23 โดยจะเห็นได้ชัดว่ากำลังด้านออกของแผงมีค่าลดลงตามค่าความเข้มแสง

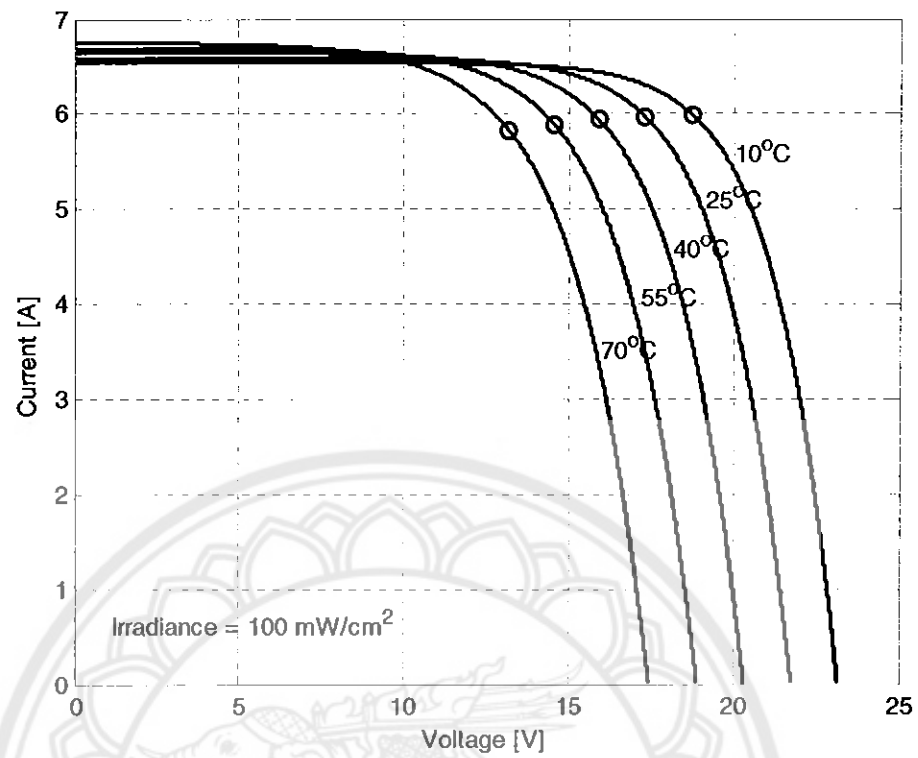


รูปที่ 2.22 ผลของความเข้มแสงต่อเส้นโค้งคุณลักษณะกระแส-แรงดัน

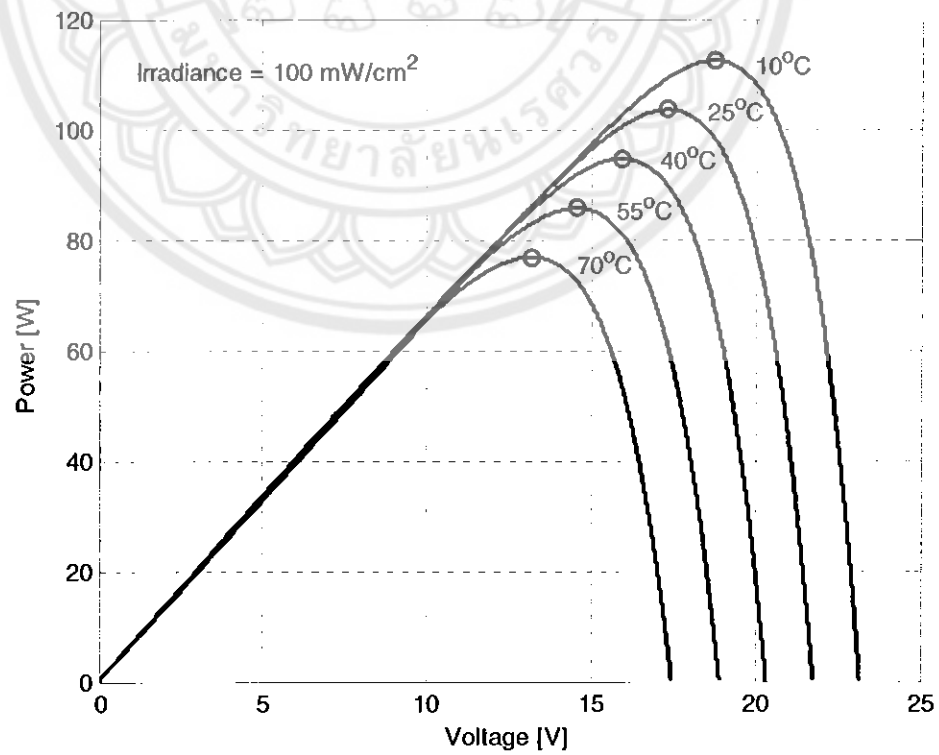


รูปที่ 2.23 ผลของความเข้มแสงต่อเส้นโค้งคุณลักษณะกำลัง-แรงดัน

คุณลักษณะของกระแส-แรงดันสำหรับค่าอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ที่แตกต่างกัน แสดงได้ดังรูปที่ 2.24 ในขณะที่อุณหภูมิสูงขึ้นกระแสพลังแสงมีค่าเพิ่มขึ้นตามเพราะแถบช่องว่าง พลังงานแถบลงและระยะแพร่ของประจุพาหะมีค่าเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของเซลล์ส่งผลให้กระแสลัดวงจรมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย (ประมาณ 0.07%/°C สำหรับเซลล์ที่ทำจากซิลิกอน) ในทางตรงกันข้าม แรงดันเปิดวงจรขึ้นอยู่กับอุณหภูมิอย่างมาก การเพิ่มขึ้นของ อุณหภูมิทำให้กระแสอิ่มตัวย้อนกลับเพิ่มขึ้นอย่างมาก และช่องว่างแถบพลังงานแถบลง ส่งผลให้ แรงดันเปิดวงจรมีค่าลดลง จากการแสดงให้เห็นในรูป แรงดันเปิดวงจรมีค่าลดลงตามอุณหภูมิใน ลักษณะค่อนข้างเชิงเส้นในอัตราประมาณ 0.4%/°C สำหรับเซลล์ที่ทำจากซิลิกอน ผลของอุณหภูมิที่มีต่อเส้นโค้งคุณลักษณะกำลัง-แรงดันแสดงได้ดังรูปที่ 2.25 จะเห็นว่าอุณหภูมิมิมีผลอย่างมากต่อค่า กำลังด้านออกที่ระดับแรงดันสูงกว่าแรงดันที่จุดกำลังสูงสุด [4]



รูปที่ 2.24 ผลของอุณหภูมิต่อเส้นโค้งคุณลักษณะกระแส-แรงดัน

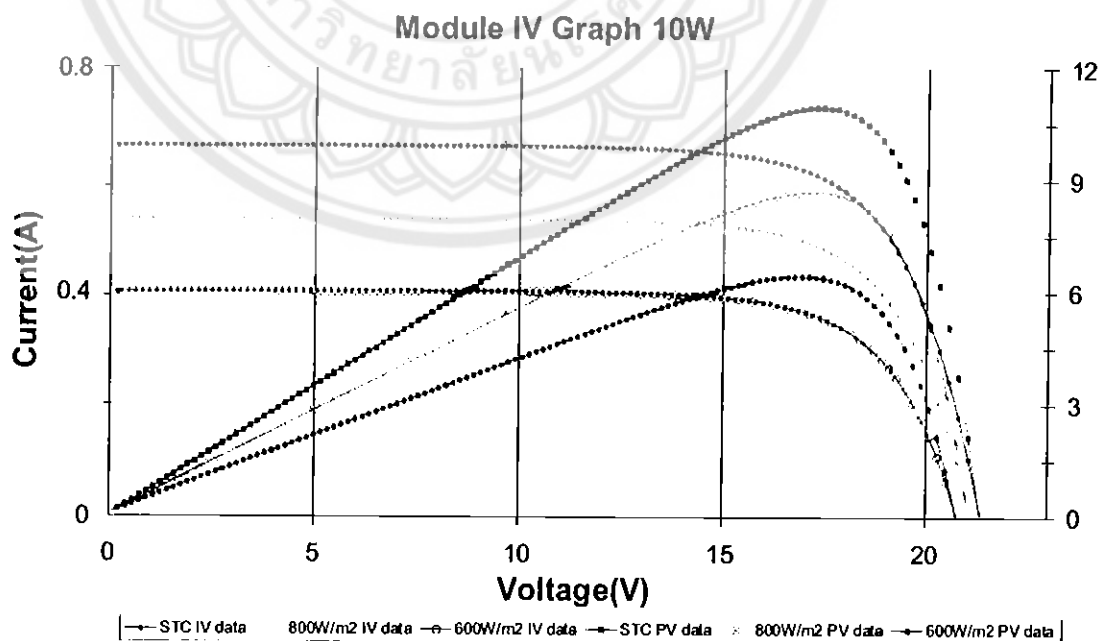


รูปที่ 2.25 ผลของอุณหภูมิต่อเส้นโค้งคุณลักษณะกำลัง-แรงดัน

แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่นำมาใช้ในโครงการนี้เป็นชนิดซิลิกอนผลึกเดี่ยว (Monocrystalline silicon) ของบริษัท Suntech Power รุ่น STP010S-12/kb ซึ่งมีคุณสมบัติดังนี้

ชนิดของเซลล์ (Cell type)	ซิลิกอนผลึกเดี่ยว
ขนาด กว้าง×ยาว×สูง (Dimension)	310×366×18 mm
น้ำหนัก (Weight)	1.5 kg
จำนวนเซลล์และการเชื่อมต่อ (No. of cells and connections)	36 (4×9)
แรงดันเปิดวงจร (Open circuit voltage: V_{oc})	21.6 V
แรงดันที่จุดกำลังสูงสุด (Optimum operating point voltage: V_{mpp})	17.2 V
กระแสลัดวงจร (Short circuit current: I_{sc})	0.66 A
กระแสที่จุดกำลังสูงสุด (Optimum operating point current: I_{mpp})	0.58 A
กำลังสูงสุดภายใต้เงื่อนไข STC (Maximum power at STC: P_{mpp})	10 Wp
อุณหภูมิใช้งาน (Operating temperature)	-40 – 80°C
ระดับแรงดันสูงสุดของระบบ (Maximum system voltage)	715 V
หมายเหตุ STC: ความเข้มแสง 1000 W/m ² อุณหภูมิของแผง 25°C และมวลอากาศ = 1.5	

เส้นโค้งคุณลักษณะของกระแส-แรงดันรวมทั้งเส้นโค้งคุณลักษณะของกำลัง-แรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์รุ่น STP010S-12/kb แสดงได้รูปที่ 2.26

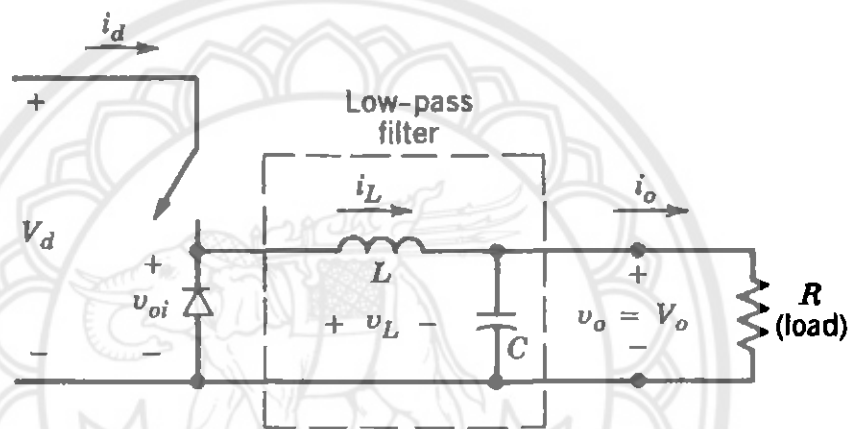


รูปที่ 2.26 เส้นโค้งคุณลักษณะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์รุ่น STP010S-12/kb

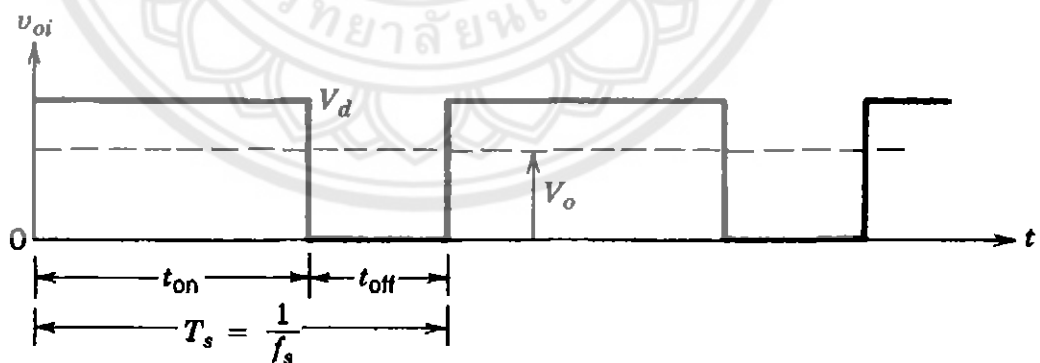
ที่มา: Suntech Power

2.5 วงจรทอนระดับแรงดัน

วงจรทอนระดับแรงดัน (Step-down converter หรือ Buck converter) มีหน้าที่สร้างแรงดันด้านออกที่มีค่าเฉลี่ยต่ำกว่าแรงดันด้านเข้า นิยมนำไปใช้ในแหล่งจ่ายกำลังกระแสตรงและการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์กระแสตรง แผนภาพวงจรทอนระดับแรงดันซึ่งมีโหลดเป็นตัวต้านทานแสดงได้ดังรูปที่ 2.27 แรงดันด้านออกถูกกรองสัญญาณ (ทำให้เรียบ) ด้วยวงจรกรองผ่านความถี่ต่ำ สมมติให้สวิตช์มีคุณสมบัติในอุดมคติ และแรงดันด้านเข้ามีค่าคงที่ ถ้าไม่มีวงจรกรองผ่านความถี่ต่ำแรงดันด้านออกจะเท่ากับแรงดันคั่นกร่อมไดโอด v_{oi} ซึ่งมีรูปคลื่นสัญญาณเป็นฟังก์ชันของตำแหน่งหน้าสัมผัสของสวิตช์ดังรูปที่ 2.28



รูปที่ 2.27 แผนภาพวงจรทอนระดับแรงดัน [5]



รูปที่ 2.28 รูปสัญญาณแรงดันด้านออกของวงจรทอนระดับแรงดันเมื่อไม่มีวงจรกรอง [5]

ตัวกรองผ่านความถี่ต่ำซึ่งประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุอย่างละหนึ่งตัวสามารถลดการเปลี่ยนแปลงขึ้นลงของสัญญาณด้านออกได้โดยกำจัดส่วนประกอบฮาร์มอนิกที่ปนอยู่ในสัญญาณ v_{oi} โดยมีเป้าหมายคือให้เหลือเฉพาะส่วนประกอบกระแสตรงหรือค่าเฉลี่ยของ v_{oi} (นั่นคือ V_o) ไปสู่โหลด เราคำนวณค่าเฉลี่ยของแรงดันด้านออกในรูปของคิวตี้ไซเคิลได้ดังนี้

$$V_o = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} v_{oi} dt = \frac{1}{T_s} \int_0^{t_{on}} V_d dt = \frac{t_{on}}{T_s} V_d = D V_d \quad (2.9)$$

โดยที่ V_o คือ ค่าเฉลี่ยของแรงดันด้านออก (V)

V_d คือ ค่าเฉลี่ยของแรงดันด้านเข้า (V)

D คือ ค่าดิวตี้ไซเคิล

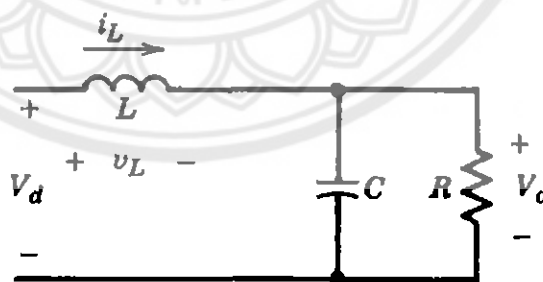
t_{on} คือ ระยะเวลาที่สวิตช์นำกระแสใน 1 คาบสวิตชิง (s)

T_s คือ คาบสวิตชิง (s) = $1/f_s$

f_s คือ ความถี่สวิตชิง (Hz)

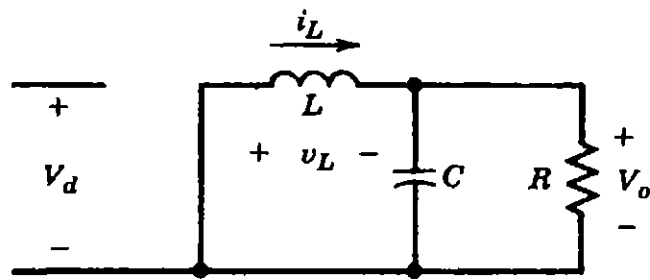
จะเห็นว่า การปรับเปลี่ยนค่าดิวตี้ไซเคิลของสวิตช์จะทำให้เราสามารถควบคุม V_o ได้ สำหรับการวิเคราะห์การทำงานในสถานะอยู่ตัวของวงจรทอนระดับแรงดัน เราสมมติให้ตัวเก็บประจุมีค่าสูง ซึ่งสอดคล้องกับการใช้งานจริงทั่วไปที่ต้องการให้แรงดันด้านออกมีค่าเกือบคงที่ และพิจารณาการทำงานของวงจรในแบบวิธีการนำกระแสต่อเนื่อง (Continuous conduction mode: CCM) นั่นคือไม่มีช่วงใดที่กระแสของตัวเหนี่ยวนำมีค่าเป็นศูนย์ ($i_L > 0$)

การทำงานของวงจรทอนระดับแรงดันในขณะที่สวิตช์นำกระแสแสดงได้ด้วยวงจรสมมูลดังรูปที่ 2.29 เมื่อสวิตช์นำกระแสในช่วงระยะเวลา t_{on} ไดโอดได้รับไบแอสย้อน ส่งผลให้เกิดแรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำมีค่าเป็นบวก ทำให้กระแสของตัวเหนี่ยวนำมีค่าเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้น จึงเกิดการสะสมพลังงานในตัวเหนี่ยวนำ ในช่วงนี้แหล่งกำเนิดจ่ายพลังงานให้กับตัวเหนี่ยวนำและโหลด



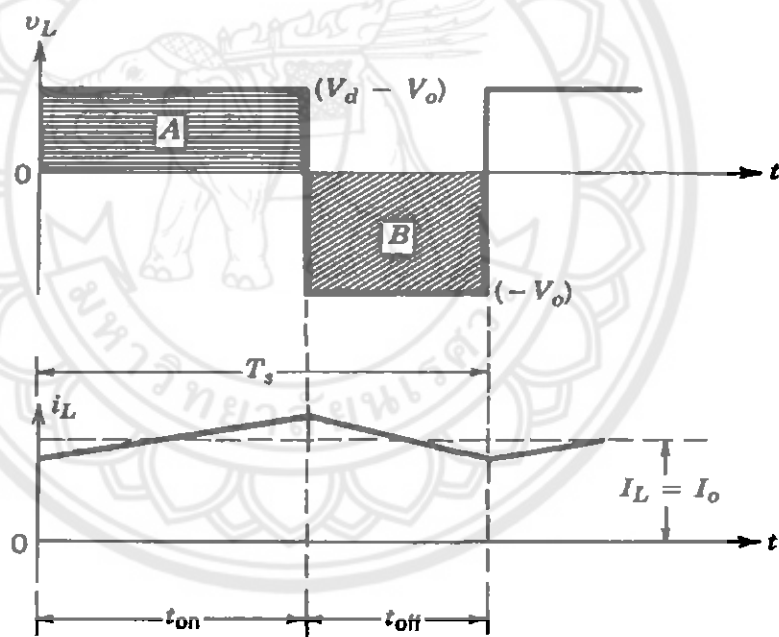
รูปที่ 2.29 วงจรสมมูลของวงจรทอนระดับแรงดันเมื่อสวิตช์ปิด [5]

การทำงานของวงจรทอนระดับแรงดันในขณะที่สวิตช์ไม่นำกระแสแสดงได้ด้วยวงจรสมมูลดังรูปที่ 2.30



รูปที่ 2.30 วงจรสมมูลของวงจรทอนระดับแรงดันเมื่อสวิตช์เปิด [5]

ในขณะที่สวิตช์หยุดนำกระแสเป็นระยะเวลา t_{off} พลังงานที่สะสมในตัวเหนี่ยวนำจะทำให้ไดโอดนำกระแส (ทำหน้าที่เป็นไดโอดฟรียวลิ่ง) กระแสของตัวเหนี่ยวนำจึงยังคงไหลต่อเนื่องโดยไหลผ่านไดโอดเพื่อส่งผ่านพลังงานที่สะสมไว้ไปยังโหลด ในช่วงนี้แรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำมีค่าเป็นลบ กระแสของตัวเหนี่ยวนำมีค่าลดลงแบบเชิงเส้นดังรูปที่ 2.31



รูปที่ 2.31 แรงดันและกระแสของตัวเหนี่ยวนำในวงจรทอนระดับแรงดันในสถานะอยู่ตัว [5]

ในสถานะอยู่ตัว ค่าเฉลี่ยของแรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำต้องเป็นศูนย์

$$\int_0^{T_s} v_L dt = \int_0^{t_{on}} v_L dt + \int_{t_{on}}^{T_s} v_L dt = 0$$

$$(V_d - V_o)t_{on} = V_o(T_s - t_{on})$$

$$\frac{V_o}{V_d} = \frac{t_{on}}{T_s} = D \quad (2.10)$$

ถ้าไม่พิจารณากำลังสูญเสียในตัวแปลงผันฯ จะได้กำลังด้านเข้า (P_{in}) มีค่าเท่ากับกำลังด้านออก (P_{out})

$$\begin{aligned} P_{in} &= P_{out} \\ V_d I_d &= V_o I_o \\ \frac{V_o}{V_d} &= \frac{I_d}{I_o} = D \end{aligned} \quad (2.11)$$

โดยที่ I_o คือ ค่าเฉลี่ยของกระแสด้านออก (A)

I_d คือ ค่าเฉลี่ยของกระแสด้านเข้า (A)

จะพบว่าค่าเฉลี่ยของแรงดันด้านออกมีค่าต่ำกว่าแรงดันด้านเข้า วงจรทอนระดับแรงดัน จึงทำตัวเสมือนเป็นหม้อแปลงไฟฟ้ากระแสตรง (DC transformer) โดยปรับคัตไชเคิล ($0 \leq D \leq 1$) ในวงจรทอนระดับแรงดัน ค่าเฉลี่ยของกระแสของตัวเหนี่ยวนำ I_L มีค่าเท่ากับค่าเฉลี่ยของกระแสด้านออก I_o เพราะค่าเฉลี่ยของกระแสของตัวเก็บประจุในสถานะอยู่ตัวมีค่าเป็นศูนย์

ค่าประสิทธิภาพของวงจรทอนระดับแรงดันหาได้จากสมการที่ (2.12)

$$\eta = \frac{P_o}{P_d} = \frac{V_o I_o}{V_d I_d} \quad (2.12)$$

ความพลีวของแรงดันด้านออก (Output voltage ripple) แสดงดังรูปที่ 2.32 และคำนวณได้โดยพิจารณาให้ส่วนความพลีวของ i_L ไหลผ่านตัวเก็บประจุ และค่าเฉลี่ยของ i_L ไหลไปที่โหลด จากรูปที่ 2.32 เราสามารถประมาณค่ายอดถึงยอด (Peak-to-peak value) ของความพลีวของแรงดันด้านออก (ΔV_o) ได้จาก

$$\Delta V_o = \frac{\Delta Q}{C} = \frac{1}{C} \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta I_L}{2} \cdot \frac{T_s}{2} \right)$$

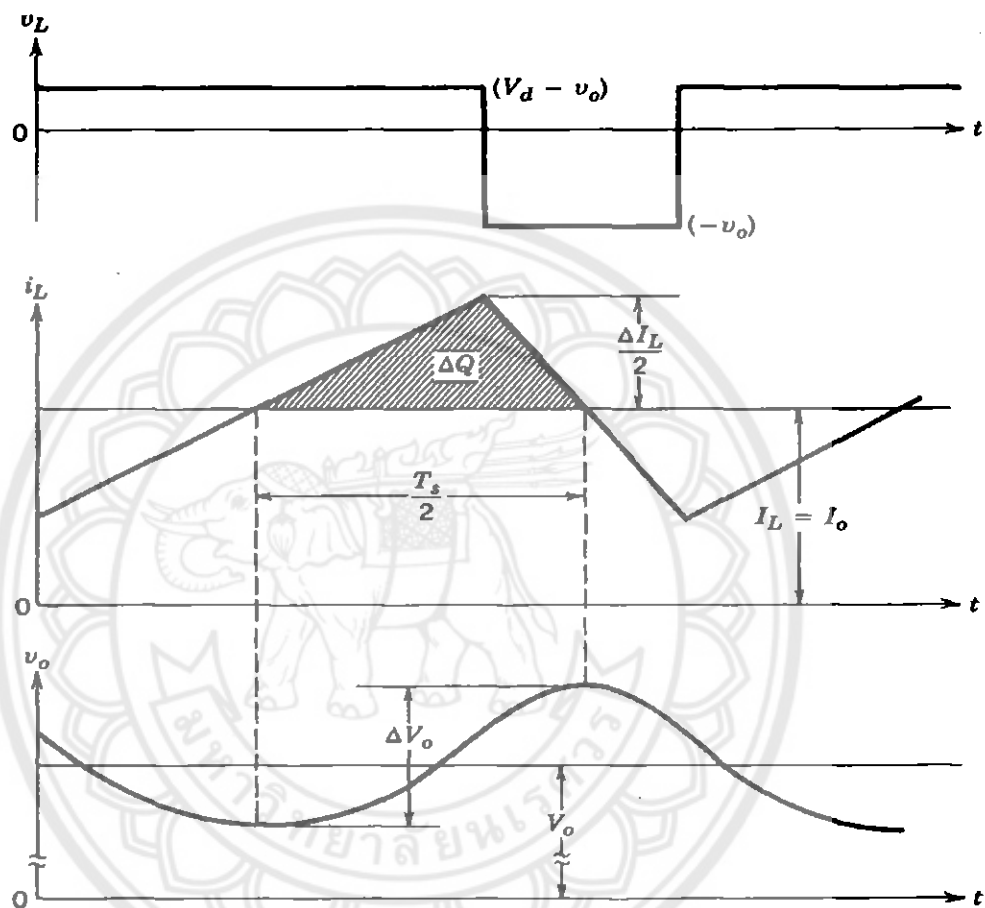
พิจารณาช่วง t_{off}

$$\Delta I_L = \frac{V_o}{L} (1-D) T_s$$

แทนค่า ΔI_L ใน ΔV_o จะได้

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{1}{8} \frac{(1-D) T_s^2}{LC} = \frac{1}{8} \frac{(1-D)}{LC f_s^2} \quad (2.13)$$

จะเห็นว่าที่ค่าคิวตี้ไอ้เกิดค่าหนึ่ง ๆ ความพลีของแรงดันด้านออกแปรผกผันกับค่าความเหนี่ยวนำ L และค่าความจุ C และแปรผกผันกับความถี่สวิตชิ่งยกกำลังสอง นั่นคือเราสามารถลดความต้องการในการกรองสัญญาณแรงดันด้านออกได้โดยเพิ่มความถี่สวิตชิ่ง อย่างไรก็ตามผลที่ตามมาคือกำลังสูญเสียในสวิตช์จะเพิ่มขึ้น [5]



รูปที่ 2.32 ความพลีของแรงดันด้านออกในวงจรทอนระดับแรงดัน [5]

บทที่ 3

การออกแบบและสร้างตัวควบคุมการอัดประจุ

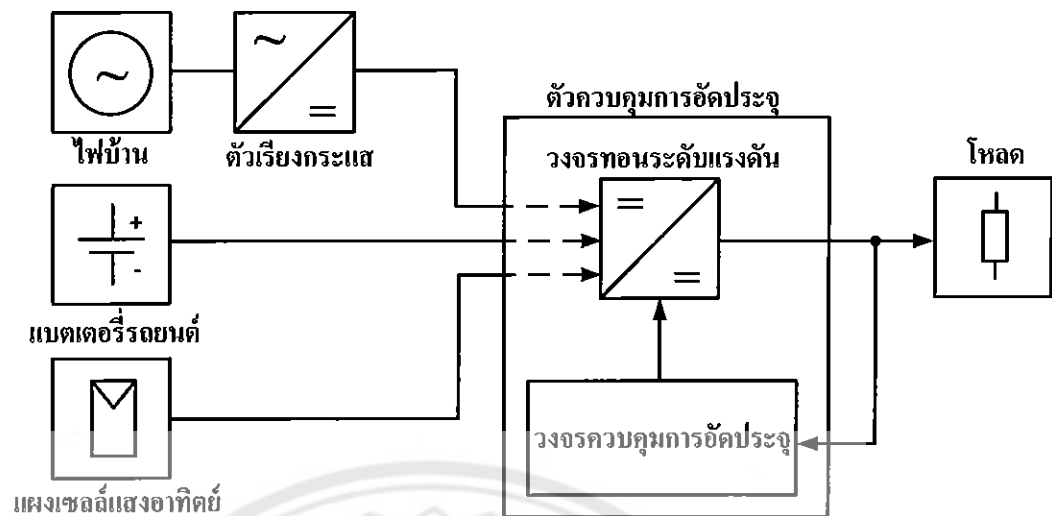
เนื่องจากแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนและลิเทียมไอออนพอลิเมอร์เสื่อมสภาพได้ง่าย หากอยู่ในสภาวะการอัดประจุเกิน ดังนั้นในระหว่างการอัดประจุจึงต้องควบคุมแรงดันและกระแสที่จ่ายออกจากวงจรทอนระดับแรงดันให้เหมาะสมกับขนาดของแบตเตอรี่ที่ต้องการอัดประจุ และเพื่อให้สะดวกในการนำไปใช้งานในสถานที่ต่างๆ จึงได้ออกแบบตัวควบคุมการอัดประจุให้สามารถรับพลังงานไฟฟ้าได้ทั้งจากการไฟฟ้า แบตเตอรี่รถยนต์และแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยแบ่งโครงสร้างหลักของตัวควบคุมการอัดประจุออกเป็น 2 ส่วน คือ วงจรทอนระดับแรงดัน และวงจรควบคุมการอัดประจุ

3.1 การออกแบบการทำงานของตัวควบคุมการอัดประจุ

รูปแบบการทำงานของตัวควบคุมการอัดประจุที่ออกแบบในโครงงานนี้แสดงดังรูปที่ 3.1 โหลดของตัวควบคุมการอัดประจุคือ แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนและลิเทียมไอออนพอลิเมอร์ที่นิยมใช้ในโทรศัพท์เคลื่อนที่และกล้องถ่ายภาพดิจิทัล โดยแบตเตอรี่ของโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่ต้องการแรงดันอัดประจุ 5 V รวมถึงอุปกรณ์อื่นๆที่ใช้แบตเตอรี่ชนิดเดียวกันและต้องการแรงดันอัดประจุ 5 V อันได้แก่ แท็บเล็ต (Tablet) และเครื่องเล่นเพลงแบบพกพา เช่น ไอพอด (iPod) เป็นต้น ส่วนแบตเตอรี่ของกล้องถ่ายภาพดิจิทัลต้องการแรงดันอัดประจุ 4.2 V หรือ 8.4 V โดยขึ้นอยู่กับชนิดของกล้อง ทั้งนี้พลังงานอัดประจุสามารถมาจากแหล่งจ่าย 3 ประเภท คือ

- 1) ไฟกระแสสลับขนาดแรงดัน 220 V ความถี่ 50 Hz ที่ได้รับจากการไฟฟ้าฯ ผ่านทางอะแดปเตอร์ (Adapter) ซึ่งทำหน้าที่แปลงเป็นไฟกระแสตรงที่มีขนาดแรงดันคงที่ 19 V และกระแสไม่เกิน 4.74 A
- 2) ไฟกระแสตรงขนาดแรงดัน 12 V จากแบตเตอรี่รถยนต์
- 3) ไฟกระแสตรงจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยในที่นี้ใช้แผงขนาด 10 W แรงดัน 17.2 V และกระแส 0.58 A

ซึ่งจะเห็นว่าแรงดันของแหล่งจ่ายพลังงานทั้งสามชนิดข้างต้น มีค่าสูงกว่าค่าที่ใช้ในการอัดประจุ ดังนั้นจึงออกแบบให้ตัวควบคุมการอัดประจุประกอบด้วยวงจรทอนระดับแรงดันและวงจรควบคุมการอัดประจุ เพื่อรองรับไฟฟ้าจากทั้งสามแหล่งพลังงานดังกล่าวได้ รวมทั้งควบคุมการจ่ายแรงดันอัดประจุ 3 ระดับ คือ 4.2 V 5 V และ 8.4 V และคุมค่ากระแสอัดประจุได้สูงสุดในช่วง 0.3 – 2 A



รูปที่ 3.1 แผนภาพกรอบแสดงส่วนประกอบของตัวควบคุมการอัดประจุ

3.2 โครงสร้างและหลักทำงานของตัวควบคุมการอัดประจุ

แผนภาพวงจรของตัวควบคุมการอัดประจุที่ออกแบบในโครงงานนี้แสดงดังรูปที่ 3.2 โดยประกอบขึ้นจากวงจรทอนระดับแรงดันและวงจรควบคุมการอัดประจุ วงจรทอนระดับแรงดันมีหน้าที่ปรับลดระดับแรงดันของแหล่งจ่ายพลังงานให้สอดคล้องกับค่าโหลดที่ต้องการ ในวงจรทอนระดับแรงดันนอกจากตัวเก็บประจุที่ต่ออยู่ด้านเข้าและด้านออกแล้วยังมีทรานซิสเตอร์ชนิดพีเอ็นพีหมายเลข Tip 32C ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ และมีตัวเหนี่ยวนำขนาด 1 mH และไดโอดชนิดฟื้นตัวเร็ว (Fast recovery diode) หมายเลข FR204

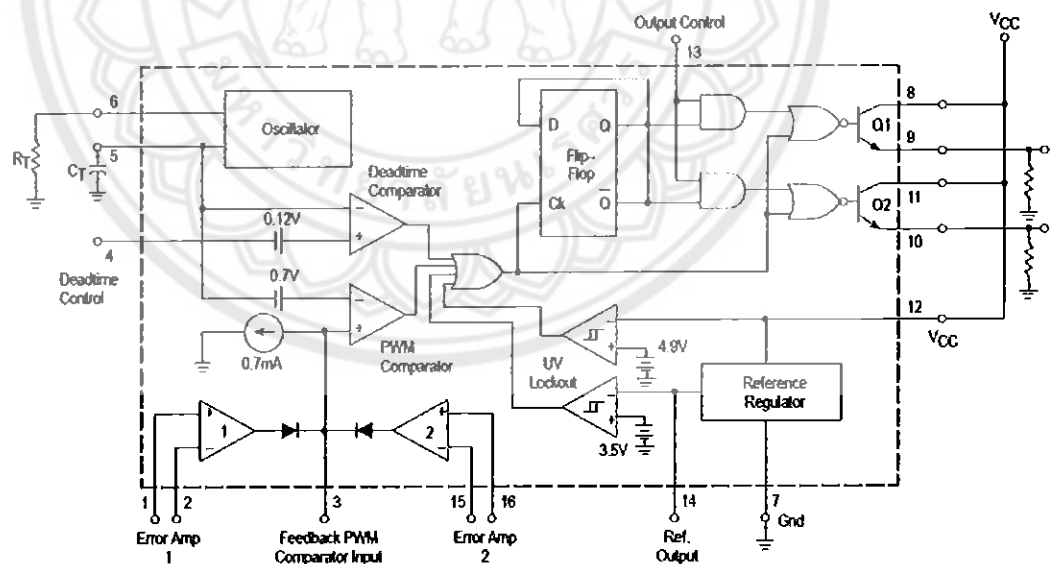
วงจรควบคุมการอัดประจุ ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ วงจรควบคุมแรงดันและกระแสอัดประจุ และวงจรตัดกระแสอัดประจุ ในวงจรควบคุมแรงดันและกระแสอัดประจุได้เลือกใช้วงจรรวมหมายเลข TL494 ให้ทำหน้าที่สร้างสัญญาณควบคุมการทำงานของ Tip 32C เพื่อควบคุมแรงดันและกระแสด้านออกของวงจรทอนระดับแรงดันสำหรับการอัดประจุให้เหมาะสมกับแบตเตอรี่แต่ละขนาดได้ ส่วนวงจรตัดกระแสอัดประจุมีหน้าที่ยุติกระบวนการอัดประจุโดยตัดสัญญาณควบคุมการทำงานของ Tip 32C ในวงจรทอนระดับแรงดัน

ตัวควบคุมการอัดประจุถูกออกแบบให้เริ่มทำงานด้วยลอจิกสูงที่ได้รับจากวงจรตัดกระแสอัดประจุเพื่อให้รีเลย์ทำงาน เมื่อหน้าสัมผัสของรีเลย์ปิดลงทำให้ทรานซิสเตอร์ Tip 32C ซึ่งทำหน้าที่เป็นสวิตช์ของวงจรทอนระดับแรงดันได้รับสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มจาก TL494 ซึ่งอยู่ในวงจรควบคุมแรงดันและกระแสอัดประจุ หลังจากที่มีการอัดประจุเริ่มต้นขึ้น กระแสอัดประจุมีค่าสูงส่งผลให้วงจรตัดกระแสอัดประจุยังคงสร้างลอจิกสูงเพื่อรักษาสถานะการทำงานของรีเลย์ทำให้การอัดประจุดำเนินต่อไปอย่างต่อเนื่อง ในที่นี้เราใช้การกดสวิตช์ S3 เพื่อเริ่มการทำงาน

อย่างไรก็ตามหากการทำงานของวงจรตัวกระตุ้นกระแสอัดประจุหรือรีเลย์เกิดความผิดพลาด เรายังสามารถใช้งานตัวควบคุมการอัดประจุที่ออกแบบและสร้างขึ้นนี้ต่อไปได้ โดยใช้สวิทช์ S2 เพื่อควบคุมการเริ่มและหยุดการอัดประจุ (Manual control)

3.3 วงจรควบคุมแรงดันและกระแสอัดประจุ

ในการสร้างวงจรควบคุมแรงดันและกระแสอัดประจุเราได้เลือกใช้ TL494 ซึ่งสร้างสัญญาณควบคุมการทำงานของ Tip 32C โดยใช้หลักการมอดูเลตความกว้างพัลส์หรือพีคดับเบิลยูเอ็ม แผนภาพวงจรภายในของ TL494 ดังแสดงในรูปที่ 3.3 สัญญาณพีคดับเบิลยูเอ็มนี้สร้างจากสัญญาณรูปคลื่นฟันเลื่อย (Sawtooth waveform) ที่ได้จากวงจรกำเนิดสัญญาณ (Oscillator) เปรียบเทียบกับสัญญาณควบคุมที่เกิดจากวงจรขยายความผิดพลาด (Error amplifier) 2 วงจร เพื่อทำให้ความกว้างของสัญญาณพีคดับเบิลยูเอ็มเปลี่ยนแปลงได้ ส่งผลให้ค่าคิวตี้ไซเคิลเปลี่ยนแปลงเช่นกัน โดยเราสามารถปรับความถี่ของสัญญาณรูปคลื่นฟันเลื่อยได้ด้วยการเลือกค่าของตัวเก็บประจุ C_T และตัวต้านทาน R_T ที่ต่อกับขาที่ 5 และ 6 ตามลำดับ นอกจากนี้ TL494 ยังให้แรงดันคงที่ 5 V ออกมายังขาที่ 14 ซึ่งใช้เป็นแรงดันอ้างอิงในการควบคุมแรงดันและกระแสอัดประจุ โดย TL494 สามารถรับแรงดันเข้าผ่านขาที่ 12 (V_{CC}) ในช่วง 7 – 40 V



รูปที่ 3.3 แผนภาพวงจรภายในของวงจรรวมหมายเลข TL494

วงจรควบคุมแรงดันและกระแสอัดประจุที่ออกแบบและสร้างขึ้นในโครงงานนี้แสดงดังรูปที่ 3.4 ในการควบคุมแรงดันอัดประจุเราได้เลือกใช้วงจรขยายความผิดพลาดตัวที่ 1 โดยขาที่ 1 รับแรงดันตกคร่อมตัวต้านทาน R_T เข้ามาเปรียบเทียบกับแรงดันอ้างอิงที่ขาที่ 2 เพื่อจำกัดแรงดัน

ดังนั้นหากต้องการแรงดันอัดประจุที่ 4.2 V 5 V และ 8.4 V จึงเลือกใช้ตัวต้านทาน R_I เท่ากับ 17.5 k Ω 12 k Ω และ 5 k Ω ตามลำดับ

การกำหนดค่าสูงสุดของกระแสอัดประจุทำได้โดยเลือกค่าความต้านทานของ R_I ให้อยู่ในช่วงกระแสอัดประจุของค่าที่ออกแบบไว้คือ 0.3 – 2 A ซึ่งหาจากสมการที่ (3.2) โดยกำหนดแรงดัน V_{ref} เท่ากับ 5 V ซึ่งตรงกับ V_{ref} (ขาที่ 14)

หาค่า R_I โดยใช้หลักการการแบ่งแรงดันที่ขาที่ 15 ซึ่งทำให้แรงดันตกคร่อมตัวต้านทาน R_I เท่ากับแรงดันตกคร่อมตัวต้านทาน 0.1 Ω

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

$$\text{ดังนั้น} \quad R_I = \frac{1200 \cdot I_{out}}{V_{ref} - 0.1 \cdot I_{out}} \quad (3.2)$$

โดยที่ I_{out} คือ กระแสอัดประจุ (A)

V_{ref} คือ แรงดันอ้างอิง (= 5 V)

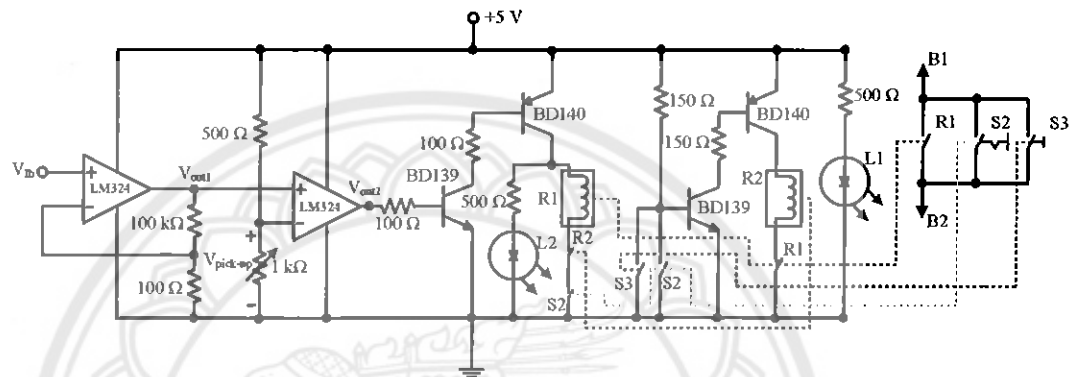
ที่ $I_{out} = 0.3$ A จะได้ $R_I = 72.43 \Omega \approx 72 \Omega$

ที่ $I_{out} = 2$ A จะได้ $R_I = 500 \Omega$

ในที่นี้ได้เลือกใช้ตัวต้านทานชนิดปรับค่าได้ขนาด 1 k Ω เพื่อปรับค่าความต้านทาน R_I ให้อยู่ในช่วงที่ออกแบบได้

3.4 วงจรตัดกระแสอัดประจุ

หลังจากการอัดประจุแบตเตอรี่ใกล้เต็มแล้ว จำเป็นต้องมีวงจรที่ทำหน้าที่หยุดการอัดประจุ เพื่อป้องกันการอัดประจุเกิน โดยใช้วงจรตัดกระแสอัดประจุ ดังแสดงในรูปที่ 3.5 ซึ่งประกอบด้วยวงจรขยายไม่กลับขั้ว (Non-inverting amplifier) วงจรเปรียบเทียบแรงดัน (Voltage comparator) และรีเลย์ (พร้อมวงจรขยายกระแสซึ่งใช้ขั้วรีเลย์)



รูปที่ 3.5 แผนภาพวงจรตัดกระแสอัดประจุ

วงจรตัดกระแสอัดประจุจะตัดสัญญาณพีคอัพเบิกลูเอม เพื่อหยุดการทำงานของวงจรตอนระดับแรงดัน เมื่อค่ากระแสอัดประจุมีค่าต่ำลงจนถึงค่าที่ปรับตั้งไว้ คือ 20 mA อย่างไรก็ตามที่ค่ากระแสนี้ตัวรับรู้กระแส (ตัวต้านทาน 0.1 Ω) จะเกิดแรงดัน V_{lb} เท่ากับ 2 mV ซึ่งมีค่าน้อยมาก จึงยากแก่การนำไปเปรียบเทียบ เราจึงนำตัวขยายเชิงดำเนินการ หรือออปแอมป์ (Operational amplifier: Op-Amp) ในวงจรรวมหมายเลข LM324 มาสร้างเป็นวงจรขยายไม่กลับขั้วที่มีอัตราขยายประมาณ 1000 เท่า โดยใช้ตัวต้านทานที่มีค่า 100 kΩ และ 100 Ω แรงดันด้านออกของวงจรขยายไม่กลับขั้ว (V_{out1}) คำนวณหาได้จากสมการที่ (3.3)

$$V_{out1} = V_{lb} \cdot \left(1 + \frac{100 \times 10^3}{100}\right) = 1001 \cdot V_{lb} \quad (3.3)$$

โดยที่ V_{out1} คือ แรงดันด้านออกของวงจรขยายไม่กลับขั้ว (V)

V_{lb} คือ แรงดันตกคร่อมตัวต้านทาน 0.1 Ω (V)

ที่ $V_{lb} = 2 \text{ mV}$ จะได้ $V_{out1} = 1001 \times 2 \times 10^{-3} = 2.002 \text{ V}$

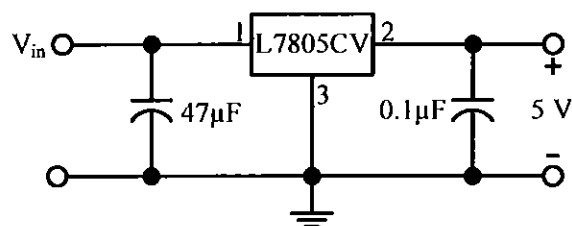
เนื่องจากไฟเลี้ยงที่จ่ายให้กับวงจรนี้มีค่า 0 V และ +5 V ทำให้ออปแอมป์มีแรงดันออฟเซต (V_{offset}) ประมาณ 0.6 V ส่งผลให้แรงดันด้านออก V_{out1} มีค่าสูงขึ้นอีก 0.6 V จากค่าที่ออกแบบไว้ ดังนั้นในกรณีนี้แรงดันด้านออกที่แท้จริงมีค่าเท่ากับ $2.002 + 0.6 = 2.602 \text{ V}$ ซึ่งค่านี้ถูกนำไปใช้ในการปรับตั้งค่าแรงดันอ้างอิงของวงจรเปรียบเทียบแรงดัน ($V_{pick-up}$)

ค่ากระแสอัดประจุขณะใดๆถูกตรวจจับด้วยตัวรับรู้กระแส (ตัวต้านทาน 0.1Ω) ซึ่งให้ค่าออกมาเป็นแรงดัน V_b แรงดันด้านออกของวงจรขยายไม่กลับขั้วถูกนำค่ามาเปรียบเทียบกับค่าแรงดันอ้างอิงของวงจรเปรียบเทียบแรงดันโดยใช้โอปแอมป์ภายใน LM324 ถ้าแรงดัน V_{out1} ซึ่งต่อเข้ากับขาบวกของโอปแอมป์มีค่ามากกว่าค่าแรงดันอ้างอิงซึ่งต่ออยู่ที่ขาลบของโอปแอมป์ทำให้วงจรนี้สร้างลอจิกสูง ในระหว่างการอัดประจุนั้นกระแสอัดประจุยังมีค่าสูงจึงทำให้วงจรเปรียบเทียบแรงดันสร้างลอจิกสูงอย่างต่อเนื่อง แต่หลังจากที่กระแสอัดประจุลดลงจนถึงค่าที่ปรับตั้งไว้ คือ 20 mA ทำให้แรงดันที่นำมาเปรียบเทียบกับค่าน้อยกว่าแรงดันอ้างอิงจะทำให้วงจรนี้สร้างลอจิกต่ำ

เมื่อวงจรเปรียบเทียบแรงดันสร้างลอจิกสูงเพื่อจ่ายให้กับขดลวดของรีเลย์ R1 แต่ค่ากระแสที่ไหลในขดลวดมีค่าต่ำจึงไม่สามารถทำให้รีเลย์ R1 เปลี่ยนหน้าสัมผัสได้ เราจึงใช้วงจรขยายกระแสเพื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้าให้กับขดลวดของรีเลย์ R1 โดยใช้ทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็นพีเอ็นหมายเลข BD139 ร่วมกับทรานซิสเตอร์ชนิดพีเอ็นพีหมายเลข BD140 โดยที่ลอจิกสูงจากวงจรเปรียบเทียบแรงดันทำให้เกิดกระแสเบสไปกระตุ้นให้ BD139 ทำงาน จึงมีกระแสคอลเลกเตอร์ไหลผ่าน BD139 ซึ่งเป็นกระแสเบสที่ออกมาจาก BD140 ส่งผลให้เกิดกระแสคอลเลกเตอร์ไหลออกจาก BD140 เพื่อป้อนให้ขดลวดรีเลย์ R1

เนื่องจากวงจรขยายไม่กลับขั้วมีอัตราขยายประมาณ 1000 เท่า การเปลี่ยนแปลงค่าเพียงเล็กน้อยของกระแสอัดประจุส่งผลให้แรงดัน V_{out1} มีค่าไม่คงที่ ดังนั้นในช่วงที่กระแสอัดประจุลดลงเหลือประมาณ 20 mA การแกว่งของค่า V_{out1} จึงทำให้วงจรเปรียบเทียบแรงดันสร้างลอจิกสูงและต่ำสลับกัน ส่งผลให้หน้าสัมผัสของรีเลย์ R1 เปลี่ยนสถานะสลับไปมาทำให้วงจรขาดเสถียรภาพและอายุการใช้งานของรีเลย์ R1 ลดลง เราจึงใช้งานรีเลย์ R2 โดยมีวงจรขยายกระแสเช่นเดียวกับรีเลย์ R1 เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าวด้วยหลักการยักระหว่างกัน (Interlocking)

วงจรตัดกระแสอัดประจุต้องการไฟเลี้ยง 5 V เพื่อจ่ายให้กับ LM324 และรีเลย์ ซึ่งในที่นี้ไฟกระแสตรงดังกล่าวถูกสร้างขึ้นด้วยตัวคุมค่าแรงดัน (Voltage regulator) หมายเลข L7805CV โดยรับแรงดันด้านเข้ามาจากแหล่งจ่ายพลังงานที่ใช้อัดประจุแล้วคุมค่าให้คงที่เท่ากับ $+5 \text{ V}$ ดังแสดงในรูปที่ 3.6 เพื่อเป็นไฟเลี้ยงให้กับวงจรควบคุม



รูปที่ 3.6 แผนภาพวงจรไฟเลี้ยง 5 V

การออกแบบวงจรควบคุมการอัดประจุได้เลือกใช้รีเลย์และสวิตช์เพื่อควบคุมการทำงานทั้งการอัดประจุและการตัดกระแสอัดประจุ อัน ได้แก่

1) รีเลย์ R1 มีหน้าที่ต้องจรรยาเพื่ออัดประจุเมื่อกระแสอัดประจุยังคงมีค่าสูงกว่าค่าต่ำสุดที่กำหนดในโหมดตัดกระแส (Cut-off mode) ในที่นี้เลือกใช้รีเลย์ที่มีหน้าสัมผัส 2 ชุด โดยใช้หน้าสัมผัสแบบปกติเปิด (Normally open: NO) ต่ออนุกรมกับขาเบสของ Tip 32C และหน้าสัมผัสแบบปกติปิด (Normally closed: NC) ต่ออนุกรมกับขลวดของรีเลย์ R2 เพื่อทำหน้าที่เป็นหน้าสัมผัสแบบยักระหว่างกัน (Interlocking contact)

2) รีเลย์ R2 มีหน้าที่ยุติการอัดประจุทันทีที่กระแสอัดประจุลดต่ำลงถึงค่าต่ำสุดที่กำหนดในโหมดตัดกระแส (Cutoff mode) ในที่นี้เลือกใช้รีเลย์ที่มีหน้าสัมผัส NC 1 ชุด โดยต่ออนุกรมกับขลวดของรีเลย์ R1 เพื่อทำหน้าที่เป็นหน้าสัมผัสแบบยักระหว่างกัน

3) สวิตช์ S1 มีหน้าที่ตัดและต้องจรรยาระหว่างแหล่งจ่ายพลังงานกับตัวควบคุมการอัดประจุ ในที่นี้เลือกใช้สวิตช์เปิด-ปิดธรรมดา (Toggle switch) ที่มีหน้าสัมผัส NO 1 ชุด โดยต่อคั่นระหว่างแหล่งจ่ายไฟกับตัวควบคุมการอัดประจุ

4) สวิตช์ S2 ช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถเลือกรูปแบบการทำงานของตัวควบคุมการอัดประจุว่าเป็นโหมดตัดกระแสหรือไม่ตัดกระแส (Non-cutoff mode) ในที่นี้เลือกใช้สวิตช์เปิด-ปิดธรรมดาที่มีหน้าสัมผัส NO 2 ชุด และ NC 1 ชุด โดยต่อหน้าสัมผัส NO ชุดแรกขนานกับหน้าสัมผัส NO ของรีเลย์ R1 เพื่อควบคุมการขับ Tip 32C และต่อ NO ชุดที่สองระหว่างขาเบสของ BD139 ในวงจรของรีเลย์ R2 กับกราวด์ของระบบ และใช้หน้าสัมผัส NC ต่ออนุกรมกับขลวดของรีเลย์ R1 เพื่อป้องกันการดำเนินงานของรีเลย์ทั้งสองในโหมดไม่ตัดกระแส อย่างไรก็ตาม ถ้ากดสวิตช์ S2 เพื่อเลือกใช้งานโหมดไม่ตัดกระแสจะทำให้การอัดประจุเริ่มต้นทันที

5) สวิตช์ S3 ช่วยให้ผู้ใช้งานเริ่มกระบวนการอัดประจุในโหมดตัดกระแส ในที่นี้เลือกใช้สวิตช์ปุ่มกด (Push-button switch) ที่มีหน้าสัมผัส NO 2 ชุด โดยต่อหน้าสัมผัสชุดแรกขนานกับ NO ของรีเลย์ R1 เพื่อเริ่มขับ Tip 32C และต่อหน้าสัมผัสอีกชุดระหว่างขาเบสของ BD139 ในวงจรของรีเลย์ R2 กับกราวด์ของระบบเพื่อป้องกันการดำเนินงานของรีเลย์ R2 ในขณะที่เริ่มอัดประจุในโหมดตัดกระแส

6) ไดโอดเปล่งแสงหรือหลอดแอลอีดี (Light emitting diode: LED) 2 หลอด มีหน้าที่แสดงสถานะการทำงานของตัวควบคุมการอัดประจุ โดยใช้หลอด L1 แสดงการเชื่อมต่อแหล่งพลังงานอัดประจุเข้ากับตัวควบคุมฯ ในขณะที่หลอด L2 แสดงสถานะของระดับกระแสอัดประจุที่สูงกว่าค่าต่ำสุดที่กำหนด

หลังจากกดสวิตช์ S1 เพื่อให้วงจรเตรียมพร้อมในการเริ่มอัดประจุ ทำให้หลอด L1 สว่างขึ้น ในกรณีที่กด S2 เพื่อเลือกให้ตัวควบคุมการอัดประจุทำงานในโหมดตัดกระแสแล้ว เมื่อกดสวิตช์ S3 ทำให้ตัวควบคุมการอัดประจุเริ่มทำงานเพราะมีการส่งสัญญาณพีคเบิลยูเอ็มให้กับ

Tip 32C จึงเกิดการไหลของกระแสอัดประจุและเกิดแรงดันตกคร่อมตัวต้านทาน 0.1Ω ส่งผลให้วงจรเปรียบเทียบกับสร้างลอจิกสูงทำให้หลอด L2 สว่างขึ้นเพื่อแสดงว่าเกิดการอัดประจุ นอกจากนี้ผลของการกด S3 ดังกล่าวยังทำให้รีเลย์ R2 ไม่ทำงาน ดังนั้นหน้าสัมผัส NC ของ R2 จึงต้องวงจรให้รีเลย์ R1 ทำงาน ส่งผลให้หน้าสัมผัสทั้งสองของ R1 เปลี่ยนสถานะ นั่นคือหน้าสัมผัส NO ต้องวงจรให้การขับ Tip 32C เป็นไปอย่างต่อเนื่อง (แม้ว่าหน้าสัมผัสของ S3 เปิดออกก็ตาม) และหน้าสัมผัส NC ต้องวงจรเพื่อไม่ให้รีเลย์ R2 ทำงาน

หลังจากที่กระแสอัดประจุมีค่าลดลงถึงค่าที่ปรับตั้งไว้ วงจรเปรียบเทียบกับแรงดันสร้างลอจิกต่ำทำให้รีเลย์ R1 หยุดทำงาน หน้าสัมผัสทั้งสองของ R1 เปลี่ยนกลับสถานะเดิม นั่นคือหน้าสัมผัส NO ทำให้การอัดประจุสิ้นสุดลงเพราะไม่มีสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มให้กับ Tip 32C ส่วนหน้าสัมผัส NC ทำให้รีเลย์ R2 ทำงาน ส่งผลให้หน้าสัมผัส NC ของ R2 เปิดวงจรเพื่อป้องกันการกลับมาทำงานอีกครั้งของรีเลย์ R1 (ความพลัวของสัญญาณ V_{out1} อาจทำให้วงจรเปรียบเทียบกับแรงดันสร้างลอจิกสูงและต่ำสลับกันทำให้หน้าสัมผัสของ R1 เปลี่ยนสถานะสลับไปมา)

ในกรณีที่กด S2 เพื่อเลือกให้ตัวควบคุมการอัดประจุทำงานในโหมดไม่ตัดกระแส หน้าสัมผัส NO ที่ต่อกับกราวด์และหน้าสัมผัส NC ของ S2 เปลี่ยนสถานะเพื่อไม่ให้รีเลย์ R1 และ R2 ทำงาน ในขณะที่หน้าสัมผัส NO ที่ต่อคร่อมกับ NO ของรีเลย์ R1 จะต้องวงจรให้มีการป้อนสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มเพื่อขับ Tip 32C อย่างต่อเนื่อง

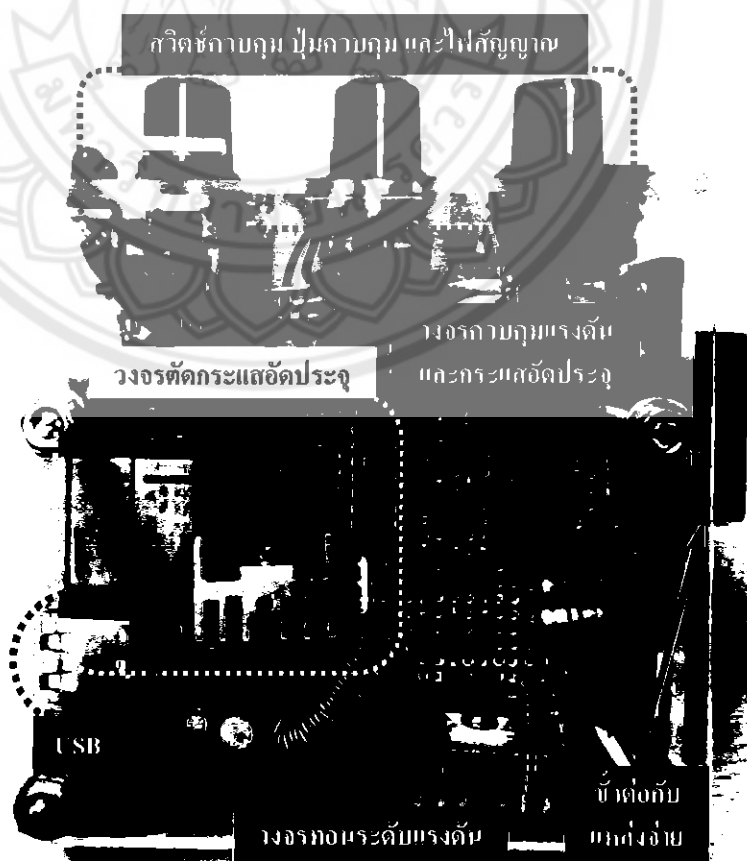
การใช้สวิตช์ S2 มีประโยชน์ต่อการใช้งานตัวควบคุมการอัดประจุโดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่ใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็นแหล่งจ่ายพลังงาน เนื่องจากกระแสอัดประจุมีค่าแปรผันโดยตรงกับความเข้มแสงในขณะนั้น ในระหว่างการอัดประจุนั้นความเข้มแสงมีโอกาสดลดลงอย่างรวดเร็วทำให้กระแสที่ได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์อาจมีค่าลดลงจนไม่เพียงพอต่อการอัดประจุ ซึ่งสถานการณ์นี้อาจเกิดขึ้นเพียงชั่วคราว ดังนั้นหากเลือกใช้งาน โหมดตัดกระแสจะทำให้การอัดประจุวงจรสิ้นสุดทันที แต่ถ้าหากเลือกใช้โหมดไม่ตัดกระแสจะทำให้วงจรยังคงทำงานได้อย่างต่อเนื่อง อย่างไรก็ตามการใช้งานใน โหมดไม่ตัดกระแสอาจมีข้อเสียคือทำให้เกิดสภาวะการอัดประจุเกิดได้

3.5 การประกอบตัวควบคุมการอัดประจุ

ในโครงการนี้ได้ออกแบบรูปทรงและสร้างวงจรของตัวควบคุมการอัดประจุขึ้นมา มีขนาด $10 \times 11.5 \times 5$ cm ซึ่งสามารถพกพาได้ ส่วนประกอบของชิ้นงานที่สร้างขึ้นแสดงดังรูปที่ 3.7 โดยจัดกลุ่มของอุปกรณ์ตามวงจรต่างๆที่ประกอบขึ้นเป็นตัวควบคุมการอัดประจุ นอกจากนี้ยังมี ขั้วต่อกับแหล่งจ่ายพลังงานและโหลดดังนี้

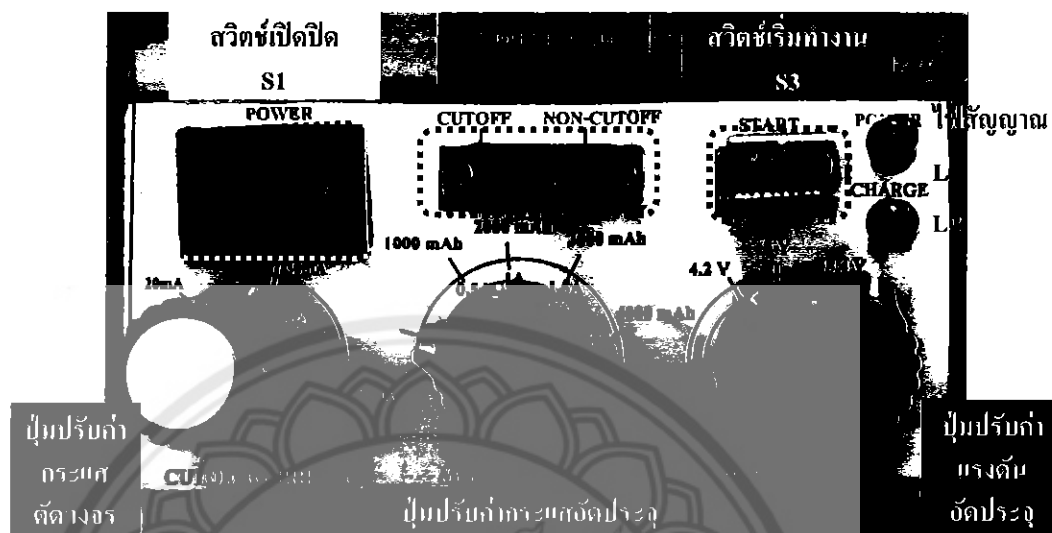
1) ขั้วต่อกับแหล่งจ่ายพลังงาน ในที่นี่ใช้ขั้วต่อ 2 แบบ โดยขั้วต่อแบบที่ 1 เป็นเด้ารับสำหรับอะแดปเตอร์ดังรูปที่ 3.7 ซึ่งในกรณีรับพลังงานจากแบตเตอรี่รถยนต์จะใช้ร่วมกับหัวต่อของตัวจุดบุหรี่ในรถยนต์ ส่วนขั้วต่อแบบที่ 2 เป็นเด้ารับสำหรับต่อตรงกับสายไฟขั้วบวกและลบของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ดังรูปที่ 3.7

2) ขั้วต่อกับโหลด ในที่นี่ใช้บัสอนุกรมอนุกรมประสงค์ หรือยูเอสบี (Universal serial bus: USB) ซึ่งสามารถต่อกับอุปกรณ์ได้หลากหลายชนิด ซึ่งสามารถต่อนำสายยูเอสบีอนุกรมประสงค์ (Universal USB) ที่สามารถเชื่อมกับโทรศัพท์เคลื่อนที่ได้หลายรุ่น ในกรณีที่ต้องนำแบตเตอรี่มาอัดประจุภายนอกตัวอุปกรณ์ เช่น แบตเตอรี่ของกล้องถ่ายภาพดิจิทัล เราสามารถประยุกต์ใช้กับแท่นอัดประจุอนุกรมประสงค์ได้ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 ส่วนประกอบของตัวควบคุมการอัดประจุ

ตำแหน่งของสวิตช์ควบคุมและปุ่มปรับค่าต่างๆ รวมทั้งไฟสัญญาณของตัวควบคุมการอัดประจุที่สร้างขึ้นแสดงดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 สวิตช์ควบคุม ปุ่มปรับค่า และไฟสัญญาณของตัวควบคุมการอัดประจุ

การใช้งานตัวควบคุมการอัดประจุมี 2 รูปแบบคือ โหมดตัดกระแสและโหมดไม่ตัดกระแส โดยเริ่มจากการนำแหล่งจ่ายพลังงานและโหลดที่ต้องการมาต่อเข้ากับขั้วต่อของตัวควบคุมการอัดประจุ จากนั้นกดสวิตช์ S1 เพื่อจ่ายไฟให้วงจรซึ่งแสดงสถานะด้วยหลอดแอลอีดีสีสีแดง (L1) ติดสว่าง ถ้าต้องการใช้งานในโหมดตัดกระแส ให้เลื่อนคันโยกของสวิตช์ S2 ไปยังตำแหน่งที่ระบุว่า Cutoff แล้วตั้งค่าแรงดันอัดประจุด้วยปุ่ม Voltage และตั้งค่ากระแสอัดประจุสูงสุดด้วยปุ่ม Max. Current รวมทั้งตั้งค่าระดับกระแสที่ต้องการให้ตัวควบคุมฯ ตัดวงจรด้วยปุ่ม Cutoff current (เช่น ที่ 20 mA) จากนั้นกดสวิตช์ S3 การอัดประจุจึงเริ่มขึ้นซึ่งแสดงสถานะด้วยหลอดแอลอีดีสีเขียว (L2) ติดสว่าง จนกระทั่งเข้าสู่สภาวะการอัดประจุเต็มซึ่งแสดงสถานะด้วยหลอด L2ดับ ถ้าต้องการใช้งานในโหมดไม่ตัดกระแส ให้ตั้งค่าแรงดันอัดประจุด้วยปุ่ม Voltage และตั้งค่ากระแสอัดประจุสูงสุดด้วยปุ่ม Max. Current และ “ควร” ตั้งค่าระดับกระแสที่บ่งบอกถึงสภาวะการอัดประจุเต็มด้วยปุ่ม Cutoff current (เช่น ที่ 20 mA) แล้วเริ่มการอัดประจุโดยเลื่อนคันโยกของสวิตช์ S2 ไปยังตำแหน่งที่ระบุว่า Non-cutoff การอัดประจุจะเริ่มทันทีที่โดยแสดงสถานะด้วยหลอด L2 ติดสว่าง จนกระทั่งเข้าสู่สภาวะการอัดประจุเต็ม หลอด L2 จะกระพริบเตือนจนดับลงในที่สุด

บทที่ 4

ผลการทดสอบ

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดสอบตัวควบคุมการอัดประจุ หลังจากที่ได้สร้างตัวควบคุมการอัดประจุแล้วจึงได้ทำการทดสอบการทำงานของตัวควบคุมการอัดประจุ โดยแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้

- 1) การทดสอบการทำงานของวงจรทอนระดับแรงดัน เพื่อตรวจสอบความสามารถในการควบคุมแรงดันและกระแสที่ได้ออกแบบไว้พร้อมทั้งหาค่าคัตไชเกิล และหาค่าประสิทธิภาพของวงจรทอนระดับแรงดัน ซึ่งรับพลังงานไฟฟ้าจากไฟฟ้าบ้าน แบตเตอรี่รถยนต์ และแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อนำไปจ่ายแก่โหลดตัวต้านทาน
- 2) การทดสอบวงจรตัดกระแสอัดประจุ เพื่อตรวจสอบความสามารถในการตัดวงจรเมื่อกระแสอัดประจุต่ำกว่าค่าที่ตั้งไว้
- 3) การทดสอบตัวควบคุมการอัดประจุ เพื่อตรวจสอบการทำงานของวงจรควบคุมแรงดันและกระแสอัดประจุ และวงจรตัดกระแสอัดประจุ เมื่อต่อกับโหลดที่เป็นแบตเตอรี่ของโทรศัพท์เคลื่อนที่และกล้องถ่ายภาพดิจิทัล

4.1 การทดสอบการทำงานของวงจรทอนระดับแรงดัน

การทดสอบการทำงานของวงจรทอนระดับแรงดันมีเป้าหมายเพื่อตรวจสอบการจำกัดค่าแรงดันและกระแสให้เป็นไปตามค่าที่ออกแบบไว้ ซึ่งจะถูกรับตั้งด้วยค่า R_v และ R_i ตามลำดับ โดยในการทดสอบมีการจำกัดค่าแรงดันและกระแส เพื่อหาค่าแรงดันและกระแสด้านออก และค่าคัตไชเกิล รวมทั้งหาค่าประสิทธิภาพของวงจร ซึ่งผลการทดสอบจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

4.1.1 การควบคุมค่าแรงดันและจำกัดค่ากระแสด้านออก

การควบคุมค่าแรงดันและจำกัดค่ากระแสด้านออกมีเป้าหมายเพื่อตรวจสอบแรงดันและแรงดันและกระแสด้านออกด้วยการจำกัดค่าของ R_v และ R_i โดยจะพิจารณาค่าแรงดันและกระแสด้านออกเมื่อต่อกับโหลดตัวต้าน 3 ค่า คือ 5 Ω 10 Ω และ 18 Ω ซึ่งผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แรงดันและกระแสด้านออกของวงจรควบคุมแรงดันและกระแสอัตโนมัติ

ค่าจากการคำนวณ		ค่าจากการทดลอง						
		ไม่ต่อโหลด	ตัวต้านทาน 5 Ω		ตัวต้านทาน 10 Ω		ตัวต้านทาน 18 Ω	
V_{out} (V)	I_{out} (A)	V_{oc} (V)	V_{LOAD} (V)	I_{LOAD} (A)	V_{LOAD} (V)	I_{LOAD} (A)	V_{LOAD} (V)	I_{LOAD} (A)
4.5	0.4	4.4	2.042	0.4084	4.080	0.4080	4.291	0.2384
4.5	0.8	4.4	4.048	0.8096	4.202	0.4202	4.291	0.2384
4.5	1.2	4.4	4.331	0.8662	4.204	0.4204	4.293	0.2385
4.5	2	4.4	4.335	0.8670	4.206	0.4206	4.295	0.2386
4.5	ไม่จำกัด	4.4	4.336	0.8672	4.206	0.4206	4.301	0.2389
5	0.4	4.9	2.038	0.4076	4.096	0.4096	4.773	0.2652
5	0.8	4.9	4.047	0.8094	4.665	0.4665	4.773	0.2652
5	1.2	4.9	4.660	0.9320	4.666	0.4666	4.773	0.2652
5	2	4.9	4.682	0.9364	4.666	0.4666	4.773	0.2652
5	ไม่จำกัด	4.9	4.708	0.9416	4.666	0.4666	4.779	0.2655
8.5	0.4	8.4	2.040	0.4080	4.082	0.4082	7.350	0.4083
8.5	0.8	8.4	4.048	0.8096	8.090	0.8090	8.250	0.4583
8.5	1.2	8.4	6.080	1.2160	8.180	0.8180	8.230	0.4572
8.5	2	8.4	8.040	1.6080	8.180	0.8180	8.240	0.4578
8.5	ไม่จำกัด	8.4	8.040	1.6080	8.190	0.8190	8.250	0.4583

จากตารางที่ 4.1 จะเห็นว่าการจำกัดกระแสที่ 2 A ไม่สามารถทำได้ เนื่องจากการจำกัดแรงดันเข้ามารวมด้วย ทำให้แรงดันตกคร่อมตัวต้านทานมีค่าสูงสุดใกล้เคียงกับค่าแรงดันที่จำกัดไว้ ส่งผลให้กระแสไหลผ่านโหลดตัวต้านทานไม่ถึงค่าที่จำกัดไว้ได้ ซึ่งเป็นไปตามกฎของโอห์ม นอกจากนี้ยังพบว่าตัวต้านทาน 5 Ω สามารถรับกระแสได้มากกว่าตัวต้านทาน 10 Ω และ 18 Ω ถ้าเปรียบเทียบกันที่ระดับแรงดันเดียวกัน เนื่องจากมีค่าความต้านทานค่าที่สุด ทำให้ตัวต้านทาน 5 Ω สามารถจำกัดค่ากระแส 1.2 A ได้ที่การจำกัดแรงดัน 8.5 V ซึ่งตัวต้านทาน 10 Ω และ 18 Ω ไม่สามารถทำได้เนื่องจากการจำกัดค่าแรงดันทำให้ค่ากระแสเพิ่มไม่ถึง 1.2 A ดังนั้นวงจรควบคุมแรงดันและกระแสสามารถจำกัดค่าแรงดันด้านออกได้ทุกค่าและค่ากระแสได้ทุกค่าสำหรับกรณีที่ตัวต้านทานมีค่าต่ำ

4.1.2 การวัดค่าคิวดั้ไซเคิลโดยใช่ออสซิลโลสโคป

หลังจากการทดสอบความสามารถในการควบคุมค่าแรงดันและจำกัดกระแสด้านออก แล้ว เรานำวงจรทอนระดับแรงดันมาต่อโหลดตัวต้านทานขนาด $5\ \Omega$ โดยควบคุมค่าแรงดันและจำกัดกระแสด้านออกพร้อมทั้งใช่ออสซิลโลสโคปจับสัญญาณของแรงดันและกระแสด้านออก แล้วอ่านค่าคิวดั้ไซเคิลที่ได้จากรูปสัญญาณนี้เปรียบเทียบกับค่าคิวดั้ไซเคิลจากการคำนวณซึ่งหาได้จากอัตราส่วนของแรงดันด้านออกต่อแรงดันด้านเข้า โดยค่าต่างๆที่ได้จากการทดสอบนี้แสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าคิวดั้ไซเคิลของวงจรทอนระดับแรงดัน

V_{out} (V)	I_{out} (A)	V_{in} (V)	V_{LOAD} (V)	I_{LOAD} (A)	D	
					จากสัญญาณ	จากการคำนวณ
4.5	0.4	15.07	2.043	0.411	0.188	0.136
4.5	0.8	15.05	4.052	0.817	0.313	0.269
4.5	ไม่จำกัด	15.05	4.376	0.881	0.375	0.291
5	0.4	15.07	2.039	0.411	0.188	0.135
5	0.8	15.06	4.052	0.817	0.313	0.269
5	ไม่จำกัด	15.05	4.834	0.974	0.406	0.321
8.5	0.4	15.07	2.042	0.411	0.188	0.136
8.5	0.8	15.05	4.054	0.817	0.313	0.269
8.5	ไม่จำกัด	15.05	8.112	1.634	0.625	0.540

จากการทดสอบพบว่า ที่การจำกัดกระแสด้านออก 0.4 A ซึ่งเป็นค่ากระแสต่ำ ในการจำกัดแรงดันทั้ง 3 ค่า จะได้ค่าคิวดั้ไซเคิลมีค่าเช่นกันประมาณ 0.138 เนื่องจากกระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทานถูกจำกัดทำให้แรงดันตกคร่อมตัวต้านทานมีค่าต่ำลงตามไปด้วยประมาณ 2.04 V โดยที่วงจรนี้สามารถจ่ายแรงดันให้กับตัวต้านทานสูงกว่านี้ได้ แต่เมื่อวัดค่าคิวดั้ไซเคิลจากรูปสัญญาณในรูปที่ 4.1 ก) 4.1 ค) และ 4.1 จ) มีค่าเท่ากับ 0.188 ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนอยู่บ้าง แต่ถือว่ายังสามารถนำไปใช้งานได้ ส่วนกรณีไม่จำกัดกระแสจะได้ค่ากระแสที่สูง (มากกว่า 0.8 A) ทั้ง 3 ระดับแรงดัน แต่จำกัดแรงดันไว้ที่ 8.5 V จะทำให้จ่ายกระแสได้มากที่สุด ทำให้ค่าคิวดั้ไซเคิลมีค่าสูงกว่า 0.5 โดยต่างจากกรณีการจำกัดแรงดันที่ 4.5 V และ 5 V ซึ่งมีค่าคิวดั้ไซเคิลต่ำกว่า 0.5 เมื่อเปรียบเทียบค่าคิวดั้ไซเคิลจากรูปสัญญาณในรูปที่ 4.1 ข) 4.1 ง) และ 4.1 ฉ) กับค่าที่ได้จากการคำนวณแล้วพบว่ามีความคลาดเคลื่อนเล็กน้อย นอกจากนี้รูปสัญญาณทั้งหมดในรูปที่ 4.1 จะสังเกตเห็นการกระชากของสัญญาณ (Spike) ในตำแหน่งที่เกิดการสวิตชิงเพราะกระแสของตัวเหนี่ยวนำไม่สามารถเปลี่ยนแปลงฉับพลันได้ โดยเกิดจากการตัดต่อวงจรของ Tip 32C ในสภาวะชั่วคราว ซึ่งถือว่ามีผลกระทบต่อวงจรน้อยมาก ดังนั้นการทดสอบหาค่าคิวดั้ไซเคิลจากรูปสัญญาณมีความคลาดเคลื่อน

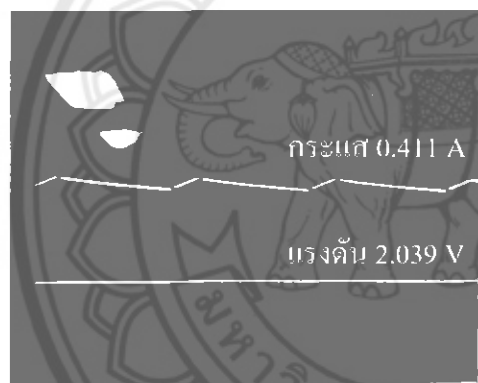
จากค่าที่คำนวณประมาณ 0.053 ถึง 0.085 ซึ่งอาจเกิดจากความไม่เป็นอุดมคติของอุปกรณ์ในวงจร หรือการสูญเสีย (Power losses) ในส่วนต่างๆของวงจรทอนระดับแรงดัน



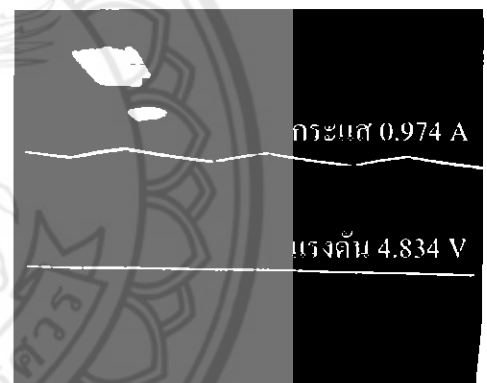
ก) แรงดันปรับตั้ง 4.5 V จำกัดกระแส 0.4 A



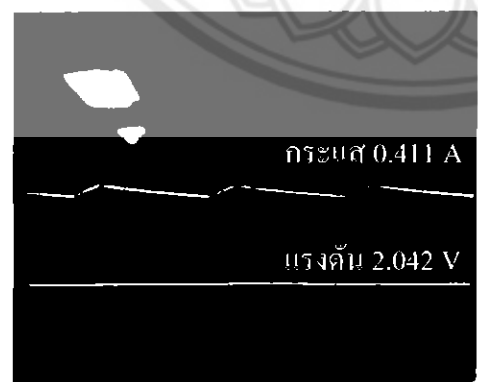
ข) แรงดันปรับตั้ง 4.5 V ไม่จำกัดกระแส



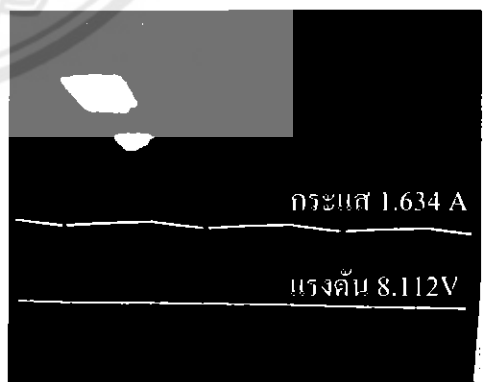
ค) แรงดันปรับตั้ง 5 V จำกัดกระแส 0.4 A



ง) แรงดันปรับตั้ง 5 V ไม่จำกัดกระแส



จ) แรงดันปรับตั้ง 8.4 V จำกัดกระแส 0.4 A



ฉ) แรงดันปรับตั้ง 8.4 V ไม่จำกัดกระแส

รูปที่ 4.1 รูปสัญญาณแรงดันและกระแสด้านออกของวงจรทอนระดับแรงดัน

4.1.3 การทดสอบหาค่าประสิทธิภาพ

ในการทดสอบนี้เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าประสิทธิภาพของวงจรทอนระดับแรงดัน โดยใช้แหล่งจ่ายพลังงาน 3 ประเภท คือ ไฟบ้านซึ่งจ่ายผ่านอะแดปเตอร์ขนาดแรงดัน 19 V 4.74 A แบตเตอรี่รถยนต์ขนาดแรงดัน 12 V และแผงเซลล์แสงอาทิตย์พิกัด 10 W แรงดัน 17.2 V กระแส 0.58 A ในการทดสอบนี้มีการคุมค่าแรงดันและจำกัดกระแสสูงสุดด้านออก โดยต่อกับตัวต้านทาน 2 ค่าคือ 2.5 Ω และ 5 Ω แล้ววัดค่าแรงดันและกระแสทั้งด้านเข้าและด้านออกเพื่อนำมาคำนวณหา ค่าประสิทธิภาพ ผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 4.3 ถึง 4.8

จากสมการที่ (2.12) เราสามารถหาค่าประสิทธิภาพของวงจรทอนระดับแรงดันได้จาก สมการที่ (4.1)

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% = \frac{V_{LOAD} \cdot I_{LOAD}}{V_{in} \cdot I_{in}} \times 100\% \quad (4.1)$$

โดยที่ V_{LOAD} คือ แรงดันตกคร่อมโหลด (V)

I_{LOAD} คือ กระแสที่ไหลผ่านโหลด (A)

V_{in} คือ แรงดันด้านเข้าของวงจรทอนระดับแรงดัน (V)

I_{in} คือ กระแสด้านเข้าของวงจรทอนระดับแรงดัน (A)

ตารางที่ 4.3 ประสิทธิภาพของวงจรทอนระดับแรงดันเมื่อใช้ไฟบ้านจ่ายผ่านอะแดปเตอร์และ ต่อโหลดตัวต้านทาน 2.5 Ω

V_{out} (V)	I_{out} (A)	ตัวต้านทาน 2.5 Ω				
		V_{LOAD} (V)	I_{LOAD} (A)	V_{in} (V)	I_{in} (A)	η (%)
4.23	0.4	1.025	0.410	18.95	0.084	26.40
	0.8	2.023	0.809	18.83	0.190	45.74
	1.2	3.027	1.211	18.66	0.341	57.61
	2	4.044	1.618	18.41	0.561	63.35
	ไม่จำกัด	4.036	1.614	18.41	0.559	63.30
4.99	0.4	1.026	0.410	18.95	0.084	26.43
	0.8	2.017	0.807	18.84	0.181	47.73
	1.2	3.027	1.211	18.66	0.339	57.95
	2	4.752	1.901	18.19	0.758	65.52
	ไม่จำกัด	4.752	1.901	18.19	0.757	65.60
8.44	0.4	1.027	0.411	18.95	0.084	26.52
	0.8	2.020	0.808	18.83	0.190	45.62
	1.2	3.024	1.210	18.66	0.339	57.84
	2	5.167	2.067	18.04	0.896	66.10
	ไม่จำกัด	-	-	-	-	-

ตารางที่ 4.4 ประสิทธิภาพของวงจรทอนระดับแรงดันเมื่อใช้ไฟบ้านจ่ายผ่านอะแดปเตอร์และ
ต่อโหลดตัวต้านทาน 5 Ω

V_{out} (V)	I_{out} (A)	ตัวต้านทาน 5 Ω				
		V_{LOAD} (V)	I_{LOAD} (A)	V_{in} (V)	I_{in} (A)	η (%)
4.23	0.4	2.048	0.410	18.93	0.107	41.46
	0.8	4.066	0.813	18.73	0.283	62.36
	1.2	4.148	0.830	18.72	0.292	62.98
	2	4.148	0.830	18.72	0.292	62.98
	ไม่จำกัด	4.148	0.830	18.72	0.292	62.98
4.99	0.4	2.056	0.411	18.92	0.108	41.35
	0.8	4.068	0.814	18.72	0.283	62.50
	1.2	4.869	0.974	18.61	0.380	67.06
	2	4.869	0.974	18.61	0.380	67.06
	ไม่จำกัด	4.869	0.974	18.61	0.380	67.06
8.44	0.4	2.048	0.410	18.93	0.107	41.45
	0.8	4.059	0.812	18.73	0.283	62.18
	1.2	6.090	1.218	18.41	0.564	71.44
	2	8.000	1.600	18.00	0.933	76.22
	ไม่จำกัด	8.000	1.600	18.00	0.933	76.22

จากตารางที่ 4.3 และ 4.4 จะเห็นว่าเมื่อใช้อะแดปเตอร์ขนาดแรงดัน 19 V กระแส 4.74 A เป็นแหล่งจ่ายพลังงานให้กับวงจรควบคุมแรงดันและกระแสอัดประจุ เมื่อจำกัดค่ากระแสที่ 0.4 A และจำกัดแรงดันทั้ง 3 กรณี พบว่าค่าประสิทธิภาพของวงจรเมื่อต่อตัวต้านทาน 5 Ω มีค่าสูงกว่าวงจรที่ต่อกับตัวต้านทาน 2.5 Ω เนื่องจากมีค่าแรงดันตกคร่อมตัวต้านทาน 5 Ω สูงกว่า นอกจากนี้ค่าประสิทธิภาพที่การจำกัดแรงดันค่าๆหนึ่งจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามการจำกัดกระแสที่สูงขึ้น

จากตารางที่ 4.5 และ 4.6 จะเห็นว่าเมื่อใช้แบตเตอรี่รถยนต์ขนาดแรงดัน 12 V เป็นแหล่งจ่ายพลังงานให้กับวงจรควบคุมแรงดันและกระแสอัดประจุ เมื่อจำกัดค่ากระแสที่ 0.4 A และจำกัดแรงดันทั้ง 3 กรณี พบว่าค่าประสิทธิภาพของวงจรเมื่อต่อตัวต้านทาน 5 Ω มีค่าสูงกว่าวงจรที่ต่อกับตัวต้านทาน 2.5 Ω เนื่องจากมีค่าแรงดันตกคร่อมตัวต้านทาน 5 Ω สูงกว่า นอกจากนี้ค่าประสิทธิภาพที่การจำกัดแรงดันค่าๆหนึ่งจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามการจำกัดกระแสที่สูงขึ้น ซึ่งผลที่ได้นี้เหมือนกับกรณีใช้อะแดปเตอร์เป็นแหล่งพลังงาน

ตารางที่ 4.5 ประสิทธิภาพของวงจรทอนระดับแรงดันเมื่อจ่ายไฟด้วยแบตเตอรี่รถยนต์และ
ต่อโหลดตัวต้านทาน 2.5 Ω

V_{out} (V)	I_{out} (A)	ตัวต้านทาน 2.5 Ω				
		V_{LOAD} (V)	I_{LOAD} (A)	V_{in} (V)	I_{in} (A)	η (%)
4.23	0.4	1.021	0.408	12.37	0.107	31.50
	0.8	2.017	0.810	12.12	0.257	52.24
	1.2	3.030	0.829	11.69	0.514	61.12
	2	4.059	0.829	10.90	0.957	63.18
	ไม่จำกัด	4.052	0.829	10.86	0.959	63.06
4.99	0.4	1.022	0.409	12.38	0.102	33.09
	0.8	2.018	0.810	12.13	0.257	52.25
	1.2	3.030	0.973	11.69	0.514	61.12
	2	4.750	0.973	10.09	1.470	60.85
	ไม่จำกัด	4.750	0.973	10.03	1.496	60.15
8.44	0.4	1.021	0.409	12.38	0.108	31.19
	0.8	2.017	0.810	12.12	0.256	52.45
	1.2	3.030	1.217	11.69	0.541	58.07
	2	5.141	1.560	9.10	2.060	56.40
	ไม่จำกัด	5.135	1.560	9.10	2.058	56.32

ตารางที่ 4.6 ประสิทธิภาพของวงจรทอนระดับแรงดันเมื่อจ่ายไฟด้วยแบตเตอรี่รถยนต์และ
ต่อโหลดตัวต้านทาน 5 Ω

V_{out} (V)	I_{out} (A)	ตัวต้านทาน 5 Ω				
		V_{LOAD} (V)	I_{LOAD} (A)	V_{in} (V)	I_{in} (A)	η (%)
4.23	0.4	2.042	0.4084	12.27	0.140	48.55
	0.8	4.050	0.807	11.81	0.405	68.56
	1.2	4.143	1.212	11.78	0.421	69.22
	2	4.143	1.623	11.78	0.421	69.22
	ไม่จำกัด	4.143	1.621	11.78	0.421	69.22
4.99	0.4	2.044	0.409	12.28	0.140	48.60
	0.8	4.051	0.807	11.82	0.404	68.73
	1.2	4.867	1.212	11.54	0.563	72.92
	2	4.867	1.9	11.54	0.563	72.92
	ไม่จำกัด	4.867	1.9	11.58	0.555	73.71
8.44	0.4	2.044	0.4084	12.30	0.136	49.95
	0.8	4.051	0.807	11.58	0.400	70.86
	1.2	6.084	1.212	11.06	0.863	77.56
	2	7.800	2.056	9.85	1.569	78.73
	ไม่จำกัด	7.800	2.054	9.86	1.568	78.70

ตารางที่ 4.7 ประสิทธิภาพของวงจรทอนระดับแรงดันเมื่อจ่ายไฟด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์และ
ต่อโหลดตัวต้านทาน 2.5 Ω

V_{out} (V)	I_{out} (A)	ตัวต้านทาน 2.5 Ω				
		V_{LOAD} (V)	I_{LOAD} (A)	V_{in} (V)	I_{in} (A)	η (%)
4.23	0.4	1.049	0.420	18.06	0.087	28.01
	0.8	2.035	0.814	17.34	0.196	48.74
	1.2	-	-	-	-	-
	2	-	-	-	-	-
	ไม่จำกัด	-	-	-	-	-
4.99	0.4	1.110	0.444	18.05	0.093	29.36
	0.8	2.026	0.810	17.39	0.195	48.42
	1.2	-	-	-	-	-
	2	-	-	-	-	-
	ไม่จำกัด	-	-	-	-	-
8.44	0.4	1.025	0.410	18.43	0.085	26.83
	0.8	2.018	0.807	17.67	0.194	47.52
	1.2	-	-	-	-	-
	2	-	-	-	-	-
	ไม่จำกัด	-	-	-	-	-

ตารางที่ 4.8 ประสิทธิภาพของวงจรทอนระดับแรงดันเมื่อจ่ายไฟด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์และ
ต่อโหลดตัวต้านทาน 5 Ω

V_{out} (V)	I_{out} (A)	ตัวต้านทาน 5 Ω				
		V_{LOAD} (V)	I_{LOAD} (A)	V_{in} (V)	I_{in} (A)	η (%)
4.23	0.4	2.046	0.409	17.84	0.111	42.28
	0.8	-	-	-	-	-
	1.2	-	-	-	-	-
	2	-	-	-	-	-
	ไม่จำกัด	-	-	-	-	-
4.99	0.4	2.045	0.409	17.99	0.110	42.27
	0.8	-	-	-	-	-
	1.2	-	-	-	-	-
	2	-	-	-	-	-
	ไม่จำกัด	-	-	-	-	-
8.44	0.4	2.044	0.409	18.01	0.110	42.18
	0.8	-	-	-	-	-
	1.2	-	-	-	-	-
	2	-	-	-	-	-
	ไม่จำกัด	-	-	-	-	-

จากตารางที่ 4.7 และ 4.8 จะเห็นว่าเมื่อใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 10 W แรงดัน 17.2 V กระแส 0.58 A เป็นแหล่งจ่ายพลังงานให้กับวงจรควบคุมแรงดันและกระแสอัดประจุ สามารถจำกัดค่ากระแสได้เพียง 0.8 A เมื่อต่อวงจรกับตัวต้านทาน 2.5 Ω และจำกัดค่ากระแสได้เพียง 0.4 A เมื่อต่อวงจรกับตัวต้านทาน 5 Ω เนื่องจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์จ่ายกระแสให้กับตัวต้านทานได้ไม่เกิน 0.8 A ทำให้การทดสอบที่การจำกัดกระแสสูงกว่า 0.8 A ทำให้ค่าแรงดันและกระแสด้านเข้าผิดปกติจากความเป็นจริง ถือเป็นข้อจำกัดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์รุ่นที่นำมาทดลองกับวงจรนี้

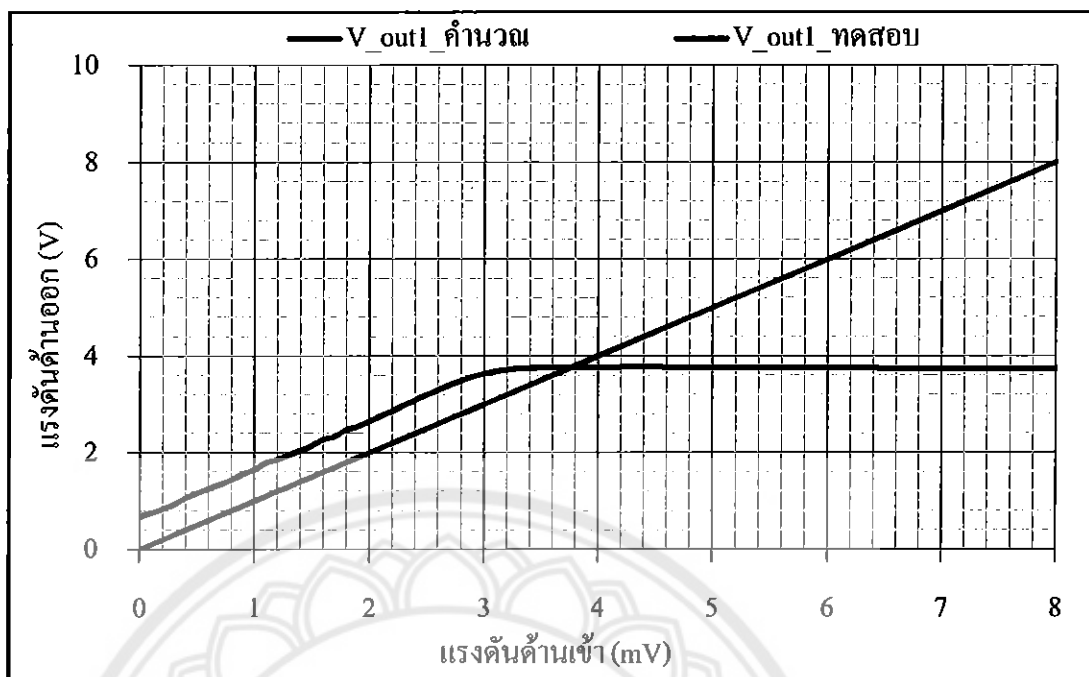
จากการทดสอบที่ผ่านมาสรุปได้ว่า เมื่อใช้อะแดปเตอร์ แบตเตอรี่รถยนต์และแผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็นแหล่งจ่ายพลังงานเพื่อจ่ายให้วงจรควบคุมแรงดันและกระแสอัดประจุ ซึ่งได้ค่าประสิทธิภาพเป็นไปในทางเดียวกันคือ เมื่อจำกัดค่ากระแสที่ 0.4 A และจำกัดแรงดันทั้ง 3 กรณีพบว่าค่าประสิทธิภาพของวงจรที่ต่อตัวต้านทาน 5 Ω มีค่าสูงกว่าวงจรที่ต่อกับตัวต้านทาน 2.5 Ω เนื่องจากมีค่าแรงดันตกคร่อมตัวต้านทาน 5 Ω สูงกว่าตัวต้านทาน 2.5 Ω ที่กระแสไหลผ่านตัวต้านทานเท่ากัน ซึ่งเป็นตามกฎของโอห์ม นอกจากนี้ค่าประสิทธิภาพที่การจำกัดแรงดันค่าๆหนึ่งจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามการจำกัดกระแสที่สูงขึ้น

4.2 การทดสอบวงจรตัดกระแสอัดประจุ

ในโครงการนี้ได้ออกแบบวงจร และทดสอบวงจรการสิ้นสุดการอัดประจุ เพื่อจำกัดกระแสอัดประจุเมื่อตามค่าที่ตั้งไว้ ทำให้วงจรหยุดทำงาน โดยในวงจรตัดกระแสอัดประจุประกอบด้วยวงจรขยายไม่กลับขั้ว และวงจรเปรียบเทียบแรงดัน ซึ่งผลการทดลองจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

4.2.1 การทดสอบวงจรขยายไม่กลับขั้ว

การทดสอบวงจรขยายไม่กลับขั้วมีเป้าหมายเพื่อตรวจสอบค่าแรงดันด้านออกของวงจรขยายไม่กลับขั้ว (V_{out}) สำหรับกำหนดค่าแรงดันอ้างอิงให้กับวงจรเปรียบเทียบแรงดัน โดยในการทดสอบจะป้อนแรงดันด้านเข้า (V_{in}) เพิ่มขึ้นละ 0.1 mV ให้กับวงจรขยายไม่กลับขั้วแล้วทำการวัดค่าแรงดัน V_{out} แล้วบันทึกผล แล้วนำค่าแรงดัน V_{out} ที่ได้จากการทดสอบมาเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณ ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.2

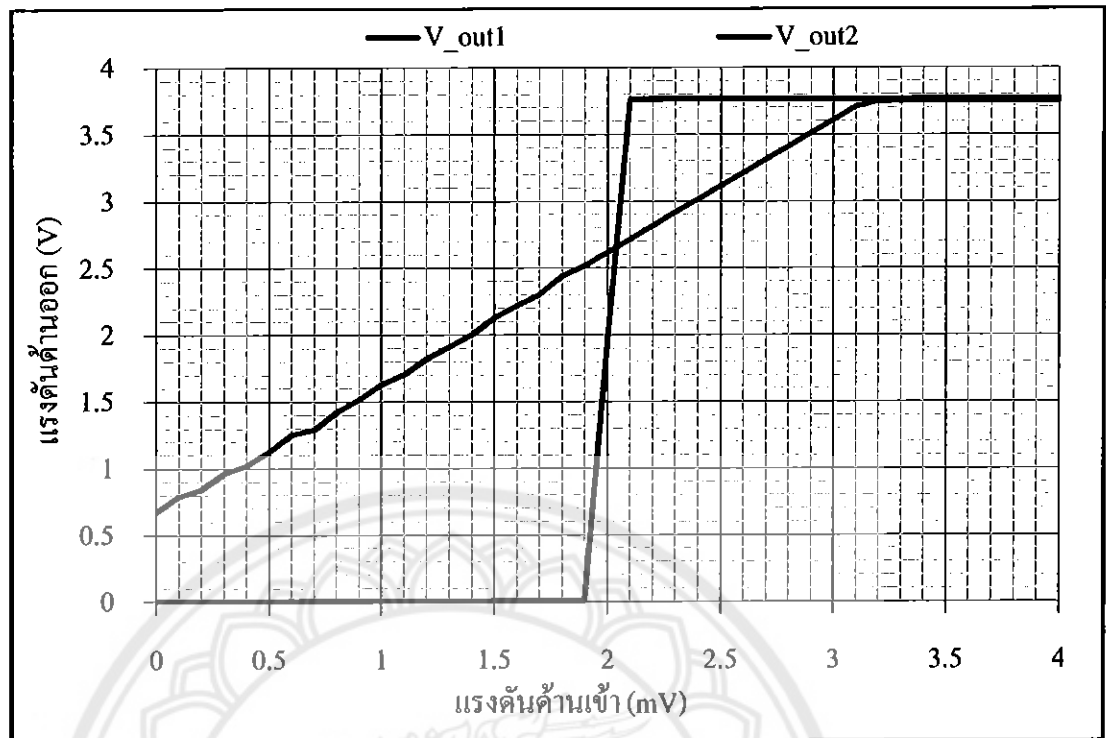


รูปที่ 4.2 ผลการทดสอบวงจรขยายไม่กลับขั้ว

จากรูปที่ 4.2 จะเห็นว่าเมื่อป้อนแรงดันด้านเข้าของวงจรขยายไม่กลับขั้ว แล้ววัดค่าแรงดันด้านออก V_{out1} พบว่าค่าที่ได้มีคลาดเคลื่อนเมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณ เนื่องจากไฟเลี้ยงที่จ่ายให้วงจรมีค่า 0 V และ 5 V ทำให้เกิดแรงดันออฟเซต (V_{offset}) ประมาณ 0.6 V ส่งผลให้แรงดันด้านออก V_{out1} มีค่าสูงขึ้นอีก 0.6 V จากค่าที่ออกแบบไว้ ดังนั้นแรงดันด้านออกที่แท้จริงเมื่อหักค่าแรงดันออฟเซตออก ค่าที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณ แต่เมื่อป้อนแรงดันด้านเข้าให้สูงขึ้นมีค่าตั้งแต่ 4 mV ขึ้นไป ในช่วงนี้พบว่าค่าแรงดัน V_{out1} ที่อ่านค่าจากรูปที่ 4.2 ไม่ขึ้นเป็นเชิงเส้นและมีความคลาดเคลื่อนจากค่าที่แท้จริง เนื่องจากออปแอมป์ได้รับไฟเลี้ยง 5 V จึงให้แรงดันด้านออกสูงสุด 3.76 V ดังนั้นจากการทดสอบพบว่าแรงดันด้านออกมีแตกต่างจากการคำนวณจึงเลือกใช้ค่าจากการทดสอบเพื่อปรับตั้งแรงดันอ้างอิง ($V_{pick-up}$) ให้กับวงจรเปรียบแรงดันต่อไป

4.2.2 การทดสอบวงจรเปรียบเทียบแรงดัน

การทดสอบวงจรเปรียบเทียบแรงดันมีเป้าหมายเพื่อตรวจสอบแรงดันด้านออก (V_{out2}) ซึ่งบ่งบอกถึงลักษณะการทำงานของวงจรเปรียบเทียบ ในการทดสอบจะปรับตั้งแรงดันอ้างอิง ($V_{pick-up}$) เพื่อให้วงจรเปรียบเทียบแรงดันสร้างลอจิกต่ำเมื่อป้อนแรงดันด้านเข้าให้กับวงจรขยายไม่กลับขั้วมีค่าต่ำกว่า 2.0 mV ซึ่งจากการผลทดสอบดังรูปที่ 4.2 จึงได้กำหนดแรงดันอ้างอิงไว้ที่ค่า 2.610 V เพื่อมาเปรียบเทียบกับค่าจากแรงดัน V_{out1} ของวงจรขยายไม่กลับขั้ว จากการทดสอบการทำงานของวงจรเปรียบเทียบจะแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ผลการทดสอบวงจรเปรียบเทียบแรงดัน

จากรูปที่ 4.3 จะเห็นว่าการทำงานของวงจรเปรียบเทียบแรงดันแบ่งออกเป็น 3 ช่วง คือ ช่วงแรกเป็นช่วงที่ป้อนแรงดันด้านเข้าให้กับวงจรขยายไม่กลับขั้วมีค่าสูงกว่า 2.0 mV ช่วงนี้วงจรเปรียบเทียบแรงดันสร้างลอจิกสูงออกมา เนื่องจากแรงดัน V_{out1} ของวงจรขยายไม่กลับขั้วให้แรงดันสูงกว่าค่าแรงดันอ้างอิง และได้แรงดัน V_{out2} มีค่าประมาณ 3.76 V ช่วงที่สองป้อนแรงดันด้านเข้าให้กับวงจรขยายมีค่าเท่า 2.0 mV ช่วงนี้วงจรเปรียบเทียบจะทำงานคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง เนื่องจากแรงดันออกของวงจรขยายแรงดัน ไม่กลับขั้วให้ค่าแรงดันมีค่าไม่คงที่ ซึ่งเกิดจากการแกว่งของค่าแรงดัน V_{out1} ส่งผลให้วงจรเปรียบเทียบสร้างลอจิกสูงและต่ำสลับกัน ทำให้ค่าแรงดัน V_{out2} เฉลี่ยของวงจรเปรียบเทียบมีค่าประมาณ 1.9 V และช่วงที่สามคือช่วงที่ป้อนแรงดันด้านเข้าให้กับวงจรขยายไม่กลับขั้วมีค่าต่ำกว่า 2.0 mV ช่วงนี้วงจรเปรียบเทียบแรงดันสร้างลอจิกต่ำ เพราะแรงดันด้านออกของวงจรขยายไม่กลับขั้วให้แรงดันต่ำกว่าค่าแรงดันอ้างอิง และได้แรงดัน V_{out2} มีค่าประมาณ 0 V ดังนั้นวงจรเปรียบเทียบแรงดันที่สร้างขึ้นสามารถทำงานได้ตามที่ออกแบบไว้ได้ 2 ช่วง คือช่วงค่าแรงดันด้านเข้าสูงหรือต่ำกว่า 2.0 V และช่วงแรงดันด้านเข้ามีค่าเท่ากับ 2.0 V วงจรจะไม่ทำงานตามที่ออกแบบไว้ เนื่องจากตัวออปแอมป์ที่ใช้ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงแรงดันกลับพลันได้ ด้วยเหตุนี้จึงสร้างวงจรควบคุมการทำงานของรีเลย์ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

4.2.3 การควบคุมการทำงานของรีเลย์

การทดสอบการควบคุมการทำงานของรีเลย์มีเป้าหมายเพื่อตรวจการทำงานของรีเลย์ทั้งสองตัวเพื่อนำไปใช้ในวงจรตัดกระแส โดยในการทดสอบจะต้องวงจรควบคุมการทำงานของรีเลย์เข้ากับวงจรเปรียบเทียบแรงดันและวงจรขยายแรงดัน โดยปรับแรงดันด้านเข้าป้อนให้วงจรขยายให้สร้างแรงดัน V_{out} เพื่อเปรียบเทียบกับแรงดันอ้างอิงในวงจรเปรียบเทียบแรงดัน ในที่นี้ตั้งแรงดันอ้างอิงไว้ที่ค่า 2.610 V แล้วสังเกตการณ์ทำงานของรีเลย์ทั้งสองตัว จากการทดสอบวงจรควบคุมการทำงานของรีเลย์แสดงดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ผลการทดสอบการควบคุมการทำงานของรีเลย์

สถานะของสวิตช์ S3	V_m (V)	แรงดันตกคร่อมรีเลย์		หน้าสัมผัสของรีเลย์		
		R1	R2	R1 (NO)	R1 (NC)	R2 (NC)
ก่อนกดสวิตช์	2.3	0	4.954	เปิด	ปิด	เปิด
หลังกดสวิตช์	2.3	4.951	0	ปิด	เปิด	ปิด
	2.2	4.951	0	ปิด	เปิด	ปิด
	2.1	4.951	0	ปิด	เปิด	ปิด
	2.0	0	4.954	เปิด	ปิด	เปิด
	1.9	0	4.954	เปิด	ปิด	เปิด

จากตารางที่ 4.9 จะเห็นการทำงานของวงจรควบคุมการทำงานของรีเลย์ดังนี้ เมื่อจ่ายไฟให้กับวงจรควบคุมการทำงานของรีเลย์ ในขณะก่อนกดสวิตช์ S3 มีแรงดันมาตกคร่อมรีเลย์ R2 ทำงาน หน้าสัมผัสของรีเลย์ R2 มีหน้าสัมผัสชนิด NC เปลี่ยนสถานะและเปิดวงจรออก ทำให้รีเลย์ R1 ไม่ทำงาน เมื่อกดสวิตช์ S3 รีเลย์ R2 หยุดทำงาน ทำให้หน้าสัมผัสของรีเลย์กลับสถานะเดิมเพื่อให้รีเลย์ R1 ทำงานเมื่อได้รับลอจิกสูงจากวงจรเปรียบเทียบ ส่งผลให้หน้าสัมผัสของรีเลย์ R1 ซึ่งมีหน้าสัมผัส 2 ชุด คือ NO และ NC เปลี่ยนสถานะ โดยหน้าสัมผัส NC ของรีเลย์ R1 ทำให้รีเลย์ R2 ไม่ทำงาน เมื่อปล่อยสวิตช์ S3 ออก แล้วเมื่อปรับค่าแรงดันอินพุตมีค่าเท่ากับ 2.0 mV ในช่วงนี้วงจรเปรียบเทียบจะสร้างลอจิกสูงและต่ำสลับกัน แต่เมื่อวงจรควบคุมการทำงานของรีเลย์ได้ได้ลอจิกต่ำเพียงชั่วครู่ รีเลย์ R1 จะหยุดทำงานทำให้รีเลย์ R1 หยุดทำงาน หน้าสัมผัสของรีเลย์ R1 กับคู่สถานะเดิมทำให้หน้าสัมผัส NC ของรีเลย์ R1 ต้องวงจร ทำให้รีเลย์ R2 ทำงาน เมื่อรีเลย์ R2 ทำงาน แม้ได้รับลอจิกสูงจากวงจรเปรียบเทียบรีเลย์ R1 ยังคงไม่ทำงาน ดังนั้นวงจรควบคุมการทำงานของรีเลย์ทำให้รีเลย์ทำงานได้เป็นปกติแม้จะอยู่ในช่วงแรงดันไม่คงที่ และสามารถทำงานได้ตามที่กำหนดไว้ด้วยเหตุจึงนำไปสร้างเป็นวงจรตัดกระแสฉุกเฉินในตัวควบคุมแรงดันและกระแสอัดประจุ

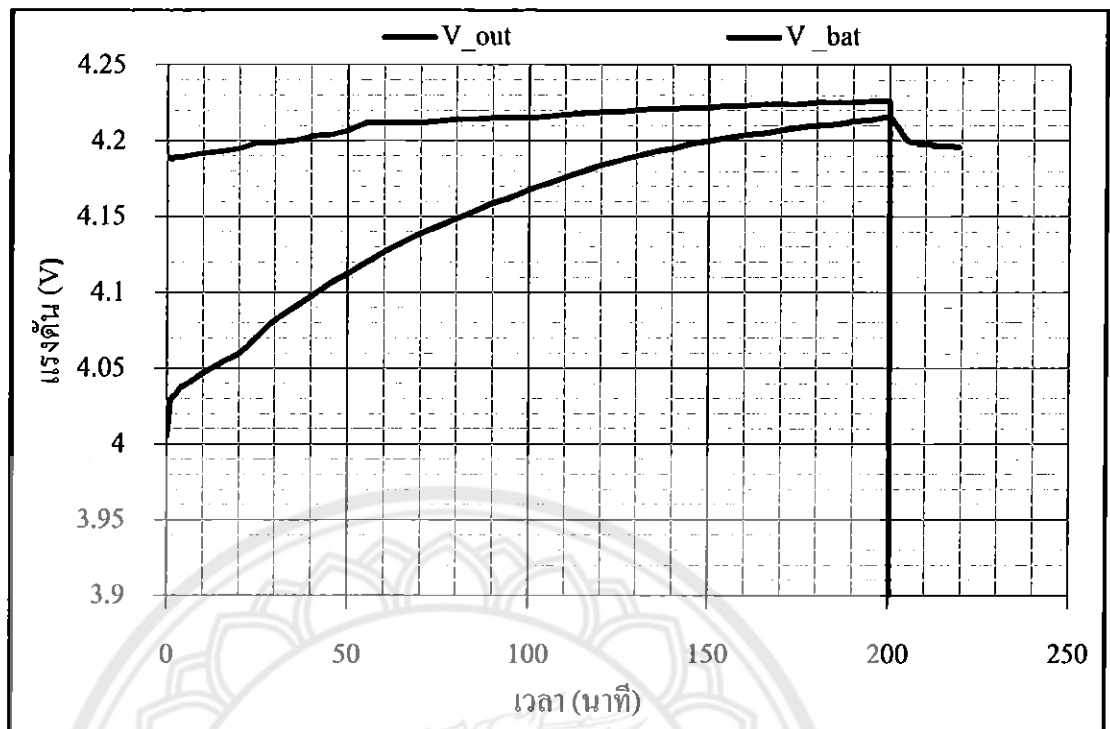
4.3 การทดสอบตัวควบคุมการอัดประจุ

หลังจากที่ได้ทำการทดสอบวงจรควบคุมแรงดันและกระแสอัดประจุ และวงจรตัดกระแสอัดประจุแล้วจึงได้สร้างตัวควบคุมการอัดประจุขึ้นมาเพื่อนำมาใช้อัดประเภทเตอร์โทรศัพท์เคลื่อนที่ โดยในการทดสอบตัวควบคุมการอัดประจุมีเป้าหมายเพื่อตรวจสอบการทำงานของวงจรและกระแสอัดประจุและวงจรตัดกระแสอัดประจุในระหว่างเริ่มจนกระทั่งสิ้นสุดการอัดประจุโดยใช้อะแดปเตอร์และแผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็นแหล่งจ่ายพลังงาน ซึ่งในการทดสอบจะพิจารณาค่าแรงดันและกระแสอัดประจุโดยแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ แบบแรกจะพิจารณาตามอะแดปเตอร์คู่ตัว คือ จะเลือกแรงดันและกระแสตามอะแดปเตอร์ของแบตเตอรี่นั้นระบุไว้ และแบบที่สองจะพิจารณาค่ากระแสอัดประจุโดยใช้หลักการ $0.5C$ เช่น แบตเตอรี่มีขนาด $1,000\text{ mAh}$ จะใช้ค่ากระแสอัดประจุ 500 mA (0.5×1000) เป็นต้น ซึ่งในการทดสอบนี้โหลดที่ใช้คือกับตัวควบคุมการอัดประจุ แบ่งออกเป็นสองกรณี คือ กรณีโหลดเป็นแบตเตอรี่และกรณีโหลดเป็นโทรศัพท์เคลื่อนที่ โดยผลการทดสอบแต่ละกรณีของโหลดจะกล่าวในส่วนถัดไป

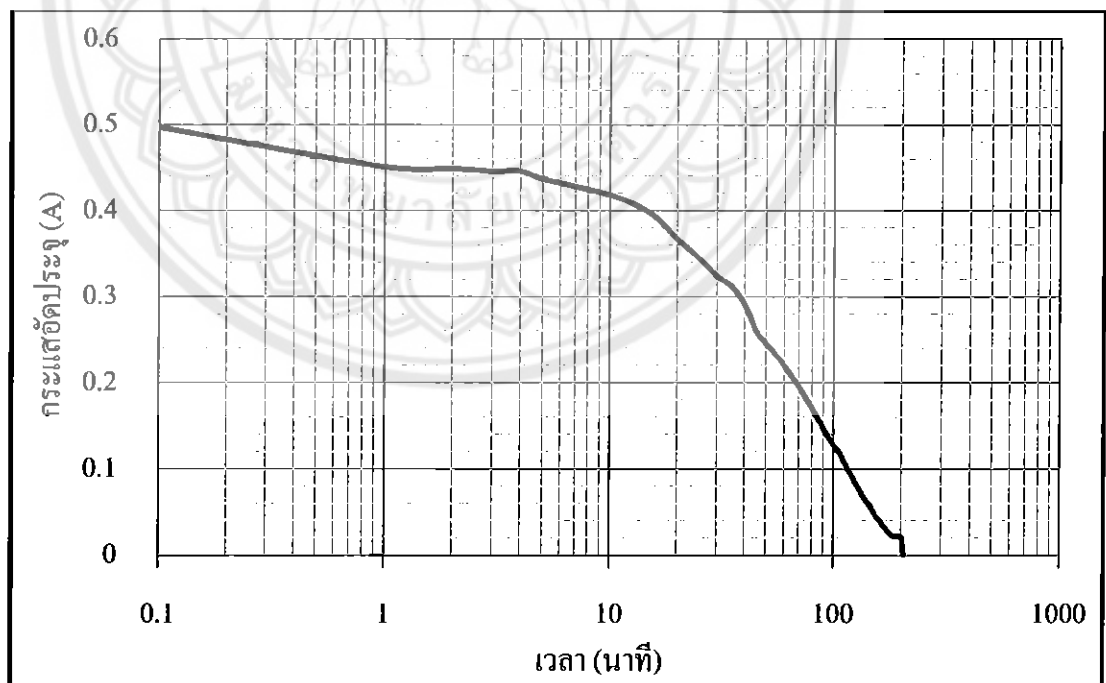
4.3.1 การอัดประจุแบตเตอรี่โดยตรง

ในการทดสอบนี้มีเป้าหมายเพื่อตรวจสอบลักษณะการขึ้นลงของค่าแรงดันและกระแสขณะอัดประจุแบตเตอรี่ รวมทั้งค่าแรงดันของแบตเตอรี่หลังจากที่อัดประจุเสร็จสิ้น ในการทดสอบการอัดประจุนี้ใช้โหลดเป็นแบตเตอรี่โดยแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ แบตเตอรี่ของโทรศัพท์เคลื่อนที่มีค่าความจุ $1,260\text{ mAh}$ และแบตเตอรี่ของกล้องถ่ายภาพดิจิทัลมีความจุ 800 mAh ในการทดสอบโหลดแบตเตอรี่ของโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่จะปรับตั้งแรงดันอัดประจุไว้ที่ 4.2 V และกำหนดค่ากระแสตามที่ระบุไว้กับอะแดปเตอร์คู่ตัว คือ 0.7 A โดยจ่ายไฟผ่านอะแดปเตอร์ $19\text{ V } 4.74\text{ A}$ ให้ตัวควบคุมการอัดประจุ และในการทดสอบโหลดเป็นแบตเตอรี่ของกล้องถ่ายภาพดิจิทัลได้ปรับตั้งแรงดันอัดประจุไว้ที่ 4.2 V และกำหนดค่ากระแสโดยใช้หลักการ 0.5 C คือค่ากระแส 0.4 A โดยใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 10 W เป็นแหล่งจ่ายพลังงาน ผลการทดสอบข้างต้นแสดงในรูปที่ 4.4 ถึง 4.7

จากรูปที่ 4.4 และ 4.5 แสดงการอัดประจุแบตเตอรี่ของโทรศัพท์เคลื่อนที่ยี่ห้อแอลจี ขนาด 1260 mAh โดยปรับตั้งค่าแรงดันอัดประจุไว้ที่ 4.2 V และกำหนดกระแสอัดประจุตามที่ระบุไว้กับอะแดปเตอร์คู่ตัว ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.7 A โดยใช้ไฟบ้านเป็นแหล่งจ่ายพลังงานผ่านอะแดปเตอร์ขนาดแรงดัน 19 V กระแส 4.74 A



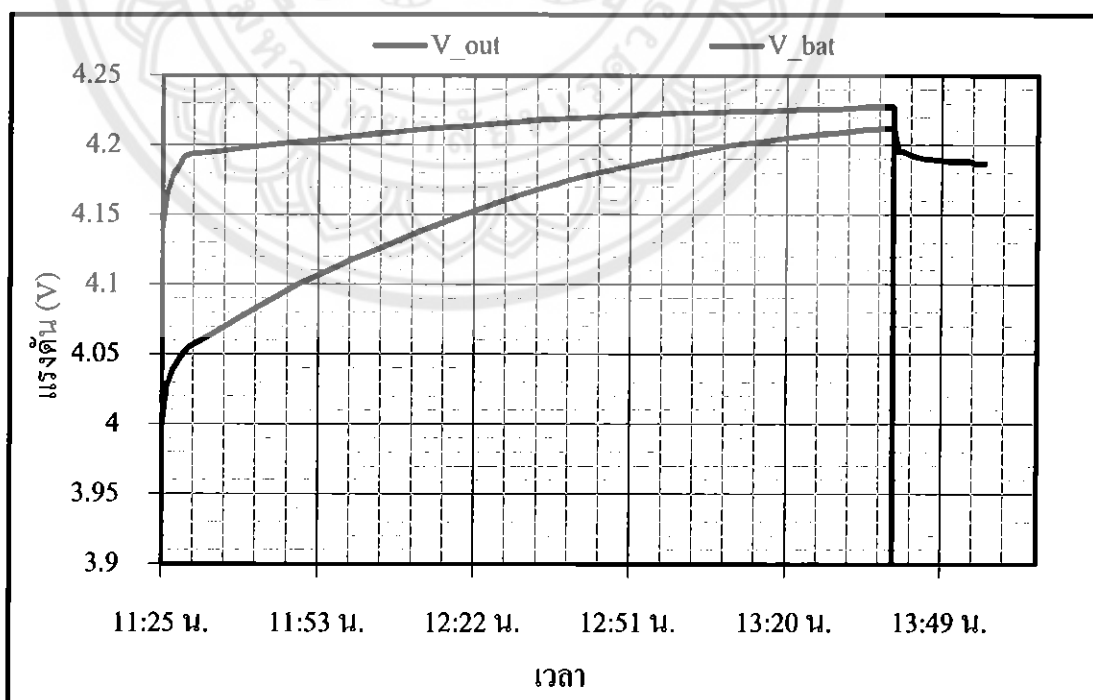
รูปที่ 4.4 การเปลี่ยนแปลงของแรงดันในระหว่างอัดประจุแบตเตอรี่ของโทรศัพท์เคลื่อนที่ขนาดความจุ 1,260 mAh โดยตั้งค่าแรงดันที่ 4.2 V และกระแสสูงสุดที่ 0.7 A



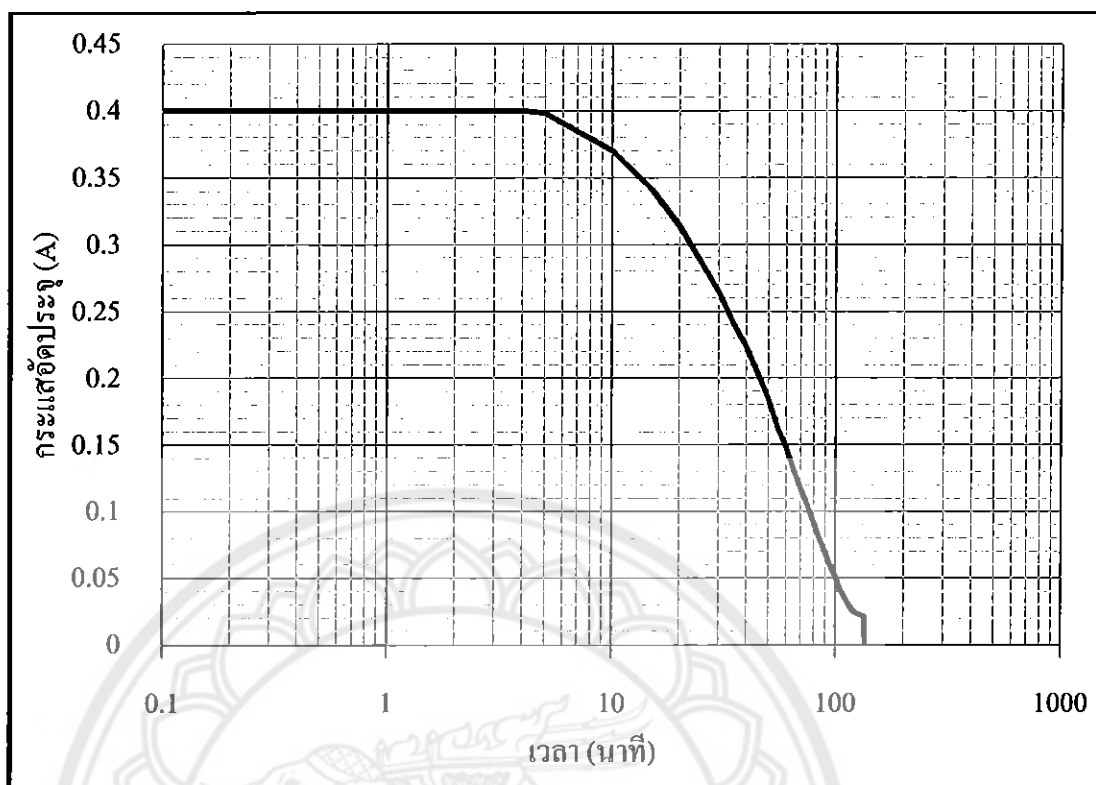
รูปที่ 4.5 การเปลี่ยนแปลงของกระแสในระหว่างอัดประจุแบตเตอรี่ของโทรศัพท์เคลื่อนที่ขนาดความจุ 1,260 mAh โดยตั้งค่าแรงดันที่ 4.2 V และกระแสสูงสุดที่ 0.7 A

จากการทดสอบข้างต้นพบว่า ในช่วงแรกค่ากระแสอัดประจุมีค่าไม่ตรงกับค่าที่ออกแบบไว้เนื่องจากความแตกต่างระหว่างแรงดันอัดประจุกับแรงดันแบตเตอรี่ ซึ่งความแตกต่างของแรงดันนี้ส่งผลให้ค่ากระแสที่ได้ไม่เพียงพอสำหรับการจำกัดค่ากระแสที่ 0.7 A จึงทำให้ค่ากระแสเริ่มต้นมีค่าประมาณ 0.5 A และลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึง 20 mA ทำให้วงจรตัดกระแสอัดประจุทำงาน ส่งผลให้การอัดประจุสิ้นสุด ซึ่งการอัดประจุด้วยแรงดัน 4.2 V ใช้เวลาดำเนินการนาน แต่แรงดันของแบตเตอรี่หลังจากการอัดประจุเสร็จสิ้นแล้วมีค่าลดลงน้อยมาก

รูปที่ 4.6 และ 4.7 แสดงการอัดประจุแบตเตอรี่ของกล้องถ่ายภาพดิจิทัลยี่ห้อซัมซุง ขนาด 800 mAh โดยกำหนดแรงดันอัดประจุไว้ที่ 4.2 V และกระแสอัดประจุ 0.5C (0.4 A) ซึ่งใช้เซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 10 W แรงดัน 17.2 V กระแส 0.58 A เป็นแหล่งจ่ายพลังงาน จากการทดสอบดังกล่าวพบว่าใกล้เคียงกับการอัดประจุแบตเตอรี่ของโทรศัพท์เคลื่อนที่โดยใช้ไฟบ้านจ่ายผ่านอะแดปเตอร์ แต่มีความแตกต่างกันในช่วงแรกคือ ค่ากระแสเริ่มต้นเป็นไปตามค่าที่ออกแบบไว้ และมีค่าคงที่ในช่วงระยะเวลาสั้นๆ จากนั้นจึงลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึงค่ากระแสตัดวงจรที่กำหนดคือ 20 mA วงจรตัดกระแสจึงทำงาน และค่าแรงดันแบตเตอรี่หลังจากการอัดประจุเสร็จสิ้นมีค่าลดลงเล็กน้อย ดังนั้นผลการทดสอบชี้ให้เห็นว่าตัวควบคุมการอัดประจุกรณีโหลดเป็นแบตเตอรี่สามารถอัดประจุแบตเตอรี่ของโทรศัพท์เคลื่อนที่และกล้องถ่ายภาพดิจิทัลได้อย่างเหมาะสม



รูปที่ 4.6 การเปลี่ยนแปลงของแรงดันในระหว่างอัดประจุแบตเตอรี่ของกล้องถ่ายภาพดิจิทัล ขนาดความจุ 800 mAh โดยตั้งค่าแรงดันที่ 4.2 V และกระแสสูงสุดที่ 0.4 A

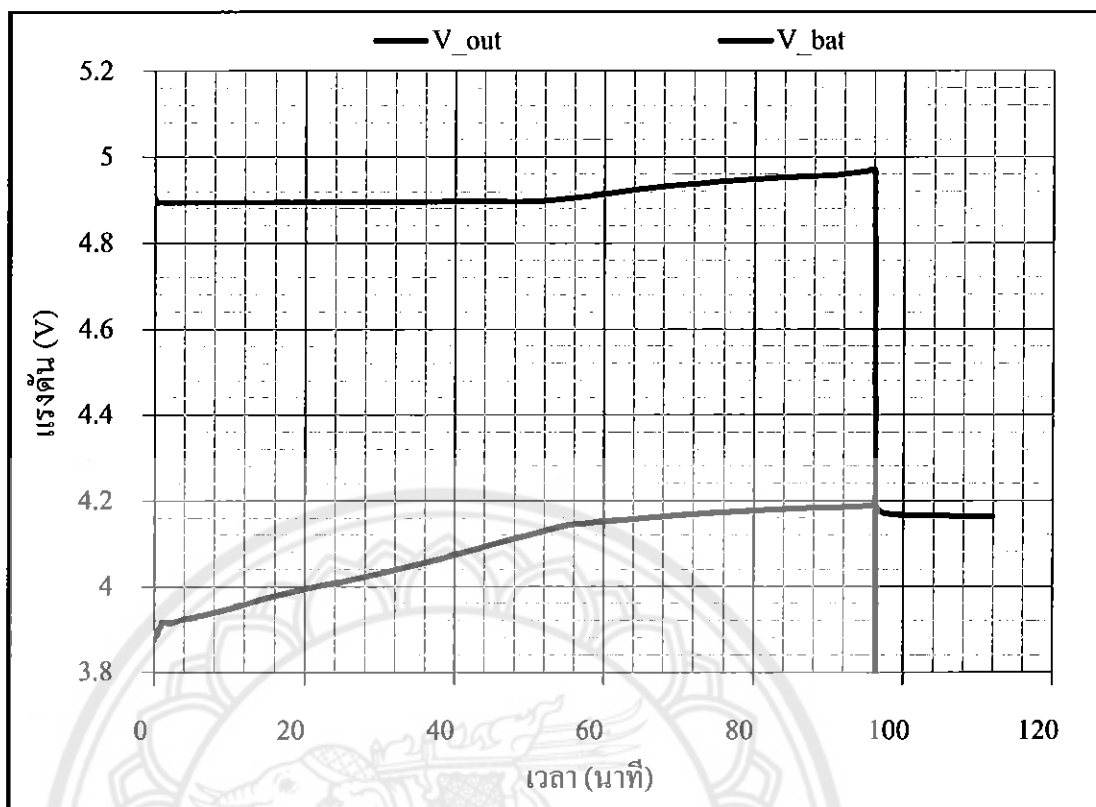


รูปที่ 4.7 การเปลี่ยนแปลงของกระแสในระหว่างอัดประจุแบตเตอรี่ของกล้องถ่ายภาพดิจิทัล ขนาดความจุ 800 mAh โดยตั้งค่าแรงดันที่ 4.2 V และกระแสสูงสุดที่ 0.4 A

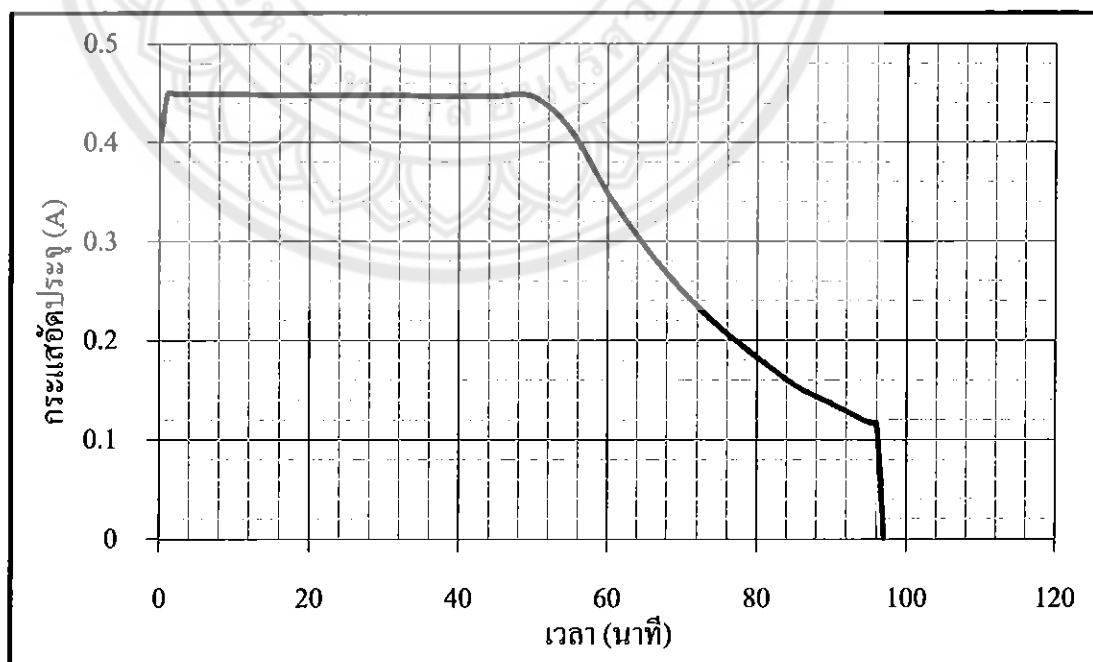
4.3.2 การอัดประจุแบตเตอรี่ในโทรศัพท์เคลื่อนที่

ในการทดสอบนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบการทำงานของตัวควบคุมการอัดประจุ และการเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดันและกระแสอัดประจุ รวมทั้งค่าแรงดันของแบตเตอรี่หลังจากที่อัดประจุเสร็จสิ้น ในการทดสอบใช้โหนดเป็นแบตเตอรี่ขนาด 1,200 mAh โดยติดตั้งอยู่ในโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่หือซัมซุง

เมื่อนำโหนดมาต่อกับตัวควบคุมการอัดประจุและปรับตั้งให้ค่าแรงดันและกระแสอัดประจุตรงกับที่ระบุในอะแดปเตอร์คู่ตัว คือ 5 V 0.7 A โดยใช้ไฟบ้านเป็นแหล่งจ่ายพลังงานผ่านอะแดปเตอร์ขนาด 19 V 4.74 A และวัดค่าแรงดันและกระแสอัดประจุ รวมทั้งแรงดันของแบตเตอรี่แต่ละช่วงเวลา ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.8 และ 4.9



รูปที่ 4.8 การเปลี่ยนแปลงของแรงดันในระหว่างอัดประจุแบตเตอรี่ขนาดความจุ 1,200 mAh ภายในโทรศัพท์เคลื่อนที่ โดยตั้งค่าแรงดันที่ 5 V และกระแสสูงสุดที่ 0.7 A



รูปที่ 4.9 การเปลี่ยนแปลงของกระแสในระหว่างอัดประจุแบตเตอรี่ขนาดความจุ 1,200 mAh ภายในโทรศัพท์เคลื่อนที่ โดยตั้งค่าแรงดันที่ 5 V และกระแสสูงสุดที่ 0.7 A

จากรูปที่ 4.8 และ 4.9 พบว่าการอัดประจุด้วยแรงดันอัดประจุ 5 V ในช่วงแรกเมื่อกระแสอัดประจุมีค่าคงที่ประมาณ 0.45 A จากนั้นจึงมีค่าลดลงเมื่อค่าแรงดันของแบตเตอรี่เข้าใกล้ 4.2 V หลังจากทีกระแสลดลงจนถึงประมาณ 0.1 A เกิดการตัดวงจรก่อนถึงค่ากระแสที่ออกแบบไว้โดยเกิดจากวงจรป้องกันภายในตัวแบตเตอรี่ซึ่งตัดวงจรเมื่อแรงดันของแบตเตอรี่สูงถึงค่าที่ตั้งไว้ในวงจรป้องกันโดยทั่วไปคือ 4.3 V เนื่องจากต้องการรักษาอายุการใช้งานของแบตเตอรี่จึงตัดการทำงานเร็วกว่าที่ควร อย่างไรก็ตามในกรณีการทดสอบนี้ แรงดันของแบตเตอรี่หลังอัดประจุเสร็จสิ้นมีค่าลดลงต่ำกว่าในกรณีที่อัดประจุด้วยแรงดัน 4.2 V

ผลการทดสอบกับโหลดทั้งสองกรณีแสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมการอัดประจุที่สร้างขึ้นสามารถอัดประจุแบตเตอรี่ของโทรศัพท์เคลื่อนที่และกล้องถ่ายภาพดิจิทัล โดยสามารถเลือกค่าแรงดันและกระแสอัดประจุได้อย่างเหมาะสม รวมทั้งตัดกระแสอัดประจุได้ นอกจากนี้ยังสามารถรองรับพลังงานจากไฟบ้านผ่านอะแดปเตอร์ แบตเตอรี่รถยนต์ และแผงเซลล์แสงอาทิตย์



บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

จากการดำเนินโครงการสามารถสรุปผล และชี้แจงปัญหาในการดำเนินงาน รวมทั้งเสนอแนะแนวทางแก้ปัญหา และให้ข้อเสนอแนะในการนำโครงการไปพัฒนาต่อไปดังนี้

5.1 สรุปผลการดำเนินงาน

หลังจากได้ศึกษารวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนซึ่งนิยมใช้ในโทรศัพท์เคลื่อนที่และกล้องถ่ายภาพดิจิทัล รวมทั้งหลักการอัดประจุที่เหมาะสมสำหรับแบตเตอรี่ชนิดนี้ ผู้ดำเนินโครงการได้ออกแบบและสร้างตัวควบคุมการอัดประจุ โดยสามารถเลือกค่าแรงดันประจุได้ 3 ค่าคือ 4.2 V 5 V และ 8.4 V และสามารถจำกัดค่ากระแสอัดประจุในช่วง 0.3 A ถึง 2 A นอกจากนี้ยังได้ออกแบบการเลือกค่ากระแสอัดประจุที่เหมาะสมกับขนาดของแบตเตอรี่ ซึ่งตัวควบคุมการอัดประจุสามารถรับพลังงานจากแหล่งจ่ายพลังงานได้ 3 ประเภท คือ ไฟกระแสสลับจากการไฟฟ้า ขนาดแรงดัน 220 V ความถี่ 50 Hz และไฟกระแสตรงขนาด 12 V จากแบตเตอรี่ผ่านตัวจุกบูห์ในรถยนต์และแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีค่าแรงดันเปิดวงจรในช่วง 15 – 40 V และได้ออกแบบให้การอัดประจุสิ้นสุดลงเมื่อกระแสอัดประจุลดลงจนถึงค่าที่กำหนดคือ 20 mA รวมทั้งออกแบบรูปทรงของตัวควบคุมการอัดประจุให้มีขนาดเล็กเหมาะสำหรับการพกพาในสถานที่ต่างๆ หลังจากนั้นได้นำตัวควบคุมการอัดประจุมาทำการทดสอบทั้งหมด 3 ส่วน ซึ่งสามารถสรุปผลการทดสอบในส่วนต่างๆดังต่อไปนี้

ในการทดสอบวงจรควบคุมแรงดันและกระแสอัดประจุ โดยการต่อวงจรกับโหลดตัวต้านทานเพื่อตรวจสอบการจำกัดค่าแรงดันและกระแส ค่าวัดที่ไซเคิลและค่าประสิทธิภาพ ซึ่งได้ผลทดสอบใกล้เคียงกับค่าที่ออกแบบ เช่น การจำกัดค่าแรงดันอัดประจุไว้ที่ 5 V ซึ่งได้ผลการทดสอบเท่ากับ 4.9 V ในขณะที่การจำกัดค่ากระแสอัดประจุไว้ที่ 0.4 A ได้ผลการทดสอบอยู่ในช่วง 0.4076 – 0.4096 A เป็นต้น นอกจากนี้ค่าวัดที่ไซเคิลที่ได้จากการทดสอบมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณ ซึ่งสามารถยอมรับได้ เช่น ค่าวัดที่ไซเคิลจากคำนวณเท่ากับ 0.136 ในขณะที่จากทดสอบได้ค่าเท่ากับ 0.188 เป็นต้น และในการทดสอบหาประสิทธิภาพของวงจร โดยใช้แหล่งจ่ายพลังงานทั้ง 3 ประเภท ได้แก่ ในกรณีใช้ไฟบ้านผ่านอะแดปเตอร์ได้ค่าประสิทธิภาพในช่วง 26.40 – 76.22% ส่วนกรณีใช้แบตเตอรี่รถยนต์ได้ค่าประสิทธิภาพในช่วง 31.50 – 78.70% และในกรณีที่ใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้ค่าประสิทธิภาพในช่วง 28.01 – 72.56% สรุปผลได้ว่าวงจรสามารถจำกัดค่าแรงดันและกระแสอัดประจุได้และวงจรมีประสิทธิภาพในระดับปานกลาง

ในการทดสอบวงจรตัวกระตุ้นกระแสอัดประจุแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ส่วนแรกเป็นการทดสอบการทำงานของวงจรขยายไม่กลับขั้ว พบว่าแรงดันด้านออกมีความคลาดเคลื่อนจากค่าที่ออกแบบไว้ประมาณ 0.6 V ซึ่งเป็นผลมาจากรูปแบบการจ่ายไฟเลี้ยงให้ออปแอมป์คือ +5 V และ 0 V ทำให้เกิดแรงดันออฟเซต ส่งผลให้แรงดันด้านออกที่ผ่านการขยายแล้วมีค่าเพิ่มขึ้นอีกประมาณ 0.6 V ดังนั้นในการกำหนดค่าแรงดันอ้างอิงให้กับวงจรเปรียบเทียบแรงดัน จึงต้องตั้งค่าเพิ่มจากการคำนวณอีก 0.6 V ในส่วนที่สองเป็นการทดสอบการทำงานของวงจรเปรียบเทียบแรงดัน โดยกำหนดแรงดันอ้างอิงเท่ากับ 2.610 V ซึ่งได้ผลการทดสอบเป็นไปตามการออกแบบ นั่นคือเมื่อแรงดัน V_{out1} มีค่าต่ำกว่า 2.610 V ทำให้วงจรเทียบแรงดันสร้างลอจิกต่ำเพื่อยุติการอัดประจุ ในส่วนที่สามได้ทดสอบการควบคุมการทำงานของรีเลย์ โดยสังเกตจากการเปลี่ยนหน้าสัมผัสของรีเลย์ R1 และ R2 การกดสวิตช์ S3 (ซึ่งใช้เริ่มกระบวนการอัดประจุ) ทำให้รีเลย์ R1 ทำงานโดยหน้าสัมผัสทั้งสองเกิดการเปลี่ยนสถานะ ส่งผลให้การอัดประจุเป็นไปอย่างต่อเนื่อง (แม้เปิดหน้าสัมผัสของ S3 แล้วก็ตาม) และป้องกันไม่ให้รีเลย์ R2 การทดสอบต่อมาเป็นการลดค่าแรงดันที่จ่ายให้กับวงจรขยายไม่กลับขั้ว (ซึ่งค่าแรงดันนี้สอดคล้องกับปริมาณกระแสอัดประจุนั้นเอง) ทำให้ได้แรงดัน V_{out1} ที่ใช้ในการเปรียบเทียบกับแรงดันอ้างอิงของวงจรเปรียบเทียบแรงดัน มีค่าลดลงจนต่ำกว่าแรงดันอ้างอิง จึงทำให้รีเลย์ R1 หยุดทำงาน หน้าสัมผัสจึงกลับสถานะเดิม ส่งผลให้รีเลย์ R2 กลับมาทำงานได้อีกครั้ง ซึ่งผลการทดสอบนี้เป็นไปตามการออกแบบจึงทำให้สามารถนำวงจรนี้มาใช้เป็นวงจรตัวกระตุ้นกระแสอัดประจุที่ใช้ในตัวควบคุมการอัดประจุได้

ส่วนสุดท้ายเป็นการทดสอบการทำงานของตัวควบคุมการอัดประจุ ซึ่งใช้วงจรควบคุมแรงดันและกระแสอัดประจุร่วมกับวงจรตัวกระตุ้นกระแสอัดประจุ โดยนำไปอัดประจุแบตเตอรี่ในรูปแบบต่างๆ เช่น การอัดประจุด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ การอัดประจุแบตเตอรี่ภายนอกตัวเครื่อง โดยต่อผ่านแท่นอัดประจุเอนกประสงค์ด้วยแรงดันอัดประจุ 4.2 V และจำกัดค่ากระแสอัดประจุ 0.7 A จากการทดสอบพบว่าวงจรตัวกระตุ้นกระแสอัดประจุทำงานถูกต้องโดยตัดวงจรเมื่อกระแสอัดประจุลดลงจนถึงค่าที่ปรับตั้งไว้คือ 20 mA ซึ่งบ่งบอกว่าแบตเตอรี่มีการอัดประจุเต็มแล้ว

ผลการทดสอบทั้งหมดได้ชี้ให้เห็นว่าตัวควบคุมการอัดประจุที่สร้างขึ้นในโครงการนี้สามารถใช้อัดประจุได้ทั้งแบตเตอรี่ของโทรศัพท์เคลื่อนที่และกล้องถ่ายภาพดิจิทัล โดยสามารถเลือกค่าแรงดันและกระแสอัดประจุที่ต้องการได้หลายค่า

5.2 ปัญหาและแนวทางแก้ไข

วงจรขยายไม่กลับขั้วในตัวควบคุมการอัดประจุให้แรงดันด้านออกมากกว่าค่าที่คำนวณไว้เนื่องจากเกิดแรงดันออฟเซตภายในออปแอมป์ หากไม่ต้องการให้แรงดันออฟเซตนี้เกิดขึ้นต้องจ่ายไฟเลี้ยงให้ออปแอมป์ที่แรงดัน +5 V และ -5V แทนที่แรงดัน +5 V และ 0 V

เนื่องจากตัวควบคุมการอัดประจุที่สร้างขึ้นในโครงงานนี้สร้างจากวงจรแบบแอนะล็อก (Analog circuit) ค่าแรงดันและกระแสในวงจรมีค่าต่อเนื่อง ทำให้วงจรขาดความแม่นยำในการสร้างสัญญาณพีคดับเบิลยูเอ็มและการตัดกระแส หากต้องการเพิ่มความแม่นยำในการประมวลผลสามารถปรับเปลี่ยนไปใช้วงจรในรูปแบบดิจิทัล (Digital circuit) เช่นสร้างวงจรควบคุมขึ้นจากไมโครคอนโทรลเลอร์

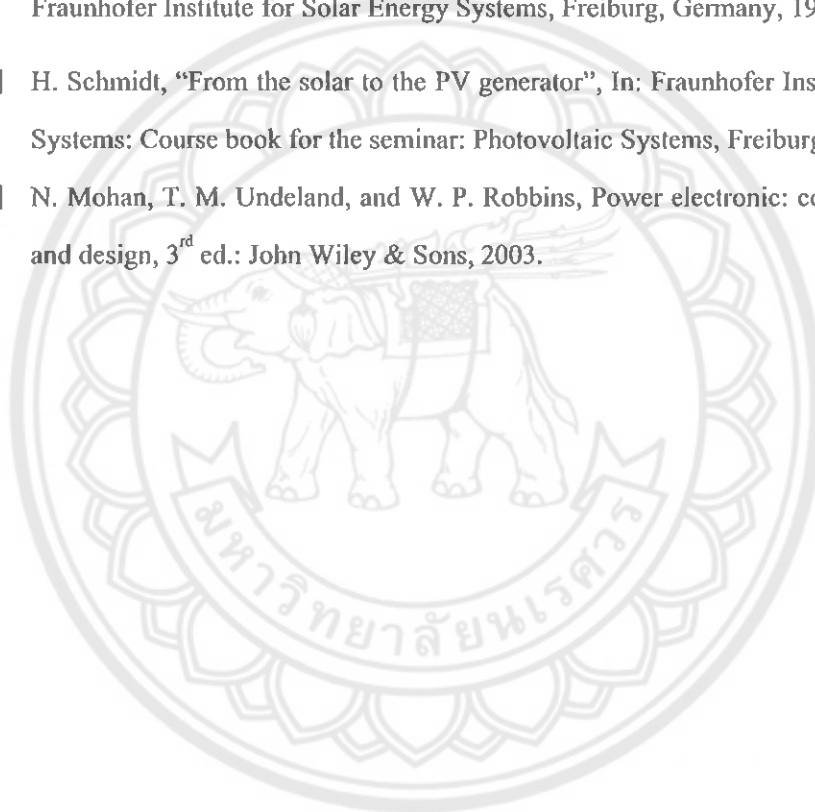
การอัดประจุโดยปรับตั้งค่ากระแสตัดวงจรไว้ที่ 20 mA ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยที่ออกแบบไว้เหมาะสมสำหรับแบตเตอรี่ที่มีขนาดความจุตั้งแต่ 1,000 mAh ขึ้นไป ในกรณีที่แบตเตอรี่มีขนาดความจุต่ำกว่า 1,000 mAh ผู้ใช้สามารถปรับตั้งค่ากระแสตัดวงจรให้ต่ำกว่า 20 mA ได้โดยใช้ปุ่ม Cutoff current เพื่อให้แบตเตอรี่มีโอกาสเข้าสู่สภาวะอัดประจุเต็มมากขึ้น โดยพิจารณาตั้งค่ากระแสตัดวงจรให้มีค่าประมาณ 3 – 5% ของค่ากระแสอัดประจุสูงสุด

5.3 แนวทางในการพัฒนาต่อไป

ตัวควบคุมการอัดประจุที่สร้างขึ้นนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการอัดประจุแบตเตอรี่ชนิดอื่นได้ เช่น แบตเตอรี่ชนิดตะกั่วหรือชนิดนิเกิลแคดเมียม (NiCd) เป็นต้น รวมทั้งแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ได้แก่ แบตเตอรี่ของเครื่องคอมพิวเตอร์แบบพกพา (Laptop) โดยศึกษาหลักการอัดประจุของแบตเตอรี่ที่ต้องการไปประยุกต์เพื่อปรับวงจรให้เหมาะกับการอัดประจุแบตเตอรี่ที่ต้องการ นอกจากนี้ยังสามารถเพิ่มความแม่นยำในการควบคุมได้โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์

เอกสารอ้างอิง

- [1] Grant M. Ehrlich, "Lithium-Ion Batteries", In: Handbook of Batteries, 3rd ed.: New York: McGraw-Hill, 2002.
- [2] Isidor Buchman. Charging Lithium-ion. สืบค้นวันที่ 4 กันยายน 2555, จาก http://batteryuniversity.com/learn/article/charging_lithium_ion_batteries.
- [3] G. Hille, W. Roth, and H. Schmidt, "Course book for the seminar – Photovoltaic Systems", Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, Freiburg, Germany, 1995.
- [4] 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.
- [5] N. Mohan, T. M. Undeland, and W. P. Robbins, Power electronic: converters, applications, and design, 3rd ed.: John Wiley & Sons, 2003.





ตารางที่ ก.1 การทดสอบการอัดประจุแบตเตอรี่ของโทรศัพท์เคลื่อนที่ยี่ห้อแอลจี (LG) ขนาด 1,260 mAh โดยตั้งค่าแรงดันที่ 4.2 V และกระแสอัดประจุสูงสุดที่ 0.7 A ตามอะแดปเตอร์คู่ตัว

Time (min)	V _{in} (V)	I _{in} (A)	V _{out} (V)	I _{out} (A)	V _{bat} (V)	R _{bat} (Ω)	η (%)
0	-	-	4.190	0.497	4.006	0.370	-
1	-	-	4.188	0.451	4.030	0.350	-
2	-	-	4.189	0.449	4.032	0.350	-
3	-	-	4.189	0.446	4.035	0.345	-
4	-	-	4.189	0.446	4.038	0.339	-
5	18.68	0.326	4.190	0.437	4.039	0.346	30.07
10	18.69	0.317	4.192	0.418	4.047	0.347	29.58
15	18.69	0.312	4.193	0.398	4.054	0.349	28.62
20	18.70	0.307	4.195	0.367	4.060	0.368	26.82
25	18.70	0.302	4.199	0.345	4.071	0.371	25.65
30	18.71	0.294	4.199	0.324	4.082	0.361	24.73
35	18.72	0.291	4.200	0.312	4.090	0.353	24.05
40	18.73	0.285	4.203	0.291	4.098	0.361	22.91
45	18.73	0.278	4.204	0.260	4.106	0.377	20.99
50	18.74	0.272	4.207	0.245	4.113	0.384	20.22
55	18.76	0.266	4.212	0.233	4.120	0.395	19.67
60	18.76	0.264	4.212	0.220	4.127	0.386	18.71
65	18.76	0.263	4.212	0.207	4.133	0.382	17.67
70	18.77	0.256	4.212	0.195	4.139	0.374	17.09
75	18.77	0.255	4.213	0.182	4.144	0.379	16.02
80	18.77	0.250	4.214	0.170	4.149	0.382	15.27
85	18.77	0.250	4.214	0.158	4.154	0.380	14.19
90	18.77	0.244	4.215	0.147	4.159	0.381	13.53
95	18.77	0.243	4.215	0.136	4.163	0.382	12.57
100	18.77	0.242	4.215	0.127	4.168	0.370	11.78
105	18.77	0.240	4.216	0.120	4.172	0.367	11.23
110	18.78	0.237	4.217	0.110	4.176	0.350	10.42
115	18.78	0.235	4.218	0.100	4.180	0.350	9.56
120	18.78	0.232	4.219	0.092	4.184	0.345	8.91
125	18.78	0.230	4.219	0.083	4.187	0.339	8.11
130	18.79	0.228	4.220	0.076	4.190	0.346	7.49
135	18.79	0.226	4.221	0.068	4.193	0.347	6.76
140	18.79	0.224	4.221	0.062	4.195	0.349	6.22
145	18.79	0.222	4.222	0.056	4.198	0.368	5.67
150	18.80	0.219	4.222	0.050	4.200	0.371	5.13

ตารางที่ ก.1 (ต่อ) การทดสอบการอัดประจุแบตเตอรี่ของโทรศัพท์เคลื่อนที่ ยี่ห้อแอลจี (LG) ขนาด 1,260 mAh โดยตั้งค่าแรงดันที่ 4.2 V และกระแสอัดประจุสูงสุดที่ 0.7 A ตามอะแดปเตอร์กู่ตัว

Time (min)	V_{in} (V)	I_{in} (A)	V_{out} (V)	I_{out} (A)	V_{bat} (V)	R_{bat} (Ω)	η (%)
155	18.80	0.216	4.223	0.044	4.202	0.361	4.58
160	18.80	0.214	4.223	0.040	4.204	0.353	4.20
165	18.80	0.212	4.224	0.035	4.205	0.361	3.71
170	18.81	0.210	4.224	0.031	4.207	0.377	3.31
175	18.81	0.208	4.224	0.027	4.209	0.384	2.91
180	18.81	0.206	4.225	0.024	4.210	0.395	2.62
185	18.83	0.193	4.225	0.022	4.211	0.386	2.56
190	18.84	0.178	4.225	0.022	4.213	0.382	2.77
195	18.86	0.162	4.226	0.022	4.214	0.374	3.04
200	18.88	0.147	4.226	0.021	4.215	0.379	3.20
204	-	-	-	-	4.202	-	-

หมายเหตุ: Time คือ เวลาที่ใช้อัดประจุ (min)

V_{in} คือ แรงดันด้านเข้าของวงจรทอนระดับแรงดัน (V)

I_{in} คือ กระแสด้านเข้าของวงจรทอนระดับแรงดัน (A)

V_{out} คือ แรงดันอัดประจุ (V)

I_{out} คือ กระแสอัดประจุ (A)

V_{bat} คือ แรงดันของแบตเตอรี่ (V)

R_{bat} คือ ค่าความต้านทานสมมูลของแบตเตอรี่ (Ω)

η คือ ประสิทธิภาพของวงจรทอนระดับแรงดัน (%)

ตารางที่ ก.2 ค่าแรงดันของแบตเตอรี่โทรศัพท์เคลื่อนที่ ยี่ห้อแอลจี (LG) ขนาด 1260 mAh
หลังจากการอัดประจุด้วยแรงดัน 4.2 V และกระแสสูงสุดที่ 0.7 A สิ้นสุด

Time (min)	V _{bat} (V)
0	4.202
1	4.200
2	4.199
3	4.199
4	4.198
5	4.198
6	4.198
7	4.198
8	4.197
9	4.197
10	4.197
11	4.197
12	4.197
13	4.197
14	4.196
15	4.196

หมายเหตุ: Time คือ เวลาที่ใช้อัดประจุ (min)

V_{bat} คือ แรงดันของแบตเตอรี่ (V)

ตารางที่ ก.3 การทดสอบการอัดประจุแบตเตอรี่ของกล่องคิติดอล ยี่ห้อซัมซุง (Samsung) ขนาด 800 mAh โดยเลือกค่าแรงดัน 4.2 V และกระแสอัดประจุที่ 0.5C คือ 0.7 A

Time (min)	V_{in} (V)	I_{in} (A)	V_{out} (V)	I_{out} (A)	V_{bat} (V)	R_{bat} (Ω)	η (%)
11:25 น.	-	-	4.140	0.400	3.998	0.355	-
11:26 น.	-	-	4.166	0.400	4.028	0.345	-
11:27 น.	-	-	4.179	0.400	4.039	0.350	-
11:28 น.	-	-	4.184	0.400	4.045	0.346	-
11:29 น.	-	-	4.192	0.400	4.051	0.353	-
11:30 น.	17.14	0.323	4.193	0.398	4.055	0.347	30.14
11:35 น.	17.17	0.316	4.195	0.370	4.066	0.349	28.61
11:40 น.	17.13	0.307	4.198	0.341	4.078	0.352	27.22
11:45 น.	17.37	0.298	4.200	0.314	4.089	0.354	25.48
11:50 น.	17.17	0.289	4.202	0.287	4.100	0.355	24.30
11:55 น.	17.35	0.284	4.204	0.264	4.109	0.360	22.52
12:00 น.	17.23	0.278	4.206	0.240	4.118	0.367	21.07
12:05 น.	17.21	0.272	4.208	0.223	4.126	0.368	20.05
12:10 น.	17.15	0.266	4.210	0.203	4.134	0.374	18.73
12:15 น.	17.21	0.260	4.212	0.184	4.142	0.380	17.32
12:20 น.	17.19	0.255	4.213	0.163	4.149	0.393	15.67
12:25 น.	17.25	0.250	4.215	0.148	4.156	0.399	14.47
12:30 น.	17.14	0.246	4.216	0.131	4.163	0.405	13.10
12:35 น.	17.32	0.241	4.218	0.117	4.169	0.419	11.82
12:40 น.	17.51	0.238	4.219	0.104	4.175	0.423	10.53
12:45 น.	17.39	0.234	4.220	0.091	4.180	0.440	9.44
12:50 น.	17.25	0.231	4.221	0.079	4.184	0.468	8.37
12:55 น.	17.22	0.228	4.222	0.069	4.188	0.493	7.42
13:00 น.	17.41	0.225	4.223	0.059	4.192	0.525	6.36
13:05 น.	17.45	0.222	4.223	0.051	4.196	0.529	5.56
13:10 น.	17.21	0.216	4.224	0.041	4.200	0.585	4.66
13:15 น.	17.13	0.213	4.224	0.035	4.202	0.629	4.05
13:20 น.	17.20	0.210	4.225	0.029	4.205	0.690	3.39
13:25 น.	17.34	0.204	4.226	0.025	4.207	0.760	2.99
13:30 น.	17.51	0.184	4.226	0.023	4.209	0.739	3.02
13:35 น.	17.50	0.174	4.227	0.022	4.211	0.727	3.05
13:40 น.	17.52	0.154	4.227	0.021	4.212	0.714	3.29
13:41 น.	-	-	-	0	4.195	-	-

ตารางที่ ก.4 ค่าแรงดันของแบตเตอรี่ลิเธียมไอออน (Samsung) ขนาด 800 mAh
หลังจากการอัดประจุด้วยแรงดัน 4.2 V และกระแสที่ 0.5C คือ 0.7 A สิ้นสุด

Time (min)	V_{bat} (V)
0	4.195
1	4.193
2	4.192
3	4.191
4	4.190
5	4.190
6	4.189
7	4.189
8	4.188
9	4.188
10	4.188
11	4.188
12	4.188
13	4.187
14	4.187
15	4.187

ตารางที่ ก.5 การทดสอบการอัดประจุแบตเตอรี่ของโทรศัพท์เคลื่อนที่ ยี่ห้อซัมซุง (Samsung)
ขนาด 1,260 mAh โดยตั้งค่าแรงดันที่ 5 V และกระแสอัดประจุสูงสุดที่ 0.7 A ตาม
อะแดปเตอร์ตู้ตัว

Time (min)	V_{in} (V)	I_{in} (A)	V_{out} (V)	I_{out} (A)	V_{bat} (V)	R_{bat} (Ω)	η (%)
0	-	-	4.903	0.402	3.876	2.555	-
1	-	-	4.895	0.449	3.917	2.178	-
2	-	-	4.895	0.449	3.914	2.185	-
3	-	-	4.895	0.449	3.919	2.174	-
4	-	-	4.895	0.449	3.924	2.163	-
5	18.66	0.347	4.895	0.449	3.927	2.156	33.943
10	18.66	0.347	4.895	0.449	3.948	2.109	33.944
15	18.66	0.346	4.895	0.448	3.973	2.058	33.966
20	18.66	0.346	4.895	0.448	3.994	2.011	33.966
25	18.66	0.346	4.895	0.448	4.011	1.973	33.966
30	18.66	0.347	4.896	0.448	4.030	1.933	33.875
35	18.65	0.347	4.896	0.447	4.051	1.890	33.817
40	18.65	0.347	4.897	0.447	4.073	1.843	33.824
45	18.65	0.347	4.897	0.447	4.098	1.787	33.824
50	18.65	0.347	4.897	0.446	4.120	1.742	33.749
55	18.67	0.333	4.904	0.412	4.142	1.850	32.498
60	18.69	0.316	4.914	0.348	4.151	2.193	28.955
65	18.71	0.297	4.926	0.295	4.159	2.600	26.151
70	18.72	0.283	4.935	0.250	4.166	3.076	23.288
75	18.74	0.271	4.942	0.213	4.172	3.615	20.727
80	18.75	0.261	4.948	0.183	4.177	4.213	18.503
85	18.76	0.253	4.953	0.155	4.181	4.981	16.175
90	18.74	0.247	4.957	0.136	4.184	5.684	14.564
95	18.78	0.241	4.967	0.117	4.187	6.667	12.840
96	18.79	0.241	4.968	0.115	4.189	6.774	12.616
97	0	0	4.983	0	4.173	-	-

ตารางที่ ก.6 ค่าแรงดันของแบตเตอรี่โทรศัพท์เคลื่อนที่ ยี่ห้อซัมซุง (Samsung) ขนาด 1,260 mAh
 หลังจากการอัดประจุด้วยแรงดัน 5 V และกระแสสูงสุดที่ 0.7 A สิ้นสุด

Time (min)	V _{bat} (V)
0	4.173
1	4.169
2	4.167
3	4.166
4	4.165
5	4.165
6	4.164
7	4.164
8	4.164
9	4.164
10	4.163
11	4.163
12	4.163
13	4.163
14	4.163
15	4.163





MOTOROLA

Order this document by TL494/D

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

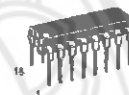
TL494

SWITCHMODE PULSE WIDTH MODULATION CONTROL CIRCUIT

SEMICONDUCTOR TECHNICAL DATA



D SUFFIX
PLASTIC PACKAGE
CASE 761B
(SO-16)



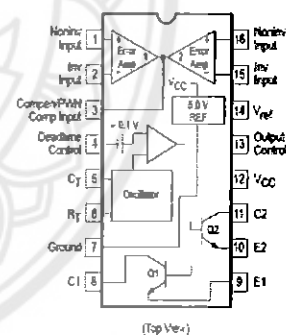
N SUFFIX
PLASTIC PACKAGE
CASE 648

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 ≤ 45°C	P _D	1000		mW
Thermal Resistance, Junction-to-Ambient	R _{θJA}	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.

PIN CONNECTIONS



ORDERING INFORMATION

Device	Operating Temperature Range	Package
TL494CD	T _A = 0° to +70°C	SO-16
TL494CN	T _A = 0° to +70°C	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_b	—	—	0.3	mA
Reference Output Current	I_{ref}	—	—	10	mA
Timing Resistor	R_T	1.8	30	500	k Ω
Timing Capacitor	C_T	0.0047	0.001	10	μ F
Oscillator Frequency	f_{osc}	10	40	200	kHz

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($V_{CC} = 15$ V, $C_T = 0.01$ μ F, $R_T = 12$ k Ω , unless otherwise noted.)For typical values $T_A = 25^\circ\text{C}$, 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	μ A
Emitter Off-State Current ($V_{CC} = 40$ V, $V_C = 40$ V, $V_E = 0$ V)	$I_{E(off)}$	—	—	-100	μ A
Collector-Emitter Saturation Voltage (Note 2)	$V_{sat(C)}$	—	1.1	1.3	V
Common-Emitter ($V_E = 0$ V, $I_C = 200$ mA)	$V_{sat(E)}$	—	1.5	2.6	V
Emitter-Follower ($V_C = 15$ V, $I_E = -200$ mA)					
Output Control Pin Current	I_{OCL}	—	10	—	μ A
Low State ($V_{OC} \leq 0.4$ V)	I_{OCH}	—	0.2	3.5	mA
High State ($V_{OC} = V_{ref}$)					
Output Voltage Rise Time	t_r	—	100	200	ns
Common-Emitter (See Figure 12)		—	100	200	ns
Emitter-Follower (See Figure 13)		—	100	200	ns
Output Voltage Fall Time	t_f	—	25	100	ns
Common-Emitter (See Figure 12)		—	25	100	ns
Emitter-Follower (See Figure 13)		—	40	100	ns

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

TL494

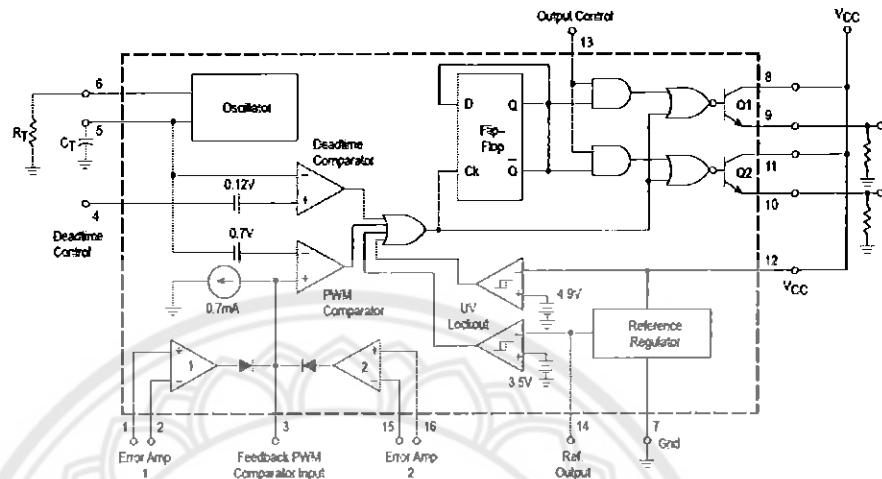
ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($V_{CC} = 15\text{ V}$, $C_T = 0.01\text{ }\mu\text{F}$, $R_T = 12\text{ k}\Omega$, unless otherwise noted.)For typical values $T_A = 25^\circ\text{C}$, for max/min values T_A is the operating ambient temperature range that applies, unless otherwise noted.

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 ($V_{CC} = 40\text{ V}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$)	V_{ICR}	—0.3 to V_{CC} —2.0			V
Open Loop Voltage Gain ($\Delta V_O = 3.0\text{ V}$, $V_O = 0.5\text{ V}$ to 3.5 V , $R_L = 2.0\text{ k}\Omega$)	A_{VOL}	70	95	—	dB
Unity-Gain Crossover Frequency ($V_O = 0.5\text{ V}$ to 3.5 V , $R_L = 2.0\text{ k}\Omega$)	f_{C-}	—	350	—	kHz
Phase Margin at Unity-Gain ($V_O = 0.5\text{ V}$ to 3.5 V , $R_L = 2.0\text{ k}\Omega$)	ϕ_m	—	65	—	deg.
Common Mode Rejection Ratio ($V_{CC} = 40\text{ V}$)	CMRR	65	90	—	dB
Power Supply Rejection Ratio ($\Delta V_{CC} = 33\text{ V}$, $V_O = 2.5\text{ V}$, $R_L = 2.0\text{ k}\Omega$)	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 ($V_{(Pin\ 3)} = 0.7\text{ V}$)	I_{-}	0.3	0.7	—	mA
DEADTIME CONTROL SECTION (Test Circuit Figure 11)					
Input Bias Current (Pin 4) ($V_{Pin\ 4} = 0\text{ V}$ to 5.25 V)	I_{IB} (DT)	—	—2.0	—10	μA
Maximum Duty Cycle, Each Output, Push-Pull Mode ($V_{Pin\ 4} = 0\text{ V}$, $C_T = 0.01\text{ }\mu\text{F}$, $R_T = 12\text{ k}\Omega$) ($V_{Pin\ 4} = 0\text{ V}$, $C_T = 0.001\text{ }\mu\text{F}$, $R_T = 30\text{ k}\Omega$)	DC_{max}	45 —	48 45	50 50	%
Input Threshold Voltage (Pin 4) (Zero Duty Cycle) (Maximum Duty Cycle)	V_{in}	— 0	2.8 —	3.3 —	V
OSCILLATOR SECTION					
Frequency ($C_T = 0.001\text{ }\mu\text{F}$, $R_T = 30\text{ k}\Omega$)	f_{osc}	—	40	—	kHz
Standard Deviation of Frequency* ($C_T = 0.001\text{ }\mu\text{F}$, $R_T = 30\text{ k}\Omega$)	σ_{fosc}	—	3.0	—	%
Frequency Change with Voltage ($V_{CC} = 7.0\text{ V}$ to 40 V , $T_A = 25^\circ\text{C}$)	$\Delta f_{osc} (\Delta V)$	—	0.1	—	%
Frequency Change with Temperature ($\Delta T_A = T_{low}$ to T_{high}) ($C_T = 0.01\text{ }\mu\text{F}$, $R_T = 12\text{ k}\Omega$)	$\Delta f_{osc} (\Delta T)$	—	—	12	%
UNDERVOLTAGE LOCKOUT SECTION					
Turn-On Threshold (V_{CC} increasing, $I_{ref} = 1.0\text{ mA}$)	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) ($V_{CC} = 15\text{ V}$) ($V_{CC} = 40\text{ V}$)	I_{CC}	— —	5.5 7.0	10 15	mA
Average Supply Current ($C_T = 0.01\text{ }\mu\text{F}$, $R_T = 12\text{ k}\Omega$, $V_{(Pin\ 4)} = 2.0\text{ V}$) ($V_{CC} = 15\text{ V}$) (See Figure 12)		—	7.0	—	mA

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

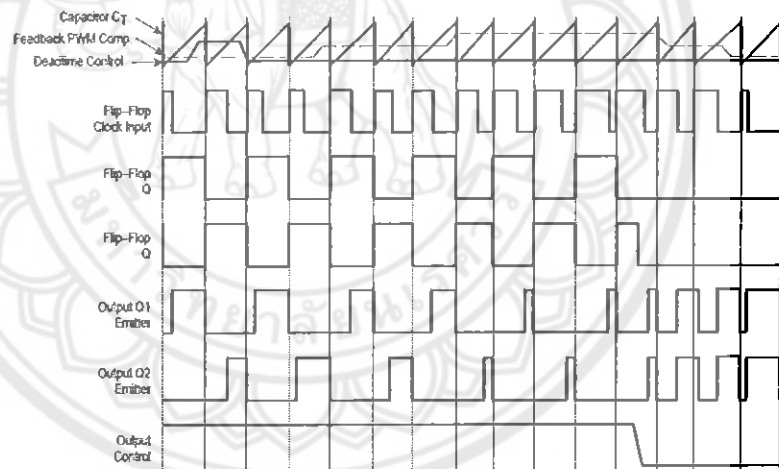
TL494

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:

$$f_{osc} = \frac{1}{R_T \cdot C_T}$$

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 deadline control, the error amplifier inputs, or the feedback input. The deadline control comparator has an effective 120 mV input offset which limits the minimum output deadline 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 deadline may be imposed on the output by setting the deadline-control input to a fixed voltage, ranging between 0 V to 3.3 V.

Functional Table

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

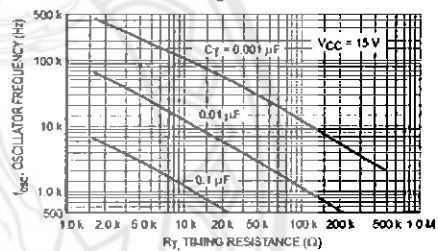
The pulse width modulator comparator provides a means for the error amplifiers to adjust the output pulse width from the maximum percent on-time, established by the deadline control input, down to zero, as the voltage at the feedback pin varies from 0.5 V to 3.5 V. Both error amplifiers have a common 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 deadline 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 $\pm 5.0\%$ 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



TL494

Figure 4. Open Loop Voltage Gain and Phase versus Frequency

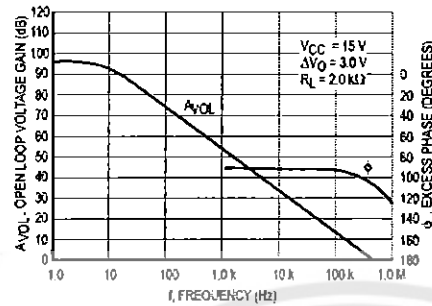


Figure 5. Percent Deadtime versus Oscillator Frequency

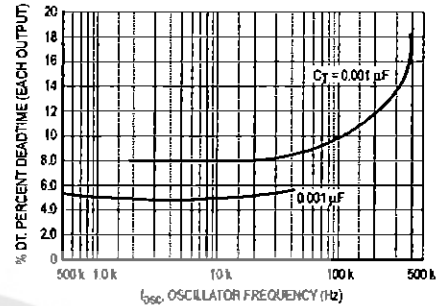


Figure 6. Percent Duty Cycle versus Deadtime Control Voltage

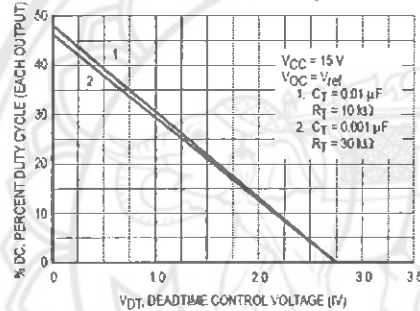


Figure 7. Emitter-Follower Configuration Output Saturation Voltage versus Emitter Current

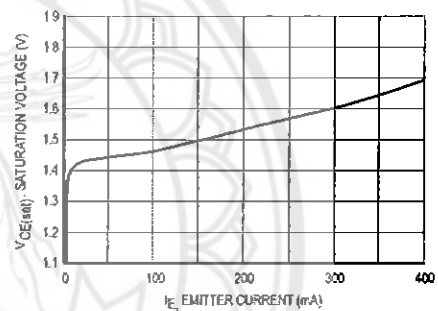


Figure 8. Common-Emitter Configuration Output Saturation Voltage versus Collector Current

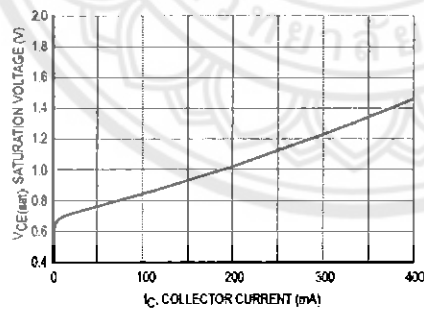
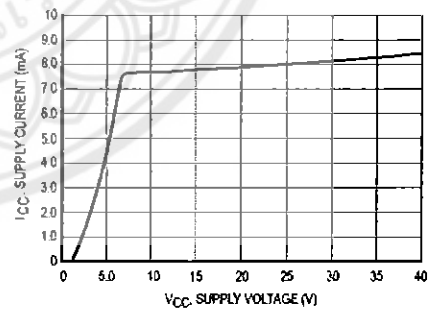
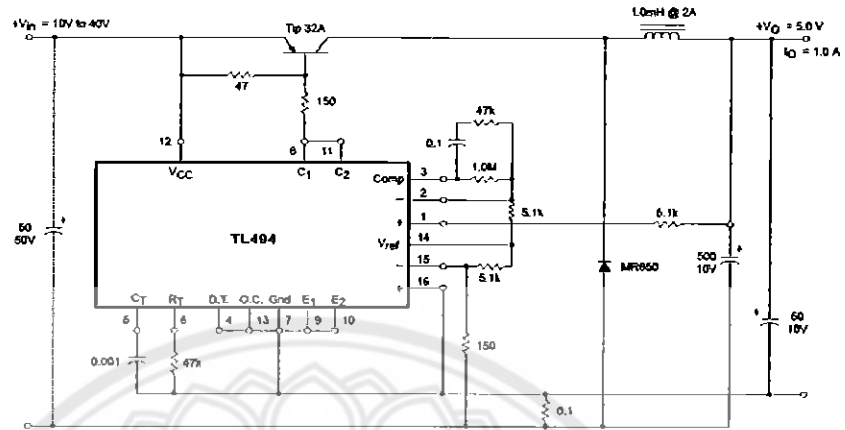


Figure 9. Standby Supply Current versus Supply Voltage



TL494

Figure 21. Pulse Width Modulated Step-Down Converter



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



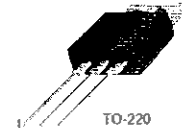
ภาคผนวก ค
รายละเอียดของทรานซิสเตอร์หมายเลข Tip 32C

FAIRCHILD
SEMICONDUCTOR

TIP32 Series(TIP32/32A/32B/32C)

Medium Power Linear Switching Applications

• Complement to TIP31/31A/31B/31C



1.Base 2.Collector 3.Emitter

PNP Epitaxial Silicon Transistor

Absolute Maximum Ratings $T_C=25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted

Symbol	Parameter	Value	Units
V_{CE0}	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_{EB0}	Emitter-Base Voltage	-6	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 ($T_C=25^\circ\text{C}$)	40	W
P_C	Collector Dissipation ($T_a=25^\circ\text{C}$)	2	W
T_J	Junction Temperature	150	$^\circ\text{C}$
T_{STG}	Storage Temperature	-65 ~ 150	$^\circ\text{C}$

Electrical Characteristics $T_C=25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted

Symbol	Parameter	Test Condition	Min.	Max.	Units
$V_{CE0}(\text{sus})$	* Collector-Emitter Sustaining Voltage				
	: TIP32	$I_C = -30\text{mA}, I_B = 0$	-40		V
	: TIP32A		-60		V
	: TIP32B		-80		V
	: TIP32C		-100		V
I_{CEO}	Collector Cut-off Current				
	: TIP32/32A	$V_{CE} = -30\text{V}, I_B = 0$		-0.3	mA
	: TIP32B/32C	$V_{CE} = -60\text{V}, I_B = 0$		-0.3	mA
I_{CES}	Collector Cut-off Current				
	: TIP32	$V_{CE} = -40\text{V}, V_{EB} = 0$		-200	μA
	: TIP32A	$V_{CE} = -60\text{V}, V_{EB} = 0$		-200	μA
	: TIP32B	$V_{CE} = -80\text{V}, V_{EB} = 0$		-200	μA
	: TIP32C	$V_{CE} = -100\text{V}, V_{EB} = 0$		-200	μA
I_{EBO}	Emitter Cut-off Current	$V_{EB} = -5\text{V}, I_C = 0$		-1	mA
h_{FE}	* DC Current Gain				
		$V_{CE} = -4\text{V}, I_C = -1\text{A}$	25		
		$V_{CE} = -4\text{V}, I_C = -3\text{A}$	10	50	
$V_{CE}(\text{sat})$	* Collector-Emitter Saturation Voltage	$I_C = -3\text{A}, I_B = -375\text{mA}$		-1.2	V
$V_{BE}(\text{sat})$	* Base-Emitter Saturation Voltage	$V_{CE} = -4\text{V}, I_C = -3\text{A}$		-1.8	V
f_T	Current Gain Bandwidth Product	$V_{CE} = -10\text{V}, I_C = -600\text{mA}$	3.0		MHz

* Pulse Test: PWS300ps, Duty Cycle2%

©2000 Fairchild Semiconductor International

Rev. A, February 2000

TIP32 Series(TIP32/32A/32B/32C)

Typical Characteristics

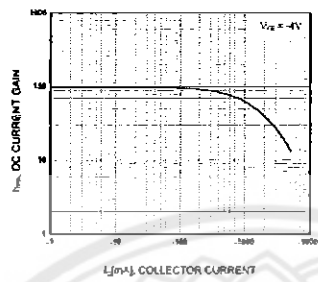


Figure 1. DC current Gain

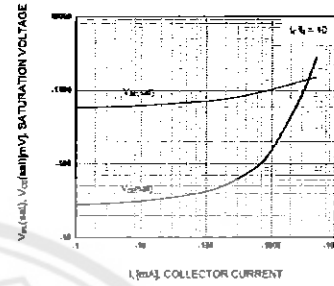


Figure 2. Base-Emitter Saturation Voltage
Collector-Emitter Saturation Voltage

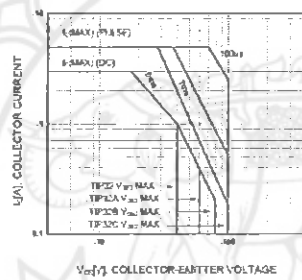


Figure 3. Safe Operating Area

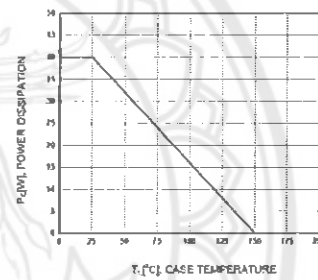


Figure 4. Power Derating



ภาคผนวก ง

รายละเอียดของทรานซิสเตอร์หมายเลข BD139 และ BD140

มหาวิทยาลัยพระนคร



BD135 - BD136 BD139 - BD140

Complementary low voltage transistor

Features

- Products are pre-selected in DC current gain

Application

- General purpose

Description

These epitaxial planar transistors are mounted in the SOT-32 plastic package. They are designed for audio amplifiers and drivers utilizing complementary or quasi-complementary circuits. The NPN types are the BD135 and BD139, and the complementary PNP types are the BD136 and BD140.

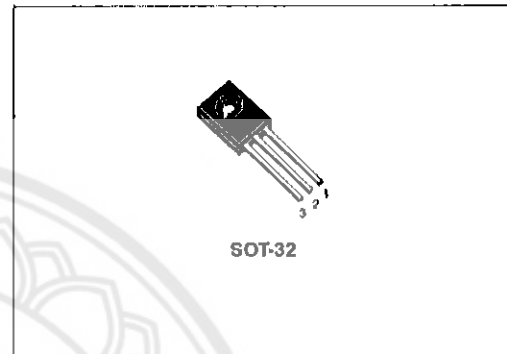


Figure 1. Internal schematic diagram

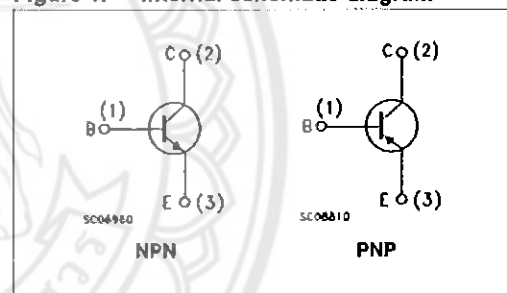


Table 1. Device summary

Order codes	Marking	Package	Packaging
BD135	BD135	SOT-32	Tube
BD135-16	BD135-16		
BD136	BD136		
BD136-16	BD136-16		
BD139	BD139		
BD139-10	BD139-10		
BD139-16	BD139-16		
BD140	BD140		
BD140-10	BD140-10		
BD140-16	BD140-16		

1 Electrical ratings

Table 2. Absolute maximum ratings

Symbol	Parameter	Value				Unit
		NPN		PNP		
		BD135	BD139	BD136	BD140	
V_{CBO}	Collector-base voltage ($I_E = 0$)	45	80	-45	-80	V
V_{CEO}	Collector-emitter voltage ($I_B = 0$)	45	80	-45	-80	V
V_{EBO}	Emitter-base voltage ($I_C = 0$)	5		-5		V
I_C	Collector current	1.5		-1.5		A
I_{CM}	Collector peak current	3		-3		A
I_B	Base current	0.5		-0.5		A
P_{TOT}	Total dissipation at $T_c \leq 25^\circ\text{C}$	12.5				W
P_{TOT}	Total dissipation at $T_{amb} \leq 25^\circ\text{C}$	1.25				W
T_{stg}	Storage temperature	-65 to 150				$^\circ\text{C}$
T_j	Max. operating junction temperature	150				$^\circ\text{C}$

Table 3. Thermal data

Symbol	Parameter	Max value	Unit
$R_{thj-case}$	Thermal resistance junction-case	10	$^\circ\text{C/W}$
$R_{thj-amb}$	Thermal resistance junction-ambient	100	$^\circ\text{C/W}$

2 Electrical characteristics

($T_{\text{case}} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ unless otherwise specified)

Table 4. On/off states

Symbol	Parameter	Polarity	Test conditions	Value			Unit
				Min.	Typ.	Max.	
I_{CBO}	Collector cut-off current ($I_{\text{E}}=0$)	NPN	$V_{\text{CB}} = 30\text{ V}$ $V_{\text{CB}} = 30\text{ V}, T_{\text{C}} = 125\text{ }^{\circ}\text{C}$			0.1 10	μA μA
		PNP	$V_{\text{CB}} = -30\text{ V}$ $V_{\text{CB}} = -30\text{ V}, T_{\text{C}} = 125\text{ }^{\circ}\text{C}$			-0.1 -10	μA μA
I_{EBO}	Emitter cut-off current ($I_{\text{C}}=0$)	NPN	$V_{\text{EB}} = 5\text{ V}$			10	μA
		PNP	$V_{\text{EB}} = -5\text{ V}$			-10	μA
$V_{\text{CEO(sus)}}^{(1)}$	Collector-emitter sustaining voltage ($I_{\text{B}}=0$)	NPN	$I_{\text{C}} = 30\text{ mA}$ BD135	45			V
			BD139	80			V
		PNP	$I_{\text{C}} = -30\text{ mA}$ BD136	-45			V
			BD140	-80			V
$V_{\text{CE(sat)}}^{(1)}$	Collector-emitter saturation voltage	NPN	$I_{\text{C}} = 0.5\text{ A}, I_{\text{B}} = 0.05\text{ A}$			0.5	V
		PNP	$I_{\text{C}} = -0.5\text{ A}, I_{\text{B}} = -0.05\text{ A}$			-0.5	V
$V_{\text{BE}}^{(1)}$	Base-emitter voltage	NPN	$I_{\text{C}} = 0.5\text{ A}, V_{\text{CE}} = 2\text{ V}$			1	V
		PNP	$I_{\text{C}} = -0.5\text{ A}, V_{\text{CE}} = -2\text{ V}$			-1	V
$h_{\text{FE}}^{(1)}$	DC current gain	NPN	$I_{\text{C}} = 5\text{ mA}, V_{\text{CE}} = 2\text{ V}$	25			
			$I_{\text{C}} = 150\text{ mA}, V_{\text{CE}} = 2\text{ V}$	40		250	
			$I_{\text{C}} = 0.5\text{ A}, V_{\text{CE}} = 2\text{ V}$	25			
		PNP	$I_{\text{C}} = -5\text{ mA}, V_{\text{CE}} = -2\text{ V}$	25			
			$I_{\text{C}} = -150\text{ mA}, V_{\text{CE}} = -2\text{ V}$	40		250	
			$I_{\text{C}} = -0.5\text{ A}, V_{\text{CE}} = -2\text{ V}$	25			
$h_{\text{FE}}^{(1)}$	h_{FE} groups	NPN	$I_{\text{C}} = 150\text{ mA}, V_{\text{CE}} = 2\text{ V}$ BD139-10	63		160	
			BD135-16/BD139-16	100		250	
		PNP	$I_{\text{C}} = -150\text{ mA}, V_{\text{CE}} = -2\text{ V}$ BD140-10	63		160	
			BD136-16/BD140-16	100		250	

1. Pulsed: pulse duration = 300 μs , duty cycle 1.5%

2.1 Electrical characteristics (curves)

Figure 2. Safe operating area

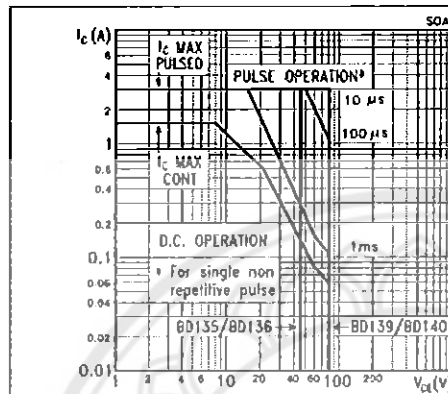
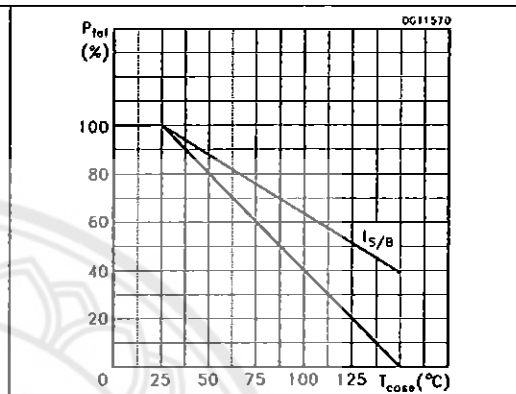


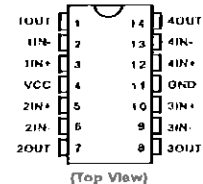
Figure 3. Derating





LM324**Low Power Quad Operational Amplifier****DESCRIPTION**

The LM324 contains four independent high gain operational amplifiers with internal frequency compensation. The four op-amps operate over a wide voltage range from a single power supply. Also use a split power supply. The device has low power supply current drain, regardless of the power supply voltage. The low power drain also makes the LM324 a good choice for battery operation.

PIN CONFIGURATION**FEATURES**

- Internally frequency-compensated for unity gain
- Large DC voltage gain: 100 dB
- Wide bandwidth (unity gain): 1 MHz (temperature-compensated)
- Wide power supply range:
 - Single supply: 3VDC to 32 VDC
 - Dual supplies: ± 1.5 VDC to ± 16 VDC
- Differential input voltage range equal to the power supply voltage
- Power drain suitable for battery operation
- Large output voltage swing 0VDC to $V_{CC}-1.5$ VDC

APPLICATIONS

- Transducer Amplifiers
- DC Gain-blocks
- All The Conventional Op Amp Circuits

ORDERING INFORMATION

Temperature Range	Package		Orderable Device	Package Qty
-40°C to +85°C	SOP14	Pb-Free	LM324D	50Units/Tube
			LM324DR	3000Units/R&T
	DIP14		LM324N	25Units/Tube



April, 2007

Rev 1.1

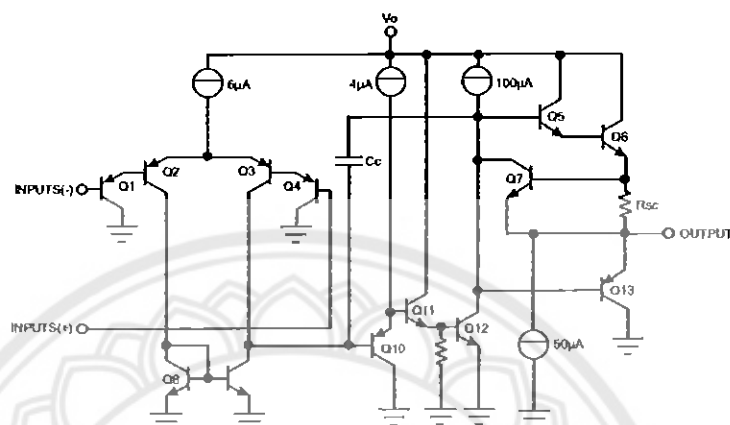
LM324**SCHEMATIC DIAGRAM**

Figure 1. Simplified Block Diagram

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS(NOTE1)

Parameter		Symbol	Value	Unit
Power Supply Voltages	Single Supply	V_{CC}	32	V
	Split Supplies		± 16	
Input Differential Voltage Range(Note 2)		V_{IDR}	± 32	V
Input Common Mode Voltage Range		V_{ICR}	-0.3 to 32	V
Output Short Circuit Duration		I_{SC}	Continuous	
Junction Temperature (Plastic Packages)		T_J	150	$^{\circ}\text{C}$
Storage Temperature (Plastic Packages)		T_{SG}	-55 to +125	$^{\circ}\text{C}$
Input Current, per pin(Note 3)		I_{IN}	50	mA
Lead Temperature, 1mm from Case for 10 Seconds		T_L	260	$^{\circ}\text{C}$

Note 1: Maximum Ratings are those values beyond which damage to the device may occur. Functional operation should be restricted to the Recommended Operating Conditions.

Power Derating:

DIP Package:-10mW/ $^{\circ}\text{C}$ from 65 to 125 $^{\circ}\text{C}$

SOP Package:-7mW/ $^{\circ}\text{C}$ from 65 to 125 $^{\circ}\text{C}$

Note 2: Split Power Supplies.

Note 3: $V_{IN} < -0.3\text{V}$. This input current will only exist when voltage at any of the input leads is driven negative.



April, 2007

Rev 1.1

LM324**RECOMMENDED OPERATING CONDITIONS**

Parameter	Symbol	Min	Max	Unit
DC Supply Voltage	Single Supply	5.0	30	V
	Split Supplies	±2.5	+15	
Operating Temperature, All Package Types	T _A	-40	+85	°C

Notes: This device contains protection circuitry to guard against damage due to high static voltages or electric fields. However, precautions must be taken to avoid applications of any voltage higher than maximum rated voltages to this high-impedance circuit. For proper operation, V_{IN} and V_{OUT} should be constrained to the range GND ≤ (V_{IN} or V_{OUT}) ≤ V_{CC}.

Unused inputs must always be tied to an appropriate logic voltage level (e.g., either GND or V_{CC}).

Unused outputs must be left open.

DC ELECTRICAL CHARACTERISTICS (T_A = -40 to +85°C)

Parameter	Symbol	Test Conditions	Min	Typ	Max	Unit
Maximum Input Offset Voltage	V _{IO}	V _O = 1.4V, V _{CC} = 5.0-30V R _S = 0, V _{ICM} = 0V, I _O = V _{CC} - 1.7V			9.0 5.0*	mV
Input Offset Voltage Drift	ΔV _{IO} /ΔT	R _S = 0Ω, V _{CC} = 30V		7.0		μV/°C
Maximum Input Offset Current	I _{IO}	V _{CC} = 5.0V			150 50*	nA
Input Offset Current Drift	ΔI _{IO} /ΔT	R _S = 0Ω, V _{CC} = 30V		10		pA/°C
Maximum Input Bias Current	I _{IB}	V _{CC} = 5.0V			500 250*	nA
Input Common Mode Voltage Range	V _{ICR}	V _{CC} = 30V	0		28	V
Maximum Power Supply Current	I _{CC}	R _L = ∞, V _{CC} = 30V, V _O = 0V			3	mA
		R _L = ∞, V _{CC} = 5V, V _O = 0V			1.2	
Minimum Large Signal Open-Loop Voltage Gain	A _{VOL}	V _{CC} = 15V R _L ≥ 2kΩ	15 25*			V/mV
Minimum Output Low-Level Voltage Swing	V _{OL}	V _{CC} = 30V, R _L = 2kΩ	26			V
		V _{CC} = 30V, R _L = 10kΩ	27			
Maximum Output Low-Level Voltage Swing	V _{OL}	V _{CC} = 5V, R _L = 10kΩ			20	mV
Common Mode Rejection	CMR	V _{CC} = 30V, R _L = 10kΩ	65*			dB



April, 2007

Rev 1.1

LM324**DC ELECTRICAL CHARACTERISTICS(CONTINUED)**

Parameter	Symbol	Test Conditions	Min	Typ	Max	Unit
Power Supply Rejection	PSR	$V_{CC}=30V$	85*			dB
Channel Separation	CS	$f=1kHz$ to $20kHz$, $V_{CC}=30V$	-120*			dB
Maximum Output Short Circuit to GND	I_{ISC}	$V_{CC}=5.0V$			60*	mA
Minimum Output Source Current	I_{SOURCE}	$V_{IN}=1V, V_{OUT}=0V$, $V_{CC}=16V, V_{EE}=0V$	-10			mA
Minimum Output Sink Current	I_{SINK}	$V_{IN}=0V, V_{OUT}=1V$, $V_{CC}=15V, V_{EE}=15V$	5	10*		mA
		$V_{IN}=0V, V_{OUT}=1V$, $V_{CC}=15V, V_{EE}=0.2V$	12*			μA
Differential Input Voltage Range	V_{ICR}	ALL $V_{IN}>GND$ or V-Supply (if used)			V_{CC}	V

*at $T_A=25^{\circ}C$ 

April, 2007
Rev 1.1

-1

www.chipsaliner.com






Certificate Number: Q10561



Certificate Number: E17776

FR201 - FR207-STR

PRV : 50 - 1000 Volts

Io : 2.0 Amperes

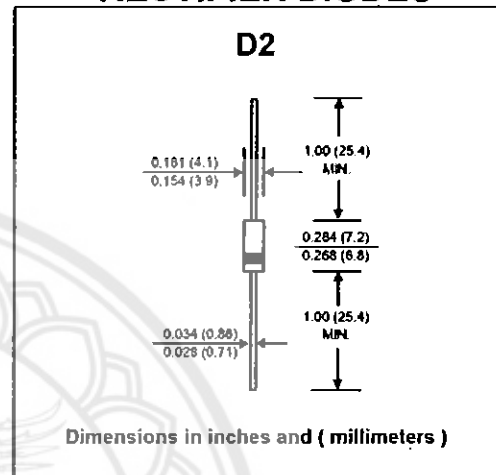
FEATURES :

- * High current capability
- * High surge current capability
- * High reliability
- * Low reverse current
- * Low forward voltage drop
- * Fast switching for high efficiency

MECHANICAL DATA :

- * Case : D2 Molded plastic
- * Epoxy : UL94V-0 rate flame retardant
- * Lead : Axial lead solderable per MIL-STD-202, Method 208 guaranteed
- * Polarity : Color band denotes cathode end
- * Mounting position : Any
- * Weight : 0.465 gram

FAST RECOVERY RECTIFIER DIODES



MAXIMUM RATINGS AND ELECTRICAL CHARACTERISTICS

Rating at 25 °C ambient temperature unless otherwise specified
Single phase, half wave, 60 Hz, resistive or inductive load.
For capacitive load, derate current by 20%.

RATING	SYMBOL	FR201	FR202	FR203	FR204	FR205	FR206	FR207	FR207-STR	UNIT
Maximum Recurrent Peak Reverse Voltage	VRRM	50	100	200	400	600	800	1000	1000	V
Maximum RMS Voltage	VRMS	35	70	140	280	420	560	700	700	V
Maximum DC Blocking Voltage	VDC	50	100	200	400	600	800	1000	1000	V
Maximum Average Forward Current 0.375"(9.5mm) Lead Length Ta = 55 °C	IF(AV)	2.0								A
Peak Forward Surge Current, 8.3ms Single half sine wave Superimposed on rated load (JEDEC Method)	IFSM	75								A
Maximum Peak Forward Voltage at IF = 2.0 Amps.	VF	1.3								V
Maximum DC Reverse Current Ta = 25 °C	IR	10								µA
at Rated DC Blocking Voltage Ta = 100 °C	IR(H)	500								µA
Maximum Reverse Recovery Time (Note 1)	Trr	150					250	500	250	ns
Typical Junction Capacitance (Note 2)	Cj	15								pF
Junction Temperature Range	TJ	- 65 to + 150								°C
Storage Temperature Range	TSTG	- 65 to + 150								°C

Notes :

- (1) Reverse Recovery Test Conditions : $I_F = 0.5$ A, $I_R = 1.0$ A, $t_{rr} = 0.25$ A.
- (2) Measured at 1.0 MHz and applied reverse voltage of 4.0 Vdc



Certificate Number: Q18541



Certificate Number: E17224

RATING AND CHARACTERISTIC CURVES (FR201 - FR207-STR)

FIG.1 - REVERSE RECOVERY TIME CHARACTERISTIC AND TEST CIRCUIT DIAGRAM

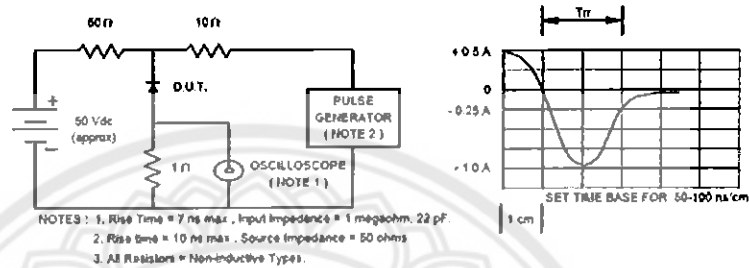


FIG.2 - DERATING CURVE FOR OUTPUT RECTIFIED CURRENT

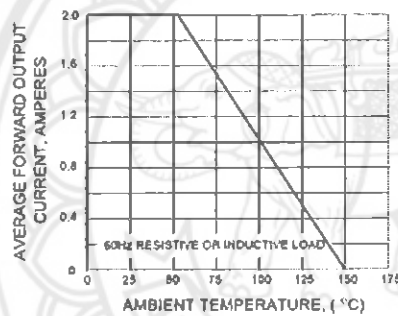


FIG.3 - MAXIMUM NON-REPETITIVE PEAK FORWARD SURGE CURRENT

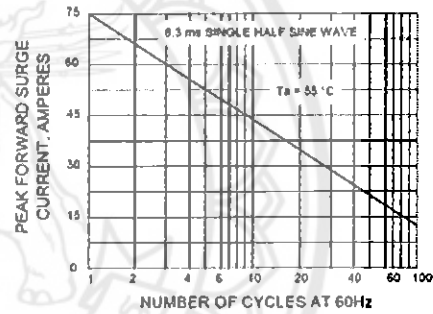


FIG.4 - TYPICAL FORWARD CHARACTERISTICS

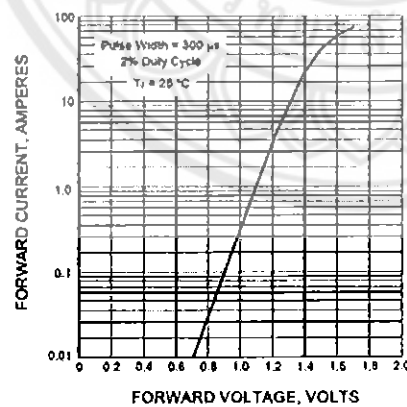
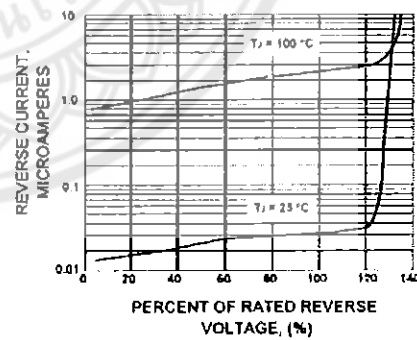


FIG.5 - TYPICAL REVERSE CHARACTERISTICS





รายละเอียดของตัวคุมค่าแรงดัชนีหมายเลข L7805CV



L7800 series

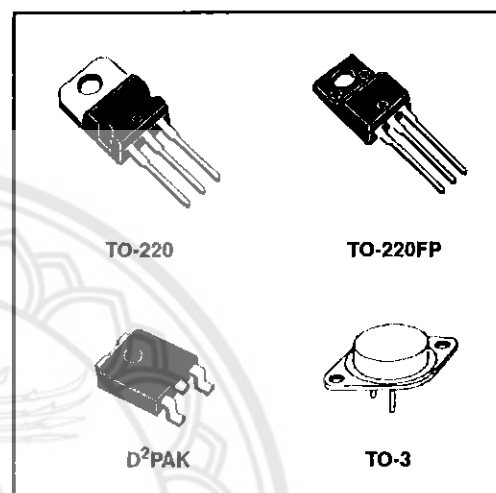
Positive voltage regulators

Feature summary

- Output current to 1.5A
- Output voltages of 5; 5.2; 6; 8; 8.5; 9; 10; 12; 15; 18; 24V
- Thermal overload protection
- Short circuit protection
- Output transition SOA protection

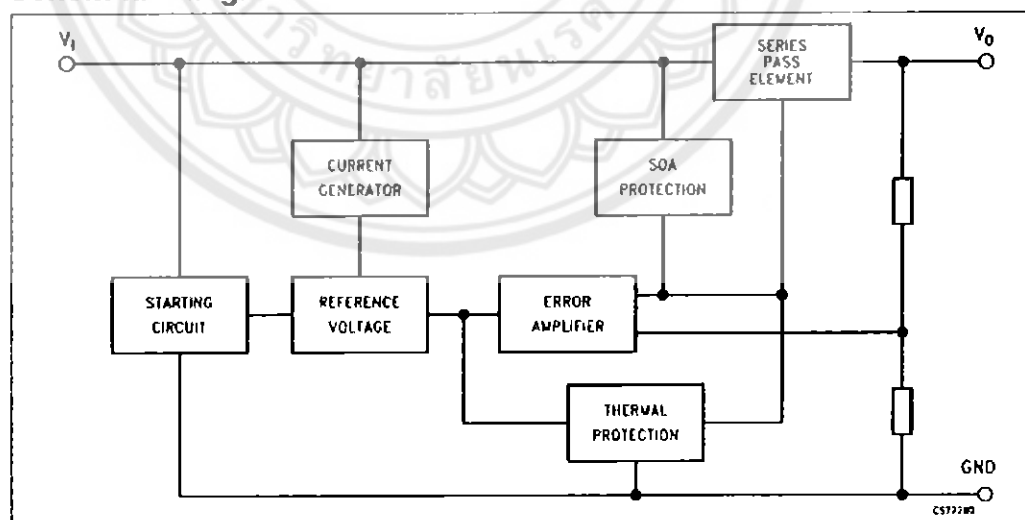
Description

The L7800 series of three-terminal positive regulators is available in TO-220, TO-220FP, TO-3 and D²PAK packages and several fixed output voltages, making it useful in a wide range of applications. These regulators can provide local on-card regulation, eliminating the distribution problems associated with single point regulation. Each type employs internal current limiting, thermal shut-down and safe area protection, making it essentially indestructible. If adequate heat sinking is provided, they can deliver over 1A output current. Although designed



primarily as fixed voltage regulators, these devices can be used with external components to obtain adjustable voltage and currents.

Schematic diagram



1 Pin configuration

Figure 1. Pin connections (top view)

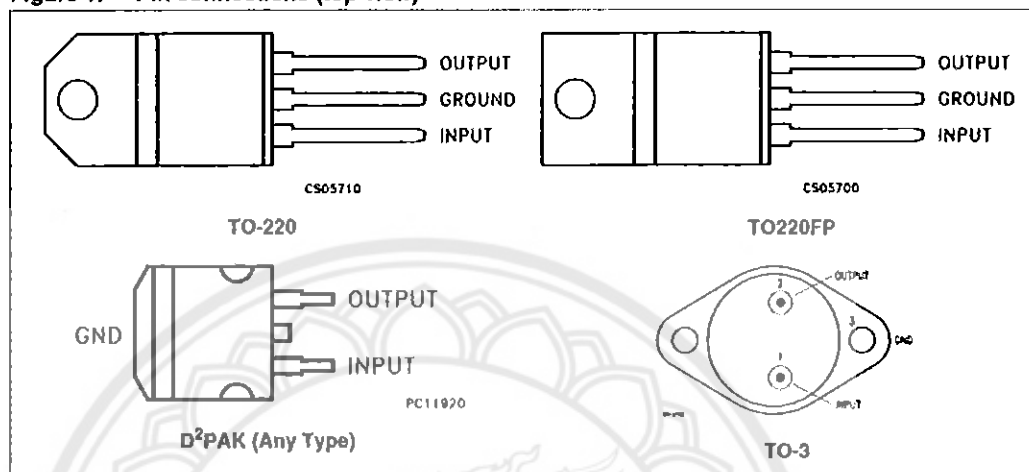
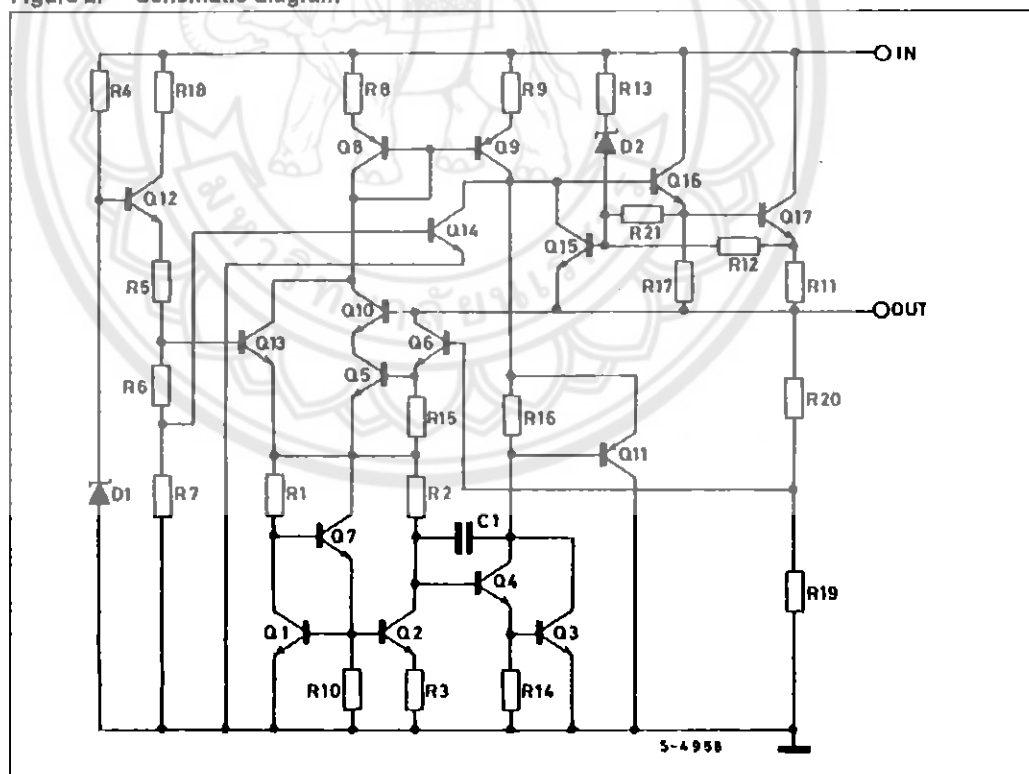


Figure 2. Schematic diagram



2 Maximum ratings

Table 1. Absolute maximum ratings

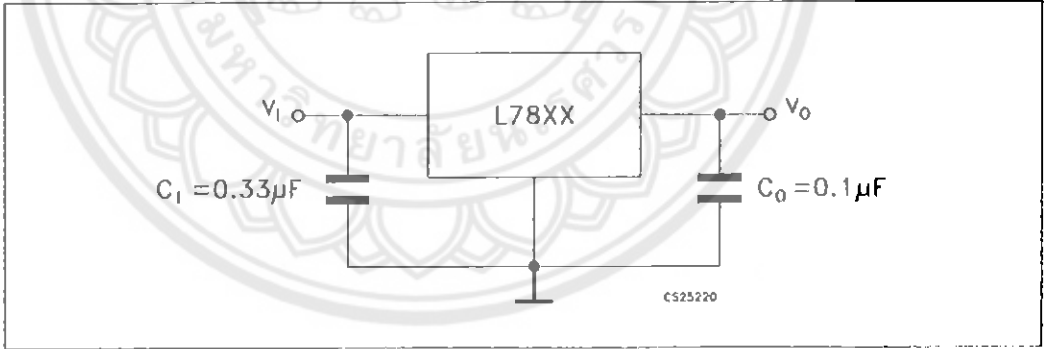
Symbol	Parameter		Value	Unit
V _I	DC Input voltage	for V _O = 5 to 18V	35	V
		for V _O = 20, 24V	40	
I _O	Output current		Internally Limited	
P _D	Power dissipation		Internally Limited	
T _{STG}	Storage temperature range		-65 to 150	°C
T _{OP}	Operating junction temperature range	for L7800	-55 to 150	°C
		for L7800C	0 to 150	

Note: Absolute Maximum Ratings are those values beyond which damage to the device may occur. Functional operation under these condition is not implied

Table 2. Thermal Data

Symbol	Parameter	D ² PAK	TO-220	TO-220FP	TO-3	Unit
R_{thJC}	Thermal resistance junction-case	3	5	5	4	°C/W
R_{thJA}	Thermal resistance junction-ambient	62.5	50	60	35	°C/W

Figure 3. Application circuits





ภาคผนวก ช

รายละเอียดของรีเลย์หมายเลข HRS2H-S-DC5V



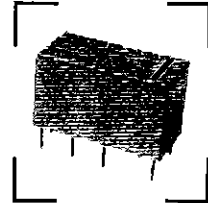
Safety Approval

UL US No. E164730

TUV No. 50097843

Features

- Microminiature relay
Dimension: 20.3×9.9×11.4 (mm)
- High sensitivity
- 2 Form C contacts



ORDERING INFORMATION

HRS2H - [S] - [DC12V] - [T]			
Model	Enclosure	Coil Voltage	Coil Sensitivity
	S - Plastic Sealed Type	DC3V, DC5V, DC6V DC9V, DC12V, DC24V	Blank: 450mW T - High Sensitivity (150mW) N - Sensitivity (200mW) B - Standard 360mW (48VDC: 400mW)

Remarks: 1. Available in 2 Form C only 2. Contact rating: 1A, 2A

SPECIFICATION

CONTACT DATA

Contact Form	2 Form C	
Contact Material	AuAg overlay, Ag Alloy	
Contact Rating	1A 120VAC/24VDC 2A 120VAC/24VDC	
Contact Resistance	Max. 50mΩ (6VDC 0.1A)	
Load	Max. Switching Voltage	125VAC/30VDC
	Max. Switching Current	2A
	Max. Switching Power	250VA, 60W
	Min. Switching Load	5VDC, 10mA
Life	Electrical	100,000 operations
	Mechanical	15,000,000 operations

COIL DATA

Nominal Coil Power	150mW, 200mW, 360mW, 450mW
--------------------	----------------------------

GENERAL DATA

Insulation Resistance		Min. 1000MΩ 500VDC
Dielectric Strength	Between open contacts	500VAC, 1min
	Between coil and contacts	1,000VAC, 1min
Operate Time		Max. 7ms
Release Time		Max. 3ms
Operating Temperature		-25°C to +70°C
Humidity		35~95%RH, +40°C
Surge Strength		1,500VAC, 10x160 μs
Shock Resistance	Endurance	1,000m/s ²
	Misoperation	100m/s ²
Vibration Resistance	Endurance	10~55Hz, 1.5mm double amplitude
	Misoperation	10~55Hz, 1.5mm double amplitude
Weight		Approximately 5.0g

Note: Data shown are of initial value

SAFETY APPROVAL

File Number	Contact Form	Power Consumption	Coil Voltage	Contact Rating	Remark
UL E164730	C	0.15W/0.20W/0.36W	3-48VDC	1A 120VAC/24VDC	Ambient Temperature: 85°C
	C	0.45W	3-48VDC	2A 120VAC/24VDC	
	C	0.45W	3-48VDC	1A 120VAC/24VDC	
TUV 50097843	C	0.20W/0.36W	3-24VDC	1A 120VAC/24VDC	Ambient Temperature: 70°C

Specifications subject to change without notice

ISO9001, ISO/TS16949, ISO14001 Approved

EKE HRS2H-198

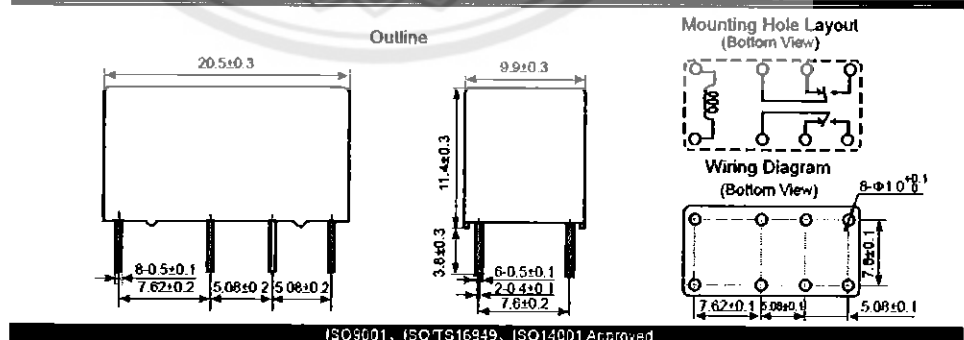


COIL DATA

Ambient Temperature: 23°C

Model	Nominal Voltage VDC	Coil Resistance $\Omega \pm 10\%$	Operate Voltage $\leq \text{VDC}$	Release Voltage $\geq \text{VDC}$	Coil Power mW
HRS2H-S-DC3V-N	3	45	2.25	0.3	200
HRS2H-S-DC5V-N	5	125	3.75	0.5	
HRS2H-S-DC6V-N	6	180	4.5	0.6	
HRS2H-S-DC9V-N	9	405	6.75	0.9	
HRS2H-S-DC12V-N	12	720	9.0	1.2	
HRS2H-S-DC24V-N	24	2880	18.0	2.4	
HRS2H-S-DC48V-N	48	11520	36.0	4.8	150
HRS2H-S-DC3V-T	3	60	2.25	0.3	
HRS2H-S-DC5V-T	5	168	3.75	0.5	
HRS2H-S-DC6V-T	6	240	4.5	0.6	
HRS2H-S-DC9V-T	9	540	6.75	0.9	
HRS2H-S-DC12V-T	12	960	9.0	1.2	
HRS2H-S-DC24V-T	24	3840	18.0	2.4	360
HRS2H-S-DC48V-T	48	15360	36.0	4.8	
HRS2H-S-DC3V-B	3	25	2.25	0.3	
HRS2H-S-DC5V-B	5	69.4	3.75	0.5	
HRS2H-S-DC6V-B	6	100	4.5	0.6	
HRS2H-S-DC9V-B	9	225	6.75	0.9	
HRS2H-S-DC12V-B	12	400	9.0	1.2	400
HRS2H-S-DC24V-B	24	1600	18.0	2.4	
HRS2H-S-DC48V-B	48	5760	36.0	4.8	450
HRS2H-S-DC3V	3	20	2.25	0.3	
HRS2H-S-DC5V	5	55.6	3.75	0.5	
HRS2H-S-DC6V	6	80	4.5	0.6	
HRS2H-S-DC9V	9	180	6.75	0.9	
HRS2H-S-DC12V	12	320	9.0	1.2	
HRS2H-S-DC24V	24	1280	18.0	2.4	
HRS2H-S-DC48V	48	5120	36.0	4.8	

OUTLINE, WIRING DIAGRAM, MOUNTING HOLE LAYOUT (UNIT: mm)



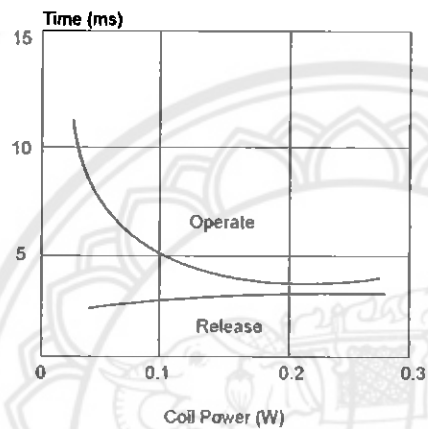
ISO9001, ISO/TS16949, ISO14001 Approved

HKE HRS2H-199

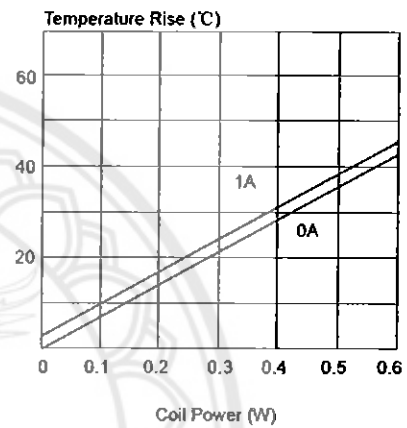


REFERENCE DATA

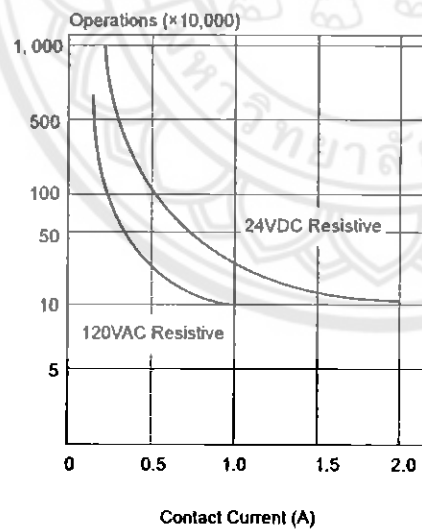
Timing



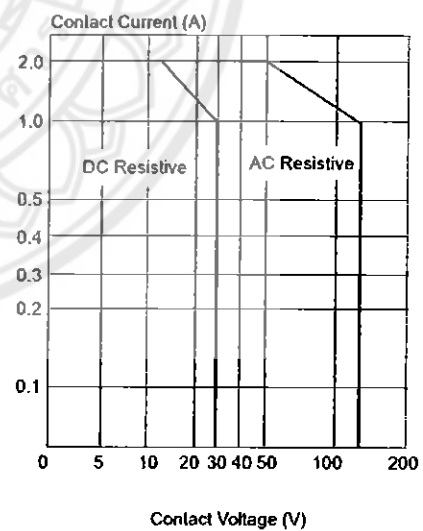
Coil Temperature Rise



Life Curves



Maximum Switching Power



ISO9001, ISO/TS16949, ISO14001 Approved

EKE HRS2H-200