



## จักรยานไฟฟ้าสองระบบ รุ่นที่ 2

### TWO-OPERATING-MODE ELECTRIC BIKE II

นายวินัย คำวร รหัส 50362320

นายกิตติศักดิ์ จันทะเสน รหัส 50364454

นายมนตรี เอมอทัย รหัส 50364744

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์
วันที่รับ..... ๑๙ มิ.ค. 2555
เลขทะเบียน..... 154538/8
เลขเรียกหนังสือ..... ม/ร
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 2619 ๗

2553  
ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ปีการศึกษา 2553



## ใบรับรองปริญญาโท

ชื่อหัวข้อโครงการ    จักรยานไฟฟ้าสองระบบ รุ่นที่ 2

ผู้ดำเนินโครงการ    นายวินัย    คำว    รหัส 50362320

   นายกิตติศักดิ์    จันทะเสน    รหัส 50364454

   นายมนตรี    เอมอุทัย    รหัส 50364744


ที่ปรึกษาโครงการ    ดร. นิพัทธ์    จันทรมินทร์

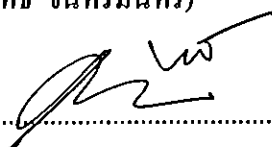
สาขาวิชา    วิศวกรรมไฟฟ้า

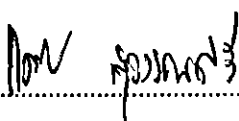
ภาควิชา    วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

ปีการศึกษา    2553

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครสวรรค์ อนุมัติให้ปริญญาโทฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

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

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

  
.....กรรมการ  
(ดร. แคทรียา    สุวรรณศรี)

ชื่อหัวข้อโครงการ จักรยานไฟฟ้าสองระบบ รุ่นที่ 2

ผู้ดำเนินโครงการ นายวินัย คำวร รหัส 50362320  
นายกิตติศักดิ์ จันทะเสน รหัส 50364454  
นายมนตรี เอมอุทัย รหัส 50364744

ที่ปรึกษาโครงการ ดร. นิพัทธ์ จันทรมินทร์

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

ปีการศึกษา 2553

#### บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการปรับปรุงโครงสร้างและการทำงานของจักรยานไฟฟ้าที่ถูกสร้างขึ้นในปีการศึกษา 2552 แนวคิดในการดำเนินโครงการนี้สืบเนื่องมาจากการตระหนักถึงสถานการณ์การใช้พลังงานในปัจจุบัน การสร้างมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม และปัญหาภาวะโลกร้อนซึ่งส่งผลให้เกิดความพยายามในการลดการใช้พลังงานอันนำมาซึ่งการพัฒนาโครงการ “จักรยานไฟฟ้าสองระบบ” ในปีการศึกษา 2552 ซึ่งสามารถขับเคลื่อนด้วยแบตเตอรี่และสามารถใช้พลังงานจากแรงปัดในขณะขับเคลื่อนเพื่ออัดประจุแบตเตอรี่ อย่างไรก็ตามจักรยานไฟฟ้าดังกล่าวยังมีข้อจำกัดหลายประการ ได้แก่ น้ำหนักโดยรวมของระบบค่อนข้างมาก ความสมดุลของโครงสร้างและในขณะขับเคลื่อนข้างน้อยอันเกิดจากน้ำหนักและตำแหน่งการติดตั้งของแบตเตอรี่ ความซับซ้อนของวงจรควบคุมส่งผลให้เกิดความยุ่งยากในการใช้งาน นอกจากนี้แรงดันและกระแสในขณะอัดประจุมีค่าต่ำ ดังนั้นในโครงการนี้จึงได้มีการออกแบบเพื่อลดน้ำหนักและเพิ่มความสมดุลของโครงสร้างจักรยานไฟฟ้า โดยเลือกขนาดของแบตเตอรี่และเปลี่ยนตำแหน่งการติดตั้งให้เหมาะสม และออกแบบชุดสวิทช์ควบคุมการทำงานให้ง่ายต่อการใช้งาน รวมทั้งเพิ่มศักยภาพในการอัดประจุแบตเตอรี่ด้วยการใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบทศรอบและปรับปรุงตัวควบคุมการอัดประจุที่สร้างจากวงจรทระดับแรงดันซึ่งสามารถคุมค่าแรงดันในระดับที่เหมาะสมต่อการอัดประจุ

**Project title** Two-Operating-Mode Electric Bike II

**Name** Mr. Winai Khumworn ID. 50362320  
Mr. Kittisuk Junthasen ID. 50364454  
Mr. Montri Aemuithai ID. 50364744

**Project advisor** Mr. Niphat Jantharamin, Ph.D.

**Major** Electrical Engineering

**Department** Electrical and Computer Engineering

**Academic year** 2010

---

### Abstract

This thesis presents improvements in structure and performance of the electric bike developed in 2009. The idea of carrying out this project arose from a glowing realization of current global energy situation and environmental problems. These issues encourage a reduction in energy consumption and therefore the development of the aforementioned two-operating-mode electric bike in the academic year 2009, of which the motor is driven by a battery set and recharged by energy from a generator during a ride. However, the developed system has some limitations such as heavy weight, lack of balance due to the position of the mounted batteries, complexity of control switches, and low charging voltage and current. In this project the aforesaid drawbacks are dealt with. Hereby, size, capacity and mounted position of the battery set is properly selected. Use of control switches is simplified. Performance of the battery charging is improved by means of a new generator with gearbox and a properly designed step-up regulator.

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาเป็นอย่างยิ่งจาก ดร. นิพัทธ์ จันทรมินทร์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ และให้ความกรุณาในการตรวจทานปริญาานิพนธ์ คณะผู้ดำเนินโครงการขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงและขอระลึกถึงความกรุณาของท่านไว้ตลอดไป

ขอขอบคุณคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้กับคณะผู้ดำเนินงาน

ขอขอบคุณคุณพลวัฒน์ ทองบัวบาน ที่ให้คำแนะนำเกี่ยวกับอุปกรณ์ในระหว่างดำเนินโครงการ

นอกจากนี้ยังต้องขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ที่ให้ยืมอุปกรณ์และเครื่องมือวัดมาใช้งาน จนทำให้โครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปได้

เหนือสิ่งอื่นใด คณะผู้ดำเนินโครงการขอกราบขอบพระคุณคุณพ่อ คุณแม่ ผู้มอบความรักความเมตตา สติปัญญา รวมทั้งเป็นผู้ให้ทุกสิ่งทุกอย่างตั้งแต่วัยเยาว์จวบจนถึงปัจจุบัน คอยเป็นกำลังใจทำให้ได้รับความสำเร็จอย่างทุกวันนี้ และขอขอบคุณทุก ๆ คนในครอบครัวของคณะผู้ดำเนินโครงการที่ไม่ได้กล่าวไว้ ณ ที่นี้ด้วย

นายวินัย คำวาร์

นายกิตติศักดิ์ จันทะเสน

นายมนตรี เอมอุทัย

## สารบัญ

	หน้า
ใบรับรองปริญญาโท.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ.....	2
1.4 ขั้นตอนและแผนการดำเนินงาน.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.6 งบประมาณที่ใช้.....	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>4</b>
2.1 โครงสร้างของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง.....	4
2.1.1 สเตเตอร์.....	5
2.1.2 โรเตอร์.....	6
2.1.3 แปรงถ่าน.....	7
2.2 การทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า.....	7
2.3 การทำงานเป็นมอเตอร์ไฟฟ้า.....	9
2.4 มอเตอร์ไฟฟ้าแบบไร้แปรงถ่าน.....	10
2.4.1 การทำงานของมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน.....	11
2.4.2 ข้อดีและข้อเสียของมอเตอร์ไร้แปรงถ่าน.....	13

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5 แบตเตอรี่แบบตะกั่ว.....	13
2.5.1 การแบ่งประเภทของแบตเตอรี่แบบตะกั่ว.....	14
2.5.2 ปฏิกริยาทางเคมีในแบตเตอรี่แบบตะกั่ว.....	14
2.5.3 อัตราการคายประจุ.....	16
2.5.4 การคายประจุด้วยตัวเอง.....	19
2.6 วงจรทบทระดับแรงดัน .....	20
2.6.1 เงื่อนไขการทำงานของวงจรทบทระดับแรงดัน.....	20
2.6.2 หลักการทำงานของวงจรทบทระดับแรงดัน.....	21
2.6.3 ค่าความพลิวของแรงดันไฟฟ้าค่านอก.....	25
บทที่ 3 การทำงานและการสร้างจักษยานไฟฟ้าสองระบบ รุ่นที่ 2 .....	27
3.1 การสร้างวงจรทบทระดับแรงดัน.....	28
3.1.1 ขั้นตอนการสร้างวงจรทบทระดับแรงดัน.....	28
3.1.2 การคำนวณค่าและเลือกใช้อุปกรณ์ของวงจรทบทระดับแรงดัน.....	28
3.2 การสร้างวงจรตรวจสอบระดับแรงดันแบตเตอรี่.....	33
3.2.1 หลักการทำงานของวงจรตรวจสอบระดับแรงดันแบตเตอรี่.....	33
3.3 การควบคุมการทำงานของจักษยานไฟฟ้าสองระบบ รุ่นที่ 2.....	34
3.4 การทำงานของจักษยานไฟฟ้าสองระบบ รุ่นที่ 2 .....	35
3.5 การประกอบชิ้นงานและปรับปรุงโครงสร้างของจักษยานไฟฟ้า .....	36
บทที่ 4 ผลการทดลอง .....	38
4.1 การทดสอบวงจรอัดประจุ.....	38
4.1.1 การทดสอบในสภาวะไร้โหลด.....	38
4.1.2 การทดสอบในความเร็วดังๆที่ระยะเวลาต่อเนื่อง.....	39
4.1.3 การอัดประจุแบตเตอรี่ที่แรงดันคงที่.....	40
4.2 ผลการทดสอบการขับมอเตอร์.....	43
4.3 การทดสอบวงจรตรวจสอบระดับแรงดัน .....	44

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ.....	46
5.1 สรุปผลการดำเนินโครงการ.....	46
5.1.1 นำหนักรวมของจักรยานไฟฟ้าสองระบบ.....	47
5.1.2 การควบคุมการเปลี่ยนโหมดการทำงาน.....	47
5.1.3 ชนิดของแบตเตอรี่.....	47
5.2 ปัญหาและแนวทางแก้ไข.....	47
5.3 แนวทางการพัฒนาต่อไป.....	48
เอกสารอ้างอิง.....	49
ภาคผนวก ก.....	50
ภาคผนวก ข.....	64
ภาคผนวก ค.....	72
ประวัติผู้ดำเนินโครงการ.....	75



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 อัตราขยายแรงดันของวงจรทระดับแรงดันเมื่อมีการปรับเปลี่ยนค่า D .....	24
4.1 ผลการทดสอบวงจรอค์ประจุในสภาวะไร้โหลด .....	39
4.2 ผลการทดสอบวงจรอค์ประจุในความเร็วต่างๆที่ระยะเวลาต่อเนื่อง .....	39
4.3 ผลการทดสอบการอค์ประจุแบตเตอรี่ที่แรงดัน 9.5 V คงที่ .....	40
4.4 ผลการทดสอบการอค์ประจุแบตเตอรี่ที่แรงดัน 11 V คงที่ .....	41
4.5 ผลการทดสอบมอเตอร์ของจักรยานไฟฟ้าสองระบบ รุ่นที่ 1 [7] .....	43
4.6 ผลการทดสอบมอเตอร์ของจักรยานไฟฟ้าสองระบบ รุ่นที่ 2 .....	44
4.7 ผลการทดสอบวงจรตรวจสอบระดับแรงดัน .....	44



## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ส่วนประกอบของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง [4].....	4
2.2 เปลือกหรือโครง .....	5
2.3 ขดลวดพันอยู่รอบขั้วแม่เหล็ก.....	5
2.4 โรเตอร์.....	6
2.5 การเกิดแรงกระทำต่อตัวนำตามกฎของฟาราเดย์ [5].....	7
2.6 กฎมือขวาของเฟลมมิง [5] .....	8
2.7 หลักการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง [5] .....	9
2.8 หลักการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	9
2.9 ไดอะแกรมการพันขดลวดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน .....	11
2.10 แผนภาพการทำงานของมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน [7] .....	12
2.11 แผนภาพสัญญาณการตรวจสอบตำแหน่งที่ใช้ตรวจจับสนามแม่เหล็ก [7] .....	12
2.12 โครงสร้างภายในของเบตเตอรี่แบบตะกั่ว [9].....	13
2.13 การเกิดปฏิกิริยาภายในเบตเตอรี่เมื่อคายประจุ.....	15
2.14 การคายประจุของเบตเตอรี่ .....	16
2.15 การเกิดปฏิกิริยาภายในเบตเตอรี่เมื่ออัดประจุ.....	16
2.16 กราฟคุณลักษณะการคายประจุของเบตเตอรี่ NP4-12 .....	18
2.17 กราฟเปรียบเทียบความลึกในการคายประจุกับอายุการใช้งาน.....	18
2.18 วงจรทบทระดับแรงดัน .....	20
2.19 วงจรสมมูลเมื่อสวิตช์นำกระแส [10].....	21
2.20 วงจรสมมูลเมื่อสวิตช์ไม่นำกระแส [10].....	22
2.21 (ก) แรงดันที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ (ข) กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ [10] .....	23
2.22 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราขยายแรงดันกับค่า D.....	25
2.23 กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ.....	26
3.1 วงจรการอัดประจุ.....	27
3.2 วงจรการคายประจุ.....	27
3.3 แผนภาพการเชื่อมต่ออุปกรณ์ในวงจรทบทระดับแรงดัน.....	29
3.4 แผนภาพของวงจรภายใน LM2577-Adj.....	32

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.5 วงจรทบทระดับแรงดันที่เชื่อมลงบอร์ดคอนโทรล.....	32
3.6 แสดงวงจรภายใน LM 324 .....	33
3.7 วงจรตรวจสอบระดับแรงดันแบตเตอรี่แสดงผลด้วย LED .....	34
3.8 แผนภาพการควบคุมการทำงานของจักรยานไฟฟ้าสองระบบ .....	35
3.9 แผงควบคุมการทำงาน .....	35
3.10 การติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 250 W 24 V 400 rpm เข้ากับจักรยาน [12].....	36
3.11 จักรยานไฟฟ้าสองระบบ รุ่นที่ 1 .....	37
3.12 จักรยานไฟฟ้าสองระบบ รุ่นที่ 2.....	37
4.1 อัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดันของแบตเตอรี่เมื่อแรงดันด้านเข้ามีค่า 9.5 และ 11 V .....	42
4.2 อัตราการเปลี่ยนแปลงกระแสของแบตเตอรี่เมื่อแรงดันด้านเข้ามีค่า 9.5 และ 11 V.....	42

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ

จากสถานการณ์ในปัจจุบัน ประชากรโลกมีอัตราการเพิ่มขึ้นและมีการใช้พลังงานกันอย่างสิ้นเปลือง ทำให้พลังงานสำรองของโลกลดน้อยและใกล้หมดลงทุกที ถึงแม้มีการสำรวจและค้นหาแหล่งพลังงานธรรมชาติกันอย่างต่อเนื่อง แต่ก็พบว่าพลังงานที่มีอยู่ยังไม่เพียงพอต่อความต้องการใช้ของประชากรโลกที่นับวันจะมีจำนวนเพิ่มมากขึ้น การใช้พลังงานดังกล่าวส่งผลทำให้เกิดภาวะโลกร้อน มีหลายหน่วยงานได้สังเกตเห็นปัญหานี้ และได้รณรงค์ให้คนหันมาใช้จักรยานเป็นพาหนะแทนพาหนะที่ใช้เชื้อเพลิง บริษัทหลายแห่งได้มีการคิดค้นและปรับปรุงอุปกรณ์ต่างๆ เพื่อปรับแต่งจักรยานให้สามารถใช้งานได้สะดวกมากยิ่งขึ้น นั่นคือจักรยานไฟฟ้า ซึ่งเป็นแนวทางที่จะสามารถช่วยลดปัญหาโลกร้อนได้ในระดับหนึ่ง [1,2,3]

เนื่องจากปัจจุบันจักรยานไฟฟ้าที่บริษัทผู้ผลิตสร้างขึ้นมา ยังไม่เป็นที่นิยมใช้เท่าที่ควร เนื่องจากการใช้งานต้องมีการนำไปอัดประจุแบตเตอรี่ก่อนจึงสามารถใช้งานได้ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้เกิดหัวข้อโครงการเรื่อง “จักรยานไฟฟ้าสองระบบ” ขึ้นมาในปีการศึกษา 2552 ซึ่งได้มีการสร้างจักรยานไฟฟ้าที่นอกจากจะสามารถขับเคลื่อนด้วยไฟกระแสตรงจากแบตเตอรี่ได้แล้วยังสามารถอัดประจุแบตเตอรี่ด้วยพลังงานที่ได้จากแรงปั่นของผู้ขี่ อย่างไรก็ตามปัญหาที่พบในโครงการดังกล่าวคือ ระบบการอัดประจุแบตเตอรี่ยังไม่ดีเท่าที่ควรเพราะแรงดันและกระแสที่ใช้อัดประจุค่อนข้างต่ำจึงใช้เวลานานในการอัดประจุและการใช้งานค่อนข้างซับซ้อนเนื่องจากสวิตช์มีจำนวนมากเกินไปนอกจากนี้การจัดวางตำแหน่งแบตเตอรี่ยังทำให้โครงสร้างโดยรวมของระบบเสียสมดุลได้ง่าย ซึ่งเป็นเหตุผลที่ทำให้เกิดหัวข้อโครงการจักรยานไฟฟ้าสองระบบ รุ่นที่ 2 ขึ้นมา โดยมีการปรับปรุงแก้ไขในส่วนต่างๆที่เป็นข้อเสียของจักรยานไฟฟ้าสองระบบที่มีอยู่ เพื่อให้มีค่าแรงดันและกระแสในการอัดประจุมากขึ้น และมีการใช้จำนวนสวิตช์น้อยลง

### 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

เพื่อพัฒนาระบบการอัดประจุแบตเตอรี่ของจักรยานไฟฟ้าสองระบบให้สามารถอัดประจุได้ปริมาณที่มากขึ้น โดยใช้เวลาการอัดประจุที่สั้นลงรวมทั้งปรับปรุงโครงสร้างของจักรยานเพื่อเพิ่มความสมดุลให้กับระบบ



## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

จักรยานไฟฟ้าสองระบบที่สร้างขึ้นในโครงการนี้สามารถนำไปใช้ได้โดยมีค่าแรงดันและกระแสในการอัดประจุมากขึ้น มีระบบการควบคุมการทำงานที่ง่ายต่อการใช้งานและมีน้ำหนักเบาต่ำกว่าเดิม เป็นแนวคิดใหม่ที่ลดการใช้พลังงานน้ำมันเป็นเชื้อเพลิง ซึ่งช่วยลดมลภาวะทางสิ่งแวดล้อม

## 1.6 งบประมาณที่ใช้

1) การปรับปรุงโครงสร้าง	1,000 บาท
2) แบตเตอรี่ 2 ลูก	2,360 บาท
3) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบทอรอบ	1,800 บาท
4) ค่าอุปกรณ์ในตัวควบคุมการอัดประจุ	500 บาท
5) ค่าอุปกรณ์ในตัวตรวจสอบระดับแรงดัน	100 บาท
6) ค่าถ่ายเอกสารและเข้าเล่มปริญญาบัตร	1,000 บาท
รวมเป็นเงิน (หกพันเจ็ดร้อยหกสิบบาทถ้วน)	<u>6,760 บาท</u>
หมายเหตุ : ถัวเฉลี่ยทุกรายการ	

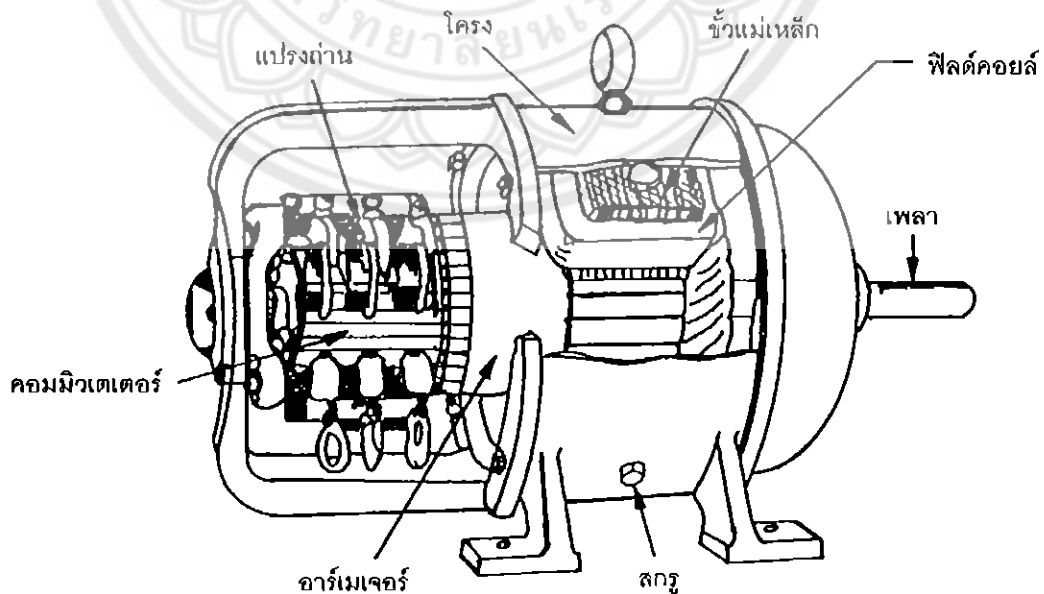
## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

ส่วนประกอบหลักของจักรยานไฟฟ้าสองระบบที่สร้างขึ้นในโครงร่างนี้ ได้แก่ เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง (DC generator) ทำหน้าที่สร้างกำลังไฟฟ้าให้วงจรระดับแรงดันจากการหมุนของล้อวงจร มอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน (Brushless DC motor) ขับจักรยานไฟฟ้า แบตเตอรี่แบบตะกั่วชนิดแห้ง (Sealed lead acid battery) วงจรทบทระดับแรงดัน (Step-up converter หรือ Boost converter) เพื่อควบคุมการอัดประจุแบตเตอรี่

#### 2.1 โครงสร้างของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง

โดยปกติ เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงเพียงเครื่องเดียวอาจทำงานเป็นได้ทั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและมอเตอร์ไฟฟ้า กล่าวคือ ถ้าเครื่องจักรกลไฟฟ้าได้รับแรงดันไฟฟ้าจากภายนอกเข้าที่ขั้วจะทำงานเป็นมอเตอร์ไฟฟ้า แต่ถ้าได้รับพลังงานกลจากภายนอกมาหมุนเพลาก็จะทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โครงสร้างของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงแสดงได้ดังรูปที่ 2.1

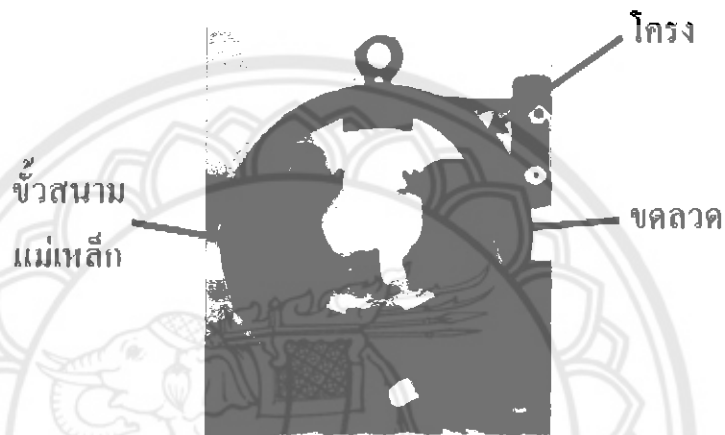


รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง [4]

### 2.1.1 สเตเตอร์

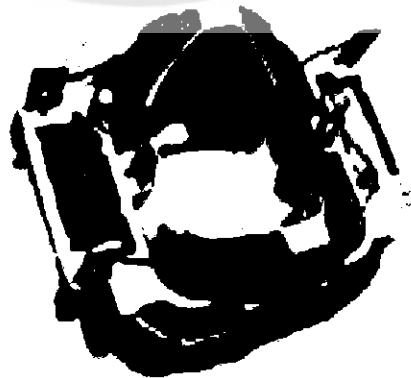
สเตเตอร์ (Stator) เป็นส่วนของเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่อยู่กับที่ประกอบด้วย

1) เปลือกหรือโครง (Frame) เป็นโครงภายนอกทำหน้าที่เป็นทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็กจากขั้วเหนือไปขั้วใต้ให้ครบวงจรและยึดส่วนประกอบอื่นๆ ให้แข็งแรง ทำด้วยเหล็กหล่อหรือเหล็กแผ่นหนา้วนเป็นรูปทรงกระบอกกลมแสดงได้ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 เปลือกหรือโครง

2) ขั้วสนามแม่เหล็ก (Field poles) เป็นส่วนที่สร้างฟลักซ์แม่เหล็กเมื่อตัวนำในอาร์มเจอร์หมุนตัดผ่าน ฟลักซ์แม่เหล็กนี้ก็จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำขึ้นแสดงได้ดังรูปที่ 2.3

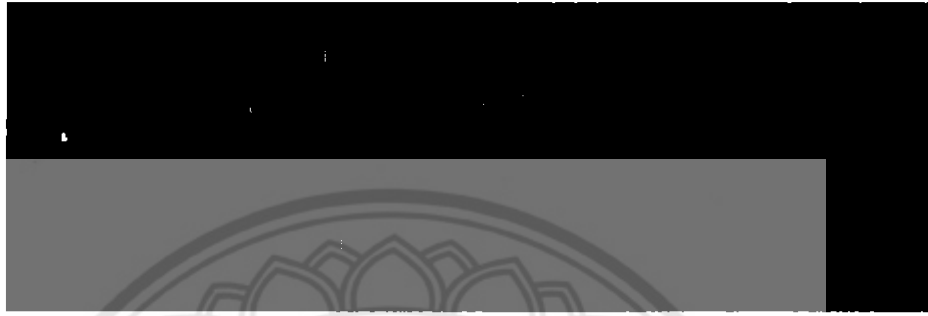


รูปที่ 2.3 ขดลวดพันอยู่รอบขั้วแม่เหล็ก



### 2.1.2 โรเตอร์

โรเตอร์ (Rotor) เป็นส่วนที่ทำให้เกิดกำลังงานมีลักษณะดังรูปที่ 2.4 ซึ่งมีแกนวางอยู่ในรองลื่น (Bearing) ประกอบอยู่ในแผ่นปิดหัวท้าย (End plate) ของมอเตอร์



รูปที่ 2.4 โรเตอร์

โรเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงประกอบด้วย 4 ส่วน คือ

- 1) แกนเพลลา (Shaft) เป็นตัวสำหรับยึดคอมมิวเตเตอร์ และยึดแกนเหล็กอาร์เมเจอร์ (Armature core) ประกอบเป็นตัวโรเตอร์ แกนเพลลานี้จะวางอยู่บนรองลื่นเพื่อบังคับให้หมุนอยู่ในแนวตั้งไม่มีการสั่นสะเทือน
- 2) แกนเหล็กอาร์เมเจอร์ทำด้วยแผ่นเหล็กบางอาบฉนวน (Laminated sheet steel) เป็นที่สำหรับพันขดลวดอาร์เมเจอร์ซึ่งสร้างแรงบิด (Torque)
- 3) คอมมิวเตเตอร์ (Commutator) ทำด้วยทองแดงออกแบบเป็นซี่ แต่ละซี่มีฉนวนไมกา (mica) คั่นระหว่างซี่ของคอมมิวเตเตอร์ ส่วนหัวซี่ของคอมมิวเตเตอร์จะมีร่องสำหรับใส่ปลายสายของขดลวดอาร์เมเจอร์ ตัวคอมมิวเตเตอร์นี้อัดแน่นติดกับแกนเพลลาเป็นทรงกระบอกมีหน้าที่สัมผัสกับแปรงถ่าน (Carbon brushes)
- 4) ขดลวดอาร์เมเจอร์ (Armature winding) เป็นขดลวดพันอยู่ในร่องสล็อต (Slot) ของแกนอาร์เมเจอร์ ขนาดของลวดจะเล็กหรือใหญ่ และจำนวนรอบจะมากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับ การออกแบบของตัวโรเตอร์ชนิดนั้นๆ เพื่อให้เหมาะสมกับงานต่างๆ

### 2.1.3 แปร่งถ่าน

แท่งแปร่งถ่านอาจทำจากส่วนผสมของคาร์บอนกับกราไฟท์ หรือคาร์บอนกับทองแดง เมื่อเครื่องจักรกลทำหน้าที่เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แปร่งถ่านจะทำหน้าที่รวบรวมกระแสไฟฟ้าจากซีคอมมิวเตเตอร์ส่งไปสู่วงจรภายนอก และเมื่อเครื่องจักรกลทำหน้าที่เป็นมอเตอร์ไฟฟ้าแปร่งถ่านจะทำหน้าที่รับกระแสไฟฟ้าจากวงจรภายนอกส่งไปยังคอมมิวเตเตอร์

## 2.2 การทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นเครื่องจักรกลที่เปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า จากกฎของฟาราเดย์ เมื่อเส้นลวดตัวนำเคลื่อนที่ตัดเส้นแรงแม่เหล็ก จะเกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นในเส้นลวดตัวนำในเส้นลวดตัวนำนั้น หลักการของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การเกิดแรงกระทำต่อตัวนำตามกฎของฟาราเดย์ [5]

จากรูปที่ 2.5 เมื่อตัวนำเคลื่อนที่ตัดเส้นแรงแม่เหล็ก จะเกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นในเส้นลวดตัวนำนั้นเรียกว่า การเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic induction)

ขนาดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดในเส้นลวดตัวนำหาได้จากสมการที่ (2.1)

$$\vec{e} = \vec{B}l\vec{v} \quad (2.1)$$

$\vec{e}$  คือเวกเตอร์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้า มีหน่วยเป็นโวลต์ (V)

$l$  คือความยาวของแท่งตัวนำในสนามแม่เหล็ก มีหน่วยเป็นเมตร (m)

$\vec{v}$  คือเวกเตอร์ของความเร็วในการเคลื่อนที่ของตัวนำ มีหน่วยเป็นเมตรต่อวินาที (m/s)

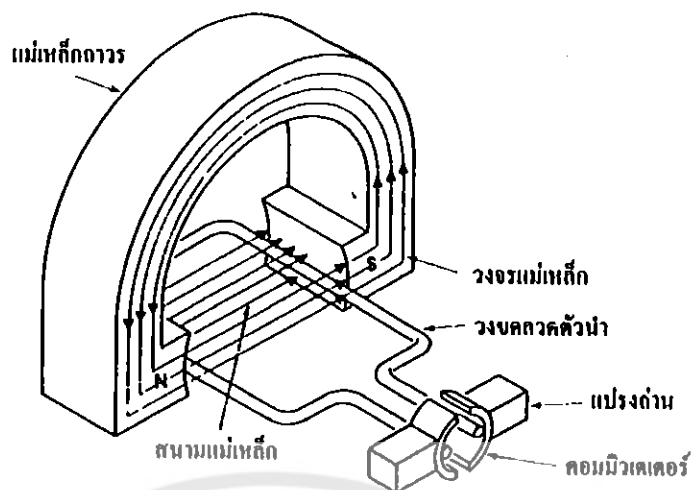
$\vec{B}$  คือเวกเตอร์ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก มีหน่วยเป็นเทสลา (T)

เมื่อมีการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างแท่งตัวนำตัดกับเส้นแรงแม่เหล็ก ค่าหรือขนาดของแรงดันไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับความเข้มของสนามแม่เหล็กโดยตรง ส่วนทิศทางหรือขั้วของแรงดันที่เกิดขึ้นสามารถหาได้โดยการใช้กฎมือขวาของเฟลมมิ่งดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 กฎมือขวาของเฟลมมิ่ง [5]

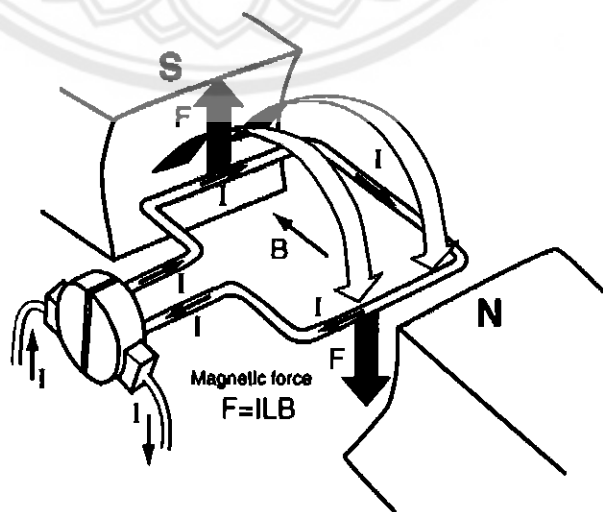
หลักการเบื้องต้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง ประกอบด้วยขดลวดเพียงขดเดียว (2 ตัวนำ) ซึ่งปลายทั้งสองต่อเข้ากับซีคอมมิวเตเตอร์ เมื่อทำให้ตัวนำหมุนในสนามแม่เหล็กจะเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้ากระแสสลับบนตัวนำทั้งสองของขดลวดตามกฎมือขวาของเฟลมมิ่ง ซึ่งจะเปลี่ยนเป็นกระแสตรงเมื่อผ่านซีคอมมิวเตเตอร์ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 หลักการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง [5]

### 2.3 การทำงานเป็นมอเตอร์ไฟฟ้า

มอเตอร์ไฟฟ้าคือ เครื่องจักรกลที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลโดยอาศัยหลักการคือ เมื่อมีกระแสไหลผ่านตัวนำที่วางอยู่ในสนามแม่เหล็กจะทำให้ลวดตัวนำเกิดการเคลื่อนที่ มอเตอร์ไฟฟ้าที่ถูกผลิตขึ้นมาใช้งานแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ มอเตอร์ชนิดนี้ถูกพัฒนามาจากมอเตอร์กระแสตรง เพื่อให้สามารถใช้งานได้อย่างกว้างขวางมากขึ้น หลักการของมอเตอร์ไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 หลักการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

จากรูปที่ 2.8 เป็นการทำงานเบื้องต้นของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง มีแรงดันไฟฟ้าจ่ายผ่านแปรงถ่านไปคอมมิวเตเตอร์และขดลวดตัวนำที่อาร์เมเจอร์ ทำให้ขดลวดอาร์เมเจอร์เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้น ทางด้านขวามือเป็นขั้วเหนือ (N) และด้านซ้ายมือเป็นขั้วใต้ (S) เหมือนกับขั้วแม่เหล็กถาวรที่วางอยู่ใกล้ๆกันทำให้เกิดอำนาจแม่เหล็กผลักดันกัน อาร์เมเจอร์หมุนไปในทิศทางตามเข็มนาฬิกา พร้อมกับคอมมิวเตเตอร์หมุนตามไปด้วย แปรงถ่านสัมผัสกับส่วนของคอมมิวเตเตอร์เปลี่ยนไปไปอีกปลายหนึ่งของขดลวด แต่มีผลทำให้เกิดขั้วแม่เหล็กที่อาร์เมเจอร์เหมือนกับขั้วแม่เหล็กถาวรที่อยู่ใกล้ๆอีกครั้ง ทำให้อาร์เมเจอร์ยังคงถูกผลักให้หมุนไปในทิศทางตามเข็มนาฬิกาตลอดเวลา ส่งผลให้เกิดการหมุนของอาร์เมเจอร์ ซึ่งหมายถึงเครื่องจักรกลกำลังทำงานเป็นมอเตอร์ไฟฟ้า

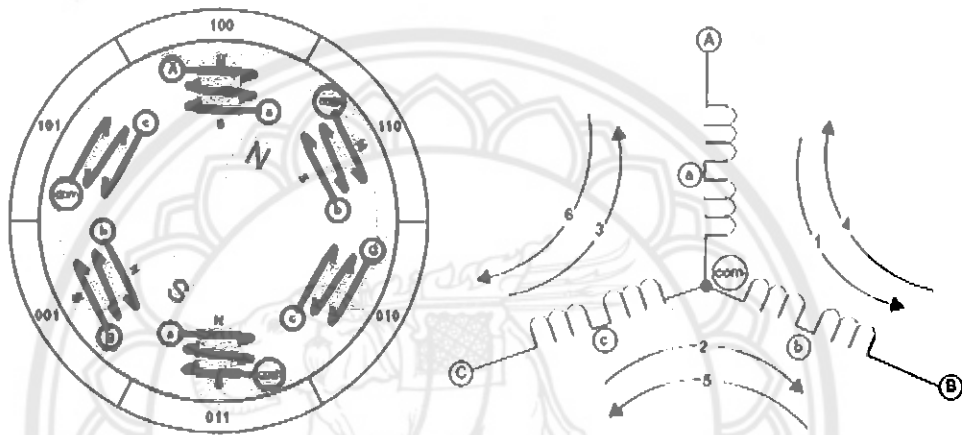
## 2.4 มอเตอร์ไฟฟ้าแบบไร้แปรงถ่าน

มอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านมีโครงสร้างที่ซับซ้อนมากกว่ามอเตอร์กระแสตรงที่มีแปรงถ่าน สำหรับการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าแบบไร้แปรงถ่าน (Self-controlled synchronous motor หรือ Brushless motor) สามารถปรับความถี่ของแหล่งจ่ายอาร์เมเจอร์ที่สเตเตอร์ได้ โดยมีค่าแปรผันตามความเร็วของตัวโรเตอร์ ส่งผลให้สนามแม่เหล็กที่เกิดจากอาร์เมเจอร์หมุนที่ความเร็วเดียวกันกับโรเตอร์ตลอดเวลา ส่วนสนามแม่เหล็กหมุนที่สเตเตอร์หรืออาร์เมเจอร์และโรเตอร์จะหมุนที่ความเร็วเชิงโคจรนี้ตลอดเวลา ทำให้ได้แรงบิดอยู่ตัวที่ทุกค่าความเร็ว

อย่างไรก็ตามมอเตอร์ไฟฟ้าแบบไร้แปรงถ่านต้องใช้ตัวตรวจจับตำแหน่งและความเร็วของโรเตอร์ (Rotor position sensor) และยังคงปรับความถี่ที่ป้อนให้กับสเตเตอร์ที่มีความแม่นยำสูง โดยตัวตรวจจับตำแหน่งของตัวโรเตอร์ทำหน้าที่ในการแปลงข้อมูล (Encoder) ที่ได้จากโรเตอร์เพื่อนำไปใช้ในการควบคุมการสวิตชิงในวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ป้อนให้แก่ขดลวดอาร์เมเจอร์ มอเตอร์ชนิดนี้ไม่สามารถต่อกับแหล่งจ่ายโดยตรงได้ เนื่องจากต้องทำงานร่วมกับชุดควบคุมมอเตอร์ และมีตัวตรวจจับสนามแม่เหล็ก (Hall sensor) ติดตั้งไว้เป็นส่วนหนึ่งของสเตเตอร์ ซึ่งทำหน้าที่แทนแปรงถ่านและคอมมิวเตเตอร์ [6]

### 2.4.1 การทำงานของมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน

การทำงานของมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านจะทำงานแบบง่ายๆ โดยมีแปรงถ่านเป็นตัวคอยสับเปลี่ยนการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวด เพื่อสร้างสนามแม่เหล็กที่เหมาะสม มอเตอร์ชนิดนี้จึงมีสายเพียง 2 เส้นเท่านั้น แต่การทำงานของมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านจะมีขดลวด 3 เฟสอยู่ดังรูปที่ 2.9 ซึ่งเชื่อมต่อกันแบบสตาร์ (Y) พลังงานไฟฟ้าถูกจ่ายครั้งละ 2 เฟสเพื่อขับเคลื่อนมอเตอร์สับเปลี่ยนกันเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กที่เหมาะสม เห็นได้ว่ามอเตอร์ไร้แปรงถ่านมีสายจำนวน 3 เส้นต่อออกมาคือขั้ว A, B และ C ดังรูปที่ 2.9

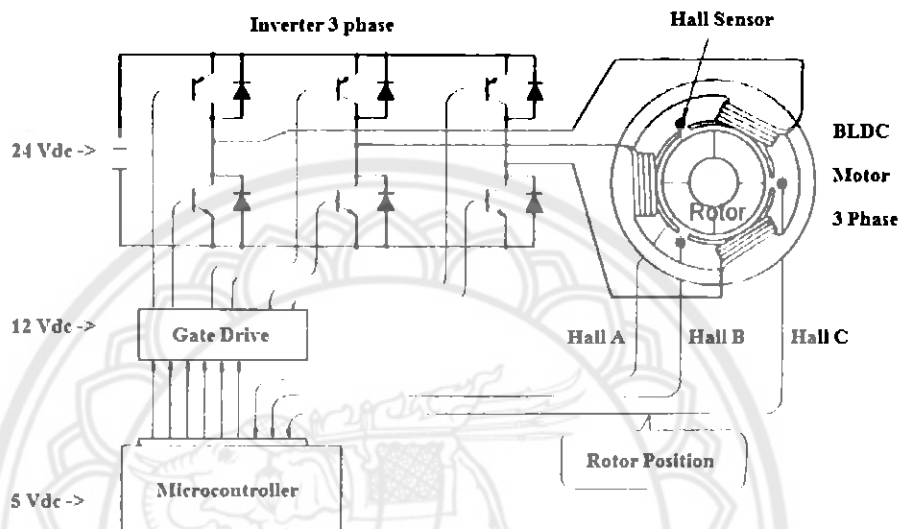


รูปที่ 2.9 โค้ดแกรมการพันขดลวดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน

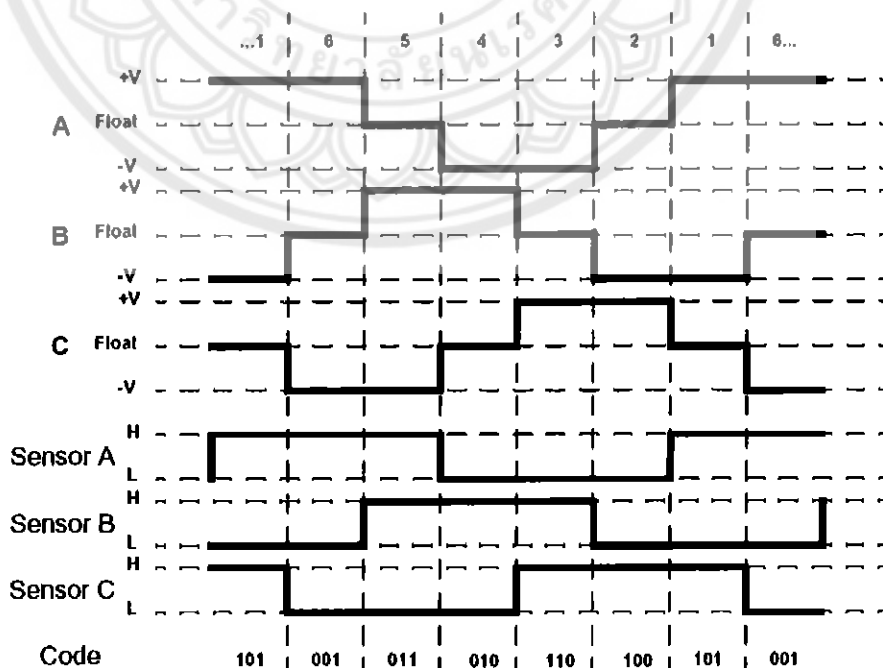
จากรูปที่ 2.9 มีกระแสไหลผ่านขดลวดจาก A ไป B ตามเส้นทางที่ 1 ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กดึงดูดแกนหมุนให้อยู่ระหว่างขั้ว A และ B และถ้าให้กระแสไหลตามเส้นทางที่ 6 คือจากขั้ว A ไปยังขั้ว C จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กระหว่างขั้ว A และ C ทำให้ตัวหมุนเคลื่อนที่ไปในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาไปอยู่ระหว่างขั้ว A และ C แทน หรือขั้ว N ประมาณเลข 11 บนหน้าปัดนาฬิกา และถ้าเปลี่ยนให้กระแสไหลในเส้นทางที่ 5 คือจาก B ไปยัง C ต่ไปอีก ตัวหมุนจะหมุนทวนเข็มนาฬิกาต่อไปอีก ขั้ว N จะอยู่ที่ระหว่างขั้ว B และ C หรือที่ประมาณ 9 นาฬิกา ดังนั้นถ้าให้เกิดการหมุนอย่างต่อเนื่อง ต้องทำการสับขั้วให้กระแสไหลในจังหวะที่เหมาะสมตามลำดับไป และเมื่อกระทำต่อเนื่องไปจนครบ 6 ขั้ว มอเตอร์จะเกิดการหมุนครบ 1 รอบพอดี [7]

จากหลักการการทำงานของมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านข้างต้น จะเห็นว่าการสับเปลี่ยนขั้วมีความสัมพันธ์กับตำแหน่งของตัวหมุนเป็นอย่างมาก การสับเปลี่ยนขั้วเพื่อให้เกิดสนามแม่เหล็กที่เหมาะสมทำให้ได้แรงบิดที่ดี โดยแรงบิดสูงสุดเกิดขึ้นเมื่อตัวหมุนทำมุมกับสนามแม่เหล็ก  $90^\circ$  ดังนั้นในการควบคุมมอเตอร์แบบไร้แปรงถ่านจำเป็นต้องรู้ตำแหน่งของ

มอเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ถ้าหากมีการใช้อุปกรณ์ตรวจจับ (Sensor) ช่วยบอกตำแหน่งเช่น ตัวตรวจจับสนามแม่เหล็ก อุปกรณ์เหล่านี้ทำหน้าที่คล้ายตัวถอดรหัส โดยใช้จำนวน 3 ตัว เพื่อให้สัญญาณออกมาดังรูปที่ 2.11 จากนั้นนำสัญญาณที่ได้ไปกำหนดเวลาสับเปลี่ยนขั้วของมอเตอร์อีกชั้นหนึ่ง [7]



รูปที่ 2.10 แผนภาพการทำงานของมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน [7]



รูปที่ 2.11 แผนภาพสัญญาณการตรวจสอบตำแหน่งที่ใช้ตรวจจับสนามแม่เหล็ก [7]

#### 2.4.2 ข้อดีและข้อเสียของมอเตอร์ไร้แปรงถ่าน

เมื่อเทียบกับมอเตอร์ที่มีแปรงถ่านทั่วไป มอเตอร์ไร้แปรงถ่านมีข้อดี [7] คือ

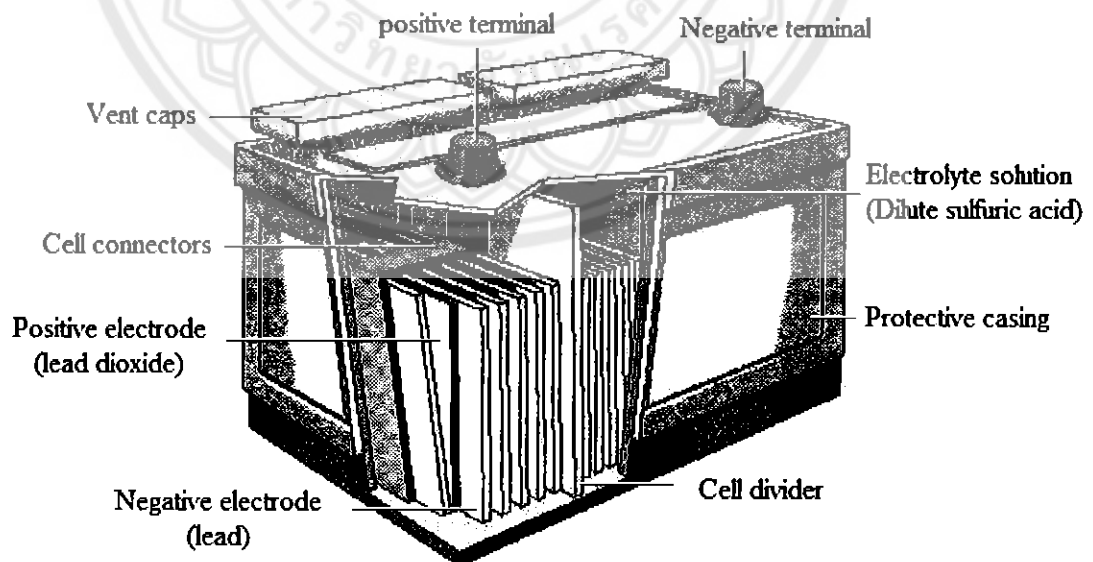
- 1) ไม่เกิดปัญหาในการซ่อมบำรุงระบบแปรงถ่าน
- 2) สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย
- 3) ให้แรงบิดและความเร็วรอบสูงกว่ามอเตอร์กระแสตรงทั่วไปที่พิกัดเท่ากัน
- 4) กำลังสูญเสียต่ำ

ข้อเสียของมอเตอร์ไร้แปรงถ่าน [7] คือ

- 1) ราคาแพง
- 2) วงจรที่ใช้ในการควบคุมค่อนข้างซับซ้อน

#### 2.5 แบตเตอรี่แบบตะกั่ว

แบตเตอรี่ที่ใช้กับรถจักรยานไฟฟ้าที่พบเห็นทั่วไปตามท้องตลาดเป็นแบตเตอรี่ตะกั่วชนิดแห้ง มีข้อดีคือ น้ำหนักเบา บำรุงรักษาง่าย ขนาดไม่ใหญ่มาก และอายุการใช้งานนาน ส่วนประกอบของแบตเตอรี่แบบตะกั่ว [8] แสดงดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 โครงสร้างภายในของแบตเตอรี่แบบตะกั่ว [9]



### 2.5.1 การแบ่งประเภทของแบตเตอรี่แบบตะกั่ว

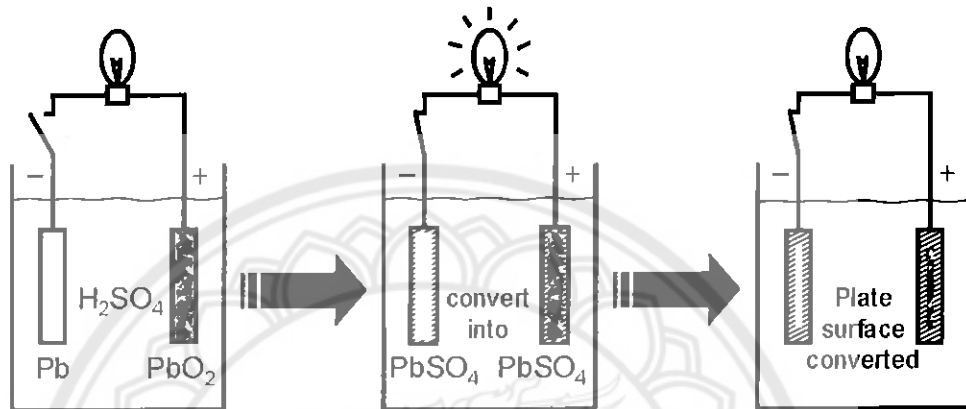
แบตเตอรี่แบบตะกั่วชนิดแห้งจะแบ่งเป็น 2 ประเภท คือประเภทที่ใช้เจลเป็นวัสดุอุดขั้วกรวดเรียกว่าแบตเตอรี่แบบเจล (Gel battery หรือ gel cell) และประเภทที่ใช้แผ่นซีลิกาไฟเบอร์เป็นตัวอุดขั้วเรียกว่า แบตเตอรี่แบบเอจีเอ็ม (Absorption glass mat battery หรือ AGM battery) ซึ่งลักษณะการแบ่งประเภทแบบนี้เป็นการแบ่งตามลักษณะ โครงสร้างทางกายภาพของแบตเตอรี่ แต่การแบ่งประเภทของแบตเตอรี่แบบตะกั่วยังสามารถแบ่งได้อีกลักษณะหนึ่งคือ แบ่งตามลักษณะการใช้งาน โดยจะแบ่งเป็นแบตเตอรี่แบบใช้งานทั่วไป หรือแบบที่ใช้สำหรับสตาร์ทเครื่องยนต์แบบคายประจุลึกและแบบลูกผสม ความแตกต่างระหว่างแบตเตอรี่แบบเจลและแบบเอจีเอ็มคือ แบตเตอรี่แบบเจลจะเป็นแบตเตอรี่ที่แห้งกว่าแบบเอจีเอ็ม ถ้าเปลือกนอกของมันแตกจะไม่มีน้ำกรดไหลหรือซึมออกมา แต่สำหรับแบบเอจีเอ็มจะขั้วน้ำกรดได้ประมาณ 95% ดังนั้นถ้าเปลือกของมันแตกแม้มีน้ำกรดจะไหลออกมาก็อาจจะมีกรดรั่วซึมออกมาได้บ้างเพียงเล็กน้อย ในปัจจุบันนิยมใช้แบตเตอรี่ตะกั่วแบบเอจีเอ็มมากกว่าแบบเจล ส่วนแบบเจลมีการใช้น้อยลงเนื่องจากมีข้อเสียคือ เจลมักจะละลายเมื่ออยู่ในสภาพอากาศที่ร้อนและถ้าเกิดการอัดประจุเกินขึ้น เจลอาจจะเปลี่ยนรูปเป็นสารเหนียวๆที่เรียกว่า วอยด์ (Void) ไปเกาะติดแน่นอยู่ที่แผ่นธาตุซึ่งเป็นตัวขั้วขวางการแลกเปลี่ยนประจุระหว่างอิเล็กโทรไลต์และแผ่นธาตุ ทำให้ประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ลดลง

แบตเตอรี่ทั้งแบบเอจีเอ็มและแบบเจลยังแบ่งย่อยออกได้เป็นแบตเตอรี่ตะกั่วแบบปิดผนึกหรือ เอสแอลเอ (Sealed lead acid) และแบบเปิดผนึกที่มีวาล์วระบายแรงดันหรือ วีอาร์แอลเอ (Valve-regulated lead acid) แบตเตอรี่แบบวีอาร์แอลเอจะมีการติดตั้งวาล์วเพื่อใช้ระบายแก๊สในกรณีที่มีความดันภายในเซลล์สูงเกินไป เพื่อป้องกันแบตเตอรี่เสียหาย การอัดประจุแบตเตอรี่ทั้ง 2 ประเภท คือ เอสแอลเอและวีอาร์แอลเอจะต้องไม่เร็วหรือมากจนเกินไป เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดแก๊สในขณะที่อัดประจุมากเกินไป การอัดประจุมากหรือเร็วเกินไปจะทำให้ปฏิกิริยาเคมีภายในเซลล์ขั้วขั้วเกิดขึ้นไม่ทัน ความดันภายในแบตเตอรี่จะสูงขึ้นเป็นสาเหตุให้เกิดการสูญเสียแก๊สและน้ำออกไปจากตัวแบตเตอรี่ การเสียแก๊สและน้ำออกไปก็เท่ากับว่าแบตเตอรี่ได้สูญเสียอิเล็กโทรไลต์ออกไปจากระบบ เพราะแก๊สและน้ำเป็นส่วนประกอบของอิเล็กโทรไลต์ เมื่อแบตเตอรี่มีปริมาณอิเล็กโทรไลต์น้อยลงจะสูญเสียความสามารถในการเก็บพลังงานไป ทำให้แรงดันไฟฟ้าหรือโวลต์ของแบตเตอรี่หลังจากการอัดประจุไม่สูงเท่าที่ควร และถ้าแบตเตอรี่มีการเสียแก๊สและน้ำบ่อยๆอิเล็กโทรไลต์ภายในเซลล์ก็จะหมดไปทำให้แบตเตอรี่ใช้งานไม่ได้อีก [8]

### 2.5.2 ปฏิริยาทางเคมีในแบตเตอรี่แบบตะกั่ว

เราสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงทางเคมีภายในแบตเตอรี่ขณะคายประจุแสดงดังรูปที่ 2.13 กำหนดให้แบตเตอรี่มีประจุเต็ม (Fully charged condition) ก่อนจะต่อกับโหลด เนื้อสารที่

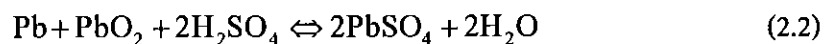
ขั้วลบจะเป็นตะกั่วส่วนขั้วบวกจะเป็นตะกั่วออกไซด์ หลังจากนำโพลลมาต่อ แบตเตอรี่จะเริ่มคายประจุโดยเนื้อสารที่ขั้วลบและขั้วบวกจะทำปฏิกิริยากับสารละลายอิเล็กโทรไลต์จนกลายเป็นตะกั่วซัลเฟต การคายประจุของแบตเตอรี่จะสิ้นสุดลงเมื่อเนื้อสารทั้งขั้วลบและขั้วบวกกลายเป็นตะกั่วซัลเฟตทั้งหมด



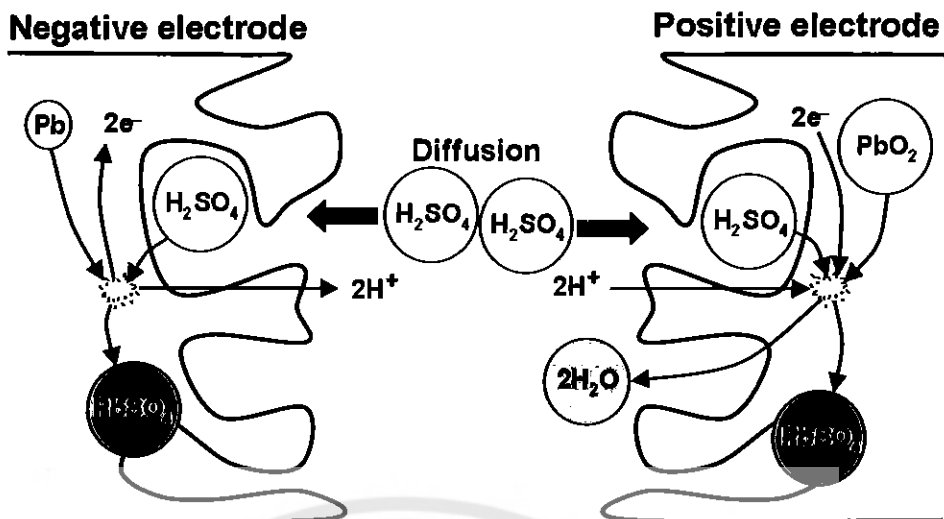
รูปที่ 2.13 การเกิดปฏิกิริยาภายในแบตเตอรี่เมื่อคายประจุ

ในระหว่างที่แบตเตอรี่กำลังคายประจุเกิดการไหลของอิเล็กตรอนจากขั้วลบไปยังขั้วบวก ดังแสดงในรูปที่ 2.14 จึงเกิดกระแสไหลผ่านโพลล ซึ่งถ้ากระแสที่แบตเตอรี่จ่ายได้ขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวที่เนื้อสารสัมผัสกับน้ำกรด

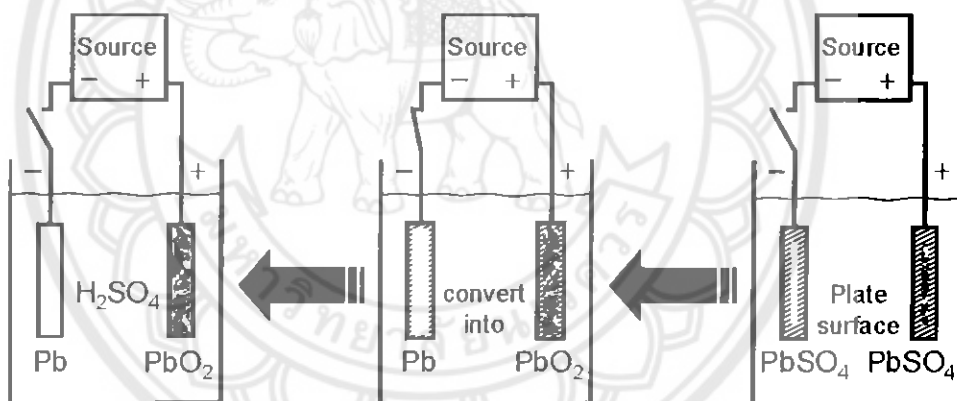
การเปลี่ยนแปลงทางเคมีภายในแบตเตอรี่เป็นปฏิกิริยาชนิดย้อนกลับได้ (Reversible reaction) ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังสมการเคมีต่อไปนี้



จากสมการที่ (2.2) การคายประจุจะอธิบายได้โดยการเปลี่ยนแปลงทางเคมีจากซ้ายไปขวา ในขณะที่การอัดประจุแบตเตอรี่จะอธิบายได้โดยการเปลี่ยนแปลงทางเคมีในสมการจากขวาไปซ้ายเมื่อต่อแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงเข้ากับแบตเตอรี่ โดยเนื้อสารที่อยู่ภายในเกิดการเปลี่ยนแปลงย้อนกลับจากการอัดประจุ [8] แสดงดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.14 การคายประจุของแบตเตอรี่

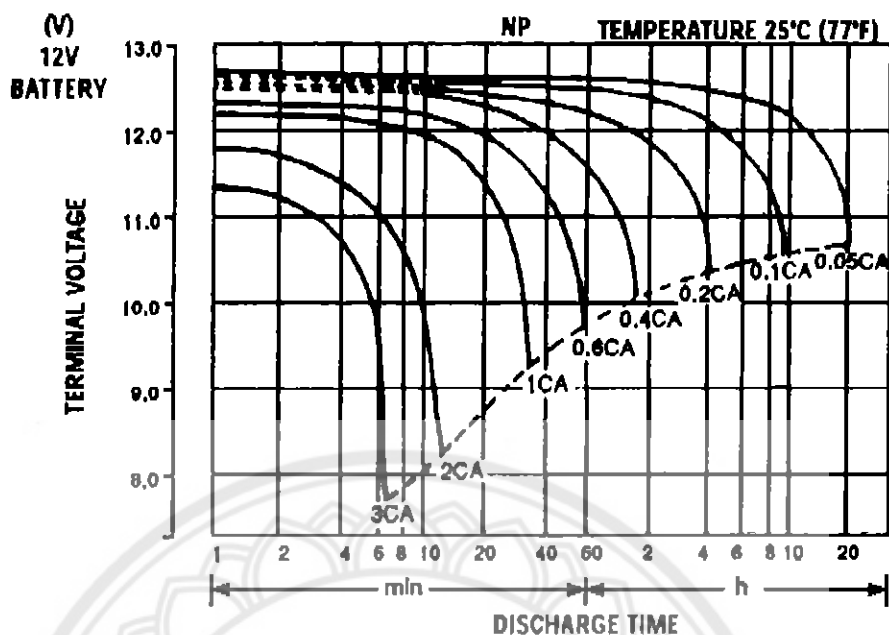


รูปที่ 2.15 การเกิดปฏิกิริยาภายในแบตเตอรี่เมื่ออัดประจุ

### 2.5.3 อัตราการคายประจุ

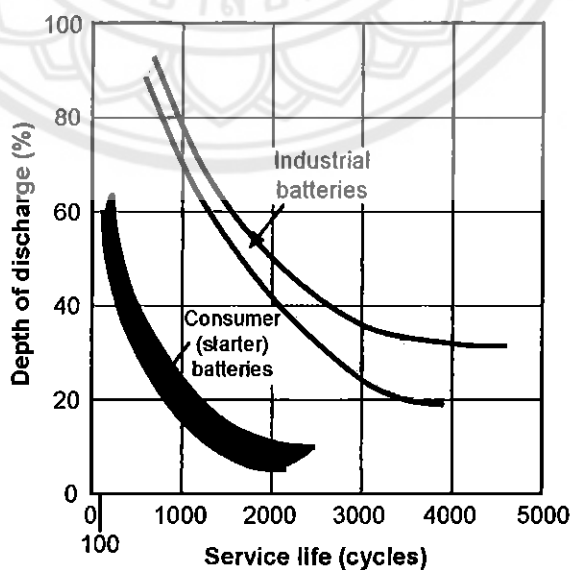
อัตราการคายประจุ หรือที่เรียกว่า ซีเรท ( $C_{rate}$ ) ของแบตเตอรี่แบบตะกั่ว ไม่ควรเกิน 0.2C หรือ 20% ของความจุ ถ้าอัตราการคายประจุมากขึ้นประสิทธิภาพของมันจะลดลง แต่อย่างไรก็ตาม เราไม่ควรจะคายประจุในอัตราที่มากกว่า 1C

### DISCHARGE CHARACTERISTIC CURVES



รูปที่ 2.16 กราฟคุณลักษณะการคายประจุของแบตเตอรี่ NP4-12

ก) อายุการใช้งาน (Service life) ของแบตเตอรี่ถูกกำหนดในรูปของจำนวนรอบของการอัดและคายประจุ (Charge-discharge cycle) อายุการใช้งานของแบตเตอรี่ขึ้นอยู่กับความลึกในการคายประจุแต่ละครั้งดังแสดงในรูปที่ 2.17 ถ้าความลึกในการคายประจุมีค่าสูงจะทำให้อายุการใช้งานสั้นลง



รูปที่ 2.17 กราฟเปรียบเทียบความลึกในการคายประจุกับอายุการใช้งาน

การคายประจุจนต่ำกว่าจุดสิ้นสุดของการคายประจุ (Deep discharge) จะทำให้แบตเตอรี่ทำงานหนักเกินไป หากเกิดเหตุการณ์เช่นนี้ต้องรีบอัดประจุคืนให้เต็ม มิฉะนั้นจะเหลือผลิตภัณฑ์ซัลเฟตที่ขั้วบวกและขั้วลบ หากปล่อยไว้นานผลิตภัณฑ์เหล่านี้จะโตขึ้นจนยากต่อการเปลี่ยนกลับคืนเป็นตะกั่ว (ที่ขั้วลบ) และตะกั่วออกไซด์ (ที่ขั้วบวก) ได้อีก ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า “การเกิดซัลเฟชัน” (Sulphation) ซึ่งทำให้อายุการใช้งานของแบตเตอรี่สั้นลงเนื่องจากสูญเสียเนื้อสารที่จะทำปฏิกิริยาดังนั้น ในทางปฏิบัติจึงต้องมีการป้องกันการคายประจุต่ำกว่าจุดสิ้นสุดการคายประจุ (Deep discharge protection) โดยวิธีที่ง่ายและเป็นที่ยอมรับคือการวัดค่าและตรวจสอบแรงดันของแบตเตอรี่อยู่ตลอดเวลา

ง) จุดสิ้นสุดการอัดประจุ (End of charge) ในการอัดประจุแต่ละครั้งจำเป็นต้องใช้แรงดันของแหล่งจ่ายสูงกว่า เช่น ประมาณ 14.4 V สำหรับแบตเตอรี่ขนาด 12 V เมื่ออัดประจุจนแรงดันของแบตเตอรี่เพิ่มสูงขึ้นถึงระดับหนึ่งจะทำให้มีน้ำในน้ำกรดแตกตัวเป็นแก๊สไฮโดรเจนที่ขั้วลบและแก๊สออกซิเจนที่ขั้วบวก ถ้าอัดประจุนานเกินไปจะทำให้ปริมาณน้ำที่อยู่ในแบตเตอรี่ลดลง นอกจากนี้การอัดประจุด้วยกระแสที่สูงยังทำให้เกิดความร้อนในเนื้อสาร ซึ่งทำให้การเกาะตัวของโมเลกุลในเนื้อสารแย่งจนส่งผลให้เนื้อสารบางส่วนหลุดออกจากขั้ว ซึ่งนำไปสู่การสูญเสียความจุที่ใช้ได้ของแบตเตอรี่ ดังนั้นในระหว่างการอัดประจุจึงต้องมีการจำกัดแรงดันและกระแส เช่น การอัดประจุด้วยกระแสไม่เกิน 1 A และใช้แรงดันในการอัดประจุประมาณ 2.3-2.4 V/cell หรือ 14.4 V (สำหรับแบตเตอรี่ 12 V) ที่อุณหภูมิ 20°C [8]

#### 2.5.4 การคายประจุด้วยตัวเอง

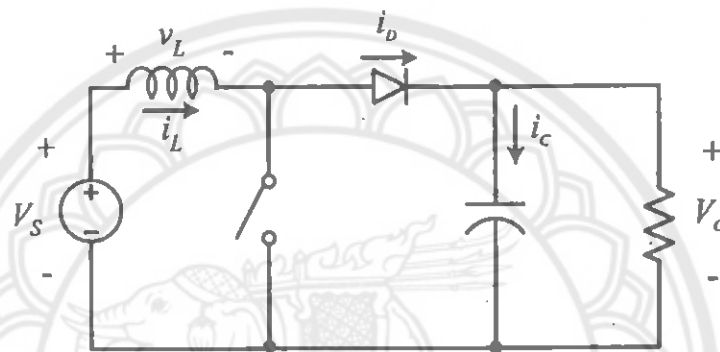
แบตเตอรี่แบบตะกั่วมีการคายประจุด้วยตัวเองน้อยมาก ถ้าเป็นแบตเตอรี่แบบเปียกอัตราการคายประจุประมาณ 40% ต่อปี ส่วนแบตเตอรี่แบบแห้งจะมีอัตราการคายประจุน้อยกว่าแบบเปียก โดยเฉพาะแบตเตอรี่แบบเจลเอ็มรูนใหม่ ๆ บางชนิดอัตราการคายประจุด้วยตัวเองไม่เกิน 2% ต่อเดือน นอกจากนี้แบตเตอรี่แบบตะกั่วถึงแม้จะมีราคาถูก แต่ถ้าเป็นแบตเตอรี่แบบเปียกจะมีค่าใช้จ่ายในการดูแลรักษาเพิ่มขึ้น เพราะต้องคอยตรวจสอบระดับของน้ำกรดเพื่อเติมน้ำกลั่นเมื่อระดับของน้ำกรดต่ำเกินไป และต้องหมั่นทำความสะอาดต่างๆ ที่อาจจะเกิดเนื่องจากการกัดกร่อนของกรด อีกทั้งยังต้องระมัดระวังในเรื่องสถานที่เก็บแบตเตอรี่ ไม่ควรเก็บไว้ใกล้แหล่งความร้อนหรือประกายไฟเพราะในขณะที่อัดประจุ (โดยเฉพาะถ้าอัดประจุโดยเปิดฝาแบตเตอรี่) จะเกิดแก๊สไฮโดรเจนขึ้นซึ่งอาจทำให้ระเบิดได้

ถ้าเปรียบเทียบกับแบตเตอรี่อัดประจุได้ (Rechargeable batteries) ชนิดใหม่ๆ แล้วที่น้ำหนักเท่ากัน แบตเตอรี่แบบตะกั่วจะสามารถเก็บประจุได้น้อยกว่า จึงไม่เหมาะที่จะนำมาใช้สำหรับอุปกรณ์พกพาซึ่งต้องการแบตเตอรี่ที่มีขนาดเล็กและน้ำหนักเบา เพราะจะทำให้ได้

กำลังไฟฟ้าน้อย ทำให้ต้องอัดประจุแบตเตอรี่บ่อย หรือทำให้อุปกรณ์มีน้ำหนักมากจนเกินไป แต่เนื่องจากราคาต้นทุนเทียบกับพลังงานที่ได้สูงกว่าแบตเตอรี่ชนิดอื่น เราจึงนิยมนำแบตเตอรี่แบบตะกั่วมาทำให้มีขนาดใหญ่เพื่อใช้ในงานอื่นที่ไม่ต้องการพกพา [8]

## 2.6 วงจรทบทระดับแรงดัน

วงจรทบทระดับแรงดัน (Step-up converter หรือ Boost converter) คือตัวแปลงผันกำลังกระแสตรง ทำหน้าที่เพิ่มระดับแรงดันด้านออกให้สูงกว่าแรงดันด้านเข้า แผนภาพวงจรของวงจรทบทระดับแรงดันแสดงได้ดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 วงจรทบทระดับแรงดัน

### 2.6.1 เงื่อนไขการทำงานของวงจรทบทระดับแรงดัน

การวิเคราะห์การทำงานของวงจรทบทระดับแรงดันในช่วงสถานะอยู่ตัว (Steady state) จะมีการกำหนดเงื่อนไขการทำงานของวงจรทบทระดับแรงดันเพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ ดังนี้

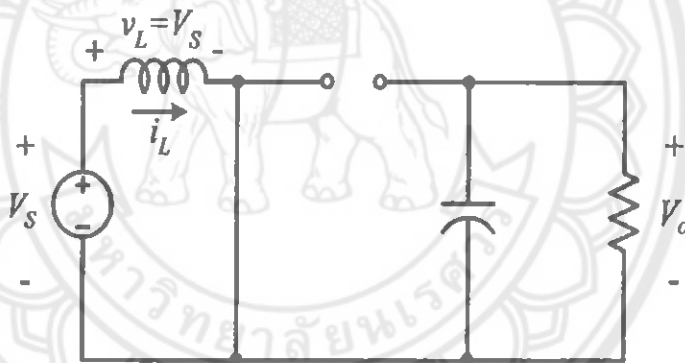
- 1) กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ ( $i_L$ ) ณ ตำแหน่งเดียวกันในแต่ละคาบ จะมีค่าเท่ากัน และมีค่าเป็นบวกเสมอ
- 2) แรงดันเฉลี่ยตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำในแต่ละคาบจะเท่ากับศูนย์ หมายถึงผลรวมของผลคูณระหว่างแรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำกับเวลาในแต่ละคาบจะเท่ากับศูนย์
- 3) ตัวเก็บประจุต้องมีขนาดใหญ่พอ เพื่อให้แรงดันด้านออก ( $V_o$ ) มีค่าคงที่
- 4) กำลังไฟฟ้าด้านเข้าเท่ากับกำลังไฟฟ้าด้านออก กรณีนี้ไม่คำนึงถึงการสูญเสียเนื่องจากการทำงานของวงจร โดยกำหนดให้อุปกรณ์ทุกตัวเป็นอุดมคติ ทำให้สามารถสรุปได้ว่าประสิทธิภาพของวงจรเป็น 100% [10]

### 2.6.2 หลักการทำงานของวงจรถดับแรงดัน

จากรูปที่ 2.18 กำหนดให้  $V_s$  คือแรงดันจากแหล่งจ่าย,  $v_L$  คือแรงดันที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ,  $i_L$  คือกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ,  $i_D$  คือกระแสที่ไฟฟ้าที่ไหลผ่านไดโอด,  $i_C$  คือกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ และ  $V_o$  คือแรงดันคัตเอาท์

หลักการทำงานของวงจรถดับแรงดันเพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าตามที่ต้องการ เริ่มจากข้อกำหนดที่ว่า “แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำในแต่ละคาบเวลาจะเท่ากับศูนย์” และสามารถหากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำได้โดยวิเคราะห์การทำงานของสวิตช์ในแต่ละโหมด ทั้งนี้การทำงานต้องอยู่ในช่วงสถานะอยู่ตัวดังนี้

เมื่อสวิตช์นำกระแส กระแสไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงจะไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ และสวิตช์ ขณะเดียวกันไดโอดจะถูกไบแอสย้อน (Reverse bias) ทำให้ไม่สามารถนำกระแสได้ [10] ดังแสดงในรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 วงจรสมมูลเมื่อสวิตช์นำกระแส [10]

จากกฎของเคอร์ชอฟฟ์จะได้สมการดังนี้

$$-V_s + V_L = 0 \quad (2.3)$$

จาก 
$$V_L = V_s = L \frac{di_L}{dt} \quad (2.4)$$

จะได้ 
$$-V_s + L \frac{di_L}{dt} = 0$$

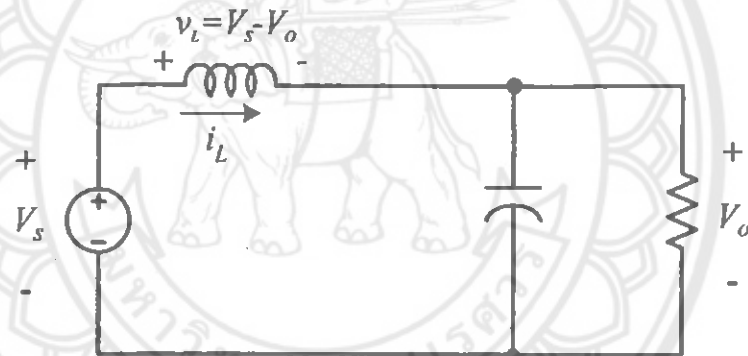
$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_s}{L} \quad (2.5)$$

ขณะที่สวิตช์นำกระแส  $dt = Dt$  เมื่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสคงที่ อาจจะได้ว่าการเพิ่มของกระแสเป็นเชิงเส้น [10] โดยที่  $D$  คือ ดิวตี้ไซเคิล (Duty cycle) ทำให้สามารถคำนวณอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสในตัวเหนี่ยวนำขณะสวิตช์นำกระแสได้จาก

$$\begin{aligned} \text{จากสมการที่ (2.5)} \quad \frac{di_{L,on}}{dt} &= \frac{V_s}{L} \\ \frac{\Delta i_{L,on}}{\Delta t} &= \frac{V_s}{L} \\ \Delta i_{L,on} &= \frac{V_s DT}{L} \end{aligned} \quad (2.6)$$

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

เมื่อสวิตช์ไม่นำกระแส กระแสในตัวเหนี่ยวนำจะเปลี่ยนแปลงทันทีทันใดไม่ได้ ใดโอดจะถูกไบแอสไปหน้า (Forward bias) เพื่อให้กระแสทำให้กระแสไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำอย่างต่อเนื่อง สมมุติแรงดันที่ด้านออกมีค่าคงที่ [10] ดังแสดงในรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 วงจรสมมูลเมื่อสวิตช์ไม่นำกระแส [10]

จากกฎของเคอร์ชอฟฟ์จะได้สมการของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำดังนี้

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

จัดรูปจะได้

$$v_L = V_s - V_o$$

แทนค่า

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

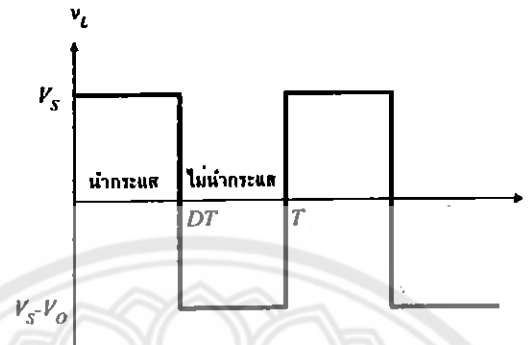
$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_s - V_o}{L} \quad (2.7)$$

ขณะสวิตช์ไม่นำกระแส  $dt = (1-D)T$  ดังแสดงในรูปที่ 2.21(ก) อัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำมีค่าคงที่ และจะถือว่าการลดลงของกระแสเป็นเชิงเส้น [10] ดัง

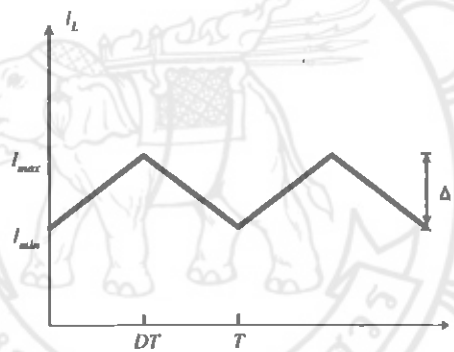


แสดงในรูปที่ 2.21(ข) สามารถคำนวณอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสในตัวเหนี่ยวนำขณะ สวิตช์ไม่นำกระแสได้จาก

$$\Delta i_{L,off} = \left( \frac{V_s - V_o}{L} \right) (1-D)T \quad (2.8)$$



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.21 (ก) แรงดันที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ (ข) กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ [10]

ในสถานะอยู่ตัว การเปลี่ยนแปลงสุทธิของกระแสตัวเหนี่ยวนำมีค่าเท่ากับศูนย์ [10] จากสมการที่ (2.6) และสมการที่ (2.8) จะได้ว่า

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

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

$$V_s D + (V_s - V_o)(1-D) = 0$$

$$V_s D + V_s - V_s D - V_o + V_o D = 0$$

$$V_s - V_o(1-D) = 0$$

$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{1}{1-D}$$

(2.9)

จากการหาความสัมพันธ์ของอัตราส่วนของแรงดันด้านออกต่อแรงดันด้านเข้าที่เรียกว่า อัตราขยายแรงดัน สามารถหาได้โดยใช้สมการแรงดันเฉลี่ยตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำในแต่ละคาบซึ่ง จะมีค่าเท่ากับศูนย์ [10] และได้ผลเช่นเดียวกับสมการที่ (2.9) ดังนี้

จาก  $V_{L,av} = v_{L,on}(t_{on}) + v_{L,off}(t_{off}) = 0$   
 แทนค่า  $t_{on} = DT$  และ  $t_{off} = (1-D)T$   
 โดยที่  $V_{L,on} = V_s$   
 $V_{L,off} = V_s - V_o$   
 จะได้  $V_{L,av} = (V_s)(t_{on}) + (V_s - V_o)(t_{off}) = 0$   
 $(V_s)(DT) + (V_s - V_o)(1-D)T = 0$   
 $V_s D + (V_s - V_o)(1-D) = 0$   
 $V_s D + V_s - V_s D - V_o + V_o D = 0$   
 $V_s - V_o(1-D) = 0$   
 $\frac{V_o}{V_s} = \frac{1}{1-D}$  (2.10)

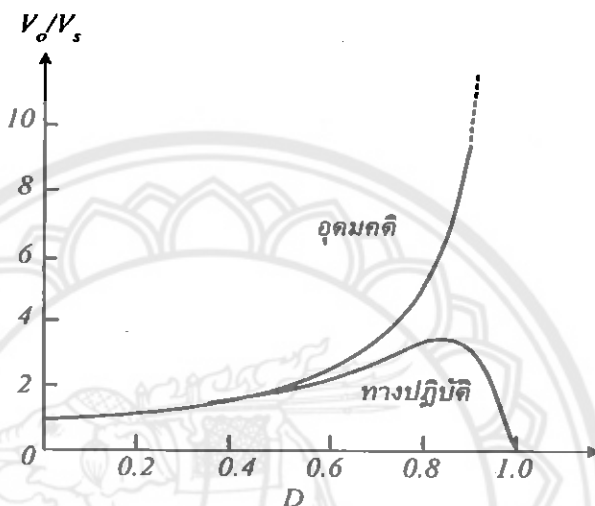
การได้มาซึ่งสมการอัตราส่วนของแรงดันด้านออกต่อแรงดันด้านเข้า จากสมการที่ (2.10) แท้จริงแล้วมีหลักการทำงานเดียวกัน ทำให้สามารถคำนวณค่าอัตราส่วนของแรงดันด้านออกต่อแรงดันด้านเข้าได้จากการปรับค่า  $D$  ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 อัตราขยายแรงดันของวงจรทบระดับแรงดันเมื่อมีการปรับเปลี่ยนค่า  $D$

Duty cycle ( $D$ )	อัตราขยายแรงดัน ( $V_o/V_s$ )
0.0	1.00
0.1	1.10
0.2	1.25
0.3	1.43
0.4	1.67
0.5	2.00
0.6	2.50
0.7	3.33
0.8	5.00
0.9	10.00
1.0	อนันต์

### ห้องสมมติคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครสวรรค์

กราฟความสัมพันธ์ในรูปที่ 2.22 เมื่อค่า  $D$  เพิ่มขึ้นอัตราขยายแรงดันจะเพิ่มขึ้นแบบไม่เป็นเชิงเส้น ในทางปฏิบัตินิยมปรับอัตราขยายแรงดันไม่เกิน 4 เท่า ทั้งนี้เพื่อให้วงจรมีเสถียรภาพ โดยอัตราขยายแรงดันขั้นต่ำสุดคือหนึ่งหรือแรงดันด้านออกเท่ากับแรงดันด้านเข้า ในทางทฤษฎี แต่ในทางปฏิบัติแรงดันด้านออกจะน้อยกว่าแรงดันด้านเข้าเล็กน้อยเนื่องจากค่าความสูญเสียจากแรงดันที่ตกคร่อมไดโอดและอุปกรณ์สวิตซ์ [10]



รูปที่ 2.22 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราขยายแรงดันกับค่า  $D$

#### 2.6.3 ค่าความพลีวของแรงดันไฟฟ้าด้านออก

การที่ตัวเก็บประจุมีขนาดใหญ่จะสามารถรักษาให้แรงดันไฟฟ้าด้านออกคงที่ แต่ในทางปฏิบัติไม่สามารถเลือกใช้ตัวเก็บประจุที่มีขนาดใหญ่มากๆ ได้เนื่องจากมีราคาแพงและใช้พื้นที่มาก จึงเลือกใช้ตัวเก็บประจุที่มีขนาดเหมาะสม และค่าความพลีวของแรงดันไฟฟ้าด้านออกอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ [10]

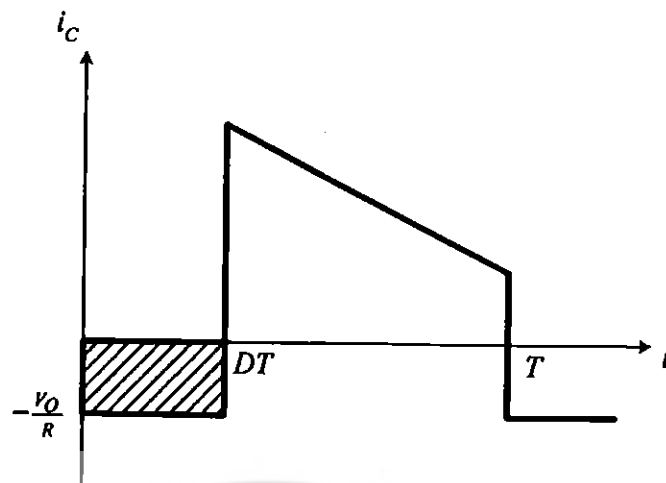
การคำนวณหาค่าความพลีวของแรงดันไฟฟ้าด้านออกจากยอดถึงยอด สามารถหาได้จากกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ [10] ดังรูปที่ 2.23

15753818

ร/ร.

26/9/2553

2553



รูปที่ 2.23 กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ

$$|\Delta Q| = C \Delta V_o = I_o \Delta t_{on} \quad (2.11)$$

$$I_o = \frac{V_o}{R}$$

$$\Delta t_{on} = DT$$

$$\Delta V_o = \frac{I_o \Delta t_{on}}{C} = \frac{V_o DT}{RC}$$

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{DT}{RC} \quad (2.12)$$

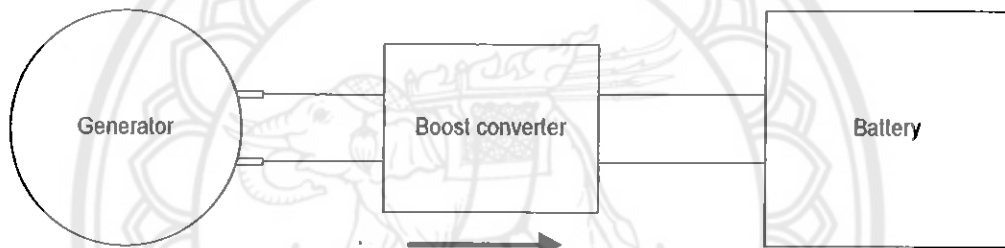
$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{D}{RCf} \quad (2.13)$$

เมื่อต้องการลดอัตราความพลีวของแรงดันไฟฟ้าด้านออก จะทำได้โดยการลดค่า  $D$  ให้เข้าใกล้ศูนย์ การเพิ่ม โหลดหรือเพิ่มค่าของตัวเก็บประจุรวมถึงการเพิ่มค่าความถี่ในการสวิตช์ให้สูงขึ้น [10]

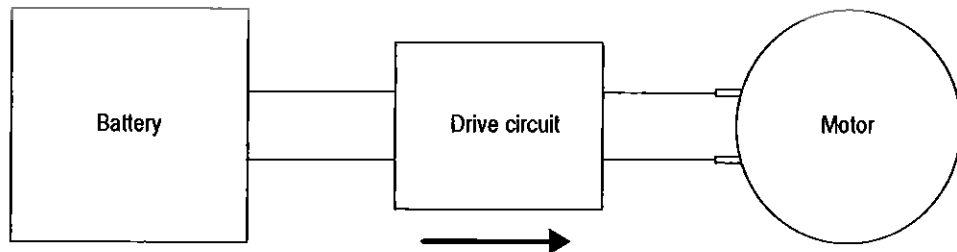
### บทที่ 3

## การทำงานและการสร้างจักรยานไฟฟ้าสองระบบ รุ่นที่ 2

จักรยานไฟฟ้าที่มีใช้อยู่ทั่วไปมีการดึงพลังงานจากแบตเตอรี่ออกมาใช้เพียงอย่างเดียว และการอัดประจุจะอาศัยแหล่งจ่ายไฟฟ้าภายในอาคาร แต่การทำงานของจักรยานไฟฟ้าสองระบบ รุ่นที่ 2 นอกจากจะมีการดึงพลังงานจากแบตเตอรี่มาใช้แล้วยังสามารถอัดประจุแบตเตอรี่ได้โดยการปั่น ซึ่งมีหลักการตามรูปที่ 3.1 และรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.1 วงจรการอัดประจุ



รูปที่ 3.2 วงจรการคายประจุ

จากโครงการจักรยานไฟฟ้าสองระบบ รุ่นที่ 1 มีการใช้แบตเตอรี่ 4 ลูก โดยใช้ 2 ลูกในการขับเคลื่อนมอเตอร์ ในขณะที่อีก 2 ลูกถูกอัดประจุทำให้เกิดปัญหาเรื่องน้ำหนัก คณะผู้ดำเนินโครงการได้สังเกตเห็นความบกพร่องดังกล่าวจึงมีการลดจำนวนแบตเตอรี่ให้เหลือเพียง 2 ลูก ซึ่งแยกการทำงานออกเป็น 2 โหมด คือ โหมดการขับเคลื่อนมอเตอร์ และโหมดการอัดประจุ โดยการทำงานในแต่ละโหมดจะถูกควบคุมด้วยสวิทช์ซึ่งส่งผลให้ในขณะที่รถจักรยานทำงานในโหมดการขับเคลื่อนมอเตอร์จะไม่สามารถอัดประจุแบตเตอรี่ได้ และขณะที่ทำงานในโหมดการอัดประจุจะไม่สามารถขับเคลื่อนมอเตอร์ได้ โดยมีวงจรควบคุมการอัดประจุจำนวน 2 ชุดเพื่อใช้อัดประจุแบตเตอรี่แต่ละลูกแยกจากกันด้วยแรงดันคงที่ที่ 13.5 V

### 3.1 การสร้างวงจรทระดับแรงดัน

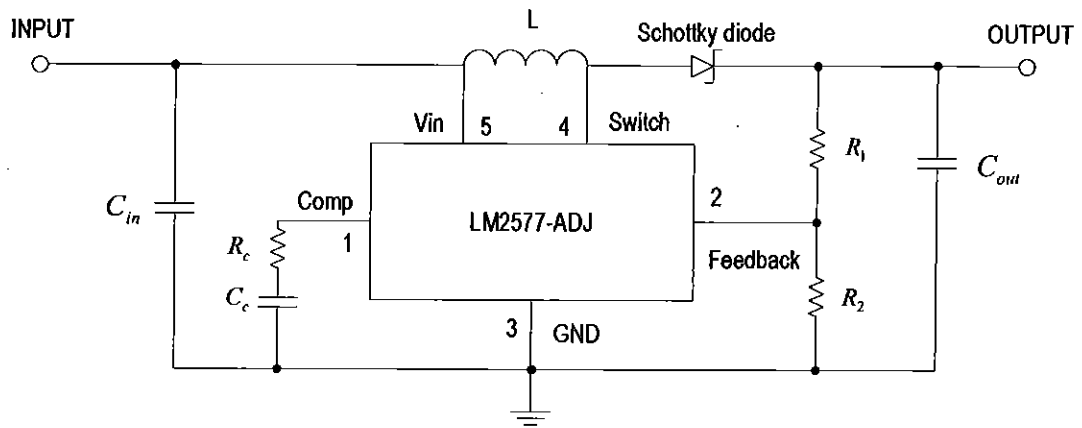
การอัดประจุแบตเตอรี่ขณะขับเคลื่อนใช้แรงดันจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับล้อหลังของจักรยาน เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้เป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 24 V 250 W 400 rpm อย่างไรก็ตามแรงดันที่ออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้านี้ยังไม่เพียงพอสำหรับการอัดประจุแบตเตอรี่จึงจำเป็นต้องเพิ่มระดับแรงดันขึ้นไปอีกเพื่อให้เพียงพอสำหรับการอัดประจุ

#### 3.1.1 ขั้นตอนการสร้างวงจรทระดับแรงดัน

- 1) ออกแบบวงจรทระดับแรงดันโดยการศึกษาจากแหล่งข้อมูล
- 2) คำนวณค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์
- 3) จัดซื้ออุปกรณ์
- 4) ต่อวงจรตามที่ได้ทำการศึกษาและออกแบบลงบนแผ่นโปรโตบอร์ด (Protoboard)
- 5) ทดสอบวงจร
- 6) สร้างวงจรโดยใช้บอร์ดคอนเนกประสงค์

#### 3.1.2 การคำนวณค่าและเลือกใช้อุปกรณ์ของวงจรทระดับแรงดัน

ขั้นตอนการออกแบบต่อไปนี้สามารถใช้ในการเลือกอุปกรณ์ที่เป็นส่วนประกอบของวงจรดังรูปที่ 3.3 ซึ่งขึ้นอยู่กับความต้องการของระบบ



รูปที่ 3.3 แผนภาพการเชื่อมต่ออุปกรณ์ในวงจรหม้อแปลงแรงดัน

ก่อนคำนวณต้องตรวจสอบไอซีหมายเลข LM2577-Adj [11] ว่าสามารถให้ค่าของแรงดันด้านออก ( $V_{out}$ ) และกระแสด้านออกที่มากที่สุด ( $I_{out(max)}$ ) ได้ตามการทำงานของแรงดันด้านเข้าที่น้อยที่สุด ( $V_{in(min)}$ ) หรือไม่ โดยพิจารณาจากสมการดังต่อไปนี้

$$V_{out} \leq 60 \text{ V} \tag{3.1}$$

$$V_{out} \leq 10 \times V_{in(min)} \tag{3.2}$$

$$I_{out(max)} \leq \frac{2.1 \times V_{in(min)}}{V_{out}} \tag{3.3}$$

1) การเลือกค่าความเหนี่ยวนำ  $L$

การเลือก  $L$  ขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ดังสมการที่ (3.4) และ (3.5)

$$D_{max} = \frac{V_{out} + V_F - V_{in(min)}}{V_{out} + V_F - 0.6} \tag{3.4}$$

$$D_{max} = \frac{13.63 + 0.5 - 5}{13.63 + 0.5 - 0.6}$$

จะได้

$$D_{max} = 0.67$$

$V_F = 0.5$  สำหรับขอตักไดโอด (Schottky diodes)

$$L_{min} = \frac{6.4(V_{in(min)} - 0.6)(2D_{(max)} - 1)}{1 - D_{(max)}} \tag{3.5}$$

$$L_{min} = \frac{6.4(5 - 0.6)[2(0.67) - 1]}{1 - 0.67}$$

จะได้

$$L_{\min} = 29 \mu\text{H}$$

ในโครงการงานนี้เลือก  $L = 100 \mu\text{H}$  [11]

2) การเลือกค่าความต้านทาน  $R_c$  และค่าความจุ  $C_{out}$

ค่าของ  $R_c$  และ  $C_c$  ส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับ การควบคุมอัตราขยายแรงดัน  $I_{out(max)}$ ,  $L$  และ  $C_{out}$  ดังสมการที่ (3.6) และ (3.7)

$$R_c \leq \frac{750 \times I_{out(max)} \times V_{out}^2}{V_{in(min)}^2} \quad (3.6)$$

$$R_c \leq \frac{750 \times 0.77 \times 13.63^2}{5^2}$$

จะได้

$$R_c \leq 4.29 \text{ k}\Omega$$

ควรเลือกตัว  $R_c$  ที่มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับค่านี้อาจจะมีค่าไม่เกิน 3 k $\Omega$

$$C_{out} \geq \frac{0.19 \times L \times R_c \times I_{out(max)}}{V_{in(min)} \times V_{out}} \quad (3.7)$$

$$C_{out} \geq \frac{0.19 \times 100 \times 3 \times 0.77}{5 \times 13.63}$$

จะได้

$$C_{out} \geq 644.02 \mu\text{F}$$

ในโครงการงานนี้เลือก  $C_{out} = 1000 \mu\text{F}$

3) การเลือกค่าความจุ  $C_c$

การชดเชยตัวเก็บประจุเป็นส่วนหนึ่งของวงจร เมื่อเริ่มจ่ายไฟอัตราขยายจะเพิ่มขึ้น  $C_c$  เป็นตัวควบคุมการทำงานของวงจรให้ทำงานอย่างถูกต้องโดยมีค่าเริ่มต้น  $C_c \geq 0.22 \mu\text{F}$  ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (3.8)

$$C_c \geq \frac{58.5 \times V_{out}^2 \times C_{out}}{R_c^2 \times V_{in(min)}} \quad (3.8)$$

$$C_c \geq \frac{58.5 \times 13.63^2 \times 1000}{3^2 \times 5}$$



จะได้

$$C_c \geq 0.24 \mu\text{F}$$

ในโครงงานนี้เลือก  $C_c = 0.33 \mu\text{F}$

4) การเลือกค่าความต้านทาน  $R_1$  และ  $R_2$

การเลือกค่า  $R_1$  และ  $R_2$  ต้องสอดคล้องกับแรงดันด้านออกที่เราต้องการ สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (3.9)

$$V_{out} = 1.23V(1 + R_1/R_2) \quad (3.9)$$

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{13.63}{1.23} - 1$$

จะได้

$$\frac{R_1}{R_2} = 10.08$$

ในโครงงานนี้เลือก  $R_1 = 20 \text{ k}\Omega$  และ  $R_2 = 2 \text{ k}\Omega$

5) การเลือกค่าความจุ  $C_{in}$

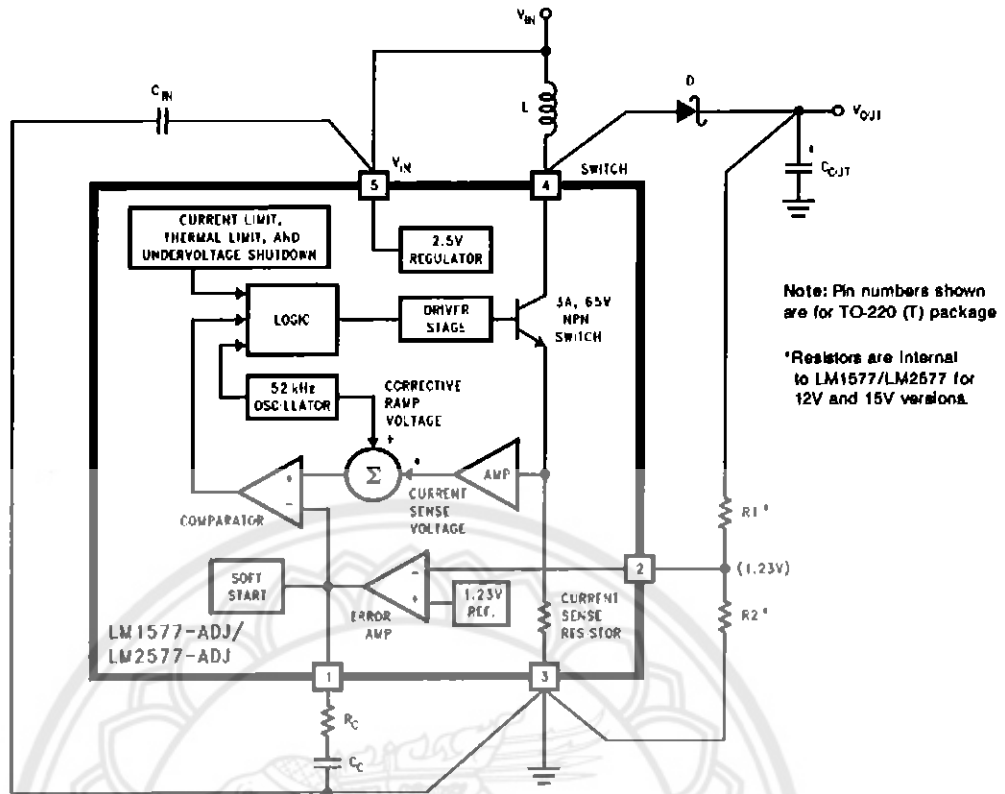
ในการทำงานของวงจรจะเกิดความพลัวของกระแส (Ripple current) ทำให้เกิดเสียงดัง จึงต้องมี  $C_{in}$  เพื่อกำจัดคลื่นเหล่านี้ในที่นี้เลือก  $C_{in} = 0.1 \mu\text{F}$

6) การเลือกไดโอด

ไดโอดในวงจรต้องทนต่อแรงดันไฟฟ้าย้อนกลับเท่ากับแรงดันด้านออกของวงจร ไดโอดที่เหมาะสมต้องมีแรงดันเบรกดาวน์นี้ขั้นต่ำสูงกว่าแรงดันด้านออกของวงจรจึงเลือกใช้ชอตต์กีไดโอด [11]

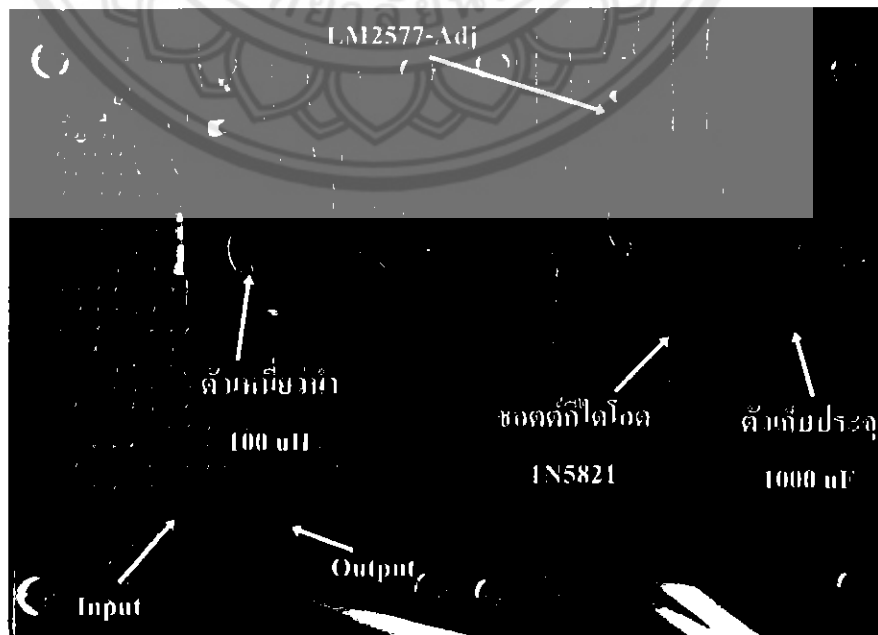
7) วงจรสร้างสัญญาณควบคุมสวิทช์

ในโครงงานนี้ สวิทช์จะถูกควบคุมด้วยสัญญาณที่สร้างมาจาก ไอซีหมายเลข LM2577-Adj ซึ่งใช้งานง่าย และสามารถทนกระแสและแรงดันที่ใช้ภายในวงจรได้ แผนภาพวงจรภายในแสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แผนภาพของวงจรภายใน LM2577-Adj

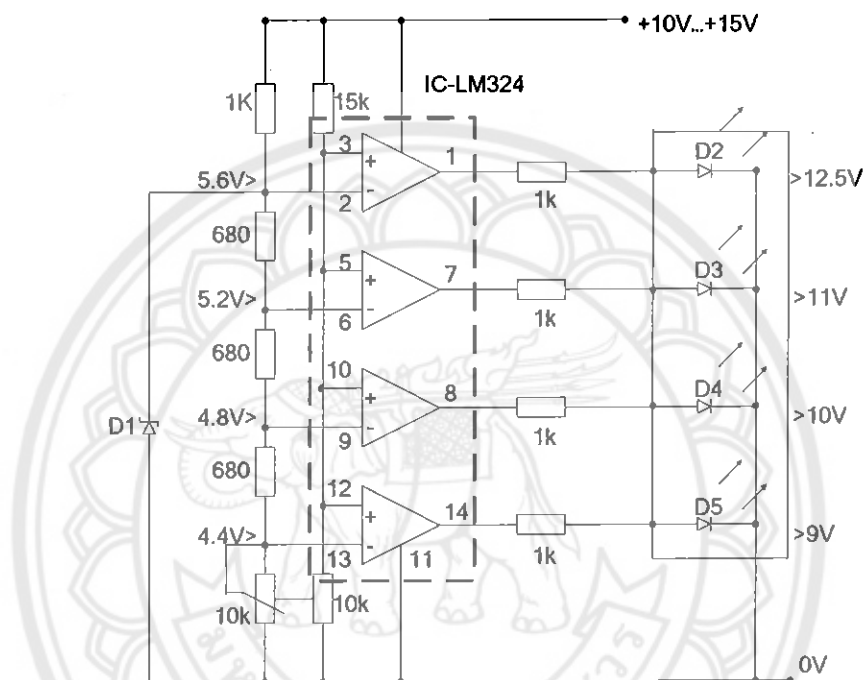
หลังจากเลือกอุปกรณ์แล้วนำมาประกอบเป็นวงจรทระดับแรงดันบนโปรโตบอร์ด ทดสอบการทำงานของวงจรแล้วนำอุปกรณ์มาเชื่อมลงบอร์ดอเนกประสงค์ได้ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 วงจรทระดับแรงดันที่เชื่อมลงบอร์ดอเนกประสงค์

### 3.2 การสร้างวงจรตรวจสอบระดับแรงดันแบตเตอรี่

การใช้งานจักรยานไฟฟ้าสองระบบต้องคำนึงถึงแรงดันของแบตเตอรี่ไม่ให้ต่ำจนเกินไป เพื่อยืดอายุการใช้งานให้นานยิ่งขึ้น โดยใช้วงจรตรวจสอบระดับแรงดันแบตเตอรี่แสดงผลด้วย แอลอีดี (LED) ที่สร้างมาจากไอซีหมายเลข LM 324 ซึ่งแสดงวงจรภายในและส่วนประกอบของ วงจรดังรูปที่ 3.6

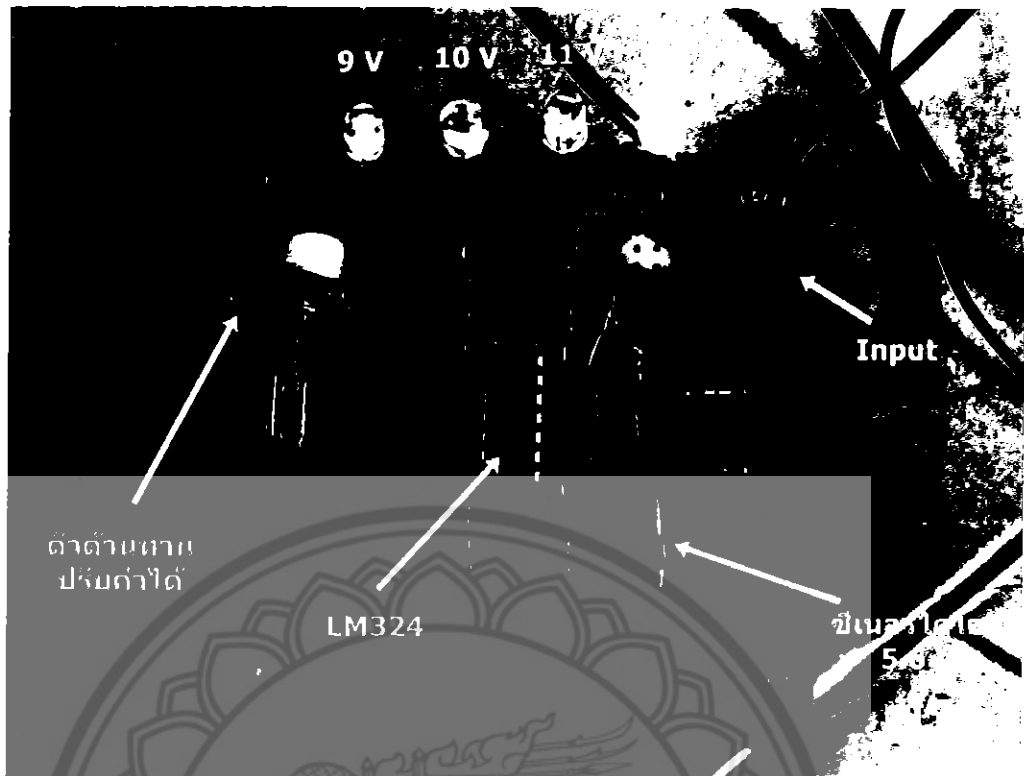


รูปที่ 3.6 แสดงวงจรภายใน LM 324

#### 3.2.1 หลักการทำงานของวงจรตรวจสอบระดับแรงดันแบตเตอรี่

เริ่มจากแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงตกคร่อมไดโอดมีค่า 5.6 V มีการลดแรงดันแต่ละช่วงลงด้วยการต่อตัวต้านทาน จะได้แรงดันไฟฟ้าอ้างอิง 4 ค่า เมื่อแรงดันไฟฟ้าด้านเข้าจากแบตเตอรี่มีการเปลี่ยนแปลงแล้วไปสอดคล้องกับแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงตัวใดแอลอีดีตัวนั้นจะติด

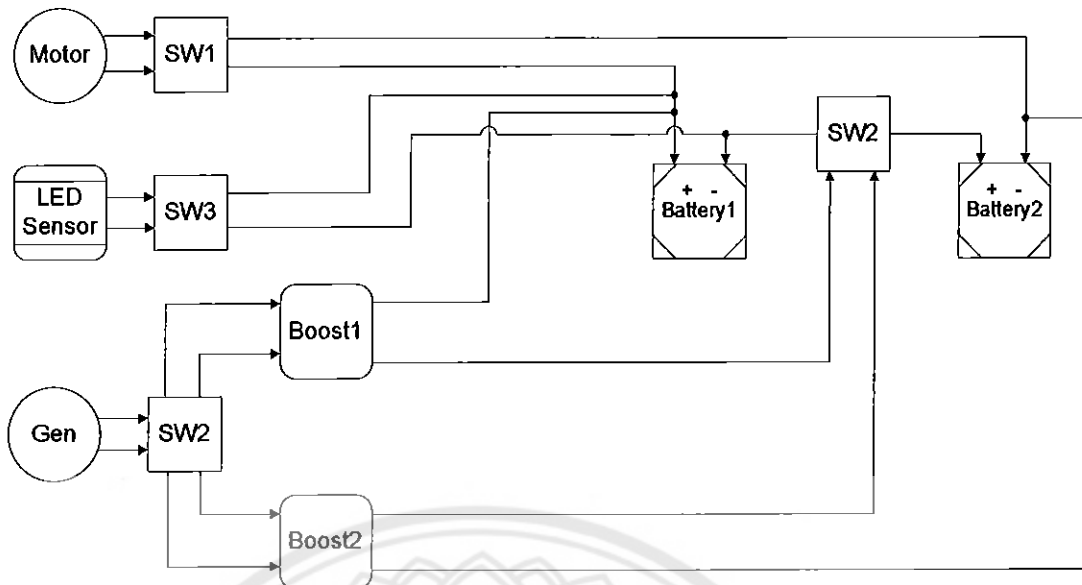
หลังจากทดสอบการทำงานของวงจรบนโปรโตบอร์ดเป็นที่เรียบร้อยแล้ว จึงนำอุปกรณ์มาเชื่อมลงบอร์ดคอนเนกประสงค์ได้วงจรดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 วงจรตรวจสอบระดับแรงดันแบตเตอรี่แสดงผลด้วย LED

### 3.3 การควบคุมการทำงานของจ็กรยานไฟฟ้าสองระบบ รุ่นที่ 2

จากโครงการจ็กรยานไฟฟ้าสองระบบ รุ่นที่ 1 ใช้สวิตช์ในการควบคุมการทำงานถึง 5 ตัว ซึ่งมากเกินไปจนเกิดความจำเป็น ทำให้ไม่สะดวกต่อการใช้งาน คณะผู้ดำเนินโครงการได้เล็งเห็นปัญหาดังกล่าว จึงได้ออกแบบจ็กรยานไฟฟ้าสองระบบ รุ่นที่ 2 ขึ้นมาให้มีลักษณะการทำงานที่เรียบง่ายและสะดวกต่อการใช้งาน โดยใช้สวิตช์ควบคุมจำนวน 3 ตัว ( $Sw_1$ - $Sw_3$ ) เพื่อกำหนดลักษณะการทำงานดังรูปที่ 3.8 และแผงควบคุมแสดงดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.8 แผนภาพการควบคุมการทำงานของจ็กรยานไฟฟ้าสองระบบ



รูปที่ 3.9 แผงควบคุมการทำงาน

### 3.4 การทำงานของจ็กรยานไฟฟ้าสองระบบ รุ่นที่ 2

การทำงานของจ็กรยานไฟฟ้าสองระบบ รุ่นที่ 2 มีความแตกต่างจาก รุ่นที่ 1 โดยมีลำดับการทำงานน้อยกว่าทำให้เข้าใจง่ายขึ้น ซึ่งมีขั้นตอนการทำงานดังนี้

- ลำดับที่ 1 กรณีที่แบตเตอรี่เต็มสามารถขับด้วยระบบไฟฟ้าโดยการควบคุมให้สวิตช์ 1 นำกระแสแล้วสามารถบิดคันเร่งใช้งานได้เลย เนื่องจากช่วงนี้แบตเตอรี่มีลักษณะการต่อแบบอนุกรมทำให้แรงดันของแบตเตอรี่เป็น 24 V ซึ่งเป็นแรงดันที่เหมาะสมในการขับมอเตอร์จักรยานไฟฟ้า
- ลำดับที่ 2 กรณีที่ต้องการอัดประจุแบตเตอรี่ จะควบคุมให้สวิตช์ 2 นำกระแสทำให้แบตเตอรี่เป็นอิสระแยกจากกัน
- ลำดับที่ 3 กรณีที่ต้องการตรวจสอบระดับแรงดันของแบตเตอรี่ จะควบคุมให้สวิตช์ 3 นำกระแสไฟจากหลอดแอลอีดีที่แสดงหมายถึงระดับแรงดันของแบตเตอรี่ซึ่งได้อธิบายไว้ในหัวข้อขั้นตอนการใช้งานจักรยานไฟฟ้าสองระบบ ในภาคผนวก ค

หมายเหตุ สวิตช์ 1 และ 2 ไม่สามารถนำกระแสพร้อมกันได้

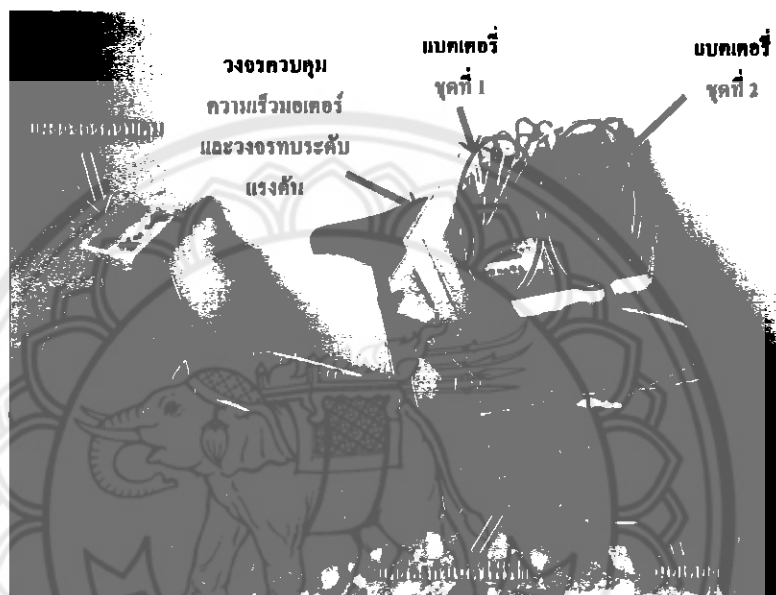
### 3.5 การประกอบชิ้นงานและปรับปรุงโครงสร้างของจักรยานไฟฟ้า

ในโครงการนี้ได้เปลี่ยนขนาดเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง จากขนาด 350 W 24 V 2500 rpm เป็น 250 W 24 V มีเกียร์ทดในตัว อัตราทด 1:6 ความเร็ว 400 rpm แสดงดังรูปที่ 3.10 มีโครงสร้างที่กะทัดรัดจึงทำให้ง่ายต่อการติดตั้ง และมีความฝืดน้อย จึงไม่ต้องใช้แรงมากขณะปั่นจักรยาน

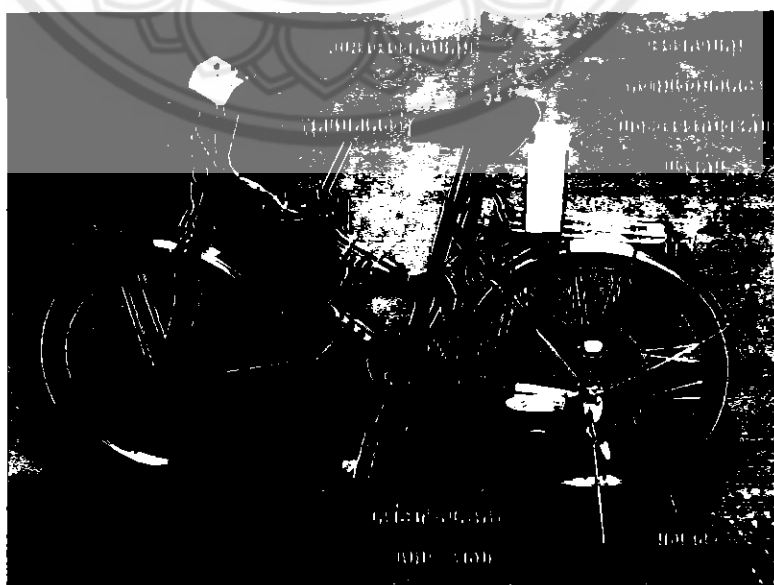


รูปที่ 3.10 การติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 250 W 24 V 400 rpm เข้ากับจักรยาน [12]

เพื่อให้จักรยานไฟฟ้ามีความสมดุมากขึ้นจึงย้ายตำแหน่งแบตเตอรี่ เพิ่มขาตั้งคู่ และสร้างสวิทช์ควบคุมขึ้นมาใหม่ทำให้ใช้งานได้ง่ายขึ้น เนื่องจากการสร้างวงจรทระดับแรงดันขึ้นมาใหม่จึงมีการเปลี่ยนวงจรแทนตำแหน่งเดิม เมื่อปรับปรุงโครงสร้างและเตรียมอุปกรณ์ต่างๆ ซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักของจักรยานไฟฟ้าสองระบบ รุ่นที่ 2 พร้อมแล้วจึงนำมาประกอบเข้ากับจักรยานในตำแหน่งดังรูปที่ 3.12 เปรียบเทียบกับจักรยานไฟฟ้าสองระบบ รุ่นที่ 1 ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 จักรยานไฟฟ้าสองระบบ รุ่นที่ 1



รูปที่ 3.12 จักรยานไฟฟ้าสองระบบ รุ่นที่ 2

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

หลังจากศึกษาการทำงานของวงจรระดับแรงดันในบทที่ 2 ต่อด้วยการสร้างตัวควบคุมการอัดประจุแบตเตอรี่และวงจรตรวจสอบระดับแรงดันในบทที่ 3 คณะผู้จัดทำโครงการได้ทดสอบการทำงานของตัวควบคุมฯที่สร้างขึ้น โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ส่วนดังนี้

#### ส่วนที่ 1 การทดสอบวงจรอัดประจุ

- ก) ในสภาวะไร้โหลด
- ข) ในความเร็วต่างๆที่ระยะเวลาต่อเนื่อง
- ค) การอัดประจุแบตเตอรี่ที่ความเร็วปกติคงที่

#### ส่วนที่ 2 การทดสอบมอเตอร์

#### ส่วนที่ 3 การทดสอบวงจรตรวจสอบระดับแรงดัน

### 4.1 การทดสอบวงจรอัดประจุ

#### 4.1.1 การทดสอบในสภาวะไร้โหลด

ในสภาวะที่วงจร ไม่มีโหลดจะ ไม่มีกระแสไหลด้านออกของวงจร แต่จะมีแรงดันตกคร่อมอยู่ ในการทดสอบนี้จะเห็นว่าที่แรงดันด้านเข้าค่าน้อยๆแรงดันด้านออกของวงจรจะไม่แตกต่างจากด้านเข้ามากนัก จนเมื่อแรงดันด้านเข้าถึงค่าๆหนึ่งคือประมาณ 7.5 V จะพบว่าแรงดันด้านออกมีค่า 13.63 V คงที่ และถ้าแรงดันด้านเข้ามีค่ามากกว่า 13.63 V ซึ่งเป็นค่าที่ถูกกำหนดไว้ โดยคุณลักษณะของวงจร จะทำให้แรงดันด้านออกมีค่าเท่ากับแรงดันด้านเข้า ในความเป็นจริงการป้อนจกรยานไฟฟ้าให้ได้แรงดันที่สูงถึง 13.63 V เป็นไปได้ยากเนื่องจากต้องป้อนด้วยความเร็วสูง ในการทดสอบนี้ใช้มอเตอร์ในการปั่นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแทนการใช้คนปั่น ทำให้ได้ความเร็วค่อนข้างคงที่มากกว่าการใช้คนปั่น ซึ่งได้ผลดังตารางที่ 4.1



ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบวงจรอัดประจุในสภาวะไร้โหลด

แรงดันด้านเข้า (V)	แรงดันด้านออก (V)
1.0	1.05
2.0	2.07
3.0	5.12
3.5	13.21
4.0-6.5	13.53
7.0	13.61
7.5-13.63	13.63
> 13.63	เท่ากับแรงดันด้านเข้า

#### 4.1.2 การทดสอบในความเร็วต่างๆที่ระยะเวลาต่อเนื่อง

การทดสอบนี้จะมีการต่อโหลดคือแบตเตอรี่ จากตารางที่ 4.2 แสดงค่าการอัดประจุแบตเตอรี่ที่มีการเปลี่ยนแปลงของระดับแรงดัน โดยมีระยะเวลาต่อเนื่อง พิจารณาที่สถานะอยู่ตัวในแต่ละระดับ แรงดันด้านออกเริ่มต้นจะขึ้นอยู่กับแรงดันแบตเตอรี่ ณ ขณะนั้น คือ ถ้าแบตเตอรี่แรงดันต่ำมาก หรือมีการคายประจุที่ลึกมากแรงดันด้านออกเริ่มต้นก็จะต่ำแล้วจึงจะเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองวงจรอัดประจุในความเร็วต่างๆที่ระยะเวลาต่อเนื่อง

เวลา (min)	ความเร็ว (km/h)	แรงดันด้านเข้า (V)	แรงดันด้านออก (V)	กระแสด้านออก (mA)
0	13.27	7.5	11.780	10
1	14.30	8.0	11.780	10
2	14.93	8.5	11.780	25
3	15.81	9.0	11.785	90
4	17.32	9.5	11.795	295
5	18.39	10.0	11.810	600
6	19.70	10.5	11.840	1,010
7	21.07	11.0	11.900	1,555
8	21.87	11.5	11.945	1,715

#### 4.1.3 การอัดประจุแบตเตอรี่ที่แรงดันคงที่

การใช้งานจักรยานไฟฟ้าสองระบบที่ความเร็วปกติคือ 17 km/h จะได้แรงดันอยู่ที่ประมาณ 9.5 V ซึ่งในการทดสอบนี้จะทำการอัดประจุด้วยแรงดัน 9.5 V คงที่สังเกตการเพิ่มขึ้นของแรงดันแบตเตอรี่และการลดลงของกระแสที่ไหลเข้าแบตเตอรี่เทียบกับระยะเวลา จากผลการทดสอบพบว่าเมื่ออัดประจุด้วยแรงดัน 9.5 V จะได้ผลดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบการอัดประจุแบตเตอรี่ที่แรงดัน 9.5 V คงที่

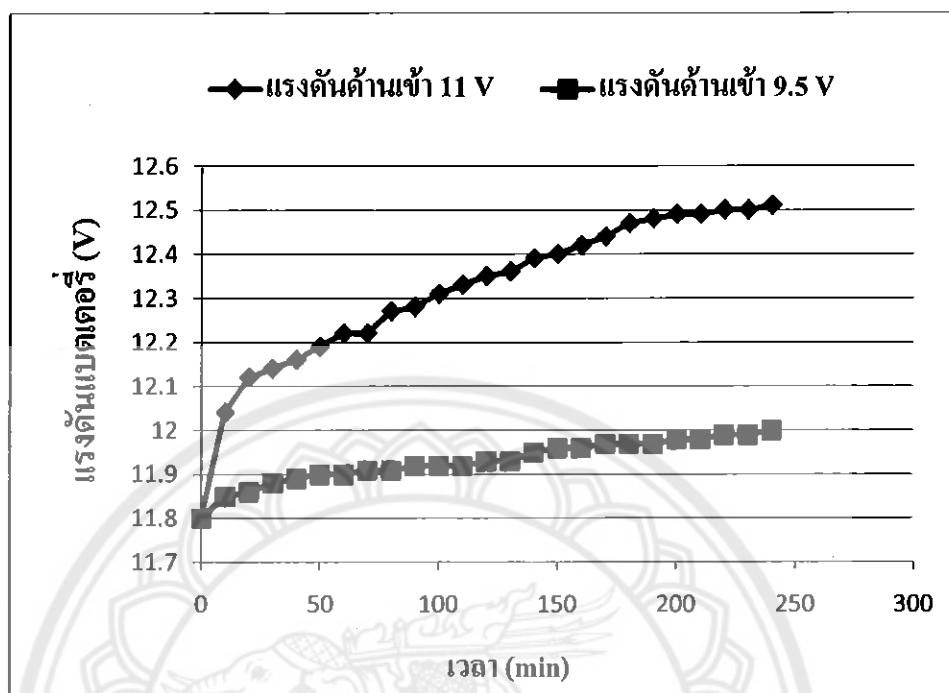
เวลา (min)	แรงดันแบตเตอรี่ (V)	กระแสเข้าแบตเตอรี่ (mA)
0	11.80	340
10	11.85	270
20	11.86	270
30	11.88	250
40	11.89	240
50	11.90	230
60	11.90	220
70	11.91	210
80	11.91	210
90	11.92	210
100	11.92	200
110	11.92	200
120	11.93	200
130	11.93	200
140	11.95	180
150	11.96	170
160	11.96	170
170	11.97	160
180	11.97	150
190	11.97	150
200	11.98	140
210	11.98	140
220	11.99	130
230	11.99	120
240	12.00	110

ความเป็นจริงแล้วความเร็วในการทำงานสามารถเปลี่ยนแปลงได้ ซึ่งอัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงดันและกระแสที่ไหลเข้าแบตเตอรี่จะมากหรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับระดับแรงดันที่ใช้ในการอัดประจุ ถ้าใช้แรงดันสูงก็จะสามารถอัดประจุแบตเตอรี่ได้ดี และมีการทดสอบการอัดประจุที่แรงดันอีกค่าหนึ่งคือ 11 V แสดงค่าดังตารางที่ 4.4

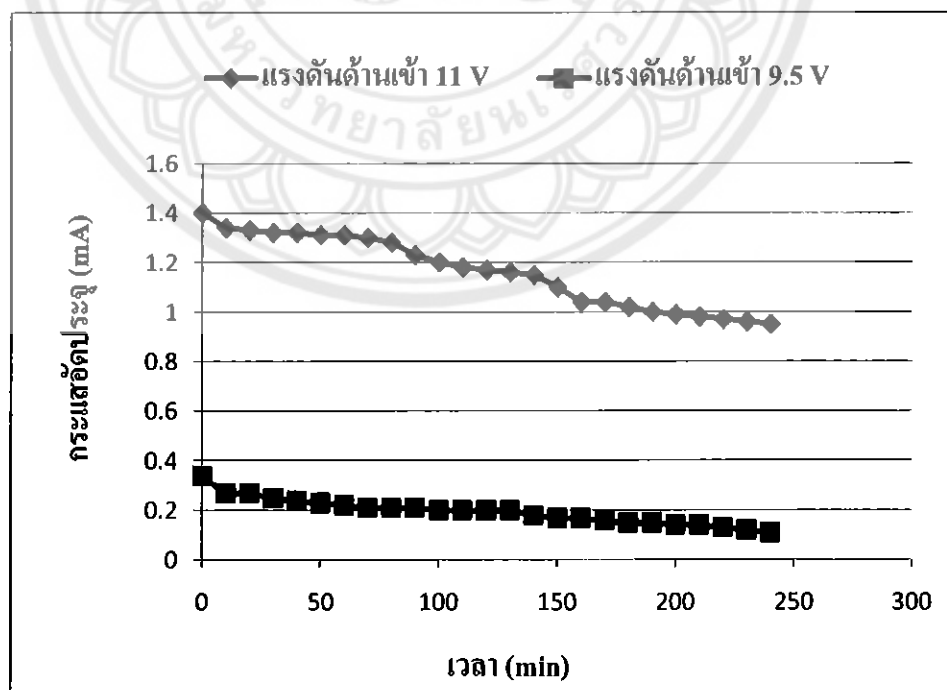
ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบการอัดประจุแบตเตอรี่ที่แรงดัน 11 V คงที่

เวลา (min)	แรงดันแบตเตอรี่ (V)	กระแสเข้าแบตเตอรี่ (mA)
0	11.80	1,400
10	12.04	1,340
20	12.12	1,330
30	12.14	1,320
40	12.16	1,320
50	12.19	1,310
60	12.22	1,310
70	12.22	1,300
80	12.27	1,280
90	12.28	1,230
100	12.31	1,200
110	12.33	1,180
120	12.35	1,170
130	12.36	1,160
140	12.39	1,150
150	12.40	1,100
160	12.42	1,040
170	12.44	1,040
180	12.47	1,020
190	12.48	1,000
200	12.49	990
210	12.49	980
220	12.50	970
230	12.50	960
240	12.51	950

จากตารางที่ 4.3 และตารางที่ 4.4 เมื่อนำมาแสดงเป็นกราฟจะได้ดังรูปที่ 4.1 และรูปที่ 4.2 โดยจะแยกออกเป็นกราฟแรงดันและกระแส



รูปที่ 4.1 อัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดันของแบตเตอรี่เมื่อแรงดันด้านเข้ามีค่า 9.5 และ 11 V



รูปที่ 4.2 อัตราการเปลี่ยนแปลงกระแสของแบตเตอรี่เมื่อแรงดันด้านเข้ามีค่า 9.5 และ 11 V

จากรูปที่ 4.1 และรูปที่ 4.2 ทดลองโดยการอัดประจุแบตเตอรี่ที่แรงดัน 9.5 V และ 11 V แทนความเร็ว 17 km/h และ 21 km/h ตามลำดับเป็นเวลา 4 ชั่วโมง โดยแรงดันเริ่มต้นของแบตเตอรี่มีค่าเท่ากัน คือ 11.8 V เมื่อเวลาผ่านไปแรงดันแบตเตอรี่ค่อยๆเพิ่มขึ้นและกระแสค่อยๆลดลงเป็นฟังก์ชันพาราโบลา จะเห็นได้ว่าการขึ้นของกราฟแรงดันและปริมาณกระแสอัดประจุ จะขึ้นอยู่กับแรงดันค่านเข้า ซึ่งแรงดันค่านเข้ามากกระแสอัดประจุสูงแบตเตอรี่ก็จะเต็มเร็ว นั่นหมายถึงยิ่งเราปั่นจักรยานเร็วขึ้นก็จะอัดประจุได้เต็มเร็วขึ้นเช่นกัน

#### 4.2 ผลการทดสอบการขับมอเตอร์

จากการทดสอบมอเตอร์ของจักรยานไฟฟ้าสองระบบ รุ่นที่ 1 เป็นการทดสอบด้วยวิธีการขับจีจริง แหล่งจ่ายไฟให้แก่มอเตอร์คือ แบตเตอรี่ 1 ชุดซึ่งประกอบด้วยแบตเตอรี่ 12 V 14 Ah จำนวน 2 ลูกต่ออนุกรมกัน โดยมีแรงดันเริ่มต้นที่ 24.6 V ผู้ขับขี่ที่ทำการทดสอบมีน้ำหนัก 57 kg ซึ่งพบว่ากระแสที่ทำให้จักรยานเริ่มเคลื่อนที่ (มอเตอร์เริ่มหมุน) มีค่าเท่ากับ 0.7 A ในขณะที่ปริมาณกระแสที่ต้องใช้เพื่อขับมอเตอร์ด้วยความเร็วคงที่มีค่าแตกต่างกัน [7] ตามผลการทดสอบในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบมอเตอร์ของจักรยานไฟฟ้าสองระบบ รุ่นที่ 1 [7]

ความเร็ว (km/h)	แรงดันแบตเตอรี่ (V)	กระแสแบตเตอรี่ (A)
10	23.3	1.35
15	23.0	1.80
20	22.8	2.5
25	22.1	3.75
30	21.3	5.15

ในการทดสอบมอเตอร์ของจักรยานไฟฟ้าสองระบบ รุ่นที่ 2 ต่างจาก รุ่นที่ 1 คือการเปลี่ยนแบตเตอรี่จาก 12 V 14 Ah เป็น 12 V 21 Ah จำนวน 2 ลูกต่ออนุกรมกัน โดยมีแรงดันเริ่มต้นที่ 26.4 V ผู้ขับขี่ที่ทำการทดลองมีน้ำหนัก 47 kg ซึ่งพบว่ากระแสที่ทำให้จักรยานเริ่มเคลื่อนที่ (มอเตอร์เริ่มหมุน) มีค่าเท่ากับ 0.16 A และแรงดันของแบตเตอรี่ที่ทำให้จักรยานหยุดเคลื่อนที่ (มอเตอร์หยุดหมุน) มีค่าเท่ากับ 22.1 V ในขณะที่ปริมาณกระแสที่ต้องใช้เพื่อขับมอเตอร์ด้วยความเร็วคงที่มีค่าแตกต่างกันตามผลการทดสอบในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบมอเตอร์ของจักรยานไฟฟ้าสองระบบ รุ่นที่ 2

ความเร็ว (km/h)	แรงดันแบตเตอรี่ (V)	กระแสแบตเตอรี่ (A)
5	25.8	1.06
10	25.7	2.03
15	25.5	2.60
20	25.3	4.21
25	24.4	6.20
30	24.2	9.70
35	24.1	9.80

จากการทดสอบพบว่าจักรยานไฟฟ้าสองระบบ รุ่นที่ 2 สามารถขับเคลื่อนด้วยความเร็วสูงสุดประมาณ 35 km/h ซึ่งมีความเร็วกว่า รุ่นที่ 1 ที่มีความเร็วสูงสุดประมาณ 30 km/h นอกจากนี้การขับเคลื่อนด้วยความเร็วที่สูงขึ้นจำเป็นต้องใช้กระแสจากแบตเตอรี่สูงขึ้นด้วยส่งผลให้แรงดันของแบตเตอรี่ลดต่ำลงมากกว่าการขับเคลื่อนด้วยความเร็วต่ำ แต่สำหรับรุ่นที่ 2 การขี่ทำให้แรงดันของแบตเตอรี่ลดต่ำลงน้อยมากจึงทำให้การขับเคลื่อนของจักรยานไฟฟ้าสองระบบ รุ่นที่ 2 มีความราบรื่นมากกว่า รุ่นที่ 1

#### 4.3 การทดสอบวงจรตรวจสอบระดับแรงดัน

จากการทดลองวงจร โดยการต่อแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเข้ากับวงจร แล้วทำการปรับค่าแรงดันที่ต้องการแทนการเปลี่ยนแปลงแรงดันของแบตเตอรี่ โดยตั้งค่าต่ำสุดไว้ที่ 9 V ซึ่งได้ผลตามตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ผลการทดลองวงจรตรวจสอบระดับแรงดัน

แรงดัน (V)	LED 1	LED 2	LED 3	LED 4
12.5	ติด	ติด	ติด	ติด
11.0	ติด	ติด	ติด	ดับ
10.0	ติด	ติด	ดับ	ดับ
9.0	ติด	ดับ	ดับ	ดับ

จากผลการทดลองจะเห็นว่าเมื่อแรงดันแบตเตอรี่ลดลงเหลือ 9-10 V หลอด LED ก็จะดับจนเหลือสีแดงดวงเดียว ซึ่งเป็นการเตือนผู้ใช้งานจักรยานไฟฟ้าสองระบบให้เริ่มทำการอัดประจุแบตเตอรี่ได้แล้ว



## บทที่ 5

### สรุปผลและข้อเสนอแนะ

จากการที่ได้ศึกษา ออกแบบ ทดสอบ และทำการปรับปรุงชิ้นงานขึ้นเป็นจักรยานไฟฟ้าสองระบบ รุ่นที่ 2 โดยใช้ระยะเวลาดำเนินโครงการ 2 ภาคการศึกษาทำให้ทราบถึงปัญหาที่เกิดขึ้นในบทนี้จะเป็นการสรุปผลที่ได้จากการทดลองในโครงการ พร้อมเสนอแนะแนวทางในการนำโครงการนี้ไปพัฒนาให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นต่อไป

#### 5.1 สรุปผลการดำเนินโครงการ

1) จักรยานไฟฟ้าสองระบบ รุ่นที่ 2 ที่ทางคณะผู้จัดทำได้ออกแบบและสร้างขึ้น หลังจากทำการทดสอบแล้วพบว่าสามารถขับเคลื่อนและควบคุมความเร็วได้สูงสุดถึง 35 km/h ซึ่งดีกว่า รุ่นที่ 1 ที่มีความเร็วสูงสุดที่ 30 km/h และสามารถอัดประจุแบตเตอรี่ได้ดีกว่า รุ่นที่ 1 นอกจากนี้ยังมีการควบคุมที่ง่ายขึ้นอีกด้วย

2) จากการทดลองพบว่า การขับเคลื่อนด้วยความเร็วที่เพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นส่งผลให้ปริมาณกระแสที่แบตเตอรี่คายประจุสูงขึ้นในลักษณะคล้ายกับฟังก์ชันพาราโบลา นั่นหมายความว่า การขับเคลื่อนด้วยความเร็วที่สูงขึ้นทำให้ระยะเวลาในการใช้งานแบตเตอรี่สั้นลง อย่างไรก็ตาม ในจักรยานไฟฟ้าสองระบบ รุ่นที่ 2 ได้มีการเปลี่ยนขนาดแบตเตอรี่ให้มีความจุแบตเตอรี่มากขึ้นจึงทำให้ใช้งานได้ในระยะทางที่มากขึ้น

3) จักรยานไฟฟ้าที่วางขายตามท้องตลาดทั่วไปมีราคาอยู่ในช่วง 16,000-20,000 บาท เมื่อเทียบกับจักรยานไฟฟ้าสองระบบ รุ่นที่ 1 ที่ทางคณะผู้จัดทำได้สร้างขึ้นมีราคา 17,000 บาท และ รุ่นที่ 2 มีราคา 14,000 ซึ่งมีราคาต่ำกว่า รุ่นที่ 1 และใกล้เคียงกับจักรยานไฟฟ้าทั่วไป โดยมีข้อที่แตกต่างดังนี้

ก. จักรยานไฟฟ้าสองระบบ รุ่นที่ 1 และ รุ่นที่ 2 มีส่วนประกอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำหน้าที่สร้างกำลังไฟฟ้าเพื่ออัดประจุแบตเตอรี่ แต่จักรยานทั่วไปไม่สามารถอัดประจุแบตเตอรี่ได้ จึงต้องอัดประจุโดยใช้ไฟฟ้าภายในอาคาร

ข. จักรยานไฟฟ้าสองระบบ รุ่นที่ 1 มีแบตเตอรี่ทั้งหมดจำนวน 2 ชุด 12 V 14 Ah แต่ รุ่นที่ 2 มีแบตเตอรี่เพียงชุดเดียว 12 V 21 Ah จึงสามารถขี่ได้ระยะทางที่มากกว่า



ค. จักรยานไฟฟ้าสองระบบ รุ่นที่ 1 สามารถอัดประจุกลับคืนสู่แบตเตอรี่ได้ในขณะขับขี่แต่อัดประจุได้ปริมาณกระแสน้อยกว่า รุ่นที่ 2 ถึงแม้ รุ่นที่ 2 จะไม่สามารถอัดและคายประจุได้ในเวลาเดียวกันเพราะมีแบตเตอรี่เพียงชุดเดียวแต่มีการปรับปรุงวงจรอัดประจุแบตเตอรี่จึงทำให้ได้กระแสในการอัดประจุที่มากกว่า รุ่นที่ 1

### 5.1.1 น้ำหนักรวมของจักรยานไฟฟ้าสองระบบ

ในการเลือกใช้อุปกรณ์สำหรับประกอบชิ้นงานจักรยานไฟฟ้าสองระบบ รุ่นที่ 2 ทำให้ระบบมีน้ำหนักน้อยลง คือการลดแบตเตอรี่ให้เหลือเพียง 2 ลูก ส่งผลดีในด้านต่างๆ เช่น การขับขี่มีความคล่องตัว เมื่อระบบมีน้ำหนักน้อยลงทำให้มอเตอร์กินกระแสน้อยกว่าเมื่อเทียบกับความเร็วและระยะทางที่เท่ากัน ส่งผลให้แบตเตอรี่ขั้วมอเตอร์ได้นานกว่าเดิม

### 5.1.2 การควบคุมการเปลี่ยนโหมดการทำงาน

การเปลี่ยน โหมดการควบคุมผู้เขียน โครงการงาน ได้ลดสวิทซ์ให้เหลือน้อยลง ช่วยให้การเปลี่ยนโหมดง่ายและไม่สับสน

### 5.1.3 ชนิดของแบตเตอรี่

ในโครงการรถจักรยานไฟฟ้าสองระบบ รุ่นที่ 1 เลือกใช้แบตเตอรี่แบบตะกั่วชนิดเปียก ซึ่งก็จะมีข้อเสียหลักๆคือน้ำหนักมาก ถือเป็นภาระเพิ่มโหลดให้กับระบบ ผู้เขียนโครงการในจักรยานไฟฟ้าสองระบบรุ่นที่ 2 ได้เปลี่ยนมาใช้แบตเตอรี่ชนิดตะกั่วแบบแห้ง ซึ่งมีน้ำหนักพอกันแต่ความจุแบตเตอรี่มากกว่าและลดเหลือแค่ 2 ลูก ซึ่งช่วยลดน้ำหนักของจักรยานไฟฟ้าสองระบบได้

## 5.2 ปัญหาและแนวทางแก้ไข

- 1) แบตเตอรี่ในโครงการนี้มีขนาดความจุ 21 Ah ซึ่งต้องใช้เวลานานในการอัดประจุ ดังนั้นในการเลือกแบตเตอรี่ควรเลือกให้มีขนาดที่เหมาะสม
- 2) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าถึงแม้มีการทดรอบให้ได้แรงดันสูงขึ้นแต่ก็ยังให้กระแสน้อยดังนั้นควรเลือกพิกัดกำลังไฟฟ้าให้สูงขึ้น

### 5.3 แนวทางการพัฒนาต่อไป

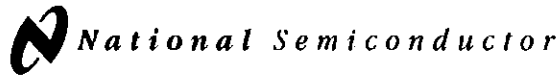
จากการพัฒนาจักรยานไฟฟ้าสองระบบรุ่น 1 ซึ่งมีการแก้ไขปัญหาเรื่องน้ำหนักจึงลดแบตเตอรี่เหลือเพียง 2 ลูกทำให้การอัดประจุแบตเตอรี่จักรยานไฟฟ้าสองระบบ รุ่นที่ 2 ไม่สามารถอัดประจุพร้อมกับการขับมอเตอร์ได้ เพื่อที่จะให้ได้มาซึ่งจักรยานไฟฟ้าสองระบบที่มีความสมบูรณ์มากกว่านี้ทางผู้ดำเนินโครงการได้สังเกตเห็นปัญหาดังกล่าวที่สมควรจะได้รับการพัฒนาต่อไป คือการขับจักรยานด้วยแบตเตอรี่ 1 ลูก แล้วอีก 1 ลูกใช้อัดประจุในเวลาเดียวกัน



## เอกสารอ้างอิง

- [1] Energy Information Administration “Annual Energy Outlook 2001”, Washington, December 2000.
- [2] Energy Information Administration “International Energy Outlook 2001”, Washington, March 2001.
- [3] International Energy Agency “World Energy Outlook 2000”, Paris, 2001.
- [4] ไชชาญ หินเกิด “เครื่องกลไฟฟ้า 1”, บริษัทประชาชน, กรุงเทพฯ, 2537.
- [5] <http://electrical.technicchan.ac.th>, สืบค้นเมื่อ มีนาคม 2554
- [6] นายนทวรรณ กั้นไชยตะ นายแสงเพชร นาคจีนและนายเจษฎากร ไชยมงคล “การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน”, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า, มหาวิทยาลัยนเรศวร, 2548.
- [7] นายวรากร สเกาคำและนายวัชรพล เกษามูล “จักรยานไฟฟ้าสองระบบ”, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า, มหาวิทยาลัยนเรศวร, 2552.
- [8] G. Hille, W. Roth, and H. Schmidt, “Course book for the seminar - Photovoltaic Systems”, Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, Freiburg, Germany, 1995.
- [9] กรมสรรพสามิต, “แบตเตอรี่”, สามิตสาร ปีที่ 5 ฉบับที่ 5, กรมสรรพสามิต, กรุงเทพฯ, 2542
- [10] วีระเชษฐ์ ชันเงิน และวุฒิพล ธาราธิ์เศรษฐ์ “อิเล็กทรอนิกส์กำลัง: Power Electronics”, หนังสือนักศึกษากิต ว.เจ. พรินตัง, 2550.
- [11] <http://www.wt.co.th>, สืบค้นเมื่อ ธันวาคม 2553
- [12] <http://www.nattakit.com>, สืบค้นเมื่อ มกราคม 2554





April 1995

## LM1577/LM2577 Series SIMPLE SWITCHER® Step-Up Voltage Regulator

### General Description

The LM1577/LM2577 are monolithic integrated circuits that provide all of the power and control functions for step-up (boost), flyback, and forward converter switching regulators. The device is available in three different output voltage versions: 12V, 15V, and adjustable.

Requiring a minimum number of external components, these regulators are cost effective, and simple to use. Listed in this data sheet are a family of standard inductors and flyback transformers designed to work with these switching regulators.

Included on the chip is a 3.0A NPN switch and its associated protection circuitry, consisting of current and thermal limiting, and undervoltage lockout. Other features include a 52 kHz fixed-frequency oscillator that requires no external components, a soft start mode to reduce in-rush current during start-up, and current mode control for improved rejection of input voltage and output load transients.

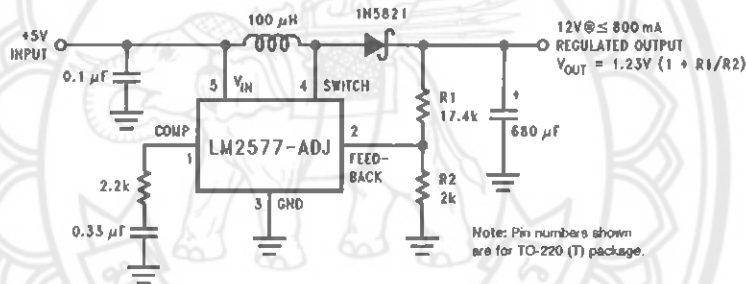
### Features

- Requires few external components
- NPN output switches 3.0A, can stand off 65V
- Wide input voltage range: 3.5V to 40V
- Current-mode operation for improved transient response, line regulation, and current limit
- 52 kHz internal oscillator
- Soft-start function reduces in-rush current during start-up
- Output switch protected by current limit, under-voltage lockout, and thermal shutdown

### Typical Applications

- Simple boost regulator
- Flyback and forward regulators
- Multiple-output regulator

### Typical Application



TL/H/11468-1

### Ordering Information

Temperature Range	Package Type	Output Voltage			NSC Package Drawing	Package
		12V	15V	ADJ		
-40°C ≤ T <sub>A</sub> ≤ +125°C	24-Pin Surface Mount	LM2577M-12	LM2577M-15	LM2577M-ADJ	M24B	SO
	16-Pin Molded DIP	LM2577N-12	LM2577N-15	LM2577N-ADJ	N16A	N
	5-Lead Surface Mount	LM2577S-12	LM2577S-15	LM2577S-ADJ	T55B	TO-263
	5-Straight Leads	LM2577T-12	LM2577T-15	LM2577T-ADJ	T05A	TO-220
	5-Bent Staggered Leads	LM2577T-12	LM2577T-15	LM2577T-ADJ	T05D	TO-220
-55°C ≤ T <sub>A</sub> ≤ +150°C	4-Pin TO-3	Flow LB03	Flow LB03	Flow LB03	K04A	TO-3
		LM1577K-12/883	LM1577K-15/883	LM1577K-ADJ/883		

SIMPLE SWITCHER® is a registered trademark of National Semiconductor Corporation

**Absolute Maximum Ratings** (Note 1)

If Military/Aerospace specified devices are required, please contact the National Semiconductor Sales Office/Distributors for availability and specifications.

Supply Voltage	45V
Output Switch Voltage	65V
Output Switch Current (Note 2)	6.0A
Power Dissipation	Internally Limited
Storage Temperature Range	-65°C to +150°C
Lead Temperature (Soldering, 10 sec.)	260°C
Maximum Junction Temperature	150°C
Minimum ESD Rating (C = 100 pF, R = 1.5 k $\Omega$ )	2 kV

**Operating Ratings**

Supply Voltage	$3.5V \leq V_{IN} \leq 40V$
Output Switch Voltage	$0V \leq V_{SWITCH} \leq 60V$
Output Switch Current	$I_{SWITCH} \leq 3.0A$
Junction Temperature Range	
LM1577	$-55^{\circ}C \leq T_J \leq +150^{\circ}C$
LM2577	$-40^{\circ}C \leq T_J \leq +125^{\circ}C$

**Electrical Characteristics—LM1577-12, LM2577-12**

Specifications with standard type face are for  $T_J = 25^{\circ}C$ , and those in bold type face apply over full Operating Temperature Range. Unless otherwise specified,  $V_{IN} = 5V$ , and  $I_{SWITCH} = 0$ .

Symbol	Parameter	Conditions	Typical	LM1577-12 Limit (Notes 3, 4)	LM2577-12 Limit (Note 5)	Units (Limits)
<b>SYSTEM PARAMETERS</b> Circuit of Figure 1 (Note 6)						
$V_{OUT}$	Output Voltage	$V_{IN} = 5V$ to 10V $I_{LOAD} = 100$ mA to 800 mA (Note 3)	12.0	11.60/11.40 12.40/12.60	11.60/11.40 12.40/12.60	V V(min) V(max)
$\frac{\Delta V_{OUT}}{\Delta V_{IN}}$	Line Regulation	$V_{IN} = 3.5V$ to 10V $I_{LOAD} = 300$ mA	20	50/100	50/100	mV mV(max)
$\frac{\Delta V_{OUT}}{\Delta I_{LOAD}}$	Load Regulation	$V_{IN} = 5V$ $I_{LOAD} = 100$ mA to 800 mA	20	50/100	50/100	mV mV(max)
$\eta$	Efficiency	$V_{IN} = 5V$ , $I_{LOAD} = 800$ mA	80			%
<b>DEVICE PARAMETERS</b>						
$I_S$	Input Supply Current	$V_{FEEDBACK} = 14V$ (Switch Off)	7.5	10.0/14.0	10.0/14.0	mA mA(max)
		$I_{SWITCH} = 2.0A$ $V_{COMP} = 2.0V$ (Max Duty Cycle)	25	50/85	50/85	mA mA(max)
$V_{UV}$	Input Supply Undervoltage Lockout	$I_{SWITCH} = 100$ mA	2.90	2.70/2.65 3.10/3.15	2.70/2.65 3.10/3.15	V V(min) V(max)
$f_O$	Oscillator Frequency	Measured at Switch Pin $I_{SWITCH} = 100$ mA	52	48/42 56/62	48/42 56/62	kHz kHz(min) kHz(max)
$V_{REF}$	Output Reference Voltage	Measured at Feedback Pin $V_{IN} = 3.5V$ to 40V $V_{COMP} = 1.0V$	12	11.76/11.64 12.24/12.36	11.76/11.64 12.24/12.36	V V(min) V(max)
$\frac{\Delta V_{REF}}{\Delta V_{IN}}$	Output Reference Voltage Line Regulator	$V_{IN} = 3.5V$ to 40V	7			mV
$R_{FB}$	Feedback Pin Input Resistance		9.7			k $\Omega$
$G_M$	Error Amp Transconductance	$I_{COMP} = -30$ $\mu A$ to +30 $\mu A$ $V_{COMP} = 1.0V$	370	225/145 515/615	225/145 515/615	$\mu mho$ $\mu mho$ (min) $\mu mho$ (max)
$A_{VOL}$	Error Amp Voltage Gain	$V_{COMP} = 1.1V$ to 1.9V $R_{COMP} = 1.0$ M $\Omega$ (Note 7)	80	50/25	50/25	V/V V/V(min)

### Electrical Characteristics—LM1577-ADJ, LM2577-ADJ

Specifications with standard type face are for  $T_J = 25^\circ\text{C}$ , and those in bold type face apply over full Operating Temperature Range. Unless otherwise specified,  $V_{IN} = 5\text{V}$ ,  $V_{FEEDBACK} = V_{REF}$ , and  $I_{SWITCH} = 0$ .

Symbol	Parameter	Conditions	Typical	LM1577-ADJ Limit (Notes 3, 4)	LM2577-ADJ Limit (Note 5)	Units (Limits)
<b>SYSTEM PARAMETERS</b> Circuit of <i>Figure 3</i> (Note 6)						
$V_{OUT}$	Output Voltage	$V_{IN} = 5\text{V to }10\text{V}$ $I_{LOAD} = 100\text{ mA to }800\text{ mA}$ (Note 3)	12.0	11.60/ <b>11.40</b> 12.40/ <b>12.60</b>	11.60/ <b>11.40</b> 12.40/ <b>12.60</b>	V V(min) V(max)
$\frac{\Delta V_{OUT}}{\Delta V_{IN}}$	Line Regulation	$V_{IN} = 3.5\text{V to }10\text{V}$ $I_{LOAD} = 300\text{ mA}$	20	<b>50/100</b>	<b>50/100</b>	mV mV(max)
$\frac{\Delta V_{OUT}}{\Delta I_{LOAD}}$	Load Regulation	$V_{IN} = 5\text{V}$ $I_{LOAD} = 100\text{ mA to }800\text{ mA}$	20	<b>50/100</b>	<b>50/100</b>	mV mV(max)
$\eta$	Efficiency	$V_{IN} = 5\text{V}$ , $I_{LOAD} = 800\text{ mA}$	80			%
<b>DEVICE PARAMETERS</b>						
$I_S$	Input Supply Current	$V_{FEEDBACK} = 1.5\text{V}$ (Switch Off)	7.5	10.0/ <b>14.0</b>	10.0/ <b>14.0</b>	mA mA(max)
		$I_{SWITCH} = 2.0\text{A}$ $V_{COMP} = 2.0\text{V}$ (Max Duty Cycle)	25	<b>50/85</b>	<b>50/85</b>	mA mA(max)
$V_{UV}$	Input Supply Undervoltage Lockout	$I_{SWITCH} = 100\text{ mA}$	2.90	2.70/ <b>2.65</b> 3.10/ <b>3.15</b>	2.70/ <b>2.65</b> 3.10/ <b>3.15</b>	V V(min) V(max)
$f_O$	Oscillator Frequency	Measured at Switch Pin $I_{SWITCH} = 100\text{ mA}$	52	48/ <b>42</b> 56/ <b>62</b>	48/ <b>42</b> 56/ <b>62</b>	kHz kHz(min) kHz(max)
$V_{REF}$	Reference Voltage	Measured at Feedback Pin $V_{IN} = 3.5\text{V to }40\text{V}$ $V_{COMP} = 1.0\text{V}$	1.230	1.214/ <b>1.206</b> 1.246/ <b>1.254</b>	1.214/ <b>1.206</b> 1.246/ <b>1.254</b>	V V(min) V(max)
$\frac{\Delta V_{REF}}{\Delta V_{IN}}$	Reference Voltage Line Regulation	$V_{IN} = 3.5\text{V to }40\text{V}$	0.5			mV
$I_B$	Error Amp Input Bias Current	$V_{COMP} = 1.0\text{V}$	100	300/ <b>800</b>	300/ <b>800</b>	nA nA(max)
$G_M$	Error Amp Transconductance	$I_{COMP} = -30\text{ }\mu\text{A to }+30\text{ }\mu\text{A}$ $V_{COMP} = 1.0\text{V}$	3700	2400/ <b>1600</b> 4800/ <b>5600</b>	2400/ <b>1600</b> 4800/ <b>5600</b>	$\mu\text{mho}$ $\mu\text{mho}$ (min) $\mu\text{mho}$ (max)
$A_{VOL}$	Error Amp Voltage Gain	$V_{COMP} = 1.1\text{V to }1.9\text{V}$ $R_{COMP} = 1.0\text{ M}\Omega$ (Note 7)	800	500/ <b>250</b>	500/ <b>250</b>	V/V V/V(min)
	Error Amplifier Output Swing	Upper Limit $V_{FEEDBACK} = 1.0\text{V}$	2.4	2.2/ <b>2.0</b>	2.2/ <b>2.0</b>	V V(min)
		Lower Limit $V_{FEEDBACK} = 1.5\text{V}$	0.3	0.40/ <b>0.55</b>	0.40/ <b>0.55</b>	V V(max)

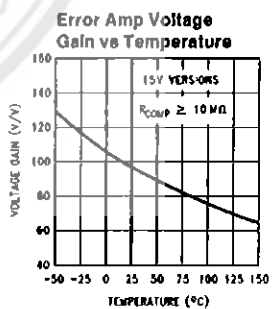
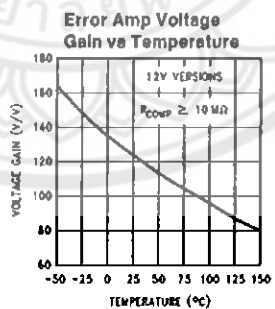
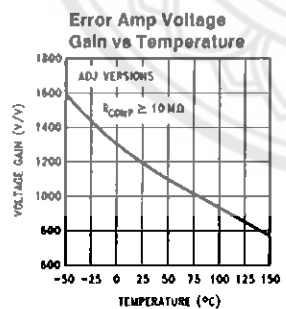
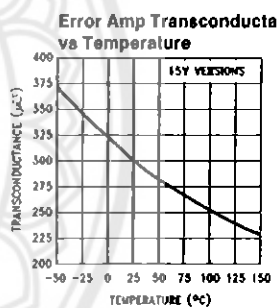
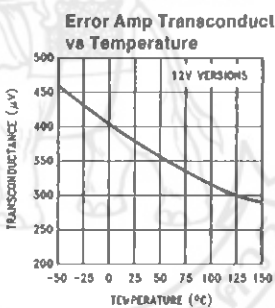
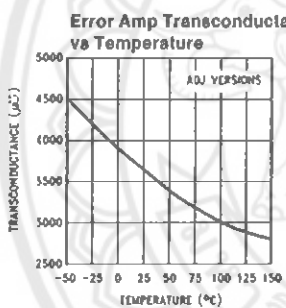
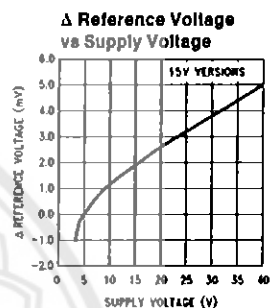
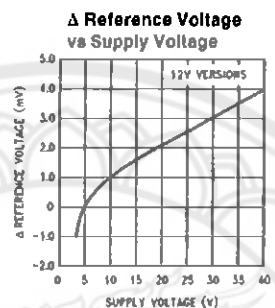
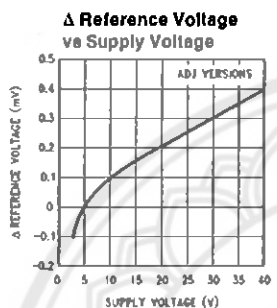
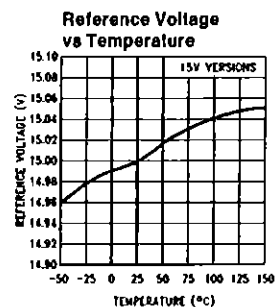
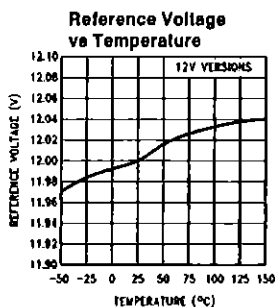
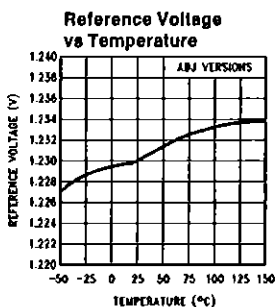
### Electrical Characteristics—LM1577-ADJ, LM2577-ADJ (Continued)

Specifications with standard type face are for  $T_J = 25^\circ\text{C}$ , and those in bold type face apply over full Operating Temperature Range. Unless otherwise specified,  $V_{IN} = 5\text{V}$ ,  $V_{FEEDBACK} = V_{REF}$ , and  $I_{SWITCH} = 0$ .

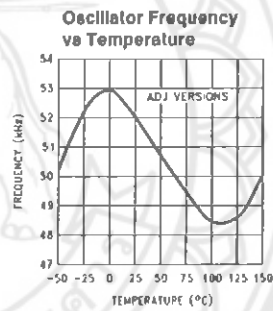
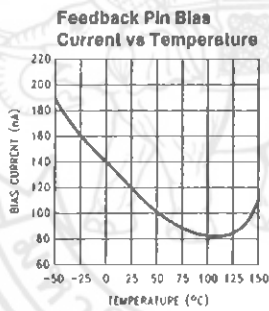
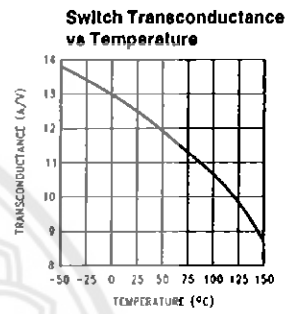
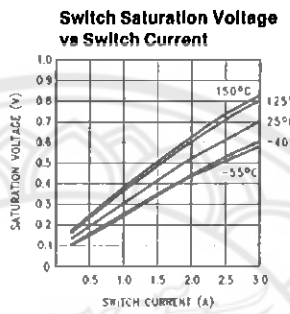
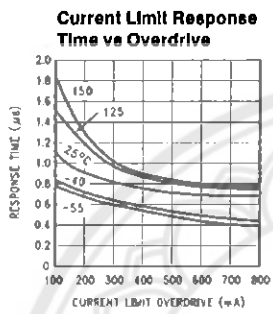
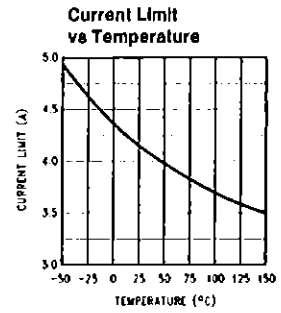
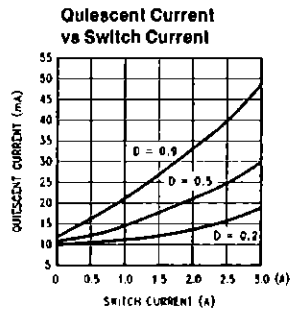
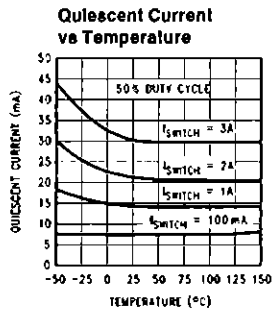
Symbol	Parameter	Conditions	Typical	LM1577-ADJ Limit (Notes 3, 4)	LM2577-ADJ Limit (Note 5)	Units (Limits)
<b>DEVICE PARAMETERS (Continued)</b>						
	Error Amp Output Current	$V_{FEEDBACK} = 1.0\text{V to }1.5\text{V}$ $V_{COMP} = 1.0\text{V}$	$\pm 200$	$\pm 130/\pm 90$ $\pm 300/\pm 400$	$\pm 130/\pm 90$ $\pm 300/\pm 400$	$\mu\text{A}$ $\mu\text{A}(\text{min})$ $\mu\text{A}(\text{max})$
$I_{SS}$	Soft Start Current	$V_{FEEDBACK} = 1.0\text{V}$ $V_{COMP} = 0\text{V}$	5.0	2.5/1.5 7.5/9.5	2.5/1.5 7.5/9.5	$\mu\text{A}$ $\mu\text{A}(\text{min})$ $\mu\text{A}(\text{max})$
D	Maximum Duty Cycle	$V_{COMP} = 1.5\text{V}$ $I_{SWITCH} = 100\text{ mA}$	95	93/90	93/90	% %(min)
$\Delta I_{SWITCH}/\Delta V_{COMP}$	Switch Transconductance		12.5			A/V
$I_L$	Switch Leakage Current	$V_{SWITCH} = 65\text{V}$ $V_{FEEDBACK} = 1.5\text{V (Switch Off)}$	10	300/600	300/600	$\mu\text{A}$ $\mu\text{A}(\text{max})$
$V_{SAT}$	Switch Saturation Voltage	$I_{SWITCH} = 2.0\text{A}$ $V_{COMP} = 2.0\text{V (Max Duty Cycle)}$	0.5	0.7/0.9	0.7/0.9	V V(max)
	NPN Switch Current Limit	$V_{COMP} = 2.0\text{V}$	4.3	3.7/3.0 5.3/6.0	3.7/3.0 5.3/6.0	A A(min) A(max)
<b>THERMAL PARAMETERS (All Versions)</b>						
$\theta_{JA}$	Thermal Resistance	K Package, Junction to Ambient	35			°C/W
$\theta_{JC}$		K Package, Junction to Case	1.5			
$\theta_{JA}$		T Package, Junction to Ambient	65			
$\theta_{JC}$		T Package, Junction to Case	2			
$\theta_{JA}$		N Package, Junction to Ambient (Note 8)	85			
$\theta_{JA}$		M Package, Junction to Ambient (Note 8)	100			
$\theta_{JA}$	S Package, Junction to Ambient (Note 9)	37				
<p>Note 1: Absolute Maximum Ratings indicate limits beyond which damage to the device may occur. Operating ratings indicate conditions the device is intended to be functional, but device parameter specifications may not be guaranteed under these conditions. For guaranteed specifications and test conditions, see the Electrical Characteristics.</p> <p>Note 2: Due to timing considerations of the LM1577/LM2577 current limit circuit, output current cannot be internally limited when the LM1577/LM2577 is used as a step-up regulator. To prevent damage to the switch, its current must be externally limited to 6.0A. However, output current is internally limited when the LM1577/LM2577 is used as a flyback or forward converter regulator in accordance to the Application Hints.</p> <p>Note 3: All limits guaranteed at room temperature (standard type face) and at temperature extremes (boldface type). All limits are used to calculate Outgoing Quality Level, and are 100% production tested.</p> <p>Note 4: A military RETS electrical test specification is available on request. At the time of printing, the LM1577K-12/883, LM1577K-15/883, and LM1577K-ADJ/883 RETS specifications complied fully with the boldface limits in these columns. The LM1577K-12/883, LM1577K-15/883, and LM1577K-ADJ/883 may also be procured to Standard Military Drawing specifications.</p> <p>Note 5: All limits guaranteed at room temperature (standard type face) and at temperature extremes (boldface type). All room temperature limits are 100% production tested. All limits at temperature extremes are guaranteed via correlation using standard Statistical Quality Control (SQC) methods.</p> <p>Note 6: External components such as the diode, inductor, input and output capacitors can affect switching regulator performance. When the LM1577/LM2577 is used as shown in the Test Circuit, system performance will be as specified by the system parameters.</p> <p>Note 7: A 1.0 M<math>\Omega</math> resistor is connected to the compensation pin (which is the error amplifier's output) to ensure accuracy in measuring <math>A_{VOL}</math>. In actual applications, this pin's load resistance should be <math>\geq 10\text{ M}\Omega</math>, resulting in <math>A_{VOL}</math> that is typically twice the guaranteed minimum limit.</p> <p>Note 8: Junction to ambient thermal resistance with approximately 1 square inch of pc board copper surrounding the leads. Additional copper area will lower thermal resistance further. See thermal model in "Switchers Made Simple" software.</p> <p>Note 9: If the TO-263 package is used, the thermal resistance can be reduced by increasing the PC board copper area thermally connected to the package. Using 0.5 square inches of copper area, <math>\theta_{JA}</math> is 50°C/W; with 1 square inch of copper area, <math>\theta_{JA}</math> is 37°C/W; and with 1.8 or more square inches of copper area, <math>\theta_{JA}</math> is 32°C/W.</p>						



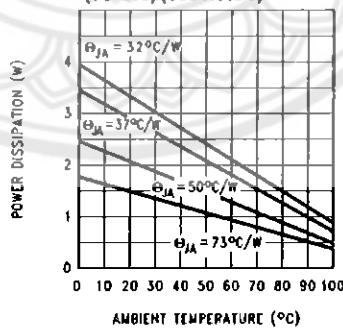
### Typical Performance Characteristics



Typical Performance Characteristics (Continued)



Maximum Power Dissipation (TO-263) (See Note 9)

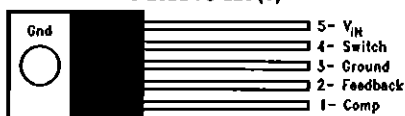


TL/H/11468-3

TL/H/11468-31

### Connection Diagrams

**Straight Leads  
5-Lead TO-220 (T)**

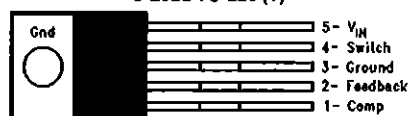


TL/H/11468-4

Top View

Order Number LM2577T-12, LM2577T-15,  
or LM2577T-ADJ  
See NS Package Number T05A

**Bent, Staggered Leads  
5-Lead TO-220 (T)**

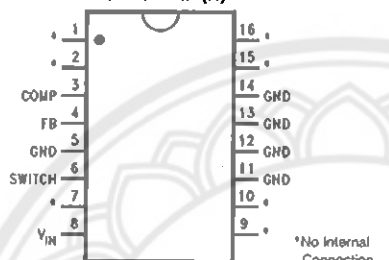


TL/H/11468-5

Top View

Order Number LM2577T-12 Flow LB03, LM2577T-15  
Flow LB03, or LM2577T-ADJ Flow LB03  
See NS Package Number T05D

**18-Lead DIP (N)**

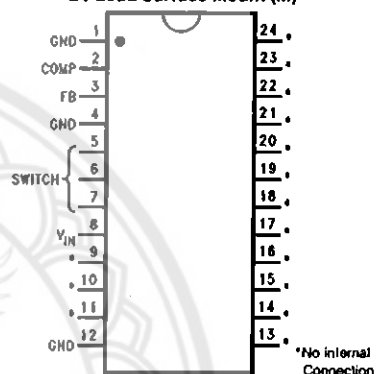


\*No Internal  
Connection  
TL/H/11468-8

Top View

Order Number LM2577N-12, LM2577N-15,  
or LM2577N-ADJ  
See NS Package Number N16A

**24-Lead Surface Mount (M)**



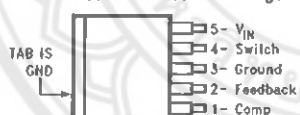
\*No Internal  
Connection  
TL/H/11468-7

Top View

Order Number LM2577M-12, LM2577M-15,  
or LM2577M-ADJ  
See NS Package Number M24B

**TO-263 (S)**

**6-Lead Surface-Mount Package**



TL/H/11468-32

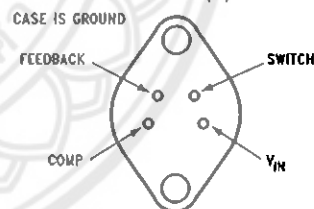
Top View



Side View

Order Number LM2577S-12, LM2577S-15,  
or LM2577S-ADJ  
See NS Package Number TS5B

**4-Lead TO-3 (K)**



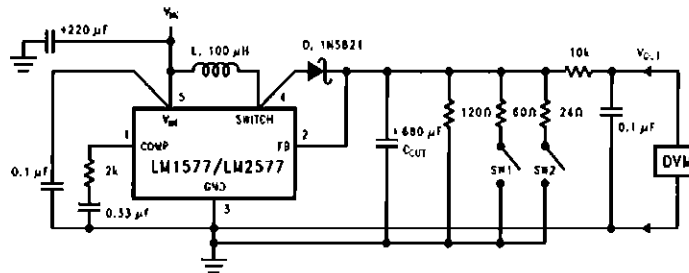
TL/H/11468-6

Bottom View

Order Number LM1577K-12/883, LM1577K-15/883, or  
LM1577K-ADJ/883  
See NS Package Number K04A

**Test Circuits**

**LM1577-12, LM2577-12**



L = 415-0930 (AIE)  
D = any manufacturer

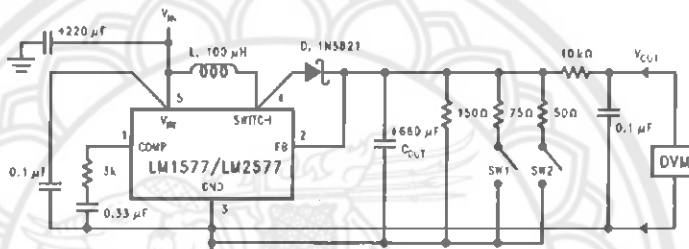
C<sub>OUT</sub> = Sprague Type 673D  
Electrolytic 680 μF, 20V

Note: Pin numbers shown  
are for TO-220 (T) package

TL/H/11468-30

FIGURE 1. Circuit Used to Specify System Parameters for 12V Versions

**LM1577-15, LM2577-15**



L = 415-0930 (AIE)  
D = any manufacturer

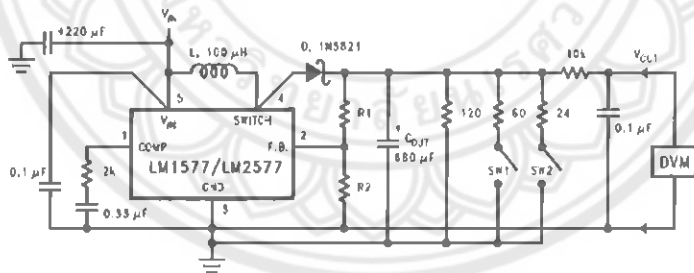
C<sub>OUT</sub> = Sprague Type 673D  
Electrolytic 680 μF, 20V

Note: Pin numbers shown  
are for TO-220 (T) package

TL/H/11468-28

FIGURE 2. Circuit Used to Specify System Parameters for 15V Versions

**LM1577-ADJ, LM2577-ADJ**



L = 415-0930 (AIE)  
D = any manufacturer

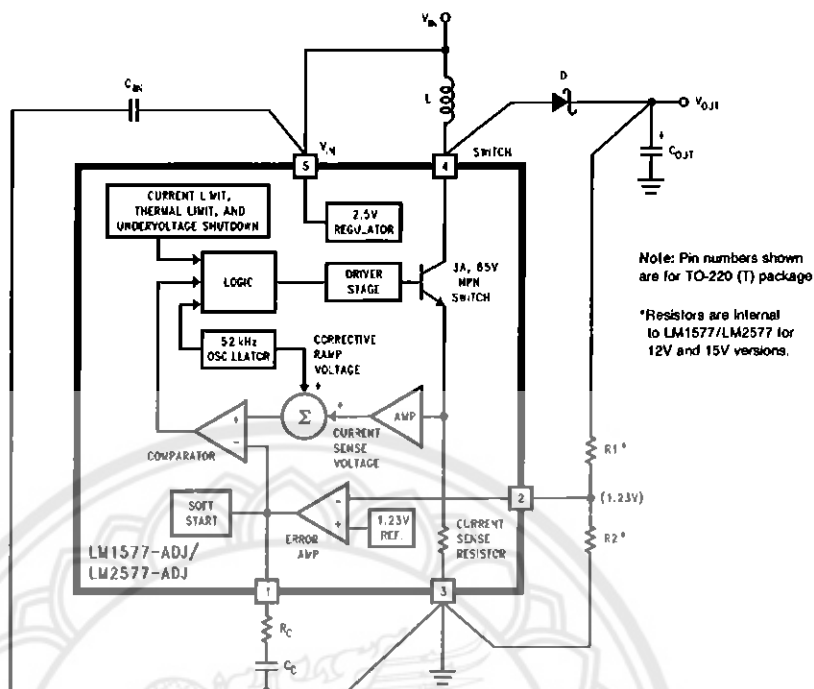
C<sub>OUT</sub> = Sprague Type 673D  
Electrolytic 680 μF, 20V

R1 = 48.7k in series with 511Ω (1%)  
R2 = 5.62k (1%)

TL/H/11468-9

FIGURE 3. Circuit Used to Specify System Parameters for ADJ Versions

### Application Hints



TL/H/11468-10

FIGURE 4. LM1577/LM2577 Block Diagram and Boost Regulator Application

#### STEP-UP (BOOST) REGULATOR

Figure 4 shows the LM1577-ADJ/LM2577-ADJ used as a Step-Up Regulator. This is a switching regulator used for producing an output voltage greater than the input supply voltage. The LM1577-12/LM2577-12 and LM1577-15/LM2577-15 can also be used for step-up regulators with 12V or 15V outputs (respectively), by tying the feedback pin directly to the regulator output.

A basic explanation of how it works is as follows. The LM1577/LM2577 turns its output switch on and off at a frequency of 52 kHz, and this creates energy in the inductor (L). When the NPN switch turns on, the inductor current charges up at a rate of  $V_{IN}/L$ , storing current in the inductor.

When the switch turns off, the lower end of the inductor flies above  $V_{IN}$ , discharging its current through diode (D) into the output capacitor (C<sub>OUT</sub>) at a rate of  $(V_{OUT} - V_{IN})/L$ . Thus, energy stored in the inductor during the switch on time is transferred to the output during the switch off time. The output voltage is controlled by the amount of energy transferred which, in turn, is controlled by modulating the peak inductor current. This is done by feeding back a portion of the output voltage to the error amp, which amplifies the difference between the feedback voltage and a 1.230V reference. The error amp output voltage is compared to a voltage proportional to the switch current (i.e., inductor current during the switch on time).

### Application Hints (Continued)

The comparator terminates the switch on time when the two voltages are equal, thereby controlling the peak switch current to maintain a constant output voltage.

Voltage and current waveforms for this circuit are shown in Figure 5, and formulas for calculating them are given in Figure 6.

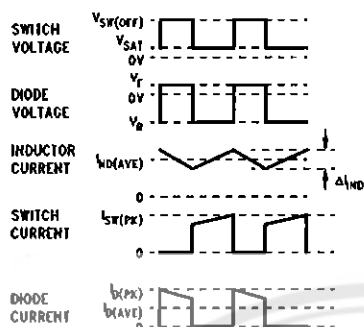


FIGURE 5. Step-Up Regulator Waveforms

Duty Cycle	D	$\frac{V_{OUT} + V_F - V_{IN}}{V_{OUT} + V_F - V_{SAT}} \approx \frac{V_{OUT} - V_{IN}}{V_{OUT}}$
Average Inductor Current	$I_{IND(AVE)}$	$\frac{I_{LOAD}}{1 - D}$
Inductor Current Ripple	$\Delta I_{IND}$	$\frac{V_{IN} - V_{SAT}}{L} \frac{D}{52,000}$
Peak Inductor Current	$I_{IND(PK)}$	$\frac{I_{LOAD(max)}}{1 - D_{(max)}} + \frac{\Delta I_{IND}}{2}$
Peak Switch Current	$I_{SW(PK)}$	$\frac{I_{LOAD(max)}}{1 - D_{(max)}} + \frac{\Delta I_{IND}}{2}$
Switch Voltage When Off	$V_{SW(OFF)}$	$V_{OUT} + V_F$
Diode Reverse Voltage	$V_R$	$V_{OUT} - V_{SAT}$
Average Diode Current	$I_{D(AVE)}$	$I_{LOAD}$
Peak Diode Current	$I_{D(PK)}$	$\frac{I_{LOAD}}{1 - D_{(max)}} + \frac{\Delta I_{IND}}{2}$
Power Dissipation of LM1577/2577	$P_D$	$0.25\Omega \left( \frac{I_{LOAD}}{1 - D} \right)^2 D + \frac{I_{LOAD} D V_{IN}}{50(1 - D)}$

$V_F$  = Forward Biased Diode Voltage

$I_{LOAD}$  = Output Load Current

FIGURE 6. Step-Up Regulator Formulas

#### STEP-UP REGULATOR DESIGN PROCEDURE

The following design procedure can be used to select the appropriate external components for the circuit in Figure 4, based on these system requirements.

Given:

$V_{IN(min)}$  = Minimum input supply voltage

$V_{OUT}$  = Regulated output voltage

$I_{LOAD(max)}$  = Maximum output load current

Before proceeding any further, determine if the LM1577/LM2577 can provide these values of  $V_{OUT}$  and  $I_{LOAD(max)}$  when operating with the minimum value of  $V_{IN}$ . The upper limits for  $V_{OUT}$  and  $I_{LOAD(max)}$  are given by the following equations.

$$V_{OUT} \leq 60V$$

$$\text{and } V_{OUT} \leq 10 \times \frac{V_{IN(min)}}{V_{OUT}}$$

$$I_{LOAD(max)} \leq \frac{2.1A \times V_{IN(min)}}{V_{OUT}}$$

These limits must be greater than or equal to the values specified in this application.

#### 1. Inductor Selection (L)

##### A. Voltage Options:

##### 1. For 12V or 15V output

From Figure 7a (for 12V output) or Figure 7b (for 15V output), identify inductor code for region indicated by  $V_{IN(min)}$  and  $I_{LOAD(max)}$ . The shaded region indicates conditions for which the LM1577/LM2577 output switch would be operating beyond its switch current rating. The minimum operating voltage for the LM1577/LM2577 is 3.5V.

From here, proceed to step C.

##### 2. For Adjustable version

##### Preliminary calculations:

The inductor selection is based on the calculation of the following three parameters:

$D_{(max)}$ , the maximum switch duty cycle ( $0 \leq D \leq 0.9$ ):

$$D_{(max)} = \frac{V_{OUT} + V_F - V_{IN(min)}}{V_{OUT} + V_F - 0.6V}$$

where  $V_F = 0.5V$  for Schottky diodes and  $0.8V$  for fast recovery diodes (typically);

$E \cdot T$ , the product of volts  $\times$  time that charges the inductor:

$$E \cdot T = \frac{D_{(max)} (V_{IN(min)} - 0.6V) 10^8}{52,000 \text{ Hz}} \quad (V \cdot \mu s)$$

$I_{IND,DC}$ , the average inductor current under full load;

$$I_{IND,DC} = \frac{1.05 \times I_{LOAD(max)}}{1 - D_{(max)}}$$

##### B. Identify Inductor Value:

1. From Figure 7c, identify the inductor code for the region indicated by the intersection of  $E \cdot T$  and  $I_{IND,DC}$ . This code gives the inductor value in microhenries. The L or H prefix signifies whether the inductor is rated for a maximum  $E \cdot T$  of  $90 V \cdot \mu s$  (L) or  $250 V \cdot \mu s$  (H).

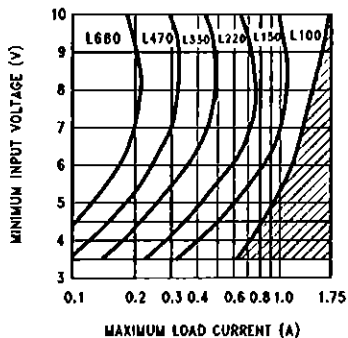
2. If  $D < 0.85$ , go on to step C. If  $D \geq 0.85$ , then calculate the minimum inductance needed to ensure the switching regulator's stability:

$$L_{MIN} = \frac{6.4 (V_{IN(min)} - 0.6V) (2D_{(max)} - 1)}{1 - D_{(max)}} \quad (\mu H)$$

If  $L_{MIN}$  is smaller than the inductor value found in step B1, go on to step C. Otherwise, the inductor value found in step B1 is too low; an appropriate inductor code should be obtained from the graph as follows:

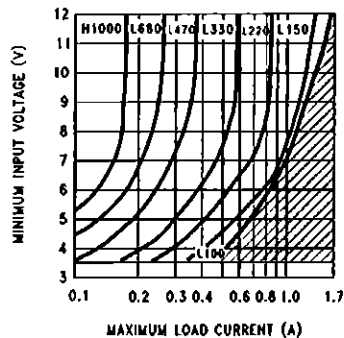
1. Find the lowest value inductor that is greater than  $L_{MIN}$ .
2. Find where  $E \cdot T$  intersects this inductor value to determine if it has an L or H prefix. If  $E \cdot T$  intersects both the L and H regions, select the inductor with an H prefix.

**Application Hints (Continued)**



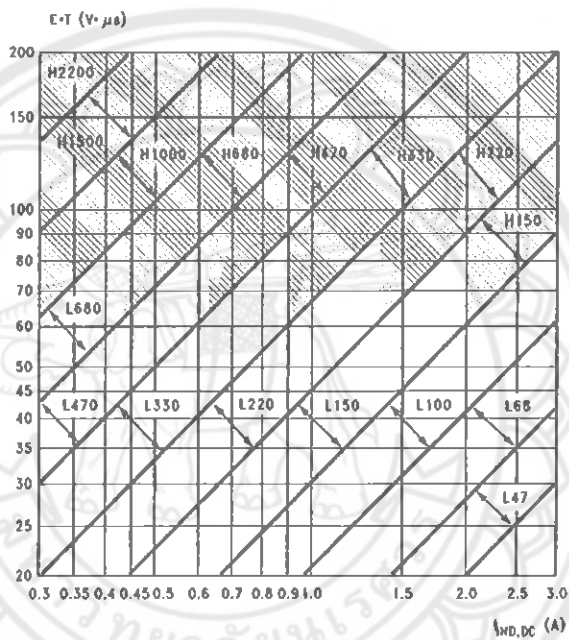
TL/H/11468-27

FIGURE 7a. LM2577-12 Inductor Selection Guide



TL/H/11468-28

FIGURE 7b. LM2577-15 Inductor Selection Guide



TL/H/11468-12

FIGURE 7c. LM1577-ADJ/LM2577-ADJ Inductor Selection Graph

**Note:**

These charts assume that the inductor ripple current is approximately 20% to 30% of the average inductor current (when the regulator is under full load). Greater ripple current causes higher peak switch currents and greater output ripple voltage; lower ripple current is achieved with larger-value inductors. The factor of 20 to 30% is chosen as a convenient balance between the two extremes.

### Application Hints (Continued)

C. Select an inductor from the table of Figure 8 which cross-references the inductor codes to the part numbers of three different manufacturers. Complete specifications for these inductors are available from the respective manufacturers. The inductors listed in this table have the following characteristics:

**AIE:** ferrite, pot-core inductors; Benefits of this type are low electro-magnetic interference (EMI), small physical size, and very low power dissipation (core loss). Be careful not to operate these inductors too far beyond their maximum ratings for E•T and peak current, as this will saturate the core.

**Pulse:** powdered iron, toroid core inductors; Benefits are low EMI and ability to withstand E•T and peak current above rated value better than ferrite cores.

**Renco:** ferrite, bobbin-core inductors; Benefits are low cost and best ability to withstand E•T and peak current above rated value. Be aware that these inductors generate more EMI than the other types, and this may interfere with signals sensitive to noise.

Inductor Code	Manufacturer's Part Number		
	Schott	Pulse	Renco
L47	67126980	PE - 53112	RL2442
L68	67126990	PE - 92114	RL2443
L100	67127000	PE - 92108	RL2444
L150	67127010	PE - 53113	RL1954
L220	67127020	PE - 52626	RL1953
L330	67127030	PE - 52627	RL1952
L470	67127040	PE - 53114	RL1951
L680	67127050	PE - 52629	RL1950
H150	67127060	PE - 53115	RL2445
H220	67127070	PE - 53116	RL2446
H330	67127080	PE - 53117	RL2447
H470	67127090	PE - 53118	RL1961
H680	67127100	PE - 53119	RL1960
H1000	67127110	PE - 53120	RL1959
H1500	67127120	PE - 53121	RL1958
H2200	67127130	PE - 53122	RL2448

Schott Corp., (612) 475-1173  
1000 Parkers Lake Rd., Wayzata, MN 55391  
Pulse Engineering, (619) 268-2400  
P.O. Box 12235, San Diego, CA 92112  
Renco Electronics Inc., (516) 586-5568  
60 Jeffry Blvd. East, Deer Park, NY 11729

FIGURE 8. Table of Standardized Inductors and Manufacturer's Part Numbers

#### 2. Compensation Network ( $R_C$ , $C_C$ ) and Output Capacitor ( $C_{OUT}$ ) Selection

$R_C$  and  $C_C$  form a pole-zero compensation network that stabilizes the regulator. The values of  $R_C$  and  $C_C$  are mainly dependant on the regulator voltage gain,  $I_{LOAD(max)}$ ,  $L$  and  $C_{OUT}$ . The following procedure calculates values for  $R_C$ ,  $C_C$ , and  $C_{OUT}$  that ensure regulator stability. Be aware that this procedure doesn't necessarily result in  $R_C$  and  $C_C$  that provide optimum compensation. In order to guarantee optimum compensation, one of the standard procedures for testing loop stability must be used, such as measuring  $V_{OUT}$  transient response when pulsing  $I_{LOAD}$  (see Figure 13).

A. First, calculate the maximum value for  $R_C$ .

$$R_C \leq \frac{750 \times I_{LOAD(max)} \times V_{OUT}^2}{V_{IN(min)}^2}$$

Select a resistor less than or equal to this value, and it should also be no greater than 3 k $\Omega$ .

B. Calculate the minimum value for  $C_{OUT}$  using the following two equations.

$$C_{OUT} \geq \frac{0.19 \times L \times R_C \times I_{LOAD(max)}}{V_{IN(min)} \times V_{OUT}}$$

and

$$C_{OUT} \geq \frac{V_{IN(min)} \times R_C \times (V_{IN(min)} + (3.74 \times 10^5 \times L))}{487,800 \times V_{OUT}^2}$$

The larger of these two values is the minimum value that ensures stability.

C. Calculate the minimum value of  $C_C$ .

$$C_C \geq \frac{58.5 \times V_{OUT}^2 \times C_{OUT}}{R_C^2 \times V_{IN(min)}}$$

The compensation capacitor is also part of the soft start circuitry. When power to the regulator is turned on, the switch duty cycle is allowed to rise at a rate controlled by this capacitor (with no control on the duty cycle, it would immediately rise to 90%, drawing huge currents from the input power supply). In order to operate properly, the soft start circuit requires  $C_C \geq 0.22 \mu\text{F}$ .

The value of the output filter capacitor is normally large enough to require the use of aluminum electrolytic capacitors. Figure 9 lists several different types that are recommended for switching regulators, and the following parameters are used to select the proper capacitor.

**Working Voltage (WVDC):** Choose a capacitor with a working voltage at least 20% higher than the regulator output voltage.

**Ripple Current:** This is the maximum RMS value of current that charges the capacitor during each switching cycle. For step-up and flyback regulators, the formula for ripple current is

$$I_{RIPPLE(RMS)} = \frac{I_{LOAD(max)} \times D_{(max)}}{1 - D_{(max)}}$$

Choose a capacitor that is rated at least 50% higher than this value at 52 kHz.

**Equivalent Series Resistance (ESR):** This is the primary cause of output ripple voltage, and it also affects the values of  $R_C$  and  $C_C$  needed to stabilize the regulator. As a result, the preceding calculations for  $C_C$  and  $R_C$  are only valid if ESR doesn't exceed the maximum value specified by the following equations.

$$ESR \leq \frac{0.01 \times V_{OUT}}{I_{RIPPLE(P-P)}} \text{ and } \leq \frac{8.7 \times (10) - 3 \times V_{IN}}{I_{LOAD(max)}}$$

where

$$I_{RIPPLE(P-P)} = \frac{1.15 \times I_{LOAD(max)}}{1 - D_{(max)}}$$

Select a capacitor with ESR, at 52 kHz, that is less than or equal to the lower value calculated. Most electrolytic capacitors specify ESR at 120 Hz which is 15% to 30% higher than at 52 kHz. Also, be aware that ESR increases by a factor of 2 when operating at  $-20^\circ\text{C}$ .



**Application Hints (Continued)**

In general, low values of ESR are achieved by using large value capacitors ( $C > 470 \mu\text{F}$ ), and capacitors with high WVDC, or by paralleling smaller-value capacitors.

**3. Output Voltage Selection (R1 and R2)**

This section is for applications using the LM1577-ADJ/LM2577-ADJ. Skip this section if the LM1577-12/LM2577-12 or LM1577-15/LM2577-15 is being used.

With the LM1577-ADJ/LM2577-ADJ, the output voltage is given by

$$V_{\text{OUT}} = 1.23\text{V} (1 + R1/R2)$$

Resistors R1 and R2 divide the output down so it can be compared with the LM1577-ADJ/LM2577-ADJ internal 1.23V reference. For a given desired output voltage  $V_{\text{OUT}}$ , select R1 and R2 so that

$$\frac{R1}{R2} = \frac{V_{\text{OUT}}}{1.23\text{V}} - 1$$

**4. Input Capacitor Selection ( $C_{\text{IN}}$ )**

The switching action in the step-up regulator causes a triangular ripple current to be drawn from the supply source. This in turn causes noise to appear on the supply voltage. For proper operation of the LM1577, the input voltage should be decoupled. Bypassing the Input Voltage pin directly to

<p>Cornell Dublier—Types 239, 250, 251, UFT, 300, or 350 P.O. Box 128, Pickens, SC 29671 (803) 878-6311</p> <p>Nichicon—Types PF, PX, or PZ 927 East Parkway, Schaumburg, IL 60173 (708) 843-7500</p> <p>Sprague—Types 672D, 673D, or 674D Box 1, Sprague Road, Lansing, NC 28643 (919) 384-2551</p> <p>United Chemi-Con—Types LX, SXF, or SXJ 9801 West Higgins Road, Rosemont, IL 60018 (708) 696-2000</p>
--

FIGURE 9. Aluminum Electrolytic Capacitors Recommended for Switching Regulators

ground with a good quality, low ESR, 0.1  $\mu\text{F}$  capacitor (leads as short as possible) is normally sufficient.

If the LM1577 is located far from the supply source filter capacitors, an additional large electrolytic capacitor (e.g. 47  $\mu\text{F}$ ) is often required.

**5. Diode Selection (D)**

The switching diode used in the boost regulator must withstand a reverse voltage equal to the circuit output voltage, and must conduct the peak output current of the LM2577. A suitable diode must have a minimum reverse breakdown voltage greater than the circuit output voltage, and should be rated for average and peak current greater than  $I_{\text{LOAD(max)}}$  and  $I_{\text{D(pk)}}$ . Schottky barrier diodes are often favored for use in switching regulators. Their low forward voltage drop allows higher regulator efficiency than if a (less expensive) fast recovery diode was used. See Figure 10 for recommended part numbers and voltage ratings of 1A and 3A diodes.

V <sub>OUT</sub> (max)	Schottky		Fast Recovery	
	1A	3A	1A	3A
20V	1N5817 MBR120P	1N5820 MBR320P		
30V	1N5818 MBR130P 11DQ03	1N5821 MBR330P 31DQ03		
40V	1N5819 MBR140P 11DQ04	1N5822 MBR340P 31DQ04		
50V	MBR150 11DQ05	MBR350 31DQ05	1N4933 MUR105	
100V			1N4934 HER102 MUR110 10DL1	MR851 30DL1 MR831 HER302

FIGURE 10. Diode Selection Chart



**inter:si**  
**OBSOLETE PRODUCT**  
**NO RECOMMENDED REPLACEMENT**

**CA124, CA224, CA324, LM324, LM2902**

Data Sheet

May 2001

File Number 796.5

**Quad, 1MHz, Operational Amplifiers for Commercial, Industrial, and Military Applications**

The CA124, CA224, CA324, LM324, and LM2902 consist of four independent, high-gain operational amplifiers on a single monolithic substrate. An on-chip capacitor in each of the amplifiers provides frequency compensation for unity gain. These devices are designed specially to operate from either single or dual supplies, and the differential voltage range is equal to the power-supply voltage. Low power drain and an input common-mode voltage range from 0V to V+ -1.5V (single-supply operation) make these devices suitable for battery operation.

**Features**

- Operation from Single or Dual Supplies
- Unity-Gain Bandwidth ..... 1MHz (Typ)
- DC Voltage Gain ..... 100dB (Typ)
- Input Bias Current ..... 45nA (Typ)
- Input Offset Voltage ..... 2mV (Typ)
- Input Offset Current
  - CA224, CA324, LM324, LM2902 ..... 5nA (Typ)
  - CA124 ..... 3nA (Typ)
- Replacement for Industry Types 124, 224, 324

**Part Number Information**

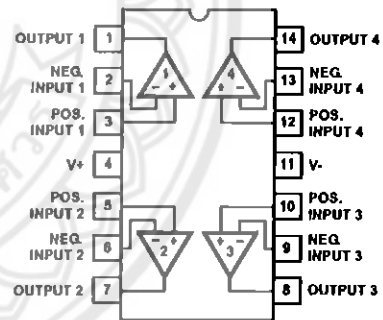
PART NUMBER (BRAND)	TEMP. RANGE (°C)	PACKAGE	PKG. NO.
CA0124E	-55 to 125	14 Ld PDIP	E14.3
CA0124M (124)	-55 to 125	14 Ld SOIC	M14.15
CA0124M96 (124)	-55 to 125	14 Ld SOIC Tape and Reel	M14.15
CA0224E	-40 to 85	14 Ld PDIP	E14.3
CA0224M (224)	-40 to 85	14 Ld SOIC	M14.15
CA0324E	0 to 70	14 Ld PDIP	E14.3
CA0324M (324)	0 to 70	14 Ld SOIC	M14.15
CA0324M96 (324)	0 to 70	14 Ld SOIC Tape and Reel	M14.15
LM324N	0 to 70	14 Ld PDIP	E14.3
LM2902N	-40 to 85	14 Ld PDIP	E14.3
LM2902M (2902)	-40 to 85	14 Ld SOIC	M14.15
LM2902M96 (2902)	-40 to 85	14 Ld SOIC Tape and Reel	M14.15

**Applications**

- Summing Amplifiers
- Multivibrators
- Oscillators
- Transducer Amplifiers
- DC Gain Blocks

**Pinout**

CA124, CA224, CA324, LM2902 (PDIP, SOIC)  
 LM324 (PDIP)  
 TOP VIEW



1

CAUTION: These devices are sensitive to electrostatic discharge; follow proper IC Handling Procedures.  
 1-888-INTERSIL or 321-724-7143 | Intersil and Design is a trademark of Intersil Americas Inc. | Copyright © Intersil Americas Inc. 2001

## CA124, CA224, CA324, LM324, LM2902

### Absolute Maximum Ratings

Supply Voltage	32V or $\pm 16V$
Differential Input Voltage	32V
Input Voltage	-0.3V to 32V
Input Current ( $V_I < -0.3V$ , Note 1)	50mA
Output Short Circuit Duration ( $V_O \leq 15V$ , Note 2)	Continuous

### Operating Conditions

Temperature Range	
CA124	-55°C to 125°C
CA224, LM2902	-40°C to 85°C
CA324, LM324	0°C to 70°C

### Thermal Information

Thermal Resistance (Typical, Note 3)	$\theta_{JA}$ (°C/W)
PDIP Package	95
SOIC Package	175
Maximum Junction Temperature (Die)	175°C
Maximum Junction Temperature (Plastic Package)	150°C
Maximum Storage Temperature Range	-65°C to 150°C
Maximum Lead Temperature (Soldering 10s)	300°C (SOIC - Lead Tips Only)

**CAUTION:** Stresses above those listed in "Absolute Maximum Ratings" may cause permanent damage to the device. This is a stress only rating and operation of the device at these or any other conditions above those indicated in the operational sections of this specification is not implied.

### NOTES:

- This input current will only exist when the voltage at any of the input leads is driven negative. This current is due to the collector base junction of the input p-n-p transistors becoming forward biased and thereby acting as input diode clamps. In addition to this diode action, there is also lateral n-p-n parasitic transistor action on the IC chip. This transistor action can cause the output voltages of the amplifiers to go to the  $V_+$  voltage level (or to ground for a large overdrive) for the time duration that an input is driven negative. This transistor action is not destructive and normal output states will re-establish when the input voltage, which was negative, again returns to a value greater than -0.3V.
- The maximum output current is approximately 40mA independent of the magnitude of  $V_+$ . Continuous short circuits at  $V_+ > 15V$  can cause excessive power dissipation and eventual destruction. Short circuits from the output to  $V_+$  can cause overheating and eventual destruction of the device.
- $\theta_{JA}$  is measured with the component mounted on an evaluation PC board in free air.

### Electrical Specifications

Values Apply for Each Operational Amplifier. Supply Voltage  $V_+ = 5V$ ,  $V_- = 0V$ , Unless Otherwise Specified

PARAMETER	TEST CONDITIONS	TEMP. (°C)	CA124			CA224, CA324, LM324			LM2902			UNITS
			MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
Input Offset Voltage (Note 8)		25	-	2	5	-	2	7	-	-	-	mV
		Full	-	-	7	-	-	9	-	-	10	mV
Average Input Offset Voltage Drift	$R_S = 0\Omega$	Full	-	7	-	-	7	-	-	7	-	$\mu V/^\circ C$
Differential Input Voltage (Note 5)		Full	-	-	$V_+$	-	-	$V_+$	-	-	$V_+$	V
Input Common Mode Voltage Range (Note 5)	$V_+ = 30V$	25	0	-	$V_+ - 1.5$	0	-	$V_+ - 1.5$	-	-	-	V
	$V_+ = 30V$	Full	0	-	$V_+ - 2$	0	-	$V_+ - 2$	-	-	-	V
	$V_+ = 26V$	Full	-	-	-	-	-	-	0	-	$V_+ - 2$	V
Common Mode Rejection Ratio	DC	25	70	85	-	65	70	-	-	-	-	dB
Power Supply Rejection Ratio	DC	25	65	100	-	65	100	-	-	-	-	dB
Input Bias Current (Note 4)	$I_{I+}$ or $I_{I-}$	25	-	45	150	-	45	250	-	-	-	nA
	$I_{I+}$ or $I_{I-}$	Full	-	-	300	-	-	500	-	40	500	nA
Input Offset Current	$I_{I+} - I_{I-}$	25	-	3	30	-	5	50	-	-	-	nA
	$I_{I+} - I_{I-}$	Full	-	-	100	-	-	150	-	45	200	nA
Average Input Offset Current Drift		Full	-	10	-	-	10	-	-	10	-	$\mu A/^\circ C$
Large Signal Voltage Gain	$R_L \geq 2k\Omega$ , $V_+ = 15V$ (For Large $V_O$ Swing)	25	94	100	-	88	100	-	-	-	-	dB
	$R_L \geq 2k\Omega$ , $V_+ = 15V$ (For Large $V_O$ Swing)	Full	88	-	-	83	-	-	83	-	-	dB

CA124, CA224, CA324, LM324, LM2902

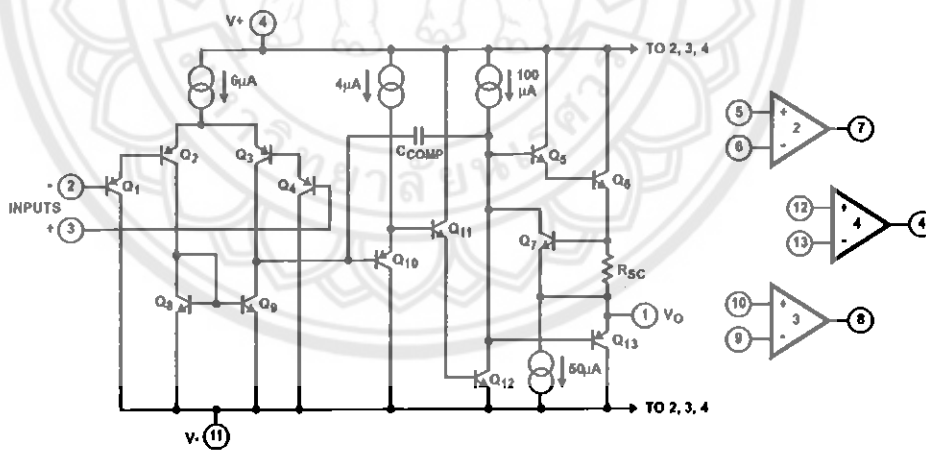
**Electrical Specifications** Values Apply for Each Operational Amplifier. Supply Voltage  $V_+ = 5V$ ,  $V_- = 0V$ . Unless Otherwise Specified (Continued)

PARAMETER	TEST CONDITIONS	TEMP (°C)	CA124			CA224, CA324, LM324			LM2902			UNITS
			MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
Output Voltage Swing	High Level $R_L = 2k\Omega$ $R_L = 2k\Omega, V_+ = 30V$ $R_L = 2k\Omega, V_+ = 26V$ $R_L = 10k\Omega, V_+ = 30V$	25	0	-	$V_+ - 1.5$	0	-	$V_+ - 1.5$	-	-	-	V
		Full	26	-	-	26	-	-	-	-	-	V
		Full	-	-	-	-	-	-	22	-	-	V
		Full	27	28	-	27	28	-	23	28	-	V
	Low Level $R_L = 10k\Omega$	Full	-	5	20	-	5	20	-	5	100	mV
Output Current	Source $V_{I+} = +1V, V_{I-} = 0V, V_+ = 15V$	25	20	40	-	20	40	-	-	-	-	mA
		Full	10	20	-	10	20	-	10	20	-	mA
	Sink $V_{I+} = 0V, V_{I-} = 1V, V_+ = 15V$	25	10	20	-	10	20	-	-	-	-	mA
		25	12	50	-	12	50	-	-	-	-	$\mu A$
		Full	5	8	-	5	8	-	5	8	-	mA
Crosstalk	$f = 1$ to $20kHz$ (Input Referred)	25	-	-120	-	-	-120	-	-	-	-	dB
Total Supply Current	$R_L = \infty$	Full	-	0.8	2	-	0.8	2	-	0.7	1.2	mA
	$R_L = \infty, V_+ = 26V$	Full	-	-	-	-	-	-	-	1.5	3	mA

NOTES:

- Due to the PNP input stage the direction of the input current is out of the IC. No loading change exists on the input lines because the current is essentially constant, independent of the state of the output.
- The input signal voltage and the input common mode voltage should not be allowed to go negative by more than 0.3V. The positive limit of the common mode voltage range is  $V_+ - 1.5V$ , but either or both inputs can go to  $+32V$  without damage.
- $V_O = 1.4V, R_S = 0\Omega$  with  $V_+$  from 5V to 30V, and over the full input common mode voltage range (0V to  $V_+ - 1.5V$ ).

**Schematic Diagram** (One of Four Operational Amplifiers)



CA124, CA224, CA324, LM324, LM2902

Typical Performance Curves

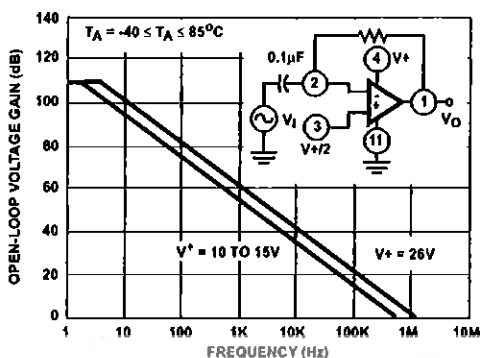


FIGURE 1. OPEN LOOP FREQUENCY RESPONSE

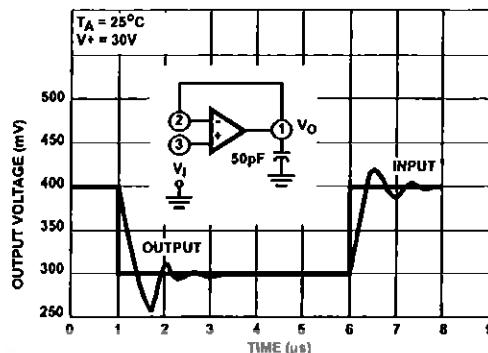


FIGURE 2. VOLTAGE FOLLOWER PULSE RESPONSE (SMALL SIGNAL)

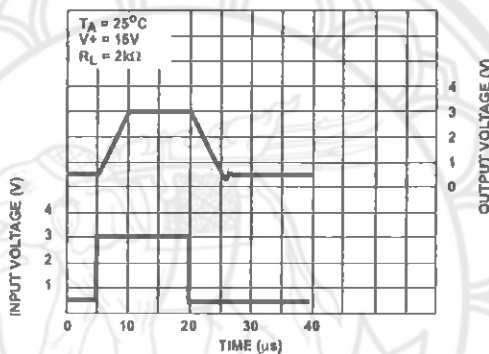


FIGURE 3. VOLTAGE FOLLOWER PULSE RESPONSE (LARGE SIGNAL)

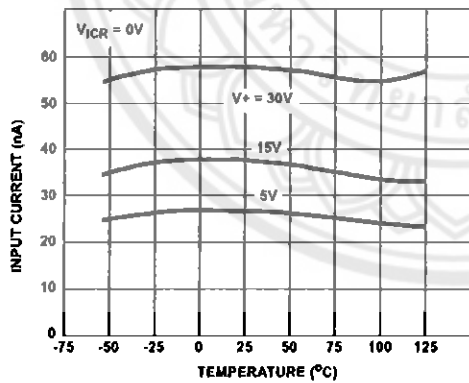


FIGURE 4. INPUT CURRENT vs AMBIENT TEMPERATURE

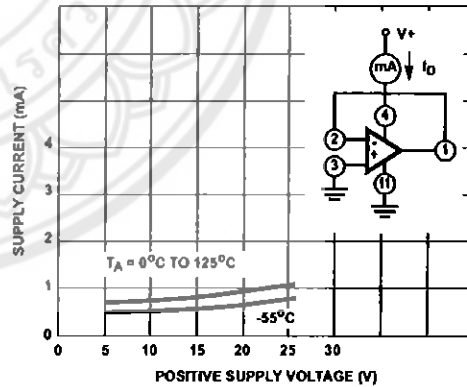


FIGURE 5. SUPPLY CURRENT vs SUPPLY VOLTAGE

CA124, CA224, CA324, LM324, LM2902

Typical Performance Curves (Continued)

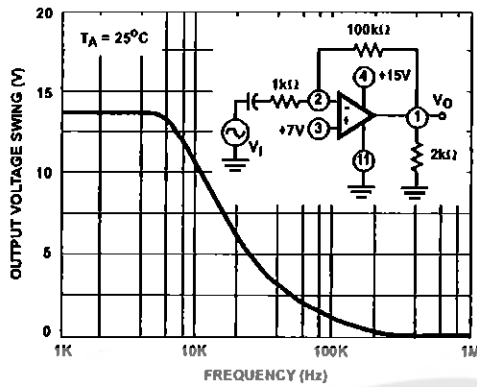


FIGURE 6. LARGE SIGNAL FREQUENCY RESPONSE

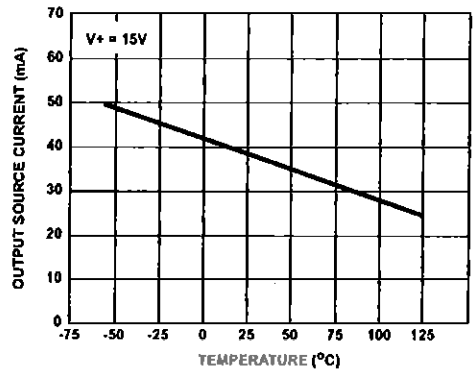


FIGURE 7. OUTPUT CURRENT vs AMBIENT TEMPERATURE

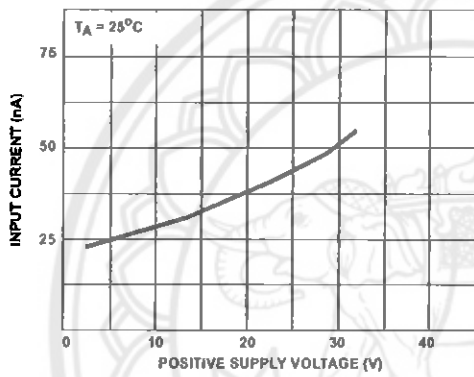


FIGURE 8. INPUT CURRENT vs SUPPLY VOLTAGE

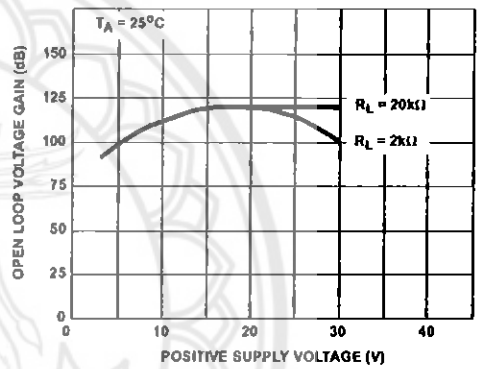
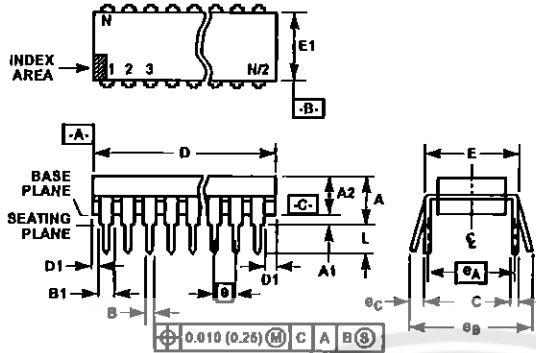


FIGURE 9. VOLTAGE GAIN vs SUPPLY VOLTAGE

CA124, CA224, CA324, LM324, LM2902

Dual-In-Line Plastic Packages (PDIP)



E14.3 (JEDEC MS-001-AA ISSUE D)  
14 LEAD DUAL-IN-LINE PLASTIC PACKAGE

SYMBOL	INCHES		MILLIMETERS		NOTES
	MIN	MAX	MIN	MAX	
A	-	0.210	-	5.33	-
A1	0.015	-	0.39	-	4
A2	0.115	0.195	2.93	4.95	-
B	0.014	0.022	0.358	0.558	-
B1	0.045	0.070	1.15	1.77	8
C	0.008	0.014	0.204	0.355	-
D	0.735	0.775	18.66	19.68	5
D1	0.005	-	0.13	-	5
E	0.300	0.325	7.62	8.25	6
E1	0.240	0.280	6.10	7.11	5
e	0.100 BSC		2.54 BSC		-
e <sub>A</sub>	0.300 BSC		7.62 BSC		6
e <sub>B</sub>	-	0.430	-	10.92	7
L	0.115	0.150	2.93	3.81	4
N	14		14		9

NOTES:

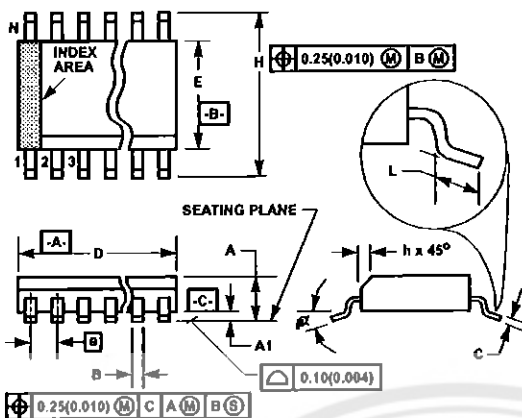
- Controlling Dimensions: INCH. In case of conflict between English and Metric dimensions, the inch dimensions control.
- Dimensioning and tolerancing per ANSI Y14.5M-1982.
- Symbols are defined in the "MO Series Symbol List" in Section 2.2 of Publication No. 95.
- Dimensions A, A1 and L are measured with the package seated in JEDEC seating plane gauge GS-3.
- D, D1, and E1 dimensions do not include mold flash or protrusions. Mold flash or protrusions shall not exceed 0.010 inch (0.25mm).
- E and e<sub>A</sub> are measured with the leads constrained to be perpendicular to datum -C-.
- e<sub>B</sub> and e<sub>C</sub> are measured at the lead lips with the leads unconstrained. e<sub>C</sub> must be zero or greater.
- B1 maximum dimensions do not include dambar protrusions. Dambar protrusions shall not exceed 0.010 inch (0.25mm).
- N is the maximum number of terminal positions.
- Corner leads (1, N, N/2 and N/2 + 1) for E8.3, E16.3, E18.3, E28.3, E42.6 will have a B1 dimension of 0.030 - 0.045 inch (0.76 - 1.14mm).

Rev. 0 12/93



CA124, CA224, CA324, LM324, LM2902

Small Outline Plastic Packages (SOIC)



M14.15 (JEDEC MS-012-AB ISSUE C)  
14 LEAD NARROW BODY SMALL OUTLINE PLASTIC PACKAGE

SYMBOL	INCHES		MILLIMETERS		NOTES
	MIN	MAX	MIN	MAX	
A	0.0532	0.0688	1.35	1.75	-
A1	0.0040	0.0098	0.10	0.25	-
B	0.013	0.020	0.33	0.51	9
C	0.0075	0.0098	0.19	0.25	-
D	0.3367	0.3444	8.55	8.75	3
E	0.1497	0.1574	3.80	4.00	4
e	0.050 BSC		1.27 BSC		-
H	0.2284	0.2440	5.80	6.20	-
h	0.0099	0.0196	0.25	0.50	5
L	0.016	0.050	0.40	1.27	6
N	14		14		7
α	0°	8°	0°	8°	-

NOTES:

1. Symbols are defined in the 'MO Series Symbol List' in Section 2.2 of Publication Number 95.
2. Dimensioning and tolerancing per ANSI Y14.5M-1982.
3. Dimension "D" does not include mold flash, protrusions or gate burrs. Mold flash, protrusion and gate burrs shall not exceed 0.15mm (0.006 inch) per side.
4. Dimension "E" does not include interlead flash or protrusions. Interlead flash and protrusions shall not exceed 0.25mm (0.010 inch) per side.
5. The chamfer on the body is optional. If it is not present, a visual index feature must be located within the crosshatched area.
6. "L" is the length of terminal for soldering to a substrate.
7. "N" is the number of terminal positions.
8. Terminal numbers are shown for reference only.
9. The lead width "B", as measured 0.36mm (0.014 inch) or greater above the seating plane, shall not exceed a maximum value of 0.61mm (0.024 inch).
10. Controlling dimension: MILLIMETER. Converted inch dimensions are not necessarily exact.

Rev. 0 12/93

All Intersil products are manufactured, assembled and tested utilizing ISO9000 quality systems.

Intersil Corporation's quality certifications can be viewed at website [www.intersil.com/design/quality/iso.asp](http://www.intersil.com/design/quality/iso.asp).

*Intersil products are sold by description only. Intersil Corporation reserves the right to make changes in circuit design and/or specifications at any time without notice. Accordingly, the reader is cautioned to verify that data sheets are current before placing orders. Information furnished by Intersil is believed to be accurate and reliable. However, no responsibility is assumed by Intersil or its subsidiaries for its use, nor for any infringements of patents or other rights of third parties which may result from its use. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of Intersil or its subsidiaries.*

For information regarding Intersil Corporation and its products, see web site [www.Intersil.com](http://www.Intersil.com)

Sales Office Headquarters

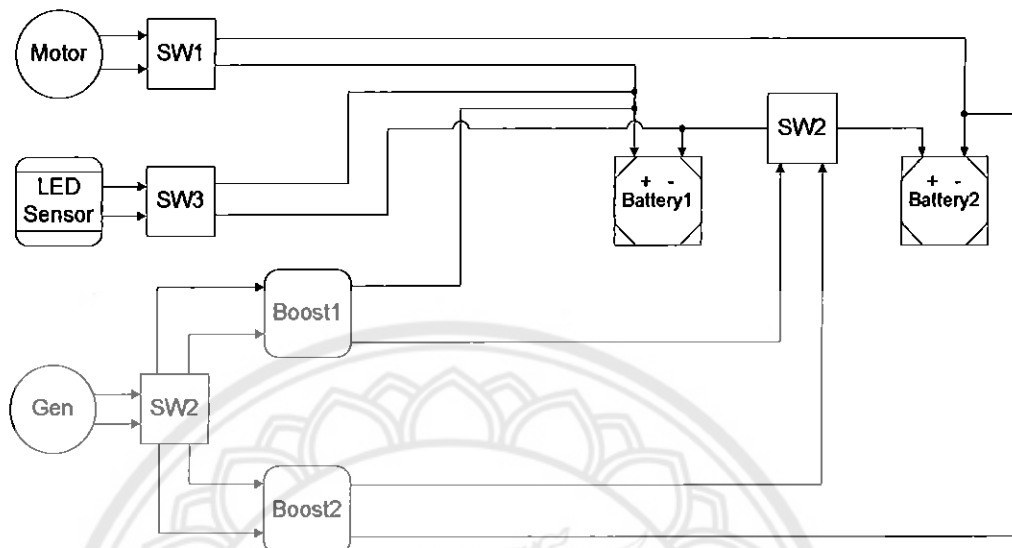
**NORTH AMERICA**  
Intersil Corporation  
2401 Palm Bay Rd.  
Palm Bay, FL 32905  
TEL: (321) 724-7000  
FAX: (321) 724-7240

**EUROPE**  
Intersil SA  
Mercure Center  
100, Rue de la Fusée  
1130 Brussels, Belgium  
TEL: (32) 2.724.2111  
FAX: (32) 2.724.22.05

**ASIA**  
Intersil Ltd.  
8F-2, 96, Sec. 1, Chien-kuo North,  
Taipei, Taiwan 104  
Republic of China  
TEL: 886-2-2515-8508  
FAX: 886-2-2515-8369



## แผนภาพการควบคุมและแผงสวิตช์ควบคุมการใช้งานจักรยานไฟฟ้าสองระบบ



แผนภาพการควบคุมการทำงานจักรยานไฟฟ้าสองระบบ



แผงสวิตช์ควบคุมและส่วนแสดงค่าแรงดันของแบตเตอรี่

## ขั้นตอนการใช้งานจักรยานไฟฟ้าสองระบบ

ลำดับที่ 1 กรณีที่แบตเตอรี่เต็มเราสามารถขั้ด้วยระบบไฟฟ้าโดยโยกสวิตช์ 1 ไปตำแหน่ง ON แล้วสามารถบิดคันเร่งใช้งานได้โดยเนื่องจากช่วงนี้แบตเตอรี่มีลักษณะการต่อแบบอนุกรมทำให้แรงดันของแบตเตอรี่เป็น 24 โวลต์ซึ่งเป็นแรงดันที่เหมาะสมในการขั้จักรยานไฟฟ้า

ลำดับที่ 2 กรณีที่ต้องการอัดประจุแบตเตอรี่โดยการกดสวิตช์ 2 ลงซึ่งการกดจะทำให้แบตเตอรี่เป็นอิสระแยกจากกัน

ลำดับที่ 3 กรณีที่เราต้องการตรวจสอบระดับแรงดันของแบตเตอรี่โดยเลื่อนสวิตช์ 3 ไปทางขวาไฟที่แสดงหมายถึงระดับแรงดันของแบตเตอรี่ ไฟติดหมดแสดงว่าแบตเตอรี่เต็ม (แรงดันมากกว่า 12.5 โวลต์) ไฟสีเขียวดับหมายถึงระดับแรงดันแบตเตอรี่ต่ำกว่า 11 โวลต์ ไฟสีเหลืองดับหมายถึงระดับแรงดันแบตเตอรี่ต่ำกว่า 10 โวลต์ ไฟสีส้มดับหมายถึงระดับแรงดันแบตเตอรี่ต่ำกว่า 9 โวลต์ เหลือเพียงไฟสีแดงดวงเดียวหมายถึงต้องอัดประจุแบตเตอรี่ได้แล้ว

หมายเหตุ สวิตช์ 1 และ 2 ไม่สามารถนำกระแสพร้อมกันได้หมายถึงการขั้และการอัดประจุไม่สามารถทำงานพร้อมกันได้นั่นเอง

## ประวัติผู้ดำเนินโครงการ



ชื่อ นายวินัย คำว  
 ภูมิลำเนา 149/9 หมู่ 9 ต.ท่าฉนวน อ.กงไกรลาศ จ.สุโขทัย  
 ประวัติการศึกษา  
 – จบระดับมัธยมศึกษาจาก โรงเรียนประชาสงเคราะห์วิทยา  
 – ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4  
 สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์  
 มหาวิทยาลัยนเรศวร  
 E-mail: winai\_ee@hotmail.com



ชื่อ นายกิตติศักดิ์ จันทะเสน  
 ภูมิลำเนา 62/8 ถ. โพนพิสัย ต.หมากแข้ง อ.เมืองอุดรธานี จ.อุดรธานี  
 ประวัติการศึกษา  
 – จบระดับมัธยมศึกษาจาก โรงเรียนประจักษ์ศิลปาคาร  
 – ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4  
 สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์  
 มหาวิทยาลัยนเรศวร  
 E-mail: neo\_blue@windowslive.com



ชื่อ นายมนตรี เอมอุทัย  
 ภูมิลำเนา: 55/5 หมู่ 1 ต.น้ำซึม อ.เมืองอุทัยธานี จ.อุทัยธานี  
 ประวัติการศึกษา  
 – จบระดับมัธยมศึกษาจาก โรงเรียนพระสุธรรมยาน  
 เถระวิทยา  
 – ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4  
 สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์  
 มหาวิทยาลัยนเรศวร  
 E-mail: new\_managas@hotmail.com