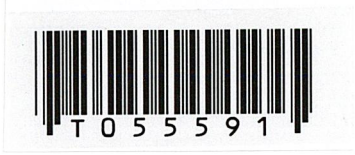
สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

โซลาร์อินเวอร์เตอร์

SOLAR INVERTER



โดย

นาย สรพงศ์ สกุลกิจ

นาย สรรค์ ทรรพกาญจน์

นาย สัจจา ศรีสุขธนา

นาย สิรโรจน์ ใจขาน

อาจารย์ที่ปรึกษา

ดร. สุพัฒน์ กิตติรัตน์สัจจา

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2546

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เลขหมู่ b.....
เลขทะเบียน 55591
วัน,เดือน,ปี 20 พ.ค. 2548

วิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง โซลาร์อินเวอร์เตอร์

SOLAR INVERTER

ผู้จัดทำ

1. นาย สรพงศ์	สกุลกิจ	รหัสประจำตัว	43010456
2. นาย สรรค์	ทรรพกาญจน์	รหัสประจำตัว	43010457
3. นาย สัจจา	ศรีสุขธนา	รหัสประจำตัว	43010459
4. นาย สิรโรจน์	ใจขาน	รหัสประจำตัว	43010467

อาจารย์ที่ปรึกษา

(ดร. สุพัฒน์ กิตติรัตน์สัจจา)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โซลาร์อินเวอร์เตอร์

นาย สรพงศ์ สกุลกิจ
นาย สรรค์ ทรรพกาญจน์
นาย สัจจา ศรีสุขธนา
นาย สิรโรจน์ ใจขาน
ดร. สุพัฒน์ กิตติรัตน์สัจจา อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2546

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันการใช้พลังงานมีการใช้มากขึ้นเรื่อยๆ ดังนั้นจึงมีความพยายามหาแหล่งพลังงานอื่นๆ มาทดแทนซึ่งพลังงานแสงอาทิตย์ จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่ง เนื่องจากมีข้อดีคือ หาได้ง่ายและเป็นแหล่งพลังงานที่สะอาดไม่ก่อให้เกิดมลพิษแก่สิ่งแวดล้อม โครงงานนี้เป็นการประยุกต์ใช้เซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นแหล่งพลังงานไฟฟ้า ดังนั้นจึงต้องมีการจัดเก็บพลังงานในขณะที่มีแสงแดดเพื่อนำไปใช้ในช่วงเวลาที่ไม่มีแสงแดด โดยความต้องการของโครงงานนี้ต้องการพลังงานที่มีแรงดัน 12 V ดังนั้นการจัดเก็บ จึงใช้แบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด ที่มีขนาดแรงดัน 12 V ,100 Ah จำนวนหนึ่งลูก โดยใช้ไอซีเบอร์ TL494 ควบคุมสถานะการชาร์จ เพื่อเป็นการเพิ่มอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ให้ยาวนานขึ้น โดยใช้ บูสคอนเวอร์เตอร์ ยกระดับแรงดัน 12 V จากโซลาร์เซลล์ 50 W เป็น 14 V เพื่อทำการประจุแรงดันให้แบตเตอรี่ จากนั้นทำการแปลงแรงดันไฟตรง 12 V จากแบตเตอรี่ เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ 220 V โดยใช้พุช-พูล อินเวอร์เตอร์ เพื่อไปจ่ายโหลดกระแสสลับต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Solar Inverter

Sorapong Sakulkij
San Tuppakarn
Sujchar Seesukthana
Sirarote Jaikhan
Dr. Supat Kitiratsajja
2003

ABSTRACT

Today, the consumption of energy has continuously increase then there are the effort to find order energy source. Solar energy is an alternative because it is easy to find, being, clean power, save for environment and without any pollution. This project has applied solar sell to be the energy source to battery by storage at the sunlight for using later when doesn't have sunlight. In this project need 12 volt so it has to use one lead-acid battery in 12 volt 100 Ah. IC TL494 was used to control the charging status and increased the efficiency of battery. Otherwise in this charging also use boost converter controlled by TL494 to step up 12 volt from 50 W solar cell to 14 volt for charging battery. Then push-pull inverter converses DC to AC energy for AC load.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงงานนี้จะไม่สามารถสำเร็จลงได้ หากปราศจากความช่วยเหลือจากบุคคลหลายท่านซึ่งทางคณะผู้จัดทำขอขอบคุณบุคคลต่อไปนี้อันประกอบไปด้วยดร.สุพัฒน์ กิตติรัตน์สัจจา ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในด้านการให้คำปรึกษาทางด้านวิชาการและอุปกรณ์ในการทดลอง รวมถึงงบประมาณในการทำงานและมีการติดตามผลการทำงานอย่างต่อเนื่องรวมถึง เพื่อนๆทุกคน จนเป็นผลให้การจัดทำโครงงานและวิทยานิพนธ์ชิ้นนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ท้ายที่สุดนี้คณะผู้จัดทำ ขอขอบพระคุณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังและคณาจารย์ในคณะวิศวกรรมศาสตร์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิประสาทวิชาความรู้ คุณธรรม และจริยธรรมให้กับผู้จัดทำจนประสบความสำเร็จในการศึกษา

คณะผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้าที่

บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญรูปภาพ	VII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของโครงงาน	1
1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตของการทำโครงงาน	2
1.3 เป้าหมาย	2
บทที่ 2 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับแบตเตอรี่และหลักการพื้นฐานของเครื่องอัดประจุไฟฟ้า	3
2.1 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับแบตเตอรี่	3
2.2 แบตเตอรี่แบบตะกั่ว-กรด	3
2.3 หลักการทำงานของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด	4
2.4 ขนาดโวล์ทเตจของเซลล์แบตเตอรี่	7
2.5 การนำเซลล์แบตเตอรี่ไปใช้งาน	7
2.6 ค่าความจุของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด	8
2.7 การชาร์จแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด	9
2.8 ระดับโวลท์เตจในการชาร์จแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด	9
2.9 ระดับของโวลท์เตจที่กระทบกระเทือนต่ออายุของแบตเตอรี่	11
2.10 การชาร์จแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด	12
2.11 ทฤษฎีและหลักการการอัดประจุไฟฟ้าแบตเตอรี่	14
บทที่ 3 Boost Converter & Inverter	16
ภาค Boost Converter	16
3.1 วงจรการทำงานของ Boost Converter	16
3.2 การหาค่า Ripple Voltage	17
3.3 การหาค่า Minimum ของ L	18
3.4 การควบคุมวงจร Boost Converter	18
3.5 ไอซีเบอร์ TL494 สำหรับโหมดควบคุมจากแรงดัน	20
ภาค Inverter	23
3.6 ทรานซิสเตอร์สวิตช์	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้าที่

3.7 มัลติไวเบรเตอร์ 26
3.8 ไบสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ 31
3.9 อินเวอร์เตอร์ 36
บทที่ 4 หลักการและการออกแบบวงจร 39
4.1 การออกแบบวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์ (Boost Converter Design) 39
4.2 การออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์ (Inverter Design) 41
บทที่ 5 ผลการทดลอง 48
5.1 ผลการทดลองในส่วน Boost Converter 48
5.2 ผลการทดลองในส่วน Inverter 52
บทที่ 6 สรุปผล วิจารณ์ผลการทดลองและข้อเสนอแนะ 57
6.1 สรุปผลการทดลอง 57
6.2 ข้อเสนอแนะในการปรับปรุงเพิ่มเติมในอนาคต 57
6.3 วิจารณ์โครงงานที่จัดทำขึ้น 57
เอกสารอ้างอิง 58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

หน้าที่

ตารางที่ 2.1 ขนาดของเซลล์แบตเตอรี่และขนาดของโวลท์เตจ 7
ตารางที่ 2.2 ระดับโวลท์เตจในการชาร์จแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด 10
ตารางที่ 5.1 ผลการอัดประจุ 48
ตารางที่ 5.2 ผลการจ่ายไฟ 52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

หน้าที่

บทที่ 1

รูปที่ 1.1 ภาพรวมของโครงงานทั้งหมด 1

บทที่ 2

รูปที่ 2.1 แสดงเซลล์ของแบตเตอรี่ในขณะที่มีการชาร์จ 5

รูปที่ 2.2 แสดงการคิสชาร์จของแบตเตอรี่ 6

รูปที่ 2.3 ก 8

รูปที่ 2.3 ข 8

รูปที่ 2.4 แสดงการเปลี่ยนแปลงของโวลท์เตจในการชาร์จแบบกระแสคงที่ 13

รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-เวลาในการชาร์จแบตเตอรีแบบโวลท์เตจคงที่ 13

รูปที่ 2.6 แสดงทิศทางการไหลของกระแสอัดประจุแบตเตอรี่ 14

รูปที่ 2.7 แสดงรูปวงจรที่มีความต้านทานต่ออนุกรมเพื่อกำจัดกระแส 15

บทที่ 3

รูปที่ 3.1 วงจร Boost Converter 16

รูปที่ 3.2 วงจรขณะสวิตช์ on 16

รูปที่ 3.3 วงจรขณะสวิตช์ off 16

รูปที่ 3.4 กราฟแรงดันไฟที่คร่อม L 17

รูปที่ 3.5 กราฟกระแสไฟที่ผ่าน L 17

รูปที่ 3.6 กราฟ Ripple Voltage 17

รูปที่ 3.7 วงจรพื้นฐานการควบคุมคอนเวอร์เตอร์ในโหมดควบคุมจากแรงดัน 19

รูปที่ 3.8 แสดงลักษณะของความกว้างเอาท์พุทพัลส์ของ PWM 20

รูปที่ 3.9 โครงสร้างภายในและการจัดขาของไอซี TL494 21

รูปที่ 3.10 แสดงความสัมพันธ์ของค่า RTCT ในการกำหนดความถี่ 21

รูปที่ 3.11 แสดงรูปคลื่นลักษณะการทำงานของ TL494 22

รูปที่ 3.12 ก. วงจรทรานซิสเตอร์สวิตช์ทางอุดมคติ 23

รูปที่ 3.12 ข. กราฟคุณสมบัติ 24

รูปที่ 3.12 ค. สภาวะทรานซิสเตอร์อิ่มตัว 24

รูปที่ 3.12 ง. สภาวะทรานซิสเตอร์คัตออฟ 24

รูปที่ 3.13 ก. วงจรอะสเตเบิสมัสติไวเบรเตอร์ 27

รูปที่ 3.13 ข. สัญญาณตามจุดต่างๆ 27

รูปที่ 3.14 แสดงสภาวะการคายประจุของ C1 ผ่านทรานซิสเตอร์ Q2 28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้าที่

รูปที่ 3.15 ส่วนประกอบของรูปที่ 7.1 สภาวะการคายประจุของ C2 ผ่าน Q1 29
รูปที่ 3.16 วงจรอะสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ชนิดมีไดโอดต่อร่วมขาอิมิตเตอร์ 30
รูปที่ 3.17 วงจรไบสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์แบบเบื้องต้น 31
รูปที่ 3.18 วงจรไบสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์เขียนในรูปมาตรฐาน 32
รูปที่ 3.19 การทำงานแบบ Set-Reset โดยใช้ push button 33
รูปที่ 3.20 การทำงานแบบ Set-Reset โดยใช้ negative pulses 34
รูปที่ 3.21 วงจรไบสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์โดยมี toggle เป็นอินพุท 34
รูปที่ 3.22 วงจรไบสเตเบิลต่อแบบ two cascaded 35
รูปที่ 3.23วงจรอินเวอร์เตอร์แบบครึ่งบริดจ์ 36
รูปที่ 3.24 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบเต็มบริดจ์ 37
รูปที่ 3.25 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบพุชพูล 38

บทที่ 4

รูปที่ 4.1 วงจรบูสคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการออกแบบ 39
รูปที่ 4.2 วงจรอะสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ (Astable Multivibrator Circuit) 41
รูปที่ 4.3 สัญญาณตามจุดต่างๆ 42
รูปที่ 4.4 วงจรอะสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ ที่ได้จากการออกแบบ (Astable Multivibrator) 43
รูปที่ 4.5 วงจรไบสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ (Bistable Multivibrator) 44
รูปที่ 4.6 วงจรไบสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ที่ได้จากการออกแบบ(Bistable Multivibrator) 45
รูปที่ 4.7 ส่วนขับอุปกรณ์ switching และ อุปกรณ์ switching 45
รูปที่ 4.8 แสดงวงจรส่วนของ Boost Converter 46
รูปที่ 4.9 แสดงวงจรส่วนของ Inverter 47

บทที่ 5

รูปที่ 5.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง เวลากับกระแส 49
รูปที่ 5.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง เวลากับแรงดัน 49
รูปที่ 5.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง เวลากับกำลังไฟฟ้า 50
รูปที่ 5.5 สัญญาณ input ของ battery ขณะไม่มี load 50
รูปที่ 5.6 สัญญาณ input ของ battery ขณะมี load 51
รูปที่ 5.7 สัญญาณ output ของ battery ขณะมี load 51
รูปที่ 5.8 สัญญาณขับขาเกตของมอสเฟตขณะมีโหลด 52
รูปที่ 5.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Load กับ กระแส 53
รูปที่ 5.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Load กับ แรงดัน 53
รูปที่ 5.11 สัญญาณ input ของ battery ขณะมี load 54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้าที่

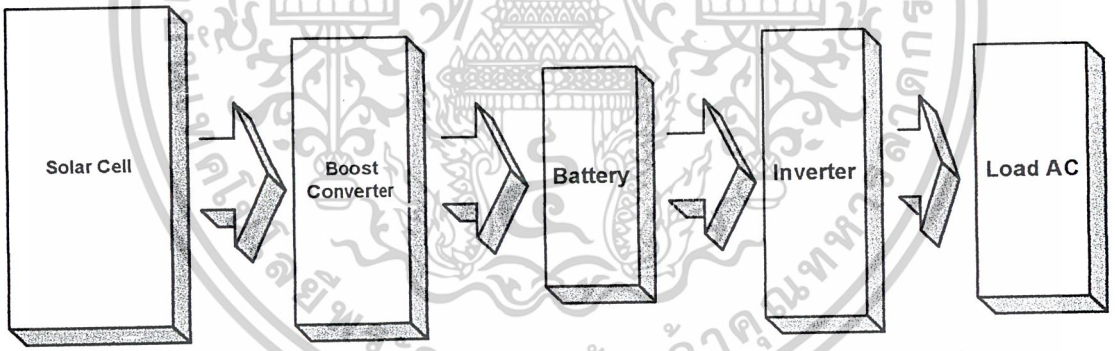
รูปที่ 5.12 สัญญาณของวงจรอะสเตเบิล 100 Hz ขณะมี load 54
รูปที่ 5.13 สัญญาณของวงจรไบสเตเบิล 50 Hz ขณะมี load 55
รูปที่ 5.14 สัญญาณขับขาเบสของทรานซิสเตอร์ 55
รูปที่ 5.15 สัญญาณ output รูปsine ขับขาเบสของทรานซิสเตอร์ 56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

ในปัจจุบัน การใช้พลังงานมีการใช้มากขึ้นเรื่อย ๆ ดังนั้นจึงมีความพยายามหาแหล่งพลังงานอื่น ๆ มาทดแทน การใช้พลังงานแสงอาทิตย์ เป็นแหล่งพลังงานไฟฟ้า ได้มีมานานแล้ว แต่ยังไม่เป็นที่แพร่หลาย เพราะเซลล์แสงอาทิตย์ยังผลิตได้ยากและมีราคาแพงมาก จึงมีใช้ในโครงการอวกาศ หรือสถานที่สำคัญ ๆ ที่ยังไม่มีไฟฟ้า เช่นสถานีวิจัยยอดเขาหรือบนเกาะกลางทะเล ซึ่งการลำเลียงเชื้อเพลิงเป็นไปได้ยากมากในปัจจุบันเทคโนโลยีการผลิตมีความก้าวหน้าขึ้น อีกทั้งมีการเริ่มใช้เซลล์แสงอาทิตย์กันมากขึ้นทำให้ต้นทุนการผลิตต่ำลง และประสิทธิ์ภาพของเซลล์ก็ดีกว่าเดิมมาก พลังงานแสงอาทิตย์จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่ง เนื่องจากมีข้อดีคือ หาได้ง่ายและเป็นแหล่งพลังงานที่สะอาดไม่ก่อให้เกิดมลพิษแก่สิ่งแวดล้อม โครงงานนี้เป็นการประยุกต์ใช้เซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ให้ เป็นแหล่งพลังงานไฟฟ้าให้แก่โหลดไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 50 วัตต์ 220 โวลท์ ดังนั้นจึงต้องมีการจัดเก็บพลังงานในขณะที่มีแสงแดดเพื่อนำไปใช้ในเวลาที่ไม่มีแสงแดด ดังนั้นการจัดเก็บพลังงานจึงใช้แบตเตอรี่ในการเก็บพลังงาน

1.1 ความเป็นมาของโครงงาน



รูปที่ 1.1 ภาพรวมของโครงงานทั้งหมด

ในโครงงานนี้ดังรูปข้างบนแบ่งออกเป็น 5 ส่วนดังนี้ส่วนที่ 1 Solar Cell ขนาด 12 V 50W จะเป็นต้นกำลังของส่วนที่ 2 คือ Boost Converter จะยกระดับแรงดันจาก 12 V เป็น 14 V ชาร์จเข้าส่วนที่ 3 คือ Battery ขนาด 12 V โดยส่วนที่ 4 Inverter จะแปลงแรงดัน DC จาก Battery เป็น แรงดันAC เพื่อไปขับโหลดคือส่วนที่ 5 โดยโหลดจะเป็นโหลดไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 220 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตของการทำโครงงาน

- สามารถจัดเก็บพลังงานที่ได้จาก Solar Cell ไปไว้ใน Battery 12 V 1 ลูก
- สามารถจ่ายโหลดไฟฟ้ากระแสสลับโดยรับไฟฟ้ากระแสสลับจาก Inverter และ Inverter รับไฟฟ้ากระแสตรงจาก Battery
- ราคาถูกและขนาดเล็ก สามารถพกพาไปที่ต่าง ๆ ได้อย่างสะดวก
- เพื่อเป็นต้นแบบพัฒนาให้รุ่นต่อ ๆ ไป
- ฝึกฝนในเรื่องการทำงานเป็นกลุ่ม

1.3 เป้าหมาย

- ต้องการที่จะจัดเก็บพลังงานที่ได้จาก Solar cell มาเก็บไว้ในแบตเตอรี่และแปลงพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงจากแบตเตอรี่เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส 220 V โดยอินเวอร์เตอร์ เพื่อจ่ายให้กับโหลดไฟฟ้ากระแสสลับต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับแบตเตอรี่และหลักการพื้นฐานของเครื่องอัดประจุไฟฟ้า

2.1 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับแบตเตอรี่

แบตเตอรี่เป็นอุปกรณ์ที่สำคัญอย่างหนึ่งทางด้านไฟฟ้า ทำหน้าที่ในการเปลี่ยนพลังงานเคมีให้เป็นพลังงานไฟฟ้า จ่ายออกมาให้เครื่องใช้ไฟฟ้าต่างๆ แบตเตอรี่บางชนิดสามารถอัดไฟเข้าไปเพื่อเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานเคมีแล้วค่อยๆ ปล่อยพลังงานออกมาให้เครื่องใช้ไฟฟ้าต่างๆ

2.1.1 โครงสร้างของแบตเตอรี่

เซลล์ของแบตเตอรี่ประกอบด้วยแผ่นธาตุบวกและแผ่นธาตุลบ และสารละลายที่เป็นของเหลวหรือวุ้นซึ่งเรียกว่า"อิเล็กโตรไลต์"เซลล์อาจมีการปิดสนิม หรือมีช่องให้สารระเหยได้ แผ่นธาตุบวกและแผ่นลบจะวางอยู่คู่กันในเซลล์แบตเตอรี่ลูกๆหนึ่งๆอาจมีแผ่นธาตุบวกและแผ่นธาตุลบหลายๆชุด วางขนานกันเป็นคู่ๆ เพื่อให้ได้กระแสไฟฟ้าที่จ่ายออกมาสูงขึ้น โดยปริมาณขนาดกระแสไฟฟ้าที่ได้จากแบตเตอรี่จะขึ้นอยู่กับพื้นที่ของแผ่นบวกและแผ่นลบ ระยะห่างระหว่าง ค่าความเข้มของสารระลาย ความจุของแบตเตอรี่มักวัดเป็นแอมแปร์-ชั่วโมง การวัดความจุโดยให้เวลาคงที่ แล้ววัดกระแสไฟฟ้าที่จ่ายออกมาในช่วงเวลาดังกล่าว

2.1.2 ประเภทของแบตเตอรี่

วัสดุที่นำมาทำแผ่นธาตุบวก(Anode) มีหลายชนิด เช่น ตะกั่ว แคดเมี่ยมแมกนีเซียมและสังกะสี ซึ่งเป็นสารที่ปล่อยอิเล็กตรอนได้ง่าย ส่วนแผ่นลบ(Cathode) อาจทำด้วยตะกั่วออกไซด์ นิเกิล ปรอท และเงิน ซึ่งจะรับอิเล็กตรอนได้ง่าย จากคุณสมบัติที่ใช้วัสดุต่างกัน เราจึงแบ่งแบตเตอรี่ออกเป็นสองประเภท คือ

1. แบตเตอรี่แบบปฐมภูมิ เป็นแบตเตอรี่ที่ใช้งานได้ครั้งเดียวเมื่อจ่ายไฟหมดแล้วต้องทิ้งไปไม่สามารถอัดไฟกลับเข้าไปได้อีก เช่น แบตเตอรี่ที่ทำจาก สังกะสี-คาร์บอน ปรอท และลิเที่ยม
2. แบตเตอรี่แบบทุติยภูมิ เป็นแบตเตอรี่ที่เมื่อใช้ไฟหมดแล้วสามารถนำมาอัดประจุใช้ได้ใหม่ เช่น แบตเตอรี่ที่ทำจากตะกั่ว-กรด นิเกิล-แคดเมียม ซึ่งมีราคาแพงและอีกชนิดคือ แบบเงิน-สังกะสีราคาแพงมากแต่ใช้ไฟมากที่สุด

2.2 แบตเตอรี่แบบตะกั่ว-กรด

แบบเตอรี่ที่นำมาใช้งานในโครงงานนี้เป็นแบตเตอรี่แบบตะกั่ว-กรดซึ่งเราจกล่าวถึงแบตเตอรี่แบบต่างๆ อย่างคร่าวๆดังนี้

การแบ่งชนิดของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด

แบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด(Lead-Acid) สามารถที่จะแบ่งตามลักษณะการใช้งาน อายุของแบตเตอรี่ตลอดจนค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำยาอิเล็กโตรไลต์ออกเป็น 2 ชนิดคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1 แบตเตอรี่แบบเพาเวอร์ดี(Power-D)

ซึ่งแบตเตอรี่ชนิดนี้เป็นแบบที่ผลิตเองในประเทศเป็นส่วนมากเช่น ขององค์กรแบตเตอรี่กระทรวงกลาโหม เป็นต้น แบตเตอรี่ชนิดนี้เราเรียกกันว่า 1ชุดหรือ 1หม้อ ภายในของแบตเตอรี่ 1หม้อจะประกอบไปด้วยช่องของกรุ๊ปเซลล์แบตเตอรี่ ซึ่งมีขนาดต่างๆ ดังนี้คือ ขนาด 3 ช่องและขนาด 6 ช่อง ใน 1 ช่องแบตเตอรี่ชนิดนี้ประกอบด้วยกรุ๊ปของแผ่นเพลทบวกและลบ บรรจุอยู่ในช่องเซลล์และใน 1 ช่องเซลล์มีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเท่ากับ 2 โวลท์ ดังนั้น 3 ช่องเซลล์และ 6 ช่องเซลล์มี่แรงเคลื่อนไฟฟ้าเท่ากับ 6 และ 12 โวลท์ตามลำดับ การบรรจุเซลล์ลงในชุดของแบตเตอรี่ทำได้โดยการนำเอากรุ๊ปของเซลล์มาวางลงในหม้อเซลล์ แล้วนำเซลล์มาต่ออนุกรมกันแล้วเทยางมะตอยสีดำปิดด้านบน แต่จะมีขั้วบวกของเซลล์แรกและขั้วลบของเซลล์สุดท้าย โผล่ออกมาเพื่อเป็นจุดต่อนำเอาพลังงานของแบตเตอรี่นี้ไปใช้งานส่วนน้ำยาอิเล็กโตรไลต์ที่ใช้เป็นค่าความถ่วงจำเพาะที่สูงมากหรือที่เราเรียกว่าเข้มข้นมาก แบตเตอรี่ชนิดนี้นิยมใช้กันเป็นส่วนมากในระบบที่ต้องการใช้กระแสสูงๆในระยะอันสั้นเช่น ในงานสตาร์ทเครื่องยนต์ในรถยนต์ เป็นต้น แบตเตอรี่ชนิดนี้ไม่เหมาะที่จะเป็นแหล่งจ่ายพลังงานที่มาตรฐาน เช่น ในระบบควบคมกลไกต่างๆและในระบบสื่อสารเป็นต้น

2.2.2 แบตเตอรี่ชนิดสเตชั่นนารี่(Station Batterry)

เป็นแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดเหมือนชนิดที่หนึ่ง ทั้งสูตรของน้ำยาอิเล็กโตรไลต์แต่แบตเตอรี่แบบนี้ใช้ค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำยาระหว่าง1.200เท่านั้น แบตเตอรี่ชนิดนี้ภายในหนึ่งชุดประกอบด้วยแผ่นเพลทบวกและลบ ที่บรรจุอยู่ในกล่องใส่เซลล์ประกอบกันแล้วเราเรียกว่า 1 เซลล์โดยในหนึ่งเซลล์มีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเท่ากับ 2 โวลท์ แบตเตอรี่ชนิดนี้มีการใช้งานยาวนานมาก อยู่ระหว่าง 15-20 ปี ดังนั้นแบตเตอรี่ชนิดนี้จึงเหมาะที่จะใช้เป็นแหล่งจ่ายพลังงานที่มาตรฐาน ทั้งในระบบควบคุมห้องกลไกลและระบบสื่อสาร ดังนั้นแบตเตอรี่ชนิดที่ 2 นี้มีการใช้งานกันมากในการไฟฟ้าฝ่ายผลิตเพื่อที่จะทำให้แบตเตอรี่ชนิดนี้มีอายุการใช้งานอย่างยาวนานและคุ้มค่าต่อราคาของแบตเตอรี่เนื่องจากมีราคาแพงมาก ถ้าหากผู้ใช้งานมีการบำรุงรักษาไม่ถูกต้องตามรักการ จะทำให้อายุการใช้งานของแบตเตอรี่ลดลง ในที่นี้ขอกล่าวเฉพาะชนิดสเตชั่นนารี่เท่านั้น

2.3 หลักการทำงานของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด

การเกิดพลังงานของแบตเตอรี่ในทางเคมีจนเกิดกระแสไฟฟ้านั้น เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างวัสดุ(Active Material) หรือที่เราเรียกกันว่า น้ำยาอิเล็กโตรไลต์ เมื่อจุ่มแผ่นเพลทลงในน้ำยาอิเล็กโตรไลต์จะเกิดการแยกตัวหรือแตกตัว ทำให้เกิดเป็นไอออนบวกและไอออนลบขึ้นภายในเซลล์ไอออนนี้จากวัสดุแผ่นหนึ่งไปยังวัสดุอีกแผ่นหนึ่งโดยใช้น้ำยาอิเล็กโตรไลต์เป็นตัวกลางในขณะที่แบตเตอรีถูกดิสชาร์หรือที่เรียกว่าคายประจุ ไอออนลบจะวิ่งจากแผ่นเพลทลบไปยังแผ่นบวก ดังขบวนการปฏิกิริยาทางเคมีดังต่อไปนี้

$$Pb + 0.5O_2 + H_2SO_4 \Leftrightarrow PbSO_4 + H_2O \qquad 2.1$$

ในขั้นตอนสุดท้ายของการประจุจะเกิดออกซิเจนที่ขั้วบวก

$$H_2O \Leftrightarrow 0.5\,O_2 + 1H^- + 2e^- \qquad 2.2$$

ออกซิเจน จะถูกดูดซับที่ขั้วลบ ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$PbO_2 + Pb + H_2SO_4 \quad \Leftrightarrow \quad PbSO_4 \; PbSO_4 + PbO + H_2O \qquad 2.3$$

ปฏิกิริยาการเกิดก๊าซและการดูดซับก๊าซ อธิบายโดยสมการ

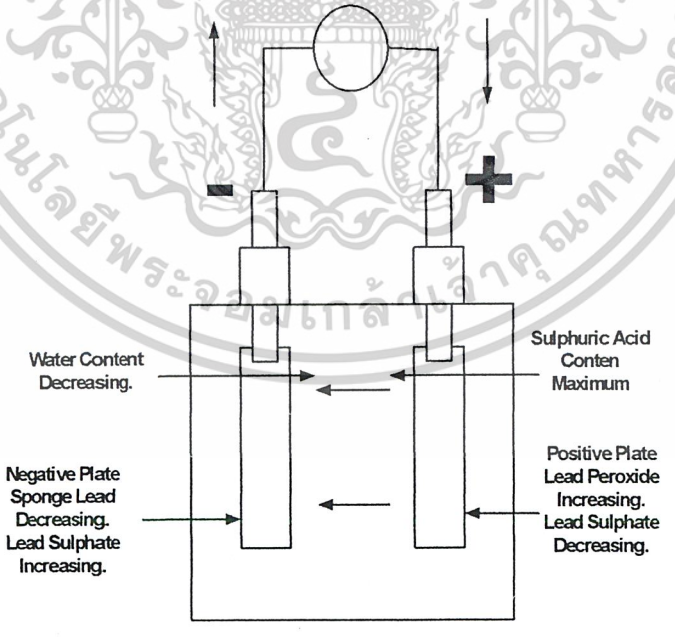
$$\text{(Anode)} \quad PbSO_4 \quad \Leftrightarrow \quad PbSO_4 \quad \Leftrightarrow \quad O_2 \qquad 2.4$$

$$\text{(Cathod)} \quad PbSO_4 \quad \Leftrightarrow \quad PbO_2 \qquad 2.5$$

ออกซิเจนที่เกิดจากขั้วบวกจะถูกขั้วลบดูดซับแล้วเกิดปฏิกิริยาแต่ออกซิเจนบางส่วนจะค่อยๆเพิ่มขึ้นจนความดันสูง แบตเตอรี่จะมีช่องระบายความดันก๊าซนี้เรียกว่า วาล์วระบายก๊าซ(Safety Valve) สำหรับก๊าซไฮโดรเจนก็เกิดขึ้นเช่นกัน เมื่อมีการอัดประจุเกินที่ขั้วลบ

$$2H^+ + 2e^- \quad \Leftrightarrow \quad H_2 \qquad 2.6$$

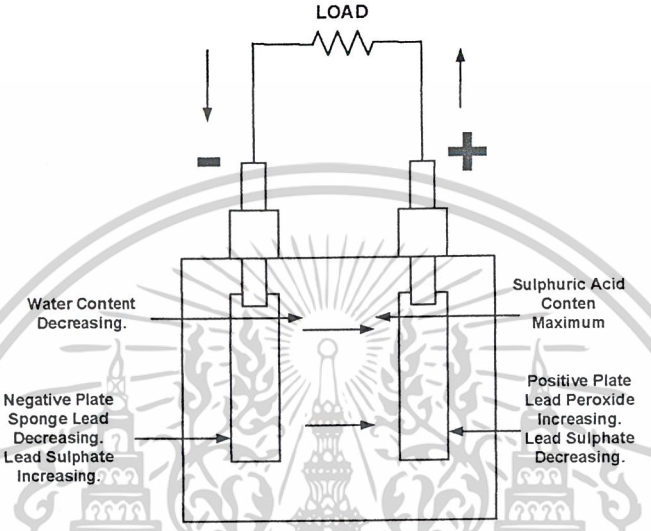
จากสมการ 2.3 แสดงการทำงานในทางเคมีของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดในขณะที่แผ่นเพลทจุ่มอยู่ในน้ำยาอิเล็กโตรไลต์ ในลักษณะที่มีประจุเต็ม จากปฏิกิริยาทางเคมีจะทำให้แผ่นบวกเป็นลีดเปอร์อ็อกไซด์(Lead per Oxide) หรือ PbO_2 และแผ่นลบเป็นสปองลีด(Spong Lead) หรือ Pb จะทำให้ปริมาณเนื้อกรดภายในเซลล์ของแบตเตอรี่หลุดออกมา รวมตัวกับน้ำซึ่งจะทำให้สภาพของน้ำยาอิเล็กโตไลท์ภายในเซลล์ของแบตเตอรี่นี้มีเนื้อกรดมากที่สุด จากปรากฏการณ์ที่กล่าวมานี้สรุปได้ว่าขณะที่แบตเตอรี่มีประจุเต็ม ค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำยาอิเล็กโตรไลต์ภายในเซลล์จะมีค่าสูงสุด การที่จะทำให้แบตเตอรี่มีสภาพประจุเต็มตลอดเวลา ทำได้โดยการให้แบตเตอรี่ได้รับแรงดันหรือการชาร์จ โดยให้มีการไหลของกระแสภายในวงจรแบตเตอรี่จากแผ่นเพลทบวกไปยังแผ่นเพลทลบอยู่ตลอดเวลา ในลักษณะนี้เราเรียกกันทั่วๆไปว่า การประจุแบตเตอรี่ด้วยเครื่องชาร์จ



รูปที่ 2.1 แสดงเซลล์ของแบตเตอรี่ในขณะที่มีการชาร์จ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในขณะที่เราทำการชาร์จแบตเตอรี่จะมีกระแสไหลในวงจรของแบตเตอรี่ ทำให้เกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า Electrolysis นั่นคือ น้ำที่เป็นส่วนผสมของน้ำยาอิเล็กโตรไลต์ ถูกแยกออกเป็นแก๊ซไฮโดรเจนและก๊าซออกซิเจน โดยระเหยออกมาทางช่องระบายอากาศสู่ภายนอกเซลล์การระเหยของก๊าซทั้งสองนี้ ทำให้เกิดการสูญเสียน้ำภายในเซลล์ ซึ่งส่งผลให้เราต้องเติมน้ำกลั่นลงในระหว่างที่แบตเตอรี่ใช้งานอยู่



รูปที่ 2.2 แสดงการดิสชาร์จของแบตเตอรี่

จากรูปที่ 2.2 แสดงถึงเซลล์แบตเตอรี่ที่ถูกดิสชาร์จหรือการที่ทำให้เกิดกระแสไหลในวงจร แบตเตอรี่ไหลจากแผ่นเพลทบวก ซึ่งจะทำให้น้ำยาอิเล็คโตรไลต์แตกตัวออกไปเป็นไฮโดรเจนและซัลเฟต หรือ SO_4 ไฮโดรเจนที่แตกตัวออกมานี้จะไปทำปฏิกิริยากับแผ่นเพลททั้งสองทำให้เกิดน้ำ ส่วนซัลเฟตจะไปทำปฏิกิริยากับแผ่นเพลททั้งสองเช่นกัน ทำให้แผ่นเพลทลบเป็นลีดซัลเฟตหรือ $PbSO_4$ และแผ่นบวกเป็นลีดซัลเฟตเช่นกัน หรือนั่นคือมีซัลเฟตเกาะจับที่แผ่นเพลททั้งสอง ปริมาณซัลเฟตนี้จะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เป็นลำดับตราบเท่าที่แบตเตอรี่มีการดิสชาร์จอยู่ การดิสชาร์จแบตเตอรี่จะไม่เกิดผลเสียก็ต่อเมื่อซัลเฟตที่เกาะจับแผ่นเพลทลบ และบวกมีปริมาณเท่ากัน นั่นคือการทำปฏิกิริยาระหว่างแผ่นเพลทกับน้ำยาอิเล็กโตรไลต์จะหยุดทันทีในสภาวะเช่นนี้ น้ำยาอิเล็กโตรไลต์จะมีสภาพเป็นน้ำในขณะที่เราทำการชาร์จแบตเตอรี่อยู่นั้น จะพบว่าโวลท์เตจภายในเซลล์แบตเตอรี่จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ในขณะเดียวกันค่าความถ่วงจำเพาะของแบตเตอรี่จะลดลงมาเช่นกัน ดังนั้นเราจึงพอที่จะสรุปได้ว่าขณะที่แบตเตอรี่ถูกดิสชาร์จจนหมดตัว (Full Discharge) ค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำยาอิเล็กโตรไลต์จะมีค่าต่ำสุดหรือมีสภาพกลายเป็นน้ำนั่นเอง

ในการดิสชาร์จเซลล์แบตเตอรี่ในแต่ละครั้ง จงพยายามอย่าให้โวลต์เตจตกคร่อมภายในเซลล์แบตเตอรี่โดยค่าเฉลี่ยแล้วต่ำกว่า 1.75 โวลท์ต่อเซลล์ ทั้งนี้เพราะจะทำให้ซัลเฟตที่เกาะจับแผ่นเพลทมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริมาณซึ่งจะทำให้เป็นการยุ่งยาก ในเวลาที่เราจะทำการชาร์จ หรือใช้เวลาในการชาร์จนานนั่นเอง และอีกประการหนึ่งถ้าการคิสชาร์จแบตเตอรี่ต่ำกว่า 1.75 โวลท์ต่อเซลล์บ่อยครั้งจะส่งผลทำให้อายุการทำงานของแบตเตอรี่ลดลง

2.4 ขนาดโวล์ทเตจของเซลล์แบตเตอรี่

ขนาดโวล์ทเตจสำหรับเซลล์แบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดที่มาตรฐาน ไม่ว่าจะเป็นบริษัทใด ๆ สร้างก็ตาม จะมีค่าแรงเคลื่อนทางไฟฟ้าหรือโวล์ทเตจปกติเท่ากับ 2 โวลต์ต่อเซลล์ เมื่อวงจรปิด

เราจะเห็นว่าโวล์ทเตจขนาด 2 โวล์ตนับว่าเป็นขนาดโวล์ทเตจที่น้อยมาก ไม่เพียงพอที่จะนำไปใช้งานได้ ดังนั้น การที่เราจะนำแบตเตอรี่ไปใช้งานทำได้โดยการนำเอาแบตเตอรี่หลาย ๆ เซลล์มาต่อกันในลักษณะอนุกรม โดยการต่อแบบขั้วบวกของเซลล์ที่ 1 ต่อกับขั้วลบของเซลล์ที่ 2 และต่อกันในลักษณะเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ จนมีขนาดของโวล์ทเตจเพียงพอกับความต้องการ ผลสุดท้ายจะเหลือขั้วบวกของเซลล์ที่ 1 และขั้วลบของเซลล์ที่สุดท้าย ขั้วทั้งสองที่กล่าวมานี้เป็นจุดต่อที่จะนำเอาพลังงานไปใช้งาน

จำนวนต่อเซลล์	ขนาดของโวลท์เตจ (volt)
3	6
6	12
12	24
24	48
30	60
60	120
120	240

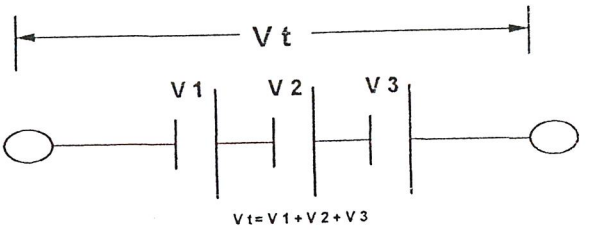
ตารางที่ 2.1 ขนาดของเซลล์แบตเตอรี่และขนาดของโวลท์เตจ

2.5 การนำเซลล์แบตเตอรี่ไปใช้งาน

เซลล์แบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด ไม่ว่าจะเป็นบริษัทใด ๆ ผลิตขึ้นก็ตาม มีค่าแรงดันท่ากับ 2 โวลท์ต่อเซลล์ ดังนั้นการนำเอาเซลล์แบตเตอรี่ไปใช้งานทำได้ดังนี้

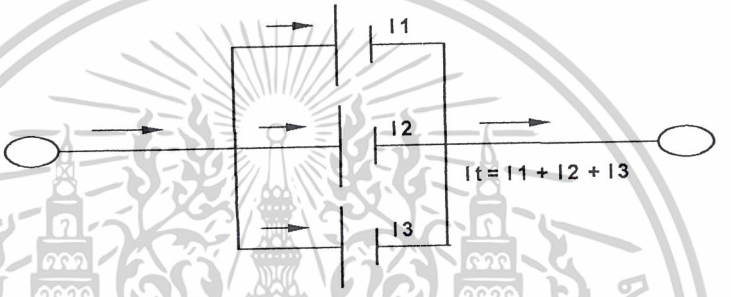
1. ในกรณีที่ต้องการเพิ่มค่าโวลท์เตจทางไฟฟ้าให้สูงขึ้นทำได้โดยการนำเอาเซลล์แบตเตอรี่หลาย ๆ เซลล์มาต่อกันในลักษณะอนุกรม ค่าโวลท์เตจทางไฟฟ้าที่ได้คือผลรวมของแรงดันหรือโวลท์เตจของทุก ๆ เซลล์รวมกัน ในการต่อแบบนี้จะใช้ขั้วบวกของเซลล์ที่ 1 ต่อเข้ากับขั้วลบของเซลล์ที่ 2 ต่อกันไปเรื่อย ๆ จนได้โวลท์เตจเพียงพอกับความต้องการ ผลสุดท้ายจะเหลือขั้วลบของเซลล์ที่ 1 และขั้วบวกของเซลล์สุดท้ายขั้วทั้งสองนี้เป็นจุดต่อที่จะนำเอาพลังงานของแบตเตอรี่ไปใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 ก

2. ในกรณีที่ต้องการค่ากระแสไฟฟ้าสูง ๆทำได้โดยการนำเอาเซลล์แบตเตอรี่หลาย ๆ เซลล์มาต่อกันในลักษณะขนานกัน ค่าของกระแสรวมที่ได้คือ ค่ารวมของกระแสในแต่ละเซลล์รวมกัน



รูปที่ 2.3 ข

2.6 ค่าความจุของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด

ค่าความจุของแบตเตอรี่หรือ Capacity หมายถึง อัตราการจ่ายกระแสสูงสุดจนแบตเตอรี่ไม่สามารถจ่ายกระแสได้อีกต่อไป ค่าความจุของแบตเตอรี่มีหน่วยเป็นแอมแปร์ต่อชั่วโมง(Ampere per Hours;AH) ค่าความจุของแบตเตอรี่ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบต่าง ๆ ต่อไปนี้

1. ปริมาณของแผ่นเพลท หรือความกว้างและความยาวของแผ่นเพลท โดยเฉพาะแผ่นเพลทยิ่งมีความกว้างและยาวมากค่าความจุของแบตเตอรี่จะยิ่งสูงมาก

2. จำนวนของแผ่นเพลท ที่นำมารวมกันเป็นเพลทกรุ๊ปของเซลล์แบตเตอรี่ เช่น แบตเตอรี่ที่มีแผ่นเพลทบวกและลบรวมกันเท่ากับ 15 แผ่น แต่จำนวนแผ่นเพลทลบจะมีค่ามากกว่าแผ่นเพลทบวกอยู่หนึ่งแผ่นเสมอดังนั้นเมื่อแยกกรุ๊ปของแผ่นเพลททั้งสองจะได้จำนวนของแผ่นเพลทลบเท่ากับ 8 แผ่นและแผ่นเพลทบวกเท่ากับ 7 แผ่น

3. น้ำหนักของตะกั่ว-กรด ที่นำมาทำแผ่นเพลท ฉะนั้นแผ่นเพลทของแบตเตอรี่ยิ่งมีน้ำหนักมากแสดงว่าปริมาณเนื้อตะกั่ว-กรดที่นำมาทำแผ่นเพลทมาก ดังนั้นน้ำหนักแผ่นเพลทยิ่งมาก ค่าความจุของแบตเตอรี่ยิ่งสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 การชาร์จแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด

การชาร์จแบตเตอรี่ คือ การนำไฟฟ้ากระแสตรงจากแหล่งภายนอกมาประจุให้แบตเตอรี่เพื่อที่จะเปลี่ยนพลังงานทางไฟฟ้ามาเป็นพลังงานทางเคมี กระแสไฟฟ้าที่จ่ายเข้าไปนี้จะขับเนื้อกรดในแผ่นเพลททั้งลบและบวกให้หลุดออกมานี้จะกลับไปรวมตัวกับน้ำ ทำให้สภาพของน้ำยาอิเล็กโตรไลท์ของแบตเตอรี่มีความพร้อมที่จะจ่ยพลังงานออกมาในเวลาที่เราต้องการใช้งาน

ระบบการชาร์จแบตเตอรี่แบบตะกั่ว-กรด โดยทั่วไปเราจะใช้การชาร์จแบบโวลท์เตจคงที่ การชาร์จแบบนี้คือการทำให้โวลท์เตจหรือแรงดันของเครื่องชาร์จคงที่อยู่ตลอดเวลาที่ทำการชาร์จ ส่วนปริมาณของกระแสในการชาร์จเข้าวงจรแบตเตอรี่ จะเริ่มต้นจากปริมาณกระแสสูงสุดในช่วงแรกของการชาร์จและเริ่มลดลงเรื่อย ๆ จนแบตเตอรี่เติม

2.8 ระดับโวลท์เตจในการชาร์จแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด

ระดับโวลท์เตจในการชาร์จแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดโดยทั่ว ๆไปจะแบ่งออกเป็น 2 ระดับคือ

1. ระดับโวลท์เตจปกติ (Float Charge)
2. ระดับโวลท์เตจรุนแรง (Equalize Charge)

2.8.1 ระดับโวลท์เตจปกติ (Float Charge)

คือ การชาร์จระดับนี้นับว่ามีความสำคัญอย่างมากต่ออายุของแบตเตอรี่ เช่น ถ้าเราใช้โวลท์เตจในการชาร์จสูงเกินไป จะไม่เป็นผลดีกับแบตเตอรี่ เพราะจะทำให้แผ่นเพลทของแบตอรีร่ป่งบวมและคดงอในภายหลังตลอดจนการเกิดตะกอนร่วงหล่นที่ก้นเซลล์จะมีปริมาณมากกว่าปกติ จนเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้แบตเตอรี่เสียเร็วกว่าที่ควรจะเป็นในทำนองเดียวกันถ้าเราตั้งระดับโวลท์เตจในการชาร์จต่ำกว่ากำหนด จะทำให้แบตเตอรี่ได้รับโวลท์เตจในการชาร์จไม่เพียงพอ ไม่สามารถที่จะชดเชยกระแสที่สูญเสียที่เกิดขึ้นภยในเซลล์ของแบตเตอรี่ กระแสสูญเสียนั้นเราเรียกว่า Self Discharge และ Local Action ดังนั้นถ้าเราปล่อยให้แบตเตอรี่ได้รับโวลท์เตจในระดับนี้นาน ๆ จะทำให้แผ่นเพลททั้งสองของแบตเตอรี่เกิดซัลเฟตเกาะจับจนเป็นสาเหตุให้แบตเตอรี่ทำให้แบตเตอรี่เกิด Under Charge ขึ้นได้ การเกิด Self Discharge หรือ Local Action จะมีแบตเตอรี่ทุก ๆ ชนิดอันเนื่องมาจากสารโลหะที่เป็นส่วนผสมของแผ่นเพลทและความชื้นของอากาศ ดังนั้นการชาร์จในระดับนี้จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องปรับระดับโวลท์เตจในการชาร์จ ให้ถูกต้องอยู่ตลอดเวลาที่แบตเตอรี่ใช้งานอยู่ การปรับระดับโวลท์เตจที่ Float Charge ของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดจะใช้โวลท์เตจระหว่าง 2.15-2.20 โวลท์ต่อเซลล์ เช่น แบตเตอรี่ขนาด 24 เซลล์ โวลท์เตจที่ใช้ในการชาร์จจะเท่ากับ 2.15 คูณกับ 24 เท่ากับ 52.8 โวลท์ การหาโวลท์เตจในระดับ Float Charge ในแต่ละชุดของแบตเตอรี่จะเท่ากับระดับโวลท์เตจในการชาร์จต่อเซลล์ด้วยจำนวนเซลล์ของแบตเตอรี่ในชุดนั้น ๆ

2.8.2 ระดับโวลท์เตจรุนแรง(Equalize Charge)

การที่เราชาร์จแบตเตอรี่ในระ Float Charge อย่างเดียวเป็นระยะเวลานาน ๆ ยังไม่เพียงพอที่จะรักษาแบตเตอรี่ ให้อยู่ในสภาพที่สมบูรณ์ซึ่งเพียงพอที่จะสรุปเหตุผลย่อ ๆ ได้ดังนี้

ในระดับโวลท์เตจการชาร์จที่ Float Charge ไม่สามารถที่จะแก้ Self Discharge และ Local Action ได้ 100 เปอร์เซ็นต์ ทำให้โวลท์เตจที่ตกคร่อมเซลล์เกิดการแตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เซลล์บางเซลล์ของแบตเตอรี่ได้รับความร้อน และความเย็นจากอุณหภูมิโดยรอบเซลล์แบตเตอรี่ไม่เท่ากันซึ่งจะทำให้อุณหภูมิของน้ำยาอิเล็กโตรไลท์ภายในเซลล์ทุก ๆ ตารางนิ้วไม่เท่ากัน

ขั้วต่อแบตเตอรี่บางส่วนได้รับโวลท์เตจที่ตกคร่อมไม่เท่ากัน อันเนื่องมาจากความขันความตึงแน่นของขั้วแบตเตอรี่มีค่าไม่เท่ากัน

การทำ Equalize Charge คือการเพิ่มระดับโวลท์เตจในการชาร์จให้สูงกว่าระดับ Float Charge ซึ่งจะทำให้แบตเตอรี่มีการไหลของกระแสสูงขึ้น เพื่อเป็นการแก้การสูญเสียภายในวงจรแบตเตอรี่ทั้งหมด และจะทำให้แบตเตอรี่มีประจุเต็มพร้อมที่จะเป็นตัวจ่ายพลังงานในเวลาที่เราต้องการใช้งาน ระดับโวลท์เตจที่เราใช้ในการทำ Equalize Charge ใช้โวลท์เตจที่ 2.33 โวลท์ต่อเซลล์ เช่นแบตเตอรี่ 24 เซลล์ จะใช้โวลท์เตจในการชาร์จเท่ากับ 24 คูณ 2.33 จะมีค่าเท่ากับ 55.9 โวลท์

เพื่อไม่ให้มีการปรับระดับโวลท์เตจในการชาร์จแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดเกิดการผิดพลาด และเกิดปัญหาขึ้นกับแบตเตอรี่ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ขอให้ดูตารางที่ 2.2 โวลท์เตจในการชาร์จนี้เป็นหลักในการปรับเครื่องชาร์จ

จำนวนเซลล์	ระดับโวลท์เตจในการชาร์จ (Volts)	
	Float	Equalize
6	12.9	14.7
12	25.8	25.97
24	51.6	55.92
48	103.2	111.84
60	129	139.8
120	258	279.6

ตารางที่ 2.2 ระดับโวลท์เตจในการชาร์จแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด

หมายเหตุ ระดับโวลท์เตจ Float Charge ใช้ในโวลท์เตจเท่ากับ 2.15 โวลท์ต่อเซลล์ระดับโวลท์เตจ Equalize Charge ใช้โวลท์เตจเท่ากับ 2.45 โวลท์ต่อเซลล์

2.8.2.1 สภาวะการทำงานของ Equalize Charge

- ทุก ๆ วันสิ้นเดือน ๆ ละหนึ่งครั้ง
- หลังจากที่ไฟ AC Line ที่จ่ายให้กับแบตเตอรี่ชาร์จเจอร์ดับนานกว่า 3 ชั่วโมง เพราะระหว่างไฟ AC ดับแบตเตอรี่จะถูกจ่ายกระแสให้กับโหลดทั้งหมดที่วงจรแบตเตอรี่ต่ออยู่ ซึ่งจะทำให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบตเตอรี่เสียพลังงานที่สะสมไว้ ฉะนั้นหลังจากที่ไฟ AC เข้าสู่สภาวะปกติจะต้องทำการ Equalize Charge ทันที

- เมื่อตรวจพบว่าในชุดเซลล์แบตเตอรี่มีความแตกต่างในระดับโวลท์เตจเกินกว่า 0.05 โวลท์หรือมากกว่านี้
- เมื่อตรวจพบว่าค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำยาอีเล็กโตรไลท์ในชุดแบตเตอรี่ มีความแตกต่างกันมากกว่า 0.02 โวลท์

2.8.2.2 ระยะเวลาในการทำ Equalize Charge

ระยะเวลาในการทำ Equalize Charge ขึ้นอยู่กับสภาวะของแบตเตอรี่และสามารถสังเกตุได้ดังนี้

- มีฟองอากาศผุดขึ้นภายในชุดของเซลล์ของเซลล์ทุก ๆ เซลล์ใกล้เคียงกัน
- ระดับโวลท์เตจที่ตกคร่อมเซลล์แตกต่างกันไม่เกิน 0.01 โวลท์
- กระแสที่ไหลในวงจรแบตเตอรี่ที่อ่านได้จากแอมมิเตอร์ที่เครื่องชาร์จมีค่าต่ำสุด
- แผ่นเพลทลบของเซลล์แบตเตอรี่มีสีส้ม

จากข้อมูลที่กล่าวมานี้จึงพอที่จะสรุประยะเวลาที่ใช้ในการทำ Equalize Charge ในแต่ละครั้ง และทำให้แบตเตอรี่มีประจุสมบูรณ์สูงที่สุด โดยจะใช้เวลาระหว่าง 8-12 ชั่วโมง ซึ่งนับว่าเป็นการเพียงพอที่จะแก้ไขปัญหาต่าง ๆ

1. การทำ Equalize Charge ในทุก ๆ ครั้งควรจะตั้งเวลาในการชาร์จให้เหมาะสมโดยระวังอย่าให้การทำ Equalize Charge นานเกินไปเพราะจะทำให้แผ่นเพลทของแบตเตอรี่เกิดการคดงอ ตลอดจนเป็นการเปลืองน้ำโดยเปล่าประโยชน์ด้วยระบบ Electrolysis หรือการแยกน้ำออกเป็นแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจน

2.9 ระดับของโวลท์เตจที่กระทบกระเทือนต่ออายุของแบตเตอรี่

การปรับระดับโวลท์เตจในการชาร์จแบตเตอรี่นับว่าเป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างมาก ถ้าหากการปรับระดับโวลท์เตจในการชาร์จไม่ถูกต้อง ในขณะที่มีการชาร์จปกติประจำทุกๆวันแบตเตอรี่จะได้รับโวลท์เตจในการชาร์จโดยตรงจากแบตเตอรี่อยู่ตลอดเวลา จะทำให้แบตเตอรี่เกิดการเสียหายขึ้นใน 2 ลักษณะคือ

2.9.1 Under Charge

คือการใช้โวลท์เตจในการชาร์จแบตเตอรี่ในระดับ Float Charge ต่ำกว่า 2.15 โวลท์ต่อเซลล์ ถ้าหากใช้โวลท์เตจในการชาร์จระดับนี้ไปนาน ๆ จะทำให้เกิดซัลเฟตเกาะจับที่บริเวณแผ่นเพลททั้งบวกและลบ หากทิ้งไว้นานวันปริมาณซัลเฟตนี้ จะเพิ่มมากขึ้นจนเป็นสาเหตุทำให้การทำปฏิกิริยาระหว่างแผ่นเพลทบวกและลบกับน้ำยาอีเล็กโตรไลท์ ทั้งการชาร์จและการดิสชาร์จเป็นไปด้วยความยากลำบาก ส่งผลให้ Capacity ของแบตเตอรี่ลดลงตามลำดับ ถ้าหากทิ้งไว้นานวันจะส่งผลกระทบกระเทือนต่ออายุของแบตเตอรี่ ดังนั้นหากตรวจพบว่าแบตเตอรี่เกิดอันเดอร์ชาร์จขึ้นต้องรีบแก้ไขโดยเร็ว การเกิดอันเดอร์ชาร์จสังเกตได้ดังนี้

- มีการปรับระดับน้ำยาอีเล็กโตรไลท์น้อยครั้งที่สุด ในระยะเวลาอันยาวนานหรือไม่มีการเติมน้ำกลั่นเลยตลอดเวลาที่แบตเตอรี่ใช้งานอยู่
- มีฟองอากาศผุดขึ้นภายในเซลล์น้อยที่สุดหรือน้อยกว่าปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สีของแผ่นเพลทแบตเตอรี่ที่แผ่นเพลทลบมีสีขาวเกาะจับ
- ค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำยาอีเล็กโตรไลท์ในเซลล์ต่ำกว่า 1.180
- วัดโวลท์เตจตกคร่อมในแต่ละเซลล์ต่ำกว่า 2.15 โวลท์
- ความร้อนในเซลล์แบตเตอรี่ต่ำกว่าปกติ

2.9.2 Over Charge

คือการใช้โวลท์เตจในการชาร์จแบตเตอรี่ในระดับ Float Charge สูงกว่า 2.15 โวลท์ต่อเซลล์ซึ่งเป็นระดับโวลท์เตจที่สูงกว่าปกติ ทำให้เกิดกระแสไหลในวงจรแบตเตอรี่สูงทำให้การทำปฏิกิริยาระหว่างน้ำยาอีเล็กโตรไลท์กับแผ่นเพลทเป็นไปอย่างรุนแรงและรวดเร็วกว่าปกติ ซึ่งทำให้แผ่นเพลททั้งสองเกิดการสึกกร่อนอย่างรวดเร็ว ทำให้อายุการใช้การใช้งานลดลง

2.10 การชาร์จแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด

การชาร์จประจุแบตเตอรี่โดยทั่วไปเป็นการนำแหล่งจ่ายไฟ AC จากแหล่งภายนอก เช่นเครื่องชาร์จ DC. Generator มาอัดประจุพลังงานไฟฟ้าให้กับแบตเตอรี่ เป็นต้น การชาร์จแบตเตอรี่ที่มีอยู่ด้วยกัน 2 แบบ คือ

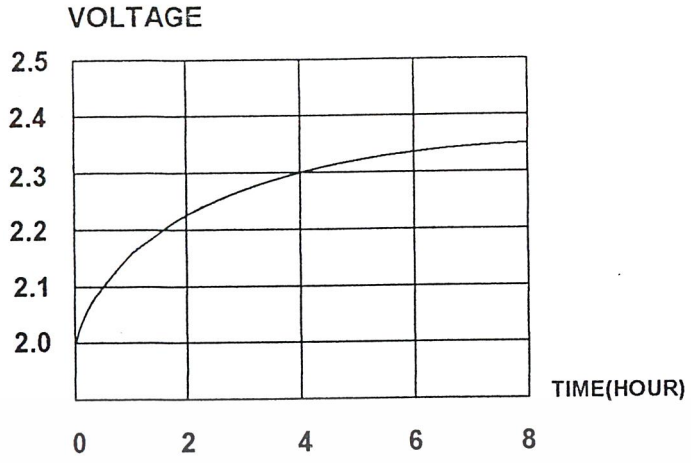
2.10.1 การชาร์จแบบกระแสคงที่ (Constant Current Charge)

การชาร์จแบบนี้จะใช้ระยะเวลานานกว่าการชาร์จแบบคงที่ทั้งนี้ เพราะการชาร์จแบบกระแสคงที่จะถูกกำจัดปริมาณการชาร์จของกระแสในการชาร์จ จากเครื่องชาร์จเข้าสู่แบตเตอรี่ เป็นจำนวนแอมแปร์ต่อชั่วโมงดังนั้นแบตเตอรี่จะได้รับกระแสในการชาร์จเป็นไปตามที่กำหนด ซึ่งถ้าตั้งกระแสในการชาร์จให้สูงขึ้นแม้ว่าจะเป็นการลดระยะเวลาในการชาร์จลง แต่ก็จะก่อให้เกิดผลเสียกับแบตเตอรี่คือจะทำให้เกิดความร้อนขึ้นภายในเซลล์ของแบตเตอรี่ ซึ่งจะสูงขึ้นตามปริมาณของกระแสที่ทำการชาร์จและในที่สุดผ่นเพลทของแบตเตอรี่ที่เป็น Active Material ของเซลล์แบตเตอรี่จะเกิดการคดงอแตกหรือเกิดรอยร้าวอันเนื่องมาจากความร้อนนี้ หรืออาจเกิดระเบิดขึ้นได้ ส่วนการชาร์จแบบกระแสคงที่มีข้อดีที่เกิดขึ้นกับแบตเตอรี่คือจะทำให้เซลล์ทุก ๆ เซลล์ในชุดของแบตเตอรี่ได้รับการประจุกระแสในการชาร์จที่มีสัดส่วนเท่ากันทุก ๆ เซลล์ตลอดชุดของแบตเตอรี่ เหตุผลที่ทำให้การชาร์จแบบกระแสคงที่ใช้เวลานานด้วยเหตุผลดังนี้

1. ขึ้นอยู่กับค่าความจุหรือขนาดของแบตเตอรี่ที่นำมาทำกรชาร์จ
2. ขึ้นอยู่กับปริมาณของกระแสที่ทำการชาร์จ
3. ขึ้นอยู่กับสภาพของแบตเตอรี่ก่อนที่จะทำการชาร์จ

จากการชาร์จแบบกระแสคงที่ เราไม่ได้กล่าวถึงโวลท์เตจที่ชาร์จแบตเตอรี่เลยอย่างไรก็ตามโดยทั่วไปในขณะที่ทำการชาร์จแบตเตอรี่อยู่นั้น ระดับโวลท์เตจที่เซลล์ของแบตเตอรี่จะควบคุมจาก END OF CELL จนถึงประมาณ 2.33 โวลท์ต่อเซลล์ซึ่งสามารถจะแสดงได้ดังรูป

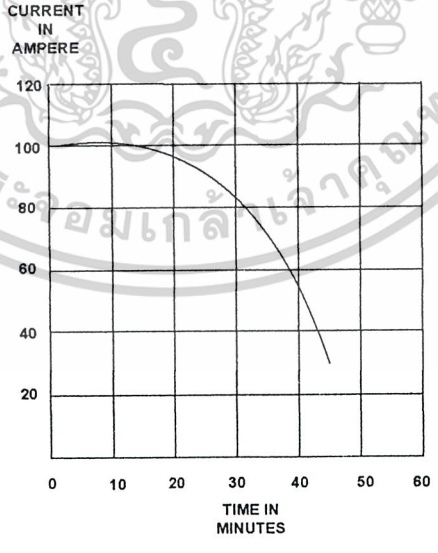
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 แสดงการเปลี่ยนแปลงของโวลท์เตจในการชาร์จแบบกระแสคงที่

2.10.2 การชาร์จแบบโวลท์เตจคงที่

จากที่เราได้ศึกษามาแล้วว่า การชาร์จแบบกระแสคงที่เราจะทำการชาร์จอย่างรวดเร็วไม่ได้ต่อไปนี้เราจะศึกษาถึงการชาร์จแบบโวลท์เตจคงที่ ในการชาร์จแบบนี้จะใช้ระยะเวลาในการชาร์จน้อยกว่าแบบแรก โดยระยะเวลาในการชาร์จจะเร็วกว่าเท่าไรนั้น ขึ้นอยู่กับความสามารถของเครื่องชาร์จจะต้องจ่ายกระแสออกมาได้ 50% ของค่าความจุของแบตเตอรี่ที่นำมาทำการชาร์จ เช่น แบตเตอรี่ขนาด 100 แอมแปร์ต่อชั่วโมงจะใช้เวลาในการชาร์จประมาณ 2 ชั่วโมง ซึ่งการชาร์จแบบโวลท์เตจคงที่สามารถแสดงได้ดังรูป



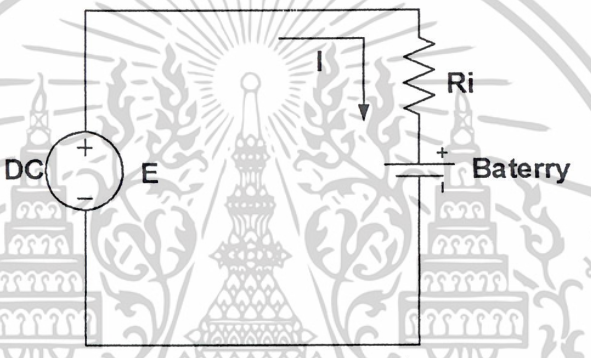
รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-เวลาในการชาร์จแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดแบบโวลท์เตจคงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การชาร์จแบตเตอรี่แบบโวลท์เตจคงที่ทำโดยการใช้เครื่องชาร์จหรือ Generator เป็นตัวกำหนดโวลท์เตจขึ้นมาแล้วป้อนเข้าแบตเตอรี่ แต่การกำเนิดโวลท์เตจจากเครื่องชาร์จหรือ Generator นั้นอาจจะมีโวลท์เตจที่ไม่คงที่ตลอดเวลาที่ทำการชาร์จ ดังนั้นเราจึงต้องหาวงจรที่ทำหน้าที่ในการรักษาระดับการชาร์จที่คงที่ให้แก่แบตเตอรี่ ซึ่งวงจรนี้เราเรียกกันทั่วไปว่า วงจรโวลท์เตจเร็คกูเลเตอร์ (Voltage Regulator) ซึ่งนับว่าเป็นวงจรที่มีความสำคัญมากในการชาร์จแบบโวลท์เตจคงที่

2.11 ทฤษฎีและหลักการการอัดประจุไฟฟ้าแบตเตอรี่

เครื่องอัดประจุแบตเตอรี่เป็นแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง ซึ่งจะให้ระดับแรงดันสูงกว่าระดับแรงดันของแบตเตอรี่ในขณะที่มีการเก็บประจุเต็ม ในการอัดประจุแบตเตอรี่จะให้ขั้วบวกของเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่ต่อเข้ากับขั้วบวกของแบตเตอรี่โดยที่กระแสที่ทำการชาร์จประจุแบตเตอรี่ จะมีทิศทางตรงหันข้ามกับกระแสที่แบตเตอรี่จ่ายออกมา ดังแสดงในรูป



รูปที่ 2.6 แสดงทิศทางการไหลของกระแสอัดประจุแบตเตอรี่

โดย E: แรงดันที่ทำการอัดประจุ

E_c : แรงดันที่ขั้วของแบตเตอรี่

R_I : ความต้านทานภายในเซลล์ของแบตเตอรี่

I : กระแสที่ใช้ในการอัดประจุ

จากรูปจะได้สมการ

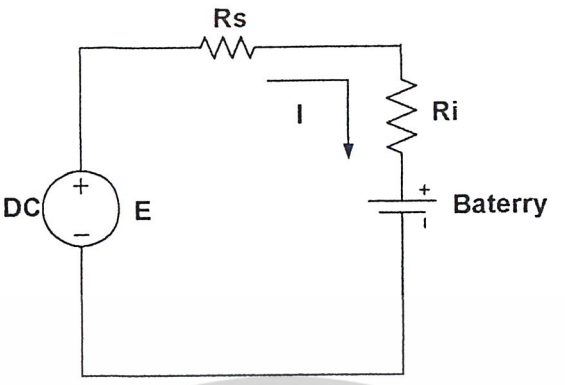
$$E = E_C + IR_I \qquad \ldots (2.7)$$

$$I = (E-E_C)/R \qquad \ldots (2.8)$$

เมื่อแรงดันที่แบตเตอรี่ (E_C) มีค่าเท่ากับแรงดันที่อัดประจุ (E) จะไม่มีกระแส (I) ไหลในวงจร ถ้าแรงดัน E_C ต่ำกว่าแรงดัน E จะทำให้มีกระแสไหลเพื่อเข้าไปทำการอัดประจุให้กับแบตเตอรี่ แต่ถ้าแรงดัน E_C สูงกว่าแรงดัน E กระแสจะถูกดิสชาร์จออกจากแบตเตอรี่ค่าความต้านทานภายใน (R_I) ของแบตเตอรี่ส่วนมากจะมีค่าน้อย ซึ่งมีหน่วยเป็นโอห์มโดยจะมีการเปลี่ยนแปลงไปในขณะที่มีการอัดประจุ โดยจะมีผลต่อปริมาณกระแสที่อัดประจุแบตเตอรี่ว่าจะมากหรือน้อย ถ้ากระแสในการอัดประจุแบตเตอรี่มีค่ามากเกินกว่าที่แบตเตอรี่จะทนได้ อาจจะทำให้ชำรุดได้ การลดปริมาณกระแสการอัดประจุแบตเตอรี่ให้

เอกสารนี้มีลิขสิทธิ์ ห้ามนำไปใช้ในการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่ำลง ทำได้โดยเอาความต้านทานต่ออนุกรมเข้าไปเพื่อที่จะกำจัดปริมาณกระแสที่ไหลได้ตามต้องการ ซึ่งวงจรจะมีลักษณะดังรูป



รูปที่ 2.7 แสดงรูปวงจรที่มีความต้านทานต่ออนุกรมเพื่อกำจัดกระแส

จากรูป 2.7 เราจะหาค่า R_S ได้ดังนี้

$$I = (E-E_c) / (R_S + R_I) \quad \ldots (2.9)$$

$$R_S = [(E-E_c) / I] - R_I \quad \ldots (2.10)$$

แบตเตอรี่แบบทุติยภูมิ อัตราการอัดประจุหรือการดิสชาร์จจะขึ้นอยู่กับความจุของแบตเตอรี่ พิกัดของกระแสในการอัดประจุแบตเตอรี่จะบอกเป็นชั่วโมง ฉะนั้นค่าของกระแสหาได้จากค่าของความจุซึ่งมีหน่วยเป็นแอมแปร์-ชั่วโมง (Ah) หารด้วยจำนวนชั่วโมง แต่ทั้งนี้ทั้งนั้นค่าความสัมพันธ์ของกระแสและชั่วโมงในการดิสชาร์จนี้จะไม่แปรผันตามกันตลอดเช่น แบตเตอรี่ 100 Ah ดิสชาร์จกระแส 5 แอมป์ ในเวลา 20 ชั่วโมงแต่ถ้าจ่าย 10 แอมป์ อาจจะใช้เวลาเพียง 7 ชั่วโมง หรือถ้าจ่ายกระแส 20 แอมป์ อาจจะใช้เวลาเพียง 3 ชั่วโมง เป็นต้น จะเห็นว่าถ้าจ่ายกระแสในปริมาณมาก ค่าพิกัดแอมป์-ชั่วโมง (Ah) ของแบตเตอรี่อาจจะมีค่าน้อยลงซึ่งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติการดิสชาร์จของแบตเตอรี่ (Rate of discharge) ซึ่งราคาของแบตเตอรี่ก็จะต่างออกไปด้วย

อีกสิ่งหนึ่งที่ต้องคำนึงถึงว่าค่ากระแสในการอัดประจุแบตเตอรี่ควรมีค่าเท่าใด นั่นก็คือค่ากำลังสูญเสียในแบตเตอรี่ซึ่งอาจเขียนอยู่ในรูปสมการได้ดังนี้คือ

$$P = I^2 * R_I \quad \ldots (2.11)$$

เมื่อ P = กำลังสูญเสียในแบตเตอรี่

I = กระแสในการอัดประจุแบตเตอรี่

R_I = ค่าความต้านทานภายในของแบตเตอรี่

จากสมการข้างต้นจะเห็นได้ว่าเมื่อกระแสในการอัดประจุมีค่าสูงจะทำให้มีค่าสูญเสียมาก ซึ่งจะทำผลทำให้เกิดความร้อนขึ้นในแบตเตอรี่ ถ้ามีค่าสูงมากจะทำให้แบตเตอรี่มีอายุการใช้งานน้อยลง หรืออาจทำให้เสียหายได้ ฉะนั้นในการอัดประจุแบตเตอรี่ต้องพิจารณาข้อจำกัดดังกล่าวนี้ด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

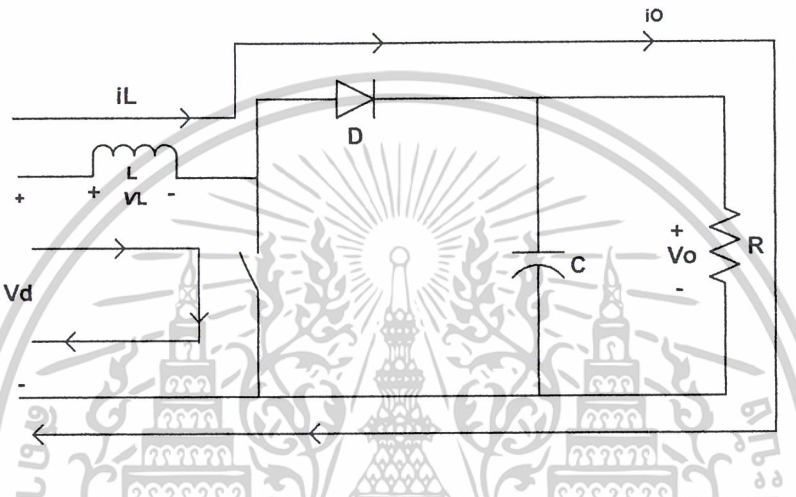
บทที่ 3

Boost Converter & Inverter

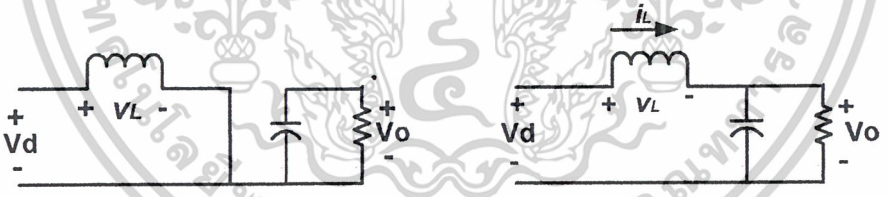
ภาค Boost Converter

3.1 วงจรการทำงานของ Boost Converter

ภายในวงจรจะมี L, C และไดโอดตามรูปที่ 3.1 โดยเมื่อสวิตช์ on จะได้รูปวงจรตามรูปที่ 3.2 คือจะเป็นการเก็บพลังงานไว้ที่ L และเมื่อสวิตช์ off จะทำให้มีกระแสไหลไปที่โหลด R ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.1 วงจร Boost Converter

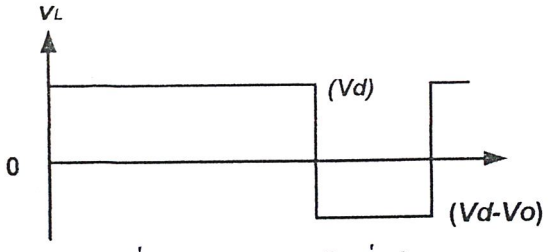


รูปที่ 3.2 วงจรขณะสวิตช์ on *รูปที่ 3.3 วงจรขณะสวิตช์ off*

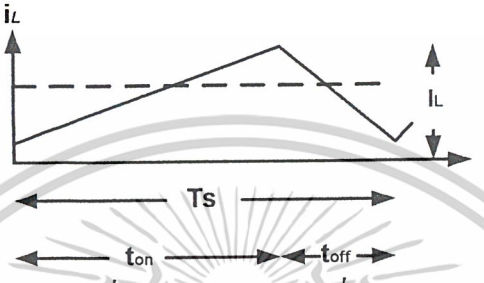
โดยในช่วง t_{on} แรงดันที่คร่อม L จะเท่ากับ V_d และช่วง t_{off} แรงดันที่คร่อม L จะเท่ากับ $V_d - V_o$ เป็นดังรูปที่ 3.4 ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่ผ่าน L กับเวลาเป็นดังรูปที่ 3.5 โดยในช่วง t_{on} จะเป็นการสะสมพลังงานไว้ที่ L กระแสจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นไม่เพิ่มอย่างทันทีทันใดตามหลักของกระแสที่ไหลผ่าน L และช่วง t_{off} กระแสจะไหลผ่าน L ไปยังโหลดทำให้กระแสใน L ค่อยๆลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง



รูปที่ 3.4 กราฟแรงดันไฟที่คร่อม L



รูปที่ 3.5 กราฟกระแสไฟที่ผ่าน L

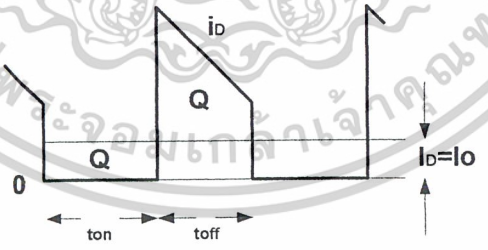
จากรูปที่ 3.4 นำมาหาอัตราการขยายได้ดังนี้

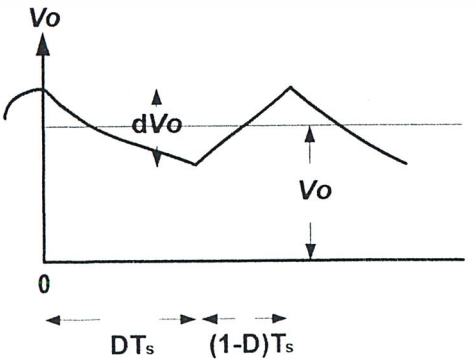
$$V_d t_{on} + (V_d - V_o)t_{off} = 0$$

$$V_o/V_d = T_s/t_{off} = 1/1 - D$$

โดย T_s คือช่วงเวลาทั้งหมด $(t_{on} + t_{off})$

3.2 การหาค่า Ripple Voltage





รูปที่ 3.6 กราฟ Ripple Voltage

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

55591

จากรูปที่ 3.6 ทั้งช่วง t_{on} และ t_{off} จะมีปริมาณความร้อนเท่ากับ Q ถ้าเรานำช่วง t_{on} มาคิดจะได้

$$dV_O = Q/C = I_O DT_S/C$$

$$dV_O = V_O DT_S/RC$$

$$dV_O/V_O = DT_S/RC$$

หรือ $$dV_O/V_O = D/RCf$$

3.3 การหาค่า Minimum ของ L

โดยหาจากกำลังงานที่ออกมาดังนี้

$$P_O = V_O^2/R$$

$$V_d I_L = V_O^2/R = (V_d/1\text{-}D)^2/R = V_d^2/(1\text{-}D)^2 R$$

$$I_L = V_d/(1\text{-}D)^2 R$$

จาก $$I_{max} = I_L + di_L/2$$

จะได้ $$I_{max} = V_d/(1\text{-}D)^2 R + V_d DT_s/2L$$

และ $$I_{min} = V_d/(1\text{-}D)^2 R - V_d DT_s/2L = 0$$

$$L_{min} = D(1\text{-}D)^2 R/2f$$

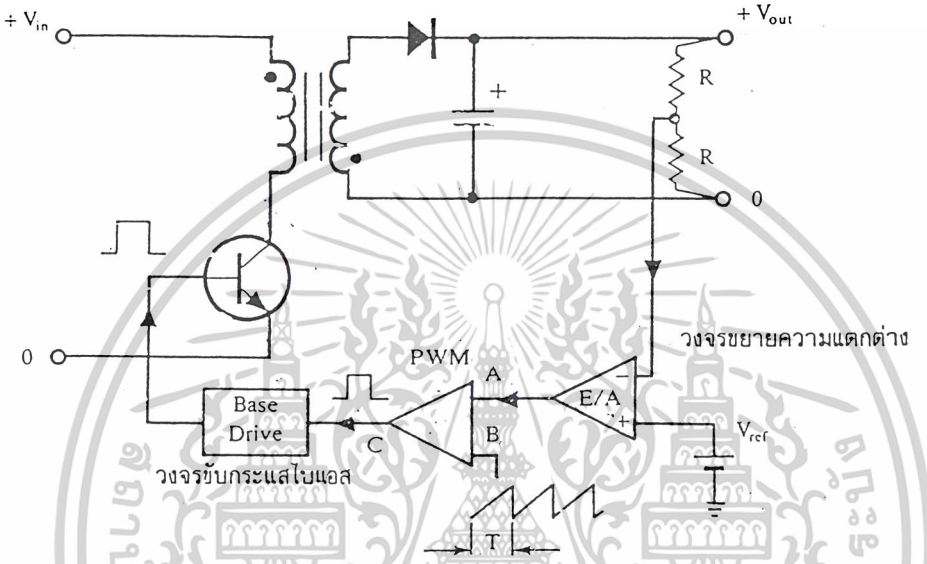
3.4 การควบคุมวงจร Boost Converter

เนื่องจากคอนเวอร์เตอร์เกือบทุกแบบ จะคงค่าแรงดันเอาต์พุตได้ด้วยการควบคุมช่วงเวลานำกระแส (t_{on}) ของเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ ดังนั้นวงจรควบคุมการทำงานของคอนเวอร์เตอร์โดยทั่วไปจึงมักนิยมใช้เทคนิคพัลส์วิดท์มอดูเลชั่น (Pulse Width Modulation) หรือ PWM เป็นหลัก การใช้ PWM เมื่อควบคุมช่วงเสลาการนำกระแสของเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ในคอนเวอร์เตอร์ สามารถทำได้ในสองลักษณะการทำงานของวงจรควบคุมคือ ในโหมดควบคุมจากแรงดันและโหมดควบคุมจากกระแส ซึ่งในรายงานนี้จะอธิบายเฉพาะโหมดควบคุมจากแรงดันเพราะโครงงานนี้เรานำโหมดควบคุมแบบนี้มาใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.1 วงจรควบคุมในโหมดควบคุมจากแรงดัน

การทำงานของวงจรควบคุมในโหมดนี้ จะอาศัยการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงค่าของแรงดันที่เอาต์พุทมาควบคุมช่วงเวลานำกระแสของเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ เพื่อการคงค่าแรงดันเอาต์พุทเป็นหลัก วงจรพื้นฐานของวงจรในโหมดควบคุมจากแรงดันจะเป็นดังรูปที่ 3.7



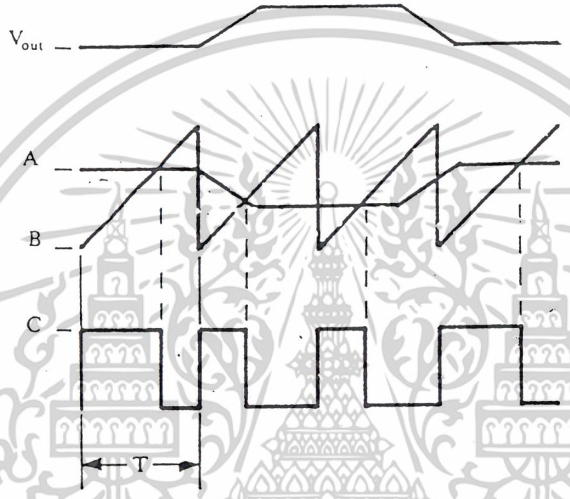
รูปที่ 3.7 วงจรพื้นฐานการควบคุมคอนเวอร์เตอร์ในโหมดควบคุมจากแรงดัน

จากรูปที่ 3.7 วงจรควบคุมจะอาศัยการป้อนกลับค่าแรงดันที่เอาต์พุทและเปรียบเทียบกับแรงดันอ้างอิง V_{ref} ของวงจร เพื่อตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของแรงดันเอาต์พุท ค่าความแตกต่างที่ได้จากวงจรขยายความแตกต่าง E/A ก่อนที่จะส่งต่อไปยังวงจร PWM โดยค่าแรงดันที่ได้จากวงจรขยายความแตกต่าง E/A ที่ตำแหน่ง A จะถูกเปรียบเทียบกับแรงดันรูปฟันเลื่อยที่ตำแหน่ง B ของ PWM อีกครั้งหนึ่ง เอาต์พุทที่ได้จากวงจร PWM จะมีลักษณะเป็นพลัส์สี่เหลี่ยม ซึ่งมีคาบเวลาคงที่เท่ากับคาบเวลาของแรงดันรูปฟันเลื่อย และมีความกว้างของพัลส์ซึ่งเปลี่ยนแปลงไปตามผลมอดูเลชั่นของค่าแรงดันที่ตำแหน่ง A และ B ค่าความกว้างของพัลส์นี้เองที่จะเป็นตัวกำหนดช่วงเวลาการนำกระแสของเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ในคอนเวอร์เตอร์

เนื่องจากค่าแรงดันป้อนกลับจะถูกส่งมายังวงจรขยายความแตกต่าง E/A ที่ขาอินเวอร์ติ้ง ผลต่างของแรงดันเอาต์พุทและแรงดันอ้างอิงที่จุด A จึงมีลักษณะกลับเฟสอยู่ 180° กล่าวคือ เมื่อแรงดันเอาต์พุทมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่ามากขึ้น แรงดันที่จุด A มีค่าลดลง ความกว้างพัลส์ที่เอาต์พุทของวงจร PWM จึงมีค่าลดลงด้วย และช่วงเวลานำกระแสของเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ ton ก็จะมีค่าลดลง ถ้าแรงดันเอาต์พุทมีค่าลดลง แรงดันที่จุด A จะมีค่าเพิ่มขึ้น ความกว้างพัลส์ที่เอาต์พุทของวงจร PWM จึงมีค่าเพิ่มขึ้น t_{on} ก็จะมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้คอนเวอร์เตอร์สามารถคงค่าแรงดันเอาต์พุทไว้ได้ ลักษณะรูปคลื่นแรงดันขณะวงจรทำงานจะเป็นดังรูปที่ 3.8 ตัวอย่างไอซีที่ใช้ควบคุมคอนเวอร์เตอร์ในโหมดควบคุมจากแรงดันได้แก่ เบอร์ MC34060, MC34166 และ TL494 เป็นต้น

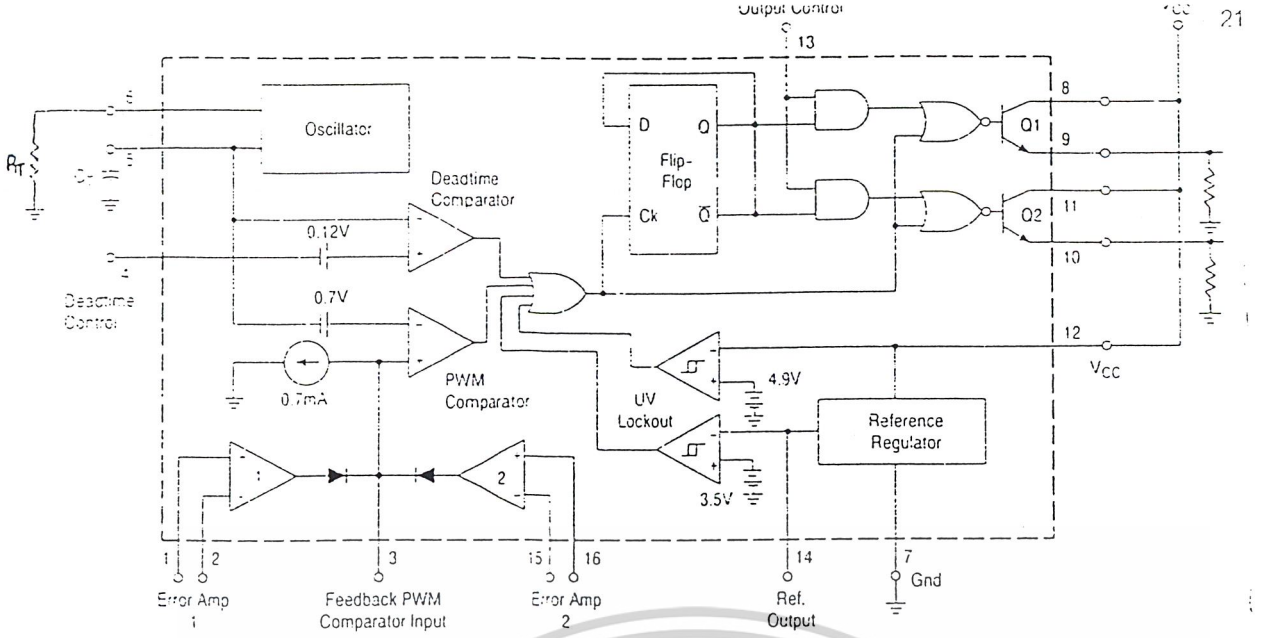


รูปที่ 3.8 แสดงลักษณะของความกว้างเอาท์พุทพัลส์ของ PWM

3.5 ไอซีเบอร์ TL494 สำหรับโหมดควบคุมจากแรงดัน

ไอซีเบอร์ TL494 เป็นไอซีที่ออกแบบมาเพื่อใช้ควบคุมการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ โดยทำงานด้วยโหมดควบคุมจากแรงดัน ซึ่งจะได้นำมาเป็นตัวอย่างการทำงานสำหรับวงจรควบคุมด้วยวิธีควบคุมจากแรงดัน โครงสร้างภายในและการจัดขาของ TL494 แสดงในรูปที่ 3.9 การทำงานของไอซีจะเป็นดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

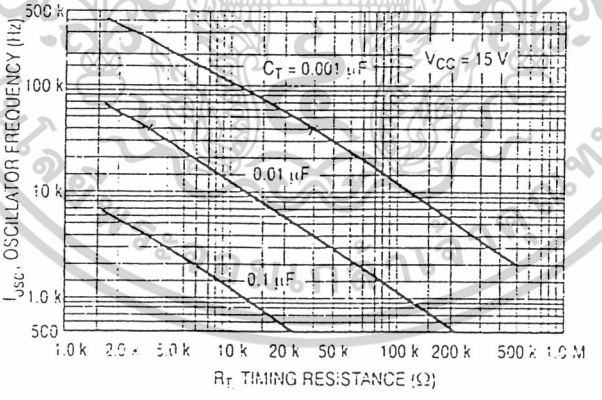


รูปที่ 3.9 โครงสร้างภายในและการจัดขาของไอซี TL494

3.5.1 การกำหนดคาบเวลาการทำงาน

วงจรของ TL494 เป็นวงจร PWM ที่มีความถี่คงที่ คาบเวลาการทำงานของเอาต์พุทพัลส์ กำหนดโดยค่าของ R_T และ C_T จากภายนอกที่ขา 6 และขา 5ของไอซี ค่าคาบเวลาการทำงาน จะกำหนดได้จาก

$$T = R_T C_T / 1.1$$



รูปที่ 3.10 แสดงความสัมพันธ์ของค่า RTCT ในการกำหนดความถี่

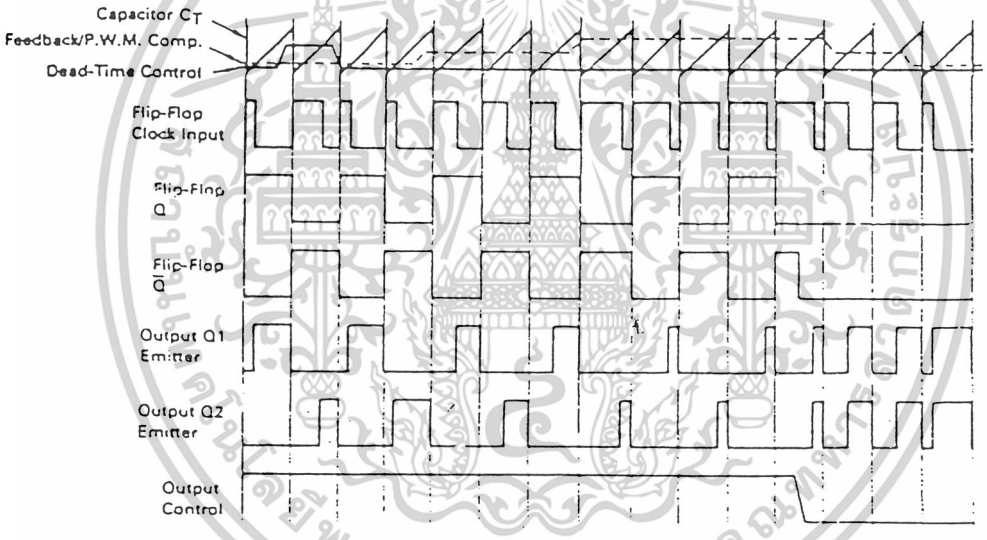
3.5.2 การทำงานของไอซีในการคงค่าแรงดันของคอนเวอร์เตอร์

ความกว้างเอาต์พุทพัลส์ของไอซี จะได้จากการเปรียบเทียบสัญญาณฟันเลื่อยที่ขา S กับแรงดันที่ได้จากวงจรขยายความแตกต่าง (Error Amp) ทั้ง 2 ตัวที่ PWM Comparator ส่วน NOR Gate ที่ควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทรานซิสเตอร์เอาต์พุท Q1 และ Q2 จะทำงานก็ต่อเมื่อขา C_k ของ Flip-Flop อยู่ในสถานะ LOW เท่านั้น ซึ่ง C_k จะเป็น LOW ได้ก็ต่อเมื่อแรงดันของสัญญาณฟันเลื่อยมีค่ามากกว่าแรงดันที่มาจาก Error Amp ทั้ง 2 ตัว นั่นคือแรงดันป้อนกลับจากเอาต์พุทของคอนเวอร์เตอร์หากมีค่าสูงขึ้น ความกว้างเอาต์พุทพัลส์ของไอซีจะเพิ่มขึ้น

ความก้างเอาต์พุทพัลส์ของไอซีนี้ สามารถกำหนดให้มีค่ามากสุดหรือมี่ค่าเท่ากับศูนย์ได้ด้วยการเปลี่ยนแปลงแรงดันที่ขา 3 จาก 0.5 โวลต์ ส่วน Error Amp ทั้งสองตัวจะมีช่วงของอินพุทคอมมอนโหมดตั้งแต่ –0.3 ถึง (V_{cc}-2) โวลต์ และสามารถใช้ตรวจจับแรงดันหรือกระแสที่เอาต์พุทของคอนเวอร์เตอร์ได้ Error Amp ทั้ง 2 ตัวจะให้เอาต์พุทในลักษณะให้สถานะ High (Active High) โดยต่ออยู่ในลักษณะ OR ที่ขา non-inverting ของ PWM Comparator การต่อกันในลักษณะนี้ Error Amp ตัวที่ทำให้เกิดความกว้างเอาต์พุทพัลส์ต่ำสุด จะเป็นตัวควบคุมความกว้างของเอาต์พุทพัลส์ของไอซี โดยรูปคลื่นการทำงานของไอซีเป็น ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 แสดงรูปคลื่นลักษณะการทำงานของ TL494

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาค Inverter

3.6 ทรานซิสเตอร์สวิตซ์

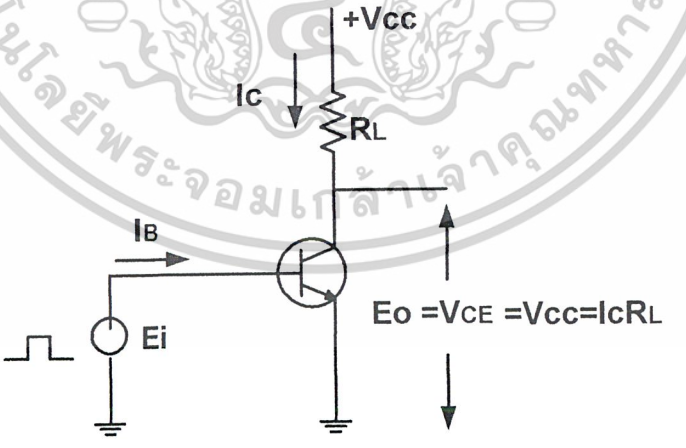
คุณสมบัติของทรานซิสเตอร์สามารถทำงานได้ 3 สภาวะคือ คัดออฟ (cut off) แอกทีฟ (active) และอิ่มตัว (saturation) สภาวะแอกทีฟเป็นสภาวะที่ทรานซิสเตอร์ทำงานในย่านกึ่งกลางของกราฟคุณสมบัติ ทำหน้าที่เป็นตัวขยายสัญญาณ จะใช้ในวงจรขยายต่าง ๆ ส่วนในสภาวะคัตออฟและสภาวะอิ่มตัวของทรานซิสเตอร์ ถูกให้ทำงานในย่านต่ำสุดและสูงสุดของกราฟคุณสมบัติเป็นย่านที่ทรานซิสเตอร์ถูกใช้เป็นสวิตซ์

สภาวะคัตออฟของทรานซิสเตอร์ ทรานซิสเตอร์จะไม่นำกระแส มีเพียงกระแสรั่วซึมไหลผ่านเล็กน้อย ในสภาวะนี้จะถือว่าทรานซิสเตอร์เป็นสวิตซ์อยู่ในขณะตัดวงจร (OFF)

สภาวะอิ่มตัวของทรานซิสเตอร์ ทรานซิสเตอร์จะนำกระแสมีกระแสไหลผ่านสูงสุด ในสภาวะนี้จะถือว่าทรานซิสเตอร์เป็นสวิตซ์อยู่ในขณะต่อวงจร (ON)

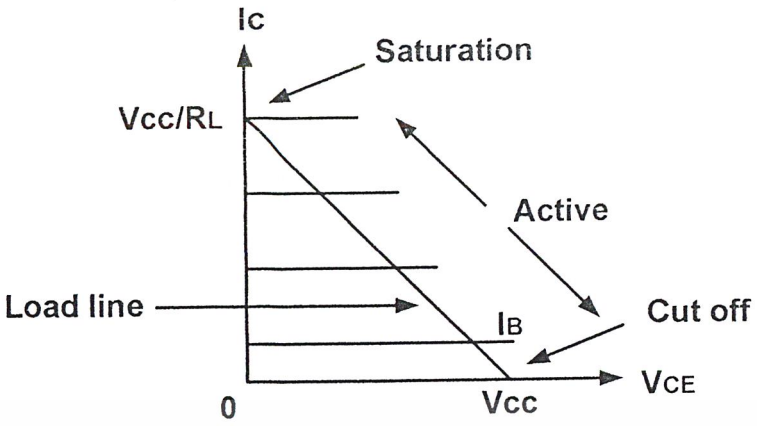
3.6.1 ทรานซิสเตอร์สวิตซ์ในทางอุดมคติหรือทางการนึกคิด

ทรานซิสเตอร์ในทางอุดมคตินี้ คุณสมบัติในการทำงานจะทำงานเหมือนสวิตซ์ไฟฟ้า คือขณะทรานซิสเตอร์นำกระแสความต้านทานในตัวทรานซิสเตอร์ต่ำสุด เสมือนซ๊อตวงจรเป็นสวิตซ์ในสภาวะต่อวงจร (ON) และขณะทรานซิสเตอร์ไม่นำกระแสความต้านทานในตัวทรานซิสเตอร์สูงสุดเสมือนเป็นค่าอนันต์ ไม่มีกระแสไหลผ่านตัวทรานซิสเตอร์ เป็นสวิตซ์ในสภาวะตัดวงจร (OFF) ทรานซิสเตอร์ทางอุดมคติแสดงดังรูปที่ 3.12

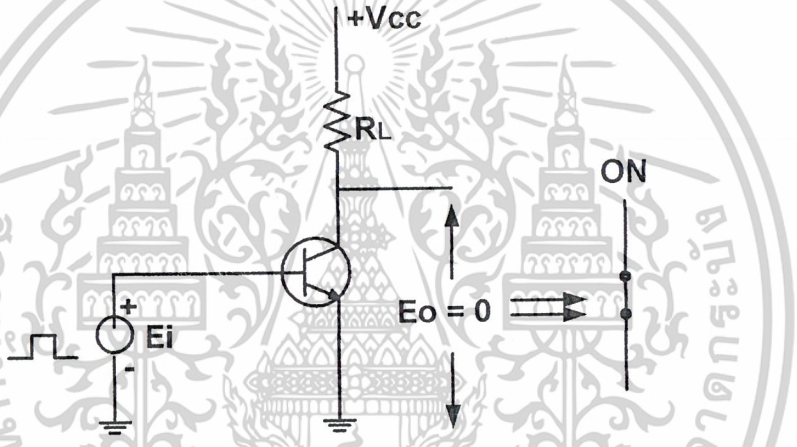


รูปที่ 3.12 ก. วงจรทรานซิสเตอร์สวิตซ์ทางอุดมคติ

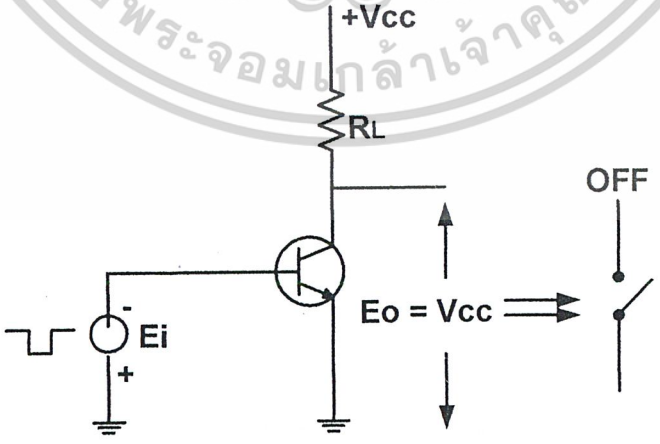
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 ข. กราฟคุณสมบัติ



รูปที่ 3.12 ค. สภาวะทรานซิสเตอร์อิ่มตัว



รูปที่ 3.12 ง. สภาวะทรานซิสเตอร์คัตออฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.12 เป็นวงจรทรานซิสเตอร์ทางอุดมคติแบบวงจรอิมิเตอร์ร่วม รูปที่ 3.12 (ก) ตัวทรานซิสเตอร์จะทำงานเป็นสวิตซ์ให้กับโหลด R_L โดยต่อขาคอลเล็กเตอร์กับโหลด R_L และขาอิมิเตอร์จะต่อลงกราวด์ ขาเบสถูกต่อรับแรงดันพัลส์จากอินพุต Ei โหลด R_L จะมีกระแสไหลผ่านและมีแรงดันตกคร่อมเมื่อทรานซิสเตอร์นำกระแส โหลด R จะไม่มีกระแสไหลผ่านและไม่มีแรงดันตกคร่อมเมื่อทรานซิสเตอร์ไม่นำกระแส ค่าแรงดันที่ตกคร่อมขาคอลเล็กเตอร์และขาอิมิเตอร์ของทรานซิสเตอร์สามารถหาได้จากกฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchhoff voltage law) หาได้ดังนี้

$$V_{ce} = V_{cc} - I_cR_L \qquad (3.1)$$

ถ้าแรงดันพัลส์อินพุตถูกป้อนเข้ามาเป็นบวก มีกระแสเบส (Ib) ไหลมากจนทำให้ทรานซิสเตอร์อิ่มตัว ดังรูปที่ 3.12 (ค) มีผลทำให้กระแสคอลเล็กเตอร์ (Ic) ไหลสูงสุด แรงดันตกคร่อมโหลด R มีค่าเท่ากับ I_cR_L จะประมาณได้เท่ากับแหล่งจ่าย V_{cc} โดยที่แรงดันตกคร่อมตัวทรานซิสเตอร์ Vce เป็น 0 V เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

จาก $V_{ce} = V_{cc} - I_cR_L$

แทนค่า $V_{cc} = V_{cc} - V_{cc}$

ได้ $E_o = V_{ce} = 0$ สภาวะสวิตซ์ต่อวงจร (ON)

ถ้าแรงดันพัลส์อินพุตถูกป้อนเข้ามาเป็นลบ กระแสเบส (Ib) จะไม่ไหล มีค่าเป็นศูนย์ดังรูปที่ 3.12 (ง) มีผลทำให้กระแสคอลเล็กเตอร์ (Ic) ไม่ไหลตามไปด้วย ($I_c = 0$) แรงดันตกคร่อมโหลด R_L มีค่าเป็นศูนย์ จะมีแรงดันตกคร่อมตัวทรานซิสเตอร์ Vce มีค่าประมาณเท่ากับแหล่งจ่าย V_{cc} เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

จาก $V_{ce} = V_{cc} - I_cR_L$

แทนค่า $V_{ce} = V_{cc} - 0$

ได้ $E_o = V_{ce} = V_{cc}$ สภาวะสวิตซ์ตัดวงจร (OFF)

ในรูปที่ 3.12 (ข) เป็นกราฟคุณสมบัติของทรานซิสเตอร์ทางอุดมคติ กราฟแนวตั้งบอกค่ากระแสคอลเล็กเตอร์ (Ic) กราฟแนวนอนบอกค่าแรงดันตกคร่อมตัวทรานซิสเตอร์ (Vce) มีค่ากระแสเบส (Ib) หลายค่าเป็นเส้นขนานแนวนอน การหาเส้นโหลด (Load line) ทำได้โดยกำหนดจุดทำงานของตัวทรานซิสเตอร์ 2 สภาวะคือ สภาวะอิ่มตัวและสภาวะคัตออฟ เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

สภาวะอิ่มตัว $V_{ce} = V_{cc} - I_cR_L$

$0 = V_{cc} - I_cR_L$

$I_cR_L = V_{cc}$

$I_c = V_{cc} / R_L$ ที่จุดอิ่มตัว

สภาวะคัตออฟ $V_{ce} = V_{cc} - I_cR_L$

$V_{ce} = V_{cc} - 0$

$V_{ce} = V_{cc}$ ที่จุดคัตออฟ

ลากเส้นตรงตัดผ่านจุดทั้งสองก็จะได้เส้นโหลดออกมา จากเส้นโหลดนี้สามารถกำหนดจุดทำงานให้ตัวทรานซิสเตอร์ได้ 3 สภาวะคือที่ตำแหน่งสูงสุดของเส้นโหลดเป็นจุดอิ่มตัว ที่ตำแหน่งต่ำสุดของเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โหลดเป็นจุดคัตออฟ และที่ตำแหน่งระหว่างต่ำสุดถึงสูงสุดเป็นย่านแอกทีฟหรือย่านทรานซิสเตอร์เป็นตัวขยายสัญญาณ

3.7 มัลติไวเบรเตอร์

วงจรมัลติไวเบรเตอร์ (multivibrator circuit) จะทำหน้าที่เหมือนวงจรกำเนิดความถี่คลื่นสี่เหลี่ยม และบางแบบก็จะทำหน้าที่เหมือนวงจรสวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์ การกำเนิดความถี่ด้วยวงจรมัลติไวเบรเตอร์บางชนิดสามารถกำเนิดความถี่ได้ด้วยตัวเอง บางชนิดจะต้องมีสัญญาณมาควบคุมการทำงานของตัวมัน สามารถแบ่งมัลติไวเบรเตอร์ได้เป็น 3 ชนิด

1. อะสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ (astable multivibrator) เป็นวงจรมัลติไวเบรเตอร์ที่ทำงานได้ด้วยตัวเอง ทำหน้าที่คล้ายวงจรกำเนิดความถี่ คือตัวมันองสามารถทำงานและหยุดทำงานสลับกันตลอดเวลา บางครั้งจะเรียกว่า ฟรีรันนิ่งมัลติไวเบรเตอร์ (free running multivibrator)

2. โมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ (monostable multivibrator) เป็นวงจรมัลติไวเบรเตอร์ที่การเปลี่ยนแปลงการทำงานจะต้องมีสัญญาณอินพุตมาควบคุมการทำงาน การทำงานของวงจรแต่ละครั้งจะทำงานเพียงสภาวะเดียว โดยที่วงจรหนึ่งจะทำงานตลอดเวลา ส่วนอีกวงจรหนึ่งจะคัตออฟตลอดเวลา วงจรจะอยู่ในสภาวะเช่นนี้จนกว่าจะมีสัญญาณอินพุตมากระตุ้น สภาวะการทำงานจะกลับกันชั่วขณะ คือวงจรที่ทำงานอยู่จะคัตออฟ วงจรที่คัตออฟอยู่จะทำงานแทน หลังจากช่องเวลาที่กำหนดไว้หมดลง วงจรจะกลับไปอยู่ในสภาวะเดิม เวลาดังกล่าวจะถูกกำหนดโดยค่าของเวลาคงที่ RC วงจรจะกลับไปอยู่ในสภาวะเดิมจนกระทั่งมีอินพุตใหม่ป้อนเข้ามาอีก วงจรโมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์นี้บางครั้งจะเรียกว่า วันช็อตมัลติไวเบรเตอร์ (one – shot multivibrator)

3. ไบสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ (bistable multivibrator) เป็นวงจรมัลติไวเบรเตอร์อีกชนิดหนึ่งที่การเปลี่ยนแปลงการทำงานต้องมีสัญญาณอินพุตมาควบคุมการทำงาน สภาวะการทำงานวงจรหนึ่งทำงาน ส่วนอีกวงจรหนึ่งคัตออฟ วงจรจะอยู่ในสภาวะเช่นนี้จนกว่าจะมีสัญญาณอินพุตมากระตุ้น สภาวะการทำงานจะกลับกัน คือวงจรที่ทำงานอยู่จะหยุดทำงาน วงจรที่คัตออฟอยู่จะทำงานแทน โดยวงจรอยู่ในสภาวะเช่นนี้ตลอดไปจนกว่าจะมีสัญญาณอินพุตครั้งที่สองป้อนมากระตุ้น สภาวะการทำงานจึงกลับไปอยู่ในสภาวะเดิมเหมือนครั้งแรก ในการเปลี่ยนแปลงสภาวะการทำงานทุกครั้งจะต้องมีสัญญาณอินพุตมาควบคุม มัลติไวเบรเตอร์แบบนี้บางครั้งจะเรียกว่า ฟลิปฟลอป (flip – flop)

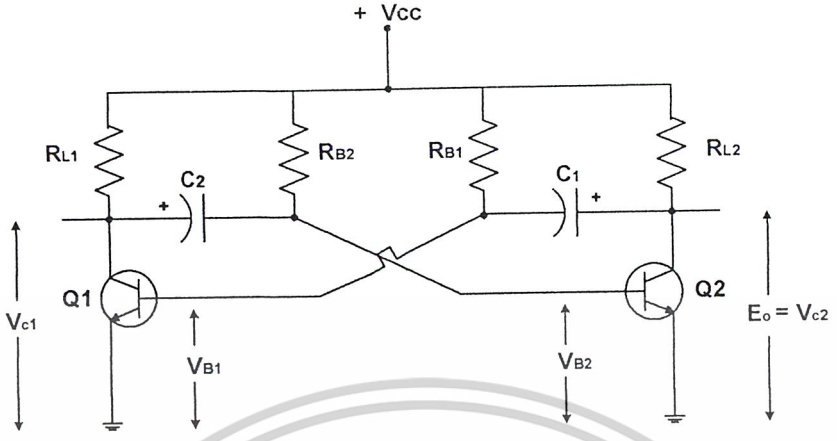
3.7.1 อะสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์

วงจรอะสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์หรือวงจรฟรีรันนิ่งมัลติไวเบรเตอร์คือวงจรทางอิเล็กทรอนิกส์ที่มีสภาวะกึ่งเสถียรภาพ 2 สภาวะ ระยะเวลาของแต่ละสภาวะกึ่งเสถียรภาพทั้งสองจะขึ้นอยู่กับค่าเวลาคงที่ของ RC ในวงจรมัลติไวเบรเตอร์ ถึงแม้ว่าไม่มีสัญญาณพัลส์จากอินพุตป้อนเข้ามากระตุ้นการทำงาน วงจรอะสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ก็สามารถกำเนิดสัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยมออกเอาต์พุตได้ วงจรจะทำงานคล้ายกับวงจรกำเนิดสัญญาณสี่เหลี่ยม (square wave generator) หรือวงจรกำเนิดความถี่ (oscillator)

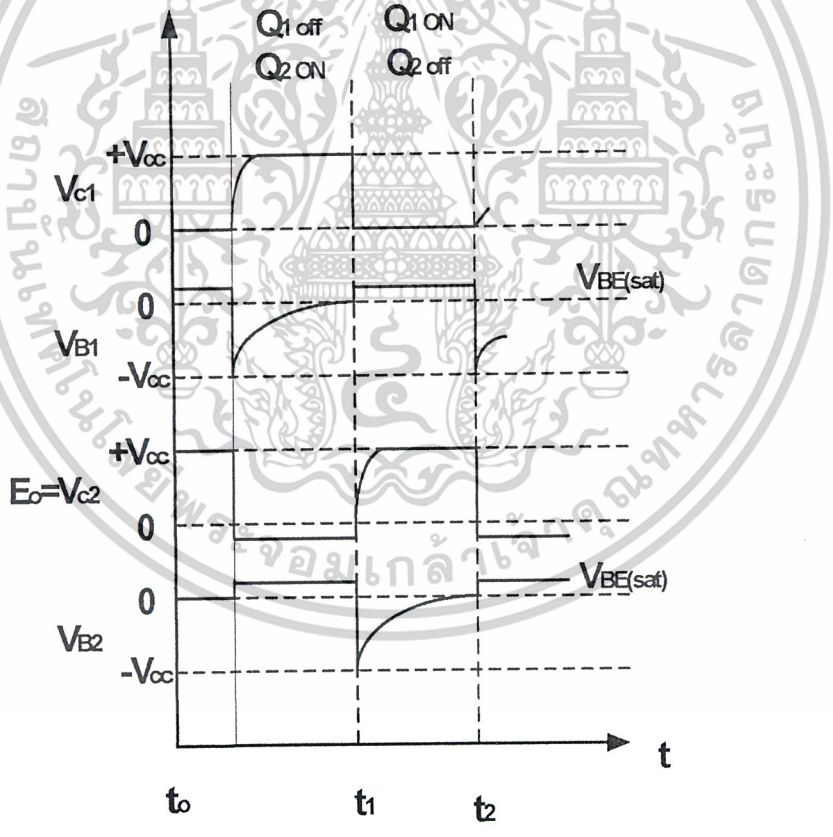
วงจรอะสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ประกอบขึ้นจากวงจรกลับสัญญาณสองวงจร โดยเอาต์พุตของวงจรกลับสัญญาณวงจรแรกต่อเป็นอินพุตของวงจรกลับสัญญาณวงจรที่สอง และเอาต์พุตของวงจรกลับสัญญาณวงจรที่สองต่อเป็นอินพุตของวงจรกลับสัญญาณวงจรแรก เอาต์พุตของแต่ละวงจรกลับสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะถูกคับปลิงด้วย RC ไปยังอินพุตของวงจรกลับสัญญาณแต่ละวงจร วงจรอะสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์แสดงดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 ก. วงจรอะสเตเบิสมัลติไวเบรเตอร์



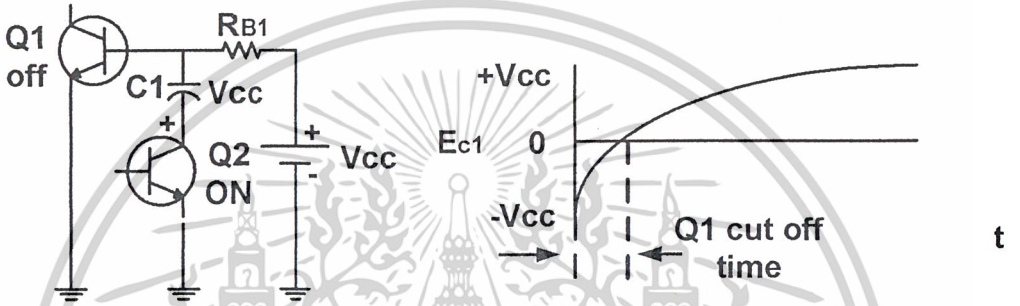
รูปที่ 3.13 ข. สัญญาณตามจุดต่างๆ

จากรูปที่ 3.13 เป็นวงจรอะสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ชนิดคอลเล็กเตอร์คับเบิล การทำงานของวงจรอธิบายได้ดังนี้ ที่เวลา t+0 ทรานซิสเตอร์ Q2 จะนำกระแสถึงจุดอิ่มตัว ส่วนทรานซิสเตอร์ Q1 จะคัตออฟ กระแสเบสของทรานซิสเตอร์ Q2 จะไหลไปประจุในตัวเก็บประจุ C2 ตัวเก็บประจุ C2 ประจุแรงดันถึงค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดัน VCC ทำให้แรงดันที่ขาคอลเล็กเตอร์ของทรานซิสเตอร์ Q1 ค่อย ๆ เพิ่มขึ้นแบบเอกซ์โพแนนเชียล จนถึงค่าแรงดัน VCC ตามการประจุตัวของเก็บประจุ C2 ตัวต้านทาน RB2 ควรเลือกค่าที่เหมาะสมในการจำกัดกระแสเบสของทรานซิสเตอร์ Q2 ให้มีค่ากระแสที่จำเป็นต่ำสุดสำหรับการควบคุมให้ทรานซิสเตอร์ Q2 ทำงานถึงจุดอิ่มตัวในสภาวะ ON นั่นคือทรานซิสเตอร์ Q2 จะทำงานถึงจุดอิ่มตัวหลังจากตัวเก็บประจุ C2 ประจุแรงดันถึงค่า VCC

ในทำนองเดียวกัน ตัวเก็บประจุ C1 จะประจุแรงดันถึงค่าแรงดัน VCC เมื่อทรานซิสเตอร์ Q1 ทำงานถึงจุดอิ่มตัวเช่นกัน ขณะทรานซิสเตอร์ Q2 นำกระแสถึงจุดอิ่มตัว เสมือนเป็นสวิตช์ที่ต่อวงจร ต่อแผ่นเพลตที่ประจุแรงดันบวกของตัวเก็บประจุ C1 ลงกราวด์ แสดงให้เห็นดังรูปที่ 3.14



ก. ส่วนของวงจรรูปที่ 3.13 ข. ช่วงเวลาที่ทำให้ Q1 คัตออฟ

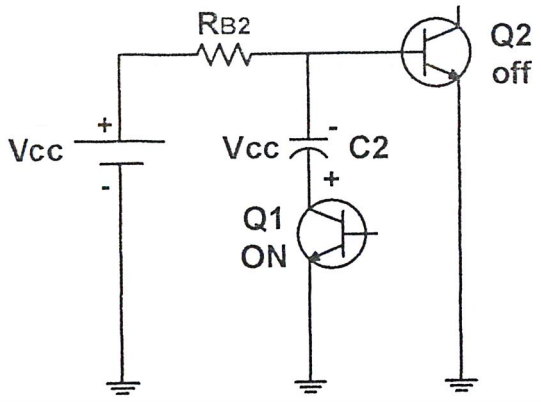
รูปที่ 3.14 แสดงสภาวะการคายประจุของ C1 ผ่านทรานซิสเตอร์ Q2

จากรูปที่ 3.14 จะเห็นได้ว่าตัวเก็บประจุของ C1 ต่อขนานกับรอยต่อเบสกับอิมิเตอร์ของทรานซิสเตอร์ Q1 และจากที่ตัวเก็บประจุ C1 มีแรงดันประจุอยู่แล้วเท่าแหล่งจ่าย Vcc จึงทำให้มีแรงดัน Vcc จ่ายเป็นแรงดันไบอัสกลับให้ทรานซิสเตอร์ Q1 ที่เวลา t+0 มีค่าเป็น –Vcc ทรานซิสเตอร์ Q1 อยู่ในสภาวะ (OFF)

ที่เวลา t+0 นี้ตัวเก็บประจุ C1 จะเริ่มประจุแรงดันอีกจาก –Vcc V ถึง +Vcc V แสดงดังรูปที่ 3.14 (ข) ทรานซิสเตอร์ Q1 จะยังคง (OFF) จนกระทั่งถึงช่วงเวลา t-1 เพราะในขณะเวลาดังกล่าวไบอัสที่ทรานซิสเตอร์ Q1 เป็น 0 V เมื่อถึงช่วงเวลา t+1 รอยต่อเบสกับอิมิเตอร์ของทรานซิสเตอร์ Q1 จะได้รับไบอัสตรง ทำให้ทรานซิสเตอร์ Q1 เริ่มนำกระแส

เพราะทรานซิสเตอร์ Q1 นำกระแสที่เวลา t+1 ทำให้แผ่นเพลตที่ประจุแรงดันบวกของตัวเก็บประจุ C2 ถูกต่อลงกราวด์ ดังนั้นแรงดันที่ประจุในตัวเก็บประจุ C2 กลายเป็นแรงดันไบอัสกลับให้กลับตัวทรานซิสเตอร์ Q2 แสดงได้ดังรูปที่ 3.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.15 ส่วนประกอบของรูปที่ 7.1 สภาวะการคายประจุของ C2 ผ่านทรานซิสเตอร์ Q1

ที่เวลา t+1 ตัวเก็บประจุ C2 เริ่มประจุแรงดันจาก –Vcc ถึง +Vcc ผ่านทรานซิสเตอร์ Q1 ขณะ (ON) และผ่าน R_{B2} ทรานซิสเตอร์ Q2 จะ (OFF) จนกว่าตัวเก็บประจุ C2 จะมีประจุตกคร่อมเป็น 0 V ทรานซิสเตอร์ Q2 จึงจะเริ่มนำกระแสอีกครั้งในเวลา t+2

ช่วงเวลาระหว่าง t+1 ถึงช่วงเวลา t-2 ตัวเก็บประจุ C1 จะประจุแรงดันถึงค่า Vcc มีกระแสเบสไหลเนื่องจากทรานซิสเตอร์ Q1 (ON) การทำงานของวงจรจะเป็นเช่นนี้โดยสลับกันทำงานเรื่อยไป ทำให้เอาต์พุตได้รูปสัญญาณสี่เหลี่ยมมุมฉาก แสดงดังรูปที่ 3.13 (ข) ความแรงของแรงดันเอาต์พุตมีค่า Vcc – Vce(SAT)

จากรูปที่ 3.13 จะได้ว่า

$t1 - t0$ = เวลา tA

และ $t2 - t1$ = เวลา tB

ให้ T = เวลา 1 คาบ (period)

ดังนั้น $T = tA + tB$

เมื่อ $t = 0.69\ RC$

$tA = 0.69\ R_{B1}\ C1$

$tB = 0.69\ R_{B2}\ C2$

แทนค่า $T = 0.69\ R_{B1}\ C1 + 0.69\ R_{B2}C2$

ตามปกติให้ $R = R_{B1} = R_{B2}$

จะได้ $T = 0.69\ R(C1 + C2)$

ในกรณีที่วงจรอะสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์เป็นแบบสมมาตร จะได้

$C = C1 = C2$

ดังนั้น $T = 0.69\ R(C + C)$

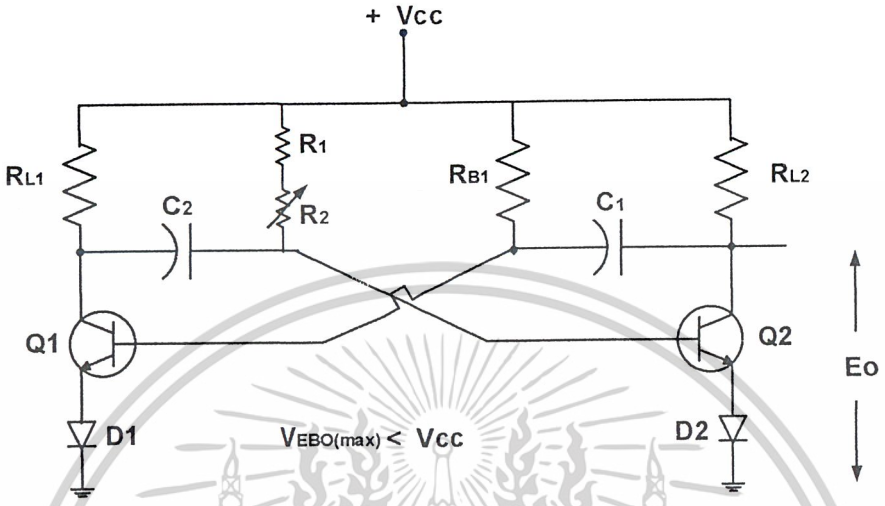
$T = 0.69\ R(2C)$

จะได้ $T = 1.38\ RC$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7.2 อะสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ชนิดมีไดโอดต่อร่วมขาอิมิเตอร์

ถ้าอัตราการทนแรงดันไฟตรงสูงสุดตรงรอยต่ออิมิเตอร์กับเบสของทรานซิสเตอร์ที่ใช้งานในวงจรอะสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์มีค่าน้อยกว่าค่าแรงดันแหล่งจ่าย Vcc ที่จ่ายให้วงจร จะต้องใส่ไดโอดแทรกเข้าไปที่ขาอิมิเตอร์ของตัวทรานซิสเตอร์ทุกตัวในวงจร แสดงวงจรดังรูปที่ 3.16



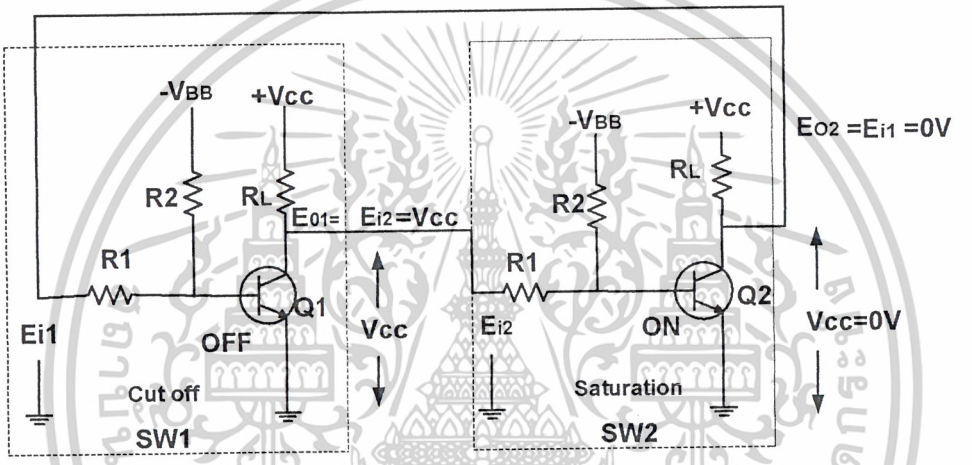
รูปที่ 3.16 วงจรอะสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ชนิดมีไดโอดต่อร่วมขาอิมิตเตอร์

จากรูปที่ 3.16 เป็นวงจรอะสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ชนิดมีไดโอดต่อร่วมขาอิมิเตอร์ โดยให้ไดโอดได้รับแรงดันไบอัสตรงเสมอจากแหล่งจ่าย เมื่อไดโอดได้รับไบอัสกลับจะทำหน้าที่เป็นตัวต้านทานแบ่งแรงดันร่วมกับรอยต่ออิมิเตอร์กับเบส ช่วยลดแรงดันตกคร่อมรอยต่ออิมิเตอร์กับเบสลง แรงดันที่ออกเอาต์พุตเมื่อต่อไดโอดเข้าวงจรจะมีค่าลดลงประมาณ 0.7 V ในไดโอดชนิดซิลิคอน ถึงแม้ว่าค่าแรงดันของรอยต่อไดโอดจะมีค่าน้อย แต่ก็มีส่วนสำคัญในการทำงานของวงจรจึงต้องนำมาร่วมในการคำนวณส่วนประกอบของวงจร ทำให้การคำนวณค่าความกว้างของพัลส์ถูกต้องมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.8 ไบสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์

ไบสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์หรือฟลิบฟลอบ คือวงจรทางอิเล็กทรอนิกส์ที่มีสภาวะเสถียรภาพของวงจรอยู่ 2 สภาวะ โดยที่ส่วนหนึ่งของวงจรอยู่ในสภาวะการทำงาน (ON) อีกส่วนหนึ่งของวงจรจะอยู่ในสภาวะไม่ทำงาน (OFF) ในการเปลี่ยนสภาวะการทำงานของวงจรจะต้องใช้สัญญาณพัลส์จากภายนอกมาควบคุมหนึ่งครั้ง สภาวะการทำงานของวงจรจะเปลี่ยนเป็นตรงกันข้ามจนกว่าจะมีสัญญาณพัลส์ภายนอกครั้งที่ 2 ป้อนเข้ามา สภาวะการทำงานของวงจรจึงจะกลับไปอยู่ในสภาวะเดิม ในการเปลี่ยนแปลงการทำงานทุกครั้งจะต้องใช้สัญญาณพัลส์จากภายนอกมาควบคุมเสมอ วงจรเบื้องต้นประกอบด้วยวงจรทรานซิสเตอร์สวิตซ์ 2วงจรต่อร่วมกัน ดังแสดงที่รูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 วงจรไบสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์แบบเบื้องต้น

จากรูปที่ 3.17 เป็นวงจรไบสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ ประกอบด้วยวงจรทรานซิสเตอร์สวิตซ์ต่อร่วมกัน 2 วงจร การต่อทำดังนี้ ใช้เอาท์พุตของทรานซิสเตอร์สวิตซ์วงจรหนึ่งไปต่อเป็นอินพุตของทรานซิสเตอร์วงจรที่สองและ ใช้เอาท์พุตของทรานซิสเตอร์สวิตซ์ที่สองไปต่อเป็นอินพุตของทราน ซิสเตอร์สวิตซ์วงจรที่หนึ่ง การทำงานของวงจรสามารถอธิบายได้ดังนี้

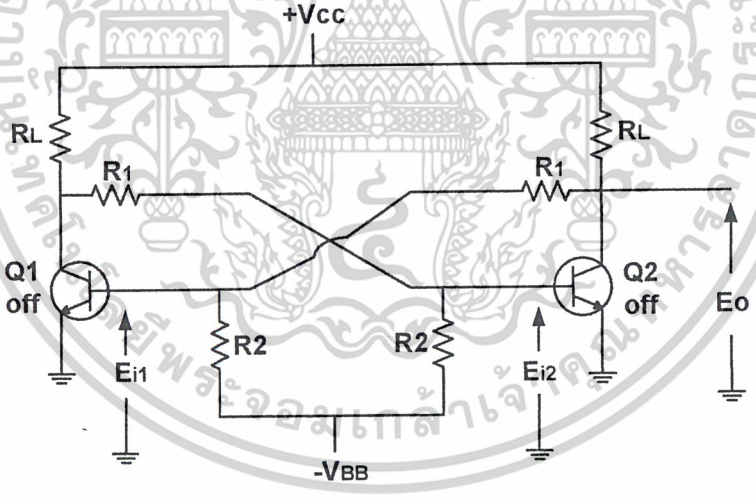
เมื่อจ่ายแหล่งจ่ายแรงดัน V_{CC} และ $-V_{BB}$ เข้าวงจร สมมติกำหนดให้วงจรสวิตซ์ 1 อยู่ในสภาวะคัตออฟ (OFF) และวงจรสวิตซ์ 2 อยู่ในสภาวะอิ่มตัว (ON) ทรานซิสเตอร์ Q_1 คัตออฟ ทำให้แรงดันตกคร่อมขาคอลเล็กเตอร์กับขาอิมิตเตอร์ของ Q_1มีค่า$+V_{CC}$ แรงดัน $+V_{CC}$ ที่ขาคอลเล็กเตอร์ Q_1 นี้จะจ่ายเป็นอินพุตให้วงจรสวิตซ์ 2 เป็นการจ่ายแรงดันไบอัสตรงให้ขาเบสของทรานซิสเตอร์ Q_2 ทรานซิสเตอร์ Q_2 นำกระแสจนถึงจุดอิ่มตัวทำให้แรงดันตกคร่อมขาคอลเล็กเตอร์กับขาอิมิตเตอร์ของ Q_2 มีค่าประมาณ 0 V ป้อนไปเป็นแรงดันอินพุตให้วงจรทรานซิสเตอร์สวิตซ์ Q_1 ถ้าไม่มีแรงดันอินพุตป้อนให้กับสวิตซ์ 1 ของดันลบที่ขาเบสของทรานซิสเตอร์สวิตซ์ Q_1 เทียบกับกราวด์และแรงดันไบอัสกลับที่จ่ายกลับทรานซิสเตอร์ Q_2 ทำให้ทรานซิสเตอร์ Q_1 คัตออฟหรือไม่ทำงาน (OFF) แรงดันไบอัสกลับที่ขาเบสของทรานซิสเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Q_1 เทียบกับกราวด์นั้นได้มาจากแรงดันตกคร่อม R_1 ที่ถูกจ่ายมาจากแหล่งจ่ายแรงดัน V_{BB} ค่าแรงดันที่จ่ายถูกกำหนดด้วยค่าตัวต้านทาน R_1 และ R_2ต่อวงจรเป็นแบบวงจรแบ่งแรงดัน

สวิตช์ 1 จะอยู่ในสภาวะหยุดนำกระแส (OFF) และสวิตช์ 2 จะอยู่ในสภาวะ (ON) เช่นนี้ต่อไปจนกว่าจะมีแรงดันพัลส์บวกจากภายนอกป้อนเข้าไปที่ขาเบสของ Q_1 มีผลทำให้ทรานซิสเตอร์ Q_1 นำกระแส (ON) ค่าความต้านทานระหว่างรอยต่อคอลเล็กเตอร์กับอิมิตเตอร์ลดลงเสมือนขาคอลเล็กเตอร์ของ Q_1 ถูกต่อลงกราวด์ ทำให้ขาเบสของ Q_2 ถูกต่อลงกราวด์ด้วยทรานซิสเตอร์ Q_2 หยุดนำกระแส (OFF) แรงดันแรงดันตกคร่อมขาคอลเล็กเตอร์กับขาอิมิตเตอร์ของ Q_2 มีค่าสูงประมาณแหล่งจ่าย V_{CC} ถูกป้อนไปเป็นแรงดันอินพุตให้ขาเบส Q_1 ทรานซิสเตอร์ Q_1 นำกระแสโดยสมบูรณ์ (ON) ส่งผลให้ทรานซิสเตอร์ Q_2 หยุดนำกระแสโดยสมบูรณ์ ถึงแม้ว่าสัญญาณพัลส์บวกที่ป้อนให้ขาเบส Q_1 จะหยุดการป้อนแล้วก็ตาม สภาวะการทำงานของวงจรสวิตช์ทั้งสองยังคงสภาพเช่นนี้ตลอดเวลาเป็นสภาวะเสถียรภาพใหม่จนกว่าจะมีแรงดันพัลส์จากภายนอกป้อนเข้ามาที่ขาเบสของ Q_2 สภาวะการทำงานของวงจรจะกลับไปอยู่สภาวะเสถียรภาพเดิมคือ สวิตช์ 1 ไม่ทำงาน (OFF) สวิตช์ทำงาน (ON) นั้นคือทุกครั้งของสัญญาณพัลส์จากภายนอกป้อนเข้ามาควบคุมการทำงาน วงจรจะมีการเปลี่ยนสภาวะการทำงานทุกครั้งสลับไปสลับมา

จากวงจรไบสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์เบื้องต้นในรูปที่ 3.17 สามารถนำมาเขียนใหม่ให้เป็นรูปแบบมาตรฐานได้ดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 วงจรไบสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์เขียนในรูปมาตรฐาน

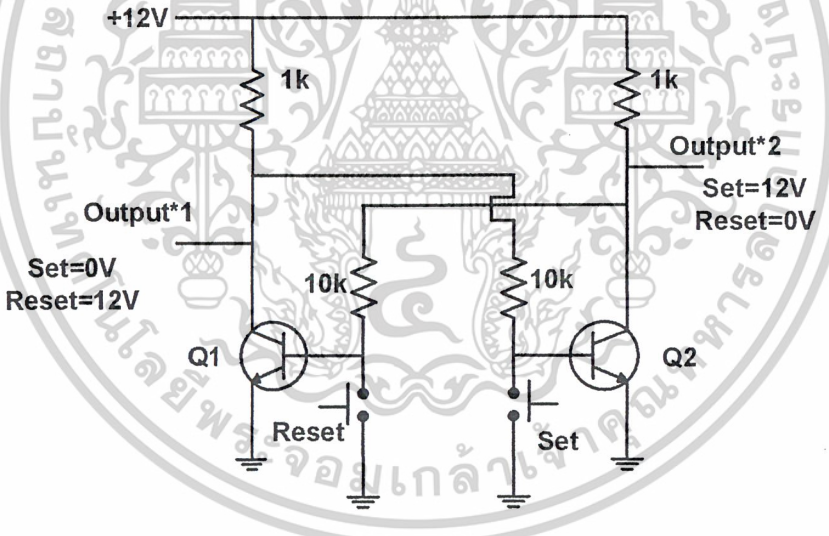
จากรูปที่ 3.18 เป็นวงจรไบสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ของรูปที่ 3.17 โดยนำมาเขียนให้อยู่ในรูปมาตรฐาน จะเห็นได้ว่าทรานซิสเตอร์สวิตช์ทั้งสองวงจรที่ต่อร่วมกันถูกจัดอุปกรณ์ให้เหมือนกันทั้งค่าความต้านทานและตัวทรานซิสเตอร์ โดยต่อวงจรร่วมกันแบบคอลเล็กเตอร์คัปเปิล เมื่อจ่ายแหล่งจ่ายแรงดันให้วงจรจะทำให้ทรานซิสเตอร์สวิตช์วงจรหนึ่งทำงานตลอดเวลา (ON) และทรานซิสเตอร์สวิตช์อีกวงจรหนึ่งจะหยุดทำงานตลอดเวลา (OFF) การเกิดสภาวะเช่นนี้เพราะถึงแม้จะใช้อุปกรณ์ในวงจรเหมือนกันและค่าเท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กันทั้งสองวงจรก็ตาม แต่คุณสมบัติของทรานซิสเตอร์ Q_1 และ Q_2 ที่นำมาใช้งานจะมีความแตกต่างกันอยู่บ้าง ทำให้จุดเริ่มต้นในการนำกระแสมีความเร็วช้าแตกต่างกัน จึงทำให้ทรานซิสเตอร์ทำงานเร็วปรับตัวไปอยู่ในสภาพอิ่มตัว(ON) ส่งผลให้ทรานซิสเตอร์ตัวที่ทำงานช้าปรับตัวให้อยู่ในสภาวะคัตออฟ (OFF) สภาวะจุดเริ่มต้นการทำงานจะเป็นเช่นนี้ตลอดเวลาขณะที่ยังไม่มีสัญญาณพัลส์ป้อนเข้าอินพุต E_i

3.8.1 Set-Reset Operation

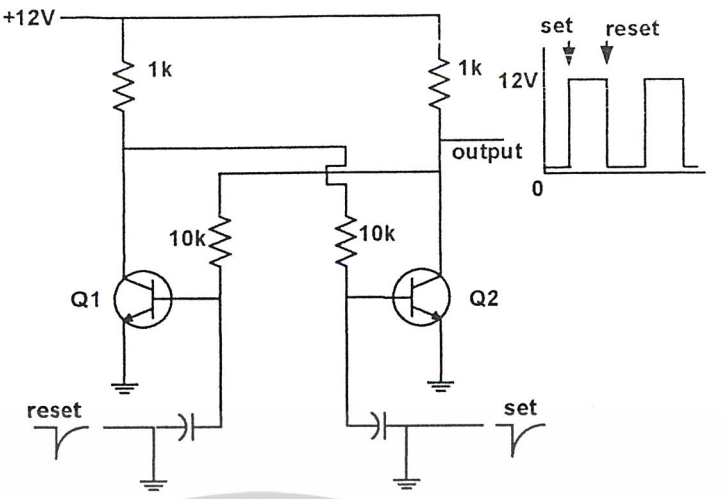
หนึ่งในการใช้งานวงจร Bistable Multivibrator ที่เรียกว่า set-reset ในการใช้งานแบบนี้จะมี อินพุต 2 ขั้วคือ set input และ reset input ตัวอย่างเช่นรูปที่ 3.19 มี push button อยู่ 2 ตัว ซึ่งคอยทำหน้าที่ในการเปลี่ยนสภาวะการทำงานไปเป็นสภาวะตรงกันข้าม คือรูปที่ 3.19 สมมติให้ Q_2 อยู่ในสภาวะ ON และ Q_1 อยู่ในสภาวะ OFF ถ้าเรากดปุ่ม Set จะทำให้ขาเบสของ Q_2 ถูกต่อลงกราวด์ มีผลทำให้ Q_2 เปลี่ยนสภาวะการทำงานจาก ON เป็น OFF และที่ขาคอลเล็กเตอร์ของ Q_2 จะมีค่าเท่ากับแรงดัน V_{CC} (12 v) ซึ่งค่าแรงดันนี้เองจะขับให้ขาเบส ของ Q_1 นำกระแส ทำให้ Q_1 เปลี่ยนสภาวะจาก OFF เป็น ON และยังคงสภาพเช่นนี้เป็นเรื่อยๆ จนกว่าจะมีการกดปุ่ม Reset ถ้ามีการกดปุ่ม Reset สภาวะของทรานซิสเตอร์ Q_1 และ Q_2 ก็จะเป็นตรงกันข้าม และเป็นอย่างนี้เรื่อยๆไป



รูปที่ 3.19 การทำงานแบบ Set-Reset โดยใช้ push button

รูปที่ 3.20 แสดงวงจร set-reset อีกรูปแบบหนึ่งโดยถูก trig จาก short-negative pulses โดย negative pulses มีการทำงานเหมือนปุ่ม Set button และ Reset button โดยที่เอาท์พุตจะมีการเปลี่ยนสถานะเมื่อมี negative pulses มากระตุ้นที่ขา set หรือ reset

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

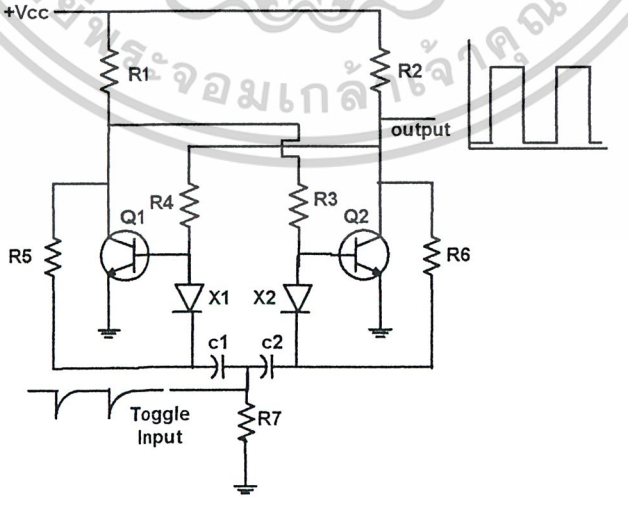


รูปที่ 3.20 การทำงานแบบ Set-Reset โดยใช้ negative pulses

3.8.2 Toggle Operation

ในการทำงานของวงจร Bistable Multivibrator ในโหมดของการทำงานแบบ " toggle " จะมี input ขั้วเดียวดังรูป 3.21 โดยสภาวะการทำงานจะเปลี่ยนเป็นตรงกันข้ามหรือ negative pulse ลูกต่อไปถูกป้อนเข้ามาและเป็นอย่างนี้ไปเรื่อยๆ

โดยรูปที่ 3.21 แสดงวงจร Bistable Multivibrator อย่างง่ายโดยมี input เป็น toggle input วงจร Bistable พื้นฐานประกอบไปด้วย R_1 , R_2 , R_3 และ R_4 และ Q_1 และ Q_2 ดังรูป ส่วนองค์ประกอบที่เหลือคือ R_5,R_6,R_7,X_1,X_2 และ C_1,C_2 เป็นวงจร Steering (Steering circuit) สำหรับ input ที่เป็น pulse โดยจุดประสงค์ของ Steering circuit คือจะนำ negative pulse ไปยังเบสของทรานซิสเตอร์ที่อยู่ในสภาวะ ON เพื่อเปลี่ยนไปยังสภาวะ OFF



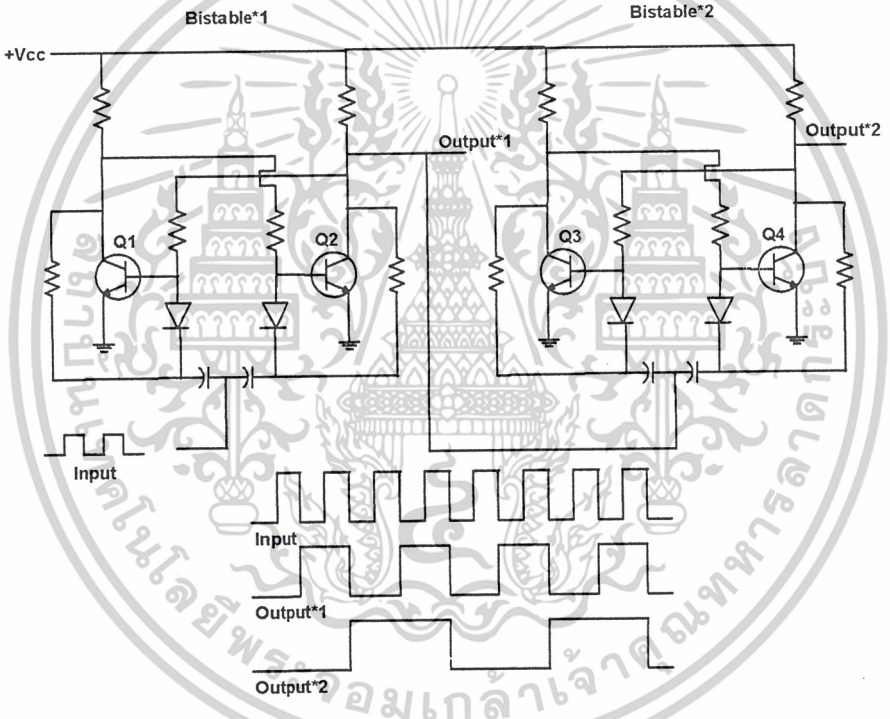
รูปที่ 3.21 วงจรไบสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์โดยมี toggle เป็นอินพุท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมมติให้ Q_1 อยู่ในสภาวะ OFF และ Q_2 อยู่ในสภาวะ ON ก่อน negative pulse ลูกต่อไปจะเข้ามา โดยสภาวะนี้แรงดันที่ขาคอลเล็กเตอร์ ของ Q_1 จะมีค่าประมาณ V_{CC} และที่คาโทดของไดโอด X_1 อยู่ในสภาพ Reverse bias โดยผ่านR_5 ส่วนด้านอาโนดจะมีค่าเป็น 0 โดยผ่านทาง R_4 ซึ่งถูกต่อมาจากขาคอลเล็กเตอร์ของ Q_2 ขณะ saturated ถ้ามี negative pulse ลูกต่อมาเข้ามาก็จะทำให้ Q_1 และ Q_2 เปลี่ยนสภาวะไปเป็นตรงกันข้าม คือ Q_1 อยู่ในสภาวะ ON และ Q_2 อยู่ในสภาวะ OFF

โดย R_5, C_1 จะต้องคำนึงถึงค่า time constant โดยจะต้องมีค่า time constant ที่น้อยเมื่อเทียบกับคาบเวลาของ pulse และ R_6, C_2ก็ใช้หลักการเดียวกัน

3.8.3 Cascading Bistable Multivibrators



รูปที่ 3.22 วงจรไบสเตเบิลต่อแบบ two cascaded

โดยวงจร Bistable 2 วงจรอาจถูกนำมาต่อแบบ cascaded เพื่อที่จะเป็นวงจรนับหรือหารความถี่ให้เหลือเพียงครึ่งหนึ่ง จากรูปที่ 3.22 จะเป็นวงจร Bistable 2 วงจรอาจถูกนำมาต่อแบบ cascaded ที่ทำงานในโหมดของ toggle โดย input ของวงจรที่ 2 จะได้มาจาก output ของวงจรที่ 1

เมื่อมีสัญญาณ input เข้ามาเป็น pulse และไดโอดในวงจร steering จะนำกระแสเมื่อมี negative pulse เท่านั้น จากเหตุนี้เอง output ของวงจรที่ 1 จะเปลี่ยนสถานะเมื่อสัญญาณ input เปลี่ยนสภาวะจากขอบขาขึ้นเป็นขอบขาลง (หรือ V_{CC} เป็น 0) ในทำนองเดียวกัน output ของวงจรที่ 2 จะเปลี่ยนสภาวะเมื่อ output ของวงจรที่ 1 เปลี่ยนสภาวะจากขอบขาขึ้นเป็นขอบขาลง (หรือ V_{CC} เป็น 0) ดังรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.9 อินเวอร์เตอร์

โดยทั่วไปแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ

1.อินเวอร์เตอร์เฟสเดียว

2.อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส

นอกจากนี้อินเวอร์เตอร์ยังแบ่งตามลักษณะของโครงสร้างและการนำไปใช้งานอีกด้วยซึ่งแบ่งได้เป็น 2 แบบ และแต่ละแบบ ยังถูกแบ่งย่อยลงไปอีกดังต่อไปนี้

1.อินเวอร์เตอร์แบบป้อนแรงดัน (voltage source inverter : VSI)

ซึ่งแบ่งได้เป็น 4 กลุ่ม ดังนี้

1.1 อินเวอร์เตอร์แบบการมีอดดูเลตตามความกว้างของพัลส์ (pulse width modulation (PWM) inverter)

1.2 อินเวอร์เตอร์แบบรีโซแนนท์

1.3 อินเวอร์เตอร์แบบ McMurry

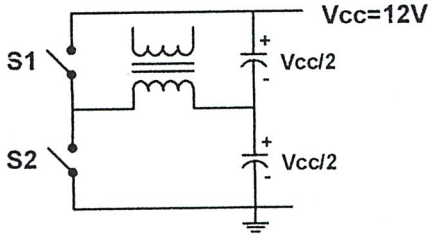
1.4 อินเวอร์เตอร์แบบ McMurry- Bedford

2. อินเวอร์เตอร์แบบป้อนกระแส (current source inverter : CSI)

วงจรสวิตชิ่งอินเวอร์เตอร์ที่นิยมใช้กันมีอยู่หลายแบบ แต่ละแบบจะมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันออกไปรวมทั้งคุณสมบัติของอุปกรณ์ที่ใช้ในแต่ละวงจรและขนาดของแต่ละอุปกรณ์ก็จะแตกต่างกันไป โดยวงจรอินเวอร์เตอร์ที่นิยมใช้ได้แก่ วงจรพุชพูล (push – pull), วงจรฮาร์ฟบริดจ์ (half – bridge), วงจรฟูลบริดจ์ (full – bridge)

3.9.1 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบครึ่งบริดจ์ (half – bridge inverter)

วงจรนี้จะใช้ทรานซิสเตอร์เป็นสวิตช์ในการอินเวอร์เตอร์ เนื่องจากการหยุดนำกระแสหรือการปิดทรานซิสเตอร์ทำได้ โดยหยุดจ่ายกระแสที่ขั้วเบสของทรานซิสเตอร์เท่านั้น ไม่จำเป็นต้องวงจรในการหยุดกระแสเหมือนกับ SCR ซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 3.23 จากรูปจะเห็นได้ว่าเมื่อ S_1 และ S_2 นั้นได้รับการออกแบบให้ทำงานตรงข้ามกันที่เวลาเดียวกัน ตัวอย่างเช่น เมื่อ S_1 " ON " แรงดันที่ได้จะเป็น $V_{CC}/2$ และเมื่อ S_2 " ON " จะทำให้เราได้ แรงดันที่ได้จะเป็น $-V_{CC}/2$ ในขณะที่ทรานซิสเตอร์อยู่ในสภาวะ " OFF " จะเกิดแรงดันย้อนกลับมีค่าเป็น $V_{CC}/2$ แทนที่จะเป็น V_{CC} ดังนั้นจึงเรียกอินเวอร์เตอร์ชนิดนี้ว่า เป็นอินเวอร์เตอร์แบบครึ่งบริดจ์ (half – bridge inverter)

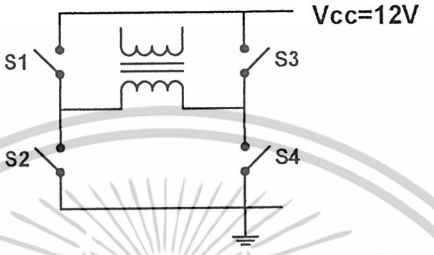


รูปที่ 3.23วงจรอินเวอร์เตอร์แบบครึ่งบริดจ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.9.2 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบเต็มบริดจ์ (full – bridge inverter)

ในวงจรนี้จะใช้ทรานซิสเตอร์ 4 ตัวเป็นสวิตช์ และจะทำงานเป็นคู่ คือ S_1 และ S_4 " ON " พร้อมกันจึงจะมีแรงดันตกคร่อมที่โหลด เท่ากับ V_{CC} แต่ถ้า S_2 และ S_3 " ON " พร้อมกันจึงจะมีแรงดันตกคร่อมที่โหลด เท่ากับ $-V_{CC}$ และในขณะที่สวิตช์ทั้ง 4 ตัว " OFF " จะเกิดแรงดันย้อนกลับมีค่าเป็น V_{CC} ดังนั้นจึงเรียกอินเวอร์เตอร์ชนิดนี้ว่า วงจรอินเวอร์เตอร์แบบเต็มบริดจ์ (full – bridge inverter) ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 3.24



รูปที่ 3.24 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบเต็มบริดจ์

3.9.3 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบพุชพูล (push – pull inverter)

วงจรอินเวอร์เตอร์แบบพุชพูลนี้เป็นวงจรที่กำลังขาออกในช่วง 100 ถึง 500 watt ซึ่งในวงจรพุชพูลนี้จะใช้หม้อแปลงที่มีแทปกลางด้านอินพุต วงจรอินเวอร์เตอร์แบบพุชพูลยังสามารถทำงานร่วมกับ PWM และรูปคลื่นสี่เหลี่ยมได้ดีเช่นเดียวกับ วงจรอินเวอร์เตอร์แบบครึ่งบริดจ์ หรือ วงจรอินเวอร์เตอร์แบบเต็มบริดจ์ โดย PWM จะเป็นตัวควบคุมสวิตช์ 1 , สวิตช์ 2 เพื่อให้ i_0 ไหลอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นในขณะที่สวิตช์ 1 อยู่ในสภาวะ " ON " (หรือสวิตช์ 2 อยู่ในสภาวะ " OFF ") ขดปฐมภูมิทางด้านบนจะครบรอบ และจะทำให้มีกระแส i_0 ที่ขดลวดทุติยภูมิ จะเป็นค่าบวกได้แรงดันบวกที่มีขนาด $V_0 = V_{source} / n$ เมื่อ n คือ อัตราส่วนจำนวนรอบครึ่งบนหรือครึ่งล่างของขดลวดปฐมภูมิต่อจำนวนรอบขดลวดทุติยภูมิ แต่เมื่อสวิตช์ 2 อยู่ในสภาวะ " ON " (หรือสวิตช์ 1 อยู่ในสภาวะ " OFF ") ขดลวดปฐมภูมิด้านล่างจะทำงานครบรอบทำให้แรงดันที่ขดลวดทุติยภูมินั้นมีค่าเป็น ลบ ขนาด $V_0 = -V_{source} / n$ วงจรอินเวอร์เตอร์แบบพุชพูลนี้ จะให้ค่าศักดาไฟฟ้าสูงสุด (Peak switch voltage),V_Tและกระแสสูงสุด (Peak switch current), I_T ดังนี้

$$V_T = 2V_S$$

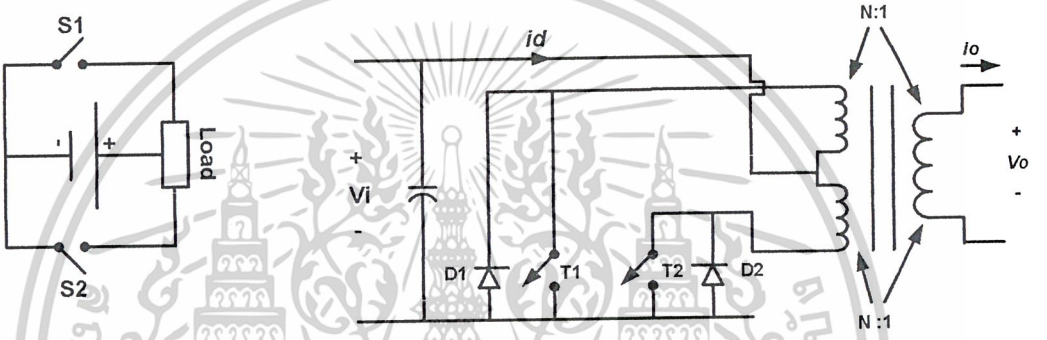
$$I_T = i_{0,peak} / n$$

ข้อดีของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบพุชพูล

คือการนำกระแสผ่านขดลวดปฐมภูมิ แต่ครั้งจะผ่านสวิตช์เพียง 1 สวิตช์ซึ่งจะแตกต่างกับวงจรอินเวอร์เตอร์แบบเต็มบริดจ์ ที่แต่ละครั้งกระแสจะผ่านสวิตช์ถึง 2 ตัว ทำให้เกิดศักดาตกคร่อมสวิตช์มากกว่าวงจรอินเวอร์เตอร์แบบพุชพูล ซึ่งจะมีผลโดยตรงต่อระดับแรงดันด้านเอาท์พุต นอกจากนี้ยังเป็นผลดีใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้านแรงดันด้านอินพุต หรือ V_{source} ที่มีค่าต่ำๆ เช่น battery และแหลงจ่ายไฟตรงแรงดันต่ำอื่นๆ ซึ่งจะทำให้ค่าแรงดันที่ตกคร่อมสวิตช์ (Voltage drop) มีค่าน้อย ผลก็คือจะยังคงได้แรงดันเอาท์พุตมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบ กับวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดเต็มบริดจ์ หรือกล่าวโดยทั่วไปแรงดันเอาท์พุตจะไม่ถูกกระทบจากแรงดันทางด้านอินพุตที่เปลี่ยนไปมาก หรือแสดงการมีเสถียรภาพการทำงานของวงจรสูง ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่ต้องการพื้นฐานของวงจรอิเล็กทรอนิกส์

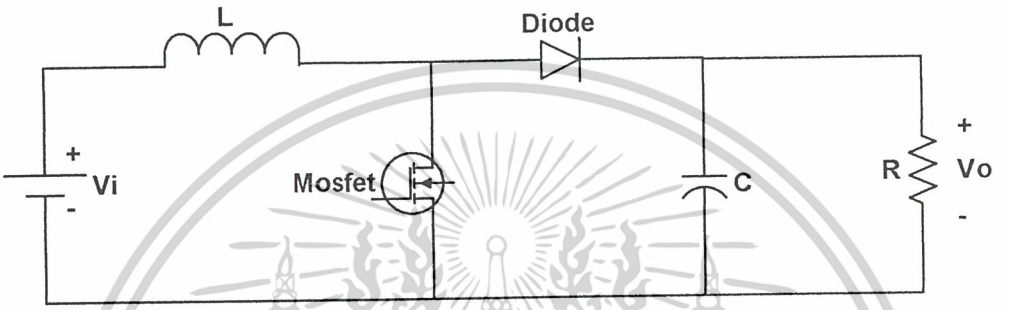


รูปที่ 3.25 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบพุชพูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
หลักการและการออกแบบวงจร

4.1 การออกแบบวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์ (Boost Converter Design)



รูปที่ 4.1 วงจรบูสคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการออกแบบ

ข้อมูลที่ใช้ในการออกแบบ คือ V_i=12V , V_o=14V , P=50 , f=20k , $I_{ripple} < 0.3$, $(V_{o,ripple} / V_o) < 1\%$

4.1.1 การคำนวณหาค่า Duty Cycle

จาก $Vo/Vi = Ts/Toff = 1/1-D$

$Vo/Vi = 1/1-D$

$1-D = Vi/Vo$

$D = 1- Vi/Vo$

$D = 1- (12/14)$

$D = 0.143$

4.1.2 การคำนวณหาค่า Inductance (L)

จาก $Po = Vo\ Io$

แทนค่า $50 = 14\ Io$

$Io = 3.6A$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จาก $L_{min} = D(1-D)^2R/2f$

$L_{min} = D(1-D)^2 V/2f*I$

$L_{min} = 0.143(1-0.143)^2(14)/2(20k)*(3.6)$

$L_{min} = 10.2\ uH$

จาก $VL = L\ iL,ripple/ton$

$VL = L\ iL,ripple/DT$

$L = Vi\ DT/Il,ripple$

$L = 12(0.143)/0.3(20k)$

$L = 0.289\ mH$

เลือกใช้ L เท่ากับ 0.3 mL (เผื่อไว้สำหรับ continuous current)

ตรวจสอบ iL,ripple < 0.3 จากสมการ

$iL,ripple = Vi\ D/Lf$

$iL,ripple = 12(0.143)/0.3m(20k)$

$iL,ripple = 0.286$ (ใช้ได้)

4.1.3 การหาค่าตัวเก็บประจุ (Capacitance)

เพื่อมากรองแรงดันการกระเพื่อม (ripple) ที่ output

จาก $Vo,ripple/Vo = D/RCf$

$C = D/Rf(Vo,ripple/Vo)$

$C = 0.143/(14/3.6)(20k)(0.01)$

$C = 184\ uF$

เลือกใช้ C ขนาดมากกว่า 184 uF เพื่อช่วยลดขนาด ripple และยังช่วยกรองแรงดัน output ให้เรียบยิ่งขึ้น ดังนั้นจึงเลือก C เท่ากับ 1000uF

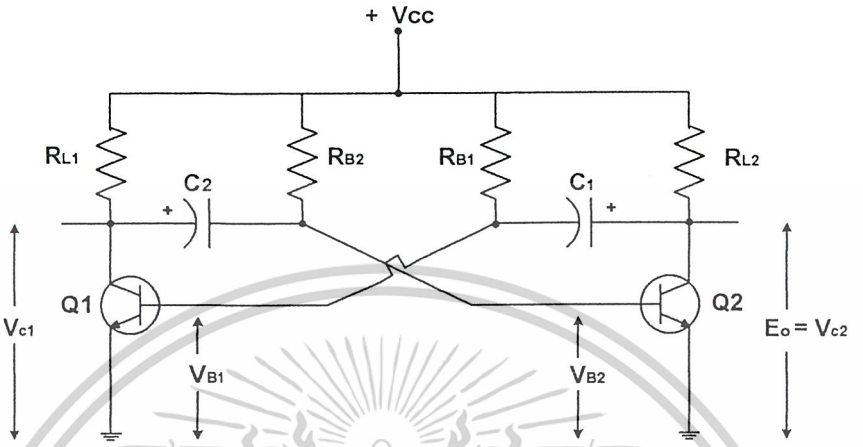
ส่วนตัวที่จะมาควบคุม mosfet ในโครงงานนี้จะใช้ IC TL494 มาเป็นตัวควบคุมแบบ voltage control (สามารถกำหนดความถี่ได้จากภายนอก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

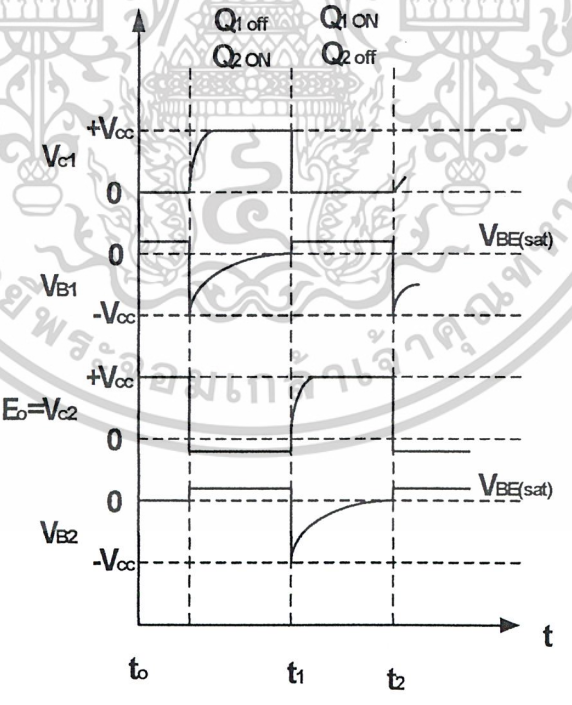
4.2 การออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์ (Inverter Design)

4.2.1 การออกแบบวงจรอะสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ (Astable Multivibrator)

ข้อมูลที่ใช้ในการออกแบบ คือ ต้องการ square wave (ton = toff) , f = 100 Hz



รูปที่ 4.2 วงจรอะสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ (Astable Multivibrator Circuit)



รูปที่ 4.3 สัญญาณตามจุดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.2 และ 4.3 จะได้ว่า

$t1 - t0 =$ เวลา tA

และ $t2 - t1 =$ เวลา tB

ให้ $T =$ เวลา 1 คาบ (period)

ดังนั้น $T = tA + tB$

เมื่อ $t = 0.69RC$

$tA = 0.69RB1C1$

$tB = 0.69RB2C2$

แทนค่า $T = 0.69RB1C1 + 0.69RB2C2$

ตามปกติให้ $R = RB1 = RB2$

จะได้ $T = 0.69R(C1+C2)$

ในกรณีที่วงจรอะสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์เป็นแบบสมมาตร จะได้

$C = C1 = C2$

ดังนั้น $T = 0.69(C+C)$

$T = 0.69(2C)$

จะได้ $T = 1.38RC$

จากข้อมูลที่ใช้ในการออกแบบ $f = 100Hz$ ได้ $T = 1/100 = 0.01s$ และให้

$t\,on = toff = 0.01/2 = 0.005 = 5$ ms

ตามปกติให้ $ton = toff$ จะได้ $RB1 = RB2$ และ $C1=C2$

จาก $T = 1.38RC$

เลือก $R = 150k$, $C = 47000\,pu$ และ $T = 0.01$ s

แทนค่า $T = (1.38)(150k)(47000p)$

$T = 9.729$ ms

$f = 1/T = 102.8$ Hz

ตรวจสอบ

จาก $ton = toff = 0.69RC$

$= 0.69(150k)(47000pu)$

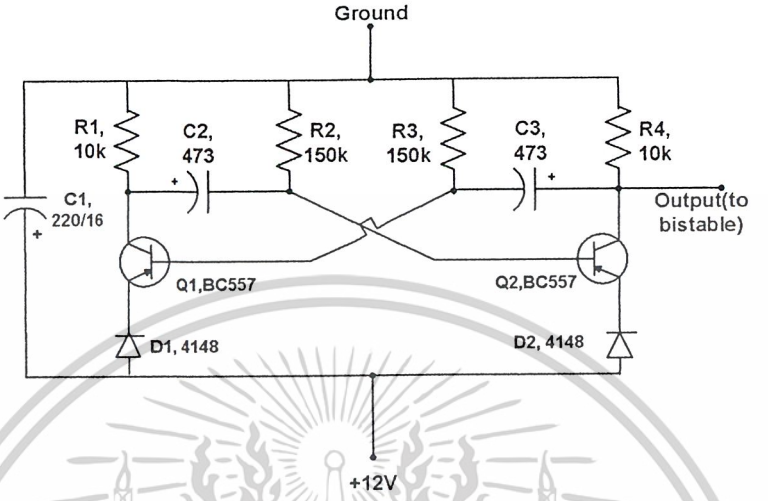
$= 4.86$ ms

ดังนั้น $ton = toff$ ประมาณ 5 ms (ใช้ได้)

ในการเลือก RB1 , RB2 ต้องคำนึงถึง IB ที่ใช้ในการขับทรานซิสเตอร์ Q1 , Q2 ตามลำดับ ว่า IB ที่ได้จากการเลือก RB1 , RB2 เหมาะกับทรานซิสเตอร์ Q1 , Q2 หรือไม่ โดยดูจาก data sheet

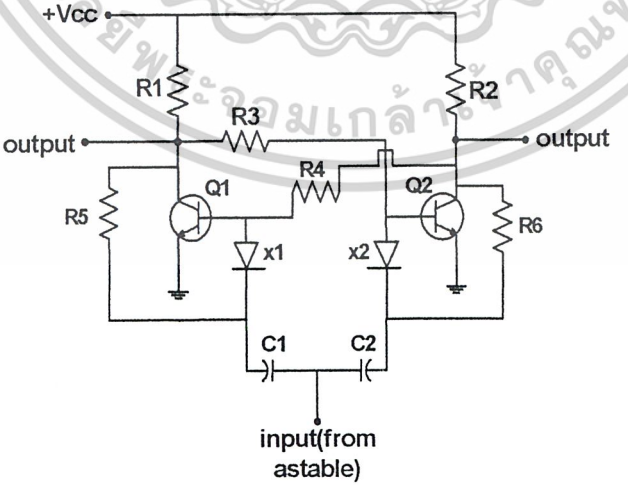
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการเลือก RL1 , RL2 ต้องคำนึงถึง Ic ที่ไหลผ่านขา Collector ของทรานซิสเตอร์ Q1 , Q2 ตามลำดับ ว่า Ic ที่ได้จากการเลือก RL1 , RL2 ว่าเหมาะกับ Q1 , Q2 หรือไม่ โดยดูจาก data sheet



รูปที่ 4.4 วงจรอะสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ ที่ได้จากการออกแบบ (Astable Multivibrator)

4.2.2 การออกแบบวงจรไบสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ (Bistable Multivibrator Design)



รูปที่ 4.5 วงจรไบสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ (Bistable Multivibrator)

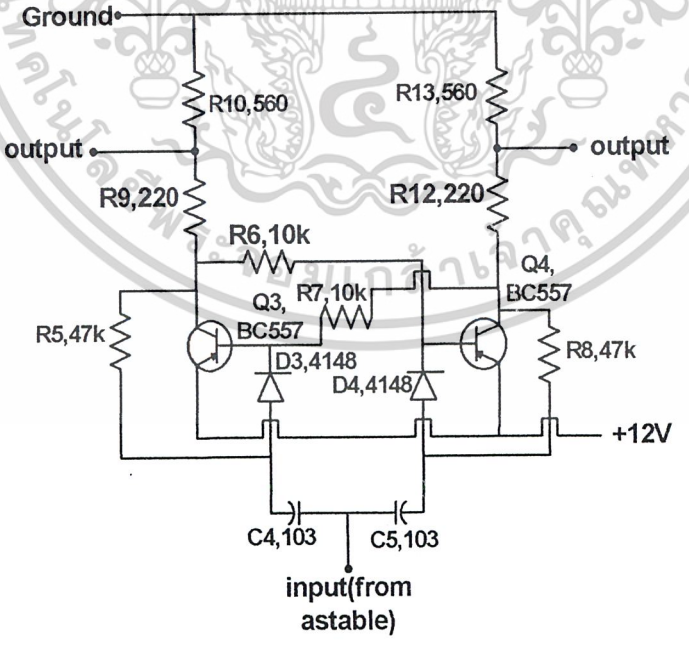
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการเลือกค่า C1 , R5 และ C2 , R6 จะต้องคำนึงถึงค่า time constant โดยจะต้องมีค่า time constant ที่น้อยเมื่อเทียบกับคาบเวลาของ square wave

ในการเลือกค่า R1 , R2 (ทำหน้าที่ลิมิต Ic ที่ไหลผ่านtransistor)จะต้องเลือกค่าเพื่อให้ได้ค่ากระแสที่ไหลผ่านขา collector ของ transistor Q1 , Q2 เหมาะกับพิกัดที่ transistor แต่ละตัวทนได้

ในการเลือกค่า R4 จะต้องคำนึงถึงค่า R2 ด้วย โดยค่า R4 + R2 (ทำหน้าที่ลิมิต IB ที่ไหลผ่าน transistor) จะต้องเลือกค่าเพื่อให้ได้ค่ากระแสไปขับขา base ของ transistor Q1 เหมาะกับพิกัดที่ transistor Q1 ทนได้

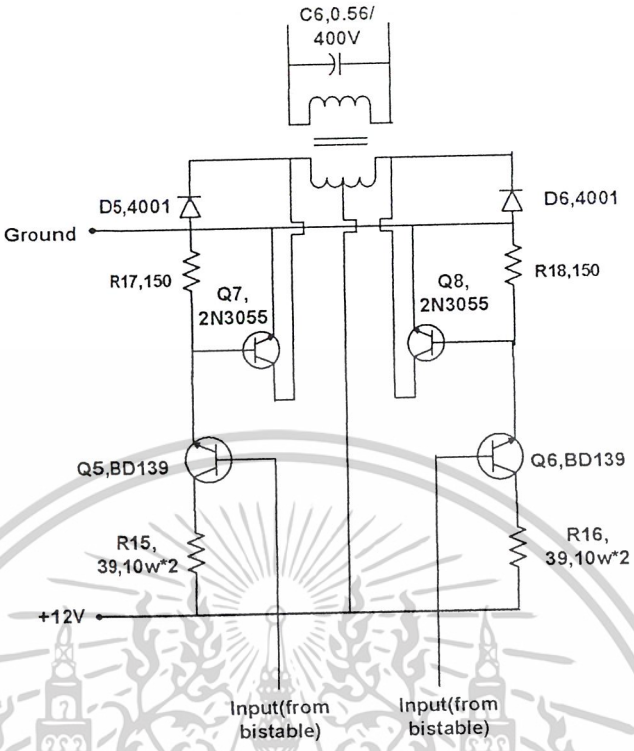
ในการเลือกค่า R3 จะต้องคำนึงถึงค่า R1 ด้วย โดยค่า R3 + R1 (ทำหน้าที่ลิมิต IB ที่ไหลผ่าน transistor) จะต้องเลือกค่าเพื่อให้ได้ค่ากระแสไปขับขา base ของ transistor Q2 เหมาะกับพิกัดที่ transistor Q2 ทนได้



รูปที่4.6วงจรไบสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ที่ได้จากการออกแบบ(Bistable Multivibrator)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

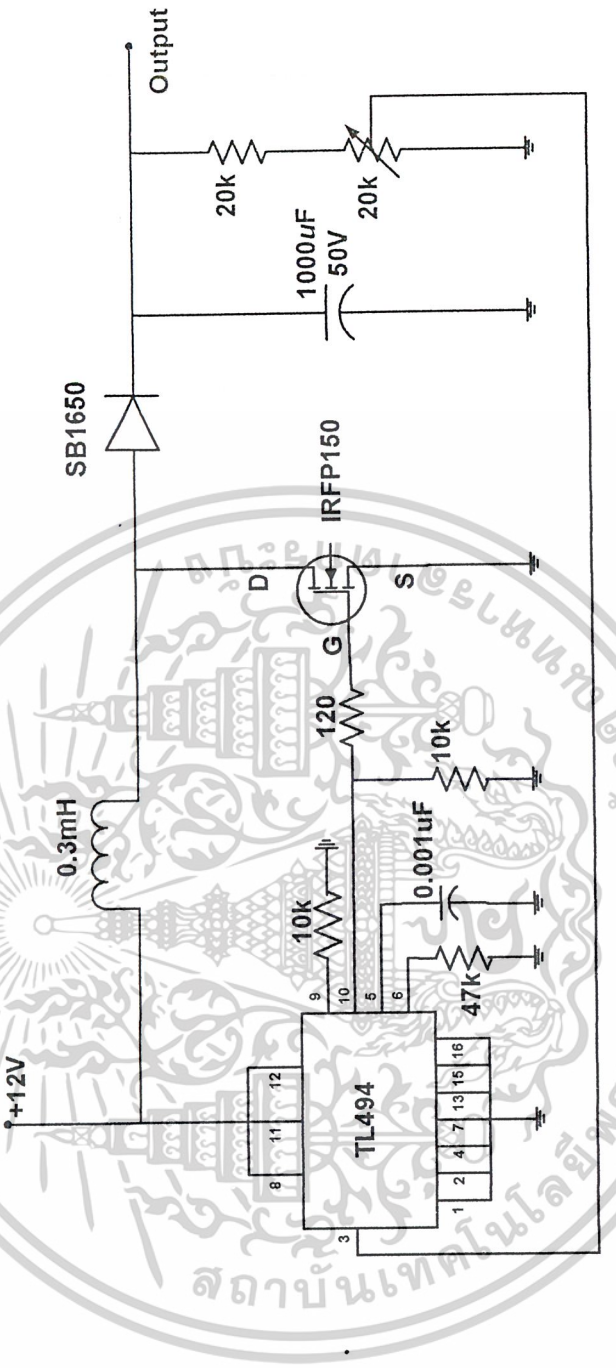
4.2.3 ส่วนขับอุปกรณ์ switching และ อุปกรณ์ switching



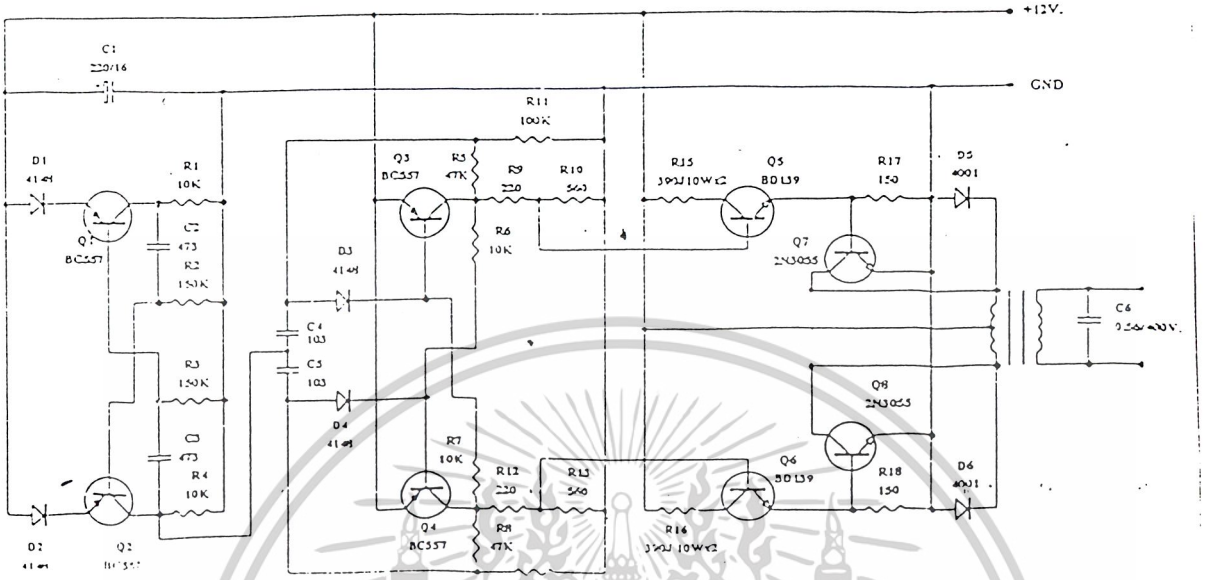
รูปที่ 4.7 ส่วนขับอุปกรณ์ switching และ อุปกรณ์ switching

จากรูปที่ 4.7 transistor Q7,Q8 ก็คือ อุปกรณ์ switching ควรเลือกที่ทนกระแส collector ได้สูงๆ เพราะเวลาจ่ายโหลดที่มีวัตต์สูง โหลดจะดึงกระแสสูงตามไปด้วย ส่วน transistor Q5,Q6 เป็นตัวช่วยในการขับ transistor Q7,Q8 อีกที หลักในการเลือกก็เหมือน transistor ทั่วไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 แสดงวงจรส่วนของ Boost Converter



รูปที่ 4.9 แสดงวงจรส่วนของ Inverter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

ผลการทดลอง

ผลการทดลองแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ 5.1 Boost Converter และ 5.2 Inverter

5.1 ผลการทดลองในส่วน Boost Converter

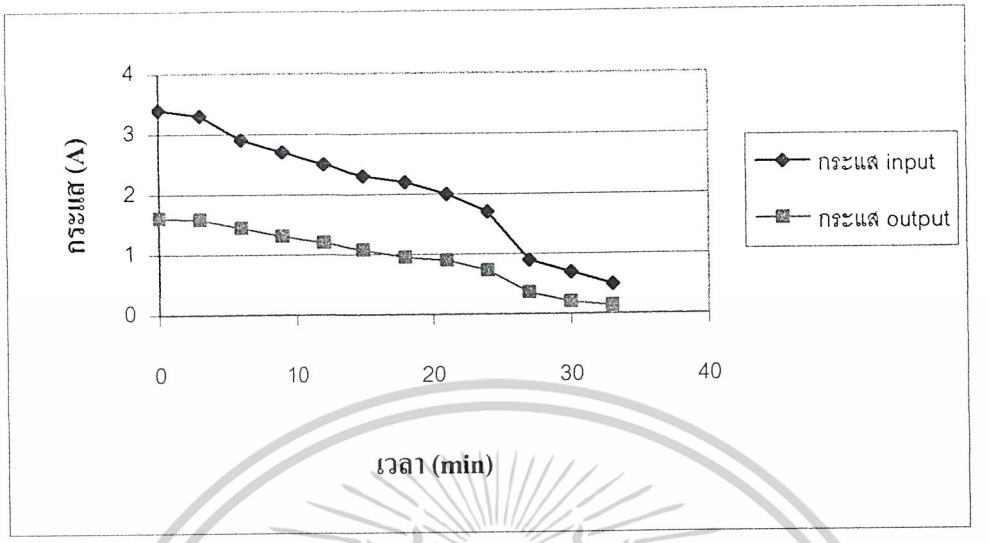
ใช้ Boost Converter เพื่อยกระดับแรงดันจาก 12 V เป็น 14 V ก่อนทำการอัดประจุเข้าแบตเตอรี่ตะกั่วกรดขนาด 12 V, 4.5 Amp-Hour โดยใช้แบตเตอรี่ขนาด 12 V , 70Ah เป็น supply และแสดงผลการทดลองตามตารางที่ 5.1

ผลการอัดประจุ							
Time (min)	กระแส input (amp)	แรงดัน input (volt)	กระแส output (amp)	แรงดัน output (volt)	P(in) (watt)	P(out) (watt)	ประสิทธิภาพ (%)
0	3.4	9.46	1.6	12.76	32.16	20.42	63.5
3	3.3	9.24	1.58	12.67	30.49	20.02	65.7
6	2.9	8.96	1.45	12.64	25.98	18.33	70.6
9	2.7	8.73	1.31	12.62	23.57	16.53	70.1
12	2.5	8.56	1.2	12.59	21.4	15.12	70.7
15	2.3	8.3	1.08	12.56	19.1	13.56	70.9
18	2.2	8.2	0.95	12.55	18.04	11.92	66.1
21	2	7.86	0.9	12.54	15.72	11.29	71.8
24	1.7	7.27	0.73	12.43	12.36	9.07	73.4
27	0.9	7.26	0.36	12.25	6.53	4.41	67.5
30	0.7	7.25	0.2	12.22	5.08	2.44	48
33	0.5	7.25	0.14	12	3.63	1.68	46.3

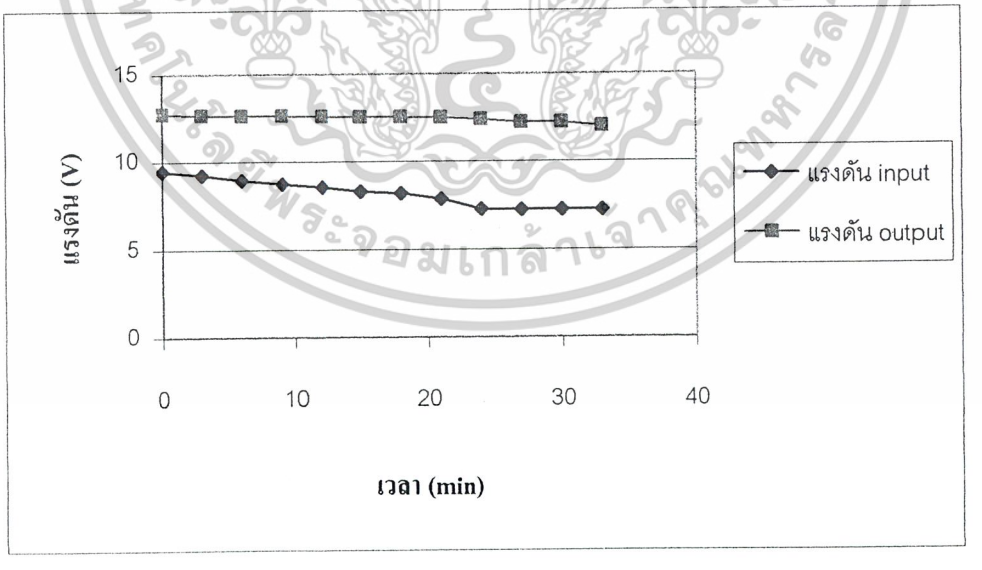
ตารางที่ 5.1 ผลการอัดประจุ

หมายเหตุ เนื่องจากในการทดลองนี้ไม่ได้ใช้แผงโซลาร์เซลล์จริงแต่จะใช้แบตเตอรี่ขนาด 12 V, 70Ah เป็นแหล่งจ่ายแทนและเนื่องจากวงจร boost converter ที่ออกแบบสามารถจ่ายกระแสได้สูงสุด 1.8 A ดังนั้นจึง เลือกใช้แบตเตอรี่ขนาด 12 V, 4.5Ah แทนที่จะใช้แบตเตอรี่ขนาด 12 V, 100Ah ตามที่ได้ตั้งจุดประสงค์ไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

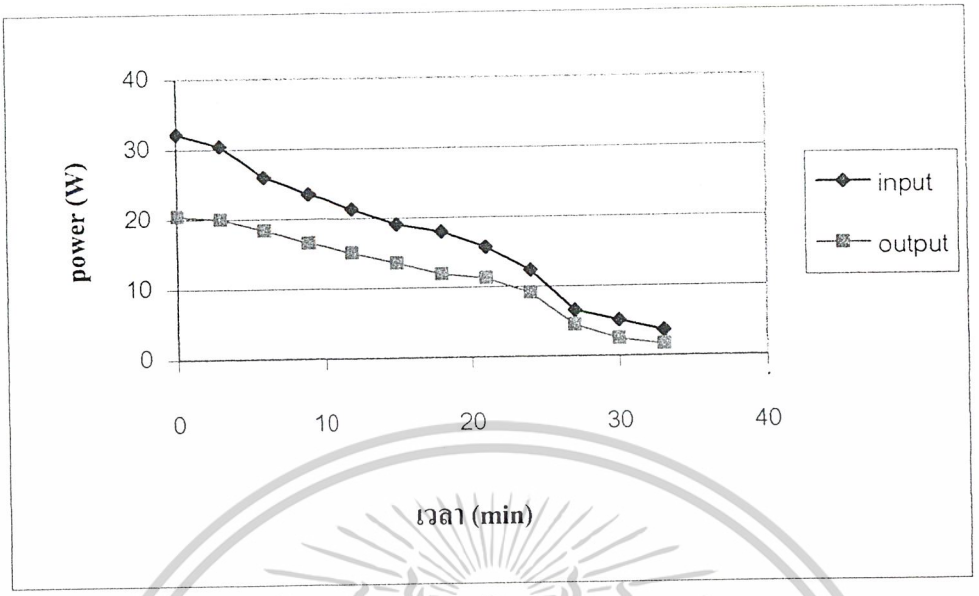


รูปที่ 5.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง เวลากับกระแส



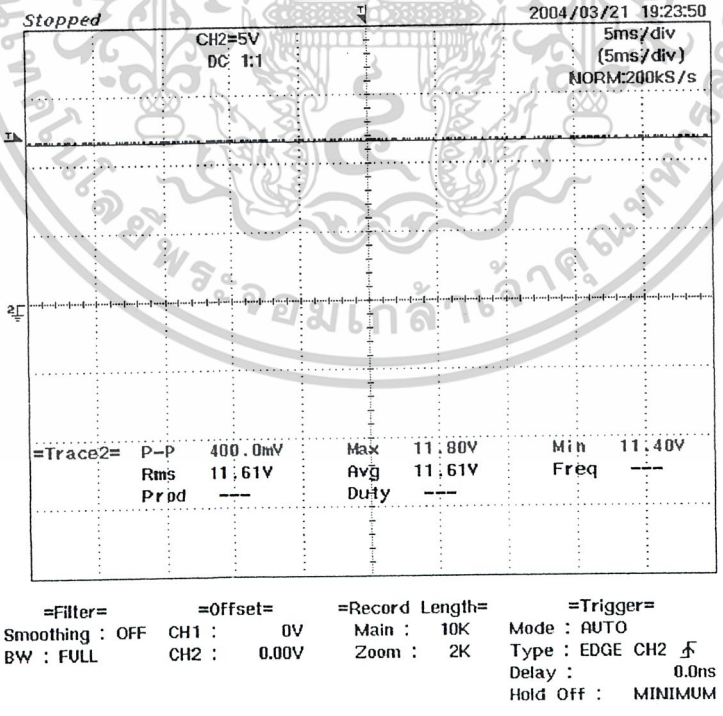
รูปที่ 5.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง เวลากับแรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



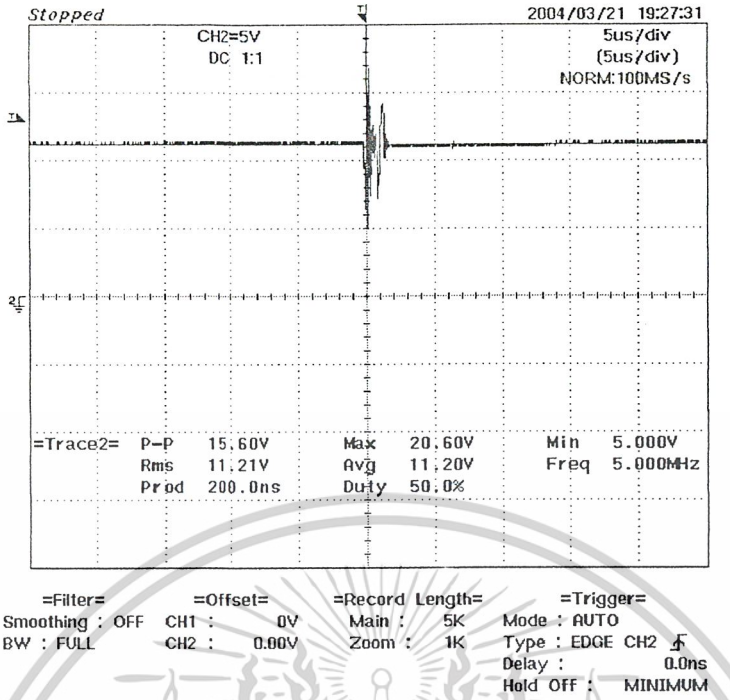
รูปที่ 5.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับกำลังไฟฟ้า

รูปสัญญาณที่จุดต่างๆ ของวงจร Boost Converter โดยมีโหลดไฟฟ้ากระแสตรง R 10 โอห์ม 10 วัตต์

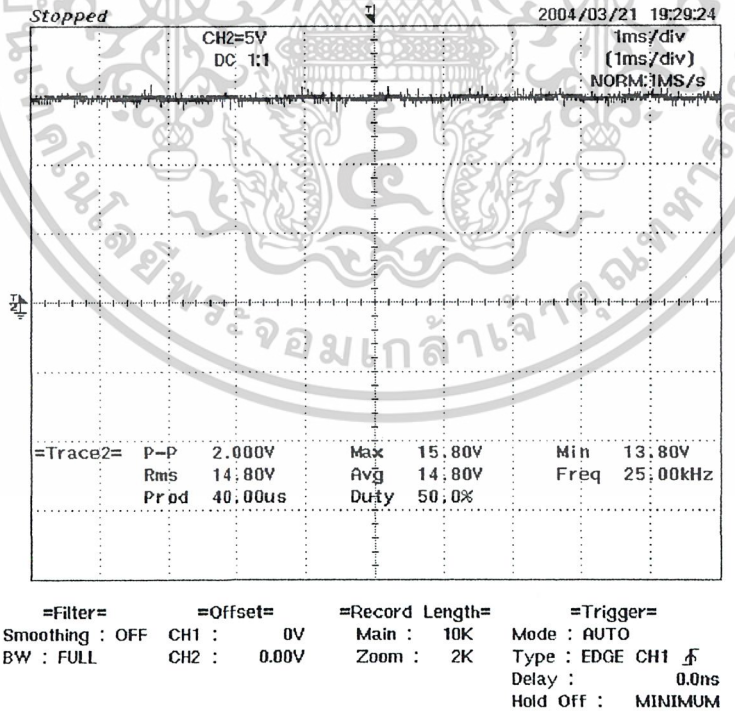


รูปที่ 5.5สัญญาณ input ของ battery ขณะไม่มี load

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

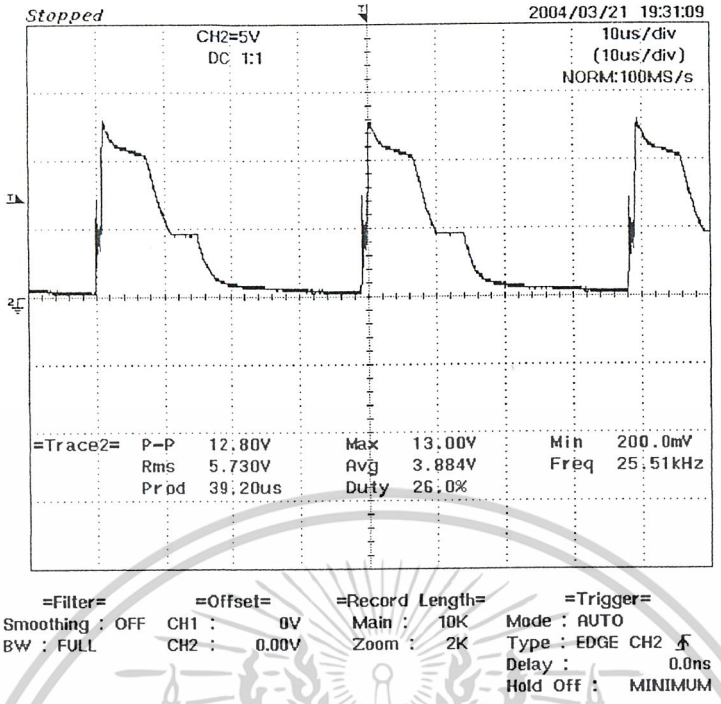


รูปที่ 5.6 สัญญาณ input ของ battery ขณะมี load



รูปที่ 5.7 สัญญาณ output ของ battery ขณะมี load

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.8 สัญญาณขับขาเกตของมอสเฟตขณะมีโหลด

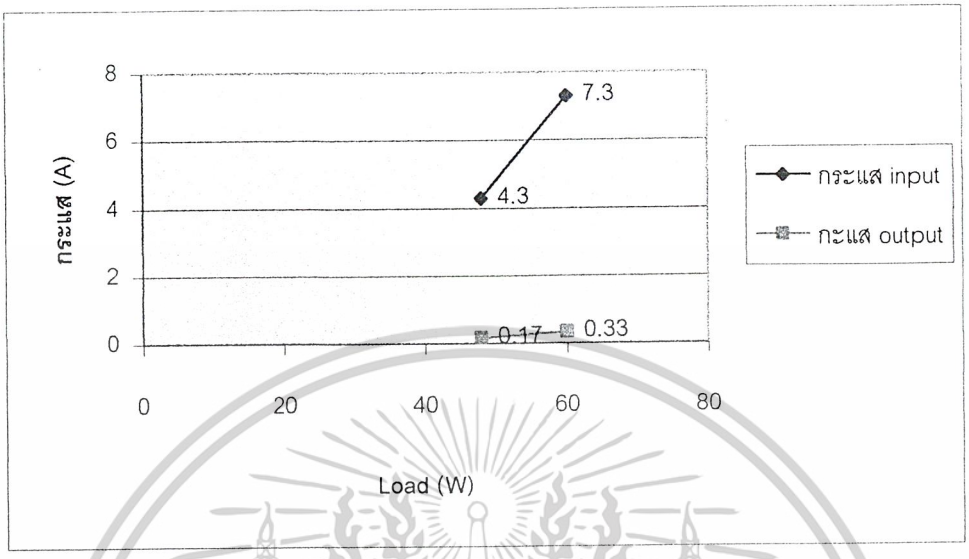
5.2 ผลการทดลองในส่วน Inverter

เป็นการจ่ายไฟด้วยแบตเตอรี่ขนาด 12 V, 100 Ah โดยผ่านอินเวอร์เตอร์แปลงเป็น 220 V_{ac} ก่อนที่จะจ่ายไฟไปยังโหลดขนาด 50 W, 220 V_{ac} โดยมีผลการทดลองตามตารางที่ 5.2

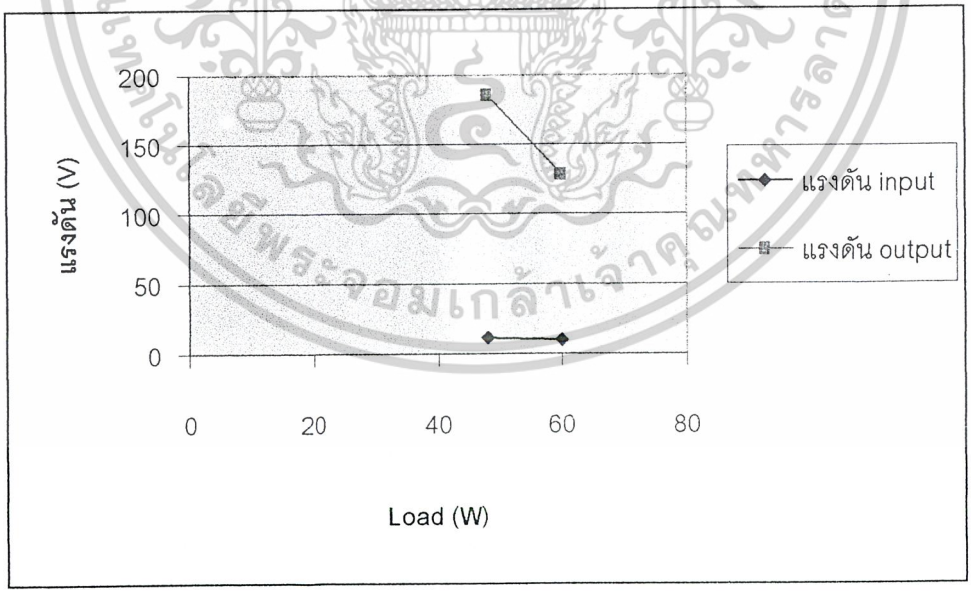
ผลการจ่ายไฟ				
Load (watt)	**กระแส input (amp)**	**แรงดัน input (volt)**	**กระแส output (amp)**	**แรงดัน output (volt)**
48	4.3	11.09	0.17	185.1
60	7.3	10.9	0.33	127.9

ตารางที่ 5.2 ผลการจ่ายไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



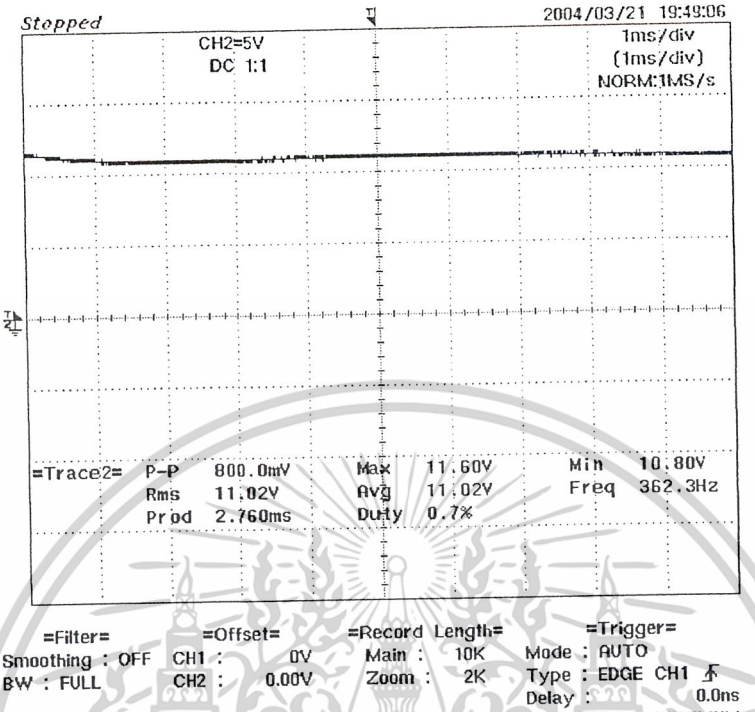
รูปที่ 5.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Load กับ กระแส



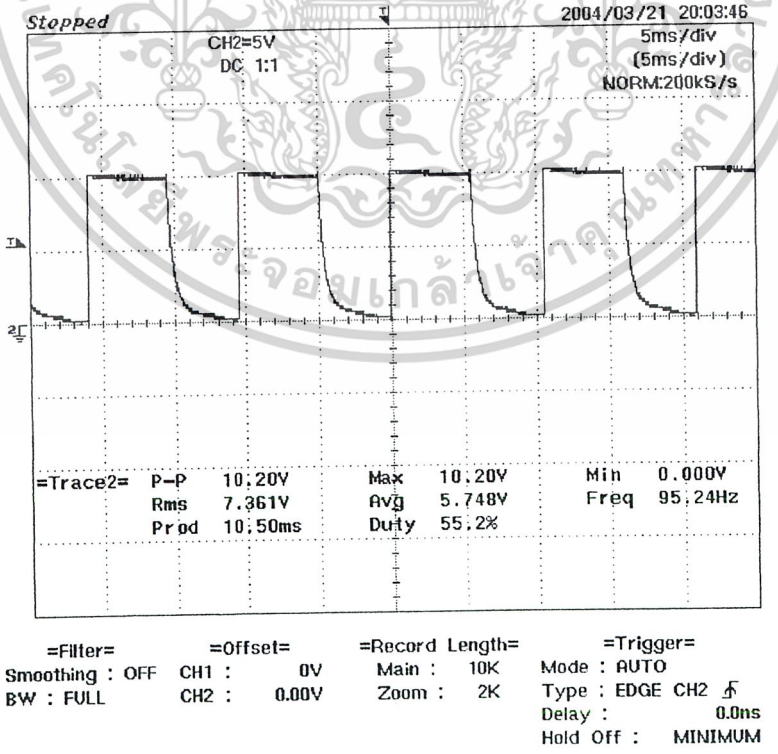
รูปที่ 5.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Load กับ แรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปสัญญาณที่จุดต่างๆ ของ วงจร inverter โดยมีโหลดไฟฟ้ากระแสสลับ 50 วัตต์

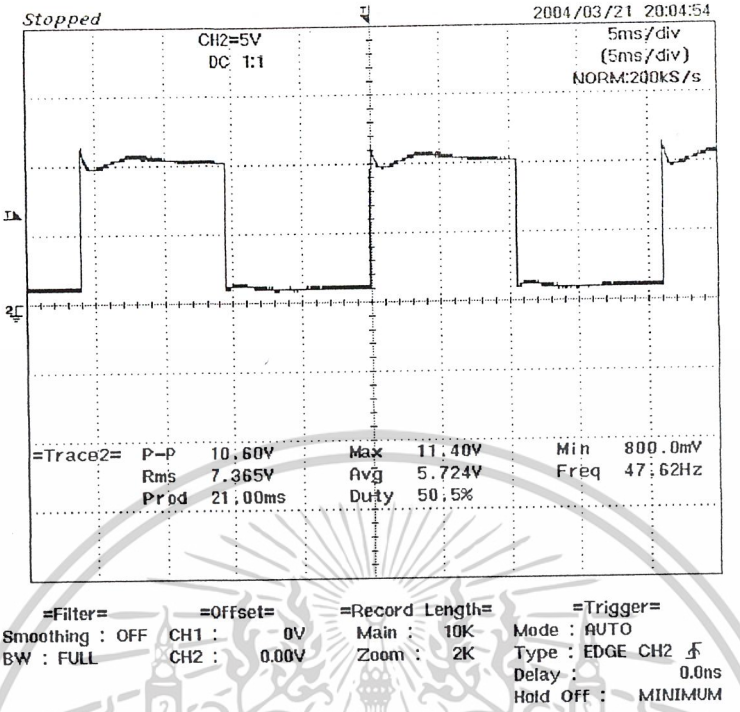


รูปที่ 5.11 สัญญาณ input ของ battery ขณะมี load

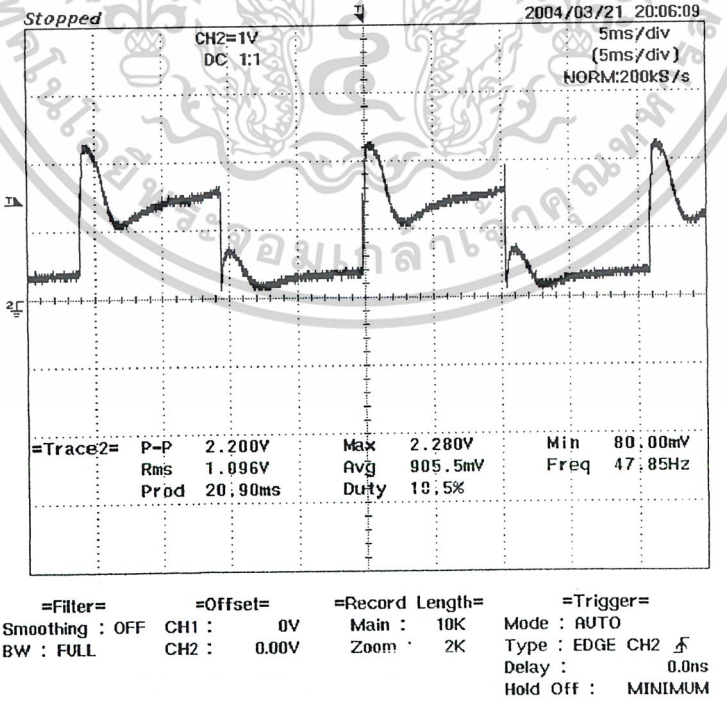


รูปที่ 5.12 สัญญาณของวงจรอะสเตเบิล 100 Hz ขณะมี load

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

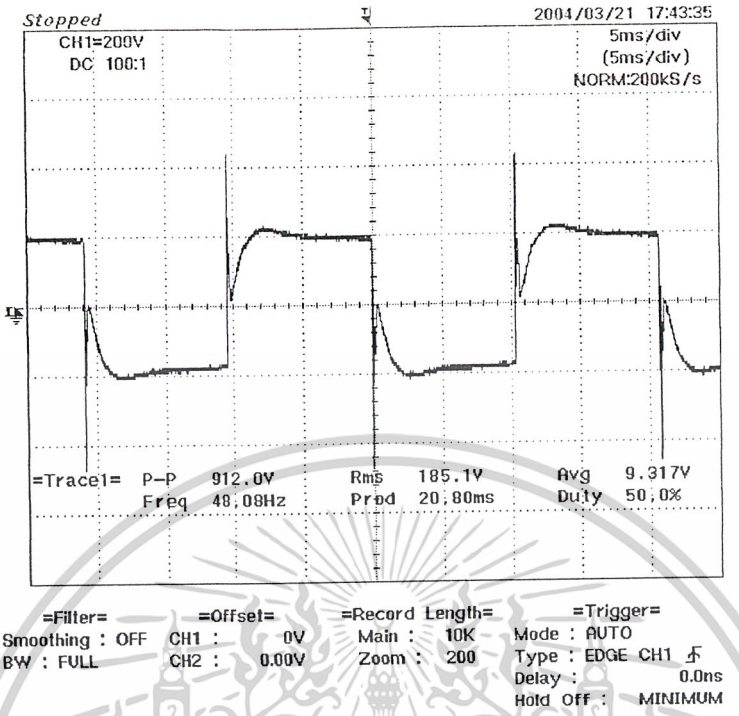


รูปที่ 5.13 สัญญาณของวงจรไบสเตเบิล 50 Hz ขณะมี load



รูปที่ 5.14 สัญญาณขับขนแบสของทรานซิสเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.15 สัญญาณ output รูป sine ก่อนเข้าโหลด(พัดลม)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6
สรุปผล วิจารณ์ผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

จากการทำงานที่ผ่านมาทั้งหมดวงจรที่ได้จัดทำขึ้นสามารถที่จะทำงานได้ตามที่ออกแบบไว้ โดยมีผลสรุปและข้อแนะนำดังนี้

6.1 สรุปผลการทดลอง

โดยวงจรของบูสคอนเวอร์เตอร์สามารถทำการยกระดับแรงดันได้ตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการ แต่ในการทดลองจริงอาจจะไม่ได้ตามที่เราตั้งวัตถุประสงค์ไว้ โดยเราจะใช้ IC TL 494 เป็นตัวรักษาระดับแรงดันให้คงที่

ในการอัดประจุนั้นกระแสที่ใช้ในการอัดประจุจะมีค่าลดลงเรื่อยๆ จนเข้าใกล้ศูนย์ ซึ่งจะถือว่าแบตเตอรี่เต็มแล้วจึงหยุดทำการอัดประจุ และในการใช้แบตเตอรี่จ่ายโหลดไฟฟ้ากระแสสลับโดยใช้อินเวอร์เตอร์ในการแปลงไฟตรงเป็นไฟสลับ เมื่อมีโหลดมากขึ้นจะทำให้แรงดันตก ฉะนั้นจึงควรเลือกโหลดที่มีขนาดไม่มากเกินกว่าที่ออกแบบไว้ (50 W) ในการนำมาใช้งานจริง

จากการทำงานจริงที่ทำการทดลองทำให้พบว่าประสิทธิภาพในการทำงานไม่สูงนัก แต่โดยสรุปภาพรวมของทุกระบบวงจรในส่วนของโครงงานนี้ได้ตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้อย่างเป็นที่น่าพอใจ แต่ถ้าหากว่าต้องการประสิทธิภาพที่สูงขึ้นควรจะต้องมีการปรับปรุงเพิ่มขึ้นอีก

6.2 ข้อเสนอแนะในการปรับปรุงเพิ่มเติมในอนาคต

1. ควรเพิ่มวงจรป้องกันแบตเตอรี่ไม่ให้มีการคายประจุเกินสภาวะ End of cell เพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับแบตเตอรี่
2. ควรมีการแสดงผลสภาวะการทำงานของวงจรอัดประจุแบตเตอรี่ ว่าในขณะนั้นวงจรทำงานอยู่ในสภาวะใด
3. ควรเพิ่มขนาดของบูสคอนเวอร์เตอร์ให้สามารถจ่ายกระแสให้ได้มากกว่านี้ เพื่อที่จะสามารถประจุแบตเตอรี่ที่มีขนาดมากกว่า 4.5 Ah

6.3 วิจารณ์โครงงานที่จัดทำขึ้น

ในสภาวะการทำงานในยามที่เกิดปัญหาในส่วนของวงจรต่างๆ ได้ฝึกให้มีการรู้จักหาวิธีการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นไม่ว่าจะเป็นในการหาอุปกรณ์ที่เสียหายเนื่องจากการทดสอบวงจร หรือสัญญาณรบกวนที่เกินขึ้นในวงจร ซึ่งจะต้องมีการคุยกันเพื่อแก้ปัญหาที่เกิดขึ้น การเข้าไปถามจากผู้ที่มีประสบการณ์ในการทำงานมาก่อน การแบ่งงานระหว่างผู้ร่วมงานเพื่อทำให้การทำงานเร็วขึ้น โดยภาพรวมแล้วผลงานที่ได้จัดทำขึ้นนับว่าเป็นที่พอใจในระดับหนึ่งแต่หากจะมีการพัฒนาวงจรที่ใช้ในโครงงานให้มีประสิทธิภาพดีขึ้นก็จะเป็นการดีมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1.] พันธ์คักดิ์ พุฒิมานิตพงศ์ (2539) : " วงจรพัลส์และสวิตชิ่ง " , ซีเอ็ดยูเคชั่น , กรุงเทพ , 2539

[2.] สุวัฒน์ คั่น (2537) : " เทคนิคและการออกแบบสวิตชิ่งเพาเวอร์ซัพพลาย " , เอนเทล ไทย , กรุงเทพ , 2537

[3.] Courtney Hall (1974) : " How to Design & Use Multivibrators" , HOWARD W. SAMS & CO., INC. and THE BOBBS-MERRILL CO., INC. , New York, 1974

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้