

จักรยานไฟฟ้าแบบใช้การอัดประจุแบตเตอรี่เพิ่มจากการเบรกและการปั่นด้วยเท้า
ELECTRIC BICYCLE WITH BATTERY CHARGING BY BRAKING AND SPINNING

ประกาศ แก้วพิทักษ์
ไตรรัตน์ กฤษณะโลม

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยบูรพา
ปีการศึกษา 2551

จักรยานไฟฟ้าแบบใช้การอัดประจุแบตเตอรี่เพิ่มจากการเบรกและการปั่นด้วยเท้า
ELECTRIC BICYCLE WITH BATTERY CHARGING BY BRAKING AND SPINNING

ประกาศ แก้วพิทักษ์
ไตรรัตน์ กฤษณะโลม

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยบูรพา
ปีการศึกษา 2551

ELECTRIC BICYCLE WITH BATTERY CHARGING BY BRAKING AND SPINNING

**PRAPAS KAEWPITAK
TRAIRUT KRITSANALOM**

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF REQUIREMENT
FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
BURAPHA UNIVERSITY 2008**

ปริญญานิพนธ์	จักรยานไฟฟ้าแบบใช้การอัดประจุแบตเตอรี่เพิ่มจากการเบรกและการปั่นด้วยเท้า
โดย	นายประภาส แก้วพิทักษ์ นายไทรรัตน์ กฤษณะโลม
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ บัณฑิต จิตต์สุภาพ
จำนวนหน้า	144 หน้า
ปีการศึกษา	2551

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา อนุมัติปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

.....ประธานกรรมการสอบปริญญานิพนธ์
(อาจารย์ ดร. เฉลิมภักดิ์ ฟองสมุทร)

.....กรรมการสอบปริญญานิพนธ์
(อาจารย์ ดร. มนตรี โพธิ์โสโนทัย)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ บัณฑิต จิตต์สุภาพ)

.....หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณยศ ชุรุกิจโกศล)

บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นการศึกษาการทำงานและควบคุมเครื่องจักรไฟฟ้ากระแสดตรง เนื่องจากเครื่องจักรไฟฟ้าตัวหนึ่ง สามารถทำงานเป็นได้ทั้งมอเตอร์ไฟฟ้าและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในตัวเดียวกัน จึงนำหลักการดังกล่าวมาประดิษฐ์อุปกรณ์ที่สามารถคืนพลังงานให้แก่จักรยานไฟฟ้า ซึ่งในส่วนของระบบควบคุมจะแบ่งเป็นสองระบบ คือระบบจ่ายพลังงานจากแบตเตอรี่ให้แก่มอเตอร์เพื่อใช้ในการขับเคลื่อนจักรยาน และระบบคืนพลังงานโดยการประจุแบตเตอรี่เพิ่มจากการปั่นด้วยเท้าและการเบรก ผลการทดสอบรถจักรยานที่สร้างขึ้นสามารถวิ่งด้วยความเร็วสูงสุด 22.28 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และการประจุแบตเตอรี่เพิ่มด้วยการปั่นจักรยานด้วยเท้า จะได้ปริมาณพลังงานมากกว่าการประจุแบตเตอรี่โดยใช้การเบรก

คำสำคัญ : จักรยานไฟฟ้า การประจุแบตเตอรี่ ไมโครคอนโทรลเลอร์

Abstract

The objective of this project is to study operation and control system of direct current electrical machine. An electrical machine can be able to use as motor and generator. Based on such principle, we can invent the equipment that returns energy to the electric bicycle. There are two control systems. The first is an energy supply system from battery into motor by driving electric bicycle, the second is battery charging by breaking and spinning. The experimental results shown that the maximum speed is 22.28 kilometers per hour and battery charging by spinning is more efficiency than breaking.

Keywords: Electric bicycle, Battery charging, microcontroller

กิตติกรรมประกาศ

การทำโครงการทางวิศวกรรมไฟฟ้า จักรยานไฟฟ้าแบบใช้การอัดประจุแบตเตอรี่เพิ่มจากการเบรกและการปั่นด้วยเท้าสามารถ จะไม่สำเร็จได้ด้วยดีหากปราศจากได้รับความอนุเคราะห์จากอาจารย์ ดร. โกวิท มาศรัตน์ ที่ให้คำปรึกษาเกี่ยวกับโครงการ ชมรมอาสาพัฒนาและบำเพ็ญประโยชน์ มหาวิทยาลัยบูรพา ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และอุปกรณ์บางชนิด ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าที่เอื้อเฟื้อสถานที่ให้จัดทำโครงการ พร้อมทั้งขอขอบคุณอาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์และบุคลากรในภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่านที่ให้คำปรึกษา คำแนะนำระหว่างการปฏิบัติงาน และขอขอบคุณบุคลากรทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าที่อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือต่างๆ

สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณ บิดา มารดา ที่ให้ความช่วยเหลือทางด้านงบประมาณและเป็นกำลังใจให้ผู้จัดทำโครงการเสมอมา ขอขอบคุณเพื่อนนิสิตภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าที่ให้กำลังใจและความช่วยเหลือในสิ่งที่ยากบางสิ่ง และขอขอบคุณอีกหลายๆท่านที่ไม่อาจจะกล่าวถึงในที่นี้ได้หมด คุณประโยชน์อันใดที่เกิดจากความกรุณาของทุกท่านที่กล่าวไว้ข้างต้น คณะผู้จัดทำโครงการฯ ซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่ง จึงใคร่ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง ณ โอกาสนี้ด้วย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	ii
Abstract.....	iii
กิตติกรรมประกาศ.....	iv
สารบัญ.....	v
สารบัญรูป.....	x
สารบัญตาราง.....	xv
รายการสัญลักษณ์และคำย่อ.....	xvi
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 หลักการและเหตุผล.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของการทำโครงการ.....	2
1.4 แผนการดำเนินงาน.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 หลักการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	5
2.1.1 สมการแรงเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้าบนขดลวดตัวนำ.....	5
2.1.2 สมการแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของขดลวดตัวนำที่ตัดผ่านสนามแม่เหล็ก.....	6
2.1.3 สมการของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	6
2.1.4 แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำต้านกลับ.....	8
2.1.5 สมการแรงเคลื่อนไฟฟ้าของมอเตอร์.....	8
2.1.6 สมการแรงบิด.....	9
2.1.7 ความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	10
2.2 วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	10
2.3 หลักการทำงานของมอเตอร์แม่เหล็กถาวร.....	12
2.4 การหยุดเครื่องจักรไฟฟ้ากระแสตรง.....	14
2.4.1 โดยวิธีต่อความต้านทานไฟฟ้าคร่อม.....	14
2.4.2 โดยวิธีเก็บพลังงานคืนเข้าระบบจ่าย.....	15
2.4.3 โดยวิธีกลับขั้วข้อแมเจอร์.....	16

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5 การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	17
2.5.1 วงจรสวิตซ์.....	17
2.5.2 การปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	19
2.6 การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	20
2.7 แหล่งจ่ายพลังงานสำหรับรถไฟฟ้า.....	21
2.7.1 ความหนาแน่นของพลังงาน.....	21
2.7.2 ความหนาแน่นของกำลัง.....	22
2.7.3 รอบอายุการใช้งาน.....	22
2.7.4 ค่าใช้จ่ายเริ่มต้น.....	23
2.7.5 ค่าใช้จ่ายบำรุงรักษา.....	23
2.7.6 ประสิทธิภาพของพลังงาน.....	24
2.7.7 แรงดันแบตเตอรี่.....	24
2.7.8 อิมพีแดนซ์ภายในของแบตเตอรี่.....	24
2.7.9 คุณลักษณะการประจุ.....	24
2.7.10 คุณลักษณะทางอุณหภูมิ.....	24
2.8 แหล่งจ่ายพลังงานชนิดต่างๆ.....	25
2.8.1 แบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด.....	25
2.8.2 คุณลักษณะโดยทั่วไปของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด.....	27
2.8.3 วิธีการประจุไฟของแบตเตอรี่ตะกั่วกรด.....	37
2.9 วงจรพัดระบายแรงดันไฟฟ้า.....	40
2.9.1 เงื่อนไขการทำงานของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์.....	40
2.9.2 หลักการทำงานของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์.....	41
2.10 ออปแอมป์.....	42
2.10.1 คุณสมบัติของออปแอมป์.....	42
2.10.2 วงผลต่างแรงดัน.....	43
2.10.3 วงจรเปรียบเทียบแรงดัน.....	43
2.10.4 วงจรขยายแบบไม่กลับเฟส.....	44
2.10.5 วงจรอินทิเกรตเตอร์.....	44
2.10.6 วงจรนอนอินเวอร์ตติงซิมิท์ทริกเกอร์.....	45
2.11 ไมโครคอนโทรลเลอร์.....	46
2.11.1 ข้อมูลพื้นฐานของไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC.....	46

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.11.2 ความเร็วของไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC.....	47
2.11.3. สถาปัตยกรรมของไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC.....	47
2.12 ไอซี 555.....	47
บทที่ 3 หลักการ แนวคิด และการออกแบบโครงงาน.....	49
3.1 การออกแบบวงจรควบคุมมอเตอร์.....	50
3.1.1 วงจรควบคุมมอเตอร์แบบPWM.....	50
3.1.1.1 วงจรกำเนิดสัญญาณรูปสามเหลี่ยม.....	52
3.1.1.2 วงจรขยายสัญญาณจากคัมแรง.....	54
3.1.1.3 วงจรเปรียบเทียบแรงดัน.....	55
3.1.1.4 ทดสอบวงจรโดยการจำลองวงจร.....	57
3.1.2 การออกแบบวงจรขับมอเตอร์.....	59
3.2 การออกแบบวงจรชาร์จแบตเตอรี่.....	61
3.2.1 แนวคิดของวงจรชาร์จแบตเตอรี่.....	61
3.2.2 การออกแบบวงจรชาร์จแบตเตอรี่.....	64
3.2.2.1 วงจรส่งค่าแรงดันแบตเตอรี่ แรงดันมอเตอร์ กระแสที่ไหลเข้า แบตเตอรี่ และวงจร เปิด-ปิด การชาร์จแบตเตอรี่.....	66
3.2.2.2 วงจรจ่ายแรงดันไฟฟ้า.....	67
3.2.2.3 วงจรตรวจสอบเงื่อนไขแรงดันแบตเตอรี่และแรงดันมอเตอร์.....	68
3.2.2.4 วงจรแอนด์สัญญาณ (AND) ระหว่างสัญญาณของแรงดันมอเตอร์ และแรงดันแบตเตอรี่ที่ตรวจสอบแล้ว และส่งค่าสัญญาณไปขับ สวิตช์ SW1.....	71
3.2.2.5 วงจรตรวจสอบกระแส และรักษาระดับกระแส.....	71
3.2.3 การจำลองวงจรและวิเคราะห์การทำงาน.....	75
3.2.3.1 การจำลองวงจรและวิเคราะห์ผลในส่วนของวงจรชาร์จแบตเตอรี่.....	75
3.2.3.2 การจำลองวงจรและวิเคราะห์ผลในส่วนของวงจรรักษาระดับกระแส.....	77
3.3 การออกแบบวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์.....	79
3.4 การออกแบบวงจรสวิตช์สลับการทำงาน.....	81
3.5 การออกแบบวงจรแสดงผลแรงดันแบตเตอรี่.....	83
3.6 การออกแบบตัวรถจักรยานไฟฟ้า.....	85
3.7 การประกอบอุปกรณ์และวงจรทั้งหมดในจักรยาน.....	87

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดสอบ.....	89
4.1 การทดสอบระบบขับเคลื่อนมอเตอร์รถจักรยานไฟฟ้า.....	89
4.1.1 การทดสอบโดยไม่มีผู้ขับขี่.....	92
4.1.2 การทดสอบโดยมีผู้ขับขี่.....	93
4.2 การทดสอบการชาร์จแบตเตอรี่.....	99
4.2.1 การทดลองการชาร์จแบตเตอรี่ด้วยการปั่นด้วยเท้า.....	102
4.2.2 การทดลองการชาร์จแบตเตอรี่ด้วยการเบรกรถจักรยาน.....	108
4.3 การทดลองวงจรแสดงผลแรงดันของแบตเตอรี่.....	114
4.3.1 การจำลองวงจรและทดสอบ.....	114
4.3.2 การต่ออุปกรณ์จริงและทดสอบ.....	116
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	119
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	119
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	120
เอกสารอ้างอิง.....	121
ภาคผนวก ก อุปกรณ์และวงจรที่ใช้ในโครงงาน.....	122
ภาคผนวก ข ซอร์สโค้ดของโปรแกรมที่ใช้ในโครงงาน.....	135
ภาคผนวก ค วิธีการใช้จักรยานไฟฟ้า.....	140
ประวัติผู้ทำโครงงาน.....	144

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 กฎมือซ้ายของเฟลมมิ่ง.....	5
2.2 ทิศทางของแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ.....	8
2.3 วงจรมอเตอร์กระแสตรง.....	9
2.4 การเกิดแรงบิด.....	9
2.5 วงจรสมมูลย์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	11
2.6 การทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงทั้ง 4 ย่าน.....	12
2.7 หลักการทำงานของมอเตอร์กระแสตรงแบบแม่เหล็กถาวร.....	13
2.8 วงจรอย่างง่ายของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบแม่เหล็กถาวร.....	14
2.9 การต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้า.....	15
2.10 การต่อตัวต้านทาน R1 เพื่อหยุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า.....	15
2.11 การหยุดมอเตอร์แบบเก็บพลังงานคืนระบบจ่าย.....	16
2.12 การหยุดมอเตอร์แบบกลับขึ้นขั้วเมเจอร์.....	16
2.13 (ก) วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงพื้นฐาน (ข) วงจรสมมูลของสวิตช์ (ค) แรงดันไฟฟ้าต้านออก.....	18
2.14 วงจรฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์.....	19
2.15 รูปสัญญาณ PWM ที่วิตซ์ไคเคลต่าง ๆ.....	19
2.16 วงจรฟูลบริดจ์ใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	20
2.17 สัญญาณอ้างอิง (Ref) และสัญญาณฟันเลื่อย (Saw) เปรียบเทียบ (Comparator) กัน ได้สัญญาณ Output เป็น PWM.....	21
2.18 การเปรียบเทียบความหนาแน่นของพลังงานของแบตเตอรี่ชนิดต่าง ๆ.....	22
2.19 แบตเตอรี่ชนิดต่าง ๆ.....	23
2.20 ย่านการจ่ายพลังงานสำหรับแบตเตอรี่, เซลล์เชื้อเพลิง, และเครื่องยนต์ที่ให้ความร้อนชนิดต่าง ๆ.....	26
2.21 ความจุแอปแปร์ฮาวท์และกราฟของเวลา (ก) แบตเตอรี่รถยนต์ (ข) แบตเตอรี่ลากจูง.....	29
2.22 ผลของแรงดันสูกท้ายต่อเอาต์พุตของเซลล์เมื่อโหลดเท่ากับ 6 ชม.แรงดันสุดท้ายปกติเป็น V1 กับแรงดันสุดท้ายเป็น V2 ที่ 4 ชม.....	30
2.23 การเปลี่ยนแปลงแรงดันขณะเปิดวงจรของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดกับค่าความถ่วงจำเพาะ	34

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.24 ลักษณะความสัมพันธ์กับแรงดันไฟฟ้ากับเวลาขณะทำการประจุไฟและคายไฟ (ก) การประจุไฟ (ข) การคายไฟ.....	35
2.25 ลักษณะสมบัติของเครื่องประจุไฟแบบ Wa characteristic และผลการประจุไฟ.....	36
2.26 ลักษณะสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสของเครื่องประจุไฟ แบบ WOWa-Characteristic และผลการประจุไฟให้กับแบตเตอรี่.....	37
2.27 ลักษณะสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสของเครื่องประจุไฟ ระบบ IU- Characteristic และผลการประจุไฟให้กับแบตเตอรี่.....	38
2.28 ลักษณะสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสของเครื่องประจุไฟ ระบบ IUla- Characteristic และผลการประจุไฟให้กับแบตเตอรี่.....	39
2.29 วงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์.....	40
2.30 วงจรสมมูลเมื่อสวิตช์นำกระแส.....	41
2.31 วงจรสมมูลเมื่อสวิตช์ไม่นำกระแส.....	41
2.32 แสดงสัญลักษณ์โอปแอมป์.....	42
2.33 วงผลต่างแรงดัน.....	43
2.34 วงจรเปรียบเทียบแรงดัน.....	43
2.35 วงจรขยายออปแอมป์แบบไม่กลับเฟส.....	44
2.36 วงจรอินทิเกรตเตอร์.....	44
2.37 วงจร Non inverting Schmitt-Trigger.....	45
2.38 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอินพุตและเอาต์พุต.....	46
2.39 pin connection ของไอซีไทเมอร์ 555.....	48
2.40 วงจรอะสเตเบิล.....	48
3.1 แผนภาพแนวคิดการทำงานของจากรยานไฟฟ้าในโครงการ.....	49
3.2 แผนภาพวงจรควบคุมมอเตอร์.....	50
3.3 สัญญาณอ้างอิง (Ref) สัญญาณรูปสามเหลี่ยม (Triangle) เปรียบเทียบ (Comparator) กัน ได้สัญญาณ Output.....	51
3.4 รูปวาดคันเร่งที่ใช้ในโครงการ.....	51
3.5 การออกแบบวงจรกำเนิดสัญญาณ PWM.....	52
3.6 วงจรกำเนิดสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมโดย LM324.....	52
3.7 วงจรกำเนิดสัญญาณรูปสามเหลี่ยมพร้อมค่าพารามิเตอร์ต่างๆ.....	54
3.8 สัญญาณรูปสามเหลี่ยมที่ได้จากวงจร.....	54
3.9 วงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส.....	55

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.10 วงจรเปรียบเทียบแรงดัน	55
3.11 สัญญาณของวงจรเปรียบเทียบแรงดัน.....	56
3.12 วงจรกำเนิดสัญญาณ PWM ควบคุมด้วยคันเร่งไฟฟ้า.....	56
3.13 Schematic ของวงจรควบคุมมอเตอร์แบบ PWM โดยโปรแกรม MicroSim	57
3.14 ผลการจำลองวงจร โดยให้สัญญาณจากคันเร่งเป็น 1Vdc จะได้สัญญาณ PWM ค่า Duty Cycle 0%.....	57
3.15 ผลการจำลองวงจร โดยให้สัญญาณจากคันเร่งเป็น 2Vdc จะได้สัญญาณ PWM ค่า Duty Cycle ประมาณ 30%.....	58
3.16 ผลการจำลองวงจร โดยให้สัญญาณจากคันเร่งเป็น 2Vdc จะได้สัญญาณ PWM ค่า Duty Cycle ประมาณ 70%.....	58
3.17 ผลการจำลองวงจร โดยให้สัญญาณจากคันเร่งเป็น 4Vdc จะได้สัญญาณ PWM ค่า Duty Cycle 100 %.....	59
3.18 วงจรขับมอเตอร์.....	60
3.19 แผนภาพวงจรชาร์จแบตเตอรี่.....	61
3.20 แผนภาพการทำงานของวงจรควบคุมการชาร์จแบตเตอรี่.....	62
3.21 โฟลว์ชาร์ตการทำงานของวงจรชาร์จแบตเตอรี่.....	63
3.22 กราฟคุณสมบัติของแบตเตอรี่ที่ใช้ในโครงการ.....	64
3.23 วงจรชาร์จแบตเตอรี่ทั้งหมด.....	65
3.24 วงจรส่งค่าแรงดันแบตเตอรี่ แรงดันมอเตอร์ กระแสที่ไหลเข้าแบตเตอรี่ และ วงจรสวิตช์ เปิดการชาร์จแบตเตอรี่.....	66
3.25 วงจรจ่ายแรงดันไฟฟ้า.....	67
3.26 วงจรตรวจสอบเงื่อนไขของการชาร์จแบตเตอรี่โดยใช้อปแอมป์ (ก) ตรวจสอบแรงดันแบตเตอรี่ (ข) ตรวจสอบแรงดันมอเตอร์.....	68
3.27 (ก) แอนด์เกต (ข) วงจรทรานซิสเตอร์ทำงานแบบแอนด์เกต.....	70
3.28 วงจรแอนด์เกตและวงจรแสดงผลขณะกำลังชาร์จด้วยหลอด LED	71
3.29 วงจรตรวจสอบกระแส และรักษาระดับกระแส.....	72
3.30 วงจรรักษาระดับกระแส (ก) และวงจรตรวจสอบกระแส (ข).....	73
3.31 วงจรขยายความแตกต่าง.....	73
3.32 วงจรเปรียบเทียบแรงดัน.....	74
3.33 กราฟผลการจำลองวงจรชาร์จแบตเตอรี่ โดยให้ Vbatt คงที่.....	75
3.34 กราฟผลการจำลองวงจรชาร์จแบตเตอรี่โดยให้ Vmo คงที่.....	76

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.35 วงจรชาร์จแบตเตอรี่จำลองด้วยโปรแกรม MicroSim.....	77
3.36 การจำลองวงจรจำกัดกระแสโดยใช้โปรแกรม MicroSim	78
3.37 ผลการจำลองวงจรจำกัดกระแสโดยใช้โปรแกรม MicroSim	78
3.38 ผลการจำลองวงจรจำกัดกระแสโดยใช้โปรแกรม MicroSim	79
3.39 วงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์.....	79
3.40 วงจร 555 กำเนิดสัญญาณพัลส์.....	81
3.41 แนวคิดการเบรกแล้วชาร์จคืนพลังงานไฟฟ้า.....	81
3.42 วงจรสวิตช์สลับการทำงาน.....	82
3.43 การต่อลิมิตสวิตช์เข้ากับเบรกมือ.....	82
3.44 แผนผังวงจรแสดงผลโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์.....	83
3.45 การจำลองวงจรแสดงผลในโปรแกรม Proteus.....	84
3.46 โฟลว์ชาร์ตการทำงานของโปรแกรม.....	85
3.47 จักรยานที่ใช้ในโครงการ.....	86
3.48 มอเตอร์ขนาด 250W 24V อัตราทดรอบ 1:6 4125RPM	86
3.49 แสดงการติดมอเตอร์เข้ากับจักรยาน.....	87
3.50 แผนภาพการประกอบวงจรทั้งหมดไว้ด้วยกัน.....	88
4.1 การทดสอบวงจรกำเนิดสัญญาณ PWM.....	89
4.2 การทดสอบวงจรกำเนิดสัญญาณ PWM โดยใช้ฮอสซิลโลสโคป.....	90
4.3 การประกอบวงจรขับมอเตอร์ลงใน PCB.....	90
4.4 จักรยานไฟฟ้าที่ประกอบด้วยวงจรขับมอเตอร์.....	91
4.5 ผู้ทดสอบน้ำหนัก 55 กิโลกรัม.....	91
4.6 ผู้ทดสอบน้ำหนัก 71.5 กิโลกรัม.....	92
4.7 กราฟแสดง Duty Cycle และกระแสเข้ามอเตอร์เมื่อไม่มีผู้ขี่.....	93
4.8 กราฟแสดง Duty Cycle และกระแสมอเตอร์เมื่อมีผู้ขี่น้ำหนัก 71.5 กิโลกรัม.....	94
4.9 กราฟแสดงความเร็วและ Duty Cycle เมื่อมีผู้ขี่น้ำหนัก 71.5 กิโลกรัม.....	95
4.10 กราฟแสดงกระแสและ Duty Cycle เมื่อมีผู้ขี่น้ำหนัก 55 กิโลกรัม.....	97
4.11 กราฟแสดงความเร็วและ Duty Cycle เมื่อมีผู้ขี่น้ำหนัก 55 กิโลกรัม.....	97
4.12 กราฟเปรียบเทียบความเร็วและ Duty Cycle เมื่อผู้ขี่น้ำหนัก 71.5 และ 55 กิโลกรัม.....	98
4.13 กราฟเปรียบเทียบกระแสและ Duty Cycle เมื่อผู้ขี่น้ำหนัก 71.5 และ 55 กิโลกรัม.....	98
4.14 ทดลองต่ออุปกรณ์ตามวงจรที่ออกแบบไว้ลง Proto Board	99
4.15 ลงอุปกรณ์ต่างๆ บนแผ่นปริ้นท์	99

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.16 วงจรชาร์จแบตเตอรี่	100
4.17 วงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์.....	101
4.18 วงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์.....	101
4.19 ประกอบวงจร และทดสอบโดยการปั่นด้วยเท้า แบบอยู่กับที่.....	102
4.20 เครื่องตรวจวัดความเร็วจักรยาน.....	102
4.21 กราฟแสดงแรงดันมอเตอร์และความเร็วเฉลี่ย.....	103
4.22 กราฟแสดงแรงดันออกของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์และความเร็วเฉลี่ย.....	104
4.23 กราฟแสดงกระแสที่เข้าแบตเตอรี่และความเร็วเฉลี่ย.....	104
4.24 การทดสอบการชาร์จแบตเตอรี่โดยการปั่นด้วยเท้า แบบมีผู้ขี่.....	105
4.25 กราฟแสดงกระแสที่เข้าแบตเตอรี่และความเร็วเฉลี่ย เมื่อมีผู้ขี่.....	106
4.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความเร็วของการปั่นจักรยาน และเวลาที่ใช้ชาร์จแบตเตอรี่จนเต็ม แบบมีผู้ขี่.....	107
4.27 การต่อ Limit Switch เข้าสู่เบรกมือ.....	108
4.28 การทดลองใช้การเบรกกับวงจรชาร์จแบตเตอรี่.....	108
4.29 วงจรรีเลย์ที่ใช้ในการสลับการทำงานระหว่างวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์และวงจรชาร์จแบตเตอรี่.....	109
4.30 กราฟแสดงความเร็วและเวลาขณะชาร์จของการชาร์ตด้วยการเบรกแบบคืนพลังงาน.....	111
4.31 กราฟแสดงความเร็วและระยะที่ใช้ในการเบรกของการชาร์ตด้วยการเบรกแบบคืนพลังงาน.....	111
4.32 กราฟแสดงความเร็วและกระแสเริ่มต้นของการชาร์ตด้วยการเบรกแบบคืนพลังงาน.....	112
4.33 กราฟแสดงกระแสที่ลดลงเป็นเชิงเส้นและเวลาที่ได้จากการเบรกคืนพลังงาน.....	113
4.34 การทดสอบวงจรแสดงผลด้วยโปรแกรม Proteus.....	115
4.35 การต่อวงจรลง Proto Board เพื่อทำการทดสอบวงจร.....	116
4.36 การทดสอบวงจรเมื่อลงอุปกรณ์บนแผ่นปริ้นท์เสร็จแล้ว.....	116
4.37 วงจรแสดงผลประกอบใส่กล่อง เพื่อทำเป็นหน้าปัดแสดงผลจักรยาน.....	117
4.38 หน้าปัดแสดงผลของจักรยานไฟฟ้า.....	117
ก.1 คุณสมบัติของมอเตอร์ที่ใช้ในโครงการ.....	123
ก.2 คุณสมบัติของแบตเตอรี่ที่ใช้ในโครงการ.....	126
ก.3 คันเร่งไฟฟ้าแบบ Hall Effect.....	127
ก.4 วงจรกำเนิดสัญญาณ PWM และวงจรขับเคลื่อน.....	127
ก.5 วงจรกำเนิดสัญญาณ PWM และวงจรขับเคลื่อน ประกอบใส่กล่องอลูมิเนียมเพื่อระบายความร้อนให้มอเตอร์.....	128

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ก.6 ไดโอดกำลัง ESD83-004 ต่อแยกจากวงจรขับมอเตอร์ เพื่อติดชิงค์ระบายความร้อน.....	128
ก.7 ไดโอดกำลัง MUR1560 ต่อแยกจากวงจรขับมอเตอร์ เพื่อติดชิงค์ระบายความร้อน.....	129
ก.8 วงจรชาร์จแบตเตอรี่.....	129
ก.9 วงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์.....	130
ก.10 วงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์สำหรับวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์.....	130
ก.11 วงจรสวิตช์สลับการทำงานระหว่างวงจรขับมอเตอร์และวงจรชาร์จแบตเตอรี่.....	131
ก.12 คอนเน็กเตอร์สำหรับเชื่อมต่อวงจร.....	131
ก.13 โครงรถจักรยานที่ใช้ในโครงงาน.....	132
ก.14 ประกอบวงจรทั้งหมดลงในกล่องพลาสติกซึ่งอยู่ด้านหลังเบาะผู้ขับขี่.....	132
ก.15 กล่องวงจรและมอเตอร์ซึ่งอยู่ด้านหลังเบาะผู้ขับขี่.....	133
ก.16 วงจรแสดงผลแรงดันและกระแสที่ชาร์จแบตเตอรี่.....	133
ก.17 การทดสอบวงจรแสดงผลแรงดันและกระแสที่ชาร์จแบตเตอรี่ โดยต่อเข้ากับหน้าจอ LCD..	134
ก.18 จักรยานไฟฟ้าที่ประกอบเสร็จ.....	134
ข.1 หน้าต่างโปรแกรม MikroC ซึ่งเป็นคอมไพเลอร์ภาษาซี.....	136
ข.2 ซอร์สโค้ดภาษาซีที่ใช้เขียนวงจรแสดงผล.....	136
ค.1 รูปวาดจักรยานในโครงงาน แสดงอุปกรณ์สำคัญที่อยู่ภายนอก.....	141
ค.2 รูปวาดหน้าปัดควบคุมและแสดงผลของจักรยานไฟฟ้า.....	142

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 คุณสมบัติแอมแปร์ชั่วโมง (Ampere-hours) หรือวัตต์ชั่วโมง (Watt-Hour) ของแบตเตอรี่ชนิดต่างๆ.....	27
2.2 เปอร์เซ็นความจุแบตเตอรี่ชนิดต่างๆ.....	28
2.3 ความจุที่ได้จากการประจุไฟฟ้าด้วยกระแสต่างกัน.....	38
3.1 ประสิทธิภาพของมอเตอร์ที่ใช้ในการทำโครงการ.....	59
3.2 คุณสมบัติของแบตเตอรี่.....	62
4.1 การวัดกระแสไหลเข้ามอเตอร์เทียบกับ Duty Cycle ของสัญญาณ PWM.....	92
4.2 การวัด Duty Cycle ของสัญญาณ PWM เทียบกับความเร็วรถ ผู้ขับขี่น้ำหนัก 71.5 กิโลกรัม.....	93
4.3 การวัดกระแสไหลเข้ามอเตอร์เทียบกับ Duty Cycle ของสัญญาณ PWM ผู้ขับขี่น้ำหนัก 71.5 กิโลกรัม.....	94
4.4 การวัดกระแสไหลเข้ามอเตอร์เทียบกับ Duty Cycle ของสัญญาณ PWM ผู้ขับขี่น้ำหนัก 55 กิโลกรัม.....	96
4.5 การวัดความเร็วเข้ามอเตอร์เทียบกับ Duty Cycle ของสัญญาณ PWM ผู้ขับขี่น้ำหนัก 55 กิโลกรัม.....	96
4.6 การทดสอบการชาร์จแบตเตอรี่ด้วยการปั่นด้วยเท้า แบบอยู่กับที่.....	103
4.7 การทดสอบการชาร์จแบตเตอรี่โดยการปั่นด้วยเท้า แบบมีผู้ขับขี่.....	105
4.8 แสดงความสัมพันธ์ของความเร็วของการปั่นจักรยาน กระแสที่ได้ และเวลาที่ใช้ชาร์จแบตเตอรี่จนเต็ม แบบมีผู้ขับขี่.....	107
4.9 การทดสอบการชาร์จด้วยการเบรกแบบคืนพลังงาน.....	110
4.10 แสดงความสัมพันธ์ของความเร็วเฉลี่ย กระแสเริ่มต้น เวลาขณะชาร์จ ปริมาณกระแสที่ได้ และจำนวนครั้งของการเบรกแล้วชาร์จจนกว่าแบตเตอรี่เต็ม.....	114

รายการสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์	หน่วย	คำอธิบาย
A_v	-	อัตราขยายของออปแอมป์
D	-	Duty Cycle
f	Hz	ความถี่
LTL	-	Low Trigger Level
UTL	-	Upper Trigger Level
V^+	-	ขาบวกของออปแอมป์
V^-	-	ขาลบของออปแอมป์
V_o	V	แรงดันขาออก
V_r	%	ค่า Ripple ของสัญญาณ
ω_b	-	หน่วยของฟลักซ์แม่เหล็ก (เวเบอร์)
Z	Ω	Impedance
ϕ	Wb	ฟลักซ์แม่เหล็ก

บทที่ 1

บทนำ

1.1 หลักการและเหตุผล

ในสภาวะปัจจุบัน ราคาน้ำมันมีราคาสูงขึ้นมากและสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง และปริมาณของน้ำมันยังมีแนวโน้มที่จะลดลงเรื่อยๆ ประกอบกับการใช้พลังงานจากน้ำมันซึ่งมาจากฟอสซิลก่อให้เกิดมลพิษทางสิ่งแวดล้อม และยังก่อเกิดปัญหาโลกร้อนทั่วโลกในปัจจุบัน ดังนั้นนักประดิษฐ์และนักวิจัยจึงหันมาสนใจพลังงานสะอาด และราคาไม่แพง พลังงานไฟฟ้าเป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่เป็นพลังงานสะอาด ไม่ก่อเกิดมลพิษให้กับสิ่งแวดล้อม มีค่าใช้จ่ายต่ำกว่าน้ำมันเชื้อเพลิง สามารถผลิตและควบคุมได้ง่าย และสามารถเปลี่ยนแปลงไปเป็นพลังงานรูปอื่นๆ ได้เกือบทุกชนิด ซึ่งปัจจุบันมีการคิดค้นสิ่งประดิษฐ์และอุปกรณ์จำนวนมากที่ใช้พลังงานไฟฟ้า หนึ่งในนั้นก็คือจิกยานไฟฟ้า ซึ่งใช้มอเตอร์ซึ่งเป็นเครื่องจักรไฟฟ้าเป็นตัวขับเคลื่อน

จิกยานเป็นยานพาหนะที่ถูกสร้างขึ้นเป็นเวลานานมาแล้ว สมัยก่อนใช้กำลังคนขับเคลื่อน แต่ปัจจุบันมนุษย์รู้จักไฟฟ้า เรียนรู้การผลิตและควบคุมกระแสไฟฟ้า และสร้างอุปกรณ์ทางไฟฟ้าขึ้นมามากมาย หนึ่งในนั้นก็คือ มอเตอร์ (Motor) ซึ่งเป็นเครื่องจักรไฟฟ้า (Electrical Machine) ที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล และสามารถประยุกต์จิกยานธรรมดา มาเป็นจิกยานไฟฟ้าโดยติดตั้งมอเตอร์เป็นอุปกรณ์ขับเคลื่อน และใช้แบตเตอรี่เป็นแหล่งพลังงาน

เครื่องจักรไฟฟ้า (Electrical Machine) ทำงานได้สองรูปแบบ คือ เป็นมอเตอร์ หรือเครื่องจักรขับเคลื่อนทางไฟฟ้า โดยเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานทางกล และเป็นเครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้า เปลี่ยนพลังงานทางกลมาเป็นพลังงานไฟฟ้า

ปัจจุบันจิกยานไฟฟ้าได้ถูกสร้างขึ้นมามากมาย เพื่อลดความล่าช้าของร่างกายมนุษย์จากการขี่ระยะไกล หรือการขี่ขึ้นที่สูงชัน โดยใช้มอเตอร์เป็นตัวขับเคลื่อน ใช้แบตเตอรี่เป็นแหล่งพลังงาน และใช้ระบบห้ามล้อทางกล และเนื่องจากมอเตอร์นั้นเป็นเครื่องจักรไฟฟ้าที่สามารถทำหน้าที่เป็นตัวกำเนิดไฟฟ้าหรือเจนเนอเรเตอร์ (Generator) ได้ ซึ่งการขี่จิกยานไฟฟ้าทั่วไปมักจะติดตั้งระบบห้ามล้อทางกล ซึ่งเป็นการลดแรงเฉื่อยและลดความเร็วของตัวรถจิกยานเวลาขี่ โดยใช้แรงกดจากคันเบรกมาต้านทานการหมุนของล้อ พลังงานที่เกิดขึ้นจากการห้ามล้อนี้จะอยู่ในรูปความร้อน ซึ่งถ้าเปลี่ยนจากการห้ามล้อทางกล มาเป็นการห้ามล้อทางไฟฟ้า โดยใช้แรงเฉื่อยของจิกยานมาขับเคลื่อนมอเตอร์ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นตัวกำเนิดกระแสไฟฟ้า ผลิตไฟฟ้าจากการลดความเร็วหรือการเบรกจิกยานไฟฟ้า มาเก็บคืนไว้ที่แหล่งจ่ายพลังงานของรถจิกยานไฟฟ้าซึ่งก็คือแบตเตอรี่ ก็จะสามารถจ่ายพลังงานไฟฟ้าได้นานกว่าเดิม

นอกจากการชาร์จ(Charging)แบตเตอรี่จากการเบรกแล้ว จักรยานไฟฟ้ายังสามารถชาร์จแบตเตอรี่จากการขับเคลื่อนด้วยเท้าได้โดยใช้เครื่องจักรไฟฟ้าทำหน้าที่เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชาร์จแบตเตอรี่โดยใช้ไฟบ้าน 220 V ได้ รวมไปถึงเวลาขับเคลื่อนก็สามารถประจุไฟฟ้าให้แก่แบตเตอรี่ได้เช่นกัน ทำให้แบตเตอรี่ใช้งานได้นานกว่าเดิมเพราะจะมีการชาร์จพลังงานกลับคืนสู่แบตเตอรี่ทุกครั้งที่เบรกหรือต้องการลดความเร็วของรถจักรยาน

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาการทำงานของเครื่องจักรไฟฟ้า
2. เพื่อศึกษาการทำงานของระบบควบคุมมอเตอร์และเซ็นเซอร์
3. เพื่อนำพลังงานที่ได้จากระบบเบรกและการปั่นด้วยเท้ามาเก็บไว้ในแบตเตอรี่
4. เพื่อสร้างจักรยานไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

1.3 ขอบเขตของโครงการ

1. ใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ขนาด 250 W
2. จักรยานที่ใช้แบบ 1 นิ้ว มีระบบเบรกทางกล และไม่มีระบบเกียร์
3. ใช้แบตเตอรี่สามารถอัดประจุใหม่ได้
4. มีหน่วยแสดงผลปริมาณพลังงานของแบตเตอรี่
5. ใช้การควบคุมมอเตอร์แบบ PWM
6. แบตเตอรี่สามารถชาร์จด้วยไฟบ้านได้
7. สามารถอัดประจุเข้าแบตเตอรี่จากการเบรกและการปั่นจักรยานได้
8. จักรยานไฟฟ้าที่สร้างขึ้นสามารถขับเคลื่อนโดยใช้ไฟฟ้าและใช้กำลังคน
9. จักรยานไฟฟ้าที่สร้างขึ้น ใช้สำหรับการวิจัยและการพัฒนาเท่านั้น

1.4 แผนการดำเนินงาน

1. ศึกษาและรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับเครื่องจักรไฟฟ้าจากตำราและบทความต่างๆที่เกี่ยวข้อง
2. ศึกษาเครื่องจักรไฟฟ้ากระแสตรงและแบตเตอรี่เพื่อเป็นข้อมูลในการเลือกใช้
3. ศึกษาทฤษฎีการควบคุมเครื่องจักรไฟฟ้าในแบบต่างๆที่จะนำมาใช้ควบคุมเครื่องจักรไฟฟ้า
4. สร้างวงจรควบคุมความเร็วเครื่องจักรไฟฟ้ากระแสตรง
5. ประกอบมอเตอร์และวงจรควบคุมความเร็วกับจักรยานทำให้ขับเคลื่อนจักรยานได้
6. สร้างอุปกรณ์เบรกแบบคืนพลังงานและวงจรควบคุมการเบรกแบบคืนพลังงานไฟฟ้าของเครื่องจักรไฟฟ้ากระแสตรง

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

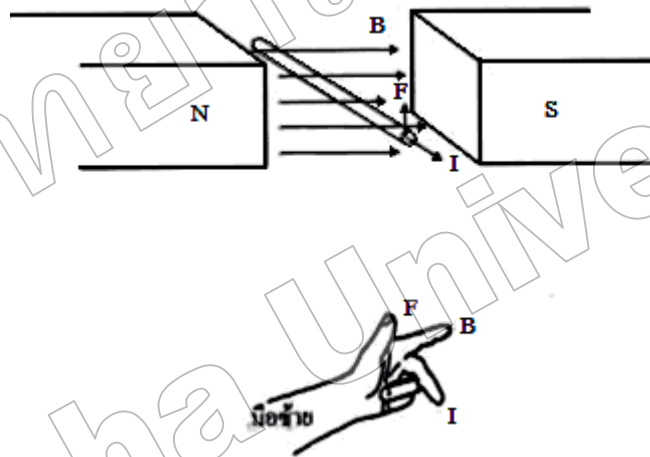
1. เรียนรู้การทำงานและเทคนิคการควบคุมเครื่องจักรไฟฟ้ากระแสดตรง
2. สามารถสร้างจักรยานไฟฟ้าที่สามารถอัดประจุจากระบบเบรกและจากการปั่นด้วยเท้าได้
3. เพิ่มพลังงานของแบตเตอรี่ทำให้ใช้งานนานกว่าเดิม
4. ลดการใช้น้ำมัน ทำให้ประหยัดเงิน ลดภาวะโลกร้อน และไม่เป็นมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 หลักการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง [1]

อาศัยหลักการของปฏิกิริยาของสนามแม่เหล็กและขดลวดอาร์เมเจอร์ (Armature Winding) ซึ่ง
จะเกิดเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดตัวนำ สามารถที่จะหาแรงที่เกิดขึ้นในขดลวดตัวนำที่วางอยู่ใน
สนามแม่เหล็ก โดยจะมีทิศทางดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 กฎมือซ้ายของเฟลมมิ่ง

จากรูป 2.1 จะใช้กฎมือซ้ายของเฟลมมิ่ง (Fleming's left hand rule) ในการเคลื่อนที่ของตัวนำ
ได้ดังนี้ โดยการกางนิ้วหัวแม่มือ นิ้วชี้ และนิ้วกลาง ให้ตั้งฉากซึ่งกันและกัน จะได้ว่านิ้วหัวแม่มือแสดงทิศ
การเคลื่อนที่ของตัวนำ นิ้วชี้แสดงทางของสนามแม่เหล็ก และนิ้วกลางแสดงทิศทางของการไหลของ
กระแส และสมการที่ประยุกต์ใช้กับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีดังนี้
สมการแรงเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้าบนขดลวดตัวนำ

2.1.1 สมการแรงเคลื่อนแม่เหล็กแม่เหล็กไฟฟ้าบนขดลวดตัวนำ

$$F = i(L \times B) \text{ นิวตัน}$$

โดย $F =$ แรงที่เกิดขึ้นในขดลวดตัวนำ

i = กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดตัวนำ

B = ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้า

L = ความยาวของลวดตัวนำ

2.1.2 สมการแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของขดลวดตัวนำที่ตัดผ่านสนามแม่เหล็ก

$$e = (v \times B)L \text{ โวลต์}$$

โดย e = แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

v = ความเร็วของตัวนำที่ตัดกับสนามแม่เหล็ก

B = ความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก

2.1.3 สมการของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

สมการของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในอาร์เมเจอร์สามารถหาได้ดังนี้
แรงเคลื่อนแม่เหล็กที่ตัด/ตัวนำ

$$d\phi = \phi P Wb$$

จำนวนความเร็ว $= \frac{N}{60}$ รอบต่อวินาที

ดังนั้นเวลาใน 1 รอบ $dt = \frac{60}{N}$ วินาที

จากกฎแม่เหล็กไฟฟ้าเหนี่ยวนำของฟาราเดย์ซึ่งมีสมการ

$$e = \frac{d\phi}{dt} \text{ โวลต์}$$

แทนค่า dt และ $d\phi$ จะได้

$$e = \frac{\phi PN}{60} \text{ โวลต์}$$

เมื่อพันขดลวดแบบเวฟ

จำนวนทางขนานในอาร์เมเจอร์ $= 2$

จำนวนตัวนำอนุกรมหนึ่งทางขนาน $= \frac{Z}{2}$

เมื่อพันขดลวดแบบแลป

จำนวนทางขนานในอาร์เมเจอร์ $= P$

จำนวนตัวนำอนุกรมหนึ่งทางขนาน $= \frac{Z}{P}$

จึงได้สมการดังนี้

$$e = \frac{\phi NZP}{60a} \quad \text{โวลต์}$$

โดย e = แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

ϕ = เส้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้าต่อขั้ว

P = จำนวนขั้วแม่เหล็ก

Z = จำนวนลวดตัวนำของอาร์เมเจอร์

N = ความเร็วของอาร์เมเจอร์

a = จำนวนทางขนานในอาร์เมเจอร์ = P พันแบบเวฟ, = $2P$ พันแบบแลป

หรือ

$$\omega_m = \frac{2\pi N}{60} \quad \text{เรเดียนต่อวินาที}$$

$$N = \frac{60\omega_m}{2\pi}$$

แทน N ลงใน

$$e = \frac{\phi NZP}{60a}$$

ดังนั้น

$$e = \frac{\phi ZP \omega_m}{2\pi a}$$

เมื่อให้

$$K_a = \frac{ZP}{2\pi a}$$

ดังนั้น

$$e = K_a \phi \omega_m \quad \text{โวลต์}$$

โดย K_a = ค่าคงที่ของวงจรรอาร์เมเจอร์

ดังนั้น จะได้ความสัมพันธ์ของเส้นแรงแม่เหล็กและกระแสกระตุ้นสนามแม่เหล็กซึ่งมีสมการดังนี้

$$\phi \propto I_f$$

$$\phi \propto K_f I_f \quad \text{เวเบอร์}$$

โดย K_f = ค่าคงที่ของสนามแม่เหล็ก

I_f = กระแสไหลผ่านสนามแม่เหล็ก

เพราะ $e = K_a \phi \omega_m$ โวลต์

ดังนั้น

$$e = K_a K_f I_f \omega_m \quad \text{โวลต์}$$

เมื่อให้ $K = K_a K_f$

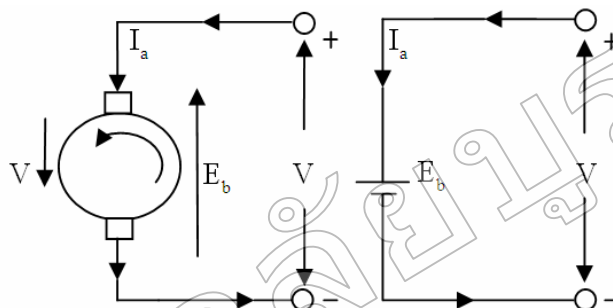
จะได้

$$e = K I_f \omega_m \quad \text{โวลต์}$$

โดย K = ค่าคงที่ของมอเตอร์

2.1.4 แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำต้านกลับ

เมื่ออาร์เมเจอร์หมุน ตัวนำที่อาร์เมเจอร์จะตัดกับเส้นแรงแม่เหล็กทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ขึ้นในอาร์เมเจอร์ โดยมีทิศทางตรงกันข้ามกับแรงเคลื่อนที่จ่ายให้กับมอเตอร์ เรียกว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้านี้ว่า แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำต้านกลับ (back electromotive force) หรือ E_b



รูปที่ 2.2 ทิศทางของแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ

$$I_a = \frac{(V - E_b)}{R_a}$$

แอมแปร์

$$E_b = \phi Z N \times \frac{P}{A} \text{ โวลต์}$$

โดย

R_a = ความต้านทานในวงจรอาร์เมเจอร์ โอห์ม

N = ความเร็วรอบมอเตอร์

รอบต่อวินาที

2.1.5 สมการแรงเคลื่อนไฟฟ้าของมอเตอร์

$$V = E_b + I_a R_a$$

คูณด้วย I_a ทั้งสองข้างของสมการ จะได้

$$V I_a = E_b I_a + (I_a)^2 R_a$$

โดย V = แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่จ่ายให้กับวงจรของมอเตอร์ (โวลต์)

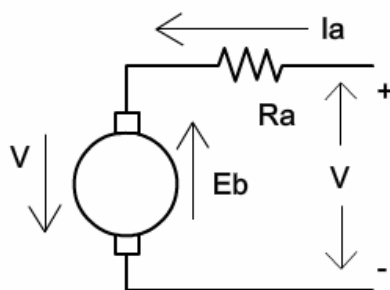
E_b = แรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับที่เกิดขึ้นในอาร์เมเจอร์ (โวลต์)

$I_a R_a$ = แรงเคลื่อนไฟฟ้าตกคร่อมที่ความต้านทานของอาร์เมเจอร์ (โวลต์)

$V I_a$ = กำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้อาร์เมเจอร์ (วัตต์)

$E_b I_a$ = กำลังไฟฟ้าในอาร์เมเจอร์ที่สมดุลกับกำลังทางกลที่เกิดขึ้นในอาร์เมเจอร์ (วัตต์)

$(I_a)^2 R_a$ = กำลังสูญเสียที่ขดลวดในอาร์เมเจอร์ (วัตต์)



รูปที่ 2.3 วงจรมอเตอร์กระแสตรง

2.1.6 สมการแรงบิด

แรงบิดคือ โมเมนต์การบิดตัวของแรงเหวี่ยงที่พิจารณา สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$T = F \times r \quad \text{นิวตัน-เมตร}$$

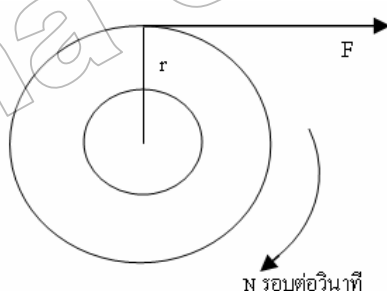
งานเกิดจากแรงในการหมุน 1 รอบ = แรง $\times$ ระยะทาง

$$\text{กำลังที่เกิดขึ้น} = F \times 2\pi r \times N \quad \text{จูลต่อวินาที}$$

$$= (F \times r) \times 2\pi N \quad \text{จูลต่อวินาที}$$

$$\text{โดย} \quad 2\pi N = \omega \quad \text{เรเดียนต่อวินาที}$$

$$\text{ดังนั้น กำลังที่เกิด} = T \times \omega \quad \text{จูลต่อวินาที หรือ วัตต์}$$



รูปที่ 2.4 การเกิดแรงบิด

กำลังที่เกิดขึ้นในมอเตอร์ ได้มาจากการที่อาร์เมเจอร์หมุนด้วยความเร็ว ω_m และได้แรงบิด T_m นั่นคือ T , ω_m ดังนั้น แรงบิดที่เกิดขึ้นจากเหล็กไฟฟ้าในอาร์เมเจอร์และแรงบิดที่เกิดขึ้นมาจากการไหลของกระแสอาร์เมเจอร์ I_a และแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำในอาร์เมเจอร์คือ e และทำให้ได้กำลังกลที่อาร์เมเจอร์ คือ $e I_a$

$$\text{โดย} \quad P = T \omega_m \quad \text{วัตต์}$$

$$\text{จะได้} \quad e I_a = T \omega_m$$

$$\text{ดังนั้น} \quad T = \frac{e I_a}{\omega_m} \quad \text{นิวตัน-เมตร}$$

$$\text{โดย} \quad e = K I_f \omega_m \quad \text{โวลต์}$$

$$\text{ดังนั้น} \quad T = K I_f I_a \quad \text{นิวตัน-เมตร}$$

$$T = K_a \phi I_a \quad \text{นิวตัน-เมตร}$$

2.1.7 ความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

ความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงพิจารณาจากสมการแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับของมอเตอร์ ดังนี้

$$\begin{aligned} E_b &= V - I_a R_a \\ \phi Z N \times (P/A) &= V - I_a R_a \\ \text{ดังนั้น} \quad N &= \left[\frac{(V - I_a R_a)}{\phi} \right] \left(\frac{A}{ZP} \right) \quad \text{รอบต่อวินาที} \\ \text{เมื่อ} \quad V - I_a R_a &= E_b \\ \text{ดังนั้น} \quad N &= \left(\frac{E_b}{\phi} \right) \left(\frac{A}{ZP} \right) \quad \text{รอบต่อวินาที} \end{aligned}$$

2.2 วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง [2]

สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดของมอเตอร์ T_{em} กับแรงบิดที่โหลดต้องการเท่ากับ

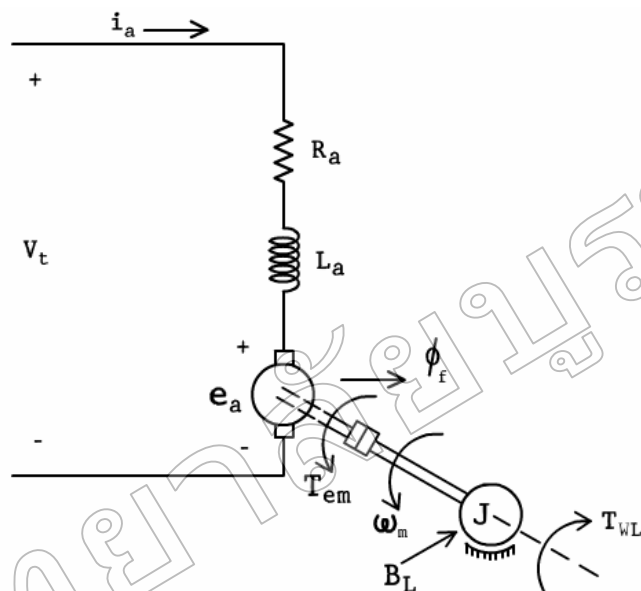
$$T_{em} = J \frac{d\omega_m}{dt} + B \cdot \omega_m + T_{WL}(t)$$

โดยที่ J หมายถึง ผลรวมวงจรมวลของแรงเฉื่อย (Total equivalent inertia) ของโหลด

B หมายถึง ผลรวมวงจรมวลของการแกว่ง (Total equivalent damping) ของโหลด

T_{WL} หมายถึง ผลรวมวงจรมวลของแรงบิดที่โหลดต้องการในการทำงาน

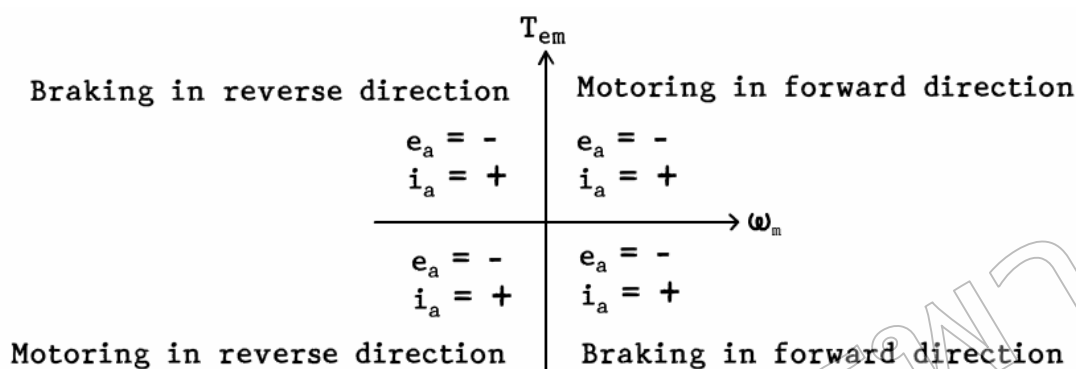
เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงนั้น สามารถทำงานเป็นมอเตอร์หรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงได้ ในขณะที่ทำการเบรคมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงนั้น มอเตอร์จะทำตัวเสมือนเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง ในขณะที่ความเร็วเริ่มลดลง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องพิจารณากรณีที่มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ทำตัวเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงขณะเบรก โดยกำหนดให้เส้นแรงแม่เหล็กมีค่าคงที่ และมอเตอร์กำลังขับโหลดที่มีความเร็วเท่ากับ ω_m เพื่อที่จะลดความเร็วของมอเตอร์โดยทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้า V_t มีค่าต่ำกว่าแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำย้อนกลับ e_a ดังแสดงในรูป 2.5 จะมีผลทำให้กระแสอาเมเจอร์ i_a จะไหลกลับทิศทาง ค่าแรงบิด T_{em} จะกลับทิศทางเช่นกัน นอกจากนั้นพลังงานจลน์ที่เกิดจากแรงเฉื่อยของโหลดจะเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้า ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวหมายความว่ามอเตอร์ได้ทำ

v_t 

รูปที่ 2.5 วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

ขณะที่มอเตอร์ไฟฟ้าทำการเบรก ขั้วของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำย้อนกลับ e_a จะไม่เปลี่ยนแปลง เพราะทิศทางการหมุนยังคงไม่เปลี่ยนแปลง ดังนั้นสมการที่ (1.2.2.1) จะยังคงใช้ในการหาขนาดของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำย้อนกลับได้ และเมื่อความเร็วของโรเตอร์ลดลง เป็นผลให้แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำย้อนกลับ e_a มีค่าลดลง (สมมติให้เส้นแรงแม่เหล็ก ϕ_f มีค่าคงที่) จนกระทั่งโรเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงหยุดหมุน และถ้าขั้วของแหล่งจ่ายไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลง ก็จะมีผลทำให้ทิศทางการหมุนของโรเตอร์เปลี่ยนแปลงไปเช่นกัน

ดังนั้นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจะสามารถทำงานได้ทั้งทิศทางใดทิศทางหนึ่ง และเมื่อทำการเบรก แรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงก็จะสามารถกลับทิศทางได้ ดังรูป 2.6 แสดงความสัมพันธ์ ระหว่างแรงบิดกับความเร็วรอบสำหรับย่านการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงทั้ง 4 ย่านการทำงาน

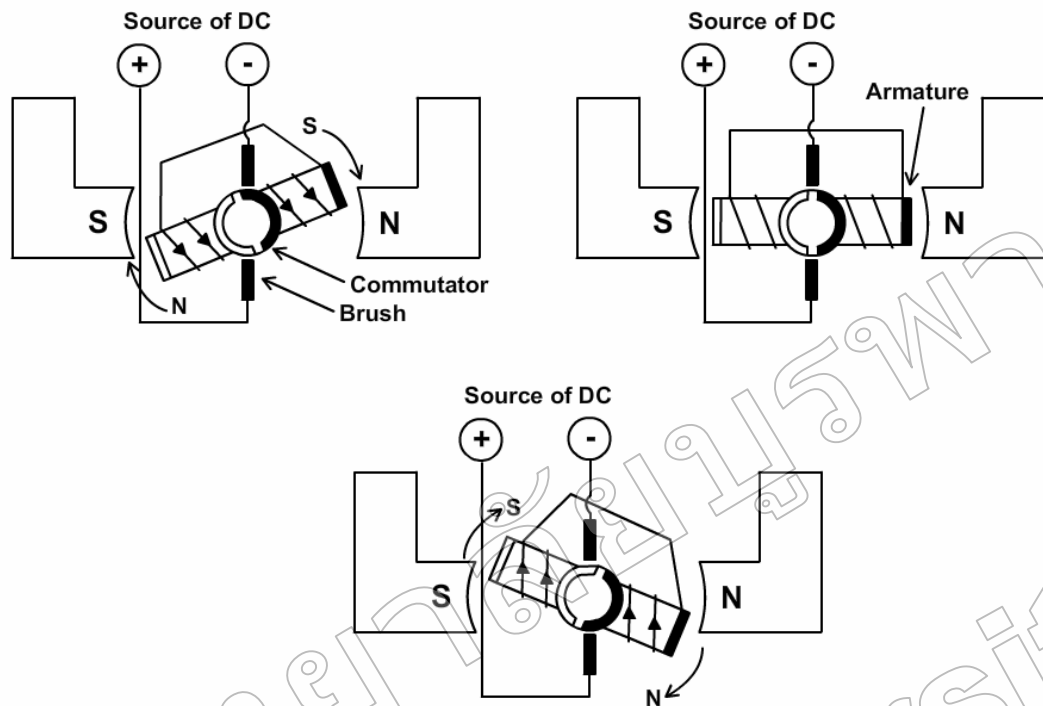


รูปที่ 2.6 การทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงทั้ง 4 ย่าน

2.3 หลักการทำงานของมอเตอร์แม่เหล็กถาวร

มอเตอร์แม่เหล็กถาวรใช้สนามแม่เหล็กหลักจากแม่เหล็กถาวรและใช้แม่เหล็กไฟฟ้าเป็นสนามทุติยภูมิหรือฟลักซ์อาร์เมเจอร์ รูปที่ 2.7 (ก) แสดงหลักการทำงานของมอเตอร์แม่เหล็กถาวร กระแสไหลจากขดลวดอาร์เมเจอร์จากแหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรงจะทำให้อาร์เมเจอร์เป็นแม่เหล็ก ขั้วแม่เหล็กของอาร์เมเจอร์จะมีขั้วตรงข้ามกับสนามแม่เหล็ก ทำให้อาร์เมเจอร์มีการหมุนดังรูป อาร์เมเจอร์หมุนตามเข็มนาฬิกา เมื่อขั้วอาร์เมเจอร์อยู่ในแนวเดียวกันกับสนามแม่เหล็กแปรงถ่านจะอยู่ในช่องว่างของคอมมิวเตเตอร์จะไม่มีกระแสไหลผ่านในขดลวดอาร์เมเจอร์ ดังนั้นแรงแม่เหล็กจะเป็นแรงผลักดัน ดังแสดงในรูป 2.7 (ข) ความเฉื่อยจะทำให้อาร์เมเจอร์ผ่านจุดนิวทรัลคอมมิวเตเตอร์จะกลับทิศของกระแสในอาร์เมเจอร์เมื่อขั้วแม่เหล็กตรงกันข้ามตรงกันจึงทำให้ขั้วแม่เหล็กของอาร์เมเจอร์จะกลับขั้วเมื่อขั้วเหมือนกัน ของอาร์เมเจอร์และสนามหลักอยู่ตรงกันจะทำให้เกิดการผลักดัน จึงทำให้อาร์เมเจอร์หมุนได้อย่างต่อเนื่อง ดังรูปที่ 2.7

ทิศทางการหมุนของมอเตอร์ สามารถหาจากการไหลของกระแสผ่านอาร์เมเจอร์ การกลับทิศของอาร์เมเจอร์จะทำให้การหมุนกลับทิศ ลักษณะสำคัญของมอเตอร์กระแสตรงคือ สามารถควบคุมอัตราเร็วได้ อัตราเร็วของมอเตอร์แม่เหล็กถาวรจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าแรงดันที่ให้กับอาร์เมเจอร์ ฉะนั้นถ้าแรงดันอาร์เมเจอร์สูงจะทำให้อัตราเร็วของมอเตอร์สูงขึ้นด้วย



รูปที่ 2.7 หลักการทำงานของมอเตอร์กระแสตรงแบบแม่เหล็กถาวร

วงจรอย่างง่ายของมอเตอร์กระแสตรงแม่เหล็กถาวรแสดงได้ดังรูป 2.8 แม่เหล็กถาวรเป็นตัวสร้างสนามแม่เหล็กซึ่งมีค่าคงที่ จากวงจรจะได้สมการดังนี้

$$T_m = K_T I_a \text{ นิวตัน-เมตร} , \quad \omega_m = \frac{2n}{60}$$

$$E_a = K_E \omega_m \text{ โวลต์}$$

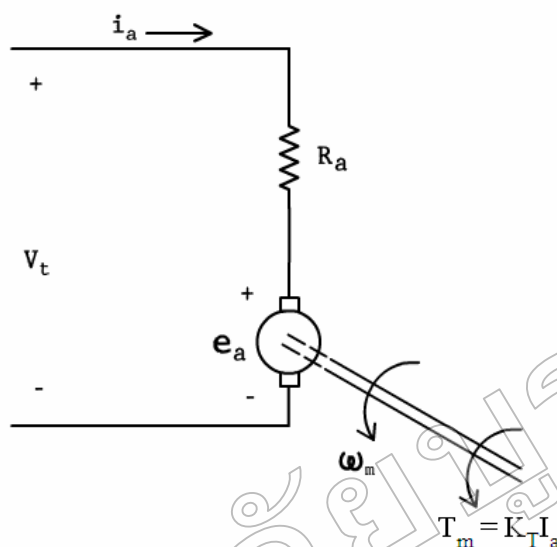
$$V_t = E_a + R_a I_a \text{ โวลต์}$$

$$\text{เมื่อ } K_T = K_t \phi_f \quad \text{และ } K_E = K_e \phi_f$$

จากสมการข้างบนได้สมการความเร็วในฟังก์ชันของ T_m เมื่อกำหนดให้ V_t คงที่

$$\omega_m = \frac{1}{K_E} \left(V_t - \frac{R_a}{K_t} T_m \right)$$

$$I_a = \left(\frac{V_t - E_a}{R_a} \right)$$



รูปที่ 2.8 วงจรรายง่ายของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบแม่เหล็กถาวร

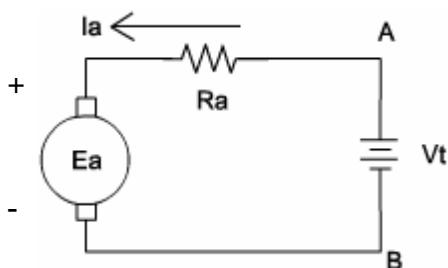
2.4 การหยุดเครื่องจักรไฟฟ้ากระแสตรง

การหยุดเครื่องจักรไฟฟ้ากระแสตรงอาจปล่อยให้หยุดโดยธรรมชาติ หรือใช้ความฝืด แรงเสียดทาน หรือการใช้เบรกทางเครื่องมืองัดกรกล แต่ในการใช้งานของเครื่องจักรไฟฟ้าบางครั้งต้องการหยุดเครื่องอย่างรีบด่วน เช่นอุบัติเหตุ ซึ่งการหยุดโดยวิธีใช้เครื่องมืองัดกรกล หรือแรงเสียดทานจะต้องบำรุงรักษาซ่อมแซม แต่ถ้าเราออกแบบหยุดโดยใช้พลังงานไฟฟ้าช่วยจะทำให้สามารถใช้งานได้เป็นเวลานานโดยไม่ต้องบำรุงรักษา วิธีหยุดทางไฟฟ้าจะเปลี่ยนพลังงานกลในเพลามอเตอร์ ให้กลับเป็นพลังงานไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า(มอเตอร์ตัวเดิม)ทำให้เกิดแรงบิดทางไฟฟ้าขึ้นกลับ ทำให้เครื่องจักรหยุดโดยเร็วขึ้น หลักการหยุดมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีอยู่ 3 วิธีใหญ่ ดังนี้คือ

2.4.1 โดยวิธีต่อความต้านทานไฟฟ้าคร่อม

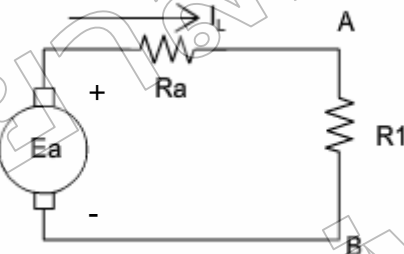
พิจารณาเครื่องจักรไฟฟ้า ในรูป 2.9 เป็นมอเตอร์ มีศักดาไฟฟ้าป้อนเข้าสู่วงจรขั้ว AB ซึ่งขั้ว A เป็นขั้วบวกของวงจร ดังนั้นสมการของมอเตอร์ คือ

$$V_t = E_a + I_a R_a$$



รูปที่ 2.9 การต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ถ้าจะวิธีหยุดเดินมอเตอร์นี้เราอาจจะเอาศักดาไฟฟ้าป้อนเข้า V_t ออก แล้วใช้ค่าความต้านทาน R_1 ดังแสดงไว้ในรูป 2.10 ต่อคร่อมแทนศักดาไฟฟ้า V_t ที่ระหว่างขั้ว AB



รูปที่ 2.10 การต่อตัวต้านทาน R_1 เพื่อหยุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

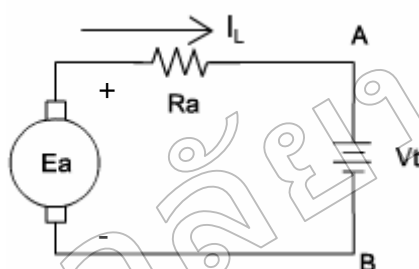
เครื่องจักรจะหมุนไปด้วยแรงเฉื่อย ดังนั้นเครื่องมอเตอร์ในขณะนี้ทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จะมีกระแสไฟฟ้าไหลออกจากอเมเจอร์ แยกลงวงจรขั้วแม่เหล็กและออกมาสู่โหลด R_1 ดังนั้นพลังงานกลจากการหมุนเปลี่ยนกลับเป็นพลังงานไฟฟ้ามาสูญเสียไปในโหลด $I_a^2 R_1$ เครื่องจักรก็จะหมุนช้าลง เมื่อความเร็วรอบของเครื่องลดลง จะมีผลทำให้ศักดาไฟฟ้าของอเมเจอร์ E_a ลดลง ดังนั้นถ้าต้องการให้แรงบิดที่ต้านทานการหมุนคงที่ค่าความต้านทาน R_1 จะต้องค่อยลดลงไปด้วย

ค่าความต้านทาน R_1 ที่จะใช้ในวงจรนี้ ส่วนมากจะออกแบบคำนวณโดยให้ค่ากระแสของ I_a ไม่สูงเกินไปจนทำลายวงจรอเมเจอร์ ซึ่งค่าโดยทั่วไปจะใช้ประมาณ 2 เท่าของกระแสโหลดเต็มที่ของมอเตอร์ สามารถคำนวณหาค่า R_1 ได้จากสมการ

$$E_a = I_L R_1 + I_a R_a$$

2.4.2 โดยวิธีเก็บพลังงานคืนเข้าระบบจ่าย

วิธีนี้ได้ดัดแปลงจากวิธีแรก โดยให้พลังงานกลศาสตร์ที่สะสมอยู่ในระบบมอเตอร์ จ่ายคืนเข้าสู่ระบบไฟฟ้า แทนที่จะมาสูญเสียเป็นพลังงานความร้อนในความต้านทาน R_1 ในรูป 2.9 ขั้วระบบจ่ายไฟ

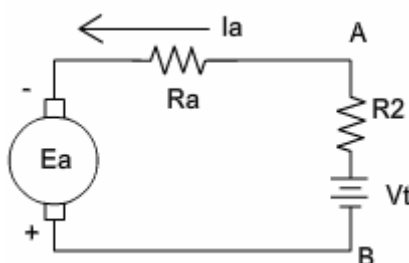


รูปที่ 2.11 การหยุดมอเตอร์แบบเก็บพลังงานคืนระบบจ่าย

2.4.3 โดยวิธีกลับขึ้นขั้วเมเจอร์

วิธีนี้หยุดเครื่องจักรอย่างรวดเร็วหรือกลับทิศทางการหมุนของเครื่องจักรใช้ในกรณีเกิดอุบัติเหตุ หรือลักษณะการใช้งานที่ต้องการความรวดเร็ว หรือกลับทิศทางการหมุนไปมาของระบบ พิจารณารูป 2.12 ขณะต้องการหยุดโดยใช้วิธีนี้ใช้ตัววงจรตรงจุดระหว่าง x และ y แล้วใส่ความต้านทาน R_2 อนุกรมเข้าวงจรแทน และกลับทิศทางของขั้วเมเจอร์โดยทันทีทันใด ค่า R_2 ที่คำนวณใช้เพื่อป้องกันกระแสในวงจรระหว่างกลับขั้วไม่ให้อุปกรณ์เกินกำหนด ซึ่งตามธรรมชาติจะใช้เวลาประมาณ 2 เท่าของกระแสเมื่อโหลดเต็มที่มีอีกเช่นเดียวกันค่าของ R_2 อาจคำนวณได้จากสมการ

$$V_t + E_a = I_a (R_a + R_2)$$



รูปที่ 2.12 การหยุดมอเตอร์แบบกลับขึ้นขั้วเมเจอร์

ซึ่งถ้าต้องการใช้แรงบิดขึ้นคงที่ ที่เมื่อความเร็วรอบลดลงก็จะลดค่าของ R_2 ตามลงด้วย

2.5 การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงโดยพื้นฐานประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ ชุดขดลวดสนาม (field winding) โดยทั่วไปทั่วไปจะพันอยู่ที่โครงสเตเตอร์ของมอเตอร์ และชุดขดลวดอาร์เมเจอร์ (armature winding) โดยทั่วไปพันอยู่ที่โรเตอร์ ขดลวดทั้งสองจะถูกป้อนด้านไฟฟ้ากระแสตรง ชุดขดลวดอาร์เมเจอร์จะต่ออยู่กับคอมมิวเตเตอร์ (commutator) ซึ่งติดอยู่ที่ตัวโรเตอร์ คอมมิวเตเตอร์ทำหน้าที่เสมือนกับวงจรเรียงกระแสเพื่อให้กับอาร์เมเจอร์ ซึ่งไหลผ่านแปรงถ่าน เพียงทิศทางเดียวไม่ว่าโรเตอร์จะหมุนที่ความเร็วเท่าไรก็ตาม

โดยทั่วไปการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง จะนิยมใช้กับงานที่ต้องการควบคุมความเร็วและตำแหน่ง แต่ได้มีการนำเซอร์โวมอเตอร์กระแสสลับ (AC motor servo drive) มาใช้แทนมอเตอร์กระแสตรง แต่อย่างไรก็ตาม มอเตอร์กระแสตรงยังคงใช้กันอยู่ เนื่องจากใช้เงินลงทุนเริ่มต้นต่ำ มีคุณสมบัติการทำงานดี แต่มีค่าบำรุงรักษาสูง

วงจรที่นำมาใช้ขับเคลื่อนมอเตอร์ในโครงการฯ เป็นวงจรแบบสวิตชิง มีข้อดีคือ แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าให้โหลดได้เต็มที่ และมีความสูญเสียน้อย

2.5.1 วงจรสวิตชิง

หลักการทำงานของวงจรสวิตชิง (Switching Circuit)

อุปกรณ์สวิตชิง เช่น มอสเฟต ไอจีบีที จะทำหน้าที่เป็นสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ มีโหมดการทำงานคือ โหมดนำกระแส และหยุดนำกระแส โดยสมมติให้ มอสเฟต หรือ ไอจีบีทีที่ใช้เป็นสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ในอุดมคติดังรูป หลักการทำงานคือ

เมื่อสวิตช์นำกระแส แรงดันไฟฟ้าด้านออกจะมีค่าเท่ากับ แรงดันไฟฟ้าด้านเข้า ($V_o = V_s$) และเมื่อสวิตช์ไม่นำกระแส แรงดันไฟฟ้าด้านออกจะมีค่าเท่ากับศูนย์ หรือ ($v_o = 0$) ช่วงเวลาในการนำกระแสและหยุดนำกระแส จะได้สัญญาณแรงดันไฟฟ้าด้านออกเป็นพัลส์ ดังรูป 2.13 ซึ่งสามารถหาค่าเฉลี่ยหรือค่าของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านออกได้จากสมการ

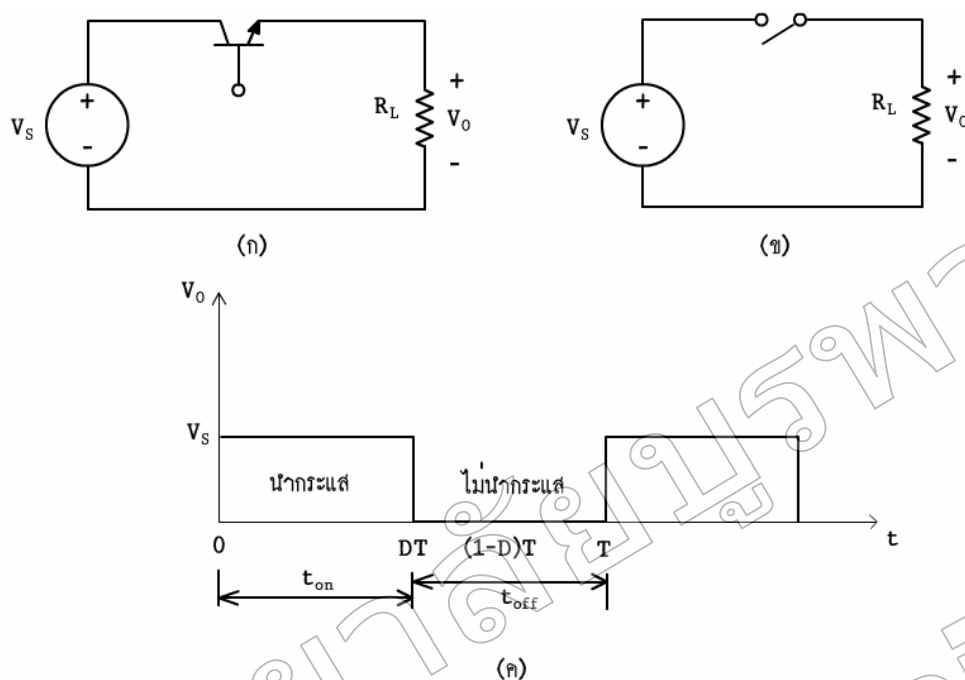
$$V_o = \frac{1}{T} \int_0^T v_o(t) dt$$

$$V_o = \frac{1}{T} \int_0^{DT} v_s dt$$

$$V_o = V_s D$$

เมื่อ V_s = แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

D = ดิวตี้ไซเคิล



รูปที่ 2.13 (ก) วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงพื้นฐาน
(ข) วงจรสมมูลของสวิตช์ (ค) แรงดันไฟฟ้าต้านออก

จากสมการ (2.1.1) จะพบว่าค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงทางต้านออกจะถูกควบคุมได้จากการปรับค่าตัวที่ใช้เคิล (Duty Cycle หรือ Duty Ratio: D) ซึ่ง D หมายถึง อัตราส่วนของช่วงเวลาที่ยานะสัทนำกระแสต่อช่วงเวลาหนึ่งคาบของการสวิตซิ่ง ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$D = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} = \frac{t_{on}}{T}$$

$$t_{on} = DT$$

$$t_{off} = (1-D)T$$

เมื่อ t_{on} = ช่วงเวลานำกระแส

t_{off} = ช่วงเวลาไม่นำกระแส

T = ช่วงเวลาหนึ่งคาบ

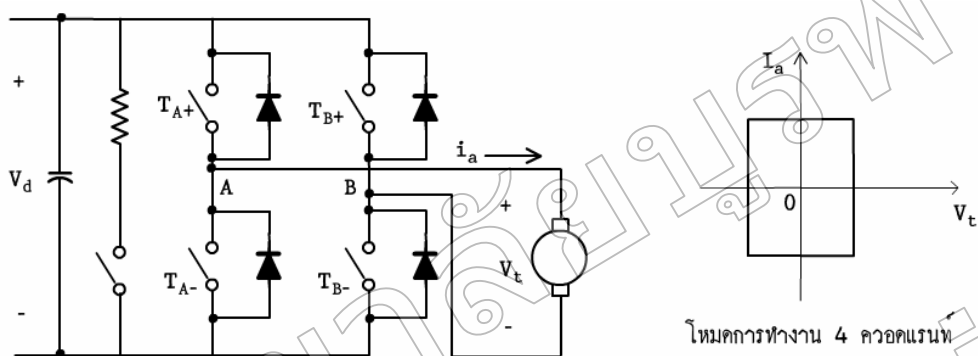
การกำหนดค่า D นิยมบอกเป็นสองลักษณะ คือบอกเป็นเลขจำนวนเต็มและบอกเป็นเปอร์เซ็นต์ ค่าต่ำสุดของ D คือ ศูนย์ และค่าสูงสุดคือ หนึ่ง ขณะที่บอกเป็นเปอร์เซ็นต์ จะมีค่าต่ำสุดเป็นศูนย์เปอร์เซ็นต์ และค่าสูงสุดคือหนึ่งร้อยเปอร์เซ็นต์

ตัวอย่างเช่น $D = 0.4$ หรือ $D = 40\%$ หมายถึงช่วงเวลาที่ยานะสัทนำกระแส 0.4 ส่วน จากช่วงเวลาหนึ่งคาบ หรือ ช่วงเวลาที่สวิตซิ่งนำกระแสมี 40% ในช่วงเวลาหนึ่งคาบหรือ 100%

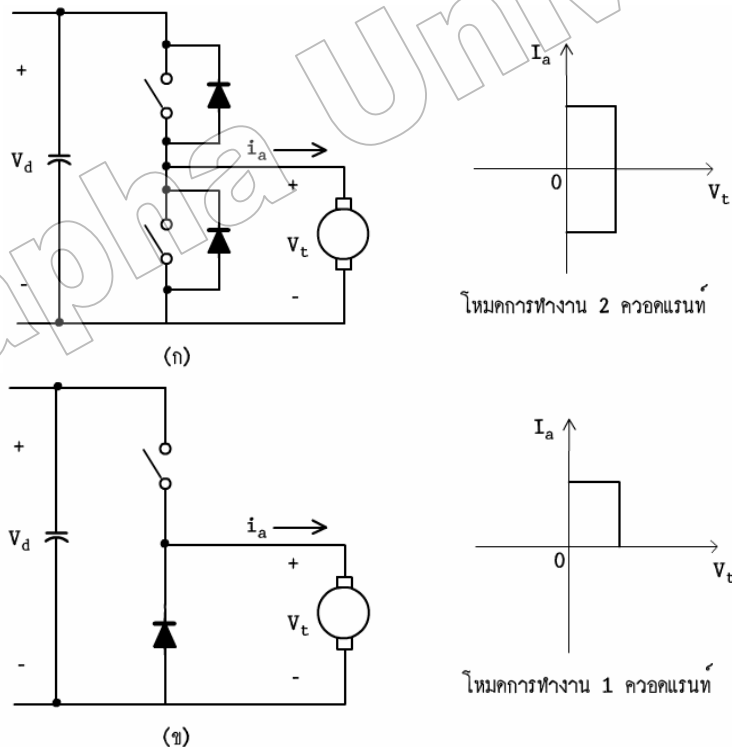
2.5.2 การปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

Switched-Mode DC-DC Converter

สำหรับงานที่ต้องการให้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงทำงานทั้งสี่ย่าน และใช้ร่วมกับวงจรแปลงผันกำลังแบบสวิตชิ่ง (Switched-Mode Converter) ต้องใช้วงจรฟูลบริดจ์ดังรูป 2.14



รูปที่ 2.14 วงจรฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์



รูปที่ 2.15 วงจรฟูลบริดจ์ใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

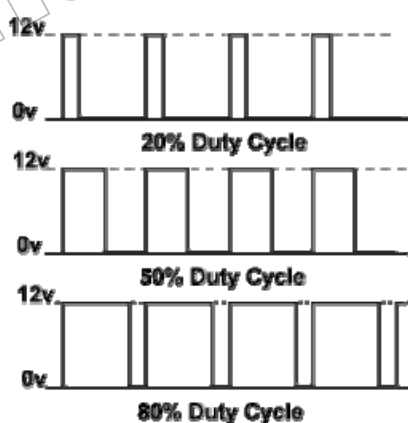
สำหรับงานที่ไม่ต้องการกลับทางหมุนของมอเตอร์ แต่ต้องการเฉพาะการเบรคมอเตอร์ สามารถใช้คอนเวอร์เตอร์ที่มีโหมดการทำงานแบบสองจุดภาค ดังรูป 2.15 (ก) ได้ ซึ่งในวงจรดังรูป 2.15 (ก) จะประกอบด้วย สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังสองตัว จะต้องมิตัวใดตัวหนึ่งนำกระแส เพื่อที่จะทำให้แรงดันต้านออกไม่ขึ้นกับทิศทางของการแส I_a และในกรณีที่ทิศทางของกระแส I_a กลับทิศทางหรือมีค่าเป็นลบ จะหมายถึงการทำงานในโหมดเบรคซึ่งกำลังไฟฟ้าจะถูกส่งผ่านกลับคืนไปยังแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า กระแสตรง V_d ถึงแม้ว่าแรงดันไฟฟ้าต้านออกของคอนเวอร์เตอร์จะสามารถควบคุมขนาดได้ แต่จะไม่สามารถกลับขั้วแรงดันได้ สำหรับคอนเวอร์เตอร์ที่มีโหมดการทำงาน 1 จุดภาค จะสามารถใช้วงจรที่ดีที่คอนเวอร์เตอร์ ซึ่งโหมดการทำงาน 1 จุดภาค จะมีทิศทางการหมุนของมอเตอร์เพียงหนึ่งทิศทางและไม่มีระบบเบรค รูป 2.15 (ข) แสดงตัวอย่างวงจรเบรคคอนเวอร์เตอร์ในการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรง

2.6 การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

การควบคุมแบบ PWM

การควบคุมแบบ PWM ย่อมาจาก Pulse Width Modulation หรือแปลว่า การปรับความกว้างของพัลส์โดยการนำเอาสองสัญญาณมาเปรียบเทียบกัน เป็นสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมที่มีลักษณะความถี่คงที่ แต่ช่วงเวลา on off หรือ Duty Cycle สามารถปรับเปลี่ยนได้ สัญญาณ PWM นี้ มักจะนำไปขับอุปกรณ์สวิตซ์ ซึ่งเพื่อควบคุมความเร็วของมอเตอร์ การควบคุมความเร็วมอเตอร์นั้น ได้จากการปรับช่วงเวลา Duty Cycle ดังกล่าว ให้มากขึ้นจากน้อยไปมาก

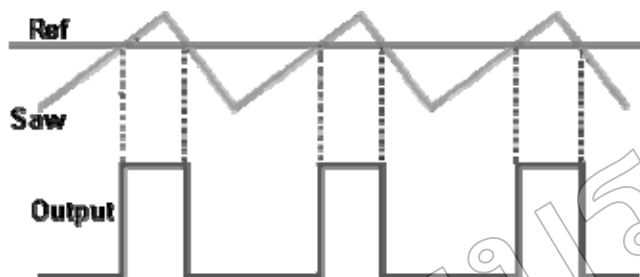
จากรูป 2.16 จะเห็นว่าสัญญาณ PWM ถูกปรับ Duty Cycle ในตำแหน่ง 20%, 50% และ 80% จะเห็นว่า ไม่ว่าจะปรับดีวีซีไอเคิลไปกี่เปอร์เซ็นต์ ความถี่ก็จะคงที่ตลอด



รูปที่ 2.16 รูปสัญญาณ PWM ที่ดีวีซีไอเคิลต่างๆ

สัญญาณ PWM สร้างได้จากการเปรียบเทียบ หรือ Comparator สัญญาณสองชนิดคือ สัญญาณรูปสามเหลี่ยม (Saw) และสัญญาณเส้นตรง (Ref) ดังรูป 2.17

การเปรียบเทียบของสัญญาณทั้งสองนี้ มักจะใช้ OP-AMP ในการทำงาน



รูปที่ 2.17 สัญญาณอ้างอิง (Ref) และสัญญาณฟันเลื่อย (Saw) เปรียบเทียบ (Comparator) กัน ได้สัญญาณ Output เป็น PWM

สัญญาณรูปสามเหลี่ยม (Saw) นั้น จะมีแอมพลิจูดและความถี่ที่ กำเนิดจากวงจร Oscillator การกำหนดความถี่ของสัญญาณ PWM นั้น มักกำหนดที่ความถี่ของสัญญาณรูปฟันเลื่อยนี้ ส่วนสัญญาณเส้นตรง (Ref) นั้นเป็นสัญญาณเปรียบเทียบ สามารถปรับแอมพลิจูดหรือแรงดันได้ มักได้จากการปรับค่าความต้านทานของตัวต้านทานปรับค่าได้ สัญญาณทั้งสองชนิดเมื่อนำมาเปรียบเทียบ (Comparator) กัน แล้วจะได้สัญญาณ Output เป็น PWM ที่สามารถเปลี่ยน Duty Cycle ได้ จากการปรับเปลี่ยนค่าแรงดันจากตัวต้านทานปรับค่าได้

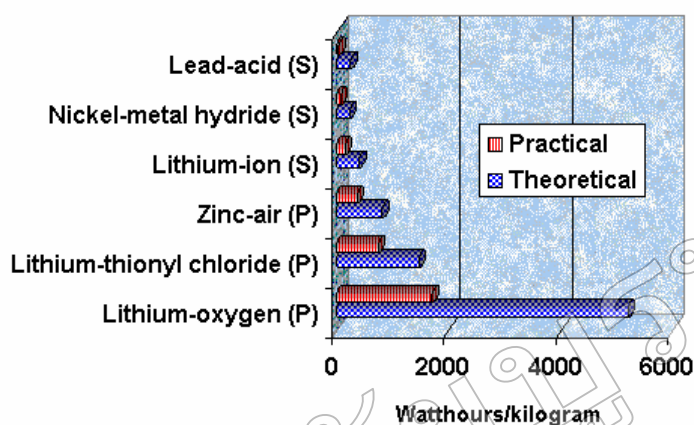
2.7 แหล่งจ่ายพลังงานสำหรับรถไฟฟ้า [4]

แหล่งจ่ายพลังงานที่ใช้กันอยู่มีสองชนิดคือ แบตเตอรี่(ชนิดประจุไฟใหม่ได้) และเซลล์เชื้อเพลิง รถไฟฟ้าส่วนใหญ่ใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ คุณลักษณะที่ใช้ในการเลือกคือ

2.7.1 ความหนาแน่นของพลังงาน

ความหนาแน่นของพลังงานหมายถึง พลังงานจากแหล่งจ่าย หารด้วยน้ำหนักของแหล่งจ่าย มีหน่วยเป็นกิโลวัตต์ต่อชั่วโมงต่อกิโลกรัม หรือความจุของแบตเตอรี่จะพิจารณาให้เปลี่ยนแปลงด้วยระดับของกำลัง ที่ซึ่งมีการใช้พลังงาน

Comparative Specific Energies



รูปที่ 2.18 การเปรียบเทียบความหนาแน่นของพลังงานของแบตเตอรี่ชนิดต่างๆ

2.7.2 ความหนาแน่นของกำลัง

ตัวแปรนี้ถูกกำหนดขึ้นมาในลักษณะเดียวกันกับความหนาแน่นของพลังงาน ปกติเราใช้ความหนาแน่นเชิงน้ำหนักมากกว่าเชิงปริมาตร

2.7.3 รอบอายุการใช้งาน

แหล่งจ่ายพลังงานเป็นตัวแปรที่มีความสำคัญกับรอบอายุการใช้งาน โดยทั่วไปแหล่งจ่ายพลังงานของรถยนต์ (ถังน้ำมัน) จะไม่มีปัญหาเรื่องรอบอายุการใช้งาน อย่างไรก็ตาม อายุการใช้งานของแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าของรถไฟฟ้ามักจะไม่นาน มักจะหมดอายุก่อนตัวถังรถ ดังนั้น อายุการใช้งานของแหล่งจ่ายมักบ่งบอกค่าใช้จ่ายของรถไฟฟ้า

รอบอายุการใช้งานคือ การที่แบตเตอรี่คายประจุจนกระทั่งไม่สามารถที่จะจ่ายกำลัง เพื่อที่จะขับเคลื่อนรถต่อไปได้ หรือ เมื่อใดที่แรงดันที่ขั้วแบตเตอรี่ลดลงต่ำกว่าระดับที่กำหนด



รูปที่ 2.19 แบตเตอรี่ชนิดต่างๆ

2.7.4 ค่าใช้จ่ายเริ่มต้น

เป็นที่แน่นอนอยู่แล้วว่าแบตเตอรี่มีค่าใช้จ่ายมากกว่าเชื้อเพลิงทั่วไป ทำให้ค่าใช้จ่ายในรถไฟฟ้าแตกต่างกันอย่างมากจากเชื้อเพลิงในรถยนต์ทั่วไป ค่าใช้จ่ายไม่ได้ขึ้นกับแบตเตอรี่อย่างเดียวเท่านั้น แต่ยังขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมทางเศรษฐกิจทั่วไป

2.7.5 ค่าใช้จ่ายบำรุงรักษา

แหล่งจ่ายพลังงานรถยนต์เชื้อเพลิงทั่วไปไม่ต้องการการบำรุงรักษา แต่กับรถไฟฟ้าการบำรุงรักษาเป็นสิ่งสำคัญ โดยเฉพาะแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดที่ต้องเติมน้ำกลั่น มูลค่าเหล่านี้จะยังไม่ถูกกำหนดในเวลานี้ จะพิจารณาเมื่อได้เลือกใช้แบตเตอรี่แล้ว

2.7.6 ประสิทธิภาพของพลังงาน

เป็นคุณลักษณะสำคัญของแหล่งพลังงาน แต่เป็นการยากที่จะกำหนด แต่อย่างไรก็ตาม แบตเตอรี่ทั่วไปมีประสิทธิภาพของพลังงานสูง จะอยู่ในย่าน 80-90 %

2.7.7 แรงดันแบตเตอรี่

แรงดันแบตเตอรี่จะเป็นตัวกำหนดจำนวนเซลล์ทั้งหมดของแบตเตอรี่ที่ใช้ในระบบขับเคลื่อน แรงดันชั่วขณะไม่มีโหลด กระแสเป็นศูนย์ จะเป็นฟังก์ชันของชนิดการเชื่อมโยงทางอิเล็กทรอนิกส์ และ สถานะการประจุแบตเตอรี่ภายใต้สภาวะโหลด นอกจากนี้ แรงดันชั่วขณะขึ้นกับ ฟังก์ชันของ กระแส โหลด ความต้านทานภายในของแบตเตอรี่ ปรากฏการณ์ Polarization และอุณหภูมิของ แบตเตอรี่ด้วย จากการเปลี่ยนแปลงแรงดันที่ชั่วแบตเตอรี่ จะมีผลต่อระบบอื่นๆ ที่ต่อกับแบตเตอรี่ เช่น ระบบควบคุมการขับเคลื่อน เป็นต้น

2.7.8 อิมพีแดนซ์ภายในของแบตเตอรี่

อิมพีแดนซ์ภายในของแบตเตอรี่ มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงแรงดันที่ชั่วขณะมีโหลด นอกจากนี้ยังมีผลต่อกำลัง ประสิทธิภาพของพลังงาน และการตอบสนองชั่วคราว วงจรสมมูลของแบตเตอรี่ส่วนมากจะซับซ้อน ซึ่งประกอบด้วย ความต้านทาน และอุปกรณ์ที่สะสมพลังงานได้

2.7.9 คุณลักษณะการประจุ

สถานะการประจุของแบตเตอรี่ หมายถึงพลังงานที่สะสมในแบตเตอรี่ จะกำหนดเป็นปริมาณของ ประจุในระบบ SI มีหน่วยเป็นคูลอมบ์, แอมแปร์-ชั่วโมง หรือ แอมแปร์-วินาที

คุณลักษณะที่สำคัญของการประจุแบตเตอรี่คือ rate หรือ ระดับกำลังของแบตเตอรี่ที่ประจุได้ เปรียบเหมือนการเติมน้ำมันใส่รถยนต์ แต่จะสำคัญมากเมื่อรถไฟฟ้าใช้ระบบเบรกแบบให้พลังงานกลับคืน การเบรกดังกล่าว แบตเตอรี่จะต้องมีความสามารถในการรับกำลังที่เกิดขึ้นได้จากการเบรกอัตรา (rate) ซึ่งแบตเตอรี่สามารถรับประจุได้ เรียกว่า battery charge acceptance การรับประจุทำให้ แบตเตอรี่มีอุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งจะต้องนำมาพิจารณา เมื่อการใช้ระบบเบรกแบบคืนพลังงาน

2.7.10 คุณลักษณะทางอุณหภูมิ

อุณหภูมิภายนอก เป็นองค์ประกอบที่สำคัญที่มีผลต่อการทำงานของแบตเตอรี่ ย่านของ อุณหภูมิภายนอก เป็นผลให้มีการแบ่งแบตเตอรี่เป็นสองชนิด คือ แบตเตอรี่อุณหภูมิสูง (พลังงานสูง)

2.8 แหล่งจ่ายพลังงานชนิดต่าง ๆ

1. แบตเตอรี่ตะกั่วกรด (LEAD-ACID BATTERIES)
2. แบตเตอรี่นิเกิล-สังกะสี
3. แบตเตอรี่นิเกิล-ไอออน (NICKEL-IRON BATTERIES)
4. แบตเตอรี่นิเกิล-แคดเมียม (NICKEL-CADMIUM)
5. แบตเตอรี่อุณหภูมิสูง (HIGH-TEMPERATURE BATTERIES)
6. แบตเตอรี่สังกะสี-คลอรีน (ZINC CHLORINE BATTERY)
7. แบตเตอรี่ไฮบริด (HYBRID BATTERIES)
8. เซลล์เชื้อเพลิง (FUEL CELL)

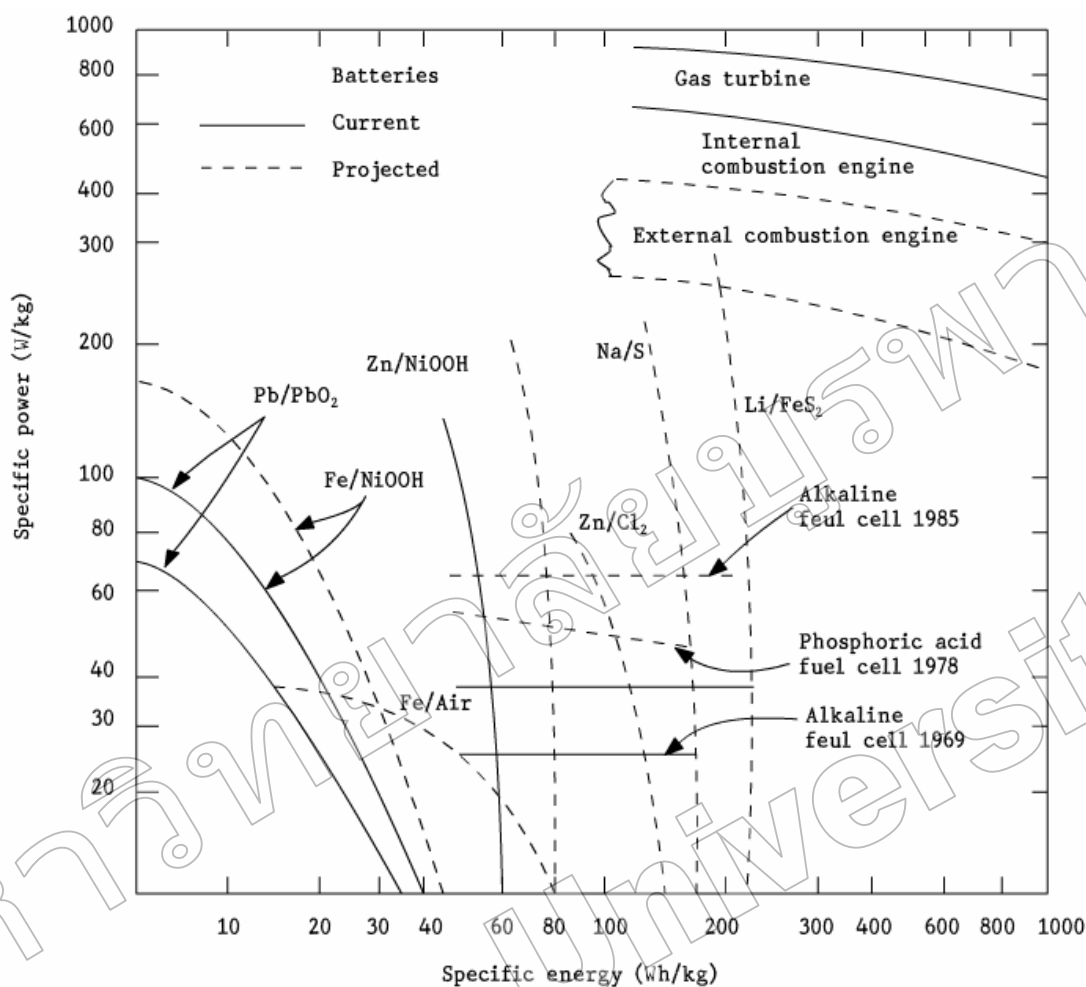
ย่านการให้พลังงานของแบตเตอรี่ และเซลล์เชื้อเพลิง แสดงดังรูป 2.20

2.8.1 แบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด

แบตเตอรี่ชนิดนี้นับได้ว่าเป็นแบตเตอรี่ได้มีการใช้งานกันอย่างกว้างขวางไม่เฉพาะแต่ที่ใช้ในรถยนต์เท่านั้น แต่ได้มีการใช้งานกันในลักษณะที่แตกต่างกันเช่น ใช้แหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าสำรองให้กับห้องทดลอง หรือเป็นแหล่งพลังงานให้กับชุดสตาร์ทมอเตอร์ เป็นต้น

การจำแนกประเภทของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด

แบตเตอรี่ได้ถูกออกแบบมาหลากหลายประเภทเพื่อที่จะทำให้แบตเตอรี่สามารถทำงานได้ภายใต้เงื่อนไขต่าง ๆ ที่ถูกกำหนดไว้และทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด การที่จะเลือกใช้แบตเตอรี่ชนิดใดนั้น ควรที่จะพิจารณาถึงความเหมาะสม และลักษณะสมบัติต่าง ๆ กันของแบตเตอรี่ชนิดใดนั้น ซึ่งจะมีหลายสิ่งหลายอย่างที่ต้องคล้อยกันอยู่ เช่น อายุการใช้งานของแบตเตอรี่ แอตต์พุตสูงสุดต่อหน่วยน้ำหนัก หรือปริมาตร และสิ่งที่สำคัญที่สุดคือจะต้องมีค่าใช้จ่ายในขณะใช้งานต่ำ



รูปที่ 2.20 ย่านการจ่ายพลังงานสำหรับแบตเตอรี่ เซลล์เชื้อเพลิง และเครื่องยนต์ที่ให้ความร้อนชนิดต่างๆ

เราสามารถแบ่งประเภทของแบตเตอรี่ได้เป็น 2 ชนิดตามการใช้งานที่เหมาะสมซึ่งแบตเตอรี่ทำงานในสถานที่ซึ่งเปลี่ยนแปลงไปเรื่อยๆไม่ว่าจะถูกเคลื่อนย้ายโดยมือของมนุษย์หรือเป็นอุปกรณ์ส่วนหนึ่งของยานพาหนะ เรียกแบตเตอรี่ชนิดนี้ว่า แบตเตอรี่เคลื่อนที่ได้ (Portable Batteries) และอีกชนิดหนึ่งนั้นเป็นประเภทที่ตั้งอยู่ในสถานที่ที่เป็นหลักแหล่งแน่นอนและจะอยู่ต่อไปเช่นนั้นตลอดอายุการใช้งานแบตเตอรี่ ซึ่งเราเรียกแบตเตอรี่ชนิดนี้ว่า แบตเตอรี่ชนิดอยู่กับที่ (Stationary Batteries)

แบตเตอรี่ (Portable Batteries)

- แบตเตอรี่รถยนต์
- แบตเตอรี่รถลากจูง (Traction Batteries)
- แบตเตอรี่ที่ใช้ในเรือ
- แบตเตอรี่ที่ใช้ในรถไฟ
- แบตเตอรี่ที่ใช้เริ่มเดินเครื่องยนต์ดีเซล

- แบตเตอรี่ที่ใช้ในรถมอเตอร์ไซด์
- แบตเตอรี่ที่ใช้ในยานอวกาศ
- แบตเตอรี่ของวิทยุและโทรศัพท์มือถือ
- แบตเตอรี่ชนิดอยู่กับที่(Stationary Batteries)
- แบตเตอรี่ที่ใช้ในไฟฉุกเฉิน
- แบตเตอรี่ที่ใช้ในห้องทดลอง
- แบตเตอรี่ที่ใช้ในสถานที่ส่งจ่ายไฟฟ้ากำลัง
- แบตเตอรี่ที่ใช้ในการป้องกันไฟฟ้าไหม้ในระบบ
- แบตเตอรี่ในชุมสายโทรศัพท์

2.8.2 คุณสมบัติโดยทั่วไปของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด

ความจุที่มีอยู่ในเซลล์หรือแบตเตอรี่ สามารถแสดงได้เป็นแอมแปร์ชั่วโมง(Ampere-Hour) หรือวัตต์ชั่วโมง (Watt-Hour)

แบตเตอรี่ที่มีความจุ 100 Ah ที่ 10 ชม. หมายความว่า จะสามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าได้ 10 แอมป์ ภายในเวลา 10 ชม. แบตเตอรี่จะจ่ายพลังงานไฟฟ้าได้ต่ำกว่า 100 Ah ในขณะที่มีพิกัดของภาระต่ำกว่า 10 แอมป์ แบตเตอรี่จะจ่ายพลังงานได้มากกว่า 100 Ah

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติแอมแปร์ชั่วโมง (Ampere-hours) หรือวัตต์ชั่วโมง (Watt-Hour) ของแบตเตอรี่ชนิดต่างๆ

Type of Battery	Nominal capacity rating	Specified temperatures		Specified final c/cell
	hr	deg C	deg F	
Lead-acid				
Automotive	20	25	77	1.75
Traction	5	21	70	1.73
Train lighting	5	27	80	1.7
air-conditioning	10	15.6	60	1.8
Alkaline	5	20-27	68-80	1.1

ในการระบุความจุของแบตเตอรี่จำเป็นต้องกำหนดถึงพิกัดเวลาในการคายไฟ ความจุของแบตเตอรี่จะเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิและแรงดันไฟฟ้าสุดท้าย (Final Voltage) โดยค่าต่างๆเหล่านี้จะถูกกำหนดมาสำหรับแบตเตอรี่ 100 Ah ความจุของมันจะเกี่ยวเนื่องกับเวลา 10 ชม. ที่อุณหภูมิ 15.6 องศาเซลเซียสและมีแรงดันไฟฟ้าสุดท้ายเป็น 18.5 โวลต์ต่อเซลล์ เราสามารถเขียนได้เป็น 100 Ah/10 hr/1.85V.p.c/15.6C แพรกชั้นแบตเตอรี่ขนาดความจุ 100 Ah จะเกี่ยวเนื่องกับเวลา 5 ชม. 27 องศาเซลเซียสและแรงดันไฟฟ้าสุดท้ายเป็น 1.7 โวลต์ต่อเซลล์ (100 Ah/5 hr/1.7 V.p.c./27 C) ในตารางที่ 2.1 ซึ่งในแต่ละประเทศจะถูกกำหนดเป็นพื้นฐานสำหรับความจุ อุณหภูมิ และแรงดันไฟฟ้าสุดท้าย จะเปลี่ยนไปตามชนิดของแบตเตอรี่

ความจุวัตต์-ชั่วโมง (Watt-Hour Capacity)

เมื่อได้คายประจุที่พิกัดพื้นฐานที่แสดงไว้ตาราง แบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดจะมีแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นที่ 2.0 โวลต์ต่อเซลล์ และแบตเตอรี่ชนิดอัลคาไลท์จะมีแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นที่ 1.35 โวลต์ ค่าแรงดันไฟฟ้าในการคายประจุตลอดเวลาจะมีค่าเริ่มต้นไปจนถึงค่าสุดท้าย แรงดันไฟฟ้าสุดท้ายเป็นตัวแปรมาก ๆ ต่อแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย

เปอร์เซ็นต์และกราฟของเวลา

ความจุของแบตเตอรี่ ชนิดตะกั่วกรด เปลี่ยนแปลงไปกับพิกัดของการคายไฟ และความจุเท่าที่จะหาได้จากแบตเตอรี่ ค่าความของแอมแปร์-ชั่วโมง หรือวัตต์-ชั่วโมง เป็นค่าที่มีมากที่สุดในพิกัดการคายไฟด้วยกระแสต่ำสุด และมีค่าน้อยเมื่อมีพิกัดการคายไฟด้วยกระแส

ความสัมพันธ์ระหว่างความจุและเวลาในการคายไฟแสดงในภาพที่ 2.34 สำหรับแบตเตอรี่ชนิด แพรกชั้นและรถยนต์ จากการอ่านค่าจากกราฟนั้นมีความเป็นไปได้ในการประมาณค่าความจุในแต่ละชนิดของแบตเตอรี่ ที่ค่าต่างๆเปลี่ยนไปตามคายไฟ

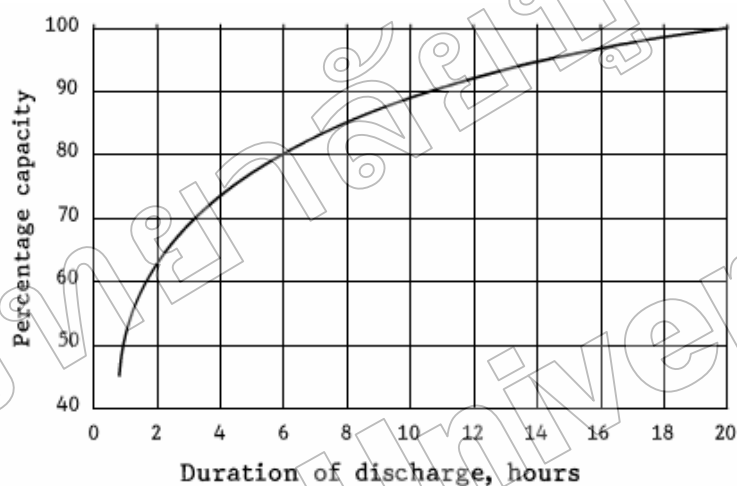
ตาราง 2.2 เปอร์เซ็นความจุแบตเตอรี่ชนิดต่างๆ

Capacity	Automotive	Traction
Nominal	100% (20hr)	100% (5hr)
10-hr	89%	111%
5-hr	78%	100%
3-hr	70%	89%

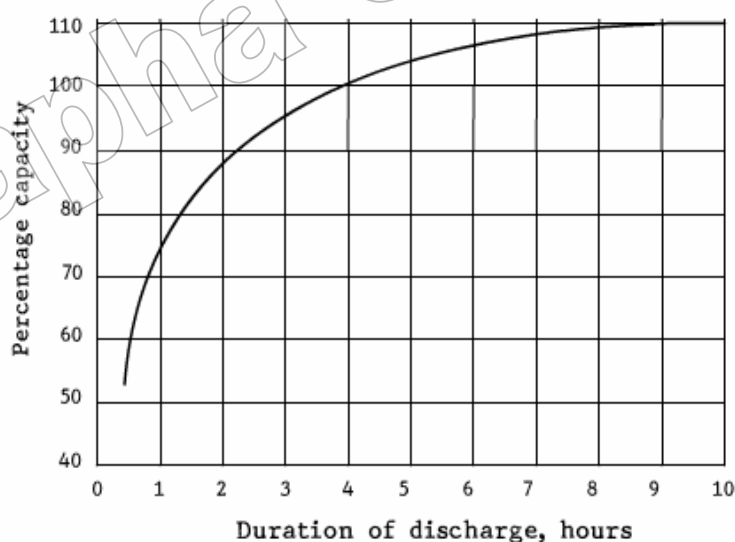
การลดลงของความจุที่การคายไฟด้วยกระแสสูง นั้นเป็นผลจากการสร้างตะกั่วซัลเฟตอย่างรวดเร็วบนที่พื้นผิวของแผ่นเพลท เกิดการกีดขวางรูของแผ่นเพลทกรดจะถูกหน่วงและกีดขวางชั้นสุดท้ายที่จะเข้าไปทำปฏิกิริยาซัลเฟต ที่ถูกสร้างอย่างรวดเร็วนี้จะไปเพิ่มความต้านทานภายในแบตเตอรี่ ส่งผลให้แรงดันที่ขั้วของแบตเตอรี่ลดลง

สำหรับพิกัดในการคายไฟอย่างช้าๆ การแพร่ของกรดไปยังรูต่างๆทำให้การทำปฏิกิริยาเป็นไปอย่างช้าๆทำให้ซัลเฟต ไม่เกาะที่พื้นผิวของแผ่นเพลทอย่างรวดเร็วเกินไป มีแผ่นปฏิกิริยาหลายอย่างที่ง่ายต่อการเปลี่ยนไปเป็นตะกั่วซัลเฟต แรงดันไฟฟ้าแบตเตอรี่จะมีค่าคงที่สำหรับงานที่มีคาบและความยาวมาก

อย่างไรก็ตามแบตเตอรี่สามารถคายไฟ ได้ที่กระแสสูงๆ ถึงจุดๆหนึ่งทำให้แรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่จะลดลงอย่างรวดเร็ว ต้องการทำให้ดวงจรแรงดันไฟฟ้าจะกลับมาที่ค่าเดิม และความสามารถในการจ่ายกระแสไฟฟ้ากับคืนมาซึ่งปรากฏการณ์เช่นนี้เรียกว่า ความจุกลับคืนมา (Recuperative Capacity)



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.21 ความจุแอมแปร์ชั่วโมงและกราฟของเวลา

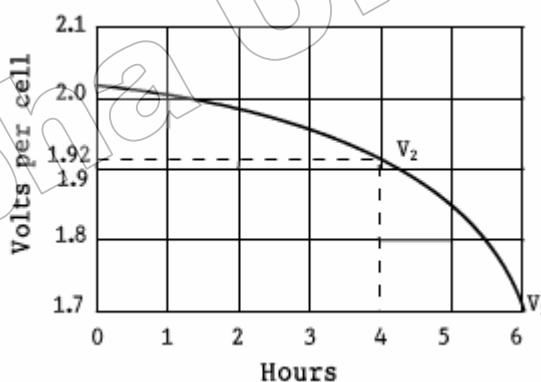
(ก) แบตเตอรี่รถยนต์ (ข) แบตเตอรี่ลากจูง

องค์ประกอบที่มีผลต่อความจุของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดมีหลายๆ องค์ประกอบแต่ที่สำคัญๆ มีดังนี้

- พิกัดของการคายประจุ
- แรงดันไฟฟ้าสุดท้ายที่ถูกจำกัดไว้
- อุณหภูมิของแบตเตอรี่
- จำนวนของแผ่นปฏิกิริยา
- การออกแบบและจำนวนของแผ่นเพลท
- ปริมาตรและคุณสมบัติความจำเพาะของอิเล็กโทรไลต์
- อายุของแบตเตอรี่

แรงดันไฟฟ้าสุดท้าย

ควรพิจารณาผลที่เกิดจากการคายประจุบนความจุเท่าที่หาได้ของแบตเตอรี่ ความจุนั้นจะสัมพันธ์กับแรงดันไฟฟ้าสุดท้ายที่ถูกจำกัดไว้ เมื่อแรงดันไฟฟ้าสุดท้ายมีค่าสูงขึ้น จะให้ความจุนั้นต่ำลง สามารถจำลองชนิดของการทำงานคือแบตเตอรี่ 24 เซลล์ สามารถจ่ายพลังงานต่ำที่สุดของจะทำงานได้ คือ 46 โวลต์หรือ 1.92 โวลต์ต่อเซลล์ กระแสไฟฟ้าจะสามารถเขียนได้จากการจ่ายภาระสูงสุดของแบตเตอรี่อาจจะเทียบเคียงจากพิกัด 6 ชม. ถึงแรงดันไฟฟ้าสุดท้ายมาตรฐานเป็น 1.71 โวลต์ต่อเซลล์แต่เมื่อแรงดันไฟฟ้าที่ทำงานพอจะยอมรับได้ว่า มีค่า 1.92 โวลต์ต่อเซลล์แบตเตอรี่จะสามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าได้เพียง 4 ชม. เท่านั้น



รูปที่ 2.22 ผลของแรงดันสุดท้ายต่อเอาต์พุตของเซลล์ เมื่อโหลดเท่ากับ 6 ชม. แรงดันสุดท้ายปกติเป็น V_1 กับแรงดันสุดท้ายเป็น V_2 ที่ 4 ชม.

แรงดันไฟฟ้าสุดท้าย จะถูกกำหนดเป็นส่วนๆ โดยอาศัยธรรมชาติของการทำงาน ซึ่งคุณสมบัติของแบตเตอรี่จะถูกกำหนด โดยคุณสมบัติแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ ภาระที่เป็นแสงสว่างจะทำให้แรงดันไฟฟ้ามีค่าที่สูงแต่ถ้าภาระในการเดินมอเตอร์ที่มีภาระหนักๆ จะเกิดความต้องการพลังงานที่ได้จากแบตเตอรี่ค่อนข้างมาก การใช้กระแสไฟฟ้าสูงๆ ที่แรงดันไฟฟ้าต่ำๆ ทำให้แรงดันไฟฟ้าสุดท้ายกว่า

อุณหภูมิปกติของแบตเตอรี่ทุกๆไป จะอยู่ระหว่าง 15.6 องศาเซลเซียสถึง 27 องศาเซลเซียส อุณหภูมิของแบตเตอรี่จะลดลงอย่างชั่วคราว ตามแรงดันไฟฟ้าในการคายประจุ และแรงดันไฟฟ้าจะกลับคืนถึงกับอุณหภูมิปกติเมื่อปราศจากการประจุเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ความจุมีค่าสูงขึ้นด้วย

อุณหภูมิจะส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาระหว่าง ความต้านทานของอิเล็กโทรดและวิสคอสซิตี (Viscosity) โดยปฏิกิริยาทั้งสองของอิเล็กโทรดจะเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิที่อุณหภูมิต่ำกว่า 0 องศาเซลเซียส การแพร่หรือการไหลเวียนของอิเล็กโทรดภายในรูของแผ่นปฏิกิริยา จะส่งผลให้วิสคอสซิตี (Viscosity) และความต้านทานลดลงความจุของแบตเตอรี่จะมีค่าสูงขึ้นที่อุณหภูมิสูงๆ

ในการเปลี่ยนแปลงความจุของแบตเตอรี่ก่อให้เกิดผลในวิสคอสซิตีและความต้านทานของอิเล็กโทรดอย่างเห็นได้ชัดที่พิกัดการดีสชาร์จสูงๆ

อุณหภูมิมาตรฐานสำหรับแบตเตอรี่ชนิดต่างๆ กันนั้นแสดงในตารางที่ 2.1

สเตชันนารีแบตเตอรี่	มีพิกัด 15.6 องศาเซลเซียส
พอร์ทเทเบิลแบตเตอรี่	มีพิกัด 21 องศาเซลเซียส
แทรกชั่นแบตเตอรี่	มีพิกัด 27 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิใช้งานโดยเฉลี่ยต่างๆไปประมาณได้จากชนิดของแบตเตอรี่ อุณหภูมิของแทรกชั่นแบตเตอรี่ จะมีค่าสูงสุด เพราะว่าแบตเตอรี่ชนิดนี้จะต้องใช้กับงานหนักๆ และทำงานสม่ำเสมอทั้งวัน โดยที่ทั้งการคายไฟและการประจุไฟอย่างสมบูรณ์

แบตเตอรี่รถยนต์ ขนาด 50 Ah ที่ 20 ซม. และ 25 องศาเซลเซียสจะสามารถให้ความจุ 38 Ah ที่ 0 องศาเซลเซียส ซึ่งเท่ากับว่าค่าความจุลดลง 0.96% ต่อองศาเซลเซียส

การลดลงของอุณหภูมิจะส่งผลให้องค์ประกอบที่ถูกต้องของอุณหภูมิ (Temperature Correction Factor) มีค่าเพิ่มขึ้น

แบตเตอรี่รถยนต์ที่เวลา 5 นาที มีค่าองค์ประกอบที่ถูกต้องของอุณหภูมิ (Temperature Correction Factor) เป็น 1.13 % ต่อองศาเซลเซียสนั้นหมายความว่า ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส แบตเตอรี่มีความจุ 50Ah จะสามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าได้ 168 แอมป์ ภายใน 5 นาที แต่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส จะสามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าได้ 115 แอมป์ที่เวลาเท่าเดิม

จำนวนของแผ่นปฏิกิริยา พลังงานไฟฟ้าที่ได้จากการปล่อยให้แบตเตอรี่คายไฟออกมาเกิดจากปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมีระหว่างอิเล็กโทรดไลต์และแผ่นปฏิกิริยา ของตะกั่วออกไซด์ตะกั่วที่เป็นโพลง ความจุของแบตเตอรี่ จะมีค่ามากขึ้น ถ้าจำนวนของแผ่นปฏิกิริยามีจำนวนมาก

ความสัมพันธ์ตามเหตุผลระหว่างน้ำหนักของแผ่นปฏิกิริยาพลังงานด้านแอตพุตในหน่วยของแอมแปร์ชั่วโมงที่เก็บสะสมไว้ สามารถคำนวณได้โดยอาศัยสูตรของฟาราเดย์ในเรื่องไฟฟ้าเคมี

ตามหลักการแล้วแผ่นปฏิกิริยาสำหรับ 1Ah ต้องประกอบด้วย ตะกั่วออกไซด์ 4.4 กรัม กับตะกั่ว 3.87 กรัม ในทางปฏิกิริยาจะออกแบบเพิ่มขึ้น 3 ถึง 5 เท่าจะขึ้นอยู่กับ ชนิดของเซลล์ความหนาแน่นและจำนวนของแผ่นเพลท

การออกแบบของเซลล์ การเพิ่มน้ำหนักของแผ่นปฏิกิริยา เพื่อให้เซลล์สามารถจ่ายกระแสได้สูง นั้นเป็นปัจจัยที่ทำให้โอเล็กโทรไลต์เข้าไปในแผ่นปฏิกิริยาจะเป็นผลสำเร็จนั้น จะต้องใช้แผ่นเพลทบางๆ จำนวนมากกับอัตราส่วนของน้ำหนักแผ่นปฏิกิริยากับกรดมีค่าสูง และต้องอาศัยการบำรุงรักษาแผ่นกริด ให้แข็งแรงเพียงพอ ที่จะเป็นตัวนำที่ดี และจำยึดเพื่อรับน้ำหนักของแผ่นปฏิกิริยาจะถูกกระจายไปยัง บางส่วนของแผ่นบางๆ ที่บรรจุในตัวจับยึดที่หนาแน่นหรือแข็งซึ่งผลที่ได้จะทำให้ความจุของเซลล์ลดต่ำลงแผ่นเพลทของแผ่นตัวทำปฏิกิริยาที่เป็นรูๆ จะสามารถผลิตเอาต์พุตได้มากกว่าแผ่นเพลทของแผ่น ทำปฏิกิริยาที่หนาแน่นและแข็งโดยดูจากรายละเอียดในการตีสารที่ค่าพิกัดสูงๆ การเพิ่มของขึ้นของ จำนวนคาร์บอนเล็กๆ เบอร์เลี่ยมซัลเฟต โครงสร้างอื่นๆ จะขยายผลของตัวจับยึดได้รวดเร็วขึ้นใน การเจาะแผ่นเพลทเป็นรูๆ สำหรับงานที่มีรอบของการทำงานคือมีการประจุและคายไฟอย่างสม่ำเสมอจะ ใช้แผ่นเพลทที่มีจำนวนรูค่อนข้างมากแต่จะทำให้การนำกระแสไฟฟ้ามีอายุการใช้งานสั้น เพราะแผ่น ปฏิกิริยาจะกร่อนก่อนกำหนด รูของแผ่นเพลทจะตันในระหว่างการคายไฟปกติเนื่องจากการก่อตัวของ ตะกั่วซัลเฟตเพราะว่าตะกั่วซัลเฟตจะเข้าไปอุดช่องหรือรูของปฏิกิริยาที่มีอยู่แล้ว อย่างไรก็ตาม ปฏิกิริยา ของซัลเฟตเกิดขึ้นอย่างมากมาเนื่องจากว่าเซลล์ได้ถูกการคายประจุที่มากเกินไปหรือการประจุ ที่ กระแสต่ำเกินไปบ่อยๆ หรือซัลเฟตได้ขยายตัวจนกลบรูของแผ่นเพลท สำหรับการคายไฟที่มีคาบเวลา ยาวนาน ถ้าไม่มีการรักษารูไหลของความจุในเซลล์หรือการชาร์จที่ผิดเงื่อนไขจะทำให้ความดันเกิดขึ้นที่ แผ่นปฏิกิริยา ซึ่งส่งผลให้เกิดขึ้นที่กริด หรือแผ่นเพลทสูญเสียการทำปฏิกิริยาไป

ความต้านทานภายใน เมื่อขั้วของเซลล์ที่มีการเก็บพลังงานไฟฟ้า ได้ถูกต่อเข้ากับ ความต้านทานภายนอกซึ่งมีค่า R โอห์ม ทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหล 1 แอมแปร์ ซึ่งเราวัดได้จากแอมมิเตอร์ โดย ทิศทางของกระแสจะไหลจากขั้วบวกไปยังแผ่นเพลทของขั้วลบโดยโอเล็กโทรไลต์ ความต้านทานรวม ทั้งหมด คือความต้านทานภายนอกบวกกับความต้านทานภายใน โดยคำนวณได้จากกฎของโอห์ม

$$I = \frac{E}{R_E + R_C}$$

โดยที่ E คือแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจรของเซลล์ R_E คือความต้านทานภายนอก และ R_C คือ ความต้านทานภายในของเซลล์

ความต้านทานภายในจะแปรผันไปตามอุณหภูมิ สถานะของการคายไฟการออกแบบของเซลล์ มันจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิต่ำลง ขอบเขตของการคายไฟการเพิ่มขึ้นของการประจุ ความต้านทานภายใน ของแบตเตอรี่จะมีค่าเมื่อความต้านทานภายในของวงจร ซึ่งจากสมการที่เขียนได้

$$E = IR_E + IR_C$$

เมื่อ R_E มีค่าสูง และ I ที่มีค่าต่ำเพราะฉะนั้นเราสามารถรู้ค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม IR_C ได้ ซึ่งมี คำน้อยมากเมื่อเทียบกับ IR_E เมื่อ I มีค่ามากๆ เช่น ในงานสตาร์ทหรืองานอื่นๆ ที่คล้ายกัน IR_C จะมีค่าสูง ประมาณ 0.1 โวลต์ หรือมากกว่า กระแสที่ไหลออกมามากมาย จะทำให้บางส่วนของพลังงานจะสูญเสีย ไปกับความร้อนภายใน ซึ่งเป็นไปตามกฎกับกระแสยกกำลังสอง ($I^2 R_C$)

เมื่อแบตเตอรี่หรือเซลล์มีจุดมุ่งหมายอย่างเห็นได้ชัด เพื่อจัดหากระแสไฟฟ้าโดยที่จะต้องพยายามรักษาความต้านทานภายในให้มีค่าต่ำๆ ซึ่งจะเป็นเช่นนี้ได้จะต้องออกแบบเซลล์ ซึ่งจะทำให้ผลของความต้านทานของ N เซลล์ ซึ่งค่าความต้านทาน R_p คือ R_p/N

บางครั้งเพื่อความสะดวก จึงมีการแสดงค่าความจุของเซลล์ในหน่วยของแอมแปร์ชั่วโมงต่อแผ่นเพลทขั้วบวก เซลล์ที่มี 9 แผ่นเพลท จะมีแผ่นเพลทขั้วบวก 4 แผ่น และแผ่นเพลทขั้วลบ 5 แผ่น สมมติว่า แผ่นเพลทขั้วบวกมีความจุ 10 แอมป์ชั่วโมงความจุของแบตเตอรี่หาได้จาก $4 \times 10 = 40 \text{ Ah}$ ซึ่งเหมือนกับแผ่นเพลทที่มีขนาดเท่ากันคือ ในหนึ่งเซลล์มี 21 แผ่นเพลท และมีแผ่นเพลทขั้วบวก 10 แผ่น เพราะฉะนั้นค่าความจุจะมีค่าเท่ากับ $10 \times 10 = 100 \text{ Ah}$

เช่นเดียวกันในการบอกค่าความต้านทานภายในซึ่งมีหน่วยเป็นโอห์มต่อแผ่นเพลทขั้วบวก ที่ความจุ 10 Ah จะมีค่าความต้านทาน 0.01 โอห์ม ซึ่งในจำนวน 9 แผ่นเพลท จะมีแผ่นเพลทขั้วบวกต่อขนาบกัน 4 แผ่นจึงมีค่าความต้านทานเท่ากับ $0.01/4$ หรือ 0.0025 โอห์ม

แบตเตอรี่ 6 เซลล์ 9 แผ่นเพลทมีค่าแรงดันทั่วไป 12 โวลต์ (6×2) มีความจุ 40 Ah มีค่าความต้านทานภายใน 6×0.0025 หรือ 0.015 โอห์ม ซึ่งมีค่าเท่ากับค่าความต้านทาน 6 เซลล์อนุกรมต่อกัน

ความต้านทานของแบตเตอรี่หาได้จาก ค่าความต้านทานภายในบวกกับค่าความต้านทานจุดต่อของแต่ละเซลล์ทั้ง 5 จุดต่อ ค่าความต้านทานของจุดต่อมีค่าประมาณเท่ากับหนึ่งในหกของค่าความต้านทานภายในของแบตเตอรี่ ความต้านทานของแบตเตอรี่จะมีค่าเป็น $0.015 + 0.0025 = 0.0175$ โอห์ม

ความต้านทานภายในจะมีค่าเพิ่มขึ้น ความต้านทานขณะคายไฟเต็มที่จะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น $2 \frac{1}{2}$ ถึง 3 เท่าของค่าในขณะที่มีการประจุเต็มที่

ความถ่วงจำเพาะของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดต่างๆ กันที่ 15.6 องศาเซลเซียส เป็นดังนี้

สเตชันนารีแบตเตอรี่ 1.210

พอร์ทเทเบิลแบตเตอรี่

ภูมิประเทศเมืองหนาว 1.270 – 1.285

ภูมิประเทศเมืองร้อน 1.230 – 1.250

ความถ่วงจำเพาะจะตกลงตามการคายไฟ และจะเพิ่มขึ้นตามการประจุไฟซึ่งจะมีค่าต่ำสุดเมื่อมีการคายไฟเต็มที่ และมีค่าสูงสุดเมื่อมีการประจุไฟเต็มที่

ความถ่วงจำเพาะจะเป็นตัวแสดงผลที่ดีมากของสถานะ ในการคายไฟของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดการตกลงของความถ่วงจำเพาะในขณะที่คายไฟจะเป็นปฏิกิริยาโดยตรงกับจำนวนแอมป์ชั่วโมงที่ถูกจ่ายไปโดยแบตเตอรี่ ความแตกต่างของความถ่วงจำเพาะของเซลล์ในระหว่างการคายไฟเต็มที่ จะเปลี่ยนไปตามจำนวนของอิเล็กโทรไลต์ในเซลล์ขอบเขตของความถ่วงจำเพาะของแบตเตอรี่ชนิดต่างๆ มีค่าประมาณดังนี้

สเตชันนารี 1.210 – (1.130 - 1.80)

รถยนต์ 1.280 – 1.110

แทรกซัน 1.280 – (1.120 – 1.150)

ค่าความผิดพลาดอาจจะเปลี่ยนไปได้ไม่เกิน 0.0300 สำหรับสเตชันนารีขนาดใหญ่ และไม่เกิน 0.170 หรือมากกว่าสำหรับพอร์ทเทเบิลเซลล์

ความถ่วงจำเพาะของอิเล็กโทรไลต์จะแปรไปตามแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจร หลังจากการประจุไฟฟงที่ประมาณ 12 ชม. และจะอยู่คงที่

ผลของค่าความถ่วงจำเพาะของอิเล็กโทรไลต์ ขณะเปิดวงจรเป็นไปตามภาพ 2.36 ในย่านของความถ่วงจำเพาะจาก 1.10-1.29 ค่าของแรงดันจะเพิ่มขึ้นโดยความชันคงที่โดยการเพิ่มค่าความถ่วงจำเพาะ

สเตชันนารีเซลล์จะทำงานที่ความถ่วงจำเพาะ 1.210 อิเล็กโทรไลต์จะมีแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจรเป็น 2.05 โวลต์ สำหรับแบตเตอรี่รถยนต์จะทำงานที่ความถ่วงจำเพาะ 1.280 อิเล็กโทรไลต์จะมีแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจรเป็น 2.12 โวลต์

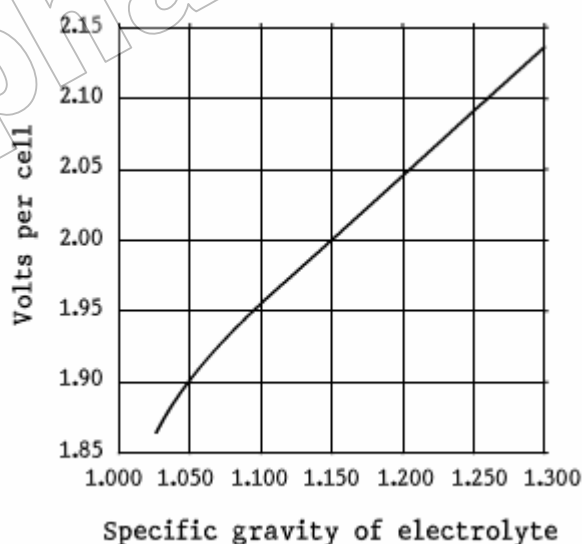
เราอาจจะหาค่าได้จากการประมาณดังนี้

$$\text{แรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจร} = \text{sp.gr} + 0.84$$

โดยทั่วไปนี้แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วจะหาได้จากจำนวนเซลล์คูณด้วยสอง

แรงดันไฟฟ้าของบางเซลล์จะมีค่าสูงกว่าปกติ เมื่อมีการประจุแต่เมื่อมีการคายไฟ แรงดันไฟฟ้าของเซลล์ก็จะลดลง สำหรับแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปจากการประจุหรือการคายไฟ จะแปรผันไปตามองค์ประกอบดังต่อไปนี้

1. กระแสไฟฟ้าที่ไหล
2. สถานะของการคายประจุ และการคายไฟ
3. อุณหภูมิของเซลล์
4. อายุของเซลล์

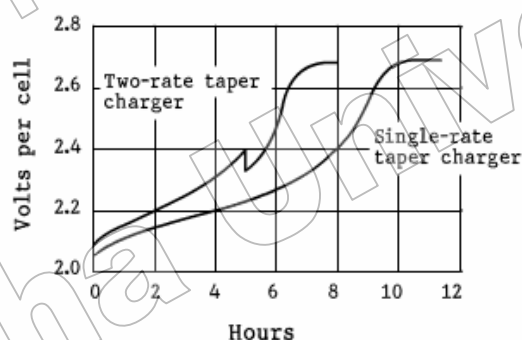


รูปที่ 2.23 การเปลี่ยนแปลงแรงดันขณะเปิดวงจรของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดกับค่าความถ่วงจำเพาะ

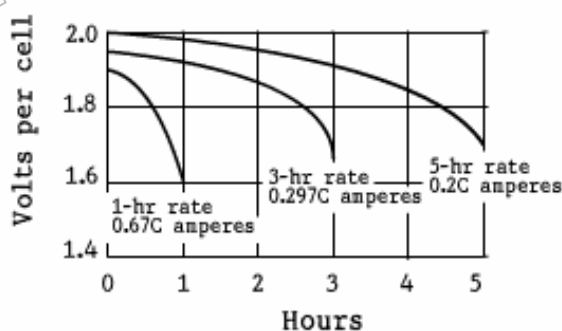
รูปร่างของกราฟการประจุและคายไฟเป็นไปตามภาพที่ 2.24 สำหรับแบตเตอรี่ตะกั่วกรดชนิดแทรกชั้นทำไมจะต้องเป็นแบตเตอรี่ชนิดนี้ ก็เพราะว่าแบตเตอรี่ชนิดนี้ จะผลิตไฟฟ้าสำหรับยานพาหนะที่ขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้าและบรรทุกในงานอุตสาหกรรม ภายในหนึ่งวันหรือวันถัดไปจะมีการคายไฟอย่างสมบูรณ์ สำหรับกราฟการประจุครั้งต่อไปในช่วงเวลา 8 ชม. หรือ 12 ชม. ซึ่งจะแปรผันตามเวลาที่เปลี่ยนไปแบตเตอรี่ชนิดต่างๆ ส่วนใหญ่จะเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าสำรองหรือแหล่งจ่ายไฟฉุกเฉิน ซึ่งจะไม่มีการขยายของการคายไฟขึ้นมากมาย และจะรักษาเวลาในการประจุส่วนใหญ่ไว้ โดยการใช้ทำงานต่อขนานกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ในระบบแบตเตอรี่จะต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่ใช้ในการประจุในช่วงเวลาที่กำหนดไว้ แรงดันไฟฟ้าจะถูกแบ่งเป็นหลายระดับโดยมีระดับแรงดันขณะเริ่มเกิดแก๊ส (Gassing) เป็นจุดอ้างอิง ซึ่งมีค่าประมาณ 2.30 – 2.40 โวลต์ต่อเซลล์และกระแสที่ไหลผ่านตัวแบตเตอรี่จะมีค่าค่อนข้างต่ำไปเรื่อยๆ เมื่อระดับแรงดันไฟฟ้า ของแบตเตอรี่ค่าสูงเกินกว่าระดับแรงดันเริ่มเกิดแก๊ส

แบตเตอรี่จะต้องได้รับการประจุถึงระดับแรงดันเริ่มเกิดแก๊ส หรือทำการประจุสมบูรณ์ โดยมีค่าความจุมากกว่า 10 % ของค่าความจุเพื่อใช้ไปในระหว่างการคายไฟฉุกเฉิน ลักษณะสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าขณะทำการประจุไฟแสดงได้คล้ายๆกัน ดังรูปที่ 2.24

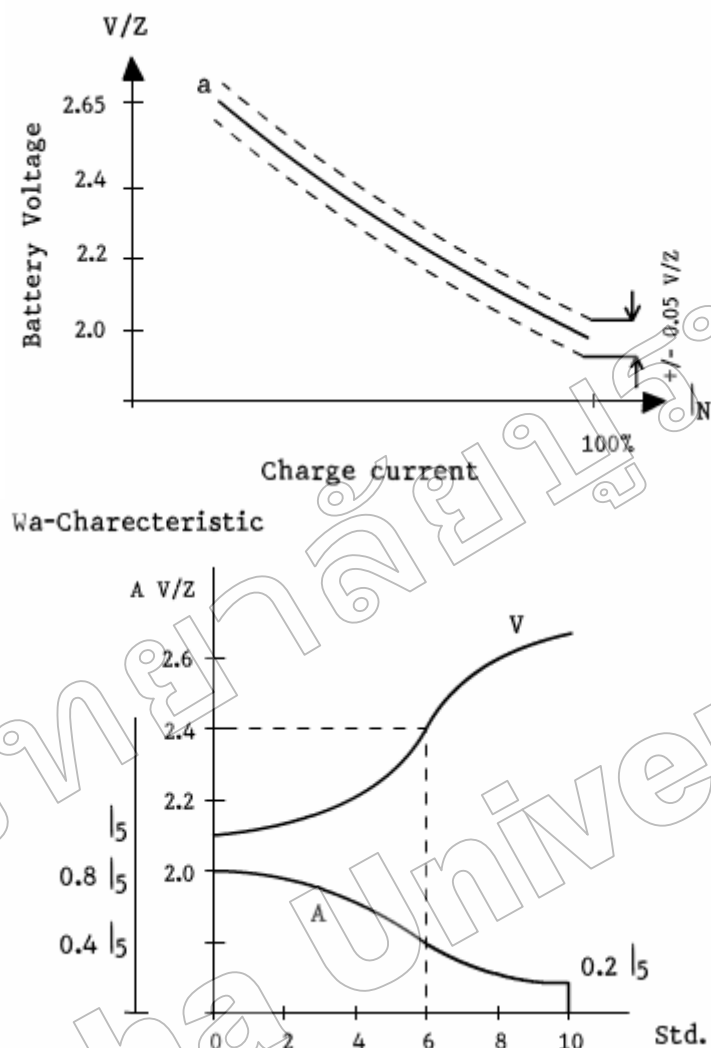


(ก)



(ข)

รูปที่ 2.24 ลักษณะความสัมพันธ์กับแรงดันไฟฟ้า กับเวลาขณะทำการประจุไฟและคายไฟ
(ก) การประจุไฟ (ข) การคายไฟ



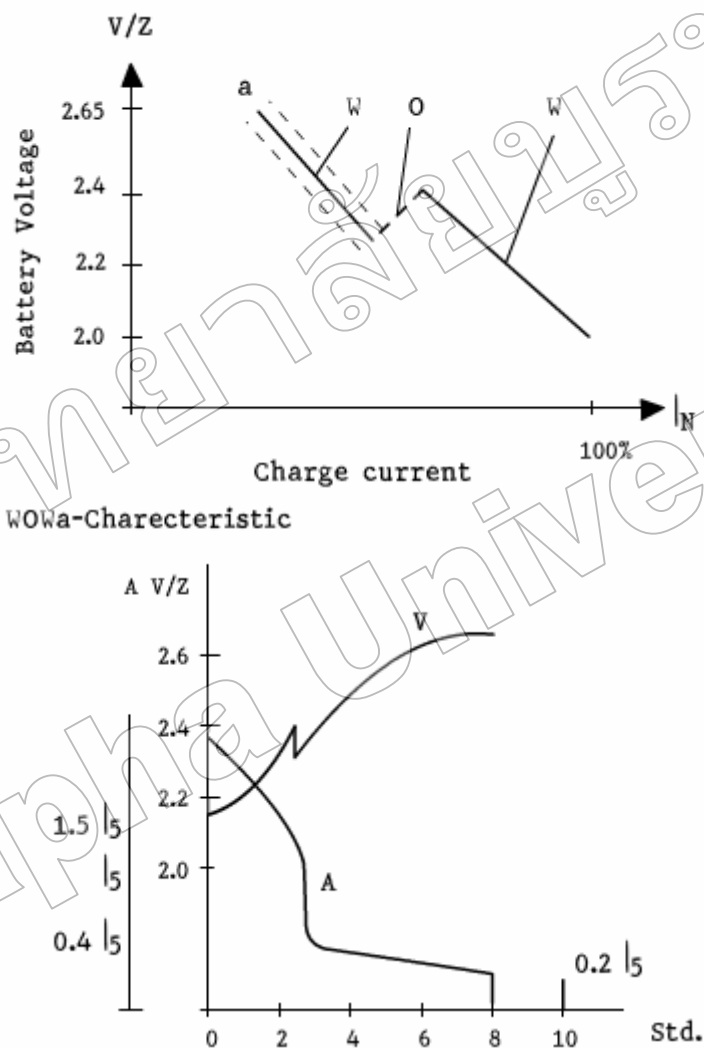
รูปที่ 2.25 ลักษณะสมบัติของเครื่องประจุไฟแบบ Wa characteristic และผลการประจุไฟ

แรงดันและพิกัดในการประจุไฟ

ในการประจุของเซลล์ปกติ หรือการประจุครั้งต่อไปของแบตเตอรี่จะถูกกำหนดโดยผู้ผลิตและสามารถบำรุงรักษาได้ตลอดที่มีการประจุไฟ เพราะว่าชาร์จ์ที่ได้รับการยอมรับที่พิกัดสูง กับแบตเตอรี่ที่ผ่านการคายไฟมาที่เป็นไปได้ที่จะต้องประจุอย่างปลอดภัยที่พิกัดติดต่อกัน 3-5 ครั้งสำหรับการประจุปกติ เมื่อให้พิกัดเริ่มต้นของการประจุมีค่าสูงจะลดลง เมื่อถึงจุดเริ่มเกิดแก๊ส แรงดันของเซลล์จะมีค่าประมาณ 2.35 โวลต์ และจะต้องมีการป้องกัน

2.8.3 วิธีการประจุไฟของแบตเตอรี่ตะกั่วกรด

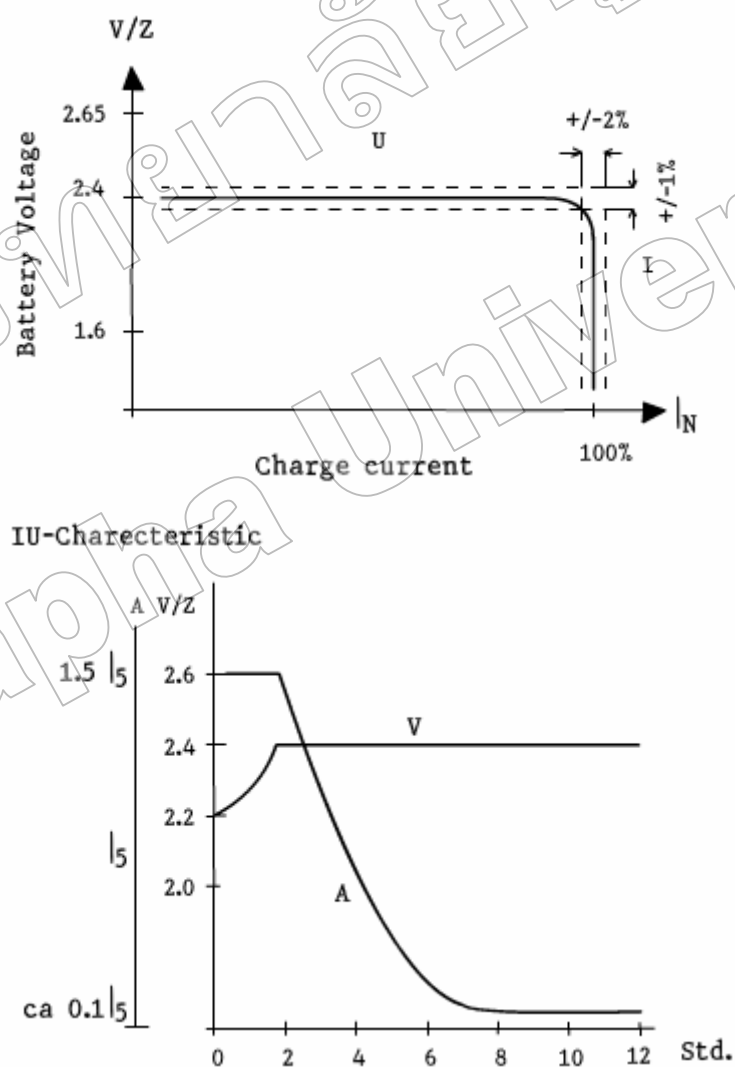
วิธีการประจุไฟที่เหมาะสมเป็นสิ่งสำคัญที่สุดที่จะทำให้อายุการใช้งานของแบตเตอรี่ได้ยาวนาน เครื่องประจุไฟรุ่นใหม่ ๆ จะใช้ระบบแหล่งจ่ายเป็นกระแสสลับ และจะมีการจัดเตรียมระบบป้องกันและ คล่องตัวในการควบคุมจะใช้ระบบอัตโนมัติให้มากที่สุด



รูปที่ 2.26 ลักษณะสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสของเครื่องประจุไฟแบบ WOWa-Characteristic และผลการประจุไฟให้กับแบตเตอรี่

ตารางที่ 2.3 ความจุที่ได้จากการประจุไฟฟ้าด้วยกระแสต่างกัน

Charging Current ratio Amperes/Ah capacity	Time to reach 2.4V per cell	State of charge at 2.4V per cell
per cent	hr	per cent
10	8	85
20	3.5	75
30	2	65
40	1.33	57



รูปที่ 2.27 ลักษณะสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสของเครื่องประจุไฟ
ระบบ IU- Characteristic และผลการประจุไฟให้กับแบตเตอรี่

จะเห็นได้ที่ระดับแรงดัน 2.4V/cell ถ้าทำการประจุไฟด้วยกระแสต่ำ สภาพะของการประจุจะมีถึง 85 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับกระแสสูงสุดเวลาสั้น สภาพะของการประจุมีแค่ 57 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งโดยปกติแล้วจะเลือกใช้กระแสประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์เวลาในการประจุประมาณ 8 ชม.หรือ มากกว่า

วิธีการประจุไฟฟ้าสามารถแบ่งตามมาตรฐานของยุโรปโดยมีสัญลักษณ์ต่อไปนี้

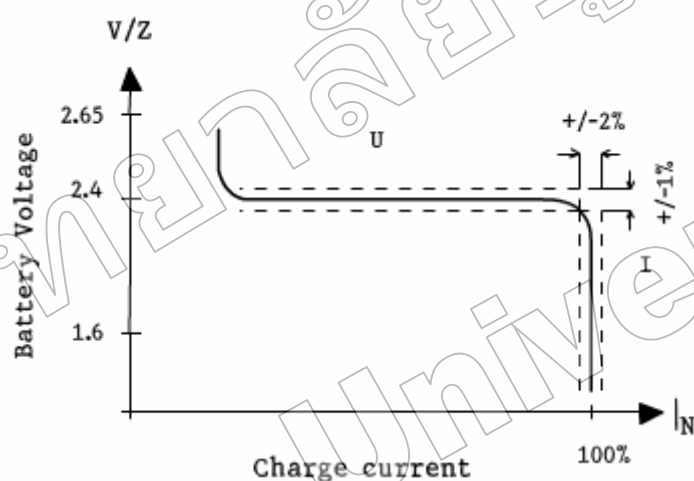
I = คุณลักษณะกระแสคงที่

U = คุณลักษณะแรงดันคงที่

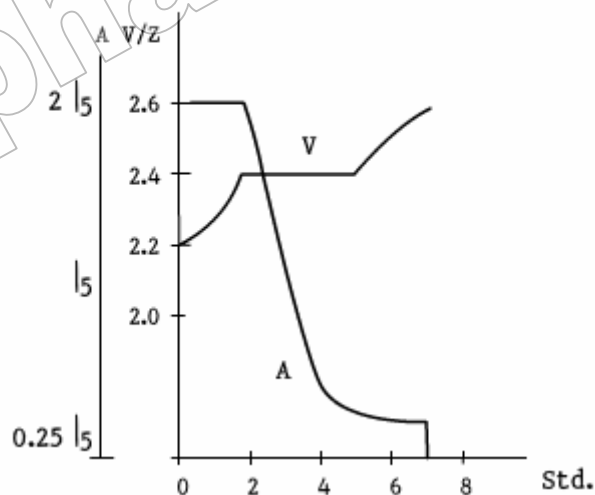
W = คุณลักษณะแบบตกลง

a = ตัดไฟอัตโนมัติ

o = ช่วงตัดไฟอัตโนมัติ



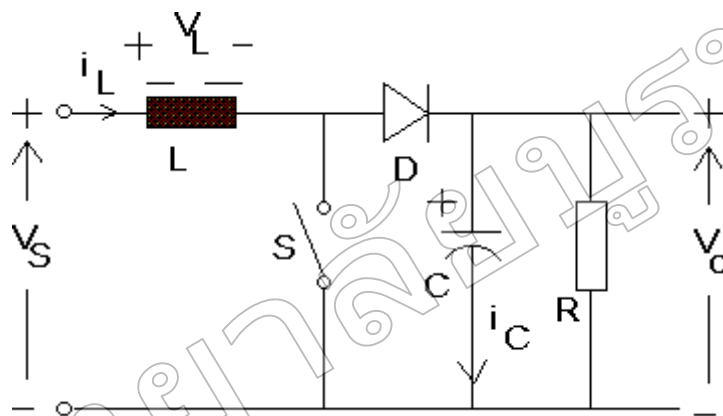
IUIa-Characteristic



รูปที่ 2.28 ลักษณะสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสของเครื่องประจุไฟระบบ IUIa- Characteristic และผลการประจุไฟให้กับแบตเตอรี่

2.9 วงจรทบทระดับแรงดันไฟฟ้า [2]

วงจรทบทระดับหรือวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์(Boost converter) คือวงจรที่ทำการเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าด้านออกให้สูงกว่าแรงดันไฟฟ้าด้านเข้า ที่เรียกว่าบูสต์คอนเวอร์เตอร์ก็เพราะแรงดันไฟฟ้าด้านออกสูงกว่าแรงดันไฟฟ้าด้านเข้านั่นเอง



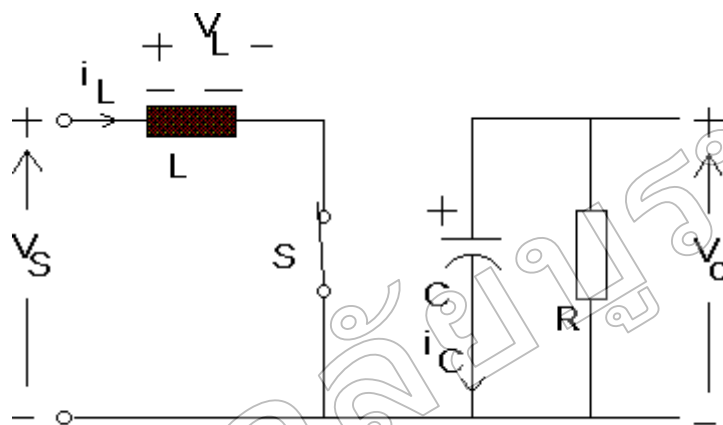
รูปที่ 2.29 วงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์

2.9.1 เงื่อนไขการทำงานของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์

- กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ ณ ตำแหน่งเดียวกันในแต่ละคาบ จะมีค่าเท่ากันและมีค่าเป็นบวกเสมอ
- แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำในแต่ละคาบจะเท่ากับศูนย์ หมายถึงผลรวมของผลคูณระหว่างแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำกับเวลาในแต่ละคาบเท่ากับศูนย์
- ตัวเก็บประจุมีขนาดใหญ่ทำให้แรงดันไฟฟ้าด้านออกมีค่าคงที่
- กำลังไฟฟ้าด้านเข้าเท่ากับด้านออก กรณีนี้ไม่คำนึงถึงการสูญเสียเนื่องจากการทำงานของวงจรโดยกำหนดอุปกรณ์ทุกตัวเป็นอุดมคติ ทำให้สามารถสรุปได้ว่าประสิทธิภาพของวงจรเป็น 100 %

2.9.2 หลักการทำงานของวงจรบูสต์อินเวอร์เตอร์

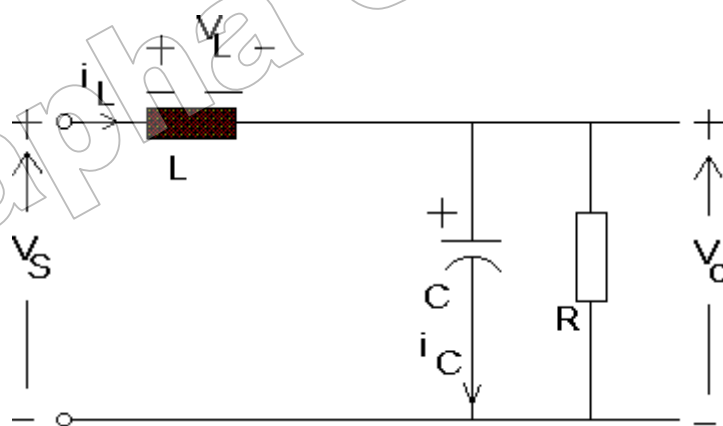
ขณะสวิตช์นำกระแส



รูปที่ 2.30 วงจรสมมูลเมื่อสวิตช์นำกระแส

จากรูป 2.29 กระแสไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงจะไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ โดยผ่านสวิตช์ ขณะเดียวกันไดโอดจะถูกไบแอสย้อนกลับทำให้ไม่สามารถนำกระแสได้ดังรูป 2.30

ขณะสวิตช์ไม่นำกระแส



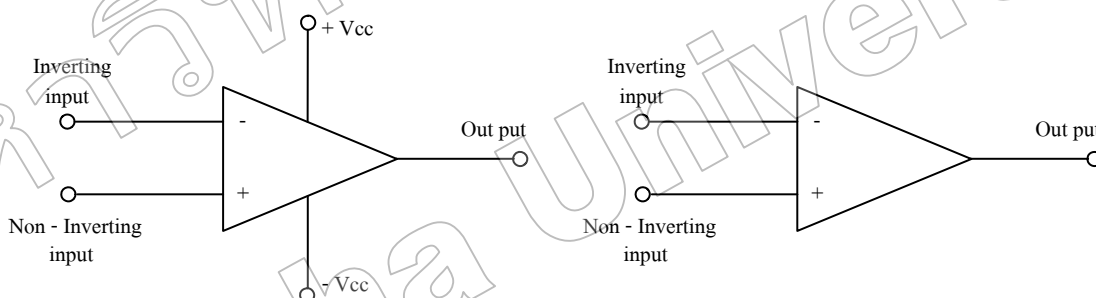
รูป 2.31 วงจรสมมูลเมื่อสวิตช์ไม่นำกระแส

เมื่อสวิตช์ไม่นำกระแส กระแสไฟฟ้าในตัวเหนี่ยวนำจะเปลี่ยนแปลงทันทีทันใดไม่ได้ ไดโอดจะถูกไบแอสไปหน้าให้นำกระแส ทำให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำอย่างต่อเนื่อง

2.10 ออปแอมป์ [3],[5]

2.10.1 คุณสมบัติของออปแอมป์

ออปแอมป์ (Op-Amp) เป็นชื่อย่อสำหรับเรียกวงจรขยายที่มาจาก Operating Amplifier เป็นวงจรขยายแบบต่อตรง (Direct coupled amplifier) ที่มีอัตราการขยายสูงมากใช้การป้อนกลับแบบลบไปควบคุมลักษณะการทำงาน ทำให้ผลการทำงานของวงจรไม่ขึ้นกับพารามิเตอร์ภายในของออปแอมป์ วงจรภายในประกอบด้วยวงจรขยายที่ต่ออนุกรมกัน ภาควิธีคือ วงจรขยายดิฟเฟอเรนเชียลด้านทางเข้า วงจรขยายดิฟเฟอเรนเชียลภาคที่สอง วงจรเลื่อนระดับและวงจรขยายกำลังด้านทางออก สัญลักษณ์ที่ใช้แทนออปแอมป์จะเป็นรูปสามเหลี่ยม ไอซ์ออปแอมป์เป็นไอซีที่แตกต่างไปจากลิเนียร์ไอซีต่างๆ ไปคือไอซ์ออปแอมป์มีขาอินพุต 2 ขา เรียกว่าขาเข้าไม่กลับเฟส (Non-Inverting Input) หรือ ขา + และขาเข้ากลับเฟส (Inverting Input) หรือขา - ส่วนทางด้านออกมีเพียงขาเดียว เมื่อสัญญาณป้อนเข้าขาไม่กลับเฟสสัญญาณทางด้านออกจะมีเฟสตรงกับทางด้านเข้า แต่ถ้าป้อนสัญญาณเข้าที่ขาเข้ากลับเฟส สัญญาณทางออกจะมีเฟสต่างไป 180 องศา จากสัญญาณทางด้านเข้า



รูปที่ 2.32 แสดงสัญลักษณ์ออปแอมป์

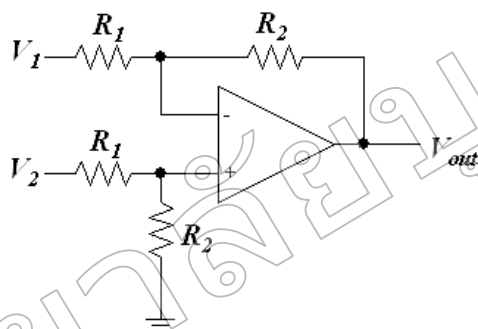
คุณสมบัติของออปแอมป์ในทางอุดมคติ

1. อัตราขยายมีค่าสูงมากเป็นอนันต์หรือ อินฟินิตี้ ($AV = \infty$)
2. อินพุตอิมพีแดนซ์มีค่าสูงมากเป็นอนันต์ ($Z_i = \infty$)
3. เอาท์พุตอิมพีแดนซ์มีค่าต่ำมากเท่ากับศูนย์ ($Z_o = 0$)
4. ความกว้างของแบนด์วิธ (Bandwidth) ในการขยายสูงมาก ($BW = \infty$)
5. สามารถขยายสัญญาณได้ทั้งสัญญาณ AC และ DC
6. การทำงานไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ

2.10.2 วงผลต่างแรงดัน

วงจรนี้จะขยายแรงดันไฟฟ้าที่แตกต่างกันระหว่าง V_2 และ V_1 ได้ดังนี้

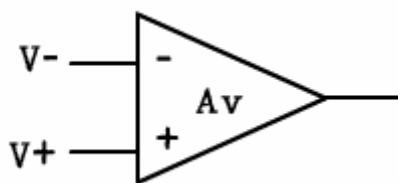
$$v_{out} = \frac{R_2}{R_1}(v_2 - v_1)$$



รูป 2.33 วงผลต่างแรงดัน

2.10.3 วงจรเปรียบเทียบแรงดัน

วงจรเปรียบเทียบแรงดัน (Voltage Comparator) ใช้โอปแอมป์เปรียบเทียบขนาดของสัญญาณอินพุต โดยเอาท์พุทจะแสดงให้เห็นว่าสัญญาณอินพุตใดมีขนาดมากกว่า



รูปที่ 2.34 วงจรเปรียบเทียบแรงดัน

จากคุณสมบัติของโอปแอมป์ในทางอุดมคติจะได้

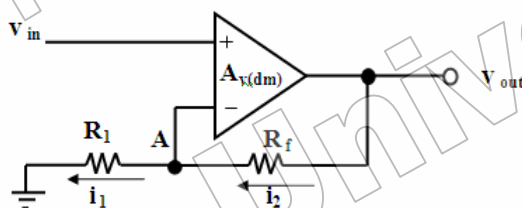
$$v_{out} = A_{v(dm)}(v^+ - v^-)$$

2.10.4 วงจรขยายแบบไม่กลับเฟส (Non-Inverting Amplifier)

วงจรขยายนี้เป็นวงจรขยายอีกแบบหนึ่งที่ต้องการเฟสในการขยายเป็นเฟสเดียวกัน ดังนั้นการป้อนสัญญาณอินพุตจึงต้องป้อนเข้าที่ขาอินพุตไม่กลับเฟส (+) ซึ่งเมื่อขยายออกที่เอาต์พุตแล้วจะได้สัญญาณเอาต์พุตที่มีเฟสเหมือนเดิม ดังนั้นในวงจรขยายแบบไม่กลับเฟสนี้การป้อนกลับเพื่อลดอัตราขยายจึงยังคงต้องป้อนไปยังขาอินเวอร์ตติ้ง (-) เพื่อให้เกิดการหักล้างของสัญญาณกันภายในตัวโอซีโอป-แอมป์ โดยสามารถหาอัตราขยายของวงจรได้จากสูตร

$$v_{out} = A_{v(dm)}(v^+ - v^-)$$

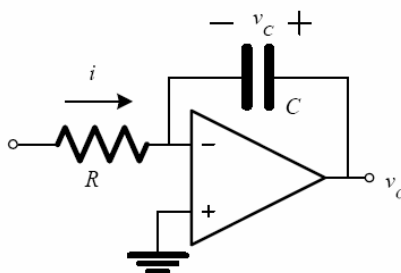
$$A'_v = \frac{A_{v(dm)}}{A_{v(dm)} \left(\frac{R_1}{R_1 + R_f} \right)} = 1 + \left(\frac{R_f}{R_1} \right)$$



รูปที่ 2.35 วงจรขยายออปแอมป์แบบไม่กลับเฟส

2.10.5 วงจรอินทิเกรตเตอร์ (Integrator)

วงจรอินทิเกรตเตอร์เป็นวงจรที่เอาต์พุตคือปฏิกวนพันธ์ (Integration) ของสัญญาณอินพุตเทียบกับเวลา



รูปที่ 2.36 วงจรอินทิเกรตเตอร์

จากวงจรรวมกระแสสูงสุดที่จุด A เท่ากับ

$$i_R = i_C$$

และเนื่องจาก

$$v^+ = v^- = 0$$

จะได้

$$i_R = \frac{V_{in}}{R} \quad \text{และ} \quad i_C = C \frac{d(-v_{out})}{dt}$$

ดังนั้น

$$\frac{v_{in}}{R} = -C \frac{dv_{out}}{dt}$$

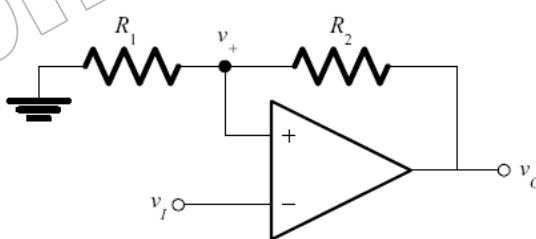
จะได้

$$v_{out} = -\frac{1}{RC} \int_0^t v_{in} dt$$

2.10.6 วงจรนอนอินเวอร์ตติ้งชmittทริกเกอร์ (Non inverting Schmitt Trigger)

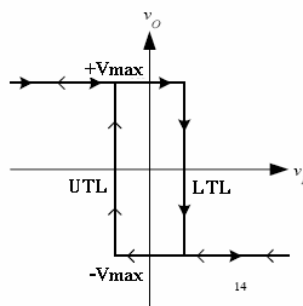
ฮิสเทอรีซิส(Hysteresis) เป็นปรากฏการณ์ที่เอาต์พุตของวงจรมีลักษณะแตกต่างกันเมื่อสัญญาณอินพุตมีการเปลี่ยนแปลงแตกต่างกัน โดยเมื่อสัญญาณอินพุตเพิ่มขึ้น เอาต์พุตเปลี่ยนแปลงในลักษณะหนึ่งและเมื่อสัญญาณอินพุตลดลง เอาต์พุตเปลี่ยนแปลงในอีกลักษณะหนึ่ง ตัวอย่างเช่นการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นแม่เหล็กในหม้อแปลง เป็นต้น

การประยุกต์ฮิสเทอรีซิสเพื่อเปรียบเทียบสัญญาณ จะทำให้มีจุดเปรียบเทียบจำนวน 2 จุด คือ Low Trigger Level (LTL) และ Upper Trigger Level (UTL) โดยขึ้นอยู่กับลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณอินพุต เรียกว่าวงจรนี้ว่า Schmitt Trigger โดยแบ่งตามลักษณะการทำงานได้ 2 แบบคือ Non inverting Schmitt Trigger และ inverting Schmitt Trigger



รูปที่ 2.37 วงจร Non inverting Schmitt-Trigger

โดยในโครงงานนี้ใช้ในแบบ Non inverting Schmitt Trigger จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอินพุตและเอาต์พุตที่เรียกว่า Hysteresis loop ดังรูปที่ 2.38



รูปที่ 2.38 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอินพุตและเอาต์พุต

จุด ULT และ LTL ของ Non inverting Schmitt Trigger กำหนดได้จากสมการ

$$UTL = \frac{R1}{R2} | +V_{max} |$$

$$LTL = \frac{R1}{R2} | -V_{max} |$$

โดยความแตกต่างระหว่างจุด LTL และ UTL เรียกว่าค่า Hysterisis นั่นคือ

$$Hysterisis = UTL - LTL$$

2.11 ไมโครคอนโทรลเลอร์ [4]

ไมโครคอนโทรลเลอร์ คือ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อย่างหนึ่ง ซึ่งภายในประกอบด้วยวงจรอื่นๆ หลายวงจรทำงานร่วมกัน เช่น หน่วยประมวลผลกลาง (Central Processing Unit : CPU) หน่วยคำนวณทางคณิตศาสตร์และลอจิก (Arithmetic Logic Unit : ALU) วงจรออสซิลเลเตอร์ (Oscillator) หน่วยความจำ (Memory : ROM, RAM) วงจรรับสัญญาณอินพุตและขับสัญญาณเอาต์พุต (I/O Port)

2.11.1 ข้อมูลพื้นฐานของไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC

PIC คือ ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูลหนึ่ง ย่อมาจากคำว่า "Peripheral Interface Controller" ซึ่งแนวความคิดของไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูลนี้คือ พยายามรวมเอาทุกอย่างไว้ภายในตัวไอซีไม่ว่าจะเป็น PROGRAM MEMORY, RAM, EEPROM, SERIAL, I2C, PWM, A/D ฯลฯ โดยไม่จำเป็นต้องต่ออุปกรณ์เสริมจากภายนอก ในตัวของไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC จะมีฟังก์ชันที่ใช้ในการประมวลผลรวมทั้งหน่วยความจำซึ่งทำให้เหมือนกับเป็นหน่วยประมวลผลกลาง (CPU)

2.11.2 ความเร็วของไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC

ภาคของความถี่สัญญาณนาฬิกาปัจจุบัน สามารถสร้างสัญญาณนาฬิกาได้ที่ 20 เมกะเฮิร์ตซ์ ซึ่งทำให้หนึ่งคำสั่งของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC ใช้เวลาเพียง 0.25 ไมโครวินาที หน่วยความจำของไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC ในอดีตหน่วยความจำของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC จะค่อนข้างน้อย คืออยู่ระหว่าง 512 words ถึง 4K words แต่ในปัจจุบัน บริษัท microchip ซึ่งเป็นเจ้าของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC ได้พัฒนาจนทำให้หน่วยความจำของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC มีขนาดเป็นหลายสิบกิโลไบต์ และมีที่คาดว่าจะขยายได้ใหญ่ขึ้นเรื่อยๆ ในเรื่องของขนาดของหน่วยความจำของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC จะนับไม่เหมือนปกติ โดยที่หนึ่งคำสั่งของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC จะมีขนาด 14 bits ดังนั้นจะเรียกว่า 1 word ของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC

2.11.3 สถาปัตยกรรมของไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC

มี 3 รุ่นหลัก ๆ คือขึ้นต้นด้วย 16xxx, 17xxx และล่าสุดคือ 18xxx และที่นิยมมากนั้นคือ รุ่นที่ขึ้นต้นด้วย 16xxx โดยหลักการออกแบบของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC ทุกรุ่นจะยึดถือการออกแบบที่รวมทุกอย่างไว้ภายใน chip ตัวเดียวโดยไม่ต้องต่ออุปกรณ์ใดๆ เพิ่มเติม ผลที่ตามมาก็คือแผ่นวงจรจะมีขนาดเล็ก และอุปกรณ์ที่ใช้จะไม่มาก ดังนั้นไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC จึงเหมาะสำหรับงานเล็กๆ ไม่ใช่งานใหญ่ๆ ที่ต้องใช้อุปกรณ์จำนวนมาก และหน่วยความจำเยอะๆ

2.12 ไอซี 555

ไอซีไทมเมอร์ 555 (Timer 555) มีโหมดการทำงาน 3 โหมดดังนี้

1. โมโนสเตเบิล (Monostable) ในโหมดนี้ การทำงานของไอซีไทมเมอร์ 555 จะเป็นแบบชิ่งเกิ้ลช็อตหรือวันช็อต (One Shot) โดยการสร้างสัญญาณครั้งเดียว
2. อะสเตเบิล (Astable) ในโหมดนี้ การทำงานจะเป็นออสซิลเลเตอร์
3. ไบสเตเบิล (Bistable) ในโหมดนี้ ไอซี 555 ทำงานเป็นฟลิปฟล็อป (flip-flop)

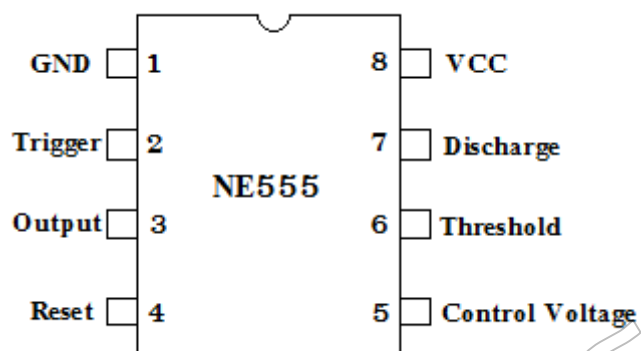
สำหรับโครงงานนี้ใช้โหมดการทำงานแบบอะสเตเบิล (Astable) ในการสร้างสัญญาณ PWM ที่มีความถี่คงที่และสามารถปรับความกว้างของสัญญาณได้โดยใช้ความต้านทานปรับค่าได้

โดยคาบเวลาของสัญญาณสามารถควบคุมได้ ตามสูตรดังนี้

$$\text{ช่วงเวลาชาร์จหรือเอาต์พุตสูง} \quad T_1 = 0.693(R_1 + R_2)C_1$$

$$\text{ช่วงเวลาดิชาร์จหรือเอาต์พุตต่ำ} \quad T_2 = 0.693(R_2 C_1)$$

$$\text{คาบเวลารวม} \quad T = T_1 + T_2 = 0.693(R_1 + 2R_2)C_1$$



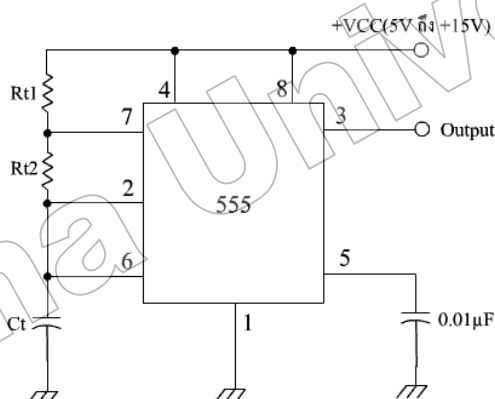
รูปที่ 2.39 pin connection ของไอซีไทมเมอร์ 555

ตั้งนั้นความถี่ที่ได้จึงมีค่า

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{(R_1 + 2R_2)C_1}$$

Duty cycle

$$D = \frac{R_2}{R_1 + 2R_2}$$



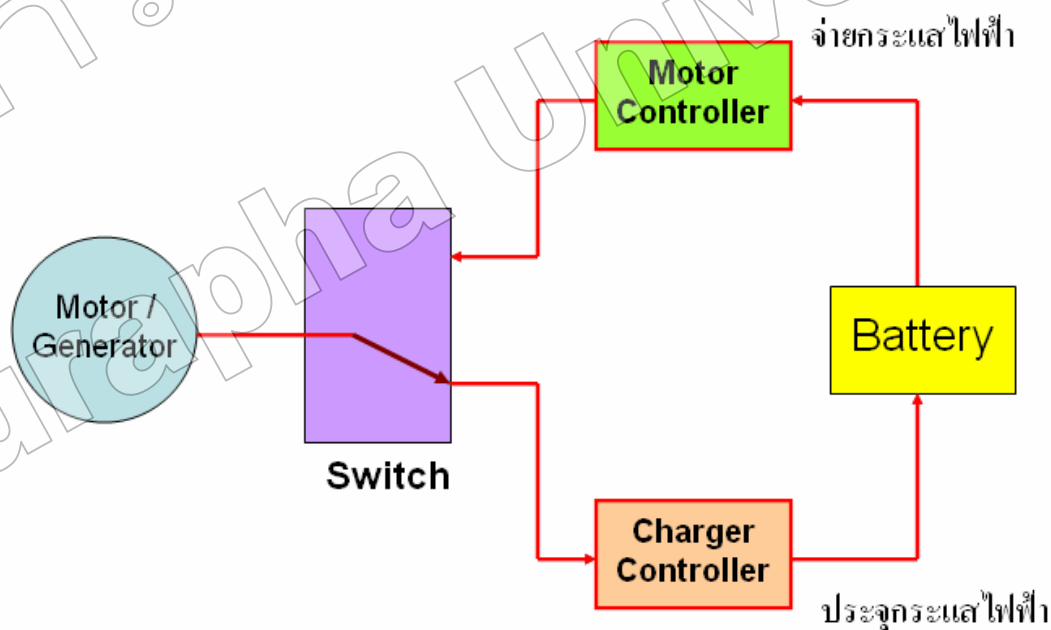
รูปที่ 2.40 วงจรอะอสเตเบิล

บทที่ 3

หลักการ แนวคิด และการออกแบบโครงงาน

ในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการ แนวคิด และการออกแบบวงจรควบคุมมอเตอร์ วงจรประจุแบตเตอรี่จากการปั่นด้วยเท้า และวงจรประจุแบตเตอรี่จากการเบรก รวมไปถึงวงจรแสดงผลแรงดันของแบตเตอรี่ สำหรับโครงงานนี้ใช้มอเตอร์ขนาด 250 W 24 V จำนวน 1 ตัว แบตเตอรี่ขนาด 12 V 7.5Ah จำนวน 2 ก้อน

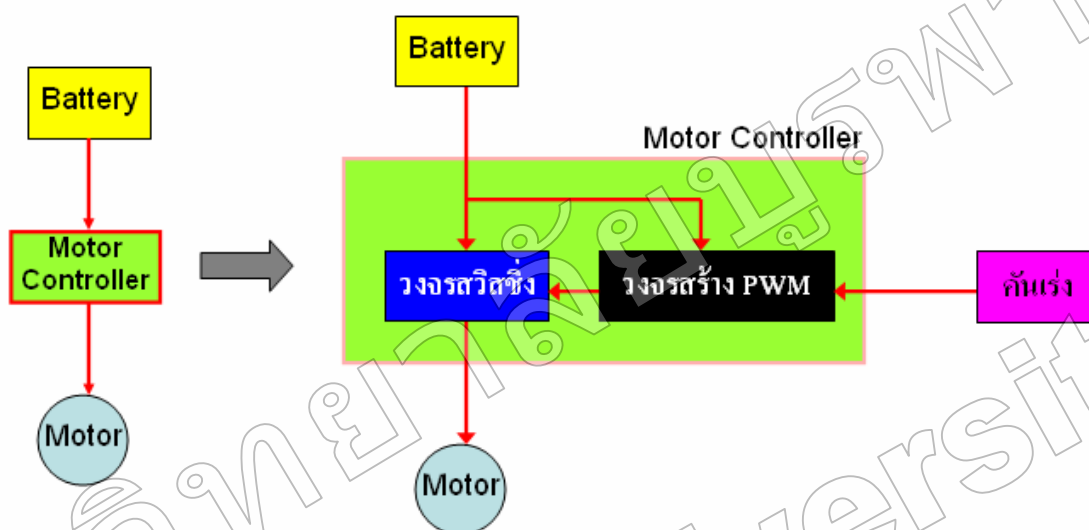
โครงงานนี้ ประกอบด้วยการทำงาน 2 ส่วนหลักๆ คือ ส่วนควบคุมมอเตอร์ (Motor Controller) ซึ่งจะควบคุมในส่วนของการจ่ายกระแสไฟฟ้าจากแบตเตอรี่เข้าสู่มอเตอร์ ซึ่งเป็นการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ ในวงจรส่วนนี้ จะทำให้ได้จักรยานขับเคลื่อนได้โดยพลังงานไฟฟ้า และส่วนควบคุมการชาร์จแบตเตอรี่ (Charger Controller) เมื่อมอเตอร์ทำหน้าที่เป็นเจนเนอเรเตอร์ (Generator) จะควบคุมในส่วนของการอัดประจุกระแสไฟฟ้าจากมอเตอร์ ขณะทำหน้าที่เป็นเจนเนอเรเตอร์ เข้าสู่แบตเตอรี่ โดยมีสวิตช์ (Switch) ทำหน้าที่เลือกรูปแบบการทำงาน



รูปที่ 3.1 แผนภาพแนวคิดการทำงานของจักรยานไฟฟ้าในโครงงาน

จากรูปที่ 3.1 Motor Controller คือส่วนควบคุมความเร็วของมอเตอร์ ซึ่งเป็นการควบคุมการจ่ายกระแสไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ให้กับมอเตอร์ ส่วน Charging Controller นั้น เป็นวงจรที่ควบคุมการ

3.1 การออกแบบวงจรควบคุมมอเตอร์



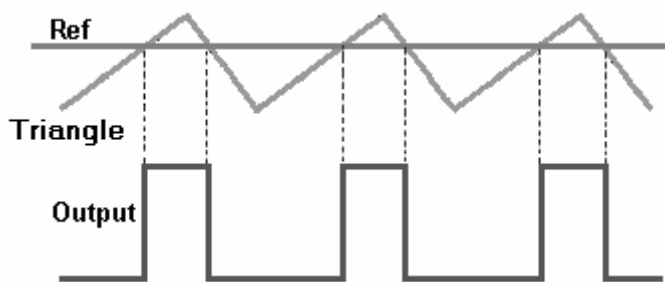
รูปที่ 3.2 แผนภาพวงจรควบคุมมอเตอร์

วงจรควบคุมมอเตอร์ จะแบ่งเป็นสองส่วนคือ ส่วนที่เป็นสวิตซ์ และส่วนที่สร้างสัญญาณ PWM หลักการออกแบบมีดังนี้

3.1.1 วงจรควบคุมมอเตอร์แบบ PWM (Pulse Width Modulation)

จากการศึกษาการควบคุมมอเตอร์โดยใช้ PWM มีหลักการดังนี้

PWM คือสัญญาณคลื่นที่มีความถี่คงที่ แต่ช่วงเวลา on – off หรือ Duty Cycle ไม่เท่ากัน และการควบคุมได้จากการปรับช่วง Duty Cycle ดังกล่าว ให้มากหรือน้อยตามต้องการ สัญญาณที่ได้ จะนำไปควบคุมอุปกรณ์ขับเคลื่อนมอเตอร์แบบสวิตซ์ ซึ่งเป็นมอเตอร์เฟดกำลัง

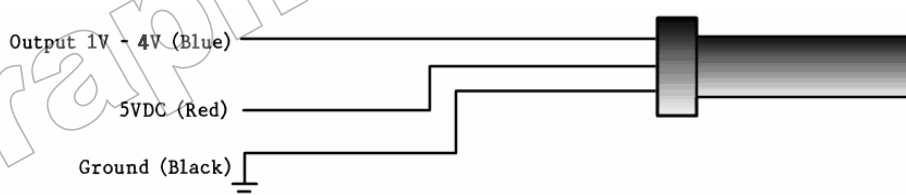


รูปที่ 3.3 สัญญาณอ้างอิง (Ref) สัญญาณรูปสามเหลี่ยม (Triangle) เปรียบเทียบ (Comparator) กัน ได้สัญญาณ Output

สัญญาณ Output เป็น PWM ได้จากการเปรียบเทียบสัญญาณสองชนิดคือ สัญญาณรูปสามเหลี่ยม (Triangle) และสัญญาณอ้างอิงที่เป็นเส้นตรง (Ref) ดังรูปที่ 3.3

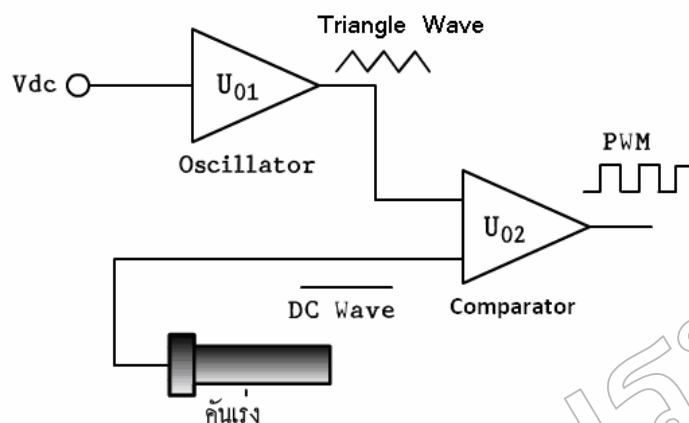
สัญญาณรูปสามเหลี่ยมนั้น จะมีแอมพลิจูดและความถี่คงที่ ส่วนสัญญาณอ้างอิง (Ref) นั้นเป็นสัญญาณเส้นตรงที่สามารถปรับแอมพลิจูดได้ สัญญาณนี้เปรียบเหมือนสัญญาณจากคันเร่ง เมื่อเราบิดคันเร่งขึ้น-ลง แอมพลิจูดของสัญญาณ Ref นี้ ก็จะเปลี่ยนตามการบิดคันเร่ง สัญญาณทั้งสองชนิดเมื่อนำมาเปรียบเทียบกันแล้วจะได้สัญญาณ Output เป็น PWM ที่สามารถเปลี่ยน Duty Cycle ได้จากการเปลี่ยนแอมพลิจูดของสัญญาณ Ref

คันเร่งสำเร็จรูปที่ใช้เป็นแบบที่ใช้เซ็นเซอร์แบบฮอลล์เอฟเฟกต์ (Hall Effect) มีสายไฟสามสาย สายสีแดงเป็นไฟเลี้ยงขั้วบวก สายสีดำเป็นกราวด์ และสายสีน้ำเงินคือสายสัญญาณ Output คุณสมบัติของคันเร่งคือ จ่ายแรงดัน 5VDC เป็นไฟเลี้ยง เมื่อบิดจากจุดเริ่มต้นไปจนสุด แรงดันไฟ Output จะเพิ่มขึ้นจาก 1V เป็น 4V



รูปที่ 3.4 รูปวาดคันเร่งที่ใช้ในโครงการ

อุปกรณ์ที่สามารถกำเนิดและเปรียบเทียบสัญญาณที่นิยมใช้กันคือออปแอมป์ (OP-AMP; Operating Amplifier) ดังนั้นวงจรที่ออกแบบจะใช้ออปแอมป์ โดยมีแนวคิดดังนี้



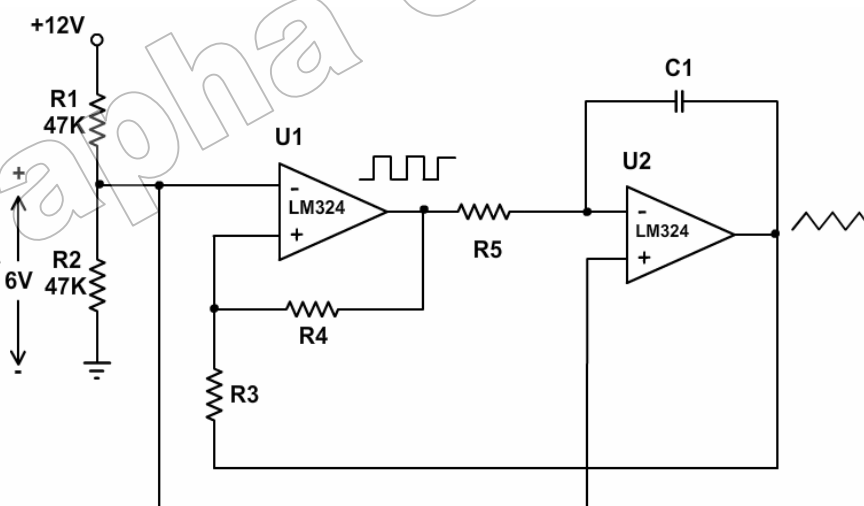
รูปที่ 3.5 การออกแบบวงจรกำเนิดสัญญาณ PWM

U_{01} เป็นออปแอมป์ที่ทำหน้าที่กำเนิดสัญญาณรูปสามเหลี่ยม U_{02} เป็นออปแอมป์ที่เปรียบเทียบแรงดันระหว่างสัญญาณเส้นตรงจากคั่นแรง กับสัญญาณรูปสี่เหลี่ยม

ออปแอมป์ที่จะใช้ให้เป็นเบอร์ LM324 เพราะหาง่ายและใช้ได้กว้างขวาง มีคุณสมบัติตาม Data Sheet ของบริษัทผู้ผลิต

การต่อออปแอมป์ให้ได้ตามแบบที่ออกแบบไว้มีวิธีการดังนี้

3.1.1.1 วงจรกำเนิดสัญญาณรูปสี่เหลี่ยม



รูปที่ 3.6 วงจรกำเนิดสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมโดย LM324

โดยปกติ ออปแอมป์จะใช้ไฟเลี้ยงคู่ เพราะแอมพลิฟายเออร์ของคลีนมีทั้งช่วงบวกและช่วงลบ แต่วงจรนี้ใช้ไฟเลี้ยงเดี่ยวจากแบตเตอรี่ 12 V จึงต้องปรับที่แรงดันอ้างอิง จากปกติ 0V ปรับให้เป็นครึ่งหนึ่งของ 12 V นั่นคือ 6 V

จากรูป 3.6 แรงดันอ้างอิงของออปแอมป์ทั้งสองคือ 6V ซึ่งได้จากการต่อตัวต้านทานแบบอนุกรมกันเพื่อแบ่งแรงดัน โดยใช้งานกับออปแอมป์ทั้งสองตัว ในการคำนวณ ที่จุด 6V ให้เปรียบเสมือนเป็น 0V

กำหนดความถี่และแอมพลิฟายเออร์ในการสวิตช์ แล้วเลือกค่าตัวต้านทานและตัวเก็บประจุมาใส่ กำหนดให้ความถี่เป็น 3 kHz (ทดลองโดยใช้ความถี่ต่างๆในการขับมอเตอร์ ความถี่ช่วงนี้เสียงเจียบที่สุด)

$$\text{ความถี่ของสัญญาณคือ } f = \frac{1}{4R_5C_1} \left(\frac{R_4}{R_3} \right)$$

เลือก C_1 ค่ามาตรฐาน 10nF R_4 ค่ามาตรฐาน 100k Ω และ R_3 ค่ามาตรฐาน 100k Ω คำนวณหาค่า R_5

$$\text{จากสมการ } R_5 = \frac{1}{4fC_1} \left(\frac{R_4}{R_3} \right)$$

$$R_5 = \frac{1}{4 \times 3k \times 10n} \left(\frac{100k}{56k} \right)$$

$$\text{ดังนั้น } R_5 = 14.88k\Omega$$

เลือก R_5 ค่ามาตรฐานคือ 15 k Ω

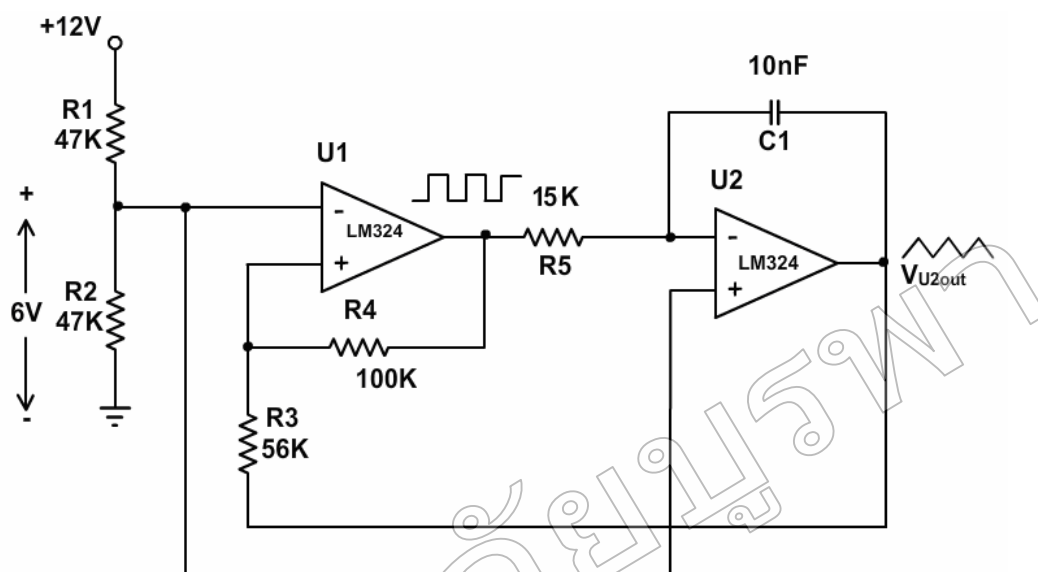
$$\text{แอมพลิฟายเออร์ของสัญญาณรูปสามเหลี่ยมคือ } V_{U2(out)} = \left(\frac{R_3}{R_4} \right) (\pm V_{U1(out)})$$

เมื่อแรงดันสูงสุดของสัญญาณรูปสี่เหลี่ยม $V_{U1(out)} = \pm 6V$ (เทียบกับแรงดันอ้างอิงคือ 6V)

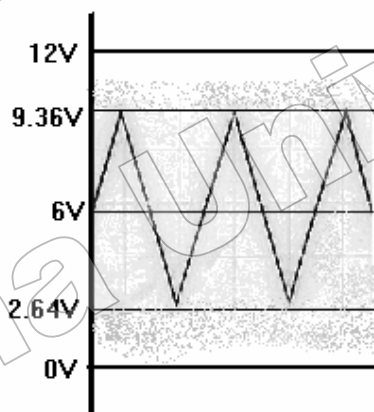
$$\text{เพราะฉะนั้น } V_{U2(out)} = \left(\frac{56k}{100k} \right) (\pm 6)$$

$$V_{U2(out)} = 3.36V$$

แรงดันเมื่อเทียบกับกราวด์คือ $6 - 3.36 = 2.64V$ และ $6 + 3.36 = 9.36V$



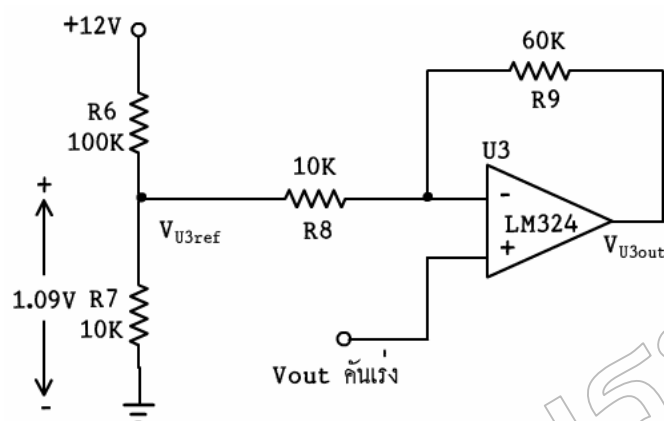
รูปที่ 3.7 วงจรกำเนิดสัญญาณรูปสามเหลี่ยมพร้อมค่าพารามิเตอร์ต่างๆ



รูปที่ 3.8 สัญญาณรูปสามเหลี่ยมที่ได้จากวงจร

3.1.1.2 วงจรขยายสัญญาณจากคันเร่ง

เนื่องจากคันเร่งให้สัญญาณเส้นตรงออกมา 1V ถึง 4V จะนำมาเป็นสัญญาณอ้างอิง (Ref) กับสัญญาณรูปสามเหลี่ยมซึ่งมีระดับแรงดันต่ำสุด 2.64V สูงสุด 9.36 V ดังรูป 3.8 ต้องปรับสัญญาณจากคันเร่งตั้งแต่แรงดันน้อยกว่า 2.64V ถึงมากกว่า 9.36 V ให้ได้ก่อน จึงจะทำการเปรียบเทียบแรงดันให้เป็นสัญญาณ PWM ต่อไป



รูปที่ 3.9 วงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส

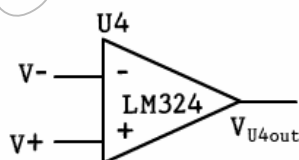
แรงดันเอาต์พุต $V_{U3out} = \left(1 + \frac{R9}{R8 + R7}\right) |V_{out} \text{ คั่นแรง} - V_{U3ref}|$

$V_{out} \text{ คั่นแรง} \text{ ต่ำสุด} = 1V$ $V_{U3out} = \left(1 + \frac{60K}{10K + 10K}\right) |1 - 1.09| = 0.36V$

$V_{out} \text{ คั่นแรง} \text{ สูงสุด} = 4V$ $V_{U3out} = \left(1 + \frac{60K}{10K + 10K}\right) |4 - 1.09| = 11.64V$

ดังนั้น V_{U3out} จะได้สัญญาณระหว่าง 0.36V ถึง 11.64V ซึ่งสามารถนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณรูปฟันเลื่อยได้

3.1.1.3 วงจรเปรียบเทียบแรงดัน



รูปที่ 3.10 วงจรเปรียบเทียบแรงดัน

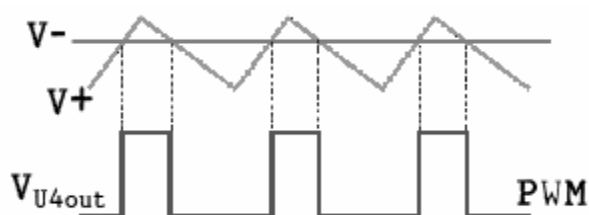
จากรูป 3.10 $V_{U4out} = A_v (V^+ - V^-)$

เมื่อ A_v เป็นอัตราขยายสัญญาณของ U4

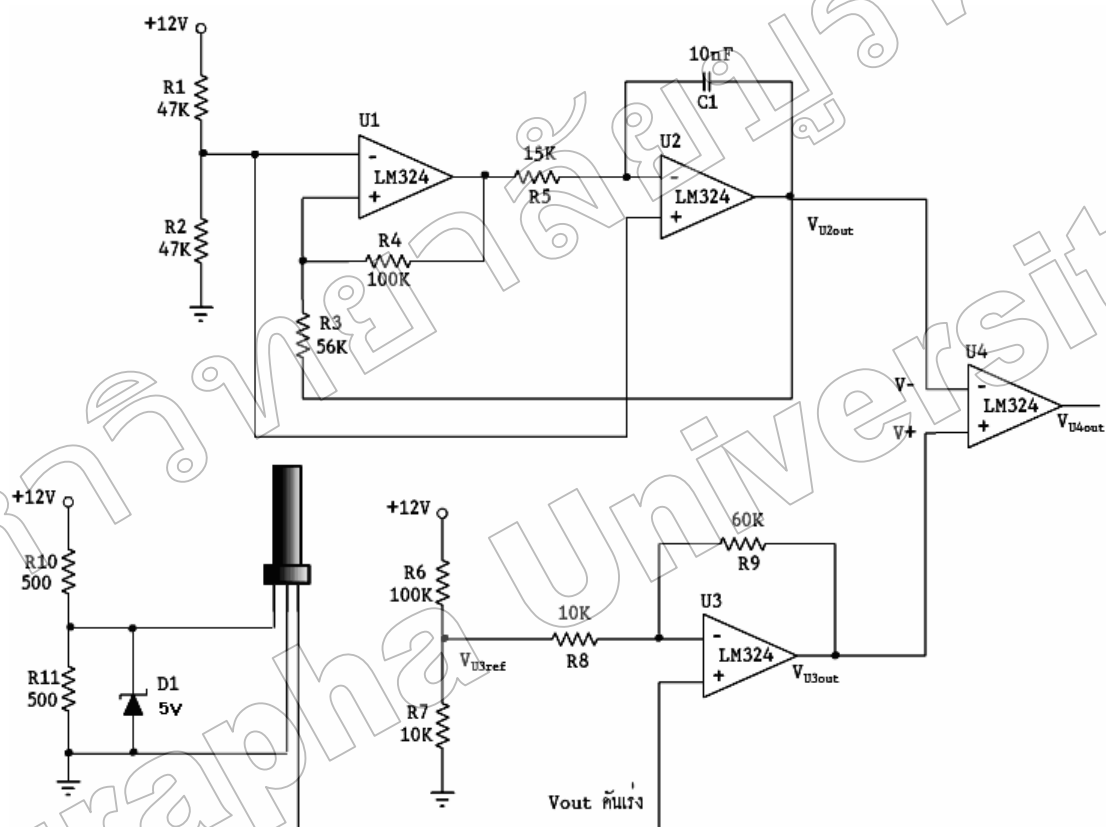
V^- คือสัญญาณ V_{U3out} ที่ได้จากการขยายสัญญาณของคั่นแรง

V^+ คือสัญญาณ V_{U2out} ที่เป็นสัญญาณรูปรูปสี่เหลี่ยม

จากรูป 3.12 จ่ายไฟเลี้ยงให้คั่นแรง ด้วยการต่อตัวต้านทาน R10 และ R11 ขนานกันเพื่อแบ่งแรงดัน และต่อ ซีเนอร์ไดโอด D1 ทำหน้าที่รักษาระดับแรงดันให้คงที่ในระดับประมาณ 5V



รูปที่ 3.11 สัญญาณของวงจรเปรียบเทียบแรงดัน



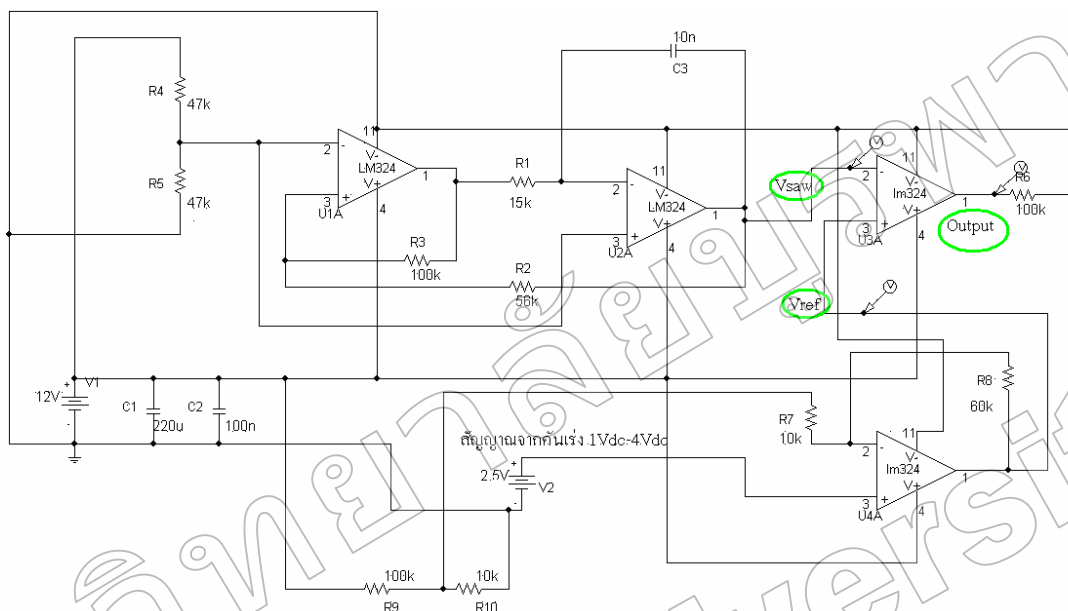
รูปที่ 3.12 วงจรกำเนิดสัญญาณ PWM ควบคุมด้วยคันเร่งไฟฟ้า

U1 และ U2 เป็นวงจรกำเนิดสัญญาณรูปสามเหลี่ยม เอาท์พุทของ U2 นำมาป้อนเข้าขั้วลบของ U4 เพื่อเปรียบเทียบแรงดัน

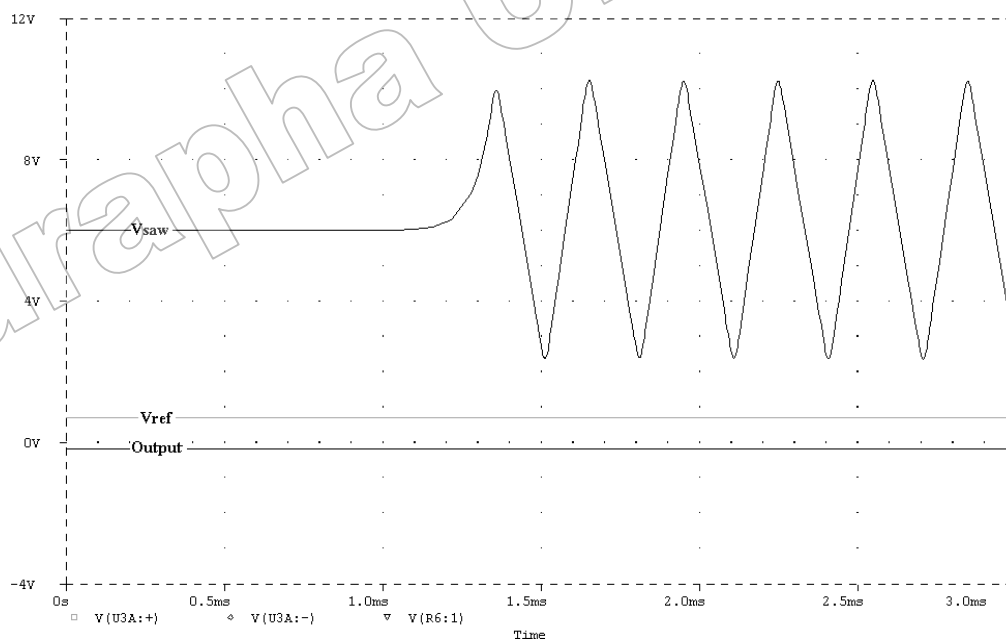
U3 เป็นออปแอมป์ที่ทำหน้าที่ขยายสัญญาณของคั่นแรงที่บิตได้ 1V - 4V เป็น 0.36V- 11.64V เพื่อนำสัญญาณที่ขยายแอมพลิจูดแล้วนี้ เข้าสู่ขั้วบวกของ U4 ซึ่งเป็นวงจรเปรียบเทียบความต่างของแรงดัน ได้เอาท์พุทเป็นสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมซึ่งสามารถปรับ Duty Cycle จากการบิตคั่นแรงได้ เรียกสัญญาณที่ได้ว่า PWM (Pulse Width Modulation)

3.1.1.4 ทดสอบวงจรโดยการจำลองวงจร

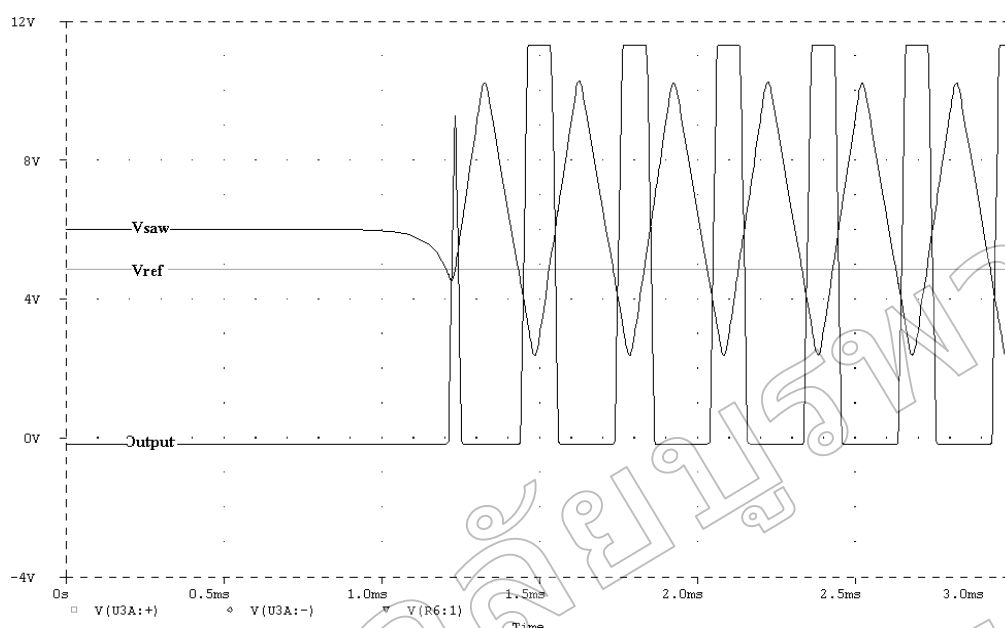
ทดลองโดยการจำลองวงจรดังนี้



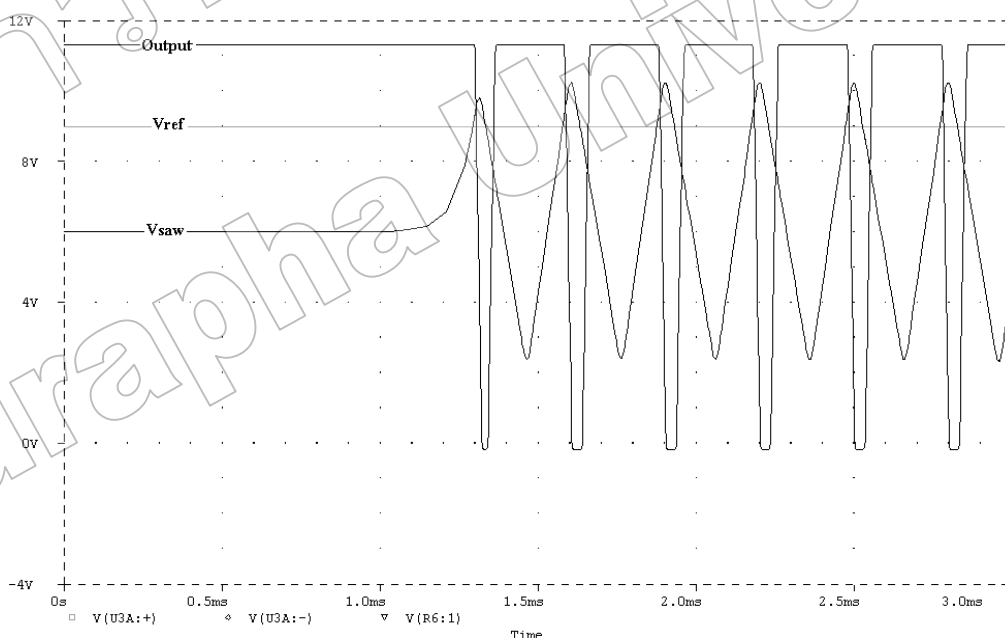
รูปที่ 3.13 วงจรควบคุมมอเตอร์แบบ PWM



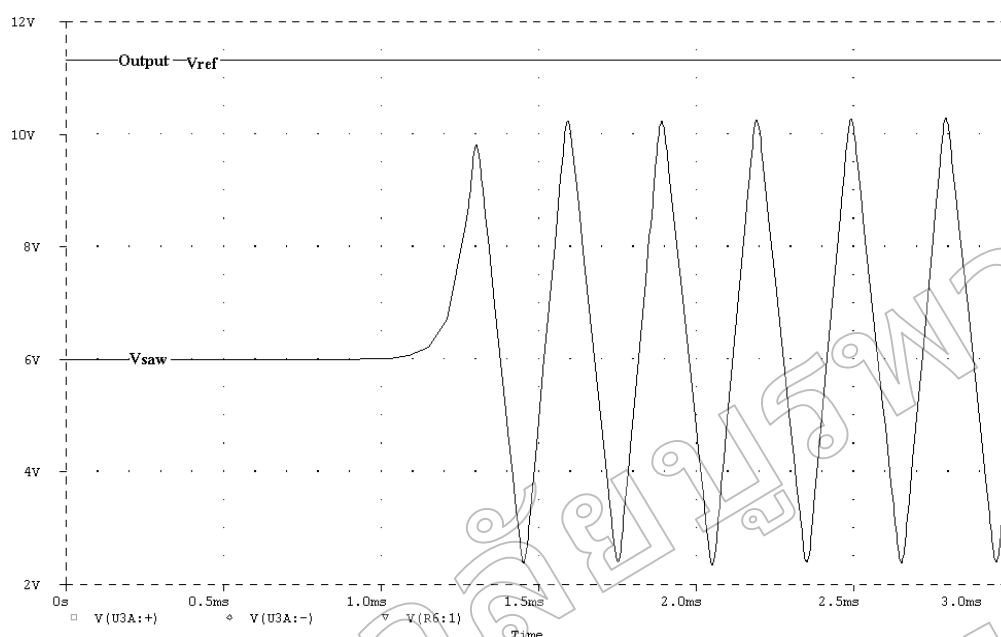
รูปที่ 3.14 ผลการจำลองวงจร โดยให้สัญญาณจากคันเร่งเป็น 1Vdc จะได้สัญญาณ PWM ค่า Duty Cycle 0%



รูปที่ 3.15 ผลการจำลองวงจร โดยให้สัญญาณจากคันเร่งเป็น 2Vdc จะได้สัญญาณ PWM ค่า Duty Cycle ประมาณ 30%



รูป 3.16 ผลการจำลองวงจร โดยให้สัญญาณจากคันเร่งเป็น 3Vdc จะได้สัญญาณ PWM ค่า Duty Cycle ประมาณ 70%



รูป 3.17 ผลการจำลองวงจร โดยให้สัญญาณจากคันเร่งเป็น 4Vdc จะได้สัญญาณ PWM ค่า Duty Cycle 100 %

จากรูป 3.14 ถึง รูป 3.17 จะเห็นได้ว่า สัญญาณ Output มีลักษณะเป็นสัญญาณ PWM ซึ่งสามารถควบคุม Duty Cycle ได้ จากการปรับค่าสัญญาณ V_{REF} จากคันเร่ง สัญญาณ PWM ที่ได้จากกราฟจะมีความถี่ประมาณ 3.32 kHz

3.1.2 การออกแบบวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์

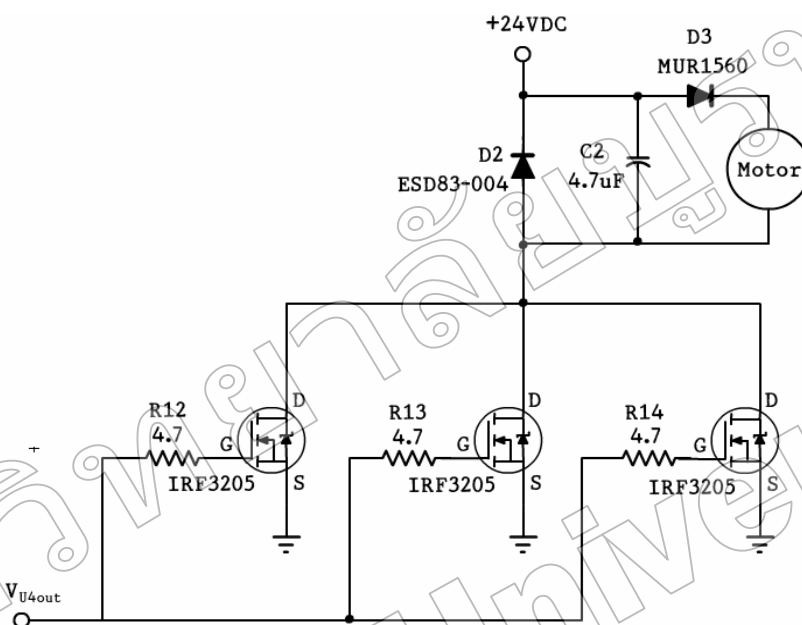
มอเตอร์ที่ใช้ในโครงการเป็นชนิดกระแสตรง กำลังไฟ 250W 24V มีคุณลักษณะดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ประสิทธิภาพของมอเตอร์ที่ใช้ในการทำโครงการ

Ref. Point	Torque/N.m	Speed/rpm	P-out/W	Volt/V	Current/A	P-in/W	Efficient/%
No Load	0.04	4125	15.12	24.09	1.86	44.71	33.81
Max. Efficient	0.49	3712	188.97	24.11	9.74	134.87	80.46
Rated Load	0.68	3535	251.54	24.12	13.12	316.47	79.48
Max. Torque	1.18	3075	380.74	24.14	21.91	528.92	71.98

จากตารางที่ 3.1 จะเห็นว่ามอเตอร์กินกระแสสูงสุดคือ 21.91A แต่กระแสเมื่อเริ่ม Start นั้นจะสูงมากประมาณ 5-10 เท่า ดังนั้นเลือกมอสเฟตที่ทนกระแสได้สูงกว่า 219.1A มอสเฟตที่เลือกใช้คือเบอร์ IRF3205 สามารถทนกระแสได้ 110A ที่แรงดัน 55V จำนวน 3 ตัว

การต่อมอเตอร์นั้นเป็นการควบคุมระดับแรงดันที่ตกคร่อมมอเตอร์ แรงดันที่ตกคร่อมมอเตอร์จะมีขนาด 0V ถึง 24V ตามการปรับดิ้วติไซเคิลของสัญญาณ PWM



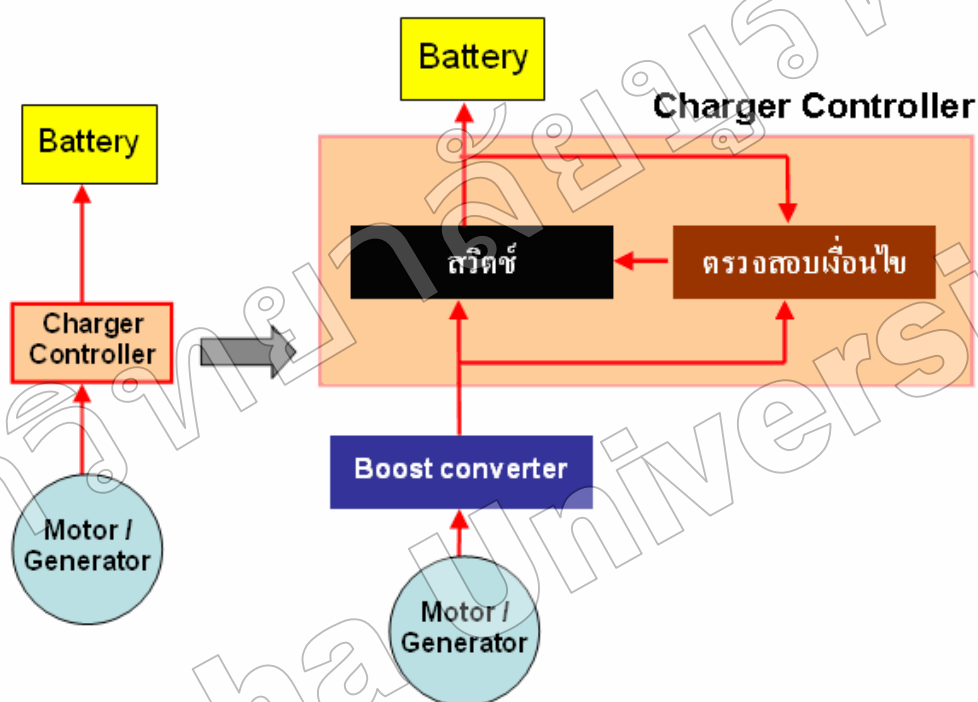
รูปที่ 3.18 วงจรขับมอเตอร์

จากรูป 3.18 เป็นวงจรขับมอเตอร์ ทำงานโดยการสวิตซ์สัญญาณ PWM (V_{U4out}) จะป้อนเข้ามาทางขาเกตของมอสเฟต ซึ่งในวงจรใช้ IRF3205 จำนวนสามตัว เพื่อแบ่งกระแสไม่ให้มอสเฟตทำงานหนักเกินไป ซึ่งแต่ละตัวทนกระแสได้ 110A สามตัวทนได้ 330A, C2 ทำหน้าที่กรองฮาร์โมนิกที่เกิดจากการขับมอเตอร์, D2 ทำหน้าที่บายพาสกระแสตกค้างเนื่องจากตัวเหนี่ยวนำในมอเตอร์ และ D3 ทำหน้าที่ป้องกันกระแสนย้อนกลับที่เกิดจากมอเตอร์ และการต่อตัวต้านทานที่ขาเกตของมอสเฟตเพื่อควบคุมกระแสที่ไหลเข้าขาเกตให้เหมาะสม

ตัวอย่างการทำงาน ถ้าสัญญาณ PWM มีความกว้างของ Duty Cycle มาก จะทำให้กระแสไหลผ่านมอสเฟตและมอเตอร์ได้มาก มอเตอร์ก็จะหมุนเร็ว ถ้าสัญญาณ PWM มีความกว้างของ Duty Cycle น้อย จะทำให้กระแสไหลผ่านมอสเฟตและมอเตอร์ได้น้อย มอเตอร์ก็จะหมุนช้า

3.2 การออกแบบวงจรชาร์จแบตเตอรี่

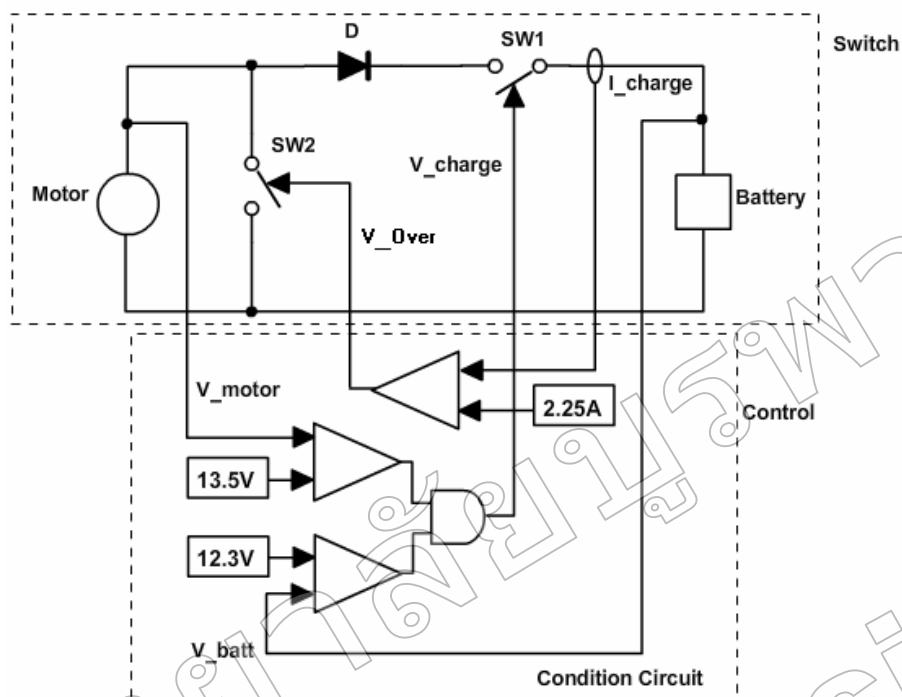
วงจรชาร์จแบตเตอรี่ จะทำงานเมื่อมอเตอร์ทำหน้าที่เป็นเจนเนอเรเตอร์ โดยการปั่นด้วยเท้า ทำหน้าที่ควบคุมการประจุกระแสไฟฟ้าจากมอเตอร์ซึ่งทำหน้าที่เป็นเจนเนอเรเตอร์ให้กับแบตเตอรี่ ประกอบด้วยสวิตช์ ซึ่งจะทำงานเมื่อถูกสั่งโดยวงจรตรวจสอบเงื่อนไข และมีวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ เพื่อให้สามารถชาร์จประจุประจุเมื่อปั่นรอบช้าๆ ได้ แผนภาพการทำงานดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 แผนภาพวงจรชาร์จแบตเตอรี่

3.2.1 แนวคิดของวงจรชาร์จแบตเตอรี่

แนวคิดในการออกแบบวงจร จะประกอบด้วยมอสเฟตและทรานซิสเตอร์เป็นหลักในการทำหน้าที่เป็นสวิตช์และสวิตช์กำลัง แบ่งเป็นวงจรสวิตช์ (Switch) และวงจรควบคุมการสวิตช์ (Control) จากรูปที่ 3.20 เมื่อมอเตอร์ทำตัวเป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้า นั่นคือปั่นมอเตอร์จนมีแรงดันมากกว่าหรือเท่ากับ 13.5V และ แรงดันของแบตเตอรี่น้อยกว่า 12.3V (ดูข้อมูลแบตเตอรี่ได้จากตารางที่ 3.2 และรูปที่ 3.21 หรือจากภาคผนวก) และกระแสที่ชาร์จต้องน้อยกว่า 2.25A V_{motor} , V_{batt} และ I_{charge} จะเป็นตัวนำสัญญาณตรวจสอบดังกล่าวตามลำดับ เข้าวงจรควบคุม เพื่อตรวจสอบเงื่อนไข ถ้าเงื่อนไขเป็นจริงจะส่งสัญญาณให้ SW1 และ SW2 จะทำงาน เป็นผลให้กระแสไฟฟ้าวิ่งสู่แบตเตอรี่ เงื่อนไขที่จะทำให้ SW1 และ SW2 ทำงานแสดงได้เป็นโพล์ชาร์จดังรูป 3.21



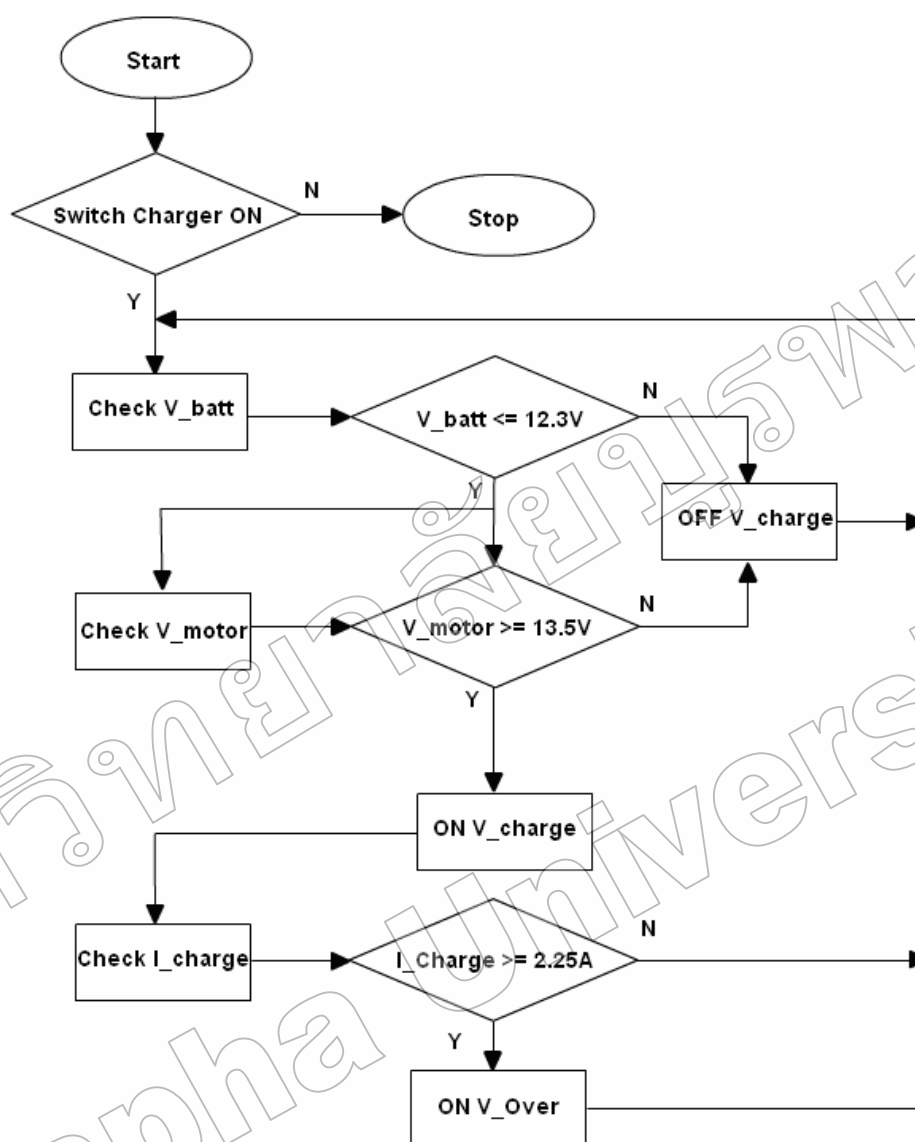
รูปที่ 3.20 แผนภาพการทำงานของวงจรควบคุมการชาร์จแบตเตอรี่

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติของแบตเตอรี่

■ Characteristics

Capacity (25°C)		20 hour rate (350mA) 10 hour rate (650mA) 5 hour rate (1.2mA) 1 hour rate (4A)	7AH 7.0AH 6.4AH 4.5AH
Internal Resistance		Fully charged Battery 25°C	Approx. 10m
Capacity affected by temperature (20 hour rate)		40°C 25°C 0°C -15°C	102% 100% 85% 65%
Self Discharge (25°C)		Capacity after 3 months storage Capacity after 6 months storage Capacity after 12 months storage	92% 83% 65%
Charge Method (Constant Voltage)	Cycle use	Initial Current	2.25A or smaller
		Control Voltage	14.4 to 15.0V (25°C)
	Standby use	Initial Current	2.25A or smaller
		Control Voltage	13.5 to 13.8V (25°C)

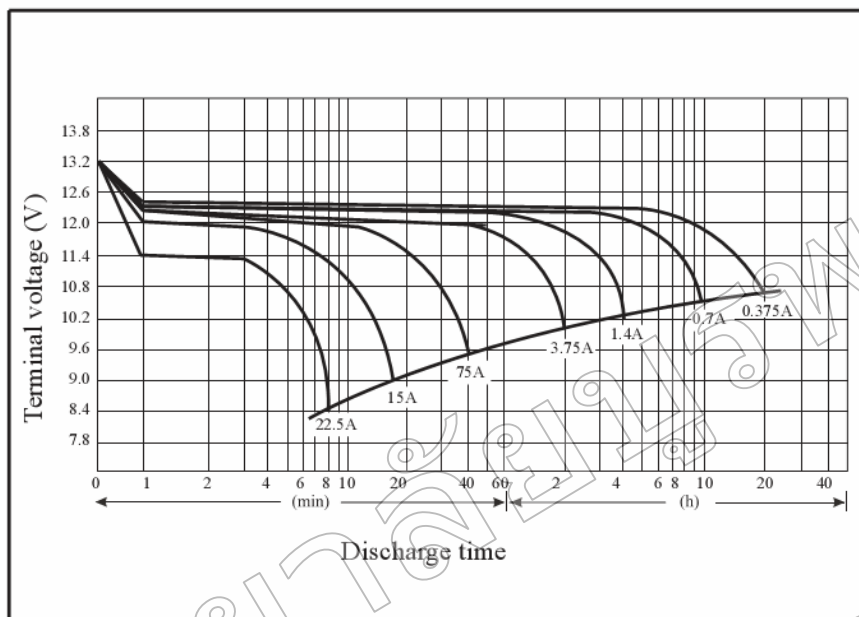
* The above data are average and obtained within three charge/discharge cycles. Cycles not the minimum values.



รูปที่ 3.21 โฟลว์ชาร์ตการทำงานของวงจรชาร์จแบตเตอรี่

จากรูปที่ 3.21 เมื่อมีการเปิดสวิตช์เลือกรูปแบบการชาร์จ วงจรจะตรวจสอบแรงดันแบตเตอรี่ก่อนอันดับแรก ว่าน้อยกว่า 12.3V หรือไม่ ถ้าจริง ก็จะตรวจสอบแรงดันของมอเตอร์ที่ทำงานเป็นเจนเนอเรเตอร์ว่าผลิตแรงดันได้มากกว่า 13.5 หรือไม่ ถ้าจริงก็จะส่งสัญญาณ V_charge เปิดสวิตช์ SW1 ให้กระแสไหลไปประจุแบตเตอรี่ทันที จากนั้นก็จะมาตรวจสอบกระแสที่ไหลเข้าสู่แบตเตอรี่ว่ามากกว่า 2.25A หรือไม่ ถ้าจริง จะส่งสัญญาณ V_Over ไปเปิดการทำงานของ SW2 ทำให้กระแสที่เกินไหลผ่าน SW2 ซึ่งจะถือว่า SW2 จะเป็นโหลดให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

■ Discharge Characteristics



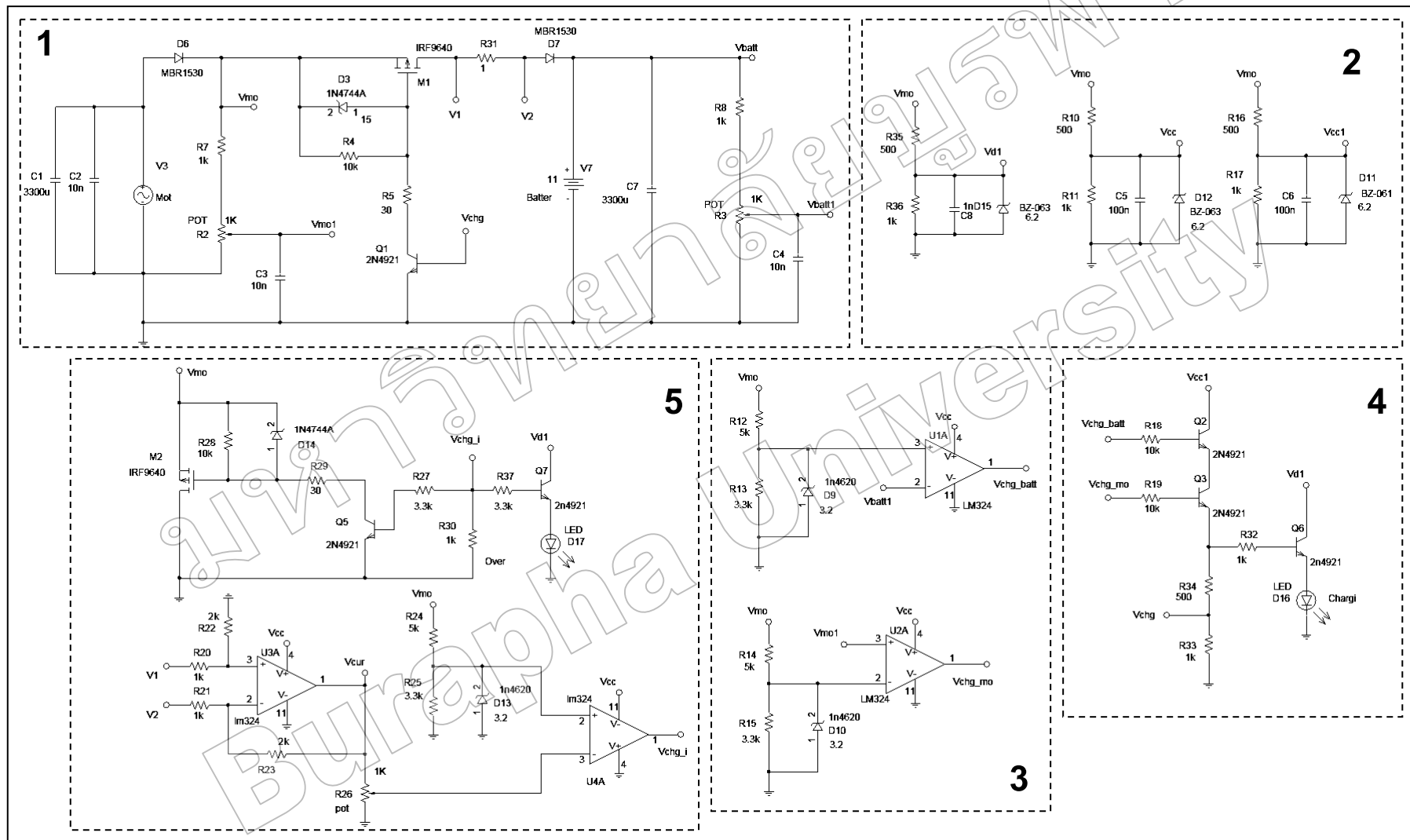
รูปที่ 3.22 กราฟคุณสมบัติของแบตเตอรี่ที่ใช้ในโครงการ

แบตเตอรี่จะมีแรงดันเมื่อชาร์จเต็มที 13.2 V จากรูปที่ 3.22 ซึ่งหมายความว่า เมื่อแบตเตอรี่มีแรงดันน้อยกว่า 13.2V สามารถประจุไฟได้ แต่จะกำหนดให้แบตเตอรี่สามารถทำการประจุได้ก็ต่อเมื่อมีแรงดันน้อยกว่า 12.3V

3.2.2 การออกแบบวงจรชาร์จแบตเตอรี่

วงจรชาร์จแบตเตอรี่ทั้งหมดแสดงได้ในรูปที่ 3.23 ซึ่งมีวงจรในส่วนของวงจรสวิตช์ (Switch) และวงจรในส่วนของการควบคุมและตรวจสอบเงื่อนไข (Control) ในรูปดังกล่าว ประกอบด้วยวงจร 5 ส่วน ได้แก่

1. วงจรส่งค่าแรงดันแบตเตอรี่ แรงดันมอเตอร์ กระแสที่ไหลเข้าแบตเตอรี่ และวงจร เปิด-ปิด การชาร์จแบตเตอรี่
2. วงจรจ่ายแรงดันไฟฟ้า
3. วงจรตรวจสอบเงื่อนไขแรงดันแบตเตอรี่และแรงดันมอเตอร์
4. วงจรแอนด์สัญญาณ (AND) ระหว่างสัญญาณของแรงดันมอเตอร์และแรงดันแบตเตอรี่ที่ตรวจสอบแล้ว และส่งค่าสัญญาณไปขับสวิตช์ SW1
5. วงจรตรวจสอบกระแส และรักษาระดับกระแส

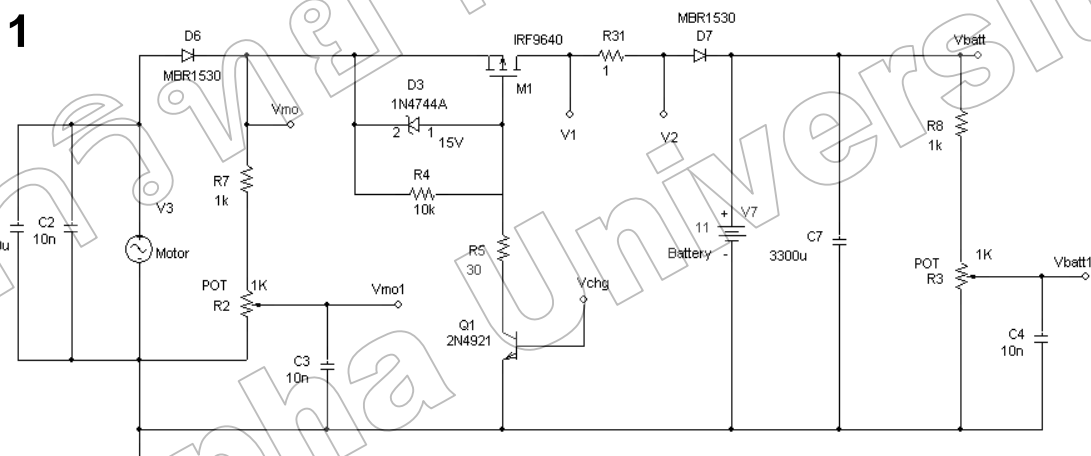


รูปที่ 3.23 วงจรชาร์จแบตเตอรี่ทั้งหมด

3.2.2.1 วงจรส่งค่าแรงดันแบตเตอรี่ แรงดันมอเตอร์ กระแสที่ไหลเข้าแบตเตอรี่ และวงจรเปิด-ปิด การชาร์จแบตเตอรี่

ในส่วนที่ 1 เป็นวงจรในส่วนของวงจรสวิตช์ (Switch) ซึ่งทำหน้าที่ปิดหรือเปิดการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าจากมอเตอร์ไปยังแบตเตอรี่ (V7) มอสเฟตแบบพีแชนแนล M1 ทำหน้าที่เป็นสวิตช์กำลัง โดยที่ทรานซิสเตอร์ Q1 เป็นตัวควบคุม โดยที่ขาเกตจะต่อซีเนอร์ไดโอดไว้เพื่อจำกัดแรงดันของขั้วเกตไม่ให้มากกว่า 15V ตัวต้านทาน R1 ทำหน้าที่ไบอัสกลับให้กับขาเกตของ M1

เมื่อเป็นจริงตามเงื่อนไข (ในหัวข้อ 3.2.1) วงจรควบคุมจะส่งสัญญาณ V_Chg มาที่ขาเบสของ Q1 ซึ่งจะทำให้ Q1 ทำงาน จะเป็นผลให้กระแสไหลผ่าน R4 ซึ่งจะเป็นแรงดันป้อนกลับให้กับขาเกตของ M1 ทำให้ M1 ทำงาน เปรียบเหมือนการเปิดการทำงานของสวิตช์ ซึ่งคือมอสเฟต M1 จึงทำให้เกิดการชาร์ตประจุ กระแสจะไหลจากมอเตอร์ผ่านไดโอด D6, D7, มอสเฟต M1, ตัวต้านทาน R31 ไปยังแบตเตอรี่



รูปที่ 3.24 วงจรส่งค่าแรงดันแบตเตอรี่ แรงดันมอเตอร์ กระแสที่ไหลเข้าแบตเตอรี่ และ วงจรสวิตช์เปิดการชาร์จแบตเตอรี่

ตัวเก็บประจุ C1 และ C2 ทำหน้าที่กรองกระแสไฟฟ้าและฮาร์โมนิคต่างๆที่ได้จากการปั่น
มอเตอร์

ไดโอด D6 และ D7 ทำหน้าที่กำหนดทิศทางการไหลของกระแสจากมอเตอร์ และทำหน้าที่แยกแบตเตอรี่และมอเตอร์ออกจากกัน เพื่อให้ตรวจสอบแรงดันของมอเตอร์ได้

ตัวต้านทาน R7 กับ R2 ทำหน้าที่แบ่งแรงดันที่เกิดจากมอเตอร์ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวกำเนิดไฟฟ้า แล้วส่งค่าแรงดันมอเตอร์ V_{mo1} ไปยังวงจรตรวจสอบเงื่อนไข โดยมีตัวเก็บประจุ C3 กรองสัญญาณรบกวนความถี่สูง

ตัวต้านทาน R8 และ R3 ทำหน้าที่แบ่งแรงดันจากแบตเตอรี่ เพื่อส่งค่า V_{batt} ไปยังวงจรตรวจสอบเงื่อนไข โดยมี C3 เป็นตัวกรองสัญญาณรบกวนความถี่สูง

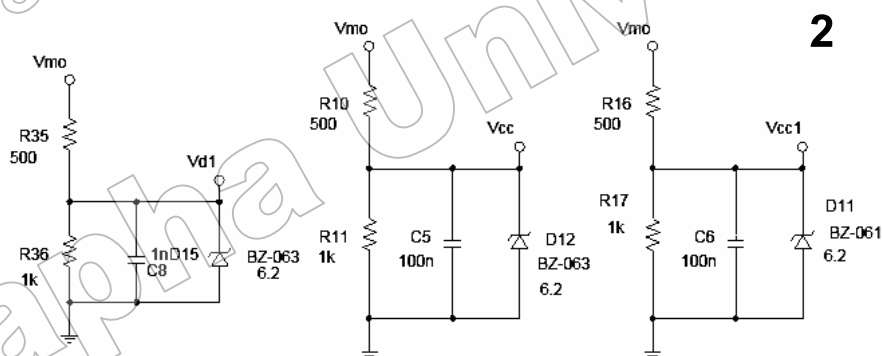
ตัวต้านทาน R31 ทำหน้าที่ตรวจสอบกระแสไหลเข้าแบตเตอรี่ อาศัยหลักการเมื่อกระแสไหลผ่านความต้านทานคงที่ แรงดันจะแปรผันตรงกับกระแสที่ไหล โดยมีค่า 1 Ohm 10W โดย V1 และ V2 จะถูกต่อกับวงจรตรวจสอบเงื่อนไขกระแสเกิน เพื่อจำกัดกระแสมิให้ไหลเข้าแบตเตอรี่มากเกินไป จะจำกัดกระแสไว้ที่ 2.25A เมื่อกระแสปริมาณ 2.25A ไหลผ่านตัวต้านทานนี้ ทำให้เกิดแรงดันตกคร่อม 2.25V ตัวต้านทาน R31 นี้ จะทำหน้าที่เซ็นเซอร์แรงดันที่ตกคร่อมดังกล่าวไปยังวงจรควบคุมเพื่อจำกัดกระแสที่ไหลผ่านนี้

จากรูปที่ 3.24 เป็นวงจรสวิตช์เพื่อควบคุมการจ่ายพลังงานจากมอเตอร์ขณะเป็นเจนเนอเรเตอร์ ไปยังแบตเตอรี่โดยมีเงื่อนไขอยู่ว่า แรงดันของมอเตอร์ต้องมากกว่าแรงดันของแบตเตอรี่

จากหัวข้อ 3.2.1 ต้องมีการตรวจสอบเงื่อนไขแรงดันของมอเตอร์ และแบตเตอรี่ และนำไปเปรียบเทียบกับจนได้สัญญาณไปควบคุมมอสเฟต M1

มอเตอร์จะถูกปั่นจนกระทั่งได้แรงดันประมาณ 15.6 V จึงจะสามารถประจุไฟได้ เพราะแรงดันต้องตกคร่อมไดโอด D6 D7 และมอสเฟต M1 รวมกันประมาณ 2.1 โวลต์

3.2.2.2 วงจรจ่ายแรงดันไฟฟ้า



รูปที่ 3.25 วงจรจ่ายแรงดันไฟฟ้า

จากรูปที่ 3.25 เป็นส่วนที่ 2 ของรูปที่ 3.23 Vd1 เป็นแรงดันเพื่อนำมาขับหลอด LED D16 และ D17 (ดังรูปที่ 3.23) ที่มีทรานซิสเตอร์ Q6 และ Q7 เป็นสวิตช์ แสดงสถานะว่ากำลังชาร์จประจุ และแสดงสถานะกระแสเกินตามลำดับ ส่วน Vcc เป็นไฟเลี้ยงของออปแอมป์ และ Vcc1 เป็นไฟเลี้ยงของทรานซิสเตอร์ Q2 และ Q3 ซึ่งได้มาจากการแบ่งแรงดันจากมอเตอร์ซึ่งทำหน้าที่เป็นเจนเนอเรเตอร์ และรักษาระดับแรงดันด้วยซีเนอร์ไดโอด D11 D12 และ D15 ประมาณ 6.2V

จากวงจรนี้ซึ่งอาศัยไฟเลี้ยง (Vmo) จากมอเตอร์ ซึ่งทำหน้าที่เป็นเจนเนอเรเตอร์ ซึ่งไฟเลี้ยงนั้นได้จากการปั่น ซึ่งจะให้แรงดันไม่คงที่ ซึ่งตอนแรกทางกลุ่มฯได้คิดไว้ว่าจะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ แต่

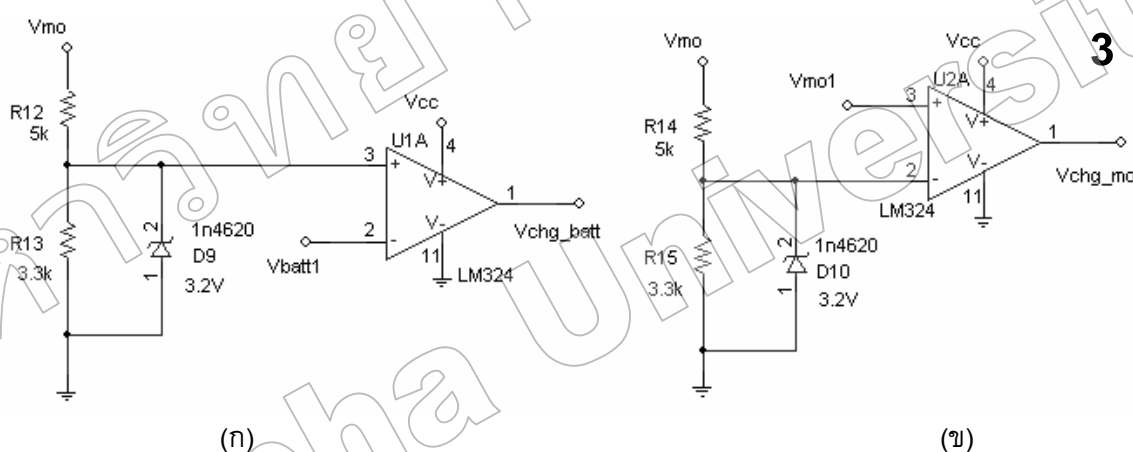
ปัญหาอยู่ที่แหล่งจ่ายไฟเลี้ยงที่ไม่คงที่ ทำให้ไม่เป็นผลดีต่อไมโครคอนโทรลเลอร์และอาจเกิดความผิดพลาดกับสัญญาณดิจิทัล หรือถ้าใช้ไฟเลี้ยงจากแบตเตอรี่ เมื่อแบตเตอรี่หมดลง ไมโครคอนโทรลเลอร์ก็ไม่สามารถทำงานได้ หรือถ้าใช้แหล่งจ่ายอื่นๆ ก็เห็นจะเป็นการสิ้นเปลืองเพราะต้องเสียค่าใช้จ่ายในส่วนนี้โดยใช้เหตุ

จากปัญหาดังกล่าว จึงใช้ออปแอมป์ ซึ่งทำงานแบบอนาล็อก สามารถเปรียบเทียบแรงดันสองแรงดันได้ โดยมีแรงดันในช่วงการทำงานที่กว้างและราคาถูกกว่าไมโครคอนโทรลเลอร์

เงื่อนไขที่ทำการเปรียบเทียบ และทำให้วงจรชาร์จทำงานคือ

1. แรงดันมอเตอร์ต้องมากกว่า 13.5V
2. แรงดันแบตเตอรี่ต้องน้อยกว่า 13.2V

3.2.2.3 วงจรตรวจสอบเงื่อนไขแรงดันแบตเตอรี่และแรงดันมอเตอร์



รูปที่ 3.26 วงจรตรวจสอบเงื่อนไขของการชาร์จแบตเตอรี่โดยใช้ออปแอมป์

(ก) ตรวจสอบแรงดันแบตเตอรี่ (ข) ตรวจสอบแรงดันมอเตอร์

ในรูปที่ 3.26 ก ซึ่งเป็นส่วนที่ 3 ของรูปที่ 3.23 ที่ U1A ตรวจสอบแรงดันแบตเตอรี่ต้องน้อยกว่า 12.3V U1A ถึงจะมีแรงดันเอาต์พุตออกมาเท่ากับไฟเลี้ยง หรือประมาณ 6V โดยเปรียบเทียบแรงดันขาที่ 2 กับขาที่ 3 โดยขาที่ 2 เป็นแรงดันของแบตเตอรี่ที่ได้จากการแบ่งแรงดัน (ดังหัวข้อที่ 3.2.2.1) และขาที่ 3 เป็นแรงดันคงที่ที่ได้จากการแบ่งแรงดันจากตัวต้านทาน R12 และ R13 แล้วรักษาระดับแรงดันด้วยซีเนอร์ไดโอด D9 มีค่าประมาณ 3.2V

จากสูตรออปแอมป์ $V_{\text{output}} = \text{Gain}(V^+ - V^-)$

ให้ V^+ เป็นแรงดันอ้างอิง มีค่า 3.2V ตามค่าการรักษาระดับแรงดันของ D9

V^- เป็นแรงดันจากแบตเตอรี่ Vbatt1

Gain เป็นอัตราขยายของออปแอมป์

ก็เพื่อความยืดหยุ่นในการตั้งค่า จะปรับค่าแรงดัน Vbatt1 จาก R3 ให้เท่ากับ 3.2V เมื่อแรงดันที่แบตเตอรี่เป็น 12.3V

เมื่อแบตเตอรี่เต็มแรงดันมากกว่า 12.3V แรงดัน Vbatt1 ที่ขา V⁻ ย่อมมากกว่า 3.2V ด้วย เช่น Vbatt1 มีค่า 3.21V

จากสูตรออปแอมป์

$$V_{\text{output}} = \text{Gain}(V^+ - V^-)$$

ต่อแบบไม่มีการป้อนกลับ

$$\text{Gain} = \infty$$

$$V_{\text{output}} = \text{Gain}(3.2 - 3.21)$$

$$V_{\text{output}} = -\infty$$

แต่ในทางปฏิบัติจะได้แรงดัน Voutput คือ 0V ซึ่งเป็นผลให้ทางด้านเอาต์พุตมีศักย์เป็นกราวด์ และเมื่อแรงดันแบตเตอรี่น้อยกว่า 12.3V ทำให้แรงดันของ Vbatt1 ที่ขา V⁻ ลดลงน้อยกว่า 3.2V

ด้วย เช่น Vbatt1 มีค่า 3.0V

$$V_{\text{output}} = \text{Gain}(3.2 - 3.0)$$

$$V_{\text{output}} = \infty$$

ในทางปฏิบัติจะได้แรงดัน Voutput ประมาณ แรงดันไฟเลี้ยงลบด้วย 0.7V ซึ่งเป็นผลให้มีสัญญาณออกทางด้านเอาต์พุต ประมาณ $6.2 - 0.7 = 5.5V$

ในรูปที่ 3.26 ข ที่ U2A เปรียบเทียบแรงดันมอเตอร์ขณะเป็นเจนเนอเรเตอร์ ต้องมากกว่า 15.6V จะทราบได้ว่าแรงดันของมอเตอร์มากกว่า 15.6V แล้ว ก็ต่อเมื่ออาศัยคุณสมบัติของออปแอมป์ ดังนี้

$$V_{\text{output}} = \text{Gain}(V^+ - V^-)$$

ให้ V⁻ เป็นแรงดันอ้างอิง มีค่า 3.2V ตามค่าการรักษาระดับแรงดันของ D10

V⁺ เป็นแรงดันของมอเตอร์ Vmo1

Gain เป็นอัตราขยายของออปแอมป์

Voutput เป็นแรงดันออกของออปแอมป์

จากรูปที่ 3.24 Vmo1 เป็นแรงดันมอเตอร์ โดยใช้ตัวต้านทานแบบค่าคงที่ R7 และตัวต้านทานปรับค่าได้ R2 ต่ออนุกรมกันเพื่อแบ่งแรงดันที่ได้จากมอเตอร์, Vmo1 จะต่อกับขา V⁺ ของ U2A การใช้ตัวต้านทานปรับค่าได้ก็เพื่อความยืดหยุ่นในการตั้งค่า ตั้งค่า Vmo1 ให้เท่ากับ 3.2V เมื่อแรงดันที่มอเตอร์เป็น 15.6V

เมื่อมอเตอร์ปั่นได้แรงดันมากกว่า 15.6V Vmo1 ก็จะมีค่ามากกว่า 3.2V ด้วย เช่น ให้ Vmo1 เท่ากับ 3.21V จากสูตรออปแอมป์

ต่อแบบไม่มีการป้อนกลับ

$$V_{\text{output}} = \text{Gain}(V^+ - V^-)$$

$$\text{Gain} = \infty$$

$$V_{\text{output}} = \text{Gain}(3.21 - 3.2)$$

$$V_{\text{output}} = \infty$$

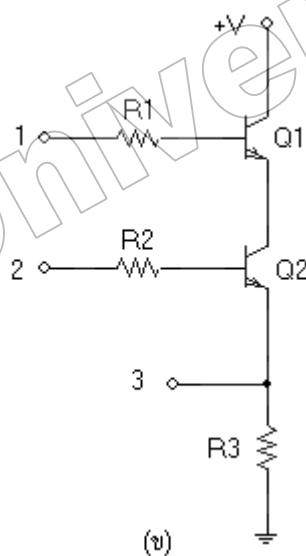
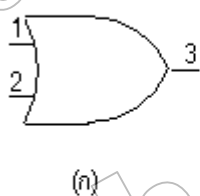
ในทางปฏิบัติจะได้แรงดัน V_{output} ประมาณ แรงดันไฟเลี้ยงลบด้วย 0.7V ซึ่งเป็นผลให้มีสัญญาณออกทางด้านเอาต์พุต ประมาณ $6.2 - 0.7 = 5.5\text{V}$

และเมื่อแรงดันมอเตอร์น้อยกว่า 15.6V ทำให้แรงดันของ V_{mo1} หรือ V^- ลดลงน้อยกว่า 3.2 V ด้วย เช่น ให้ V_{mo1} เท่ากับ 3.1V

$$V_{\text{output}} = \text{Gain}(3.1 - 3.2)$$

$$V_{\text{output}} = -\infty$$

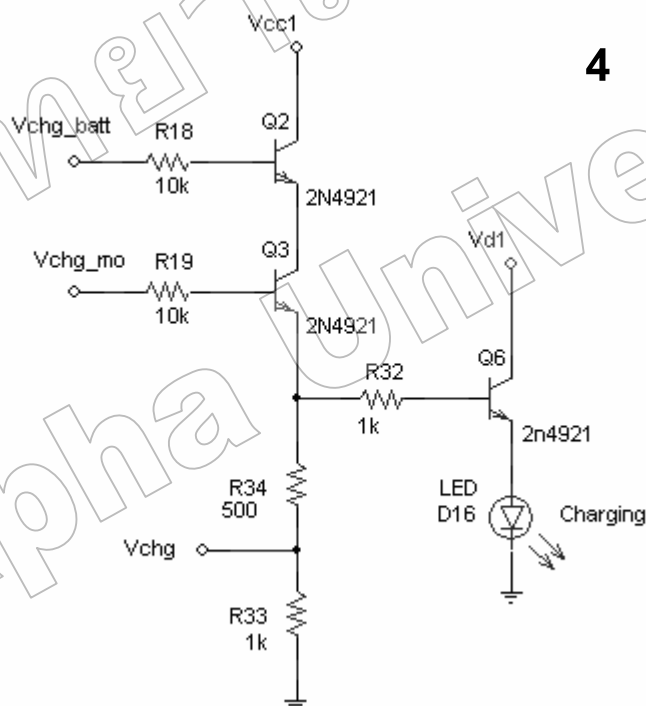
แต่ในทางปฏิบัติจะได้แรงดัน V_{output} คือ 0V ซึ่งเป็นผลให้ทางด้านเอาต์พุตมีศักย์เป็นกราวด์จากเอาต์พุตของ U1A และ U2A นำแรงดันทั้งสองมา AND กัน และนำไปป้อนให้มอเตอร์ M1 ให้ทำงาน ลอจิกเกต AND สามารถแทนด้วยวงจรรานซิสเตอร์ดังรูปที่ 3.27



รูปที่ 3.27 (ก) แอนด์เกต (ข) วงจรรานซิสเตอร์ทำงานแบบแอนด์เกต

3.2.2.4 วงจรแอนด์สัญญาณ (AND) ระหว่างสัญญาณของแรงดันมอเตอร์และแรงดันแบตเตอรี่ที่ตรวจสอบแล้ว และส่งค่าสัญญาณไปขับสวิตช์ SW1

จากรูปที่ 3.28 เป็นส่วนที่ 4 ของรูปที่ 3.23 วงจรนี้อาศัยแรงดัน Vchg_batt และ Vchg_mo ซึ่งเป็นเอาต์พุตของออปแอมป์ U1A และ U2A ตามลำดับ นำมาต่อกับทรานซิสเตอร์ Q2 และ Q3 ตามลำดับ ซึ่งทรานซิสเตอร์ Q2 และ Q3 จะทำงานแบบเป็นสวิตช์ เมื่อแรงดัน Vchg_batt และ Vchg_mo มีประมาณ 5.5V ออกจากขาเอาต์พุตของ U1A และ U2A ตามลำดับ ทรานซิสเตอร์ Q2 และ Q3 ก็จะมีสถานะ ON กระแสจะไหลผ่านทรานซิสเตอร์ทั้งสอง เป็นผลให้มีแรงดันตกคร่อม R33 และ R34 แรงดันที่ตกคร่อม R33 คือ Vchg นำไปต่อกับขาเบสของ Q1 เพื่อให้มอเตอร์ M1 ทำงาน (ดูรูปที่ 3.23) ส่วนแรงดันที่ตกคร่อมทั้ง R33 และ R34 นำไปต่อเข้ากับขาเบสของ Q6 เพื่อเปิดการทำงานของหลอด LED D16 ซึ่งเป็นไฟแสดงผลว่ามีการชาร์จประจุเกิดขึ้น



รูปที่ 3.28 วงจรแอนด์เกตและวงจรแสดงผลขณะกำลังชาร์จด้วยหลอด LED

3.2.2.5 วงจรตรวจสอบกระแส และรักษาระดับกระแส

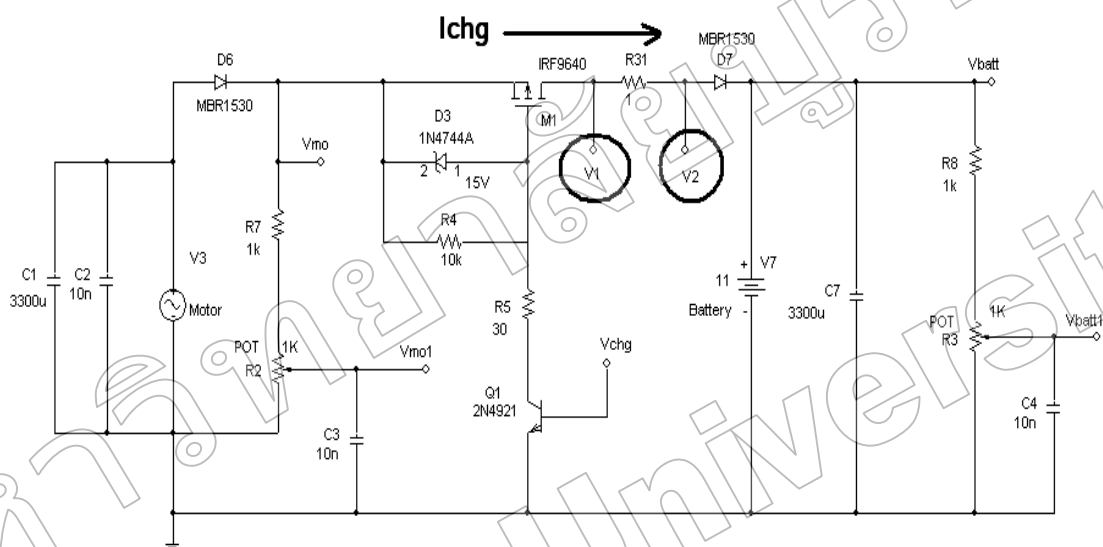
จาก data sheet ข้อจำกัดของการชาร์จแบตเตอรี่ คือ กระแสต้องไม่เกินกว่า 2.25 A ดังนั้น จึงต้องสร้างวงจรจำกัดกระแสขณะที่มอเตอร์ทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้า จากรูปที่ 3.2 ขณะที่มีการชาร์จประจุ กระแส I_{Chg} จะไหลจากมอเตอร์ผ่านมอเตอร์ M1 ผ่านตัวต้านทาน R31 เข้าสู่แบตเตอรี่,

R31 ซึ่งมีค่าความต้านทาน 1Ω ขณะนำกระแสจะเกิดแรงดันตกคร่อม R31 แรงดันที่ตกคร่อม R31 มีค่า $V_1 - V_2$ เมื่อกระแส I_{Chg} มีค่า 2.25 จะมีแรงดันตกคร่อมคือ

$$V_1 - V_2 = 2.25 \times 1$$

$$= 2.25 \text{ V}$$

นั่นคือเมื่อแรงดันตกคร่อม R31 มากกว่า 2.25 V แสดงว่ากระแส I_{Chg} มากกว่า 2.25 ด้วย ดังนั้น จึงอาศัยหลักการนี้ นำแรงดัน $V_1 - V_2$ ไปออกแบบวงจรตรวจสอบเงื่อนไขดังกล่าวโดยใช้ออปแอมป์



รูปที่ 3.29 วงจรตรวจสอบกระแส และรักษาระดับกระแส

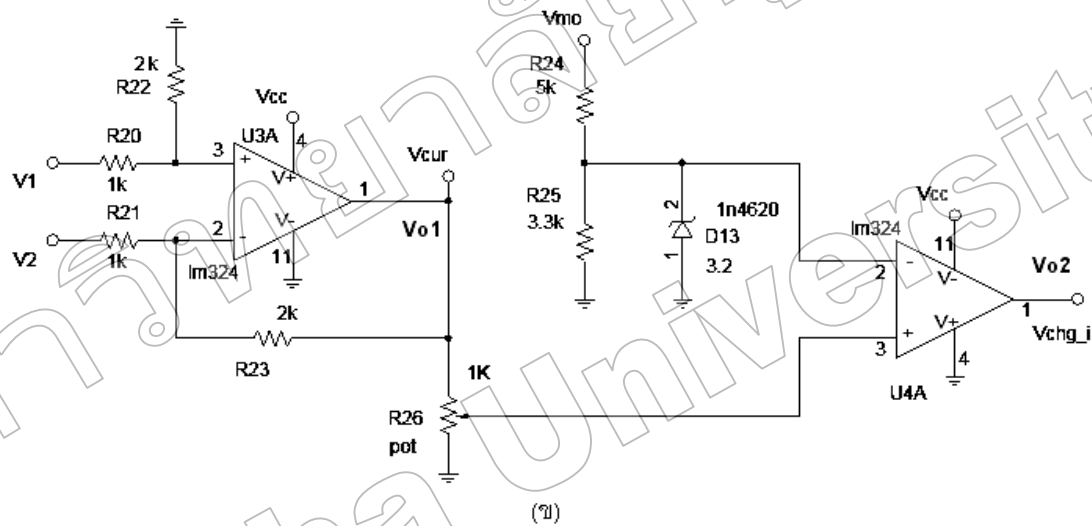
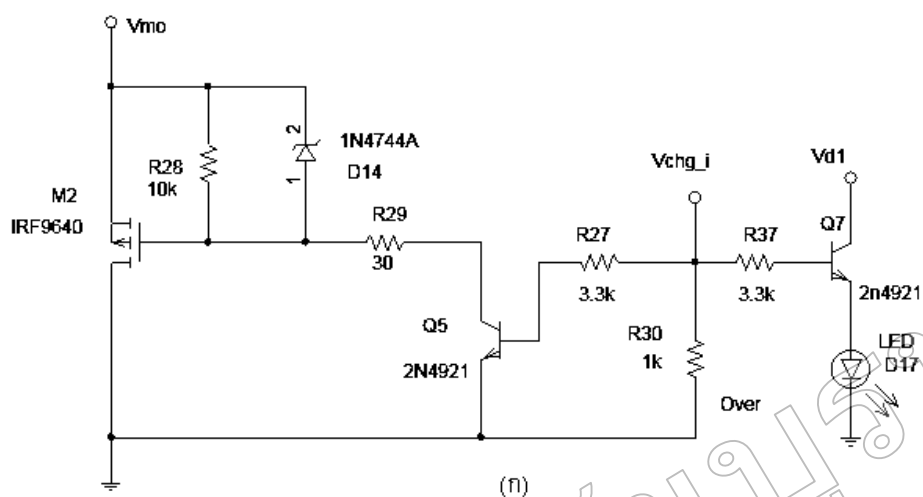
จากรูปที่ 3.30 เป็นส่วนที่ 5 ของรูปที่ 3.23 ซึ่งรูปวงจรที่ 3.29 ข เป็นวงจรตรวจสอบกระแส ขณะชาร์จแบตเตอรี่ว่าเกินกว่า 2.25A หรือไม่ โดยรับค่าจากแรงดันที่ตกคร่อม R31 (ดังรูปที่ 3.29) แรงดันนั้นเป็นความแตกต่างระหว่างจุด V_1 และ V_2 หรือคือ $V_1 - V_2$ ซึ่งเป็นแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทานดังกล่าว ซึ่งไม่ได้เทียบกับกราวด์ ดังนั้นจึงต้องนำมาแรงดัน $V_1 - V_2$ มาเทียบกับกราวด์เพื่อที่จะนำไปเปรียบเทียบเพื่อตรวจสอบกระแสต่อไป โดยผ่านวงจรขยายความแตกต่างที่ออปแอมป์ U3A

รูปที่ 3.31 เป็นรูปวงจรขยายความแตกต่างโดยออปแอมป์ U3A ซึ่งแยกออกมาจากรูป 3.30ข

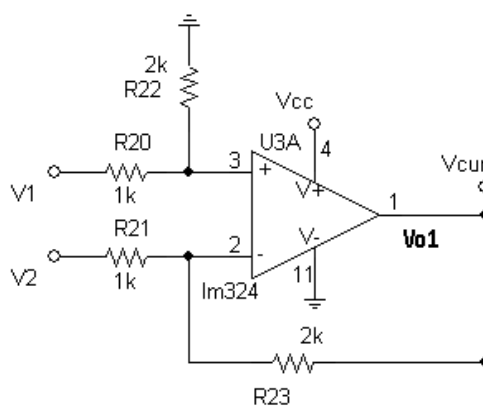
จากสูตร
$$V_{O1} = \left(\frac{R_{23}}{R_{21}} \right) (V_1 - V_2)$$

เมื่อ
$$R_{20} = R_{21} , R_{22} = R_{23}$$

5



รูปที่ 3.30 วงจรรักษาระดับกระแส (ก) และวงจรตรวจสอบกระแส (ข)



รูปที่ 3.31 วงจรขยายความแตกต่าง

จากรูป 3.31 $R_2 = R_4 = 2 \text{ K}\Omega$

$R_2 = R_4 = 1 \text{ K}\Omega$

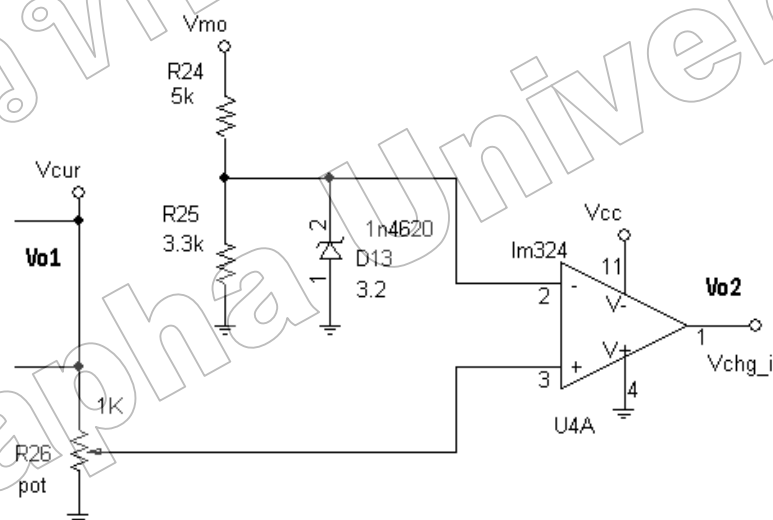
อัตราขยายคือ $\frac{R_{23}}{R_{21}} = \frac{2k}{1k} = 2$

เมื่อมีกระแสไฟฟ้า 2.25A ไหลผ่าน R31 แรงดันตกคร่อม $V_1 - V_2$ จะมีค่าประมาณ 2.25V

$$V_{O1} = 2 \times 2.25 = 4.5V$$

นำแรงดันเอาต์พุต V_{O1} ไปเปรียบเทียบกับโดยออปแอมป์ U4A โดยผ่านตัวต้านทานปรับค่าได้ R26 เพื่อที่จะปรับตั้งค่าให้เหมาะสมก่อนที่จะนำไปป้อนเข้าขา V^+ ของ U4A

รูปที่ 3.32 เป็นวงจรเปรียบเทียบแรงดันโดยออปแอมป์ U4A ซึ่งแยกออกมาจากรูป 3.30 ข เมื่อแรงดัน V_{O1} จาก U3A เป็นค่าความแตกต่างระหว่างจุด V_1 และ V_2 วงจรเปรียบเทียบแรงดัน คือ นำเอาแรงดัน V_{O1} มาเปรียบเทียบกับแรงดันที่มีค่าคงที่จากซีเนอร์ไดโอด D13 มีค่าประมาณ 3.2V เมื่อกระแสไหลมีค่า 2.25 A ทำให้แรงดัน $V_1 - V_2$ มีค่า 2.25 V จากนั้น แรงดันนี้ผ่านวงจรขยายความแตกต่าง จะได้ค่า V_{O1} ประมาณ 4.5V การต่อตัวต้านทานปรับค่าได้ R26 เป็นตัวปรับตั้งค่าให้ขา V^+ ของออปแอมป์ ให้เท่ากับแรงดันคงที่ 3.2V ที่ขา V^-



รูปที่ 3.32 วงจรเปรียบเทียบแรงดัน

จาก $V_{O2} = A_v (V^+ - V^-)$

เมื่อ A_v เป็นอัตราขยายของออปแอมป์

จากรูป ไม่มีการ Feed back A_v จึงมีค่า ∞ เมื่อกระแสไหลผ่าน R31 มากกว่า 2.25 A แรงดันที่ขา V^+ ก็มากกว่า 3.2V ด้วย เช่น ให้ $V^- = 3.3V$

$$\begin{aligned} V_{O2} &= \infty (3.3 - 3.2) \\ &= \infty \text{ V} \end{aligned}$$

ในทางปฏิบัติ จะได้ค่า V_{O2} ประมาณ 5V

ซึ่งในช่วงนี้ แรงดัน V_{O2} หรือ V_{chg_i} จะถูกจ่ายไปยังขาเบสของทรานซิสเตอร์ Q5 (ดูรูปที่ 3.30) ซึ่ง Q5 ทำงานแบบสวิตช์ ส่งผลให้ทรานซิสเตอร์ Q₅ ทำงาน ดังนั้นมอสเฟต M2 ก็จะทำหน้าที่ทำให้กระแสที่ไหลผ่าน M1 แบ่งมาไหลผ่าน M2 ลงสู่กราวด์ ซึ่งทำให้ลดกระแสชาร์จประจุที่ไหลเข้าสู่แบตเตอรี่ โดยมี D14 รักษาแรงดันของขาเกตของ M2 ไม่ให้เกิน 15V และมี Q7 เป็นสวิตช์ขับหลอด LED D17 ซึ่งจะติดขึ้นขณะที่มีการรักษาระดับกระแส ซึ่งแสดงว่ามีกระแสเกิน (ดูรูปที่ 3.30 ก)

เมื่อกระแสไหลผ่าน R31 น้อยกว่า 2.25 A แรงดันที่ขา V^+ ก็น้อยกว่า 3.2V ด้วย เช่นให้ $V^+ = 3.1V$

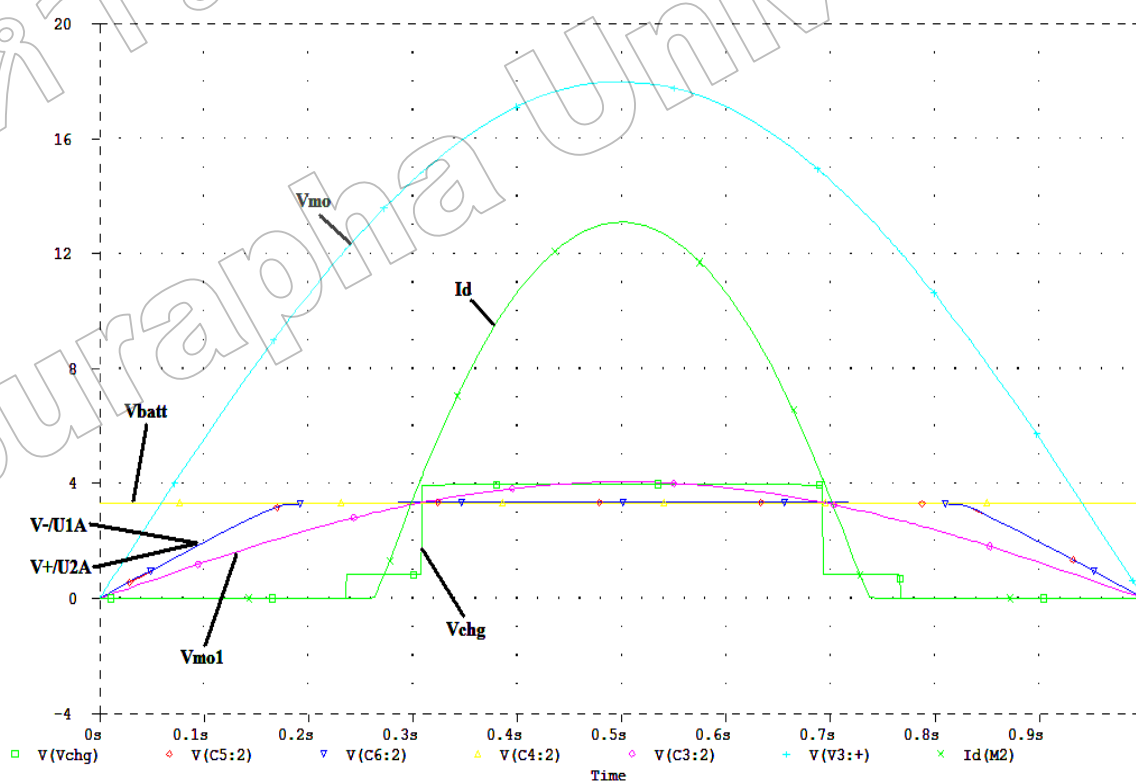
$$\begin{aligned} V_{O2} &= \infty (3.1 - 3.2) \\ &= -\infty V \end{aligned}$$

ในทางปฏิบัติ จะได้ค่า V_{O2} ประมาณ 0V

ซึ่งในช่วงนี้ จะส่งผลให้ทรานซิสเตอร์ Q₅ (จากรูปที่ 3.38) ไม่ทำงาน M2 ก็จะไม่ทำงานด้วย

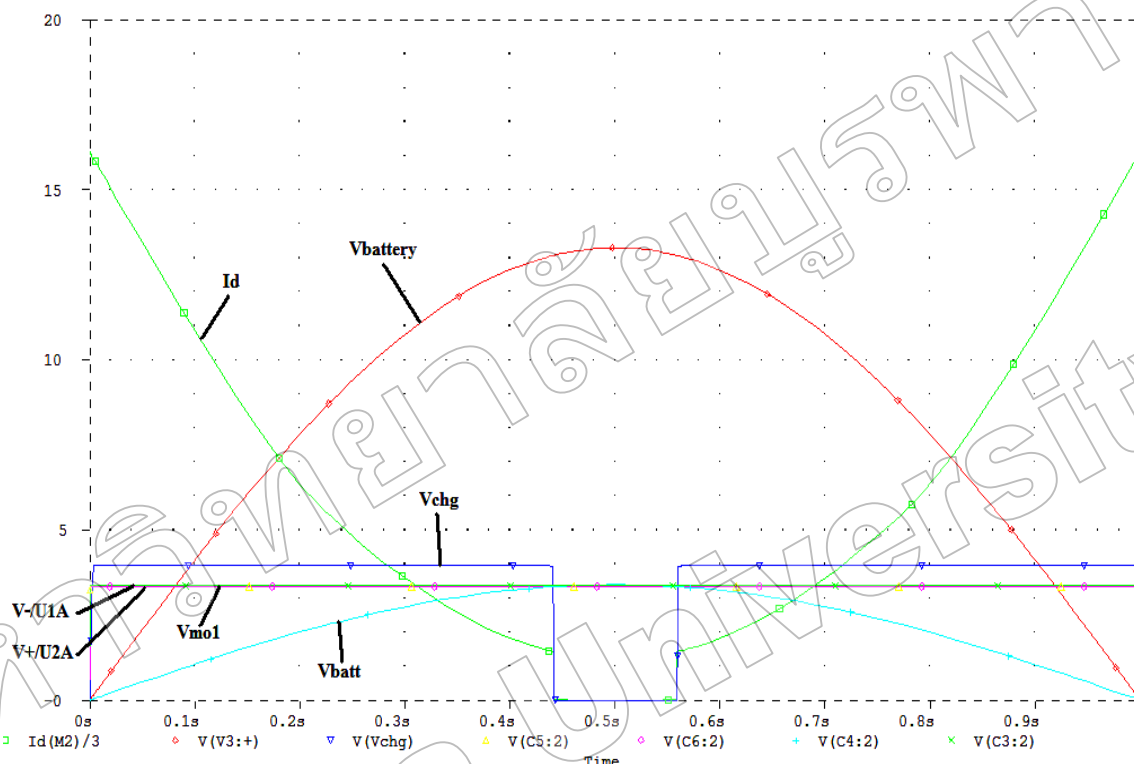
3.2.3 การจำลองวงจรและวิเคราะห์การทำงาน

3.2.3.1 การจำลองวงจรและวิเคราะห์ผลในส่วนของวงจรชาร์จแบตเตอรี่



รูปที่ 3.33 กราฟผลการจำลองวงจรชาร์จแบตเตอรี่ โดยให้ V_{batt} คงที่

นำวงจรในส่วนของการชาร์จแบตเตอรี่ (หัวข้อที่ 3.2.2.1 ถึง 3.2.2.4) ไปจำลองผลด้วยโปรแกรม MicroSim (ดูรูปที่ 3.35) โดยครั้งแรกให้แรงดันของมอเตอร์ V_{mo} เพิ่มขึ้นจาก 0V ถึงสูงสุด 18V และลดจาก 18V จนถึง 0V ในเวลา 1 วินาที และแบตเตอรี่มีแรงดันคงที่ 12V (ดูรูปที่ 3.33)



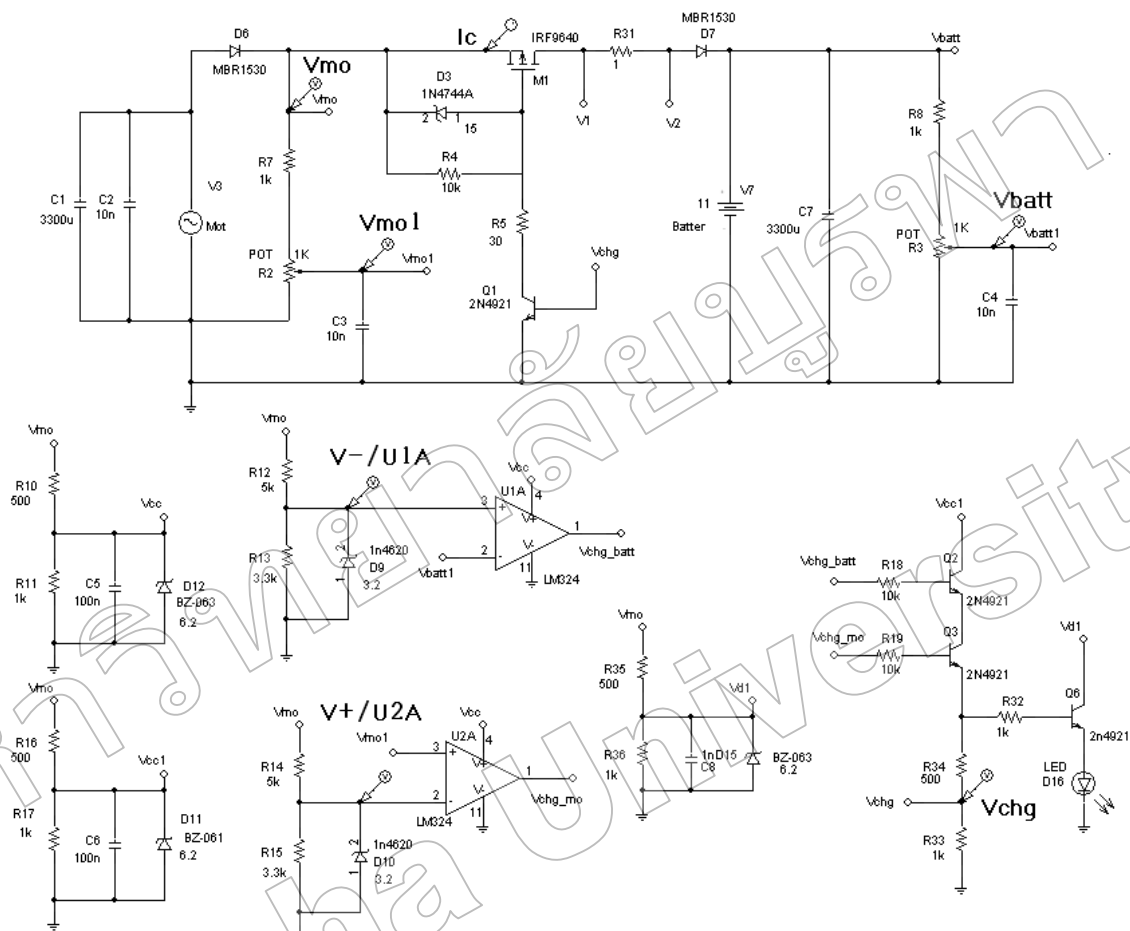
รูปที่ 3.34 กราฟผลการจำลองวงจรชาร์จแบตเตอรี่โดยให้ V_{mo} คงที่

จากรูป 3.33 เมื่อมอเตอร์ถูกปั่น V_{mo} จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ทำให้ V_{mo1} เพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน เมื่อ V_{mo1} เพิ่มจนถึงระดับอ้างอิง คือ $V-U1A$ และ V_{batt} น้อยกว่าแรงดั่งอ้างอิง $V+U2A$ ทำให้เงื่อนไขเป็นจริง V_{chg} ก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นโดยทันที ประมาณที่ 0.3S ส่งผลให้มอสเฟต M1 เปิดให้กระแส I_d ไหลจากมอเตอร์เข้าสู่แบตเตอรี่

ในทางกลับกัน ให้แรงดันมอเตอร์คงที่ ที่ 15.9V ซึ่งมากกว่า 15.6V และให้แรงดันแบตเตอรี่เพิ่มขึ้นจาก 0V ถึงสูงสุด 13.23V และลดจาก 13.23V จนถึง 0V โดยเวลา 1 วินาที แสดงกราฟได้ดังรูปที่ 3.34

จากรูปที่ 3.34 จะเห็นว่า เมื่อแบตเตอรี่ถูกชาร์จ กระแส I_d เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ $V_{battery}$ จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ทำให้ V_{batt} เพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน เมื่อ V_{batt} เพิ่มจนถึงระดับอ้างอิง คือ $V+U2A$ และ V_{batt} มากกว่าแรงดั่งอ้างอิง $V+U2A$ เอาท์พุทของ U2A มีค่าออกมาเป็น 0V ดังนั้น เมื่อแรงดันของมอเตอร์ยังสามารถชาร์จได้อยู่ก็ตาม V_{chg} ก็จะมีค่าเป็น 0V โดยทันที เพราะ AND กัน เงื่อนไขเป็นเท็จ ประมาณ

วินาทีที่ 0.45S ส่งผลให้มอสเฟต M1 ปิดไม่ให้เกิดกระแส I_d ไหล จากมอเตอร์เข้าสู่แบตเตอรี่ การชาร์จประจุจึงหยุดโดยทันที

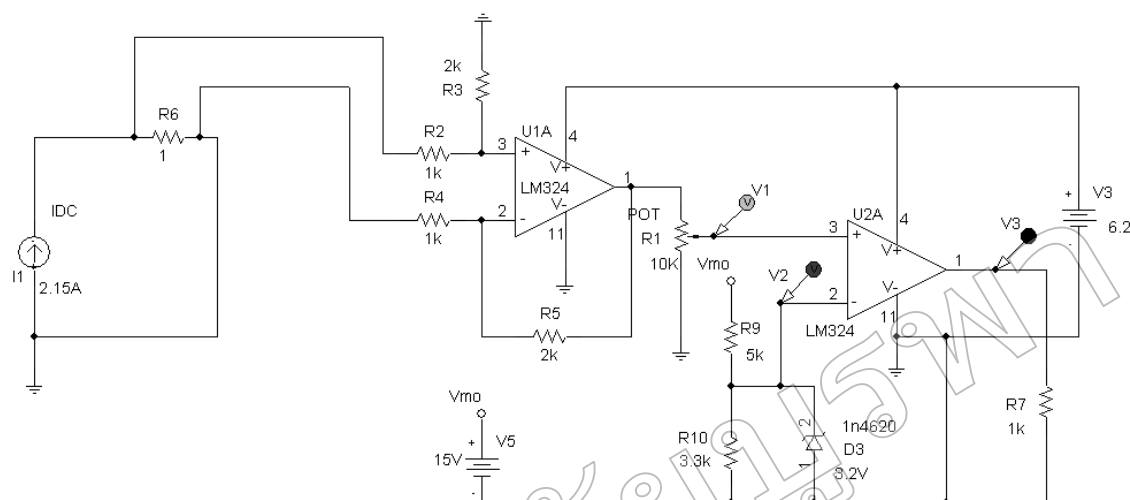


รูป 3.35 วงจรชาร์จแบตเตอรี่จำลองด้วยโปรแกรม MicroSim

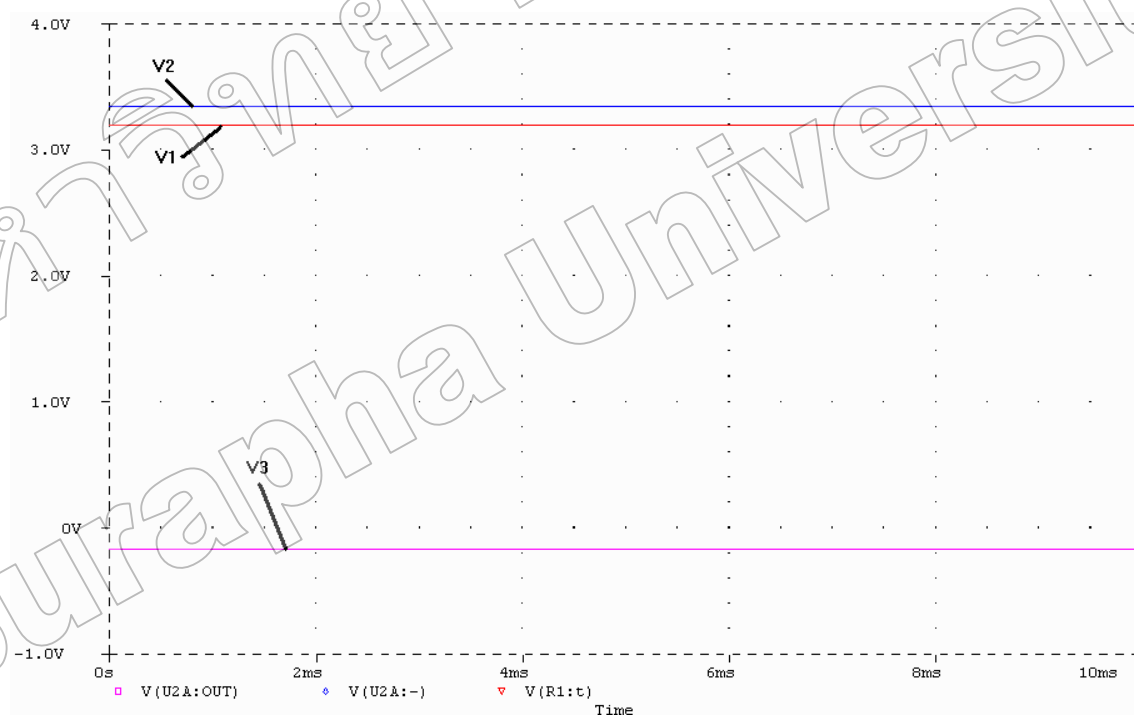
3.2.3.2 การจำลองวงจรและวิเคราะห์ผลในส่วนของวงจรรักษาระดับกระแส

จำลองวงจรในส่วนของวงจรตรวจสอบเงื่อนไข ในรูปที่ 3.30 ข โดยใช้โปรแกรม microSim ดังรูปที่ 3.36

รูปที่ 3.37 เป็นผลการทดสอบวงจร โดยปรับค่ากระแส I_1 (ดูรูปที่ 3.36) ให้น้อยกว่า 2.25A โดยจะปรับไว้ที่ 2.15A แรงดัน V_1 เป็นค่าที่ได้จากวงจรขยายความแตกต่าง โดยจะนำ V_1 มาเปรียบเทียบกับ V_2 ซึ่ง V_2 เป็นแรงดันคงที่มีค่าประมาณ 3.3V จะเห็นว่าแรงดัน V_1 จะน้อยกว่า V_2 แรงดัน V_3 ที่เป็นเอาต์พุต จะมีค่าประมาณ 0V ซึ่งเป็นจริงตามเงื่อนไขที่ออกแบบไว้

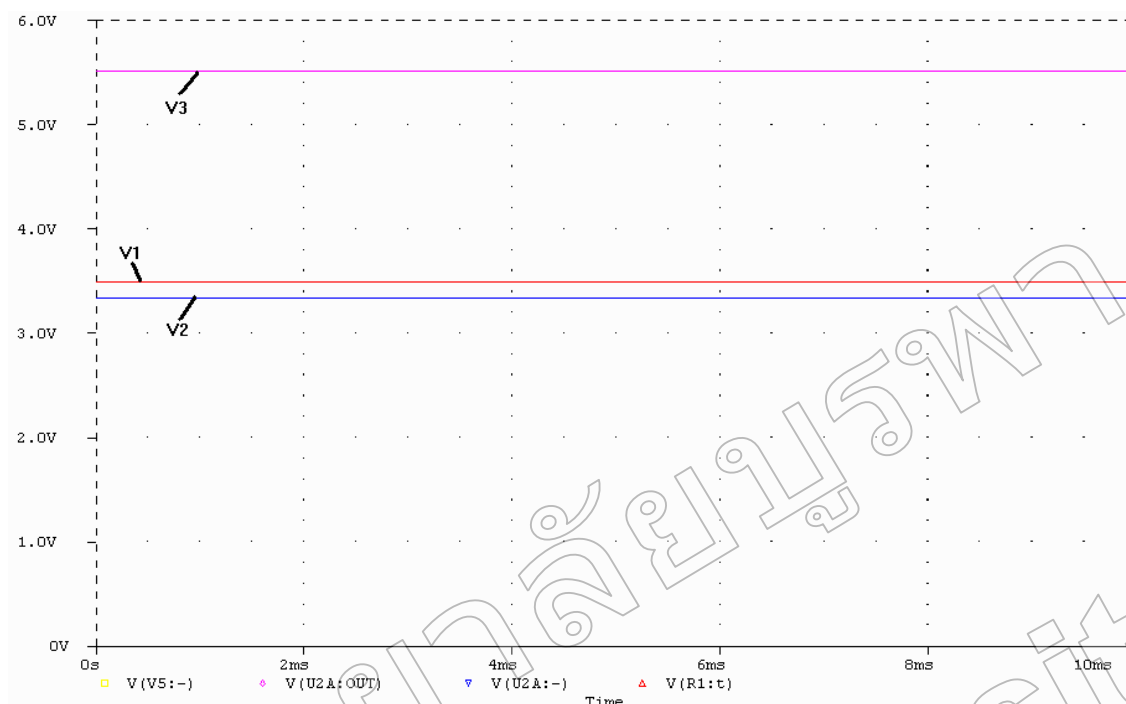


รูปที่ 3.36 การจำลองวงจรจำกัดกระแสโดยใช้โปรแกรม microSim



รูปที่ 3.37 ผลการจำลองวงจรจำกัดกระแสโดยใช้โปรแกรม microSim

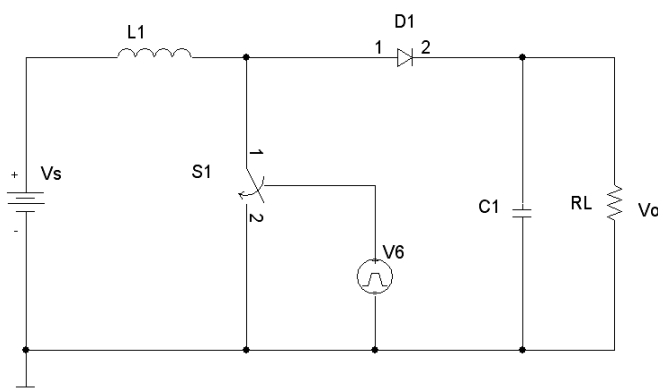
รูปที่ 3.38 เป็นผลการทดสอบวงจร โดยปรับค่ากระแส I1 (ดูรูปที่ 3.36) ให้มากกว่า 2.25A โดยจะปรับไว้ที่ 2.35A แรงดัน V1 เป็นค่าที่ได้จากวงจรขยายความแตกต่าง โดยจะนำ V1 มาเปรียบเทียบกับ V2 ซึ่ง V2 เป็นแรงดันคงที่มีค่าประมาณ 3.3V จะเห็นว่าแรงดัน V1 จะมากกว่า V2 แรงดัน V3 ที่เป็นเอาต์พุต จะมีค่าประมาณ 5.5V ซึ่งเป็นจริงตามเงื่อนไขที่ออกแบบไว้



รูปที่ 3.38 ผลการจำลองวงจรจำกัดกระแสโดยใช้โปรแกรม microSim

3.3 การออกแบบวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์

เนื่องจากวงจรชาร์จแบตเตอรี่ จะทำการชาร์จเมื่อแรงดันของมอเตอร์มากกว่า 13.5V ซึ่งหมายความว่า เมื่อปั่นจักรยานน้อยกว่า 13.5V จักรยานจะไม่มีการชาร์จเกิดขึ้น ทำให้สูญเสียพลังงานไปเปล่า ดังนั้น จึงแก้ปัญหานี้โดยการเพิ่มวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ขึ้นมา โดยทำหน้าที่แปลงแรงดันต่ำ ให้เป็นแรงดันสูง วงจร Step up converter หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Boost converter ทำหน้าที่เพิ่มแรงดันให้เหมาะสมกับการใช้งาน ทำงานแบบสวิตช์ซึ่งโดยจ่ายสัญญาณพัลส์มาควบคุมการสวิตช์



รูปที่ 3.39 วงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์

กำหนดแรงดันเข้าและออก คำนวณหาค่าตัวที่ไซเคิล

กำหนดให้เริ่มทำงานต่ำสุดที่แหล่งจ่ายมีแรงดัน 5V แรงดันขาออกจะมีค่า 13.5V

$$V_o = V_s \left(\frac{1}{1-D} \right)$$

$$13.5 = 5 \left(\frac{1}{1-D} \right)$$

$$D = 0.63$$

คำนวณหาความถี่สวิตชิง กำหนดค่าตัวเหนี่ยวนำ $L = 800\mu H$

$$L = \frac{(1-D)^2 DR}{2f}$$

$$f = \frac{(1-D)^2 DR}{2L}$$

$$f = \frac{(1-0.63)^2 0.63 \times 0.25}{2 \times 800\mu}$$

$$f = 1.347kHz$$

เลือกค่าตัวเก็บประจุ โดยให้ค่า Ripple $V_r = 1\%$

$$C = \frac{DV_o}{V_r R f}$$

$$C = \frac{0.63}{0.01 \times 25 \times 1347}$$

$$C = 1870\mu F$$

การออกแบบวงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์

ใช้ IC555 ในการกำเนิดสัญญาณพัลส์ ความถี่ 1.347kHz โดยเลือกค่าดังนี้

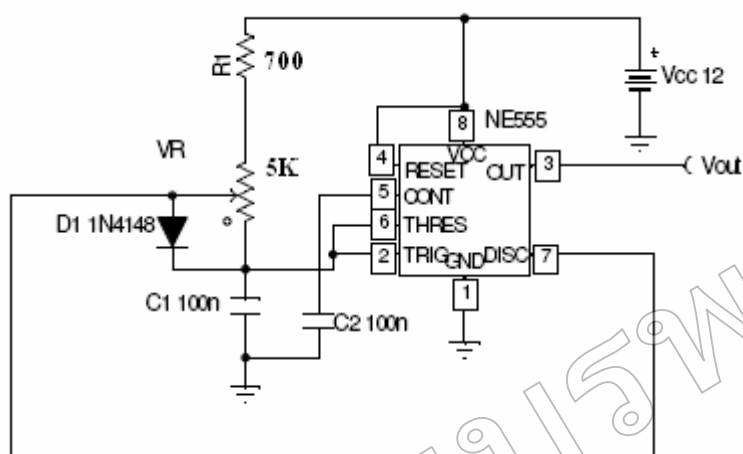
กำหนด $VR=5K$, $f = 1347 \text{ Hz}$, $V_{cc12} = 5V$ หาค่า $R1$

$$f = \frac{1}{0.693(R_1 + VR)C_1}$$

$$R_1 = \frac{1}{0.693 \times 100n \times 1347} - 5k$$

$$R_1 = 712.7$$

$R1$ เลือกค่ามาตรฐาน 700 Ohm



รูปที่ 3.40 วงจร 555 กำเนิดสัญญาณพัลส์

การปรับความถี่พัลส์ทำได้โดยปรับ VR จาก 0% - 100% เลือกปรับที่ 63% ดูได้จากการใช้ออสซิลโลสโคปวัด

3.4 การออกแบบวงจรสวิตช์สลับการทำงาน

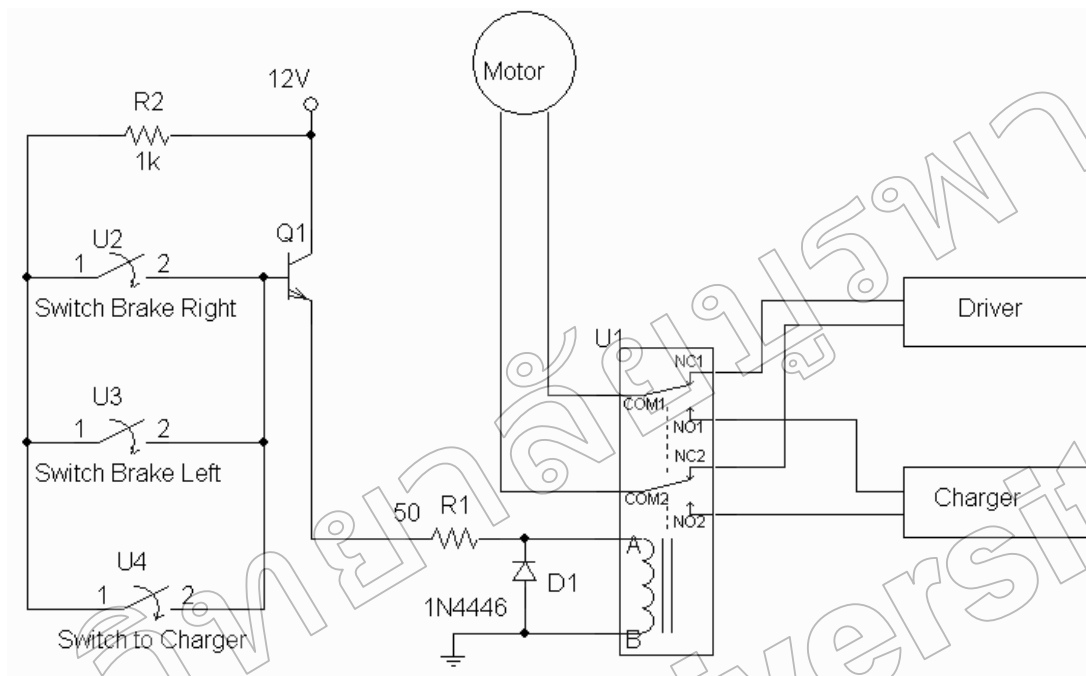
วงจรสวิตช์สลับการทำงาน ทำหน้าที่เปลี่ยนการเชื่อมต่อ ระหว่างมอเตอร์กับวงจรขับ (Driver) และมอเตอร์กับวงจรชาร์จแบตเตอรี่ (Charger) จากรูปที่ 3.1 ในแผนภาพคือส่วนที่เป็น Switch



รูปที่ 3.41 แนวคิดการเบรกแล้วชาร์จคืนพลังงานไฟฟ้า

รูปที่ 3.41 แสดงแนวคิดการเบรกแล้วคืนพลังงานไฟฟ้า โดยอาศัยสมบัติของมอเตอร์ ที่เป็นตัวทั้งเครื่องกลไฟฟ้า และแหล่งกำเนิดไฟฟ้า โดยช่วงที่เป็นจักรยานไฟฟ้า มอเตอร์ทำหน้าที่เป็นเครื่องกลไฟฟ้า ขับเคลื่อนจักรยานโดยการจ่ายไฟจากแบตเตอรี่ เมื่อต้องการลดความเร็วหรือหยุดจักรยาน โดยผู้ขับขี่จะกำเบรกมือ สวิตช์ก็จะทำงาน จะตัดการจ่ายไฟฟ้าของแบตเตอรี่ออก และสลับเปลี่ยนไปยังวงจร

ชาร์จแบตเตอรี่ ในช่วงนี้มอเตอร์จะเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า สามารถนำพลังงานไฟฟ้าที่ได้ในส่วนนี้ จ่ายคืนให้กับแบตเตอรี่ได้



รูปที่ 3.42 วงจรสวิตช์สลับการทำงาน

รูปที่ 3.42 แสดงถึงวงจรที่ได้ออกแบบ วงจรประกอบด้วยรีเลย์สองหน้าสัมผัส ขนาด 12V ใช้ไฟเลี้ยงจากแบตเตอรี่ ทรานซิสเตอร์ Q1 ทำงานเป็นสวิตช์ ควบคุมโดยสวิตช์ U2 U3 และ U4



รูปที่ 3.43 การต่อลิมิตสวิตช์เข้ากับเบรกมือ

U2 และ U3 ก็จะปิด เป็นผลให้ทรานซิสเตอร์ Q1 นำกระแสรีเลย์ U1 ทำงาน รีเลย์วงจรปกติขึ้นเชื่อมต่อระหว่างมอเตอร์กับวงจรขับ เมื่อรีเลย์ทำงาน ทำให้สับเปลี่ยนไปเป็นการเชื่อมต่อระหว่างมอเตอร์กับวงจรชาร์จแบตเตอรี่

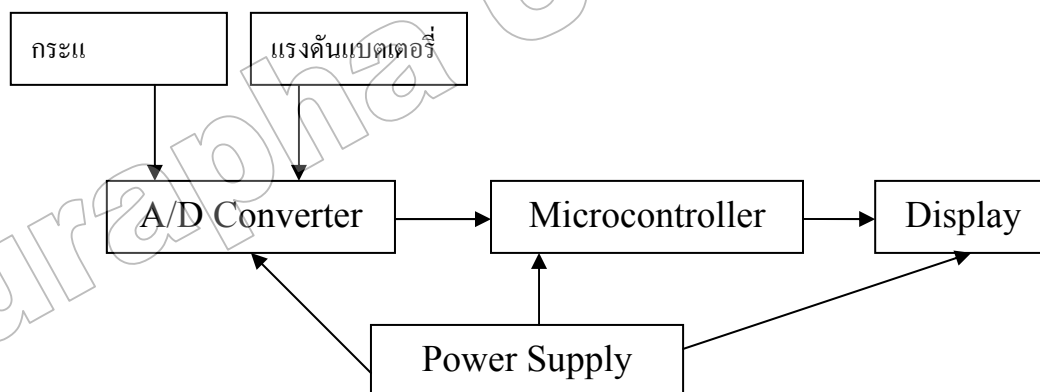
U4 นั้นเป็นสวิตช์ปิด-เปิดแบบธรรมดา เป็นสวิตช์ที่ใช้กดเลือกการปั่นแล้วชาร์จ โดยไม่ต้องอาศัยการกดเบรกมือ

จากรูปที่ 3.43 ได้ติดตั้งสวิตช์แบบปกติปิดไว้ใต้เบรก เมื่อสภาวะปกติ วงจรชาร์จแบตเตอรี่จะยังไม่ทำงาน หากมีการกดเบรกจะทำการชาร์จแบตเตอรี่ทำงาน

3.5 การออกแบบวงจรแสดงผลแรงดันแบตเตอรี่

การแสดงผลค่าแรงดันแบตเตอรี่ จะให้มีการแสดงผลแบบตัวเลข เพราะสามารถอ่านค่าได้สะดวก ทำให้ทราบค่าแรงดันที่แท้จริง และสามารถพัฒนาต่อยอดได้ การแสดงผลแบบตัวเลขนั้นเป็นระบบดิจิทัล ซึ่งต้องอาศัยไมโครคอนโทรลเลอร์ในการทำงานและประมวลผลดังกล่าว และจำเป็นต้องอาศัยระบบแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัล ซึ่งรับเข้ามาคือสัญญาณแรงดันของแบตเตอรี่ และนำสัญญาณดังกล่าวมาวิเคราะห์และคำนวณ จนได้ผลลัพธ์และแสดงผลต่อไป

การแสดงผลของแบตเตอรี่กำหนดให้แสดงแรงดันแท้จริงของแบตเตอรี่ แสดงอัตราส่วนแรงดันเป็นเปอร์เซ็นต์ ที่ 24V กำหนดให้เป็น 100% และ แสดงกระแสขณะชาร์จประจุของแบตเตอรี่



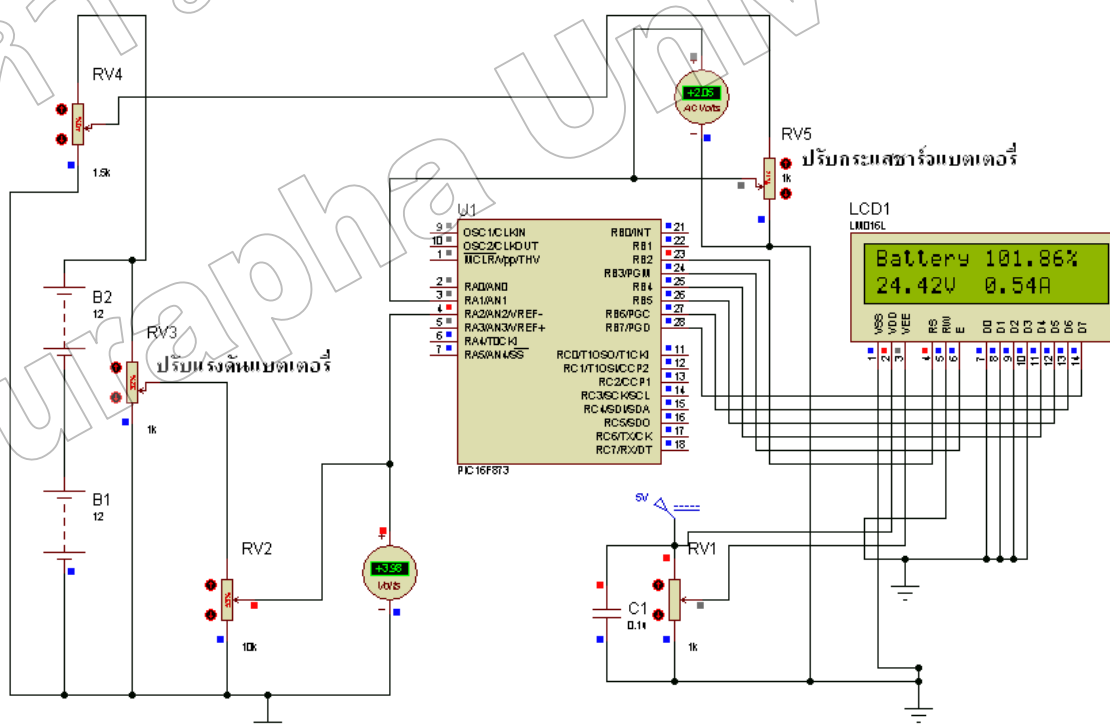
รูปที่ 3.44 แผนผังวงจรแสดงผลโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์

การทำงานเบื้องต้นแสดงได้ดังรูปที่ 3.44 ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ 16F873 ซึ่งเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์มี 28 ขา และมี A/D Converter ในตัว ใช้ไฟเลี้ยง 5Vdc ใช้หน้าจอแสดงผล (Display) แบบ LCD ขนาด 16 ตัวอักษร 2 บรรทัด ไมโครคอนโทรลเลอร์จะรับค่าแรงดันของแบตเตอรี่ 2 ก้อน ก้อนละ 12V ต่ออนุกรมกัน และรับค่ากระแสขณะชาร์จ ซึ่งจะเป็นค่าแรงดัน V_{cur} (ดูรูปที่ 3.30)

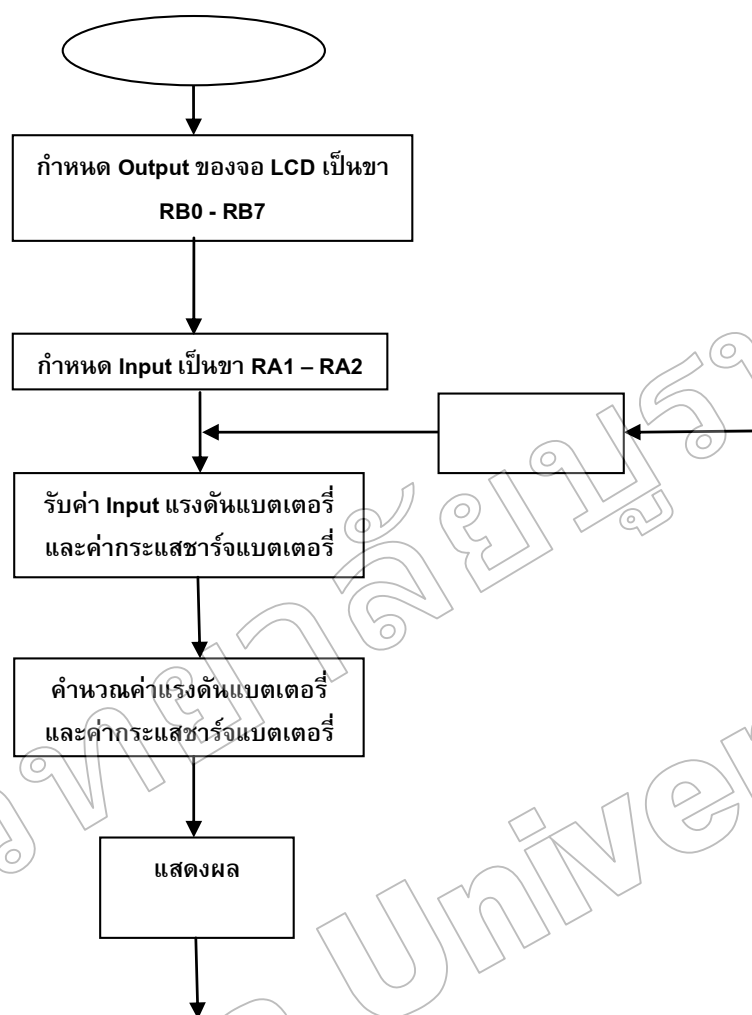
เป็นแรงดันที่เกิดจากกระแสไหลผ่านตัวต้านทาน 1 โอห์ม โดยจะนำมาคำนวณโดยการเขียนโปรแกรมใส่ไมโครคอนโทรลเลอร์ดังกล่าว และนำไปต่อกับหน้าจอ LCD เพื่อแสดงผลออกมา

ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมที่ใช้ควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์

1. กำหนดขาเอาต์พุต ที่ขา RB2-RB7 เนื่องจากจอ LCD ต่อแบบ 4 bit ต้องกำหนดเอาต์พุต 6 ขา และ กำหนดขาเอาต์พุตที่ขา RC0 เป็นไฟเตือนแบตเตอรี่หมด ขา RC1 เป็นสัญญาณเตือนผ่านลำโพง
2. กำหนดขาอินพุต กำหนดขา RA2 เป็นขาที่รับสัญญาณของแรงดันของแบตเตอรี่ ขา RA1 เป็นขาที่รับสัญญาณของกระแสจากการชาร์จแบตเตอรี่
3. เมื่อรับค่าแรงดันผ่านขา RA1 และ RA2 จะได้ค่าเป็นจำนวนเต็มที่เปลี่ยนแปลงตามค่าแรงดันนั้นๆ นำเอาค่าจำนวนเต็มนั้นมาปรับปรุงและเทียบให้ตรงกับค่าจริง โดยคูณด้วยจำนวนๆ หนึ่ง เพื่อให้ได้ค่าแรงดัน และเปอร์เซ็นต์ที่ถูกต้อง
4. แสดงผลแรงดันเป็นค่าจริง และเป็นเปอร์เซ็นต์โดยเทียบจากค่าต่ำสุดและสูงสุด
5. วนรอบและหน่วยเวลาการทำงานของการทำงานการรับค่าและแสดงผล เพราะข้อมูลต้องมีการปรับปรุงอยู่ตลอดเวลา โดยใช้คำสั่ง while ในการเขียนโปรแกรม



รูปที่ 3.45 การจำลองวงจรแสดงผลในโปรแกรม Proteus



รูปที่ 3.46 ฟลอร์ชาร์ตการทำงานของโปรแกรม

การเขียนโปรแกรมหาดังกล่าวใช้ภาษาซีเขียน และใช้โปรแกรม MikroC เป็นโปรแกรมคอมไพเลอร์ ซอสโค้ดของโปรแกรมหาดังกล่าวได้จากภาคผนวก ข

3.6 การออกแบบตัวรถจักรยานไฟฟ้า

การประกอบตัวถังรถจักรยานไฟฟ้า เริ่มจากการหาจักรยานตามขอบเขตของโครงงานฯ ได้รับบริจาคจักรยานแม่บ้านเก่า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางล้อ 24 นิ้ว ไม่มีเกียร์ทด และมี 1 ที่นั่ง เหตุที่ต้องใช้จักรยานเก่าเป็นเพราะต้องการนำจักรยานเก่านั้นมาใช้ให้เกิดประโยชน์ โดยนำมาขัดสนิมและปรับปรุงเพิ่มเติม



รูปที่ 3.47 จักรยานที่ใช้ในโครงการ

นำจักรยานมาปะยาง ซ่อมเบรก พร้อมกับปรับปรุงส่วนที่บกพร่อง ล้างและทำสีใหม่
หาซื้อมอเตอร์ขนาด 250W 24V อัตราทดรอบ 1:6 4125RPM (รายละเอียดของมอเตอร์ดูได้
จากภาคผนวก)



รูปที่ 3.48 มอเตอร์ขนาด 250W 24V อัตราทดรอบ 1:6 4125RPM

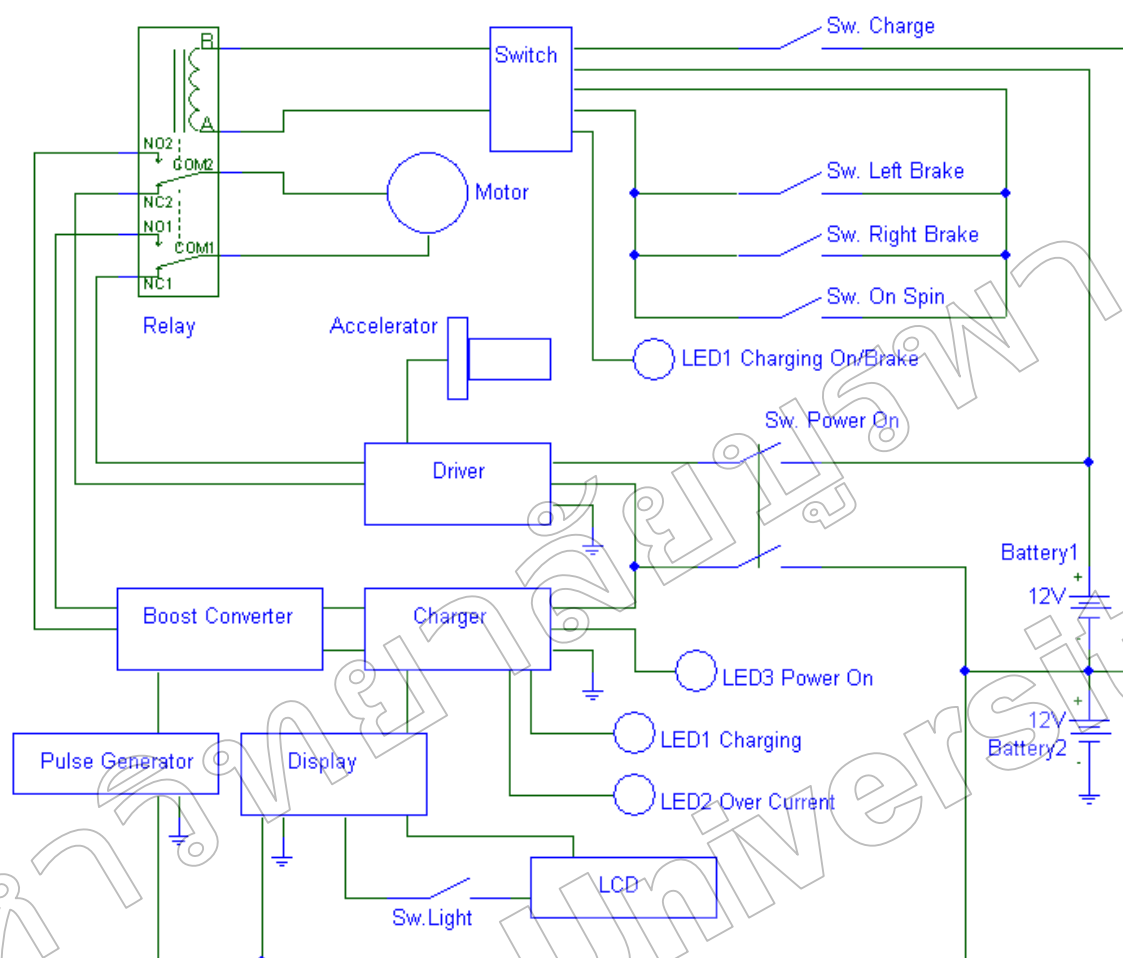
รูปที่ 3.49 แสดงการนำมอเตอร์มาประกอบกับเฟืองและโซ่ที่เชื่อมติดกับล้อจักรยาน โดยใช้
เฟืองตาย 2 ด้าน (หมายเลข 1) เพื่อให้ขับเคลื่อนได้สองทาง โดยติดไว้ด้านตรงข้ามกับจานปั่น ส่วนด้าน
จานปั่นนั้น ยังคงเป็นเฟืองฟรี 1 ด้าน (หมายเลข 2) เหมือนของเดิม



รูปที่ 3.49 แสดงการติดมอเตอร์เข้ากับจักรยาน

3.7 การประกอบอุปกรณ์และวงจรทั้งหมดในรถจักรยาน

รูปที่ 3.50 แสดงแผนภาพการประกอบวงจรทั้งหมดไว้ด้วยกัน ได้แก่ วงจรขับมอเตอร์ (Driver) วงจรชาร์จแบตเตอรี่ (Charger) วงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ (Boost Converter) วงจรสวิตช์ (Switch) วงจรแสดงผล (Display) จอ LCD มอเตอร์ (Motor) และ แบตเตอรี่ (Battery) และสวิตช์ต่างๆ ได้แก่ Sw. Charge คือ สวิตช์เปิดการทำงานของกรชาร์จ Sw. Left Brake และ Sw. Left Brake คือสวิตช์ที่ติดกับเบรกมือซ้ายและขวาตามลำดับ Sw. On Spin คือสวิตช์ที่เปิดการปั่นแล้วชาร์จ Sw. Power คือสวิตช์ที่เปิดการทำงานของระบบทั้งหมด Sw. Light คือสวิตช์เปิดไฟแสงสว่างที่จอ LCD ส่วนหลอด LED แสดงผลได้แก่ LED1 Charging แสดงสถานะการชาร์จแบตเตอรี่ LED2 Over Current แสดงสถานะกระแสวิกเกิน LED3 Power On แสดงความพร้อมที่จะเริ่มทำงาน LED4 Charging On/Brake แสดงความพร้อมที่จะทำงานในการเบรกแล้วคืนพลังงาน วงจรและอุปกรณ์ในส่วนต่างๆ จะถูกต่อเชื่อมกันไว้ดังรูปที่ 3.50 และนำไปประกอบลงในตัวรถจักรยาน แล้วทดสอบการทำงานทั้งหมดในขั้นสุดท้าย



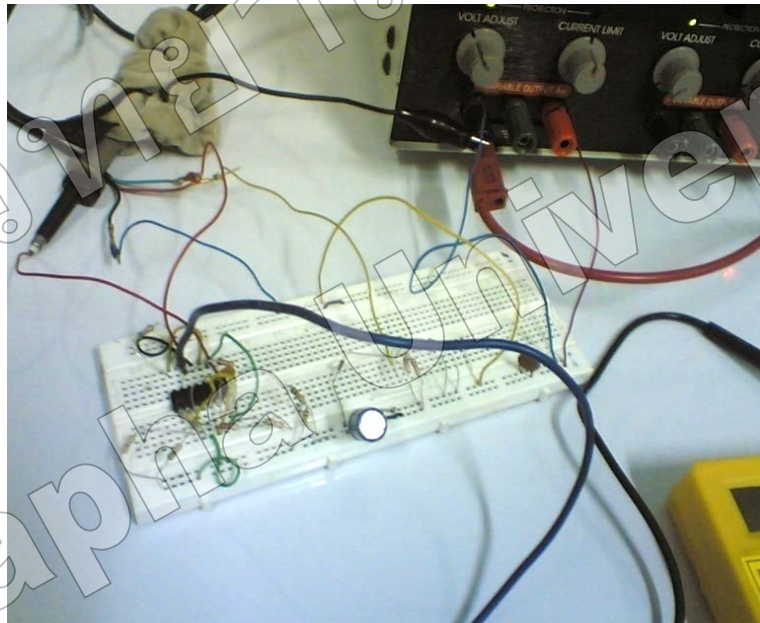
รูปที่ 3.50 แผนภาพการประกอบวงจรทั้งหมดไว้ด้วยกัน

บทที่ 4

ผลการทดสอบ

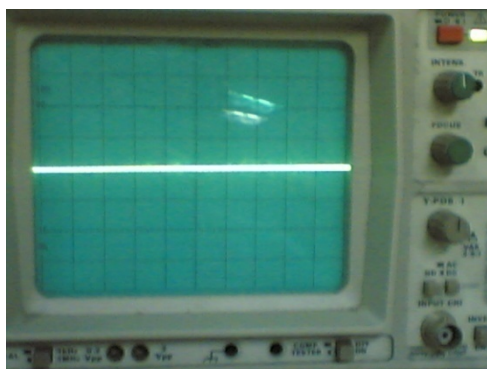
4.1 การทดสอบการขับเคลื่อนมอเตอร์รถจักรยานไฟฟ้า

การทดสอบเริ่มต้นจากการทดสอบวงจรกำเนิดสัญญาณ PWM (รูปวงจรดูจากรูปที่ 3.7) โดยทดลองใน Proto board และวัดรูปสัญญาณออกโดยออสซิลโลสโคป จากนั้น นำวงจรกำเนิดสัญญาณ PWM ดังกล่าว มาต่อกับวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ที่มีมอเตอร์เป็นตัวขับ หลังจากนั้น นำวงจรมาประกอบลงจักรยาน แล้วทำการทดสอบโดยไม่มีผู้ขับขี่ และมีผู้ขับขี่

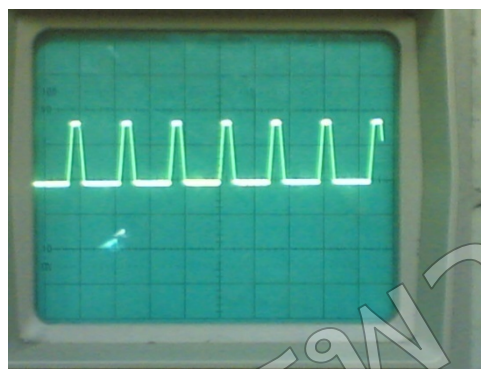


รูปที่ 4.1 การทดสอบวงจรกำเนิดสัญญาณ PWM

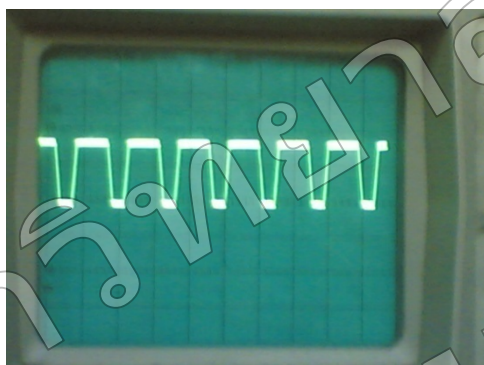
รูปที่ 4.2 แสดงการทดสอบโดยการวัดรูปสัญญาณออกโดยออสซิลโลสโคป เริ่มจากคันเร่งที่ยังไม่ได้บิด (รูปที่ 4.2 ก) จะได้ Duty Cycle ที่ 0% แล้วเริ่มบิดคันเร่งช้าๆ Duty Cycle จะเพิ่มตามการบิดคันเร่ง รูปที่ 4.2 ข และ ค แสดงการบิดคันเร่งจนได้ Duty Cycle ที่ 30% และ 70% ตามลำดับ และรูปที่ 4.2 ง เมื่อบิดคันเร่งจนสุด จะได้ Duty Cycle ที่ 100%



(ก) คั่นรังก่อนบิต
0% Duty Cycle



(ข) บิตคั่นรังก่อนที่
30% Duty Cycle

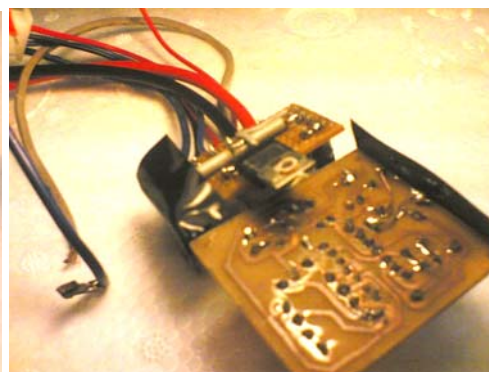
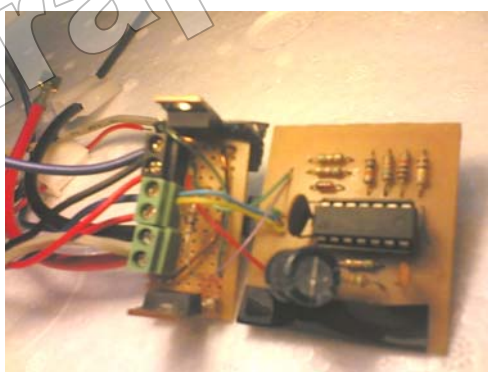


(ค) บิตคั่นรังก่อนที่
70% Duty Cycle



(ง) บิตคั่นรังก่อนที่
100% Duty Cycle

รูปที่ 4.2 การทดสอบวงจรกำเนิดสัญญาณ PWM โดยใช้ฮอสซิลโลสโคป



รูปที่ 4.3 การประกอบวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ลงใน PCB



รูปที่ 4.4 จักรยานไฟฟ้าที่ประกอบด้วยวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์



รูปที่ 4.5 ผู้ทดสอบน้ำหนัก 55 กิโลกรัม



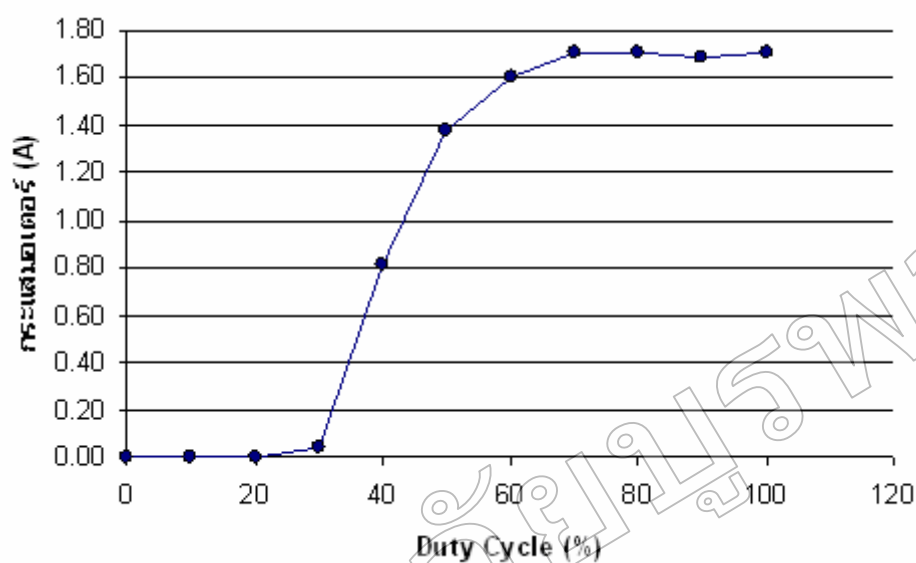
รูปที่ 4.6 ผู้ทดสอบน้ำหนัก 71.5 กิโลกรัม

4.1.1 การทดสอบโดยไม่มีผู้ขับขี่

จากการทดสอบการขับเคลื่อนโดยไม่มีผู้ขับขี่ กระแสที่ใช้ขับเคลื่อนมอเตอร์สูงสุดคือประมาณ 1.7A วัดที่ความเร็วคงที่

ตารางที่ 4.1 การวัดกระแสไหลเข้ามอเตอร์เทียบกับ Duty Cycle ของสัญญาณ PWM

Duty Cycle (%)	กระแสเข้ามอเตอร์ (A)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0	0.00	0.00	0.00	0.00
10	0.00	0.00	0.00	0.00
20	0.00	0.00	0.00	0.00
30	0.00	0.02	0.09	0.04
40	0.80	0.90	0.75	0.82
50	1.38	1.36	1.40	1.38
60	1.62	1.60	1.60	1.61
70	1.73	1.70	1.69	1.71
80	1.73	1.70	1.70	1.71
90	1.67	1.70	1.70	1.69
100	1.67	1.74	1.70	1.70



รูปที่ 4.7 กราฟแสดง Duty Cycle และกระแสเข้ามอเตอร์เมื่อไม่มีผู้ขับขี่

4.1.2 การทดสอบโดยมีผู้ขับขี่

1) ผู้ขับขี่น้ำหนัก 71.5 กิโลกรัม

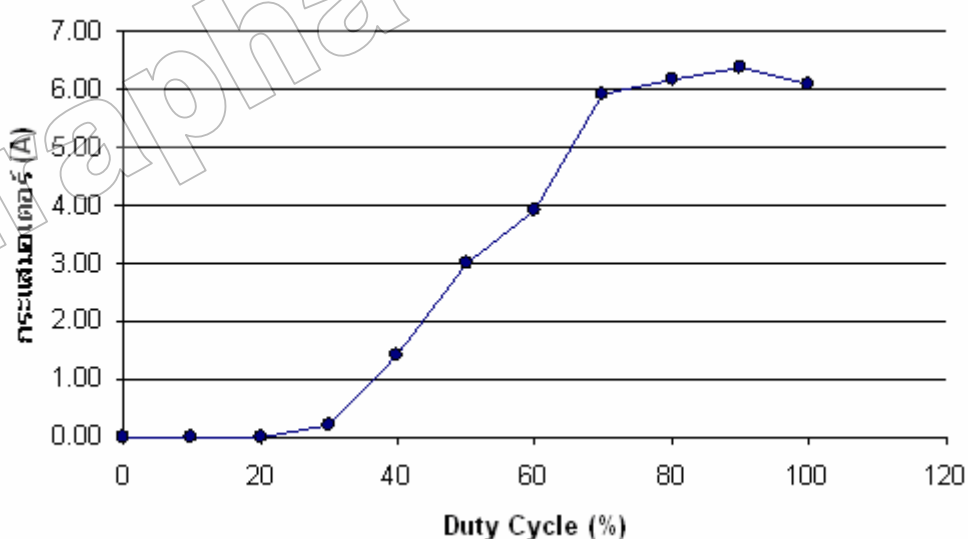
ตารางที่ 4.2 การวัด Duty Cycle ของสัญญาณ PWM เทียบกับความเร็วรถ ผู้ขับขี่น้ำหนัก 71.5 กิโลกรัม

Duty Cycle (%)	เวลา (s)				ความเร็ว m/s	ความเร็ว km/h
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
50	9.97	10.21	9.08	9.75	1.57	5.56
60	3.47	4.54	3.61	3.87	3.95	14.22
70	2.80	2.56	2.63	2.66	5.74	20.66
80	2.55	2.53	2.63	2.57	5.95	21.42
90	2.54	2.48	2.46	2.49	6.14	21.10
100	2.43	2.51	2.48	2.47	6.19	22.28

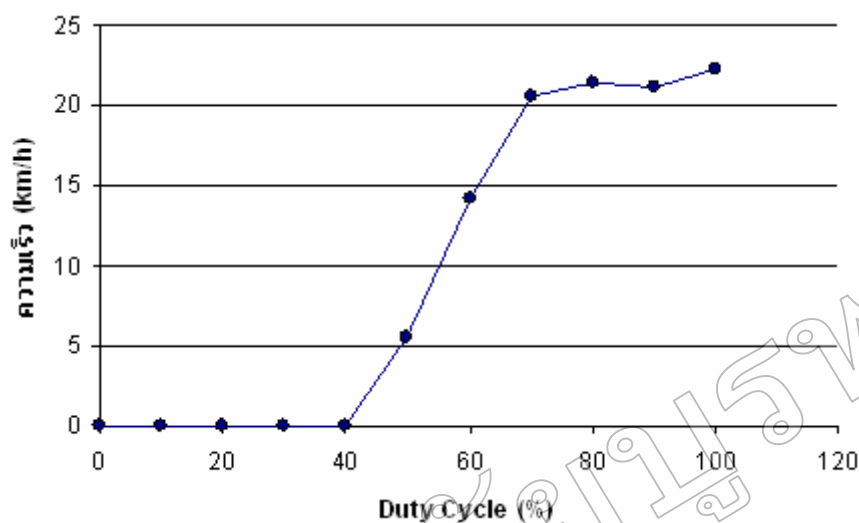
ตารางที่ 4.3 การวัดกระแสไหลเข้ามอเตอร์เทียบกับ Duty Cycle ของสัญญาณ PWM ผู้ขับขึ้นน้ำหนัก 71.5 กิโลกรัม

Duty Cycle (%)	กระแสเข้ามอเตอร์ (A)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0	0.00	0.00	0.00	0.00
10	0.00	0.00	0.00	0.00
20	0.00	0.00	0.00	0.00
30	0.22	0.22	0.15	0.20
40	1.28	1.60	1.40	1.43
50	3.45	3.30	2.23	2.99
60	4.02	3.90	3.80	3.91
70	6.80	5.80	5.20	5.93
80	7.02	5.90	5.60	6.17
90	6.90	6.30	5.90	6.37
100	6.80	5.40	6.10	6.10

หมายเหตุ ตารางที่ 4.1 และ 4.3 วัดกระแสโดยใช้แอมมิเตอร์ต่ออนุกรมกับมอเตอร์ ตารางที่ 4.2 วัดความเร็วโดยการจับเวลาขณะที่จักรยานวิ่งผ่านระยะทาง 15.3 เมตร



รูปที่ 4.8 กราฟแสดง Duty Cycle และกระแสมอเตอร์เมื่อมีผู้ขับขึ้นน้ำหนัก 71.5 กิโลกรัม



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความเร็วและ Duty Cycle เมื่อมีผู้ขับขี่น้ำหนัก 71.5 กิโลกรัม

จากรูปที่ 4.8 จะเห็นว่า ดิวตี้ไซเคิลเพิ่มขึ้นจนถึง 100% และกระแสจะลดลงกว่าเดิม แสดงว่า ช่วงดิวตี้ไซเคิล 80% - 90% วัดกระแสขณะที่มอเตอร์มีความเร่งอยู่ ความเร็วยังไม่คงที่ กระแสจึงมาก และเมื่อดิวตี้ไซเคิลประมาณ 100% ความเร็วสูงสุดประมาณ 22.28 km/h วัดกระแสขณะความเร็วคงที่ กระแสที่วัดได้จึงลดลงกว่าเดิม กระแสเฉลี่ยมากที่สุด ที่ความเร็วสูงสุดคือประมาณ 6.1A แสดงว่าถ้ารถวิ่งด้วยความเร็วคงที่สูงสุด 22.28 km/h ผู้ขับขี่น้ำหนัก 71.5kg จะใช้พลังงานของแบตเตอรี่ 7.5Ah ได้นานประมาณ 1.25 ชั่วโมง

2) ผู้ขับขี่น้ำหนัก 55 กิโลกรัม

รูปที่ 4.10 เมื่อมีผู้ขับขี่น้ำหนัก 55 กิโลกรัม จะเห็นว่า ดิวตี้ไซเคิลเพิ่มขึ้นจนถึง 100% และกระแสจะลดลงกว่าเดิม แสดงว่า ช่วงดิวตี้ไซเคิล 60% - 90% วัดกระแสขณะที่มอเตอร์มีความเร่งอยู่ และความเร็วยังไม่คงที่ กระแสจึงมาก และเมื่อดิวตี้ไซเคิลประมาณ 100% ความเร็วสูงสุดประมาณ 24.59 km/h วัดกระแสขณะความเร็วคงที่ กระแสที่วัดได้จึงลดลงกว่าเดิม กระแสเฉลี่ยมากที่สุด ที่ความเร็วสูงสุดคือประมาณ 5.62A แสดงว่าถ้ารถวิ่งด้วยความเร็วคงที่สูงสุด 24.28 km/h ผู้ขับขี่น้ำหนัก 55kg จะใช้พลังงานของแบตเตอรี่ 7.5Ah ได้นานประมาณ 1.33 ชั่วโมง

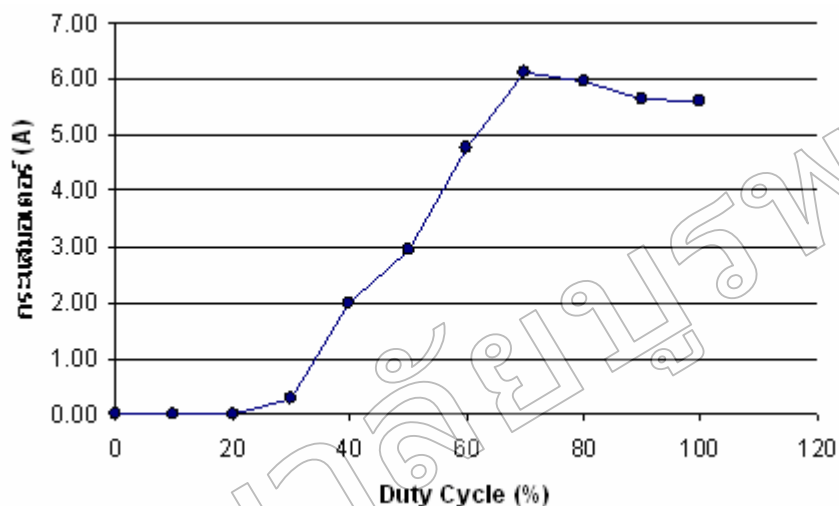
ตารางที่ 4.4 การวัดกระแสไหลเข้ามอเตอร์เทียบกับ Duty Cycle ของสัญญาณ PWM ผู้ขับขึ้นน้ำหนัก 55 กิโลกรัม

Duty Cycle (%)	กระแสเข้ามอเตอร์ (A)			
	ครั้งที่1	ครั้งที่1	ครั้งที่1	เฉลี่ย
0	0.00	0.00	0.00	0.00
10	0.00	0.00	0.00	0.00
20	0.00	0.00	0.00	0.00
30	0.24	0.47	0.18	0.30
40	1.94	2.07	1.97	1.99
50	2.83	3.30	2.68	2.94
60	3.52	6.70	4.11	4.78
70	6.20	6.24	5.90	6.11
80	6.13	5.80	6.02	5.98
90	4.94	5.90	6.13	5.66
100	5.04	5.83	5.98	5.62

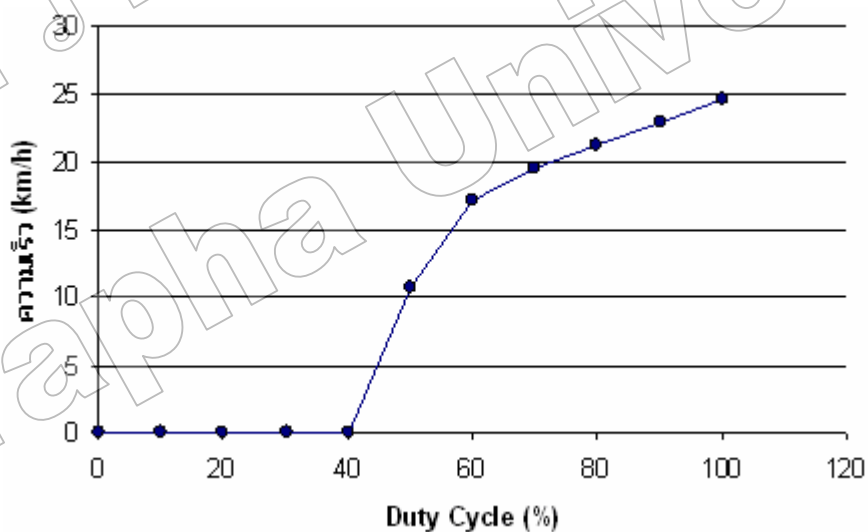
ตารางที่ 4.5 การวัดความเร็วเข้ามอเตอร์เทียบกับ Duty Cycle ของสัญญาณ PWM ผู้ขับขึ้นน้ำหนัก 55 กิโลกรัม

Duty Cycle (%)	เวลา (s)				ความเร็ว m/s	ความเร็ว km/h
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
50	5.37	5.13	4.85	5.12	2.98	10.76
60	3.10	3.47	3.04	3.20	4.77	17.20
70	2.84	2.88	2.75	2.82	5.41	19.51
80	2.54	2.59	2.64	2.59	5.90	21.27
90	2.38	2.43	2.41	2.41	6.36	22.90
100	2.25	2.22	2.25	2.24	6.83	24.59

หมายเหตุ ตารางที่ 4.4 วัดกระแสโดยใช้แอมมิเตอร์ต่ออนุกรมกับมอเตอร์ ตารางที่ 4.5 วัดความเร็วโดยการจับเวลาขณะที่จักรยานวิ่งผ่านระยะทาง 15.3 เมตร

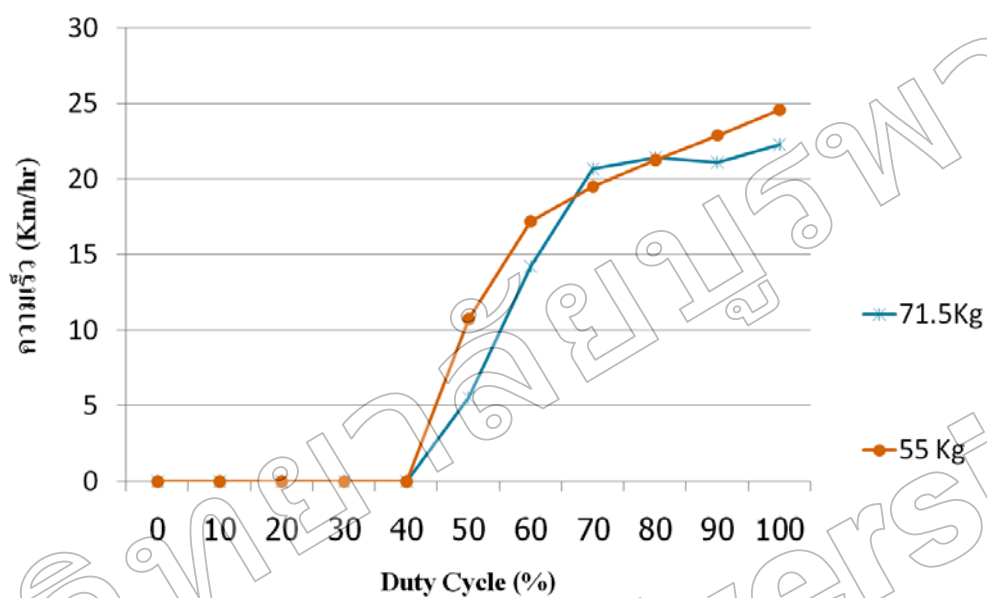


รูปที่ 4.10 กราฟแสดงกระแสและ Duty Cycle เมื่อมีผู้ขี่น้ำหนัก 55 กิโลกรัม

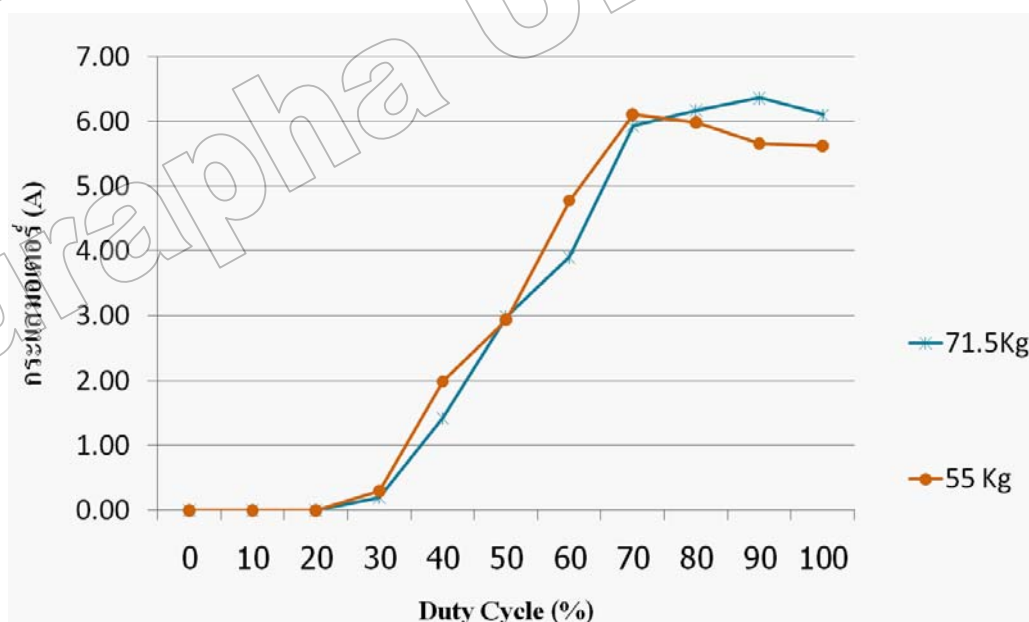


รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความเร็วและ Duty Cycle เมื่อมีผู้ขี่น้ำหนัก 55 กิโลกรัม

จากการทดสอบจักรยานโดยมีผู้ขี่น้ำหนัก 55Kg และ 71.5Kg ที่ Duty Cycle เดียวกัน รถจักรยานจะวิ่งด้วยความเร็วสูงสุดต่างกัน กระแสไหลเข้ามอเตอร์ก็ต่างกันด้วย ผู้ขี่น้ำหนักมาก กระแสที่ใช้ขับเคลื่อนมอเตอร์ก็มากตาม แต่ความเร็วจะได้น้อยกว่าผู้ขี่น้ำหนักน้อย ความเร็วของจักรยานไฟฟ้าแปรผกผันกับน้ำหนักของผู้ขี่ และกระแสที่ใช้ขับเคลื่อนมอเตอร์แปรผันตามน้ำหนักของผู้ขี่ ในช่วงเวลาเริ่มวิ่งของจักรยาน จะมีความเร่ง มอเตอร์จะมีแรงบิดสูง กระแสของมอเตอร์จะสูง

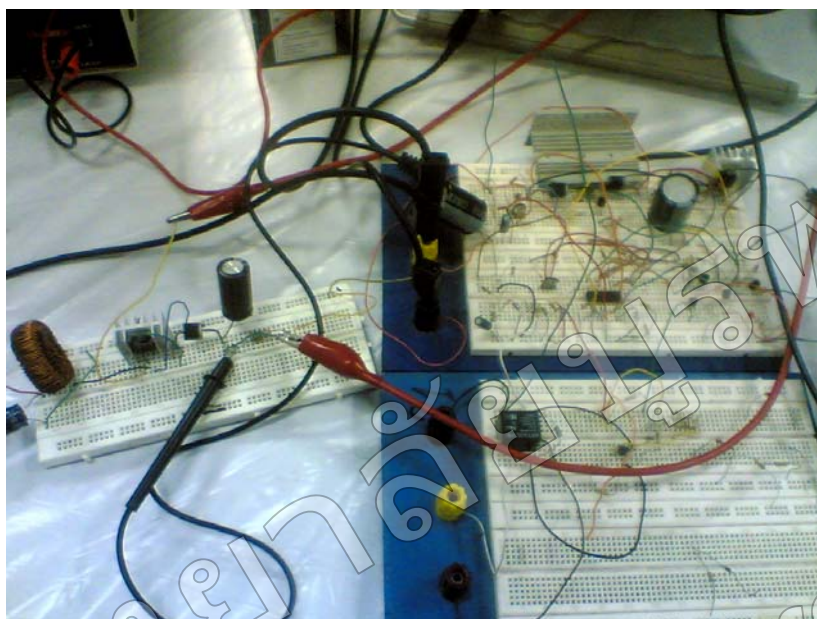


รูปที่ 4.12 กราฟเปรียบเทียบความเร็วและ Duty Cycle เมื่อผู้ขับขี่น้ำหนัก 71.5 และ 55 กิโลกรัม

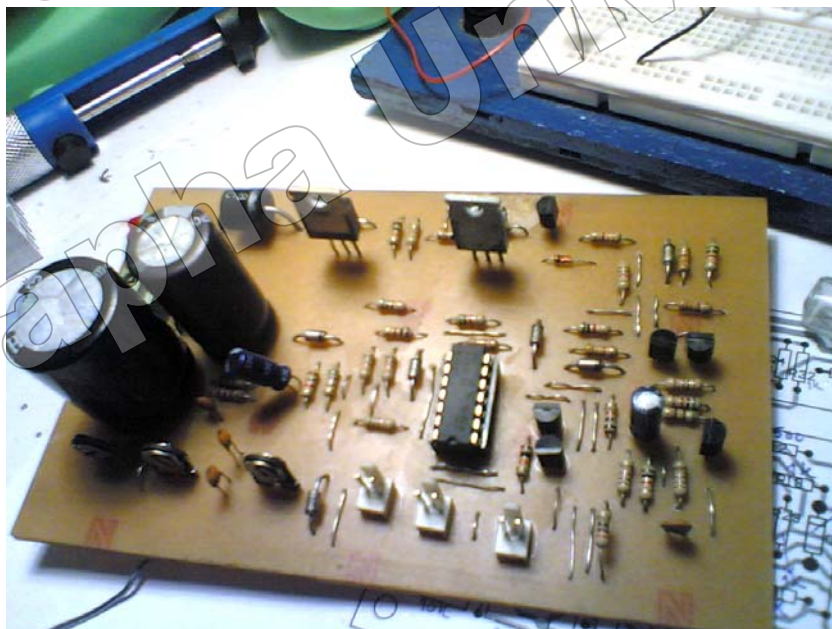


รูปที่ 4.13 กราฟเปรียบเทียบกระแสและ Duty Cycle เมื่อผู้ขับขี่น้ำหนัก 71.5 และ 55 กิโลกรัม

4.2 การทดสอบการชาร์จแบตเตอรี่

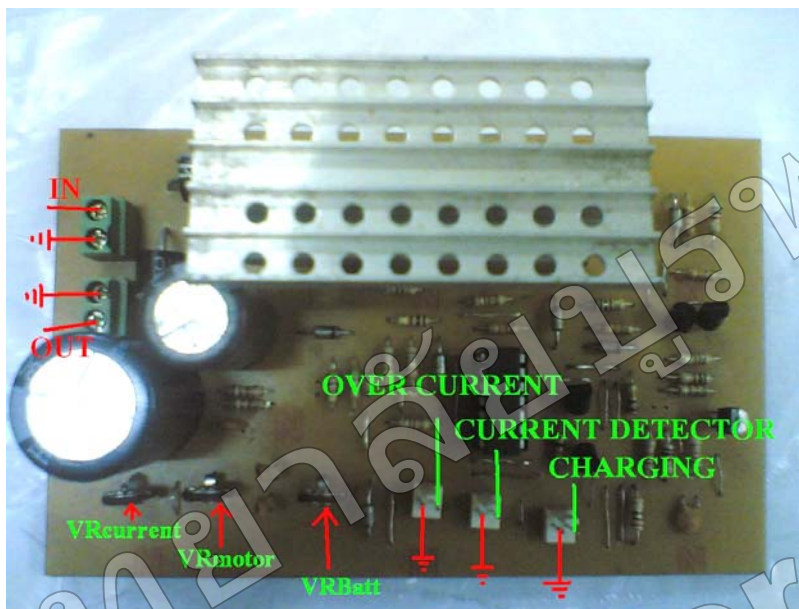


รูปที่ 4.14 ทดลองต่ออุปกรณ์ตามวงจรที่ออกแบบไว้ลง Proto Board



รูป 4.15 ลงอุปกรณ์ต่างๆ บนแผ่นปริ้นท์

การทดสอบเริ่มจากทดสอบวงจรควบคุมการชาร์จแบตเตอรี่ โดยต่อลง Proto Board แล้วจ่ายแรงดันจากแหล่งจ่าย Power Supply (ดูรูปที่ 4.14) จากนั้นนำจากรยานมาต่อและทดลองโดยการปั่นอยู่

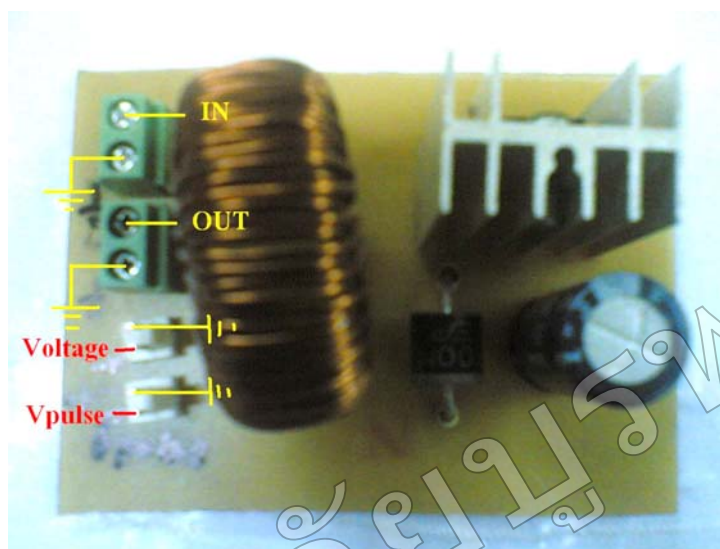


รูปที่ 4.16 วงจรชาร์จแบตเตอรี่

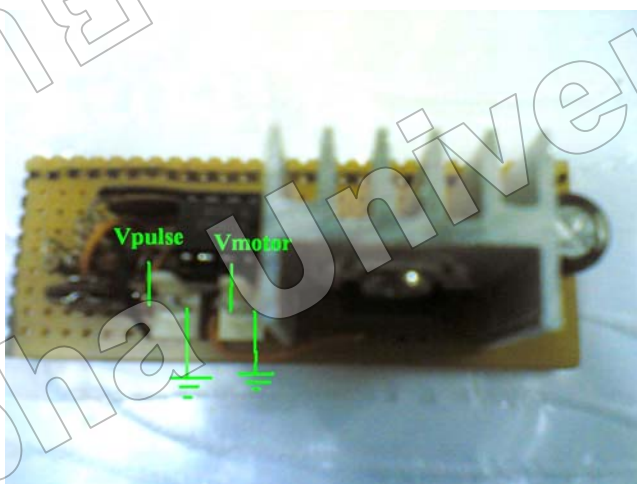
จากรูปที่ 4.16 แสดงวงจรชาร์จแบตเตอรี่ ขั้วต่อ OVER CURRENT, CURRENT DETECTOR, CHARGING คือ ขั้วต่อหลอด LED แสดงกระแสวิก, ขั้วต่อไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อแสดงกระแส, และ ขั้วต่อหลอด LED แสดงสถานะกำลังชาร์จ ตามลำดับ สำหรับ VRcurrent, VRmotor, VRbatt เป็นตัวต้านทานปรับค่าได้ R26 R2 และ R3 ตามลำดับ (ดูรูปที่ 3.23) ส่วน IN และ OUT คือ แรงดันเข้าวงจรชาร์จแบตเตอรี่ และ แรงดันออกเพื่อชาร์จให้กับแบตเตอรี่ ตามลำดับ

รูปที่ 4.17 แสดงวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ IN คือ ขั้วต่อกับมอเตอร์ โดยรับแรงดันที่ได้จากมอเตอร์ขณะที่ทำงานเป็นเจนเนอเรเตอร์ OUT คือ ขั้วต่อไปยัง IN ของวงจรชาร์จแบตเตอรี่ (ดูรูปที่ 4.16) Voltage คือ ขั้วที่วัดแรงดันออกจากวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ และ Vpulse คือ ขั้วที่รับสัญญาณพัลส์ (Pulse) จากวงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์ (ดูรูปที่ 4.18)

รูปที่ 4.18 เป็นวงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์ ที่จะนำมาควบคุมวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ Vpulse เป็นขั้วที่จ่ายสัญญาณพัลส์ให้กับวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ (ดูรูปที่ 4.17) และ Vmotor เป็นขั้วต่อไฟเลี้ยงที่ได้จากมอเตอร์ขณะทำงานเป็นเจนเนอเรเตอร์

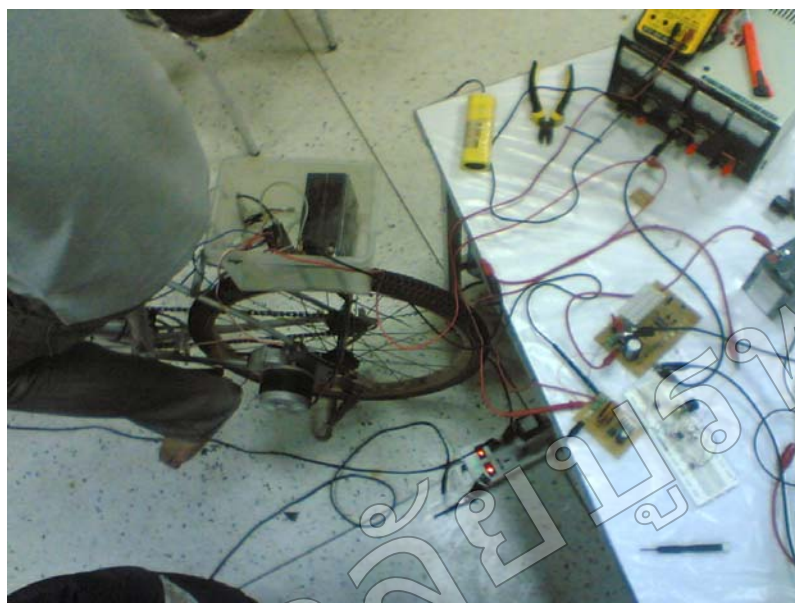


รูปที่ 4.17 วงจรพัลส์คอนเวอร์เตอร์



รูปที่ 4.18 วงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์

การทดสอบการชาร์จแบตเตอรี่ จะต้องวงจรชาร์จแบตเตอรี่และวงจรพัลส์คอนเวอร์เตอร์เข้าด้วยกัน จ่ายไฟเข้าวงจรพัลส์คอนเวอร์เตอร์โดยการปั่นจักรยาน เพื่อให้มอเตอร์ทำงานเป็นเจนเนอเรเตอร์กำเนิดไฟฟ้า โดยทำการปั่นอยู่กับที่ (ดูรูปที่ 4.19) และวัดค่าแรงดันที่ออกจากมอเตอร์ แรงดันที่ออกจากวงจรพัลส์คอนเวอร์เตอร์ และกระแสที่ไหลเข้าแบตเตอรี่ เพื่อดูประสิทธิภาพการทำงานของวงจรพัลส์คอนเวอร์เตอร์ จากนั้นก็จะทดลองโดยการปั่นแบบเคลื่อนที่ (ดูรูปที่ 4.24) แล้ววัดค่ากระแสที่ไหลเข้าแบตเตอรี่ เพื่อดูประสิทธิภาพการทำงานของวงจรชาร์จแบตเตอรี่ในขณะที่ปั่นจักรยานเคลื่อนที่



รูปที่ 4.19 ประกอบวงจร และทดสอบโดยการปั่นด้วยเท้า แบบอยู่กับที่



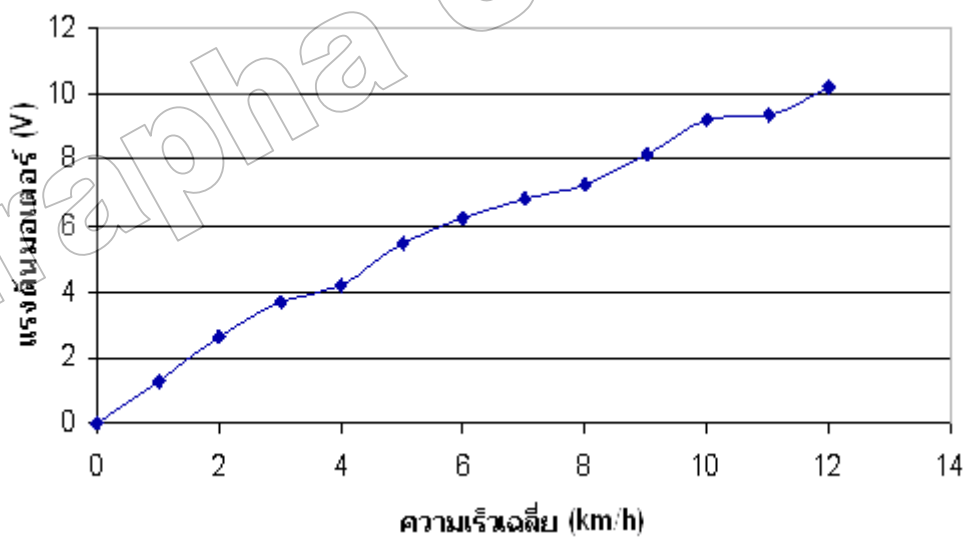
รูปที่ 4.20 เครื่องตรวจวัดความเร็วจักรยาน

4.2.1 การทดลองการชาร์จแบตเตอรี่ด้วยการปั่นด้วยเท้า

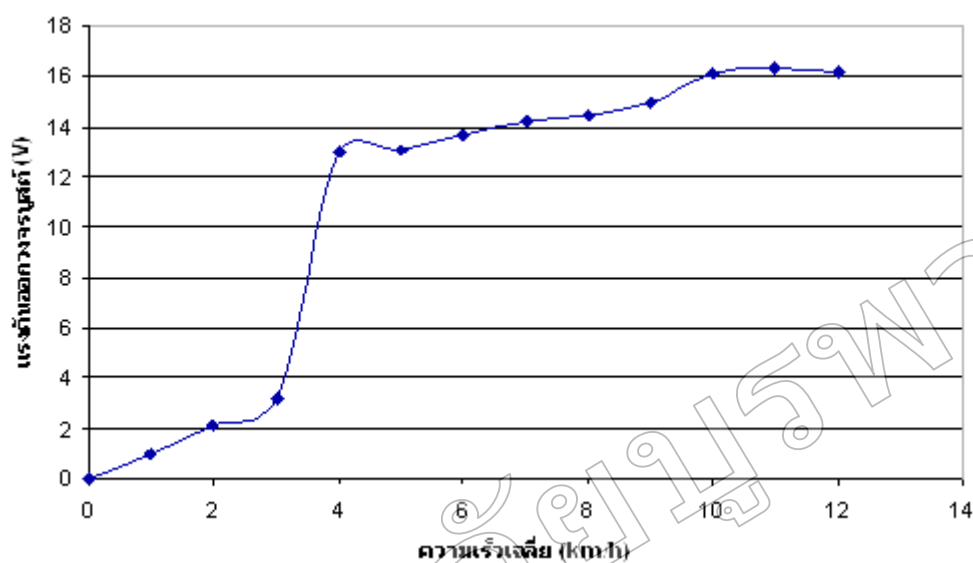
- 1) ทำการทดลองโดยการปั่นอยู่กับที่

ตารางที่ 4.6 การทดสอบการชาร์จแบตเตอรี่ด้วยการปั่นด้วยเท้า แบบอยู่กับที่

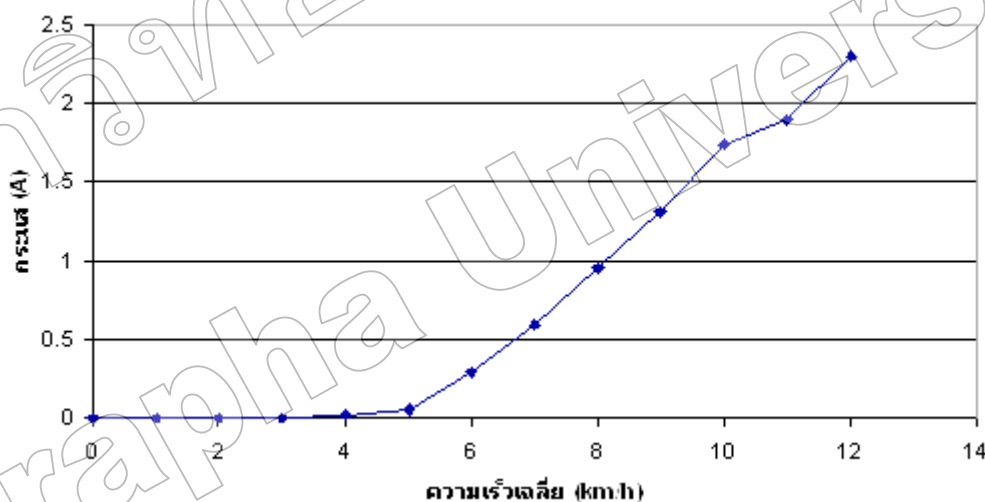
ความเร็วเฉลี่ย (km/h)	แรงดันออกมอเตอร์ (V)	แรงดันออกวงจรบูสต์ (V)	กระแส (A)
0	0.00	0.00	0.00
1	1.30	1.00	0.00
2	2.60	2.10	0.00
3	3.70	3.20	0.00
4	4.20	13.00	0.02
5	5.50	13.10	0.06
6	6.25	13.70	0.29
7	6.80	14.20	0.59
8	7.25	14.40	0.95
9	8.15	15.00	1.31
10	9.20	16.10	1.74
11	9.40	16.30	1.90
12	10.25	16.15	2.30



รูปที่ 4.21 กราฟแสดงแรงดันมอเตอร์และความเร็วเฉลี่ย



รูปที่ 4.22 กราฟแสดงแรงดันออกจากรูสเตอร์คอนเวอร์เตอร์และความเร็วเฉลี่ย



รูปที่ 4.23 กราฟแสดงกระแสที่เข้าแบตเตอรี่และความเร็วเฉลี่ย

จะเห็นว่า การทำงานของวงจรจะเริ่มชาร์จที่แรงดันออกจากรูสเตอร์คอนเวอร์เตอร์ มากกว่า 13.5V และจะเริ่มชาร์จที่ความเร็ว ประมาณ 4 km/h โดยปกติที่ความเร็ว 4 km/h จะได้แรงดันจากมอเตอร์ ประมาณ 4.2V จะนำแรงดันนี้ไปชาร์จแบตเตอรี่ไม่ได้ แต่เนื่องจากผ่านวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ที่แปลงแรงดันให้เป็น 13.5V ป้อนเข้าวงจรชาร์จแบตเตอรี่ สามารถชาร์จแบตเตอรี่ได้

จากการทดลองแสดงให้เห็นว่า วงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ สามารถเพิ่มขีดความสามารถของการชาร์จแบตเตอรี่ได้ โดยป้อนเข้าที่ความเร็วประมาณ 4 km/h ก็สามารถชาร์จแบตเตอรี่ได้แล้ว

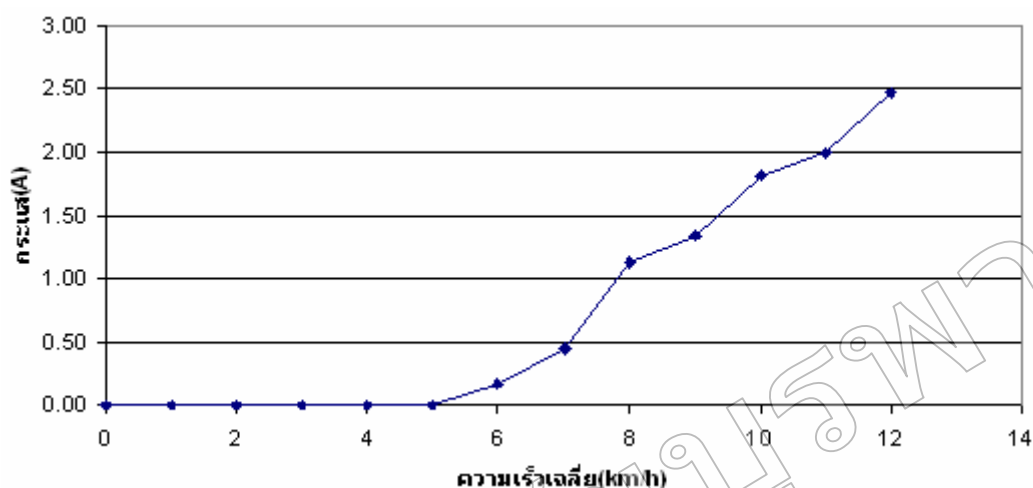
2) ทำการทดลองโดยปั่นเคลื่อนที่ และมีผู้ขี่ (น้ำหนัก 73 กิโลกรัม)



รูปที่ 4.24 การทดสอบการชาร์จแบตเตอรี่โดยการปั่นด้วยเท้า แบบมีผู้ขี่

ตารางที่ 4.7 การทดสอบการชาร์จแบตเตอรี่โดยการปั่นด้วยเท้า แบบมีผู้ขี่

ความเร็วเฉลี่ย (km/h)	กระแส (A)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0	0.00	0.00	0.00	0.00
1	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.00	0.00	0.00	0.00
3	0.00	0.00	0.00	0.00
4	0.00	0.00	0.00	0.00
5	0.00	0.00	0.00	0.00
6	0.15	0.17	0.18	0.17
7	0.42	0.43	0.51	0.45
8	0.84	1.74	0.83	1.14
9	1.26	1.32	1.43	1.34
10	1.73	1.89	1.83	1.82
11	1.98	2.03	1.99	2.00
12	2.52	2.44	2.45	2.47



รูปที่ 4.25 กราฟแสดงกระแสที่เข้าแบตเตอรี่และความเร็วเฉลี่ย เมื่อมีผู้ขับขี่

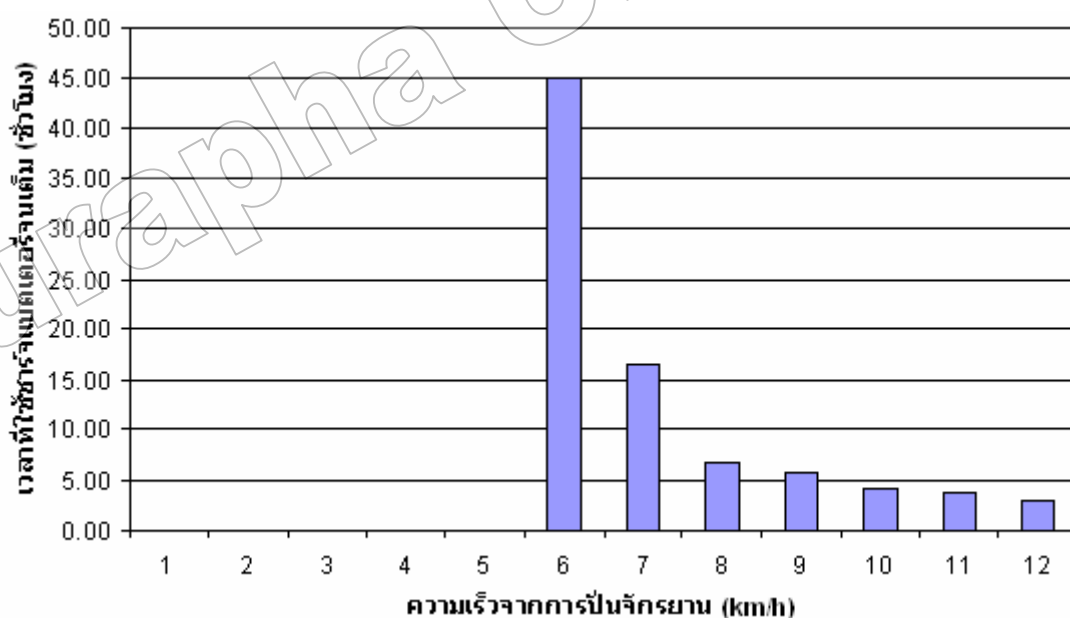
เมื่อปั่นจักรยานเคลื่อนที่เพื่อชาร์จแบตเตอรี่ การชาร์จจะเริ่มทำงานที่ความเร็วมากกว่า 5 km/h และความเร็วประมาณ 12 km/h หลอด LED D17 (ดูรูปที่ 3.23) ของวงจรชาร์จแบตเตอรี่ จะเตือนว่า กระแสเกิน ทำให้วงจรส่งผ่านกระแสที่เกินลงกราวด์ จำกัดกระแสเพื่อป้องกันการเสื่อมสภาพของ แบตเตอรี่

จากการชาร์จแบตเตอรี่ โดยการปั่นจักรยานเคลื่อนที่ พบว่า เมื่อปั่นที่ความเร็ว 5 ถึง 7 กิโลเมตรต่อชั่วโมง จักรยานมีความฝืดไม่มากหรือแทบไม่มีเลย แต่เมื่อปั่นเร็วขึ้นตั้งแต่ประมาณ 7 กิโลเมตรต่อชั่วโมงเป็นต้นไป จักรยานก็จะเริ่มฝืดมากขึ้นตามความเร็วที่เพิ่มขึ้น และต้องใช้แรงมากขึ้น ด้วย และเมื่อมีไฟเตือนว่ากระแสเกิน จักรยานก็จะหนืดมากที่สุด แทบจะไม่สามารถปั่นต่อไปได้

การหาเวลาที่ใช้ชาร์จแบตเตอรี่จนเต็ม ใช้การคำนวณ โดยคิดจากแบตเตอรี่ที่ถูกชาร์จ 1 ก้อน ขนาด 12V จ่ายกระแสต่อเนื่องได้ 7.5A ได้ 1 ชั่วโมง ทำการชาร์จแบตเตอรี่แบบเดียวกันที่หมดพลังงาน แล้ว ถ้าชาร์จด้วยกระแส 7.5A ต่อเนื่อง ต้องใช้เวลา 1 ชั่วโมง จึงจะเต็ม ในการคำนวณจะชาร์จแบตเตอรี่ ด้วยกระแสต่างๆ ในช่วงความเร็วที่ต่างกัน แสดงได้ในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ของความเร็วของการปั่นจักรยาน กระแสที่ได้ และเวลาที่ใช้ชาร์จ
แบตเตอรี่จนเต็ม แบบมีผู้ขับขี่

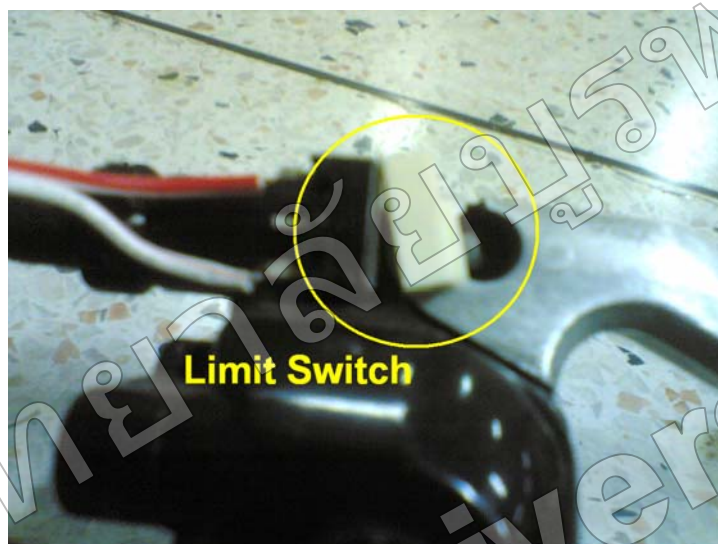
ความเร็วจากการปั่น จักรยาน (km/h)	กระแสที่ได้ (A)	เวลาที่ใช้ชาร์จแบตเตอรี่จนเต็ม (ชั่วโมง)
0	0.00	0.00
1	0.00	0.00
2	0.00	0.00
3	0.00	0.00
4	0.00	0.00
5	0.00	0.00
6	0.17	45.00
7	0.45	16.54
8	1.14	6.60
9	1.34	5.61
10	1.82	4.13
11	2.00	3.75
12	2.47	3.04



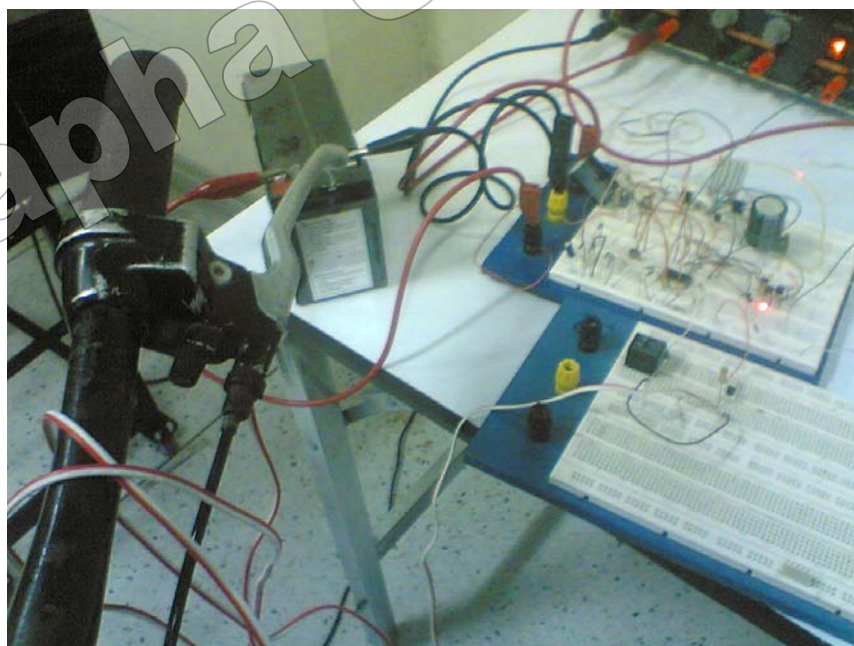
รูปที่ 4.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความเร็วของการปั่นจักรยาน และเวลาที่ใช้ชาร์จ
แบตเตอรี่จนเต็ม แบบมีผู้ขับขี่

4.2.2 การทดลองการชาร์จแบตเตอรี่ด้วยการเบรกรถจักรยาน

การชาร์จแบตเตอรี่ด้วยการเบรกรถจักรยาน ใช้วงจรชาร์จวงจรเดียวกันกับวงจรชาร์จแบตเตอรี่ในหัวข้อที่ 3.2.2 มีสวิตช์ติดอยู่ที่เบรกมือซ้ายและขวา และมีวงจรรีเลย์เพื่อทำการสลับการทำงานจากวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์เป็นวงจรชาร์จแบตเตอรี่โดยทันทีทันใด (ดูหัวข้อที่ 3.4)

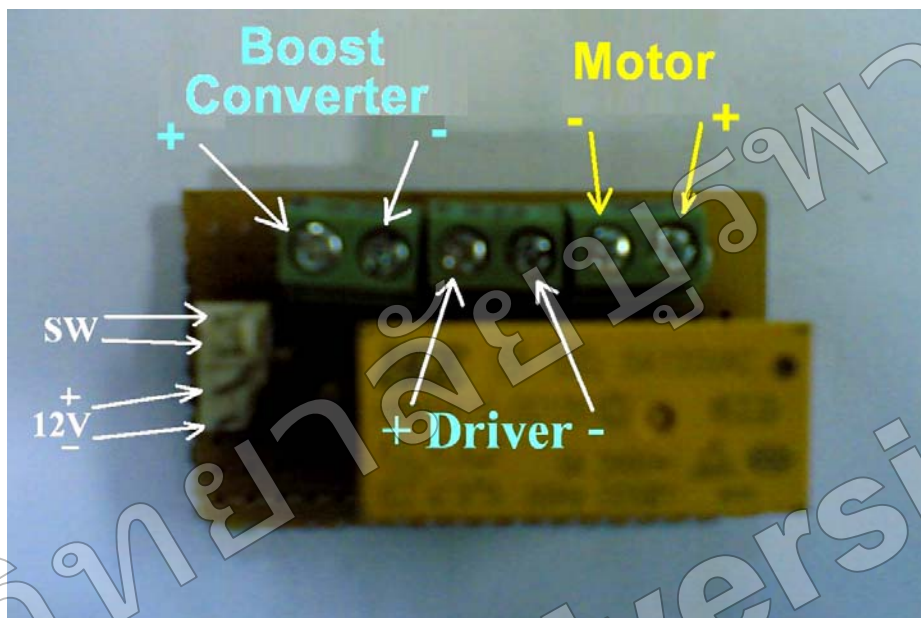


รูปที่ 4.27 การต่อ Limit Switch เข้าสู่เบรกมือ



รูปที่ 4.28 การทดลองใช้การเบรกรถจักรยานกับวงจรชาร์จแบตเตอรี่

การทดลองเริ่มจากการทดสอบวงจรที่ได้ออกแบบไว้ โดยต่ออุปกรณ์ต่างๆ เพื่อทดสอบใน Proto Board (ดูรูปที่ 4.28) เมื่อวงจรทำงานได้ถูกต้อง นำอุปกรณ์ต่างๆ ประกอบลงแผ่นปริ้นท์สำเร็จรูป (ดูรูปที่ 4.29)



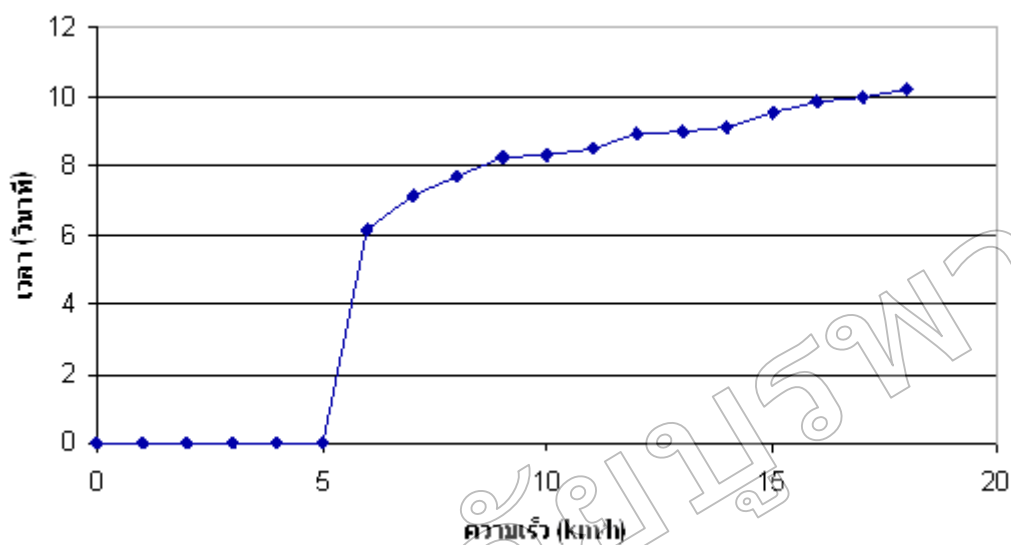
รูปที่ 4.29 วงจรรีเลย์ที่ใช้ในการสลับการทำงานระหว่างวงจรขับมอเตอร์และวงจรชาร์จแบตเตอรี่

จากรูปที่ 4.29 เป็นวงจรรีเลย์ที่ใช้ในการสลับการทำงานระหว่างวงจรขับมอเตอร์และวงจรชาร์จแบตเตอรี่ ที่ประกอบลงในแผ่นปริ้นท์ SW คือขั้วต่อของลิมิตสวิตช์ที่ติดอยู่ในเบรกมือ, 12V คือไฟเลี้ยงรีเลย์, Boost Converter คือขั้วสายไฟต่อไปยังวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์, Motor คือขั้วสายไฟต่อไปยังมอเตอร์ และ Driver คือขั้วสายไฟต่อไปยังวงจรขับมอเตอร์

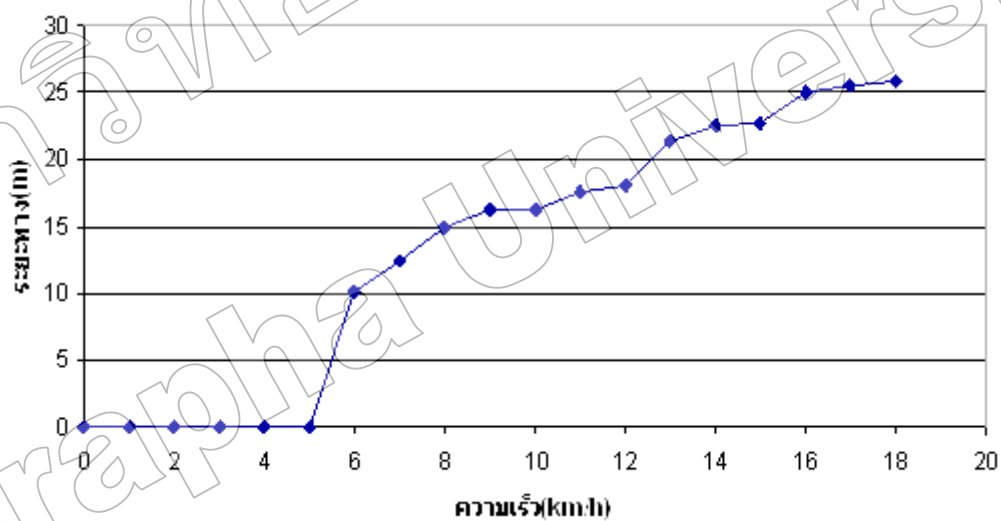
การทดสอบการชาร์จแบตเตอรี่ด้วยการเบรก ทดสอบโดยการขี่ด้วยความเร็วต่างๆ ที่คงที่ แล้วเริ่มกำเบรกมือ ลิมิตสวิตช์ติดไว้กับเบรกมือจะทำงาน และมีการสลับการทำงานจากวงจรขับมอเตอร์ไปยังวงจรชาร์จแบตเตอรี่ โดยไม่มีการเบรกทางกล แล้วปล่อยให้รถชะลอตัวจนรถหยุดนิ่ง จับเวลาและวัดกระแสเริ่มต้นที่ได้จากการชาร์จแบตเตอรี่ขณะเริ่มเบรกจนกระทั่งไม่มีการชาร์จแบตเตอรี่ ดูสถานการณ์ชาร์จได้จากการติดและดับของหลอด LED D16 (ดูรูปที่ 3.23)

ตารางที่ 4.9 การทดสอบการชาร์จด้วยการเบรกแบบคืนพลังงาน

ความเร็วเฉลี่ย(km/h)	กระแสเริ่มต้น (A)	เวลาขณะชาร์จ (วินาที)	ระยะที่ใช้ในการเบรก (m)
0	0.00	0.00	0.00
1	0.00	0.00	0.00
2	0.00	0.00	0.00
3	0.00	0.00	0.00
4	0.00	0.00	0.00
5	0.00	0.00	0.00
6	0.54	6.15	10.10
7	0.64	7.12	12.50
8	0.93	7.68	15.00
9	1.27	8.27	16.20
10	1.63	8.31	16.30
11	1.72	8.52	17.50
12	2.09	8.94	18.00
13	2.25	8.97	21.30
14	2.36	9.12	22.50
15	2.52	9.52	22.70
16	2.60	9.83	25.00
17	2.62	9.98	25.50
18	2.65	10.21	25.80



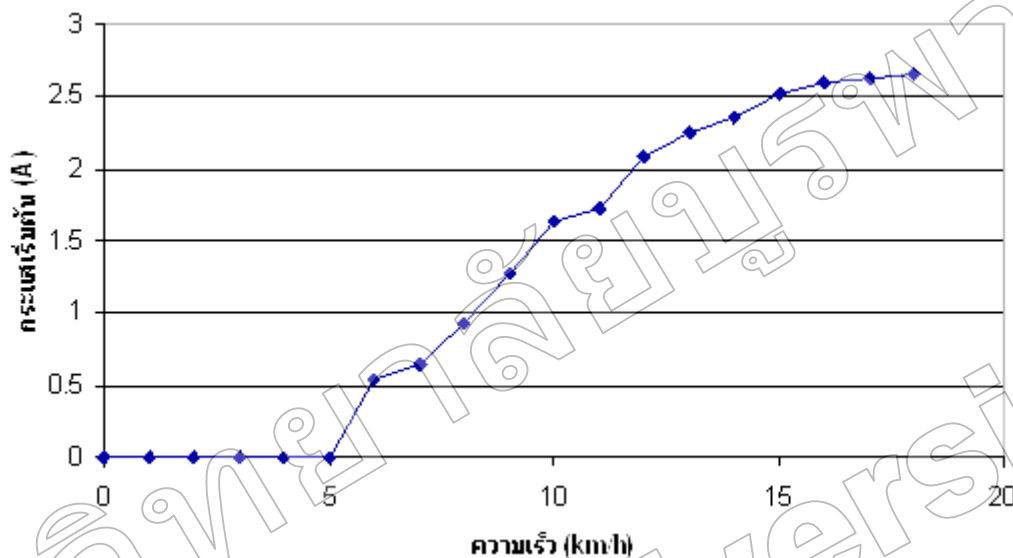
รูปที่ 4.30 กราฟแสดงความเร็วและเวลาขณะชาร์จของการชาร์จด้วยการเบรกแบบคืนพลังงาน



รูปที่ 4.31 กราฟแสดงความเร็วและระยะที่ใช้ในการเบรกของการชาร์จด้วยการเบรกแบบคืนพลังงาน

จากรูปที่ 4.30 แสดงว่าจะมีการเบรกแล้วชาร์จแบตเตอรี่ได้ จักรยานต้องขับเคลื่อนด้วยความเร็วตั้งแต่ 5 km/h ขึ้นไป เวลาที่ใช้ในการชะลอตัวของรถก่อนจะหยุดนิ่งจะขึ้นอยู่กับความเร็วที่แล่นก่อนที่จะเบรก แต่เวลาจะเริ่มคงตัวที่ความเร็วประมาณ 12 -18 km/h เป็นเพราะว่าช่วงเริ่มเบรกที่ความเร็วนี้ กระแสจะเกิน และรถจะถูกหน่วงอย่างมากในตอนเริ่มเบรก เพราะมีการส่งผ่านกระแสกราวด์ จนกระทั่งกระแสไม่เกิน การชาร์จแบตเตอรี่ก็ดำเนินไปจนหยุดในที่สุด

จากรูปที่ 4.31 ระยะทางของการชะลอตัวของรถจักรยานนั้น ขึ้นกับความเร็วของรถที่แล่นมา และเวลาก่อนที่รถจะหยุด แต่การทดลองนี้ไม่ได้ใช้เบรกทางกล แต่ใช้การชะลอตัวของรถ ขณะเคลื่อนที่ ด้วยความเร็วต่างๆ จนรถหยุด แต่การใช้งานจริงๆ จะใช้เบรกทางกลด้วย จะทำให้เวลาในการชาร์จลดลง ปริมาณพลังงานที่ได้ก็จะลดลงด้วย

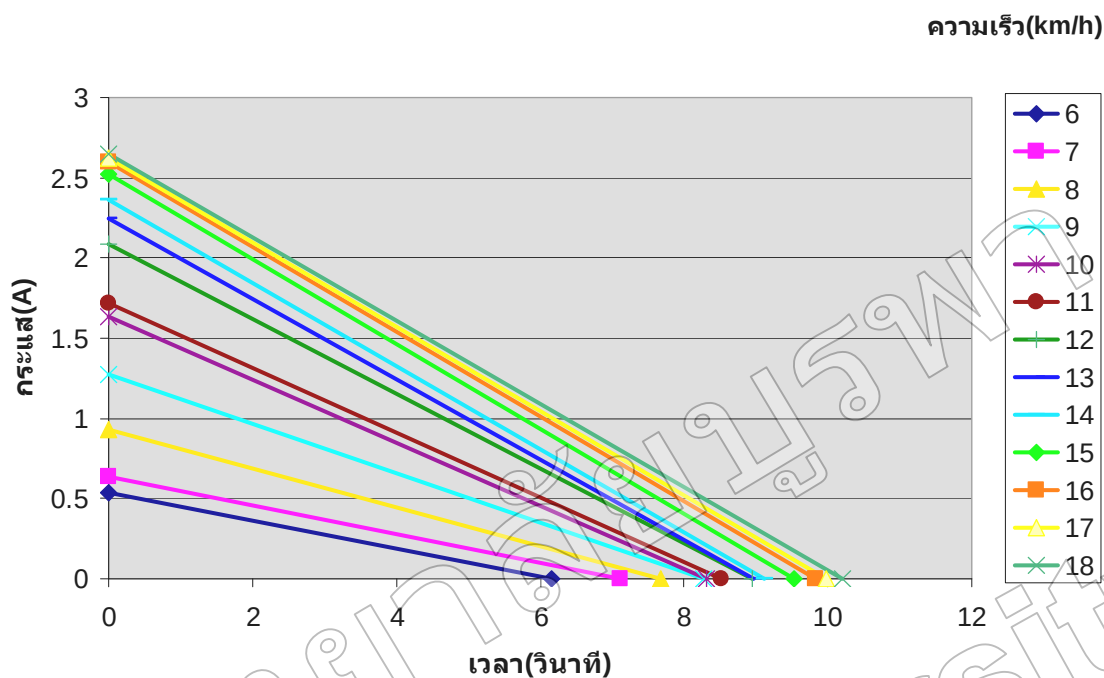


รูปที่ 4.32 กราฟแสดงความเร็วและกระแสเริ่มต้นของการชาร์จด้วยการเบรกแบบคืนพลังงาน

จากรูปที่ 4.32 การชาร์จด้วยการเบรกจะเริ่มทำงานประมาณที่ 5 km/h เมื่อความเร็วเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ กระแสเริ่มต้นจะเพิ่มขึ้น และมีแนวโน้มที่จะเข้าสู่สถานะคงตัวที่กระแสประมาณ 2.6 A เนื่องจากมีการจำกัดกระแสในการชาร์จแบตเตอรี่

การคำนวณพลังงานที่ได้จากการเบรก จะคำนวณจากการทดลองโดยอาศัยตัวแปรกระแสเริ่มต้นและเวลาที่ทำการชาร์จให้กับแบตเตอรี่ โดยกระแสนั้นจะลดลงเป็นเชิงเส้นจากกระแสมากที่สุดขณะเริ่มชาร์จที่วินาทีที่ 0 และกระแสจะลดลงจนเป็นศูนย์ จากรูปที่ 4.33 ปริมาณกระแสที่ชาร์จเข้าแบตเตอรี่นั้นคือพื้นที่ใต้กราฟของแต่ละช่วงความเร็ว หรือมีค่าเท่ากับ ค่ากระแสคูณด้วยเวลาแล้วหารสอง

จากการเปรียบเทียบนี้ ทำให้สามารถประมาณพลังงานที่ได้จากการเบรกโดยการชะลอตัวของรถ และคำนวณได้ดังตารางที่ 4.10



รูปที่ 4.33 กราฟแสดงกระแสที่ลดลงเป็นเชิงเส้นและเวลาที่ไ้จากการเบรกคืนพลังงาน

ตารางที่ 4.10 เป็นตารางแสดงความสัมพันธ์ของความเร็วเฉลี่ย กระแสเริ่มต้น เวลาขณะชาร์จ ปริมาณกระแสที่ได้ และ จำนวนครั้งของการเบรกแล้วชาร์จจนกว่าแบตเตอรี่เต็ม โดยปริมาณกระแสโดยเฉลี่ย คำนวณจากพื้นที่ใต้กราฟที่ความเร็วต่างๆ ของรูปที่ 4.33 ส่วนจำนวนครั้งของการเบรกแล้วชาร์จจนกว่าแบตเตอรี่เต็มนั้น คำนวณได้โดยคิดจากแบตเตอรี่ที่ถูกชาร์จ 1 ก้อน ขนาด 12V จ่ายกระแสต่อเนื่องได้ 7.5A ได้ 1 ชั่วโมง ทำการชาร์จแบตเตอรี่แบบเดียวกันนี้ที่หมดพลังงานแล้ว ถ้าชาร์จด้วยกระแส 7.5A ต่อเนื่อง ต้องใช้เวลา 1 ชั่วโมง จึงจะเต็ม ในการคำนวณจะชาร์จแบตเตอรี่ด้วยปริมาณกระแสเฉลี่ย ที่ความเร็วต่างๆ ตั้งแต่ 6 km/h ขึ้นไป แสดงได้ในตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ของความเร็วเฉลี่ย กระแสเริ่มต้น เวลาขณะชาร์จ ปริมาณกระแสที่ได้ และ จำนวนครั้งของการเบรกแล้วชาร์จจนกว่าแบตเตอรี่เต็ม

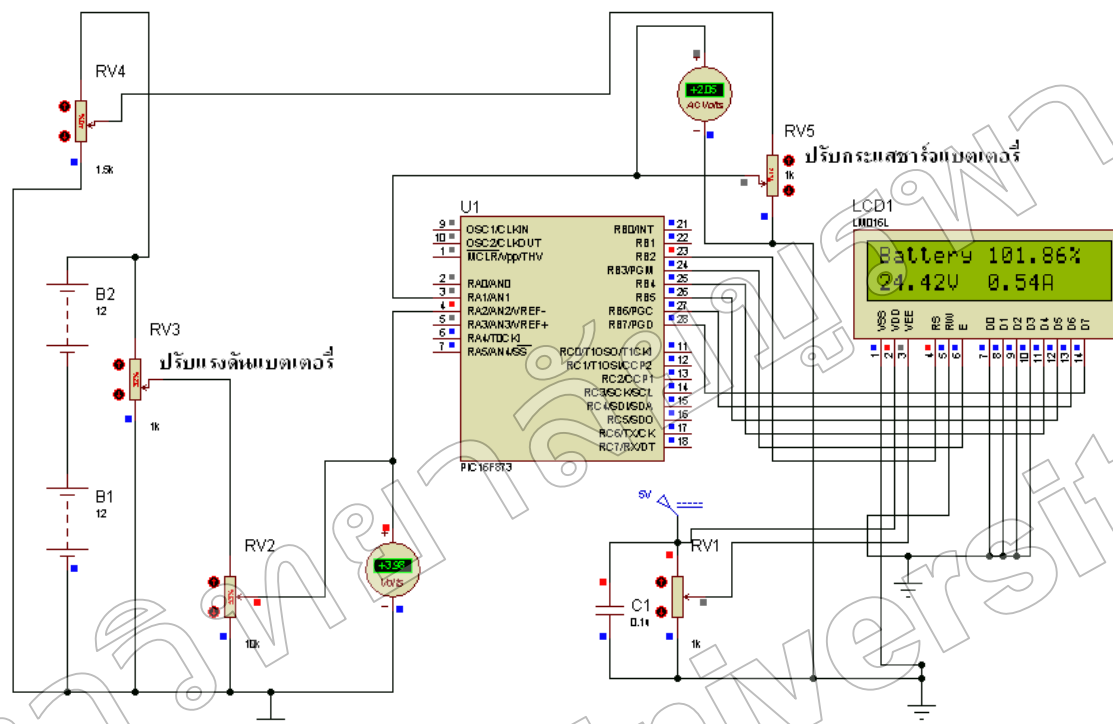
ความเร็วเฉลี่ย (km/h)	กระแสเริ่มต้น (A)	เวลาขณะชาร์จ (วินาที)	ปริมาณกระแสโดยเฉลี่ย (A/h)	จำนวนครั้งของการเบรกแล้วชาร์จจนกว่าแบตเตอรี่เต็ม
0	0.00	0.00	0.000000	0.00
1	0.00	0.00	0.000000	0.00
2	0.00	0.00	0.000000	0.00
3	0.00	0.00	0.000000	0.00
4	0.00	0.00	0.000000	0.00
5	0.00	0.00	0.000000	0.00
6	0.54	6.15	0.000461	16260.16
7	0.64	7.12	0.000633	11850.42
8	0.93	7.68	0.000992	7560.48
9	1.27	8.27	0.001459	5141.44
10	1.63	8.31	0.001881	3986.62
11	1.72	8.52	0.002035	3684.90
12	2.09	8.94	0.002595	2890.08
13	2.25	8.97	0.002803	2675.59
14	2.36	9.12	0.002989	2508.92
15	2.52	9.52	0.003332	2250.90
16	2.6	9.83	0.003550	2112.84
17	2.62	9.98	0.003632	2065.20
18	2.65	10.21	0.003758	1995.82

4.3 การทดสอบวงจรแสดงผลแรงดันของแบตเตอรี่

4.3.1 การจำลองวงจรและทดสอบ

การแสดงผลบนจอ LCD ใช้ PIC16F873 เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ชนิด 8 บิต มี 28 ขา CMOS FLASH และมี A/D ในตัว ทดสอบโดยจำลองวงจรโดยใช้โปรแกรม Proteus ดังรูปที่ 4.34 ซึ่งแสดงค่าแรงดัน ค่าพลังงานแบตเตอรี่ และค่ากระแสขณะชาร์จแบตเตอรี่

โปรแกรมที่ใช้เขียนภาษาซี คือโปรแกรม MikroC เป็นคอมไพเลอร์ที่มีฟังก์ชันในการทำงานมาก และใช้งานง่าย (ดูในภาคผนวก)



รูปที่ 4.34 การทดสอบวงจรแสดงผลด้วยโปรแกรม Proteus

ผลการทดสอบ การจำลองการทำงานโดยโปรแกรม Proteus ได้แสดงผลออกมาเป็นตัวเลข สามารถปรับ RV2 และ RV3 เสมือนการเพิ่มหรือลดระดับของแรงดันแบตเตอรี่ และปรับ RV5 เสมือนปรับแรงดันที่นำมาประมวลผลเป็นค่ากระแส V_{cur} (ดูรูปที่ 3.30) แรงดันสองอย่างนี้ เป็นสัญญาณอนาล็อก นำสัญญาณดังกล่าวมาแปลงจากอนาล็อกเป็นดิจิตอล โดยตัวแปลงสัญญาณนี้อยู่ในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์

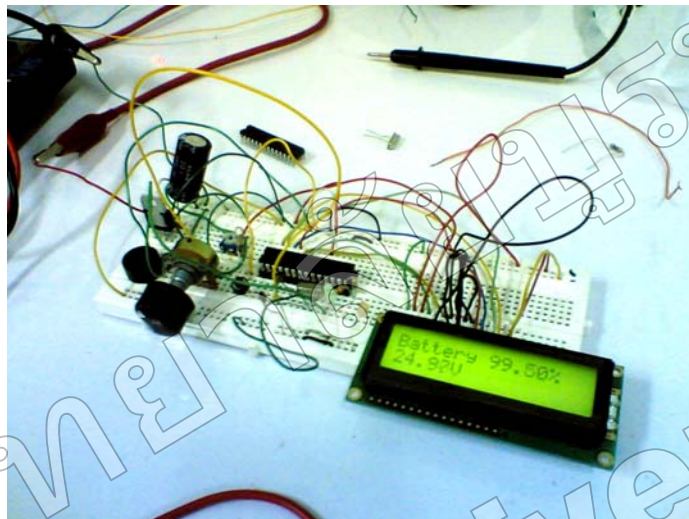
การจ่ายไฟเลี้ยง +5VDC ของไมโครคอนโทรลเลอร์ จะรับแรงดันของแบตเตอรี่ 12V นำมาแปลงให้เหลือ +5V โดยใช้ไอซีเรกูเลเตอร์ 7805 แล้วจ่ายให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์

ส่วนการแสดงผลนั้น ใช้จอ LDC ขนาด 16 ตัวอักษร 2 แถว มีไฟแสงสว่างในตัว

ผลการทดลอง เมื่อนำโค้ดโปรแกรมที่เขียนถูกต้อง มาใช้ควบคุมการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ ไมโครคอนโทรลเลอร์ก็ทำงานได้ไม่มีข้อผิดพลาด

4.3.2 การต่ออุปกรณ์จริงและทดสอบ

เป็นการทดสอบโดยการต่ออุปกรณ์ต่างๆ ในโปรโตบอร์ด เมื่อทำงานได้เหมือนกับการจำลองวงจร จึงประกอบลงในแผ่นปริ้นท์สำเร็จรูป จากนั้นนำมาทดสอบอีกครั้งหนึ่ง เมื่อทำงานได้ดังเดิม จึงประกอบลงกล่องและติดเข้าไปในจักรยาน ใช้เป็นหน้าปัดแสดงผลของจักรยาน



รูปที่ 4.35 การต่ออุปกรณ์จริงลง Proto Board เพื่อทำการทดสอบวงจร



รูปที่ 4.36 การทดสอบวงจรเมื่อลงอุปกรณ์บนแผ่นปริ้นท์เสร็จแล้ว



รูปที่ 4.37 วงจรแสดงผลประกอบใส่กล่อง เพื่อทำเป็นหน้าปัดแสดงผลจักรยานไฟฟ้า



รูปที่ 4.38 หน้าปัดแสดงผลของจักรยานไฟฟ้า

จากรูปที่ 4.38 เป็นหน้าปัดแสดงผลของจักรยานไฟฟ้า แสดงแรงดันของแบตเตอรี่ เป็นค่าเปอร์เซ็นต์และแรงดันจริง และแสดงค่ากระแสที่ชาร์จแบตเตอรี่ Over Current คือสัญญาณไฟแสดงขณะที่กระแสเกิน เป็นหลอด LED สีเขียว D17 (ดูรูปที่ 3.23), Charging คือสัญญาณไฟแสดงขณะที่มีการชาร์จ เป็นหลอด LED สีแดง D16 (ดูรูปที่ 3.23), ปุ่ม Light เป็นสวิตช์ปิดเปิดไฟของจอ LCD, Power On คือสัญญาณไฟแสดงสถานะพร้อมที่จะทำงาน, Charging On/Brake คือสัญญาณไฟแสดงการเปิดหรือปิดการชาร์จแบตเตอรี่ และการเบรก, ปุ่ม Display เป็นปุ่มเปิดการทำงานของจอ LCD, ปุ่ม Charge เป็นปุ่มเปิดการทำงานของระบบชาร์จแบตเตอรี่ และปุ่ม On Spin เป็นปุ่มที่ปิดการขับเคลื่อนแล้วเปิดการชาร์จแบตเตอรี่โดยการปั่น ส่วนวิธีการใช้งานจักรยานดูได้จากภาคผนวก ค

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

โครงการทางวิศวกรรมไฟฟ้านี้ สามารถทำให้การใช้พลังงานไฟฟ้าในจักรยานไฟฟ้ามีประสิทธิภาพขึ้น โดยนำเอาพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากการปั่นด้วยเท้า และพลังงานไฟฟ้าจากการไหลของจักรยาน เมื่อมีการเบรกหรือการชะลอความเร็วของรถจักรยาน โดยอาศัยกำลังจากแรงเฉื่อยของรถจักรยานและผู้ขับขี่ กลับคืนเข้าสู่แบตเตอรี่ ซึ่งอาศัยหลักการของมอเตอร์ ที่สามารถทำงานเป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้าและแหล่งกำเนิดไฟฟ้าได้

การออกแบบวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์สำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์ของจักรยานไฟฟ้า ใช้การขับเคลื่อนแบบสวิตชิง ใช้มอสเฟตเป็นอุปกรณ์ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ ใช้การสวิตชิงควบคุมโดยสัญญาณ PWM ซึ่งควบคุมดิวตี้ไซเคิล (Duty Cycle) โดยคันเร่งไฟฟ้าชนิด Hall Effect วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ใช้ ออปแอมป์ เป็นตัวกำเนิดสัญญาณ PWM สำหรับวงจรชาร์จแบตเตอรี่นั้น เป็นวงจรตรวจสอบเงื่อนไขแรงดันจากมอเตอร์ ขณะทำงานเป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้าจากการปั่นจักรยานด้วยเท้าเพื่อหมั่นมอเตอร์ โดยจะสามารถชาร์จได้ต้องปั่นมอเตอร์ให้มีแรงดันมากกว่า 13.5V ซึ่งเป็นการปั่นด้วยความเร็วประมาณ 14 km/h และมีวงจรจำกัดและรักษาระดับกระแสจากการชาร์จ เพื่อมิให้มีการอัดประจุเกินขอบเขตจากข้อกำหนดของแบตเตอรี่ ซึ่งจะทำให้แบตเตอรี่เสื่อมสภาพเร็ว นอกจากนี้ยังมีวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ ซึ่งทำหน้าที่แปลงแรงดันกระแสตรง ขึ้นจากแรงดันต่ำๆ ซึ่งทำให้ไม่ต้องปั่นจักรยานด้วยความเร็วมาก เพื่อชาร์จแบตเตอรี่ โดยปั่นที่ความเร็วน้อยกว่าเดิม ที่ ประมาณ 6 km/h ก็สามารถชาร์จประจุได้ และยังมีส่วนแสดงผล ซึ่งแสดงกระแสที่ชาร์จแบตเตอรี่ แรงดันของแบตเตอรี่ในขณะนั้น และร้อยละของพลังงานแบตเตอรี่

ส่วนการเบรกแบบพลังงานกลับคืนนั้น จะเป็นการกลับคืนพลังงานโดยใช้วงจรชาร์จแบตเตอรี่ที่ออกแบบไว้ มีสวิตช์สลับการทำงานระหว่างวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์กับวงจรชาร์จแบตเตอรี่ การเบรกแบบพลังงานกลับคืน จะใช้ได้ก็ต่อเมื่อผู้ขับขี่เริ่มกำเบรกมือเมื่อจะหยุดรถ ลดความเร็ว ลงเนิน ลงสะพาน หรือขณะที่จะเลี้ยวโค้ง

จากการศึกษาและทดลองพบว่า พลังงานที่ได้จากการชาร์จแบตเตอรี่ จะมากขึ้นขึ้นอยู่กับเวลาขณะชาร์จ และกระแสที่ใช้ในการชาร์จแบตเตอรี่ จากการทดลองการชาร์จแบตเตอรี่ด้วยการปั่นด้วยเท้า จะได้ปริมาณพลังงานมากกว่าการชาร์จแบตเตอรี่โดยใช้การเบรก เพราะว่าการปั่นด้วยเท้าสามารถปั่นได้อย่างต่อเนื่อง และสามารถกำหนดความเร็วในการปั่นได้ ส่วนการเบรกเป็นการชาร์จในช่วงเวลาสั้นๆ กระแสจะสูงเมื่อเริ่มเบรก เมื่อความเร็วรถลดลง กระแสก็จะลดลงด้วย ถือว่าการเบรกได้พลังงานกลับคืนน้อยมาก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสภาพถนนที่ใช้ขับขี่ด้วย

การชาร์จแบตเตอรี่จากการปั่นด้วยเท้า สามารถชาร์จได้โดยปั่นจักรยานที่ความเร็ว 6 km/h ขึ้นไป เมื่อถึงความเร็ว 12 km/h กระแสจะเริ่มเกินขอบเขตที่ตั้งไว้ เมื่อวงจรรักษาระดับกระแสทำงาน จะรู้สึกว่าการปั่นนั้นหนืดขึ้น เพราะมีการแบ่งกระแสลงกราวด์ ดังนั้น ช่วงความเร็วที่เหมาะสมในการปั่นคือ 6 -12 km/h ส่วนการเบรคนั้น เมื่อรถจักรยานแล่นมาด้วยความเร็วมากกว่า 12 km/h เมื่อทำการเบรคเพื่อชาร์จแบตเตอรี่ จะรู้สึกว่าการหน่วงให้หยุดอย่างรวดเร็ว เพราะวงจรรักษาระดับกระแสทำงานโดยการแบ่งกระแสลงกราวด์ เมื่อมีกระแสเกินขอบเขตที่ตั้งไว้ จากนั้นความหน่วงและความเร็วก็จะค่อยๆ ลดน้อยลง จนวงจรชาร์จแบตเตอรี่ไม่ทำงาน และจักรยานก็หยุดนิ่งในที่สุด

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 1 ควรที่จะไม่มีเสียงดังที่เกิดจากการขยับมอเตอร์ เพราะฉะนั้นควรปรับปรุงความถี่ของการสวิตชิงซึ่งจะทำให้ลดเสียงดังจากมอเตอร์
- 2 กระแสเริ่มต้นของมอเตอร์สูงมาก เพราะฉะนั้น ลายวงจรหรือสายไฟต้องใหญ่เพียงพอที่จะรองรับกระแสได้
- 3 วงจรชาร์จแบตเตอรี่ ควรจะชาร์จจากการปั่นด้วยเท้าได้ตั้งแต่ความเร็วมากกว่า 0 km/h หรือตั้งแต่ความเร็วจากจุดหยุดนิ่งขึ้นไป เพราะจะทำให้จักรยานไฟฟ้ามีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น
- 4 จักรยานควรมีระบบทดเกียร์ เพราะจะทำให้ได้ความเร็วเพิ่มขึ้น
- 5 มอสเฟตกำลัง และไดโอดกำลัง ต้องมีการการระบายความร้อนที่เพียงพอ เพราะอุณหภูมิมีผลต่อการนำกระแสของอุปกรณ์ดังกล่าว
- 6 ควรใช้มอเตอร์ชนิดที่กันน้ำได้
- 7 พัฒนาระบบควบคุมและแรงบิดในการ ขับเคลื่อนของมอเตอร์ ได้อย่างเหมาะสมกับความเร็วและภาระในการขับเคลื่อนนั้น ๆ
- 8 พัฒนาระบบควบคุมและจัดการพลังงานกลับคืนขณะทำการเบรค ชะลอตัว หรือลงเนิน มาทำการประจุแบตเตอรี่ได้อย่างเหมาะสม
- 9 ปรับปรุงโครงรถให้มีน้ำหนักเบา และปรับแต่งจุดศูนย์ถ่วงให้เหมาะสม
- 10 ปรับปรุงระบบส่งกำลังให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น โดยเปลี่ยนจากการส่งกำลัง โดยใช้ไปเป็นระบบส่งกำลังโดยตรง
- 11 แหล่งจ่ายไฟเลี้ยงของรีเลย์ ไม่ควรใช้แรงดันของแบตเตอรี่ เมื่อแบตเตอรี่หมดพลังงานแบบสิ้นเชิง รีเลย์ก็ไม่สามารถทำงานได้ วงจรชาร์จก็จะไม่ทำงานด้วย จึงไม่สามารถปั่นหรือเบรคแล้วคืนพลังงานได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] ปัญญา ยอดโอวาท, เครื่องกลไฟฟ้ากระแสตรง, กรุงเทพฯ: ศูนย์สื่อเสริมกรุงเทพ, 2546.
- [2] รศ.ดร.วีระเชษฐ์ ชันเงิน และ วุฒิพล ธาราธิ์เศรษฐ์, อิเล็กทรอนิกส์กำลัง, พิมพ์ครั้งที่ 4, กรุงเทพฯ: วี.เจ. พรินติ้ง, 2549.
- [3] เจษฎา สายใจ, เอกสารประกอบการสอน รายวิชา 515213 อิเล็กทรอนิกส์วิศวกรรม, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา, 2549.
- [4] ขจร อินวณิช และ พนาฤทธิ์ เศรษฐกุล, การศึกษาเพื่อพัฒนารถจักรยานยนต์ที่ขับเคลื่อนด้วยกระแสไฟฟ้า, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2551.
- [4] บัณฑิต จิตต์สุภาพ, ไมโครคอนโทรลเลอร์และการประยุกต์ใช้งาน, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา, 2549.
- [5] สายันต์ ชื่นอารมย์ และ อนงลักษณ์ อัจฉกร. ออปแอมป์และลิเนียร์ไอซี. พิมพ์ครั้งที่ 1 กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์วังอักษร, 2550.

ภาคผนวก ก

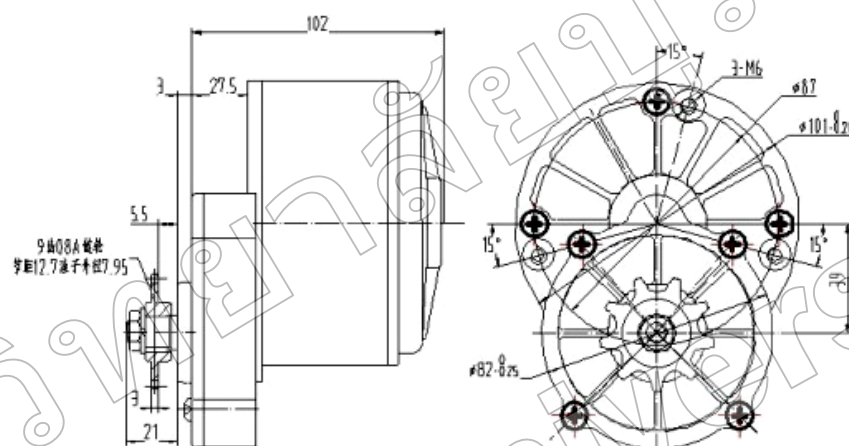
อุปกรณ์และวงจรที่ใช้ในโครงงาน

MY1016Z2-250W

1. PHOTO:



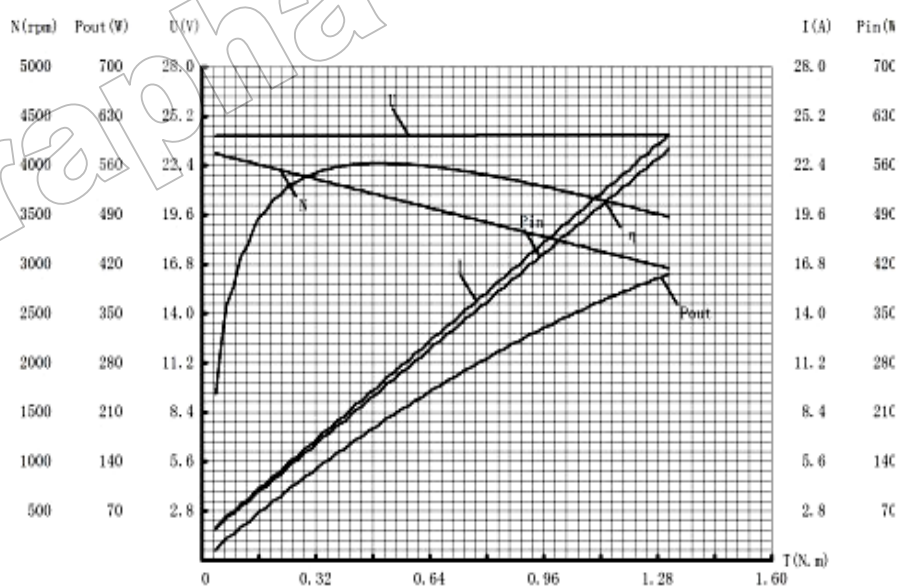
2. DIMENSIONS:



3. PERFORMANCE:

单位: 浙江尤奈特电机有限公司

日期: 2005年



รูปที่ ก.1 คุณสมบัติของมอเตอร์ที่ใช้ในโครงการ

Ref. Point	Torque/N.m	Speed/rpm	P-out/W	Volt/V	Current/A	P-in /W	Efficient/%
No Load	0.04	4125	15.12	24.09	1.86	44.71	33.81
Max. Efficient	0.49	3712	188.97	24.11	9.74	234.87	80.46
Rated Load	0.68	3535	251.54	24.12	13.12	316.47	79.48
Max. Torque	1.18	3075	380.74	24.14	21.91	528.92	71.98

4. SPECIFICATIONS:

MODEL	SPECS	V	NO LOAD		RATED LOAD				
			SPEED RPM	CURRENT A	TORQUE N.M.	SPEED RPM	CURRENT A	P-OUT W	EFFICIENT η
1016Z2	250W24V	24	4250 $\pm$ 5%	≤ 1.8	0.68 $\pm$ 5%	3500 $\pm$ 5%	≤ 13.7	250	$\geq 76\%$
1016Z2	250W36V	36	4250 $\pm$ 5%	≤ 1.8	0.68 $\pm$ 5%	3500 $\pm$ 5%	≤ 9.1	250	$\geq 76\%$
GEARBOX RATIO $i = 88: 9 = 9.778$									

5. PACKAGE:

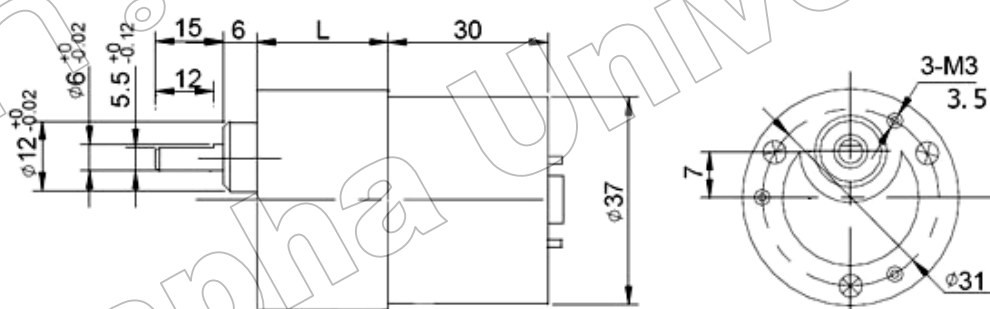
MODEL	WEIGHT Kg/PC	QTY. PC/CTN	CTN G.W. Kg	DIMENSION CM	PACKING MATERIAL
MY1016Z2-250W24V	2.115	12	26.2	37x32x26	CARTON BOX
MY1016Z2-250W36V	2.115	12	26.2	37x32x26	CARTON BOX

รูปที่ ก.1 คุณสมบัติของมอเตอร์ที่ใช้ในโรงงาน (ต่อ)

LXX37-30-24V Series

- DC Brush GearMotor
- Designed for high volume applications
- Up to 250 oz in (18 kg-cm) of Peak Torque
- Up to 83 oz in (6 kg-cm) of Continuous Torque
- 37 mm motor body diameter

Gear Ratio, Rxx number	10	18	30	50	75	100	150	200	250	300	400	500	750	900
Rated Voltage (VDC)	24V	24V	24V	24V	24V	24V	24V	24V	24V	24V	24V	24V	24V	24V
No-load speed before gearbox (RPM)	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000
No-load current (A)	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
Rated speed before gearbox (RPM)	4100	4100	4100	4100	4100	4100	4100	4100	4100	4100	4100	4100	4100	4100
Output Power (Watts)	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1
Rated current (A)	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Stall current (A)	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
Length "L" (mm)	19	21.5	21.5	24	24	24	26.5	26.5	26.5	26.5	29	29	29	29
No Load Speed after gearbox (RPM)	500	270	160	100	65	50	33	25	20	16	12	10	6.6	4.5
Rated Speed after gearbox (RPM)	410	220	130	80	50	41	27	20	16	13	11	9.2	6.3	4.8
Rated Torque after gearbox (kg-cm)	0.4	0.6	1.0	1.6	2.4	3.3	4.4	5.9	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	5.4
Peak Torque after gearbox (kg-cm)	3.0	6.0	6.0	12	12	12	18	18	18	18	18	18	18	18
Rotation Direction	CCW	CW	CW	CCW	CCW	CCW	CW	CW	CW	CW	CCW	CCW	CCW	CCW



รูปที่ ก.1 คุณสมบัติของมอเตอร์ที่ใช้ในโรงงาน (ต่อ)

HGL7.5-12

Valve Regulated Sealed Lead-Acid Battery

LION®

■ Specifications

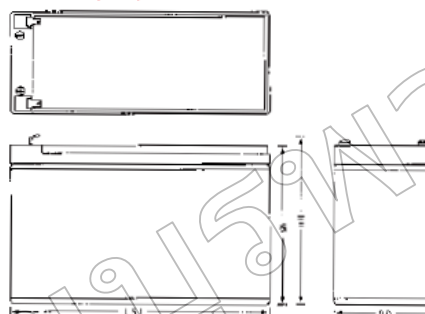
Nominal Voltage		12V
Rated Capacity (20 hours rate)		7.5Ah
Dimensions (± 2mm)	Total Height (with terminals)	100mm
	Length	151mm
	Width	66mm
	Height	95mm
Approx. Weight		2.7kg
Standard Terminal		F1

■ Characteristics

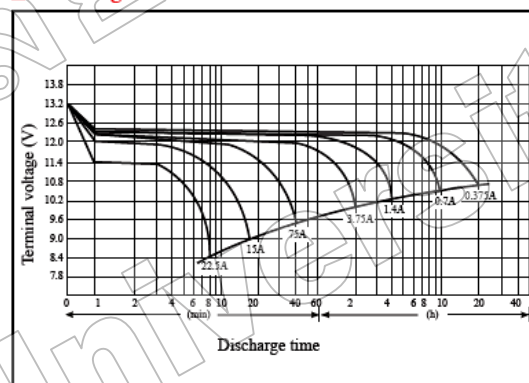
Capacity (25°C)		20 hour rate (350mA) 10 hour rate (650mA) 5 hour rate (1.2mA) 1 hour rate (4A)	7AH 7.0AH 6.4AH 4.5AH
Internal Resistance		Fully charged Battery 25°C	Approx. 10m
Capacity affected by temperature (20 hour rate)		40°C 25°C 0°C -15°C	102% 100% 85% 65%
Self Discharge (25°C)		Capacity after 3 months storage Capacity after 6 months storage Capacity after 12 months storage	92% 83% 65%
Charge Method (Constant Voltage)	Cycle use	Initial Current	2.25A or smaller
		Control Voltage	14.4 to 15.0V (25°C)
	Standby use	Initial Current	2.25A or smaller
		Control Voltage	13.5 to 13.8V (25°C)

* The above data are average and obtained within three charge/discharge cycles. Cycles not the minimum values.

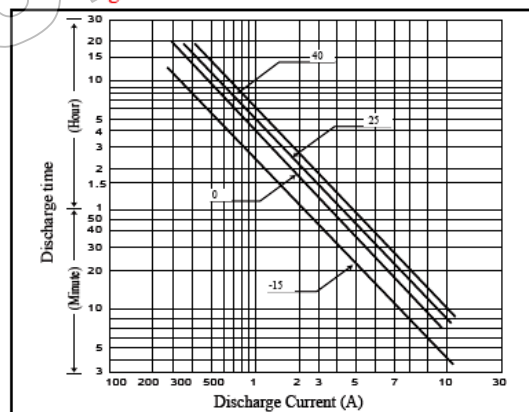
Dimensions (mm)



■ Discharge Characteristics



■ Discharge current & Duration Time



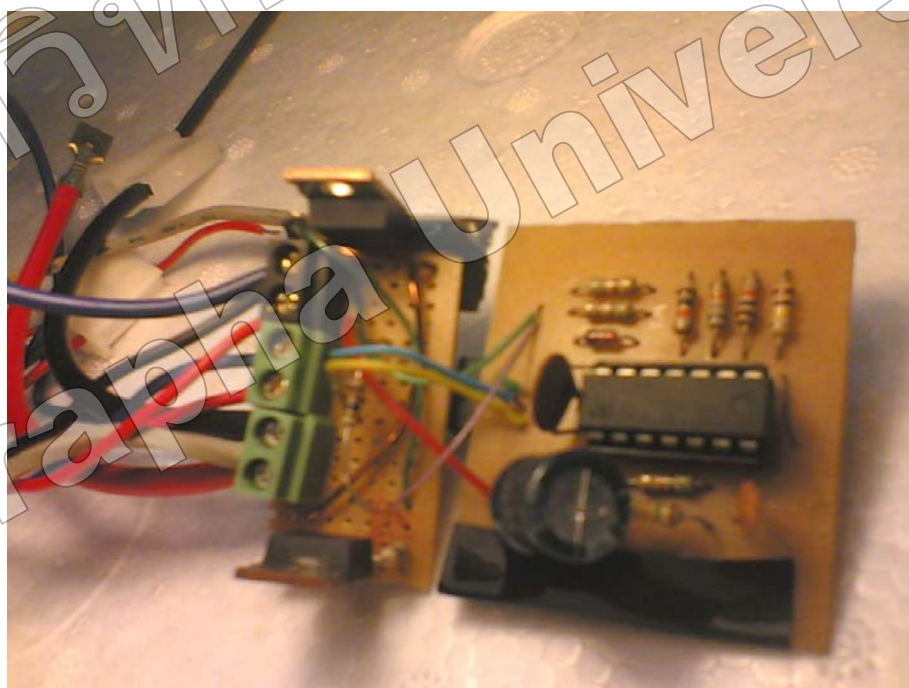
N.V. BATTERY LTD., PART.

00

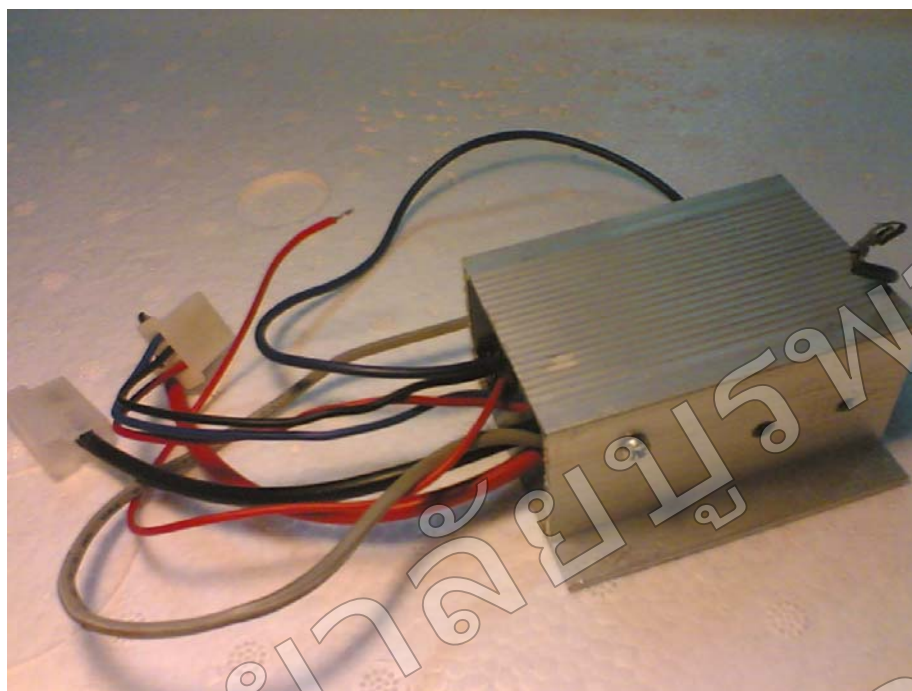
รูปที่ ก.2 คุณสมบัติของแบตเตอรี่ที่ใช้ในงาน



รูปที่ ก.3 คันเร่งไฟฟ้าแบบ Hall Effect



รูปที่ ก.4 วงจรกำเนิดสัญญาณ PWM และวงจรขับมอเตอร์



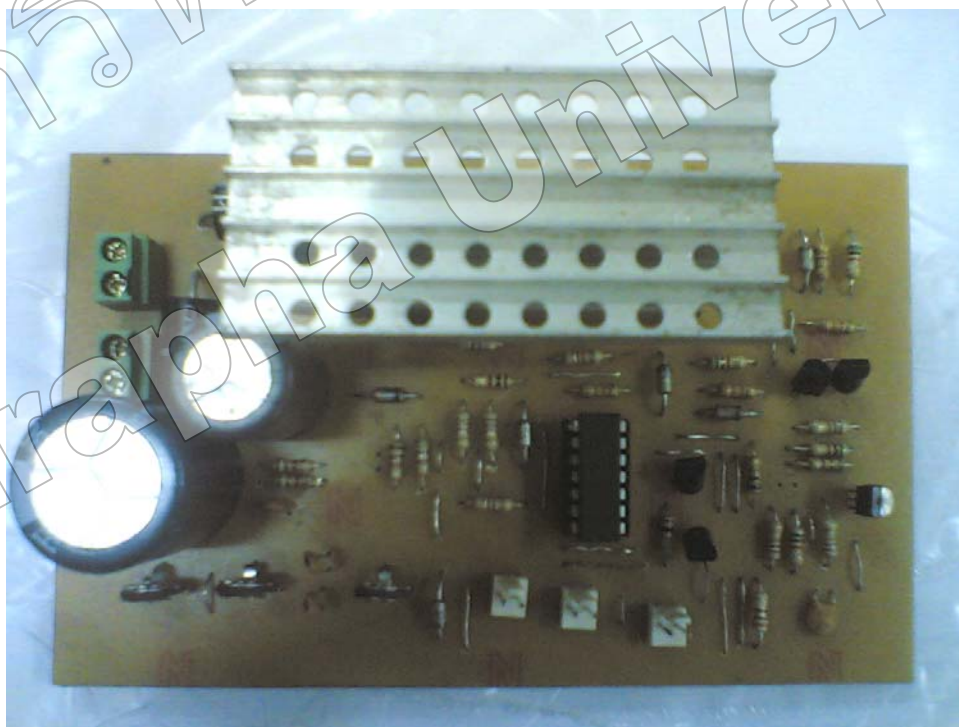
รูปที่ ก.5 วงจรกำเนิดสัญญาณ PWM และวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ ประกอบใส่กล่องอลูมิเนียมเพื่อระบายความร้อนให้มอสเฟต



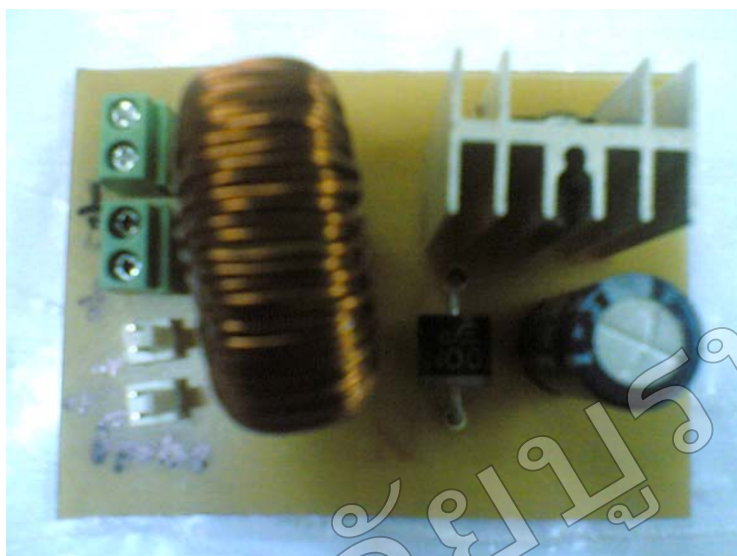
รูปที่ ก.6 ไดโอดกำลัง ESD83-004 ต่อแยกจากวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ เพื่อตัดวงจรระบายความร้อน



รูปที่ ก.7 ไดโอดกำลัง MUR1560 ต่อแยกจากวงจรขับเคลื่อน เพื่อตัดวงจรระบายความร้อน



รูปที่ ก.8 วงจรชาร์จแบตเตอรี่



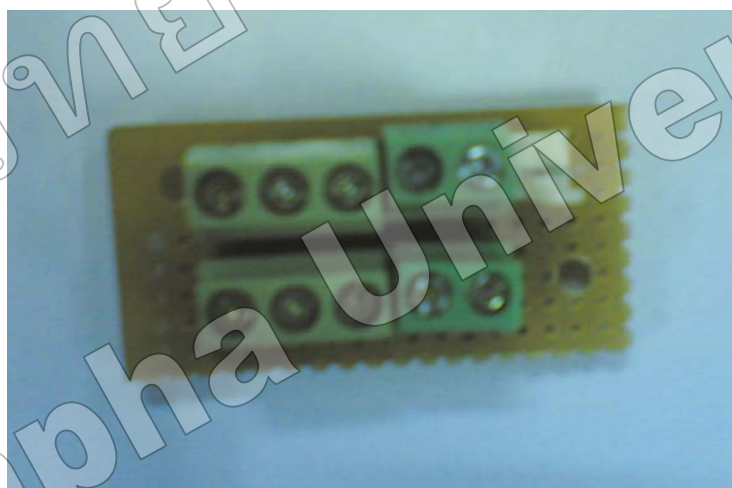
รูปที่ ก.9 วงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์



รูปที่ ก.10 วงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์สำหรับวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์



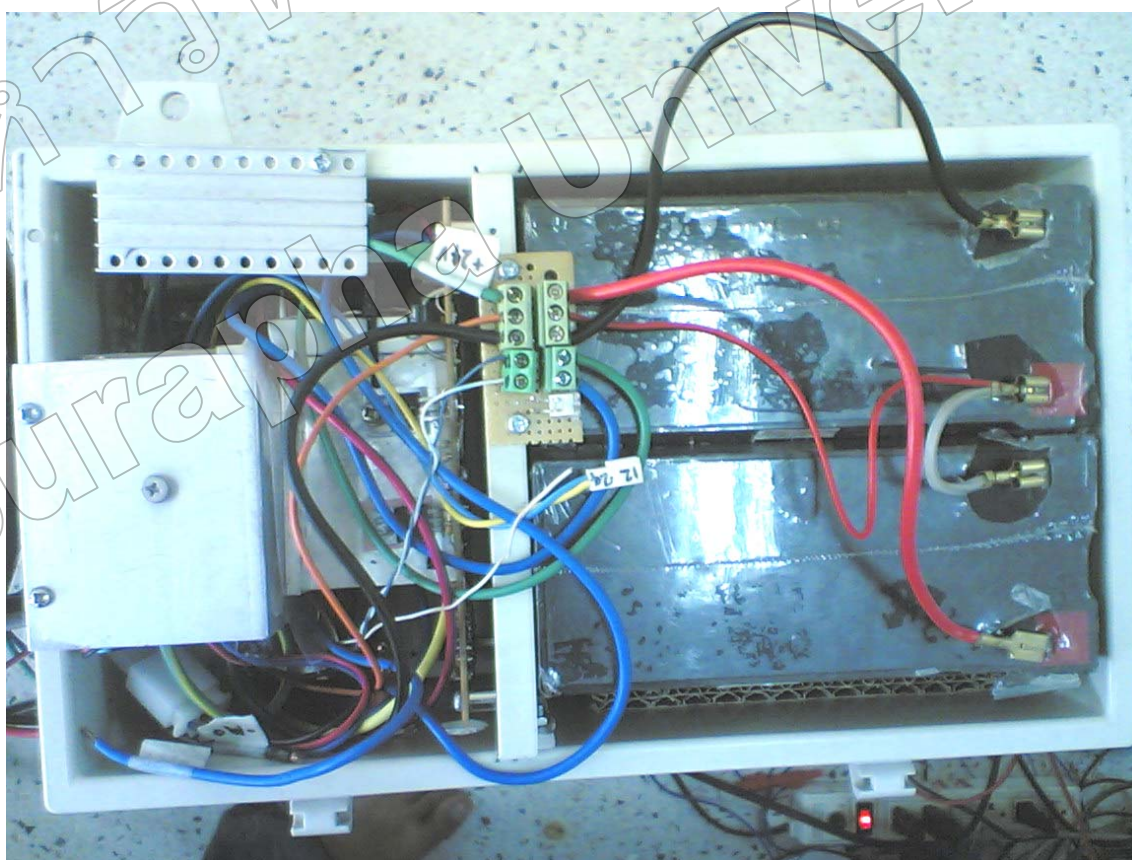
รูปที่ ก.11 วงจรสวิตช์สลับการทำงานระหว่างวงจรขับเคลื่อนและวงจรชาร์จแบตเตอรี่



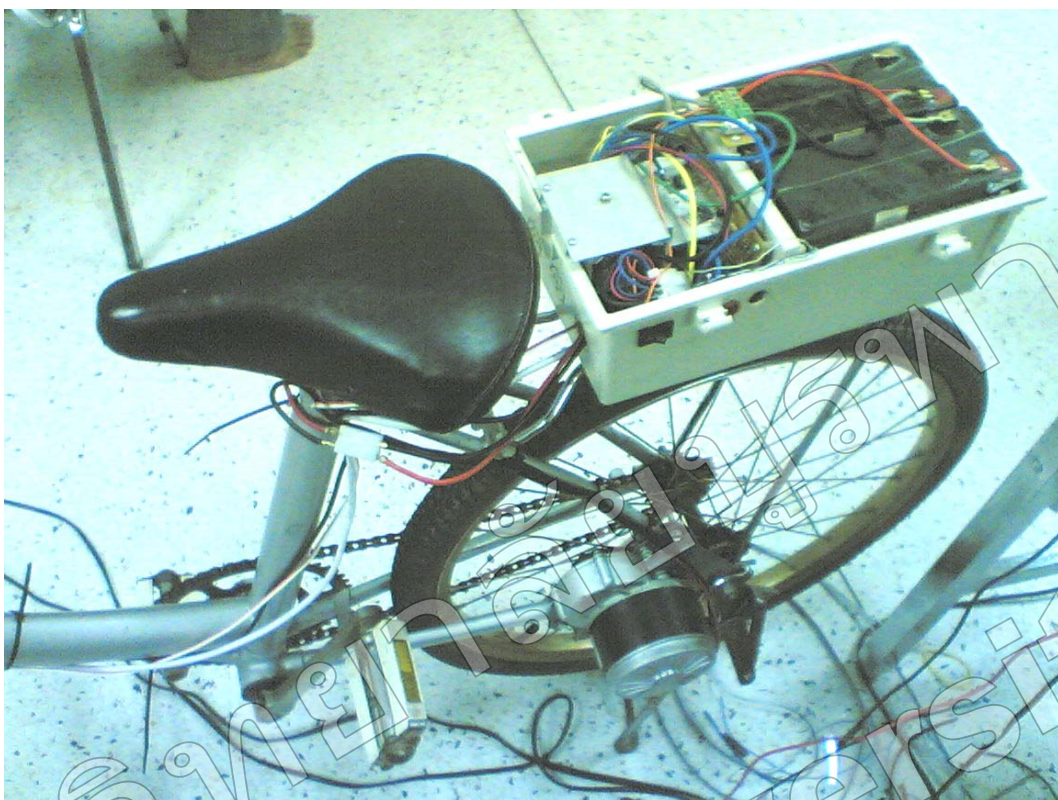
รูปที่ ก.12 คอนเน็กเตอร์สำหรับเชื่อมต่อวงจร



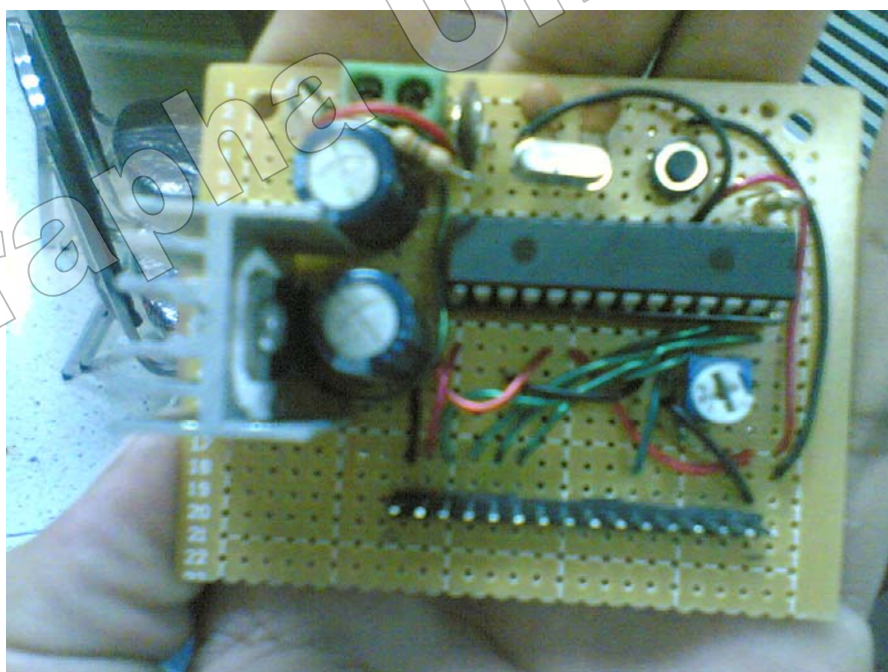
รูปที่ ก.13 โครงรถจักรยานที่ใช้ในโครงการ



รูปที่ ก.14 ประกอบวงจรทั้งหมดลงในกล่องพลาสติกซึ่งอยู่ด้านหลังเบาะผู้ขับขี่



รูปที่ ก.15 กล่องวงจรและมอเตอร์ซึ่งอยู่ด้านหลังเบาะผู้ขับขี่



รูปที่ ก.16 วงจรแสดงผลแรงดันและกระแสที่ชาร์จแบตเตอรี่



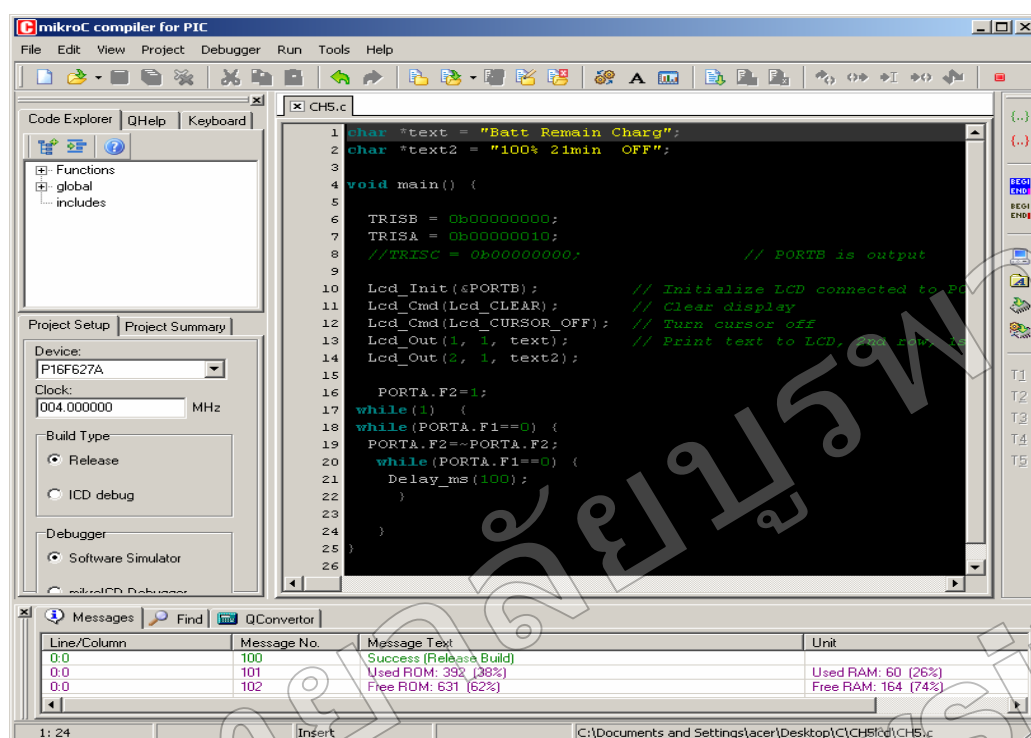
รูปที่ ก.17 การทดสอบวงจรแสดงผลแรงดันและกระแสที่ชาร์จแบตเตอรี่ โดยต่อเข้ากับหน้าจอ LCD



รูปที่ ก.18 จักรยานไฟฟ้าที่ประกอบเสร็จ

ภาคผนวก ข

ซอร์สโค้ดของโปรแกรมที่ใช้ในโครงงาน



รูปที่ ข.1 หน้าต่างโปรแกรม MikroC ซึ่งเป็นคอมไพเลอร์ภาษาซี

```
char text1[9],text2[9],text3[9];
float var1,var2;
unsigned int temp_res,cur1;
float j=0,k=0,q=0;
int count;
const
void main() {
    TRISB = 0b00000000;    // set output
    TRISA = 0b00001111;    // set input RA0-3
    TRISC = 0b00000000;    // set output RC2
    ADCON1 = 0x80;         // Configure analog inputs
```

รูปที่ ข.2 ซอร์สโค้ดภาษาซีที่ใช้เขียนวงจรแสดงผล

```

Lcd_Init(&PORTB);          // Initialize LCD connected to PORTB
Lcd_Cmd(Lcd_CLEAR);        // Clear display
Lcd_Cmd(Lcd_CURSOR_OFF);   // Turn cursor off
Lcd_Out(1, 1, "Battery ");  // Print text to LCD, 2nd row, 1st column

while(1) {
    var1=1/8.0;
    temp_res = Adc_Read(2);    // Get results of AD conversion of voltage value
    j=temp_res*var1;
    FloatToStr(j,text2);       //convert int to char
    count=0;

    while(text2[count])        // Set 2 positions of decimal point of percent voltage value
    {
        if(text2[count]!='.')
        { text2[count+3]='%';
          text2[count+4]=' ';
          text2[count+5]=0; }
        count++;
    }

    Lcd_Chr_Cp(' ');
    Lcd_Out(1,9,text2);        // Print text2 to LCD
    k=j*0.24;
    FloatToStr(k,text3);       //convert int to char
    count=0;
    while(text3[count])        // Set 2 positions of decimal point of real voltage value
    {
        if(text3[count]!='.')
        {

```

รูปที่ ข.2 ซอร์สโค้ดภาษาซีที่ใช้เขียนวงจรแสดงผล (ต่อ)

```

        text3[count+3]='V';
        text3[count+4]=' ';
        text3[count+5]=0;
    }
    count++;
}

Lcd_Chrcp(' ');
Lcd_Out(2, 1, text3);    // Print text3 to LCD
cur1=Adc_Read(1);        // Get results of AD conversion of current value
k=cur1*0.2410;
if(k<100) q=1;
else {
    if(k>109) q=2;
    else q=k;
}
k=k-100.00;
k=k*13.157;
k=k*0.042;
FloatToStr(k,text1);      //convert float to string
if(k<1) {                  //Compare for current value
    count=0;
    while(text1[count])    // Set 2 positions of decimal point of real current value
    {
        if (text1[count]!='.')
        {
            text1[count+3]='A';
            text1[count+2]=text1[count+1];
            text1[count+1]=text1[count-1];
            text1[count-1]='0';
        }
    }
}

```

รูปที่ ข.2 ซอร์สโค้ดภาษาซีที่ใช้เขียนวงจรแสดงผล (ต่อ)

```

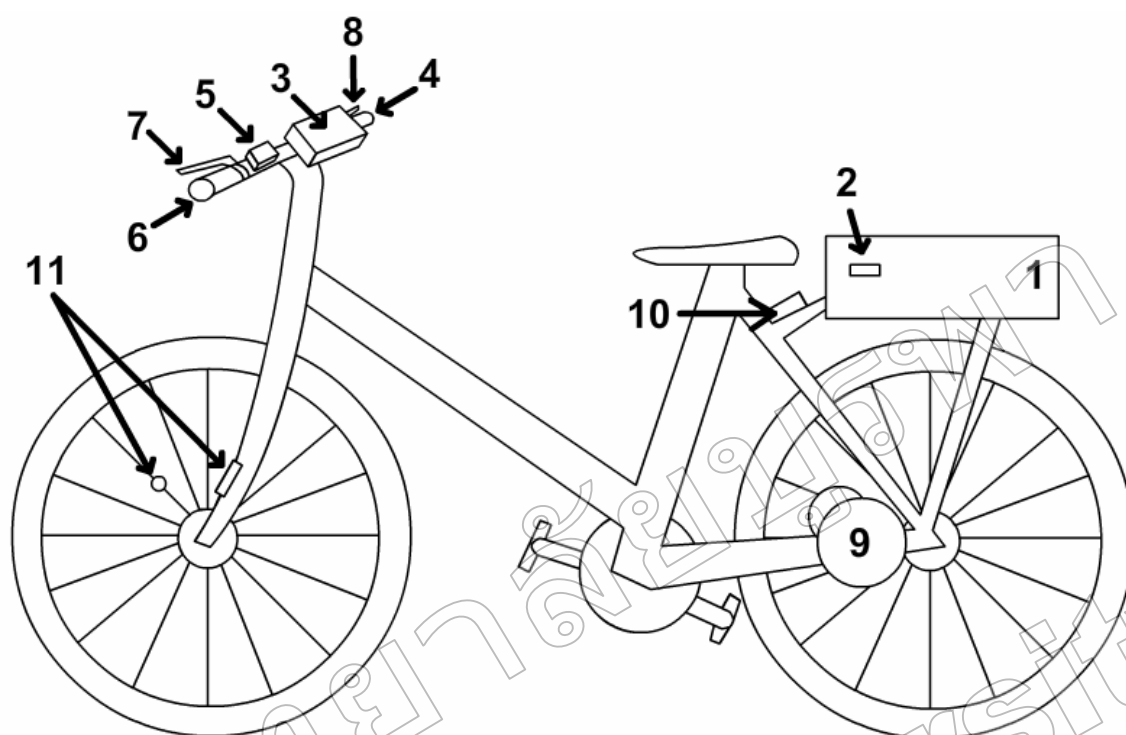
        text1[count+4]=' ';
        text1[count+5]=' ';
        text1[count+6]=0;
    }
    count++;
}
}
else {
    count=0;
    while(text1[count])
    {
        if (text1[count]=='.')
        {
            text1[count+3]='A';
            text1[count+4]=' ';
            text1[count+5]=' ';
            text1[count+6]=0;
        }
        count++;
    }
}
Lcd_Chrcp(' ');
if(q==1) Lcd_Out(2,9,"0.00A");
else
{
    if(q==2) Lcd_Out(2,9,"OverCur");
    else Lcd_Out(2,9,text1);
}
delay_ms(40);
}
}

```

รูปที่ ข.2 ซอร์สโค้ดภาษาซีที่ใช้เขียนวงจรแสดงผล (ต่อ)

มหาวิทยาลัยบูรพา
Burapha University

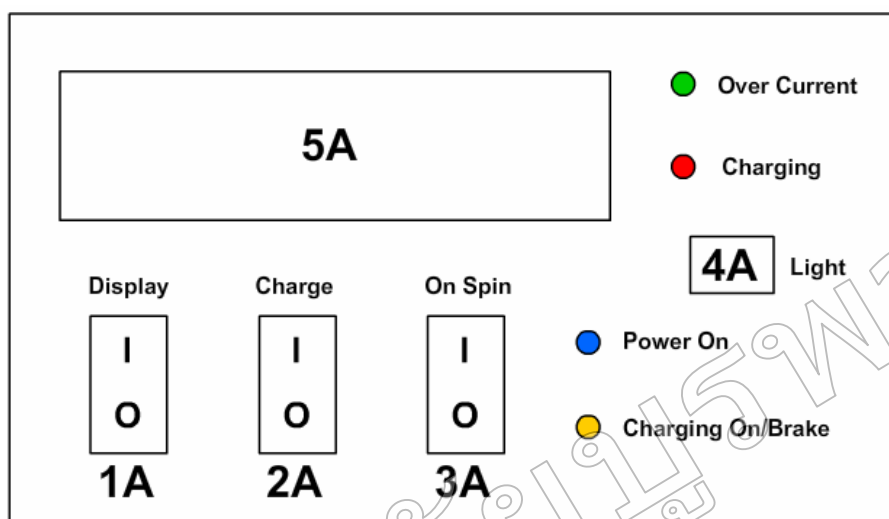
ภาคผนวก ค
วิธีใช้จักรยานไฟฟ้า



รูปที่ ค.1 รูปวาดจักรยานในโครงการ แสดงอุปกรณ์สำคัญที่อยู่ภายนอก

อุปกรณ์ตามหมายเลขในรูปที่ ค.1

1. กล่องพลาสติกบรรจุแบตเตอรี่และวงจรทั้งหมด
2. สวิตช์เปิดการจ่ายพลังงานให้กับจักรยานไฟฟ้า
3. หน้าปัดควบคุมและแสดงผล
4. คันเร่งด้านขวา
5. เครื่องมือวัดความเร็ว
6. แชนด์ด้านซ้าย
7. เบรกมือด้านซ้าย
8. เบรกมือด้านขวา
9. มอเตอร์ไฟฟ้า
10. เซ็นเซอร์บายความร้อนของไดโอดกำลัง
11. เซ็นเซอร์ความเร็วรถจักรยาน



รูปที่ ค.2 รูปวาดหน้าปัดควบคุมและแสดงผลของจักรยานไฟฟ้า

วิธีการใช้จักรยานไฟฟ้า

1. เมื่อต้องการขับขี่ ให้เปิดสวิตช์ (รูปที่ ค.1 หมายเลข 2) ให้อยู่ในตำแหน่ง ON หลอด LED Power On (ดูรูปที่ ค.2) จะติดเป็นสีฟ้า แสดงว่าพร้อมสำหรับการทำงานแล้ว
2. ขึ้นขี่จักรยานไฟฟ้าและเริ่มบิดคันเร่งอย่างช้าๆ จักรยานจะค่อยๆ ออกตัวตามการบิดคันเร่ง
3. เมื่อต้องการทราบแรงดันของแบตเตอรี่ กดสวิตช์ 1A (ดูรูปที่ ค.2) ให้อยู่ในตำแหน่ง I จอแสดงผล 5A (ดูรูปที่ ค.2) จะติดและบอกปริมาณต่างๆ และถ้าต้องการให้หน้าจอแสดงผลสว่าง ให้กดสวิตช์ 4A เพื่อเปิดไฟที่หน้าจอ
4. เมื่อต้องการให้มีการคืนพลังงาน ให้กดสวิตช์ 2A (ดูรูปที่ ค.2) ให้อยู่ในตำแหน่ง I หลอด LED Charging On/Brake (ดูรูปที่ ค.2) จะติดเป็นสีส้ม ส่งผลให้ขณะทำการเบรก วงจรขับเคลื่อนจะไม่ทำงาน และจะมีการชาร์จแบตเตอรี่เกิดขึ้น เมื่อปล่อยเบรก วงจรขับเคลื่อนจะทำงานเหมือนเดิม
5. ถ้าต้องการปั่นด้วยเท้าแล้วคืนพลังงาน ให้กดสวิตช์ 3A (ดูรูปที่ ค.2) ให้อยู่ในตำแหน่ง I วงจรขับเคลื่อนจะไม่ทำงาน ตัวเลือกนี้สำหรับการปั่นด้วยเท้าแล้วคืนพลังงานอย่างเดียว
6. ถ้าต้องการปั่นแล้วไม่คืนพลังงาน ให้ปิดสวิตช์ (รูปที่ ค.1 หมายเลข 2) ให้อยู่ในตำแหน่ง OFF หลอด LED Power On (ดูรูปที่ ค.2) จะไม่ติด ส่งผลให้จักรยานไฟฟ้าทำงานแบบจักรยานธรรมดา
7. เมื่อแบตเตอรี่หมดและต้องการชาร์จจากภายนอก ให้เปิดฝากล่อง (รูปที่ ค.1 หมายเลข 1) ถอดขั้วแบตเตอรี่ออก แล้วนำแบตเตอรี่ไปชาร์จจากแหล่งกำเนิดภายนอกจนเต็ม

คำแนะนำในการใช้งาน

1. ไม่ควรเปิดสวิตช์ (รูปที่ ค.1 หมายเลข 2) ทิ้งไว้ เพราะจะทำให้สิ้นเปลืองพลังงานของแบตเตอรี่
2. ระวัง! ห้ามต่อขั้วแบตเตอรี่ภายในกล่อง (รูปที่ ค.1 หมายเลข 1) ผิดข้ออย่างเด็ดขาด เพราะจะทำให้วงจรเสียหาย
3. ห้ามขั้วชี้ตากฝน หรือลุยน้ำ เพราะมอเตอร์และวงจรไม่ได้ห่อหุ้มด้วยวัสดุที่กันน้ำ
4. จักรยานไฟฟ้านี้ อยู่ในช่วงของการพัฒนา อย่ากระแทกหรือกระแทกแรงๆ จะทำให้อุปกรณ์ชำรุด
5. ขั้วชี้ด้วยความระมัดระวัง อย่าประมาท เพราะอาจทำให้เกิดอุบัติเหตุจนจักรยานไฟฟ้าเสียหาย และได้รับบาดเจ็บ พิการ และถึงแก่ชีวิตได้
6. เมาไม่ขับ หลับไม่ชี้

ประวัติผู้จัดทำโครงการ

นายประภาส แก้วพิทักษ์ จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียน พิบูลวิทยาลัย อ.เมืองลพบุรี จ.ลพบุรี ปัจจุบันกำลังศึกษาที่ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา มีความสนใจทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ และไฟฟ้ากำลัง

นายไตรรัตน์ กฤษณะโหม จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียน พันส-พิทยาคาร อ.พนัสนิคม จ.ชลบุรี ปัจจุบันกำลังศึกษาที่ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา มีความสนใจทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ อิเล็กทรอนิกส์กำลัง ไฟฟ้ากำลัง และ คอมพิวเตอร์