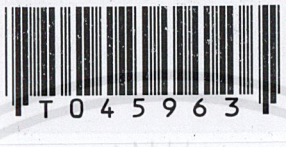
สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2544

รถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้า

ELECTRIC TUK-TUK



โดย

นาย จิรยุทธ์ ทองสา

นาย ธีระศักดิ์ พัฒน์เจริญ

นาย สุริยา โพธิมณี

นาย วรวุฒิ พงศ์ชัยศรีกุล

นาย สุทธิศักดิ์ แก้วทอง

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 45963
วัน, เดือน, ปี 26 ก.พ. 2546

.b.....
.i.....

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ประภาษ ไพรสุวรรณา

อาจารย์สุรินทร์ คำฝอย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2544

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง รถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้า

ผู้จัดทำ

นาย จิรยุทธ์	ทองสา
นาย ธีระศักดิ์	พัฒน์เจริญ
นาย สุริยา	โพธิมณี
นาย วรวุฒิ	พงศ์ชัยศรีกุล
นาย สุทธิศักดิ์	แก้วทอง

_____ อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ.ประภาษ ไพรสุวรรณา)

_____ อาจารย์ที่ปรึกษา

(อาจารย์สุรินทร์ คำฝอย)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้า

นาย จิรยุทธ์ ทองสา
นาย ธีระศักดิ์ พัฒน์เจริญ
นาย สุริยา โพธิมณี
นาย วรวุฒิ พงศ์ชัยศรีกุล
นาย สุทธิศักดิ์ แก้วทอง

ผศ. ประภาษ ไพรสุวรรณา อาจารย์ที่ปรึกษา
อ. สุรินทร์ คำฝอย อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2544

บทคัดย่อ

โครงงานนี้นำเสนอเครื่องต้นแบบรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้า ซึ่งเป็นสัญลักษณ์ของประเทศไทย เพื่อที่จะรักษาทิวทัศน์สภาพแวดล้อม โดยการนำมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบ Short shunt compound ขนาด 4.5 KW 23 Volt ใส่แทนเครื่องยนต์ ควบคุมความเร็วมอเตอร์โดยใช้วงจร Buck Converter ใช้มอสเฟท เบอร์ IRFP 150 ขนานกันทั้งหมด 28 ตัว เพื่อให้เหมาะสมกับพิกัดกำลังไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น ความถี่ในการสวิตช์ชิ่ง 2.7 KHz ชุดป้องกันมอสเฟทประกอบด้วยชุดป้องกันกระแสเกิน และชุดป้องกันอุณหภูมิเกิน มีวงจรควบคุมป้อนกลับแบบพีไอป้องกันไม่ให้กระแสเกินพิกัดของมอเตอร์ ทำการวิเคราะห์ชุดควบคุมป้อนกลับแบบพีไอเปรียบเทียบสัญญาณระหว่างกระแสจริง กับกระแสอ้างอิง เพื่อควบคุมกระแสไม่ให้เกินพิกัดของมอเตอร์ ทั้งนี้การพิจารณาคุณสมบัติของมอเตอร์ที่นำมาใช้ในโครงงานนี้ ได้พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดของมอเตอร์, ความเร็วของมอเตอร์ และกระแสอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์ ในสภาวะโหลดต่างๆ ความเร็วในการขับเคลื่อนสูงสุด 46 km/hr วิ่งได้ติดต่อกันเป็นระยะเวลานาน 45 นาที จนกว่าแบตเตอรี่จะหมด นอกจากนี้ยังได้ศึกษาชุดควบคุมการอัดประจุให้กับแบตเตอรี่ด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Electric Tuk-Tuk

Mr. Jirayut Thongsa
Mr. Teerasak Patcharoan
Mr. Suriya Phothimanee
Mr. Woravut Pongchaisekun
Mr. Sutthisuk Keawthong

Asst.Prof. Prapas Prisuwanna Adviser
Surin Khomfoi Adviser

2001

Abstract

This project presents a prototype of electric tuk tuk, tradition car of Thailand. For environment point of view, the DC motor short shunt of compound 45 kW 23 volt is used instead of gas engine. The speed control technique used variable input voltage of motor by buck converter. Twenty eighth mosfets, IRFP 150, connecting parallel, are utilized for increasing ratting power. The switching frequency of buck converter is 2.7 kHz. Certainly, the protection circuit such as current, voltage and temperature are designed. The current protection technique is using PI control for reliability of system. Surely, analyzing of PI system between actual and referent current are made. Nevertheless, the characteristic of motor such as torque, speed and load current condition are described. The maximum speed is 46 km/hr and the time continuous running is 45 minutes at maximum speed. Eventually, the principal of battery changing are discussed.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
Abstract	II
สารบัญ	III
สารบัญภาพ	V
สารบัญตาราง	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 บทนำ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขต	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในโครงงาน	4
2.1 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	4
2.2 การคำนวณหาพิกัดกำลังของมอเตอร์	7
2.3 วิธีการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์	8
2.4 ทฤษฎีเบื้องต้นของวงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์แบบช็อปเปอร์	11
2.5 เครื่องอัดประจุแบตเตอรี่	20
2.6 มอสเฟตกำลัง	28
บทที่ 3 หลักการที่นำมาใช้	40
3.1 การคำนวณหาขนาดมอเตอร์	41
3.2 การควบคุมความเร็วของรถ	42
3.3 การขับนำเกตของมอสเฟต	44
3.4 วงจรควบคุมป้อนกลับแบบพีไอ	47
3.5 แหล่งจ่ายไฟกระแสตรงแบบสวิตช์ชิ่ง	53
3.6 วงจรออปแอมป์พื้นฐาน	57
บทที่ 4 วงจรทั้งหมดที่ใช้ในโครงงาน	64
4.1 ส่วนของวงจรควบคุม	65
4.2 ส่วนของวงจรกำลัง	84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
บทที่ 5 การทดสอบ และ ผลการทดสอบ	87
5.1 การทดลองที่ 1 การทดสอบหาความเร็วสูงสุด	88
5.2 การทดลองที่ 2 การทดสอบระยะเวลาที่รถสามารถวิ่งใช้งานได้	88
5.3 การทดลองที่ 3 การทดสอบอัตราการสิ้นเปลืองกำลังไฟฟ้าต่อความเร็วรถขณะยังไม่ได้รับโหลด	89
5.4 การทดลองที่ 4 การทดสอบอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าต่อระยะทาง	92
5.5 การทดลองที่ 5 การทดสอบอัตราการเร่งของรถ	93
5.6 การทดลองที่ 6 การทดสอบหาอัตราการสิ้นเปลืองกำลังไฟฟ้าต่อความเร็วรถขณะได้รับโหลด เมื่อใช้การควบคุมความเร็วมอเตอร์แบบลูปเปิด	96
5.7 การทดลองที่ 7 การทดสอบหาแรงบิดที่ใช้งาน ขณะได้รับโหลด เมื่อใช้การควบคุมความเร็วมอเตอร์แบบลูปเปิด	98
5.8 การทดลองที่ 8 การทดสอบอัตราการสิ้นเปลืองกำลังไฟฟ้าต่อความเร็วรถขณะได้รับโหลด เมื่อใช้การควบคุมความเร็วมอเตอร์แบบลูปปิด	102
5.9 การทดลองที่ 9 การทดสอบหาแรงบิดที่ใช้งาน ขณะได้รับโหลด เมื่อใช้การควบคุมความเร็วมอเตอร์แบบลูปปิด	104
5.10 สรุปประสิทธิภาพของรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้า	108
บทที่ 6 บทสรุป และวิจารณ์ผล	109
6.1 บทสรุป	109
6.2 วิจารณ์	110
6.3 ปัญหาต่างๆ ที่ได้ประสบมา	110
6.4 แนวทางในการพัฒนา	111
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. Circuit Electric Tuk - Tuk	
ภาคผนวก ข. รูปส่วนประกอบต่างๆ ของรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้า	
ภาคผนวก ค. Data Sheet	
กิตติกรรมประกาศ	
เอกสารอ้างอิง	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

		หน้า
รูปที่ 2.1	วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	4
รูปที่ 2.2	วงจรสมมูลของ Compound dc motor แบบ Short shunt	5
รูปที่ 2.3	การเปรียบเทียบคุณสมบัติของ Series, Cumulative Compound และ Shunt Motor	6
รูปที่ 2.4	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Speed – torque ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ควบคุมโดยใช้วิธี Armature resistance control	10
รูปที่ 2.5	แรงดันที่เกิดจากการสวิทช์ที่ช่วงเวลา on และ off	11
รูปที่ 2.6	วงจร Buck dc – dc converter	11
รูปที่ 2.7	วงจรสมมูลขณะสวิทช์ on	12
รูปที่ 2.8	วงจรสมมูลขณะสวิทช์ off	12
รูปที่ 2.9	หลักการของวงจรบั๊คคอนเวอร์เตอร์	13
รูปที่ 2.10	การสร้างสัญญาณ PWM ที่ดิวตี้ไซเคิลต่างๆ	13
รูปที่ 2.11	การทำงานแบบ Pulse width control	15
รูปที่ 2.12	การทำงานในโหมดการนำกระแสต่อเนื่อง	16
รูปที่ 2.13	กระแสในตัวเหนี่ยวนำที่ช่วงรอยต่อของโหมดการนำกระแสต่อเนื่อง และไม่ต่อเนื่อง	17
รูปที่ 2.14	ความสัมพันธ์ระหว่าง I_{LB} ในฟังก์ชั่นของ D	18
รูปที่ 2.15	ริปเปิ้ลในแรงดันเอาท์พุทของวงจร Step – down converter	19
รูปที่ 2.16	ขบวนการปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมี	21
รูปที่ 2.17	ทิศทางการไหลของกระแสประจุแบตเตอรี่	23
รูปที่ 2.18	การเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันในการอัดประจุแบบกระแสคงที่	24
รูปที่ 2.19	ค่าแรงดัน และกระแสของเครื่องอัดประจุแบบแรงดันคงที่	25
รูปที่ 2.20	กราฟผลกระแส และแรงดันเมื่อทำการประจุแบบวิธีร่วม	26
รูปที่ 2.21	Equivalent circuit ของ VCCS	29
รูปที่ 2.22	แสดงโครงสร้างและสัญลักษณ์ของมอสเฟท	30
รูปที่ 2.23	แสดงการทำงานของมอสเฟท	31
รูปที่ 2.24	วงจรสมมูลของมอสเฟท	32
รูปที่ 2.25	ลักษณะของกระแสและแรงดันตกคร่อมเพาเวอร์มอสเฟท	33
รูปที่ 2.26	ตัวเก็บประจุแฝงที่ต่ออยู่ที่ขาต่างๆ ภายในตัวเพาเวอร์มอสเฟท	34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้า

รูปที่ 2.27 ลักษณะแรงดันและกระแสที่ขาเกตขณะเพาเวอร์มอสเฟทถูกไบแอส 35
รูปที่ 2.28 การป้องกันแรงดันสไปค์คร่อม เกต – ซอร์ส 35
รูปที่ 2.29 การป้องกันแรงดันสไปค์คร่อม เดรน – ซอร์ส 36
รูปที่ 2.30 ตัวอย่างกราฟพิกัดปลอดภัย FBSOA ของเพาเวอร์มอสเฟท 37
รูปที่ 2.31 ตัวอย่างกราฟพิกัดปลอดภัย SSOA ของเพาเวอร์มอสเฟท 37
รูปที่ 2.32 การขนานมอสเฟท 39
รูปที่ 3.1 บล็อกไดอะแกรมของระบบขับเคลื่อนรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้าอย่างคร่าวๆ 40
รูปที่ 3.2 บล็อกไดอะแกรมแสดงการทำงานของระบบต่างๆทั้งหมดในโครงงานนี้ 40
รูปที่ 3.3 บล็อกไดอะแกรมแสดงการทำงานของชุดควบคุมความเร็วมอเตอร์ 42
รูปที่ 3.4 การแยกกราวด์ระหว่างวงจรกำลังกับวงจรควบคุม 44
รูปที่ 3.5 วงจรพื้นฐานที่ใช้ไอซีทำหน้าที่ขับนำเกต 45
รูปที่ 3.6 ลักษณะทางกายภาพ และบล็อกไดอะแกรมของ TLP 250 46
รูปที่ 3.7 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของการควบคุมแบบพีไอ 48
รูปที่ 3.8 ตัวอย่างวงจรควบคุมป้อนกลับแบบพีไอ 48
รูปที่ 3.9 กราฟแสดงผลการควบคุมแบบพีไอ 50
รูปที่ 3.10 แสดง e(t) และ u(t) เมื่อสัญญาณ e(t) สวิงเข้าสู่ศูนย์ 51
รูปที่ 3.11 วงจรพีไอคอนโทรล 51
รูปที่ 3.12 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงแบบสวิตช์ชิ่ง 54
รูปที่ 3.13 วงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ 56
รูปที่ 3.14 วงจรเปรียบเทียบแรงดัน 57
รูปที่ 3.15 วงจรขยายกลับเฟสแบบมาตรฐาน 58
รูปที่ 3.16 วงจรขยายไม่กลับเฟส 59
รูปที่ 3.17 วงจรตามแรงดัน 60
รูปที่ 3.18 วงจรอินทิเกรเตอร์พื้นฐานที่ใช้อุปกรณ์พาสซีฟ 61
รูปที่ 3.19 วงจรอินทิเกรเตอร์ที่ใช้ออปแอมป์ 62
รูปที่ 3.20 วงจรอินทิเกรต 63
รูปที่ 4.1 วงจรรวมทั้งหมดที่ใช้ในการขับเคลื่อนรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้า 64
รูปที่ 4.2 รายละเอียดวงจรสร้างสัญญาณสามเหลี่ยม 66
รูปที่ 4.3 ผลของรูปคลื่นสัญญาณสามเหลี่ยมที่ได้ 66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

		หน้า
รูปที่ 4.4	วงจรเปรียบเทียบสัญญาณอ้างอิง กับสัญญาณสามเหลี่ยม	67
รูปที่ 4.5	รูปคลื่นการเปรียบเทียบสัญญาณอ้างอิง กับสัญญาณสามเหลี่ยม	67
รูปที่ 4.6	ผลของรูปคลื่นสัญญาณพีดับบลิวเอ็มที่ได้	68
รูปที่ 4.7	วงจรกำเนิดสัญญาณพีดับบลิวเอ็ม	68
รูปที่ 4.8	รูปคลื่นสัญญาณที่วัดได้จากวงจรกำเนิดสัญญาณพีดับบลิวเอ็มที่ duty cycle ขนาดต่างๆ	69
รูปที่ 4.9	วงจรขับนำเกต และแยกกราวด์ที่ใช้ในโครงงาน	70
รูปที่ 4.10	รูปคลื่นสัญญาณที่วัดได้จากวงจรขับนำเกต และแยกกราวด์ ที่ duty cycle ขนาดต่างๆ	71
รูปที่ 4.11	รูปคลื่นสัญญาณที่วัดได้จากวงจรขับนำเกต และแยกกราวด์ โดยวัดที่ขาเดรน และขาซอร์ส ที่ duty cycle ขนาดต่างๆ	72
รูปที่ 4.12	วงจรตรวจจับกระแสที่ใช้ในโครงงาน	73
รูปที่ 4.13	สัญญาณที่ขา 8 กับขา 6 ของออปโต้	74
รูปที่ 4.14	วงจรควบคุมป้อนกลับแบบพีไอที่ใช้ในโครงงาน	74
รูปที่ 4.15	รูปคลื่นสัญญาณ V_{ref} และ $V_{feedback}$ ของวงจรควบคุมป้อนกลับแบบพีไอ ขณะทำการขับโหลดของมอเตอร์	76
รูปที่ 4.16	รูปคลื่นสัญญาณ V_{ref} และ $V_{feedback}$ เมื่อขับรถโดยเพิ่มความเร็วเป็น 3 ระดับต่อเนื่องกัน	77
รูปที่ 4.17	วงจรป้องกันกระแสเกินที่ใช้ในโครงงาน	79
รูปที่ 4.18	วงจรป้องกันอุณหภูมิเกินที่ใช้ในโครงงาน	80
รูปที่ 4.19	วงจรยกระดับแรงดันที่ใช้ในโครงงาน	81
รูปที่ 4.20	วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบสวิตช์ชิ่ง	82
รูปที่ 4.21	รูปคลื่นสัญญาณเอาท์พุทที่ได้จากวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์	83
รูปที่ 4.22	ชุดการขนานมอสเฟทที่ใช้ในโครงงาน	84
รูปที่ 4.23	วงจรกำลังของการต่อแมกนีติกคอนแทคเตอร์ เพื่อกลับขั้วอาเมเจอร์	85
รูปที่ 4.24	วงจรควบคุมการกลับขั้วอาเมเจอร์โดยใช้สวิตช์ 3 ทาง	86
รูปที่ 5.1	วงจรที่ใช้ในการทดสอบ	87
รูปที่ 5.2	กราฟอัตราการสิ้นเปลืองกำลังไฟฟ้าต่อความเร็วรถขณะยังไม่ได้รับโหลด	91
รูปที่ 5.3	กราฟการทดสอบอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าต่อระยะทาง	93

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้า

รูปที่ 5.4 กราฟอัตราการเร่งของรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้า 94

รูปที่ 5.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรถ และเวลที่ใช้ในการเร่ง 95

รูปที่ 5.6 กราฟอัตราการสิ้นเปลืองกำลังไฟฟ้าต่อความเร็วรถขณะได้รับโหลด โดยใช้การควบคุมความเร็วมอเตอร์แบบลูปเปิด (Open loop) 97

รูปที่ 5.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอาเมเจอร์ กับความเร็วรถขณะได้รับโหลด 97

รูปที่ 5.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด กับกระแสอาเมเจอร์ขณะได้รับโหลด 100

รูปที่ 5.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด กับความเร็วรถขณะได้รับโหลด 100

รูปที่ 5.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอาเมเจอร์ กับความเร็วรถขณะได้รับโหลด 101

รูปที่ 5.11 กราฟอัตราการสิ้นเปลืองกำลังไฟฟ้าต่อความเร็วรถขณะได้รับโหลด โดยใช้การควบคุมความเร็วมอเตอร์แบบลูปปิด (Close loop) 103

รูปที่ 5.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอาเมเจอร์ กับความเร็วรถขณะได้รับโหลด 103

รูปที่ 5.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด กับกระแสอาเมเจอร์ขณะได้รับโหลด 106

รูปที่ 5.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอาเมเจอร์ กับความเร็วรถขณะได้รับโหลด 106

รูปที่ 5.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด กับความเร็วรถขณะได้รับโหลด 107

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 3.1	แสดงพฤติกรรมของพี และไอคอนโทรลเลอร์	48
ตารางที่ 3.2	แสดงข้อเปรียบเทียบระหว่างแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงแบบลิเนียร์กับแบบสวิตช์ชิ่ง	54
ตารางที่ 5.1	ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 3	90
ตารางที่ 5.2	ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 4	92
ตารางที่ 5.3	ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 5	94
ตารางที่ 5.4	ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 6	96
ตารางที่ 5.5	ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 7	99
ตารางที่ 5.6	ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 8	102
ตารางที่ 5.7	ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 9	105

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่1
บทนำ

1.1 บทนำ

ในปัจจุบันนี้ประชาชนโดยทั่วไปเริ่มให้ความสนใจต่อการหาแหล่งพลังงานสะอาดเพื่อทดแทนพลังงานน้ำมันที่มีราคาแพงและมีปริมาณลดลงเรื่อยๆ ประกอบกับประเทศไทยต้องเสียเงินตราไปแต่ละปีเป็นจำนวนมากในการซื้อน้ำมันจากต่างประเทศ จึงทำให้เกิดแนวความคิดที่จะสร้างรถที่ไม่ต้องใช้น้ำมันเป็นเชื้อเพลิง เพื่อเป็นการประหยัดทรัพยากรที่มีอยู่จำกัดจึงหันมาให้ความสนใจกับพลังงานไฟฟ้าซึ่งเป็นพลังงานที่สะอาดไม่ก่อให้เกิดมลภาวะดังเช่นน้ำมัน เพื่อเป็นการช่วยรักษาสิ่งแวดล้อม โดยใช้มอเตอร์เป็นตัวขับเคลื่อนแทนเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันเป็นเชื้อเพลิง รถพลังงานไฟฟ้าจึงได้รับความสนใจและได้ทำการวิจัยหาหลายปีแล้วแต่ก็ยังมีประสิทธิภาพการใช้งานไม่เป็นที่น่าพอใจนักและมีข้อบกพร่องอยู่มาก

โครงงานนี้จึงได้นำเสนอการทำรถไฟฟ้าโดยใช้รถตุ๊กตุ๊กที่ใช้เครื่องยนต์มาดัดแปลงทำเป็นรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้า ที่เลือกรถตุ๊กตุ๊กเนื่องจากรถตุ๊กตุ๊กเป็นรถที่ใช้งานกันอยู่อย่างแพร่หลายในบ้านเราและเป็นเอกลักษณ์อย่างหนึ่งของประเทศไทยที่ชาวต่างชาติให้ความสนใจ ดังนั้นรถตุ๊กตุ๊กจึงควรที่จะได้มีการพัฒนาให้มีจุดที่น่าสนใจเพิ่มมากขึ้น เพื่อเป็นการช่วยส่งเสริมการท่องเที่ยวและเป็นการประหยัดพลังงานน้ำมัน ลดมลภาวะบนท้องถนน

จากที่ผ่านมารถไฟฟ้าที่ได้ทำวิจัยกันมานั้นจะเป็นการทำโครงสร้างรถขึ้นมาเองทำให้ยากต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานได้จริง โครงงานนี้จึงได้นำรถที่มีใช้กันอยู่แล้ว ทำการถอดเครื่องยนต์ออกแต่โครงสร้างรถได้ดัดแปลงเพียงเล็กน้อย แล้วนำมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเข้าไปใช้ในการขับเคลื่อนแทนเครื่องยนต์แล้วอาศัยพลังงานจากแบตเตอรี่จ่ายพลังงานให้แก่มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อเป็นการนำเสนอแนวความคิดที่จะเปลี่ยนจากรถยนต์ที่ใช้กันอยู่โดยทั่วๆไปให้สามารถเปลี่ยนมาเป็นรถไฟฟ้าได้โดยเพียงแค่ถอดเครื่องยนต์เดิมออกแล้วดัดแปลงโครงสร้างเพียงเล็กน้อยเพื่อนำมอเตอร์ไปใช้แทน หาตำแหน่งวางแบตเตอรี่ ,ชุดควบคุมความเร็วมอเตอร์ ,ชุดควบคุมการชาร์จประจุในแบตเตอรี่ ,ชุดป้องกันกระแสเกิน ,ชุดป้องกันอุณหภูมิเกิน และระบบเดินหน้า-ถอยหลังของรถ โดยที่ระบบอื่นๆ ยังคงใช้ระบบเดิมอยู่เพียงเท่านี้ก็จะเปลี่ยนจากรถยนต์ที่ใช้น้ำมันมาเป็นรถไฟฟ้าได้

จากที่กล่าวมาทั้งหมดนี้ ในการที่จะทำรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้าวิ่งได้จริงบนท้องถนน และสามารถใช้ระยะเวลาในการขับเคลื่อนได้นานขึ้น ในการพัฒนาโครงงานนี้ครั้งต่อไปจึงได้ประยุกต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้พลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานเสริมที่จะช่วยจ่ายพลังงานร่วมกับแบตเตอรี่ เพื่อทำให้รถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้าสามารถใช้งานได้ในระยะเวลานานขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญานิพนธ์

1.2.1 เพื่อศึกษาการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง โดยใช้วงจร Buck Converter

1.2.2 เพื่อศึกษาการควบคุมสัญญาณด้วยวงจร PI-Control

1.2.3 เพื่อศึกษาคุณสมบัติทั่วไปของเครื่องประจุแบตเตอรี่

1.2.4 เพื่อเป็นต้นแบบในการนำไปประยุกต์ใช้งานต่อไป

1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์

1.3.1 สามารถออกแบบ และสร้างรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้า ที่ใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งให้แรงบิดสูง และควบคุมได้ง่าย ขนาด 4.5 KW 23 Volt เป็นต้นกำลังในการขับเคลื่อน ความเร็วสูงสุด 60 กม./ชม. พร้อมทั้งชุดควบคุมความเร็วมอเตอร์ และชุดป้องกันต่างๆ

1.3.2 ออกแบบ และสร้างเครื่องประจุแบตเตอรี่ให้สามารถควบคุมการประจุแบตเตอรี่ขนาด 12 Volt 85 Ah จำนวน 6 ลูกได้

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากปริญญานิพนธ์

1.4.1 แนวความคิดในการดัดแปลงรถตุ๊กตุ๊กที่มีอยู่ทั่วๆไป มาทำการออกแบบ และสร้างเป็นรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้าที่ใช้พลังงานไฟฟ้าแทนพลังงานเชื้อเพลิงต่างๆได้

1.4.2 ได้เรียนรู้เพื่อทำความเข้าใจในเทคนิคพีดับบลิวเอ็ม

1.4.3 ได้เรียนรู้ และเข้าใจหลักการทำงานของอุปกรณ์ทางเพาเวอร์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ

1.4.4 เพื่อเป็นการประหยัดพลังงานน้ำมัน และแก๊ส ลดมลภาวะบนท้องถนน

1.4.5 ช่วยส่งเสริมการท่องเที่ยวของประเทศไทย และช่วยรักษาสภาพสิ่งแวดล้อม

ซึ่งรายละเอียดเนื้อหาต่างๆ ของปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วย

บทที่ 2 จะเป็นการกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่จำเป็น ในการทำโครงงานนี้ เช่น ทฤษฎีมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง , หลักการเบื้องต้นของวงจร Chopper , หลักการคำนวณหาขนาดของมอเตอร์ , คุณสมบัติของเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่ และมอสเฟทกำลัง

บทที่ 3 หลักการที่นำมาใช้ โดยจะเป็นการกล่าวถึงรายละเอียดของโครงงาน โดยในบทนี้จะกล่าวถึงบล็อกไดอะแกรมต่างๆของโครงงาน, วิธีการคำนวณหาขนาดมอเตอร์ ,ทฤษฎีของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกำเนิดสัญญาณ PWM, ทฤษฎีของวงจรขับนำเกตด้วยไอซี TLP 250, ระบบควบคุมป้อนกลับแบบพีไอ, ทฤษฎีแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบสวิตช์ชิ่ง, วงจรออปแอมป์พื้นฐาน

บทที่ 4 จะเป็นการกล่าวถึงวงจรทั้งหมดที่ใช้ในโครงงาน พร้อมหลักการทำงานของวงจรแต่ละวงจรอย่างละเอียด และผลของสัญญาณที่ได้ในแต่ละวงจร

บทที่ 5 ผลการทดสอบ จะเป็นการกล่าวถึงการทดสอบสมรรถนะของรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้า ได้แก่ การทดสอบความเร็วสูงสุด , การทดสอบหาอัตราเร่ง , การทดสอบหาอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าต่อระยะทาง, การทดสอบหาอัตราการสิ้นเปลืองกำลังไฟฟ้าต่อความเร็วรถ, การทดสอบหาแรงบิด, การทดสอบหาระยะเวลาที่รถสามารถวิ่งใช้งานได้ และการหาประสิทธิภาพของรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้า ซึ่งการทดสอบนี้จะมีทั้งขณะได้รับโหลด และไม่ได้รับโหลด โดยในขณะได้รับโหลดจะทดสอบแบบลูปเปิด และลูปปิด

บทที่ 6 สรุป และวิจารณ์โครงงาน จะเป็นการกล่าวถึงการวิจารณ์โครงงานที่ได้ทำในครั้งนี้ และปัญหาต่างๆ ที่ได้ประสบมา พร้อมทั้งแนวทางในการพัฒนาโครงงานในอนาคต

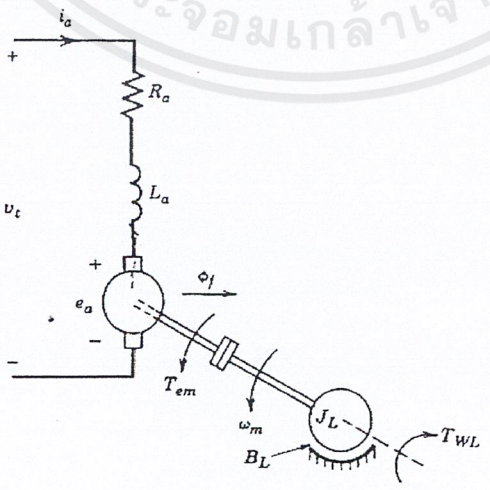
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในโครงงาน

เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงเป็นเครื่องจักรที่ทำหน้าที่แปลงรูปพลังงานระหว่างพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงกับพลังงานกล โดยที่เครื่องจักรทำงานโดยการหมุนตัวหมุนเมื่อเครื่องจักรแปลงรูปพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงเรียกว่า เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง (DC Generator) และถ้าเครื่องจักรแปลงรูปพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงเป็นพลังงานกลเรียกว่า มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC Motor)

2.1 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ทำหน้าที่เปลี่ยนแปลงพลังงานไฟฟ้าไป เป็นพลังงานกล มีขดลวดตัวนำเรียกว่าขดอาร์เมเจอร์ (Armature Winding) เมื่อให้แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมมอเตอร์จะเกิดกระแสไหลผ่านแปรงถ่าน ซี่คอมมิวเตเตอร์ (Commutater) และขดลวดอาร์เมเจอร์ ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กซึ่งจะตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดสเตเตอร์ก่อให้เกิดแรงบิดขึ้น ทำให้ส่วนของโรเตอร์หมุน โดยแปรงถ่านและซี่คอมมิวเตเตอร์เป็นตัวจัดทิศทางกระแสที่ไหลผ่านตัวนำ เพื่อให้เกิดแรงกระทำกับขดลวดตัวนำในทิศทางที่ทำให้เกิดการหมุนอย่างต่อเนื่อง วงจรสมมูลย์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 วงจรสมมูลย์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อดีของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

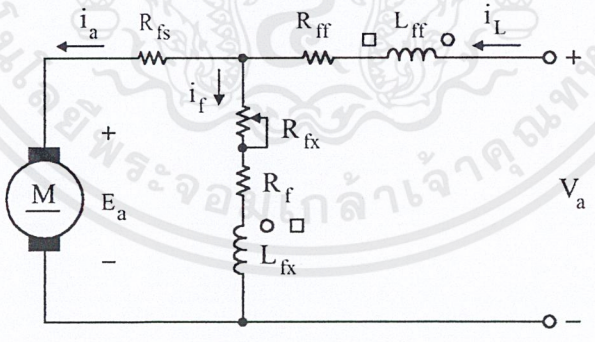
1. มีแรงบิดขณะสตาร์ทสูงมากจึงเหมาะกับงานยกของหรืองานประเภทขับเคลื่อน
2. ควบคุมง่ายกว่าและนุ่มนวลกว่ามอเตอร์กระแสสลับที่ทำงานแบบเดียวกัน
3. ช่วงความเร็วที่ควบคุมได้กว้าง สามารถเพิ่มความเร็วให้สูงหรือต่ำกว่าปกติได้

ข้อเสียของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

1. ต้องจัดหาแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงไว้ใช้งาน
2. มีวิธีการสตาร์ทที่ยุ่งยากกว่ามอเตอร์กระแสสลับในมอเตอร์ขนาดใหญ่
3. ค่าบำรุงรักษามากกว่ามอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับเนื่องจากการสึกหรอของคอมมิวเตเตอร์ที่เกิดจากอาร์ค การขัดสีกับแปรงถ่าน
4. มีราคาแพงกว่ามอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับที่ขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้าเท่ากัน

2.1.1 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบผสม (Compounded dc motor)

เป็นการนำข้อดีของมอเตอร์แบบ Shunt และ แบบ Series มาประยุกต์ใช้ร่วมกันโดย ข้อดี ของมอเตอร์แบบ Shunt คือ ให้ความเร็วรอบที่คงที่แม้โหลดจะเปลี่ยนแปลงไปมากน้อยเท่าไร ความเร็วรอบจะเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ส่วนข้อดีของมอเตอร์แบบ Series คือ จะให้แรงบิดในการออกตัวได้ดีกว่าแบบอื่นๆ



เครื่องหมาย O หมายถึง การต่อขดลวดสนามแบบ Cumulative Compound

□ หมายถึง การต่อขดลวดแบบ Differentially Compound

รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลย์ของ Compound dc motor แบบ Short Shunt

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการที่ใช้อธิบาย Compound dc motor ในสภาวะ Steady – state

$$V_a = E_a + \left(R_a + R_{fs}\right)I_a = R_f I_f \tag{2-1}$$

$$I_L = I_a + I_f \tag{2-2}$$

$$I_a = I_{fs} \tag{2-3}$$

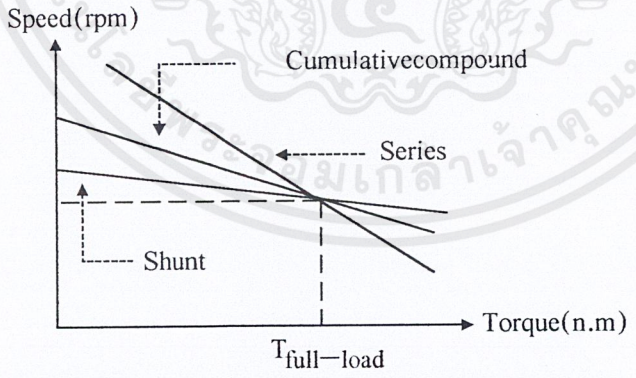
$$F_t = F_{sh} \pm F_{se} - F_{ar} \tag{2-4}$$

$$I'_f = I_f \pm \left(N_{fs}/N_f\right)I_a - \left(F_{ar}/N_f\right) \tag{2-5}$$

เครื่องหมาย (+ , -)หน้าเทอมที่ 2 ในสมการ (2-4) และ (2-5) แสดงให้เห็นถึงลักษณะการต่อขดลวดสนามแบบ Cumulative (+) และ Differential (-)

ดังนั้นในกรณีที่ Compound dc motor เปลี่ยนการทำงานเป็น Compound dc generator กระแสอาร์เมเจอร์ I_a (และ I_{fs}) จะกลับทิศทางไหลแต่กระแสใน Shunt field winding ไม่เปลี่ยนทิศทาง จึงทำให้ จาก Cumulative เป็น Differential หรือจาก Differentially เป็น Cumulatively

เนื่องจากฟลักซ์ ϕ_t ใน Compounded dc motor เกิดจากกระแสในวงจรอาร์เมเจอร์ (แปรผันตามโหลด) และจากกระแสใน Shunt field winding (ซึ่งคงที่ในกรณีที่ V_a คงที่) ดังนั้น Compound dc motor จึงมีคุณสมบัติอยู่ระหว่าง Series motor กับ Shunt motor ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของ Series, Cumulative Compound และ Shunt Motor

2.1.2 คุณสมบัติของมอเตอร์ดีซีแบบคอมปาวด์

มอเตอร์ดีซีซึ่งอาศัยการทำงานร่วมของขดลวด Series (ให้ Torque ขณะเริ่มเดินเครื่องสูง) และขดลวดแบบ Shunt (ให้ความเร็วรอบเกือบคงที่) ในอัตราส่วนที่เหมาะสม คือ มอเตอร์แบบ Cumulative Compound มอเตอร์ชนิดนี้จะให้กระแสจำนวนมากไหลผ่านขดลวด Series ในช่วงเริ่ม

เอกสารนี้สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เดินเครื่องจึงให้คุณสมบัติในช่วงของมอเตอร์แบบ Series เมื่อมอเตอร์เดินเครื่องที่ความเร็วรอบสูงขึ้นเรื่อยๆกระแส I_a ซึ่งไหลผ่านขดลวด Series จะน้อยลงเรื่อยๆ ทำให้คุณสมบัติของขดลวด Series ที่แสดงออกลดน้อยลง ในช่วงการทำงานนี้จะแสดงคุณสมบัติที่ใกล้เคียงกับมอเตอร์ดีซีแบบ Shunt กล่าวคือให้ความเร็วรอบที่เกือบคงที่

และจากสมการ

$$E_a = K_a \phi \omega_m \tag{2-6}$$

$$\tau = K_a \phi I_a \tag{2-7}$$

เมื่อ ω_m = ความเร็วของอาเมเจอร์, rad / sec

τ = แรงบิดที่สร้างโดยมอเตอร์, N – m

K_a = ค่าคงที่

ϕ = Flux per pole, Webers

ซึ่ง τ คือ แรงบิดที่เกิดจากกระแสไหลในขดลวดอาเมเจอร์ ซึ่งอยู่ในสนามแม่เหล็ก (เรียกว่า Induced Torque)

จากสมการข้างต้น จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด, τ กับความเร็วรอบ, ω_m ดังนี้

$$\omega_m = V_a / K_a \phi - r_a / (K_a \phi)^2 \tau \tag{2-8}$$

2.2 การคำนวณหาพิกัดกำลังของมอเตอร์

ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณหาขนาดพิกัดของมอเตอร์ เพื่อใช้ในการขับเคลื่อนรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้ามีดังนี้

W = น้ำหนักของรถ (kg)

V = อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร็ว (m / s)

μ = สัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างยางกับพื้นถนน (ton / Kg)

η_m = ประสิทธิภาพของมอเตอร์

η = ประสิทธิภาพของระบบส่งกำลัง

Pm = ค่าขนาดกำลังของมอเตอร์ (KW)

เมื่อทราบค่าตัวแปรทั้งหมดแล้วสามารถหาขนาดมอเตอร์ได้จากสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P_m = \{(\mu WV)/102\} \times (100/\eta) \quad (2\text{-}9)$$

ในการกำหนดค่า V กำหนดจากอัตราความเร็วสูงสุดของรถไฟฟ้าที่ต้องการให้สามารถวิ่งได้ (max speed)

2.3 วิธีการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์

ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและแรงบิดของมอเตอร์กระแสตรงตามสมการที่ (2-8) แสดงว่าเราสามารถควบคุมความเร็วได้ 3 วิธี ดังนี้คือ

1. การควบคุมแรงดันอาเมเจอร์ (Armature Voltage Control)
2. การควบคุมฟลักซ์สนาม (Field Flux Control)
3. การควบคุมความต้านทานอาเมเจอร์ (Armature Resistance Control)

2.3.1 Armature Voltage Control

ถ้าแรงดันอาเมเจอร์ของ Separated excited หรือ Series dc motor ที่กำลังวิ่งอยู่ที่สภาวะคงที่ ถูกลดลงกระแสอาเมเจอร์จะลดลงเป็นผลให้แรงบิดของมอเตอร์ลดลงด้วย ในขณะที่แรงบิดของมอเตอร์น้อยกว่าแรงบิดที่โหลดต้องการมอเตอร์จะเกิดความหน่วง เป็นสาเหตุให้ความเร็วและ back emf ลดลงเรื่อยๆ จนกระทั่งแรงบิดของมอเตอร์เท่ากับแรงบิดที่โหลดต้องการ ถ้าแรงดันอาเมเจอร์ของมอเตอร์ถูกลดเป็นปริมาณมากๆ ซึ่งอาจจะน้อยกว่า back emf จุดนี้จะทำให้กระแสอาเมเจอร์ไหลกลับทาง ในขณะนี้จะทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) สร้างแรงบิดที่ตรงข้ามจนกระทั่งความเร็วของมอเตอร์ตกลงถึงค่าที่ทำให้ back emf เสมอภาคกับแรงดันอาเมเจอร์

ในทางกลับกัน ถ้าแรงดันอาเมเจอร์ของมอเตอร์กระแสตรงที่กำลังวิ่งอยู่ ณ สถานะคงที่ถูกเพิ่มขึ้น มอเตอร์จะเกิดอัตราเร่งทำให้ความเร็วของมอเตอร์ และ back emf เพิ่มขึ้น จนกระทั่งไปสู่ จุดสมดุลใหม่ คือ แรงบิดของมอเตอร์เท่ากับแรงบิดที่โหลดต้องการ ที่ความที่สูงกว่าเดิม ขณะที่ เพิ่มความเร็ว แรงดันอาเมเจอร์ควรจะเปลี่ยนทีละน้อยๆ เพราะการเปลี่ยนแรงดันอาเมเจอร์ทีละมากๆนั้น เป็นสาเหตุให้กระแสไหลผ่านอาเมเจอร์เป็นปริมาณมาก ซึ่งจุดนี้อาจจะทำความเสียหายให้กับคอมมิวเตเตอร์หรือลดอายุการใช้งานของมอเตอร์ลงได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 Field Flux Control

ถ้า Field ของ Separate หรือ Series motor ที่กำลังวิ่งอยู่ ณ ความเร็วหนึ่งอ่อนตัวลงจะทำให้ induced emf ลดลง และเนื่องจากความต้านทานอาเมเจอร์มีค่าต่ำจึงทำให้กระแสเพิ่มขึ้นเป็นปริมาณมากกว่าการลดลงของ Field Flux เป็นผลทำให้แรงบิดของมอเตอร์เพิ่มขึ้นเป็นปริมาณมากด้วย ซึ่งจะมากกว่าแรงบิดที่โหลดต้องการ ทำให้มอเตอร์เร่งความเร็วและ back emf เพิ่มขึ้น จนกระทั่งมอเตอร์จะมาถึงจุดสมดุลย์ที่ความเร็วใหม่ที่สูงกว่าเดิม ที่ค่าแรงบิดของมอเตอร์เท่ากับที่โหลดต้องการอีกครั้ง การที่ Field ของ Separately exited motor เพิ่มขึ้น induced emf จะเพิ่มขึ้นและเป็นธรรมดาที่จะเกินแรงดันที่จ่าย เป็นเหตุให้กระแสอาเมเจอร์ไหลกลับทาง นั่นคือ มอเตอร์จะทำงานในลักษณะที่ เป็น Generator และป้อนพลังงานกลับสู่ระบบของแหล่งจ่าย พลังงานนี้ได้มาจากพลังงานจลน์ของเครื่องจักรและโหลด เนื่องจากความเร็วลดลงอย่างรวดเร็ว จนกระทั่งมอเตอร์เข้ามาสู่จุดสมดุลย์ที่ ความเร็วใหม่ ซึ่งน้อยกว่าเก่า ที่ซึ่งแรงบิดของมอเตอร์เท่ากับแรงบิดที่โหลดต้องการ ในกรณีของ Series motor การเพิ่ม Field จะทำให้กระแสอาเมเจอร์ลดลงอย่างมาก (แต่ไม่กลับทิศ) เพราะว่าแรงบิดของมอเตอร์ต่ำกว่าแรงบิดที่โหลดต้องการ มอเตอร์จึงเกิดความหน่วง ความเร็วจะลดลง จนกระทั่งแรงบิดของมอเตอร์เท่ากับแรงบิดที่โหลดต้องการ

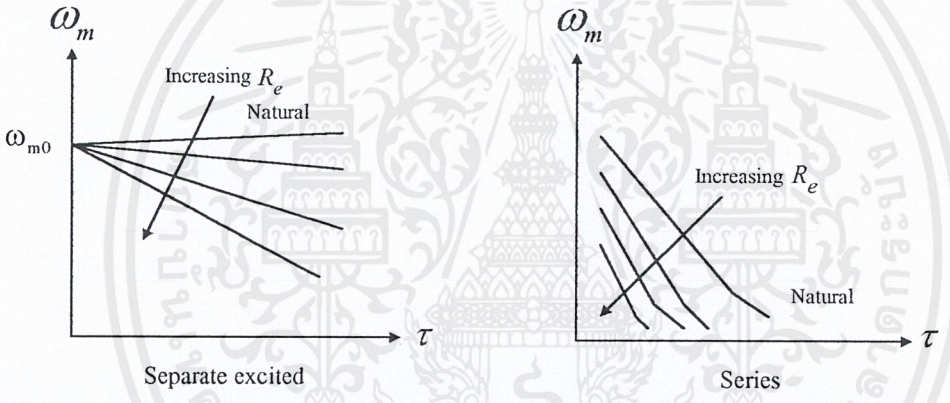
ในกรณีของ Shunt motor ความเร็วจะต่ำที่สุด เมื่อ Full Field โดยไม่มีความต้านทานภายนอกมาต่ออยู่ที่วงจร Field ในกรณีของ Separate excited motor ความเร็วต่ำสุดจะถูกจำกัด โดยความร้อนของ Field coils และการอิ่มตัวของวงจรแม่เหล็ก เพราะว่าที่ Full excitation นั้นรูปแบบของเครื่องจักรปกติจะทำงานที่จุดอิ่มตัวของวงจรแม่เหล็ก ดังนั้นความเร็วสามารถปรับให้ลดลงกว่า natural Speed Torque Characteristic เพียงเล็กน้อยเท่านั้น ความเร็วสูงสุดถูกจำกัดโดยความไม่มีเสถียรภาพของมอเตอร์ ที่เกิดจากผลกระทบของการสูญเสียรูปของสนามแม่เหล็กในปฏิกิริยา Armature reaction ภายใต้การอ่อนตัวของ Field และโครงสร้างทางกลศาสตร์ของมอเตอร์ ปกติแล้วมอเตอร์กระแสตรงได้การออกแบบให้ สามารถเร่งความเร็วได้ถึง 1.5 ถึง 2 เท่าของความเร็วที่พิกัด Field control ของ Shunt และ Separate excited motor ใช้ในการควบคุมชนิดของ Constant power control เพราะว่าความสามารถในการจ่ายกำลังสูงสุดเกือบจะคงที่ ตลอดการปรับความเร็วใน Separate excited motor เราสามารถควบคุม Flux โดยการปรับแรงดันตกคร่อมสนาม อาจจะใช้ Controlled Rectifier หรือ Chopper ขึ้นกับแหล่งจ่ายว่าเป็น AC หรือ DC เครื่องจักรขนาดเล็กที่ใช้ Shunt motor เราสามารถปรับ Flux โดยการแทรกตัวต้านทานปรับค่าได้ในวงจรสนาม สำหรับใน Series motor นั้น เราควบคุม Flux โดยต่อ Diverter resistance คร่อม Field winding ซึ่งใน Series motor บางชนิด จะมี tap บน Field winding มอเตอร์จำพวกนี้ เราสามารถควบคุมโดยการเปลี่ยนจำนวนรอบของ Field winding ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3 Armature Resistance control

Speed – torque characteristic ของ Separate excited หรือ Shunt และ Series motor เมื่อปรับค่าความต้านทานภายนอก R_e ที่ต่ออนุกรมกับอาเมเจอร์แสดงดังรูปที่ 2.4

ข้อเสียที่สำคัญของการควบคุมความเร็วด้วยวิธีนี้คือ มีประสิทธิภาพต่ำมาก ๆ ตัวอย่าง เช่นเมื่อโหลดเป็นชนิด Constant torque power input จะคงที่ โดยมีกำลังส่วนหนึ่งจ่ายให้กับโหลด และอีกส่วนหนึ่งสูญเสียที่ R_e เราจะเห็นว่ากำลังที่จ่ายให้กับโหลดจะต้องลดลงตามความเร็วที่ลดลง ดังนั้นประสิทธิภาพของมอเตอร์จะแปรผันตามความเร็ว โดยอาจจะเทียบกับเปอร์เซ็นต์ของความเร็วพิกัดก็ได้ เช่น ที่ 10 % ของความเร็วพิกัดมอเตอร์จะมีประสิทธิภาพ 10 % ของที่พิกัด



รูปที่ 2.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Speed – torque ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ควบคุมโดยใช้วิธี armature resistance control

จากรูปที่ 2.4 แสดงถึง Armature resistance control จะเปลี่ยนลักษณะของ speed – torque characteristic ของ Separately excited หรือ Shunt motor จากที่ว่าความเร็วเกือบคงที่ตลอดช่วงแรงบิดไปเป็นคุณสมบัติการปรับความเร็วก็ได้ และเพราะมีความเร็วที่ต้องการในช่วงเวลาสั้นๆ ซึ่งประสิทธิภาพทั้งหมดของระบบลดลงไม่มากนัก เนื่องจากวิธีนี้เป็นวิธีที่ง่ายและราคาต่ำ เพื่อความสะดวกและประหยัด จึงอาจเห็นวิธีนี้ใช้ใน Series motor ขับเคลื่อนแบบ Intermitant duty

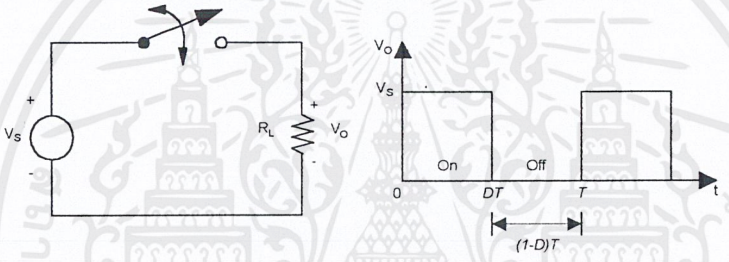
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 ทฤษฎีเบื้องต้นของวงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์แบบช็อปเปอร์

การควบคุมความเร็วแบบชิ้อปเปอร์ (Chopper) มีหลายชนิด ส่วนชนิดที่นำมาใช้ในโครงงานนี้เป็นแบบบั๊คคอนเวอร์เตอร์

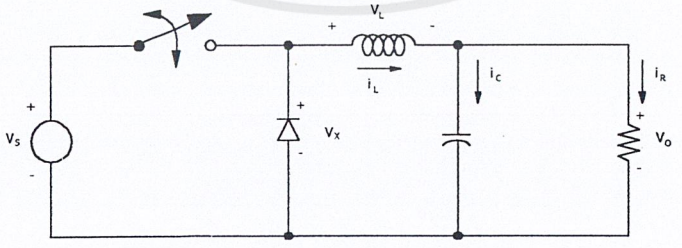
2.4.1 วงจรลดระดับแรงดัน (Buck Converter)

เป็นวงจรที่ใช้ลดระดับแรงดันไฟตรง โดยอาศัยหลักของการเปิดและปิดสวิทช์ทำให้ได้ระดับแรงดันดังรูปที่ 2.5 โดยจะมีข้อกำหนดให้ค่า Duty = Ton / (Ton + Toff) = Ton / T จึงมีค่าอยู่ระหว่าง 0 - 1 ซึ่งค่านี้จะใช้เป็นตัวกำหนดระดับแรงดัน output ที่ต้องการ



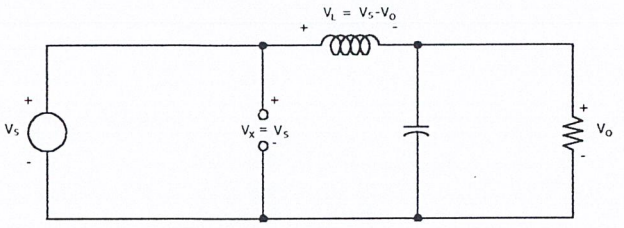
รูปที่ 2.5 แรงดันที่เกิดจากการสวิทช์ที่ช่วงเวลา on และ off

จากหลักการของการสวิทช์เราสามารถที่จะทำให้กระแสต่อเนื่องได้โดยการใช้ Inductor เป็นตัวเชื่อมต่อพลังงาน และ ใช้ไดโอดเป็นทางผ่านของกระแสขณะสวิทช์ off ทำให้เราได้วงจรการลดระดับแรงดันดังรูปที่ 2.6

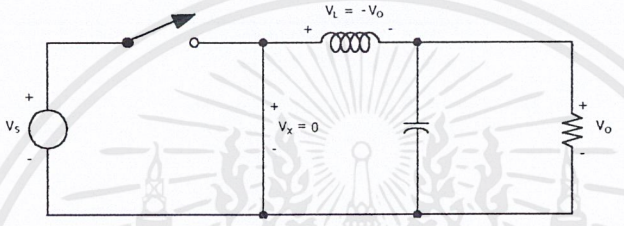


รูปที่ 2.6 วงจร Buck dc-dc converter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 วงจรสมมูลย์ขณะสวิทช์ on



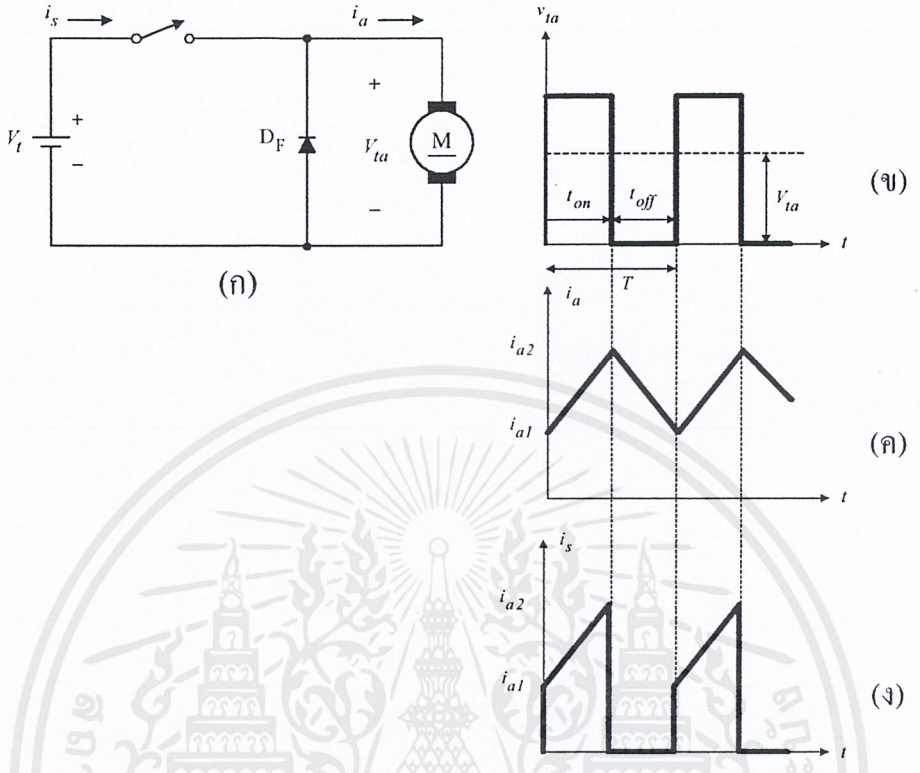
รูปที่ 2.8 วงจรสมมูลย์ขณะสวิทช์ off

ในรูปที่ 2.9 สวิตช์จะถูกควบคุมให้ตัดและต่อแรงดันไฟฟ้า เป็นช่วง ๆ ทำให้ได้แรงดันเฉลี่ยที่คร่อมมอร์เตอร์ (V_{ta}) เปลี่ยนแปลงตามต้องการซึ่งขนาดของแรงดัน V_{ta} ขึ้นอยู่กับช่วงเวลาออน (turn on time; t_{on}) และช่วงเวลาออฟ (turn off time; t_{off}) วิธีการหนึ่งที่จะควบคุมแรงดัน V_{ta} ที่มีความถี่ในการสวิตช์คงที่และเปลี่ยนแปลงช่วงเวลาออน วิธีการนี้เรียกว่า " พัลส์วิดมอดูเลชั่น " ดังนั้นค่าเฉลี่ย V_{ta} จะสามารถหาได้จากสมการ

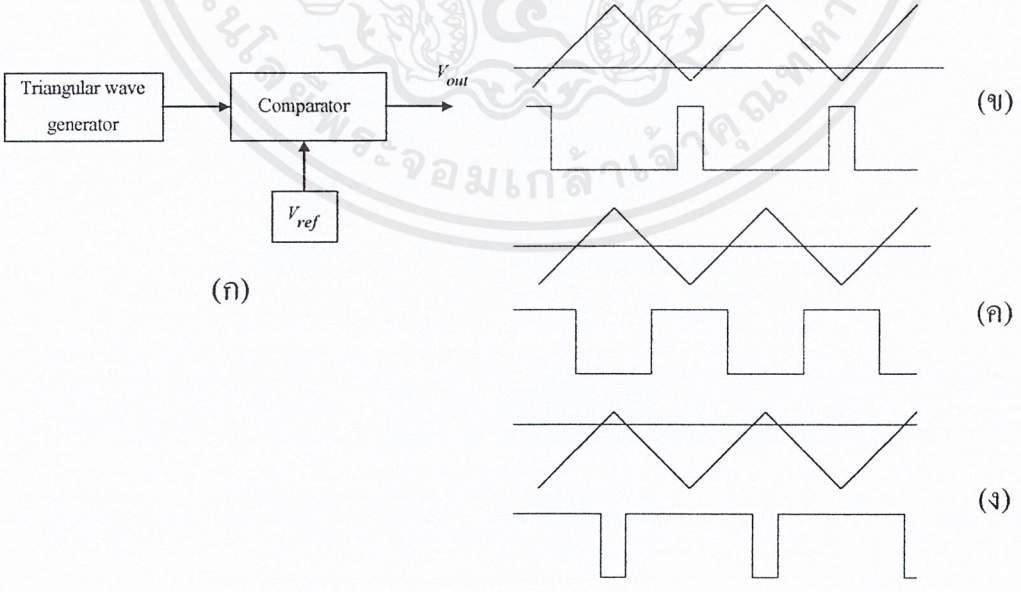
$$V_{ta} = \frac{1}{T}\int_0^{t_{on}} v_{ta}\,dt = \frac{t_{on}}{T}V_t \qquad (2\text{-}10)$$

แรงดันเฉลี่ย V_{ta} สามารถเปลี่ยนแปลงได้จาก 0 ถึง V_t โดยการควบคุมดิวตี้ไซเคิ้ล ($D = t_{on}/T$) วิธีการสร้างสัญญาณ PWM เบื้องต้นเพื่อที่จะนำไปควบคุมการสวิตช์ แสดงดังรูปที่ 2.10 รายละเอียดต่างๆ ของทฤษฎีบั๊คคอนเวอร์เตอร์ และการสร้างสัญญาณ PWM จะขอกล่าวในหัวข้อต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 หลักการของวงจรบั๊คคอนเวอร์เตอร์ ก.) วงจรบั๊คคอนเวอร์เตอร์พื้นฐาน ข.) ถึง ง.) ลักษณะรูปคลื่นที่ได้



รูปที่ 2.10 การสร้างสัญญาณ PWM ที่ดิวตี้ไซเคิ้ลต่างๆ ก.) บล็อกไดอะแกรม ข.) ดิวตี้ไซเคิ้ล 10% ค.) ดิวตี้ไซเคิ้ล 50% ง.) ดิวตี้ไซเคิ้ล 90%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 เทคนิคในการควบคุมแบบ Chopper มี 2 วิธี คือ

1.) Time Ratio Control (TRC)

วิธีนี้รู้จักในชื่อของ Pulse width modulation control ซึ่งเทคนิคการควบคุมแบบ TRC ยังแบ่งได้เป็น 2 ชนิดย่อยๆ คือ

ก. Constant frequency TRC : คาบการทำงาน T_s คงที่แต่จะปรับช่วง on ของ switch เพื่อควบคุม duty ratio D

ข. Variable frequency TRC : จะปรับ duty ratio D โดย

- ให้ t_{on} คงที่ ปรับ T_s
- ปรับทั้ง t_{on} และ T_s

ในการควบคุมแบบ Variable frequency โดยให้ t_{on} คงที่นั้นจะได้ output voltage คงที่ frequency การทำงานของ chopper ใน mode chopper ที่ความถี่ต่ำมากๆ จึงไม่ดี นอกจากนั้นการทำงานของ chopper ใน mode variable frequency ยังทำให้ออกแบบ input filter ยากอีกด้วยเพราะฉะนั้น variable frequency control จึงไม่เป็นที่นิยม

2.) Current Limit Control (CLC)

วิธีนี้เรียกอีกอย่างว่า point by point control เราจะควบคุม duty ratio โดยควบคุม load current ให้อยู่ระหว่างค่า min กับ max ที่เรากำหนดเมื่อ load current ขึ้นไปถึงค่า max switch จะ off และ on อีกทีเมื่อ load current ลงมาสู่ค่า min

2.4.3 เทคนิคการควบคุมแบบ Constant frequency TRC

จากรูปที่ 2.11 ในการทำงานแบบ Pulse width control นั้นสัญญาณการควบคุม switch ซึ่งจะควบคุมการ on, off ได้จากการเปรียบเทียบสัญญาณควบคุม $V_{control}$ กับ waveform รูปฟันเลื่อยซึ่ง $V_{control}$ ได้จากการขยายค่าแตกต่างระหว่าง V_o (actual) กับ V_o ที่ต้องการ ความถี่ของคลื่นรูปฟันเลื่อยจะเป็นตัวกำหนดความถี่ของการ switching ซึ่งในการควบคุมแบบ Pulse width ความถี่การ switching จะคงที่ และมักมีค่าตั้งแต่ 1 KHz ถึง 100 KHz ความสัมพันธ์ในการทำงานคือ

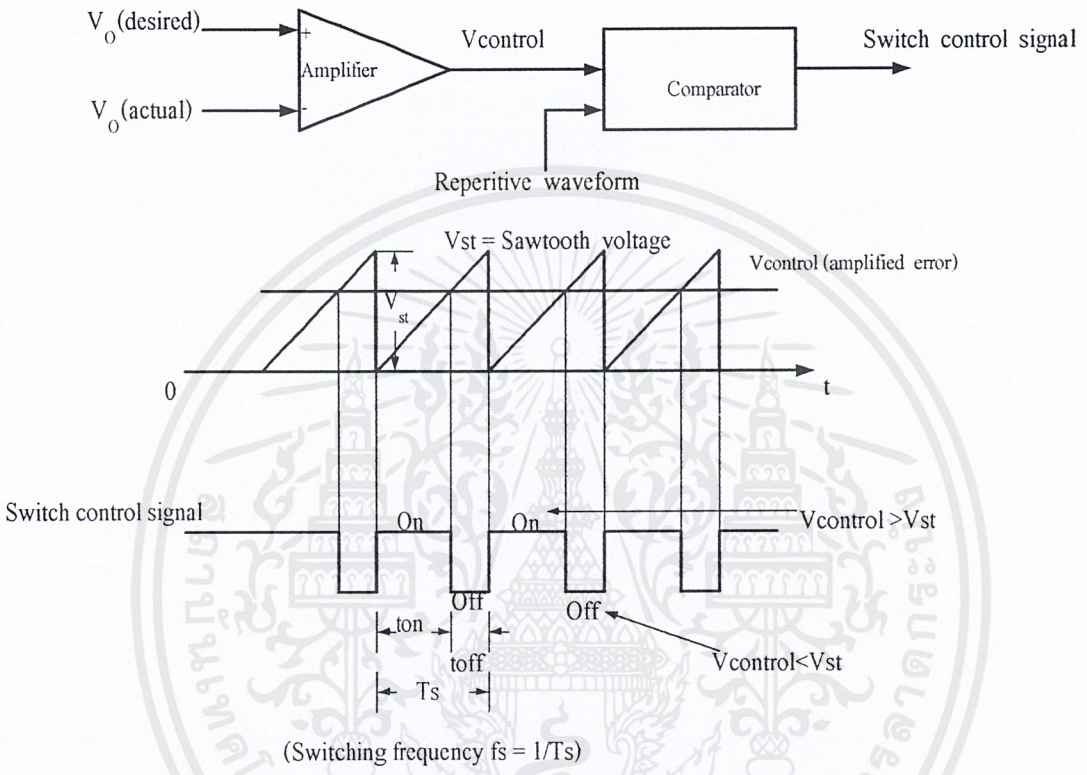
- เมื่อ $V_{control} > V_{st}$: switch control signal จะ high ทำให้ switch on
- เมื่อ $V_{control} < V_{st}$: switch control signal จะ low ทำให้ switch off

ซึ่งเราจะได้ duty ratio ดังนี้

$$D = \left(\frac{t_{on}}{T_s}\right) = \left(\frac{V_{control}}{V_{ts}}\right) \qquad (2\text{-}11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ V_{ts} = peak value ของคลื่นฟันเลื่อย



รูปที่ 2.11 การทำงานแบบ Pulse width control

ฉะนั้นจะเห็นได้ว่าการปรับค่า t_{on}/T_s ก็สามารถควบคุม V_o ได้ จากรูปที่ 2.6 เราต่อ diode เข้าไปเพื่อให้เป็นทางไหลของ load current ในช่วงที่ switch off และ load current ไหลเอง จากพลังงานสะสมใน L ซึ่งเราเรียก diode นี้ว่า freewheel diode ส่วน L และ C นั้นเป็น low pass filter มี ประโยชน์คือ ขจัด ripple เนื่องจาก harmonic ลำดับสูงๆ ออก ซึ่ง V_{on} ซึ่งเป็นอินพุต ของ low pass filter ค่า corner frequency (f_c) ของ filter จะต้องต่ำกว่า f_s มากๆ เพื่อที่จะกำจัด switch frequency ripple ใน output voltage

ในการวิเคราะห์ทาง steady state ถือว่าตัว C ใน low pass filter มีค่ามากพอที่จะทำให้ $V_o(t) = V_o$ และกระแสเฉลี่ยของ inductor จะเท่ากับ output current เฉลี่ย I_o โดยที่กระแส capacitor เฉลี่ยในช่วง steady state เป็นศูนย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.4 การวิเคราะห์ในโหมดการนำกระแสต่อเนื่อง

ในสภาวะอยู่ตัวค่าเฉลี่ยแรงดันที่ตกคร่อม L จะเท่ากับศูนย์ในหนึ่งคาบเวลา จากรูปที่ 2.12 ค. จะได้ว่า พื้นที่ A + พื้นที่ B = 0

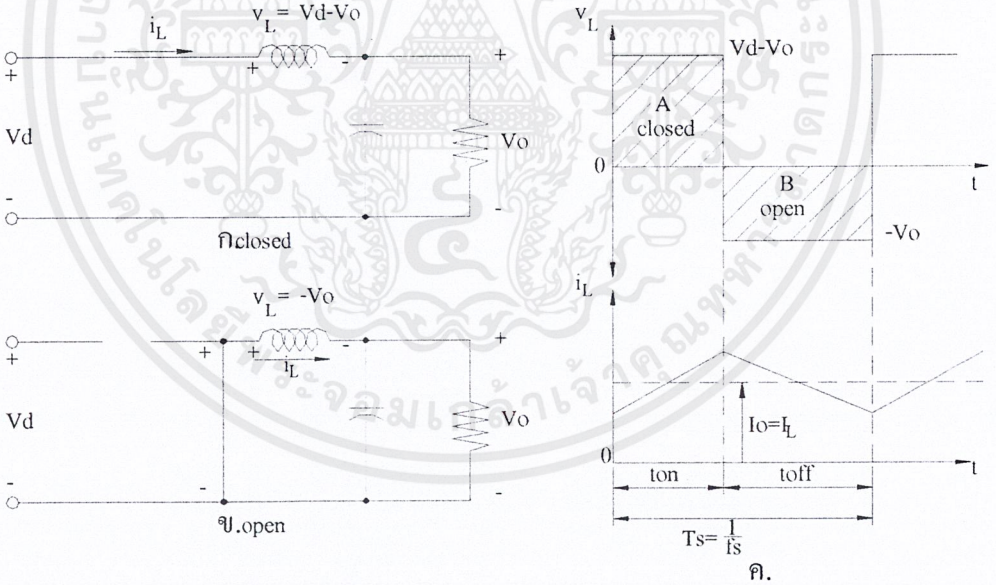
$$\int_0^{Ts}(v_L)dt = \int_0^{ton}(v_L)dt + \int_{ton}^{Ts}(v_L)dt = 0 \qquad (2\text{-}12)$$

$$(Vd - Vo)DT = Vo(1-D)T$$

$$Vo = DVd$$

หรือ

$$\frac{Vo}{Vd} = D \quad \text{(duty ratio)} \qquad (2\text{-}13)$$



รูปที่ 2.12 การทำงานในโหมดการนำกระแสต่อเนื่อง

ดังนั้นในโหมดนี้แรงดันทางด้านเอาท์พุทจะแปรผันอย่างลิเนียร์กับค่า Duty ratio ของสวิทช์ที่ใช้ในการเปิด-ปิด แรงดันทางด้านอินพุท โดยแรงดันทางด้านเอาท์พุทจะไม่ขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ใดๆของวงจร และถ้าเราไม่ใส่ใจหรือละทิ้งการสูญเสียภายในวงจรแล้ว(เพราะมีค่าต่ำ) กำลังทางด้านอินพุท (Pd) จะเท่ากับกำลังทางด้านเอาท์พุท (Po)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

$$P_d = P_o$$

$$VdId = VoIo$$

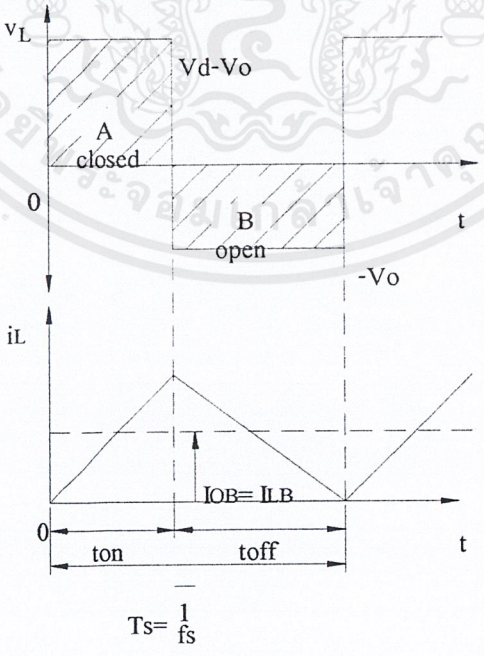
จะได้ $$\frac{Vd}{Vo} = \frac{Io}{Id} = \frac{1}{D} \qquad (2\text{-}14)$$

ดังนั้นในโหมดของการนำกระแสต่อเนื่องนี้วงจร Step-down Converter จะทำหน้าที่คล้ายๆกันกับหม้อแปลงไฟฟ้ากระแสตรง โดยที่ Turn ratio สมมูลย์ของหม้อแปลงตัวนี้สามารถที่จะปรับได้ในย่าน 0-1 โดยการควบคุมที่ Duty ratio ของสวิทช์

เราสามารถที่จะหากระแสเฉลี่ยทางด้านอินพุทของคอนเวอร์เตอร์ได้จากความสัมพันธ์เดียวกับหม้อแปลง รูปคลื่นของกระแสทางด้านอินพุทจะเป็นลักษณะที่สวิงไปมาระหว่างค่าPeak กับศูนย์ ทุกๆช่วงเวลาที่สวิทช์ OFF ดังนั้นบางครั้งก็อาจต่อวงจรฟิลเตอร์เข้ากับทางด้านอินพุทเพื่อกำจัดในเรื่องของฮาร์โมนิคส์ได้

2.4.5 ช่วงรอยต่อระหว่างโหมดการนำกระแสต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง

ในหัวข้อนี้จะพูดถึงช่วงรอยต่อระหว่างโหมดการนำกระแสต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง โดยสามารถแสดงรูปคลื่นของ v_L และ i_L ได้ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 กระแสในตัวเหนี่ยวนำที่ช่วงรอยต่อของ
โหมดการนำกระแสต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

45963

ที่ตรงช่วงรอยต่อนี้จะได้ว่า กระแสเฉลี่ยใน L

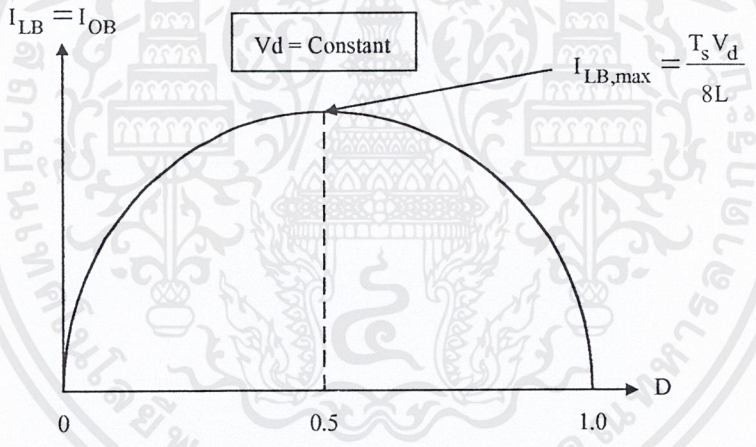
$$I_{LB} = \frac{1}{2} i_{L,peak}$$

$$= \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{L} (Vd - Vo) ton$$

$$I_{LB} = \frac{DTs}{2L} (Vd - Vo) \quad (2\text{-}15)$$

$$I_{LB} = I_{OB} \quad (2\text{-}16)$$

เมื่อนำสมการที่ (2-16) ไป plot graph โดยให้ I_{LB} อยู่ในฟังก์ชั่นของ D จะได้กราฟที่มีลักษณะดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่าง I_{LB} ในฟังก์ชั่นของ D

ดังนั้นช่วงเวลาในการควบคุมสภาวะนี้ (โดยกำหนดให้ค่า Ts, Vd, Vo, L และ D มีค่าคงที่) ถ้ากระแสเฉลี่ยทางด้านเอ้าท์พุท(ซึ่งเป็นค่าเดียวกันกับค่าเฉลี่ยของกระแส i_L ด้วย) มีค่าต่ำกว่า I_{LB} ตามที่ได้กำหนดไว้ในสมการที่ 2-16 แล้ว สภาวะการทำงานก็จะเปลี่ยนไปอยู่ในโหมดของการนำกระแสไม่ต่อเนื่องทันที

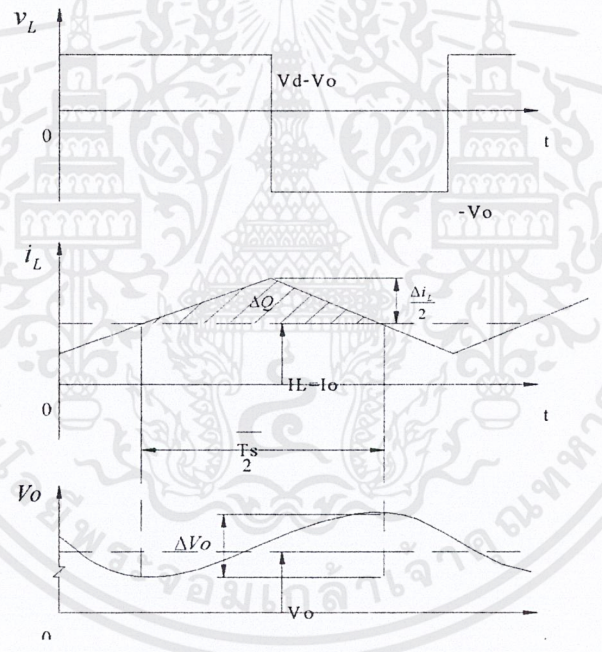
ช่วงรอยต่อระหว่างโหมดการนำกระแสต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่องนี้จะมีประโยชน์สำหรับการคำนวณหาค่า L ต่ำสุดที่ใช้ในวงจรที่ยังสามารถให้กระแสที่ไหลผ่านตัวมันยังมีความต่อเนื่องอยู่ได้ โดยถ้านำกราฟในรูปที่ 2.13 ไปวิเคราะห์หาค่า $L,\min$ จะได้สมการหาค่า L ต่ำสุดดังสมการที่ 2-17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$L,\min = \frac{(1-D)R}{2f} \qquad (2\text{-}17)$$

2.4.6 ริปเปิ้ลของแรงดันทางด้านเอ้าท์พุท

ในหัวข้อข้างต้นที่ได้กล่าวไปนั้นเราได้สมมุติให้ $vo(t) = Vo$ แต่ในทางปฏิบัติแล้วจะมีริปเปิ้ลในแรงดันทางด้านเอ้าท์พุทอยู่ และค่าของตัวเก็บประจุ (C-filter) จะสามารถคำนวณหาได้จากรูปคลื่นที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.15 ซึ่งเป็นโหมดของการนำกระแสต่อเนื่อง โดยการสมมุติให้ริปเปิ้ลใน i_L ไหลผ่าน C ทั้งหมด ส่วนค่ากระแสเฉลี่ยจะเป็นกระแสที่ไหลผ่านโหลดตัวต้านทาน



รูปที่ 2.15 ริปเปิ้ลในแรงดันเอ้าท์พุทของวงจร Step-down converter

จากรูปจะได้ว่า

$$\Delta Vo = \frac{\Delta Q}{C} = \frac{1}{C} \times \left[\frac{1}{2} \times \frac{\Delta iL}{2} \times \frac{Ts}{2} \right]$$

$$\Delta i_L \text{ ขณะ OFF} = \frac{Vo}{L}(1-D)Ts$$

$$\therefore \Delta Vo = \frac{1}{8C} \cdot \frac{Vo}{L}(1-D)Ts \cdot Ts$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นั่นคือ

$$\frac{\Delta Vo}{Vo} = \frac{1}{8} \cdot \frac{Ts^2}{LC}(1-D) \qquad (2\text{-}18)$$

ดังนั้นขนาดของ C-filter จะสามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ 2-18 โดยกำหนดริปเปิ้ลของแรงดันได้ตามที่ต้องการซึ่งปกติจะกำหนดให้มีค่าต่ำกว่า 1%

2.5 เครื่องอัดประจุแบตเตอรี่ (Battery Charger)

2.5.1 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับแบตเตอรี่

แบตเตอรี่ที่ใช้ในโครงงานนี้ เป็นแบบตะกั่ว – กรด ซึ่งเราจะกล่าวถึงแบตเตอรี่ แบบตะกั่ว – กรดชนิดต่างๆ อย่างกว้างๆ ได้ดังนี้

1.) แบตเตอรี่แบบตะกั่ว – กรดโดยที่ไม่ต้องเติมน้ำกลั่น (Non spill lead – acid Battery) แบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่

ก. แบตเตอรี่แบบมาตรฐาน (Standard Battery)

แบตเตอรี่ชนิดนี้เมื่อไม่ได้มีการคายประจุด้วยตนเอง (Self – discharge) ที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมต้องมีการอัดประจุใหม่ ทุก ๆ 4-6 สัปดาห์ เพื่อชดเชยค่าการคายประจุด้วยตนเอง แบตเตอรี่นี้เหมาะสำหรับการใช้งานในช่วงสั้นๆ

ข. แบตเตอรี่ถาวร (Permanent Battery)

แบตเตอรี่ชนิดนี้สามารถเก็บที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียลได้หลายเดือนโดยไม่ต้องมีการดูแลรักษาและสามารถอัดประจุให้กับแบตเตอรี่ ทุก ๆ 10 เดือนและ มีการคายประจุด้วยตนเองต่ำ เนื่องจาก ใช้ตะกั่วผสม (Lead Alloy) ชนิดพิเศษ เหมาะสำหรับใช้งานพิเศษที่ต้องการใช้งานสูงกว่า แบบแบตเตอรี่มาตรฐาน (Standard Battery)

2.) แบตเตอรี่แบบตะกั่ว – กรดที่มีการปิดผนึก (Recombining seal lead – acid Battery)

ปกติแล้วเมื่อแบตเตอรี่อัดประจุจนถึงระดับที่อัดประจุสูงกว่าปกติ (Over charge) กรดฟลูริกที่เป็นอิเล็กโตรไลต์จะเกิดปฏิกริยาเป็นก๊าซไฮโดรเจนและออกซิเจนทำให้ความเข้มข้นของอิเลคโตรไลต์เพิ่มขึ้นเราต้องมีการเติมน้ำกลั่นมิฉะนั้นแบตเตอรี่จะเสื่อมคุณภาพได้ การเติมน้ำกลั่นเป็นการจำกัดวงในการใช้งานของแบตเตอรี่ ฉะนั้นเราจึงมีการพัฒนาแบตเตอรี่ใช้งานโดยไม่ต้องเติมน้ำกลั่น ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

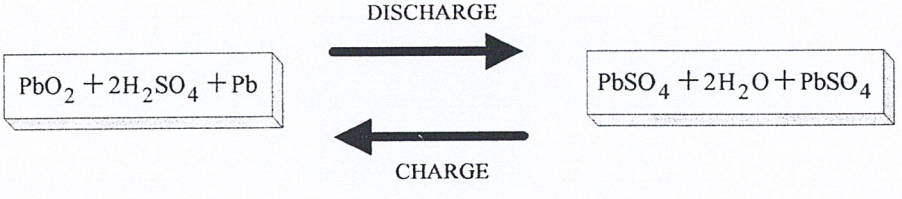
ก. แบตเตอรี่แบบไม่ต้องรวม (Non -Recombining) หรือรวมบางส่วน (Partially Recombining)

แบตเตอรี่ชนิดนี้ไม่ต้องบำรุงรักษาใด ๆ และไม่ต้องอัดประจุให้ถึงระดับ Over charge เพื่อให้แบตเตอรี่เต็ม ในกรณีที่อุณหภูมิใช้งานสูงกว่าอุณหภูมิแวดล้อมมาก ๆ แบตเตอรี่จะเกิดก๊าซ ทำให้ความดันสูงขึ้น ซึ่งแบตเตอรี่จะมีวาวล์คอยเปิดให้ก๊าซออกไปในทันที และวาวล์จะปิดโดยอัตโนมัติเมื่อความดันก๊าซต่ำลง ด้วยเหตุนี้จึงใช้แบตเตอรี่แบบนี้ได้กับทุกสภาวะแวดล้อม แบตเตอรี่แบบนี้จะปิดผนึกไว้ ซึ่งภายในแบตเตอรี่จะไม่เกิดก๊าซอีกทั้งมีความต้านทานภายในต่ำ และจ่ายกระแสได้สูง ภายใต้การอัดประจุแบบรักษาระดับแรงดันคงที่ จะอัดประจุด้วยกระแสอัดประจุสูงๆ ในตอนเริ่มต้น และในขั้นที่ 2 เมื่อแรงดันย้อนกลับของแบตเตอรี่เริ่มสูงขึ้น และต้องควบคุมกระแสในการอัดประจุ เมื่อแบตเตอรี่เต็มจะต้องรักษาระดับแรงดันแบตเตอรี่โดยลดกระแสให้เหลือน้อย เพื่อไม่ให้เกิด Over voltage และป้องกัน electrolyte loss partially recombining แบตเตอรี่แบบตะกั่ว-กรดที่มีขนาดความจุเดียวกัน สามารถต่อกันแบบอนุกรมหรือแบบขนานใช้แรงดันต่ำ และกระแสสูงๆ แบตเตอรี่แบบนี้สามารถอัดประจุและจ่ายประจุได้ที่อุณหภูมิตั้งแต่ -20 ถึง 50 องศาเซลเซียล ซึ่งดีกว่าแบบนิเกล-แคดเมียม (Nikel-Cadmium)

ข. แบตเตอรี่ แบบรวมสมบูรณ์ (Fully Recombining)

โครงสร้างคล้าย ๆ กับแบบ Standard Cylindrical Ni-cad เหมาะสำหรับใช้งาน Standby มีการรวมตัวของออกซิเจน (O_2) ที่ดี ก๊าซเกิดขึ้น คือ H_2 และ O_2 จะรวมตัวกันเป็นน้ำ ทำให้ปริมาตรของอิเล็กโตรไลท์ไม่ลดลง อายุการใช้งานขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งาน และสภาวะแวดล้อม มีความต้านทานภายในต่ำ อัตราการ discharge สูงใช้ Alloy grid ชนิดพิเศษ การอัดประจุส่วนใหญ่เป็นแบบ constant voltage, constant current, pulse charging และอื่นๆ

ขบวนการปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมี



รูปที่ 2.16 ขบวนการปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2 พารามิเตอร์ในการอัดประจุ

1.) การชดเชยทางอุณหภูมิของการอัดประจุ โดยการอัดประจุจะปรับแต่งค่าแรงดันที่อัดประจุ ซึ่งต้องมีการชดเชยทางอุณหภูมิ โดยการตรวจจับอุณหภูมิของสภาวะแวดล้อม

2.) เวลาที่อัดประจุเสร็จ เวลาที่แบตเตอรี่จะถูกอัดประจุเต็มขึ้นอยู่กับสภาวะการดิสชาร์จ และลักษณะการอัดประจุ รวมทั้งอุณหภูมิด้วย

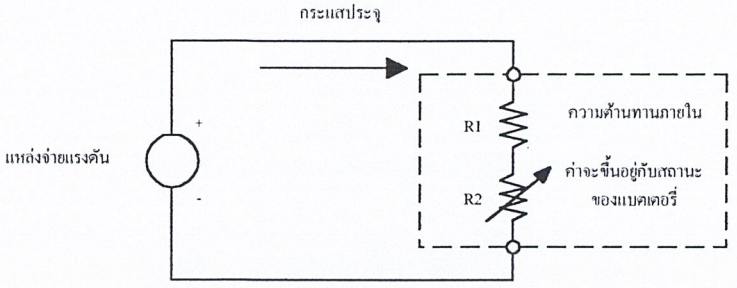
3.) อุณหภูมิในขณะการอัดประจุ ควรทำการอัดประจุที่อุณหภูมิในช่วง 0 ถึง 40 องศาเซลเซียส ซึ่งอุณหภูมิในการอัดประจุจะมีประสิทธิภาพที่ดี ก็คือในช่วง 5 ถึง 30 องศาเซลเซียส โดยที่อุณหภูมิต่ำกว่า หรือสูงกว่าที่กำหนด อาจทำให้การอัดประจุได้ไม่มาก หรือร้อนเกินไป

4.) การชาร์จประจุเกิน การอัดประจุเพิ่มขึ้นอีกหลังจากแบตเตอรี่อัดประจุเต็มแล้ว เรียกว่าโอเวอร์ชาร์จ (Overcharge) ซึ่งเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง มีผลทำให้อายุการใช้งานของแบตเตอรี่สั้นลง

2.5.3 หลักการประจุไฟฟ้าของเครื่องประจุแบตเตอรี่

เครื่องประจุแบตเตอรี่เป็นแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง ซึ่งจะให้ระดับแรงดันสูงกว่าระดับแรงดันของแบตเตอรี่ในขณะที่มีการเก็บประจุ ในการประจุแบตเตอรี่จะให้ขั้วบวกของเครื่องประจุต่อเข้ากับขั้วบวกของแบตเตอรี่ โดยกระแสที่ทำการประจุจะมีทิศทางตรงกันข้ามกับทิศทางของกระแสที่แบตเตอรี่จ่ายออกมา ดังแสดงในรูปที่ 2.17 จากรูปวงจรที่ใช้ในการประจุแบตเตอรี่แสดงให้เห็นว่าการประจุเราต้องพิจารณาถึงตัวต้านทาน 2 ตัวภายในแบตเตอรี่คือ R1 จะเป็นค่าความต้านทานภายในของแบตเตอรี่เอง จะมีอยู่ในแบตเตอรี่เสมอไม่ว่าแบตเตอรี่นั้นกำลังประจุหรือคายประจุอยู่โดยจะมีค่ามากน้อยขึ้นอยู่กับชนิดของแบตเตอรี่ซึ่งจะมีค่ามากเมื่อเป็นแบตเตอรี่ชนิด Low Rated Charge - Discharge เมื่อเราใช้แบตเตอรี่ชนิดนี้ในอัตรากระแสที่สูงจะทำให้เกิดความสูญเสียมาก เนื่องจาก $Loss = I^2 \times R$ แต่ถ้าเป็นแบตเตอรี่ชนิด High Rate ค่าความต้านทานตัวนี้จะมีค่าน้อยมาก ทำให้สามารถใช้กระแสสูงๆได้โดยกำลังสูญเสียไม่มาก ส่วน R2 นั้นจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปโดยขึ้นอยู่กับสถานะการหมดประจุของแบตเตอรี่ เมื่อแบตเตอรี่คายประจุหมดเต็มที่ ค่าความต้านทานตัวนี้จะมีค่าต่ำ ดังนั้นกระแสที่ใช้ในการประจุจึงมีค่าสูง อย่างไรก็ตามเมื่อแบตเตอรี่ใกล้หรือประจุจนเต็มที่แล้วค่าความต้านทาน R2 นี้จะมีค่าสูงขึ้น ทำให้กระแสที่ใช้ในการประจุมีค่าลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 ทิศทางการไหลของกระแสประจุแบตเตอรี่

นอกจากนี้สิ่งที่ควรทราบอย่างยิ่งในการประจุแบตเตอรี่มีดังต่อไปนี้

1.) ระดับแรงดันที่ใช้ประจุ

Float Charge คือการประจุแบตเตอรี่ด้วยระดับแรงดันแบบธรรมดามีค่าไม่สูงอยู่ที่ค่าประมาณ 2.13 - 2.25 V/Cell ในภาวะปกติของการประจุจะใช้ระดับแรงดันนี้

Equalizing Charge ในบางครั้งแบตเตอรี่ที่ใช้อยู่ไม่ถูกใช้งานหรือใช้งานน้อยทำให้ปฏิกิริยาทางเคมีเสื่อมลงจึงควรมีการกระตุ้นแบตเตอรี่บ้างประมาณ 72 ชม.ต่อปี โดยระดับแรงดันที่ใช้ประจุประมาณ 2.3 – 2.55 V/Cell

2.) End of Cell Voltage

คือจุดต่ำสุดของแรงดันในการพิจารณาว่าแบตเตอรี่คายประจุหมดแล้ว มีค่าไม่แน่นอนประมาณ 1.5 – 1.8 V/Cell ถ้าหากปล่อยให้แบตเตอรี่คายประจุจนต่ำกว่าค่า End Of Cell แล้วจะทำให้แบตเตอรี่ตายไม่สามารถอัดประจุด้วยวิธีธรรมดาได้ ต้องประจุแบบรุนแรงเป็นจังหวะแบบการปั๊มหัวใจเพื่อทำให้แบตเตอรี่ฟื้น

3.) ขนาดกระแสประจุสูงสุดที่แบตเตอรี่ทนได้

2.5.4 วิธีการอัดประจุของแบตเตอรี่

แบ่งออกได้เป็น 4 ชนิด ดังนี้

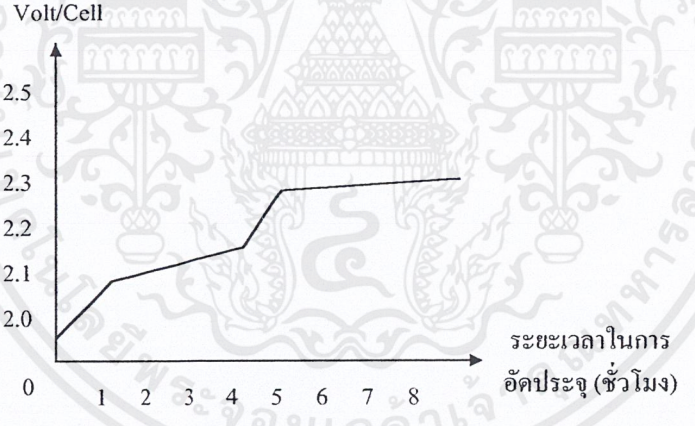
1.) การอัดประจุแบบกระแสคงที่ (Constant Current Charging)

วิธีนี้มีข้อดีตรงที่ว่าไม่จำเป็นต้องมีการชดเชยทางอุณหภูมิเหมือนกับการชาร์จแบบแรงดันคงที่ (Constant voltage charging) แต่ก็มีข้อเสียคือต้องระวังเรื่องเวลาในการอัดประจุ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการอัดประจุด้วยกระแสสูงๆ ซึ่งแบตเตอรี่จะเต็มภายในระยะเวลาอันสั้นๆ เท่านั้น การอัดประจุด้วยอัตราสูงมีผลทำให้แรงดันที่แบตเตอรี่สูงเกินไป น้ำจะเกิดแตกตัวและมีความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดขึ้น การอัดประจุแบบนี้อาจใช้ในการอัดประจุใหม่ให้กับแบตเตอรี่ที่เก็บไว้นานแล้ว ซึ่งสามารถอัดประจุแบตเตอรี่ได้ทีเดียวหลายๆลูก

การประจุแบตเตอรี่แบบกระแสคงที่นับว่าเป็นการประจุที่มีประสิทธิภาพกว่าการประจุแบบแรงดันคงที่ แต่การประจุแบบกระแสคงที่นี้ จะใช้เวลาการประจุนานกว่าแบบแรงดันคงที่ ทั้งนี้การประจุแบบกระแสคงที่นี้ จะถูกจำกัดปริมาณการประจุกระแสจากเครื่องประจุเข้าวงจรแบตเตอรี่เป็นจำนวนแอมป์ต่อชั่วโมง ดังนั้นแบตเตอรี่จะได้รับการประจุเป็นไปตามที่กำหนด เมื่อเป็นเช่นนี้อาจเป็นที่สงสัยว่าทำไมไม่ตั้งให้กระแสในการประจุสูงขึ้น จะทำการให้เวลาในการประจุน้อยลง แต่จะเกิดความเสียหายขึ้นกับแบตเตอรี่คือ ความร้อนที่เกิดขึ้นภายในเซลล์แบตเตอรี่จะสูงขึ้นตามปริมาณของกระแสที่ทำการประจุและในที่สุดแผ่นเพลทของแบตเตอรี่ที่เป็นวัสดุแอคทีฟ (Active Material) ของเซลล์แบตเตอรี่จะเกิดการคดงอ แตก หรือ เกิดการร้าวอันเนื่องจากความร้อนนี้ ถ้าเซลล์แบตเตอรี่เกิดความร้อนสูงกว่าปกติมาก ๆ หรือความร้อนในเซลล์สูงกว่ากำหนดจะทำให้เซลล์แบตเตอรี่เกิดการระเบิดขึ้นได้



รูปที่ 2.18 การเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันในการอัดประจุแบบกระแสคงที่

2.) การอัดประจุแบบแรงดันคงที่ (Constant Voltage Charging)

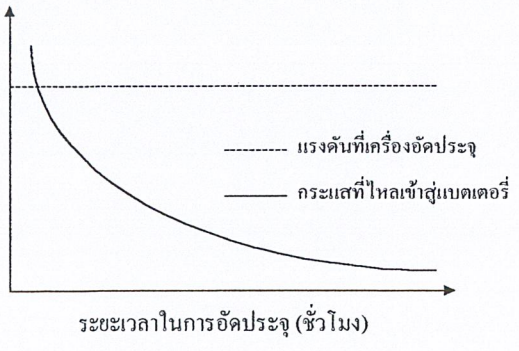
อาจจะใช้ในกรณีที่ต้องการให้แบตเตอรี่อยู่ในสภาวะประจุเต็ม (Fully charge) เสมอ โดยต้องระวังเรื่องอัตราการอัดประจุสูงเกินไป ซึ่งการอัดประจุแบบนี้ทำให้แรงดันทางด้านเอาท์พุทมีเสถียรภาพพร้อมทั้งมีความจุกระแสสูง สำหรับในช่วงที่แรงดันแบตเตอรี่มีค่าต่ำๆ ความต้านของแบตเตอรี่มีค่าน้อยมาก ฉะนั้นกระแสที่อัดประจุจึงมีค่าสูงมาก เป็นผลทำให้เครื่องอัดประจุต้องมีขนาดที่ใหญ่ และราคาแพง อีกทั้งยังทำให้เกิดความร้อนภายในแบตเตอรี่ซึ่งปกติเครื่องอัดประจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบแรงดันคงที่นี้ จะมีอุปกรณ์ช่วยในการจำกัดกระแสเริ่มต้นโดยใช้ Constant current regulation ซึ่งในช่วงสุดท้ายของการอัดประจุ กระแสจะถูกลดลงอย่างอัตโนมัติ ซึ่งไม่ทำให้เกิดการสลายตัว

จากที่เราได้ทราบมาแล้วว่าการประจุแบบกระแสคงที่ เราจะทำการประจุอย่างรวดเร็วไม่ได้ ต่อไปนี้เราจะได้ศึกษาถึงการประจุแบบแรงดันคงที่ในการประจุแบบนี้จะใช้เวลาในการประจุน้อยกว่าการประจุแบบกระแสคงที่ระยะเวลาในการประจุจะใช้น้อยเท่าไหร่นั้นขึ้นอยู่กับความสามารถของการประจุว่าจ่ายกระแสออกมายังวงจรแบตเตอรี่มากน้อยเพียงไร โดยทั่วไปเครื่องประจุจะสามารถจ่ายกระแสออกมาได้ 50% ของค่าความจุแบตเตอรี่ที่นำมาทำการประจุเช่น แบตเตอรี่ขนาด 100 แอมแปร์ต่อชั่วโมง จะใช้เวลาในการประจุเท่ากับ 2 ชั่วโมง

การประจุแบตเตอรี่เกิดจากเมื่อแบตเตอรี่ถูกนำเอาพลังงานออกไปใช้งานจะต้องมีการประจุไฟให้กับแบตเตอรี่มีประจุเต็มดังเดิม การประจุโดยระบบแรงดันคงที่ทำโดยการใช้เครื่องประจุหรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นตัวกำเนิดโวลท์เตจขึ้นมา แล้วป้อนเข้าแบตเตอรี่ แต่การกำเนิดโวลท์เตจจากเครื่องประจุหรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้น อาจจะมีโวลท์เตจที่ไม่คงที่ตลอดเวลา ดังนั้นจึงต้องมีตัวควบคุมโวลท์เตจที่นำเข้ามาประจุแบตเตอรี่ ให้คงที่อยู่ตลอดเวลาของการประจุซึ่งตัวนี้เราเรียกกันทั่วไปว่า วงจรเร็กกูเลเตอร์ (Voltage Regulator) ดังนั้นวงจรเร็กกูเลเตอร์นี้จะทำหน้าที่ให้แบตเตอรี่ได้รับการประจุที่คงที่ และนับเป็นวงจรที่สำคัญอย่างยิ่งสำหรับการประจุแบบแรงดันคงที่ และในทำนองเดียวกันถ้าหากแรงดันเร็กกูเลเตอร์นี้เสียจะทำให้แบตเตอรี่ได้รับระดับโวลท์เตจที่ไม่ถูกต้องซึ่งจะทำให้แบตเตอรี่ได้รับการประจุมากหรือน้อยเกินไป ซึ่งระดับแรงดันทั้งสองที่กล่าวมานี้จะทำให้แบตเตอรี่เกิดความเสียหายได้ การใช้วงจรเร็กกูเลเตอร์จะมีค่าแรงดันเท่าไหร่นั้นจะต้องดูที่คู่มือของแบตเตอรี่นั้น ๆ เป็นหลัก ในกรณีที่ไม่มีหนังสือคู่มือใช้หลักการดังนี้ คือให้ใช้จำนวนแรงดันในการประจุต่อเซลล์คูณด้วยจำนวนเซลล์ของแบตเตอรี่ที่ทำการประจุ เช่น แบตเตอรี่ 24 เซลล์จะปรับระดับแรงดันของเครื่องประจุเท่ากับ 2.15 คูณ 24 เท่ากับ 51.3 โวลท์ ขณะที่ทำการประจุปกติ



รูปที่ 2.19 ค่าแรงดัน และกระแสของเครื่องอัดประจุแบบแรงดันคงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

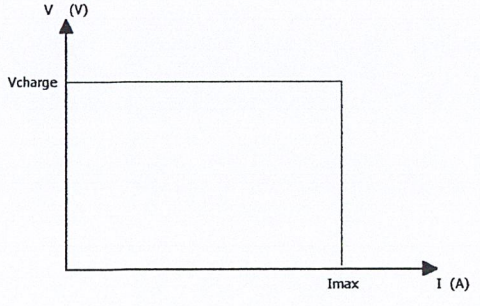
3.) การอัดประจุแบบลดค่ากระแส (Tapered Current Charging)

เป็นวิธีการอัดประจุแบตเตอรี่ที่ง่ายไม่ซับซ้อนและราคาถูก วงจรการอัดประจุประกอบด้วยหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง, วงจรเร็คติฟายเออร์ และค่าความต้านทานที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดกระแส แต่วิธีนี้ไม่เหมาะสำหรับการอัดประจุแบตเตอรี่แบบตะกั่ว-กรดปิดผนึกเนื่องจากกระแสที่ใช้อัดประจุจะกระเพื่อมตามแรงดันไฟไลน์ (แรงดันไฟของระบบ) ซึ่งทำให้แรงดันแบตเตอรี่เปลี่ยนแปลงไปด้วย แต่ก็สามารถลดผลอันนี้ได้โดยการใช้หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่มีแรงดันด้านทุติยภูมิสูงกว่าแรงดันแบตเตอรี่และเลือกค่าความต้านทานที่เหมาะสมในการกำจัดกระแส โดยที่การอัดประจุแบบนี้สามารถใช้แทนแบบการอัดประจุแบบกระแสคงที่ได้ ไม่เพียงเฉพาะการอัดประจุแบตเตอรี่หลายๆ ลูกในครั้งเดียวเท่านั้น ยังสามารถใช้ในระบบ Trickel charge ได้อีกด้วย

4.) การอัดประจุแบบรวม (Combination Charging or Two - step)

วิธีนี้บางทีเราเรียกว่า “two – step” หรือ “two – rate” เกิดจากการรวม 2 วิธี คือ การประจุแบบกระแสคงที่ กับการประจุแบบแรงดันคงที่เข้าด้วยกัน โดยขั้นแรกจะใช้วิธีการอัดประจุแบบกระแสคงที่คือจะจำกัดกระแสสูงสุดที่แบตเตอรี่ทนได้ไว้ และขั้นตอนที่สองเราจะอัดประจุด้วยแรงดันคงที่ การสวิทช์จากขั้นแรกไปยังขั้นที่สองอาจทำได้หลายวิธีเช่น ตรวจสอบแรงดันที่แบตเตอรี่ หรือ ควบคุมเวลาในการอัดประจุหรือตรวจสอบกระแสในการอัดประจุเป็นต้น โดยลักษณะการอัดประจุแสดงได้จากรูปที่ 2.20

จากกราฟในช่วงแรกจะควบคุมให้กระแสคงที่โดยไม่เกินค่ากระแสสูงสุดที่แบตเตอรี่จะทนได้เพราะค่าความต้านทานในแบตเตอรี่เมื่อคายประจุหมดจะมีค่าต่ำมากทำให้กระแสสูง ในช่วงนี้จะสังเกตเห็นว่าแรงดันจะค่อยๆเพิ่มขึ้นตามค่าความต้านทานของแบตเตอรี่ที่เพิ่มขึ้น จนกระทั้งแรงดันเพิ่มถึงระดับที่กำหนดในการชาร์จก็จะทำการเปลี่ยนมารักษาให้แรงดันคงที่แทนในช่วงนี้กระแสจะค่อยๆลดลงจนใกล้เป็นศูนย์แสดงว่าการประจุแบตเตอรี่ใกล้เต็มแล้ว



รูปที่ 2.20 กราฟผลกระแสและแรงดันเมื่อทำการประจุแบบวิธีร่วม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.5 การอัดประจุแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว - กรดโดยทั่วไป

ในการอัดประจุแบตเตอรี่ชนิดนี้ จะมีการจำกัดกระแสที่ใช้อัดประจุและแรงดันต้องพยายามให้คงที่มากที่สุด ปริมาณกระแสที่ใช้อัดประจุโดยปกติจะจำกัดอยู่ที่ 0.1 C สำหรับ Lead – antimony Battery และ 0.3 C สำหรับ Lead – calcium Battery เมื่อ C คือความจุแบตเตอรี่ (หน่วย Ampere – hour (Ah)) ถ้าหากการอัดประจุโดยใช้กระแสมากเกินไป จะทำให้อุณหภูมิภายในแบตเตอรี่สูงและทำให้อายุการใช้งานของแบตเตอรี่ลดลง และถ้าหากอัดประจุที่กระแสน้อยเกินไปจะทำให้มี Lead – sulfate เกาะหลงเหลืออยู่ในแผ่นเพลท (plate) ของแบตเตอรี่ ซึ่งจะทำให้การจ่าย Ampere – hour ไม่ได้เท่ากับพิกัดของแบตเตอรี่ และถ้าต้องการให้แบตเตอรี่มีอายุการใช้งานยาวนาน แรงดันพีคทูพีค (peak to peak) ซึ่งเป็นแรงดันเอาท์พุตของอุปกรณ์อัดประจุแบตเตอรี่ ควรจะมีค่าไม่เกิน 0.5 % ของแรงดันดีซี พึงระลึกเสมอว่า การอัดประจุแบตเตอรี่ที่ค่าพิกัดของแบตเตอรี่ จะสามารถยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ได้ยาวนานขึ้น

2.5.6 ลักษณะการประยุกต์ใช้งาน

ลักษณะในการประยุกต์ใช้งานการประจุแบตเตอรี่ของ Seal lead – acid Battery สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบใหญ่ๆ คือ

1.) การใช้งานแบบเป็นวนรอบ (Cyclic Operation)

การทำงานเป็นรอบๆ ต้องการเวลาในการอัดประจุสั้นๆ และต้องป้องกันการอัดประจุและดิสชาร์จเกิน (คายประจุเกิน) สิ่งที่สำคัญในการอัดประจุด้วยเทคนิคการอัดประจุด้วยแรงดันคงที่ คือ การรักษาแรงดันเอาท์พุท (Charging Voltage) ให้คงที่เท่ากับที่ระดับแรงดันสุดท้ายของการอัดประจุแบตเตอรี่ (Final Terminal Voltage) ซึ่งเป็นแรงดันเมื่อแบตเตอรี่เต็มแล้ว และจะจำกัดกระแสให้ต่ำกว่าค่าที่ออกแบบไว้สูงสุด ถ้าแบตเตอรี่ถูกอัดประจุในช่วงอุณหภูมิสภาวะแวดล้อมกว้างๆ จะต้องมีการชดเชยอุณหภูมิด้วย มิฉะนั้นการอัดประจุอาจสูงไป หรือต่ำไปในที่ที่อุณหภูมิสูงและอุณหภูมิต่ำ

2.) การใช้งานแบบชั่วครั้งชั่วคราว (Standby / Backup Operation)

ใช้ในงานประเภทสำรองเอาไว้ใช้ยามที่ต้องการ ปกติจะเก็บในสภาวะแบตเตอรี่เต็มตลอดเวลา และจะจ่ายพลังงานไปให้ภาระเมื่อระบบผิดปกติ ซึ่งการทำงานแบบนี้ยังแบ่งออกเป็น 2 โหมด คือ

ก. Trickel Charge

โดยปกติระบบของการไฟฟ้าฯ ทำการจ่ายพลังงานให้ภาระ หรืออุปกรณ์ ในขณะที่แบตเตอรี่ไม่ได้ถูกต่ออยู่กับภาระ ถ้าหากเกิดความผิดปกติขึ้นที่ระบบนั้น วงจรแบตเตอรี่จะถูกเชื่อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เข้ากับภาระเพื่อจ่ายพลังงาน โดยจะต้องพิจารณาการชดเชยสำหรับ Self discharge โดยการอัดประจุแบตเตอรี่ที่กระแสคงที่ค่าต่ำๆ เพื่อให้แบตเตอรี่อยู่ในสภาวะประจุเต็มตลอดเวลา ในกรณี Deep discharge จะต้องอัดประจุแบตเตอรี่เป็นเวลานาน ดังนั้นวิธีอัดประจุแบบ two – rate และแบบแรงดันคงที่ จะเหมาะสมมากในการอัดประจุแบตเตอรี่ เนื่องจากมีโหมดการอัดประจุเริ่มต้นเร็ว แต่แบบ two – rate charger จะเหมาะสมกว่า เพราะไม่จำเป็นต้องมีการชดเชยทางอุณหภูมิ

ข. Float Charge

โดยในแบบนี้ ทั้งภาระ และแบตเตอรี่จะต่อกันแบบขนานกับวงจรเร็กติไฟล์ ระบบนี้จะใช้ได้เฉพาะการอัดประจุแบบแรงดันคงที่เท่านั้น ซึ่งแรงดันที่อัดประจุต้องมีประสิทธิภาพ การกระเพื่อมอย่างมากของแรงดันที่อัดประจุ มีผลทำให้แบตเตอรี่ดิสชาร์จเพียงเล็กน้อย ซึ่งการอัดประจุแบบแรงดันคงที่ จะต้องออกแบบให้จ่ายได้ที่ภาระมีค่าสูงสุด มิฉะนั้นจะทำให้อายุการใช้งานของแบตเตอรี่สั้นลง โดยปกติอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ที่มีการอัดประจุแบบ Float จะสั้นกว่าการอัดประจุแบบ Trickle

2.6 มอสเฟตกำลัง (POWER MOSFET)

ส่วนที่สำคัญอีกส่วนหนึ่งของวงจรควบคุมความเร็วมอร์เตอร์แบบบั๊คคอนเวอร์เตอร์ ก็คือสวิตช์ ในโครงงานนี้จะใช้มอสเฟตทำหน้าที่เป็นสวิทช์ ดังนั้นจะต้องให้ความสำคัญเป็นพิเศษในการที่จะนำมอสเฟตมาใช้งานในลักษณะนี้

2.6.1 นิยามและคุณลักษณะของมอสเฟตกำลัง

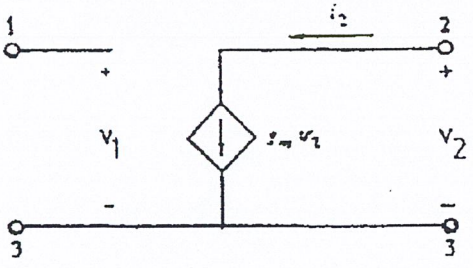
1.)*นิยาม และความหมาย*

มอสเฟต (Mosfet) ย่อมาจาก Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor การทำงานของมอสเฟตโดยการใช้สนามไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ประเภทการควบคุมแหล่งจ่ายด้วยกระแสด้วยแรงดัน (Voltage Controlled Current Source) ซึ่งสามารถเขียนวงจรเทียบเคียงได้ดังรูปที่ 2.21 และมีความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้

$$I = g_m \times V \qquad (2\text{-}19)$$

โดยที่ g_m คือ Transconductor หรือ Mutual conductor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.21 Equivalent circuit ของ VCCS

2.) *คุณลักษณะของมอสเฟตกำลัง*

- กำลังงานสูญเสียขณะสวิตช์ต่ำ
- ไม่มีช่วงแรงดันพังทลายที่2
- มีอัตราขยายสูงและวงจรขับสร้างได้ง่าย ราคาถูก
- มีความทนทานและเสถียรภาพทางอุณหภูมิดี
- มีความจุหรือรับกระแสได้สูง
- สามารถนำมาต่อขนานได้ง่ายเนื่องจากสัมประสิทธิ์ความต้านทานเป็นบวก
- ใช้ในวงจรที่มีความถี่สูงได้ดี

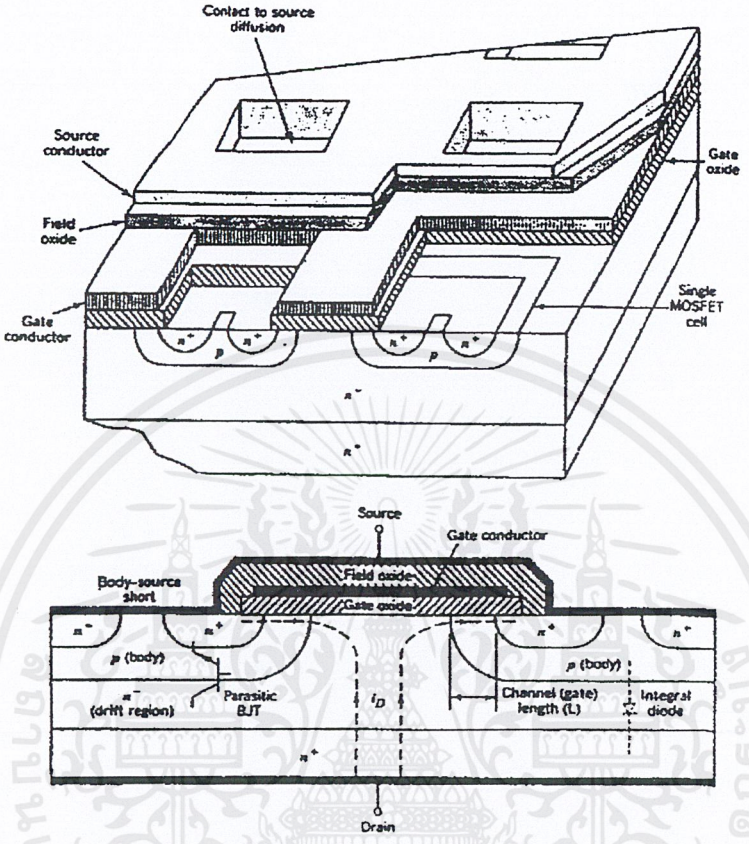
แต่ก็พอจะมีข้อเสียอยู่เหมือนกันคือ แรงดันตกคร่อมขณะนำกระแสมีค่ามากประมาณ 4.5 โวลท์ ซึ่งเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์จะมีค่าเพียง 1 โวลท์เท่านั้น

2.6.2 โครงสร้าง และการทำงานของมอสเฟตกำลัง

1.) โครงสร้างของมอสเฟตกำลัง

เพาเวอร์มอสเฟตโดยทั่วไปจะเป็นแบบ N-channel ที่ทำงานใน Enhancement mode ซึ่งมีโครงสร้างและสัญลักษณ์ดังรูปที่ 2.22 คือ เพาเวอร์มอสเฟตแต่ละตัวจะประกอบด้วย มอสเฟตขนาดเล็กนับพันตัวซึ่งอยู่บนชิพเดียวกันต่อขนานกันโดยที่กระแสในทรานซิสเตอร์ขนาดเล็กแต่ละตัวจะมีทิศทางไหลในแนวตั้ง substrate ของเพาเวอร์มอสเฟต จะมี N-type epitaxaial layer บางๆ คั่นอยู่ข้างบน ในการทำเพาเวอร์มอสเฟตแต่ละตัวจะมีการ Diffuse P และ N^+ region ลงบน N^- type epitaxial layer จากนั้นจะเป็นการทำ Gate กับ epitaxial layer ภายใต้ Gate

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



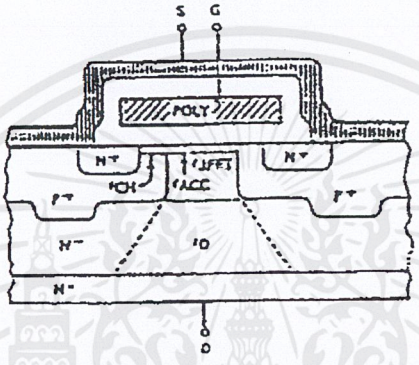
รูปที่ 2.22 แสดงโครงสร้างและสัญลักษณ์ของมอสเฟต

สำหรับเดรนของมอสเฟตนั้นทำโดยการฉาบอลูมิเนียมที่ N^+ และ N^- Substrate ส่วนซอร์สจะทำได้โดยการฉาบอลูมิเนียมลงบนชั้นของ P และ N^+ ได้จากการ Diffuse จากลักษณะการทำซอร์สดังกล่าวทำให้เกิดเป็นไดโอดต่ออยู่กับซอร์สและคาโถดคือชั้น N^+ และ N^- ต่ออยู่กับเดรน ดังแสดงในรูปในสภาวะปกติถ้าเราให้แรงดันของเดรนเป็นบวกเมื่อเทียบกับซอร์สแล้วมอสเฟตจะไม่สามารถนำกระแสได้ เนื่องจากชั้น N^- และ P จะถูกไบอัสกลับแต่ถ้าเราใส่แรงดันบวกระหว่างเกทกับซอร์สแล้ว แรงดันบวกจะทำให้อิเล็กตรอนมาออกันที่ชั้น P ภายใต้เกทเกิดเป็น N^- Channel เชื่อมระหว่างชั้น N^+ และ N^- เกิดเป็นกระแสที่ไหลจากเดรนไปยังซอร์ส เนื่องจากการนำกระแสของมอสเฟตชนิดนี้เกิดจากการไหลของอิเล็กตรอนผ่าน N^- Channel ที่ทำงานใน Enhancement mode MOSFET ตัวเล็กๆ แต่ละตัวสามารถทำงานได้อย่างอิสระ แต่มอสเฟตเหล่านี้จะถูกต่อขนานกันโดยการฉาบอลูมิเนียมที่ซอร์ส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.) การทำงานของมอสเฟตกำลัง

เมื่อป้อนแรงดันให้มีขนาดและแรงดันที่เหมาะสม Pollsilicon gate จะเหนี่ยวนำชั้นตรงกันข้ามของ Diffuse channel region ซึ่งแสดงโดย r_{CH} ในรูปที่ 2.23 จะทำให้กระแสไหลจากเดรนไปยังซอร์ส สำหรับแรงดันค่าน้อยๆ ที่ป้อนให้เดรนและซอร์ส กระแสเดรนจะเพิ่มขึ้นอย่างเป็นเชิงเส้น เมื่อแรงดันเดรนเพิ่มขึ้น กระแสเดรนจะอิ่มตัวเป็นสัดส่วนกำลังสองของแรงดันเกทกับซอร์ส

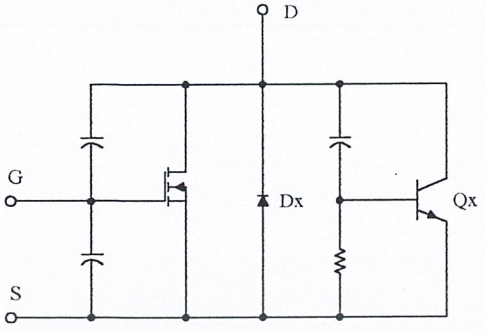


รูปที่ 2.23 แสดงการทำงานของมอสเฟต

2.6.3 วงจรสมมูลของมอสเฟต

จากโครงสร้างของมอสเฟตสามารถสร้างเป็นวงจรสมมูล ซึ่งประกอบไปด้วย ไดโอด (D_X) , ค่าความจุ , ค่าความต้านทาน (ซึ่งมีค่าน้อยมาก) และทรานซิสเตอร์ชนิด NPN (Q_X) ดังรูปที่ 2.24 การพิจารณาวงจรสมมูลนี้มีความสำคัญมากในการใช้งานมอสเฟตควบคุมความเร็วมอร์เตอร์แบบ PWM เพราะในขณะที่มอสเฟตกำลังหยุดนำกระแสไฟฟ้า ค่าแรงดันระหว่างเดรนกับซอร์สจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ($\frac{dv}{dt}$ มีค่าสูง) กระแสส่วนหนึ่งจะไหลผ่านค่าความจุที่ต่ออยู่ระหว่างคอลเล็กเตอร์และเบสของทรานซิสเตอร์ Q_X ค่ากระแสนี้ ($i_c = c\frac{dv}{dt}$) จะทำให้เกิดแรงดันที่ความต้านทานของเบสและอิมิเตอร์ของ Q_X ซึ่งแรงดันนี้อาจทำให้เกิดการลัดวงจรขึ้นได้ จุดนี้ต้องได้รับการป้องกันไม่ให้แรงดันระหว่างเดรนและซอร์สเพิ่มขึ้นสูงเกินกว่าพิกัดแรงดันของมอสเฟต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่2.24 วงจรสมมูลของมอสเฟต

2.6.4 กำลังสูญเสียในรูปของความร้อน

กำลังสูญเสียในรูปความร้อนที่เกิดขึ้นในมอสเฟตขณะทำงานจะเป็นได้ 2 ลักษณะเช่นเดียวกับไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ คือ กำลังสูญเสียขณะเปลี่ยนสถานะและกำลังสูญเสียขณะนำกระแสแต่เพาเวอร์มอสเฟตจะมีช่วงเวลาเริ่มนำกระแสและช่วงเวลาเริ่มหยุดนำกระแสสั้นกว่าไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์มากเพราะตามโครงสร้างของเพาเวอร์มอสเฟตจะไม่มีประจุสะสมเกิดขึ้นจึงไม่มีปัญหาในลักษณะเดียวกันกับไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ อย่างไรก็ตามเพาวเวอร์มอสเฟตจะมีค่าความต้านทานขณะนำกระแสค่อนข้างสูงกว่า รูปที่ 2.25 แสดงลักษณะการตอบสนองของเพาเวอร์มอสเฟตจะค่อนข้างสั้น แต่โดยทั่วไปเพาเวอร์มอสเฟตมักจะถูกใช้งานที่ความถี่สูงกว่า 50 KHz การคิดค่ากำลังสูญเสียขณะเปลี่ยนสถานะมาคิดด้วย และเนื่องจากเวลาเริ่มหยุดนำกระแส (turn off time) กับช่วงเวลาเริ่มนำกระแส (turn on time) ของเพาเวอร์มอสเฟตมีค่าใกล้เคียงกันมากจึงต้องนำมาคิดทั้งสองช่วงเวลาด้วย ดังนั้นกำลังงานสูญเสียของเพาเวอร์มอสเฟตขณะทำงาน P_D จะมีค่าเท่ากับ

$$P_D = P_{SW(on)} + P_{SW(off)} + P_C \tag{2-20}$$

$$P_{SW(on)} = \left(0.5 I_{PK(on)} \times V_{in} \times t_r\right) / T \tag{2-21}$$

$$P_{SW(off)} = \left(0.5 I_{PK(off)} \times V_{in} \times t_r\right) / T \tag{2-22}$$

เมื่อ $P_{SW(on)}$ คือ กำลังสูญเสียขณะเริ่มนำกระแส

$P_{SW(off)}$ คือ กำลังสูญเสียขณะเริ่มหยุดนำกระแส

P_C คือ กำลังสูญเสียขณะนำกระแส

$I_{PK(on)}$ คือ ค่ากระแสสูงสุดขณะเริ่มนำกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

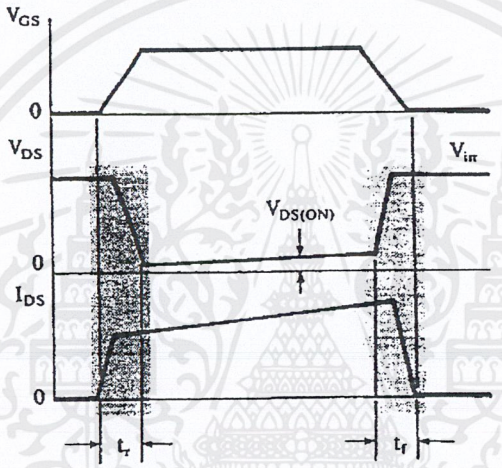
$I_{PK(off)}$ คือ ค่ากระแสสูงสุดขณะเริ่มหยุดนำกระแส

$I_{D(rms)}$ คือ ค่ากระแส ที่ไหลผ่านเพาเวอร์มอสเฟตขณะทำงาน

$R_{DS(on)}$ คือ ค่าความต้านทานระหว่างเดรนและซอร์สที่อุณหภูมิรอยต่อสูงสุดขณะทำงาน

t_r คือ ช่วงเวลาเริ่มนำกระแส

t_f คือ ช่วงเวลาเริ่มหยุดนำกระแส



รูปที่ 2.25 ลักษณะของกระแสและแรงดันตกคร่อมเพาเวอร์มอสเฟต

2.6.5 การขับเกทของมอสเฟต

ลักษณะสมบัติทางด้านขาเข้าของมอสเฟตนั้นจะมีความแตกต่างกับคุณสมบัติด้านขาเข้าของบีเจที กล่าวคือ กระแสออกของบีเจทีนั้นจะควบคุมด้วยกระแสเบส ส่วนกระแสออกของมอสเฟตนั้นจะถูกควบคุมด้วยแรงดันของเกท นอกจากนั้นแล้วความต้านทานขาเข้าของมอสเฟตจะมีค่าสูงมากคืออยู่ในช่วงจิกะโอห์มซึ่งทำให้กระแสมีค่าต่ำมากเมื่อเทียบกับบีเจทีขนาดเดียวกัน ดังนั้นการควบคุมมอสเฟตจึงใช้กำลังต่ำกว่ามากๆคุณสมบัติอันนี้นับว่าเป็นข้อได้เปรียบของมอสเฟตเมื่อเทียบกับบีเจที ในสภาวะอยู่ตัวนั้นกระแสที่ใช้ในการขับเกทของมอสเฟตจะมีค่าน้อยมาก คืออยู่ในช่วงนาโนแอมป์ เนื่องจากความต้านทานขาเข้าของมอสเฟตมีค่าสูงขึ้นถึงจิกะโอห์ม ซึ่งทำให้ดูเหมือนกับว่าเราสามารถขับเกทของมอสเฟตได้ โดยวงจรขับที่สามารถจ่ายกระแสออกได้เป็นนาโนแอมป์ แต่ในความริงแล้วการนำกระแส (Turn on) หรือการหยุดนำกระแส (Turn off) เพาเวอร์มอสเฟตนั้นเราจะต้องชาร์จหรือดิสชาร์จ ตัวเก็บประจุด้านขาเข้าของเพาเวอร์มอสเฟตจาก

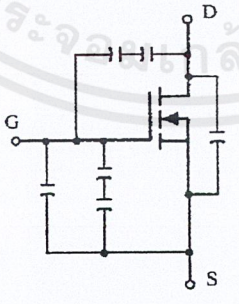
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันระดับหนึ่งไปสู่แรงดันระดับหนึ่ง ซึ่งความเร็วในการนำกระแสด้านขาเข้าของมอสเฟต ถ้าเราต้องการให้สวิตซ์มอสเฟตเป็นไปอย่างรวดเร็วเราจะต้องใช้วงจรขับที่มีความต้านทานขาออกต่ำที่สามารถจ่ายหรือรับกระแสในตอนสวิทซ์มอสเฟตได้สูงทั้งนี้ความเร็วในการสวิทซ์ของมอสเฟตจะลดลงตามความต้านทานขาออกของวงจรขับเกท

เนื่องจากเกทของมอสเฟตจะถูกแยกออกจากช่องนำกระแสด้วยชั้นบางๆ ของซิลิกอน (Silicon dioxide) ซึ่งถ้าแรงดันระหว่างขาเกทกับซอร์สซึ่งมีค่าสูงเกินไปอาจทำให้ฉนวนนั้นทะลุและทำให้มอสเฟตเสียหายได้ ดังนั้นผู้ผลิตมักจะบอกแรงดัน V_{GS} สูงสุดของมอสเฟตมาให้ซึ่งโดยทั่วไปมักจะมีค่า 20 โวลท์ และในวงจรขับเกทโดยทั่วๆ ไปจะมีการจำกัดแรงดัน V_{GS} โดยใช้ซีเนอร์ไดโอดขนาด 20 โวลท์ สองตัวมาต่ออนุกรมกันโดยต่ออาโนดหรือคาโถดเข้าด้วยกันและต่อคร่อมเกทกับซอร์ส เพื่อจำกัดเกทกับซอร์สไม่ให้เกิน 20 โวลท์ นอกจากนี้บางครั้งจะมีการต่อคร่อมความต้านทานเชื่อมระหว่างเกทกับซอร์สเพื่อป้องกันการนำกระแสของมอสเฟตโดยไม่เจตนา ทั้งนี้เราเปิดวงจรเอาไว้ตัวเก็บประจุด้านขาเข้าของมอสเฟอาจจะถูกชาร์จโดยกระแสรั่วไหล (Leakage Current) ทำให้แรงดันระหว่างเกทกับซอร์สสูงกว่า V_{GS} ซึ่งทำให้มอสเฟตนำกระแสได้ ความต้านทานระหว่างเกทกับซอร์สจะเป็นทางผ่านของกระแสรั่วไหล และรักษาไม่ให้แรงดันระหว่างเกทกับซอร์สสูงกว่า V_{GS}

2.6.6 ค่าความจุไฟฟ้า (Input Capacitance)

เนื่องจากลักษณะโครงสร้างภายใน ตัวเพาเวอร์มอสเฟตจึงเหมือนกับมีตัวเก็บประจุต่ออยู่รอบขาต่างๆ ของมันดังรูปที่ 2.26

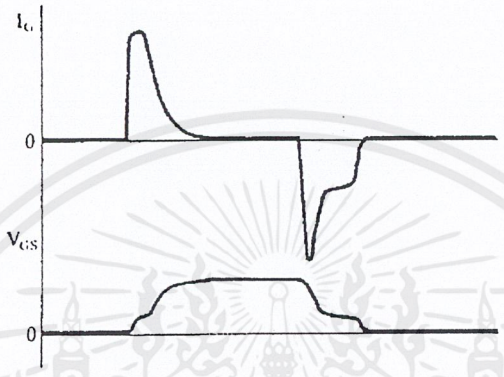


รูปที่ 2.26 ตัวเก็บประจุแฝงที่ต่ออยู่ที่ขาต่างๆ ภายในตัวเพาเวอร์มอสเฟต

ตัวเก็บประจุเหล่านี้บังคับให้เพาเวอร์มอสเฟตต้องชาร์จประจุเข้าไปที่ตัวเก็บประจุเสียก่อนเพื่อให้แรงดันตกคร่อมที่ขาเกท V_{GS} มีค่าเพิ่มขึ้นจนค่าแรงดันขีดเริ่มเพาเวอร์มอสเฟตจึงจะเริ่มนำกระแสในทางกลับกันการหยุดนำกระแสของเพาเวอร์มอสเฟตจะต้องทำให้ตัวเก็บประจุคาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประจุออกไปจนแรงดันตกคร่อมที่ขาเกท V_{GS} มีค่าลดลงต่ำกว่าค่าแรงดันขีดเริ่ม เพาเวอร์มอสเฟตจึงหยุดนำกระแส ลักษณะของกระแสและแรงดันที่ขาเกทจึงมีลักษณะดังรูปที่ 2.27 โดยทั่วไปแล้วค่าความจุของตัวเก็บประจุของตัวเก็บประจุในตัวเพาเวอร์มอสเฟตนี้เองจะเป็นตัวกำหนดความเร็วในการเปลี่ยนสถานะของมัน

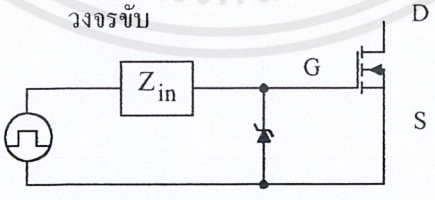


รูปที่ 2.27 ลักษณะแรงดันและกระแสที่ขาเกทขณะเพาเวอร์มอสเฟตถูกไบแอส

2.6.7 แรงดันสไปด์

แรงดันสไปด์ (spike voltage) ที่เกิดขึ้นส่วนมากจะเกิดมาจาก การคายพลังงานของค่าความเหนี่ยวนำที่แฝงอยู่ในระบบ แรงดันสไปด์ที่ทำให้มอสเฟตเสียหายอย่างถาวร คือ แรงดันสไปด์คร่อม เกต-ซอร์ส และแรงดันสไปด์คร่อม เดรน-ซอร์ส

แรงดันสไปด์ เกต-ซอร์ส สามารถป้องกันได้โดยใช้ซีนเนอร์ไดโอด มาต่อคร่อม เกต-ซอร์ส ดังรูปที่ 2.28

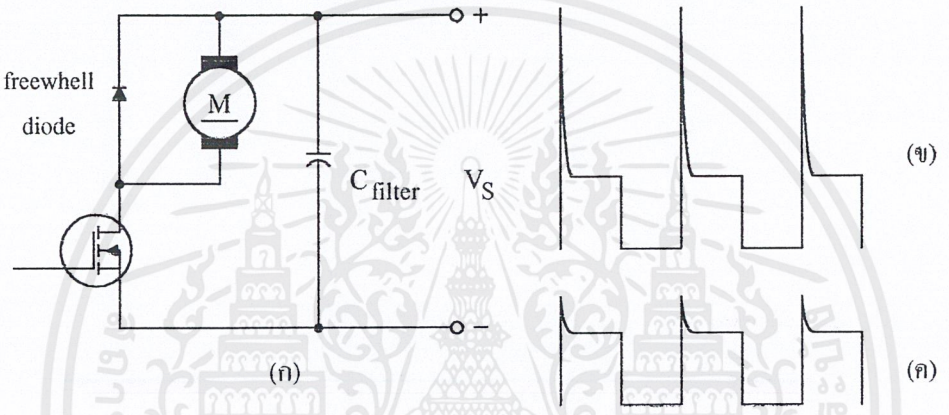


รูปที่ 2.28 การป้องกันแรงดันสไปด์คร่อม เกต-ซอร์ส

แรงดันสไปด์คร่อม เกต-ซอร์ส เป็นส่วนที่รุนแรงที่สุด เพราะโหลดเป็นมอร์เตอร์ นั่นคือเป็นพวกค่าความเหนี่ยวนำ ในเวลาที่มอสเฟตตัดต่อทำงานจากต่อมาเป็นตัด ทำให้แรงดันตกคร่อมขั้วของมอสเฟตเพิ่มจากศูนย์ (หรือเกือบศูนย์) ไปเป็นแรงดันระดับไฟเลี้ยงในทันที (จากรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.29 ก.)แม้ว่าแรงดันไฟเลี้ยงจะมีค่าต่ำกว่าอัตราทนแรงดันมอสเฟตก็ตาม แต่ด้วยแรงดันที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของขดลวดทำให้แรงดันตกคร่อมมอสเฟตสูงขึ้นอย่างมากเป็นแรงดันสไปด์ ถ้ามอสเฟตทำงานตัดต่อเร็วเท่าใด แรงดันนี้ก็จะยิ่งสูงขึ้นเท่านั้น วิธีแก้ปัญหานี้โดยทั่วไปจะใช้ฟีลวีลไดโอด (freewheel diode) ต่อคร่อมโหลด และไดโอดนี้จะต้องมีคุณสมบัติของการรีคัฟเวอรี่ (recovery) ที่ดีพอ นั่นคือเป็นไดโอดประเภทฟาสต์รีคัฟเวอรี่ (fast recovery) แต่การใช้ไดโอดอาจแก้แรงดันส่วนนี้ได้ไม่ดีพอ จึงต้องมีคาปาซิเตอร์ (Capacitor) ต่อคร่อม แหล่งจ่ายไฟอีกส่วนหนึ่ง



รูป 2.29 ก.) การป้องกันแรงดันสไปด์คร่อม เดรน-ซอร์ส
ข.) ไม่ได้ต่อคาปาซิเตอร์ ค.) เมื่อต่อคาปาซิเตอร์และไดโอด

2.6.8 พิกัดปลอดภัย FBSOA

ขีดจำกัดกำลังที่พิกัดปลอดภัย FBSOA ของเพาเวอร์มอสเฟตนั้นแบ่งออกได้เป็น 4 ลักษณะ คือ

1.) ขีดจำกัดแรงดันตกคร่อมเดรนและซอร์ส V_{DS} สูงสุดที่สามารถทนได้ (Maximum Drain Source Voltage)

2.) ค่ากระแสเดรน I_D สูงสุดที่สามารถผ่านได้และไม่ทำให้โครงสร้างภายในเสียหายได้ (Thermal Limit)

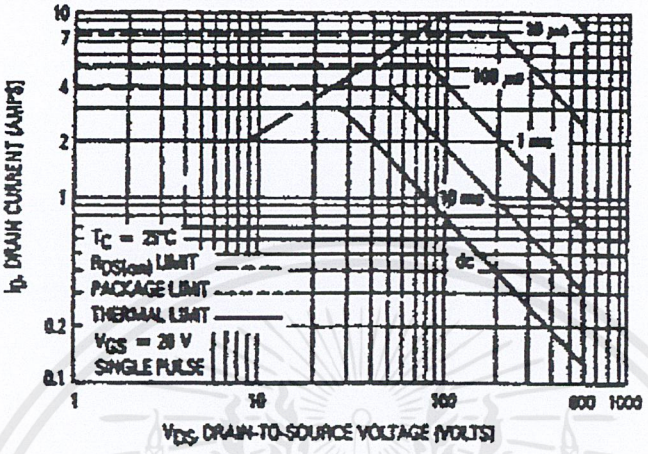
3.) ขีดจำกัดเนื่องจากค่าความต้านทานขณะนำกระแส ($R_{DS(on)}$ Limit)

4.) ขีดจำกัดการระบายความร้อนของตัวถัง (Package Limit)

ตัวอย่างกราฟ FBSOA ของเพาเวอร์มอสเฟตแสดงไว้ดังรูปที่ 2.30 และเช่นเดียวกับบีเจที การระวังไม่ให้เกิดเงื่อนไขที่ทำให้เพาเวอร์มอสเฟตต้องทำงานภายนอกพิกัดของกราฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

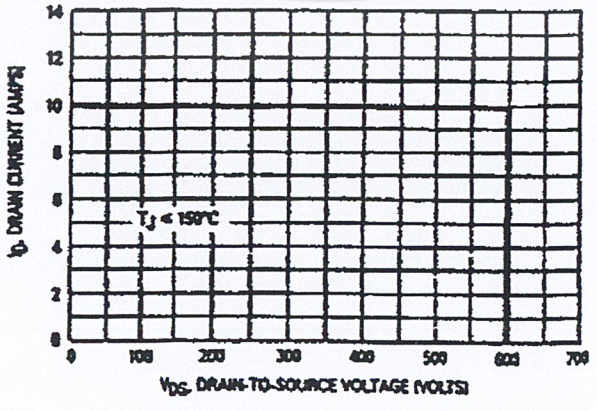
FBSOA เป็นสิ่งที่สำคัญและผู้ออกแบบจะต้องให้ความสนใจก่อนการเลือกเพาเวอร์มอสเฟตมาใช้งานทุกครั้งรวมทั้งการป้องกันการพังเสียหายได้ขณะทำงาน



รูปที่ 2.30 ตัวอย่างกราฟพิกัดปลอดภัย FBSOA ของเพาเวอร์มอสเฟต

2.6.9 พิกัดปลอดภัย SSOA

SSOA (Switching Safe Operation Area) เป็นกราฟแสดงพิกัดกระแสและแรงดันใช้งานแรงดันที่ปลอดภัยของเพาเวอร์มอสเฟตขณะเปลี่ยนสถานะการใช้ SSOA สามารถใช้ได้ทั้งในการพิจารณาพิกัดปลอดภัยทั้งในเวลาช่วงเริ่มนำกระแสและช่วงหยุดนำกระแสของเพาเวอร์มอสเฟต ปกติกราฟ SSOA จะใช้เพื่อพิจารณาเงื่อนไขปลอดภัยของเพาเวอร์มอสเฟต เช่นเดียวกับกราฟ FBSOA ของบีเจที ตัวอย่างกราฟ SSOA แสดงไว้ในรูปที่ 2.31 และเมื่อเทียบกับกราฟ FBSOA ของบีเจทีแล้วจะเห็นได้ว่า SSOA จะมีพื้นที่ปลอดภัยมากกว่าและขีดจำกัดกำลังจะอยู่ที่แรงดันตกคร่อม V_{DS} สูงสุดและกระแสเดรน I_D สูงสุดเท่านั้น



รูปที่ 2.31 ตัวอย่างกราฟพิกัดปลอดภัย SSOA ของเพาเวอร์มอสเฟต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.10 ข้อดีของการใช้มอสเฟต

1.) ความเร็ว

มอสเฟตมีความสามารถในการสวิตชิ่งด้วยความเร็วโดยปราศจากการสะสมประจุอย่างไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ดังนั้นจึงไม่คิดช่วงเวลาสะสมจึงทำให้มอสเฟทมีความเร็วกว่าทรานซิสเตอร์ในการสวิทชิ่ง ความเร็วของมอสเฟตขึ้นอยู่กับการอัดและคายประจุของตัวเก็บประจุภายใน

2.) อินพุท

ขาเกตของมอสเฟตนั้นถูกแยก (isolate) จากแหล่งจ่ายด้วยชั้นออกไซด์ที่ทำให้เกิดความต้านทานกระแสตรงสูงมาก มอสเฟตสามารถถูกไบอัสด้วยแรงดันประมาณ 10 Volt ด้วยค่าแรงดันขนาดนี้จึงสามารถทำการขับมอสเฟตได้ด้วย IC, TTL, CMOS ได้โดยตรงทำให้ลดความยุ่งยากของวงจร

3.) ย่านความปลอดภัย

ขอบเขตย่านปลอดภัยของมอสเฟตได้ถูกกำหนดด้วยพิกัดกระแสสูงสุด แรงดันเบรคดาวน์ ขอบเขตของย่านความปลอดภัยจะกว้างเนื่องจากไม่เกิดการเบรคดาวน์ทางด้าน (Breakdown Secondary) ซึ่งบางทีอาจจะไม่จำเป็นต้องใช้วงจรสนับเบอร์ก็ได้

4.) อุณหภูมิ

สัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิของมอสเฟตมีค่าตรงข้ามกับทรานซิสเตอร์กล่าวคือเมื่ออุณหภูมิ ในตัวมอสเฟตสูงขึ้นกระแสเดรนจะมีค่าน้อยลง ดังนั้นการทำงานของมอสเฟทจึงไม่มีเหตุเกิดขึ้นเนื่องจากการเพิ่มหนีของอุณหภูมิ (thermal runaway)

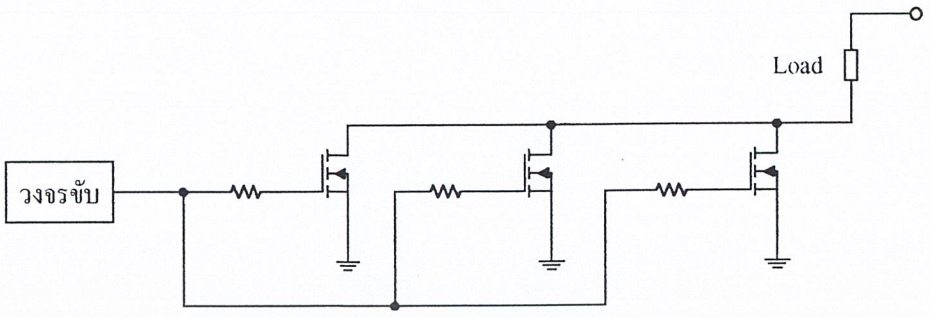
5.) แรงดัน

แรงดันต่ำสุดของมอสเฟตกำลังหาได้จากความต้านทานของอุปกรณ์ R_{DS} สำหรับอุปกรณ์แรงดันต่ำค่าของ R_{DS} จะต้องมีค่าต่ำสุดสำหรับแรงดันสูง ค่า R_{DS} ต้องมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของ R_{DS} เป็นบวกเพิ่มกำลังได้

2.6.11 การขนานมอสเฟต

เนื่องจากสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของค่าความต้านทานระหว่าง เดรน-ซอร์ส $R_{ds(on)}$ มีค่าเป็นบวก นั่นคือ ค่าความต้านทาน $R_{ds(on)}$ จะสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิที่ตัวมันมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นปริมาณกระแสที่ไหลผ่านมอสเฟตที่ต่อขนานกัน จึงมีปริมาณใกล้เคียงกันที่อุณหภูมิเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.32 การขนานมอสเฟต

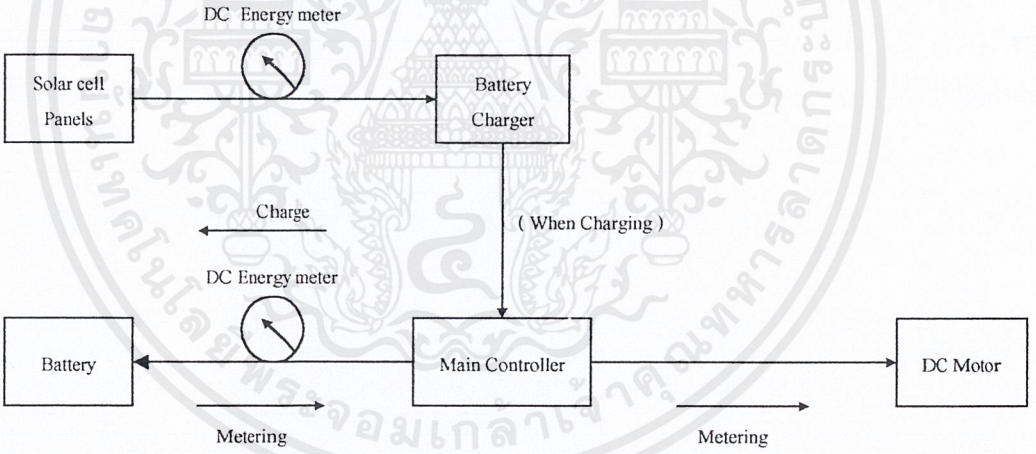
นั่นคือ ต้องติดตั้งไว้บนแผ่นระบายความร้อนเดียวกันแต่การต่อขนานมอสเฟตในการทำงานช่วงแรกอาจจะออน และออฟไม่พร้อมกันทำให้มอสเฟตตัวที่อ่อนกว่าอาจรับกระแสมากกว่าพิกัดของตัวมันเอง ดังนั้น ต้องมีวงจรป้องกันกระแสเกิน (Over current Protection) ดังที่จะได้กล่าวถึงในส่วนต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
หลักการที่นำมาใช้

ในบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงรายละเอียดต่างๆ ของโครงงาน ซึ่งส่วนประกอบหลักๆ สำหรับโครงงานนี้ สามารถแสดงเป็นบล็อกไดอะแกรมแสดงการทำงานของโครงงานทั้งหมด และบล็อกไดอะแกรมของระบบขับเคลื่อนอย่างคร่าวๆ ได้ดังนี้

รูปที่ 3.1 บล็อกไดอะแกรมของระบบขับเคลื่อนรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้าอย่างคร่าวๆ



รูปที่ 3.2 บล็อกไดอะแกรมแสดงการทำงานของระบบต่างๆ ทั้งหมดในโครงงานนี้

จากบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 3.1 และรูปที่ 3.2 จะแสดงหลักการทำงานของรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้า คือ แผงเซลล์แสงอาทิตย์จะทำการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า แล้วนำไปพลังงานไฟฟ้าที่ได้ไปชาร์จเก็บไว้ในแบตเตอรี่โดยผ่านชุดควบคุมการอัดประจุ แล้วใช้พลังงานไฟฟ้าที่เก็บไว้ในแบตเตอรี่นั้น เป็นตัวจ่ายพลังงานให้กับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งจะเป็นตัวต้นกำลังในการขับเคลื่อน โดยมีชุดควบคุมความเร็วมอเตอร์เป็นอุปกรณ์ในการควบคุมความเร็วของรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้าในครั้งนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1 การคำนวณหาขนาดมอเตอร์

จากการพิจารณาขอบเขตการใช้งานของโครงงานรถไฟฟ้านี้ ทำให้ได้ข้อมูลนำมาคำนวณหาขนาดพิกัดของมอเตอร์ที่ใช้ในการขับเคลื่อนดังนี้

W = น้ำหนักของรถ (kg) = 550 kg (น้ำหนักบรรทุก+ตัวรถ)

V = อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร็ว (m / s) ในที่นี้คิดที่อัตราเร็ว 60 km / hr (16.6 m / s)

μ = ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างยางรถ กับพื้นผิวถนน โดยทั่วไปมีค่าระหว่าง 0.04-0.06 ในที่นี้เลือกใช้ค่า 0.04 เนื่องจากเป็นรถ 3 ล้อ (ton / kg)

η_m = ประสิทธิภาพของมอเตอร์ 80 % ถึง 95 %

η = ประสิทธิภาพของระบบส่งกำลัง 90 %

จากสมการที่ (2-9) คือ

$$Pm = \{(\mu WV/102)\} \times (100/\eta) \quad KW$$

จะได้ $$Pm = \{(0.04 \times 550 \times 16.6/102)\} \times (100/90) \quad KW$$

คิดระบบส่งกำลังของตัวมอเตอร์ กับระบบเพลาของรถ โดยการต่อตรง (Direct coupling) เลือกประสิทธิภาพของมอเตอร์ 80 % ถึง 95 % ก็ได้ สำหรับโครงงานนี้เลือกใช้ที่ 95 % เพราะฉะนั้นจะได้ขนาดของกำลังที่โหลดต้องการในอัตราความเร็ว 60 km / hr คือ

$$P = P_m/\eta_m = 3.97/0.95$$

$$P = 4.17 \text{ KW}$$

จากข้อมูลข้างต้นที่ได้สามารถนำไปทำการเลือกขนาดของมอเตอร์ได้ ซึ่งจะเห็นได้ว่าแรงม้าที่ใช้ในการขับโหลดของรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้าที่ค่าประมาณ 8 แรงม้า ซึ่งถือว่าเหมาะสม หากพิจารณาร่วมกันกับน้ำหนักของรถ แต่เนื่องจากรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้ามีน้ำหนักที่เบากว่ารถที่ใช้เครื่องยนต์ทั่วๆไป และจากการพิจารณาโครงงานรถไฟฟ้าที่ได้เคยทำกันมา จะพบว่ากำลังของมอเตอร์ที่ใช้กันจะมีค่าไม่เกินประมาณ 10 แรงม้า

- พิกัดตัวมอเตอร์

23 โวลท์ ,195 แอมป์ , Rating rpm 5 Min

จากสูตร $P = V \times I$ Watt

$= 23 \times 195$

$= 4.485 \approx 4.5$ KW หรือประมาณ 9 แรงม้า

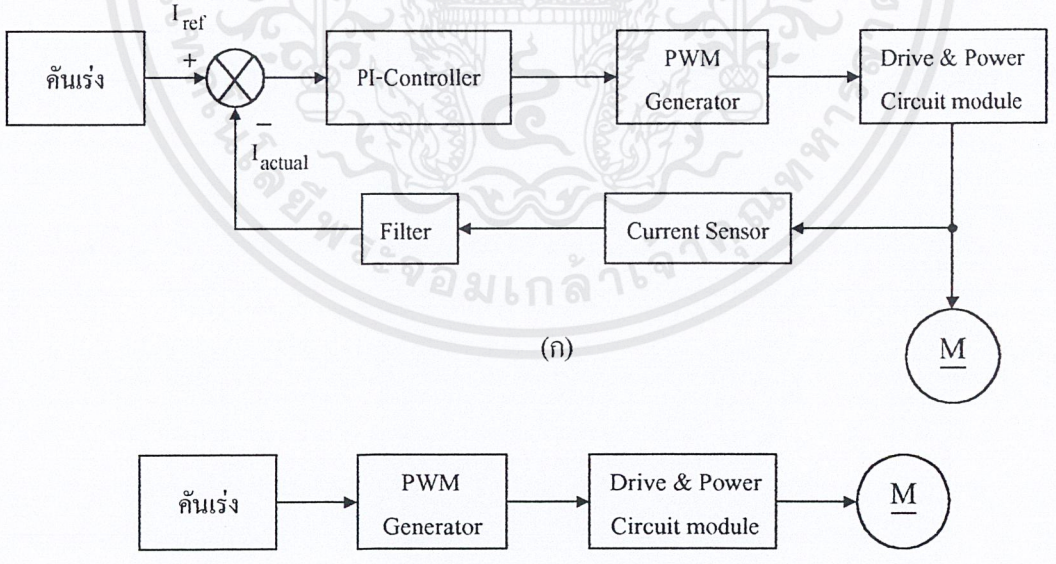
จะเห็นได้ว่า ขนาดมอเตอร์ที่เลือกใช้ในโครงงานนี้มีพิกัดกำลัง 4.5 KW หรือประมาณ 9 แรงม้า ซึ่งแรงม้าที่คำนวณได้นี้มีค่ามากกว่าแรงม้าที่คำนวณได้จากทางด้านโหลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นในโครงงานนี้จึงได้เลือกใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบผสม (compound dc motor) ขนาด 4.5 KW 23 Volt และเนื่องจากคุณสมบัติทางด้านแรงบิดในการขับโหลดมีค่าใกล้เคียงกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรม (dc series motor) อาจจะด้อยกว่าบ้างเล็กน้อยแต่ก็ยังพอที่จะใช้ขับโหลดของรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้าในครั้งนี้ได้ และที่สำคัญมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรม สามารถหาได้ยากมาก

3.2 การควบคุมความเร็วของรถ (ควบคุมความเร็วมอเตอร์)

ในส่วนของการปรับเปลี่ยนความเร็วของรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้าในโครงงานนี้ จะอาศัยการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง โดยอาศัยหลักการ Chopper ปรับเปลี่ยนค่า Duty cycle เพียงอย่างเดียว และให้ความถี่ในการสวิตช์คงที่ ในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์นั้นสามารถจำกัดกระแสของมอเตอร์ขณะขับเคลื่อนได้ โดยใช้ระบบการควบคุมแบบป้อนกลับ หรือแบบลูปปิดนั่นเอง (Close Loop) และการไม่จำกัดกระแสของมอเตอร์ขณะขับเคลื่อน โดยใช้การควบคุมแบบลูปเปิด (Open Loop) หลักการควบคุมความเร็วของรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้าสามารถแสดงเป็นบล็อกไดอะแกรมได้ดังนี้



รูปที่ 3.3 บล็อกไดอะแกรมแสดงการทำงานของชุดควบคุมความเร็วมอเตอร์
(ก.)แบบลูปปิด (Close loop) และ (ข.) แบบลูปเปิด (Open loop)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

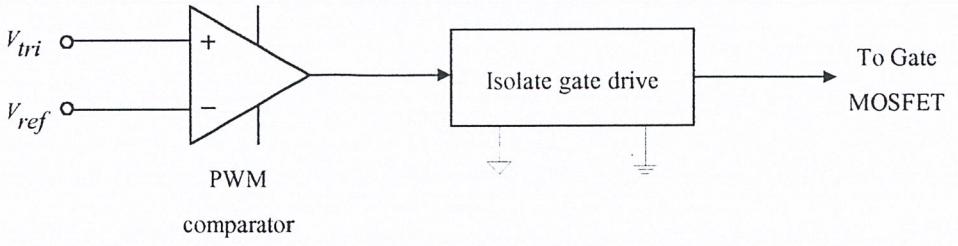
หลักการทำงานโดยรวม

ในชุดกำเนิดสัญญาณพีดับบลิวเอ็ม (PWM Generator) จะเป็นชุดที่สร้างสัญญาณควบคุมพัลส์ ขึ้นมาที่ความถี่คงที่ค่าหนึ่ง สามารถทำการปรับขนาดความกว้างของสัญญาณพีดับบลิวเอ็มได้โดยการปรับ Duty cycle เอาต์พุตของชุดกำเนิดของสัญญาณพีดับบลิวเอ็มจะถูกส่งไปยังชุดขับนำเกต เพื่อทำการแยกกราวด์ของวงจรทางด้านชุดควบคุม (control) กับชุดกำลัง (power) ออกจากกันโดยผ่าน opto couple แล้วทำการขยายกระแสเพื่อให้เพียงพอต่อความต้องการของอุปกรณ์สวิตช์ชิ่ง (มอสเฟต) เพื่อให้อุปกรณ์สวิตช์ชิ่งสามารถทำการนำกระแส (On) และหยุดนำกระแส (Off) ได้ตามสัญญาณควบคุมที่ส่งมา เพื่อนำไปทำการขับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงต่อไป และเมื่อทำการขับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง จะเกิดค่ากระแสจริง (I_{actual}) กลับมาในรูปของแรงดันโดยใช้วงจรตรวจจับกระแส (Current sensor) จะเรียกแรงดันนี้ว่า $V_{feedback}$ ส่งไปเข้าวงจรควบคุมแบบพีไอ (PI-control) เพื่อที่จะรักษาระดับกระแสที่จ่ายให้กับโหลดให้คงที่ และต้องตอบสนองให้ทันต่อการเปลี่ยนแปลงของโหลด โดยการนำ $V_{feedback}$ มาทำการเปรียบเทียบกับ V_{ref} ที่ตั้งไว้ที่คันเร่ง หากแรงดันทั้งสองมีค่าไม่เท่ากัน วงจรควบคุมป้อนกลับแบบพีไอคอนโทรล ก็จะทำการสร้างสัญญาณไปตัดกับสัญญาณรูปฟันเลื่อย (Saw tooth) เพื่อทำการปรับเปลี่ยนค่าดิวตี้ไซเคิ้ล (Duty cycle) ที่จะทำให้ได้ค่า $V_{feedback}$ เท่ากันกับ V_{ref} โดยจะมีการส่งค่า $V_{feedback}$ มาเปรียบกับ V_{ref} อยู่ตลอดเวลา ซึ่งจะทำให้ค่ากระแสจริง (I_{actual}) มีค่าคงที่ และค่าของแรงบิดก็จะคงที่ด้วย

จากหลักการทำงานที่กล่าวมาอย่างคร่าวๆ ข้างต้น จะเป็นการควบคุมความเร็วแบบจำกัดกระแสมอเตอร์ โดยใช้ระบบการควบคุมแบบป้อนกลับ หรือแบบลูปปิด (Close Loop) ซึ่งถ้าเป็นการควบคุมความเร็วแบบไม่จำกัดกระแสมอเตอร์ จะใช้การควบคุมแบบลูปเปิด (Open Loop) ซึ่งจะไม่มีการรักษาระดับกระแสที่จ่ายให้กับโหลดให้มีค่าคงที่ โดยแค่จะนำสัญญาณพีดับบลิวเอ็มที่ได้จากชุดกำเนิดสัญญาณพีดับบลิวเอ็ม (PWM Generator) ไปเข้าชุดขับนำเกต และแยกกราวด์แล้วส่งไปที่อุปกรณ์สวิตช์ชิ่ง (มอสเฟต) เพื่อนำไปทำการขับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเพียงเท่านั้น

และสำหรับการใช้งานมอสเฟต ทำงานเป็นสวิตช์ความถี่สูงนั้น วงจรขับจะต้องมีความสามารถในการรับ และจ่ายกระแสได้ ถึงแม้ว่ามอสเฟตต้องการกระแสไฟฟ้าเพียงเล็กน้อย แต่ในการนำมอสเฟตมาต่อขนานกันหลาย ๆ ตัวนั้น วงจรขับจะต้องมีความสามารถจ่ายกระแสได้เพียงพอด้วย เพื่อไม่ให้ขณะทำงานเกิดการรบกวนระหว่างวงจรกำลัง และวงจรควบคุมจะต้องทำการแยกกราวด์ของวงจรขับเกตกับส่วนของการสร้างสัญญาณ PWM ออกจากกัน ในปัจจุบันนี้มีไอซีขับเกตมอสเฟตสำเร็จรูปที่มีการแยกกราวด์ในชิป (chip) เดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 การแยกกราวด์ระหว่างวงจรกำลัง กับวงจรควบคุม

3.3 การขับนำเกตของมอสเฟต

ในคุณลักษณะการทำงานทางไฟฟ้ากระแสตรงของมอสเฟตไม่ต้องการกระแสเกต เนื่องจากการทำงานของมอสเฟตจะต้องอาศัยแรงดันเป็นตัวควบคุมการทำงาน แต่การนำกระแสหรือไม่นำกระแสของมอสเฟตในระยะเวลาช่วงสั้นๆ ยังต้องอาศัยสัญญาณกระแสพัลส์ที่เกิดจากการเก็บประจุและคายประจุของตัวเก็บประจุอินพุต

การให้มอสเฟตไม่นำกระแสนั้นกระทำได้โดยการใช้สัญญาณควบคุมแบบกลับ (พัลส์ลบ) หรือกำหนดแรงดันระหว่างเกตกับ ซอร์ทเท่ากับศูนย์ โดยปกติทั่วไปแล้วประโยชน์ที่จะได้จากการควบคุมการทำงานของมอสเฟตนั้น จะได้จากการกำหนดให้แรงดันระหว่างเกตกับซอร์ทเป็นลบ ซึ่งจะทำให้เกิดการชดเชยการทำงานของมอสเฟต

วงจรที่ใช้ในการขับนำเกตของมอสเฟตมีอยู่ด้วยกัน 3 ชนิดดังนี้

1. วงจรขับนำเกตโดยใช้ไอซี
2. วงจรขับนำเกตโดยทรานซิสเตอร์ต่อแบบคอมพลีเมนตารี (complementary)
3. วงจรขับนำเกตโดยวิธีบุทแสตรป

โดยในโครงงานนี้ได้เลือกใช้วิธีขับนำเกตโดยใช้วงจรขับนำเกตโดยใช้ไอซี ซึ่งรายละเอียดได้กล่าวถึงในตอนต้นแล้ว

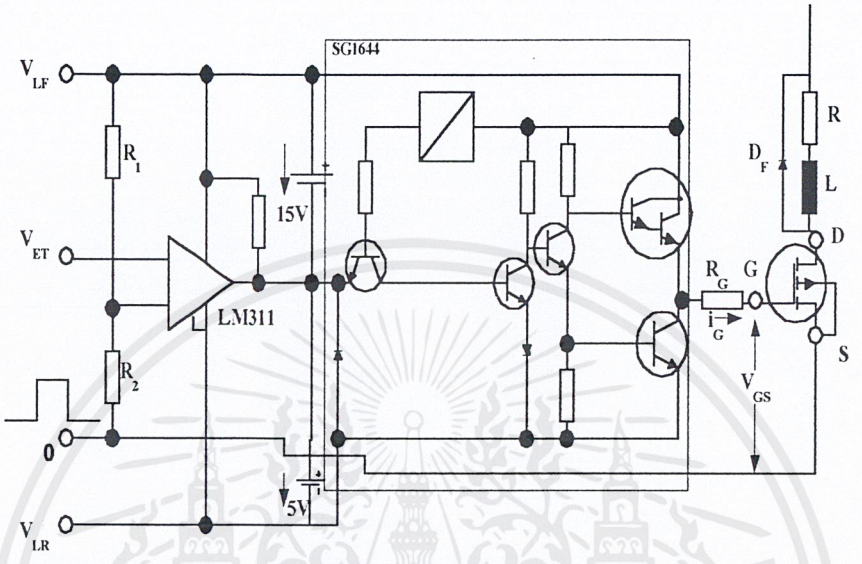
วงจรขับนำเกต โดยใช้ไอซี

ความสัมพันธ์ของค่ากระแสต่ำๆ ทำให้กำลังงานที่ปรากฏที่ขาเกตมีค่าต่ำด้วย เมื่อมอสเฟต ไม่นำกระแสที่แรงดันไม่มีโหลด V_{LR} จะมีแรงดันจาก 5 ถึง 10 V จะทำให้เกิดแรงดันลบปรากฏที่ขาเกตของมอสเฟตดังนั้นถ้าใช้มอสเฟตมาทำหน้าที่ควบคุมจะต้องมีแหล่งจ่ายแรงดัน Vcc มีความสัมพันธ์กับแรงดันเมื่อไม่มีโหลดสำหรับพัลส์บวกหรือพัลส์ลบที่จะใช้ขับนำเกตของมอสเฟต คือ

$$V_{CC} \geq V_{LF} + V_{LR} \qquad (3\text{-}1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรพื้นฐานที่ใช้ไอซีทำหน้าที่ขับนำเกต ที่ขาเกตของมอสเฟตกำลัง สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 วงจรพื้นฐานที่ใช้ไอซีทำหน้าที่ขับนำเกต

3.3.1 การใช้ไอซีเบอร์ TLP 250 ในการขับนำเกตของมอสเฟตกำลัง

ปัจจุบันมอสเฟตกำลังยังคงเป็นที่นิยมในการใช้เป็นสวิตช์กำลังสูงในระบบการควบคุมทั้งอินเวอร์เตอร์, คอนเวอร์เตอร์, การควบคุมมอเตอร์ และ ระบบจ่ายกำลังสำรอง (UPS)

MOSFET ต้องการแรงดันมาขับเกตเพื่อให้สามารถทำงานในสภาวะนำกระแส (On) และหยุดนำกระแส (Off) ได้ในระบบที่เหมาะสมตามคุณสมบัติของมอสเฟต ซึ่ง IC ขับนำเกตเบอร์ TLP250 จัดเป็นอุปกรณ์ไฮบริดจ์ ได้ถูกออกแบบมาสำหรับขับนำเกตของไอจีบีที และมอสเฟต ลักษณะโดยรวมเป็นวงจรสำเร็จรูปรวมอยู่ในชุดเดียว ไฟเลี้ยงไอซี TLP250 เป็นแบบ Single supply สัญญาณอินพุตกับเอาท์พุต โดยแยกออกจากกันด้วยตัว Opto couple ภายใน ทำให้ช่วยลดปัญหาเรื่องสัญญาณรบกวนในระบบควบคุม TLP250 และไอซี TLP250 ยังสามารถทำงานในย่านความถี่สูงได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(TLP250)

TRANSISTOR INVERTER
INVERTER FOR AIR CONDITIONOR
IGBT GATE DRIVE
POWER MOS FET GATE DRIVE

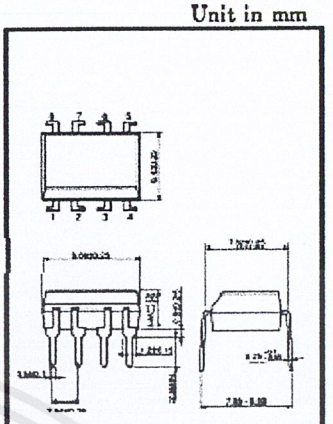
The Toshiba TLP250 consists of a GaAℓAs light emitting diode and a integrated photodetector.
This unit is 8-lead DIP package.
TLP250 is suitable for gate driving circuit of IGBT or power MOS FET.

- Input Threshold Current : I_F=5mA (Max.)
- Supply Current (I_{CC}) : 11mA (Max.)
- Supply Voltage (V_{CC}) : 10-35V
- Output Current (I_O) : ±0.5A (Min.)
- Switching Time (t_{pLH}/t_{pHL}) : 0.5μs (Max.)
- Isolation Voltage : 2500V_{rms} (Min.)
- UL Recognized : UL1577, File No.E67349
- Option (D4) type
  VDE Approved : DIN VDE0884/06.92, Certificate No.76823
  Maximum Operating Insulation Voltage : 630V_{PK}
  Highest Permissible Over Voltage : 4000V_{PK}

(Note) When a VDE0884 approved type is needed, please designate the "Option (D4)"

- Creepage Distance : 6.4mm (Min.)
  Clearance : 6.4mm (Min.)

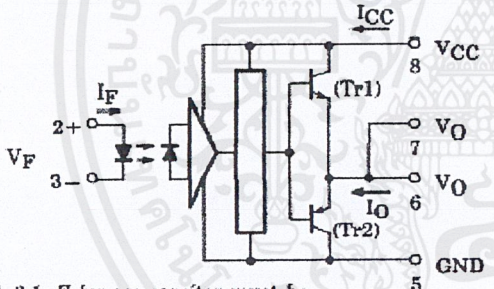
Unit in mm



JEDEC	—
EIAJ	—
TOSHIBA	11-10C4

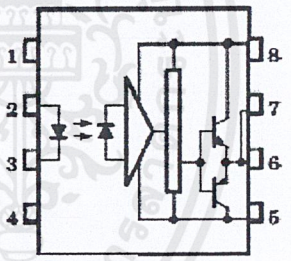
Weight : 0.54g

SCHMATIC



A 0.1μF bypass capcitor must be connected between pin 8 and 5 (See more 5).

PIN CONFIGURATION (TOP VIEW)



1 : N.C.
2 : ANODE
3 : CATHODE
4 : N.C.
5 : GND
6 : V_O (OUTPUT)
7 : V_O
8 : V_{CC}

TRUTH TABLE

		Tr1	Tr2
Input LED	ON	ON	OFF
	OFF	OFF	ON

รูปที่ 3.6 ลักษณะทางกายภาพและบล็อกไดอะแกรมของ TLP 250

3.3.2 บล็อกไดอะแกรมของไอซี TLP250

จากภาพบล็อกไดอะแกรมของไอซี TLP250 แสดงถึงรายละเอียดต่างๆ ภายในไอซี และแสดงการต่อใช้งานของไอซี โดยอินพุตของไอซี TLP250 เป็น PN photodiode และเอาท์พุต ของ TLP250 เป็น NPN, PNP ต่อแบบคอมพลีเมนทารี (complementary) ดังภาพของบล็อก ไดอะแกรมของ TLP250 ดังนั้นสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จึงมีลักษณะเป็นไปตามสัญญาณอินพุตที่ป้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เข้ามา แต่ MOSFET เป็นอุปกรณ์สวิตช์กำลังที่ต้องการแรงดันในการควบคุมให้ MOSFET ทำงาน ดังนั้นสัญญาณที่มาควบคุมจะต้องเป็นสัญญาณพัลส์ที่สามารถทำให้ MOSFET ทำงาน “On” และ “Off” ได้รวดเร็วตามความต้องการ ซึ่งจะต้องเป็นสัญญาณพัลส์แบบสี่เหลี่ยม (square wave)

ในการที่จะให้ TLP250 เป็นตัวขับนำ GATE ให้ MOSFET ทำงานตามความต้องการนั้น ก็ จะต้องมีอุปกรณ์ที่สามารถกำเนิดสัญญาณพัลส์เพื่อเป็นสัญญาณอินพุต (input signal) อันเป็นสัญญาณพัลส์แบบสี่เหลี่ยม (square wave) ดังนั้นในการกำเนิดสัญญาณพัลส์ที่ป้อนให้ไอซี TLP250 จึงเลือกใช้ไอซีเบอร์ ICL8038 ในการกำเนิดสัญญาณสามเหลี่ยม (Triangular signal) มาตัดกับแรงดันอ้างอิง (Reference signal) ที่เป็นแรงดันไฟตรง เพื่อให้ได้สัญญาณพีดับบลิวเอ็มตามต้องการ

ส่วนสาเหตุที่ใช้หลักการสร้างสัญญาณพีดับบลิวเอ็มด้วยวิธีนี้ก็เพราะว่าสามารถทำการปรับระดับสัญญาณพีดับบลิวเอ็มได้ในย่านการทำงานที่กว้างกว่าการใช้ไอซีสำเร็จรูปทั่วๆ ไป และยังสะดวกต่อการทำวงจรป้องกันต่างๆ แต่ก็มีข้อเสียคือ อาจจะทำให้วงจรมีขนาดใหญ่ขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ไอซีสำเร็จรูปในการกำเนิดสัญญาณพีดับบลิวเอ็ม

3.4 วงจรควบคุมป้อนกลับแบบพีไอ

ระบบควบคุมแบบ PI นิยามได้โดย

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i}\int_0^t e(t)\,dt$$

ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของคอนโทรลเลอร์ คือ

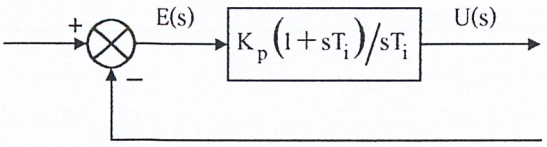
$$\boxed{\frac{U(S)}{E(S)} = K_p\left(1 + \frac{1}{T_i S}\right)} \qquad (3\text{-}2)$$

เมื่อ K_p = อัตราขยายแบบ Proportional

T_i = Integral time

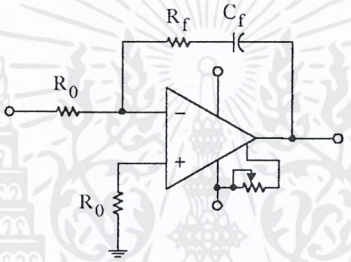
ทั้ง K_p และ T_i เป็นค่าปรับแต่ง โดย T_i เป็นการปรับการควบคุมแบบ I ขณะที่การเปลี่ยนแปลงค่าของ K_p จะมีผลต่อ Proportional และ Integral ของระบบควบคุม ส่วนค่าที่เป็นส่วนกลับของ T_i เราเรียกว่า “reset time” ซึ่งเป็นค่าของเวลาต่อนาทีในส่วนของ Proportional ของระบบควบคุมที่มีค่าเท่ากันโดย reset rate จะวัดในเทอมของสัดส่วนที่ซ้ำกันต่อนาที Block diagram การทำงานแสดงดังรูปที่ 3.7 ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 Block diagram การทำงานของการควบคุมแบบ PI

ตัวอย่างวงจรควบคุมป้อนกลับแบบพีไอโดยใช้ออปแอมป์ (Operation Amplifier) สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 ตัวอย่างวงจรควบคุมป้อนกลับแบบพีไอ

พฤติกรรมของพี และไอคอนโทรลเลอร์ ขณะมีสัญญาณความผิดพลาด (Error) เกิดขึ้นเป็นไปตามตารางที่ 3.1 ดังนี้

ตารางที่ 3.1 แสดงพฤติกรรมของพี และไอคอนโทรลเลอร์

ชนิดคอนโทรลเลอร์	พฤติกรรมเริ่มต้น	พฤติกรรมที่สภาวะคงตัว
พี (Proportional)	สัญญาณเอาท์พุทมีการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใด	สัญญาณเอาท์พุทมีค่าคงที่ อาจจะมากกว่า ,เท่ากับ หรือต่ำกว่าสัญญาณความ ผิดพลาดที่เข้ามา
ไอ (Integration)	สัญญาณเอาท์พุทมีการเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ เป็นไปตามค่าเวลาอินทิกรัลของสัญญาณความผิดพลาด	สัญญาณความผิดพลาด ต้องมีค่าเป็นศูนย์เสมอถึงจะทำให้การอินทิกรัลหยุดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.1 ผลตอบสนองของพีไอคอนโทรลเลอร์ (Response of PI-Controller)

การพิจารณาผลตอบสนองของพีไอคอนโทรลเลอร์นั้น สิ่งที่จำเป็นคือ ต้องทราบทรานส์เฟอร์ฟังก์ชั่นของพีไอคอนโทรลเลอร์ก่อน จากรูปที่ 3.8 จะได้

$$Z_f = R_f + \frac{1}{SC_f} = \frac{1 + SR_fC_f}{SC_f} \tag{3-3}$$

ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชั่นจะกลายเป็น

$$F_R(S)_{PI} = \frac{-V_a(S)}{\Delta V_o(S)} = \frac{R_f}{R_o} + \frac{1}{SR_oC_f} = A_R + \frac{1}{S\tau_1}$$
$$= \frac{R_f}{R_0}\frac{1 + SR_fC_f}{SR_fC_f} = A_R\frac{1 + S\tau_s}{S\tau_s} \tag{3-4}$$

จากสมการที่ (3-4) จะได้ว่า

$$\tau_s = R_fC_f = \frac{R_f}{R_0}R_0C_f = A_R\tau_1 \tag{3-5}$$

สมการที่ (3-3) แสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมของคอนโทรลเลอร์แบบพี บวกกับคอนโทรลเลอร์แบบไอ กลายเป็นพีไอคอนโทรลเลอร์

โดยเทอมพี คือ

$$A_R = \frac{R_f}{R_0} \tag{3-6}$$

และเทอมไอ คือ

$$\frac{1}{S\tau_1} = \frac{1}{SR_0C_f} \tag{3-7}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นสมการทางเวลาโดยทั่วไปหาได้โดย

$$-V_o(t) = A_R \Delta V_o(t) + \frac{1}{\tau_1} \int_0^t \Delta V_o(t)dt + V_{ao} \qquad (3\text{-}8)$$

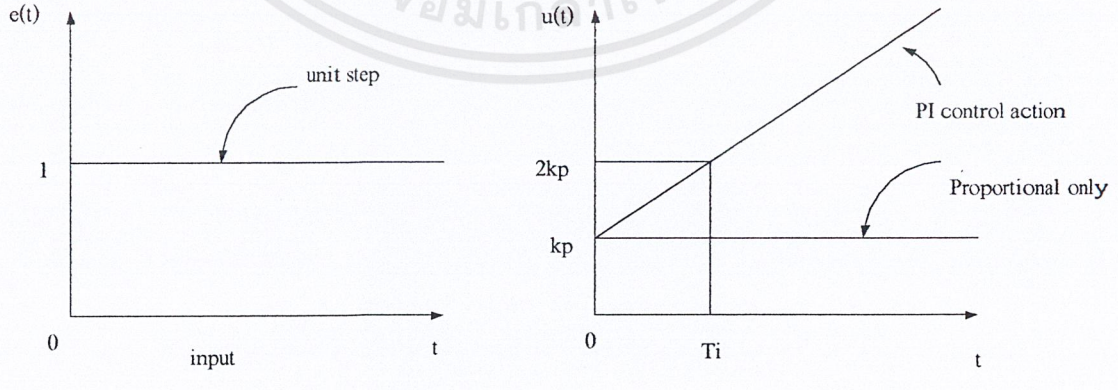
V_{ao} เป็นค่าแรงดันเอาท์พุทเริ่มแรกก่อนที่จะมีสัญญาณทางด้านอินพุท ถ้าผลตอบสนองแบบสเตปสัมพันธ์ กับสเตปอินพุท ผลตอบสนองแบบสเตปจะเป็นดังนี้

$$f(t) = \frac{-V_a(t)}{\Delta V_{ostep}} = A_R + \frac{t}{\tau_1} \qquad (3\text{-}9)$$

(V_{ao} ละเว้นไว้ไม่คิดในที่นี้)

ดังนั้นการทำงานของพีไอคอนโทรลเลอร์ จะเริ่มทำงานเมื่อมีสัญญาณความผิดพลาด โดยตราบใดที่ยังคงมีสัญญาณความผิดพลาด พีไอคอนโทรลเลอร์จะยังคงทำงานต่อไป ตราบจนกระทั่งสัญญาณความผิดพลาดเป็นศูนย์ พีไอคอนโทรลเลอร์จึงจะหยุดทำงาน การปรับการทำงานโดยมากจะกำหนดให้ R_o มีค่าคงที่ แล้วทำการปรับ R_f และ C_f โดยปรับ R_f เพื่อเปลี่ยนแปลงอัตราขยาย และปรับ C_f เพื่อเปลี่ยนแปลงค่าเวลารีเซ็ท (Reset time) ของคอนโทรลเลอร์

ถ้าอินพุทเป็น Unit step จะได้เอาท์พุทดังรูปที่ 3.9 ดังนี้



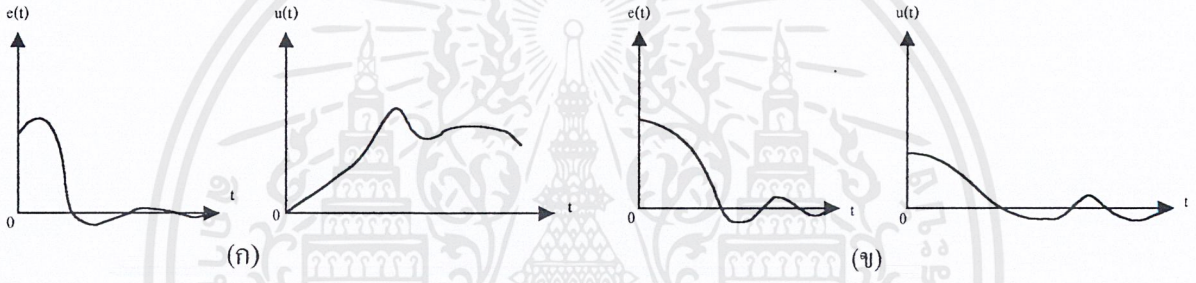
รูปที่ 3.9 กราฟแสดงผลการควบคุมแบบ PI

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.2 ประโยชน์ที่ได้จากการควบคุมแบบพีไอ

Integral control action ในการควบคุม Plant แบบ Proportional ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันจะไม่มี Integral $\frac{1}{s}$ นั่นคือ จะมีผลการตอบสนองต่อการเพิ่มของ Input คือ Steady-state error หรือ Offset สามารถกำจัดออกไปได้ ถ้า Controller มีการควบคุมแบบ Integral เพิ่มเข้าไป

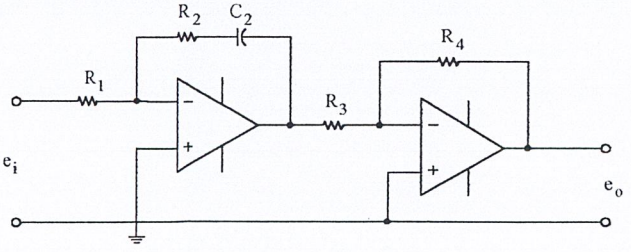
ในการควบคุม Plant โดยใช้การควบคุมแบบ Integral สัญญาณ Output จาก Controller จะมีค่าสัญญาณไม่เข้าสู่ศูนย์ เมื่อสัญญาณ Error (e (t)) ล่วงเข้าสู่ศูนย์ สิ่งนี้จะไม่เกิดขึ้น ในกรณีที่ระบบมีเพียงการควบคุมแบบ Proportional เพียงอย่างเดียว พิจารณาได้จากรูปที่ 3.10 ดังนี้



รูปที่ 3.10 (ก) แสดง e (t) และ u (t) เมื่อสัญญาณ e (t) สวิงเข้าสู่ศูนย์ จะเห็นว่า u (t) จะไม่สวิงเข้าสู่ศูนย์เมื่อ Controller มี Integral control (ข) แสดง e (t) และ u (t) เมื่อสัญญาณ e (t) สวิงเข้าสู่ศูนย์ จะเห็นว่า u (t) จะเข้าสู่ศูนย์ด้วย เมื่อ Controller Proportional control

หมายเหตุ : การควบคุมแบบ Integral ขณะที่มีการขจัดเอา Offset หรือ Steady-state error อาจจะทำให้เกิดการแกว่งของสัญญาณอย่างช้าๆ ในช่วงที่ขนาดลดลงหรือเพิ่มขึ้น ซึ่งทั้งสองสิ่งนี้เป็นสิ่งที่ไม่ต้องการให้เกิดขึ้น

3.4.3 การหาอัตราขยายของ PI-Control



รูปที่ 3.11 วงจรพีไอคอนโทรล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จาก $$\frac{E_o(s)}{E_i(s)} = K_p\left(1 + \frac{1}{T_i(s)}\right)$$

โดย $$Z_1 = R_1$$

$$Z_2 = R_2 + {}^{1}\!/_{SC_2} = \frac{SC_2R_2 + 1}{SC_2}$$

จะได้ $$\frac{E(s)}{E_i(s)} = -\frac{Z_2}{Z_1} = -\frac{\left(SC_2R_2 + 1\right)}{SC_2R_1}$$

ดังนั้น $$\frac{E_o(s)}{E_i(s)} = \frac{E_o(s)}{E(s)} \times \frac{E(s)}{E_i(s)}$$

$$\frac{E_o(s)}{E_i(s)} = -\frac{R_4}{R_3} \times -\frac{\left(SC_2R_2 + 1\right)}{SC_2R_1}$$

$$\frac{E_o(s)}{E_i(s)} = \frac{R_4}{R_3} \times \frac{R_2}{R_1}\left(\frac{SC_2R_2 + 1}{SC_2R_2}\right)$$

$$\boxed{\frac{E_o(s)}{E_i(s)} = \frac{R_4}{R_3} \times \frac{R_2}{R_1}\left(1 + \frac{1}{SC_2R_2}\right)} \qquad (3\text{-}10)$$

โดย

$$\boxed{K_p = \frac{R_4}{R_3} \times \frac{R_2}{R_1}} \qquad (3\text{-}11)$$

และ $$T_i = R_2C_2$$

จาก $$T_i = \frac{K_p}{K_i}$$

จะได้

$$\boxed{K_i = \frac{K_p}{T_i} = \frac{R_4}{R_3R_1C_2}} \qquad (3\text{-}12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 แหล่งจ่ายไฟกระแสตรงแบบสวิตซ์ชิ่ง

ในปัจจุบันนี้ แหล่งจ่ายไฟกระแสตรงสวิตซ์ชิ่ง (Switching power supply) ได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในวงการอุตสาหกรรม เนื่องจากแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงแบบสวิตซ์ชิ่งมีข้อได้เปรียบแหล่งจ่ายไฟแบบลีเนียร์ (linear regular power supply) ตรงที่มีขนาดเล็กกว่ามีน้ำหนักเบากว่าและมีประสิทธิภาพสูงกว่าในขณะที่จ่ายกำลังเท่ากัน

แหล่งจ่ายไฟแบบลิเนียร์จะประกอบด้วยหม้อแปลงความถี่ต่ำ ซึ่งทำหน้าที่เป็นไฟสลับแรงดันสูงให้มีแรงดันต่ำลงมาตามต้องการ จากนั้นส่งต่อเข้ากับวงจรเรคติฟราย และฟิลเตอร์ขั้นสุดท้ายก็จะผ่านวงจรเรคกูเลเตอร์ เพื่อรักษาเสถียรของแรงดัน ส่วนแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตซ์ชิ่งนั้น ไม่ต้องใช้จากนั้นจะผ่านวงจรสวิตซ์ชิ่งเพื่อแปลงกลับเป็นไฟสลับความถี่สูง และแรงดันไฟสลับนี้จะผ่านวงจรเรคติฟราย และฟิลเตอร์สะสมพลังงานไว้ในตัวเก็บประจุทางเอาท์พุทให้พร้อมใช้งานอยู่ตลอดเวลา

3.5.1 ข้อดีและข้อเสียของแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงแบบสวิตซ์ชิ่ง

1.) ข้อดีของแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงแบบสวิตซ์ชิ่ง

ข้อดีของแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงสวิตซ์ชิ่ง คือ มีประสิทธิภาพสูง และมีขนาดเล็ก ซึ่งในแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงแบบลิเนียร์ การทำงานจะอยู่ในแอคทีฟโหมด คือมีกระแสไหลต่อเนื่องตลอดเวลาทำให้เกิดการสูญเสียมากทำให้มีประสิทธิภาพประมาณ 40% - 50% และหากอินพุทและเอาท์พุทต่างกันมาก ประสิทธิภาพอาจจะต่ำกว่า 40% แต่แหล่งจ่ายไฟกระตรงแบบลีเนียร์ อันเนื่องมาจากสาเหตุ 2 ประการ

1. อุปกรณ์สวิตซ์ชิ่งจะทำงานเป็นสวิตซ์ คือ On หรือ Off ตลอดเวลาซึ่งทั้งสองสภาวะนี้ คือจะมีโวลท์เตจตกคร่อมต่ำมาก (ประมาณเท่ากับ V) และในช่วง Off จะมีกระแสไหลผ่านตัวมันต่ำ ทำให้ POWER ที่สูญเสียในตัวมันต่ำ

2. มีค่า regulation ดี และสามารถใช้กับอินพุทที่มีค่ากว้าง แหล่งจ่ายไฟกระแสตรงแบบสวิตซ์ชิ่งซึ่งใช้หลักการสวิตซ์ชิ่งที่มีความถี่สูง ดังนั้นหม้อแปลง โช้ค และตัวเก็บประจุจะมีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา และราคาถูก การที่อุปกรณ์ต่างๆ มีขนาดเล็กจะทำให้กำลังที่สูญเสียในแต่ละตัวน้อยกว่าอุปกรณ์ที่มีขนาดใหญ่กว่าในแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงแบบลิเนียร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.) ข้อเสียของแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงแบบสวิตซ์ชิ่ง

1.แหล่งจ่ายไฟกระแสตรง แบบ สวิตซ์ชิ่ง ซึ่งทำให้เกิดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Interference (RFI) noise) ระหว่างช่วงการสวิตซ์ความเร็วสูง

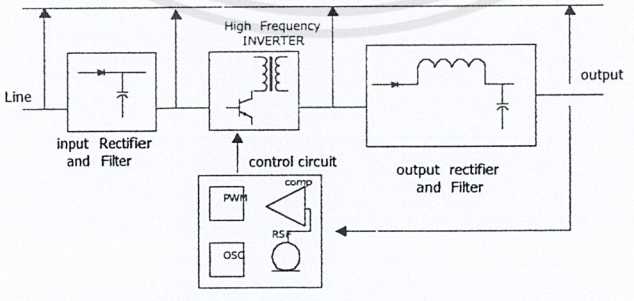
2.แหล่งจ่ายไฟกระแสตรงแบบสวิตซ์ชิ่งนั้น มีความซับซ้อนกว่าแหล่งจ่ายไฟแบบลิเนียร์มาก ทำให้การเข้าใจวงจรค่อนข้างยากทั้งการออกแบบและซ่อม

ตารางที่ 3.2 แสดงข้อเปรียบเทียบระหว่างแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงแบบลิเนียร์กับแบบสวิตซ์

แบบลิเนียร์	แบบสวิตซ์ชิ่ง
1. มีประสิทธิภาพต่ำ	1. มีประสิทธิภาพสูง
2. มีการสูญเสียกำลังในรูปของความร้อน	2. มีกำลังสูญเสียต่ำ
3. วงจรไม่ซับซ้อน ออกแบบและซ่อมง่าย	3. วงจรซับซ้อนมาก
4. มีค่ากำลังต่อน้ำหนักต่ำ	4. มีค่ากำลังต่อน้ำหนักสูง
5. มีแรงดันกระเพื่อมต่ำ	5. มีแรงดันกระเพื่อมสูง
6. ให้สัญญาณรบกวน EMI/ RFI ต่ำ	6. ให้สัญญาณรบกวน EMI / RFI สูง

3.5.2 หลักการทำงานเบื้องต้นของแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงแบบสวิตซ์ชิ่ง

แหล่งจ่ายไฟกระแสตรงแบบสวิตซ์ชิ่งในโครงงานนี้ทำหน้าที่จ่ายไฟเลี้ยงให้กับวงจรทั้งหมด 5 ชุด ดังนี้ คือ วงจรขับเบสที่อยู่ในส่วนของซายน์เวฟอินเวอร์เตอร์ 4 ชุด และอื่นๆ อีก 1 ชุด ซึ่งสามารถแสดงบล็อกไดอะแกรมของการทำงานได้ดังนี้



รูปที่ 3.12 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงแบบสวิตซ์ชิ่ง

จากรูปที่ 3.12 สามารถอธิบายการทำงานได้ดังนี้ ในสภาวะปกติแรงดันไฟตรงที่เข้าสู่ภาคอินเวอร์เตอร์ความถี่สูง (High frequency Inverter) จะได้มาจากภาคเรคติฟรายและฟิลเตอร์ด้าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อินพุท ซึ่งทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟสลับให้เป็นแรงดันไฟตรง แต่ในสภาวะผิดปกติเช่นไฟดับหรือไฟตกถึงระดับที่ไดโอดถูกฟอร์เวิร์ดไบแอส แรงดันไฟตรงจะถูกจ่ายโดยแบตเตอรี่ จากนั้นภาคอินเวอร์เตอร์ความถี่สูงจะทำการสวิตซ์เปลี่ยนแรงดันไฟตรงเป็นพัลส์สี่เหลี่ยมความถี่สูงช่วง 20 kHZ - 500 kHZ ซึ่งในวงจรสวิตซ์ชิ่งนี้อาจจะสร้างได้จากอุปกรณ์หลายชนิดเช่น เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ เพาว์เวอร์มอสเฟต เอสซีอาร์และอื่นๆ พัลส์สี่เหลี่ยมแรงดันสูงจากวงจรสวิตซ์ชิ่งจะส่งเข้าหม้อแปลงความถี่สูงเพื่อให้ได้แรงดันเอาท์พุทตามต้องการและแยกกราวน์ไปในตัว แรงดันที่ได้นี้จะส่งเข้าภาคเรคติฟรายและฟิลเตอร์ด้านเอาพ์พุทอีกครั้ง เป็นระดับแรงดันที่ต้องการส่วนหนึ่งจะถูกส่งกลับมาเข้าวงจรควบคุม เพื่อคอยตรวจสอบและควบคุมแรงดันเอาพ์พุทให้คงที่ไม่ว่าแรงดันไฟสลับด้านอินพุทหรือโหลดที่เอาท์พุทจะเปลี่ยนแปลงไปบ้างก็ตาม

ในส่วนของวงจรควบคุมประกอบด้วยวงจรกำเนิดความถี่เพื่อป้อนกลับแก่วงจรพัลส์วิดมอ-ดูแลเตอร์ (PWM) วงจรขยายความผิดพลาด และแรงดันอ้างอิงที่เที่ยงตรง เมื่อแรงดันเอาท์พุท เปลี่ยนแปลง วงจรขยายความผิดพลาดจะทำการเปรียบเทียบแรงดันเอาท์พุทกับแรงดันอ้างอิง แล้วส่งค่าความผิดพลาดนั้นไปทำการปรับความกว้างของพัลส์ของ PWM ขบวนพัลส์ที่ได้จะส่งมาควบคุมวงจรสวิตซ์ปิด - เปิด ปล่อยกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยไปสู่โหลดให้มีค่าเปลี่ยนแปลงตามไปด้วยเพื่อรักษาระดับแรงดันเอาท์พุทให้คงที่ ซึ่งรายละเอียดต่างๆทั้งหมดจะได้อธิบายในหัวข้อต่อไป

3.5.3 ส่วนประกอบของแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงแบบสวิตซ์ชิ่ง

แหล่งจ่ายไฟกระแสตรงแบบสวิตซ์ชิ่ง สามารถแบ่งออกเป็นส่วนต่าง ๆ ได้ดังนี้

1.) ภาคเรคติฟราย และฟิลเตอร์ด้านอินพุท (Input rectifier and filter)

ในส่วนนี้มีหน้าที่ในการแปลงแรงดันไฟสลับให้เป็นแรงดันไฟตรง ซึ่งรายละเอียดต่างๆ ทั้งหมดได้ถูกกล่าวไว้แล้วในส่วนของภาค Rectifier ที่ผ่านไป

2.) ภาคคอนเวอร์เตอร์

ซึ่งจะประกอบด้วย High Frequency inverter และ Output rectifier and filter คอนเวอร์เตอร์นั้นเป็นส่วนที่สำคัญที่สุด ซึ่งทำหน้าที่ตัดทอนสัญญาณแรงดันไฟตรงค่าสูงให้เป็นสัญญาณไฟตรงค่าต่ำ ซึ่งการตัดต่อจะเกิดจากการทำงานของเพาว์เวอร์ซิสเตอร์หรือเพาว์เวอร์-มอสเฟต ซึ่งถูกควบคุมช่วงนำกระแส โดยพัลส์ที่ได้จากวงจรควบคุมคงค่าแรงดัน วงจรคอนเวอร์เตอร์ที่นิยมใช้กันมี 5 แบบด้วยกัน ดังนี้

1. ฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ (Fly back converter)
2. ฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์ (Forward converter)
3. พุช - พูลคอนเวอร์เตอร์ (Push –Pull converter)

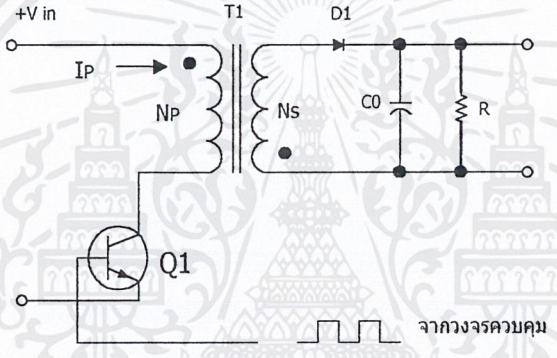
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ฮาล์ฟ -บริดจ์คอนเวอร์เตอร์ (Half-bridge converter)

5. ฟูล - บริดจ์คอนเวอร์เตอร์ (Full- bridge converter)

3.5.4 ฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ (Fly – Back Converter)

ฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ เป็นคอนเวอร์เตอร์ชนิดหนึ่งที่มีค่าใช้จ่ายในการสร้างต่ำ เหมาะสำหรับสวิตซ์ชิ่งเพาว์เวอร์ซัพพลายที่มีกำลังขาออกในช่วง 50 - 150 วัตต์ แต่คอนเวอร์เตอร์ชนิดนี้มีข้อเสียตรงที่แรงดันเอาท์พุทที่ได้จะมีค่าแรงดันกระเพื่อม (Ripple) ค่อนข้างสูง วงจรพื้นฐานของฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แสดงได้ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 วงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์

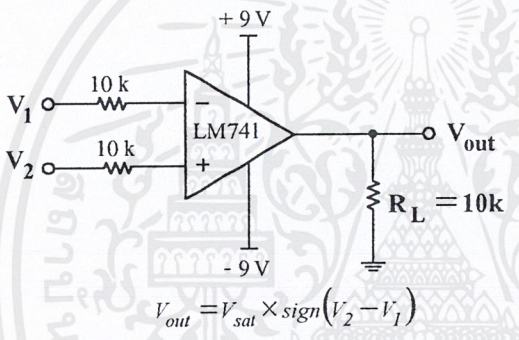
จากรูปที่ 3.13 การทำงานของวงจรจะเป็นได้ดังนี้ มอตเฟทจะนำกระแส (On) และหยุดนำกระแส (Off) สลับกันไป เมื่อ Q1 นำกระแส จะมีกระแสไหลผ่านขดลวด primary แต่เนื่องจากหม้อแปลงถูกกำหนดให้ขด primary และขด secondary พันอยู่ลักษณะกลับทิศกับ ดังนั้นขณะที่ Q1 นำกระแสอยู่นั้น ไดโอด D1 จะอยู่ในลักษณะไบอัสกลับ และไม่มีกระแสไหลผ่านโหลด R พลังงานจึงถูกสะสมที่ขด primary ของหม้อแปลง เมื่อมอสเฟตหยุดนำกระแสสนามแม่เหล็กในแกนหม้อแปลงยุบตัวนำทำให้มีการกลับขั้วของหม้อแปลงของแรงดันที่ขดลวด secondary ไดโอด D1จึงอยู่ในลักษณะไบอัสตรง พลังงานที่สะสมอยู่ในขดลวด primary จะถูกถ่ายเทไปยังขดลวด secondary และมีกระแสไหลผ่านไปยังโหลดและตัวเก็บประจุได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6 วงจรออปแอมป์พื้นฐาน

3.6.1 วงจรเปรียบแรงดัน (Comparator Amp)

การทำงานเป็นคอมพาราเตอร์ในขณะเปิดลูปนั้น ออปแอมป์จะสามารถเปรียบเทียบระดับสัญญาณระหว่างขั้วอินพุทที่ขั้วบวก ซึ่งอธิบายได้ว่าเมื่อแรงดันที่ขั้วลบมีค่าเป็นบวกสูงกว่าแรงดันอินพุทที่ขั้วบวก สัญญาณที่เอาท์พุทจะเป็นลบและมีค่าเกือบเท่า $-V_{cc}$ จากแหล่งจ่ายไฟ ดังตัวอย่างในรูปที่ 3.14



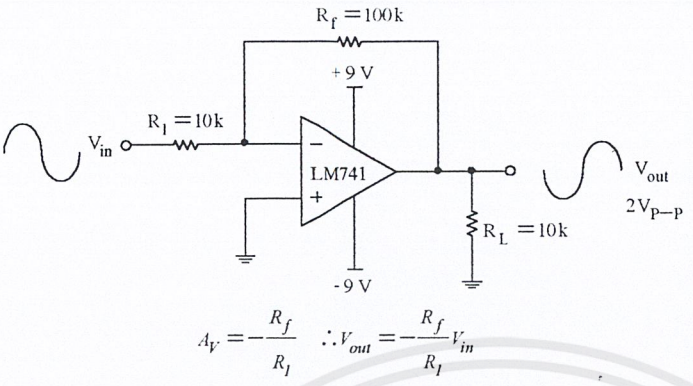
V_{in}		V_{out}
V_1	V_2	$\pm V_{sat}$
+1	+2	+8
+2	+1	-8
0	0	0
+1	-1	-8
-1	+1	+8
-1	-2	-8
-2	-1	-8

รูปที่ 3.14 วงจรเปรียบเทียบแรงดัน

3.6.2 วงจรขยายกลับเฟส (Inverting Amp)

โดยทั่วไปวงจรขยายจะหมายความถึง วงจรที่เปลี่ยนอินพุทน้อย ๆ มาเป็นสัญญาณเอาท์พุทที่มีขนาดสูงขึ้นกว่าเดิมซึ่งสัญญาณที่ว่าอาจเป็นได้ทั้งแรงดัน หรือกระแส ในลักษณะเดียวกันวงจรขยายของออปแอมป์ก็คือวงจรที่มีอัตราขยายแรงดันสูงมาก และยังมีลักษณะของการขยายเป็นเส้นตรง นั่นคืออัตราส่วนระหว่างเอาท์พุทต่ออินพุทจะคงที่เสมอ (ในอุดมคติ) และนอกจากนี้เรายังสามารถควบคุมอัตราขยายของออปแอมป์ได้โดยใช้อุปกรณ์ภายนอกเพียงไม่กี่ตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



V_{in}	V_{out}
+0.3	-3
-0.3	+3
+0.52	-5.2
-0.52	+5.2

รูปที่ 3.15 วงจรขยายกลับเฟสแบบมาตรฐาน

จากรูปที่ 3.15 วิธีที่ใช้เป็นแบบลูปปิด เรียกว่า "การป้อนกลับแบบลบ" โดยนำเอาท์พุทซึ่งกลับเฟสกับอินพุทมาป้อนที่จุดอินพุทอีกที ผลก็คือวงจรภายในออปแอมป์จะพยายามปรับเอาท์พุทจนกระทั่งความต่างศักย์ระหว่างอินพุทมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ (แต่ต้องเข้าใจว่าแรงดันระหว่างขั้วอินพุทจะต้องไม่เท่ากับศูนย์โวลท์ด้วย กล่าวคือ ผลต่างระหว่าง V_{in} และบางส่วน V_{out} ที่ขั้วอินพุทลบเพียงมีค่าต่ำพอที่จะทำให้เกิดแรงดันเอาท์พุทได้พอดีเท่านั้น)
จากสมการของอัตราขยายแรงดัน A_v

$$A_V = \frac{V_{in}}{V_{out}} \tag{3-13}$$

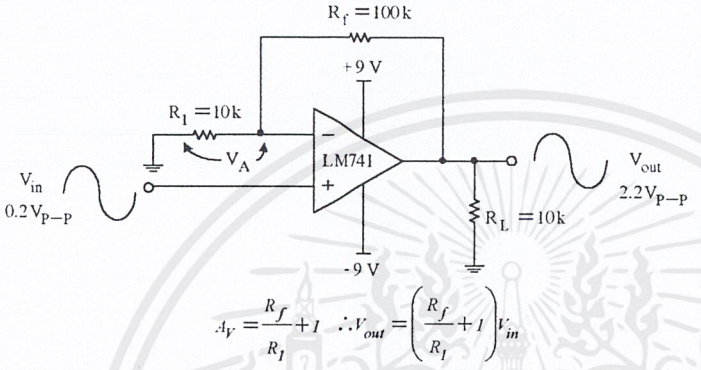
เราจะพิสูจน์ให้เห็นว่าค่าขยายแรงดัน A_v ของออปแอมป์เมื่อใช้ในโหมดของลูปปิดจะสามารถหาได้จากสมการ

$$A_V = -\frac{R_F}{R_{in}} \tag{3-14}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6.3 วงจรขยายไม่กลับเฟส (Non-Inverting Amp)

วงจรขยายไม่กลับเฟสหรือนันอินเวอร์ติงแอมป์จะแตกต่างกับอินเวอร์ติงแอมป์ในแง่ของอัตราการขยายและเฟสของเอาท์พุท แต่อย่างไรก็ตามอัตราขยายแรงดันของวงจรนันอินเวอร์ติงก็ยังควบคุมจากอุปกรณ์ภายนอกเช่นเดิม โดยเราจะวิเคราะห์วงจรเพื่อหาค่าขยายสำหรับวงจรชนิดนี้



V_{in}	V_{out}
+0.3	+3.3
-0.3	-3.3
+0.52	+5.72
-0.52	-5.72

รูปที่ 3.16 วงจรขยายไม่กลับเฟส

จากรูปที่ 3.16 แรงดันอินพุทจะถูกป้อนที่ขั้วบวก (ในขณะที่สัญญาณอินพุทในวงจรชนิดอินเวอร์ติงจะถูกป้อนเข้าที่ขั้วลบ) และมีแรงดัน V_A ซึ่งเกิดจากการแบ่งแรงดันของเอาท์พุทตกคร่อมตัวต้านทาน R_1 จากคุณสมบัติของออปแอมป์ที่ว่า ศักดาที่ขั้วอินพุทลบจะถูกบังคับให้มีขนาดเข้าใกล้ศักดาที่ขั้วอินพุทบวกเสมอ จะได้ว่า

$$V_{in} = V_A$$

ดังนั้นเราสามารถเขียนค่าขยายแรงดัน A_V ได้เท่ากับ

$$A_v = \frac{V_{out}}{V_{in}}$$

และเนื่องจาก V_A เกิดจากการแบ่งแรงดัน V_{out} จะได้

$$V_A = \frac{R_{in}}{R_F + R_{in}} V_{out}$$

จัดสมการใหม่ได้เป็น

$$\boxed{V_{out} = \left(\frac{R_F}{R_{in}} + 1\right) V_{in}} \qquad (3\text{-}15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

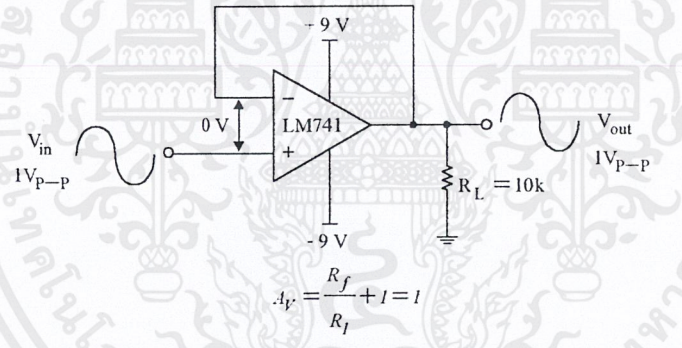
3.6.4 วงจรตามแรงดัน (Voltage Follower)

ในบางครั้งเราอาจต้องการวงจรออปแอมป์ซึ่งให้อัตราขยายเท่ากับหนึ่ง เพื่อนำไปใช้เป็นบัฟเฟอร์ ในกรณีนี้สามารถใช้วงจรนันอินเวอร์ติง หรือ ชนิดอินเวอร์ติงก็ได้ดังในรูปที่ 3.17 ซึ่งจะสามารถอธิบายได้ดังนี้

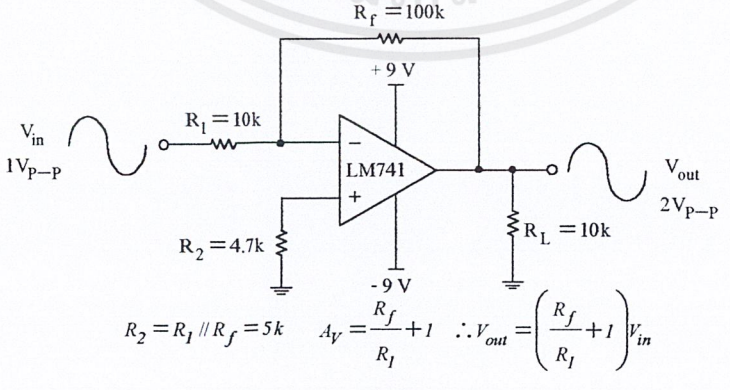
จากรูปเมื่อ R_F มีค่าเป็นศูนย์ อัตราขยายแรงดันจะมีค่าเป็น

$$A = \frac{R_1}{R_{in}} + 1 = \frac{0}{R_{in}} + 1 = 1 \qquad (3\text{-}16)$$

โดยที่แรงดันเอาท์พุทจะมีเฟสตรงกับอินพุท และยังมีขนาดเท่ากับอินพุทด้วย แต่เมื่อวงจรอินเวอร์ติงแอมป์เป็นวงจรตามแรงดันดังรูปที่ 3.17 (ข.)



(ก.)



(ข.)

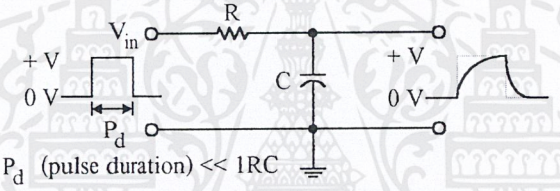
รูปที่ 3.17 วงจรตามแรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นั่นคือ แรงดันเอาท์พุทจะกลับเฟส 180 องศาเทียบกับอินพุท แต่จะมีขนาดเท่ากัน อย่างไรก็ตามข้อเสียของการใช้วงจรอินเวอร์ติงคือ อินพุทอิมพิแดนซ์ของวงจรจะมีค่าลดลงเหลือเพียงเท่ากับความต้านทานของ R_{in} (10 K) ส่วนตัวต้านทาน R_X ที่ขั้วบวก มีไว้เพื่อลดกระแสออฟเซตที่อินพุท (ทำให้เกิดสมดุลที่ขั้วอินพุททั้งสอง) ค่า R_X นี้ควรมีขนาดประมาณ R_{in} ขนานกับ R_F ($R_{in} // R_F$)

3.6.5 วงจรอินทิเกรเตอร์ (Integrator)

วงจรอินทิเกรเตอร์ก็คือ วงจรที่สามารถทำการอินทิเกรตสัญญาณที่ป้อน ณ ขั้วอินพุท หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ วงจรนี้จะสะสมสัญญาณที่ป้อนเข้าจากขั้วอินพุทเรื่อย ๆ ภายในช่วงเวลาหนึ่ง และแสดงผลของการสะสมนี้ออกทางเอาท์พุท



รูปที่ 3.18 วงจรอินทิเกรเตอร์พื้นฐานที่ใช้อุปกรณ์พาสซีพ

จากรูปที่ 3.18 แสดงวงจรอินทิเกรเตอร์พื้นฐานที่ใช้อุปกรณ์พาสซีพ (ตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ) แต่ก่อนที่จะวิเคราะห์วงจรนี้ ควรทราบคุณสมบัติบางอย่างของตัวเก็บประจุเสียก่อน คือ

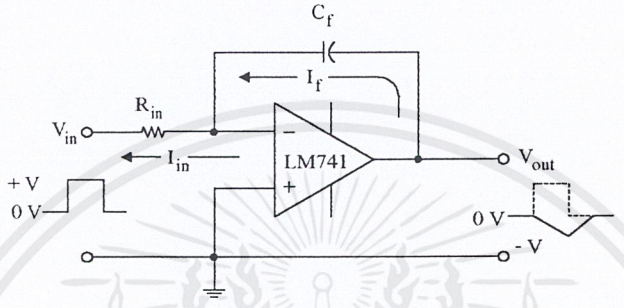
1.) แรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุไม่สามารถเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใดได้ และแรงดันเริ่มต้นมักจะให้มีค่าเท่ากับศูนย์

2.) ขณะที่ตัวเก็บประจุกำลังเก็บ (ชาร์จ) ประจุอยู่นั้น กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุจะค่อย ๆ ลดลง

เมื่อทราบคุณสมบัติดังกล่าวแล้ว เราสามารถศึกษาการทำงานของวงจรในรูปได้ง่ายขึ้น จากข้อกำหนดแรก เมื่อเริ่มต้นแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ (C) จะมีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนั้นเมื่อเราวัดเอาท์พุทคร่อมตัวเก็บประจุ แรงดันที่ได้จึงมีค่าเป็นศูนย์ หลังจากนั้นเมื่อตัวเก็บประจุค่อย ๆ ถูกชาร์จขึ้น แรงดันคร่อม (C) จึงมีค่าสูงขึ้นเรื่อย ๆ (ความเร็วในการชาร์จประจุจะขึ้นกับค่าคงตัว เวลามีค่าเท่ากับผลคูณของ R และ C) ซึ่งเป็นผลให้กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ (C) มีค่าลดลง นั่นคือแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทานจะต่ำลง และทำให้แรงดันเอาท์พุทตกลงเหลือศูนย์โวลท์ ตัวเก็บประจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก็จะคายประจุผ่านตัวต้านทาน (R) ลงกราวด์ (ในขณะนั้นตัวเก็บประจุทำตัวเสมือนเป็นแหล่งจ่ายไฟเอง) จากลักษณะของวงจรพาสซีพที่ได้แสดงมานี้ จะเห็นว่าแรงดันที่เอาท์พุท ไม่มีทางสูงกว่าแรงดันอินพุทได้เลย นอกจากนี้ต้องระวังด้วยว่า วงจรนี้จะทำงานได้ดีเมื่อความกว้างของสัญญาณพัลส์มีค่าต่ำกว่าค่าคงตัวเวลา RC มากเท่านั้น (RC คือ ผลคูณของความต้านทานและคาปาซิแตนซ์)



รูปที่ 3.19 วงจรอินทิเกรเตอร์ที่ใช้ออปแอมป์

เมื่อนำออปแอมป์มาใช้ในวงจรอินทิเกรเตอร์ดังรูปที่ 3.19 ตัวเก็บประจุจะทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์สำหรับป้อนสัญญาณกลับ จากการศึกษาคุณสมบัติของออปแอมป์ เราสามารถวิเคราะห์วงจรนี้ได้โดยยึดหลักที่ว่า กระแส I_{in} จะเท่ากับ I_F และเกิดกราวด์เสมือนที่ขั้วอินพุทลบ นอกจากนั้น หากนั่นคือ I_F จะมีค่าคงที่ตามด้วยและจากสมการของตัวเก็บประจุ

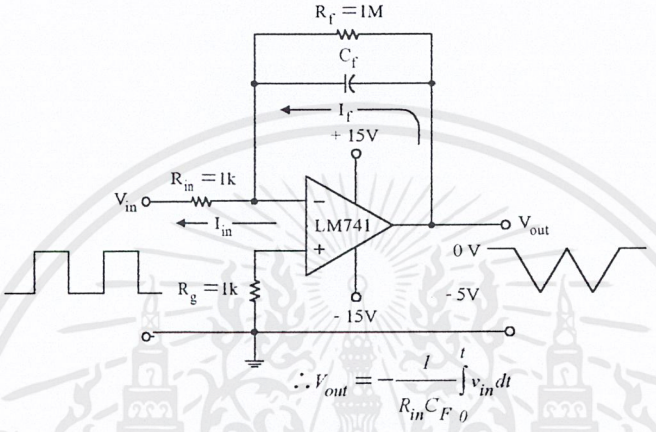
$$I_F = -C\frac{dV_{out}}{dt}$$

จะพบว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของเอาท์พุทจะมีค่าคงที่ด้วย หรืออีกนัยหนึ่ง ความชันของแรงดันเอาท์พุทจะเพิ่มขึ้นแบบเส้นตรงและเมื่อแรงดันอินพุทตกลงเหลือศูนย์โวลท์ ตัวเก็บประจุก็คายประจุแบบเชิงเส้นเช่นกัน ผลคือ แรงดันที่เอาท์พุทจะมีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยมกลับเฟส (เนื่องจากอินพุทถูกป้อน ณ ขั้วอินพุทลบ เอาท์พุทจะกลับเฟส 180 องศา)

วงจรในรูป 3.19 มีข้อเสียหลักที่ว่า ถึงแม้ในขณะที่ I_{in} มีค่าเป็นศูนย์โวลท์ก็ตาม กระแสไบอัสอินพุทจะทำให้ตัวเก็บประจุถูกชาร์จอยู่ตลอดเวลา จนกระทั่งผลสุดท้าย ขนาดแรงดันเอาท์พุทจะอิ่มตัว และมีค่าสูงประมาณแหล่งจ่ายไฟซีกลบ (ทั้ง ๆ ที่ยังไม่มีการป้อนสัญญาณอินพุทเลย) ดังนั้นการนำวงจรในรูปที่ 3.20 มาใช้ โดยมีการต่อตัวต้านทานป้อนกลับขนานกับตัวเก็บประจุจะทำให้วงจรมีเสถียรภาพดีขึ้น และจะมีค่าของอัตราขยายตั้งแต่ 10 ถึง 100 โดยมีขนาดของแรงดันเอาท์พุทตามสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_{out} = -\frac{1}{R_{in}C_F}\int_0^t v_{in}\,dt \qquad (3\text{-}17)$$



รูปที่ 3.20 วงจรอินทิเกรต

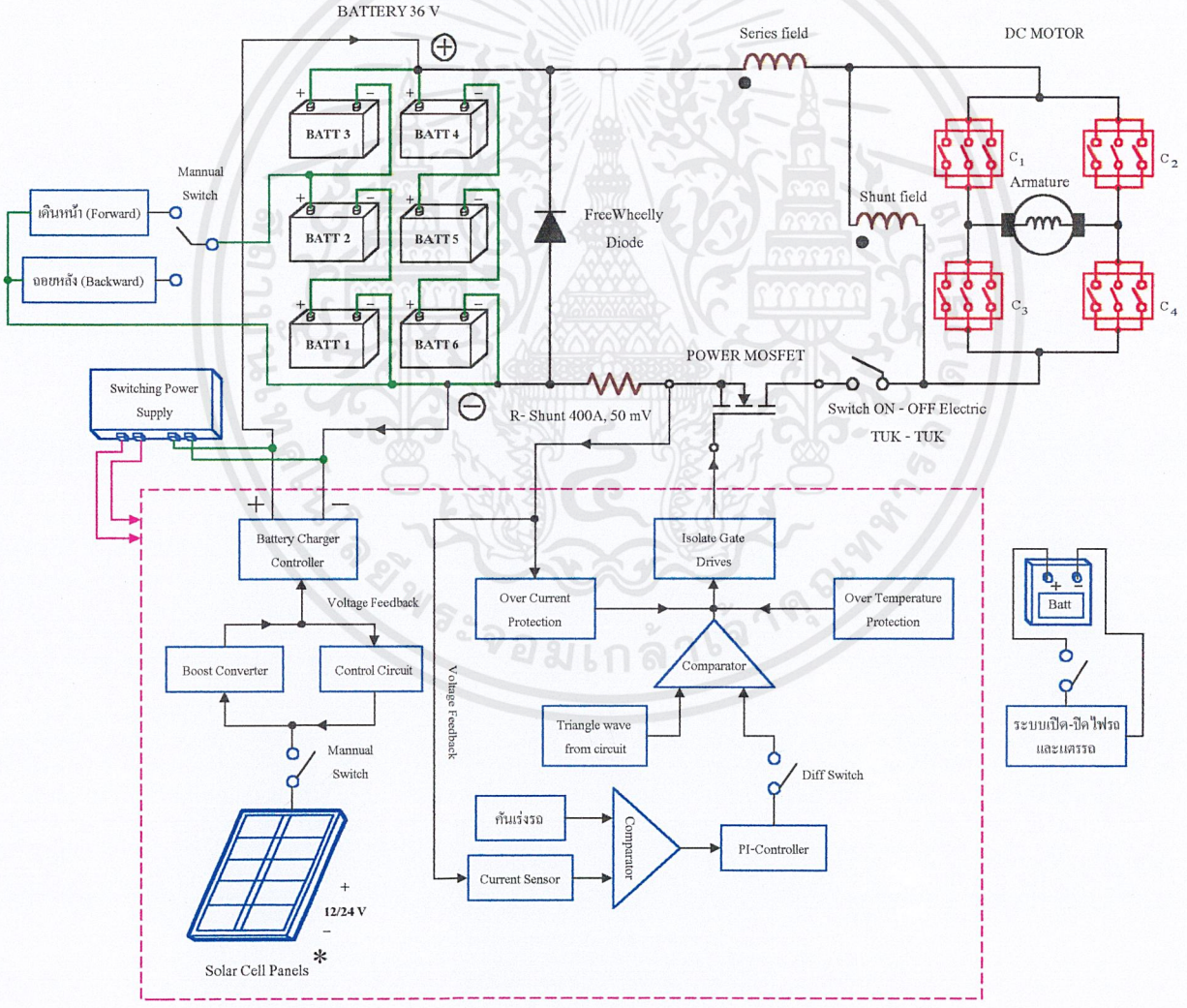
โดยที่เครื่องหมาย $\int_0^t$ แสดงการอินทิเกรต และ dt คือช่วงเวลาในการอินทิเกรต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
วงจรทั้งหมดที่ใช้ในโครงงาน

ส่วนประกอบโดยรวม

ในบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงการออกแบบส่วนประกอบต่างๆที่ใช้ในการขับเคลื่อนรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้า รวมทั้งการควบคุมการอัดประจุให้กับแบตเตอรี่โดยแบ่งส่วนประกอบของวงจรออกได้เป็น 2 ส่วนใหญ่ๆ คือ ส่วนของวงจรควบคุม และส่วนของวงจรกำลัง รายละเอียดแสดงได้ดังรูป



* หมายเหตุ : เนื่องจากในโครงงานนี้ยังไม่ได้รับแผงเซลล์แสงอาทิตย์จากบริษัทมาทำการติดตั้ง จึงได้ทำการออกแบบเฉพาะวงจรการอัดประจุแบตเตอรี่รอไว้เพียงเท่านั้น

รูปที่ 4.1 วงจรรวมทั้งหมดที่ใช้ในการขับเคลื่อนรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.1 เป็นส่วนประกอบ และวงจรต่างๆ ทั้งหมดของโครงงานนี้ ซึ่งประกอบไปด้วยส่วนที่สำคัญๆ ดังต่อไปนี้

1. วงจรกำเนิดสัญญาณพีดับบลิวเอ็ม (PWM Generator)
2. วงจรขับนำเกต และแยกกราวด์ (Isolate Gate Drive)
3. วงจรตรวจจับกระแส (Current Sensor)
4. วงจรควบคุมป้อนกลับแบบพีไอ (Proportional Plus Integral Controller)
5. วงจรป้องกันกระแสเกิน (Over Current Protection)
6. วงจรป้องกันอุณหภูมิเกิน (Over Temperature Protection)
7. วงจรยกระดับแรงดัน (Boost Converter)
8. วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบสวิตซ์ชิ่ง (Switching Power Supply)
9. ชุดการขนานมอสเฟท
10. ระบบเดินหน้า และถอยหลังรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้า

4.1 ส่วนของวงจรควบคุม

4.1.1 วงจรกำเนิดสัญญาณพีดับบลิวเอ็ม (PWM Generator)

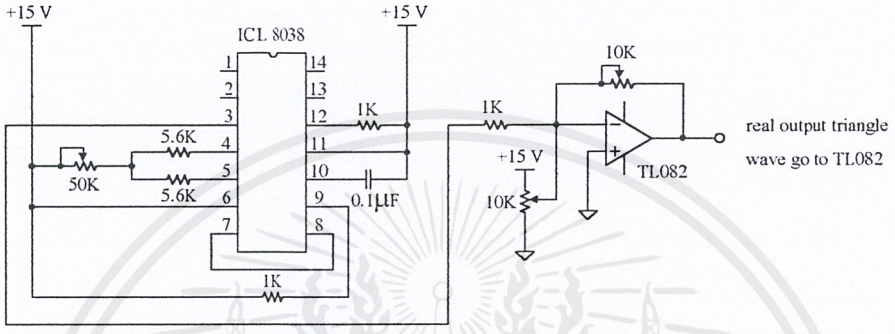
ในการควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงนั้น จะอาศัยการควบคุมระดับสัญญาณพัลส์ที่จ่ายให้กับมอเตอร์ด้วยการปรับ Duty cycle ของพัลส์ โดยการที่จะสร้างสัญญาณพีดับบลิวเอ็มได้นั้น จะต้องมีสัญญาณพาหะ (carrier signal) ในที่นี้คือสัญญาณสามเหลี่ยม และสัญญาณอ้างอิง (reference signal) ในที่นี้ก็คือแรงดันดีซีที่ได้จากคันเร่ง ซึ่งการกำเนิดสัญญาณพีดับบลิวเอ็มแบ่งออกเป็นส่วนย่อยๆ คือ วงจรสร้างสัญญาณสามเหลี่ยม และวงจรเปรียบเทียบสัญญาณอ้างอิงกับสัญญาณสามเลี่ยม

1.) วงจรสร้างสัญญาณสามเหลี่ยม (Triangle wave form circuit)

ในส่วนของวงจรสร้างสัญญาณสามเหลี่ยมจะเป็นตัวควบคุมความถี่ของการสวิตช์ชิ่งของวงจรกำเนิดสัญญาณพีดับบลิวเอ็ม สำหรับโครงงานนี้ได้เลือกความถี่ในการสวิตช์ชิ่งที่เหมาะสม คือ 2.7 KHz โดยที่ใช้ความถี่ในการสวิตช์ชิ่งคงที่ที่ 2.7 KHz เนื่องจากที่ความถี่เท่านี้ เป็นจุดที่เหมาะสมในการขับเคลื่อนมอเตอร์ในครั้งนี้ ถ้าหากใช้ความถี่ในการสวิตช์ชิ่งสูงเกินว่านี้ จะทำให้เกิดกำลังสูญเสียจากการสวิตช์ชิ่งสูง จนทำให้อุปกรณ์สวิตช์ชิ่งเสียหายได้ และถ้าเลือกความถี่ต่ำเกินไปก็จะทำให้มอเตอร์ร้อน เกิดเสียงคราง มอเตอร์หมุนไม่เรียบเพราะริปเปิลมีมาก ดังนั้นจึงควร

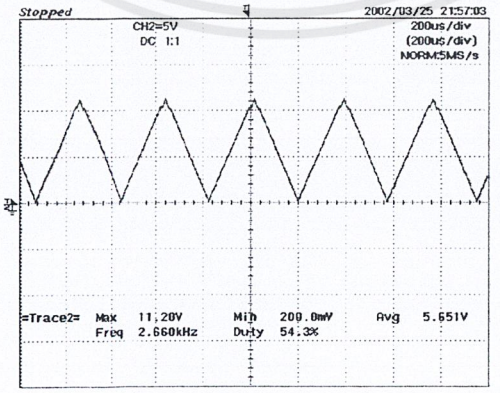
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เลือกความถี่ในการสวิตช์ชิ่งที่เหมาะสม ประกอบกับมอเตอร์ที่ใช้ในโครงงานนี้ เป็นมอเตอร์ที่กระแสสูงมาก เวลาที่ทำการควบคุมความเร็ว โดยการใช้ความถี่ในการสวิตช์สูงๆ ย่อมเกิดปัญหามากกว่ามอเตอร์ที่ใช้กระแสต่ำๆ ในส่วนของวงจรสร้างสัญญาณสามเหลี่ยมจะใช้ไอซีสำเร็จรูปเบอร์ ICL8038 รายละเอียดเพิ่มเติมต่างๆ ของไอซี ICL8038 สามารถดูได้จากดาต้าชีตในภาคผนวก



รูปที่ 4.2 รายละเอียดวงจรสร้างสัญญาณสามเหลี่ยม

จากรูปที่ 4.2 สัญญาณสามเหลี่ยมที่ได้จากไอซี ICL8038 ที่ขา 3 นั้นจะมีค่าประมาณ 3 V ดังนั้นจึงต่อวงจรขยายโดยใช้ไอซี TL082 ทำให้ได้สัญญาณสามเหลี่ยมทางด้านเอาท์พุทมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ซึ่งมีแอมปลิจูดของสัญญาณเท่ากับ 12 V และความถี่ 2.7 KHz วงจรนี้สามารถปรับความถี่ของรูปคลื่นได้จากการปรับ VR 50k ซึ่งจากวงจร สามารถปรับความถี่ได้ในช่วง 1 KHz ถึง 6 KHz โดย R 5.6K ทั้งสองตัวจะเป็นตัวปรับสโลป (Slop) ขาขึ้น และขาลงของรูปคลื่นสัญญาณสามเหลี่ยม ซึ่งถ้าค่า R ทั้งสองตัวนี้มีค่าเท่ากันจะทำให้สโลปทั้งขาขึ้น และขาลงมีค่าเท่ากัน นอกจากนี้ยังสามารถปรับแอมปลิจูดได้จากการปรับ VR 10k

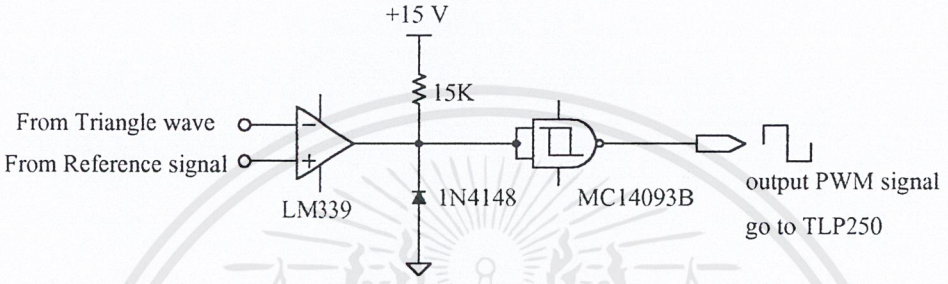


รูปที่ 4.3 ผลของรูปคลื่นสัญญาณสามเหลี่ยมที่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

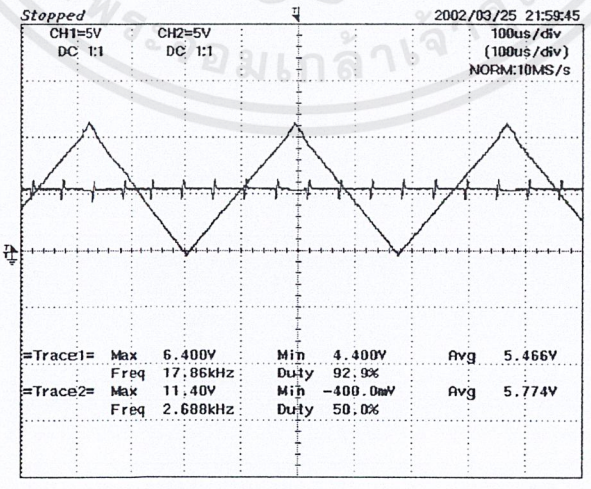
2.) วงจรเปรียบเทียบสัญญาณอ้างอิงกับสัญญาณสามเหลี่ยม

ในส่วนนี้จะเป็นการนำเอาสัญญาณสามเหลี่ยมที่ได้จากไอซี ICL8038 มาเปรียบเทียบกับสัญญาณอ้างอิงที่ได้จากการปรับแรงดันดีซี หรือแรงดันอ้างอิงจากตัวต้านทานปรับค่าได้ (คันเร่ง) ซึ่งวงจรเปรียบเทียบสัญญาณจะใช้ไอซี LM339 แสดงได้ดังรูปที่ 4.4



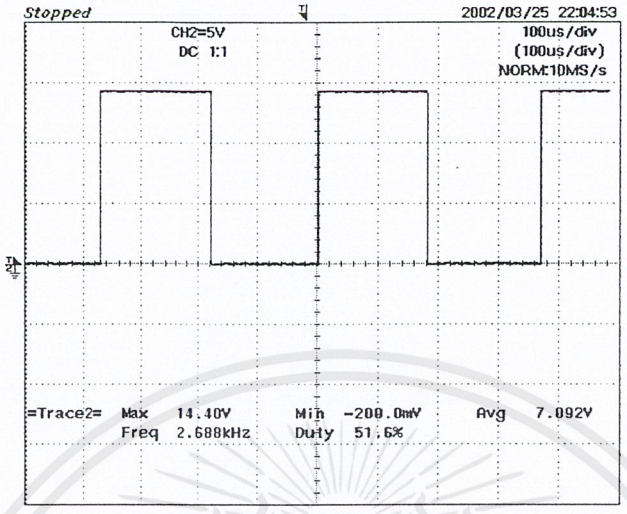
รูปที่ 4.4 วงจรเปรียบเทียบสัญญาณอ้างอิงกับสัญญาณสามเหลี่ยม

จากรูปที่ 4.4 จะสังเกตเห็นได้ว่านอกจากไอซี LM339 ที่ทำหน้าที่เป็นตัวเปรียบเทียบสัญญาณแล้ว ยังจะมีไอซี MC14093B อีกตัวหนึ่ง ซึ่งเป็นไอซี NAND gate โดยมันจะทำหน้าที่กลับเฟสสัญญาณที่ออกมาจากขา 2 ของไอซี LM339 ซึ่งเป็นขาเอาท์พุท เพื่อที่จะทำให้ได้สัญญาณพีดับบลิวเอ็มที่เรียบ และสวยงามขึ้นทางด้านเอาท์พุทของวงจร เพราะไอซี NAND gate ตัวนี้จะให้ลอจิกเป็น 0 กับ 1 เท่านั้น



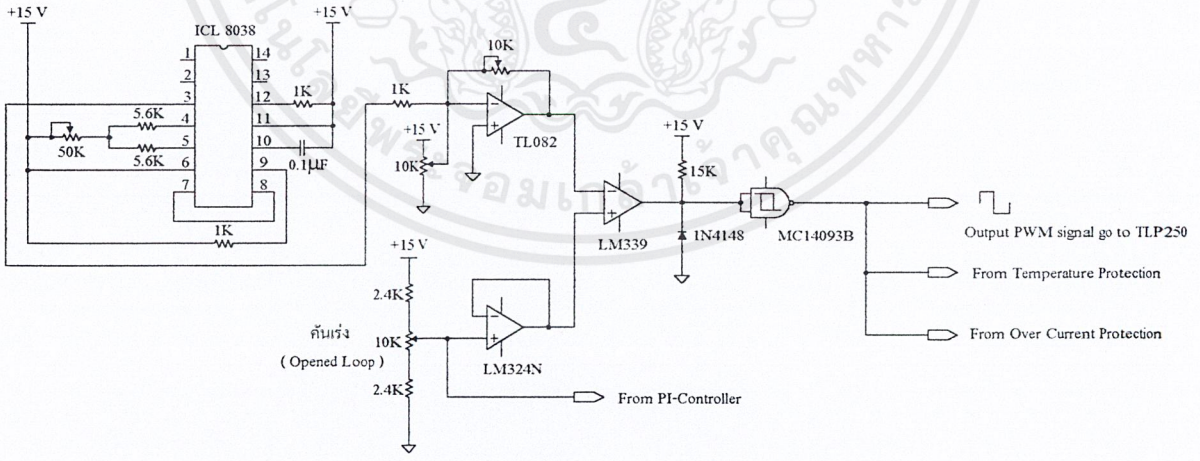
รูปที่ 4.5 รูปคลื่นการเปรียบเทียบสัญญาณอ้างอิงกับสัญญาณสามเหลี่ยม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 ผลของรูปคลื่นสัญญาณพีดับบลิวเอ็มที่ได้

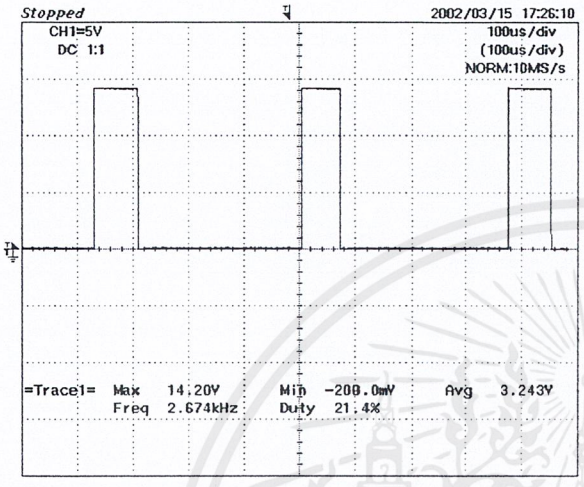
วงจรกำเนิดสัญญาณพีดับบลิวเอ็มที่ใช้ในโครงงาน



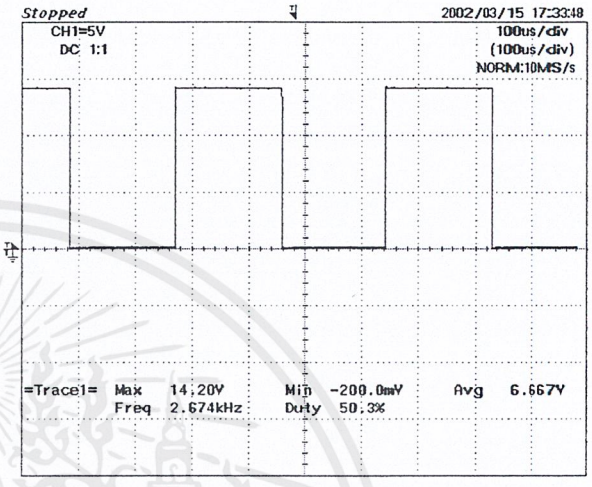
รูปที่ 4.7 วงจรกำเนิดสัญญาณพีดับบลิวเอ็ม (PWM Generator)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

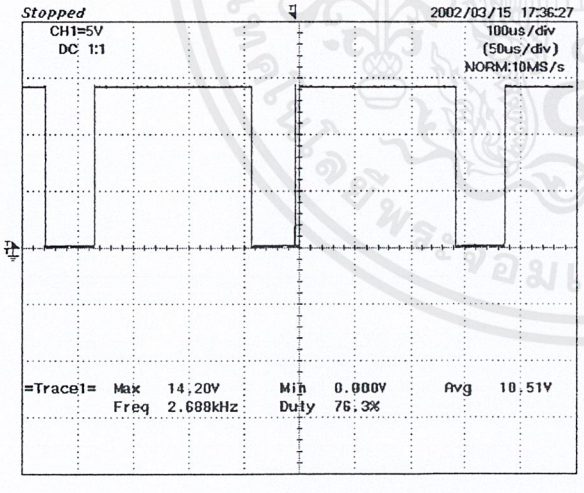
ผลการทดลองที่ได้จากวงจรกำเนิดสัญญาณพีดับบลิวเอ็ม



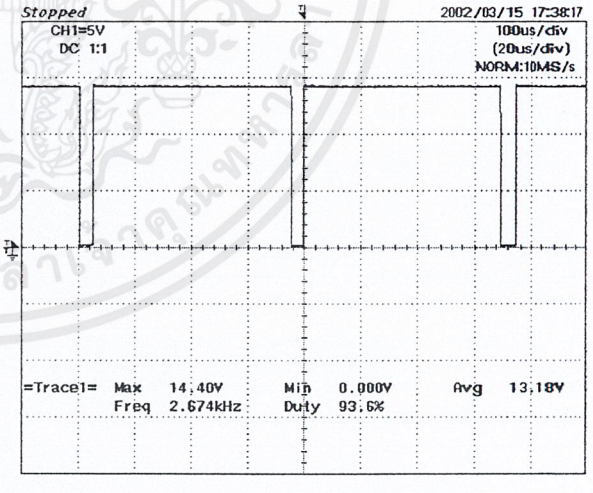
(ก.) duty cycle ประมาณ 20%



(ข.) duty cycle ประมาณ 50%



(ค.) duty cycle ประมาณ 75%

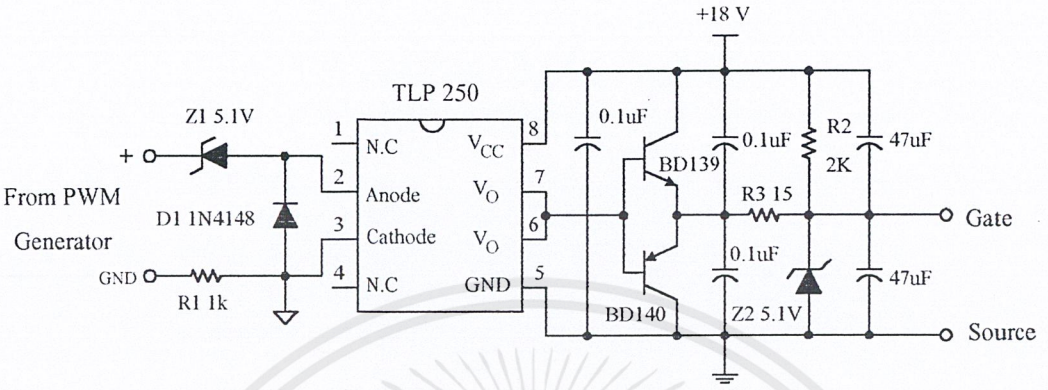


(ง.) duty cycle ประมาณ 94%

รูปที่ 4.8 รูปคลื่นสัญญาณที่วัดได้จากวงจรกำเนิดสัญญาณพีดับบลิวเอ็ม ที่ duty cycle ขนาดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 วงจรขับนำเกต และแยกกราวด์ (Isolate Gate Drive)



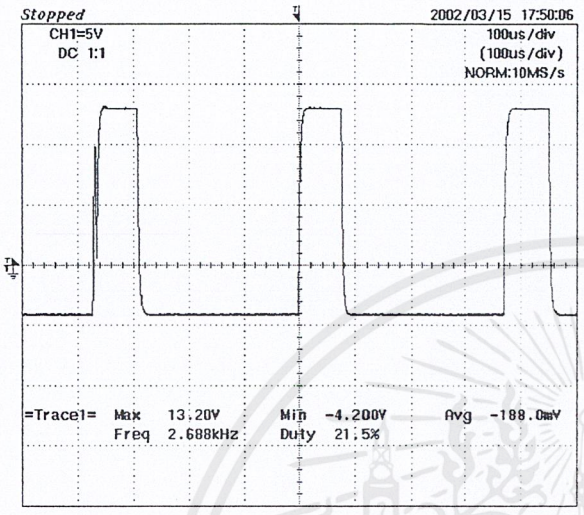
รูปที่ 4.9 วงจรขับนำเกต และแยกกราวด์ที่ใช้ในโครงงาน

หลักการทำงานของวงจร

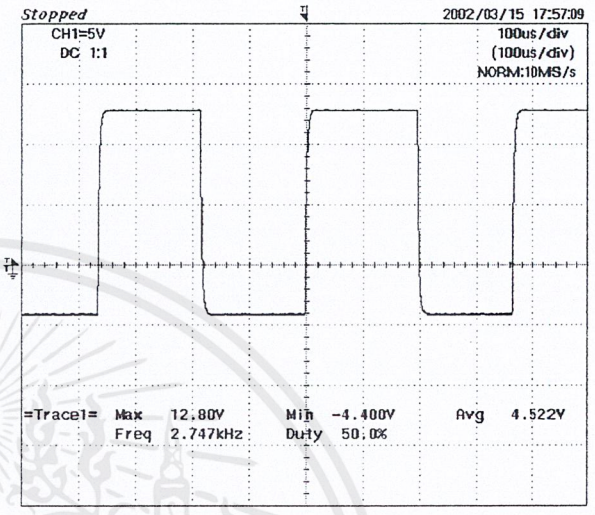
เมื่อสัญญาณพีดีบบลิวเอ็มที่ได้จากวงจรกำเนิดสัญญาณพีดับบลิวเอ็ม ถูกส่งผ่านมาทาง Z1 ทำให้ ไอซี TLP 250 ทำงาน และสัญญาณเอาท์พุทที่ได้จากไอซี TLP 250 นั้นจะได้ตามคุณสมบัติของไอซี TLP 250 คือ ไอซี TLP 250 ต้องการไฟเลี้ยง +20 โวลต์ที่ขา 8 สัญญาณเอาท์พุทที่ได้ออกมาที่ขา 6 และขา 7 ของไอซี เมื่อเทียบกับกราวด์ที่ ขา 5 สัญญาณที่ได้ออกมาจะเป็นพัลส์ที่มีระดับสัญญาณอยู่ที่ 20 โวลท์ ตามแหล่งจ่ายไฟตรงที่ป้อนให้กับ TLP 250 แต่เนื่องจากในโครงงานนี้มีการขนานมอสเฟทถึง 28 ตัว ซึ่งทำให้กระแสที่ ไอซี TLP 250 สร้างออกมาได้ ไม่สามารถที่จะจ่ายกระแสได้เพียงพอต่อความต้องการของมอสเฟท จึงจำเป็นต้องใช้ทรานซิสเตอร์ เบอร์ BD 139 และ BD 140 ทำการต่อแบบคอมพลีเมนทารี่ (Complemantary) เพื่อช่วยจ่ายกระแสในการทริกขา เกตของมอสเฟทให้เพียงพอทั้ง 28 ตัว แต่เมื่อวัดทำการระดับสัญญาณที่ได้ที่ขาเกต และขาซอร์ทของมอสเฟท จะได้ระดับสัญญาณที่ 13 โวลท์ โดยระดับของสัญญาณที่ออกมานี้จะถูกควบคุมโดย Z2 ซึ่งระดับของสัญญาณที่ได้จะมีความเหมาะสมกับความต้องการของมอสเฟทที่จะสามารถทำงานเป็นอุปกรณ์สวิตช์ชิ่งได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

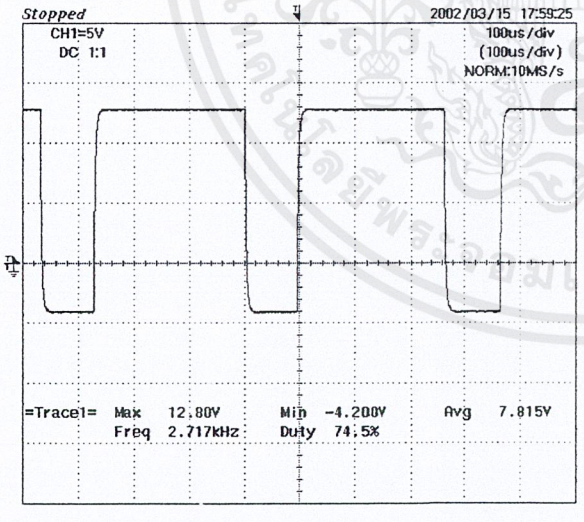
ผลการทดลองที่ได้จากวงจรขับเกต และแยกกราวด์ เมื่อวัดที่ขาเกตกับขาซอร์ท ของมอสเฟท



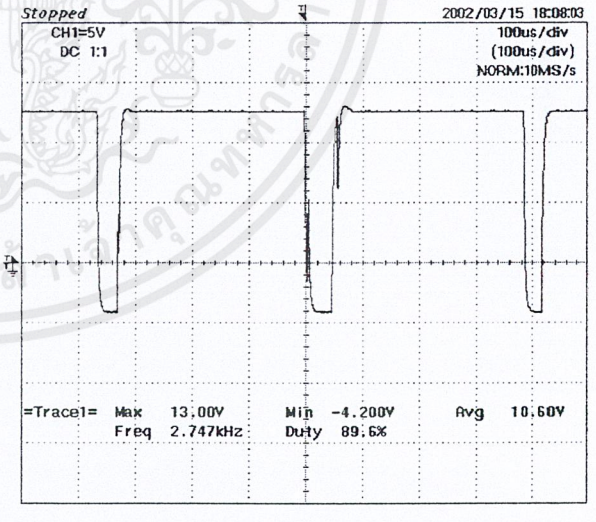
(ก.) duty cycle ประมาณ 20%



(ข.) duty cycle ประมาณ 50%



(ค.) duty cycle ประมาณ 75%

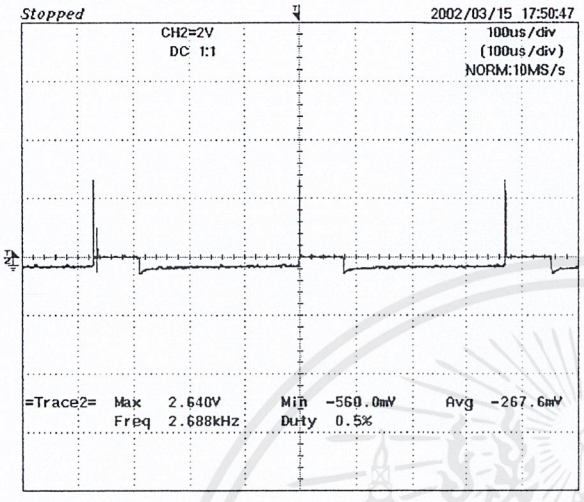


(ง.) duty cycle ประมาณ 94%

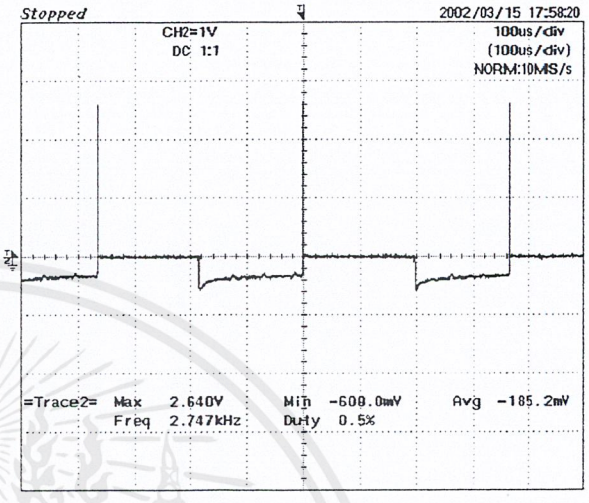
รูปที่ 4.10 รูปคลื่นสัญญาณที่วัดได้จากวงจรขับนำเกต และแยกกราวด์ ที่ duty cycle ขนาดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

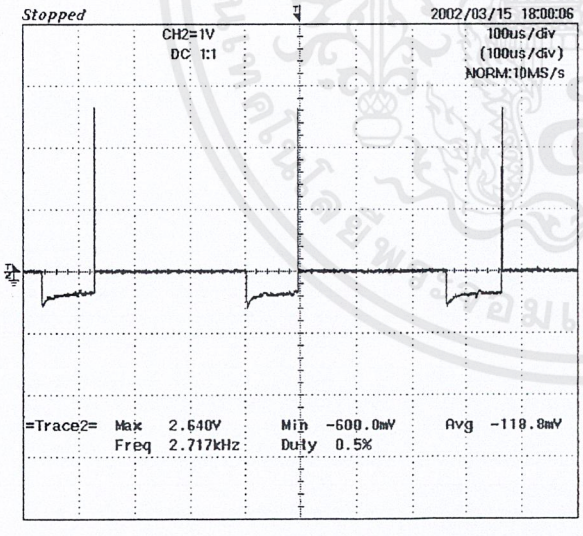
ผลการทดลองที่ได้จากวงจรขับเกต และแยกกราวด์ เมื่อวัดที่ขาเดรนกับขาซอร์ท ของมอสเฟท



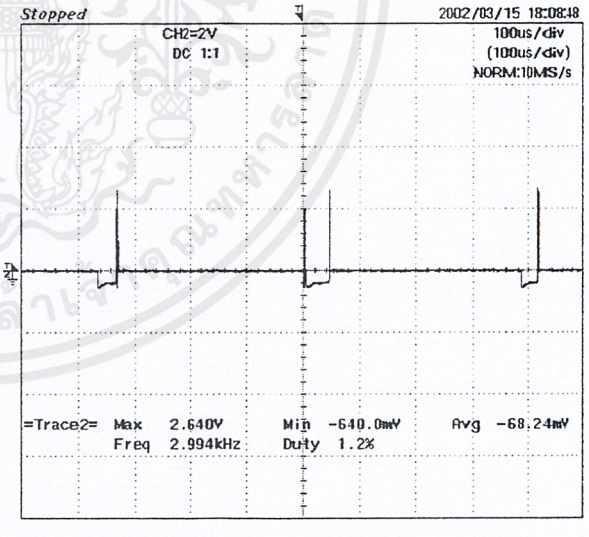
(ก.) duty cycle ประมาณ 20%



(ข.) duty cycle ประมาณ 50%



(ค.) duty cycle ประมาณ 75%

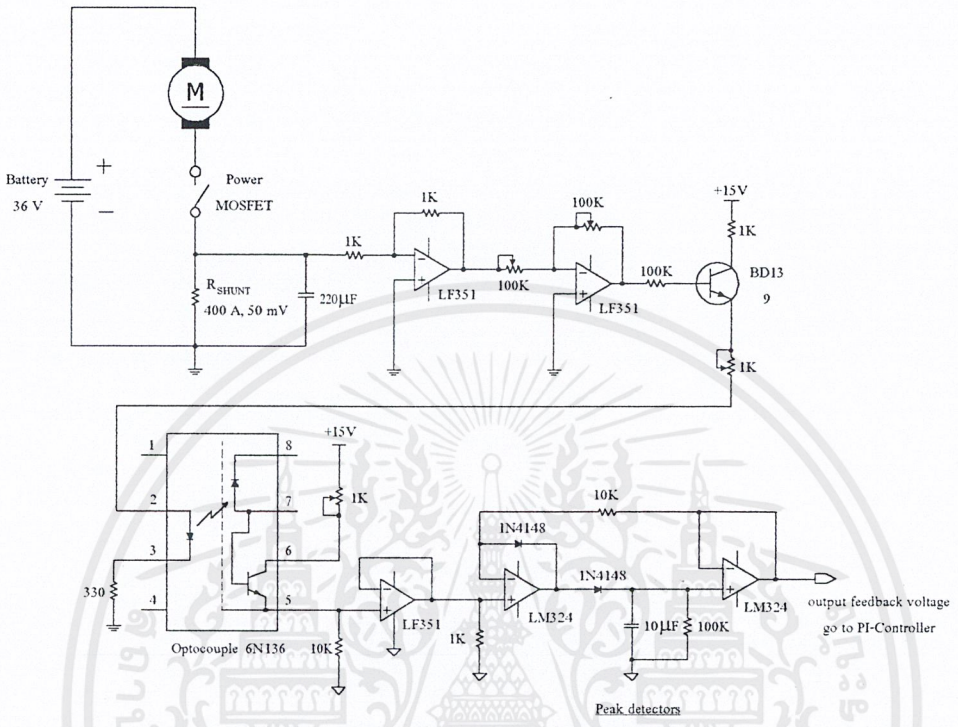


(ง.) duty cycle ประมาณ 94%

รูปที่ 4.11 รูปคลื่นสัญญาณที่วัดได้จากวงจรขับนำเกต และแยกกราวด์
โดยวัดที่ขาเดรน และขาซอร์สที่ duty cycle ขนาดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3 วงจรตรวจจับกระแส (Current Sensor)



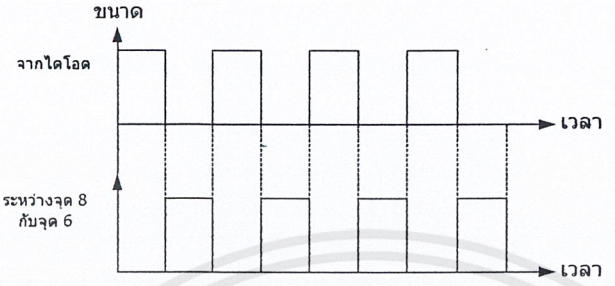
รูปที่ 4.12 วงจรตรวจจับกระแสที่ใช้ในโครงงาน

เมื่อต้องการควบคุมแรงบิดไม่ให้เปลี่ยนแปลงไปมา จึงต้องมีการฟีดแบ็คแรงบิดในรูปของกระแส เพราะแรงบิดแปรผันตรงกับกระแสโดยการใช้อุปกรณ์ตรวจจับกระแสต่ออนุกรมกับมอสเฟทแล้วมีการแปลงกระแสให้อยู่ในรูปแรงดันก่อน จากรูปที่ 4.12 จะเห็นได้ว่าวงจรในส่วนนี้จะใช้ออปแอมป์เป็นหลักในการทำงาน สัญญาณเอาท์พุทที่ได้จะถูกส่งไปยังวงจรควบคุมป้อนกลับแบบพีไอ เพื่อทำการควบคุมกระแสที่ไหลเข้ามอเตอร์ไม่ให้เกินพิกัดกำลัง โดยมีความต้านทานขนาน (R-Shunt) เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ตรวจจับกระแสที่เปลี่ยนแปลงไปจากค่าที่ตั้งไว้ตอนเริ่มต้น โดยจะเปลี่ยนกระแสเป็นแรงดันเพื่อนำเข้าสู่วงจรควบคุมป้อนกลับแบบพีไอซึ่งจะรักษาขนาดกระแสให้คงที่ ในส่วนนี้จะขอกล่าวในหัวข้อถัดไป

ส่วนความต้านทาน R-Shunt ที่ใช้ในโครงงานมีขนาด 400 แอมป์ 50 มิลลิโวลท์ เมื่อมีกระแสไหลมากก็จะมีแรงดันตกคร่อม R-Shunt มาก โดยจะตั้งค่ากระแสที่ต้องการตรวจจับไว้ที่ 200 แอมป์ ทำให้มีแรงดันตกคร่อม 25 มิลลิโวลท์ แล้วกลับเฟสสัญญาณ 180 องศา ในออปแอมป์ตัวที่ 1 ส่วนตัวที่ 2 จะขยายสัญญาณพร้อมกลับเฟสอีกครั้งหนึ่งเพื่อที่จะทำให้ทรานซิสเตอร์ได้รับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

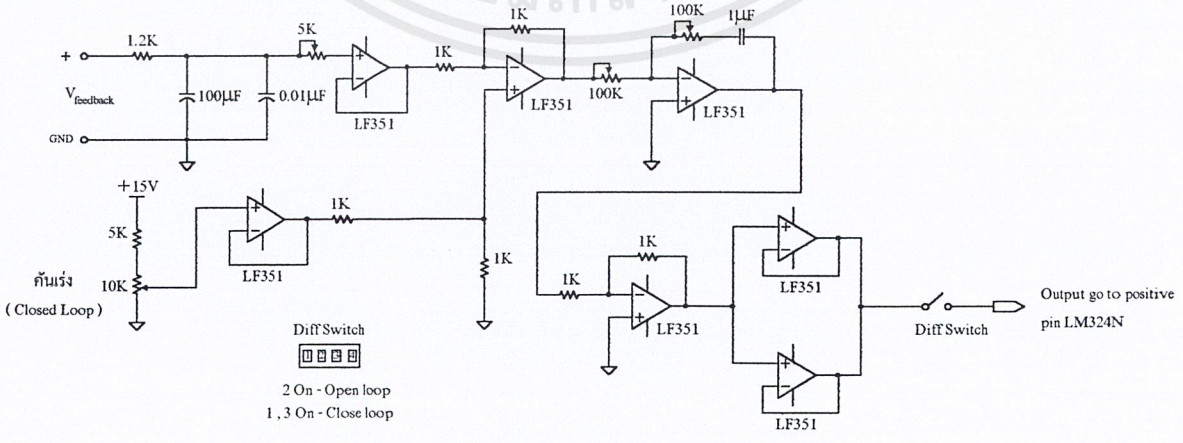
การไบอัส หลังจากนั้นที่ VR 1K จะเป็นตัวปรับขนาดกระแสเพื่อให้เพียงพอกับความต้องการของไอซีออปโต้คัปเปิ้ลสามารถอธิบายการทำงานของออปโต้คัปเปิ้ลได้จากรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 สัญญาณที่ขา 8 กับขา 6 ของออปโต้

จากรูปที่ 4.13 ขา 8 กับขา 6 ของออปโต้จะกลับเฟสกับสัญญาณที่ส่งมาจากไดโอด จากนั้นสัญญาณจะผ่าน LF351 จะทำการเฟสอีกครั้งหนึ่งให้เกิดเป็นพัลส์บวกด้านเดียว เพราะขา 4 ของ LF351 ถูกต่อลงกราวด์ไว้แล้วถูกส่งต่อไปยังส่วนของวงจรตรวจจับแรงดันยอดคลื่น (Peak detector) โดยวงจรนี้จะติดตามแรงดันยอดของอินพุท ทำหน้าที่คล้ายวงจรกรองกระแส แต่มีค่าแรงดันตรงเป็นค่ายอดของแรงดันไฟสลับ โดยจะทำการเก็บแรงดันสูงสุดที่เกิดขึ้น หรือแรงดันยอดไว้ในตัวเก็บประจุ ถ้ามีแรงดันยอดสูงกว่าค่าที่เก็บค่าใหม่ รายละเอียดสามารถดูได้จากเอกสารอ้างอิง

4.1.4 วงจรควบคุมป้อนกลับแบบพีไอ (Proportional Plus Integral Controller)



รูปที่ 4.14 วงจรควบคุมป้อนกลับแบบพีไอที่ใช้ในโครงงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับวงจรควบคุมป้อนกลับแบบพีไอนี้ จะใช้เพื่อรักษาระดับกระแสของมอเตอร์ที่จะใช้ในการขับโหลดภาระ เพื่อเป็นการป้องกันไม่ให้มอเตอร์ได้รับความเสียหายจากการจ่ายโหลดที่เกินพิกัดกำลัง เพราะจะทำให้มีกระแสป้อนเข้ามอเตอร์สูงกว่าที่พิกัด ดังนั้นในโครงงานนี้จึงได้เลือกที่จะรักษาระดับกระแสให้คงที่ที่ 200 แอมป์ เนื่องจากเป็นกระแสที่พิกัดของมอเตอร์โดยจะต้องมีการตอบสนองอย่างทันที เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของโหลด และจากรูปที่ 4.14 ในส่วนของการตั้งอัตราขยาย (Gain) จะปรับที่ VR 100K ทั้งสองตัว สำหรับสาเหตุที่ต้องใช้ความต้านทานชนิดปรับค่าได้ก็เพราะว่าไม่สามารถที่เขียนทรานเฟอร์ฟังก์ชั่นของทั้งระบบได้ จึงต้องอาศัยการปรับค่าความต้านทานในการปรับหาจุดทำงานที่เหมาะสมของระบบ นอกจากนี้สัญญาณ $V_{feedback}$ และ V_{ref} ก่อนที่จะนำมาเปรียบเทียบกันควรผ่านส่วนของ RC- filter ก่อน หลังจากนั้นจึงเข้าไปในส่วนของออปแอมป์ LF351 ที่ทำหน้าที่เป็นวงจรขยายผลต่าง (Diff Amp) ซึ่งจะเป็นตัวเปรียบเทียบสัญญาณ V_{ref} กับสัญญาณ $V_{feedback}$ ที่ได้จากเอาพ์พุทของวงจรตรวจจับกระแส โดยวงจรพีไอคอนโทรลจะสามารถปรับเปลี่ยนการตอบสนองให้ช้า หรือเร็ว ได้จากการปรับค่า R และ C

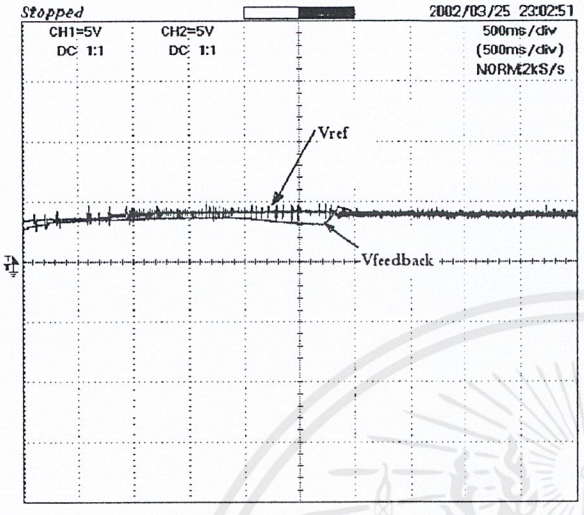
หลักการทำงานของวงจร

เมื่อทำการปรับค่า K_p และ K_i ของวงจรควบคุมแบบพีไอ (PI-Controller) ได้อย่างเหมาะสมแล้ว การทำงานของวงจรควบคุมแบบพีไอ (PI-Controller) ก็คือ ถ้าทำการปรับค่ากระแสอ้างอิง (I_{ref}) ที่ความต้านทานปรับค่าได้ (คันเร่ง) ไว้ที่ค่าๆหนึ่ง เมื่อทำการขับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจะเกิดค่ากระแสจริง (I_{actual}) กลับมาในรูปของแรงดันโดยใช้วงจรตรวจจับกระแส (Current sensor) ซึ่งได้อธิบายไปก่อนหน้านี้แล้ว โดยจะเรียกแรงดันในส่วนนี้ว่า $V_{feedback}$ ส่งไปเข้าวงจรควบคุมแบบพีไอ (PI-controller) เพื่อที่จะทำการรักษาระดับกระแสที่จ่ายให้กับมอเตอร์ให้คงที่ และต้องตอบสนองให้ทันต่อการเปลี่ยนแปลงของโหลด ถ้าหากโหลดมีการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใด โดยการนำ $V_{feedback}$ มาทำการเปรียบเทียบกับ V_{ref} ที่ตั้งไว้ที่คันเร่ง หากแรงดันทั้งสองมีค่าไม่เท่ากัน วงจรควบคุมป้อนกลับแบบพีไอคอนโทรล ก็จะทำการสร้างสัญญาณไปตัดกับสัญญาณรูปฟันเลื่อย (Saw tooth) เพื่อทำการปรับเปลี่ยนค่าดิวตี้ไซเคิ้ล (Duty cycle) ที่จะทำให้ได้ค่า $V_{feedback}$ เท่ากันกับ V_{ref} โดยจะมีการส่งค่า $V_{feedback}$ มาเปรียบกับ V_{ref} อยู่ตลอดเวลา ซึ่งจะทำให้ค่ากระแสจริง (I_{actual}) มีค่าคงที่ และค่าของแรงบิดที่ใช้ในการขับโหลดภาระก็จะคงที่ด้วย

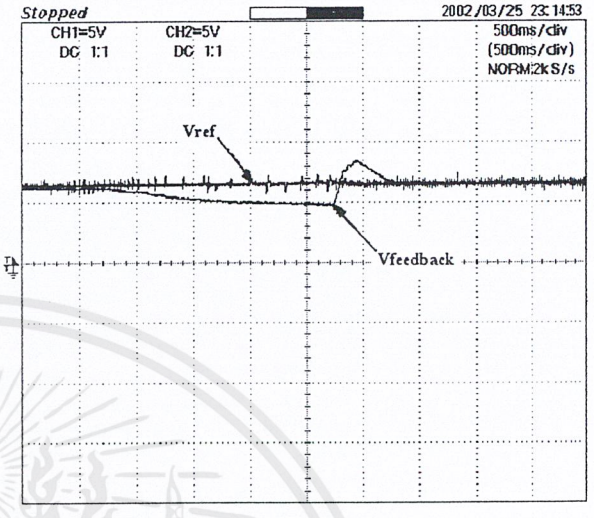
ซึ่งผลการทดลองของวงจรสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.15 ซึ่งจะเป็นการทดลองเพื่อหาผลการตอบสนองของวงจรควบคุมป้อนกลับแบบพีไอต่อระบบการขับเคลื่อนของรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้าเพื่อที่จะสามารถวิ่งใช้งานได้จริงบนท้องถนน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

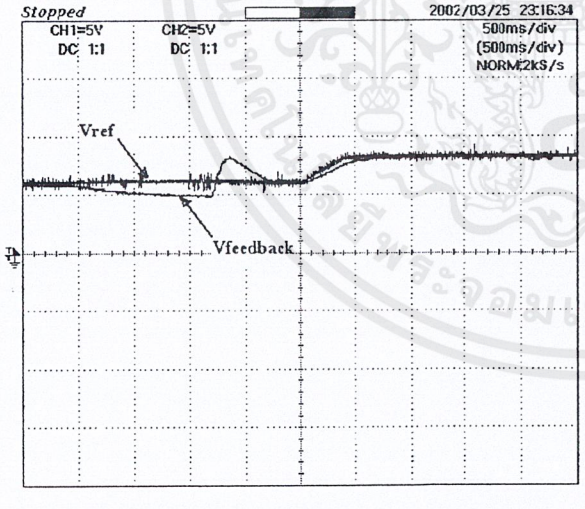
ผลการทดลองที่ได้จากวงจรควบคุมป้อนกลับแบบพีไอ ขณะทำการขับโหลดมอเตอร์



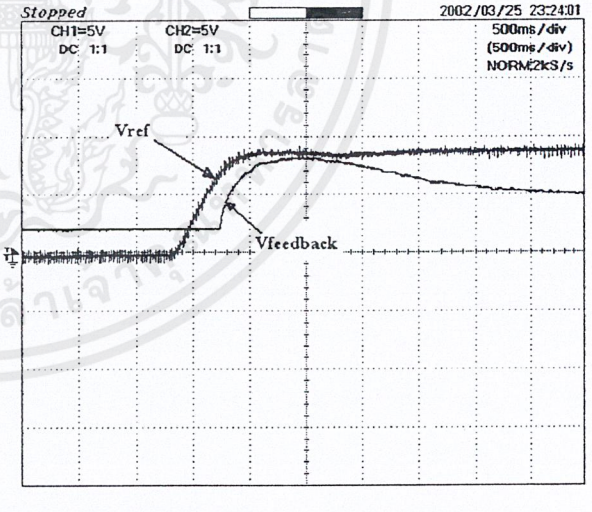
(ก.) รถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้าได้รับโหลดขณะวิ่งด้วยความเร็วต่ำ



(ข) รถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้าได้รับโหลดขณะวิ่งด้วยความเร็วสูง



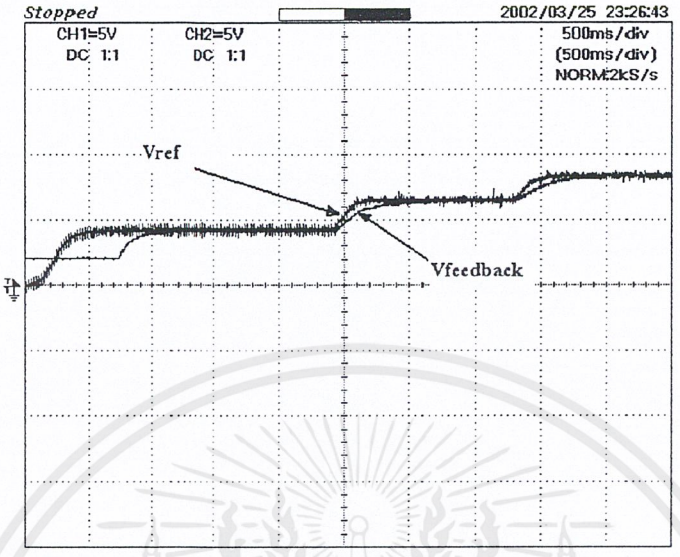
(ค.) เมื่อรถได้รับโหลด ขณะวิ่งด้วยความเร็วคงที่และขณะเพิ่มความเร็ว



(ง.) เมื่อขับรถด้วยการบิดคันเร่งอย่างทันทีทันใด

รูปที่ 4.15 รูปคลื่นสัญญาณ V_{ref} และ $V_{feedback}$ ของวงจรควบคุมป้อนกลับแบบพีไอขณะทำการขับโหลดของมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 รูปคลื่นสัญญาณ V_{ref} และ $V_{feedback}$ เมื่อขับรถโดยการเพิ่มความเร็วเป็น 3 ระดับต่อเนื่องกัน

จากรูปที่ 4.15 (ก.) จะสังเกตเห็นได้ว่าขณะที่รถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้าวิ่งด้วยความเร็วคงที่ ซึ่งเป็นความเร็วในระดับต่ำๆ กระแสที่ป้อนเข้ามอเตอร์จะเริ่มตกลงมาตามคุณลักษณะของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง คือเมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้น แรงบิดที่ใช้ในการขับโหลดภาระจะมีค่าลดลง เพราะกระแสจะแปรผันตรงกับแรงบิด และเมื่อรถได้รับโหลด ก็จะทำให้กระแสที่ป้อนเข้ามอเตอร์ หรือกระแสจริง (I_{actual}) เพิ่มสูงขึ้น และแรงบิดก็จะสูงขึ้นตาม เนื่องจาก $V_{feedback}$ พยายามจะเพิ่มแรงดันเพื่อที่จะให้ระดับสัญญาณเท่ากันกับ V_{ref} ซึ่งทำให้ I_{actual} เพิ่มขึ้นตามไปด้วย จนกระทั่งสัญญาณ $V_{feedback}$ ขึ้นกันไปกับ V_{ref} ก็จะทำได้ค่าของ I_{actual} เท่ากันกับ I_{ref} เช่นกัน ส่งผลให้ I_{actual} หรือกระแสป้อนเข้ามอเตอร์คงที่ ดังนั้นแรงบิดที่ใช้ในการขับโหลดภาระที่ค่าความเร็วนั้นๆ ก็จะคงที่ด้วย สำหรับรูปที่ 4.15 (ข.) ก็สามารถจะอธิบายได้ในลักษณะเดียวกันกับรูปที่ 4.15 (ก.) แต่จะแตกต่างกันตรงที่ I_{ref} ที่เปลี่ยนไปตาม V_{ref} จะมีค่าสูงกว่ารูป 4.15 (ก.) ซึ่งความเร็วของรถก็จะสูงขึ้น และช่วงของการเกิด Over shoot จะมีค่ามาก หรือน้อยขึ้นอยู่กับการตั้ง Gain ของวงจรพีไอคอนโทรล ยิ่ง Over shoot สูงมากเท่าไหร่ เวลาในการเข้าสู่สภาวะคงที่ (Steady state) ก็จะนานขึ้นเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.15 (ค.) จะเห็นได้ว่าเมื่อขับรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้าด้วยความเร็วคงที่ กระแสที่ป้อนเข้ามอเตอร์จะเริ่มตกลง แต่พอได้รับโหลดเพิ่มขึ้น I_{actual} ที่ตรวจจับได้จะถูกส่งมาในรูปของ $V_{feedback}$ เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับสัญญาณ V_{ref} ถ้ามีค่าไม่เท่ากันแสดงว่าเกิด Error ขึ้น $V_{feedback}$ ก็จะทำการเพิ่มแรงดันให้เท่ากับ V_{ref} ส่งผลให้ I_{actual} เพิ่มสูงขึ้นตาม I_{ref} ไปด้วย จนกระทั่ง I_{actual} เท่ากันกับ I_{ref} แล้ว แสดงว่า $V_{feedback}$ ก็ขี่กันไปกับ V_{ref} ค่า Error จะหมดไป และแม้จะเพิ่มความเร็วของรถ ในขณะที่ยังได้รับโหลดอยู่ $V_{feedback}$ ก็ตามเกาะกับ V_{ref} เหมือนเดิม ซึ่งทำให้ I_{actual} คงที่ และแรงบิดที่ใช้ในการขับโหลดก็คงที่ และสำหรับรูปที่ 4.15 (ง.) จะเห็นได้ว่าเมื่อบิดคันเร่งเร็วสุดอย่างทันทีทันใด จะทำให้กระแส I_{actual} เพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว มันจะขึ้นไปจนถึง I_{ref} แต่จะไม่เกิน I_{ref} ที่ตั้งไว้ เพราะว่า $V_{feedback}$ จะเกาะตาม V_{ref} อย่างรวดเร็วเช่นกัน และเมื่อ I_{actual} ที่สูงขึ้น ก็จะทำให้แรงบิดตอนเริ่มออกตัวมีค่าที่สูงมากจนสามารถเอาชนะแรงเฉื่อย (moment of inertia) สำเร็จแล้ว กระแส I_{actual} ก็จะเริ่มตกลงมา ตามคุณสมบัติของมอเตอร์ดีซี

ดังนั้นจากรูปที่ 4.16 จะพบว่าเมื่อเราเริ่มบิดคันเร่งให้รถค่อยๆออกตัว $V_{feedback}$ ก็จะเกาะตาม V_{ref} และเมื่อทำการบิดคันเร่งเพื่อเพิ่มความเร็วขึ้นไปอีก จะเห็นว่า $V_{feedback}$ ก็ยังคงเกาะตาม V_{ref} ขึ้นไปอยู่ ถ้าดูจากกราฟเราทำการบิดคันเร่งเพื่อเพิ่มความเร็วของรถทั้งหมด 3 ช่วงซึ่งทั้งหมดของการเร่งความเร็วทั้ง 3 ช่วง $V_{feedback}$ จะเกาะติดกับ V_{ref} อยู่ตลอดเวลา เป็นการทำให้กระแสที่ป้อนเข้ามอเตอร์ (I_{actual}) รวมทั้งแรงบิดในการขับโหลด จะมีค่าคงที่ด้วย ณ ช่วงของการขับรถที่ค่าความเร็วนั้นๆ

4.1.5 วงจรป้องกันกระแสเกิน (Over Current Protection)

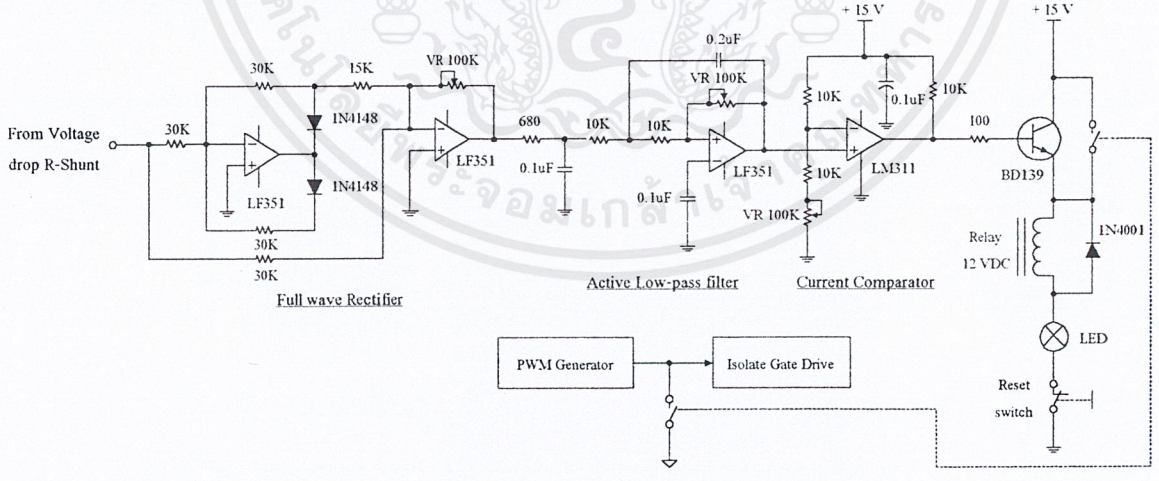
เนื่องจากในการนำมอสเฟทมาขนานกันหลายๆตัว เพื่อช่วยจ่ายกระแสนั้น สาเหตุที่ใช้มอสเฟทมาขนานกัน ก็เพื่อเหตุผลทางเศรษฐศาสตร์ เพราะว่าถ้าใช้มอสเฟทแบบโมดูล (modules) หรือ IGBT จะมีราคาที่แพงมาก ซึ่งเราจะใช้ตัวต้านทานค่าต่ำๆมาต่ออนุกรมกับมอสเฟท แล้วนำแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทานไปตรวจสอบกระแสเกิน เพราะในช่วงแรกมอสเฟทอาจจะ ON ไม่พร้อมกัน ตัวที่ ON ก่อนอาจจะเสียหายได้ ซึ่งวิธีนี้ยังมีข้อเสียอยู่บ้าง คือ ทำให้ขนาดของชุดควบคุมมีขนาดที่ใหญ่ และสูญเสียกำลังไฟฟ้าที่ตัวต้านทานโดยเปล่าประโยชน์ แต่เนื่องจากในโครงงานนี้ใช้มอเตอร์ที่มีพิกัดกระแสสูงมาก ถ้าใช้ LEM อาจจะไม่สามารถทนต่อกระแสพิกัดของมอเตอร์ได้ ถึงแม้ว่าสัญญาณที่ได้จาก LEM จะมีความผิดเพี้ยนต่ำ และสามารถใช้งานที่ความถี่สูงได้ก็ตาม

ดังนั้นวงจรป้องกันกระแสเกิน ที่ตอบสนองได้รวดเร็วเป็นสิ่งจำเป็น เนื่องจากว่าการป้องกันด้วยฟิวส์เป็นการป้องกันที่กระแสเกินเป็นเวลานานเมื่อเทียบกับกระแสกระเพื่อมที่มีขนาดใหญ่ๆ มักจะเป็นลูกคลื่นความถี่สูงๆ อุปกรณ์หลักที่ใช้ก็คือรีเลย์ และหน้าสัมผัสแม่เหล็ก (Relay

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

and Magnatic contactors) โดยที่หน้าสัมผัสจะทำการตัดวงจรตามแรงดันตามแรงดันควบคุมขดลวด (Coil voltage) การต่อวงจรป้องกันต้องทำการออกแบบวิธีที่จะดึงสัญญาณกระแสมาควบคุมหน้าสัมผัสแม่เหล็กให้ได้ โดยวิธีที่ใช้ก็คือการ sense กระแสไฟฟ้าให้ได้เป็นสัญญาณแรงดัน แล้วนำแรงดันที่ได้นั้นมาเทียบกับแรงดันเปรียบเทียบคงที่ (Constant Reference Voltage) เมื่อแรงดันที่วัดกระแสมาเกิดค่าเกิน ซึ่งหมายความว่ามีกระแสเกิน ก็จะทำให้เกิดแรงดันควบคุมขดลวดของรีเลย์และทำการตัดวงจรที่หน้าสัมผัสปกติปิด (Normally Closed Contact) ส่วนหน้าสัมผัสปกติเปิดจะทำการรักษาสภาพหน้าสัมผัสไว้ เพื่อไม่ให้เกิดการลัดวงจรอีกเมื่อตัดกระแสไปแล้ว

อุปกรณ์ที่ใช้จะประกอบไปด้วยรีเลย์สองหน้าสัมผัส (Two contact) ทรานซิสเตอร์ส่งสัญญาณควบคุมไปยังขดลวด ออปแอมป์ที่ทำหน้าที่เปรียบเทียบสัญญาณ ตัวต้านทานค่าต่ำๆที่ทนกระแสสูงๆ เพื่อทำการดึงสัญญาณ ไดโอด ความต้านทาน ตัวเก็บประจุค่าต่างๆ สำหรับการต่อวงจรสวิตช์รีเซ็ต และ LED แสดงผล นอกจากนั้นยังมีวงจรอีกส่วนหนึ่งที่จะขาดไม่ได้ เนื่องจากเราจะใช้ความต้านทานขนาน (R-Shunt) ทำหน้าที่ตรวจจับกระแสโดยนำแรงดันที่ตกคร่อม R-Shunt มาตรวจสอบซึ่งสัญญาณแรงดันที่ตกคร่อม R-Shunt ยังเป็นลูกคลื่นสัญญาณพีดับบลิวเอ็มอยู่ ดังนั้นเราจึงได้ประยุกต์ใช้วงจรฟลูเวฟเรกติไฟเออร์ (Full wave Rectifier circuit) เข้ามาใช้ เพื่อให้ค่าสัญญาณเอาท์พุทมีค่าเป็นบวกเสมอ แล้วนำสัญญาณที่ได้ไปเข้าวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านอีก เพื่อที่จะทำให้ได้แต่ส่วนของไฟดีซีจริงๆ เพียงเท่านั้น



รูปที่ 4.17 วงจรป้องกันกระแสเกินที่ใช้ในโครงงาน

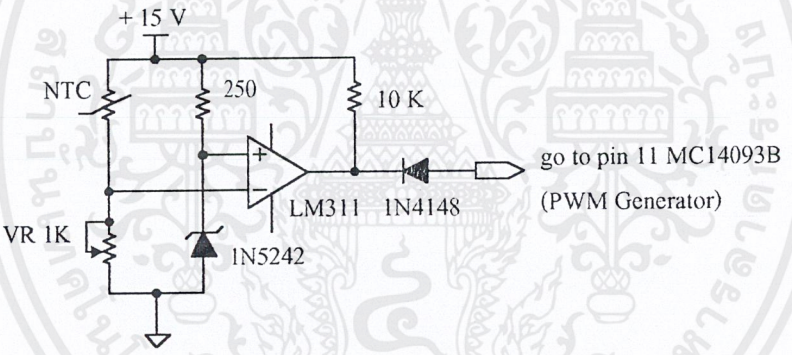
จากรูปที่ 4.17 ในช่วงที่มอสเฟทขณะ ON นั้น จะมีกระแสไหลผ่านความต้านทานขนาน (R-Shunt) ซึ่งมีค่าแรงดันค่าน้อยๆ ตกคร่อมอยู่ ดังนั้น เราจะนำแรงดันนี้ไปใช้งาน ยิ่งกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไหลผ่าน R-Shunt มาก แรงดันตกคร่อมก็ยิ่งมาก การทำงานนั้น จะพิจารณาในช่วงมีสัญญาณเกต เท่านั้น (มอสเฟต ON) เมื่อวงจรเปรียบเทียบกระแสตรวจจับได้ว่ากระแสเกิน ก็จะสั่งให้รีเลย์ทำงาน และดึงสัญญาณเอาท์พุทของวงจรกำเนิดสัญญาณพีดับบลิวเอ็ม (ขา 11 ของไอซี MC14093B) ลงกราวด์ไป ทำให้ไม่มีสัญญาณไปขับเกตของมอสเฟทได้ ทำให้มอสเฟทก็จะไม่ทำงาน ซึ่งมีลักษณะเช่นเดียวกับการป้องกันอุณหภูมิเกิน ซึ่งจะกล่าถึงในส่วนต่อไป และเพื่อที่จะให้วงจรเปรียบเทียบกระแส (Current comparator) ทำงานไม่ให้ผิดพลาด ควรต้องมีฟิลเตอร์ (filter) เล็กน้อยเพื่อกรองความถี่สูงออก

4.1.6 วงจรป้องกันอุณหภูมิเกิน (Over Temperature Protection)

วงจรนี้เป็นวงจรป้องกันพื้นฐานที่ต้องมีในระบบเพาเวอร์อิเล็คทรอนิคส์ทั่วไป เพื่อป้องกันอุณหภูมิของอุปกรณ์อิเล็คทรอนิคส์ไม่ให้สูงเกินไป จนเป็นอันตรายต่อตัวอุปกรณ์



รูปที่ 4.18 วงจรป้องกันอุณหภูมิเกินที่ใช้ในโครงงาน

จากวงจรรูปที่ 4.18 เทอร์มิสเตอร์ (NTC) จะเป็นตัวตรวจจับอุณหภูมิ ซึ่งถูกแปะติดกับแผ่นระบายความร้อนของอุปกรณ์เพาเวอร์อิเลคทรอนิคส์ เทอร์มิสเตอร์จะมีสัมประสิทธิ์ของค่าความต้านทานเป็นลบ นั่นคือ ค่าความต้านทานที่ตัวมันจะลดต่ำลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ถ้าอุณหภูมิปกติ เอาท์พุตของออปแอมป์จะมีค่าประมาณเท่ากับแหล่งจ่ายไฟเลี้ยง แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าความต้านทานของเทอร์มิสเตอร์จะต่ำลง (ซึ่งค่าความต้านทานที่แปรตามอุณหภูมิของเทอร์มิสเตอร์ดูได้จาก Data sheet) ทำให้แรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทานปรับค่าได้สูงขึ้น

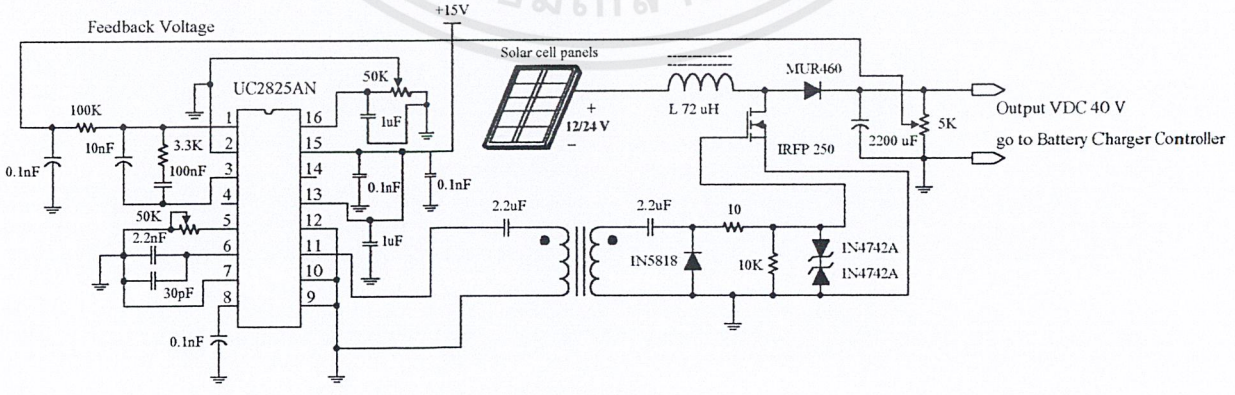
เมื่อถึงอุณหภูมิที่ตั้งไว้ เอาท์พุทของออปแอมป์ จะมีค่าประมาณระดับกราวด์ ทำให้สัญญาณเอาท์พุทที่ออกจากวงจรกำเนิดสัญญาณพีดับบลิวเอ็ม (ขา 11 ของไอซี MC14093B) อยู่ในระดับกราวด์ด้วย ซึ่งจะทำให้ไม่มีสัญญาณพีดับบลิวเอ็มไปเข้าวงจรขับเกต และแยกกราวด์ได้ ส่งผลต่อเอาท์พุทของวงจรขับเกต และแยกกราวด์มีค่าเป็นศูนย์ มอสเฟทก็ไม่ทำงาน และจะเข้าสู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สภาวะปกติ เมื่ออุณหภูมิลดลงในค่าที่เหมาะสม สำหรับการออกแบบวงจรจะอาศัยหลักการของ Bridge balance และจากค้าต้าชีตของมอสเฟทกำลังเบอร์ IRFP150 จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิระหว่างรอยต่อของตัวมอสเฟทกำลัง ($T_{J(max)}$) ที่จะทำให้มอสเฟทพังอยู่ที่อุณหภูมิ 175 องศา ถ้าอุณหภูมิสูงเกินค่าที่กำหนดไว้นี้ กระแสที่ขาเดรนรับได้จะเป็นศูนย์ ดังนั้นเราจึงทดอุณหภูมิไว้ที่ 120 องศา เพื่อให้วงจรป้องกันอุณหภูมิเกินตัดสัญญาณพีดับบลิวเอ็มออกก่อน เมื่ออุณหภูมิที่รอยต่อของมอสเฟทเพิ่มสูงขึ้นถึง 120 องศา ก่อนที่จะปล่อยให้มีสัญญาณพีดับบลิวเอ็มไปขับเกตต่อไปเรื่อยๆ เพราะอุณหภูมิยิ่งสูงขึ้น อัตราการรับกระแสที่ขาเดรนก็จะยิ่งน้อยลงจนมอสเฟทไม่สามารถทนกระแสได้ก็จะระเบิดเสียหายได้

4.1.7 วงจรยกระดับแรงดัน (Boost Converter)

ในการประจุไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ลงในแบตเตอรี่ขนาด 12 โวลท์ 85 แอมป์ – ฮาวด์ ทั้งหมดจำนวน 6 ลูก ซึ่งในการประจุไฟฟ้าลงในแบตเตอรี่นั้น แรงดันไฟฟ้าที่ได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์นั้นจะมีค่าไม่คงที่ เพราะถ้าอยู่ในที่ร่ม หรือได้รับแสงแดดไม่เพียงพอ แรงดันไฟฟ้าที่ออกมาจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ก็จะมีค่าตกลง ซึ่งทำให้แรงดันของแผงนั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา ดังนั้นก่อนที่จะทำการอัดประจุลงในแบตเตอรี่ แรงดันไฟฟ้าที่ได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะถูกผ่านด้วยวงจรยกระดับแรงดัน (Boost Converter) เสียก่อน เพื่อให้แรงดันที่จะจ่ายให้แก่วงจรควบคุมการอัดประจุในแบตเตอรี่มีค่าคงที่ สำหรับโครงงานนี้จะให้วงจรยกระดับแรงดันทำการคงที่แรงดันทางด้านเอาท์พุทไว้ที่ 40 โวลท์ เนื่องจากแบตเตอรี่ที่ต่อไว้เพื่อป้อนแรงดันให้กับมอเตอร์มีขนาด 36 โวลท์ รายละเอียดของวงจรสามารถแสดงให้เห็นได้ดังรูปที่ 4.19

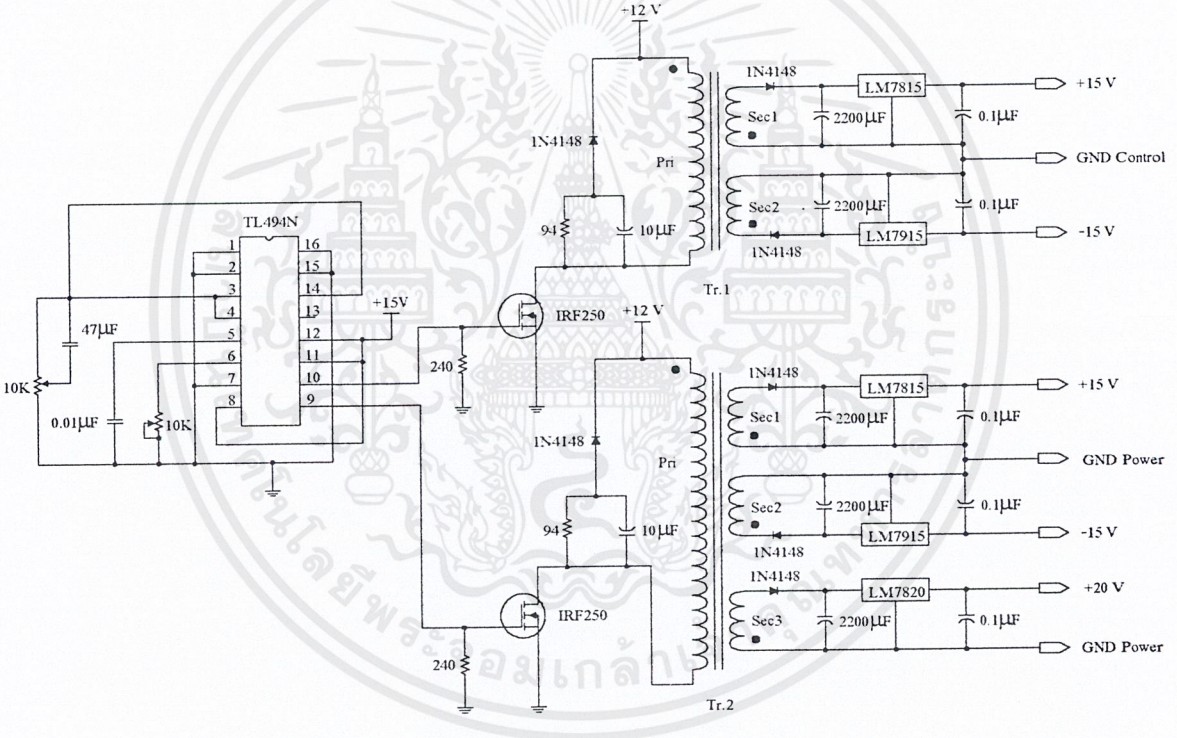


รูปที่ 4.19 วงจรยกระดับแรงดัน (Boost Converter) ที่ใช้ในโครงงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.8 วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบสวิตซ์ชิ่ง (Switching Power Supply)

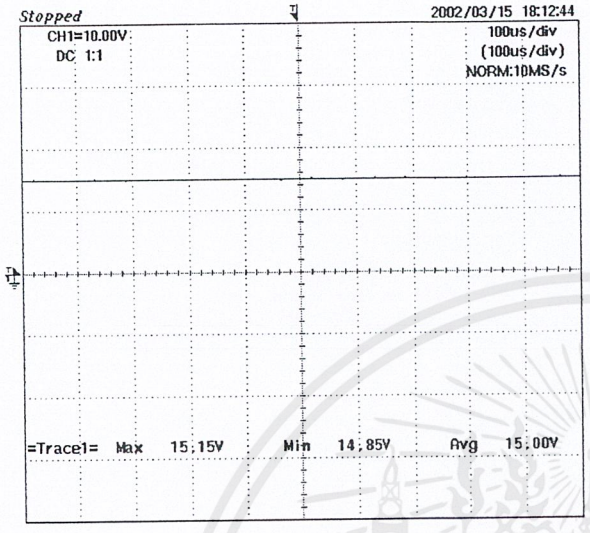
สำหรับโครงงานนี้ได้เลือกใช้วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ (Fly Back Converter) ซึ่งเป็นคอนเวอร์เตอร์ชนิดหนึ่ง เนื่องจากโครงงานนี้เป็นระบบ Stand Alone ดังนั้นจึงต้องมีวงจรไฟเลี้ยงให้กับไอซีต่างๆ และวงจรที่ใช้นี้มีค่าใช้จ่ายในการสร้างต่ำเหมาะสำหรับสวิตช์ชิ่งเพาว์เวอร์ซัพพลายที่มีกำลังขาออกในช่วง 50 - 150 วัตต์ แต่คอนเวอร์เตอร์ชนิดนี้มีข้อเสียตรงที่แรงดันเอาท์พุทที่ได้จะมีค่าแรงดันกระเพื่อม (Ripple) ค่อนข้างสูง วงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ที่ได้เลือกใช้ในโครงงานนี้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.20



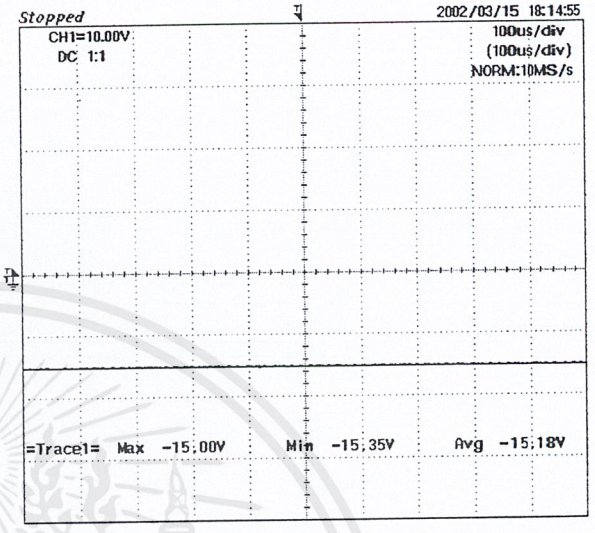
รูปที่ 4.20 วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบสวิตช์ชิ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

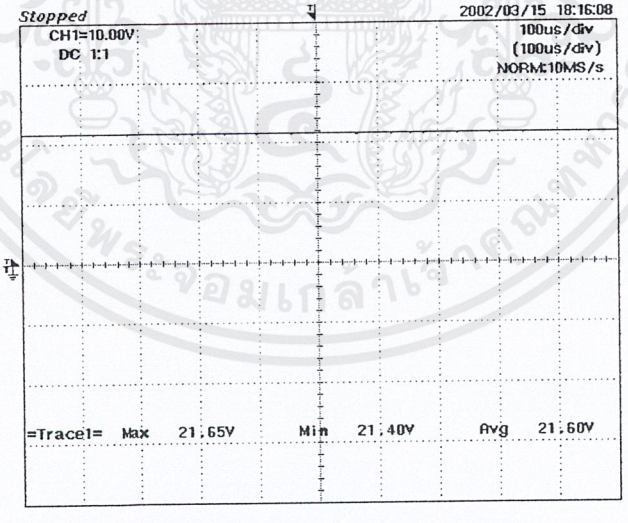
ผลการทดลองที่ได้จากวงจรสวิตช์ชิ่งเพาเวอร์ซัปพาย



(ก.) แรงดันเอาท์พุท +15 V



(ข.) แรงดันเอาท์พุท –15 V



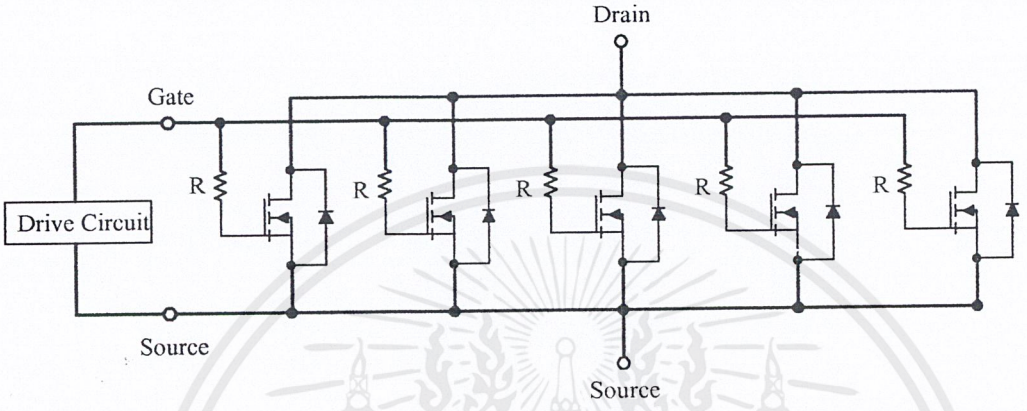
(ค.) แรงดันเอาท์พุท +22 V

รูปที่ 4.21 รูปคลื่นสัญญาณเอาท์พุทที่ได้จากวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ส่วนของวงจรกำลัง

4.2.1 ชุดการขนานมอสเฟท



รูปที่ 4.22 ชุดการขนานมอสเฟทที่ใช้ในโครงงาน

ในโครงงานนี้เลือกใช้มอสเฟทเป็นอุปกรณ์ในการสวิตช์ชิ่ง เนื่องจากราคาถูก และมีการสูญเสียจากการสวิตช์ชิ่งต่ำ โดยใช้การขนานเพื่อเพิ่มพิกัดในการรับกระแสที่ต้องรับกระแสให้ได้สูงถึง 400 – 500 แอมป์ เนื่องจากมอเตอร์ที่ใช้ในการขับเคลื่อนรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้าในครั้งนี้เป็นมอเตอร์ที่แรงดันต่ำ 23 โวลท์ ต้องการกระแสในขณะสตาร์ทสูงมาก (จากการทดสอบโดยการสตาร์ทมอเตอร์โดยไม่ได้ผ่านชุดควบคุมต้องการกระแสสตาร์ทถึง 520 แอมป์) จากรูปที่ 4.22 ค่าความต้านทาน R ในวงจรจะเป็นตัวป้องกันการออสซิเลต (Osillate) ที่อาจเกิดจากค่าอินดัคแตนซ์ที่แฝงในขาเดรน และค่าคาปาซิแตนซ์ระหว่างขาเกตกับขาเดรนในมอสเฟท สำหรับการสวิตช์ชิ่งที่ความถี่สูงๆ ค่าความต้านทานที่ใช้ควรมีค่าน้อยที่สุด

อย่างไรก็ตามมอสเฟทก็มีข้อเสียเช่นกัน คือว่าค่าความต้าน R_{DS} ในมอสเฟทกำลังจะสูงกว่าในทรานซิสเตอร์ชนิดไบโพลาร์ ดังนั้นการใช้งานที่ค่าความถี่ต่ำ ซึ่งค่าความสูญเสียขณะนำกระแสในอุปกรณ์สวิตช์ชิ่งกำลัง เป็นสิ่งที่สำคัญ จึงไม่ควรใช้มอสเฟทกำลังที่ความถี่ต่ำ

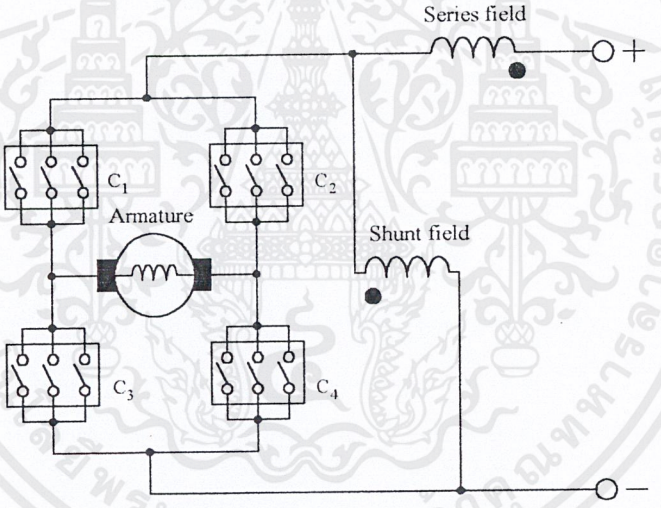
4.2.2 ระบบเดินหน้า และถอยหลังของรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้า

ระบบเดินหน้า–ถอยหลังของรถไฟฟ้า นับว่าเป็นส่วนสำคัญส่วนหนึ่งของรถไฟฟ้า เพราะการเคลื่อนที่ที่สมบูรณ์นั้น ต้องเคลื่อนที่ได้ทั้งไปข้างหน้า และถอยหลัง ซึ่งหลักการทำงานทำได้โดยการกลับทิศทางที่กระแสไหลเข้าขั้วอาเมเจอร์ของมอเตอร์เท่านั้น มอเตอร์ก็จะกลับทิศทางการหมุนทันที เนื่องจากกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดอาเมเจอร์มีค่าสูง ฉะนั้นสวิทช์ที่ใช้ในการตัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่อขั้วอาเมเจอร์ จึงต้องทนกระแสไฟฟ้าได้สูงซึ่งเป็นการยากที่จะหา สวิทช์ที่ทนกระแสไฟฟ้าได้สูงเช่นนี้ จึงได้ดัดแปลงเอาแมกนิติกคอนแทกเตอร์มาใช้แทน โดยจะควบคุมผ่านสวิทช์ตัวเล็กอีกทีหนึ่ง ซึ่งโดยปกติแล้วแมกนิติกคอนแทกเตอร์จะควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอยล์ โดยใช้ไฟสลับ แต่ในที่นี้เราจะนำมาใช้กับไฟตรง 36 โวลท์ เพื่อให้เหมาะสมกับแหล่งจ่ายไฟที่ได้จากแบตเตอรี่ของรถไฟฟ้า ดังนั้นเราจึงได้ทำการเลือกแมกนิติกคอนแทกเตอร์ที่ใช้กับไฟดีซีได้โดยตรง ซึ่งคอยล์ของแมกนิติกคอนแทกเตอร์ที่ใช้จะมีขนาดแรงดัน 24 โวลท์ เพื่อทำให้ได้ลักษณะของงานตามที่ต้องการได้สะดวกขึ้น ไม่ต้องเสียเวลาในการมาดัดแปลงแมกนิติกคอนแทกเตอร์ที่ใช้กับไฟสลับ ให้มาใช้กับไฟดีซีแทนได้อย่างเหมาะสม

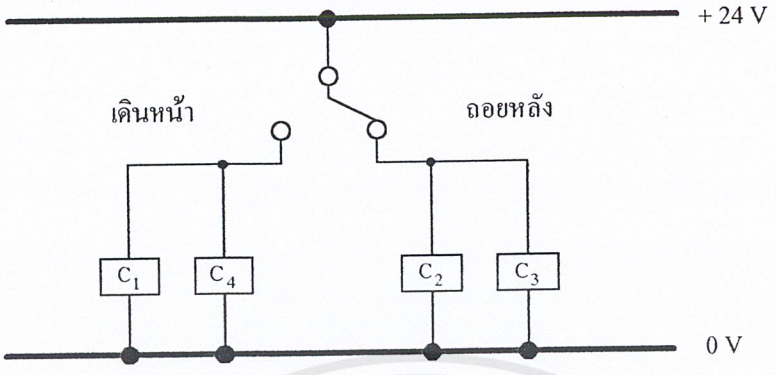
เนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดอาเมเจอร์มีค่าสูง จึงใช้แมกนีติกคอนแทกเตอร์ 1 ตัว แทนหน้าสัมผัส 1 อัน ซึ่งวงจรการกลับขั้วอาเมเจอร์ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.23



รูปที่ 4.23 วงจรกำลังของการต่อแมกนีติกคอนแทกเตอร์เพื่อกลับขั้วอาเมเจอร์

จากรูปที่ 4.23 จะแสดงให้เห็นว่าการกลับขั้วอาเมเจอร์จะต้องให้แมกนีติกคอนแทกเตอร์ ทำงานในแต่ละคู่นั้น ซึ่งจะควบคุมผ่านสวิทช์ 3 ทาง ดังแสดงในรูปที่ 4.24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.24 วงจรควบคุมการกลับขั้วอาเมเจอร์โดยใช้สวิทช์ 3 ทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

การทดสอบ และผลการทดสอบ

วัตถุประสงค์ในการทดสอบ

1.) เพื่อทำการทดสอบหาอัตราการสิ้นเปลืองกำลังไฟฟ้าต่อความเร็วของรถที่วิ่ง ทั้งในขณะ No-load และ On-load โดยใช้การควบคุมความเร็วมอเตอร์แบบ Open-loop และ Close-loop

2.) เพื่อทำการทดสอบหาแรงบิดที่ใช้ในการขับโหลด ในขณะ On-load โดยใช้การควบคุมความเร็วมอเตอร์แบบ Open-loop และ Close-loop

3.) เพื่อทำการทดสอบหาอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าต่อระยะทางที่รถวิ่ง

4.) เพื่อทำการทดสอบหาอัตราเร่งของรถ

5.) เพื่อทำการทดสอบหาความเร็วสูงสุดของรถ และระยะเวลาที่รถสามารถวิ่งใช้งานได้

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

1.) โวลต์มิเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC Voltmeter Kuwano PSM-170 Class 0.5)

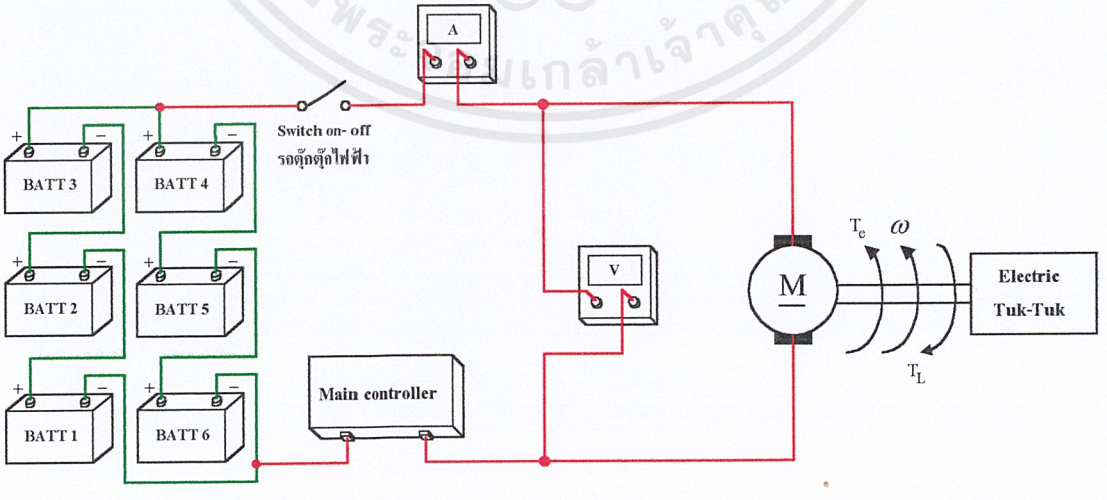
2.) แอมป์มิเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC Ampmeter Yokogawa Type 2011 Class 0.5)

3.) เครื่องทดสอบความเร็วรถ และแรงบิด

4.) อุปกรณ์วัดระยะทาง

5.) นาฬิกาจับเวลา

วงจรการทดสอบ



รูปที่ 5.1 วงจรที่ใช้ในการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1 การทดลองที่ 1 การทดสอบหาความเร็วสูงสุด

5.1.1 ขั้นตอนการทดลอง

1.) ทำการตรวจสอบสภาพรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้าว่าอยู่ในสภาพพร้อมใช้งานหรือไม่ และทำการชาร์จแบตเตอรี่ทั้งหมดให้เต็ม

2.) เตรียมอุปกรณ์เครื่องมือวัดต่างๆ ให้พร้อม เช่น เครื่องทดสอบความเร็วรถ และแรงบิด

3.) ขับรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้าโดยการบิดคันเร่งจนกระทั่งไม่สามารถเพิ่มความเร็วขึ้นได้อีก แล้วทำการวัดความเร็วที่ได้ในขณะนั้น

4.) ทำการจดบันทึกค่าความเร็วสูงสุดที่ทำได้

5.1.2 ผลการทดลองที่ 1

ความเร็วสูงสุดที่รถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้าสามารถทำได้ คือ 46 กม. / ชม.

5.1.3 สรุปผลการทดลองที่ 1

จากการทดสอบหาความเร็วสูงสุดของรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้า ความเร็วสูงสุดที่สามารถทำได้ในครั้งนี้ได้ผลที่น่าพอใจในระดับหนึ่ง แต่ความเร็วสูงสุดของรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้า น่าจะทำได้มากกว่านี้อีกเล็กน้อย ซึ่งสาเหตุส่วนหนึ่งที่ทำให้ได้ความเร็วสูงสุดเพียงเท่านี้ ก็คือ การเลือกมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมาใช้ในโครงงานนี้ มีขนาดพิกัดกำลังที่น้อยเกินไป ไม่เหมาะสมกับการที่จะต้องนำมาใช้กับรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้าที่มีโครงสร้าง และน้ำหนักที่มาก ซึ่งโครงสร้างของรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้าที่ไม่มีความสมดุล ช่วงล่าง และล้อไม่ดีไม่ได้มาตรฐาน ถ้าหากได้ทำการปรับตั้งศูนย์ถ่วงล้อให้ดีกว่านี้ และทำการเปลี่ยนขนาดพิกัดกำลังของมอเตอร์ใหม่ ก็จะทำให้ได้ความเร็วสูงสุดของรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้ามีค่าเพิ่มสูงขึ้น แต่สำหรับโครงงานนี้ไม่ขอแนะนำให้ใช้วิธีการเปลี่ยนขนาดพิกัดกำลังของมอเตอร์ เพราะโครงงานนี้ได้ออกแบบทั้งในส่วนของวงจรควบคุม และส่วนของวงจรกำลังให้ใช้กับขนาดพิกัดมอเตอร์ที่ได้กำหนดเอาไว้แล้วอย่างเหมาะสมในตอนต้น ถ้าเปลี่ยนขนาดพิกัดกำลังของมอเตอร์ใหม่ ก็จะต้องทำการออกแบบวงจรใหม่ทั้งหมด ไม่เช่นนั้นจะทำให้วงจรทั้งหมดที่ได้ออกแบบไว้ก่อนแล้วนั้น เกิดการระเบิดเสียหายได้ ดังนั้นวิธีนี้จึงเป็นวิธีที่ไม่ค่อยจะเหมาะสม

5.2 การทดลองที่ 2 การทดสอบหาระยะเวลาที่รถสามารถวิ่งใช้งานได้

5.2.1 ขั้นตอนการการทดลอง

1.) ทำการตรวจสอบสภาพรถให้เรียบร้อย และทำการชาร์จแบตเตอรี่ให้เต็มทั้งหมดทุกลูก

2.) เตรียมอุปกรณ์เครื่องมือวัดให้พร้อม เช่น นาฬิกาจับเวลา

3.) ทำการขับรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้าให้เหมือนกับสภาพการใช้งานจริงโดยการขับที่ความเร็วไม่คงที่ มีการจอดรถ และออกตัวใหม่อยู่ตลอดเวลา แล้วทำการจับเวลาเฉพาะช่วงที่รถวิ่งเท่านั้น

เอกสารนี้สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.) ขับรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้าไปจนกว่าแบตเตอรี่จะหมด และไม่สามารถจ่ายพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ต่อไปได้อีก

5.) เมื่อแบตเตอรี่หมด และรถไม่สามารถวิ่งได้ ให้ทำการจดบันทึกเวลาที่รถวิ่งใช้งาน

5.2.2 ผลการทดลองที่ 2

จากการทดสอบหาระยะเวลาที่รถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้าสามารถวิ่งใช้งานได้ ซึ่งเวลาที่ทำได้คือ ประมาณ 45 นาที

5.2.3 สรุปผลการทดลองที่ 2

จากการทดสอบหาระยะเวลาที่รถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้าสามารถวิ่งใช้งานได้นั้นระยะเวลาที่รถจะสามารถวิ่งได้ เมื่อเทียบกับระยะเวลาในการชาร์จแบตเตอรี่ที่ต้องใช้เวลาในการชาร์จแบบธรรมดาหรือการชาร์จแบบปกติ (Normal Charge) ประมาณ 4 – 7 ชั่วโมงนั้น ยังถือว่าระยะเวลาที่รถวิ่งใช้งานได้นั้นยังไม่ดีเท่าที่ควร วิ่งใช้งานได้ระยะเวลาที่น้อยเกินไป เพราะขนาดพิกัดกำลังของมอเตอร์ที่ใช้ในโครงงานนั้นกินกระแสสูงมาก จึงทำให้พลังงานไฟฟ้าในแบตเตอรี่หมดเร็วขึ้น ดังนั้นถ้าหากสามารถทำการลดเวลาในการชาร์จแบตเตอรี่ให้ลดลง หรือว่ามีอุปกรณ์ที่สามารถช่วยจ่ายพลังงานไฟฟ้า ซึ่งเป็นพลังงานเสริมร่วมกันกับแบตเตอรี่ได้ ก็จะทำให้รถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้าสามารถนำไปวิ่งใช้งานได้จริงบนท้องถนน ซึ่งอุปกรณ์ที่สามารถช่วยจ่ายพลังงานไฟฟ้า เข้ามาเป็นพลังงานเสริมในแบตเตอรี่ได้ก็คือ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cell panels) โดยหากมีการติดตั้งเข้าไปแทนหลังคารถมันจะทำการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ เป็นพลังงานไฟฟ้าเพื่อช่วยเสริมพลังงานไฟฟ้าในแบตเตอรี่ได้บ้างในบางเวลาก็จะทำให้รถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้าสามารถวิ่งใช้งานได้ระยะเวลาที่ยาวนานยิ่งขึ้น

5.3 การทดลองที่ 3 การทดสอบหาอัตราการสิ้นเปลืองกำลังไฟฟ้าต่อความเร็วรถ ขณะยังไม่ได้รับโหลด

สำหรับการทดลองนี้เป็นการทดลองในขณะไม่ได้รับโหลด แต่ในความเป็นจริงแล้วในการขับเคลื่อนรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้านั้น จะมีน้ำหนักของตัวรถเป็นโหลดอยู่ก่อนหน้านั้นแล้ว ดังนั้นการทดลองนี้จึงเป็นการขับเคลื่อนมอเตอร์ หรือขับเคลื่อนรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้าโดยให้รถวิ่งด้วยโครงสร้างน้ำหนักของตัวมันเอง (วิ่งตัวเปล่า) จึงทำให้เหมือนกับว่ารถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้าวิ่งใช้งานโดยยังไม่ได้รับน้ำหนักโหลดเพิ่มขึ้น นอกจากน้ำหนักของตัวรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้าเอง ซึ่งรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้าจะมีน้ำหนักประมาณ 550 kg

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.1 ขั้นตอนการทดลอง

1.) ตรวจสอบสภาพรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้าให้เรียบร้อย และทำการชาร์จแบตเตอรี่ให้เต็มทุกลูก

2.) เตรียมเครื่องมือวัดให้พร้อม เช่น โวลต์มิเตอร์, แอมป์มิเตอร์ และเครื่องทดสอบความเร็ว

3.) ขับรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้าโดยการบิดคันเร่งให้ได้ที่ความเร็วต่างๆ ซึ่งดูได้จากหน้าจอของเครื่องทดสอบความเร็วรถ แล้วทำการจดบันทึกค่ากระแส และแรงดันไฟฟ้าที่ความเร็วค่านั้นๆ

4.) ทำการคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าป้อนเข้าจากสูตร $P_{in} = V_t \cdot I_a$ ที่ค่าความเร็วต่างๆ กัน

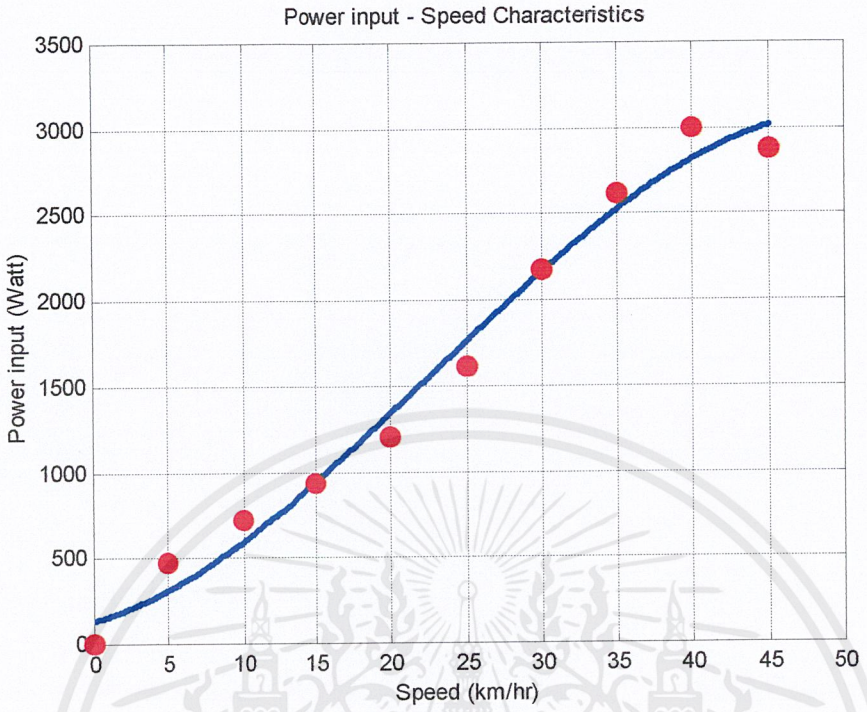
5.) บันทึกผลการทดลองที่ได้ พร้อมกับการคำนวณลงในตารางที่ 3

5.3.2 ผลการทดลองที่ 3

ความเร็วรถ (km / hr)	แรงดัน (Volt)	กระแส (Amp)	กำลังไฟฟ้าป้อนเข้า (Watt)
0	0	0	0
5	7	67	469
10	9	80	720
15	10	93	930
20	12	100	1200
25	14	115	1610
30	17	128	2176
35	19	138	2622
40	20	150	3000
45	23	125	2875

ตารางที่ 5.1 ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.2 กราฟอัตราการสิ้นเปลืองกำลังไฟฟ้าต่อความเร็วรถขณะยังไม่ได้รับโหลด

5.3.3 สรุปผลการทดลองที่ 3

จากผลการทดสอบในเรื่องของอัตราการสิ้นเปลืองกำลังไฟฟ้าต่อความเร็วในขณะยังไม่ได้รับโหลด จะเห็นได้ว่าในขณะที่รถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้ายังไม่ได้รับโหลด ช่วงต้นๆ ที่รถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้าวิ่งด้วยความเร็ว 0 –35 กม. / ชม. รถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้าจะค่อยๆใช้กำลังไฟฟ้าเพิ่มสูงมากขึ้น และในช่วงที่วิ่งด้วยความเร็ว 35 – 45 กม / ชม. จะเห็นได้ว่าการใช้กำลังไฟฟ้านั้นแทบจะไม่แตกต่างกันมาก แต่อัตราการใช้กำลังไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นสูงขึ้นที่สุด เมื่อใช้ขับรถที่ความเร็ว 40 กม. / ชม. ดังนั้นช่วงความเร็วในการขับขี่ที่เหมาะสมในการวิ่งใช้งาน ควรจะขับรถตุ๊กไฟฟ้าโดยใช้ความเร็วในช่วง 35 – 45 กม. / ชม. เนื่องจากในช่วงนี้อัตราการใช้กำลังไฟฟ้าเกือบจะคงที่ มีค่าแตกต่างกันบ้างเพียงเล็กน้อย โดยที่ความเร็ว 45 กม./ช.ม นั้น ค่ากำลังไฟฟ้าจะลดลงมา เนื่องจากรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้ากำลังวิ่งใช้งานที่แรงดันไฟฟ้าที่พิกัดของมอเตอร์แล้ว และกระแสที่ป้อนเข้ามอเตอร์ยังไม่ใช่กระแสที่พิกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4 การทดลองที่ 4 การทดสอบหาอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าต่อระยะทาง

5.4.1 ขั้นตอนการทดลอง

1.) ทำการตรวจสอบสภาพรถให้เรียบร้อย และทำการชาร์จแบตเตอรี่ให้เต็มทุกลูก

2.) เตรียมเครื่องมือวัดให้พร้อม เช่น โวลต์มิเตอร์, แอมป์มิเตอร์, อุปกรณ์วัดระยะทาง และนาฬิกาจับเวลา

3.) กำหนดระยะทางที่จะให้รถวิ่ง ที่ระยะทางค่าต่างๆ แล้วขับรถให้ได้ตามระยะทางที่ได้กำหนดเอาไว้ โดยความเร็วของรถจะต้องคงที่ ที่ 30 km/hr

4.) ทำการบันทึกเวลาที่รถวิ่งตามระยะทางค่าต่างๆที่กำหนดเอาไว้ พร้อมทั้งวัดค่าแรงดันและกระแสในขณะที่รถวิ่งใช้งาน

5.) คำนวณหาค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ต่อชั่วโมง จากสูตร

$$W\text{-}H = ((V \times I) / 3600) \times \text{เวลา}$$

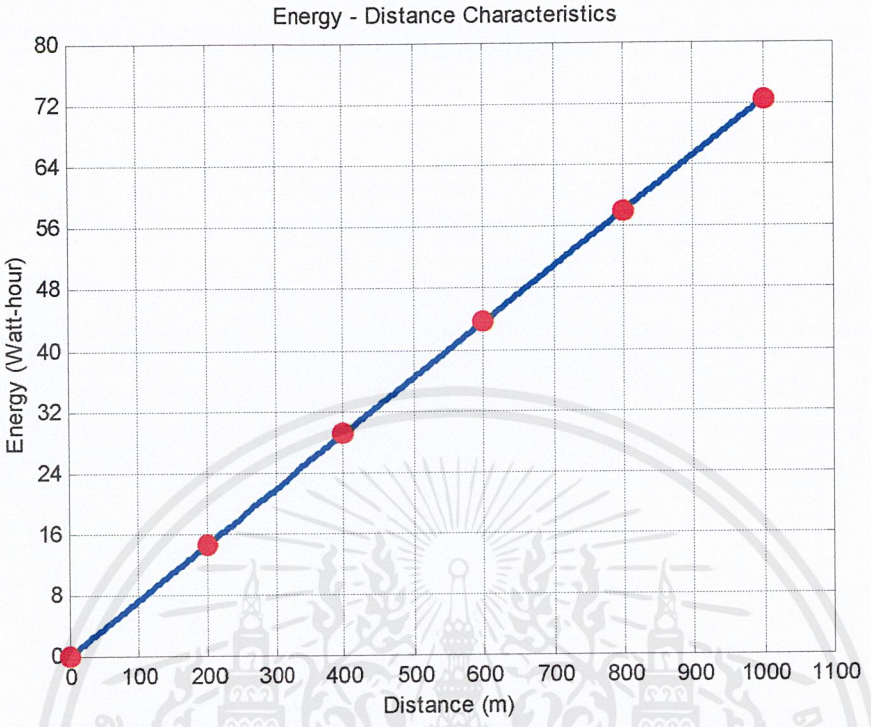
6.) บันทึกผลการทดลอง และการคำนวณหาค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ต่อชั่วโมงลงในตารางบันทึกผลการทดลองที่ 4

5.4.2 ผลการทดลองที่ 4

ระยะทาง (เมตร)	เวลา (sec)	แรงดัน (Volt)	กระแส (Amp)	พลังงานไฟฟ้า (w – h)
200	24	128	17	14.50
400	48	128	17	29.01
600	72	128	17	43.52
800	96	128	17	58.03
1000	120	128	17	72.53

ตารางที่ 5.2 ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.3 กราฟการทดสอบอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าต่อระยะทาง

5.4.3 สรุปผลการทดลองที่ 4

จากการทดสอบหาอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าต่อระยะทางจะเห็นได้ว่า เมื่อรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้าวิ่งใช้งานตามระยะทางที่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ต่อชั่วโมงก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย โดยในการทดสอบนี้จะให้รถวิ่งใช้งานที่ความเร็ว 30 km/hr พิจารณาจากกราฟผลการทดลองที่ 4. ดังแสดงในรูปที่ 5.3 จะสังเกตได้ว่าอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นตามระยะทางนั้นเกือบจะเป็นเส้นตรง โดยเฉลี่ยแล้วอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าจะอยู่ที่ประมาณ 70 W-h ต่อ 1 กิโลเมตร

5.5 การทดลองที่ 5 การทดสอบหาอัตราการเร่งของรถ

5.5.1 ขั้นตอนการทดลอง

1.) ตรวจสอบสภาพรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้าให้เรียบร้อย และทำการชาร์จแบตเตอรี่ให้เต็มทุกลูก

2.) เตรียมเครื่องมือวัด เช่น เครื่องทดสอบความเร็ว และนาฬิกาจับเวลา

3.) ขับรถโดยการบิดคันเร่งให้สุดตั้งแต่ช่วงออกตัว จับเวลาตั้งแต่รถเริ่มออกตัวจนกระทั่งถึงความเร็วที่ได้กำหนดเอาไว้ ที่ค่าความเร็วต่างๆกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

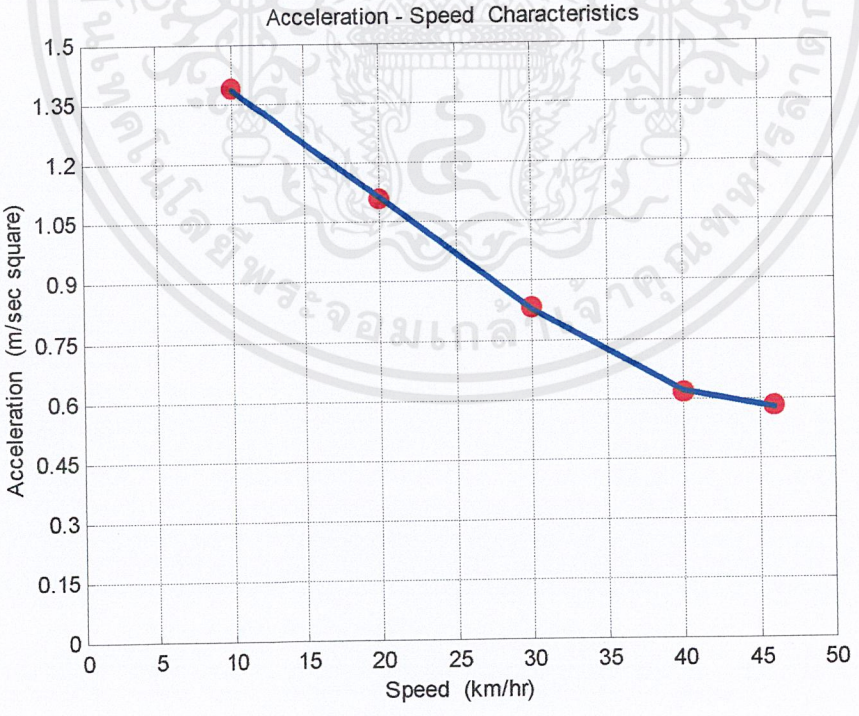
4.) บันทึกเวลาที่จับได้จากการทดลอง

5.) คำนวณหาอัตราการเร่งจากสูตร อัตราการเร่ง = (ความเร็วรถ ×1000)/ (3600×เวลา)

5.5.2 ผลการทดลองที่ 5

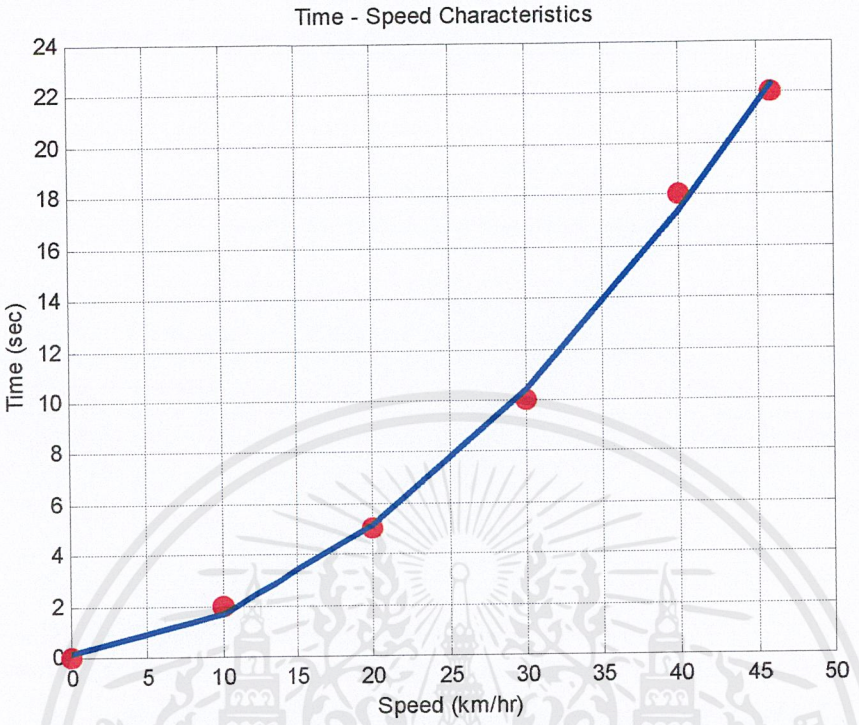
ความเร็วรถ (km / hr)	เวลา (sec)	อัตราการเร่งที่ได้ (m/s^2)
0 - 10	2	1.388
0 - 20	5	1.11
0 - 30	10	0.833
0 - 40	18	0.617
0 - 46	22	0.58

ตารางที่ 5.3 ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 5



รูปที่ 5.4 กราฟอัตราการเร่งของรถตุ๊กตุ๊กๆ ไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรถ และเวลาที่ใช้ในการเร่ง

5.5.3 สรุปผลการทดลองที่ 5

จากการทดสอบในส่วนของอัตราการเร่งของรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้าในครั้งนี้จะเห็นได้ว่า เมื่อทำการเร่งความเร็วของรถตั้งแต่ความเร็วเริ่มต้นจนถึงความเร็วสูงสุดของรถที่ประมาณ 46 กม. / ชม. นั้น จะใช้เวลาในการเร่ง 22 วินาที โดยที่อัตราการเร่งในช่วงที่ขับด้วยความเร็วต่ำๆนั้น จะใช้เวลาในการเร่งค่อนข้างน้อย แต่พอถึงช่วงที่ใกล้จะได้ความเร็วสูงสุดตั้งแต่ ความเร็ว 30 กม. / ชม. เป็นต้นไป จะใช้เวลาในการเร่งเพิ่มมากขึ้น และถ้าทำการคำนวณหาอัตราการเร่งจากสูตรดังกล่าวข้างต้น จะเห็นว่าในช่วงที่ขับรถด้วยความเร็วต่ำๆ อัตราการเร่งจะสูงมาก แต่พอขับรถโดยเร่งความเร็วเพิ่มขึ้นไปเรื่อย อัตราการเร่งจะจะลดลงมาอย่างต่อเนื่องกัน ซึ่งผลที่เกิดขึ้นมาทั้งหมดนี้อันเนื่องมาจากผลของคุณสมบัติของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบผสม ที่กล่าวไว้ว่าเมื่อความเร็วของมอเตอร์เพิ่มสูงขึ้น แรงบิดที่ใช้ในการขับโหลดจะลดต่ำลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.6 การทดลองที่ 6 การทดสอบหาอัตราการสิ้นเปลืองกำลังไฟฟ้าต่อความเร็วรถ ขณะได้รับโหลด เมื่อใช้การควบคุมความเร็วมอเตอร์แบบลูปเปิด (Open Loop)

5.6.1 ขั้นตอนการทดลอง

1.) ทำการตรวจสอบสภาพรถ และทำการชาร์จแบตเตอรี่ให้เต็มทุกลูก

2.) เตรียมเครื่องมือวัดให้พร้อม โวลต์มิเตอร์, แอมป์มิเตอร์ และอุปกรณ์วัดความเร็ว

3.) ขับรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้าที่ความเร็วที่ความเร็วตั้งแต่ 0 – 45 km/hr ที่น้ำหนักโหลด 650 kg ต่อมาขับรถที่ความเร็ว 0 – 45 km/hr ที่น้ำหนักโหลด 700 kg และสุดท้ายขับรถที่ความเร็ว 0 – 45 km/hr ที่น้ำหนักโหลด 750 kg ตามลำดับ โดยมีน้ำหนักของตัวรถประมาณ 550 kg แล้วทำการจดบันทึกค่ากระแส และแรงดันไฟฟ้า ที่ค่าความเร็วต่างๆ กัน

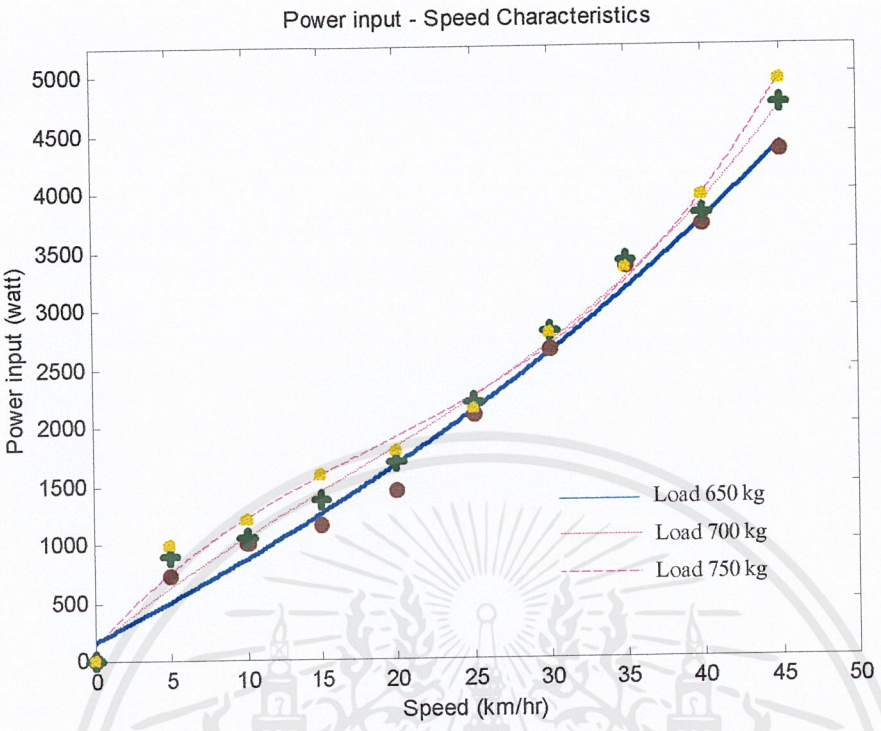
4.) ทำการคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าป้อนเข้าจากสูตร $P_{in} = V_t \cdot I_a$ ที่ความเร็วต่างๆ

5.6.2 ผลการทดลองที่ 6

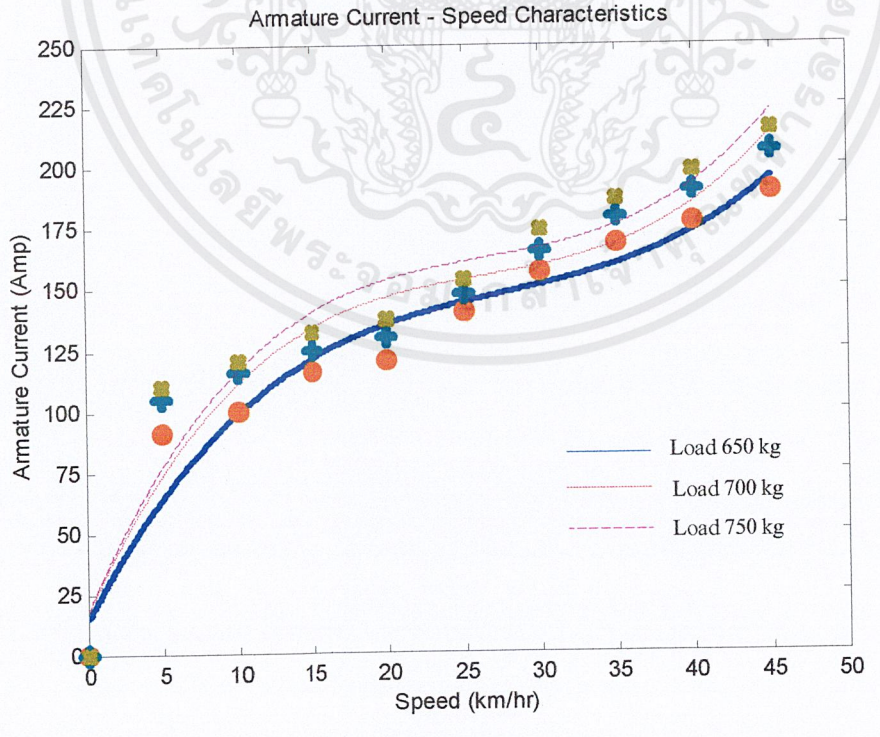
ความเร็วรถ (km / hr)	น้ำหนักโหลด 650 kg			น้ำหนักโหลด 700 kg			น้ำหนักโหลด 750 kg		
	Volt	Amp	Watt	Volt	Amp	Watt	Volt	Amp	Watt
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	8	91	728	8.5	105	892.5	9	110	990
10	10	100	1000	9	116	1044	10	120	1200
15	10	116	1160	11	125	1375	12	132	1584
20	12	120	1440	13	130	1690	13	137	1781
25	15	140	2100	15	147	2205	14	153	2142
30	17	156	2652	17	165	2805	16	174	2784
35	20	168	3360	19	179	3401	18	186	3348
40	21	177	3717	20	190	3800	20	198	3960
45	23	189	4347	23	206	4738	23	215	4945

ตารางที่ 5.4 ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.6 กราฟอัตราการสิ้นเปลืองกำลังไฟฟ้าต่อความเร็วรถขณะได้รับโหลด



รูปที่ 5.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอาร์เมเจอร์กับความเร็วรถ ขณะได้รับโหลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.6.3 สรุปผลการทดลองที่ 6

จากผลการทดลองในเรื่องของการทดสอบหาอัตราการสิ้นเปลืองกำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้าต่อความเร็วรถ จากรูปที่ 5.6 จะสามารถแสดงให้เห็นได้ว่า ในช่วงที่ขับรถด้วยความเร็วตั้งแต่ 0 – 45 กม. / ชม. รถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้าจะค่อยๆใช้กำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามลำดับ และในช่วงที่ขับรถด้วยความเร็วสูงสุดที่ 45 กม / ชม. จะเห็นได้ว่าการใช้กำลังไฟฟ้าจะมีค่าสูงมากที่สุด โดยที่น้ำหนักโหลด 100 kg กำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้ายังไม่สูงไปกว่าพิกัดกำลังที่ตัวมอเตอร์ ซึ่งมอเตอร์ที่ใช้ในการขับเคลื่อนรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้านี้มีพิกัด 4.5 KW แต่กำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้าเมื่อโหลด 650 kg มีค่าเท่ากับ 4347 watt หรือประมาณ 4.4 KW ซึ่งมอเตอร์ยังไม่จ่ายโหลดภาระเกินพิกัดกำลังไฟฟ้ากระแสตรง และเมื่อทำการเพิ่มน้ำหนักโหลดไปที่ 700 kg – 750 kg จะสังเกตเห็นได้ว่ากำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้าจะมีค่าสูงมาก ซึ่งเกินกว่าขนาดพิกัดกำลังของตัวมอเตอร์ มันจะมีผลทำให้มอเตอร์ที่ใช้ในการขับเคลื่อนรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้าจ่ายโหลดภาระที่เกินพิกัดกำลัง ทำให้มีกระแสป้อนเข้ามอเตอร์สูงกว่าที่พิกัด จะเกิดความสูญเสียในขดลวดทองแดง (I^2R) มีค่าสูงขึ้น ส่งผลกระทบต่ออุณหภูมิของมอเตอร์ก็จะสูงขึ้น ซึ่งถ้าเกินกว่าจุดที่ฉนวนจะทนได้ก็จะทำให้ฉนวนเสียหาย และเกิดการลัดวงจร มอเตอร์จะไหม้ได้ รวมทั้งอายุการใช้งานของมอเตอร์จะสั้นลง และยังมีผลต่อชุดการขนานมอสเฟตเพื่อที่จะช่วยกันแบ่งกระแสที่ไหลเข้ามอเตอร์ด้วย เพราะถ้าเกิดชุดการขนานมอสเฟตทนกระแสไม่ได้ มอสเฟตก็จะเกิดการระเบิดขึ้นได้ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าถ้าทำการขับรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้าด้วยความเร็วที่ 45 km/hr ถึงความเร็วสูงสุดที่ทำได้ 46 km/hr และมีน้ำหนักโหลดตั้งแต่ 700 kg เป็นต้นไปโดยใช้ระบบการควบคุมความเร็วของมอเตอร์แบบลูปเปิด (Open Loop) จะทำให้มอเตอร์จ่ายโหลดที่กำลังเกินพิกัดได้

5.7 การทดลองที่ 7 การทดสอบหาแรงบิดที่ใช้งาน ขณะได้รับโหลดเมื่อใช้การควบคุมความเร็วมอเตอร์แบบลูปเปิด (Open Loop)

5.7.1 ขั้นตอนการทดลอง

1.) ตรวจสอบสภาพรถให้เรียบร้อย และทำการชาร์จแบตเตอรี่ให้เต็มทุกลูก

2.) เตรียมเครื่องมือวัดความเร็ว, โวลต์มิเตอร์ และแอมป์มิเตอร์

3.) ขับรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้าที่ค่าความเร็วคงที่ 45 km/hr จากน้ำหนักของตัวรถประมาณ 550 kg (ในขณะ no-load) แล้วทำการเพิ่มน้ำหนักโหลดขึ้นไปอีกครั้งละ 50 kg จนถึง 250 kg ซึ่งจะได้น้ำหนักโหลดที่เพิ่มเข้าไปรวมกับน้ำหนักของตัวรถเป็น 600 kg, 650 kg, 700 kg, 750 kg และ 800 kg แล้วทำการจดบันทึกค่ากระแส แรงดันไฟฟ้า และความเร็วรถที่วัดได้ ในของแต่ละช่วงน้ำหนักโหลดที่ได้รับ

เอกสารนี้มีลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.) ทำการคำนวณหาค่าแรงบิดที่ใช้ในการขับโหลด จากสูตร

$$T_L = \frac{V_t \cdot I_a}{\omega} \quad \text{(N-m)}$$

โดยที่

$$\omega = \frac{1000}{(3600 \times r)} \times S \quad \text{(rad/sec)}$$

เมื่อ r = รัศมีของล้อรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้า (0.2 เมตร)

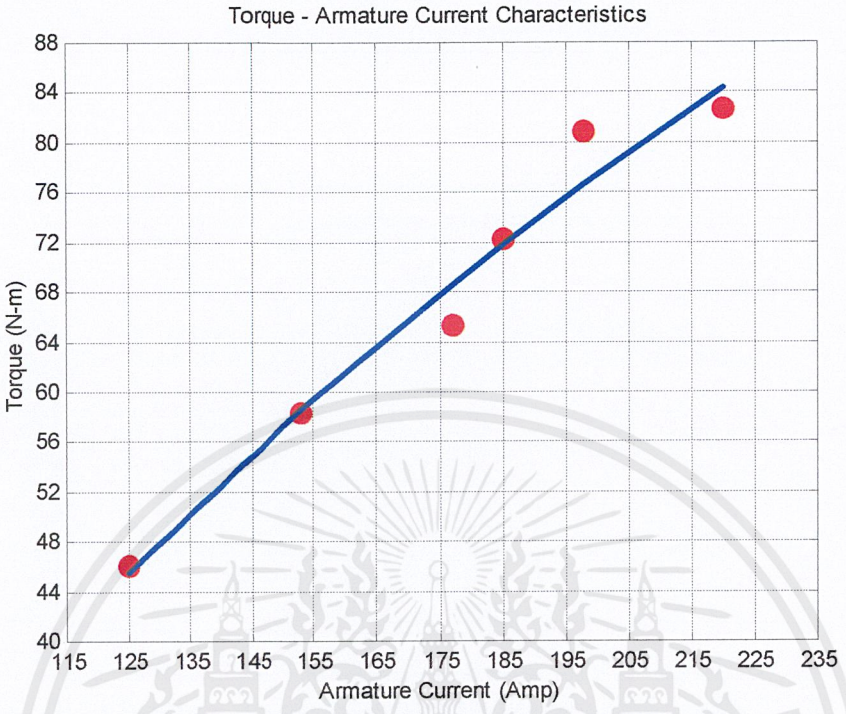
S = ความเร็วของรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้า (km / hr)

5.7.2 ผลการทดลองที่ 7

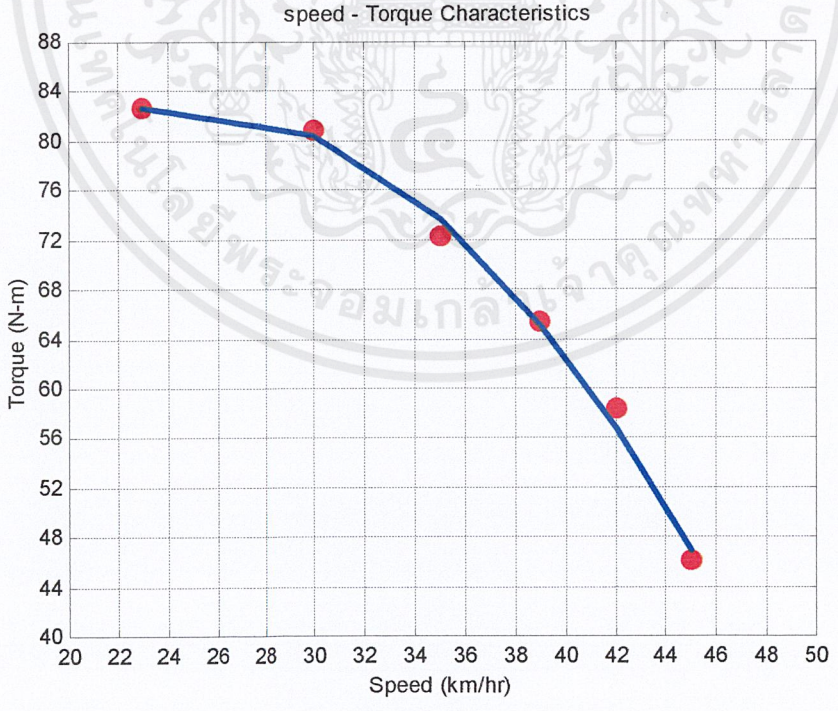
ครั้งที่	น้ำหนักโหลด (Kg)	ความเร็วรถ (km/hr)	กำลังไฟฟ้าป้อนเข้า			แรงบิดที่ใช้ขับโหลด (N - m)
			Volt	Amp	Watt	
0	550	45	23	125	2875	46
1	600	42	21.5	153	3290	58.33
2	650	39	20	177	3540	65.35
3	700	35	19	185	3515	72.30
4	750	30	17	198	3366	80.78
5	800	23	12	220	2640	82.64

ตารางที่ 5.5 ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

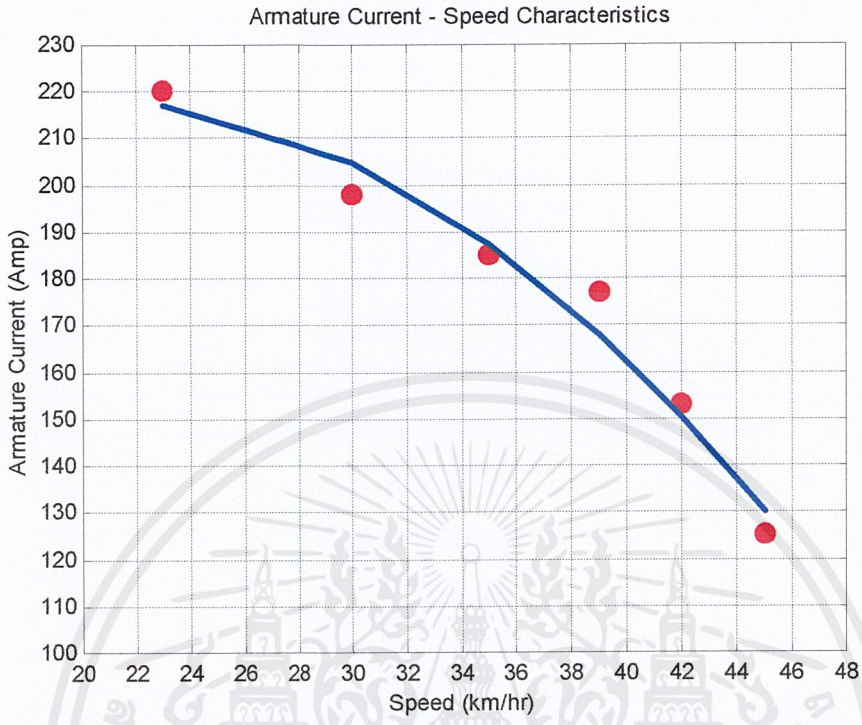


รูปที่ 5.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด กับกระแสอาเมเจอร์ขณะได้รับโหลด



รูปที่ 5.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด กับความเร็วรถขณะได้รับโหลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอาเมเจอร์ กับความเร็วรถขณะได้รับโหลด

5.7.3 สรุปผลการทดลองที่ 7

จากการทดสอบหาแรงบิดที่ใช้ในการขับโหลดภาระโดยใช้การควบคุมแบบลูปเปิด (Open loop) จะทำให้ได้แรงบิดที่ใช้ในการขับโหลดภาระสูงที่สุด ที่ความเร็วรถ 23 km /hr เนื่องจากพฤติกรรมของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบผสม ซึ่งต้องการแรงบิดในขณะเริ่มเดินสูง ดังที่ได้แสดงในรูปที่ 5.8 – 5.10 ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่า เมื่อขับรถด้วยความเร็วสูงสุดที่ 45 km/hr และได้รับน้ำหนักโหลดเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ลักษณะของกราฟที่ได้จะเป็นเส้นโค้ง ดังนั้นเมื่อป้อนน้ำหนักโหลดให้กับมอเตอร์ ก็จะทำให้มีกระแสป้อนเข้ามอเตอร์มีค่าสูงขึ้นเรื่อย แล้วรถจะมีความเร็วลดต่ำลง และถ้าเพิ่มโหลดขึ้นไปอีก กระแสป้อนเข้ามอเตอร์ก็จะสูงขึ้นกว่าปกติ ซึ่งทำให้เกิดการทำงานที่เกินพิกัดกำลัง (Over load) ส่งผลให้มอเตอร์ไหม้ได้ ซึ่งการควบคุมแบบ Open loop นั้นไม่สามารถคงที่กระแสไว้ที่พิกัดได้ เมื่อมอเตอร์ได้รับโหลดที่ 800 kg เป็นต้นไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.8 การทดลองที่ 8 การทดสอบหาอัตราการสิ้นเปลืองกำลังไฟฟ้าต่อความเร็วรถ ขณะได้รับโหลด เมื่อใช้การควบคุมความเร็วมอเตอร์แบบลูปปิด (Close Loop)

5.8.1 ขั้นตอนการทดลอง

1.) ทำการตรวจสอบสภาพรถ และทำการชาร์จแบตเตอรี่ให้เต็มทุกลูก

2.) เตรียมเครื่องมือวัดให้พร้อม โวลต์มิเตอร์, แอมป์มิเตอร์ และอุปกรณ์วัดความเร็ว

3.) ขับรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้าที่ความเร็วที่ความเร็วตั้งแต่ 0 – 45 km/hr ที่น้ำหนักโหลด 650 kg ต่อมาขับรถที่ความเร็ว 0 – 45 km/hr ที่น้ำหนักโหลด 700 kg และสุดท้ายขับรถที่ความเร็ว 0 – 45 km/hr ที่น้ำหนักโหลด 750 kg ตามลำดับ โดยมีน้ำหนักของตัวรถประมาณ 550 kg แล้วทำการจดบันทึกค่ากระแส และแรงดันไฟฟ้า ที่ค่าความเร็วต่างๆ กัน

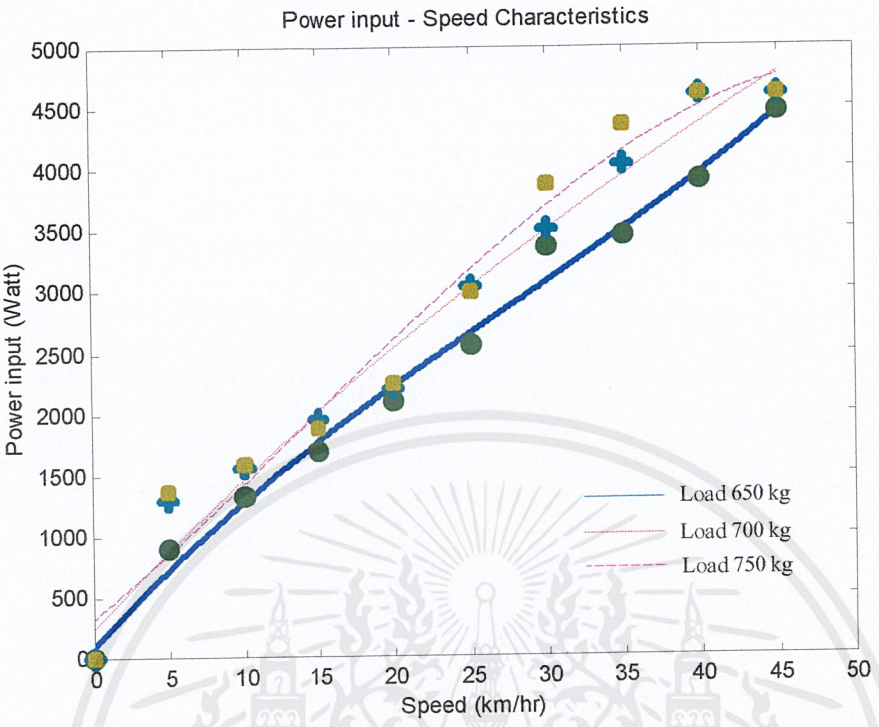
4.) ทำการคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าป้อนเข้าจากสูตร $P_{in} = V_t \cdot I_a$ ที่ความเร็วค่าต่างๆ

5.8.2 ผลการทดลองที่ 8

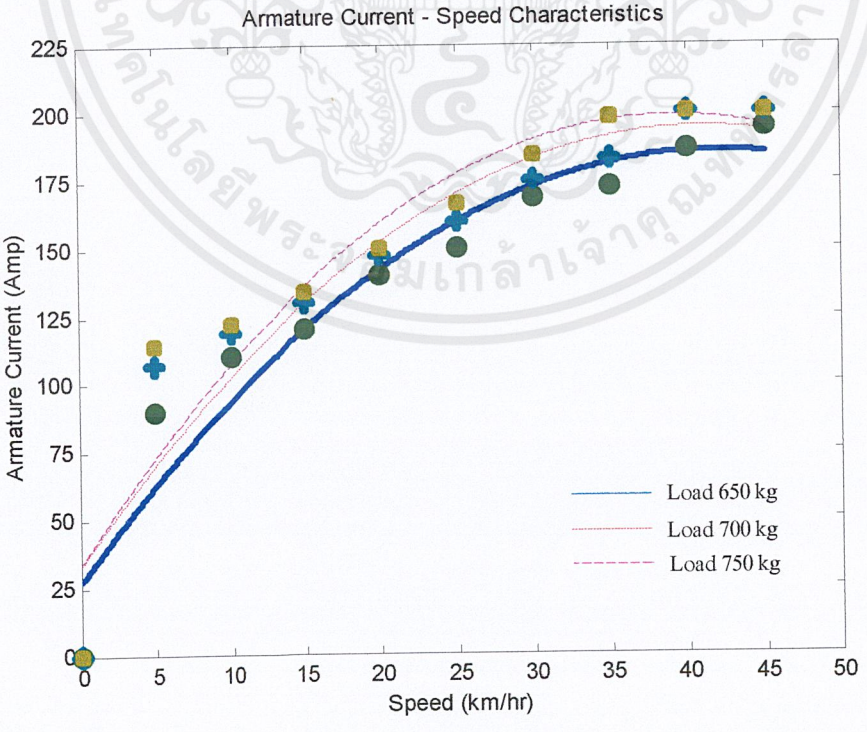
ความเร็วรถ (km / hr)	น้ำหนักโหลด 650 kg			น้ำหนักโหลด 700 kg			น้ำหนักโหลด 750 kg		
	Volt	Amp	Watt	Volt	Amp	Watt	Volt	Amp	Watt
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	10	90	900	12	107	1284	12	114	1368
10	12	110	1320	13	119	1547	13	122	1586
15	14	120	1680	15	130	1950	14	134	1876
20	15	140	2100	15	147	2205	15	150	2250
25	17	150	2550	19	160	3040	18	166	2988
30	20	168	3360	20	175	3500	21	184	3864
35	20	172	3440	22	183	4026	22	198	4356
40	21	186	3906	23	200	4600	23	200	4600
45	23	194	4462	23	200	4600	23	200	4600

ตารางที่ 5.6 ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.11 กราฟอัตราการสิ้นเปลืองกำลังไฟฟ้าต่อความเร็วขณะได้รับโหลด



รูปที่ 5.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอาร์เมเจอร์กับความเร็วรถ ขณะได้รับโหลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.8.3 สรุปผลการทดลองที่ 8

จากผลการทดลองในเรื่องของการทดสอบหาอัตราการสิ้นเปลืองกำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้าต่อความเร็วรถ จากรูปที่ 5.11 – 5.12 จะสามารถแสดงให้เห็นได้ว่า ในช่วงที่ขับรถด้วยความเร็วตั้งแต่ 0 – 45 กม. / ชม. รถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้าจะค่อยๆใช้กำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามลำดับ และในช่วงที่ขับรถด้วยความเร็วตั้งแต่ 40 – 45 กม / ชม. จะเห็นได้ว่าการใช้กำลังไฟฟ้าจะมีค่าสูงมากที่สุด โดยที่น้ำหนักโหลด 650 kg กำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้ายังไม่สูงเกินไปกว่าพิกัดกำลังที่ตัวมอเตอร์ ซึ่งมอเตอร์ที่ใช้ในการขับเคลื่อนรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้านี้มีพิกัด 4.5 KW แต่กำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้าเมื่อโหลด 650 kg มีค่าเท่ากับ 4462 watt หรือประมาณ 4.4 KW ซึ่งมอเตอร์ยังไม่จ่ายโหลดภาระเกินพิกัดกำลังไฟฟ้า แต่เมื่อทำการเพิ่มน้ำหนักโหลดไปที่ 700 kg – 750 kg แล้วขับรถด้วยความเร็ว 40 – 45 km/hr จะสังเกตเห็นได้ว่ากำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้าจะมีค่าสูงมาก แต่มอเตอร์ก็ยังไม่เกิดการจ่ายโหลดภาระเกินพิกัดกำลัง ไม่เหมือนกับการทดลองที่ 7 ที่มอเตอร์เกิดการจ่ายโหลดภาระเกินพิกัดกำลัง ที่เป็นเช่นนี้ก็เนื่องมาจากกระแสที่ป้อนเข้ามอเตอร์จะเป็นตัวกำหนดการทำงานว่าอยู่ในพิกัดหรือไม่ โดยเกิดจากการตั้งค่าอัตราขยายของวงจรควบคุมป้อนกลับแบบพีไอ ที่พิกัดกระแสของมอเตอร์ที่ใช้ในการขับเคลื่อนรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้า ซึ่งวงจรควบคุมป้อนกลับแบบพีไอจะมองเห็นว่ามอเตอร์ทำงานเกินพิกัดกำลัง เมื่อกระแสป้อนเข้าสูงเกินกว่ากระแสที่พิกัดตัวมอเตอร์ประมาณ 1.2 เท่าขึ้นไป โดยกระแสที่พิกัดมอเตอร์ 195 แอมป์ ถ้ากระแสที่ป้อนเข้ามอเตอร์มีค่าเกินกว่า $195 \times 1.2 = 235$ แอมป์ วงจรควบคุมป้อนกลับแบบพีไอจะทำการควบคุมกระแสไว้ให้คงที่ สำหรับโครงงานนี้ถ้ากระแสที่ป้อนเข้ามอเตอร์มีค่าเกินกว่า 200 แอมป์ วงจรควบคุมป้อนกลับแบบพีไอจะทำการควบคุมกระแสไว้ให้คงที่ที่ 200 แอมป์ ดังนั้นถ้าหากมอเตอร์เกิดการทำงานที่เกินพิกัด วงจรควบคุมป้อนกลับแบบพีไอจะเป็นตัวควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไม่ให้เสียหาย เนื่องจากกระแสเกินพิกัด ซึ่งจะทำการควบคุมกระแสป้อนเข้าขดลวดอาเมเจอร์ (Ia) ไม่ให้เกินพิกัดนั่นเอง สามารถพิจารณาได้จากตารางผลการทดลอง และกราฟที่ได้ ซึ่งกระแสจะคงที่ที่ 200 แอมป์ เมื่อเกิดการโอเวอร์โหลด

5.9 การทดลองที่ 9 การทดสอบหาแรงบิดที่ใช้งาน ขณะได้รับโหลด เมื่อใช้การควบคุมความเร็วมอเตอร์แบบลูปปิด (Close Loop)

5.9.1 ขั้นตอนการทดลอง

1.) ตรวจสอบสภาพรถให้เรียบร้อย และทำการชาร์จแบตเตอรี่ให้เต็มทุกลูก

2.) เตรียมเครื่องมือวัดความเร็ว, โวลต์มิเตอร์ และแอมป์มิเตอร์

3.) ขับรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้าที่ค่าความเร็วคงที่ 45 km/hr จากน้ำหนักของตัวรถประมาณ 550 kg (ในขณะ no-load) แล้วทำการเพิ่มน้ำหนักโหลดขึ้นไปอีกครั้งละ 50 kg จนถึง 250 kg ซึ่งจะได้

เอกสารนี้สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำหนักโหลดที่เพิ่มเข้าไปรวมกับน้ำหนักของตัวรถเป็น 600 kg, 650 kg, 700 kg, 750 kg และ 800 kg แล้วทำการจดบันทึกค่ากระแส แรงดันไฟฟ้า และความเร็วของรถที่วัดได้

4.) ทำการคำนวณหาค่าแรงบิดที่ใช้ในการขับโหลด จากสูตร

$$T_L = \frac{V_t \cdot I_a}{\omega} \qquad \text{(N-m)}$$

โดยที่

$$\omega = \frac{1000}{(3600 \times r)} \times S \qquad \text{(rad/sec)}$$

เมื่อ r = รัศมีของล้อรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้า (0.2 เมตร)

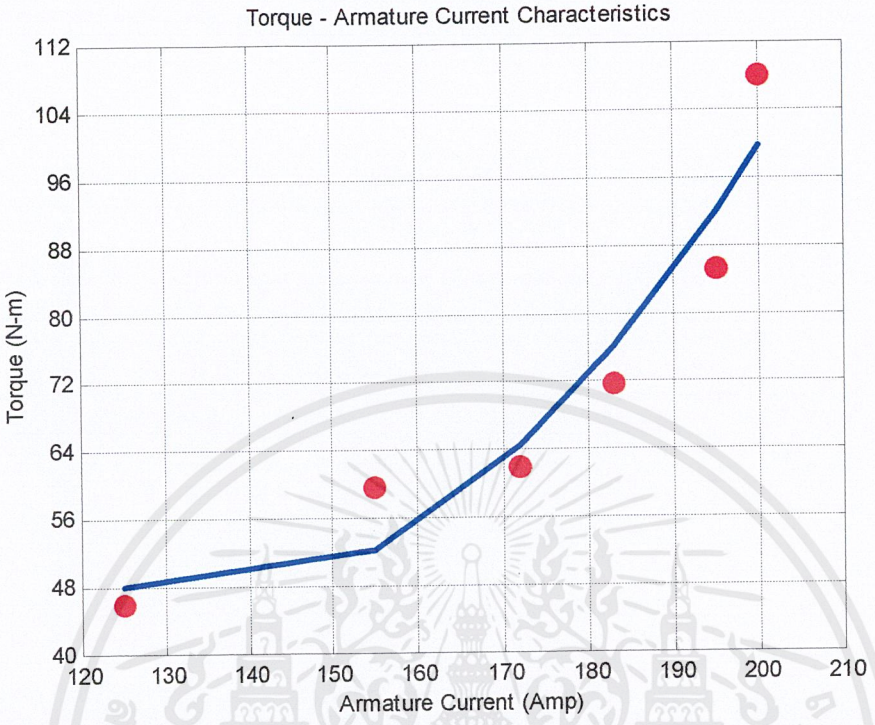
S = ความเร็วของรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้า (km / hr)

5.9.2 ผลการทดลองที่ 9

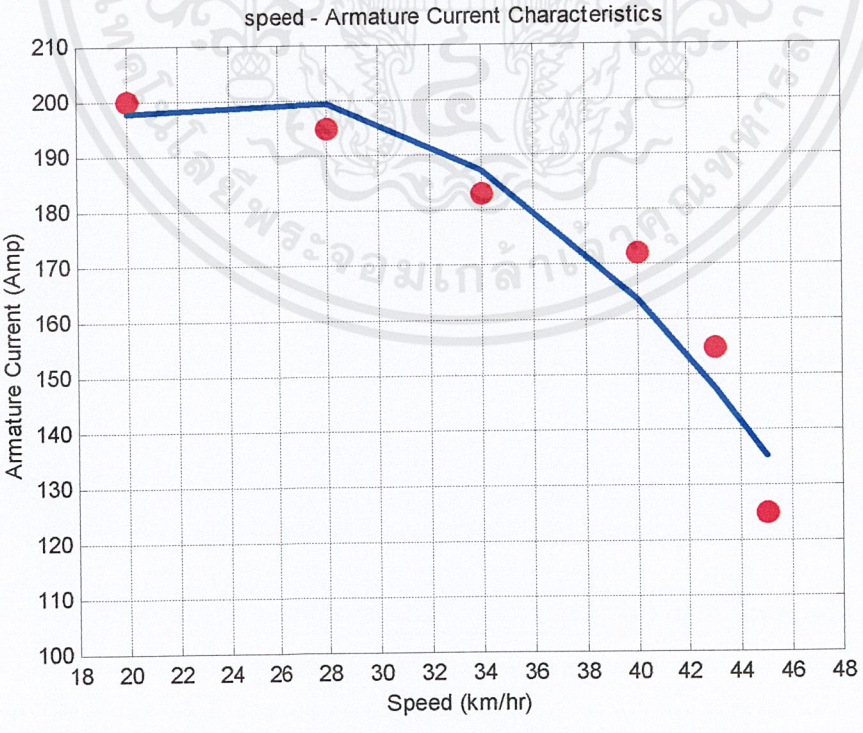
ครั้งที่	น้ำหนักโหลด (Kg)	ความเร็วรถ (km/hr)	กำลังไฟฟ้าป้อนเข้า			แรงบิดที่ใช้ขับโหลด (N - m)
			Volt	Amp	Watt	
0 (no-load)	550	45	23	125	2875	46
1	600	43	22	155	3410	59.72
2	650	40	20	172	3440	61.92
3	700	34	18.5	183	3386	71.70
4	750	28	17	195	3315	85.24
5	800	20	15	200	3000	108

ตารางที่ 5.7 ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

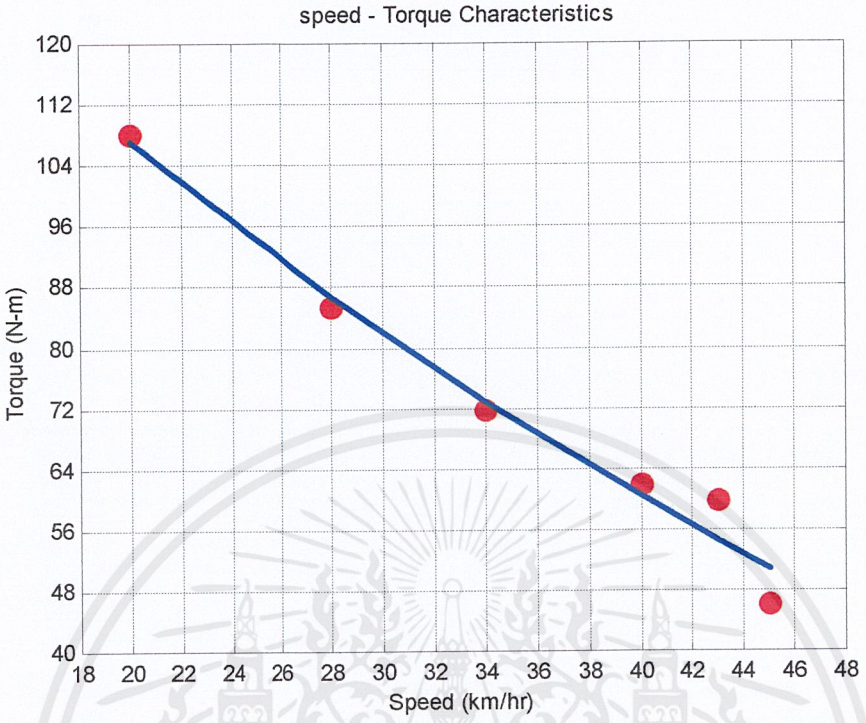


รูปที่ 5.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด กับกระแสอาเมเจอร์ขณะได้รับโหลด



รูปที่ 5.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอาเมเจอร์ กับความเร็วรถขณะได้รับโหลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด กับความเร็วรถขณะได้รับโหลด

5.9.3 สรุปผลการทดลองที่ 9

จากการทดสอบหาแรงบิดที่ใช้ในการขับโหลดภาระที่ค่าความเร็วต่างๆนั้นจะได้ค่าแรงบิดสูงสุด ที่ความเร็วรถ 5 km /hr เนื่องจากพฤติกรรมของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบผสม ซึ่งต้องการแรงบิดในขณะเริ่มเดินสูง และจากกราฟการทดสอบการหาแรงบิดที่ใช้ในการขับโหลดภาระ เมื่อทำการควบคุมความเร็วมอเตอร์แบบลูปปิด (Close loop) ดังที่ได้แสดงในรูปที่ 5.13 ถึง 5.15 จะสังเกตเห็นได้ว่า เมื่อขับรถด้วยความเร็ว 45 km/hr และได้รับน้ำหนักโหลดเพิ่มสูงขึ้นไปเรื่อย จะทำให้ความเร็วของรถลดลง กระแสที่ป้อนให้กับมอเตอร์จะมีค่าสูงขึ้น และแรงบิดที่ใช้ในการขับโหลดก็จะมากตามไป เพราะกระแสจะแปรผันตามแรงบิด ลักษณะของกราฟที่ได้จะคล้ายกันกับการทดลองที่ 7 ซึ่งเป็นการทดลองในขณะได้รับโหลด โดยใช้การควบคุมความเร็วแบบลูปเปิด แต่จะแตกต่างกันที่จะสามารถทำการจำกัดกระแสที่ไหลเข้ามอเตอร์ได้ ด้วยอาศัยหลักการของวงจรควบคุมป้อนกลับแบบพีไอจะทำการควบคุมกระแสไว้ให้คงที่ที่ 200 แอมป์ เมื่อมอเตอร์เกิดการทำงานที่เกินพิกัดกำลังขึ้น เพื่อป้องกันไม่ให้มอเตอร์ได้รับความเสียหายนั่นเอง และแรงบิดตอนเริ่มหมุนก็ยังมีค่ามากกว่าด้วยเมื่อเปรียบเทียบกับขณะ Open loop

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.10 สรุปประสิทธิภาพของรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้า

ประสิทธิภาพของรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้าโดยรวม เมื่อคิดที่ความเร็วเฉลี่ยที่ 40 km / hr เพราะเป็นความเร็วที่เหมาะสมในการใช้งานมากที่สุด ดังนั้นสามารถหาประสิทธิภาพได้จากการขับรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้าด้วยความเร็ว 30 km / hr จากการทดสอบหาอัตราการสิ้นเปลืองกำลังไฟฟ้าต่อความเร็วรถ ในขณะได้รับโหลดที่ 750 kg ซึ่งได้รวมน้ำหนักของตัวรถแล้ว และใช้การควบคุมความเร็วมอเตอร์แบบลูปปิด ที่เลือกใช้น้ำหนักโหลดที่ 750 kg เพราะจะใกล้เคียงกับการใช้งานจริงจะได้แรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าเท่ากับ 21 โวลท์ และกระแส 184 แอมป์ เมื่อได้ทำการวัดแรงดันตกคร่อมชุดอุปกรณ์สวิตช์ชิ่ง (แรงดันตกคร่อมมอสเฟท) ทั้ง 28 ตัวนั้น จะมีแรงดันตกคร่อมอยู่ 6 โวลท์ สามารถหาประสิทธิภาพของรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้าได้จากสมการดังนี้

กำลังงานสูญเสียในชุดอุปกรณ์สวิตช์ชิ่ง (Switching Loss)

$$P_{loss} = 6 \times 184 = 1104 \quad \text{วัตต์}$$

กำลังงานสูญเสียที่ความต้านทานขนาน (R-Shunt)

$$P_{R-loss} = 12.375mV \times 184 = 2.77 \quad \text{วัตต์}$$

กำลังไฟฟ้าป้อนเข้า (Power input)

$$P_{in} = 21 \times 184 = 3864 \quad \text{วัตต์}$$

หรือสามารถหาได้จาก

$$Duty = 21/36 = 0.583\%$$

$$P_{in} = D \times V_s \times I_s = D \times V_s \times I_a$$

$$= 0.5833 \times 36 \times 184 = 3863 \quad \text{วัตต์}$$

กำลังไฟฟ้าที่จ่ายออก (Power output)

$$P_o = P_{in} - P_{loss} - P_{R-loss}$$

$$= 3864 - 1104 - 2.77$$

$$= 2757.23 \quad \text{วัตต์}$$

∴ ประสิทธิภาพของรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้า จะได้ดังนี้

$$\eta = \frac{P_o}{P_{in}} = \frac{2757.23}{3864} = 0.713 \quad \text{หรือ} \quad 71.35\%$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6
บทสรุป และ วิจารณ์ผล

6.1 บทสรุป

จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าการขับเคลื่อนรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้า หรือการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงนั้น จะมีขั้นตอนการทำงานดังต่อไปนี้

6.1 ตรวจสอบแบตเตอรี่ที่นำมาใช้ ว่าอยู่ในสภาวะพร้อมใช้งานหรือไม่ และตรวจสอบระดับน้ำกลั่นของแบตเตอรี่ว่าแห้งหรือไม่ด้วย ถ้าแห้งควรเติมให้เรียบร้อย

6.2 ทำการบิดสวิตช์กุญแจเปิด - ปิดรถไฟฟ้า และเลือกตำแหน่งของรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้าว่าจะให้เดินหน้า หรือถอยหลัง จาก Selector switch

6.3 ทำการบิดคันเร่งเพื่อให้ได้ความเร็วตามต้องการ ซึ่งถ้าเป็นการควบคุมความเร็วมอเตอร์แบบลูปเปิด (Open loop) จะไม่สามารถควบคุมกระแสป้อนเข้ามอเตอร์ได้ในกรณีที่ได้รับน้ำหนักโหลดมากกว่า 750 kg ขึ้นไป ซึ่งกระแสที่มอเตอร์ได้รับนี้จะมีค่าที่สูงมากจนเกินพิกัดกระแสที่ตัวมอเตอร์จะทนได้ และในที่สุดมอเตอร์ก็จะไหม้เสียหาย และถ้าใช้การควบคุมความเร็วมอเตอร์แบบลูปปิด (Close loop) เมื่อนำไปทำการขับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง จะเกิดค่ากระแสจริง (I_{actual}) กลับมาในรูปของแรงดันโดยใช้วงจรตรวจจับกระแส (Current sensor) จะเรียกแรงดันนี้ว่า $V_{feedback}$ ส่งไปเข้าวงจรควบคุมแบบพีไอ (PI-control) เพื่อที่จะรักษาระดับกระแสที่จ่ายให้กับโหลดให้คงที่ โดยการนำ $V_{feedback}$ มาทำการเปรียบเทียบกับ V_{ref} ที่ตั้งไว้ที่คันเร่ง หากแรงดันทั้งสองมีค่าไม่เท่ากัน วงจรควบคุมป้อนกลับแบบพีไอคอนโทรล ก็จะทำการสร้างสัญญาณไปตัดกับสัญญาณรูปฟันเลื่อย (Saw tooth) เพื่อทำการปรับเปลี่ยนค่าดิวตี้ไซเคิ้ล (Duty cycle) ที่จะทำให้ได้ค่า $V_{feedback}$ เท่ากันกับ V_{ref} โดยจะมีการส่งค่า $V_{feedback}$ มาเปรียบกับ V_{ref} อยู่ตลอดเวลา ซึ่งจะทำให้ค่ากระแสจริง (I_{actual}) มีค่าคงที่ และค่าของแรงบิดก็จะคงที่ด้วย ซึ่งถ้าเป็นการควบคุมความเร็วแบบลูปเปิด (Open Loop) ซึ่งจะไม่มีการรักษาระดับกระแสที่จ่ายให้กับโหลดให้มีค่าคงที่ โดยแค่จะนำสัญญาณพีดับบลิวเอ็มที่ได้จากชุดกำเนิดสัญญาณพีดับบลิวเอ็ม (PWM Generator) ไปเข้าชุดขับนำเกต และแยกกราวด์ แล้วส่งไปที่อุปกรณ์สวิตช์ชิ่ง (มอสเฟต) เพื่อนำไปทำการขับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเพียงเท่านั้น

จะเห็นได้ว่าการที่เราใช้ระบบควบคุมป้อนกลับแบบพีไอ (PI-Controller) ซึ่งเป็นการควบคุมความเร็วมอเตอร์แบบลูปปิด มาควบคุมการขับเคลื่อนรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้าทำให้สามารถควบคุมกระแสที่ป้อนเข้ามอเตอร์ได้ง่าย โดยการนำสัญญาณกระแสจริง กับกระแสอ้างอิงมาเปรียบเทียบกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อปรับระดับกระแสให้คงที่ตามกระแสอ้างอิง ในเวลาที่ได้รับน้ำหนักโหลดเพิ่มขึ้น อีกทั้งยังสามารถเพิ่มการป้องกันแบบต่างๆ ได้อีก สำหรับในโครงงานนี้ที่เลือกใช้ได้แก่ วงจรป้องกันกระแสเกิน และวงจรป้องกันอุณหภูมิเกิน ซึ่งจะเป็นการป้องกันมอสเฟทไม่ให้รับกระแสมากเกินที่ตัวมันจะทนได้ ไม่ทำให้มอสเฟทเกิดการระเบิดขึ้น ในกรณีที่มีขาเดรน และซอร์ส ลัดวงจรถึงกัน

6.2 วิจารณ์

จากผลการทดสอบจะเห็นว่า ความเร็วสูงสุดที่ทำได้ คือ 46 km/hr ระยะเวลาที่รถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้าสามารถวิ่งใช้งานได้ คือ 45 นาที ระยะเวลาที่รถวิ่งใช้งานได้นั้นยังไม่ดีเท่าที่ควร วิ่งใช้งานได้ระยะเวลาที่น้อยเกินไป เพราะขนาดพิกัดกำลังของมอเตอร์ที่ใช้ในโครงงานนั้นกินกระแสสูงมาก จึงทำให้พลังงานไฟฟ้าในแบตเตอรี่หมดเร็วขึ้น และถ้าขับรถโดยใช้การควบคุมความเร็วมอเตอร์แบบลูปเปิด เมื่อทำการเพิ่มน้ำหนักโหลดไปที่ 700 kg – 750 kg แล้วขับรถด้วยความเร็ว 40 – 45 km/hr กำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้าจะมีค่าสูงมาก ซึ่งเกินกว่าขนาดพิกัดกำลังของตัวมอเตอร์ มันจะมีผลทำให้มอเตอร์ที่ใช้ในการขับเคลื่อนรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้าจ่ายโหลดภาระที่เกินพิกัดกำลัง ทำให้มีกระแสป้อนเข้ามอเตอร์สูงกว่าที่พิกัด ส่งผลกระทบต่ออุณหภูมิของมอเตอร์ก็จะสูงขึ้น ซึ่งถ้าเกินกว่าจุดที่ฉนวนจะทนได้ก็จะทำให้ฉนวนเสียหาย และเกิดการลัดวงจร มอเตอร์จะไหม้ได้ แต่ถ้าทำการขับรถโดยใช้การควบคุมความเร็วมอเตอร์แบบลูปปิด เมื่อทำการเพิ่มน้ำหนักโหลดไปที่ 700 kg – 750 kg แล้วขับรถด้วยความเร็ว 40 – 45 km/hr กำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้าจะมีค่าสูงมาก แต่มอเตอร์ก็ยังไม่เกิดการจ่ายโหลดภาระเกินพิกัดกำลัง ที่เป็นเช่นนี้ก็เนื่องมาจากกระแสที่ป้อนเข้ามอเตอร์จะเป็นตัวกำหนดการทำงานว่าอยู่ในพิกัดหรือไม่ โดยเกิดจากการตั้งค่าอัตราขยายของวงจรควบคุมป้อนกลับแบบพีไอ ที่พิกัดกระแสของมอเตอร์ที่ใช้ในการขับเคลื่อนรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้า ซึ่งวงจรควบคุมป้อนกลับแบบพีไอจะมองเห็นว่ามอเตอร์ทำงานเกินพิกัดกำลัง ถ้ากระแสที่ป้อนเข้ามอเตอร์มีค่าเกินกว่า 200 แอมป์ วงจรควบคุมป้อนกลับแบบพีไอจะทำการควบคุมกระแสไว้ให้คงที่ที่ 200 แอมป์ ดังนั้นถ้าหากมอเตอร์เกิดการทำงานที่เกินพิกัด วงจรควบคุมป้อนกลับแบบพีไอจะเป็นตัวควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไม่ให้เสียหาย เนื่องจากกระแสเกินพิกัด ซึ่งจะทำการควบคุมกระแสป้อนเข้าขดลวดอาเมเจอร์ (Ia) ไม่ให้เกินพิกัด และสามารถรับน้ำหนักโหลดได้สูงสุด 800 kg

6.3 ปัญหาต่างๆ ที่ได้ประสบมา

จากการที่ได้ทำโครงงานรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้ามานั้น ปัญหาต่างๆ นั้นมีหลายด้านดังนี้

- คาดความรู้ความเข้าใจในการออกแบบ การทำงานของแต่ละวงจร และศึกษาระบบต่างๆ เช่น แหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่ง ,การเดินหน้า – ถอยหลังของรถ, การตรวจจับกระแส เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- อุปกรณ์ในการสวิตช์ชิ่งเลือกใช้มอสเฟตถึง 28 ตัวทำให้เกิดปัญหามาก เพราะมอสเฟตทุกตัวจะต้องนำกระแสพร้อมกัน และคุณสมบัติจะต้องใกล้เคียง ไม่เช่นนั้นมอสเฟตจะระเบิดได้

- การตั้งอัตราขยายของวงจรควบคุมป้อนกลับแบบพีไอทำได้ยาก ซึ่งใช้เวลานานกว่าจะได้จุดที่เหมาะสมที่สุดที่จะทำการจำกัดกระแสได้

6.4 แนวทางในการพัฒนา

จากผลการทดสอบจะเห็นว่ารถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้าที่สร้างขึ้นนี้ ยังมีส่วนที่ไม่สมบูรณ์อยู่อีกมาก ควรที่จะได้รับการแก้ไข และพัฒนาต่อไปในอนาคตดังนี้คือ

- การเลือกมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมาใช้ในโครงงานนี้ มีขนาดพิกัดกำลังที่น้อยเกินไป ไม่เหมาะสมกับการที่จะต้องนำมาใช้กับรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้าที่มีโครงสร้าง และน้ำหนักที่มาก ซึ่งโครงสร้างของรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้าที่ไม่มีความสมดุล ช่วงล่าง และล้อไม่ดีไม่ได้มาตรฐาน ถ้าหากได้ทำการปรับตั้งศูนย์ถ่วงล้อให้ดีกว่านี้ และทำการเปลี่ยนขนาดพิกัดกำลังของมอเตอร์ใหม่ ก็จะทำให้ได้ความเร็วสูงสุดของรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้ามีค่าเพิ่มสูงขึ้น

- สามารถวิ่งใช้งานได้ระยะเวลาที่น้อยเกินไป เพราะขนาดพิกัดกำลังของมอเตอร์ที่ใช้ในโครงงานนั้นกินกระแสสูงมาก ดังนั้นถ้าหากมี แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cell panels) โดยทำการติดตั้งเข้าไปแทนหลังคารถมันจะทำการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ เป็นพลังงานไฟฟ้าเพื่อช่วยเสริมพลังงานไฟฟ้าในแบตเตอรี่ได้บ้างในบางเวลาก็จะทำให้รถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้าสามารถวิ่งใช้งานได้ระยะเวลาที่ยาวนานยิ่งขึ้น

- ควรเพิ่มระบบป้องกันอุณหภูมิเกินในการประจุแบตเตอรี่ เพราะหากอุณหภูมิที่แบตเตอรี่สูงเกินไป จะทำให้แบตเตอรี่เสียหายได้

- มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ในการขับเคลื่อนรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้า ควรจะใช้มอเตอร์ที่มีแรงดันสูงกว่าตัวนี้ เพื่อที่จะได้ลดกระแสที่มอเตอร์ต้องการลง

- อุปกรณ์สวิตช์ ควรจะใช้ IGBT โมดุลที่ทนกระแสได้สูง เพราะจะได้ลดปัญหาในการขนานอุปกรณ์สวิตช์จะได้ทำให้การควบคุมมีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น

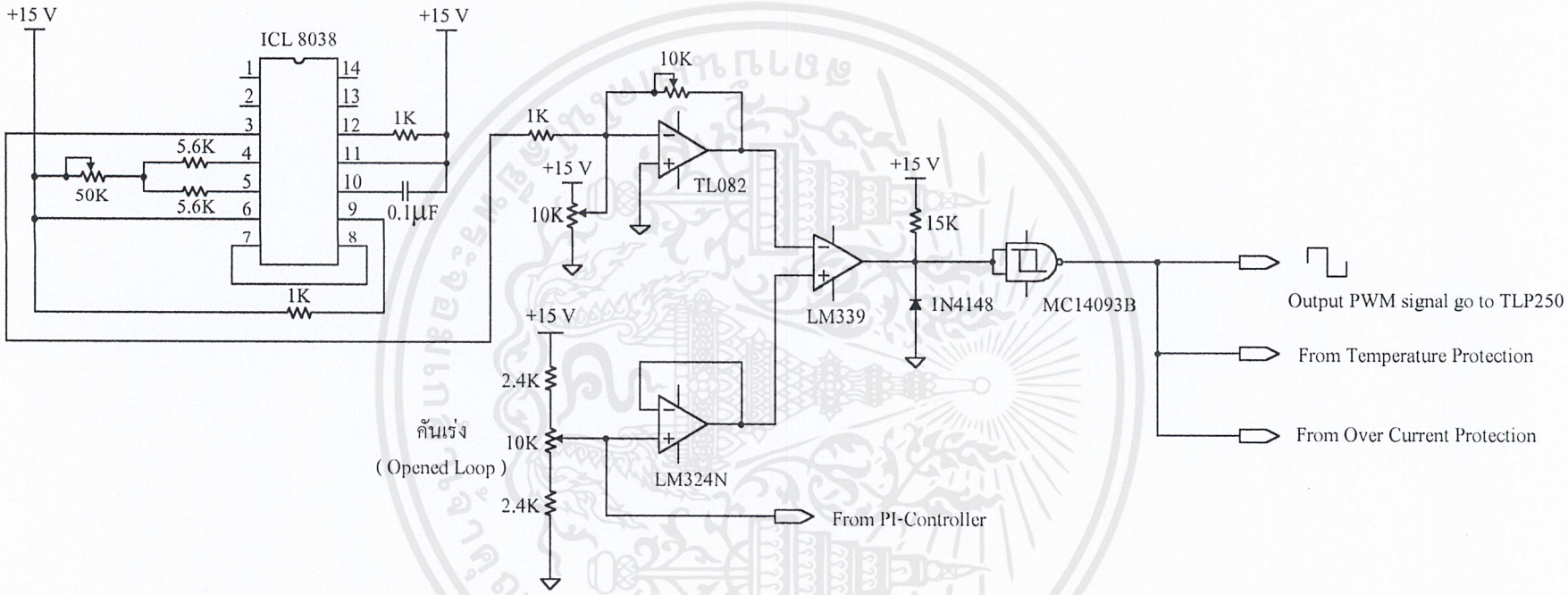
- ควรมีระบบการเบรคแบบจ่ายพลังงานคืน กลับเข้าสู่แหล่งจ่าย (Regenerative breaking) เพื่อเป็นการประหยัดพลังงานที่ใช้ในการขับเคลื่อนรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้าทำให้รถวิ่งได้ระยะเวลานานขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

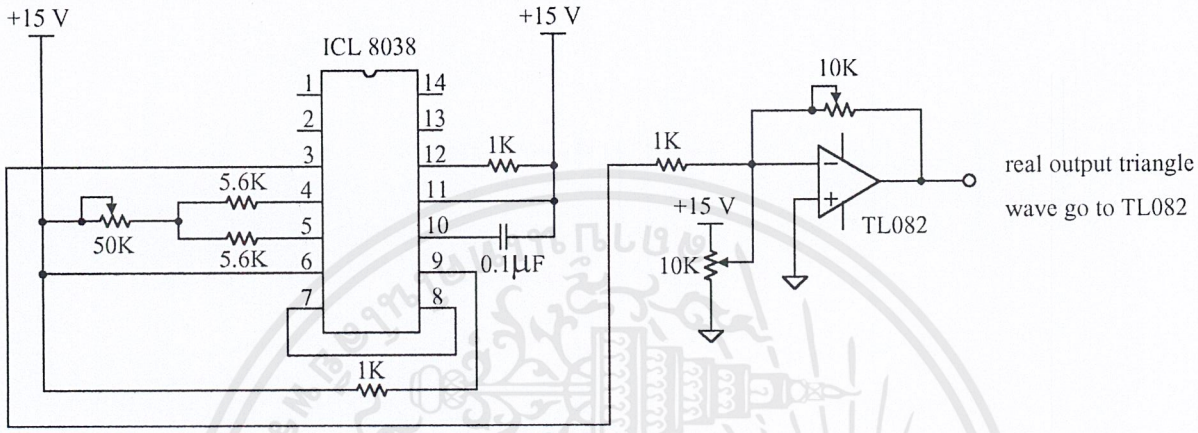
ภาคผนวก ก.

Circuit Electric Tuk - Tuk

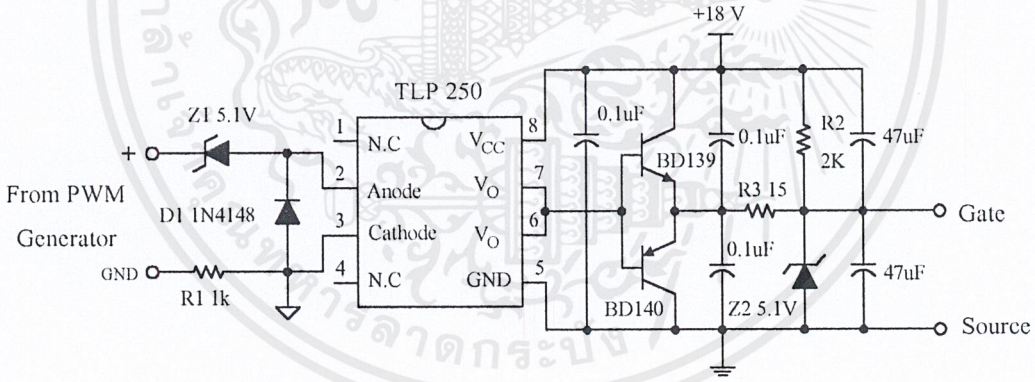
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



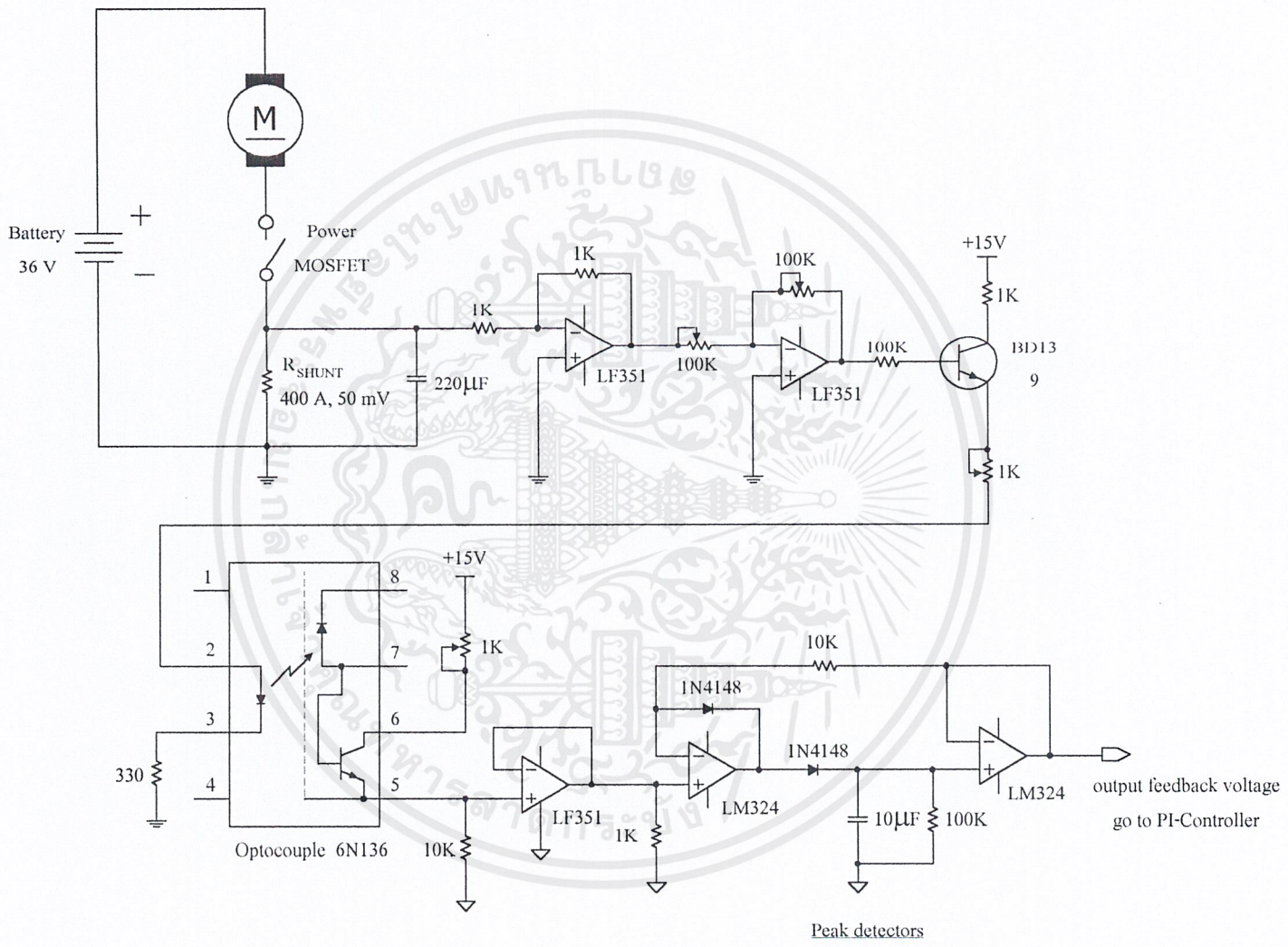
วงจรกำเนิดสัญญาณพีดับบลิวเอ็ม (PWM Generator)



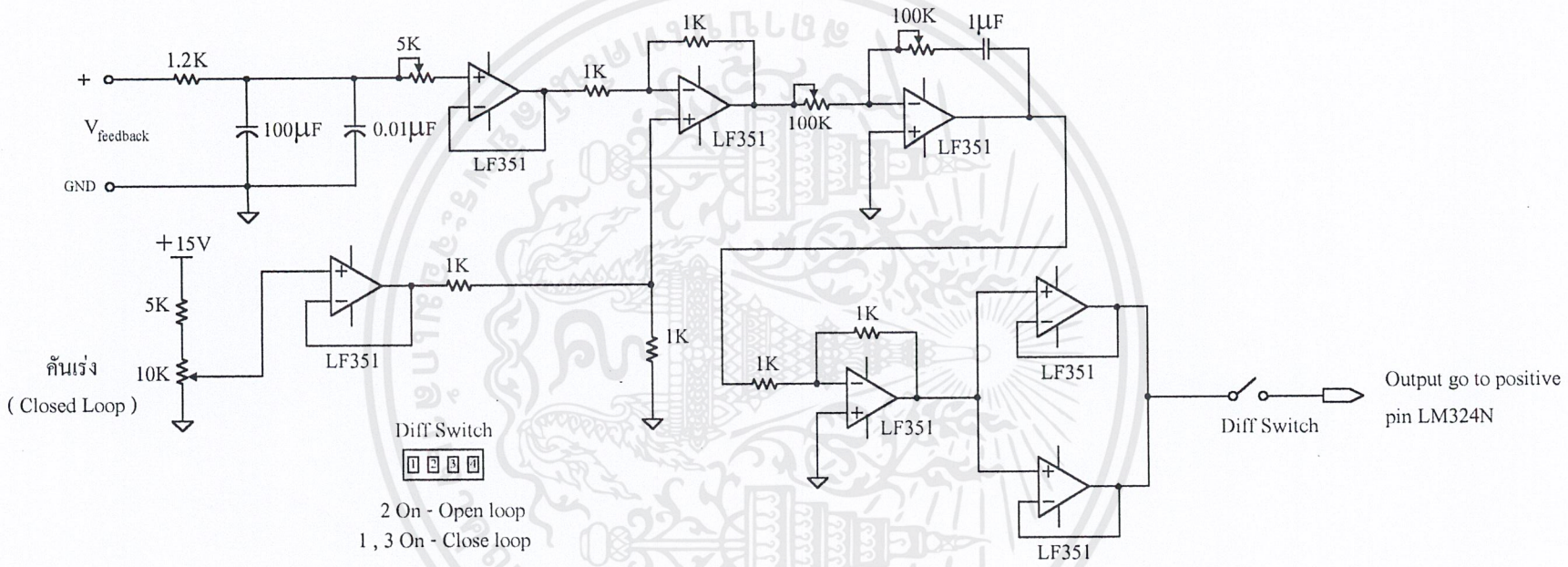
วงจรสร้างสัญญาณสามเหลี่ยม (Triangular wave from circuit)



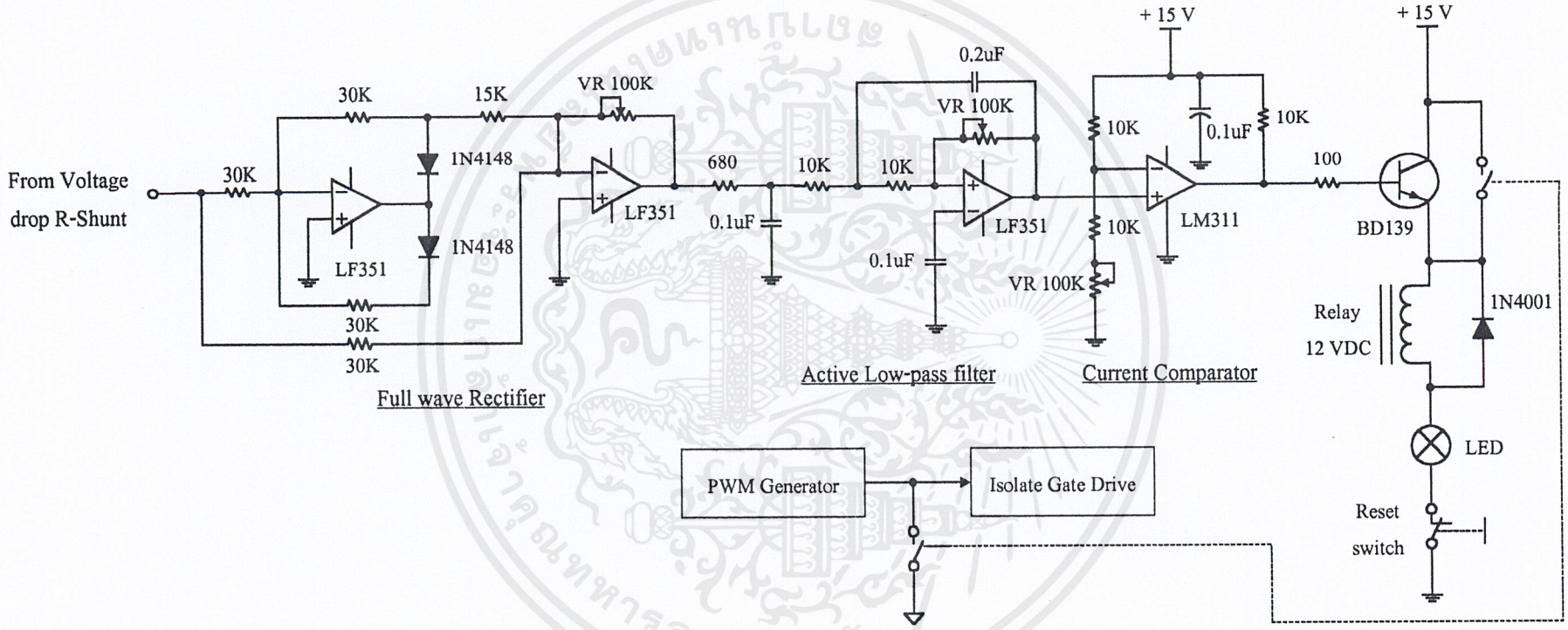
วงจรขับนำเกต และแยกกราวด์ (Isolate Gate Drives)



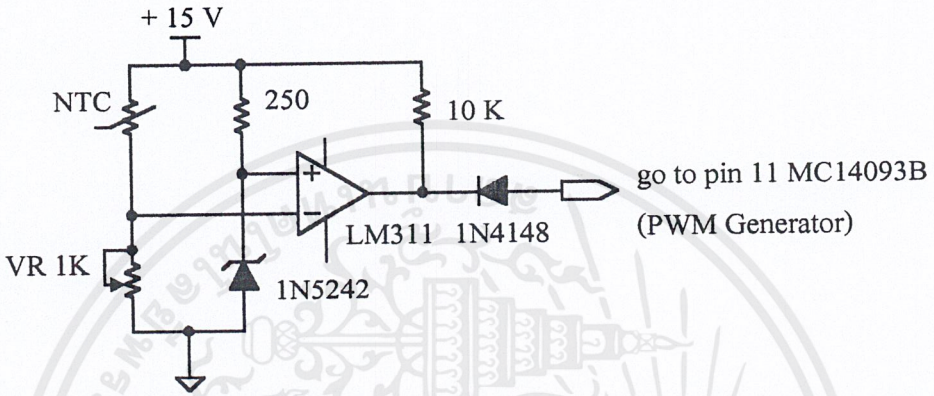
วงจรตรวจจับกระแส (Current Sensor)



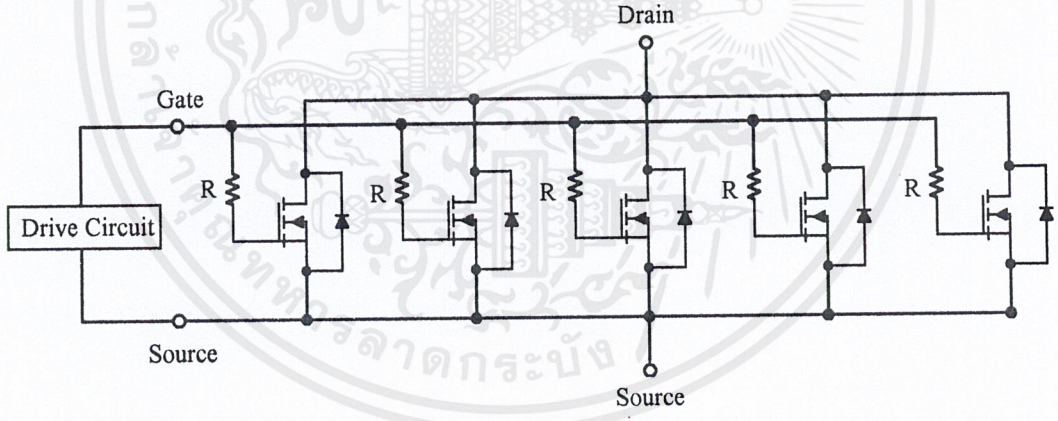
วงจรควบคุมป้อนกลับแบบพีไอ (PI-Controller)



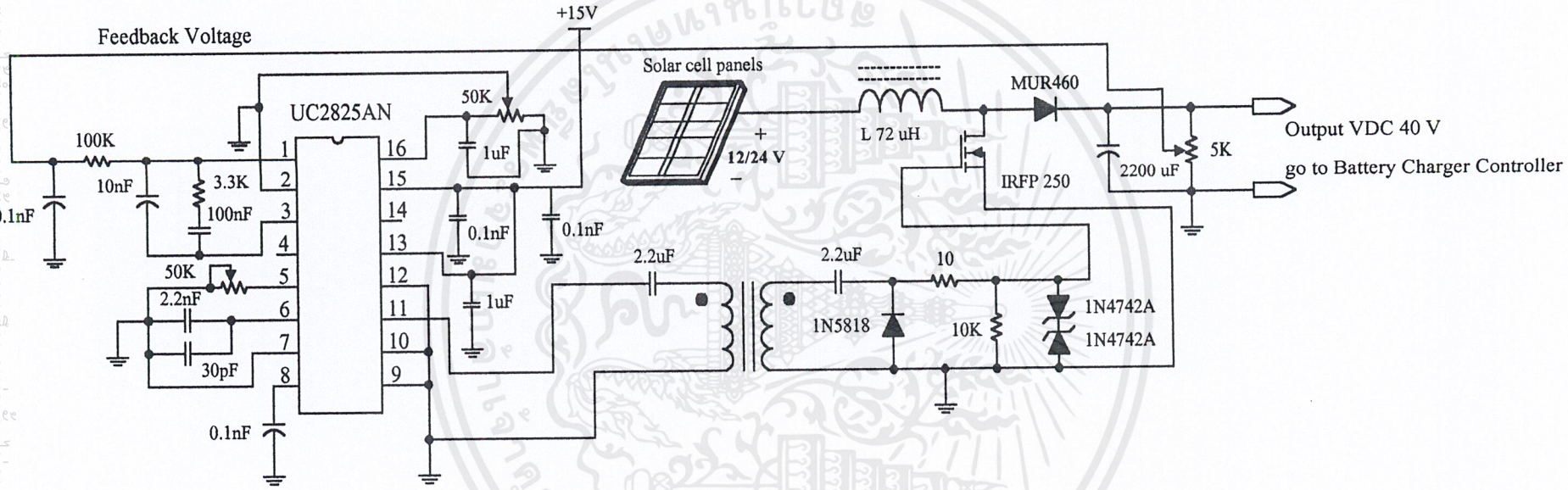
วงจรป้องกันกระแสเกิน (Over Current Protection)



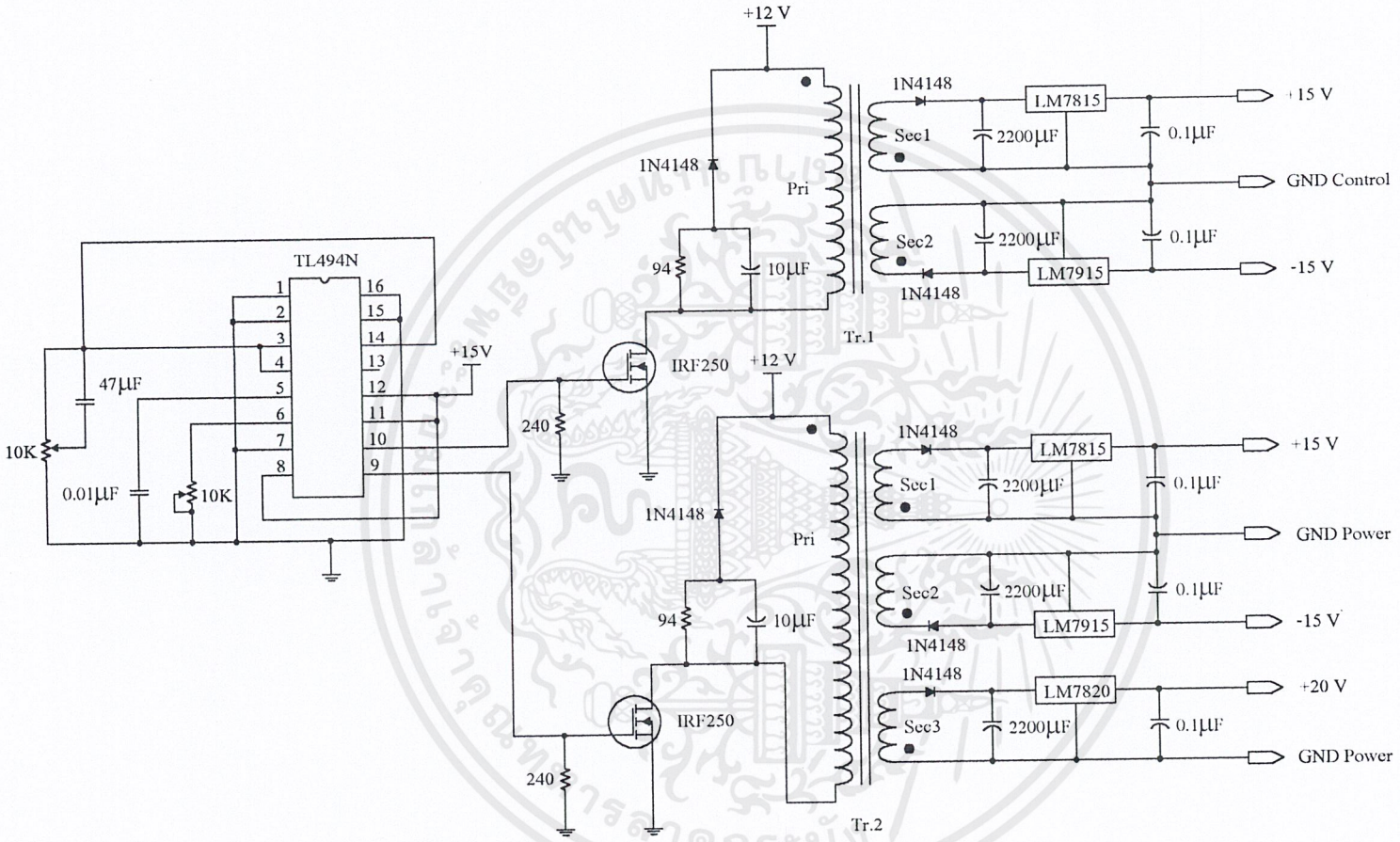
วงจรป้องกันอุณหภูมิเกิน (Over Temperature Protection)



ชุดการขนานมอสเฟท



วงจรยกระดับแรงดัน (Boost Converter)

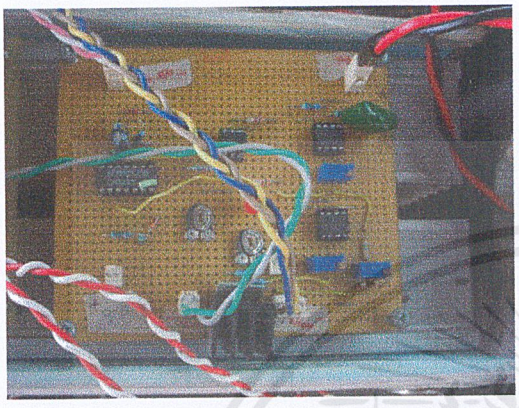


วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบสวิตช์ชิ่ง (Switching Power Supply)

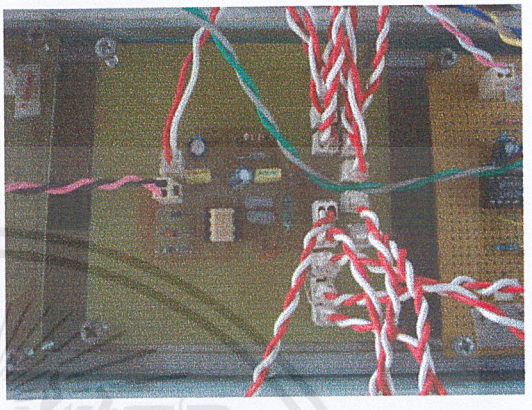
ภาคผนวก ข.

รูปส่วนประกอบต่างๆ ของรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้า

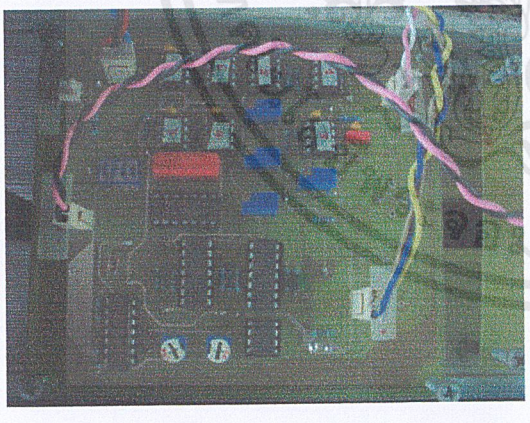
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



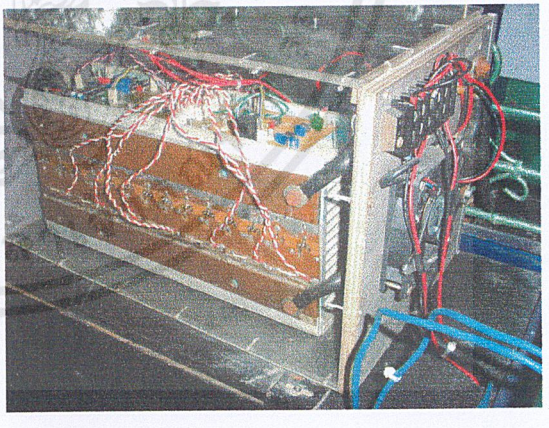
รูปวงจรตรวจจับกระแส (Current Sensor)



รูปวงจรขับเกต และแยกกราวด์



รูปวงจรป้อนกลับแบบพีไอ (PI-Controller)
วงจรกำเนิดสัญญาณ PWM



รูปวงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์และ
เมื่อประกอบเสร็จสมบรูณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปเครื่องมือวัด และทดสอบความเร็ว กับแรงบิด

รูปเครื่องมือวัดแรงดัน และกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้ามอเตอร์

รูปแสดงด้านหน้า และด้านข้างของตัวรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้าที่ได้ทำขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค.

Data Sheet

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

HARRIS SEMICONDUCTOR

ICL8038

Precision Waveform Generator/ Voltage Controlled Oscillator

November 1996

Features

- Low Frequency Drift with Temperature . . . 250ppm/^{o}C
- Low Distortion . . . . . 1% (Sine Wave Output)
- High Linearity . . . . . 0.1% (Triangle Wave Output)
- Wide Frequency Range . . . . . 0.001Hz to 300kHz
- Variable Duty Cycle . . . . . 2% to 98%
- High Level Outputs . . . . . TTL to 28V
- Simultaneous Sine, Square, and Triangle Wave Outputs
- Easy to Use - Just a Handful of External Components Required

Description

The ICL8038 waveform generator is a monolithic integrated circuit capable of producing high accuracy sine, square, triangular, sawtooth and pulse waveforms with a minimum of external components. The frequency (or repetition rate) can be selected externally from 0.001Hz to more than 300kHz using either resistors or capacitors, and frequency modulation and sweeping can be accomplished with an external voltage. The ICL8038 is fabricated with advanced monolithic technology, using Schottky barrier diodes and thin film resistors, and the output is stable over a wide range of temperature and supply variations. These devices may be interfaced with phase locked loop circuitry to reduce temperature drift to less than 250ppm/^{o}C.

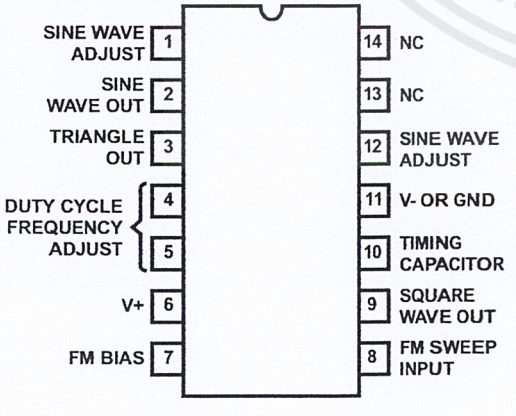
Ordering Information

PART NUMBER	STABILITY	TEMP. RANGE (^{o}C)	PACKAGE	PKG. NO.
ICL8038CCPD	250ppm/^{o}C (Typ)	0 to 70	14 Ld PDIP	E14.3
ICL8038CCJD	250ppm/^{o}C (Typ)	0 to 70	14 Ld CERDIP	F14.3
ICL8038BCJD	180ppm/^{o}C (Typ)	0 to 70	14 Ld CERDIP	F14.3
ICL8038ACJD	120ppm/^{o}C (Typ)	0 to 70	14 Ld CERDIP	F14.3
ICL8038BMJD (Note)	350ppm/^{o}C (Max)	-55 to 125	14 Ld CERDIP	F14.3
ICL8038AMJD (Note)	250ppm/^{o}C (Max)	-55 to 125	14 Ld CERDIP	F14.3

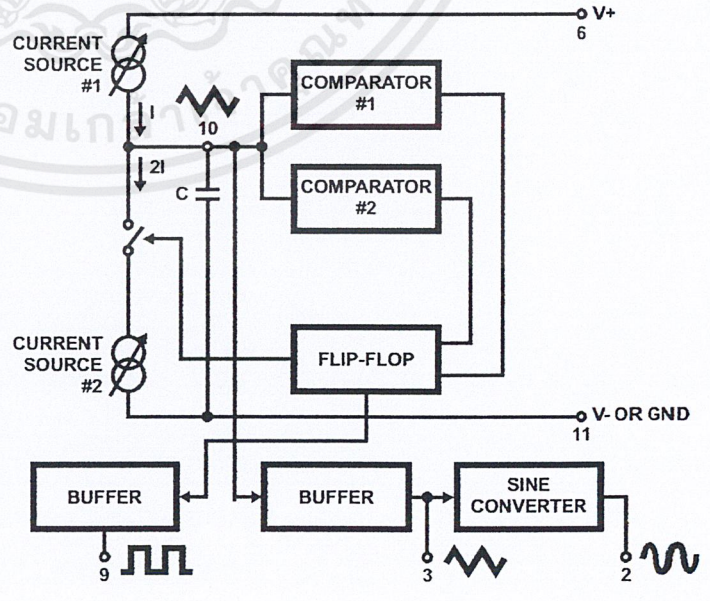
NOTE: Add /883B to part number if 883 processing is required.

Pinout

ICL8038
(PDIP, CERDIP)
TOP VIEW



Functional Diagram



CAUTION: These devices are sensitive to electrostatic discharge. Users should follow proper IC Handling Procedures.

Copyright © Harris Corporation 1996

File Number 2864.2

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Absolute Maximum Ratings

Supply Voltage (V- to V+) 36V
Input Voltage (Any Pin) . . . . . V- to V+
Input Current (Pins 4 and 5) 25mA
Output Sink Current (Pins 3 and 9) 25mA

Operating Conditions

Temperature Range
ICL8038AM, ICL8038BM . . . . . -55°C to 125°C
ICL8038AC, ICL8038BC, ICL8038CC . . . . . 0°C to 70°C

Thermal Information

Thermal Resistance (Typical, Note 1)	θ_{JA} (°C/W)	θ_{JC} (°C/W)
CERDIP Package	75	20
PDIP Package	115	N/A

Maximum Junction Temperature (Ceramic Package) . . . . . 175°C
Maximum Junction Temperature (Plastic Package) . . . . . 150°C
Maximum Storage Temperature Range . . . . . -65°C to 150°C
Maximum Lead Temperature (Soldering 10s) . . . . . 300°C

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

NOTE:

1. θ_{JA} is measured with the component mounted on an evaluation PC board in free air.

Electrical Specifications

V_{SUPPLY} = ±10V or +20V, T_A = 25°C, R_L = 10kΩ, Test Circuit Unless Otherwise Specified

PARAMETER	SYMBOL	TEST CONDITIONS	ICL8038CC			ICL8038BC(BM)			ICL8038AC(AM)			UNITS
			MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
Supply Voltage Operating Range	V_{SUPPLY}											
	V+	Single Supply	+10	-	+30	+10	-	+30	+10	-	+30	V
	V+, V-	Dual Supplies	±5	-	±15	±5	-	±15	±5	-	±5	V
Supply Current	I_{SUPPLY}	V_{SUPPLY} = ±10V (Note 2)										
8038AM 8038BM			-	-		-	12	15	-	12	15	mA
8038AC, 8038BC, 8038CC				12	20	-	12	20	-	12	20	mA
FREQUENCY CHARACTERISTICS (All Waveforms)												
Max. Frequency of Oscillation	f_{MAX}		100	-	-	100	-	-	100	-	-	kHz
Sweep Frequency of FM Input	f_{SWEEP}		-	10	-	-	10	-	-	10	-	kHz
Sweep FM Range		(Note 3)	-	35:1	-	-	35:1	-	-	35:1	-	
FM Linearity		10:1 Ratio	-	0.5	-	-	0.2	-	-	0.2	-	%
Frequency Drift with Temperature (Note 5)	$\Delta f/\Delta T$											
8038AC, 8038BC, 8038CC		0°C to 70°C	-	250	-	-	180	-	-	120		ppm/°C
8038AM, 8038BM		-55°C to 125°C	-		-	-	-	350	-	-	250	ppm/°C
Frequency Drift with Supply Voltage	$\Delta f/\Delta V$	Over Supply Voltage Range	-	0.05	-	-	0.05		-	0.05	-	%/V
OUTPUT CHARACTERISTICS												
Square Wave												-
Leakage Current	I_{OLK}	V_9 = 30V	-	-	1	-	-	1	-	-	1	µA
Saturation Voltage	V_{SAT}	I_{SINK} = 2mA	-	0.2	0.5	-	0.2	0.4	-	0.2	0.4	V
Rise Time	t_R	R_L = 4.7kΩ	-	180	-	-	180	-	-	180	-	ns
Fall Time	t_F	R_L = 4.7kΩ	-	40	-	-	40	-	-	40	-	ns
Typical Duty Cycle Adjust (Note 6)	ΔD		2		98	2	-	98	2	-	98	%
Triangle/Sawtooth/Ramp												-
Amplitude	$V_{TRIANGLE}$	R_{TRI} = 100kΩ	0.30	0.33	-	0.30	0.33	-	0.30	0.33	-	xV_{SUPPLY}
Linearity			-	0.1	-	-	0.05	-	-	0.05	-	%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Electrical Specifications V_{SUPPLY} = ±10V or +20V, T_A = 25°C, R_L = 10kΩ, Test Circuit Unless Otherwise Specified (Continued)

PARAMETER	SYMBOL	TEST CONDITIONS	ICL8038CC			ICL8038BC(BM)			ICL8038AC(AM)			UNITS
			MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
Output Impedance	Z_{OUT}	I_{OUT} = 5mA	-	200	-	-	200	-	-	200	-	Ω
Sine Wave Amplitude	V_{SINE}	R_{SINE} = 100kΩ	0.2	0.22	-	0.2	0.22	-	0.2	0.22	-	xV_{SUPPLY}
THD	THD	R_S = 1MΩ (Note 4)	-	2.0	5	-	1.5	3	-	1.0	1.5	%
THD Adjusted	THD	Use Figure 4	-	1.5	-	-	1.0	-	-	0.8	-	%

NOTES:

2. R_A and R_B currents not included.
3. V_{SUPPLY} = 20V; R_A and R_B = 10kΩ, f ≅ 10kHz nominal; can be extended 1000 to 1. See Figures 5A and 5B.
4. 82kΩ connected between pins 11 and 12, Triangle Duty Cycle set at 50%. (Use R_A and R_B.)
5. Figure 1, pins 7 and 8 connected, V_{SUPPLY} = ±10V. See Typical Curves for T.C. vs V_{SUPPLY}.
6. Not tested, typical value for design purposes only.

Test Conditions

PARAMETER	R_A	R_B	R_L	C	SW_1	MEASURE
Supply Current	10kΩ	10kΩ	10kΩ	3.3nF	Closed	Current Into Pin 6
Sweep FM Range (Note 7)	10kΩ	10kΩ	10kΩ	3.3nF	Open	Frequency at Pin 9
Frequency Drift with Temperature	10kΩ	10kΩ	10kΩ	3.3nF	Closed	Frequency at Pin 3
Frequency Drift with Supply Voltage (Note 8)	10kΩ	10kΩ	10kΩ	3.3nF	Closed	Frequency at Pin 9
Output Amplitude (Note 10) Sine	10kΩ	10kΩ	10kΩ	3.3nF	Closed	Pk-Pk Output at Pin 2
Triangle	10kΩ	10kΩ	10kΩ	3.3nF	Closed	Pk-Pk Output at Pin 3
Leakage Current (Off) (Note 9)	10kΩ	10kΩ		3.3nF	Closed	Current into Pin 9
Saturation Voltage (On) (Note 9)	10kΩ	10kΩ		3.3nF	Closed	Output (Low) at Pin 9
Rise and Fall Times (Note 11)	10kΩ	10kΩ	4.7kΩ	3.3nF	Closed	Waveform at Pin 9
Duty Cycle Adjust (Note 11) Max	50kΩ	~1.6kΩ	10kΩ	3.3nF	Closed	Waveform at Pin 9
Min	~25kΩ	50kΩ	10kΩ	3.3nF	Closed	Waveform at Pin 9
Triangle Waveform Linearity	10kΩ	10kΩ	10kΩ	3.3nF	Closed	Waveform at Pin 3
Total Harmonic Distortion	10kΩ	10kΩ	10kΩ	3.3nF	Closed	Waveform at Pin 2

NOTES:

7. The hi and lo frequencies can be obtained by connecting pin 8 to pin 7 (f_{HI}) and then connecting pin 8 to pin 6 (f_{LO}). Otherwise apply Sweep Voltage at pin 8 ($^2/_3$ V_{SUPPLY} +2V) ≤ V_{SWEEP} ≤ V_{SUPPLY} where V_{SUPPLY} is the total supply voltage. In Figure 5B, pin 8 should vary between 5.3V and 10V with respect to ground.
8. 10V ≤ V+ ≤ 30V, or ±5V ≤ V_{SUPPLY} ≤ ±15V.
9. Oscillation can be halted by forcing pin 10 to +5V or -5V.
10. Output Amplitude is tested under static conditions by forcing pin 10 to 5V then to -5V.
11. Not tested; for design purposes only.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Test Circuit

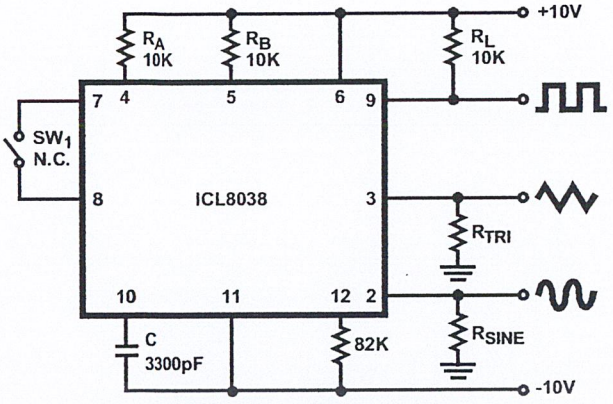
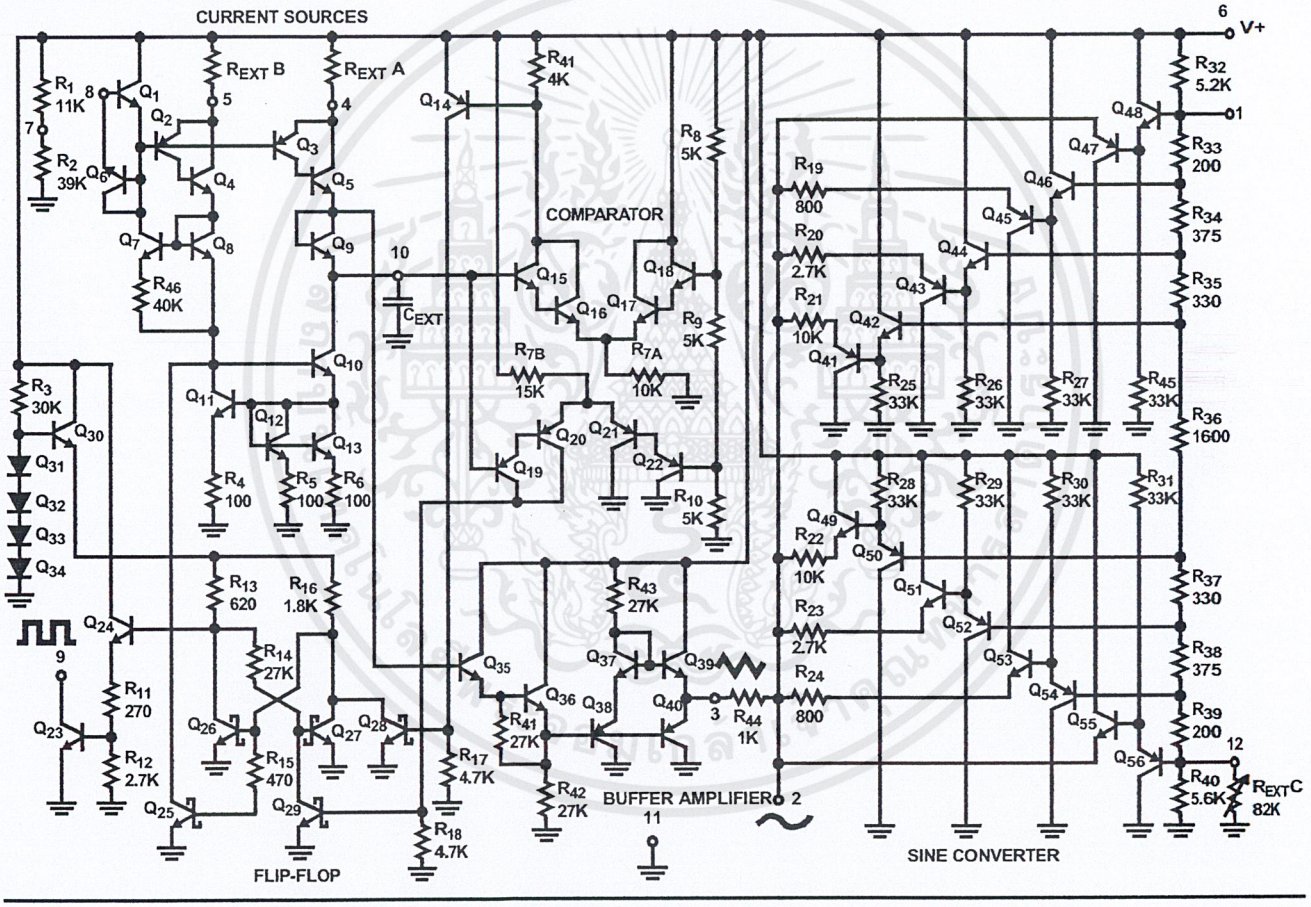


FIGURE 1. TEST CIRCUIT

Detailed Schematic



Application Information (See Functional Diagram)

An external capacitor C is charged and discharged by two current sources. Current source #2 is switched on and off by a flip-flop, while current source #1 is on continuously. Assuming that the flip-flop is in a state such that current source #2 is off, and the capacitor is charged with a current I, the voltage across the capacitor rises linearly with time. When this voltage reaches the level of comparator #1 (set at 2/3 of the supply voltage), the flip-flop is triggered, changes states, and releases current source #2. This current source normally carries a current 2I, thus the capacitor is discharged with a net-current I and the voltage across it drops linearly with time. When it has reached the level of comparator #2 (set at 1/3 of the supply voltage), the flip-flop is triggered into its original state and the cycle starts again.

Four waveforms are readily obtainable from this basic generator circuit. With the current sources set at I and 2I respectively, the charge and discharge times are equal. Thus a triangle waveform is created across the capacitor and the flip-flop produces a square wave. Both waveforms are fed to buffer stages and are available at pins 3 and 9.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The levels of the current sources can, however, be selected over a wide range with two external resistors. Therefore, with the two currents set at values different from I and 2I, an asymmetrical sawtooth appears at Terminal 3 and pulses with a duty cycle from less than 1% to greater than 99% are available at Terminal 9.

The sine wave is created by feeding the triangle wave into a nonlinear network (sine converter). This network provides a decreasing shunt impedance as the potential of the triangle moves toward the two extremes.

Waveform Timing

The *symmetry* of all waveforms can be adjusted with the external timing resistors. Two possible ways to accomplish this are shown in Figure 3. Best results are obtained by keeping the timing resistors R_A and R_B separate (A). R_A controls the rising portion of the triangle and sine wave and the 1 state of the square wave.

The magnitude of the triangle waveform is set at $^1/_3$ V_{SUPPLY}; therefore the rising portion of the triangle is,

$$t_1 = \frac{C \times V}{I} = \frac{C \times 1/3 \times V_{SUPPLY} \times R_A}{0.22 \times V_{SUPPLY}} = \frac{R_A \times C}{0.66}$$

The falling portion of the triangle and sine wave and the 0 state of the square wave is:

$$t_2 = \frac{C \times V}{1} = \frac{C \times 1/3 V_{SUPPLY}}{2(0.22)\frac{V_{SUPPLY}}{R_B} - 0.22\frac{V_{SUPPLY}}{R_A}} = \frac{R_A R_B C}{0.66(2R_A - R_B)}$$

Thus a 50% duty cycle is achieved when $R_A = R_B$.

If the duty cycle is to be varied over a small range about 50% only, the connection shown in Figure 3B is slightly more convenient. A 1kΩ potentiometer may not allow the duty cycle to be adjusted through 50% on all devices. If a 50% duty cycle is required, a 2kΩ or 5kΩ potentiometer should be used.

With two separate timing resistors, the frequency is given by:

$$f = \frac{1}{t_1 + t_2} = \frac{1}{\frac{R_A C}{0.66}\left(1 + \frac{R_B}{2R_A - R_B}\right)}$$

or, if $R_A = R_B = R$

$$f = \frac{0.33}{RC} \text{ (for Figure 3A)}$$

Neither time nor frequency are dependent on supply voltage, even though none of the voltages are regulated inside the integrated circuit. This is due to the fact that both currents and thresholds are direct, linear functions of the supply voltage and thus their effects cancel.

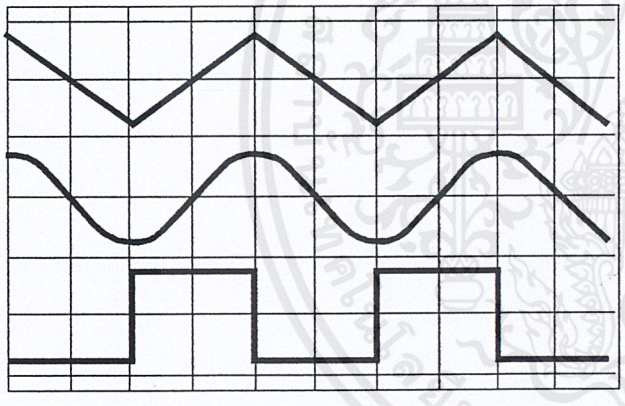


FIGURE 2A. SQUARE WAVE DUTY CYCLE - 50%

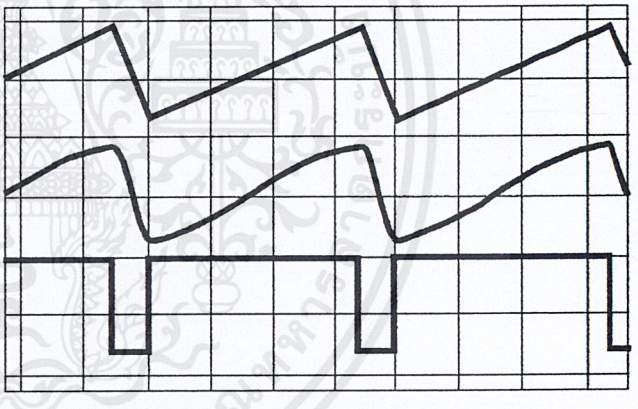


FIGURE 2B. SQUARE WAVE DUTY CYCLE - 80%

FIGURE 2. PHASE RELATIONSHIP OF WAVEFORMS

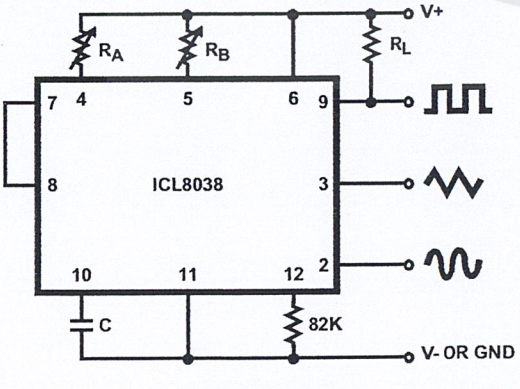


FIGURE 3A.

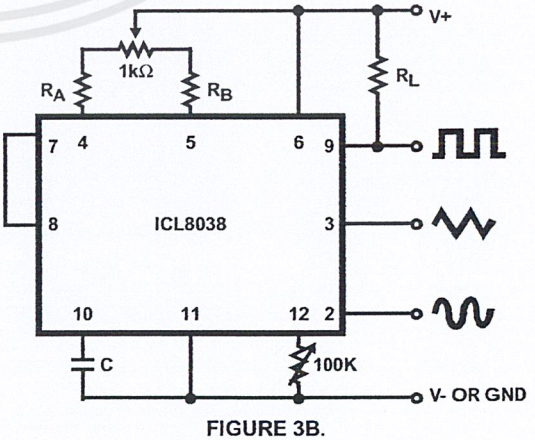


FIGURE 3B.

FIGURE 3. POSSIBLE CONNECTIONS FOR THE EXTERNAL TIMING RESISTORS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Reducing Distortion

To minimize sine wave distortion the 82kΩ resistor between pins 11 and 12 is best made variable. With this arrangement distortion of less than 1% is achievable. To reduce this even further, two potentiometers can be connected as shown in Figure 4; this configuration allows a typical reduction of sine wave distortion close to 0.5%.

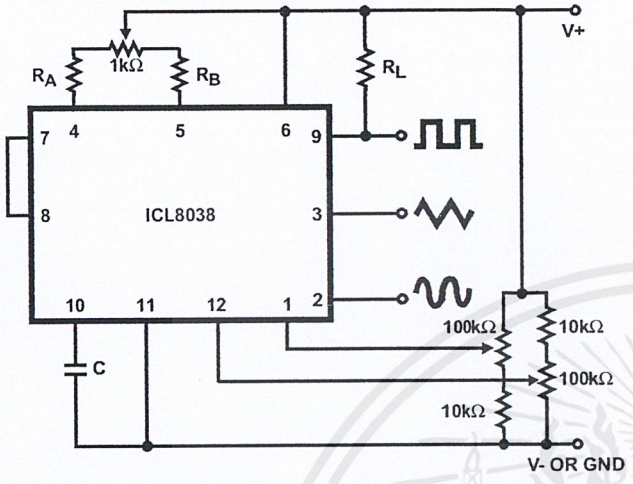


FIGURE 4. CONNECTION TO ACHIEVE MINIMUM SINE WAVE DISTORTION

Selecting R_A, R_B and C

For any given output frequency, there is a wide range of RC combinations that will work, however certain constraints are placed upon the magnitude of the charging current for optimum performance. At the low end, currents of less than 1μA are undesirable because circuit leakages will contribute significant errors at high temperatures. At higher currents (I > 5mA), transistor betas and saturation voltages will contribute increasingly larger errors. Optimum performance will, therefore, be obtained with charging currents of 10μA to 1mA. If pins 7 and 8 are shorted together, the magnitude of the charging current due to R_A can be calculated from:

$$I = \frac{R_1 \times (V+ - V-)}{(R_1 + R_2)} \times \frac{1}{R_A} = \frac{0.22(V+ - V-)}{R_A}$$

R_1 and R_2 are shown in the Detailed Schematic.

A similar calculation holds for R_B.

The capacitor value should be chosen at the upper end of its possible range.

Waveform Out Level Control and Power Supplies

The waveform generator can be operated either from a single power supply (10V to 30V) or a dual power supply (±5V to ±15V). With a single power supply the average levels of the triangle and sine wave are at exactly one-half of the supply voltage, while the square wave alternates between V+ and ground. A split power supply has the advantage that all waveforms move symmetrically about ground.

The square wave output is not committed. A load resistor can be connected to a different power supply, as long as the applied voltage remains within the breakdown capability of the waveform generator (30V). In this way, the square wave output can be made TTL compatible (load resistor connected to +5V) while the waveform generator itself is powered from a much higher voltage.

Frequency Modulation and Sweeping

The frequency of the waveform generator is a direct function of the DC voltage at Terminal 8 (measured from V+). By altering this voltage, frequency modulation is performed. For small deviations (e.g. ±10%) the modulating signal can be applied directly to pin 8, merely providing DC decoupling with a capacitor as shown in Figure 5A. An external resistor between pins 7 and 8 is not necessary, but it can be used to increase input impedance from about 8kΩ (pins 7 and 8 connected together), to about (R + 8kΩ).

For larger FM deviations or for frequency sweeping, the modulating signal is applied between the positive supply voltage and pin 8 (Figure 5B). In this way the entire bias for the current sources is created by the modulating signal, and a very large (e.g. 1000:1) sweep range is created (f = 0 at V_{SWEEP} = 0). Care must be taken, however, to regulate the supply voltage; in this configuration the charge current is no longer a function of the supply voltage (yet the trigger thresholds still are) and thus the frequency becomes dependent on the supply voltage. The potential on Pin 8 may be swept down from V+ by ($^1/_3$ V_{SUPPLY} - 2V).

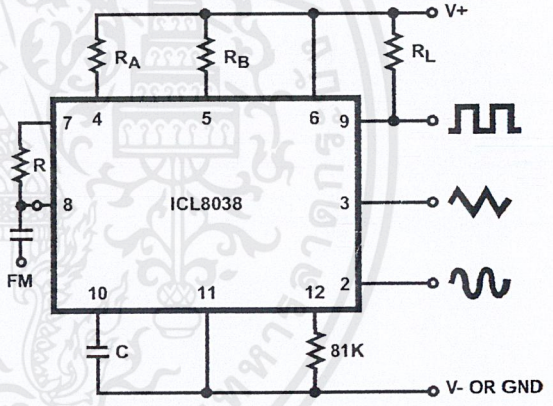


FIGURE 5A. CONNECTIONS FOR FREQUENCY MODULATION

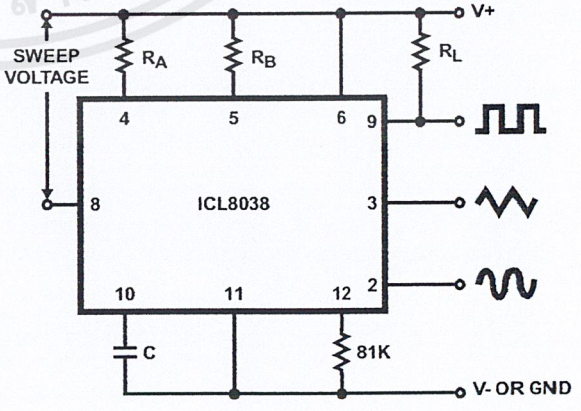


FIGURE 5B. CONNECTIONS FOR FREQUENCY SWEEP

FIGURE 5.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

UNITRODE

UC1825
UC2825
UC3825

High Speed PWM Controller

FEATURES

- Compatible with Voltage or Current Mode Topologies
- Practical Operation Switching Frequencies to 1MHz
- 50ns Propagation Delay to Output
- High Current Dual Totem Pole Outputs (1.5A Peak)
- Wide Bandwidth Error Amplifier
- Fully Latched Logic with Double Pulse Suppression
- Pulse-by-Pulse Current Limiting
- Soft Start / Max. Duty Cycle Control
- Under-Voltage Lockout with Hysteresis
- Low Start Up Current (1.1mA)
- Trimmed Bandgap Reference (5.1V ±1%)

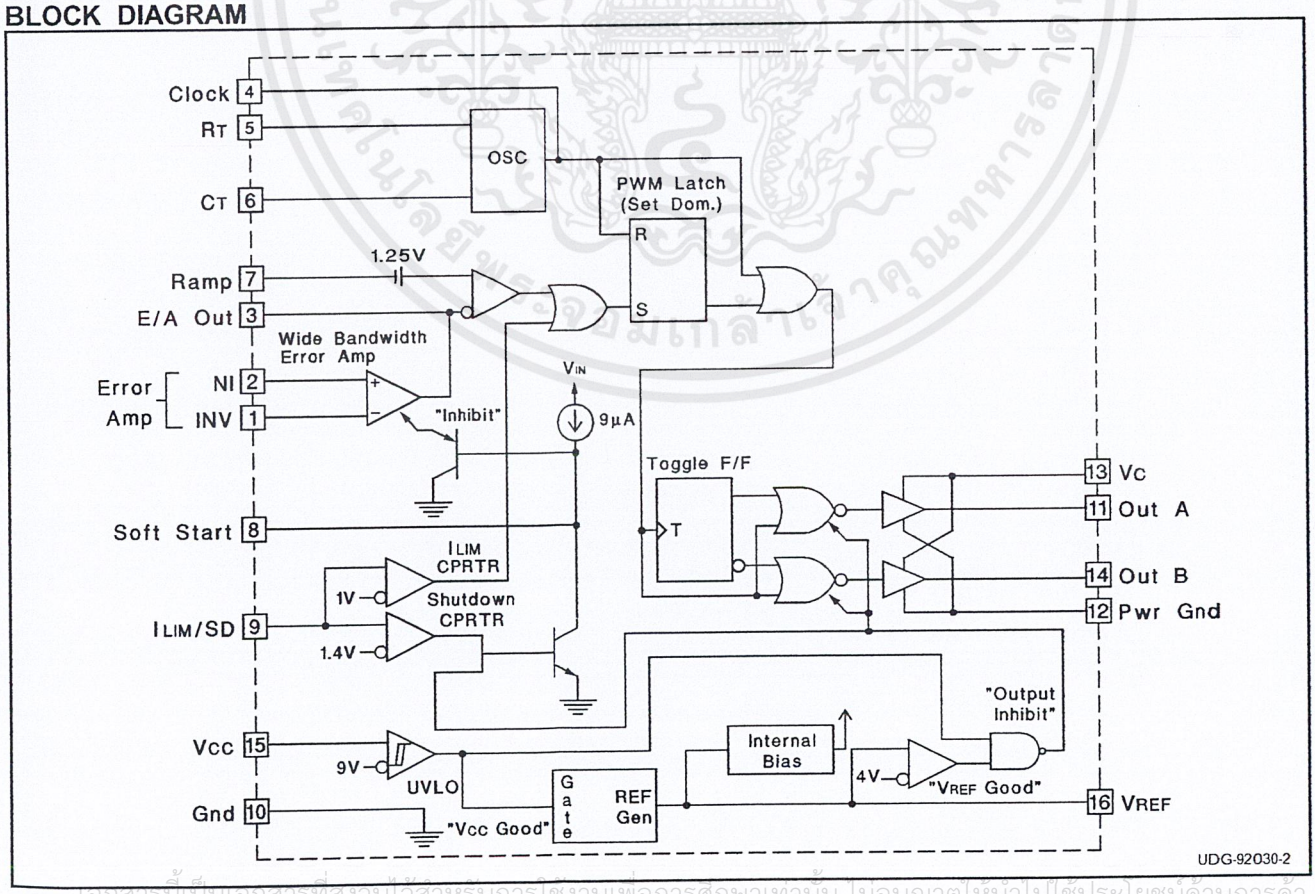
DESCRIPTION

The UC1825 family of PWM control ICs is optimized for high frequency switched mode power supply applications. Particular care was given to minimizing propagation delays through the comparators and logic circuitry while maximizing bandwidth and slew rate of the error amplifier. This controller is designed for use in either current-mode or voltage mode systems with the capability for input voltage feed-forward.

Protection circuitry includes a current limit comparator with a 1V threshold, a TTL compatible shutdown port, and a soft start pin which will double as a maximum duty cycle clamp. The logic is fully latched to provide jitter free operation and prohibit multiple pulses at an output. An under-voltage lockout section with 800mV of hysteresis assures low start up current. During under-voltage lockout, the outputs are high impedance.

These devices feature totem pole outputs designed to source and sink high peak currents from capacitive loads, such as the gate of a power MOSFET. The on state is designed as a high level.

BLOCK DIAGRAM



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (cont.)

Unless otherwise stated,these specifications apply for , R_T = 3.65k, C_T = 1nF, V_{CC} = 15V, -55°C<T_A<125°C for the UC1825, –40°C<T_A<85°C for the UC2825, and 0°C<T_A<70°C for the UC3825, T_A=T_J.

PARAMETERS	TEST CONDITIONS	UC1825 UC2825			UC3825			UNITS
		MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
Oscillator Section (cont.)								
Clock Out High		3.9	4.5		3.9	4.5		V
Clock Out Low			2.3	2.9		2.3	2.9	V
Ramp Peak*		2.6	2.8	3.0	2.6	2.8	3.0	V
Ramp Valley*		0.7	1.0	1.25	0.7	1.0	1.25	V
Ramp Valley to Peak*		1.6	1.8	2.0	1.6	1.8	2.0	V
Error Amplifier Section								
Input Offset Voltage				10			15	mV
Input Bias Current			0.6	3		0.6	3	µA
Input Offset Current			0.1	1		0.1	1	µA
Open Loop Gain	1V < V_O < 4V	60	95		60	95		dB
CMRR	1.5V < V_{CM} < 5.5V	75	95		75	95		dB
PSRR	10V < V_{CC} < 30V	85	110		85	110		dB
Output Sink Current	$V_{PIN\ 3}$ = 1V	1	2.5		1	2.5		mA
Output Source Current	$V_{PIN\ 3}$ = 4V	-0.5	-1.3		-0.5	-1.3		mA
Output High Voltage	$I_{PIN\ 3}$ = -0.5mA	4.0	4.7	5.0	4.0	4.7	5.0	V
Output Low Voltage	$I_{PIN\ 3}$ = 1mA	0	0 .5	1.0	0	0.5	1.0	V
Unity Gain Bandwidth*		3	5.5		3	5.5		MHz
Slew Rate*		6	12		6	12		V/µs
PWM Comparator Section								
Pin 7 Bias Current	$V_{PIN\ 7}$ = 0V		-1	-5		-1	-5	µA
Duty Cycle Range		0		80	0		85	%
Pin 3 Zero DC Threshold	$V_{PIN\ 7}$ = 0V	1.1	1.25		1.1	1.25		V
Delay to Output*			50	80		50	80	ns
Soft-Start Section								
Charge Current	$V_{PIN\ 8}$ = 0.5V	3	9	20	3	9	20	µA
Discharge Current	$V_{PIN\ 8}$ = 1V	1			1			mA
Current Limit / Shutdown Section								
Pin 9 Bias Current	0 < $V_{PIN\ 9}$ < 4V			15			10	µA
Current Limit Threshold		0.9	1.0	1.1	0.9	1.0	1.1	V
Shutdown Threshold		1.25	1.40	1.55	1.25	1.40	1.55	V
Delay to Output			50	80		50	80	ns
Output Section								
Output Low Level	I_{OUT} = 20mA		0.25	0.40		0.25	0.40	V
	I_{OUT} = 200mA		1.2	2.2		1.2	2.2	V
Output High Level	I_{OUT} = -20mA	13.0	13.5		13.0	13.5		V
	I_{OUT} = -200mA	12.0	13.0		12.0	13.0		V
Collector Leakage	V_C = 30V		100	500		10	500	µA
Rise/Fall Time*	CL = 1nF		30	60		30	60	ns
Under-Voltage Lockout Section								
Start Threshold		8.8	9.2	9.6	8.8	9.2	9.6	V
UVLO Hysteresis		0.4	0.8	1.2	0.4	0.8	1.2	V
Supply Current Section								
Start Up Current	V_{CC} = 8V		1.1	2.5		1.1	2.5	mA
ICC	$V_{PIN\ 1}$, $V_{PIN\ 7}$, $V_{PIN\ 9}$ = 0V; $V_{PIN\ 2}$ = 1V		22	33		22	33	mA

** This parameter not 100% tested in production but guaranteed by design.*

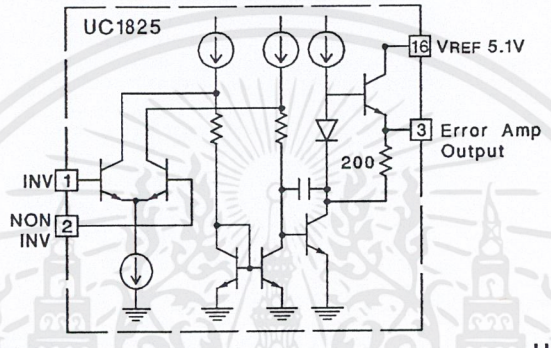
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Printed Circuit Board Layout Considerations

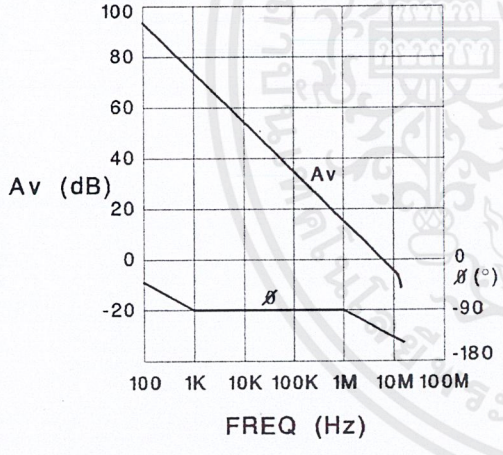
High speed circuits demand careful attention to layout and component placement. To assure proper performance of the UC1825 follow these rules: 1) Use a ground plane. 2) Damp or clamp parasitic inductive kick energy from the gate of driven MOSFETs. Do not allow the output pins to ring below ground. A series gate resistor or a shunt 1 Amp Schottky diode at the output pin will serve this purpose. 3) Bypass V_{CC}, V_C, and V_{REF}. Use 0.1µF monolithic ceramic capacitors with low equivalent series inductance. Allow less than 1 cm of total lead length for each capacitor between the bypassed pin and the ground plane. 4) Treat the timing capacitor, C_T, like a bypass capacitor.

Error Amplifier Circuit

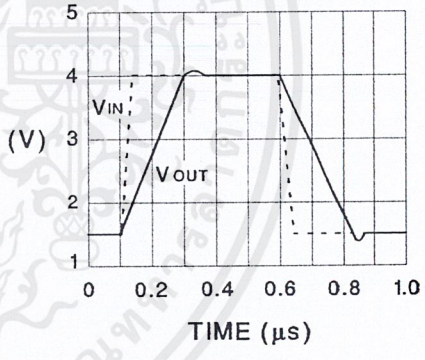
Simplified Schematic



Open Loop Frequency Response

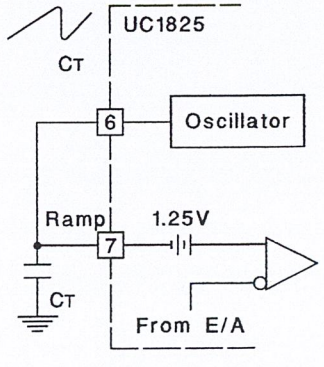


Unity Gain Slew Rate

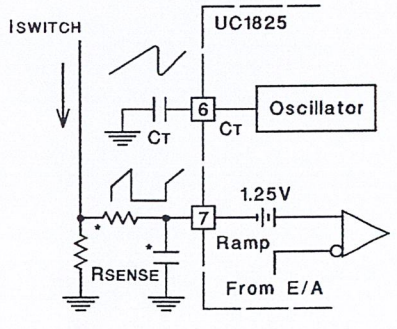


PWM Applications

Conventional (Voltage Mode)



Current-Mode



* A small filter may be required to suppress switch noise.

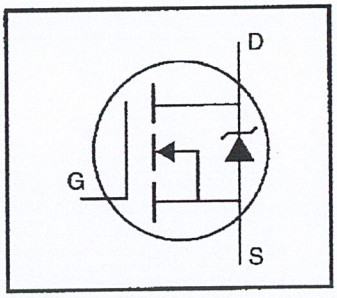
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

International IOR Rectifier

IRFP150

HEXFET® Power MOSFET

- Dynamic dv/dt Rating
- Repetitive Avalanche Rated
- Isolated Central Mounting Hole
- 175°C Operating Temperature
- Fast Switching
- Ease of Paralleling
- Simple Drive Requirements



$V_{DSS} = 100V$

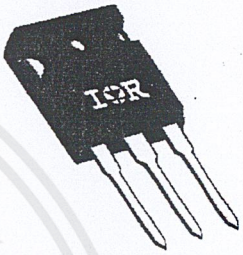
$R_{DS(on)} = 0.055\Omega$

$I_D = 41A$

Description

Third Generation HEXFETs from International Rectifier provide the designer with the best combination of fast switching, ruggedized device design, low on-resistance and cost-effectiveness.

The TO-247 package is preferred for commercial–industrial applications where higher power levels preclude the use of TO-220 devices. The TO-247 is similar but superior to the earlier TO-218 package because of its isolated mounting hole. It also provides greater creepage distance between pins to meet the requirements of most safety specifications.



TO-247AC

DATA SHEETS

Absolute Maximum Ratings

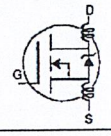
	Parameter	Max.	Units
I_D @ T_C = 25°C	Continuous Drain Current, V_{GS} @ 10 V	41	A
I_D @ T_C = 100°C	Continuous Drain Current, V_{GS} @ 10 V	29	
I_{DM}	Pulsed Drain Current ①	160	
P_D @ T_C = 25°C	Power Dissipation	230	W
	Linear Derating Factor	1.5	W/°C
V_{GS}	Gate-to-Source Voltage	±20	V
E_{AS}	Single Pulse Avalanche Energy ②	830	mJ
I_{AR}	Avalanche Current ①	41	A
E_{AR}	Repetitive Avalanche Energy ①	19	mJ
dv/dt	Peak Diode Recovery dv/dt ③	5.5	V/ns
T_J T_{STG}	Operating Junction and Storage Temperature Range	-55 to +175	°C
	Soldering Temperature, for 10 seconds	300 (1.6mm from case)	
	Mounting Torque, 6-32 or M3 screw	10 lbf•in (1.1 N•m)	

Thermal Resistance

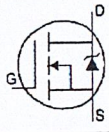
	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units
$R_{\theta JC}$	Junction-to-Case	—	—	0.65	°C/W
$R_{\theta CS}$	Case-to-Sink, Flat, Greased Surface	—	0.24	—	
$R_{\theta JA}$	Junction-to-Ambient	—	—	40	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Electrical Characteristics @ T_J = 25°C (unless otherwise specified)

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Test Conditions
$V_{(BR)DSS}$	Drain-to-Source Breakdown Voltage	100	—	—	V	V_{GS}=0V, I_D= 250µA
$\Delta V_{(BR)DSS}/\Delta T_J$	Breakdown Voltage Temp. Coefficient	—	0.14	—	V/°C	Reference to 25°C, I_D= 1mA
$R_{DS(on)}$	Static Drain-to-Source On-Resistance	—	—	0.055	Ω	V_{GS}=10V, I_D=25A ④
$V_{GS(th)}$	Gate Threshold Voltage	2.0	—	4.0	V	V_{DS}=V_{GS}, I_D= 250µA
g_{fs}	Forward Transconductance	13	—	—	S	V_{DS}=25V, I_D=25A ④
I_{DSS}	Drain-to-Source Leakage Current	—	—	25	µA	V_{DS}=100V, V_{GS}=0V
		—	—	250		V_{DS}=80V, V_{GS}=0V, T_J=150°C
I_{GSS}	Gate-to-Source Forward Leakage	—	—	100	nA	V_{GS}=20V
	Gate-to-Source Reverse Leakage	—	—	-100		V_{GS}=-20V
Q_g	Total Gate Charge	—	—	140	nC	I_D=41A
Q_{gs}	Gate-to-Source Charge	—	—	29		V_{DS}=80V
Q_{gd}	Gate-to-Drain ("Miller") Charge	—	—	68		V_{GS}=10V See Fig. 6 and 13 ④
$t_{d(on)}$	Turn-On Delay Time	—	16	—	ns	V_{DD}=50V
t_r	Rise Time	—	120	—		I_D=41A
$t_{d(off)}$	Turn-Off Delay Time	—	60	—		R_G=6.2Ω
t_f	Fall Time	—	81	—		R_D=1.2Ω See Figure 10 ④
L_D	Internal Drain Inductance	—	5.0	—	nH	Between lead, 6 mm (0.25in.) from package and center of die contact 
L_S	Internal Source Inductance	—	13	—		
C_{iss}	Input Capacitance	—	2800	—	pF	V_{GS}=0V
C_{oss}	Output Capacitance	—	1100	—		V_{DS}= 25V
C_{rss}	Reverse Transfer Capacitance	—	280	—		f=1.0MHz See Figure 5

Source-Drain Ratings and Characteristics

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Test Conditions
I_S	Continuous Source Current (Body Diode)	—	—	41	A	MOSFET symbol showing the integral reverse p-n junction diode. 
I_{SM}	Pulsed Source Current (Body Diode) ①	—	—	160		
V_{SD}	Diode Forward Voltage	—	—	2.5	V	T_J=25°C, I_S=41A, V_{GS}=0V ④
t_{rr}	Reverse Recovery Time	—	220	330	ns	T_J=25°C, I_F=41A
Q_{rr}	Reverse Recovery Charge	—	1.9	2.9	µC	di/dt=100A/µs ④
t_{on}	Forward Turn-On Time	Intrinsic turn-on time is neglegible (turn-on is dominated by L_S+L_D)				

Notes:

① Repetitive rating; pulse width limited by max. junction temperature (See Figure 11)

② V_{DD}=25V, starting T_J=25°C, L=740µH R_G=25Ω, I_{AS}=41A (See Figure 12)

③ I_{SD}≤41A, di/dt≤300A/µs, V_{DD}≤$V_{(BR)DSS}$, T_J≤175°C

④ Pulse width ≤ 300 µs; duty cycle ≤2%.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

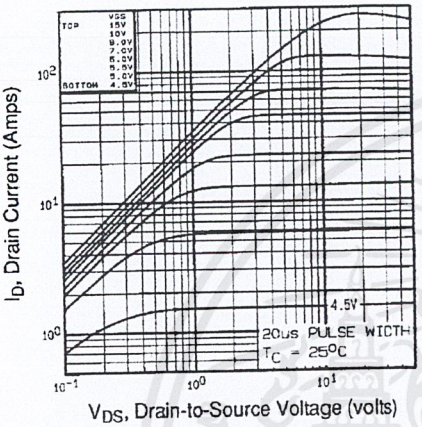


Fig 1. Typical Output Characteristics, T_C=25°C

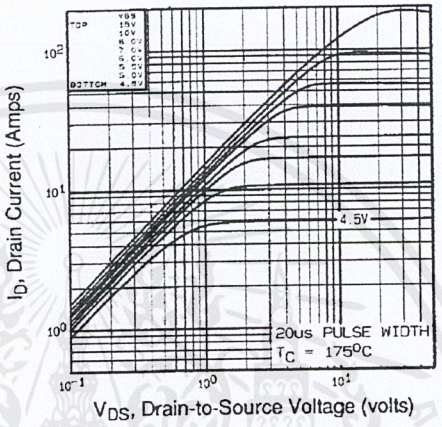


Fig 2. Typical Output Characteristics, T_C=175°C

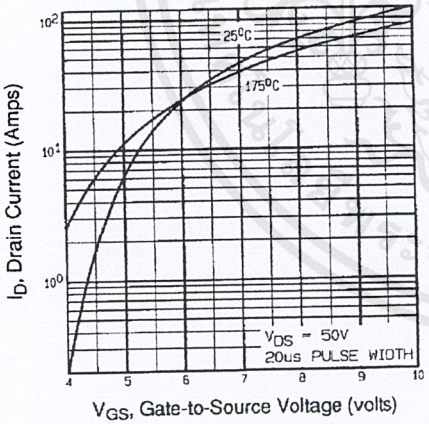


Fig 3. Typical Transfer Characteristics

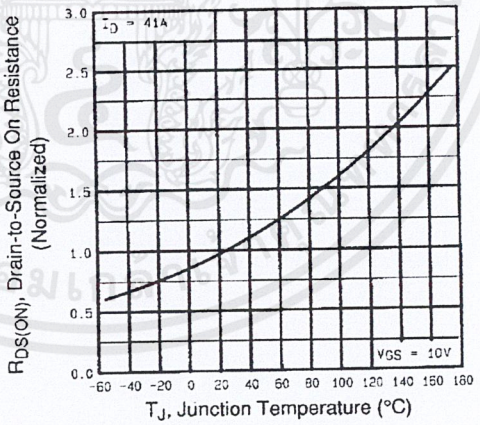


Fig 4. Normalized On-Resistance Vs. Temperature

DATA SHEETS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

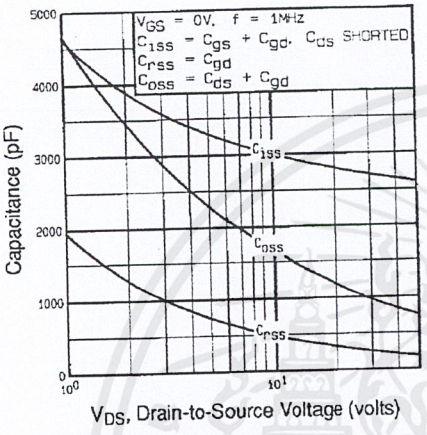


Fig 5. Typical Capacitance Vs. Drain-to-Source Voltage

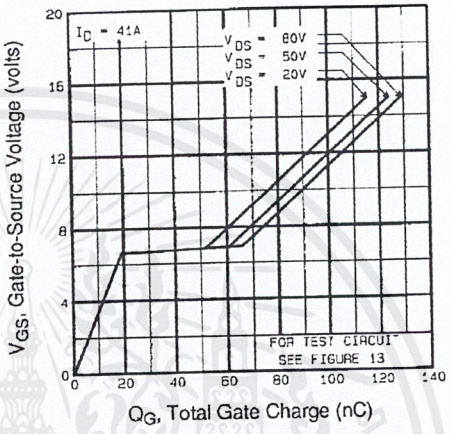


Fig 6. Typical Gate Charge Vs. Gate-to-Source Voltage

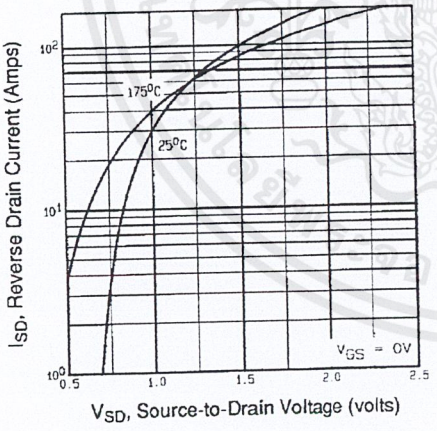


Fig 7. Typical Source-Drain Diode Forward Voltage

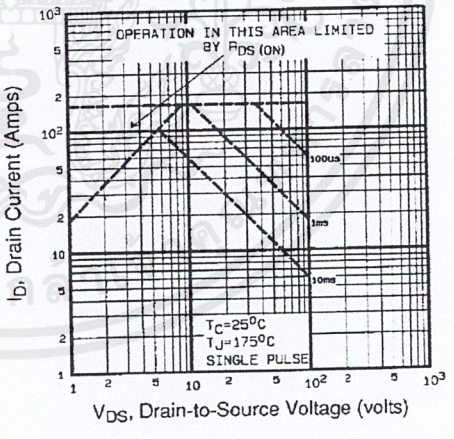


Fig 8. Maximum Safe Operating Area

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

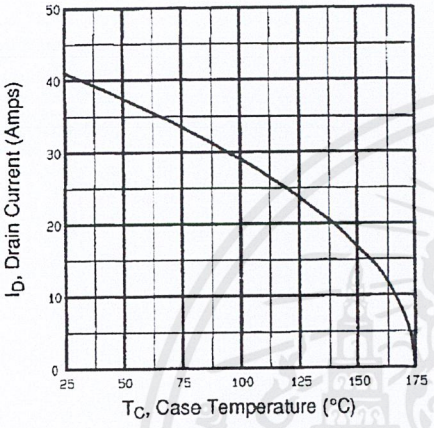


Fig 9. Maximum Drain Current Vs. Case Temperature

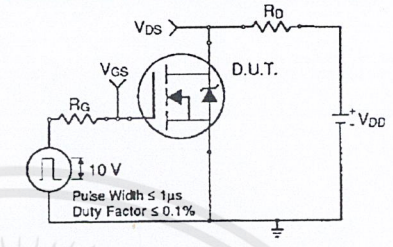


Fig 10a. Switching Time Test Circuit

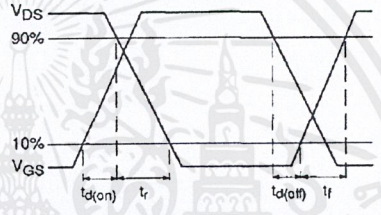


Fig 10b. Switching Time Waveforms

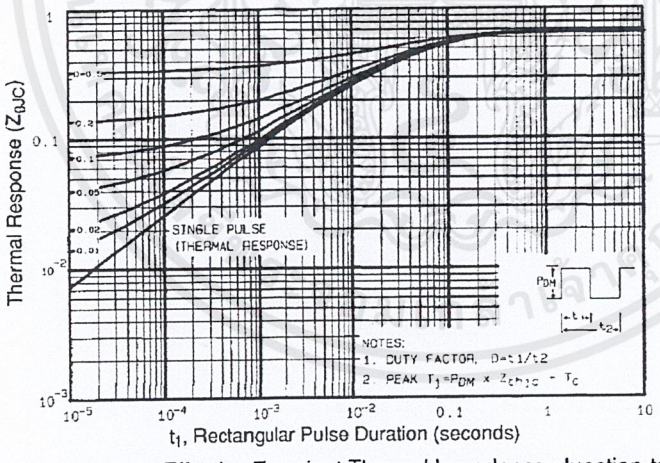


Fig 11. Maximum Effective Transient Thermal Impedance, Junction-to-Case

DATA SHEETS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Order this document by LF347/D

MOTOROLA

LF347, B
LF351
LF353

JFET Input Operational Amplifiers

These low cost JFET input operational amplifiers combine two state–of–the–art analog technologies on a single monolithic integrated circuit. Each internally compensated operational amplifier has well matched high voltage JFET input devices for low input offset voltage. The JFET technology provides wide bandwidths and fast slew rates with low input bias currents, input offset currents, and supply currents.

These devices are available in single, dual and quad operational amplifiers which are pin–compatible with the industry standard MC1741, MC1458, and the MC3403/LM324 bipolar devices.

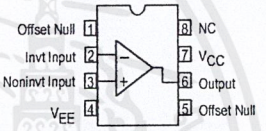
- Input Offset Voltage of 5.0 mV Max (LF347B)
- Low Input Bias Current: 50 pA
- Low Input Noise Voltage: 16 nV/$\sqrt{Hz}$
- Wide Gain Bandwidth: 4.0 MHz
- High Slew Rate: 13V/μs
- Low Supply Current: 1.8 mA per Amplifier
- High Input Impedance: 10^{12} Ω
- High Common Mode and Supply Voltage Rejection Ratios: 100 dB

FAMILY OF JFET OPERATIONAL AMPLIFIERS

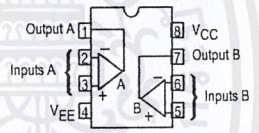
N SUFFIX
PLASTIC PACKAGE
CASE 626

D SUFFIX
PLASTIC PACKAGE
CASE 751
(SO–8)

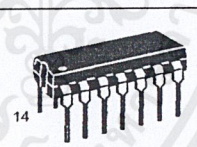
PIN CONNECTIONS



LF351
(Top View)

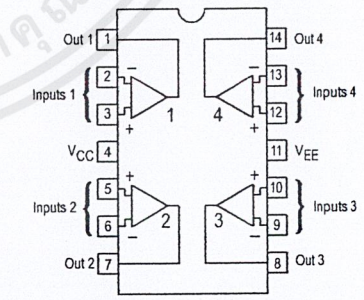


LF353
(Top View)



N SUFFIX
PLASTIC PACKAGE
CASE 646

PIN CONNECTIONS



(Top View)

MAXIMUM RATINGS

Rating	Symbol	Value	Unit
Supply Voltage	V_{CC} V_{EE}	+18 –18	V
Differential Input Voltage	V_{ID}	±30	V
Input Voltage Range (Note 1)	V_{IDR}	±15	V
Output Short Circuit Duration (Note 2)	t_{SC}	Continuous	
Power Dissipation at T_A = +25°C Derate above T_A =+25°C	P_D $1/\theta_{JA}$	900 10	mW mW/°C
Operating Ambient Temperature Range	T_A	0 to +70	°C
Operating Junction Temperature Range	T_J	115	°C
Storage Temperature Range	T_{stg}	– 65 to +150	°C

NOTES: 1. Unless otherwise specified, the absolute maximum negative input voltage is limited to the negative power supply.
2. Any amplifier output can be shorted to ground indefinitely. However, if more than one amplifier output is shorted simultaneously, maximum junction temperature rating may be exceeded.

ORDERING INFORMATION

Device	Function	Operating Temperature Range	Package
LF351D	Single	T_A = 0° to +70°C	SO–8
LF351N	Single		Plastic DIP
LF353D	Dual		SO–8
LF353N	Dual		Plastic DIP
LF347BN	Quad		Plastic DIP
LF347N	Quad		Plastic DIP

© Motorola, Inc. 1996

Rev 0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (V_{CC} = +15 V_{EE} = –15 V, T_A = 25°C, unless otherwise noted.)

Characteristic	Symbol	LF347B			LF347, LF351, LF353			Unit
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
Input Offset Voltage ($R_S \le 10$ k, V_{CM} = 0) T_A = +25°C 0°C ≤ T_A ≤ +70°C	V_{IO}	 – –	 1.0 –	 5.0 8.0	 – –	 5.0 –	 10 13	mV
Avg. Temperature Coefficient of Input Offset Voltage $R_S \le 10$ k, 0°C ≤ T_A ≤ +70°C	$\Delta V_{IO}/\Delta T$	–	10	–	–	10	–	µV/°C
Input Offset Current (V_{CM} = 0, Note 3) T_A = +25°C 0°C ≤ T_A ≤ +70°C	I_{IO}	 – –	 25 –	 100 4.0	 – –	 25 –	 100 4.0	 pA nA
Input Bias Current (V_{CM} = 0, Note 3) T_A = +25°C 0°C ≤ T_A ≤ +70°C	I_{IB}	 – –	 50 –	 200 8.0	 – –	 50 –	 200 8.0	 pA nA
Input Resistance	r_i	–	10^{12}	–	–	10^{12}	–	Ω
Common Mode Input Voltage Range	V_{ICR}	±11	+15 –12	–	±11	+15 –12	–	V
Large–Signal Voltage Gain (V_O = ±10 V, R_L = 2.0 k) T_A = +25°C 0°C ≤ T_A ≤ +70°C	A_{VOL}	 50 25	 100 –	 – –	 25 15	 100 –	 – –	V/mV
Output Voltage Swing (R_L = 10 k)	V_O	±12	±14	–	±12	±14	–	V
Common Mode Rejection ($R_S \le 10$ k)	CMR	80	100	–	70	100	–	dB
Supply Voltage Rejection ($R_S \le 10$ k)	PSRR	80	100	–	70	100	–	dB
Supply Current LF347 LF351 LF353	I_D	 – – –	 7.2 – –	 11 – –	 – – –	 7.2 1.8 3.6	 11 3.4 6.5	mA
Short Circuit Current	I_{SC}	–	25	–	–	25	–	mA
Slew Rate (A_V = +1)	SR	–	13	–	–	13	–	V/µs
Gain–Bandwidth Product	BWp	–	4.0	–	–	4.0	–	MHz
Equivalent Input Noise Voltage (R_S = 100 Ω, f = 1000 Hz)	e_n	–	24	–	–	24	–	$nV/\sqrt{Hz}$
Equivalent Input Noise Current (f = 1000 Hz)	i_n	–	0.01	–	–	0.01	–	$pA/\sqrt{Hz}$
Channel Separation (LF347, LF353) 1.0 Hz ≤ f ≤ 20 kHz (Input Referred)	–	–	–120	–	–	–120	–	dB

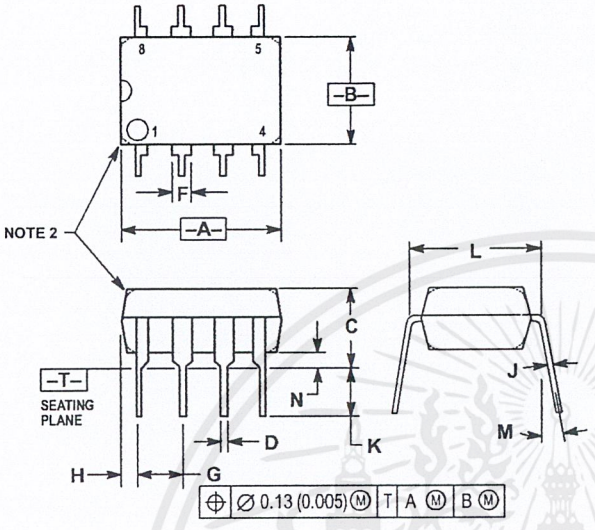
For Typical Characteristic Performance Curves, refer to MC34001, 34002, 34004 data sheet.

NOTE: 3. Input bias currents of JFET input op amps approximately double for every 10°C rise in junction temperature. To maintain junction temperatures as close to ambient as is possible, pulse techniques are utilized during test.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

OUTLINE DIMENSIONS

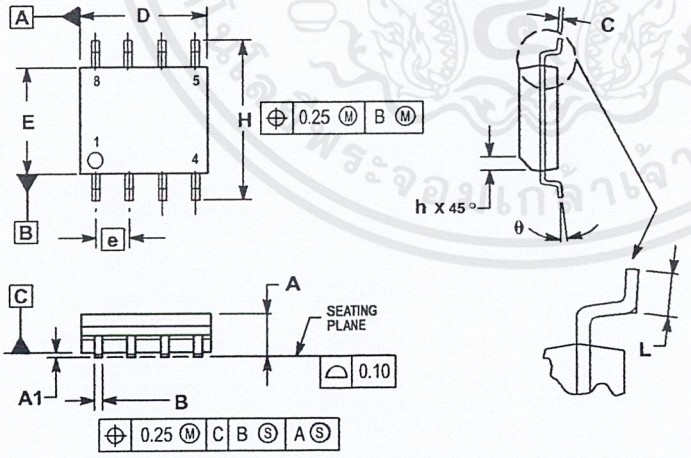
N SUFFIX
PLASTIC PACKAGE
CASE 626–05
ISSUE K



NOTES:
1. DIMENSION L TO CENTER OF LEAD WHEN FORMED PARALLEL.
2. PACKAGE CONTOUR OPTIONAL (ROUND OR SQUARE CORNERS).
3. DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ANSI Y14.5M, 1982.

	MILLIMETERS		INCHES	
DIM	MIN	MAX	MIN	MAX
A	9.40	10.16	0.370	0.400
B	6.10	6.60	0.240	0.260
C	3.94	4.45	0.155	0.175
D	0.38	0.51	0.015	0.020
F	1.02	1.78	0.040	0.070
G	2.54 BSC		0.100 BSC	
H	0.76	1.27	0.030	0.050
J	0.20	0.30	0.008	0.012
K	2.92	3.43	0.115	0.135
L	7.62 BSC		0.300 BSC	
M	—	10°	—	10°
N	0.76	1.01	0.030	0.040

D SUFFIX
PLASTIC PACKAGE
CASE 751–05
(SO–8)
ISSUE R



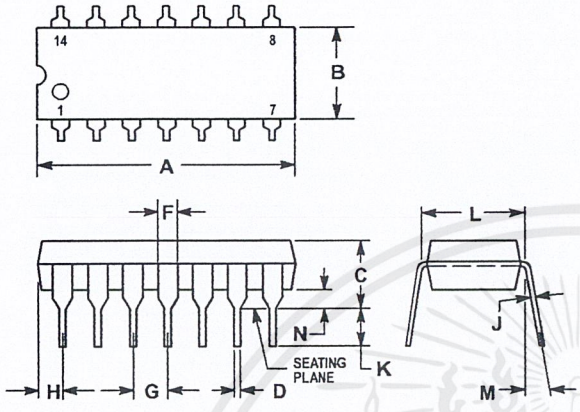
NOTES:
1. DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ASME Y14.5M, 1994.
2. DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS.
3. DIMENSION D AND E DO NOT INCLUDE MOLD PROTRUSION.
4. MAXIMUM MOLD PROTRUSION 0.15 PER SIDE.
5. DIMENSION B DOES NOT INCLUDE MOLD PROTRUSION. ALLOWABLE DAMBAR PROTRUSION SHALL BE 0.127 TOTAL IN EXCESS OF THE B DIMENSION AT MAXIMUM MATERIAL CONDITION.

	MILLIMETERS	
DIM	MIN	MAX
A	1.35	1.75
A1	0.10	0.25
B	0.35	0.49
C	0.18	0.25
D	4.80	5.00
E	3.80	4.00
e	1.27 BSC	
H	5.80	6.20
h	0.25	0.50
L	0.40	1.25
θ	0°	7°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

OUTLINE DIMENSIONS

N SUFFIX
PLASTIC PACKAGE
CASE 646–06
ISSUE L



NOTES:
1. LEADS WITHIN 0.13 (0.005) RADIUS OF TRUE POSITION AT SEATING PLANE AT MAXIMUM MATERIAL CONDITION.
2. DIMENSION L TO CENTER OF LEADS WHEN FORMED PARALLEL.
3. DIMENSION B DOES NOT INCLUDE MOLD FLASH.
4. ROUNDED CORNERS OPTIONAL.

	INCHES		MILLIMETERS	
DIM	MIN	MAX	MIN	MAX
A	0.715	0.770	18.16	19.56
B	0.240	0.260	6.10	6.60
C	0.145	0.185	3.69	4.69
D	0.015	0.021	0.38	0.53
F	0.040	0.070	1.02	1.78
G	0.100 BSC		2.54 BSC	
H	0.052	0.095	1.32	2.41
J	0.008	0.015	0.20	0.38
K	0.115	0.135	2.92	3.43
L	0.300 BSC		7.62 BSC	
M	0°	10°	0°	10°
N	0.015	0.039	0.39	1.01

Motorola reserves the right to make changes without further notice to any products herein. Motorola makes no warranty, representation or guarantee regarding the suitability of its products for any particular purpose, nor does Motorola assume any liability arising out of the application or use of any product or circuit, and specifically disclaims any and all liability, including without limitation consequential or incidental damages. "Typical" parameters which may be provided in Motorola data sheets and/or specifications can and do vary in different applications and actual performance may vary over time. All operating parameters, including "Typicals" must be validated for each customer application by customer's technical experts. Motorola does not convey any license under its patent rights nor the rights of others. Motorola products are not designed, intended, or authorized for use as components in systems intended for surgical implant into the body, or other applications intended to support or sustain life, or for any other application in which the failure of the Motorola product could create a situation where personal injury or death may occur. Should Buyer purchase or use Motorola products for any such unintended or unauthorized application, Buyer shall indemnify and hold Motorola and its officers, employees, subsidiaries, affiliates, and distributors harmless against all claims, costs, damages, and expenses, and reasonable attorney fees arising out of, directly or indirectly, any claim of personal injury or death associated with such unintended or unauthorized use, even if such claim alleges that Motorola was negligent regarding the design or manufacture of the part. Motorola and Ⓜ are registered trademarks of Motorola, Inc. Motorola, Inc. is an Equal Opportunity/Affirmative Action Employer.

How to reach us:
USA/EUROPE/Locations Not Listed: Motorola Literature Distribution;
P.O. Box 20912; Phoenix, Arizona 85036. 1–800–441–2447 or 602–303–5454

MFAX: RMFAX0@email.sps.mot.com – TOUCHTONE 602–244–6609
INTERNET: http://Design–NET.com

JAPAN: Nippon Motorola Ltd.; Tatsumi–SPD–JLDC, 6F Seibu–Butsuryu–Center, 3–14–2 Tatsumi Koto–Ku, Tokyo 135, Japan. 03–81–3521–8315

ASIA/PACIFIC: Motorola Semiconductors H.K. Ltd.; 8B Tai Ping Industrial Park, 51 Ting Kok Road, Tai Po, N.T., Hong Kong. 852–26629298

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ขอมอบความสำเร็จของปริญญานิพนธ์ฉบับนี้แด่ บิดา มารดา ที่คอยเป็นทุกสิ่งทุกอย่าง เป็นผู้ให้ที่ยิ่งใหญ่ของคณะผู้จัดทำ และปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จะสำเร็จลุล่วงลงไปไม่ได้เลย หากขาด ผ.ศ.ประภาษ ไพรสุวรรณา อาจารย์สุรินทร์ คำฝอย อาจารย์ที่ปรึกษาผู้คอยช่วยเหลือตลอดการทำงาน ทั้งงานเบื้องหน้า และเบื้องหลัง พี่ตัวเล็กที่อำนวยความสะดวกในการยืมอุปกรณ์ต่างๆ ขอขอบคุณ พี่ๆปริญญาโททุกคน พี่ติ่ง พี่ติ พี่ทัต และโดยเฉพาะเพื่อนๆ ทุกคนที่คอยถามไถ่ให้คำปรึกษา ให้ยืมอุปกรณ์ต่างๆ ตลอดจนช่วยเหลือการทำโครงงานทั้งที่ไม่ใช่โครงงานของตัวเอง เพื่อนๆที่ได้มีส่วนในความสำเร็จ และคอยช่วยเหลือในยามที่ล้มเหลวบ้างในบางครั้ง ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง ขอบคุณมากๆครับ

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณท่านอาจารย์และผู้มีพระคุณทุกท่าน ที่ได้อบรมสั่งสอนให้ความรู้อันเป็นประโยชน์ ช่วยเติมเต็มในส่วนที่ขาด ว่ากล่าวในสิ่งที่เกิน ให้แก่คณะผู้จัดทำ ซึ่งจะได้นำความรู้ที่มีค่านี้ ไปพัฒนาสังคมและประเทศชาติต่อไป

คณะผู้จัดทำ

นาย จิรยุทธ์ ทองสา

นาย ธีระศักดิ์ พัฒน์เจริญ

นาย สุริยา โพธิมณี

นาย วรวุฒิ พงศ์ชัยศรีกุล

นาย สุทธิศักดิ์ แก้วทอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1].โกวิทมาศรัตน์, "เครื่องจักรกลไฟฟ้า", ภาควิชาไฟฟ้าวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยมหานคร, 2535

[2]. พิชิต ลำยอง, "เครื่องจักรกลไฟฟ้า 1", คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังลาดกระบัง, 2537

[3]. สุวัตน์ ดั่น, " สวิตชิ่งเพาเวอร์ซัพพลาย ", ฝ่ายวิจัย และพัฒนา บริษัทเอนเทลไทยจำกัด, 2538.

[4]. มงคล เดชนครินทร์,ชาตรี ศรีไฟวรรณ, "อิเล็คทรอนิคส์", คณะวิศวกรรมศาสตร์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2521.

[5]. ปริญญานิพนธ์ การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 4 ควอดแดรนท์โดยใช้ไอจีบีที (4 Quadrant IGBT dc drives), ชนินทร์ สิริชาญชัยกุล, ชาตรี กิจวรรณจักร์, โชคอำนวย อัศวพรพิพัฒน์, 2542

[6]. ปริญญานิพนธ์ แหล่งจ่ายไฟต่อเนื่อง (Uninteruptible Power Supply), ก้องเกียรติ บุญวัฒนกุล, ณัฏฐ์ หาญอธิปเตยยะ, ปณัสย์ ลิมปกาญจน์, 2543

[7]. ปริญญานิพนธ์ ชุดจำลองโหลดสำหรับทดสอบมอเตอร์, กิตติกร ศิลาสุวรรณ, เรืองยศ ภู่ช้าง, สาโรช พึ่งสุวรรณ, สืบศักดิ์ คุณละ, 2543

[8]. ปริญญานิพนธ์ เครื่องประจุแบตเตอรี่, พิรุฬห์ ช่วยเต็ม, อรรถพล สัตตสุริยเดช, วัลลภ ดีใจ, สนั่น รื่นเรืองฤทธิ์, 2543

[9]. ปริญญานิพนธ์ รถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้า, จตุรงค์ ญาติฝูง, จรูญ ประคำทอง, บุรินทร์ มูหาหมัด, สุรเชษฐ์ พุ่มมะปราง, สันติ บุญชัย, 2543

[10]. Ned Mohan, Tore M. Undeland, William P. Robbins, "Power Electronics Converters,Applications,and Design", Second Edition ,John Wiley&Sons,INC., New York,1995

[11]. Rashid M.H, "Power Electronic", pentice-Hall,Inc, USA, 1988

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้