

รถจักรยานไฟฟ้าขับเคลื่อนด้วย Brushless DC Motor 2 ตัว  
(Electric Tricycle by Double Brushless DC Motor)

นายกิตติศักดิ์      หมึกแดง  
นายอดิศักดิ์      ความพินิจ

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า  
คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ  
ปีการศึกษา 2553  
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ



ใบรับรองปริญญาโท  
ภาควิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

เรื่อง รถจักรยานไฟฟ้าขับเคลื่อนด้วย Brushless DC Motor 2 ตัว  
Electric Tricycle By Double Brushless DC Motor

โดย นายกิตติศักดิ์ หมึกแดง  
นายอดิศักดิ์ ความพินิจ

ได้รับอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

\_\_\_\_\_ หัวหน้าภาควิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปฏิพัทธ์ ทวนทอง)  
วันที่ \_\_\_\_\_ เดือน \_\_\_\_\_ พ.ศ. \_\_\_\_\_

คณะกรรมการสอบปริญญาโท

\_\_\_\_\_ ประธานกรรมการ  
(อาจารย์จุมพล อุดมชัยบรรเจิด)

\_\_\_\_\_ กรรมการ  
(อาจารย์นวัต สุขศิริสันต์)

\_\_\_\_\_ กรรมการ  
(อาจารย์กนกวรรณ เรืองศิริ)

ชื่อ : นาย กิตติศักดิ์ หมึกแดง  
นาย อติศักดิ์ คามพินิจ  
ชื่อปริญญาบัตร : รถจักรยานไฟฟ้าขับเคลื่อนด้วย Brushless DC Motor 2 ตัว  
(Electric Tricycle by Double Brushless DC Motor)  
สาขา : วิศวกรรมไฟฟ้า  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ  
ที่ปรึกษาปริญญาบัตร : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ขจร อินวงษ์  
ปีการศึกษา : 2553

### บทคัดย่อ

เนื่องจาก ปริญญาบัตรที่ผ่านมา ได้มีผู้สร้างจักรยานไฟฟ้าขึ้นมา โดยกลุ่ม ปริญญาบัตร พ.ศ. 2552 ได้ทำจักรยานไฟฟ้า ปรมาจาก แปลงถ่าน ซึ่งมีมอเตอร์ในการขับเคลื่อน นตัวเดียวทำให้ แรงบิดน้อยส่งผลให้การไต่ระดับไม่ได้ และในระบบห้ามล้อทางกลก็ยังไม่ได้ตัดสัญญาณไฟฟ้าที่ขับเคลื่อนมอเตอร์จึงส่งผลให้รถจักรยานขับเคลื่อนต่อไปได้

ปริญญาบัตรนี้เป็นการออกแบบและ สร้างรถจักรยานไฟฟ้า (Electric Tricycle) ที่ขับเคลื่อน ล้อหน้า 2 ล้อ ด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบปรจากแปลงถ่าน (Brushless DC Motor) ขนาด 36 โวลต์ และมีกำลังไฟฟ้า 250 วัตต์ จำนวน 2 ตัว ซึ่งมอเตอร์จะเป็นคูลล์ โดยใช้มอเตอร์เฟสเป็น อุปกรณ์กำลัง ทำหน้าที่เป็นสวิทช์ ที่ความถี่ 10 kHz การควบคุมมอเตอร์ใช้วงจรควบคุมชนิด 6 ควอดแรนท์ และเป็นการควบคุม แบบลูปปิด (Closed Loop) ชนิด Cascade Control การทำงานของ มอเตอร์ทั้ง 2 ตัว นั้นมีการควบคุมแยกออกจากกัน ในการขับเคลื่อนโดยใช้ การหมุนจากคันเร่งและ คำสั่งจากการเลี้ยวทางกล สำหรับการขับเคลื่อนไปข้างหน้าของรถจักรยานไฟฟ้าใช้คันเร่ง เป็น อุปกรณ์ควบคุมและ การชะลอความเร็วของรถจักรยานไฟฟ้าจะชะลอด้วยเบรกทางกล ซึ่งทำงาน ร่วมกับการตัดสัญญาณไฟฟ้า และการควบคุมทิศทางการเลี้ยวใช้คันบังคับเป็นตัวควบคุม

จากการสร้างรถจักรยานไฟฟ้าตัวรมีน้ำหนัก รวมแบตเตอรี่ 80 กิโลกรัม จากผลการทดสอบ การทำงานของรถจักรยานไฟฟ้าที่น้ำหนักของผู้ขับขี่ที่ 80 กิโลกรัม สามารถวิ่งด้วยความเร็ว สูงสุด 32 กิโลเมตร/ชั่วโมง และสามารถไต่ระดับได้ที่มีความชัน 20 , 27 และ 32 องศา

(ปริญญาบัตรมีจำนวนทั้งสิ้น 124 หน้า)

อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาบัตร

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาบัตรนี้ประสบความสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เป็นเพราะได้รับการชี้แนะทางด้านวิชาการที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่ง รวมทั้งเครื่องมืออุปกรณ์และสถานที่ ตลอดจนความเอื้อเฟื้อ ความเอาใจใส่ จึงขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ขจร อินวณิช อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาบัตร รวมทั้งอาจารย์ประจำภาควิชาครุศาสตร์ไฟฟ้าทุกท่าน และเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาที่ให้อำนวยความสะดวกในการจัดหาวัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือต่างๆ ที่ใช้ในโครงการนี้และ ช่างผู้ชำนาญ รุ่นพี่ เพื่อนๆ ทุกคนที่ได้ให้ความช่วยเหลือ และให้คำแนะนำต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการทำปริญญาบัตร จนทำให้โครงการนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้กราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ให้ทั้งกำลังใจ และให้โอกาสทางการศึกษาจนถึงวันนี้ซึ่งผู้จัดทำหวังเป็นอย่างยิ่งว่าปริญญาบัตรฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจและเป็นแนวทางในการพัฒนาต่อไป

กิตติศักดิ์      หมึกแดง  
อดิศักดิ์      ความพินิจ

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญตาราง	ฅ
สารบัญภาพ	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ	1
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงปราศจากแปรงถ่าน (Brushless DC Motor)	3
2.2 ไอซีเบอร์ MC33033 (DC Brushless Control)	13
2.3 ไอซีเบอร์ MC33039	16
2.4 ทฤษฎีมอเตอร์เฟด	19
2.5 ทฤษฎีการขับมอเตอร์เฟด	24
2.6 วงจรภาคกำลัง	35
2.7 ตัวควบคุมอัตโนมัติ (Auto Controllers)	37
บทที่ 3 ขั้นตอนและวิธีดำเนินงาน	41
3.1 ศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้อง	42
3.2 การสร้างชุดเลี้ยวทางกล	43
3.3 การสร้างชุดควบคุมมอเตอร์	44
3.4 ทดสอบการทำงานของชุดควบคุมมอเตอร์	56
3.5 การติดตั้งควบคุมการเลี้ยวและระบบห้ามล้อ	61
3.6 การทดสอบชุดควบคุมการเลี้ยวและระบบห้ามล้อ	64
3.7 ชุดแสดงผลแบบเตอรี	65
3.8 ทดสอบการทำงานของชุดแสดงผลแบบเตอรี	68
3.9 ประกอบเข้าโครง	69
3.10 ทดสอบการทำงานของรถจักรยานไฟฟ้า	73

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.11 การจัดพิมพ์ปฏิญญานิพนธ์	73
บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน	74
4.1 ลักษณะของรถจักรยานไฟฟ้า	74
4.2 ลักษณะสมบัติของชุดตัวระดับแรงดันไฟฟ้า	77
4.3 ลักษณะสมบัติของชุดควบคุมมอเตอร์	78
4.4 การทดสอบความเร็วของรถจักรยานไฟฟ้า	79
4.5 ระยะเวลาของรถจักรยานไฟฟ้าวิ่งได้ต่อการประจุแบตเตอรี่ 1 ครั้ง	90
4.6 สรุปผลการดำเนินงาน	91
บทที่ 5 สรุปปัญหาและข้อเสนอแนะ	92
5.1 สรุปผลโครงการ	92
5.2 ปัญหาและแนวทางการแก้ไข	93
5.3 ข้อเสนอแนะ	93
บรรณานุกรม	94
ภาคผนวก	
ก คู่มือการใช้งาน	95
ข ลายวงจรพิมพ์ และตำแหน่งการวางอุปกรณ์	98
ค โปรแกรมควบคุมชุดตัวแบตเตอรี่	102
ง อุปกรณ์และงบประมาณของโครงการ	108
จ ข้อมูลทางเทคนิค	112
ประวัติผู้เขียน	123

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2-1 การทำงานของวงจร Full-bridge	9
2-2 ค่า $I_{\text{peak}}$ , $I_{\text{mean}}$ และ $I_{\text{RMS}}$ ของวงจร Single Phase Full-Bridge ที่อุณหภูมิ ที่ไม่เท่ากันและขั้วแบบ Square wave	11
2-3 ค่า $I_{\text{peak}}$ , $I_{\text{mean}}$ และ $I_{\text{RMS}}$ ของวงจร Single Phase Full-Bridge ที่อุณหภูมิเท่ากัน และขั้วแบบ Square Wave	12
3-1 ความเร็วรอบของมอเตอร์เมื่อเลี้ยว	64
ง-1 งบประมาณรายจ่ายของโครงการ	109

## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2-1 ภาพตัดขวางของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบปราศจากแปรงถ่านที่มีโรเตอร์อยู่ภายใน	5
2-2 แรงดันพัลส์วัดมอดูละชั้น	7
2-3 กระแสเรกูละชั้น	7
2-4 วงจรควบคุมแบบ 1 เฟส และ 2 เฟส	8
2-5 วงจรHalf-Bridge โดยแสดงการลดระดับของแหล่งจ่ายไฟ DC	9
2-6 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของวงจรควบคุมแบบ Full-bridge โดยมีคาบเวลา กระแสฟอ์เวิร์คที่ Single phase load $180^\circ$	10
2-7 รูปคลื่นกระแสและ EMF แบบ 2 เฟส	12
2-8 รูปคลื่นสัญญาณการทำงานของไอซีเบอร์ MC33033	14
2-9 รูปคลื่นแสดงตำแหน่งโรเตอร์ $60^\circ$ และ $120^\circ$ องศาไฟฟ้า	14
2-10 โครงสร้างภายในและการจัดขาของไอซีเบอร์ MC33033	15
2-11 ความสัมพันธ์ของค่า $R_T$ และ $C_T$ ในการกำหนดความถี่ PWM	16
2-12 โครงสร้างภายในและการจัดขาของไอซีเบอร์ MC33039	17
2-13 ความสัมพันธ์ของ $R_T$ และ $C_T$ ในการกำหนดความถี่	17
2-14 รูปคลื่นการทำงานของ Motor Three Phase	18
2-15 โครงสร้างของอิมอสเฟตแบบแซนแนล $n$	19
2-16 การทำงานของอิมอสเฟตแบบแซนแนล $n$	20
2-17 การทำงานและกราฟคุณลักษณะของอิมอสเฟตแบบแซนแนล $n$	21
2-18 กราฟคุณลักษณะถ่ายโอนของอิมอสเฟต	23
2-19 กราฟคุณลักษณะถ่ายโอน	24
2-20 แบบจำลองการสวิตช์เหนี่ยวนำ	25
2-21 ช่วงเวลามอสเฟตทำงาน	25
2-22 ช่วงเวลาการสั่งหยุดการทำงานของมอสเฟต	27
2-23 การเปรียบเทียบระหว่างการชาร์จ์ประจุที่ขาเกตและแรงดันที่ขาเกตกับขาซอร์ส	29
2-24 ส่วนประกอบวงจรจับเกตในสภาวะรีโซแนนซ์	33



## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
2-25 (ก) แสดงวงจรขับเคลื่อน	34
(ข) แสดงวงจรภายใน TLP250	35
2-26 วงจรภาคกำลัง	36
2-27 ไดอะแกรมของตัวควบคุมแบบส่วนร่วมกับแบบบูรณาการรวมหน่วย	38
2-28 ผลตอบสนองต่อฟังก์ชันขึ้นบันไดของตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับแบบบูรณาการรวมหน่วย	38
2-29 วงจรควบคุมแบบส่วนร่วมกับแบบบูรณาการรวมหน่วย	39
3-1 แผนผังขั้นตอนการดำเนินงาน	41
3-2 บล็อกไดอะแกรมแสดงการทำงานของรถจักรยานไฟฟ้า	43
3-3 ระบบการเลี้ยงคันชักคันส่ง	44
3-4 ผังชุดควบคุมมอเตอร์	44
3-5 Brushless DC Motor ขนาด 36 V 250 W ที่ใช้งาน	45
3-6 กราฟความสัมพันธ์ในการเลือกค่า $R_T$ และ $C_T$	45
3-7 วงจรสร้างสัญญาณควบคุมโดยใช้ไอซี MC33033	46
3-8 สัญญาณ Encoder เฟส A เทียบ กับ เฟส B	46
3-9 สัญญาณ Encoder เฟส B เทียบ กับ เฟส C	47
3-10 สัญญาณ Top Drive เฟส A เทียบ กับ เฟส B	47
3-11 สัญญาณ Top Drive เฟส B เทียบ กับ เฟส C	48
3-12 สัญญาณ Bottom Drive เฟส A เทียบ กับ เฟส B	48
3-13 สัญญาณ Bottom Drive เฟส B เทียบ กับ เฟส C	49
3-14 วงขับนำเกิด(เดิม)	49
3-15 วงจรขับนำเกิดใหม่	50
3-16 สัญญาณขับนำเกิด	50
3-17 วงจรสร้างสัญญาณควบคุมโดยใช้ไอซี MC33039	51
3-18 ความสัมพันธ์ของค่า $R_T$ และ $C_T$ ในการกำหนดความเร็วในการเกิด PWM	51
3-19 วงจรแปลงจากสัญญาณ PWM เป็นไฟฟ้ากระแสตรง	52
3-20 สัญญาณแปลงจาก PWM เป็นไฟฟ้ากระแสตรง	52

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3-21 ไดอะแกรมของคั่นเร่ง	52
3-22 วงจรควบคุมอัตโนมัติ	53
3-23 สัญญาณของวงจรควบคุมอัตโนมัติ	54
3-24 วงจรภาคกำลัง	54
3-25 ตัวตรวจจับกระแสและวงจรลดทอนแรงดัน	55
3-26 แหล่งจ่ายไฟฟ้า	55
3-27 PCB ของวงจรควบคุมมอเตอร์	56
3-28 ผังแสดงการทดสอบชุดควบคุมมอเตอร์	56
3-29 สัญญาณEncoder	57
3-30 สัญญาณTop Drive	57
3-31 สัญญาณBottom Drive	58
3-32 สัญญาณขั้วนำเกิดในการทำงานจริง	58
3-33 สัญญาณแปลงจาก PWM เป็นไฟฟ้ากระแสตรง	59
3-34 สัญญาณของวงจรควบคุมอัตโนมัติ	59
3-35 แรงดัน $V_{DS}$ ที่ตัว Mosfets คำสั่ง 25%	60
3-36 แรงดัน $V_{DS}$ ที่ตัว Mosfets คำสั่งเดินหน้า 95%	60
3-37 วงจรลดทอนแรงดันเพื่อควบคุมการเลี้ยว	61
3-38 สัญญาณก่อนหมุนคั่นเร่ง	61
3-39 ความต้านทานแบบ Balance ที่มุมต่างกัน	62
3-40 สัญญาณเมื่อหมุนคั่นเร่งและยังไม่ได้ทำการเลี้ยว ที่มุม $150^\circ$	62
3-41 สัญญาณเมื่อหมุนคั่นเร่งและทำการเลี้ยวซ้าย ที่มุม $0^\circ$	63
3-42 สัญญาณเมื่อหมุนคั่นเร่งและทำการเลี้ยวขวา $300^\circ$	63
3-43 สัญญาณที่ได้จากคำสั่งเบรก	65
3-44 วงจรวัดระดับแรงดันไฟฟ้า โดยใช้ PIC 16F819	66
3-45 PCB ของชุดวัดระดับแรงดันไฟฟ้า	67
3-46 วงจรแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง (DC Supply) ของชุดวัดระดับแรงเคลื่อนไฟฟ้า	67
3-47 PCB ของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง	68

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3-48 การทดสอบระดับแรงดัน	68
3-49 กราฟแสดงแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายชุดควบคุมมอเตอร์	69
3-50 ติดตั้งลวดด้านซ้ายและลวดด้านขวา	69
3-51 ติดตั้งกล่องควบคุม	70
3-52 ติดตั้งอุปกรณ์ลดทอนแรงดัน	70
3-53 ติดตั้งแบตเตอรี่	71
3-54 ติดตั้งชุดวัดระดับแรงดันไฟฟ้า	71
3-55 ต่อสายมอเตอร์เข้ากับชุดควบคุม	72
3-56 รถจักรยานไฟฟ้าที่เสร็จสมบูรณ์	72
4-1 ขนาดต่างๆ ของรถจักรยานไฟฟ้า	75
4-2 ด้านหน้าของรถจักรยานไฟฟ้า	76
4-3 ด้านข้างของรถจักรยานไฟฟ้า	76
4-4 ด้านบนของแบตเตอรี่ของรถจักรยานไฟฟ้า	77
4-5 ด้านบนของรถจักรยานไฟฟ้า	77
4-6 ชุดวัดระดับแรงเคลื่อนไฟฟ้า	78
4-7 ส่วนบนของชุดควบคุมมอเตอร์	78
4-8 การทดสอบรถจักรยานไฟฟ้าทางเรียบ	80
4-9 การทดสอบรถจักรยานไฟฟ้าทางลาดชัน	80
4-10 กราฟความเร็วของรถจักรยานไฟฟ้าเทียบกับเวลาที่ทดสอบด้วยการปั่น ที่น้ำหนัก 80 กิโลกรัม	81
4-11 กราฟความเร็วของรถจักรยานไฟฟ้าเทียบกับเวลาที่ทดสอบด้วยการออกตัวด้วยการ ช่วยปั่นจากจุดเริ่มต้นแล้วบิดคันเร่งสูงสุดที่น้ำหนัก 80 กิโลกรัม	82
4-12 กราฟความเร็วของรถจักรยานไฟฟ้าที่ได้จากการทดลองโดยการออกตัวด้วยการบิด คันเร่งสูงสุดที่น้ำหนักผู้ทดสอบ 80 กิโลกรัม	83
4-13 กราฟความเร็วของรถจักรยานไฟฟ้าที่ได้จากการทดลองที่ความเร็ว คงที่ 10 กิโลเมตร/ชั่วโมง ที่น้ำหนักผู้ทดสอบ 80 กิโลกรัม	84

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-14 กราฟความเร็วของรถจักรยานไฟฟ้าที่ได้จากการทดลองที่ความเร็ว คงที่ 20 กิโลเมตร/ ชั่วโมง ที่น้ำหนักผู้ทดสอบ 80 กิโลกรัม	85
4-15 ระดับความชันที่ 20 องศา	86
4-16 กราฟการทดสอบด้วยความเร็วการไต่ระดับที่ความชัน 20 องศา	86
4-17 ระดับความชันที่ 27 องศา	87
4-18 กราฟการทดสอบด้วยความเร็วการไต่ระดับที่ความชัน 27 องศา	87
4-19 ระดับความชันที่ 32 องศา	88
4-20 กราฟการทดสอบด้วยความเร็วการไต่ระดับที่ความชัน 32 องศา	88
4-21 กราฟการเปรียบเทียบความเร็วต่างระดับความชันที่ 20,27 และ 32 องศา	89
4-22 กราฟการเปรียบเทียบกระแสต่างระดับความชันที่ 20,27 และ 32 องศา	90
ก-1 ขั้นตอนการใช้งานรถจักรยานไฟฟ้า	96
ก-2 แสดงขนาดต่าง ๆ ของรถจักรยานไฟฟ้า	97
ข-1 การวางอุปกรณ์ของวงจรชุดวัดระดับแรงดัน	99
ข-2 ลายวงจรพิมพ์ด้านล่างของวงจรชุดวัดระดับแรงดัน	99
ข-3 การวางอุปกรณ์ของแหล่งจ่ายวงจรชุดวัดระดับแรงดัน	99
ข-4 ลายวงจรพิมพ์ด้านล่างของแหล่งจ่ายชุดวัดระดับแรงดัน	100
ข-5 การวางอุปกรณ์ของวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบปราศจากแปรงถ่าน	100
ข-6 ลายวงจรพิมพ์ด้านบนของวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง แบบปราศจากแปรงถ่าน	100
ข-7 ลายวงจรพิมพ์ด้านล่างของวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง แบบปราศจากแปรงถ่าน	101

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ

ปริญญาานิพนธ์ที่ผ่านมามีผู้สร้างจักรยานไฟฟ้าขึ้นมา 2 กลุ่มคือ 1 โดยนายรัชชชัย มีกลิ่นหอม และนายเอกสิทธิ์ นฤทุกษ์ ปริญญาานิพนธ์ พ.ศ.2548 ซึ่งรถจักรยานคันดังกล่าวนี้ใช้ มอเตอร์ที่ขับเคลื่อนแบบ DC Motor เป็นชนิดที่มีแรงต้านจะทำให้มีค่าสูญเสีย เนื่องจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ตกคร่อมแรงต้านและมีการเสียดสีของแรงต้านกับซีคอมมิวเตเตอร์ทำให้แรงต้านเกิดการสึกหรอซึ่งมีแนวคิดที่จะลดค่าสูญเสีย โดยกลุ่มที่ 2 นายทศพล ทังรอด และนายวิษณุ ทองสัมฤทธิ์ ปริญญาานิพนธ์ พ.ศ. 2551 ได้ทำจักรยานไฟฟ้าปราศจากแปลงถ่านซึ่งมีมอเตอร์ในการขับเคลื่อนตัวเดียวทำให้แรงบิดน้อยส่งผลในการไต่ระดับไม่ได้ ระบบห้ามล้อทางกลก็ยังไม่ตัดสัญญาณไฟฟ้าที่ขับเคลื่อนมอเตอร์ ซึ่งทางผู้จัดทำได้มีแนวคิดที่จะลดปัญหาจากข้างต้นที่ได้กล่าวมา จึงได้คิดนำมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิด ปราศจากแปลงถ่าน 2 ตัว มาใช้เป็นตัวขับเคลื่อนจักรยานไฟฟ้า เพื่อที่จะให้แรงบิดดีขึ้น สามารถเพิ่มแรงบิดในการไต่ระดับได้ และในการห้ามล้อทางกลก็ได้คิดทำระบบตัดสัญญาณไฟฟ้าที่ขับเคลื่อนมอเตอร์อีกด้วย

### 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

พัฒนารถจักรยานไฟฟ้าขับเคลื่อนด้วย Brushless DC Motor 2 ตัว ให้มีแรงบิดดียิ่งขึ้น และระบบห้ามล้อทางกลทำงานร่วมกับระบบตัดสัญญาณไฟฟ้าที่ขับเคลื่อนมอเตอร์

### 1.3 ขอบเขตของโครงการ

#### 1.3.1 คุณสมบัติของรถจักรยานไฟฟ้า

1.3.1.1 มีบันไดสำหรับผู้ขับขี่สามารถปั่นเองได้

1.3.1.2 น้ำหนักโดยรวมของรถจักรยานไฟฟ้าทั้งหมดประมาณ 80 กิโลกรัม

### 1.3.2 คุณสมบัติของชุดขับเคลื่อน

1.3.2.1 มีชุดวัดความเร็วแบบ Digital

1.3.2.2 เมื่อเลี้ยวทางกลมมอเตอร์ทั้ง 2 ตัว มีความเร็วที่ไม่เท่ากัน

1.3.2.3 แหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ขนาด 12 โวลต์/24 Ah จำนวน 3 ลูก

1.3.2.4 ความเร็วสูงสุด 32 กิโลเมตร/ชั่วโมง

1.3.2.5 มีชุดเซ็นเซอร์ตรวจจับการห้ามล้อ

1.3.2.6 สามารถขับขี่ได้ระยะทาง 22.5 กิโลเมตร/การประจุแบตเตอรี่ 1 ครั้ง

1.3.2.7 มีชุดเซ็นเซอร์ตรวจจับความเร็วจำนวน 2 ชุด

1.3.2.8 มีชุดขับเคลื่อนล้อหน้าด้วยมอเตอร์ 2 ตัว อิสระต่อกัน

1.3.2.9 เมื่อมีแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่า 32.4 V การขับเคลื่อนทางไฟฟ้าหยุดทำงาน

1.3.2.10 ชุดวัดแรงดันแสดงผลด้วย LED 8 ระดับ เมื่อแรงดันต่ำกว่า 32.8V LED ดวง

สุดท้ายกระพริบเตือน

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้รับจักรยานไฟฟ้า เพื่อใช้เป็นยานพาหนะซึ่งมีแรงบิดเพิ่มขึ้นจากเดิม และมีความปลอดภัยสูงขึ้น

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานที่เกี่ยวข้อง

ในการออกแบบและสร้างรถจักรยานไฟฟ้าขับเคลื่อนด้วย Brushless DC Motor จำเป็นต้องศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องดังนี้

- 2.1 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบปราศจากแปรงถ่าน (Brushless DC Motor)
- 2.2 ไอซีเบอร์ MC33033 (Brushless DC Control)
- 2.3 ไอซีเบอร์ MC33039
- 2.4 ทฤษฎีมอเตอร์
- 2.5 ทฤษฎีการขับเคลื่อนมอเตอร์
- 2.6 วงจรภาคกำลัง
- 2.7 ตัวควบคุมอัตโนมัติ (Auto Controllers)

#### 2.1 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบปราศจากแปรงถ่าน (Brushless DC Motor) (วิชญและทศพล, 2552: 36-37)

2.1.1 ความหมายและรูปแบบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบปราศจากแปรงถ่าน (Brushless DC Motor)

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบปราศจากแปรงถ่าน (Brushless DC Motor) มีลักษณะตามชื่อของตัวมันคือ เป็นมอเตอร์ที่ปราศจากแปรงถ่าน สลิปริง และ คอมมิวเตเตอร์ ซึ่งสิ่งเหล่านั้นเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง หรือมอเตอร์ซิงโครนัส เพื่อทำหน้าที่ในการจ่ายแรงดันให้กับขดลวดอาร์เมเจอร์ที่พันอยู่บนโรเตอร์

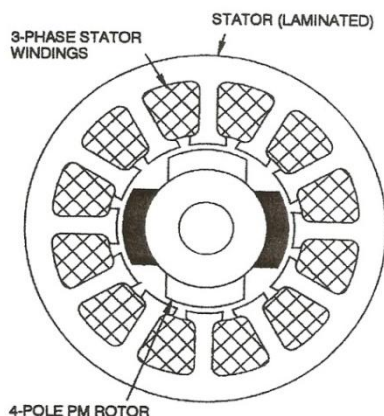
มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบปราศจากแปรงถ่านมีส่วนประกอบที่สำคัญคือส่วนหมุนที่เป็นแม่เหล็กถาวร และส่วนอยู่กับที่เป็นขดลวดอาร์เมเจอร์ ถ้าย้อนกลับไปพิจารณาถึง มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบมีแปรงถ่านในการทำงานแม่เหล็กถาวรจะอยู่กับที่ ในขณะที่ขดลวดอาร์เมเจอร์เป็นส่วนหมุน มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงทั้ง 2 ชนิด กระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านตัวนำกลับไปกลับมาเพื่อสร้างขั้วแม่เหล็กขึ้น ในทำนองเดียวกันเพื่อให้แน่ใจว่าแรงบิดที่เกิดขึ้นนั้นมีทิศทางไปในทางเดียวกันให้สังเกตมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบมีแปรงถ่าน การกลับขั้ว ถูกจัดการโดย

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบปราศจากแปรงถ่านการกลับขั้วถูกจัดการโดยทรานซิสเตอร์กำลัง ซึ่งต้องถูกสวิตช์ไปตามลำดับตำแหน่งการหมุนของโรเตอร์เช่นเดียวกัน ซึ่งการตรวจสอบตำแหน่งการหมุนของโรเตอร์จะใช้ตัวถอดรหัส (Encoder) แทนการใช้คอมมิวเตเตอร์กับแปรงถ่าน ขบวนการติดต่อทางไฟฟ้าของมอเตอร์ทั้งสองชนิดเหมือนกัน เป็นสาเหตุให้เกิดสมการและคุณสมบัติระหว่างความเร็วรอบและแรงบิดเกือบจะเหมือนกันทุกประการ

เมื่อกระแสเฟสในมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงปราศจากแปรงถ่าน สวิตช์กลับขั้วทำให้เกิดขั้วแม่เหล็กตามลำดับ มอเตอร์จะทำงานในลักษณะการกระตุ้นแบบรูปคลื่นสี่เหลี่ยม (Square Wave) และแรงเคลื่อนไฟต้าน (Back-EMF) กรณีนี้จะถูกสร้างขึ้นให้เป็นรูปสี่เหลี่ยม ในรูปคลื่นสี่เหลี่ยม ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าจะถูกใช้ในการอ้างถึงมอเตอร์ และชุดควบคุมอย่างไรก็ตามยังมีโหมดการทำงานแบบอื่นซึ่งกระแสเฟสจะถูกสร้างขึ้นเป็นรูปคลื่นไซน์ (Sine Wave) และ เป็นเหตุทำให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าทางอุดมคติเป็นรูปคลื่นไซน์ด้วย รูปร่างของมอเตอร์และชุดควบคุม จะเหมือนกับ มอเตอร์ที่ขับด้วยรูปคลื่นสี่เหลี่ยม แต่ทั้งสองชนิดมีความแตกต่างกันที่สำคัญคือ มอเตอร์ที่ขับแบบรูปคลื่นไซน์ ในการหมุนจะมีการกระจายอัตราส่วนกระแสต่อตัวนำที่ดีกว่า เหมือนกับสนามแม่เหล็กหมุนในอินดักชันมอเตอร์หรือมอเตอร์ไฟฟ้าแบบซิงโครนัส มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงปราศจากแปรงถ่านแบบนี้คือ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับแบบซิงโครนัส ที่แท้จริงจากการกระตุ้นที่คงที่จากแม่เหล็กถาวร ดูเหมือนกับซิงโครนัส มอเตอร์มากกว่า มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงทั่วไป และเป็นสาเหตุที่ทำให้เรียกว่า มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับแบบปราศจากแปรงถ่าน มอเตอร์แบบปราศจากแปรงถ่านที่ใช้แม่เหล็กถาวร ส่วนใหญ่จะผลิตขึ้นในประเทศญี่ปุ่นและยุโรป แต่จะกล่าวถึงมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับแบบเซอร์โว (AC Servo Motor) มากกว่ามอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบปราศจากแปรงถ่าน อุตสาหกรรมในอเมริกากล่าวถึง เครื่องกลกระแสสลับ (AC Machine) นั้นหมายถึงมอเตอร์ซึ่งจะเริ่ม สตาร์ท และทำงานจากแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

จากภาพที่ 2-1 เป็นภาพตัดขวางของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบปราศจากแปรงถ่าน แบบที่มีส่วนหมุนอยู่ภายในแม่เหล็กถาวรจะอยู่บนโรเตอร์ ซึ่งทำให้ไม่จำเป็นต้องใช้แปรงถ่านกับซีคอมมิวเตเตอร์อีก เนื่องจากขดลวดอยู่บนสเตเตอร์เป็นส่วนที่อยู่กับที่การทำให้โรเตอร์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กลงจะช่วยลดความเฉื่อยลงได้มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับมอเตอร์ชนิดที่มีโรเตอร์อยู่ภายนอก





ภาพที่ 2-1 ภาพตัดขวางของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบปราศจากแปรงถ่านที่มีโรเตอร์ภายใน

### 2.1.2 ทฤษฎีการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบปราศจากแปรงถ่าน

2.1.2.1 หลักการควบคุมพื้นฐานจากที่กล่าวมา มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบปราศจากแปรงถ่าน ต้องการลำดับเฟสของกระแส ซึ่งอาจจะเป็นแบบรูปคลื่นไซน์ (Sine Waves Drive) หรือแบบรูปคลื่นสี่เหลี่ยม (Square Waves Drive) ก็ได้ขึ้นอยู่กับวิธีการออกแบบในทั้ง 2 กรณีอุปกรณ์กำลังที่ใช้ในชุดควบคุมจะมีลักษณะเหมือนกันตามที่แสดงให้เห็นในภาพที่ 2-14 แตกต่างกันเพียงวิธีการควบคุมการสวิตช์ของทรานซิสเตอร์กำลังโดยหลักการจะพยายามควบคุมแรงบิดและความเร็วรอบให้มีความแม่นยำและเรียบ ในขณะเดียวกันจะต้องจำกัดกระแสอยู่ภายในค่าที่ปลอดภัยของมอเตอร์ ไม่มีแปรงถ่านแบบแม่เหล็กถาวรคือ เครื่องกลไฟฟ้าแบบกระแสสลับซึ่งดูได้จากการเปลี่ยนทิศทางของกระแสเฟสทุก ๆ ครึ่งไซเคิลตามการหมุนแผ่นแม่เหล็กถ้ากระแสเฟสเป็นรูปไซน์การกระจายของกระแสเฟสในตัวนำ (Ampere-Conductor Distribution) จะเป็นไปอย่างต่อเนื่องที่ความเร็วเชิงโคโรนา การทำให้กระแสเฟสไหลเข้าไปในขดลวดในลักษณะรูปคลื่นไซน์ การสวิตช์ของทรานซิสเตอร์เรียกว่า พัลส์วิดมอดูเลชัน (PWM)

ในกรณีที่เป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยมในการหมุนการกระจายกระแสต่อตัวนำจะไม่เรียบ แต่ยังคงค่าตำแหน่งคงที่ไว้ที่  $60^\circ$  องศาไฟฟ้าและเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใดที่อีก  $60^\circ$  องศาไฟฟ้าต่อไปข้างหน้า การเปลี่ยนแปลงสัญญาณพัลส์ คือ ผลของการคอมมิวเตชันและการเปลี่ยนแปลงของกระแสระหว่างเฟสภายใต้การควบคุมการสวิตช์ของทรานซิสเตอร์กำลังในแต่ละช่วง  $60^\circ$  ค่าแรงบิดยังคงมีค่าคงที่ ถ้ากระแสและ Back-EMF มีค่าคงที่ ดังนั้นจึงต้องสร้างสัญญาณรูปคลื่น Back-EMF ให้เป็นรูปสี่เหลี่ยมและพยายามรักษาระดับกระแสให้คงที่ในระหว่างทุก ๆ ช่วง  $60^\circ$  โดยปกติแล้วจะทำได้จากการใช้ พัลส์วิดมอดูเลชันหรือการชอปเปอร์

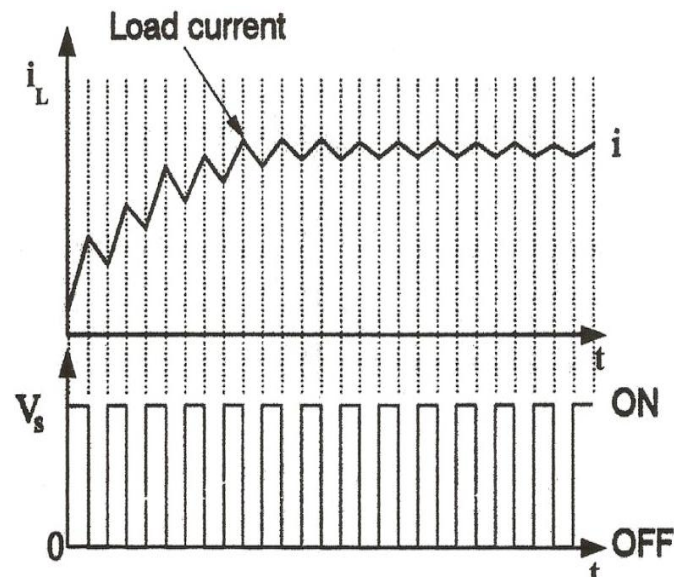
จากที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นคงทราบว่าอุปกรณ์กำลังที่ใช้ในการควบคุมมอเตอร์แบบปราศจากแปรงถ่านจะถูกใช้งานในโหมดของการสวิตช์ ซึ่งก็หมายความว่าการทำงานของอุปกรณ์กำลัง (ทรานซิสเตอร์และไดโอด) จะถูกทำงานในลักษณะสวิตช์ไม่เปิดก็ปิดตลอดเวลาซึ่งสามารถควบคุมโดยการควบคุมอัตราส่วนของเวลาหรือการควบคุมดิวตีไซเคิล หลักการของการควบคุมแบบ ดิวตีไซเคิลคือ ต้องทำการสวิตช์ทรานซิสเตอร์กำลังที่ค วามถี่สูงแล้วควบคุมค่ากระแสเฉลี่ย โดยใช้ความสัมพันธ์ช่วงเวลาเปิดและปิด

2.1.2.2 แรงดันพัลส์ วิตมอดูละชันและกระแสเรกูละชันการมอดูละชันแรงดัน (PWM) ที่แสดงในภาพที่ 2-2 และ 2-3 ทรานซิสเตอร์กำลังจะถูกสวิตช์เปิดหรือปิด โดยปกติจะทำการสวิตช์ที่ความถี่คงที่  $f_s$  ค่าเวลาจะหาได้จาก  $T=1/f_s$  แรงดันที่ตกคร่อมโหลดคือ  $V_s$  จะได้จากช่วงเวลา ที่ทรานซิสเตอร์กำลังนำกระแส  $t_{ON}$  ส่วนในช่วงเวลาที่ทรานซิสเตอร์กำลังหยุดนำกระแส  $t_{OFF}$  แรงดันที่ตกคร่อมโหลด จะเป็นศูนย์หรือไม่ก็  $-V_s$  ในกรณีที่เป็นการชอปเปอร์ของแรงดันจะเรียกว่า การชอปเปอร์แบบซอฟต์ แต่ถ้าในกรณีที่เป็นการชอปเปอร์จะเรียกว่าการชอปเปอร์แบบฮาร์ดในการชอปเปอร์แบบซอฟต์ต้องการรูปแรงดันเป็นศูนย์ ในขณะที่โหลดถูกลัดวงจร โดยปกติจะลัดวงจรผ่านทรานซิสเตอร์กำลังหนึ่งตัวและไดโอดกำลังหนึ่งตัว แต่ในกรณีที่เป็นการชอปเปอร์แบบฮาร์ด จะต้องการแรงดันตกคร่อมโหลดในลักษณะกลับขั้วปกติจะไหลผ่าน Free Wheeling ไดโอด 2 ตัว โดยที่ค่าดิวตีไซเคิลสามารถหาได้จากสมการที่ (2-1)

$$d = \frac{t_{ON}}{T_s} = \frac{t_{ON}}{t_{ON} + t_{OFF}} \quad (2-1)$$

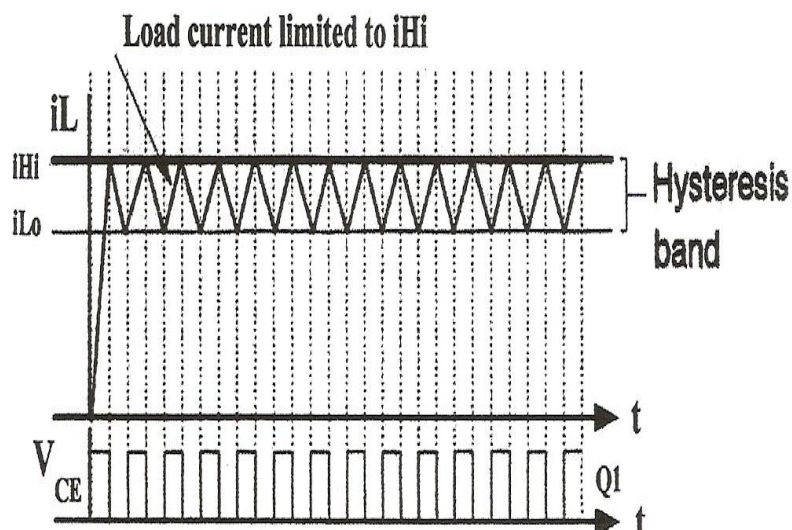
ถ้าแหล่งจ่ายคงที่และดิวตีไซเคิลคงที่ด้วยแรงดันที่ตกคร่อมโหลดจะหาได้จากสมการที่ (2-2)

$$V_{load} = d \cdot V_s \quad (2-2)$$



ภาพที่ 2-2 แรงดันพัลส์วิตช์มอดูเลชัน

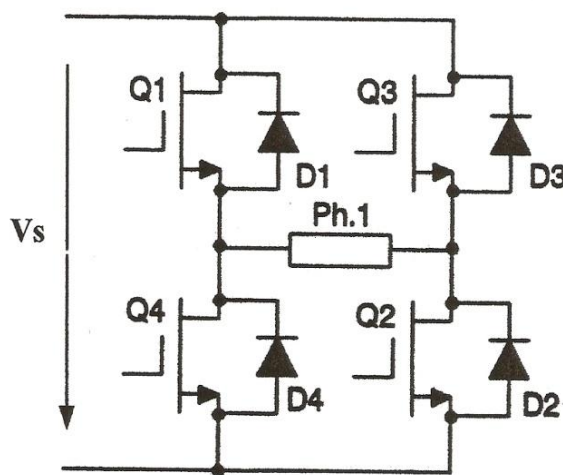
ตัวรีเลย์สามารถปรับค่าได้ ถ้ามอเตอร์มีความถี่ที่  $f_1$  ทรานซิสเตอร์กำลังที่ใช้ในการชอปเปอร์จะต้องการความถี่ในการสวิตช์  $f_s$  ที่สูงกว่า โดยทั่วไปแล้วจะสูงกว่าประมาณ 10 เท่า จะทำให้ค่าอินดักแตนซ์ในโหลดลดค่ารีปเปิ้ลที่เกิดจากความถี่สวิตช์ของกระแสโหลดลง ตัวอย่าง ถ้าความถี่ของมอเตอร์คือ 1000 Hz ความถี่ในการสวิตช์ควรเลือกใช้ไม่ต่ำกว่า 10 kHz แต่นั่นเป็นระดับมอเตอร์ที่มีกำลังไฟฟ้าต่ำ ๆ ถ้าเป็นไปได้ควรจะใช้ความถี่ในการสวิตช์ระดับนี้จะทำให้มอเตอร์ไม่มีเสียงกราง



ภาพที่ 2-3 กระแสเรกูเลชัน

จากภาพที่ 2-3 เป็นการบังคับกระแสซึ่งสามารถทำได้โดยการตรวจจับกระแสที่ไหลผ่าน และควรมีค่าแบนด์วิดท์ที่เพียงพอต่อการเปลี่ยนแปลงของกระแสอย่างรวดเร็ว สัญญาณกระแสที่ป้อนกลับจะถูกเปรียบเทียบกับค่ากระแสอ้างอิงในการเปรียบเทียบกระแสจะมีค่าฮิสเตอร์ซิสเล็กน้อย เมื่อกระแสไหลมีค่าเกินกระแสที่ติดตั้งไว้  $i_{Hi}$  ทรานซิสเตอร์กำลังจะทำการสวิตช์ให้หยุดนำกระแสและกระแสที่ตรวจจับได้ลดลง Back-EMF ของมอเตอร์จะตกคร่อมในค่าความต้านทานของตัวมอเตอร์ เมื่อกระแสลดลงจนมีค่าต่ำกว่าระดับกระแสอ้างอิง  $i_{Lo}$  การขับทรานซิสเตอร์กำลังจะทำการสวิตช์ปิดวงจรอีกครั้ง จะเห็นว่ากระแสที่ไหลจะเกิดฮิสเตอร์ซิส ( $i_{Hi}-i_{Lo}$ ) ซึ่งความถี่และแอมพลิจูดของรีปเปิ้ลนั้นจะขึ้นอยู่กับค่าอินดักแตนซ์ของโหลดแรงดันที่ใช้ในวงจรและค่าแบนด์วิดท์ของวงจรการบังคับกระแส

### 2.1.6 การควบคุมแบบ Full-Bridge ของ 1 เฟส และ 2 เฟส

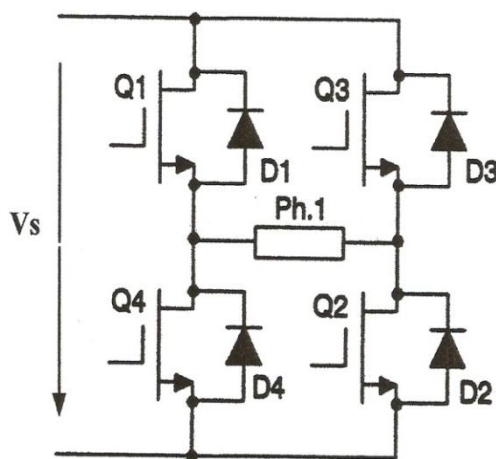


ภาพที่ 2-4 วงจรควบคุมแบบ 1 เฟส และ 2 เฟส

ภาพที่ 2-4 แสดงวงจร Full-Bridge ที่ใช้กับโหลดแบบ Single-Phase สำหรับ Brushless Motor แบบ Single-Phase ซึ่งการสั่งการทำงานของวงจรมีได้สรุปไว้ในตาราง 2-1 เมื่อ Q1 และ Q2 ทำงานจะมีแรงดันตกคร่อมโหลดเท่ากับ  $V_s$  เมื่อ Q3 และ Q4 ทำงานจะมีแรงดันตกคร่อมโหลดเท่ากับ  $-V_s$  เปรียบเทียบกับวงจร Half-Bridge จากภาพที่ 2-5 ซึ่งเหมาะที่จะใช้กับโหลดที่ต้องการแรงดันเป็น 2 เท่า ถึงแม้ว่าจะใช้แหล่งจ่ายแรงดันเดียวกัน แต่กำลังและกระแสมอเตอร์ที่ได้จะมีเพียงครึ่งเดียวเท่านั้น

จากตารางที่ 2-1 สีแถวแรกแสดงการควบคุมทรานซิสเตอร์ Q1 และ Q2 ทางด้านบวกหรือกระแส Forward กระแสจะไหลผ่านไดโอด Freewheel D4 เมื่อ Q1 off และกระแสจะไหล

ผ่านไดโอด Freewheel D3 เมื่อ D2 off ซึ่งจะมีเพียงไดโอด 1 ตัว และทรานซิสเตอร์ 1 ตัวที่ทำงาน ทำให้แรงดันที่ตกคร่อมโหลดลดลงจนเป็นศูนย์และกระแส Free Wheeling ที่โหลดจะค่อยลดลงภายใต้เงื่อนไขของ Back-EMF มอเตอร์ และแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทานในวงจรรูปนี้จะเป็นวิธีของการทำให้เกิดการเปลี่นกระแส Ripple เล็กน้อย เพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความถี่ หรือเป็นทางเลือกที่ต้องการเปลี่ยนแปลงความถี่เพื่อที่จะทำให้กระแสไหลอยู่ในระดับหนึ่ง เมื่อทรานซิสเตอร์ทั้งสอง off กระแสจะไหลผ่าน D3 และ D4 ทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมโหลดมีค่าเป็นแรงดันไฟลอป ในเวลาต่อมาสำหรับกระแสทางด้าน Forward ทรานซิสเตอร์ Q3 และ Q4 ทำงานไดโอด D1 และ D2 ไม่ทำงาน

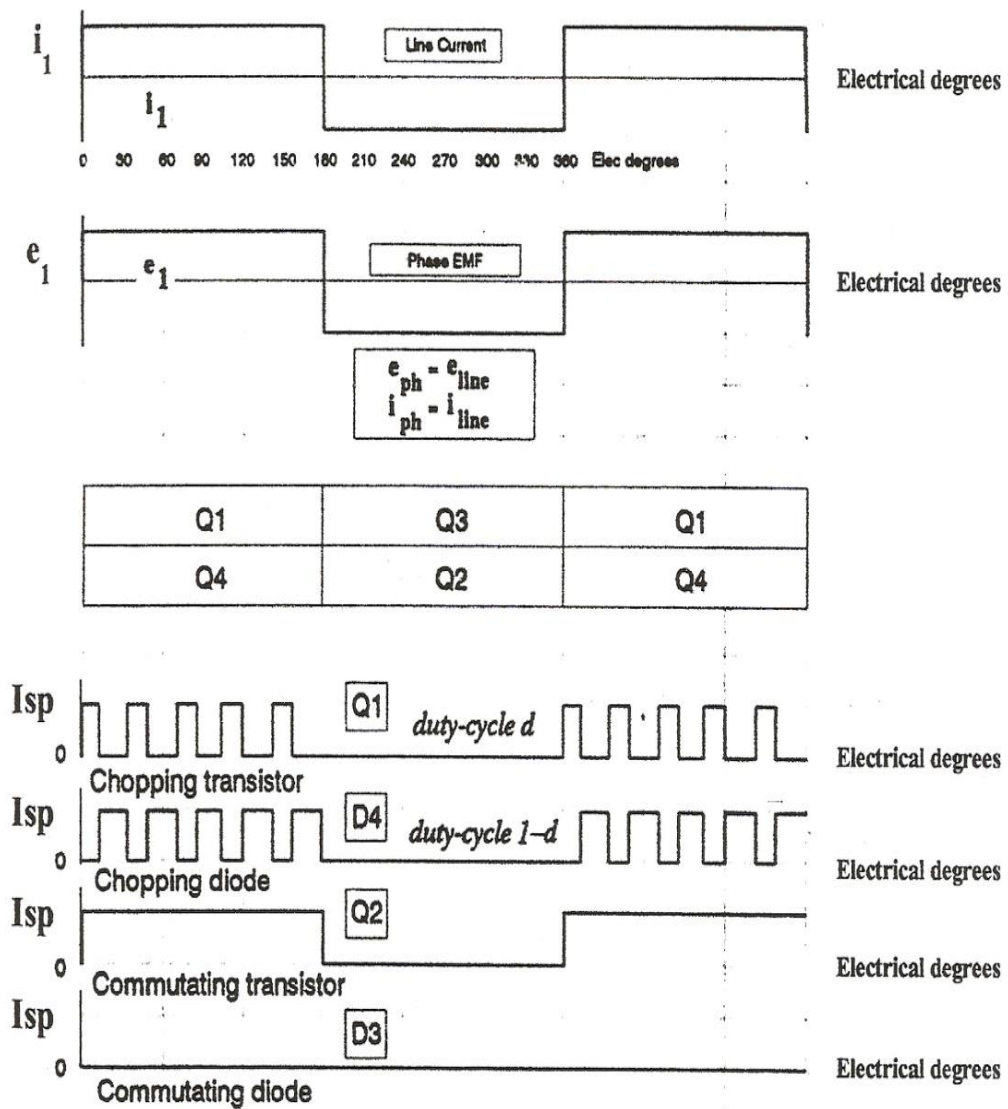


ภาพที่ 2-5 วงจร Half-Bridge โดยแสดงการลดระดับของแหล่งจ่ายไฟ DC

ตารางที่ 2-1 การทำงานของวงจร Full-Bridge

Q1	Q2	Q3	Q4	D1	D2	D3	D4	$V_{load}$	$I_{load}$	Power
1	1	0	0	0	0	0	0	$+V_s$	+	+
0	1					0	1	0	+	0
1	0					1	0	0	+	0
0	0					1	1	$-V_s$	+	-
0	0	1	1	0	0	0	0	$-V_s$	-	+
		0	1	0	1			0	-	0
		1	0	1	0			0	-	0
		0	0	1	1			$+V_s$	-	-

ในกลุ่มที่ 2 นี้จะแสดงเทคนิคการควบคุม Q3 และ Q4 ทางด้านลบหรือกระแส Reverse ระยะเวลาต่อมาสำหรับกระแสทางด้าน Reverse จะเกิดจากทรานซิสเตอร์ Q1 กับ Q2 ทำงานและไดโอด D3 กับ D4 ไม่ทำงาน



ภาพที่ 2-6 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของวงจรควบคุมแบบ Full-Bridge โดยมีคาบเวลากระแสฟอว์เวิร์ดที่ Single phase load  $180^\circ$

ภาพที่ 2-6 แสดงรูปคลื่นของกระแสและแรงดันที่ใช้กับวงจรควบคุมแบบฟูลบริดจ์ single-phase ซึ่งจะนำกระแสทั้งทางด้านฟอว์เวิร์ดและรีเวิร์ด  $180^\circ$  โดยไดอะแกรมนี้จะแสดง

คาบเวลาที่ทรานซิสเตอร์แต่ละตัวทำงานและแสดงรูปคลื่น Chopping ของการนำกระแสแบบฟอร์เวิร์ด

โดยไดโอดแกรมจะแสดงสถานะของทรานซิสเตอร์ Q1 เมื่อเกิดการ Chopping ที่  $180^\circ$  ของคาบเวลาทั้งหมด ขณะที่ Q2 ยังคง ON ตลอดในช่วงเวลานี้ โดยกรณีของ Q1 จะเรียกว่า Chopping Transistor และในกรณีของ Q2 จะเรียกว่า Commutating Transistor

โดยวงจร Chopping นั้นสามารถที่จะกำหนดให้ทรานซิสเตอร์ตัวใดตัวหนึ่งระหว่างทรานซิสเตอร์ทั้งสองตัวทำงาน ยกตัวอย่างเช่น ในครึ่งไซเคิลถัดไปของกระแสทางด้านฟอร์เวิร์ด Q1 นั้นจะยังคง ON อยู่ในขณะที่ Q2 เกิดการชอปซึ่งแรงดันที่โหลดจะมีค่าเท่ากับครึ่งไซเคิลแรก แต่อย่างไรก็ตามจะเกิดความร้อนขึ้นที่ตัวทรานซิสเตอร์ทั้งสอง เพราะว่ากระแสเฉลี่ยและกระแส RMS มีค่าเท่ากัน

รูปคลื่นตามภาพที่ 2-6 นั้นสามารถใช้เป็นพื้นฐานในการคำนวณหาค่า  $I_{peak}$ ,  $I_{mean}$  และ  $I_{RMS}$  ในโหลด, ใน Chopping transistor ใน Commutating transistor และไดโอดในแต่ละตัว ตารางที่ 2-2 จะสรุปผลในกรณีที่ทรานซิสเตอร์ทั้งหมด Chopping และตารางที่ 2-3 แสดงกรณีที่เกิดการ Chopping ระหว่างทรานซิสเตอร์ทั้งสองตัวในช่วงเวลาที่สลับกันในแต่ละเฟส

ตารางที่ 2-2 ค่า  $I_{peak}$ ,  $I_{mean}$  และ  $I_{RMS}$  ของวงจร Single Phase Full-Bridge ที่อุณหภูมิที่ไม่เท่ากันและขั้วแบบ Square Wave

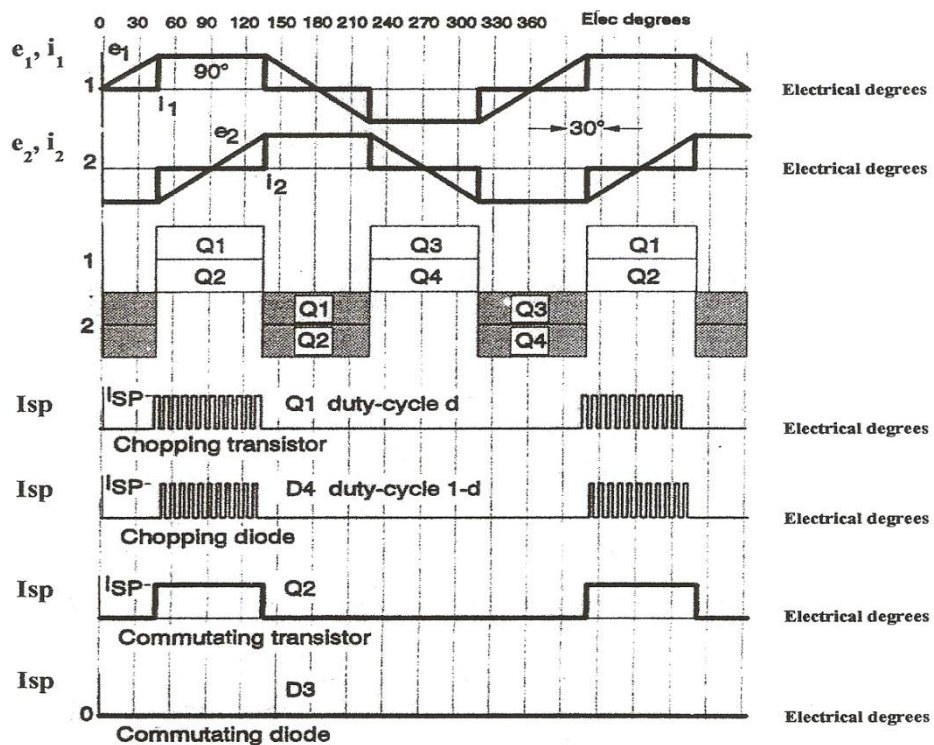
	Peak	Mean	RMS
Line	1	1	1
Chopping Transistor	1	$d/2$	$\sqrt{d/2}$
Chopping Diode	1	$(1-d)/2$	$\sqrt{[(1-d)/2]}$
Commutating Transistor	1	$1/2$	$1/\sqrt{2}$
Commutating Diode	1	0	0



ตารางที่ 2-3 ค่า  $I_{peak}$ ,  $I_{mean}$  และ  $I_{RMS}$  ของวงจร Single Phase Full-Bridge ที่อุณหภูมิต่ำกว่า และขับแบบ Square Wave

	Peak	Mean	RMS
Line	1	1	1
Transistor	1	$(1+d)/4$	$\sqrt{[1+d]}/2$
Diode	1	$(1+d)/4$	$\sqrt{[1+d]}/2$

ในการขับแบบ 2 เฟส จะกระทำเช่นเดียวกัน แต่ทรานซิสเตอร์แต่ละตัวนั้นจะทำงานที่ 90 องศา เท่านั้นแทนที่จะเป็น 180 องศา โดยรูปคลื่นจะแสดงดังภาพที่ 2-7 โดยกระแส  $I_{peak}$ ,  $I_{mean}$  และ  $I_{RMS}$  ในแต่ละเฟสของ Chopping Transistor ในตัวนั้น ๆ จะสรุปไว้ในตารางที่ 2-3 ถ้าเกิดทรานซิสเตอร์สลับการทำงานในแต่ละไซเคิล สำหรับที่อุณหภูมิต่ำกว่ากระแส  $I_{peak}$ ,  $I_{mean}$  และ  $I_{RMS}$  จะสามารถสรุปได้ในตารางที่ 2-2



ภาพที่ 2-7 รูปคลื่นกระแสและ EMF แบบ 2 เฟส

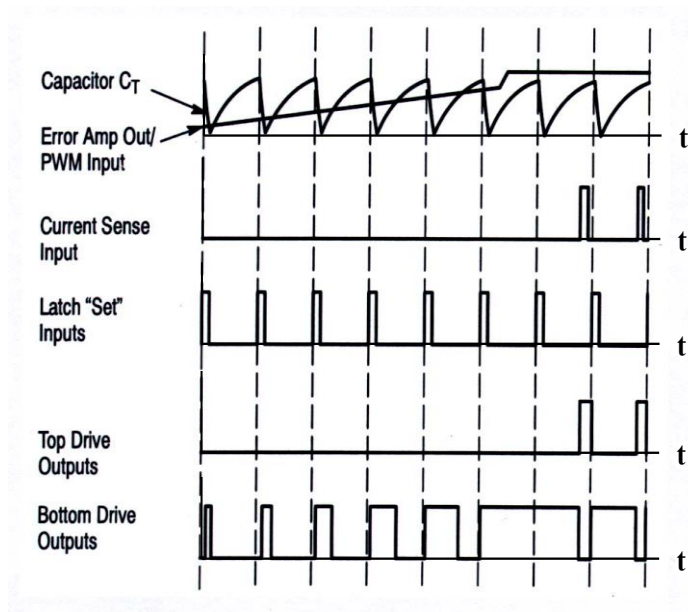


## 2.2 ไอซีเบอร์ MC33033 (นรungskฤทธิและสิทธิศักดิ์, 2549: 11-15)

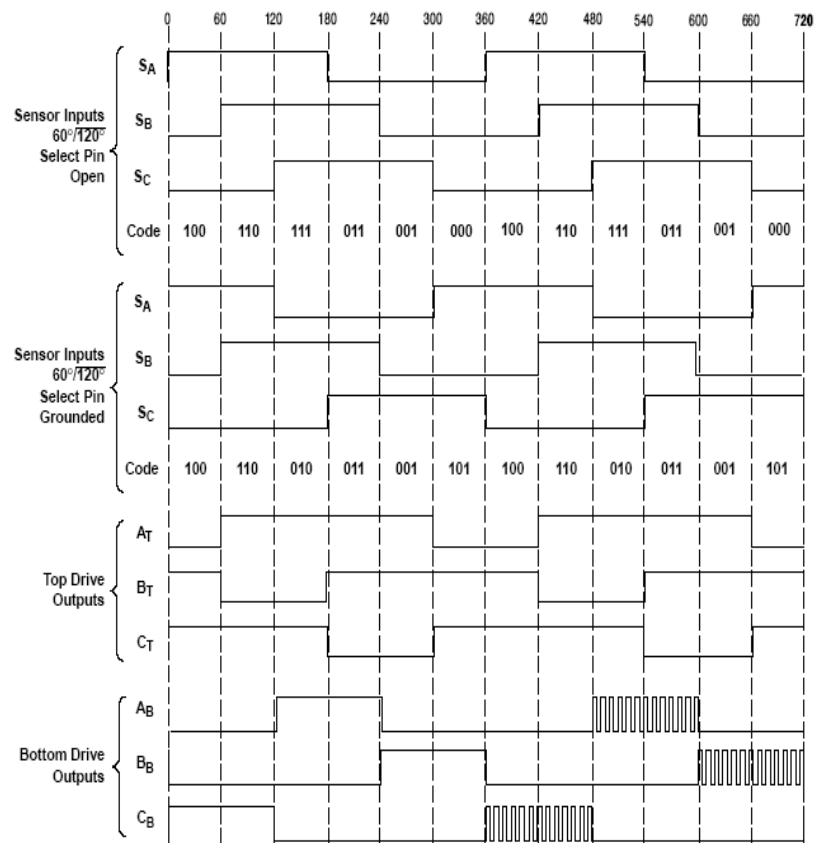
### 2.2.1 คุณลักษณะของไอซี MC33033

ไอซี MC33033 จะรับสัญญาณจาก Encoder เข้ามาทางขา 4, 5 และ 6 ตามลำดับ แล้วนำสัญญาณที่ได้ผ่านเข้าวงจรตรรกศาสตร์พร้อมกับสัญญาณ F/R ที่ขา 3 กับ  $60^\circ/120^\circ$  ที่ขา 18 จากนั้นสัญญาณที่ได้เข้าวงจร AND Gate ทางด้านเอาต์พุต การปรับความเร็วรอบสามารถทำได้โดยปรับความกว้างของสัญญาณพัลส์ PWM ทางด้านเอาต์พุตชุดล่างของไอซี ซึ่งจะได้จากการเปรียบเทียบสัญญาณฟันเลื่อยที่ขา 8 กับแรงดันที่ป้อนให้กับวงจรขยายความแตกต่าง (Error Amp) ที่ขา 9 ความกว้างของเอาต์พุตพัลส์ชุดล่างของไอซีสามารถกำหนดให้มีค่ามากที่สุดหรือมีค่าเท่ากับศูนย์ได้ด้วยการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันที่ขา 9 ตั้งแต่ 0 โวลต์เพิ่มขึ้นจนถึง 6 โวลต์ แล้วสัญญาณ PWM แล้วสัญญาณ PWM ที่ได้จะถูกส่งไปยังวงจร AND Gate ทางเอาต์พุตชุดล่าง

การจำกัดกระแสมอเตอร์ทำได้โดยฟังก์ชัน Current Sensor ที่ขา 12 ซึ่งไอซี MC33033 จะมี Op-Amp ทำงานเป็นตัวเปรียบเทียบสำหรับ ตรวจสอบกระแสที่ไหลผ่านมอเตอร์ ขาอินเวอร์ต์ตั้งของตัวเปรียบเทียบจะต่ออยู่กับแรงดันอ้างอิง 100 mV ส่วนขาอนอินเวอร์ต์ตั้งของตัวเปรียบเทียบจะเป็นขาที่รับสัญญาณตรวจจับกระแส การตรวจจับกระแส จะได้จากการต่อความต้านทานค่าต่ำ ๆ อนุกรมระหว่างอุปกรณ์กำลังชุดล่างกับกราวด์ การจำกัดกระแสอาศัยหลักการทำงานแบบรอบต่อรอบ การทำงานแบบรอบต่อรอบจะคอยตรวจจับสัญญาณกระแสในขณะที่อุปกรณ์กำลังนำกระแส มีกระแสไหลผ่านมอเตอร์ ถ้าสัญญาณกระแสมีค่าต่ำกว่า 100 mV ตัวเปรียบเทียบจะส่งแรงดัน “Low” ไปยังวงจร Latch มอเตอร์จะทำงานตามปกติ แต่ถ้าสัญญาณที่ถูกตรวจสอบได้มีค่ามากกว่า 100 mV ตัวเปรียบเทียบจะส่งสัญญาณแรงดันเป็น “High” ไปยังวงจร Latch ทำให้ไอซีหยุดจ่ายสัญญาณเอาต์พุตชั่วขณะ การหยุดจ่ายสัญญาณขั้วเกดทำให้มอเตอร์มีกระแสลดลงจนสัญญาณกระแสที่ตรวจจับได้มีค่าต่ำกว่า 100 mV ไอซีก็จะจ่ายสัญญาณเอาต์พุตต่อไป จะทำงานวนรอบอย่างนี้ไปเรื่อย ๆ ดังภาพที่ 2-8 และ ภาพที่ 2-9



ภาพที่ 2-8 รูปคลื่นสัญญาณการทำงานของไอซีเบอร์ MC33033

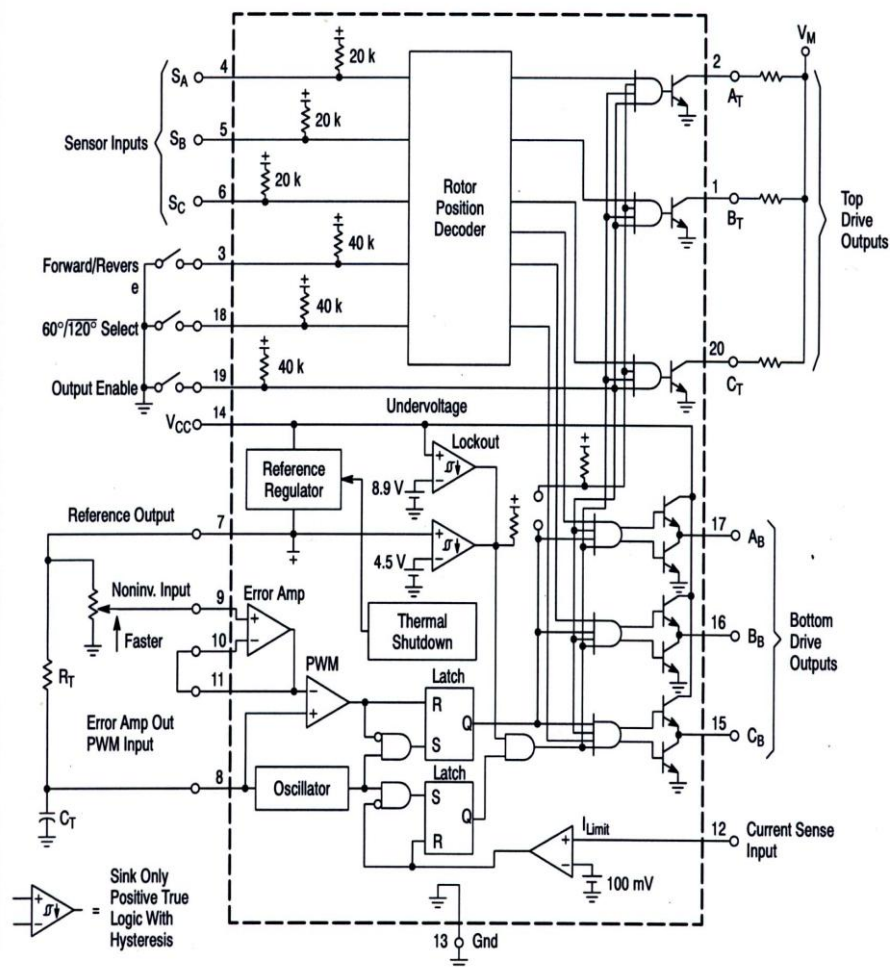


ภาพที่ 2-9 รูปคลื่นแสดงตำแหน่งโรเตอร์ 60° และ 120° องศาไฟฟ้า

### 2.2.2 โครงสร้างของ MC33033

ในการออกแบบชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบปราศจากแปรงถ่าน อาศัยหลักการตรวจสอบตำแหน่งของโรเตอร์เป็นองศา แล้วจึงสร้างสนามแม่เหล็กที่ เกิดบนสเตเตอร์ให้สัมพันธ์กับโรเตอร์ ซึ่งสามารถปรับ ความเร็วรอบของมอเตอร์ได้ด้วยการ Chopper แรงดันที่สร้างสนามแม่เหล็กขึ้น ซึ่งในโครงงานนี้ได้เลือกใช้ไอซีเบอร์ MC33033 เป็นตัวควบคุม

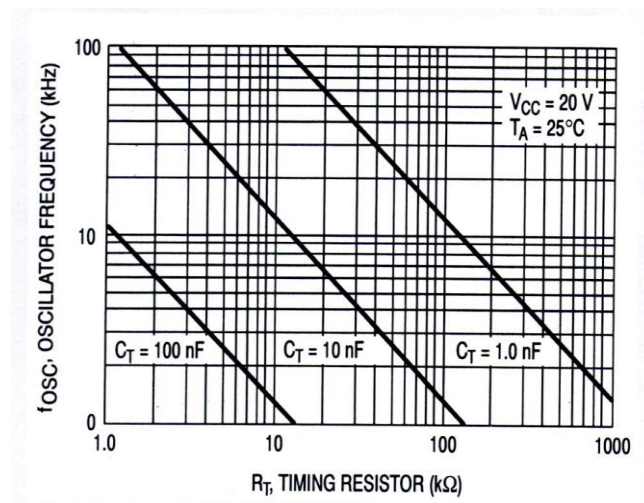
ไอซี MC33033 เป็นไอซีที่ออกแบบมาเพื่อใช้ในงานควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบปราศจากแปรงถ่าน โดยที่ไอซีจะรับสัญญาณบอกตำแหน่งของโรเตอร์มาแล้วถอดรหัสสร้างเป็นสัญญาณ PWM โครงสร้างและการจัดขาของไอซีเบอร์ MC33033 แสดงดังภาพที่ 2-10



ภาพที่ 2-10 โครงสร้างภายในและการจัดขาของไอซีเบอร์ MC33033

### 2.2.3 การกำหนดคาบเวลาการทำงานของไอซีเบอร์ MC33033

เพื่อสร้างสัญญาณ PWM ที่มีความถี่คงที่คาบเวลาการทำงานของเอาต์พุตที่ขา 15, 16 และ 17 จะถูกกำหนดโดยค่าของ  $R_T$  และ  $C_T$  จากภายนอกที่ขา 8 โดยการต่อ  $R_T$  กับแรงดันอ้างอิงซึ่งมีแรงดันประมาณ 6.25 V ที่ขา 7 แล้วอนุกรมกับ  $C_T$  ลงกราวด์แล้วต่อแรงดันตกคร่อม  $C_T$  เข้าที่ขา 8 ซึ่งค่าคาบเวลาการทำงานจะกำหนดได้จากกราฟแสดงดังภาพที่ 2-11



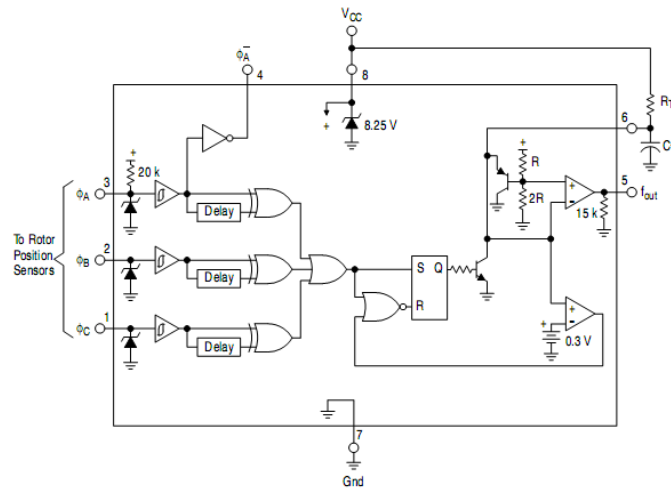
ภาพที่ 2-11 ความสัมพันธ์ของค่า  $R_T$  และ  $C_T$  ในการกำหนดความถี่ PWM

## 2.3 ไอซีเบอร์ MC 33039 Closed Loop Brushless Motor

### 2.3.1 คุณลักษณะของไอซี MC33039

MC33039 มีประสิทธิภาพสูงแบบ Closed Loop ในการควบคุมความเร็วที่ออกแบบมาเป็นพิเศษเพื่อใช้ใน Brushless DC Motor ในระบบควบคุมมอเตอร์ การทำงานจะช่วยให้ ควบคุมความเร็วได้อย่างแม่นยำขึ้นโดยไม่ต้องใช้เครื่องวัดความเร็ว อุปกรณ์นี้มีสามอินพุตบัฟเฟอร์ แต่ละขั้วมีความสามารถในการ ตรวจจับ สัญญาณ ดิจิตอล ตั้งโปรแกรมและควบคุมการสับเปลี่ยนขั้วสัญญาณภายใน สำหรับการใช้งานในระบบที่ต้องมีการ เปลี่ยน แปลงของเซ็นเซอร์ เป็นระยะ ถึงแม้ว่าอุปกรณ์นี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อใช้กับ MC33033 เพื่อ ควบคุมมอเตอร์ Brushless DC Motor แต่ก็สามารถใช้กับวงจร Closed Loop ในควบคุมความเร็ว อย่างมีประสิทธิภาพในหลาย ๆ Closed Loop ดังภาพที่ 2-12

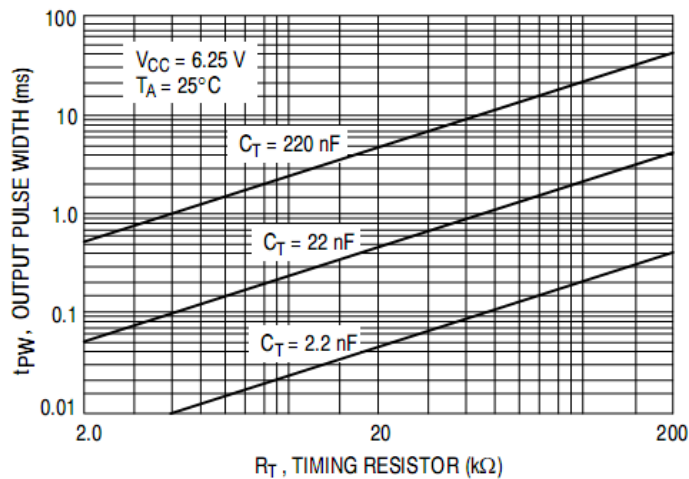
2.3.2 โครงสร้างของ MC33039



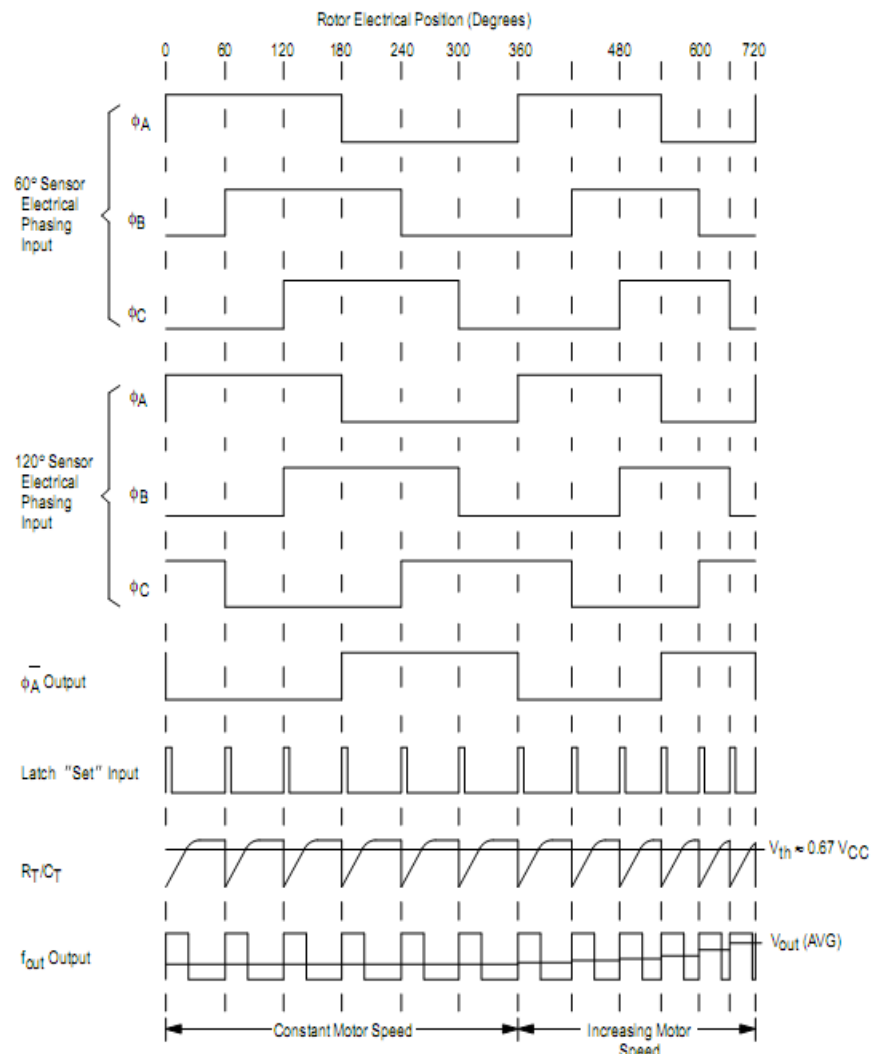
ภาพที่ 2-12 โครงสร้างภายในและการจัดขาของไอซีเบอร์ MC33039

2.3.3 การกำหนดคาบเวลาการทำงานของไอซีเบอร์ MC33039

สร้างสัญญาณ PWM ที่มีความถี่คงที่คาบเวลาของการทำงานของเอาต์พุตที่ขา 5 จะถูกกำหนดโดยค่าของ  $R_T$  และ  $C_T$  จากภายนอกที่ขา 6 โดยการต่อ  $R_T$  กับแรงดันอ้างอิงซึ่งมีแรงดันประมาณ 5.5 V ที่แหล่งจ่าย แล้วอนุกรม  $C_T$  ลงกราวด์แล้วต่อแรงดันตกร้อน  $C_T$  เข้าที่ขา 6 ซึ่งค่าคาบเวลาการทำงานจะกำหนดได้จากกราฟแสดงดังภาพที่ 2-13



ภาพที่ 2-13 ความสัมพันธ์ของค่า  $R_T$  และ  $C_T$  ในการกำหนดความถี่ PWM



ภาพที่ 2-14 รูปคลื่นการทำงานของ Motor Three Phase

MC33039 มีประสิทธิภาพในการ Closed Loop เพื่อควบคุมความเร็วของ Brushless DC Motor โดยไม่จำเป็นต้องใช้ เซ็นเซอร์หรือ เครื่องวัดความเร็ว ซึ่งแสดงในภาพที่ 2-14 สัญญาณสามอินพุต (ขั้ว 1, 2, 3) รับสัญญาณจาก Brushless DC Motor ซึ่งเป็นเซ็นเซอร์ตรวจจับตำแหน่ง แต่การเปลี่ยนแปลงสัญญาณ เซ็นเซอร์เป็นแบบดิจิทัล อด จากสัญญาณอินพุต สามอินพุต เข้ามาใน MC33039 จะถูกสร้างสัญญาณขึ้นที่  $f_{out}$  (ขา 5) ของคลื่นที่กำหนดไว้และความกว้างของโปรแกรมได้ ซึ่งกำหนดค่าโดยการเลือก  $R_T$  และ  $C_T$  (ขา 6) จากภาพที่ 2-13

การประยุกต์ใช้ MC33039 ในการควบคุม Brushless DC Motor การควบคุมความเร็วคงที่ 100 รอบต่อนาที (ขา 4) สามารถใช้ในระบบที่ควบคุม มอเตอร์เซ็นเซอร์ ด้วยอุณหภูมิและควบคุม โดยแรงดันใน  $V_{CC}$  (ขา 8) การดำเนินงานลดลงเป็น 5.5 V สำหรับระบบที่ไม่มีแหล่งจ่ายไฟ ควบคุม

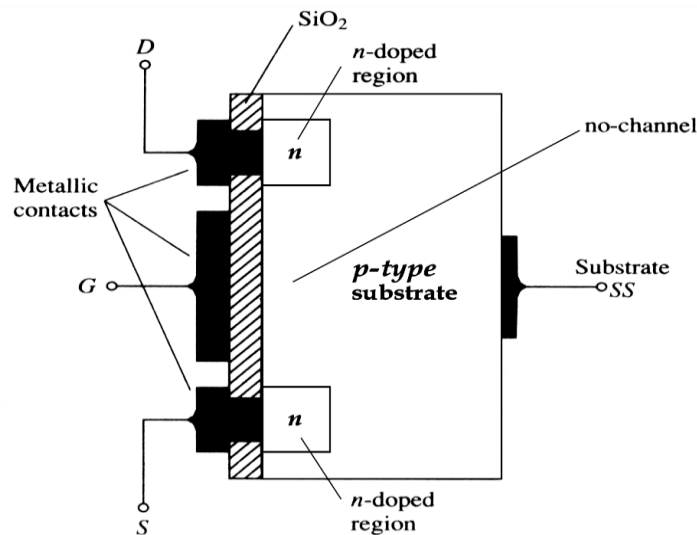
## 2.4 ทฤษฎีมอสเฟต (Mosfet) (ฉัฐพลและพิทักษ์, 2549: 13-24)

### 2.4.1 อิมอสเฟตแบบ n แชนแนล

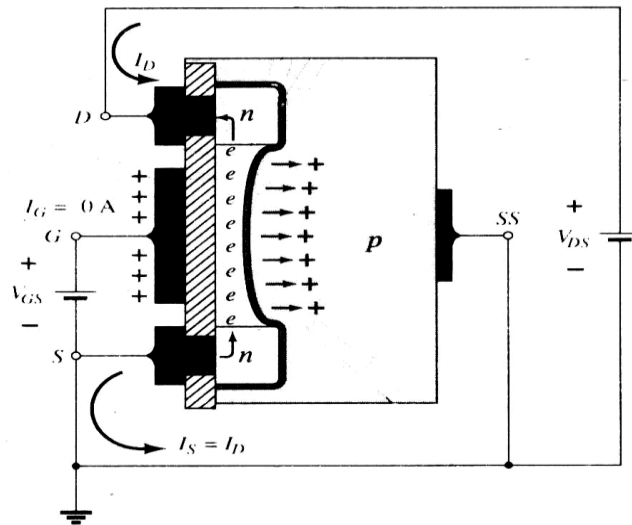
อิมอสเฟตแบบแชนแนล n ประกอบขึ้นจากแผ่นผลึกฐาน p ที่เป็นสารกึ่งตัวนำทำจากซิลิคอนขั้ว D และขั้ว S ต่อกับบริเวณที่มีการกระตุ้น n โดยผ่านวัสดุฉนวนที่เป็นโลหะ นอกจากนี้บางครั้งจะต่อแผ่นผลึกฐาน p เข้ากับแหล่งจ่ายจึงมีขั้ว SS เพิ่มขึ้นมาคล้ายกับดิมอสเฟต (Mosfet)

ถ้าสังเกตภาพที่ 2-15 ให้ดีจะเห็นได้ว่าไม่มีเส้นทางเชื่อมหรือไม่มีแชนแนล (N-Channel) ระหว่างบริเวณที่มีการกระตุ้น n ทั้ง 2 แหล่งนี้คือ ความแตกต่างเบื้องต้นระหว่างโครงสร้างของอิมอสเฟตและดิมอสเฟต

กำหนดให้  $V_{GS} = 0$  V และจ่าย  $V_{DS}$  ที่มีค่าเป็นบวกให้กับขั้ว S และขั้ว D โดยขั้ว SS ต่อรวมกับขั้ว S ดังภาพที่ 2-15 จะเกิดการไบอัสกลับที่รอยต่อ p-n (บริเวณที่มีการกระตุ้น n กับผลึกพื้นฐาน P) เนื่องจากไม่มีเส้นทางเชื่อมหรือแชนแนลระหว่างขั้ว D และ S ทำให้เกิดการต้านการไหลของอิเล็กตรอน กระแส  $I_D = 0$  ต่างจากดิมอสเฟตและเจเฟต (Jfet) ซึ่งมี  $I_D = I_{DSS}$



ภาพที่ 2-15 โครงสร้างของอิมอสเฟตแบบแชนแนล n

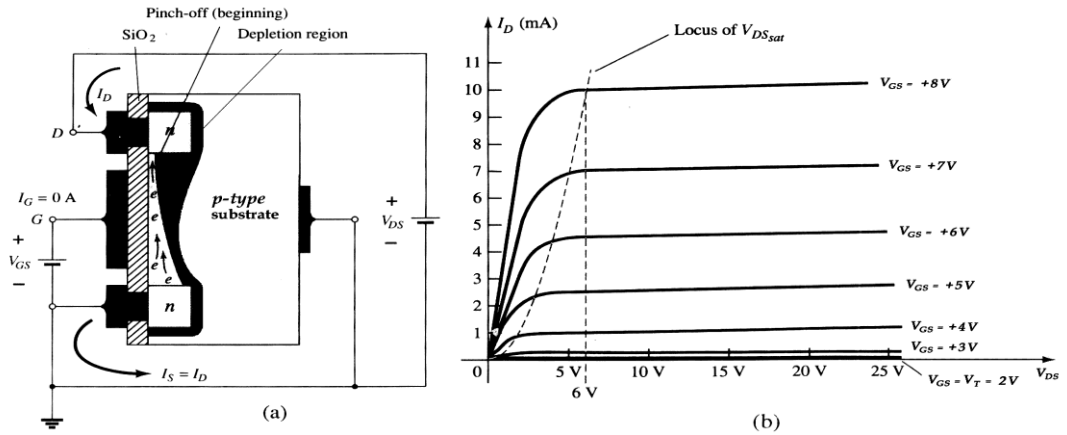


ภาพที่ 2-16 การทำงานของอิมอสเฟตแบบแชนแนล  $n$

ถ้าจ่าย  $V_{DS}$  และ  $V_{GS}$  ที่มีค่าเป็นบวกดังภาพที่ 2-16 ทำให้ขั้ว D และ G มีความต่างศักย์เป็นบวก การที่ขั้ว G มีความต่างศักย์เป็นบวกนี้จะผลักดันให้โฮลในผลึกฐาน  $p$  เข้าไปสู่บริเวณภายในผลึกฐาน  $p$  และดึงคู่อิเล็กตรอนในผลึกฐาน  $p$  (เป็นพาหะข้างน้อย) รวมตัวกันอยู่ในบริเวณใกล้กับผิวของ  $SiO_2$  ซึ่งมีคุณลักษณะเป็นฉนวนจะป้องกันอิเล็กตรอนไม่ให้ดึงคู่ไปยังขั้วเกต

ขณะที่  $V_{GS}$  เพิ่มขึ้น การรวมตัวของอิเล็กตรอนใกล้กับชั้นของ  $SiO_2$  ก็จะเพิ่มมากขึ้นตามลำดับ ขณะเดียวกันบริเวณที่มีการกระตุ้น  $n$  เกิดการเหนี่ยวนำจากแรงดัน  $V_{GS}$  ทำให้มีอิเล็กตรอนหรือ  $I_D$  (มีทิศทางตรงกันข้ามกับอิเล็กตรอน) ไหลระหว่างขั้ว D กับขั้ว S ระดับ  $V_{GS}$  ที่ทำให้  $I_D$  ไหลเรียกว่าแรงดันเทรชโฮลด์ (Threshold Voltage,  $V_T$ ) (ในสเปกกำหนดให้  $V_T$  เป็น  $V_{GS(Th)}$ )





(a) โครงสร้างทางกายภาพของมอสเฟต (b) กราฟคุณสมบัติการนำกระแสของมอสเฟต

ภาพที่ 2-17 การทำงานและกราฟคุณลักษณะของอิมอสเฟตแบบแซนแนล n

ถ้าเพิ่ม  $V_{GS}$  ให้สูงขึ้นอีก  $I_D$  ก็จะเพิ่มขึ้นด้วย แต่ถ้า  $V_{GS}$  มีค่าคงที่และเพิ่มค่า  $V_{DS}$  จะทำให้  $I_D$  ถึงจุดอิ่มตัว (เช่นเดียวกับเจเฟตและดีมอสเฟต) เนื่องจากขั้วบวกของ  $V_{DS}$  ดึงคู่อิเล็กตรอนจึงทำให้ปลายของช่องทางเหนี่ยวนำบริเวณใกล้ขั้ว D แคบลงเข้าใกล้ระดับพินช์ออฟ Pinch-off (Beginning) ดังภาพที่ 2-17 (a) เมื่อนำ KVL มาร่วมพิจารณา จะได้แรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้ว D กับขั้ว G ( $V_{DG}$ ) ดังสมการที่ (2-3)

$$-V_{DG} = V_{DS} - V_{GS} \tag{2-3}$$

ถ้ากำหนดให้  $V_{GS} = 8 \text{ V}$  และ  $V_{DS} = 2 \text{ V}$  ก็จะได้  $V_{DG} = -6 \text{ V}$  แต่ถ้าเพิ่ม  $V_{DS}$  เป็น 5 V ค่า  $V_{DG}$  จะเป็น  $-3 \text{ V}$  การลดลงของ  $V_{DS}$  ทำให้แรงดึงดูดจากขั้วบวกของ  $V_{DS}$  มีต่ออิเล็กตรอนอิสระในบริเวณที่ช่องทางเหนี่ยวนำลดลงด้วย ทำให้ช่องทางเหนี่ยวนำแคบลง ถ้าความกว้างช่องทางดังกล่าวจะลดลงเรื่อยๆ จนกระทั่งถึงจุดพินช์ออฟ  $I_D$  ก็จะถึงจุดอิ่มตัว ดังที่ได้อธิบายในเจเฟตและมอสเฟต

คุณลักษณะของขั้วเดรนของมอสเฟตในภาพที่ 2-17 (a) จะพบว่าขณะ  $V_T = 2 \text{ V}$  ที่  $V_{GS} = 8 \text{ V}$  ทำให้เกิด  $V_{DS}$  อิ่มตัว ( $V_{DS(Sat)}$ ) = 6 V ทำให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่าง  $V_{DS(Sat)}$  กับ  $V_{GS}$  ดังสมการที่ (2-4)

$$V_{DS(Sat)} = V_{GS} - V_T \tag{2-4}$$

สมการที่ 2-4 ทำให้ทราบว่า เมื่อ  $V_T$  คงที่และ  $V_{GS}$  ยิ่งสูงขึ้นเท่าใด  $V_{DS(Sat)}$  ก็ยิ่งสูงขึ้นเท่านั้น สำหรับคุณลักษณะในภาพที่ 2-17 (a) ขณะ  $V_T$  เป็น 2 V ณ ตำแหน่งนี้  $I_D = 0$  mA ดังนั้นจึงทำให้ทราบว่า ถ้าค่า  $V_{GS}$  มีค่าต่ำกว่า  $V_T$  ค่า  $I_D$  ของอิมอสเฟตจะเป็นศูนย์หรือไม่มีกระแสไหลนั่นเอง นอกจากนั้นถ้าค่า  $V_{GS}$  เพิ่มขึ้นจาก  $V_T$  เป็น 8 V จะทำให้ระดับการอิ่มตัวของ  $I_D$  เพิ่มขึ้นจาก 0 mA เป็น 10 mA แต่เนื่องจากช่วงห่างของเคอร์ฟ  $V_{GS}$  มีระยะไม่เท่ากัน ดังนั้นค่า  $I_D$  ที่เพิ่มขึ้น จะมีความสัมพันธ์กับ  $V_{GS}$  ในลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นดังสมการที่ (2-5)

$$I_D = k(V_{GS} - V_T)^2 \quad (2-5)$$

เมื่อ  $k$  เป็นค่าคงที่ของโครงสร้างของอิมอสเฟต ซึ่งหาค่าได้จากสมการที่ (2-6)

$$k = \frac{I_{D(on)}}{(V_{GS(on)} - V_T)^2} \quad (2-6)$$

เมื่อ  $I_{D(on)}$  และ  $V_{GS(on)}$  เป็นกระแสและแรงดันที่ทำให้เกิดจุดเฉพาะบนเคอร์ฟคุณลักษณะของมอสเฟต สมมติแทนค่า  $I_{D(on)} = 10$  mA ขณะ  $V_{GS(on)} = 8$  V ลงในสมการที่ (2-6)

$$k = \frac{10 \text{ mA}}{(8 \text{ V} - 2 \text{ V})^2} = \frac{10 \text{ mA}}{(6 \text{ V})^2} = \frac{10 \text{ mA}}{36 \text{ V}^2}$$

$$k = 0.278 \times 10^{-3} \text{ A/V}^2$$

แทนค่า  $k$  ในสมการที่ (2-5) เพื่อหาค่า  $I_D$  สำหรับคุณลักษณะในภาพที่ 2-17 (b)

$$I_D = 0.278 \times 10^{-3} (V_{GS} - 2 \text{ V})^2$$

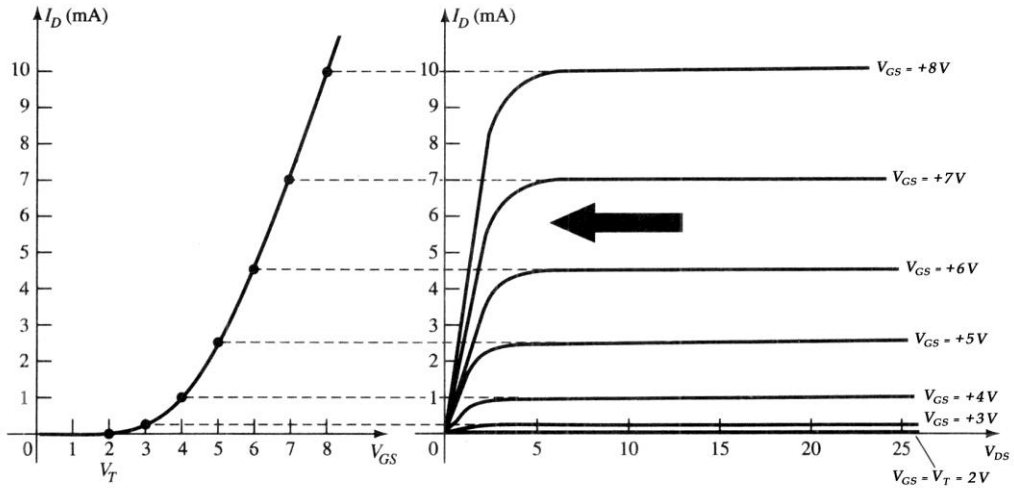
สมมติ  $V_{GS} = 4$  V จะได้

$$I_D = 0.278 \times 10^{-3} (4 \text{ V} - 2 \text{ V})^2 = 0.278 \times 10^{-3} (2)^2$$

$$I_D = 0.278 \times 10^{-3} (-4)$$

$$I_D = 1.11 \text{ mA}$$

สำหรับการวิเคราะห์ไฟฟ้ากระแสตรงของอิมอสเฟตจะใช้คุณลักษณะถ่ายโอน ดังภาพที่ 2-18 ในการแก้ปัญหาเคอร์ฟ (Curve) ถ่ายโอนในภาพที่ 2-18 แตกต่างจากเคอร์ฟถ่ายโอนอื่น ๆ

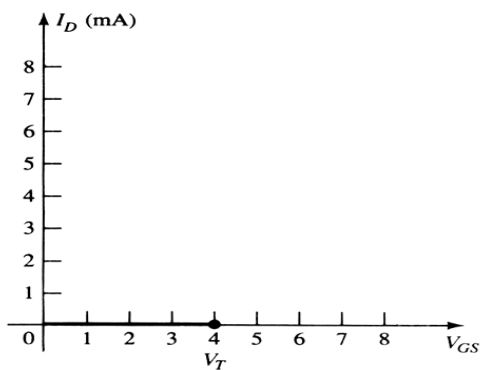


ภาพที่ 2-18 กราฟคุณลักษณะถ่ายโอนของอิมอสเฟต

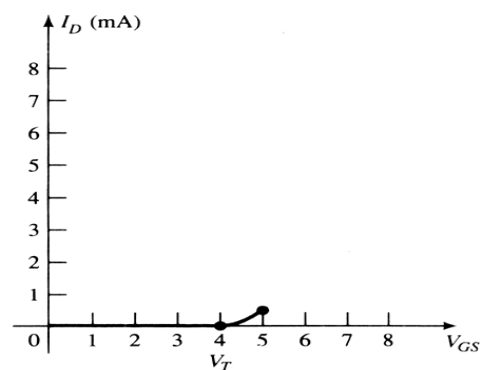
เพราะว่าอิมอสเฟตแบบแซนแนล n จะมี  $I_D$  เป็นบวกเพิ่มขึ้นไม่ได้จนกว่า  $V_{GS} = V_T$  สมมติว่าเราจะเขียนเคอร์ฟถ่ายโอนที่มี  $k = 0.5 \times 10^{-3} \text{ A/V}^2$  และ  $V_T = 4 \text{ V}$  เมื่อนำสมการที่ (2-4) มาร่วมพิจารณา จะได้

$$I_D = 0.5 \times 10^{-3} (V_{GS} - 4 \text{ V})^2$$

การเขียนเคอร์ฟถ่ายโอนในที่นี้ อันดับแรกต้องเขียนเส้นแนวนอนก่อน สำหรับกรณีนี้ขณะ  $V_{GS} = 0 \text{ V}$  ถึง  $V_{GS} = 4 \text{ V}$  ค่า  $I_D = 0 \text{ mA}$  ดังภาพที่ 2-19 (a)

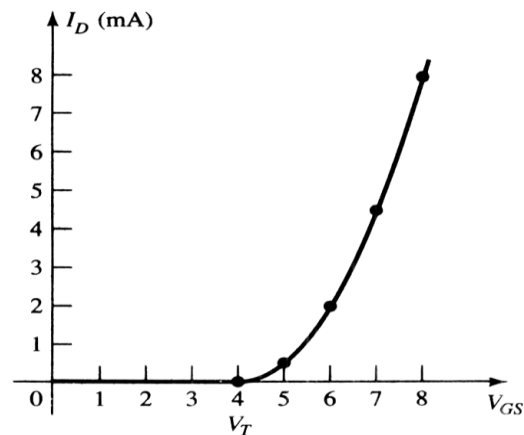


(a)



(b)

(a) กราฟคุณลักษณะถ่ายโอนขณะที่  $V_{GS} = 4 \text{ V}$  (b) กราฟคุณลักษณะถ่ายโอนขณะที่  $V_{GS} = 5 \text{ V}$



(c)

(c) กราฟคุณลักษณะถ่ายโอนขณะ  $V_{GS} = 8 \text{ V}$

ภาพที่ 2-19 กราฟคุณลักษณะถ่ายโอน

เมื่อ  $V_{GS}$  มีค่ามากกว่า  $V_T$  สมมติ  $V_{GS} = 5 \text{ V}$  แทนค่าลงในสมการที่ 2-4 เพื่อหาค่า  $I_D$

$$I_D = 0.5 \times 10^{-3} (V_{GS} - 4V)^2$$

$$I_D = 0.5 \times 10^{-3} (5V - 4V)^2$$

$$I_D = 0.5 \times 10^{-3} (1)^2$$

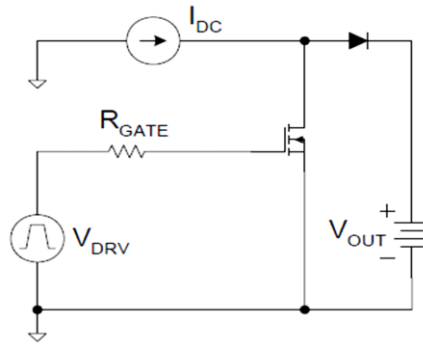
$$I_D = 0.5 \text{ mA}$$

จึงได้จุดสำหรับเขียนเคอร์ฟดังภาพที่ 2-19 (b)จากนั้นก็เพิ่มค่า  $V_{GS} = 6 \text{ V}$ ,  $7 \text{ V}$  และ  $8 \text{ V}$  จะได้ค่า  $I_D$  เป็น  $2 \text{ mA}$ ,  $4.5 \text{ mA}$  และ  $8 \text{ mA}$  ตามลำดับ นำมาเขียนเคอร์ฟถ่ายโอนได้ดังภาพที่ 2-19 (c)

## 2.5 ทฤษฎีการขับมอสเฟต (Bliss, 1990: 3-35)

### 2.5.1 การควบคุมการสวิตช์

ผู้ใช้งานต้องรู้เกี่ยวกับพฤติกรรมของมอสเฟต เพื่อเป็นรากฐานความเข้าใจเกี่ยวกับขอบเขตที่ต้องการใช้หลังจากเข้าใจหลักการพื้นฐาน และนำมาใช้ในหนึ่งขบวนการสวิตช์เพราะว่าส่วนมากมอสเฟตจะใช้ในงานที่ต้องการการสวิตช์ที่ความถี่สูงและใช้งานในภาควงจรกำลัง

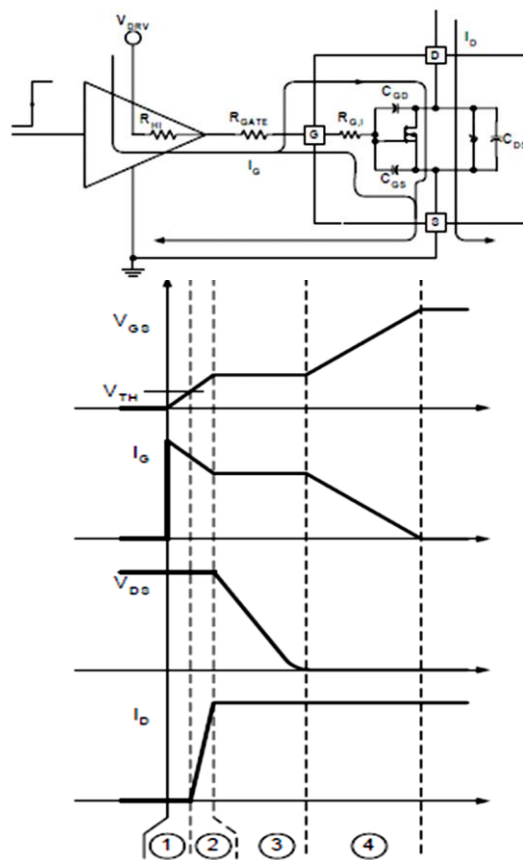


ภาพที่ 2-20 แบบจำลองการสวิตช์เหนี่ยวนำ

จากตัวอย่างในภาพที่ 2-20 แหล่งจ่ายกระแส DC แสดงให้เห็นถึงการเหนี่ยวนำกระแสซึ่งสามารถไหลต่อเนื่องในระหว่างการสับสวิตช์ กระแสจะเดินทางตามทิศทางไดโอดในช่วงเวลาที่มอสเฟต Turn Off เมื่อขาเดรนต่ออยู่กับขาซอร์ส

#### 2.5.1.1 การสั่งให้มอสเฟตทำงาน

เมื่อมอสเฟตทำงานสามารถแบ่งได้ 4 ระดับเหมือนดังแสดงในภาพที่ 2-21

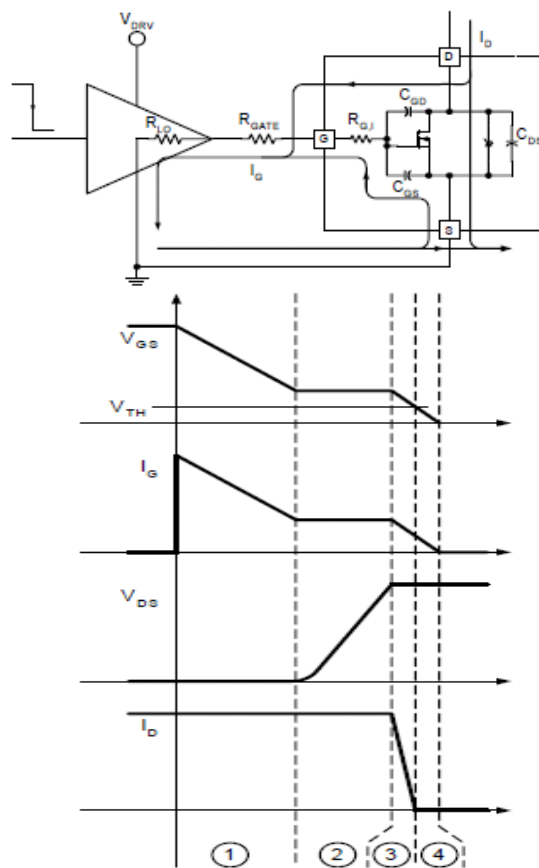


ภาพที่ 2-21 ช่วงเวลามอสเฟตทำงาน

ในขั้นแรกแรงดันขาเข้าจะอยู่ในช่วง 0 V ที่  $V_{TH}$  ช่วงเวลาแรกของขาเกตกระแสจะซาร์จมาก ที่สุดที่ตัวเก็บประจุ  $C_{GS}$  และยังมีกระแสที่ไหลเข้าที่ตัวเก็บประจุ  $C_{GD}$  ในขณะที่แรงดันขาเกตนั้นเพิ่มมากขึ้นแต่แรงดันที่  $C_{GD}$  จะลดน้อยลงในระยะเวลานี้เป็นช่วงหน่วงเวลา Turn On เพราะว่าแรงดันและกระแสของขาเดรนของมอสเฟตไม่เหลืออยู่แล้ว ทันทีที่ขาเกตเริ่มต้นซาร์จไป หม่กระแสจะเดินทางไปที่มอสเฟต ในช่วงเวลาต่อมาที่  $V_{TH}$  ของขาเกตระดับแรงดันที่  $V_{GS}$  ในช่วงนี้แรงดันที่ ขาเกตจะเรียบเมื่อมีแรงดันไหล ที่พอเหมาะในระหว่างที่ขาเกตต้องการกระแสไหลที่  $C_{GS}$  และ  $C_{GD}$  ในช่วงเวลาแรกจะต้องการแรงดันที่  $V_{GS}$  เพิ่มขึ้นในระหว่างที่เอาต์พุตภายในขาเดรนมีการไหลถึงแม้ว่าขาเดรนมีแรงดันเท่ากับขา ซอร์สก่อนที่แรงดัน  $V_{GS}$  จะ Off ดังนั้นสามารถเข้าใจได้ใน ภาพที่ 2-21 จนกระทั่งกระแสไหลไปที่มอสเฟตจนกระทั่งไดโอดสั่ง Off อย่างสมบูรณ์จนแรงดัน ที่จุด PN สามารถหยุดจ่ายจนแรงดันที่ขาเดรนจะอยู่ในระดับเอาต์พุตจนเข้าสู่ช่วงที่สามเมื่อแรงดันที่ขาเกต On จนมีกระแสไหลไหลเรียงกระแสที่ไดโอดแต่เนื่องจากแรงดันที่ขาเกตตกถึงแม้ว่าแรงดันที่ขาเกตตกแต่ที่ขาเกตถึงแหล่งจ่ายยังคงเดิมเท่านี้ แรงดันที่ขาเกตจะเป็นเวฟฟอรั่ม โดยถูกถ่ายไปที่  $C_{GD}$  สามารถทำให้ที่จุดเดรนกับขาซอร์สมีแรงดันไหลได้สะดวกขึ้นตั้งแต่ที่แรงดันขาเดรนคงเดิมโดยมีขีดจำกัดของวงจรที่แหล่งจ่ายกระแส DC จนกระทั่ง turn On เต็มที่ สามารถทำให้มอสเฟตทำงานได้มีแรงดันที่ขาเกตเพิ่มได้มากขึ้นเมื่อเอา  $V_{GS}$  เป็นพื้นฐานค่าความต้านทานช่วง On และที่ช่วงเวลาที่อุปกรณ์ทำงานเพราะฉะนั้นในช่วงที่ 4  $V_{GS}$  จะอยู่ในระดับสูงสุดคือ  $V_{DRV}$  โดยที่  $C_{GS}$  และ  $C_{GD}$  ซาร์จประจุ ดังนั้นกระแสที่ไหลระหว่างขาเกตทั้งสองกำลังแยกออกจากกันถึงแม้ว่ามีการซาร์จอยู่กระแสที่ขาเดรนจะนิ่งไม่เปลี่ยนแปลงแรงดันที่ขาเดรนจะลดลงแต่ไม่ต่อเนื่องเป็นไปตามปกติ

#### 2.5.1.2 การสั่งมอสเฟตหยุดทำงาน

เมื่อก้าวถึงการสั่งมอสเฟต หยุดทำงานโดยพื้นฐานมีการสั่งไม่ต่างกันกับการสั่งมอสเฟตทำงานเมื่อเริ่มต้น  $V_{GS}$  มีค่าเท่ากับ  $V_{DRV}$  และมีการไหลของกระแสเต็มที่ผ่านมาไปยัง  $I_{DC}$  ในช่วงเวลาที่ 3 คือ จะพุดถึงแรงดันที่ขาซอร์สถึงขาเดรนที่  $I_{DC}$  และ  $R_{DS} (On)$  ที่ตัวมอสเฟตมีการสั่งหยุดการทำงานทั้งหมดสี่ลำดับดังแสดงในภาพที่ 2-22



ภาพที่ 2-22 ช่วงเวลาการสั่งหยุดการทำงานของมอสเฟต

ช่วงเวลาระยะแรกจะมีการสั่งหน่วงหยุดเวลา แรงดันที่  $C_{GS}$  จะค่อยเก็บประจุทีละน้อยซึ่งให้ความสำคัญที่ระดับในช่วงระยะเวลาที่กระแสไหลที่ขาเกตโดยที่ตัวเก็บประจุ  $C_{ISS}$  กระตุ้นตัวเองและไหลผ่านไป  $C_{GS}$  และที่  $C_{GD}$  ของมอสเฟตจะมีแรงดันภายในขาเดรนเล็กน้อย เนื่องจากมีแรงดันลดลงมากการไหลในขาเดรนจะไม่มีเปลี่ยนแปลง ในช่วงเวลาที่ 2 แรงดันที่ขาซอร์กับขาเดรนของมอสเฟตได้มาจาก  $I_{DRES}$  (On) ไปจนถึงระดับแรงดัน  $V_{DS}$  (Off) สิ้นสุดและมีแรงดันออกไปสั่งให้ไดโอดเรียงกระแสแสดงในภาพที่ 2-22 ในระหว่างช่วงเวลาระยะแรกจะมีแรงดันที่ขาเกตและมีกระแสซาร์จที่ขาเกตเพราะว่า  $C_{GS}$  เป็นตัวสั่งให้แรงดันที่ขาซอร์สกับขาเดรนไม่เปลี่ยนโดยกระแสจะคงที่ทำให้ตัวเก็บประจุมีระยะเวลาให้กระแสจากขาเดรนไหลออกโดยกระแสที่ขาเดรนจะนิ่งเหมือนกระแสที่ไหลต ดังแสดงเห็นได้จากการจ่ายกระแส DC ในภาพที่ 2-22

เริ่มต้นช่วงเวลาที่ 3 พุถึงการ Turn On ของไดโอดถ้าหากว่าสนใจเพียงกระแสที่ไหลต แรงดันที่ขาเกตจะเริ่มทำงานจากนั้น  $V_{GS}$  จะเริ่มลดลงไปจนถึง  $V_{TH}$  ส่วนใหญ่กระแสเกิดขึ้นที่ขาเกตจะมาจาก  $C_{GS}$  เพราะ  $C_{GS}$  ช่วงนี้จะมีระยะเวลาซาร์จประจุเต็มที่มีมอสเฟต จะทำงานเป็นเชิงเส้นและเป็นสาเหตุให้แรงดันขาซอร์สกับขาเกตตกจนทำให้กระแสที่ขาเดรนลดลง ทำให้ช่วง

ระยะเวลาที่กระแส ที่ขาเดรนอาจลดลงจนเป็น 0 ส่วนแรงดันที่ขาเดรนจะคงที่อยู่ที่ระดับ  $V_{DS}$  (Off) ขึ้นตอนการ Turn Off ขึ้นสุดท้ายจะมี Input ที่ตัวเก็บประจุชาร์จเต็มจากนั้นแรงดันที่  $V_{GS}$  จะลดลงจนเป็น 0 และมีกระแสที่ขาเกตบางส่วนแต่ในทำนองเดียวกันกลับมาขึ้นคูล่วงเวลา Turn Off ช่วงที่ 3 ช่วงที่  $C_{GS}$  ช่วงนี้กระแสที่ขาเดรนและแรงดันที่ขาเดรนจะไม่เปลี่ยนแปลง

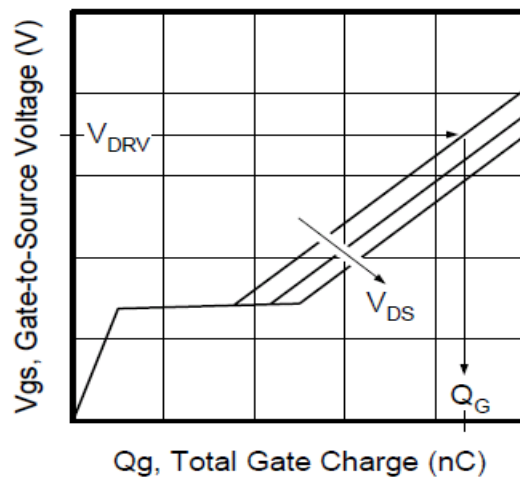
สรุปคือ มอสเฟตมันสามารถสั่งสับสวิตซ์ในช่วง Highest และ Lowest Impedance แต่สามารถเลือกช่วงเวลา Turn On และ Turn Off ได้ในช่วงเวลาที่ 4 ระยะเวลาทั้งหมดของช่วงเวลาที่ 4 จะมีการเก็บประจุปะปนในการทำงานเราสามารถเปลี่ยนแปลงแรงดันรวมถึงกระแสที่เกตไดร์ฟได้ซึ่งให้ความสำคัญในการเลือกส่วนประกอบและการออกแบบการใช้งานเกตไดร์ฟสำหรับ High Speed High Frequency Switching เป็นลักษณะพิเศษของเบอร์มอสเฟต การสั่ง Turn Off และ Turn On ทำให้มอสเฟตสวิตซ์ได้มากและน้อยจะขึ้นอยู่กับตัว Datasheet ของมอสเฟต แต่น่าเสียดายความสัมพันธ์ของเบอร์มอสเฟตและโหนดเหล่านี้ทำให้มีการยุ่งยากในการเปรียบเทียบเลือกชนิดเบอร์มอสเฟตเหมือนกัน ซึ่งการประยุกต์ใช้งานการสั่งสวิตซ์ที่ใช้ได้จริงจะมีการควบคุม Inductive Load ซึ่งมีความสำคัญต่างกันในแต่ละชนิดตัวมอสเฟตให้เลือกโดยสังเกตที่เบอร์ของตัวมอสเฟต

#### 2.5.1.3 กำลังสูญเสีย Power Losses

ในการสวิตซ์ตัวมอสเฟตจะมีกำลังไฟฟ้าสูญเสียอยู่เราสามารถประยุกต์ใช้ไม่ให้เกิดการสูญเสียได้เราสามารถแบ่งเป็นสองหมวดดังนี้

มีวิธีการง่ายๆ สองวิธีในการการลดความสูญเสียที่ขาเกตของมอสเฟต แต่ก่อนที่เราจะ พูดถึง เรามาดูช่วงที่มอสเฟตกำลัง ON มันมีการชาร์จและคายของ  $C_{ISS}$  แม้ว่าแรงดันจะชาร์จที่ตัวเก็บประจุตลอด แต่เราจำเป็นต้องย้ายการชาร์จซึ่งต้องการชาร์จประจุ ให้แรงดันขาเกตมีค่าอยู่ระหว่าง 0 V ซึ่งช่วงเวลานี้แรงดันที่ขาเกต กับ  $V_{DRV}$  เป็น 0 เหมือนกัน เมื่อเปรียบเทียบลักษณะพิเศษของแรงดันที่ขาเกตกับขาซอร์สดังกราฟใน Datasheet ของ MOSFET ตัวอย่างแสดงในภาพที่ 2-23





ภาพที่ 2-23 การเปรียบเทียบระหว่างการชาร์จประจุที่ขาเกตและแรงดันที่ขาเกตกับขาซอร์ส

โดยเปรียบเทียบที่กราฟว่าดีหรือไม่ดีโดยการประมาณที่การชาร์จขาเกตกับแรงดันที่ขาเกตอย่างเท่า ๆ กันตัวแปรที่ทำให้แรงดันขาเกตเมื่อ Off เป็นเส้นโค้งเราจะกำหนดให้  $V_{DS}$  (off) ชาร์จอยู่ที่พื้นที่ย่านต่ำที่บริเวณของเส้นโค้งบางส่วนแต่เช่นกัน ในผลรวมซึ่งต้องการให้ขาเกตชาร์จในวงจรทันทีที่การสวิตช์เราสามารถเห็นได้ในภาพที่ 2-23 ซึ่งสามารถรู้ถึงการสูญเสียขณะที่ชาร์จขาเกตได้จากสมการที่ (2-7)

$$P_{GATE} = V_{DRV} \cdot Q_G \cdot f_{DRV} \quad (2-7)$$

ซึ่งใน  $V_{DRV}$  มีความกว้างของรูปคลื่นที่เกตไดรฟ์และความถี่ของเกตไดรฟ์  $f_{DRV}$  ซึ่งสาเหตุส่วนใหญ่จะมีที่การสับสวิตช์ความถี่มาก ๆ แต่ที่สุดแล้วมันมีความน่าสนใจไปจนถึงข้อสังเกตที่ว่า  $Q_G$  คืออะไร แต่ที่  $f_{DRV}$  ก่อนนั้นมีการกำหนดระยะเวลาให้ค่าเฉลี่ยแรงดันที่ขาเกต มีค่าดังสมการโดยให้กระแสมีลักษณะที่สามารถขับขาเกตได้ซึ่งกำลังความสูญเสียไปถึงขาเกตของมอสเฟตเป็นตัวที่ทำให้สิ้นเปลืองในวงจรเกตไดรฟ์ซึ่งกล่าวย้อนกลับไปถึงภาพที่ 2-21 และภาพที่ 2-22 ส่วนประกอบที่สิ้นเปลืองสามารถระบุได้ทั้ง ๆ ที่เราต่ออนุกรมตัวต้านทานอยู่ที่ทางเดินของการขับเกตแต่ในทุก ๆ รอบในการสับสวิตช์มันต้องการให้ค่าความต้านทานที่เกตชาร์จผ่านไปยังเอาต์พุต โดยการต่อตัวต้านทานภายนอกที่ขาเกตและให้ความต้านทานนี้จะทำงานร่วมกันภายในขาเกตด้วย ดังนั้นขณะที่ปลดเอาต์พุตกำลังไฟฟ้าให้เป็นอิสระนั้น แต่ยิ่งชาร์จเร็วเท่าไรก็จะส่งผ่านไปที่ตัวต้านทานกำลัง การออกแบบจากภาพที่ 2-21 และภาพที่ 2-22 ดังที่สามารถคำนวณกำลังความสูญเสียในการขับเกตอย่างชัดเจนเหมือนกันในช่วง ON ดังสมการที่ (2-8) ช่วง OFF ดังสมการที่ (2-9) และค่าสูญเสียทั้งหมดดังสมการที่ (2-10)

$$P_{\text{DRV,ON}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{R_{\text{HI}} \cdot V_{\text{DRV}} \cdot Q_{\text{G}} \cdot f_{\text{DRV}}}{R_{\text{HI}} + R_{\text{GATE}} + R_{\text{G,I}}} \quad (2-8)$$

$$P_{\text{DRV,OFF}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{R_{\text{LO}} \cdot V_{\text{DRV}} \cdot Q_{\text{G}} \cdot f_{\text{DRV}}}{R_{\text{LO}} + R_{\text{GATE}} + R_{\text{G,I}}} \quad (2-9)$$

$$P_{\text{DRV}} = P_{\text{DRV,ON}} + P_{\text{DRV,OFF}} \quad (2-10)$$

จากสมการข้างบนแสดงให้เห็นถึงการต่อต้านค่าความต้านทานที่เอาต์พุตของวงจรถับเกต และนี่คือ สมมติฐานอย่างมีเหตุผลสำหรับการสั่งจับเกตของมอสเฟตแม้ว่าการต่อทรานซิสเตอร์ สองตัวจะมีประโยชน์ในวงจรถับเกตที่ค่าความต้านทานทางเอาต์พุตมีค่าไป ม่เป็นเชิงเส้นและที่ สมการไม่มีคำตอบที่ถูกต้องแต่มันเป็นที่ยอมรับเพราะว่ามีค่าความต้านทานที่ขาเกตน้อยกว่า 5 โอห์ม ความสูญเสียที่ขาเกตมากที่สุดคือความสิ้นเปลืองในการจับเกตถ้า  $R_{\text{GATE}}$  มีขนาดใหญ่พอ เพื่อจำกัดกระแส  $I_{\text{G}}$  ให้เอาต์พุตต่ำลง ซึ่งความสามารถที่ใช้กันในการขับ Bipolar ส่วนมากค่า ความสูญเสียทางไฟฟ้าของการจับเกตตอนนี้อยู่ที่การเผาผลาญในขาเกตในส่วนที่เพิ่มเติมจนถึงการ สูญเสียกำลังไฟฟ้าที่ขาเกตสิ่งที่เพิ่มเติมคือเพิ่มค่าความต้านทานที่สูญเสีย ในการสวิตช์ สาเหตุ เนื่องจากมีความเข้าใจแบบเดิมว่ากระแสจะมากแรงดันจะมากขึ้นอยู่กับค่าความต้านทาน ซึ่งใน เวลาเดียวกันธรรมชาติของอุปกรณ์สำหรับเวลาการลัดวงจรเพื่อให้แน่ใจว่าในการสั่งสวิตช์จะมี ความสูญเสียน้อยที่สุดในช่วงเวลาของเวลานี้น่าจะน้อยที่สุดซึ่งดูจากช่วงที่มอสเฟต Turn On และ Turn Off สถานะนี้เป็นช่วงเวลาที่ถูกระงับไปจนถึงช่วงเวลา 2 และ 3 ในการ Turn On และ Turn Off จะมีการดำเนินการเหมือน ๆ กันในการเปลี่ยนการสวิตช์ซึ่งกำหนดเวลานี้ให้หยุดพักเป็น ช่วง ๆ ให้สัมพันธ์กับอุปกรณ์โดยมีดำเนินการเป็นเชิง เส้น (Linear) แม้ว่าแรงดันที่เกิดอยู่ระหว่าง  $V_{\text{TH}}$  และ  $V_{\text{GS}}$  เป็นต้นเหตุที่ทำให้กระแสในอุปกรณ์และรวมไปถึงขอบเขตการทำให้แรงดันเรียบ แม้ว่าการสวิตช์ให้แรงดันที่ขาเกตผ่านไปได้นี้เป็นความเข้าใจและความสำคัญในการออกแบบ วงจรถับเกตแบบ High Speed ซึ่งเน้นความจริงเพราะว่าความสำคัญที่มีลักษณะพิเศษของการ จับเกตเป็นที่มาของกระแสจากรอบ ๆ ที่ทำให้ระดับแรงดันเปลี่ยนไปเล็กน้อยสำหรับ ความสามารถที่ ทำกระแสไหลได้สูงสุดซึ่งวัดได้ ณ  $V_{\text{DRV}}$  ทำงานเต็มที่ส่งข้ามไปยังการ Drive Output Impedance มีคุณสมบัติสัมพันธ์กันอย่างมากรวมไปถึง ณ เวลาที่มอสเฟตทำการ สวิตช์ แต่อย่างไรก็ตามในความจริงเวลาในการสวิตช์อุปกรณ์คือ ความสามารถที่กระแสจับเกต ถึงแม้ว่าแรงดันที่ขาเกตกับขาซอร์สที่เอาต์พุตของการ ไดรฟ์จะอยู่ที่ประมาณ 5 V (ประมาณ 2.5 V

ที่ระดับ Logic มอสเฟต) ประมาณแบบคร่าว ๆ ของมอสเฟต ซึ่งสามารถพิจารณาความสูญเสียของการสวิตช์ได้ง่าย ๆ จากการคำนวณแบบคร่าว ๆ ของการไคร์ฟกระแสที่ขาเกตกับกระแสที่ขาเดรนและแรงดันที่ขาเดรนในระหว่าง ช่วงระยะเวลารูปคลื่นในช่วงที่ 2 ดังสมการที่ (2-11) และ ช่วงที่ 3 ดังสมการที่ (2-12) ของการเปลี่ยนช่วงสวิตช์อย่างแรกน่าจะคำนึงถึงกระแสที่เกตไคร์ฟเป็นหลักเพื่อให้ช่วงระยะเวลาที่ 2 และ 3 ทำงานตามลำดับ

$$I_{G2} = \frac{V_{DRV} - 0.5 \cdot (V_{GS,Miller} + V_{TH})}{R_{HI} + R_{GATE} + R_{G,I}} \quad (2-11)$$

$$I_{G3} = \frac{V_{DRV} - V_{GS,Miller}}{R_{HI} + R_{GATE} + R_{G,I}} \quad (2-12)$$

เป็นที่เข้าใจกันเพราะว่า  $I_{G2}$  มีการชาร์จประจุจากอุปกรณ์  $V_{TH}$ ,  $V_{GS}$  และ  $I_{G3}$  เป็นตัวคายกระแสที่  $C_{RSS}$  ถึงแม้ว่าแรงดันที่เดรนจะเปลี่ยนจาก  $V_{DS}$  (Off) ไปยัง 0 V เวลาในการสวิตช์เหมือน ช่วงที่ 2 ดังแสดงในสมการ(2-13) และ ช่วงที่ 3 ดังแสดงในสมการ (2-14)

$$t_2 = C_{ISS} \cdot \frac{V_{GS,Miller} + V_{TH}}{I_{G2}} \quad (2-13)$$

$$t_3 = C_{ISS} \cdot \frac{V_{DS,OFF}}{I_{G3}} \quad (2-14)$$

ในระหว่างช่วงเวลา  $t_2$  แรงดันที่ขาเดรนจะอยู่ในช่วง  $V_{DS}$  (Off) จากนั้นกระแสจะลดลงจาก 0 A ไปยังกระแสของโหลดถึงแม้ว่า  $I_L$  ในช่วงเวลา  $t_3$  แรงดันที่ขาเดรนจะตกจาก  $V_{DS}$  (Off) ไปจนถึงใกล้ 0V อีกครั้งเรามีวิธีการคำนวณแบบคร่าว ๆ เพื่อให้มัน Linear จากรูปคลื่นส่วนประกอบของความสูญเสียสามารถคำนวณช่วงที่ 2 ดังแสดงในสมการ(2-15) และ ช่วงที่ 3 ดังแสดงในสมการ (2-16)

$$P_2 = \frac{t_2}{T} \cdot V_{DS,OFF} \cdot \frac{I_L}{2} \quad (2-15)$$

$$P_3 = \frac{t_2}{T} \cdot \frac{V_{DS,OFF}}{2} \cdot I_L \quad (2-16)$$

ที่  $T$  ระยะเวลาสวิตช์ค่าความสูญเสียในการสวิตช์ทั้งหมดจะมีความสูญเสียอยู่สองอย่าง ผลลัพธ์ที่ได้สิ่งไหนจะง่ายจากสมการ (2-17)

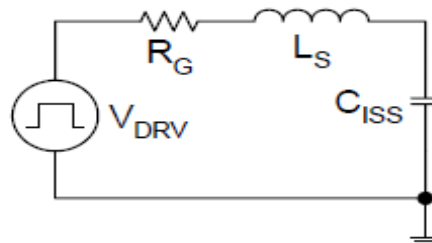
$$P_{SW} = \frac{V_{DS,OFF} \cdot I_L}{2} \cdot \frac{t_2 + t_3}{T} \quad (2-17)$$

อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าเราเข้าใจเกี่ยวกับการสวิตช์แล้วก็ตามการคำนวณความสูญเสียในการสวิตช์อาจจะมีทางเป็นไปได้ ด้วยเหตุผลที่มีผลกระทบที่ปะปนเข้ามาในการเหนี่ยวนำเราต้องเปลี่ยนแรงดันกับกระแสโดยสังเกตรูปคลื่นสังเกตว่าเหมาะสมหรือไม่ ขณะที่ให้เวลาในการสวิตช์อย่างเท่า ๆ กันในขั้นตอนการสวิตช์ที่น่าสนใจคือ จะพิจารณาในความแตกต่างระหว่างแหล่งจ่ายและการเหนี่ยวนำที่ตรงของวงจรจะจบด้วยสมการอันดับที่ 2 ไปจนถึงการบรรยายรูปคลื่นในวงจรเนื่องจากตัวแปรรวมถึงแรงดันเริ่มต้นที่ขาเกตและความสำคัญของการเก็บประจุของมอสเฟต ค่าความต้านทานในการขับเอาต์พุต ETC มีการยอมรับอย่างกว้างเหมือนกันแต่เหนือไปกว่านั้นพูดถึงการคำนวณคร่าว ๆ ในช่วงที่เป็นเส้นตรงดูเหมือนว่ามีเหตุผลพอที่ยอมให้เกิดค่าความสูญเสียของการสวิตช์ในตัวมอสเฟต

### 2.5.2 ส่วนประกอบที่ส่งผลกระทบปะปนในกำลังไฟฟ้า

ผลกระทบที่มีมากที่สุดเมื่อทำการสวิตช์ที่ระหว่างขาซอร์สนั้นจะมีการเหนี่ยวนำในสภาวะนั้นคือ ที่ขาซอร์สซึ่งในตัววงจรจะมีการปะปนมาในการเหนี่ยวนำที่ขาซอร์สเมื่อต่อเข้ากับมอสเฟตแล้วจากวงจรโดยจะต่ออยู่ระหว่างขั้วหน้าของขาซอร์สและต่อ อาร่วมกับกราวด์โดยปกติแล้วนี้ จะอ้างอิงแต่เนื่องจากที่ขั้วลบนี้นี้ความถี่สูง ๆ จึงมีการกรองประจุอยู่รอบ ๆ ช่วงเวลาที่เกิดกำลังไฟฟารวมไปถึงการเก็บประจุที่ขาเกต กระแสในการที่เราต่อวงจรอนุกรมรวมกับขาซอร์สเราสามารถเพิ่มตัวเหนี่ยวนำก่อนสองตัวดังนั้นจะได้เงื่อนไขคือ มีสองวิธีการในขั้นตอนการสวิตช์ สิ่งที่เกี่ยวข้องกับตัวนำของขาซอร์ส ณ จุดเริ่มต้นของการทำการสวิตช์ กระแสที่ขาเกตจะมากอย่า งรวดเร็วเมื่อกระแสนี้ซึ่งควรที่ไหลจากเหนี่ยวนำที่ขาซอร์สและเป็นที่ต้องการให้ค่าของตัวเหนี่ยวนำนั้น

ลดลงอย่างช้า ๆ ดังนั้นเราจึงต้องการให้ตัวเก็บประจุชาร์จและคายประจุที่ Input ของมอสเฟต โดยมีพัฒนาที่ยาวนานโดยส่วนใหญ่แล้วภายในจะมีการ Turn On และ Turn Off ช้ากว่าแต่ยิ่งกว่านั้นที่ การเหนี่ยวนำที่ขาซอร์สและที่  $C_{ISS}$  จากวงจรรีโซแนนซ์ดังที่แสดงในภาพที่ 2-24



ภาพที่ 2-24 ส่วนประกอบวงจรขับเคลื่อนในสภาวะรีโซแนนซ์

จากวงจรรีโซแนนซ์แรงดันที่ขับเคลื่อนจะมีรูปคลื่นออกมาที่รูปคลื่นจะมีการขึ้นสุดแล้วตกลงมาทันทีและมันเป็นเหตุผลเพื่อที่ต้องสังเกตในวงจรขับเคลื่อนจะมีการแกว่งของยอดคลื่นอยู่มาก แต่โชคดีไม่เช่นนั้น  $Q$  จะมีรีโซแนนซ์สูงระหว่าง  $C_{ISS}$  และ  $L_S$  ซึ่งหน่วงหรือสามารถหน่วงโดยการต่ออนุกรมตัวต้านทานของทั้ง Loop ซึ่งรวมถึงค่าความต้านทานที่ขั้วเอาต์พุตด้วยการต่อตัวต้านทานภายนอกเกตและต่อตัวต้านทานเข้าภายในเกตซึ่งผู้ใช้สามารถปรับค่าความต้านทานได้  $R_{GATE}$  สามารถคำนวณหาค่าได้จากสมการ (2-18)

$$R_{GATE, OPT} = 2 \cdot \sqrt{\frac{L_S}{C_{ISS}}} - (R_{DRV} + R_{G.I}) \quad (2-18)$$

ผลลัพธ์ที่ได้จะได้ค่าความต้านทานค่อนข้างน้อยเป็นผลให้เกิด Overshoot ที่รูปคลื่นแรงดันขับเคลื่อนแต่เช่นกันคือส่งผลให้เกิดการ Turn On อย่างรวดเร็ว แต่ที่ค่าความต้านทานสูงจะมีการแกว่งไปมาและเกิด Under Damp และทำให้เวลาในการสวิตช์เลื่อนออกไปถือว่าเป็นผลดีในการออกแบบการขับเคลื่อนที่มีผลกระทบทั้งสองด้านที่ช่วงขาซอร์สเหนี่ยวนำจะมีการป้อนกลับเป็นลบ อย่างไรก็ตามกระแสที่ขาเดรนจะเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วที่ผลกระทบช่วงเวลา Turn On ที่สองนี้และช่วงเวลาที่สามของของขั้นตอนการ Turn Off ช่วงเวลาเหล่านี้ที่แรงดันขาเกตอยู่ระหว่าง  $V_{TH}$  และ  $V_{GS}$  และกระแสที่เกตจะเป็นตัวกำหนดโดยที่แรงดันไหลผ่านเข้าที่ขาเกตค่าของความต้านทาน  $V_{VDRV} - V_{GS}$  ในลำดับแรกจะเพิ่มขึ้นไปที่กระแสเดรนอย่างรวดเร็ว ซึ่งความหมายของแรงดันจำเป็นที่ต้องนำมาประยุกต์ใช้เข้าไปที่การเหนี่ยวนำขาซอร์ส แรงดันนี้จะลดลงซึ่งสามารถใช้ประโยชน์ได้ซึ่งแรงดันจะเข้าไปที่ขาเกตค่าของความต้านทาน ดังนั้นเมื่อจัดลำดับได้ลงไปแทนที่ในแรงดันที่ขับเคลื่อนซึ่งจะทำให้เกิดการลดระดับ  $di/dt$  ของกระแสเดรนที่ระดับต่ำลง  $di/dt$

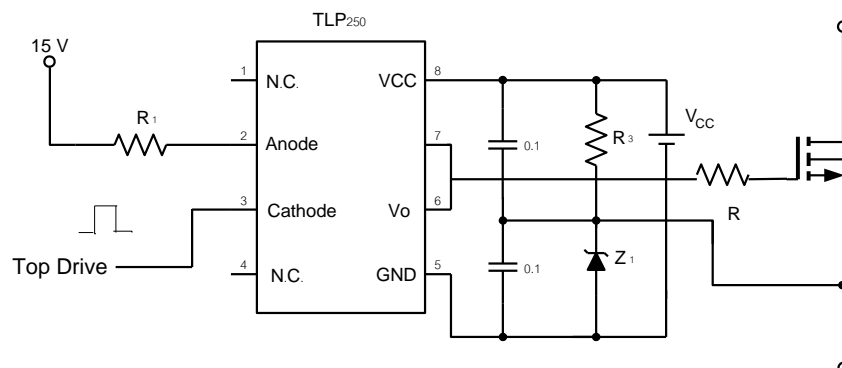
คือต้องการให้ขาซอร์สเหนี่ยวนำข้ามไปยังแรงดันที่น้อยกว่าซึ่งการทรงตัวที่ยู่ยากซับซ้อนของ กระแสเกตและเดรน  $di/dt$  เป็นที่ยอมรับเนื่องจากมีการป้อนกลับมาเป็นลบเพื่อเหนี่ยวนำขาซอร์ส

อีกสิ่งหนึ่งที่ปะปนอยู่ในตัวเหนี่ยวนำของโครงข่ายการสวิตช์อยู่ที่ตัวเหนี่ยวนำเดรนเหมือน เช่นเคยพวกมันจะอยู่ในโครงสร้างตัวเหนี่ยวนำและโครงสร้างทรานซิสเตอร์ ทั้งหมดนี้มีความสัมพันธ์กับตัวเหนี่ยวนำที่เชื่อมต่อและที่ตัวเหนี่ยวนำที่เร็วไหลในหม้อแปลง Isolated Power Supplies ผลกระทบเหล่านี้สามารถอยู่รวมตัวกันนับตั้งแต่ในการอนุกรมรวมเข้าด้วยกันตอน Turn On พวกมันทำหน้าที่เป็น Snubber สำหรับตัวมอสเฟตในระหว่างที่พวกมัน Turn On จะถูก จำกัดที่  $di/dt$  ของกระแสเดรนและบังคับให้แรงดันที่จ่ายให้เดรนข้ามไปยังอุปกรณ์ประกอบของ  $L_D di/dt$  โดยแท้จริงแล้ว  $L_D$  สามารถลดระดับความสูญเสียเมื่อสวิตช์ Turn On ตอนที่จำเป็น ถึงแม้ว่าค่า  $I_D$  จะสูงแต่เป็นประโยชน์ตอนที่ Turn On แต่สาเหตุสำคัญที่เป็นปัญหา ณ ช่วง Turn Off แม้ว่ากระแสเดรนจะลดตัวอย่างรวดเร็วไปจนถึงตัวที่ช่วยทำให้กระแสเดรนต่ำได้อย่างรวดเร็วสาเหตุเกิดจากการ Turn Off ของมอสเฟตซึ่งแรงดันที่ควบคุมต่างกันโดยสิ้นเชิงตาม ช่วงเวลา Turn On น่าจะอยู่ตรงข้ามกับ  $L_D$  เท่านั้นในทางทฤษฎีก็มีแรงดันสูงกว่า ระดับแรงดัน อยู่ที่  $V_{DS}$  (Off) จึงทำให้เกิด Overshoot ในการจ่ายแรงดันที่เดรนและทำให้การสูญเสียเพิ่มขึ้น ในช่วงการ Turn Off การวิเคราะห์ข้อผิดพลาดของการสวิตช์และผลกระทบที่จะปะปนมาใน ตัวเหนี่ยวนำอาจมีอยู่บ้างในการเขียนวงจร

### 2.5.3 วงจรขับเกต Mosfet โดย ออปโตไดร์ TLP250

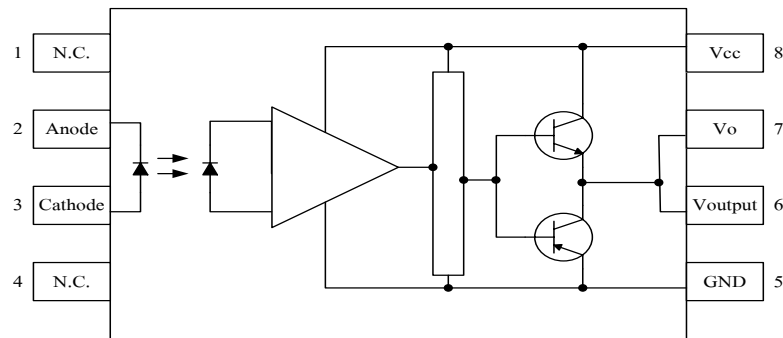
ปัจจุบันมอสเฟตกำลังเป็นที่นิยมมากในการใช้เป็นสวิตช์กำลัง ในระบบการควบคุมทั้ง อินเวอร์เตอร์ และคอนเวอร์เตอร์ การควบคุมมอดูเลเตอร์ และระบบจ่ายกำลังสำรอง

มอสเฟตต้องการแรงดันมาขับเกต เพื่อให้มันสามารถทำงาน ในสภาวะนำกระแสและหยุด นำกระแสได้ซึ่งไอซีขับเกต TLP250 เป็น ไอซีขับเกตของบริษัท โตชิบา ได้ถูกออกแบบมาสำหรับขับ



(ก) แสดงวงจรขับเกต

นำเกตของไอซีบีที และ มอสเฟสกำลัง ลักษณะโดยรวมเป็นวงจรสำเร็จรูปรวมอยู่ในชิปเดียว ไอซี TLP250 1 ตัว สามารถขับเกตมอสเฟสได้ 1 ตัว สัญญาณอินพุตและสัญญาณเอาต์พุตถูกแยกออกจากกันด้วยออปโตคัปเปอเรอร์ ซึ่งอยู่ภายในตัวไอซีทำให้ ช่วยลดปัญหาเรื่องสัญญาณรบกวน TLP250 ยังสามารถทำงานในย่านความถี่สูงได้



(ข) แสดงวงจรภายใน TLP250

ภาพที่ 2-25 แสดงวงจรขับเกต และวงจรภายใน TLP250

จากภาพที่ 2-25 วงจรชุดขับเกตที่มี Opto TLP250 ไว้แยกกราวด์ของภาค Control กับ ภาคกำลัง เมื่อไดโอดของ TLP250 ถูกไบอัสตรงทำให้มีการจ่ายไฟบวกจากขา 6 ของ TLP250 ให้กับ ขาเกตของมอสเฟส ทำให้มอสเฟสเปิดวงจร แต่เมื่อไดโอดของ TLP250 หยุดทำงาน จะมีแรงดันลบจากขา 6 ของ TLP250 แรงดันลบที่จ่ายไฟให้กับขาเกตของมอสเฟสนี้เป็นผลให้มอสเฟสเปิดวงจร

## 2.6 วงจรภาคกำลัง (วิญญูและทศพล, 2552: 81-83)

ในการเลือกใช้วงจรภาคกำลังต้องให้เหมาะสมกับมอเตอร์กระแสตรงแบบปราศจากแปรงถ่าน ซึ่งมอเตอร์ชนิดนี้ที่เลือกใช้มีขดลวด 3 ขด ดังนั้นสามารถใช้วงจรภาคกำลังชนิด 3 เฟส แบบบริดจ์ จำนวน 1 ชุด ซึ่งแต่ละชุดจะประกอบด้วยมอสเฟตกำลัง (Power Mosfets) โดยทำหน้าที่ ซอปเปอร์ 6 ตัว เพราะฉะนั้นในโครงการนี้ ใช้เพาเวอร์มอสเฟตในการสร้างวงจรอินเวอร์เตอร์ ดังภาพที่ 2-26 ทั้งหมด 6 ตัว

ในการเลือกเพาเวอร์มอสเฟต โดยคำนึงถึงแรงดันที่จ่ายให้กับมอเตอร์ตามลักษณะของตัวมอเตอร์ ซึ่งมีขนาดแรงดันต่ำแต่มีกำลังวัตต์สูง ดังนั้นต้องเลือกใช้มอสเฟตกำลังที่มีแรงดันที่ทำให้สภาวะอิ่มตัว ( $V_{SAT}$ ) ค่าต่ำและพิจารณาที่กระแสมอเตอร์ ซึ่งมีการคำนวณหากระแสของมอเตอร์ได้จากสมการ (2-19)

$$I_{\max} = \frac{P_{\max}}{V_{\max}} \quad (2-19)$$

มอเตอร์มีคุณสมบัติดังนี้ แรงดันไฟฟ้า 36 V กำลังไฟฟ้า 250 W ดังนั้นกระแสจึงได้สมการ (2-20)

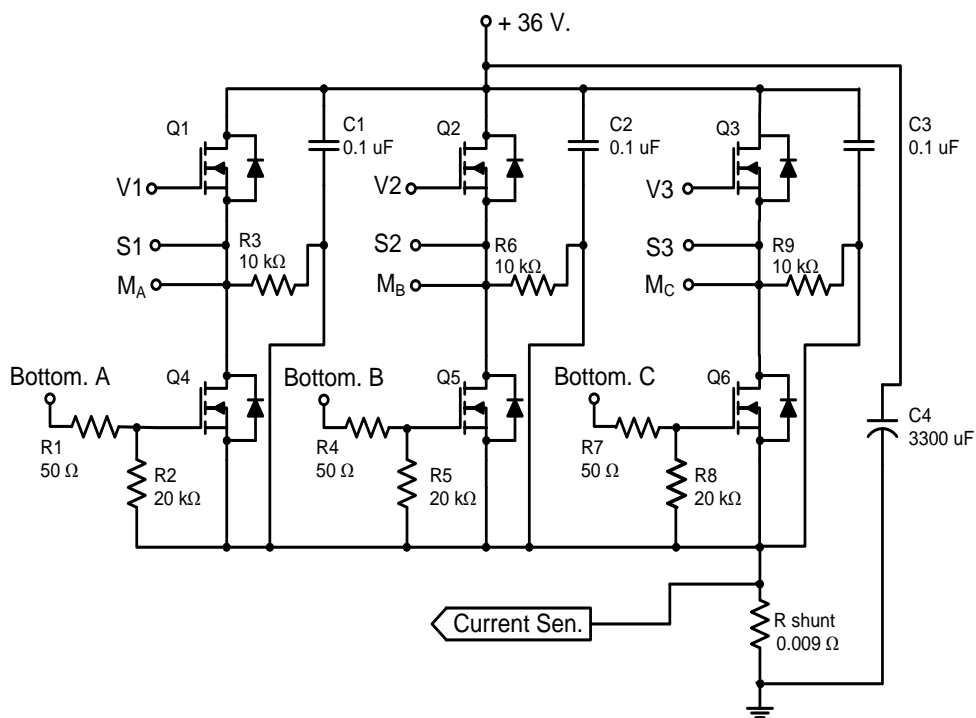
$$I_{\max} = \frac{250}{36} \quad (2-20)$$

$$I_{\max} = 6.94 \text{ แอมป์}$$

$$\text{เมื่อคิดกระแสช่วงสตาร์ทที่ 9 เท่า} = 6.94 \times 9$$

$$I_{\max} = 62.5 \text{ แอมป์}$$

ดังนั้นจึงเลือกใช้มอสเฟตกำลังเบอร์ IRF2807 เพราะมีค่า  $V_{DSS} = 80V$ ,  $R_{DS(on)} = 23 \text{ m}\Omega$   $I_D = 80 \text{ A}$  เมื่อแรงดันในช่วงอิมิตัวสูงที่สุดประมาณ  $23 \text{ m}\Omega \times 80 \text{ A} = 1.84 \text{ V}$  แต่เนื่องจากวงจรที่ใช้มีมอสเฟตจำนวน 2 ตัว ในขณะที่จ่ายแรงดันให้กับมอเตอร์ทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมที่ตัวมอสเฟต 3.68 โวลต์ ทำให้เกิด Power Losses ขึ้น โดยจะทำให้ตัวมอสเฟสร้อน



ภาพที่ 2-26 วงจรภาคกำลัง



จากภาพที่ 2-26 ซึ่งจะเป็นภาพวงจรภาคกำลังของวงจรนี้ซึ่งจะใช้ Mosfets จำนวน 6 ตัว มาต่อแบบ 3 เฟส โดยใช้เฟสละ 2 ตัว เพื่อให้สัมพันธ์กับจำนวนของขดลวดมอเตอร์ ซึ่งใน แลวที่ 1  $Q_1$  กับ  $Q_4$  จะเป็นตัวควบคุมของเฟส A ของ  $Q_2$  กับ  $Q_5$  ของเฟส B และ  $Q_3$  กับ  $Q_6$  ของเฟส C ในส่วนของ  $Q_1$   $Q_2$   $Q_3$  จะเป็นตัวรับสัญญาณจาก Top Drive ซึ่งมาจากไอซีและ  $Q_4$   $Q_5$   $Q_6$  จะเป็น Bottom Drive ซึ่งจุดต่อของวงจรในส่วนของ G และ S จะสัมพันธ์กับภาพวงจร ที่ 3-18 และในส่วนของ  $M_A$   $M_B$   $M_C$  ก็จะเป็นสายสัญญาณที่จ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับมอเตอร์ การทำงานของวงจรนี้ Mosfets ระหว่าง Top กับ Bottom จะจับคู่กันทำงานเป็นคู่ๆ ซึ่งอาจจะเป็น  $Q_1$  กับ  $Q_5$  และ  $Q_1$  กับ  $Q_6$  หรือ  $Q_2$  กับ  $Q_4$  ซึ่งการจับคู่การทำงานก็จะขึ้นอยู่กับสัญญาณของ Encoder ที่รับเข้ามา เพื่อกำหนดจังหวะการทำงาน ซึ่งข้อห้ามของวงจรนี้คือ Mosfets ในแถว เดียวกันจะทำงานพร้อมกันไม่ได้เพราะจะทำให้เกิดการลัดวงจรทำให้วงจรเสียหายได้ และใน ส่วนล่างของวงจรจะนำเอาความต้านทานค่าอื่น ๆ มาต่อไปให้ตัวไอซีโดยผ่านทางชุดควบคุม กระแสอีกครั้งหนึ่ง

## 2.7 ตัวควบคุมอัตโนมัติ ( Auto Controllers) (ชาตชนกและวัชรินทร์, 2548: 14-16)

ตัวควบคุมอัตโนมัติจะมีหน้าที่เปรียบเทียบสัญญาณทางออกของระบบ กับค่าที่ต้องการ ควบคุม หรือค่าที่ใช้อ้างอิง ( ทางเข้าของระบบ ) ผลของการเปรียบเทียบจะได้ค่าที่เบี่ยงเบนหรือ ผิดพลาดไป และตัวควบคุมอัตโนมัติจะนำสัญญาณที่เบี่ยงเบนไปสร้างเป็นสัญญาณ เพื่อควบคุม ให้ระบบลดค่าผิดพลาดเหล่านั้นจนกลายเป็นศูนย์ หรือน้อยที่สุดเท่าที่ตัวควบคุมจะสามารถทำได้

ตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับแบบบูรณาการรวมหน่วย

ตัวควบคุมแบบสัดส่วนกับแบบบูรณาการรวมหน่วยนี้ เป็นการนำเอาคุณสมบัติของตัวควบคุมแบบ สัดส่วน กับตัวควบคุมแบบบูรณาการรวมหน่วยมารวมกัน ดังนั้น สัญญาณที่ออกจากตัวควบคุม ชนิดนี้คือ

สัญญาณทางออก = สัญญาณทางออกแบบพี + สัญญาณทางออกแบบไอ

$$U_{out}(t) = G_p U_{in}(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t U_{in} dt \quad (2-21)$$

แปลงลาปลาซจะได้

$$U_{out}(s) = G_p U_{in}(s) + \frac{U_{in}(s)}{T_i s} \quad (2-22)$$

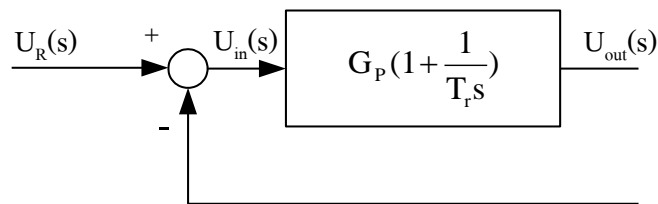
$$U_{out}(s) = G_p U_{in}(s) \left(1 + \frac{1}{T_i s}\right) \quad (2-23)$$

เมื่อ  $T_r = G_p T_i$  เวลาบูรณาการรวมหน่วยและเขียนเป็นฟังก์ชันโอนย้าย ได้ดังสมการ

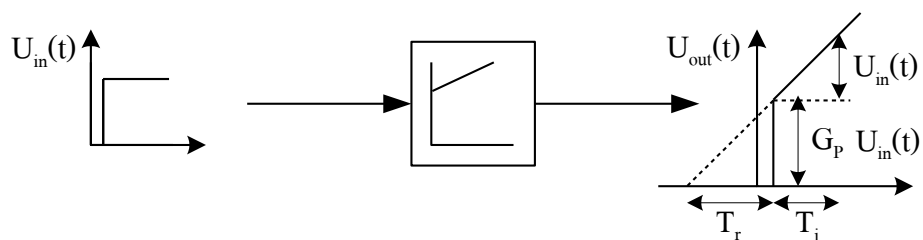
$$F(s) = \frac{U_{out}(s)}{U_{in}(s)} = G_p \left(1 + \frac{1}{T_r s}\right) \quad (2-24)$$

ค่าของ  $G_p$  และ  $T_r$  สามารถเปลี่ยนแปลงค่าได้ การปรับค่า  $T_r$  จะมีผลต่อการกระทำ การควบคุมแบบบูรณาการรวมหน่วย แต่ถ้าปรับค่าความไวของสัดส่วน  $G_p$  จะมีผลทั้งการกระทำ การควบคุมแบบสัดส่วน และการกระทำการควบคุมแบบบูรณาการรวมหน่วย ส่วนกลับของ  $T_r$  เรียกว่า “ อัตราส่วนจัดใหม่ ” อัตราส่วนจัดใหม่เป็นจำนวนครั้งต่อนาที ที่การควบคุมแบบส่วน เริ่มต้นใหม่

จากสมการ นำมาเขียนเป็นภาพบล็อกและแสดงผลตอบสนองต่อฟังก์ชันขั้นบันไดได้ ดังภาพที่ 2-27 และ 2-28

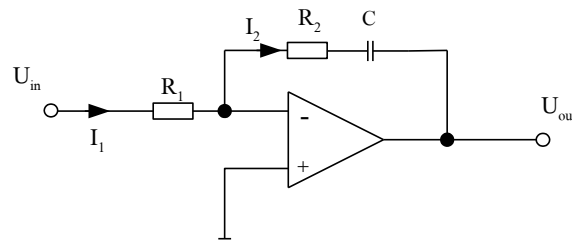


ภาพที่ 2-27 ไดอะแกรมของตัวควบคุมแบบส่วนร่วมกับแบบบูรณาการรวมหน่วย



ภาพที่ 2-28 ผลตอบสนองต่อฟังก์ชันขั้นบันไดของตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับแบบ บูรณาการรวมหน่วย

จากบล็อกไดอะแกรมสามารถสร้างเป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ได้ ดังภาพที่ 2-29



ภาพที่ 2-29 วงจรควบคุมแบบส่วนร่วมกับแบบบูรณาการรวมหน่วย

จากวงจรในภาพที่ 2-29 พิจารณาที่ขั้วลบ (-) จะได้

$$I_1 = -I_2$$

$$U_{in}(t) = I_1(t)R_1$$

$$= -I_2(t)R_1$$

$$U_{out}(t) = -(I_2(t)R_2 + U_C(t))$$

$$= -(I_2(t)R_2 + \frac{1}{C} \int_0^t I_2 dt)$$

$$= -(U_{in}(t) \frac{R_2}{R_1} + \frac{U_{in}(t)}{CR_1})$$

$$= -\frac{U_{in}(t)}{R_1} (R_2 + \frac{1}{C})$$

เขียนเป็นฟังก์ชัน โอนย้ายได้ดังนี้

$$F(s) = -\frac{U_{out}(s)}{U_{in}(s)} = -\frac{1}{R_1} (R_2 + \frac{1}{Cs})$$

$$= -\frac{R_2}{R_1} (1 + \frac{1}{R_2Cs})$$

$$F(s) = -G_p (1 + \frac{1}{T_r s})$$

เมื่อ

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

$$T_r = R_2 C \quad ; \text{ Reset Rate}$$

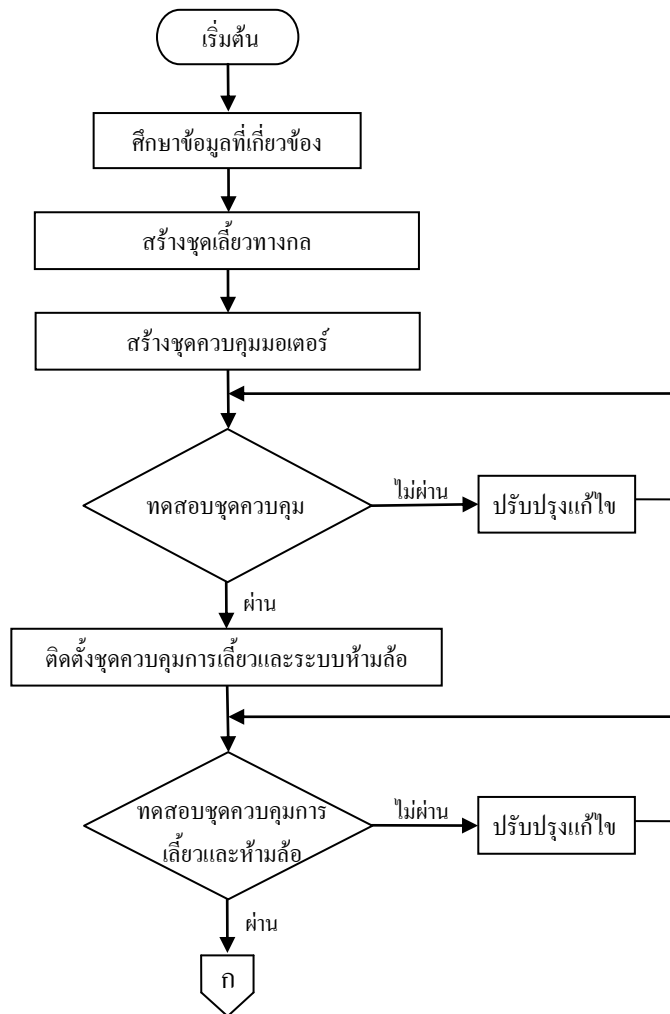
$$T_i = R_1 C \quad ; \text{ Integrating Time}$$

การควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับแบบบูรณาการรวมหน่วย (PI Control) นี้จะนำคุณสมบัติของการควบคุมทั้งสองมารวมกัน นั่นคือการควบคุมจะมีการตอบสนองที่เร็ว (P Control) และระบบจะมีความแม่นยำผิดพลาดน้อยที่สุดที่สภาวะคงตัว (I Control)

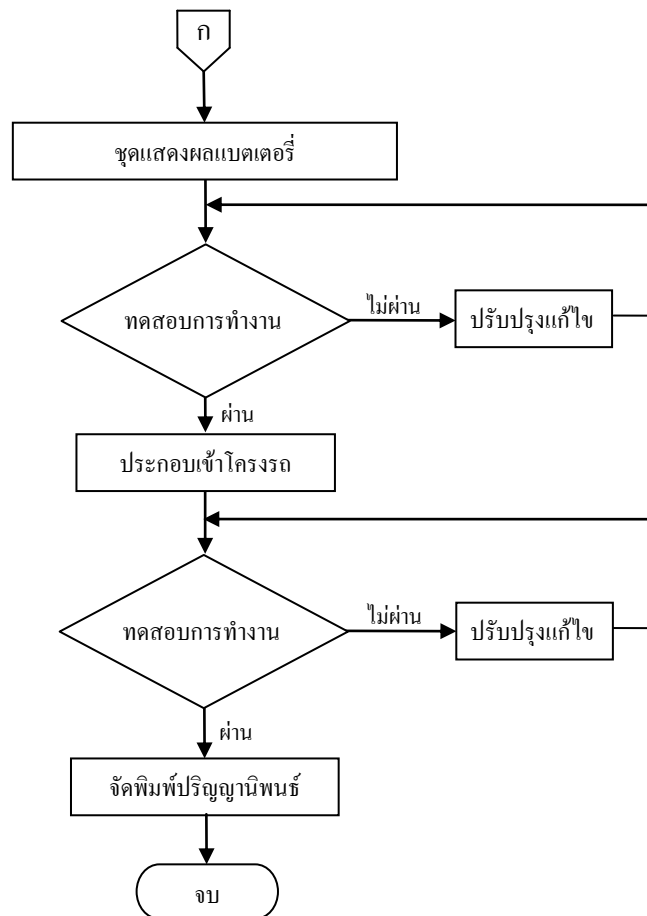
### บทที่ 3

#### ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

กระบวนการในการสร้างรถจักรยานไฟฟ้าขับเคลื่อนด้วย Brushless DC Motor มีขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานดังแสดงไว้ด้วยแผนผังแสดงขั้นตอนการทำงาน (Flow Chart) โดยรายละเอียดต่าง ๆ มีดังนี้



ภาพที่ 3-1 แผนผังขั้นตอนการดำเนินงาน



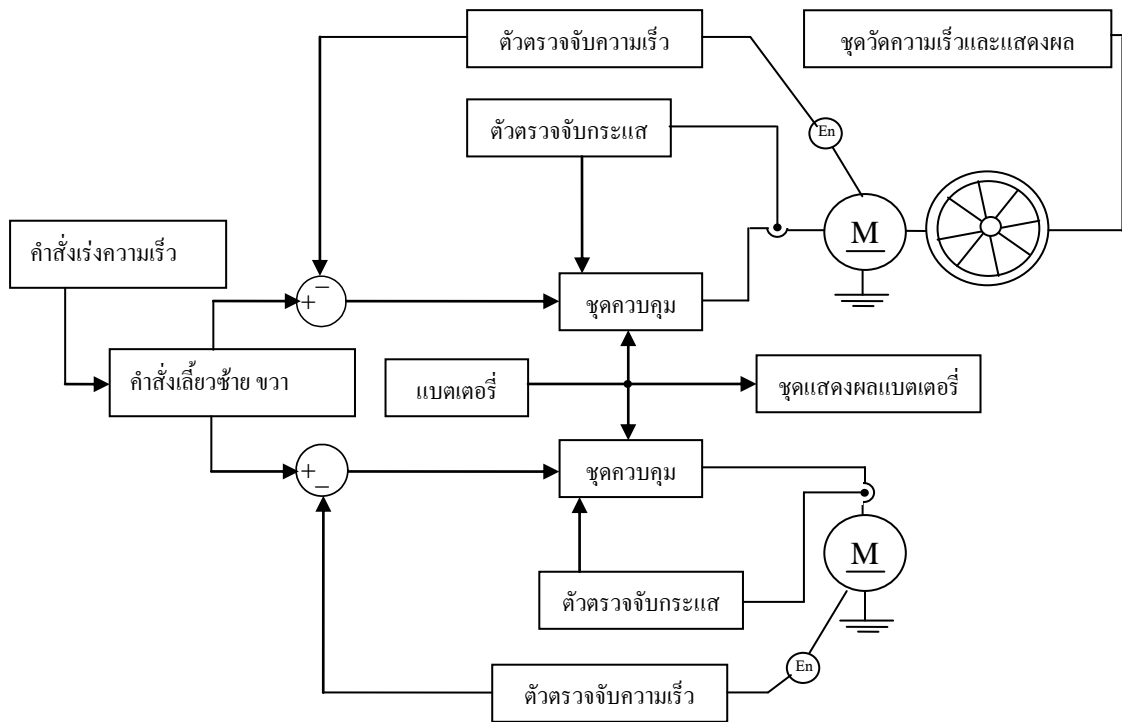
ภาพที่ 3-1 แผนผังขั้นตอนการดำเนินงาน (ต่อ)

### 3.1 ศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษาข้อมูล ที่เกี่ยวข้อง ต่างๆ ในการสร้ง ารถจักรยานไฟฟ้าขับเคลื่อนด้วย Brushless DC Motor ซึ่งได้ศึกษาข้อมูลจากปฏิญญาพันธของ วิษณุ ทองสัมฤทธิ์ และ ทศพล ทั้งรอด ในปีการศึกษา 2552

จากเดิมรถจักรยานไฟฟ้า มีมอเตอร์ในการขับเคลื่อนตัวเดียวทำให้แรงบิดน้อยส่งผลในการไต่ระดับไม่ได้ระบบห้ามล้อทางกลยังไม่ได้ตัดสัญญาณไฟฟ้าที่ขับเคลื่อนมอเตอร์

ดังนั้นผู้จัด ทำได้มีแนวคิดที่จะลดปัญหาข้างต้นที่ได้กล่าวมาจึงได้คิณามอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรงชนิดปราศจากแปรงถ่าน 2 ตัว มาใช้เป็นตัวขับเคลื่อนจักรยานไฟฟ้า เพื่อให้แรงบิดดีขึ้น สามารถเพิ่มแรงบิดในการไต่ระดับได้ และในการห้ามล้อทางกลก็ได้คิดทำระบบตัดสัญญาณไฟฟ้า ที่ขับเคลื่อนมอเตอร์อีกด้วย การสร้างรถจักรยานไฟฟ้าขับเคลื่อนด้วย Brushless DC Motor แนวคิดการออกแบบสามารถเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรม แสดงการทำงานดังภาพที่ 3-2



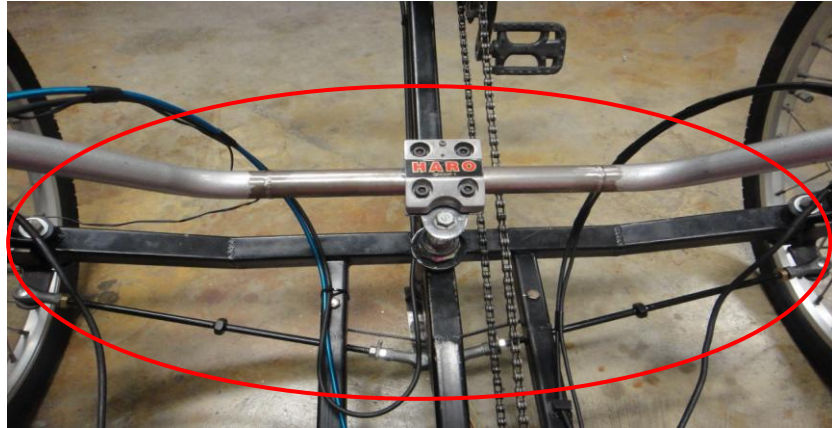
ภาพที่ 3-2 บล็อกไดอะแกรมแสดงการทำงานของรถจักรยานไฟฟ้า

เมื่อหมุนคันเร่ง นำคำสั่งเร่งความเร็วส่งไปยังคำสั่งเฉื่อย คำสั่งเฉื่อย จะทำการลดทอนแรงดัน โดย ไปสั่งให้ชุดควบคุมทำงาน ทำให้มอเตอร์หมุน เพื่อให้มอเตอร์ตอบสนอง ต่อแรงบิด จึงใช้ตัวตรวจจับกระแสเป็นตัวควบคุม การทำให้มอเตอร์ หมุนด้วยอัตราความ เร็วคงที่จึงใช้ตัวตรวจจับความเร็วเป็นการ Control Loop และมีชุดวัดความเร็ว แสดงผล บอกถึงความเร็วของรถจักรยานไฟฟ้า

### 3.2 การสร้างชุดเลี้ยวทางกล

ในการสร้าง ชุดเลี้ยวทางกลผู้จัดทำได้นำ รถจักรยาน 3 ล้อ ของปริญญาธิพนธ์ เรื่องรถจักรยานไฟฟ้าขับเคลื่อนด้วย Brushless DC Motor ซึ่งเป็นปริญญาธิพนธ์ ของ วิษณุ ทองสัมฤทธิ์ และ ทศพล ทั้งรอด ในปีการศึกษา 2552 ซึ่งโครงรถดังกล่าวมีปัญหาอยู่ในระบบการเลี้ยว

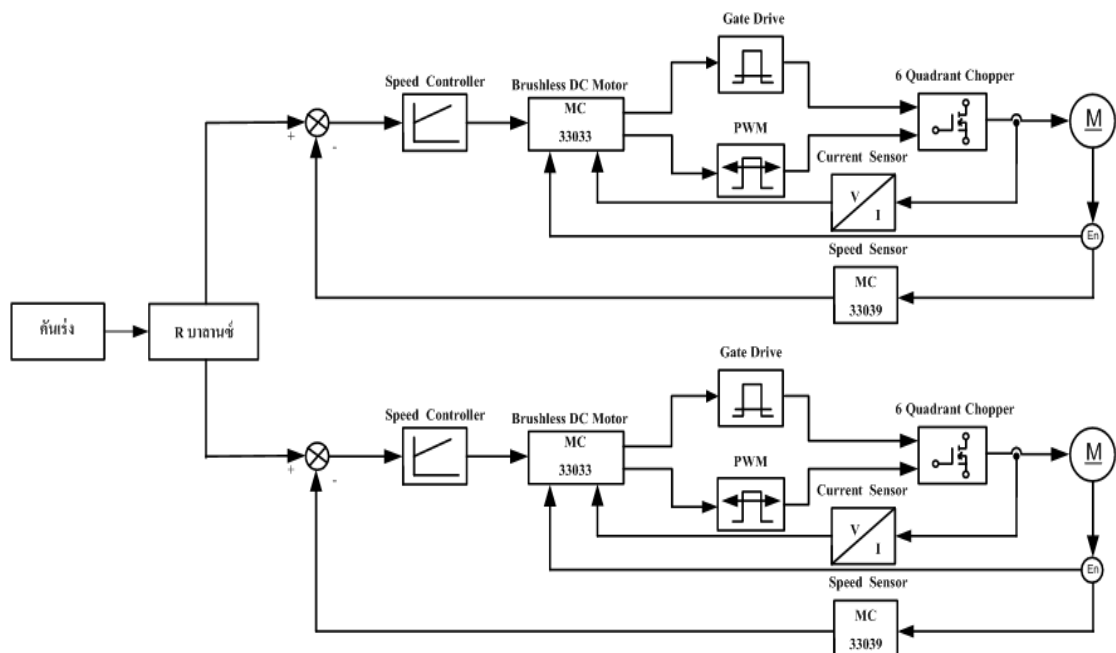
ดังนั้นผู้จัดทำได้สร้างรถจักรยาน 3 ล้อ และช่วยกันแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นกับตัวรถจักรยานไฟฟ้าจากการเลี้ยวของล้อหน้าที่ไม่แข็งแรงทำให้ล้อไม่สามารถรับน้ำหนักได้ จึงแก้ไขโดยการเปลี่ยนไปใช้คันชักคันส่งที่แข็งแรงกว่าเดิม ดังภาพที่ 3-3



ภาพที่ 3-3 ระบบการเลี้ยวคันชักคันส่ง

### 3.3 การสร้างชุดควบคุมมอเตอร์

ในโครงการนี้ผู้จัดทำได้ใช้ Brushless DC Motor ขนาด 36 V 250 W ดังแสดงในภาพที่ 3-4 ในการขับเคลื่อนรถจักรยานไฟฟ้า วิจัยและทดสอบแล้วว่า มอเตอร์ชนิดนี้ มีความเร็วรอบคงที่ จึงเหมาะสมกับการนำไปใช้งานในลักษณะการขับเคลื่อนจักรยานไฟฟ้า ในโครงการนี้ ไม่จำเป็นต้องถอดมอเตอร์เพื่อเปลี่ยนแปรปรองาน ในส่วนของสายสัญญาณต่าง ๆ ของมอเตอร์มีทั้งหมด 8 เส้น โดยแบ่งเป็นสาย Encoder 3 เส้น คือ SA SB SC สายไฟเลี้ยง Encoder อีก 2 เส้น และสายไฟจ่ายให้กับมอเตอร์อีก 3 เส้น คือ เฟส A เฟส B และเฟส C มีผังและส่วนประกอบดังนี้



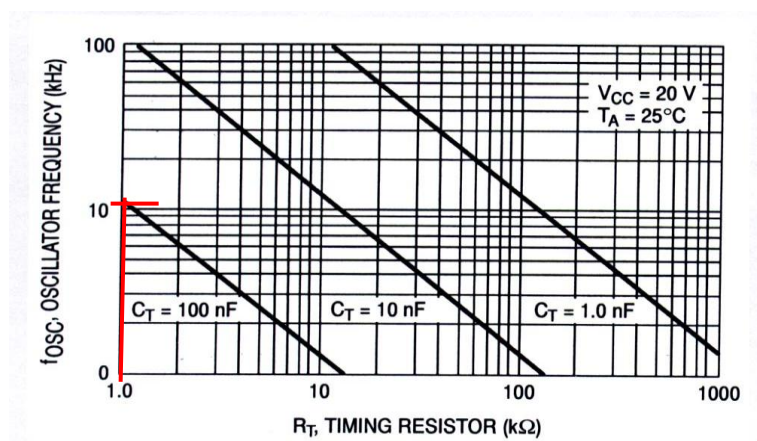
ภาพที่ 3-4 ผังชุดควบคุมมอเตอร์



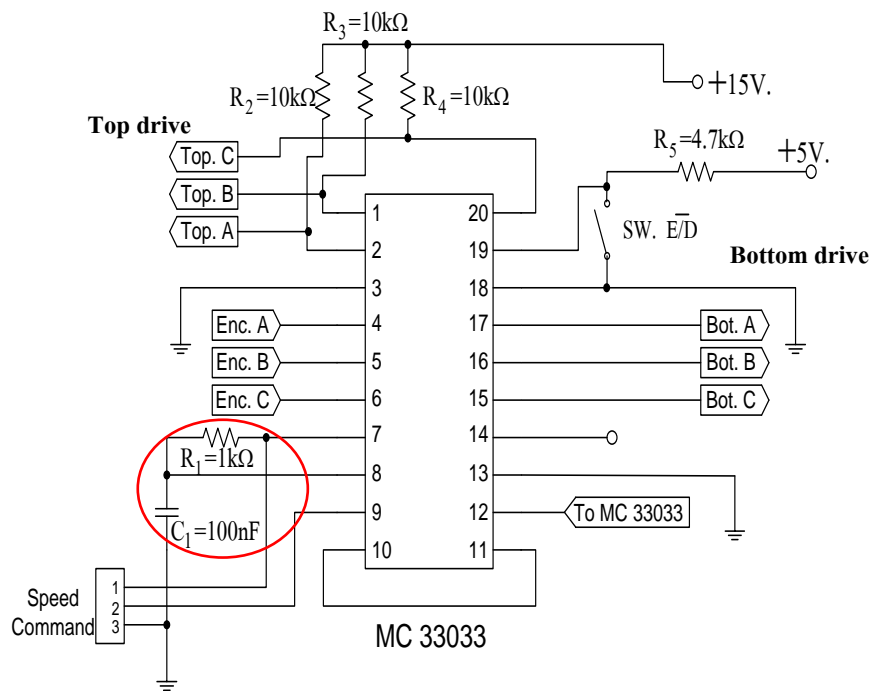


ภาพที่ 3-5 Brushless DC Motor ขนาด 36 V 250 W ที่ใช้งาน

ในโครงการนี้ได้เลือกใช้ไอซีเบอร์ MC33033 ได้นำวงจรของวิทยุและทศพล มาใช้ ซึ่งวิทยุและทศพล กล่าวว่า ไอซี MC33033 จะรับสัญญาณจาก Encoder SA SB และ SC แล้วนำไปสร้างสัญญาณเพื่อไปควบคุมมอเตอร์ สัญญาณที่ได้ออกมาด้าน Top Drive นั่นคือขา 1, 2 และ 20 ส่วนด้าน Bottom Drive คือขา 15, 16 และ 17 ซึ่งไอซี MC33033 สามารถปรับสัญญาณ PWM (Pulse Width Modulation) เพื่อควบคุมความเร็วของมอเตอร์ได้แล้วนำสัญญาณของขาไอซีทั้ง Top Drive และ Bottom Drive ไปควบคุมภาคกำลัง ปกติความถี่ที่ได้จากไอซี MC33033 สามารถกำหนดได้โดยการตั้งค่า  $R_T$  ( $R_1$ ) กับ  $C_T$  ( $C_1$ ) ที่ขา 8 ของไอซีดังในภาพที่ 3-6 การสร้างสัญญาณความถี่เลือกใช้ความถี่ 10 kHz เนื่องจากในการระบายความร้อนได้เหมาะสม ถ้าเราเลือกความถี่ที่มากกว่าหรือน้อยกว่านั้นก็จะเป็นไม่เหมาะสม ซึ่งได้จากการทดลอง จากกราฟความสัมพันธ์สามารถเลือกค่า  $R_T = 1k\Omega$  และ  $C_T = 100$  nF ซึ่งการต่อ MC33033 ดังภาพที่ 3-7

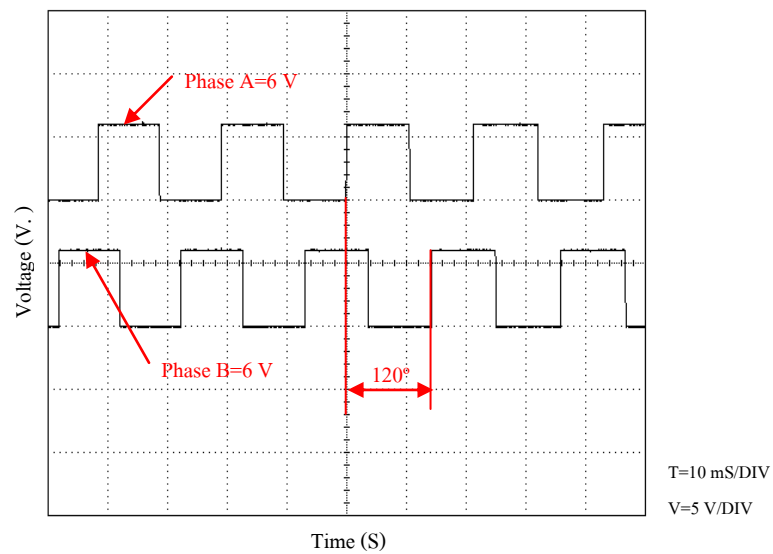


ภาพที่ 3-6 กราฟความสัมพันธ์ในการเลือกค่า  $R_T$  และ  $C_T$

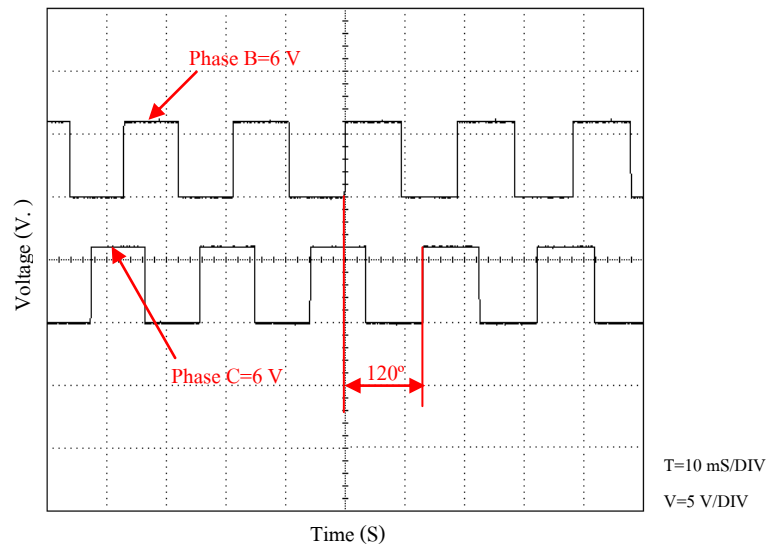


ภาพที่ 3-7 วงจรสร้างสัญญาณควบคุมโดยใช้ไอซี MC33033

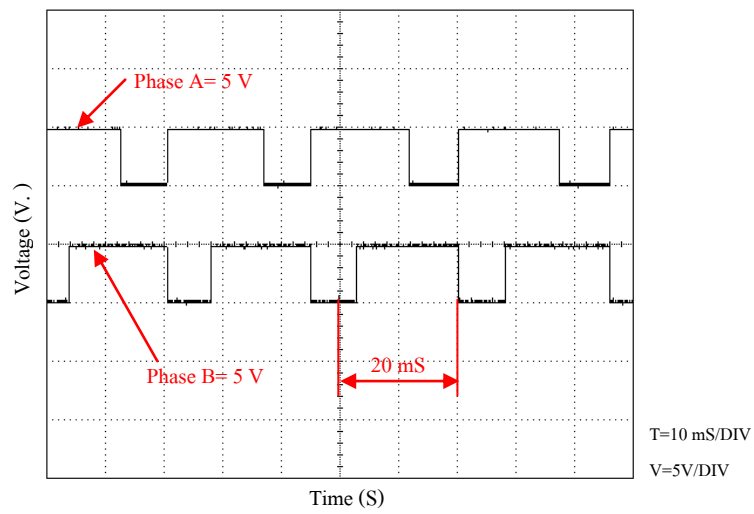
3.3.1 สัญญาณที่วัดได้จากไอซีเบอร์ MC33033



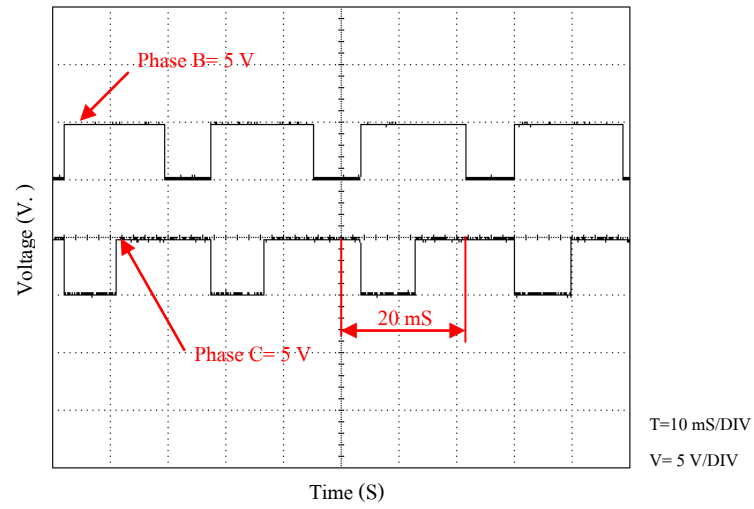
ภาพที่ 3-8 สัญญาณ Encoder เฟส A เทียบ กับ เฟส B



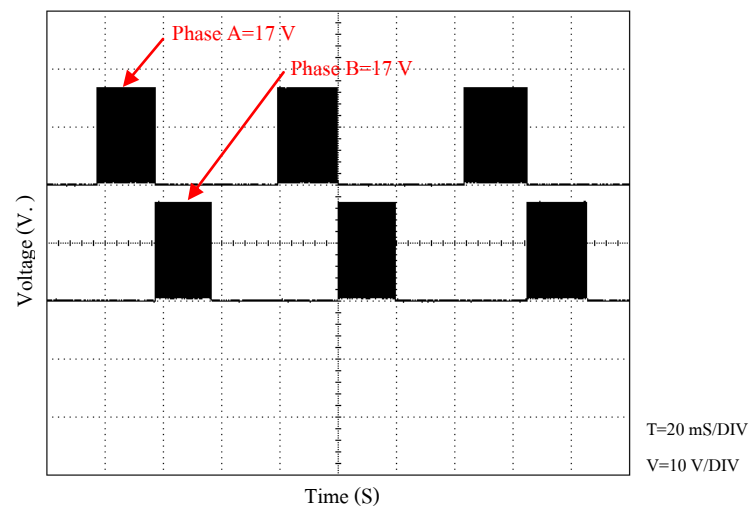
ภาพที่ 3-9 สัญญาณ Encoder เฟส B เทียบ กับ เฟส C



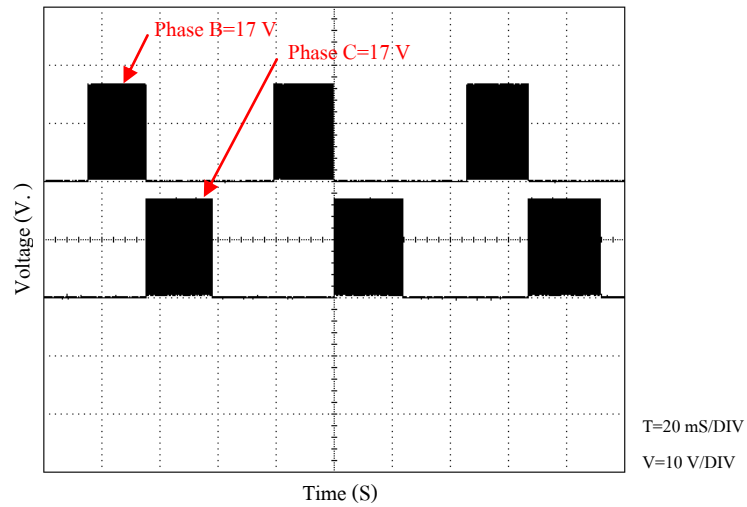
ภาพที่ 3-10 สัญญาณ Top Drive เฟส A เทียบ กับ เฟส B



ภาพที่ 3-11 สัญญาณ Top Drive เฟส B เทียบ กับ เฟส C



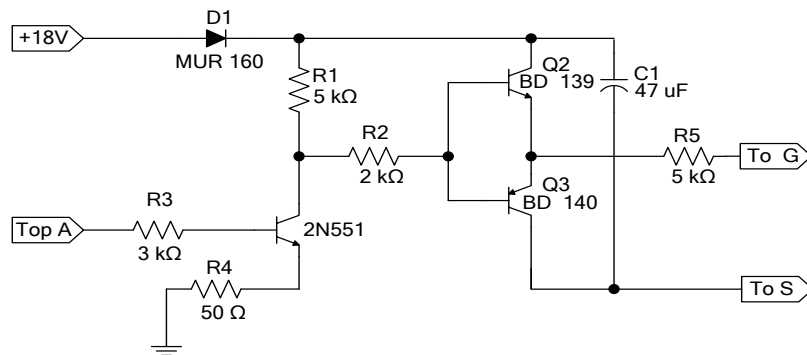
ภาพที่ 3-12 สัญญาณ Bottom Drive เฟส A เทียบ กับ เฟส B



ภาพที่ 3-13 สัญญาณ Bottom Drive เฟส B เทียบ กับ เฟส C

3.3.2 สร้างวงจรชดชับนำเกต

วงจรชดชับนำเกตของเดิมเป็นแบบ Bootstrap ดังภาพที่ 3-14ใช้เพื่อเป็นสวิตช์ ในการ ON และ OFF Mosfets ผลที่ได้จากการ OFF ไม่สนิท ทำให้วงจรภาคกำลังเกิดการเสียหาย

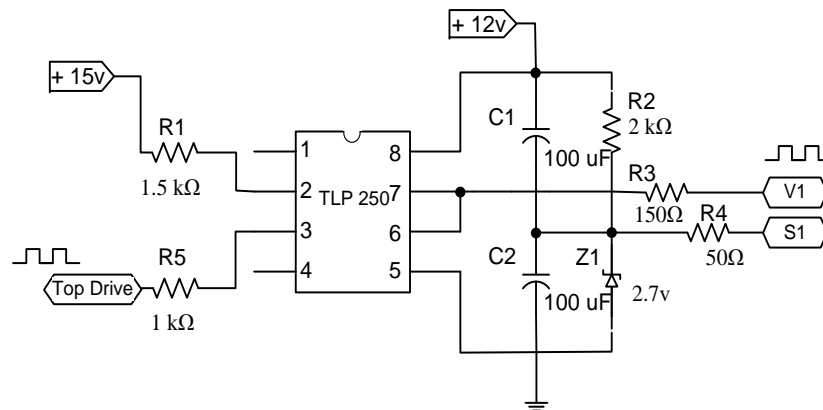


ภาพที่ 3-14 วงจรชดชับนำเกต(เดิม)

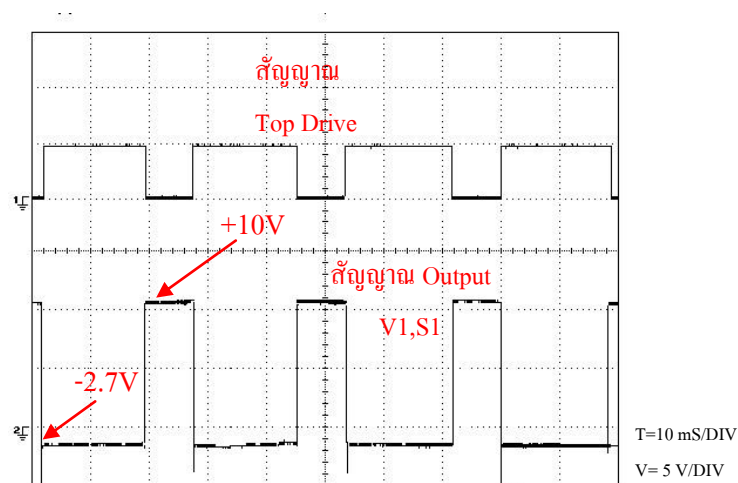
ผู้จัดทำได้ปรับเปลี่ยนชดชับนำเกต โดยใช้ Opto TLP250 เพื่อเป็นตัว ON และ OFF Mosfets ผลที่ได้จากการ OFF สนิท ทำให้วงจรภาคกำลังไม่เกิดการเสียหาย ดังภาพที่ 3-15

จากภาพที่ 3-15 วงจรชดชับนำเกตจะรับสัญญาณ Top Drive ต่อเข้ากับขาของไอซี MC 33033 และ R<sub>5</sub> ต่ออนุกรมขา 3 ของ TLP250 ส่วน R<sub>1</sub> ต่อกับแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง 15 โวลต์ เพื่อควบคุมกระแสที่ไหลผ่านออปโตคัปเปอเร่ ใน TLP250 ทำงานตามสัญญาณอินพุต (Top Drive) สัญญาณเอาต์พุต(Output Signal)ที่ได้จากไอซี TLP250 นั้นจะได้ตามคุณสมบัติของไอซี TLP250 คือป้อนไฟตรง 12 โวลต์ สัญญาณเอาต์พุต(Output Signal) ออกที่ขา 6 และขา 7 ของไอซี เมื่อเทียบกับ

กราวด์ที่ขา 5 ของไอซี สัญญาณที่ได้ออกมาเป็น ไฟตรง จะมีระดับสัญญาณอยู่ที่ 12 โวลต์ ตามแหล่งจ่ายไฟตรงที่ป้อนให้กับไอซีและความถี่จะเท่ากับ สัญญาณอินพุตที่ป้อนให้กับไอซี แต่เมื่อทำการวัดสัญญาณที่ได้จาก V1 และ S1 มีสัญญาณดังภาพที่ 3-16 ซึ่งระดับสัญญาณที่ได้เหมาะสมกับความต้องการของ Mosfets ที่สามารถทำงานเป็นสวิตช์ได้



ภาพที่ 3-15 วงจรขับนำเกตใหม่

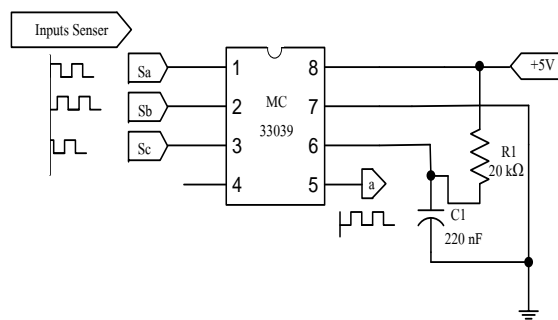


ภาพที่ 3-16 สัญญาณขับนำเกต

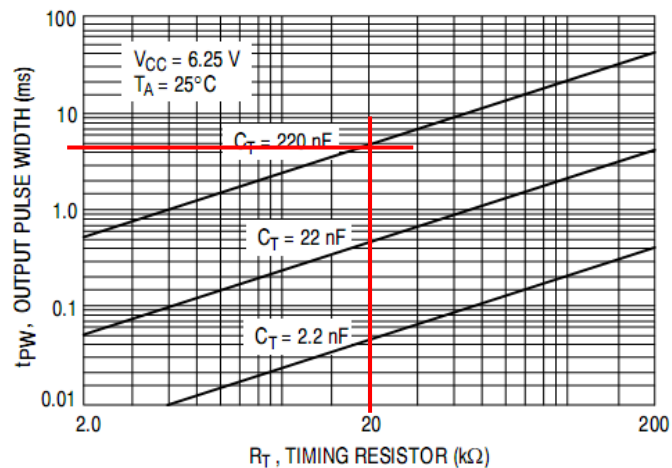
### 3.3.3 สร้างวงจรควบคุมความเร็ว

เนื่องจากมอเตอร์มีสัญญาณ Encoder 3 เฟส จึงนำสัญญาณทั้ง 3 เฟส มาใช้งานกับวงจร สร้างสัญญาณควบคุมโดยใช้ไอซี MC33033 ไม่ได้ ดังนั้นผู้จัดทำจึงเลือกใช้ MC 33039 ซึ่งจากบทที่ 2 ภาพที่ 2-14 จะเห็นว่ารูปคลื่นการทำงานของ Motor Three Phase สามารถนำสัญญาณที่ได้จาก Encoder มารวมเหลือเฟสเดียว และเหมาะสมกับวงจร

ซึ่งไอซี MC33039 รับสัญญาณจาก Encoder SA SB และ SC สามารถนำไปสร้างสัญญาณเพื่อไปควบคุมมอเตอร์ โดยการส่งสัญญาณที่ได้ออกมาด้าน  $f_{out}$  คือขา 5 ไอซี MC33039 สามารถปรับความเร็วในการเกิดสัญญาณ PWM (Pulse Width Modulation) เพื่อควบคุมความเร็วของมอเตอร์ แล้วนำสัญญาณของขาไอซี  $f_{out}$  ส่งกลับไปยัง ไอซี MC 33033 เพื่อควบคุมภาคกำลัง ปกติความเร็วของสัญญาณที่ได้จากไอซี MC33039 สามารถกำหนดได้โดยการตั้งค่า  $R_T$  ( $R_1$ ) กับ  $C_T$  ( $C_1$ ) ที่ขา 6 ของไอซีดังในภาพที่ 3-18 การสร้างสัญญาณ PWM (Pulse Width Modulation) เลือกใช้ Output Pulse Width ที่ 5 ms เนื่องจากสัญญาณ PWM (Pulse Width Modulation) ที่เกิดขึ้นในช่วงเวลานี้เหมาะสมกับวงจร ถ้าเลือก Output Pulse Width ที่ช่วงเวลามากกว่าหรือน้อยกว่านี้ก็ไม่เหมาะสม ซึ่งได้จากการทดสอบ กราฟความสัมพันธ์สามารถเลือกค่า  $R_T = 20 \text{ k}\Omega$  และ  $C_T = 220 \text{ nF}$  ซึ่งการต่อ MC33039 ดังภาพที่ 3-17



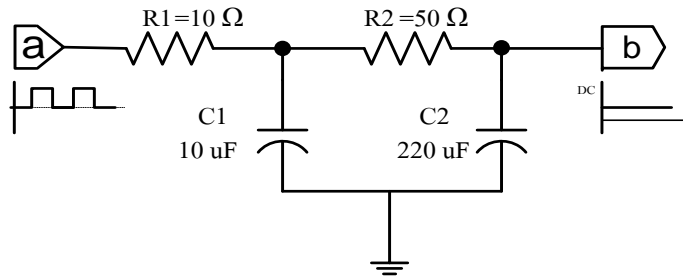
ภาพที่ 3-17 วงจรสร้างสัญญาณควบคุมโดยใช้ไอซี MC33039



ภาพที่ 3-18 ความสัมพันธ์ของค่า  $R_T$  และ  $C_T$  ในการกำหนดความเร็วในการเกิด PWM

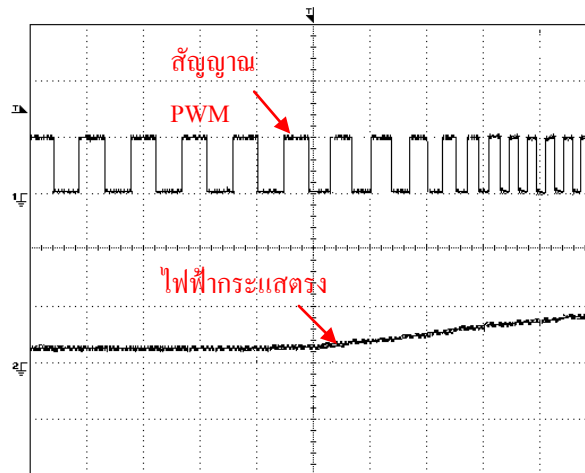
เนื่องจาก MC 33033 ขา 7 รับสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง แต่สัญญาณที่ออกมาจาก MC 33039 ขา 5 ออกมาเป็นสัญญาณ PWM (Pulse Width Modulation) และสัญญาณ PWM เกิดขึ้นจากการ

หมุนของมอเตอร์ เมื่อมอเตอร์หมุนเร็วสัญญาณ PWM (Pulse Width Modulation) ยิ่งแคบลง ดังภาพที่ 3-20 จากข้อความข้างต้น ต้องทำการแปลงจากสัญญาณ PWM เป็นไฟฟ้ากระแสตรง ดังภาพที่ 3-19 และวงจรการต่อ ดังภาพที่ 3-19



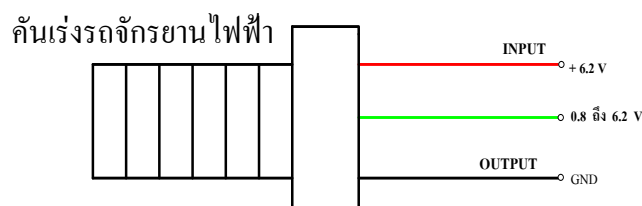
ภาพที่ 3-19 วงจรแปลงจากสัญญาณ PWM เป็นไฟฟ้ากระแสตรง

ผลที่ได้จากกา ารทดสอบหาคะควบคุมความเร็ว มอเตอร์ เห็นได้ว่าเมื่อ หมุนมอเตอร์ ทำงาน สัญญาณ PWM (Pulse Width Modulation) ยิ่งแคบลงตามความเร็วของมอเตอร์ เมื่อมอเตอร์หมุนเร็วส่งผลให้ไฟฟ้ากระแสตรงยิ่งเพิ่ม ดังภาพที่ 3-20



ภาพที่ 3-20 สัญญาณแปลงจาก PWM เป็นไฟฟ้ากระแสตรง

### 3.3.4 สร้างวงจรควบคุมอัตโนมัติ

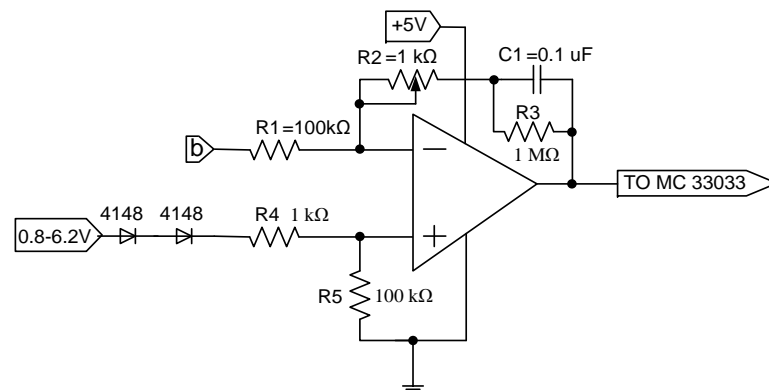


ภาพที่ 3-21 ไคอะแกรมของคันเร่ง



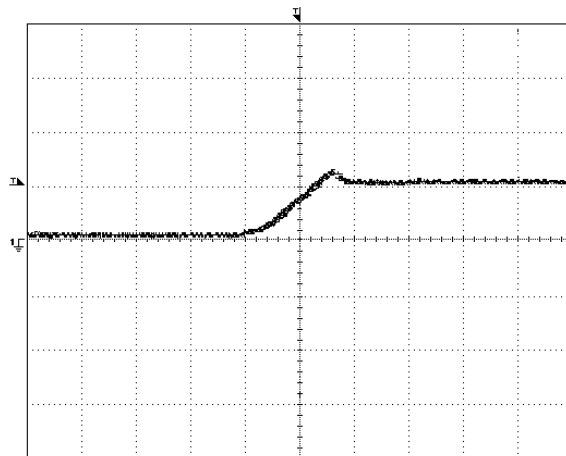
ชุดควบคุมอัตโนมัติ จะทำหน้าที่เปรียบเทียบสัญญาณเอาต์พุตของระบบกับค่าที่ใช้อ้างอิงผลของการเปรียบเทียบจะได้ค่าที่ผิดพลาด คไป และชุดควบคุมอัตโนมัตินี้จะนำสัญญาณที่เบี่ยงเบนไปสร้างเป็นสัญญาณเพื่อควบคุม ระบบลดค่าผิดพลาด คนั้นน้อยที่สุด จากการออกแบบระบบ ควบคุมอัตโนมัติต้องการนำค่าผิดพลาดนี้ไปปรับสัญญาณ PWM (Pulse Width Modulation) ควบคุมทิศทางมอเตอร์ ซึ่งวงจรสร้างสัญญาณควบคุมโดยใช้ไอซี MC33033 ที่รับอินพุตเป็นแรงดันไฟตรงในช่วง 0.1 โวลต์ ถึง 6.2 โวลต์ ไปแปลงเป็นสัญญาณ PWM (Pulse Width Modulation) ดังนั้นจึงสามารถออกแบบวงจรชุดควบคุมแบบอัตโนมัติได้โดย

สร้างวงจรชุดควบคุมอัตโนมัติโดยรับสัญญาณมาจากคันเร่ง ที่ระดับแรงเคลื่อนไฟฟ้า 0.8 โวลต์ ถึง 6.2 โวลต์ เพื่อมาเปรียบเทียบกับวงจรแปลงจากสัญญาณ PWM (Pulse Width Modulation) เป็นไฟ DC โดยเลือกวงจรควบคุมแบบ PI Control ที่มีค่าความไวต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณ สามารถปรับอัตราขยายได้ แก้ไขความคลาดเคลื่อนของระบบและมีวงจรปรับระดับสัญญาณที่ต่อไปยังวงจรสร้างสัญญาณควบคุมโดยใช้ไอซี MC33033 ดังภาพที่ 3-22



ภาพที่ 3-22 วงจรชุดควบคุมอัตโนมัติ

การออกแบบเนื่องจากระดับแรงดันไฟฟ้าที่ออกมาจากคันเร่งประมาณ 0.8 โวลต์ ถึง 6.2 โวลต์ จากความเร็วต่ำสุดถึงความเร็วสูงสุด ในวงจรสร้างสัญญาณควบคุมโดยใช้ไอซี MC33033 ต้องมีระดับแรงดันไฟฟ้าที่ออกมาจากคันเร่งประมาณ 0.1 โวลต์ เพื่อใช้ในการสร้างสัญญาณ PWM (Pulse Width Modulation) ดังนั้นจึงใช้ไดโอดเบอร์ 1N4148 ต่ออนุกรม 2 ตัว เพื่อลดแรงดัน และมีวงจรรวมสัญญาณ (Summing) ซึ่งสามารถปรับอัตราขยายที่  $R_2$  ได้ สัญญาณที่ได้ ดังภาพที่ 3-23

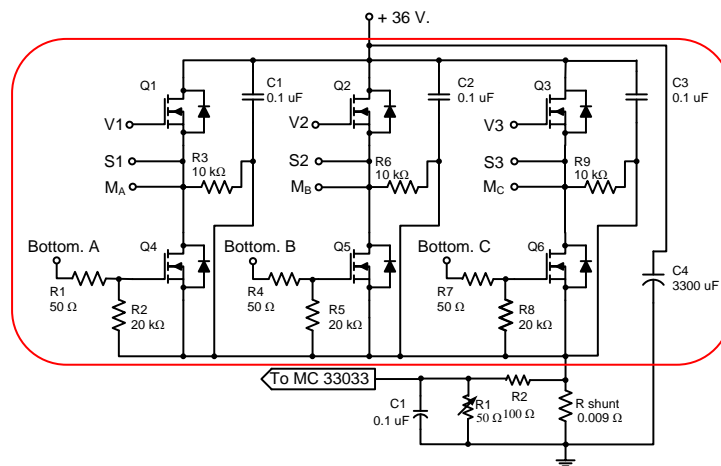


ภาพที่ 3-23 สัญญาณของวงจรควบคุมอัตโนมัติ

### 3.3.5 วงจรภาคกำลัง

ผู้จัดทำโครงการ ได้นำวงจรภาคกำลัง เดิม ของวิทยุ ทองสัมฤทธิ์ และ ทศพล ทั้งรอด ในปีการศึกษา 2552 มาใช้งานซึ่งมี ประสิทธิภาพในการใช้งานคือ ทนกระแสช่วงสตาร์ทของมอเตอร์ จากการคำนวณในบทที่ 2 (หน้า 38)

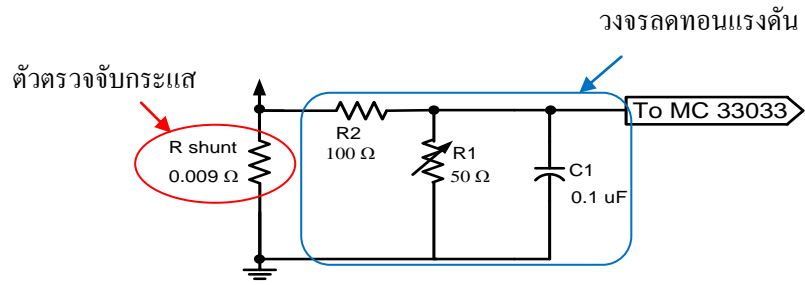
ดังนั้นจึงเลือกใช้ออสเฟตกำลังเบอร์ IRF2807 เพราะมีค่า  $V_{DSS} = 80V$ ,  $R_{DS(on)} = 23 \text{ m}\Omega$  และ  $I_D = 80 \text{ A}$



ภาพที่ 3-24 วงจรภาคกำลัง

### 3.3.6 ตัวตรวจจับกระแส

ตัวตรวจจับกระแสได้นำวงจรเดิม ของวิทยุ ทองสัมฤทธิ์ และ ทศพล ทั้งรอด ในปีการศึกษา 2552 มาใช้งานโดยได้จัด สร้าง ด้วยการนำวงจรมาทำ PCB และทดลอง ใช้ ซึ่งรูปวงจรเป็น ดังภาพที่ 3-25

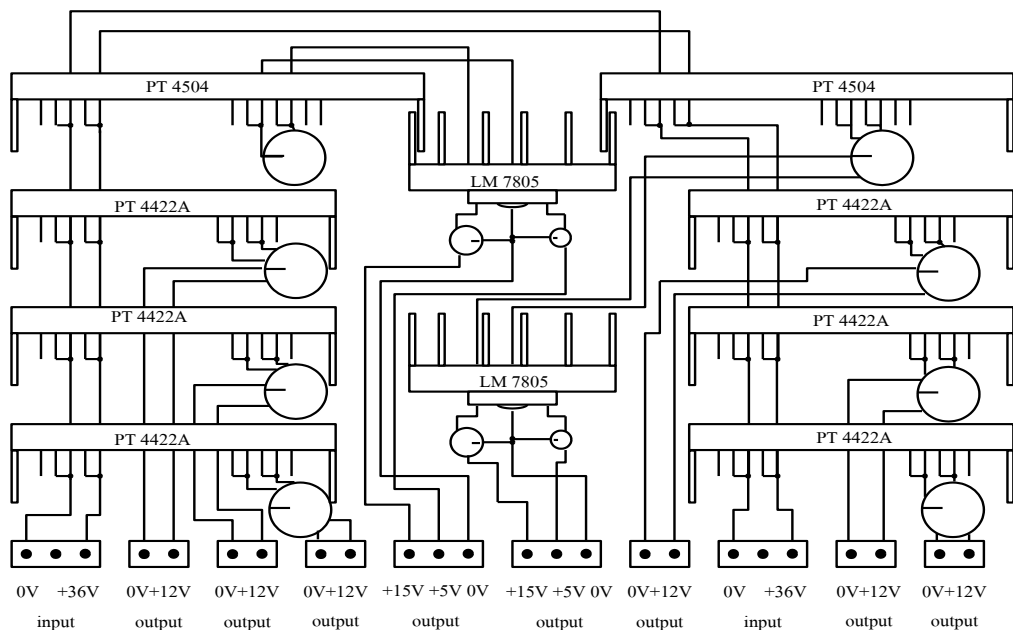


ภาพที่ 3-25 ตัวตรวจจับกระแสและวงจรลดทอนแรงดัน

### 3.3.7 สร้างแหล่งจ่ายไฟฟ้า

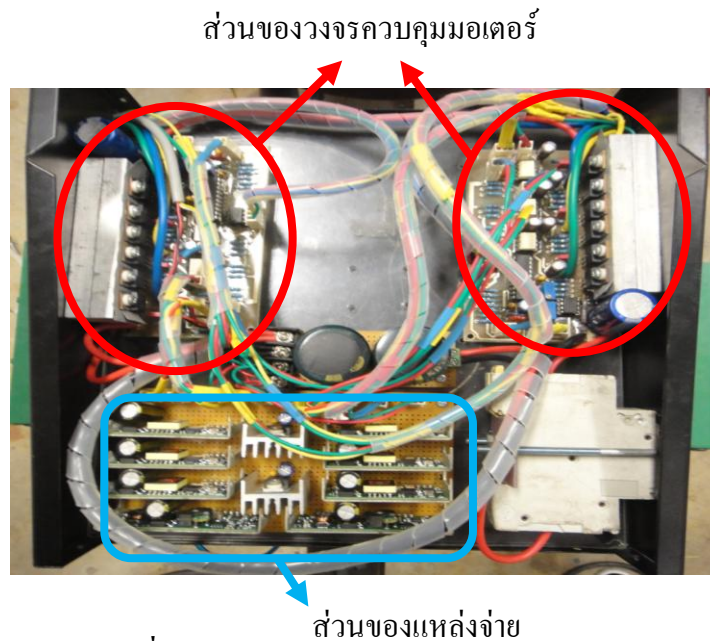
ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง แบบสามขดลวด นั้น จะมีชุดการทำงานอยู่ 3 ชุด แต่ละชุดต้องการไฟเลี้ยงที่มีระดับแรงดันต่างกัน ดังนั้นการออกแบบแหล่งจ่ายไฟฟ้าต้องให้เหมาะสมกับการใช้งานของวงจรต่างๆ เช่น วงจรสร้างสัญญาณควบคุมโดยใช้ไอซี MC33033 วงจรชุดขับนำแกด วงจรควบคุมความเร็ว ฯลฯ

คือแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 5 โวลต์ เลือกใช้ไอซีเรกูเลเตอร์เบอร์ 7805 แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 15 โวลต์ เลือกใช้ไอซีเบอร์ PT 4504 ซึ่งเป็น Programmable Isolated DC/DC Converter และแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 12 โวลต์ เลือกใช้ไอซี เบอร์ PT 4422A ซึ่งเป็น Programmable Isolated DC/DC Converter เพราะเป็นไอซี ที่ต่อใช้งานได้ง่ายและให้ระดับแรงดันไฟฟ้าคงที่ ดังภาพที่ 3-26



ภาพที่ 3-26 แหล่งจ่ายไฟฟ้า

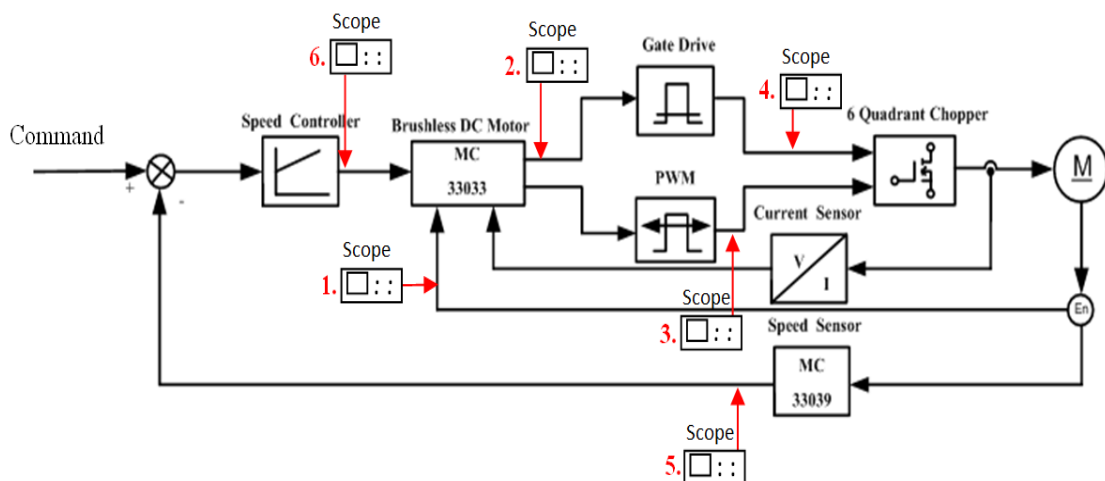
ในการสร้างวงจรต่าง ๆ ข้างต้นที่ได้กล่าวมา เช่น วงจรสร้างสัญญาณควบคุมโดยใช้ไอซี MC33033 วงจรชุดขับนำเกต วงจรควบคุมความเร็ว วงจรสร้างสัญญาณควบคุมโดยใช้ไอซี MC33039 วงจรแปลงจากสัญญาณ PWM เป็นไฟฟ้ากระแสตรง วงจรควบคุมอัตโนมัติ วงจรภาคกำลัง ตัวตรวจจับกระแส และแหล่งจ่ายไฟฟ้า นำมาประกอบเข้าด้วยกัน เป็น PCB ของ วงจรชุดควบคุมมอเตอร์ ดังภาพที่ 3-27



ภาพที่ 3-27 PCB ของวงจรควบคุมมอเตอร์

### 3.4 ทดสอบการทำงานของชุดควบคุมมอเตอร์

การทดสอบการทำงานของชุดควบคุมมอเตอร์ โดยใช้ออสซิลโลสโคป เพื่อทดสอบสัญญาณในการทำงานแสดงดังภาพที่ 3-28



ภาพที่ 3-28 แสดงการทดสอบชุดควบคุมมอเตอร์

3.4.1 การทดสอบการทำงานของวงจร สร้างสัญญาณควบคุมโดยใช้ไอซี MC33033 วัตถุประสงค์ของวงจรด้วยออสซิลโลสโคป เพื่อทดสอบสัญญาณในการทำงานจริง ซึ่งจะได้สัญญาณการทำงาน จากจุดที่ 1 จุดที่ 2 และจุดที่ 3 ของภาพที่ 3-28

จุดที่ 1 วัดสัญญาณของ Encoder สัญญาณที่ได้ ดังภาพที่ 3-29



ก. เฟส A เทียบกับเฟส B

ข. เฟส B เทียบกับเฟส C

ภาพที่ 3-29 สัญญาณ Encoder

จุดที่ 2 วัดสัญญาณของ Top Drive สัญญาณที่ได้ ดังภาพที่ 3-30

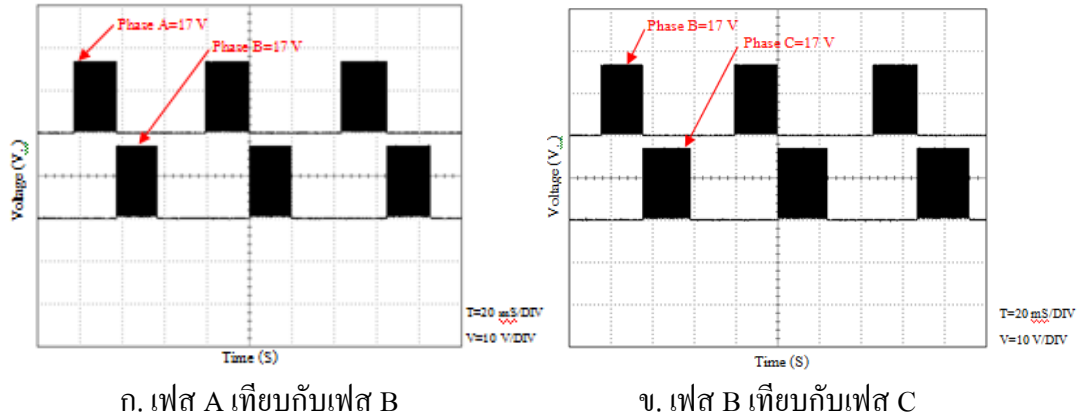


ก. เฟส A เทียบกับเฟส B

ข. เฟส B เทียบกับเฟส C

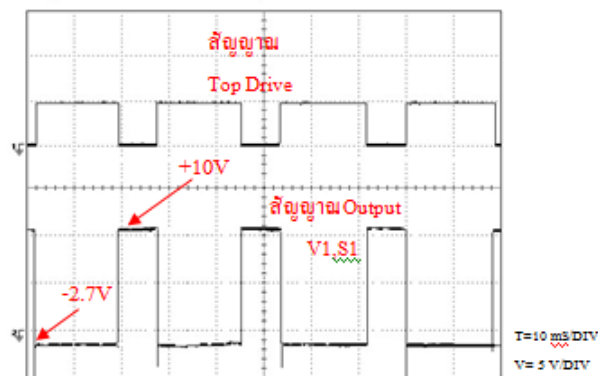
ภาพที่ 3-30 สัญญาณ Top Drive

จุดที่ 3 วัดสัญญาณของ Bottom Drive สัญญาณที่ได้ ดังภาพที่ 3-31



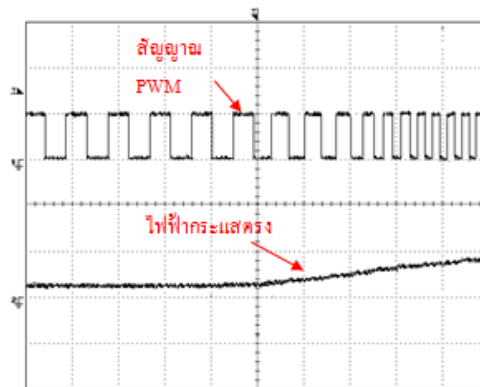
ภาพที่ 3-31 สัญญาณ Bottom Drive

3.4.2 การทดสอบการทำงานของวงจรชุดขับนำเกต ทำได้โดยนำสัญญาณ Top Drive ของวงจรสร้างสัญญาณควบคุม ใช้ไอซี MC 33033 ทั้ง 3 เฟส มาต่อกับวงจรชุดขับนำเกตทั้ง 3 ชุด วัดสัญญาณของวงจรด้วยออสซิลโลสโคป และวัดสัญญาณเอาต์พุตของวงจร ชุดขับนำเกต 1 ชุด เพื่อทดสอบสัญญาณในการทำงานจริงซึ่ง สัญญาณการทำงานของวงจร จากจุดที่ 4 ของภาพที่ 3-28 สัญญาณที่ได้ ดังภาพที่ 3-32



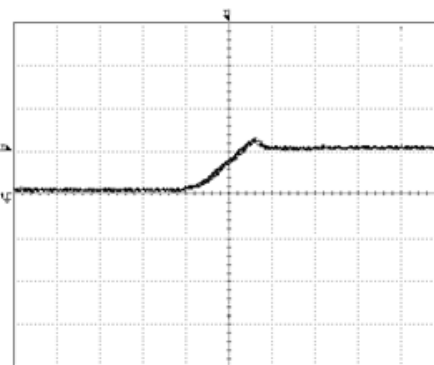
ภาพที่ 3-32 สัญญาณขับนำเกตในการทำงานจริง

3.4.3 การทดสอบการทำงานของวงจรควบคุมความเร็ว ได้นำสัญญาณจาก Encoder ของมอเตอร์มาต่อยังวงจรควบคุมความเร็วทั้ง 3 เฟส โดยไม่ได้แปลงสัญญาณ สัญญาณที่ออกมา ปกติเป็นสัญญาณ PWM แต่เมื่อนำสัญญาณที่ไ้มาต่อกับวงจรแปลงจากสัญญาณ PWM เป็นไฟฟ้ากระแสตรง สัญญาณที่ ได้ออกมาเป็นไฟฟ้ากระแสตรง โดยใช้ออสซิลโลสโคป 2 Channel วัดสัญญาณเอาต์พุตของวงจรควบคุมความเร็ว และวัดสัญญาณเอาต์พุตของวงจรแปลงจากสัญญาณ PWM เป็นไฟฟ้ากระแสตรง จากจุดที่ 5 ของภาพที่ 3-28 สัญญาณที่ได้ ดังภาพที่ 3-33



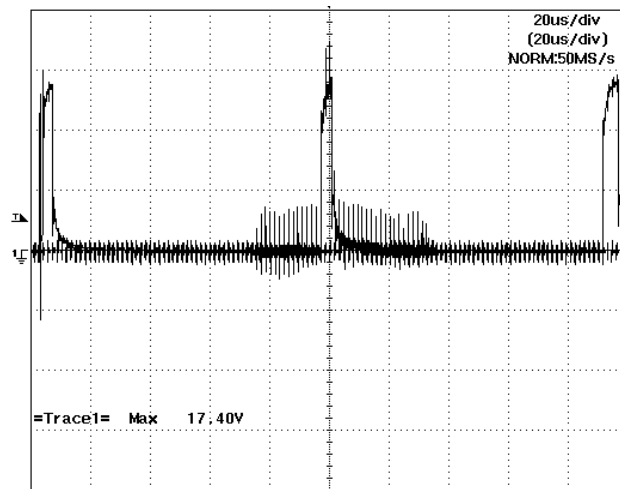
ภาพที่ 3-33 สัญญาณแปลงจาก PWM เป็นไฟฟ้ากระแสตรง

3.4.4 การทดสอบการทำงานของวงจรควบคุมอัตโนมัติ นำสัญญาณที่ได้จากเอาต์พุตของวงจรแปลงสัญญาณ PWM เป็นไฟฟ้ากระแสตรง มาต่อเป็นวงจรรวมสัญญาณแบบกลับเฟส (Summing) และนำสัญญาณเอาต์พุตจากกันเร่งมาต่อ กับวงจรชุดควบคุมอัตโนมัติ จากจุดที่ 6 ของภาพที่ 3-28 สัญญาณที่ได้ ดังภาพที่ 3-34



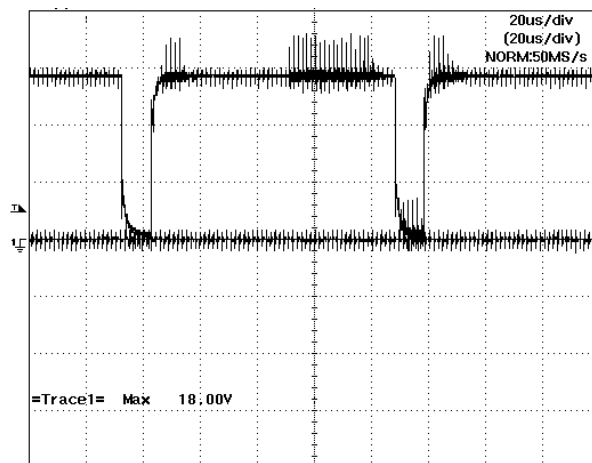
ภาพที่ 3-34 สัญญาณของวงจรควบคุมอัตโนมัติ

3.4.5 ในการทดสอบการทำงานของชุดควบคุมมอเตอร์ เมื่อทำการสร้างชุดควบคุมมอเตอร์ โดยใช้ไอซี MC 33033 ทำการทดสอบการทำงานของชุดควบคุมมอเตอร์ ทดสอบขณะไม่มีโหลด โดยการทดสอบแรงดันตกคร่อม Mosfets นั้นคือวัตที่ขาเดรนและซอร์ส ได้ผลการทดสอบ ดังภาพที่ 3-35 และภาพที่ 3-36



ภาพที่ 3-35 แรงดัน  $V_{DS}$  ที่ตัว Mosfets คำสั่ง 25%

จากภาพที่ 3-35 เป็นสัญญาณที่คำสั่ง 25% ซึ่ง Mosfets ยังไม่ทำงานเป็นผลให้มอเตอร์หยุดนิ่ง



ภาพที่ 3-36 แรงดัน  $V_{DS}$  ที่ตัว Mosfets คำสั่งเดินหน้า 95%

จากภาพที่ 3-36 เป็นสัญญาณที่คำสั่งเดินหน้าที่ 95% ซึ่ง Mosfets ทำงาน เป็นผลให้มอเตอร์หมุนไปด้านหน้า

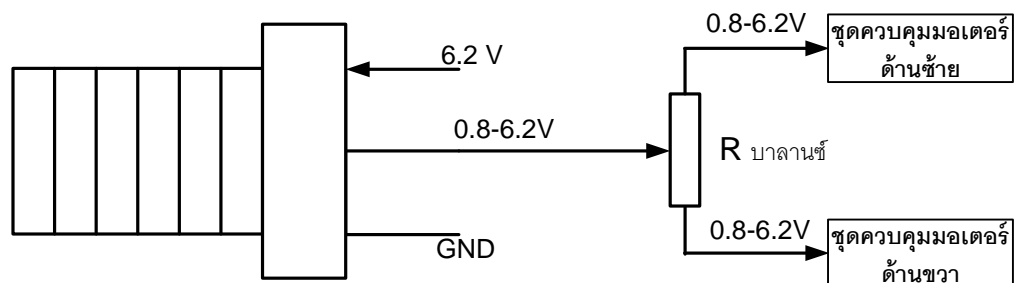


### 3.5 การติดตั้งชุดควบคุมการเลียและระบบห้ามล้อ

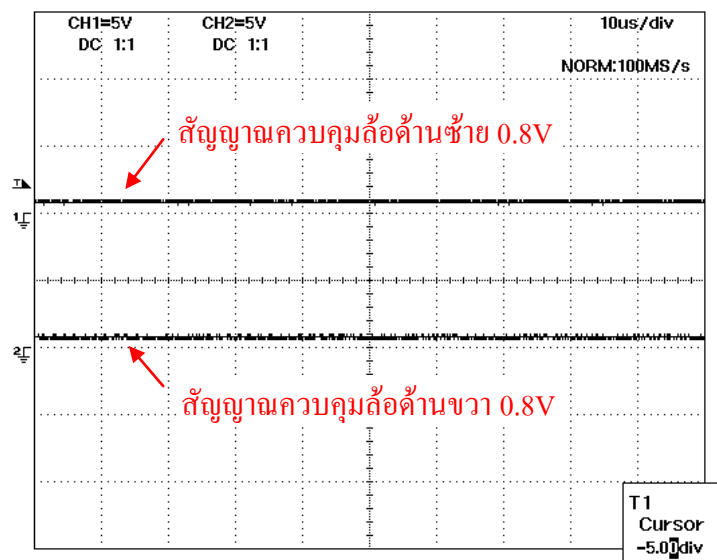
#### 3.5.1 การสร้างระบบเลีย

ในการสร้างระบบเลียเพื่อให้มอเตอร์ 2 ตัว มีความเร็วรอบที่ไม่เท่ากัน เช่น เมื่อเลียขวา มอเตอร์ด้านขวาหมุนช้ากว่ามอเตอร์ด้านซ้ายและ เมื่อเลียซ้ายมอเตอร์ด้านซ้ายหมุนช้ากว่ามอเตอร์ด้านขวา

ชุดควบคุมมอเตอร์ที่สร้างมี 2 ชุด แต่ละชุดรับสัญญาณควบคุมโดยอิสระ สัญญาณควบคุมจะใช้คันเร่งที่มีช่วงแรงดันอยู่ที่ 0.8-6.2 โวลต์ เมื่อมีการเลียต้องทำให้แรงดันที่จ่ายให้ชุดควบคุมไม่เท่ากัน จึงมีแนวคิดติดตั้ง ความต้านทานที่แกนเลียเป็นความต้านทานแบบ Balance ดังภาพที่ 3-37

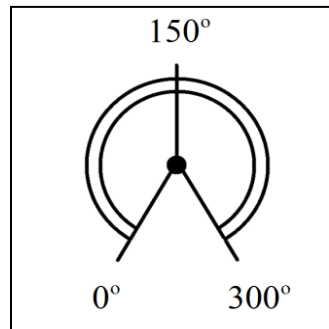


ภาพที่ 3-37 วงจรลดทอนแรงดันเพื่อควบคุมการเลีย



ภาพที่ 3-38 สัญญาณก่อนหมุนคันเร่ง

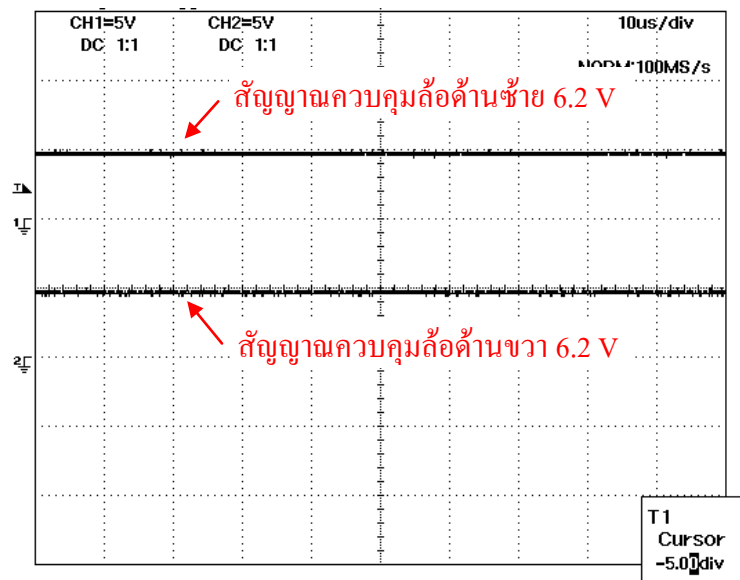
การกำหนดมุมเพื่ออธิบายลักษณะของการเลี้ยว



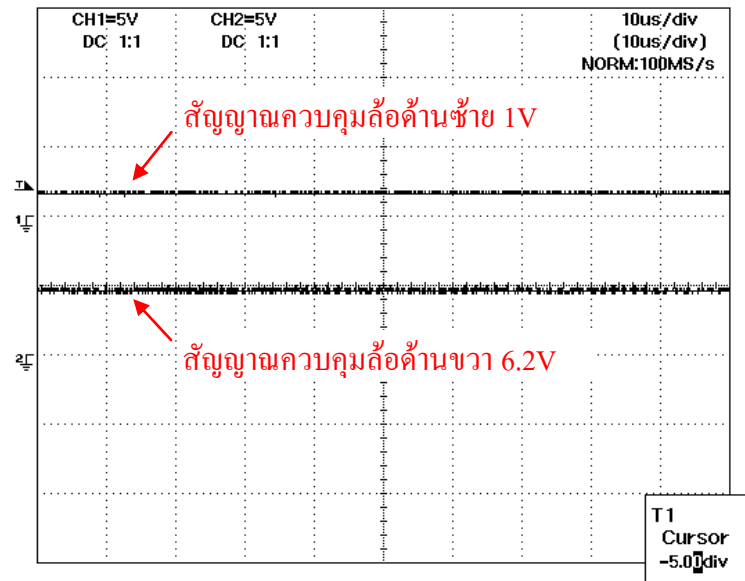
ภาพที่ 3-39 ความต้านทานแบบ Balance ที่มุมต่างกัน

1. มุม  $0^\circ$  คือ เมื่อทำการเลี้ยวซ้าย
2. มุม  $150^\circ$  คือ เมื่อยังไม่ได้ทำการเลี้ยว
3. มุม  $300^\circ$  คือ เมื่อทำการเลี้ยวขวา

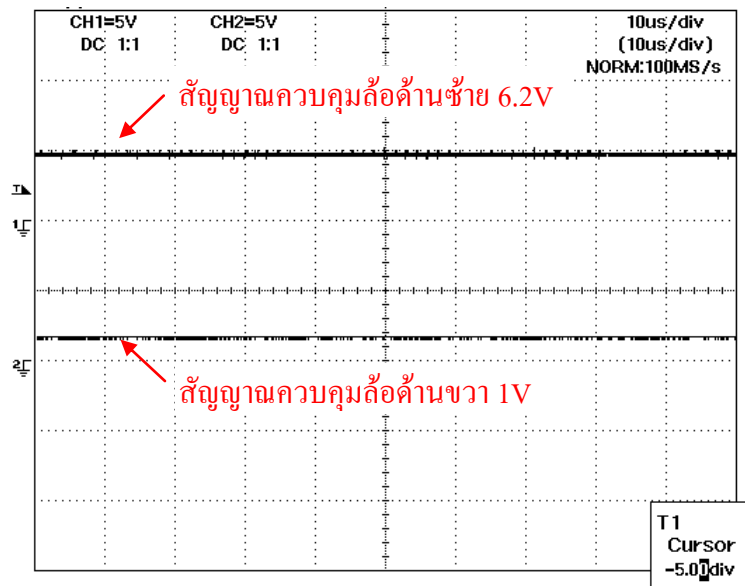
เป็นสัญญาณเปรียบเทียบระหว่างล้อด้านซ้ายและล้อด้านขวา เมื่อทำการเลี้ยวที่มุมต่างกัน แสดงดังภาพที่ 3-40, ภาพที่ 3-41 และ ภาพที่ 3-42



ภาพที่ 3-40 สัญญาณเมื่อหมุนคันเร่งและยังไม่ได้ทำการเลี้ยว ที่มุม  $150^\circ$



ภาพที่ 3-41 สัญญาณเมื่อหมุนคันเร่งและทำการเลี้ยวซ้ายที่มุม  $0^\circ$



ภาพที่ 3-42 สัญญาณเมื่อหมุนคันเร่งและทำการเลี้ยวขวา  $300^\circ$

### 3.5.2 ติดตั้งสวิตช์ห้ามล้อ

การติดตั้งสวิตช์กับชุดห้ามล้อเพื่อให้ชุดควบคุมมอเตอร์หยุดการขับเคลื่อนมอเตอร์ ดังนั้นจึงได้ติดตั้ง โดยใช้ Limit Switch แบบกดติดปลายดัด ประกอบเข้ากับค้ำมือเบรกแล้วใช้สัญญาณต่อไปยังขา 19 ของไอซี MC 33033 ซึ่งเป็นขา Output Enable เมื่อได้รับสัญญาณ MC 33033 จะตัดการทำงานของสัญญาณ PWM (Pulse Width Modulation) เพื่อหยุดการทำงานของมอเตอร์

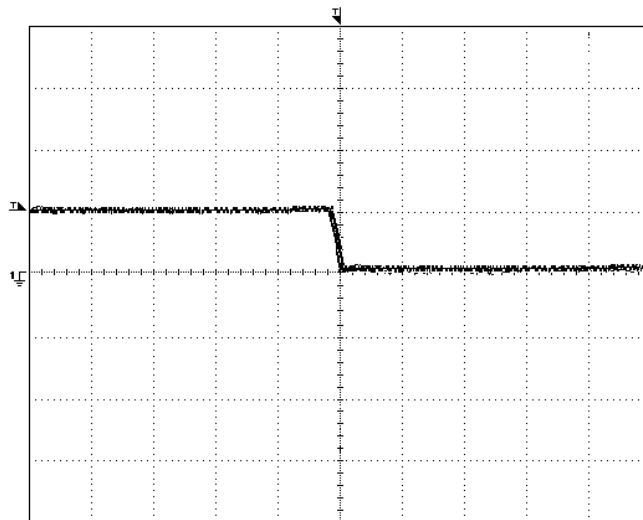
### 3.6 การทดสอบชุดควบคุมการเลี้ยวและระบบห้ามล้อ

3.6.1 ในการทดสอบได้สร้างชุดควบคุมมอเตอร์จำนวน 2 ชุด ทำงานโดยอิสระ นำชุดควบคุมการเลี้ยวต่อเข้ากับวงจรชุดควบคุมมอเตอร์ ทั้ง 2 ชุด ทำการทดสอบ ชุดควบคุมการเลี้ยว โดยเมื่อเลี้ยวไปด้านซ้ายล้อด้านซ้ายต้องหมุนช้ากว่าล้อขวา และเมื่อเลี้ยวไปด้านขวาล้อด้านขวาต้องหมุนช้ากว่าล้อด้านซ้าย ว่าเป็นไปตามที่กล่าวไว้หรือไม่ โดยใช้ Hioki Tacho Hitester 3404 เป็นตัววัดความเร็วรอบของมอเตอร์ ผลจากการทดสอบ ดังตารางที่ 3-1

ตารางที่ 3-1 ความเร็วรอบของมอเตอร์เมื่อเลี้ยว

ทิศทางการเลี้ยว	ความเร็วรอบของมอเตอร์(RPM)	
	มอเตอร์ด้านซ้าย	มอเตอร์ด้านขวา
ยังไม่เลี้ยว ที่มุม 150°	720	720
เลี้ยวซ้ายที่มุม 0°	250	720
เลี้ยวขวาที่มุม 300°	720	250

3.6.2 ในการทดสอบระบบห้ามล้อได้ใช้ Limit Switch แบบกดติดปลายดัด เมื่อบิดคันเร่งมอเตอร์หมุน แต่เมื่อทำการเบรก ชุดควบคุมมอเตอร์หยุดการทำงาน สามารถทำได้โดยใช้ ออสซิลโลสโคป วัดสัญญาณเอาต์พุตที่ขา 19 ของวงจร สร้างสัญญาณควบคุมโดยใช้ไอซี MC33033 เพื่อทดสอบสัญญาณในการทำงานจริงซึ่งจะได้สัญญาณการทำงานของวงจร ดังภาพที่ 3-43



ภาพที่ 3-43 สัญญาณที่ได้จากคำสั่งเบรก

### 3.7 ชุดแสดงผลแบตเตอรี่

เนื่องจากอาจารย์ที่ปรึกษา โครงการ ได้ให้ข้อมูลของระดับแรงดัน แบตเตอรี่ไว้ว่า แบตเตอรี่ขนาดแรงดัน 12 โวลต์ เมื่อใช้งานแรงดันไม่ควรต่ำกว่า 10.8 โวลต์ เนื่องจากแหล่งจ่ายไฟที่เลี้ยงวงจรชุดควบคุมมอเตอร์ต้องการแรงดันที่ 36 โวลต์ จึงใช้แบตเตอรี่ 3 ลูก ขนาด 12 โวลต์/24Ah ต่ออนุกรมกันได้ระดับแรงดันที่ 36 โวลต์ แต่ละลูกไม่ควรต่ำกว่า 10.8 โวลต์ ดังนั้นแรงดันรวมทั้งหมดเท่ากับ  $10.8 \times 3 = 32.4 \text{ V}$  จากข้อมูลดังกล่าวจึงสามารถที่จะกำหนดค่าของหลอดแสดงผล LED ได้ คือ

ที่แรงดันมากกว่า 36.00 โวลต์ หลอดไฟดวงจะติดหมด

ที่แรงดัน 36.00 โวลต์ หลอดไฟดวงที่ 8 จะดับ

ที่แรงดัน 35.55 โวลต์ หลอดไฟดวงที่ 7 จะดับ

ที่แรงดัน 35.10 โวลต์ หลอดไฟดวงที่ 6 จะดับ

ที่แรงดัน 34.65 โวลต์ หลอดไฟดวงที่ 5 จะดับ

ที่แรงดัน 34.20 โวลต์ หลอดไฟดวงที่ 4 จะดับ

ที่แรงดัน 33.75 โวลต์ หลอดไฟดวงที่ 3 จะดับ

ที่แรงดัน 33.30 โวลต์ หลอดไฟดวงที่ 2 จะดับ

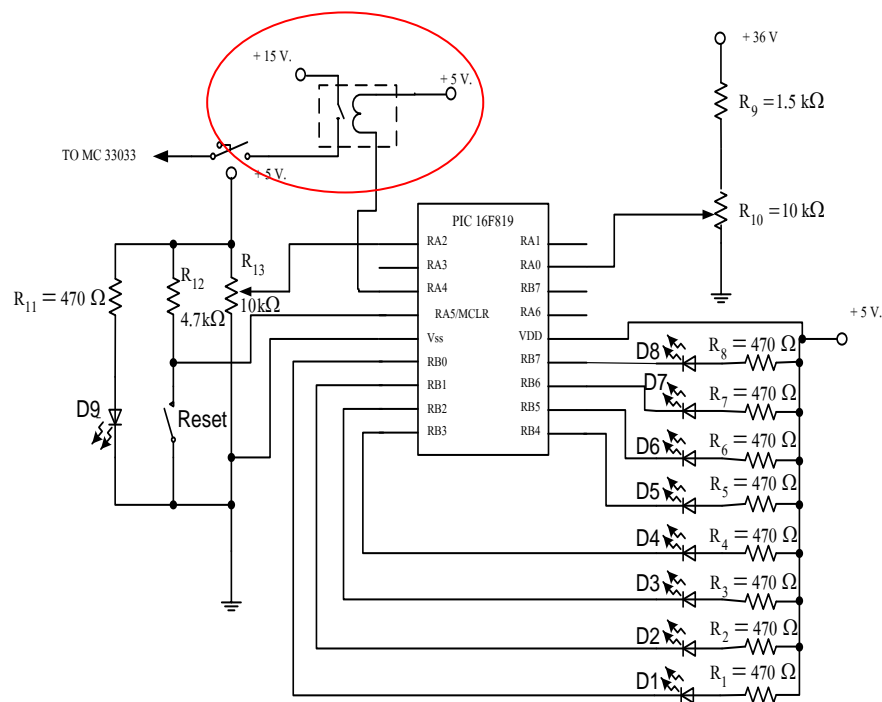
ที่แรงดัน 32.85 โวลต์ หลอดไฟดวงที่ 1 จะกระพริบ (ควรรนำแบตเตอรี่ไปชาร์จ)

ที่แรงดัน 32.40 โวลต์ ตัดสัญญาณไฟที่ไปเลี้ยง MC 33033

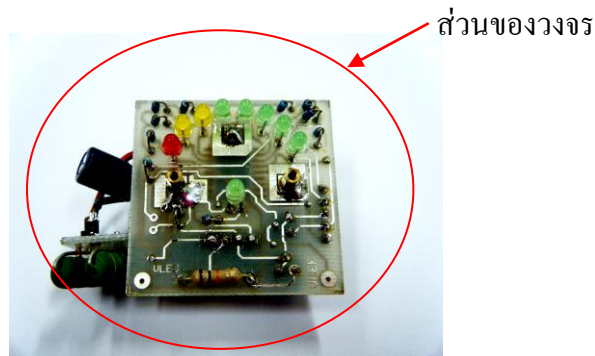
### 3.7.1 วงจรวัดระดับแรงดันไฟฟ้าโดยใช้ PIC 16F819

จาก ปรินูญณานิพนธ์เรื่องรถจักรยานไฟฟ้าขับเคลื่อนด้วย Brushless DC Motor ของ วิษณุ ทองสัมฤทธิ์ และ ทศพล ทั้งรอด ในปีการศึกษา 2552 ไม่มีการตัดแรงดันไฟฟ้าที่ไปจ่ายให้กับ วงจรสร้างสัญญาณควบคุม โดยใช้ไอซี MC33033 ผู้จัดทำจึงได้พัฒนาขึ้นมาใหม่ โดยทำการตัดแรงดันไฟฟ้า เมื่อมีแรงดันต่ำกว่าค่าที่ตั้งไว้

ชุดวัดแบตเตอรี่จะแสดงผลโดยใช้หลอด LED เป็นตัวแสดงผล จำนวน 8 หลอด โดยใช้ ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นตัวควบคุม โดยการรับค่าของแรงดันที่จะมาทำการวัดนั้นจะรับค่าแรงดันที่ลดระดับ มาจากแผงชุดจ่ายไฟ ซึ่งจะทำหน้าที่ลดระดับแรงดันจากแบตเตอรี่ลงมาเหลือประมาณ 5 โวลต์ เพื่อเป็นแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์และหลอด LED จะมีความต้านทานปรับค่าได้ ซึ่งต่อกับ แรงดัน จากแบตเตอรี่เพื่อปรับตั้งค่าให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์รับค่าไปประมวลผลผ่านทางพอร์ต RA0 โดยใช้การแปลงจากแอนะล็อกเป็นดิจิทัลเพื่อแสดงผลออกทาง หลอด LED ในวงจรนี้สามารถที่จะเลือกค่าระดับแรงดัน ค่าที่ต่ำที่สุดในการวัดได้ โดยการปรับตั้งค่าที่ตัวความต้านทานปรับค่าได้ที่ต่อกับพอร์ต RA2 ซึ่งจะใช้เป็นแรงดันอ้างอิง สามารถตั้งได้ตั้งแต่ประมาณ 0-5 โวลต์ และเมื่อมีระดับแรงดันที่ต่ำกว่าค่าที่ตั้งไว้จะมีรีเลย์ ตัดการทำงานที่ไปจ่ายให้กับชุดควบคุมมอเตอร์ สำหรับการออกแบบแสดง ดังภาพที่ 3-44

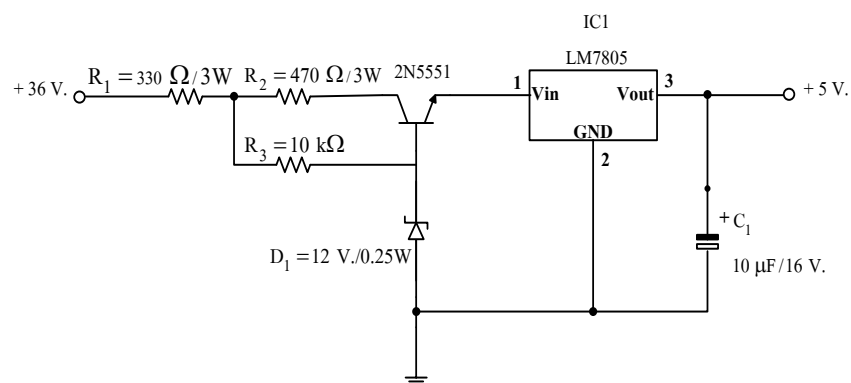


ภาพที่ 3-44 วงจรวัดระดับแรงดันไฟฟ้าโดยใช้ PIC 16F819



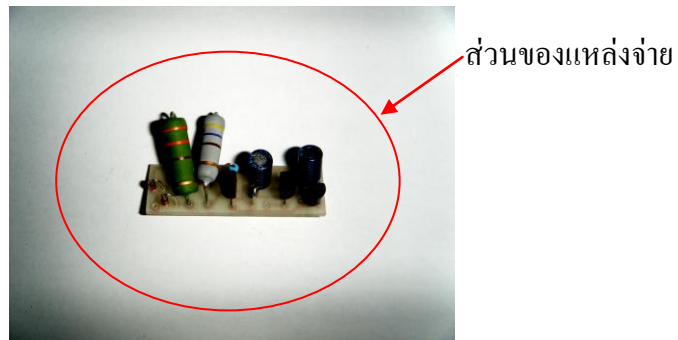
ภาพที่ 3-45 PCB ของชุดวัดระดับแรงดันไฟฟ้า

### 3.7.2 แหล่งจ่ายไฟกระแสตรง (DC Supply) ของชุดวัดระดับแรงดันไฟฟ้า



ภาพที่ 3-46 วงจรแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง (DC Supply) ของชุดวัดระดับแรงดันไฟฟ้า

ในส่วนของแหล่งจ่ายไฟได้ใช้วงจรเดิมของ วิษณุ ทองสัมฤทธิ์ และ ทศพล ทั้งรอด ในปีการศึกษา 2552 มาใช้งาน จากภาพที่ 3-46 เป็นวงจรแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง (DC Supply) ของชุดวัดระดับแรงดันไฟฟ้า ใช้ไอซีสำเร็จรูปเบอร์ LM 7805 ซึ่งเป็นวงจรรักษาระดับแรงดัน 5 โวลต์ โดยมีวงจรแบ่งแรงดันเพื่อไม่ให้ LM 7805 รับแรงดันสูงกว่าตัวมันเองมากเกินไป โดยมีซีเนอร์ไดโอดไว้สำหรับไบอัสของทรานซิสเตอร์ ให้มีแรงดันที่ 12 โวลต์ เพื่อไม่ให้ทรานซิสเตอร์เกิดความร้อนสูง และส่งต่อไปยังวงจรรักษาระดับแรงดัน



ภาพที่ 3-47 PCB ของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

### 3.8 ทดสอบการทำงานของชุดแสดงผลของแบตเตอรี่

จากการทดสอบได้นำชุดแสดงผลของแบตเตอรี่ มาต่อยัง แหล่งจ่ายภายนอกเพื่อต้องการดูผลการทดสอบ ซึ่งผลที่ได้จากการทดสอบคือ เมื่อจ่ายแรงดันให้กับชุดแสดงผล LED ทั้ง 8 หลอดติด แต่เมื่อลดแรงดันเหลือ 32.8 โวลต์ หลอด LED ดวงสุดท้ายจะกระพริบ แสดงดังภาพที่ 3-48 และลดแรงดันลงอีกเหลือ 32.4 โวลต์ รีเลย์ทำงานเปลี่ยนสถานะจาก NC เป็น NO



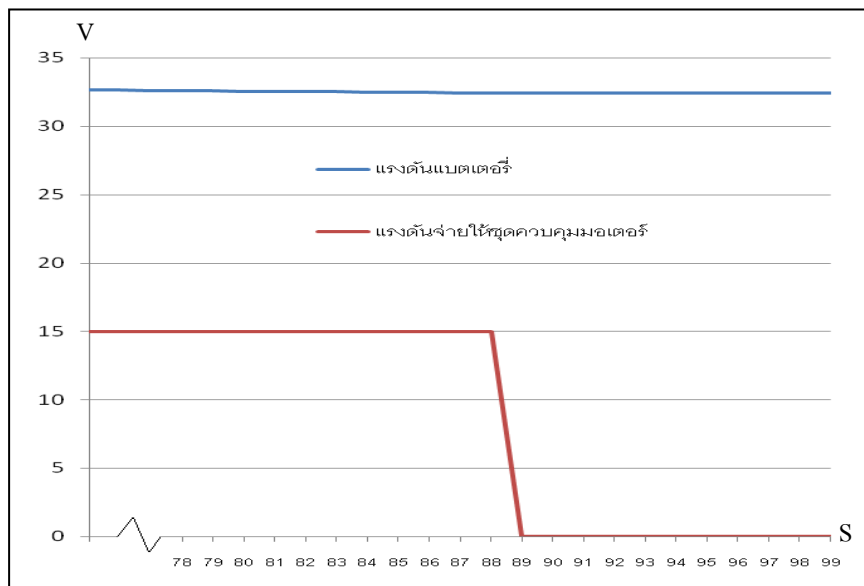
ก.แบตเตอรี่เต็ม

ข. หลอดสุดท้ายจะกระพริบ

ภาพที่ 3-48 การทดสอบระดับแรงดัน

เมื่อมีแรงดันต่ำกว่าค่าที่ตั้งไว้ ชุดควบคุมมอเตอร์หยุดการทำงาน สามารถทำได้โดยการใช้ Handy Oscillographic Recorders OR300E วัดสัญญาณเอาต์พุตแสดงดังภาพที่ 3-49



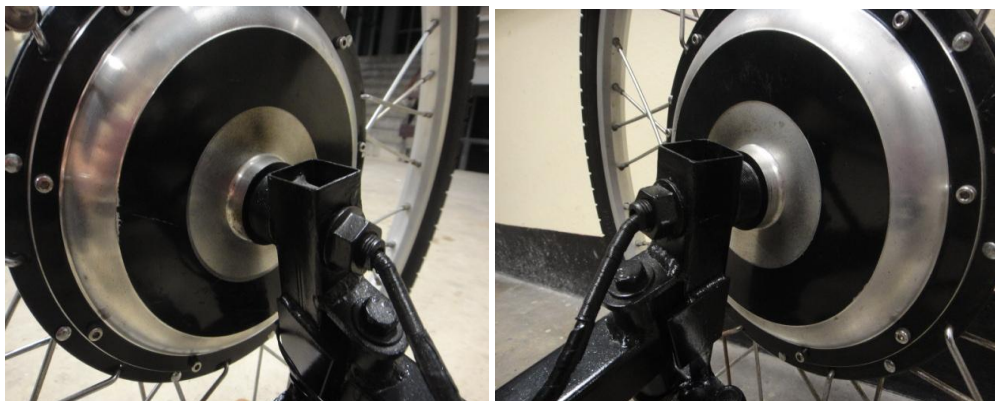


ภาพที่ 3-49 กราฟแสดงแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายหุคควบคุมมอเตอร์

### 3.9 ประกอบเข้าโครงรถ

จากการสร้างโครงรถจักรยานไฟฟ้า มีการประกอบดังนี้

3.9.1 ติดตั้งล้อหน้าด้วยมอเตอร์จำนวน 2 ตัว ซึ่งใช้ล้อขนาด 24 นิ้ว ดังภาพที่ 3-50



ก.ติดตั้งล้อซ้าย

ข.ติดตั้งล้อขวา

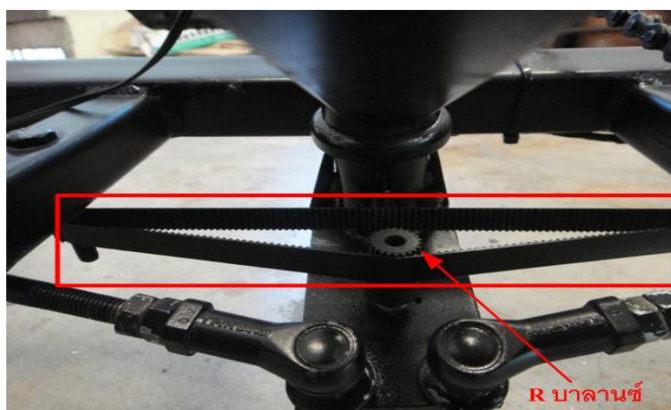
ภาพที่ 3-50 ติดตั้งล้อด้านซ้ายและล้อด้านขวา

### 3.9.2 ติดตั้งกล่องชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ดังภาพที่ 3-51



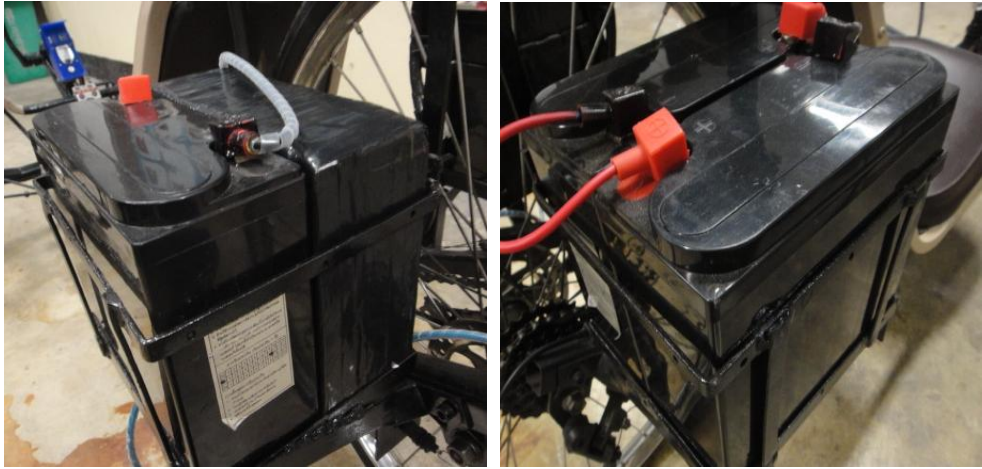
ภาพที่ 3-51 ติดตั้งกล่องควบคุม

### 3.9.3 ติดตั้งอุปกรณ์ลดทอนแรงดันเพื่อควบคุมการเลี้ยว โดยใช้ R บาลานซ์ ดังภาพที่ 3-52



ภาพที่ 3-52 ติดตั้งอุปกรณ์ลดทอนแรงดัน

3.9.4 ติดตั้งแบตเตอรี่ ใช้แบตเตอรี่จำนวน 3 ลูก ลูกละ 12 โวลต์/24Ah ต่ออนุกรม แรงดันรวมที่ได้ 36 โวลต์ แสดงดังภาพที่ 3-53



ก.แบตเตอรี่ด้านซ้าย

ข.แบตเตอรี่ด้านขวา

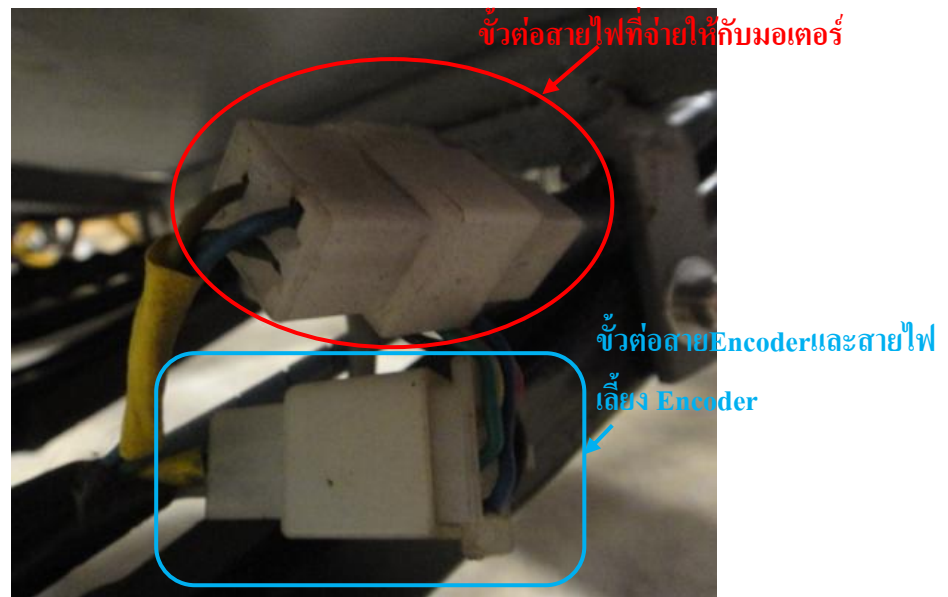
ภาพที่ 3-53 ติดตั้งแบตเตอรี่

### 3.9.5 ติดตั้งชุดวัดแรงดันไฟฟ้า



ภาพที่ 3-54 ติดตั้งชุดวัดระดับแรงดันไฟฟ้า

### 3.9.6 ต่อสายมอเตอร์เข้ากับชุดควบคุมมอเตอร์



ภาพที่ 3-55 ต่อสายมอเตอร์เข้ากับชุดควบคุม

3.9.7 เมื่อนำส่วนประกอบต่างๆ ติดตั้งเข้ากับโครงรถจะได้ รถจักรยานไฟฟ้าที่เสร็จสมบูรณ์ ดังภาพที่ 3-56



ภาพที่ 3-56 รถจักรยานไฟฟ้าที่เสร็จสมบูรณ์

### 3.10 ทดสอบการทำงานของรถจักรยานไฟฟ้า

การทดสอบการทำงานของรถจักรยานไฟฟ้า ด้วยการนำไปขับเคลื่อน ในมหาวิทยาลัยพระ - จอมเกล้าพระนครเหนือและสวนรถไฟ เพื่อตรวจสอบการทำงานของระบบ ซึ่ง ผลที่ได้ ทำการ บันทึกข้อมูลในบทที่ 4

### 3.11 การจัดพิมพ์ปฏิญานิพนธ์

การจัดทำคู่มือประกอบการใช้งานนี้ ซึ่งภายในคู่มือนี้ประกอบ ไปด้วยเนื้อหาที่เกี่ยวข้องกับ ส่วนประกอบของชุดควบคุม การใช้งานรถจักรยานไฟฟ้า โดยในส่วนการจัดทำปฏิญานิพนธ์ใน บทที่ 1 และบทที่ 2 ได้กระทำก่อนที่จะเริ่มสร้าง โครงงาน ส่วนการจัดพิมพ์ปฏิญานิพนธ์ใน บทที่ 3 จะจัดทำไปพร้อมกับการสร้าง โครงงานโดยมีขั้นตอนการสร้าง ส่วน การจัดทำปฏิญานิพนธ์ใน บทที่ 4 ได้กระทำหลังจากที่ได้ทำโครงงานเสร็จเรียบร้อยแล้ว ซึ่งจะอธิบายถึงผลของการจัดทำ โครงงานว่ามีผลการทำงานเป็นอย่างไรและจะมีการทดสอบโครงงานว่าทำงานไปตามขอบเขตที่ กำหนดไว้หรือไม่ ส่วนการจัดพิมพ์ปฏิญานิพนธ์ในบทที่ 5 ซึ่งจะเป็นส่วนสุดท้าย ที่ได้จัดทำ เป็นการสรุปผลของโครงงาน และ ปัญหาที่เกิดขึ้นในขณะที่ดำเนินงาน พร้อมข้อเสนอแนะในการ พัฒนาโครงงาน

## บทที่ 4

### ผลการดำเนินงาน

จากการดำเนินงานในส่วนต่าง ๆ ตามขั้นตอนและวิธีการ ในบทที่ 3 เมื่อนำส่วนต่าง ๆ มาประกอบและปรับแต่งในทุก ๆ ส่วน ทำให้ได้รถจักรยานไฟฟ้า และ ทดสอบการทำงานของรถจักรยานไฟฟ้า เพื่อทราบถึงคุณลักษณะการใช้งานของรถจักรยานไฟฟ้าดังต่อไปนี้

#### 4.1 ลักษณะของรถจักรยานไฟฟ้า

ลักษณะของรถจักรยานไฟฟ้าแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้

##### 4.1.1 คุณสมบัติของรถจักรยาน

4.1.1.1 มีบันไดสำหรับผู้ขับขี่สามารถปั่นเองได้

4.1.1.2 น้ำหนักโดยรวมของรถจักรยานไฟฟ้าทั้งหมดประมาณ 80 กิโลกรัม

##### 4.1.2 คุณสมบัติของชุดขับเคลื่อน

4.1.2.1 มีชุดวัดความเร็วแบบ Digital

4.1.2.2 ในการเลี้ยวทางกล มอเตอร์ทั้ง 2 ตัว จะมีความเร็วรอบไม่เท่ากัน

4.1.2.3 มีแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ขนาด 12 โวลต์/24 Ah จำนวน 3 ลูก

4.1.2.4 สามารถทำความเร็วสูงสุด 32 กิโลเมตร/ชั่วโมง ที่น้ำหนักบรรทุก 80 กิโลกรัม

4.1.2.5 เมื่อเบรก มีระบบตัดการทำงานของมอเตอร์

4.1.2.6 มีชุดเซ็นเซอร์ตรวจจับความเร็วมอเตอร์ จำนวน 2 ชุด

4.1.2.7 ในการขับเคลื่อน 2 ล้อหน้า ด้วยมอเตอร์ 2 ตัว อิสระต่อกัน

4.1.2.8 เมื่อมีแรงเคลื่อนต่ำกว่า 32.4 โวลต์ การขับเคลื่อนทางไฟฟ้าจะไม่ทำงาน

4.1.2.9 มีชุดวัดแรงเคลื่อนแสดงผลด้วย LED 8 ระดับ เมื่อแรงเคลื่อนต่ำกว่า 32.8 โวลต์

LED ดวงสุดท้ายจะกระพริบเตือน

##### 4.1.3 คุณสมบัติที่ทดสอบได้

4.1.3.1 จากการปั่นสามารถทำความเร็วได้ 21 กิโลเมตร/ชั่วโมง ที่น้ำหนักบรรทุก 80 กิโลกรัม มีอัตราเร่งจากศูนย์ถึงความเร็วสูงสุดที่ 30 วินาที

4.1.3.2 จากการออกตัวด้วยปั่นพร้อมบิดคันเร่งสามารถทำความเร็วได้ 32 กิโลเมตร/ชั่วโมง ที่น้ำหนักบรรทุก 80 กิโลกรัม มีอัตราเร่งจากศูนย์ถึงความเร็วสูงสุดที่ 9 วินาที



4.1.3.3 จากการออกตัวด้วยการบิดคันเร่ง สามารถทำความเร็วได้ 32 กิโลเมตร/ชั่วโมง ที่น้ำหนักบรรทุก 80 กิโลกรัม มีอัตราเร่งจากศูนย์ถึงความเร็วสูงสุดที่ 10 วินาที

4.1.3.4 จากการทดสอบด้วยความเร็วคงที่ 10 กิโลเมตร/ชั่วโมง รถจักรยานไฟฟ้ากินกระแสขณะวิ่ง 4 แอมแปร์

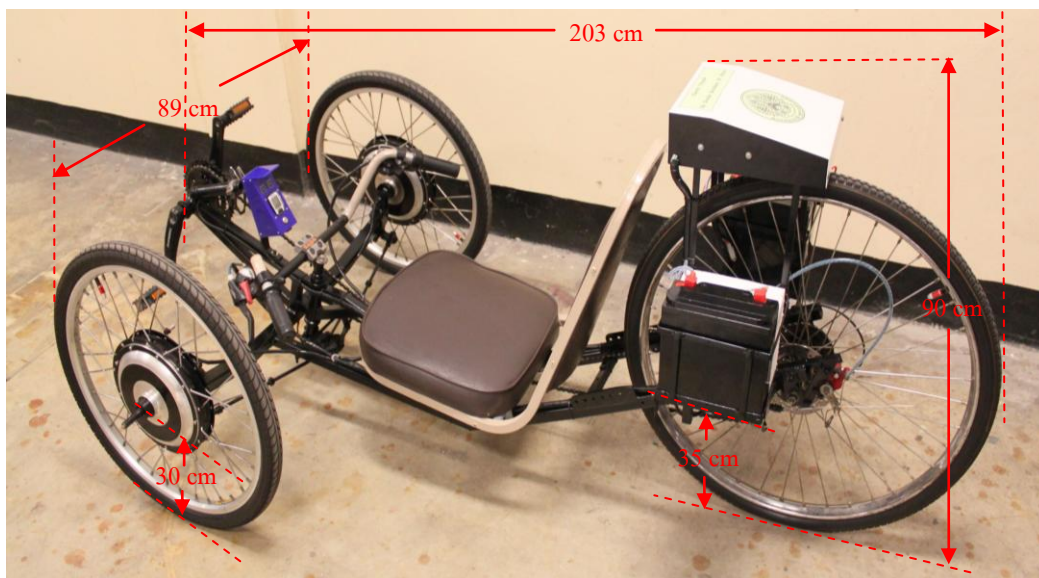
4.1.3.5 จากการทดสอบด้วยความเร็ว คงที่ 20 กิโลเมตร/ชั่วโมง รถจักรยานไฟฟ้ากินกระแสขณะวิ่ง 7 แอมแปร์

4.1.3.6 จากการทดสอบด้วยการไต่ระดับที่ความชัน 20 องศา สามารถทำความเร็วได้ 5 กิโลเมตร/ชั่วโมง ที่น้ำหนักบรรทุก 80 กิโลกรัม มีอัตราเร่งจากศูนย์ถึงความเร็วสูงสุดที่ 7.3 วินาที

4.1.3.7 จากการทดสอบด้วยการไต่ระดับที่ความชัน 27 องศา สามารถทำความเร็วได้ 5 กิโลเมตร/ชั่วโมง ที่น้ำหนักบรรทุก 80 กิโลกรัม มีอัตราเร่งจากศูนย์ถึงความเร็วสูงสุดที่ 8.5 วินาที

4.1.3.8 จากการทดสอบด้วยการไต่ระดับที่ความชัน 32 องศา สามารถทำความเร็วได้ 5 กิโลเมตร/ชั่วโมง ที่น้ำหนักบรรทุก 80 กิโลกรัม มีอัตราเร่งจากศูนย์ถึงความเร็วสูงสุดที่ 9.8 วินาที

4.1.3.9 จากการทดสอบ สามารถขับขี่ได้ระยะทาง 22 กิโลเมตร /การประจุแบตเตอรี่ 1 ครั้ง ที่น้ำหนักบรรทุก 80 กิโลกรัม



ภาพที่ 4-1 ขนาดต่าง ๆ ของรถจักรยานไฟฟ้า

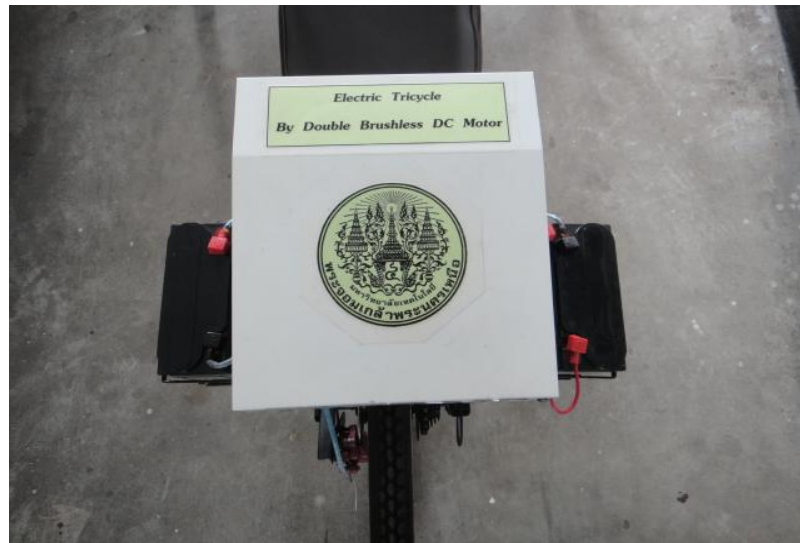


ภาพที่ 4-2 ด้านหน้าของรถจักรยานไฟฟ้า



ภาพที่ 4-3 ด้านข้างของรถจักรยานไฟฟ้า





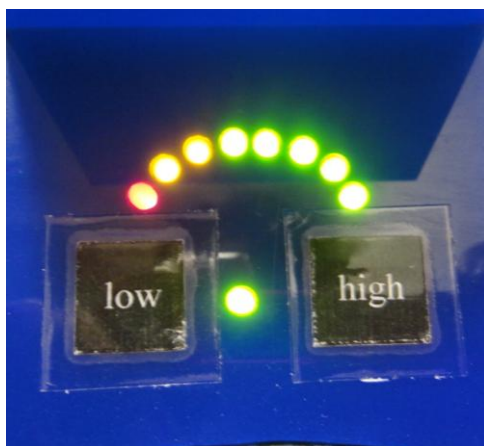
ภาพที่ 4-4 ด้านบนของแบตเตอรี่ของรถจักรยานไฟฟ้า



ภาพที่ 4-5 ด้านบนของรถจักรยานไฟฟ้า

#### 4.2 ลักษณะสมบัติของชุดตัวระดับแรงดันไฟฟ้า

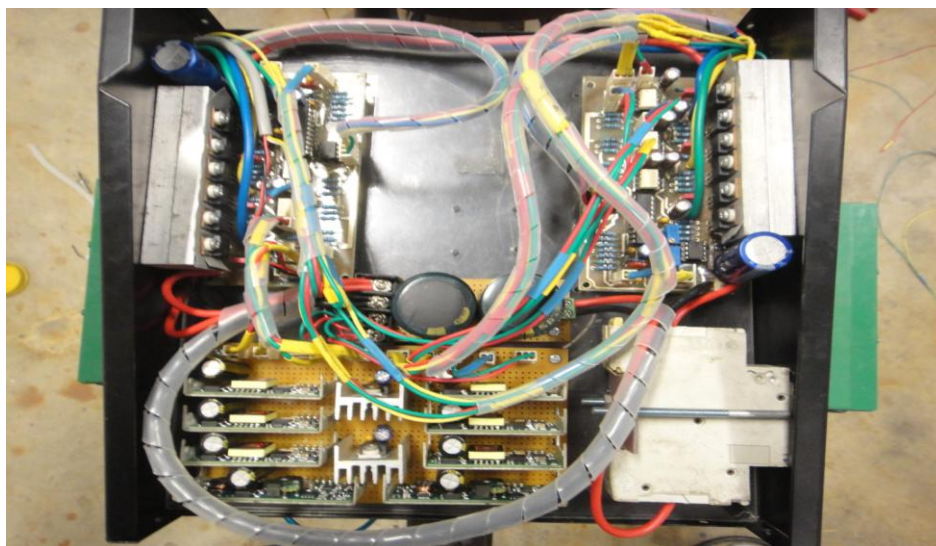
- 4.2.1 ใช้แหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ขนาด 12 โวลต์ / 24 Ah จำนวน 3 ลูก
- 4.2.2 การแสดงผลระดับแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่แสดงผลเป็น LED 8 ระดับ
- 4.2.3 การกระพริบเตือนเมื่อแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ต่ำกว่าค่าที่ตั้งไว้
- 4.2.4 เมื่อแรงดันต่ำกว่าค่าที่กำหนดจะตัดสัญญาณไฟฟ้าที่ไปเลี้ยงวงจร



ภาพที่ 4-6 ชุดวัดระดับแรงเคลื่อนไฟฟ้า

#### 4.3 ลักษณะสมบัติของชุดควบคุมมอเตอร์

- 4.3.1 ใช้แหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ขนาด 12 โวลต์ / 24 Ah จำนวน 3 ลูก
- 4.3.2 มีกำลังเอาต์พุตชุดละ 250 วัตต์ จำนวน 2 ชุด
- 4.3.3 ขับเคลื่อนด้วยความเร็วสูงสุด 32 กิโลเมตร/ชั่วโมง
- 4.3.4 ในการเดินมีการปรับระดับความกว้างของสัญญาณ (PWM) ที่ไปขับภาคกำลัง
- 4.3.5 เมื่อทำการเบรกมีเซ็นเซอร์ตัวจับ เพื่อตัดสัญญาณ (PWM) ที่ไปขับภาคกำลัง



ภาพที่ 4-7 ส่วนบนของชุดควบคุมมอเตอร์

#### 4.4 การทดสอบความเร็วของรถจักรยานไฟฟ้า

4.4.1 การทดสอบความเร็วเทียบกับเวลาด้วยการปั่น

4.4.2 การทดสอบความเร็วเทียบกับเวลา โดยการออกตัวด้วยการช่วยปั่นพร้อมกับบิดคันเร่งให้มอเตอร์ทำงาน

4.4.3 การทดสอบความเร็วเทียบกับเวลาโดยการออกตัวด้วยการบิดคันเร่งสูงสุด

4.4.4 การทดสอบด้วยความเร็วคงที่ 10 กิโลเมตร/ชั่วโมง

4.4.5 การทดสอบด้วยความเร็วคงที่ 20 กิโลเมตร/ชั่วโมง

4.4.6 การทดสอบด้วยความเร็วการไต่ระดับที่ความชัน 20 องศา

4.4.7 การทดสอบด้วยความเร็วการไต่ระดับที่ความชัน 27 องศา

4.4.8 การทดสอบด้วยความเร็วการไต่ระดับที่ความชัน 32 องศา

4.4.9 ระยะทางของรถจักรยานไฟฟ้าวิ่งได้ต่อการประจุแบตเตอรี่ 1 ครั้ง

**เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบโครงการนี้มีดังนี้**

1. Handy Oscillographic Recorders OR300E
2. แอมป์มิเตอร์
3. ลูกกอล์ฟวัดระยะทาง
4. ซอส์ก

#### **วิธีการทดสอบรถจักรยานไฟฟ้า**

เป็นการทดสอบความเร็วเฉลี่ยของรถจักรยานไฟฟ้าเทียบกับเวลา ด้วยการออกตัวรถโดยการปั่นพร้อมกับบิดคันเร่งสูงสุด และการออกตัวรถโดยการบิดคันเร่งสูงสุด การทดสอบด้วยทางเรียบ โดยการใช้ความเร็วคงที่ 10 และ 20 กิโลเมตร/ชั่วโมง และการทดสอบด้วยการไต่ระดับความชันที่ 20, 27 และ 32 องศา ซึ่งทดสอบที่น้ำหนักผู้ขับขี่ 80 กิโลกรัม โดยจะใช้ Handy Oscillographic Recorders OR300E เป็นเครื่องมือสำหรับบันทึกข้อมูลที่ได้ทำการทดสอบค่าต่างๆ



ภาพที่ 4-8 การทดสอบรถจักรยานไฟฟ้าทางเรียบ

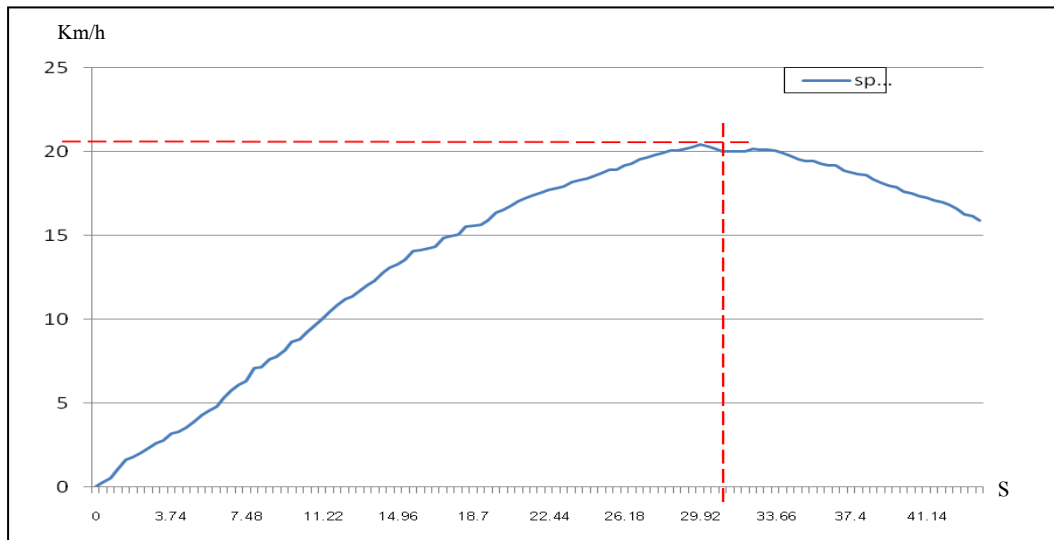


ภาพที่ 4-9 การทดสอบรถจักรยานไฟฟ้าทางลาดชัน

#### 4.4.1 การทดสอบความเร็วเทียบกับเวลาด้วยการปั่น

เป็นการวัดความเร็วเฉลี่ยของรถจักรยานไฟฟ้า ซึ่งทดสอบที่โหลดน้ำหนัก 80 กิโลกรัม การทดสอบจะใช้ Handy Oscillographic Recorders OR300E เป็นตัวบันทึกข้อมูล แล้วปั่นรถจักรยานไฟฟ้าเพื่อหาความเร็วสูงสุดของรถจักรยานไฟฟ้า

4.4.1.1 การทดสอบความเร็วเทียบกับเวลาด้วยการ ปั่นที่น้ำหนักผู้ทดสอบ 80 กิโลกรัม แสดงดังภาพที่ 4-10



ภาพที่ 4-10 กราฟความเร็วของรถจักรยานไฟฟ้าเทียบกับเวลาที่ทดสอบโดยการปั่น ที่น้ำหนัก 80 กิโลกรัม

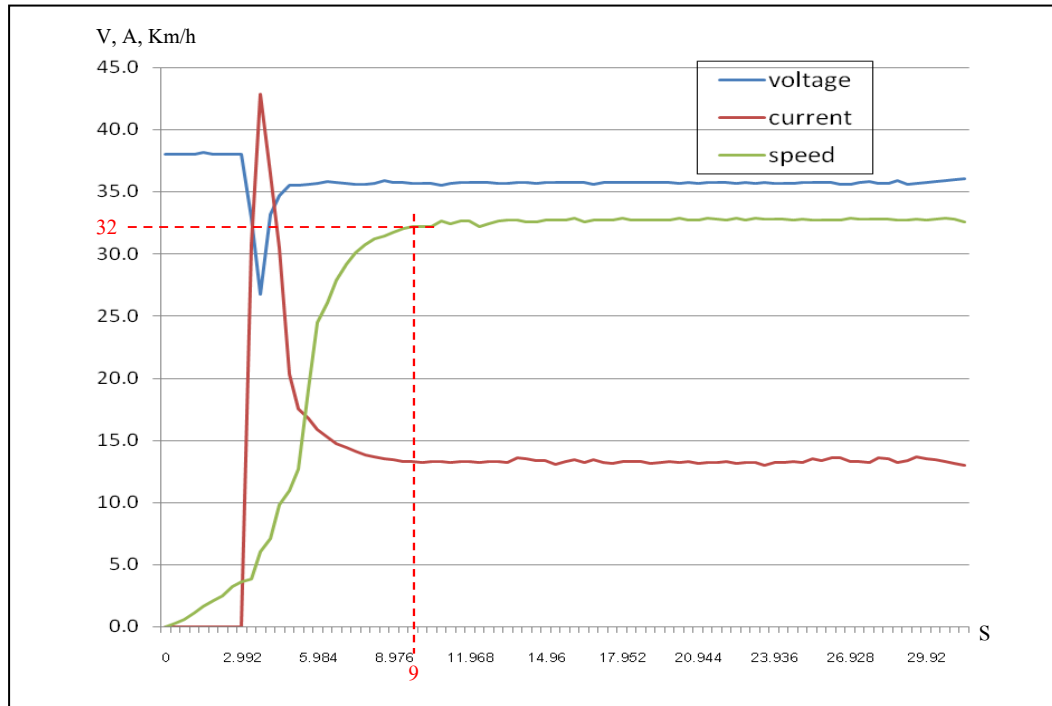
จากกราฟแสดงการทดสอบด้วยการปั่นรถจักรยานไฟฟ้า สรุปผลการทดลองได้ว่า ที่น้ำหนักผู้ขับขี่ 80 กิโลกรัม การออกตัว ด้วยการปั่นรถจักรยานไฟฟ้า โดยไม่บิดคันเร่ง จะสามารถทำความเร็วสูงสุดได้ที่ 21 กิโลเมตร/ชั่วโมง จะมีอัตราเร่งจากศูนย์ถึงความเร็วสูงสุดอยู่ที่ 30 วินาที

4.4.2 การทดสอบความเร็วเทียบกับเวลา โดยการออกตัวด้วยการช่วย ปั่นพร้อมกับบิดคันเร่งให้มอเตอร์ทำงาน

เป็นการวัดความเร็วเฉลี่ยของรถจักรยานไฟฟ้า ซึ่งทดสอบที่โหลดน้ำหนัก 80 กิโลกรัม การทดสอบจะใช้ Handy Oscillographic Recorders OR300E เป็นตัวบันทึกข้อมูล การทดสอบจะทำการช่วยปั่นในการออกตัว จากจุดเริ่มต้น พร้อมทั้งบิดคันเร่ง แล้วหยุดปั่น และบิดคันเร่งอย่างเดียว เพื่อให้ได้ความเร็วสูงสุดของรถ



#### 4.4.2.1 การทดสอบความเร็วเทียบกับเวลาโดยการออกตัวด้วยการช่วยปั่น พร้อมกับบิดคันเร่งให้มอเตอร์ทำงานที่น้ำหนักผู้ทดสอบ 80 กิโลกรัม ดังภาพที่ 4-11



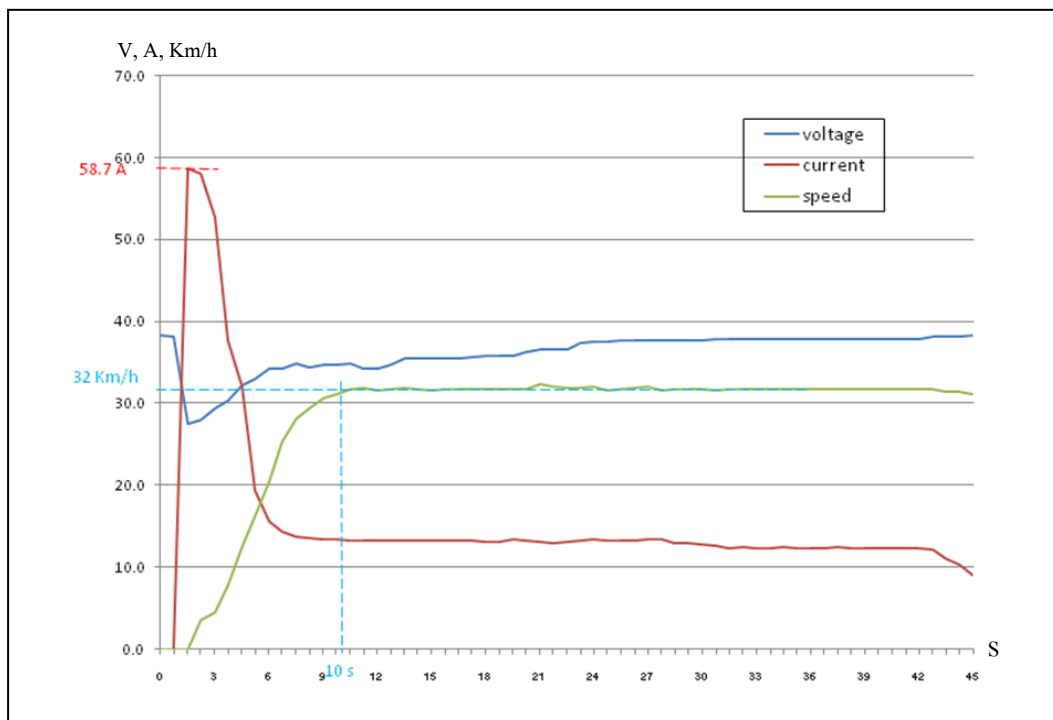
ภาพที่ 4-11 กราฟความเร็วของรถจักรยานไฟฟ้าเทียบกับเวลาที่ทดสอบโดยการออกตัวด้วยการช่วยปั่นจากจุดเริ่มต้นแล้วบิดคันเร่งสูงสุดที่น้ำหนัก 80 กิโลกรัม

จากกราฟแสดงการทดสอบ ทำการช่วยปั่นในการออกตัวจากจุดเริ่มต้นพร้อมทั้งบิดคันเร่งแล้วหยุดปั่นและบิดคันเร่งอย่างเดียวเพื่อให้ได้ความเร็วที่สูงสุด สรุปผลการทดลองได้ว่า ที่น้ำหนักผู้ขับขี่ 80 กิโลกรัม การช่วยปั่นรถจักรยานไฟฟ้าตอนออกตัวแล้วบิดคันเร่งสูงสุด รถจักรยานไฟฟ้าสามารถทำความเร็วสูงสุดได้ที่ 32 กิโลเมตร/ชั่วโมง โดยจะมีอัตราเร่งจากศูนย์ถึงความเร็วสูงสุดอยู่ที่ 9 วินาที และรถจักรยานไฟฟ้าจะกินกระแสขณะวิ่งเฉลี่ย 13 แอมแปร์

#### 4.4.3 การทดสอบความเร็วเทียบกับเวลาโดยการออกตัวด้วยการบิดคันเร่งสูงสุด

เป็นการวัดความเร็วเฉลี่ยและวัดอัตราเร่งของรถจักรยานไฟฟ้า ซึ่งทดสอบที่น้ำหนัก 80 กิโลกรัม การทดสอบจะใช้ Handy Oscillographic Recorders OR300E เป็นตัวบันทึกข้อมูล การทดสอบจะทำการบิดคันเร่งด้วยอัตราเร่งสูงสุดของรถเพื่อให้ได้ความเร็วสูงสุดของรถจักรยานไฟฟ้า

#### 4.4.3.1 การทดสอบความเร็วเทียบกับเวลาโดยการออกตัวด้วยการบิดคันเร่งสูงสุดให้ มอเตอร์ทำงานที่น้ำหนักผู้ทดสอบ 80 กิโลกรัม แสดงดังภาพที่ 4-12



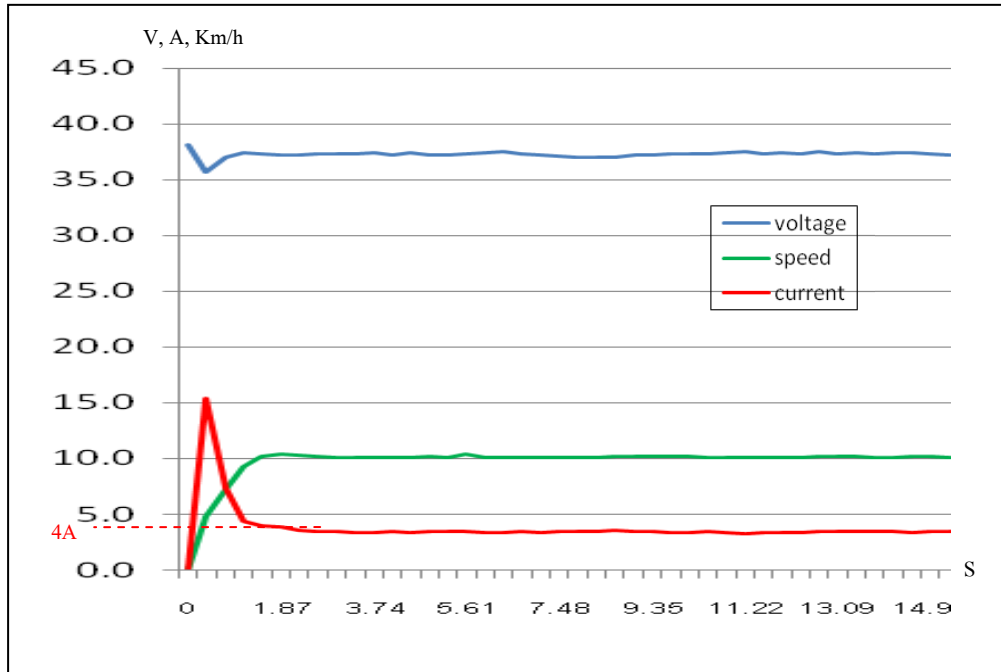
ภาพที่ 4-12 กราฟความเร็วของรถจักรยานไฟฟ้าที่ได้จากการทดลองโดยการออกตัวด้วยการบิดคันเร่งสูงสุดที่น้ำหนักผู้ทดสอบ 80 กิโลกรัม

จากกราฟแสดงการทดสอบ ทำการบิดคันเร่งสูงสุดในการออกตัวจากจุดเริ่มต้นเพื่อให้ได้ความเร็ว ที่สูงสุด สรุปผลการทดลองได้ว่า าน้ำหนัก ผู้ขับขี่ 80 กิโลกรัม การออกตัวบิดคันเร่งรถจักรยานไฟฟ้า สามารถทำความเร็วสูงสุดได้ที่ 32 กิโลเมตร/ชั่วโมง จะมีอัตราเร่งจากศูนย์ถึงความเร็วสูงสุดอยู่ที่ 10 วินาที และรถจักรยานไฟฟ้าจะกินกระแสขณะวิ่งเฉลี่ย 13 แอมแปร์

#### 4.4.4 การทดสอบด้วยความเร็วคงที่ 10 กิโลเมตร/ชั่วโมง

เป็นการวัดความเร็วเฉลี่ยของรถจักรยานไฟฟ้า ซึ่งทดสอบที่โหลดน้ำหนัก 80 กิโลกรัม โดยการทดสอบจะใช้ Handy Oscillographic Recorders OR300E เป็นตัวบันทึกข้อมูล การทดสอบจะทำการจำกัดความเร็วไว้ที่ 10 กิโลเมตร/ชั่วโมง และบิดคันเร่งอย่างเดียวเพื่อให้ได้ค่าของกระแสขณะวิ่งของรถจักรยานไฟฟ้า

4.4.4.1 การทดสอบความเร็วคงที่ 10 กิโลเมตร/ชั่วโมง ที่น้ำหนักผู้ทดสอบ 80 กิโลกรัม  
แสดงดังภาพที่ 4-13



ภาพที่ 4-13 กราฟความเร็วของรถจักรยานไฟฟ้าที่ได้จากการทดลองโดยใช้ความเร็วคงที่ 10 กิโลเมตร/ชั่วโมง ที่น้ำหนักผู้ทดสอบ 80 กิโลกรัม

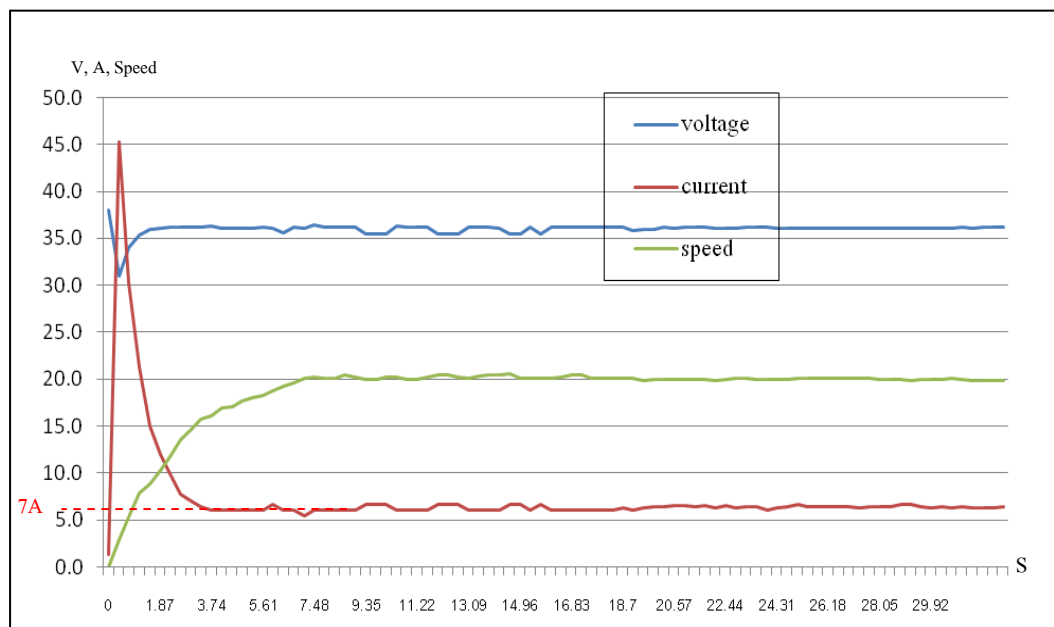
จากกราฟแสดงการทดสอบ ทำการบิดคันเร่งในกา รอกตัวจากจุดเริ่มต้นเพื่อให้ ความเร็วคงที่ ที่ 10 กิโลเมตร/ชั่วโมง สรุปผลการทดลองได้ว่า ที่น้ำหนักผู้ขับขี่ 80 กิโลกรัม การออกตัวบิดคันเร่งให้ความเร็วคงที่ที่ 10 กิโลเมตร/ชั่วโมง รถจักรยานไฟฟ้าจะกินกระแสไฟฟ้า ขณะวิ่ง 4 แอมแปร์

4.4.5 การทดสอบด้วยความเร็วคงที่ 20 กิโลเมตร/ชั่วโมง

เป็นการวัดความเร็วเฉลี่ยของรถจักรยานไฟฟ้า ซึ่งทดสอบที่โหลคน้ำหนัก 80 กิโลกรัม โดยการทดสอบจะใช้ Handy Oscillographic Recorders OR300E เป็นตัวบันทึกข้อมูล การทดสอบจะทำการจำกัดความเร็วไว้ที่ 20 กิโลเมตร/ชั่วโมง และบิดคันเร่งอย่างเดียวเพื่อให้ได้ค่าของกระแสขณะวิ่งของรถจักรยานไฟฟ้า



#### 4.4.5.1 การทดสอบความเร็วคงที่ 20 กิโลเมตร/ชั่วโมง ที่น้ำหนักผู้ทดสอบ 80 กิโลกรัม แสดงดังภาพที่ 4-14

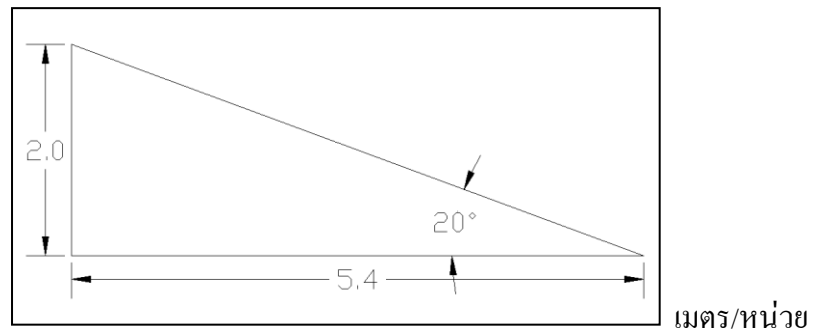


ภาพที่ 4-14 กราฟความเร็วของรถจักรยานไฟฟ้าที่ได้จากการทดลองที่ความเร็วคงที่ 20 กิโลเมตร/ชั่วโมง ที่น้ำหนักผู้ทดสอบ 80 กิโลกรัม

จากกราฟแสดงการทดสอบ ทำการบิดคันเร่งในกา รอกตัวจากจุดเริ่มต้นเพื่อให้ ความเร็วคงที่ ที่ 20 กิโลเมตร/ชั่วโมง สรุปผลการทดลองได้ว่า ที่น้ำหนักผู้ขับขี่ 80 กิโลกรัม การออกตัวบิดคันเร่งให้ความเร็วคงที่ 20 กิโลเมตร /ชั่วโมง รถจักรยานไฟฟ้าจะกินกระแสไฟฟ้า ขณะวิ่ง 7 แอมแปร์

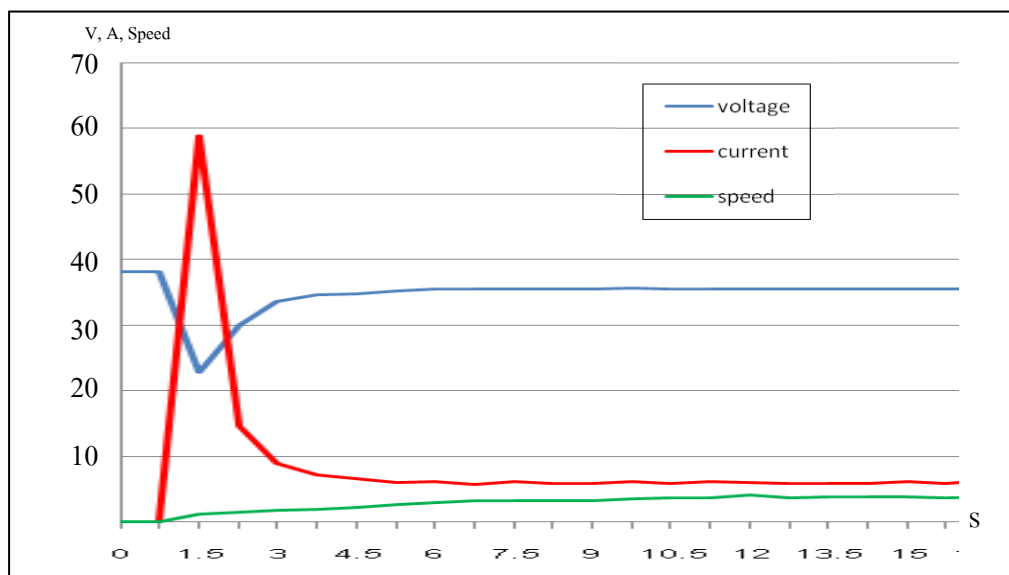
#### 4.4.6 การทดสอบด้วยความเร็วการไต่ระดับที่ความชัน 20 องศา

เป็นการวัดความเร็วเฉลี่ยของรถจักรยานไฟฟ้า ซึ่งทดสอบที่โหลดน้ำหนัก 80 กิโลกรัม โดย การทดสอบจะใช้ Handy Oscillographic Recorders OR300E เป็นตัวบันทึกข้อมูล การทดสอบทำ การไต่ระดับความชัน 20 องศา ระดับความชันแสดงดังภาพที่ 4-15 ทำการบิดคันเร่งอย่างเดียว เพื่อให้ได้ค่าของกระแสขณะวิ่งของรถจักรยานไฟฟ้า แสดงดังภาพที่ 4-16



ภาพที่ 4-15 ระดับความชันที่ 20 องศา

#### 4.4.6.1 การทดสอบความชันที่ 20 องศา ที่น้ำหนักผู้ทดสอบ 80 กิโลกรัม

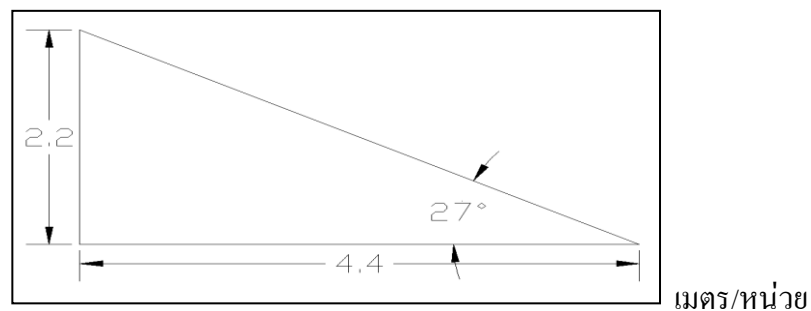


ภาพที่ 4-16 กราฟการทดสอบด้วยความเร็วการไต่ระดับที่ความชัน 20 องศา

จากกราฟ แสดง การทดสอบ ทำการบิดคันเร่งสูงสุดในการออกตัว ของรถ จากจุดเริ่มต้น เพื่อให้ได้ความเร็วที่สูงสุด สรุปผลการทดลองได้ว่า ที่น้ำหนักผู้ ขับขี่ 80 กิโลกรัม การออกตัวบิด คันเร่งสูงสุด ในการไต่ระดับที่ความชัน 20 องศา นั้นสามารถทำความเร็วสูงสุดได้ที่ 5 กิโลเมตร/ ชั่วโมง จะมีอัตราเร่งจากศูนย์ถึงความเร็ว 5 กิโลเมตร/ชั่วโมง ใช้เวลาที่ 7.3 วินาที และกินกระแส ขณะวิ่งเฉลี่ย 8 แอมแปร์

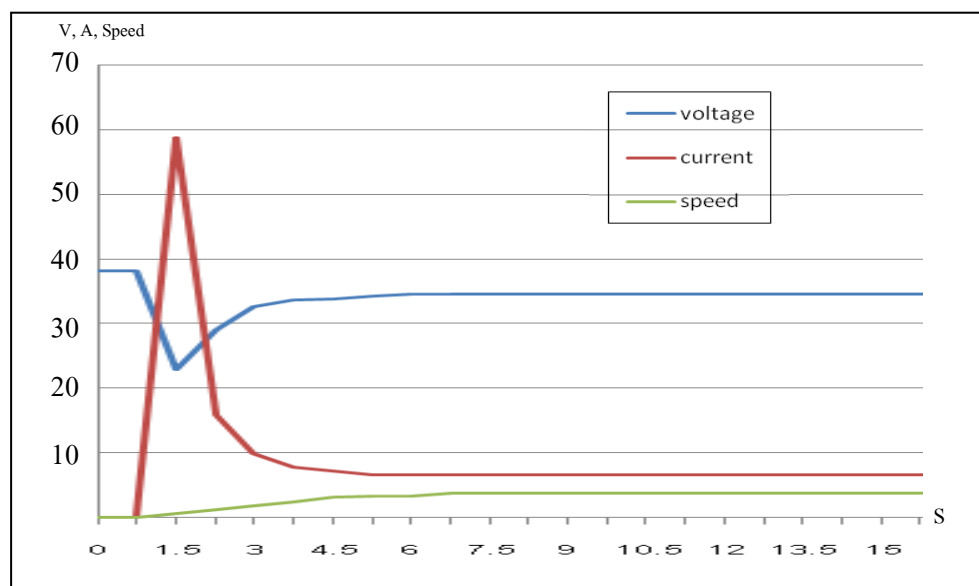
#### 4.4.7 การทดสอบด้วยความเร็วการไต่ระดับที่ความชัน 27 องศา

เป็นการวัดความเร็วเฉลี่ยของรถจักรยานไฟฟ้า ซึ่งทดสอบที่โหลดน้ำหนัก 80 กิโลกรัม โดยการทดสอบจะใช้ Handy Oscillographic Recorders OR300E เป็นตัวบันทึกข้อมูล การทดสอบจะทำการไต่ระดับความชันที่ 27 องศา ระดับความชันแสดงดังภาพที่ 4-17 ทำการบิดคันเร่งอย่างเดียวเพื่อให้ได้ค่าของกระแสขณะวิ่งของรถจักรยานไฟฟ้า แสดงดังภาพที่ 4-18



ภาพที่ 4-17 ระดับความชันที่ 27 องศา

##### 4.4.7.1 การทดสอบความชันที่ 27 องศา ที่น้ำหนักผู้ทดสอบ 80 กิโลกรัม



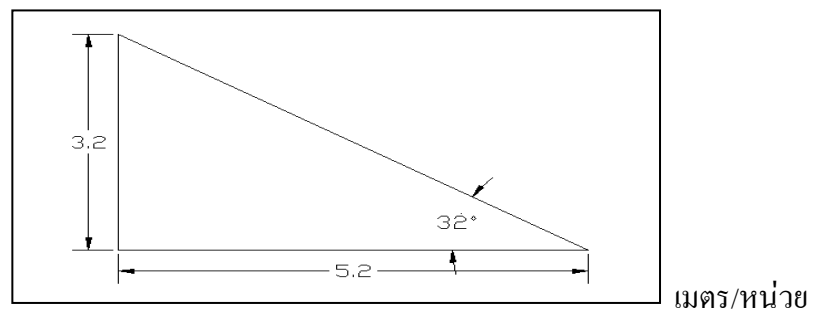
ภาพที่ 4-18 กราฟการทดสอบด้วยความเร็วการไต่ระดับที่ความชัน 27 องศา

จากกราฟ แสดง การทดสอบ ทำการบิดคันเร่งสูงสุดในการออกตัว ของรถจากจุดเริ่มต้น เพื่อให้ได้ความเร็วสูงสุด สรุปผลการทดลองได้ว่า ที่น้ำหนักผู้ขี่ บัชี่ 80 กิโลกรัม การออกตัวบิดคันเร่งสูงสุด ในการไต่ระดับ ที่ความชัน 27 องศา นั้นสามารถทำ ความเร็ว สูงสุดได้ที่

5 กิโลเมตร/ชั่วโมง จะมีอัตราเร่งจากศูนย์ถึงความเร็ว 5 กิโลเมตร/ชั่วโมง ใช้เวลาที่ 8.5 วินาที และกินกระแสขณะวิ่งเฉลี่ย 8 แอมแปร์

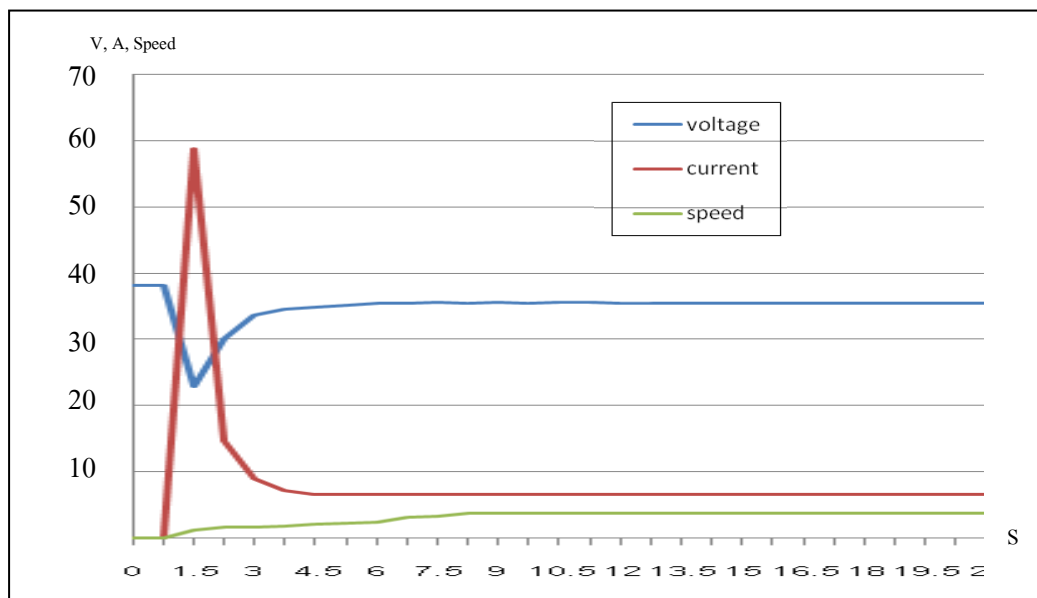
#### 4.4.8 การทดสอบด้วยความเร็วการไต่ระดับที่ความชัน 32 องศา

เป็นการวัดความเร็วเฉลี่ยของรถจักร ยานไฟฟ้า ซึ่งทดสอบที่โหลคน้ำหนัก 80 กิโลกรัม โดยการทดสอบจะใช้ Handy Oscillographic Recorders OR300E เป็นตัวบันทึกข้อมูล การทดสอบจะทำการไต่ระดับความชันที่ 32 องศา ระดับความชันแสดงดังภาพที่ 4-19 ทำการบิดคันเร่งอย่างเดียวเพื่อให้ได้ค่าของกระแสขณะวิ่งของรถจักรยานไฟฟ้า แสดงดังภาพที่ 4-20



ภาพที่ 4-19 ระดับความชันที่ 32 องศา

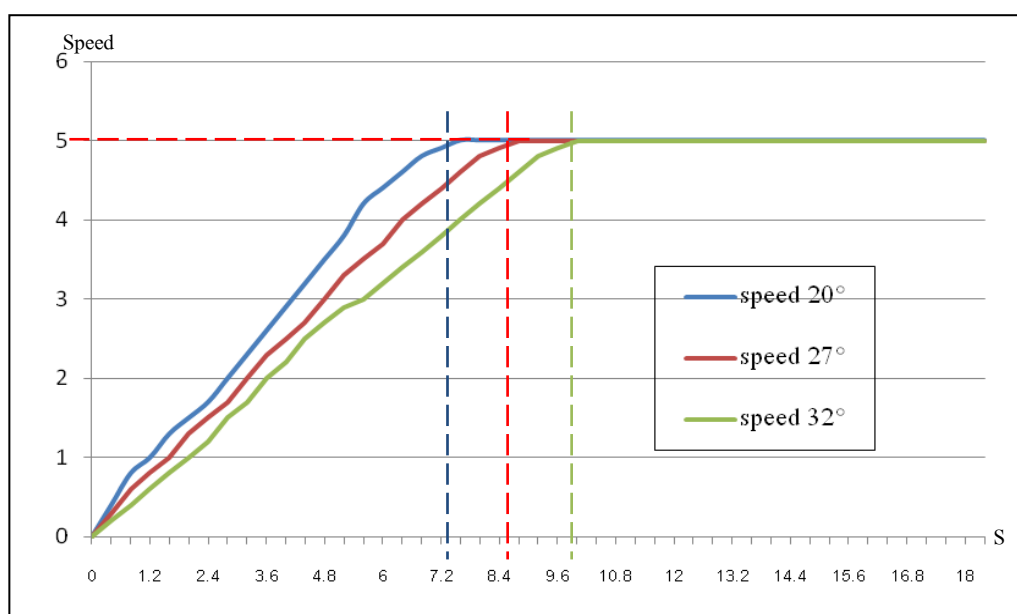
##### 4.4.8.1 การทดสอบความชันที่ 32 องศา ที่น้ำหนักผู้ทดสอบ 80 กิโลกรัม



ภาพที่ 4-20 กราฟการทดสอบด้วยความเร็วการไต่ระดับที่ความชัน 32 องศา

จากกราฟ แสดง การทดสอบ ทำการบิดคันเร่งสูงสุดในการออกตัว ของรถ จากจุดเริ่มต้น เพื่อให้ได้ความเร็วที่สูงสุด สรุปผลการทดลองได้ว่า ที่น้ำหนักผู้ขับขี่ 80 กิโลกรัม การออกตัวบิดคันเร่งสูงสุด ในการไต่ระดับที่ความชัน 32 องศา นั้นสามารถทำความเร็วสูงสุดได้ที่ 5 กิโลเมตร/ชั่วโมง จะมีอัตราเร่งจากศูนย์ถึงความเร็ว 5 กิโลเมตร/ชั่วโมง อยู่ที่ 9.8 วินาที และกินกระแสขั้ววงจรถือ 8 แอมแปร์

#### 4.4.9 การนำความเร็วทั้ง 3 กราฟมาเปรียบเทียบ แสดงดังภาพที่ 4-21

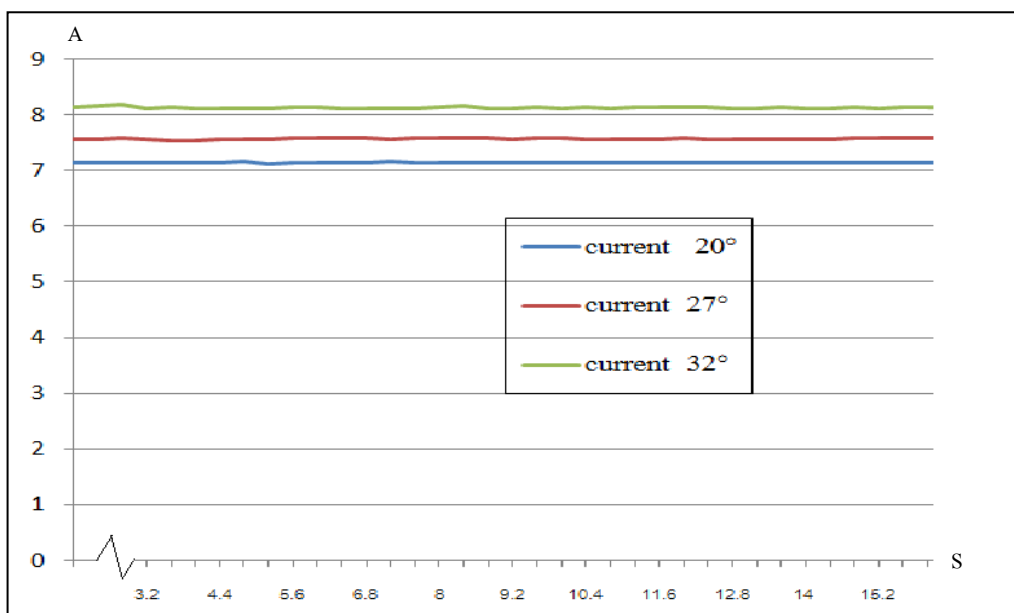


ภาพที่ 4-21 กราฟการเปรียบเทียบความเร็วต่างระดับความชันที่ 20,27 และ 32 องศา

จากกราฟ แสดง การเปรียบเทียบความเร็วจากการบิดคันเร่ง ในการออกตัวจากจุดเริ่มต้น เพื่อให้ได้ความเร็วสูงสุด สรุปได้ว่า ที่ความชันต่างระดับกัน สามารถทำความเร็วสูงสุดที่เท่ากันแต่ ช่วงระยะเวลาต่างกันจะเห็นได้ว่าที่ความชัน 32 องศา จะใช้เวลาที่มากกว่าความชันที่ต่ำกว่า

ถ้าสามารถทำให้ความเร็วที่เท่ากันและในเวลาที่ใช้ใกล้เคียงกันหรือเท่ากันจะเป็นผลดีต่อการใช้งานเนื่องจากมีผลต่อการออกตัวของรถนั่นเอง

#### 4.4.10 การนำกระแสทั้ง 3 กราฟมาเปรียบเทียบที่ระดับความชันต่างกัน แสดงดังภาพที่ 4-22



ภาพที่ 4-22 กราฟการเปรียบเทียบกระแสต่างระดับความชันที่ 20,27 และ 32 องศา

จากกราฟ แสดง การเปรียบเทียบความเร็วจากการบิดคันเร่ง ในการออกตัวจากจุดเริ่มต้น เพื่อให้ได้ความเร็วสูงสุด สรุปได้ว่า ที่ความชันต่างระดับกัน จะมีกระแสที่ไม่เท่ากันจะเห็นได้ว่าที่ความชัน 32 องศา จะกินกระแสมากกว่าความชันที่ต่ำกว่า

ถ้าสามารถทำให้กระแสที่ใช้งานมีค่าน้อยที่สุดหรืออาจจะเท่ากับความชันที่ต่ำที่สุดจะเป็นผลดีต่อการใช้งานและอาจเพิ่มระยะทางได้มากกว่าเดิม

#### 4.5 ระยะทางของรถจักรยานไฟฟ้าวิ่งได้ต่อการประจุแบตเตอรี่ 1 ครั้ง

การหาระยะทางที่รถจักรยานไฟฟ้าสามารถวิ่งได้ต่อการประจุแบตเตอรี่ 1 ครั้ง ในที่นี้จะใช้ผู้ทดสอบที่น้ำหนัก 80 กิโลกรัม เป็นผู้ขับขี่ โดยวิ่งในมหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าพระนครเหนือซึ่งได้ระยะทางรอบละประมาณ 1500 เมตร แบตเตอรี่ที่ใช้ในโครงการนี้เป็นชนิดตะกั่ว-กรด (Lead-Acid) ขนาด 12 V/24 Ah จำนวน 3 ลูก ต่ออนุกรมกันเพื่อให้ได้ระดับแรงดันที่ 36 โวลต์

จากการทดสอบเมื่อประจุแบตเตอรี่ เต็ม ทดสอบ โดยการ วิ่งด้วยความเร็ว ประมาณ 20-25 กิโลเมตร / ชั่วโมง ซึ่ง จากการทดสอบ รถจักรยาน สามารถ วิ่งได้ 15 รอบ ดังนั้นรถจักรยานวิ่งได้ระยะทาง  $15 \times 1500 = 22500$  เมตร หรือ 22.5 กิโลเมตร

#### 4.6 สรุปผลการดำเนินงาน

ผลการทดสอบรถจักรยานไฟฟ้า เริ่มจากทดสอบความเร็วเฉลี่ยของรถจักรยานไฟฟ้าเทียบกับเวลา ด้วยการออกตัวรถโดยการปั่นพร้อมกับบิดคันเร่งสูงสุด และการออกตัวรถโดย การบิดคันเร่งสูงสุด การทดสอบด้วยทางเรียบโดยใช้ความเร็ว คงที่ 10 และ 20 กิโลเมตร/ชั่วโมง และการไต่ระดับความชันที่ 20, 27 และ 32 องศา ซึ่งทดสอบที่น้ำหนักผู้ขับขี่ 80 กิโลกรัม เพื่อเปรียบเทียบการใช้งานตามลักษณะของสภาพพื้นทางเรียบและการไต่ระดับที่แตกต่างกัน

## บทที่ 5

### สรุป ปัญหาและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลโครงการ

การสร้างรถจักรยานไฟฟ้าแบบสามล้อ โดยใช้ มอเตอร์ ไฟฟ้ากระแสตรงแบบปราศจากแปรงถ่าน เป็นการพัฒนามาจาก ปริญญาณิพนธ์ เรื่องรถจักรยานไฟฟ้าขับเคลื่อนด้วย Brushless DC Motor ของวิษณุ ทองสัมฤทธิ์ และ ทศพล ทั้งรอด ในปีการศึกษา 2552 ใช้มอเตอร์ขับเคลื่อนแบบ Brushless DC Hub Motor เป็นชนิดที่ปราศจากแปรงถ่านจำนวน 1 ตัว ทำให้เกิดแรงบิดน้อย ซึ่งผู้จัดทำจึงมีแนวคิดพัฒนารถจักรยานไฟฟ้า โดย นำมอเตอร์ ไฟฟ้ากระแสตรงแบบปราศจากแปรงถ่าน Brushless DC Hub Motor ขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้า 36 โวลต์ และมีกำลังไฟฟ้า 250 วัตต์ จำนวน 2 ตัว ซึ่งส่งผลทำให้แรงบิดดีขึ้น

การเร่งหรือลดความเร็ว สามารถทำได้โดยการบิด และผ่อนคันเร่งซึ่ง เป็นคำสั่งให้ ไอซี MC33033 ไปขับมอสเฟต (Mosfets) ทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์สวิตช์ วงจรมอสเฟต (Mosfets) แบบ 3 เฟส โดยใช้มอสเฟต (Mosfets) จำนวน 6 ตัว เพื่อจับคู่ ทำงาน ( 6 ควอดแรนท์ ) ส่วนในการเลี้ยวอาศัยการปรับสัญญาณ PWM(Pulse Width Modulation)ให้ลดลง ทำให้มอเตอร์ อีกตัวหมุน ช้าลง โดยการใช้ตัวต้านทานที่ปรับค่าได้ชนิดมีแท่งปกกลาง ทำหน้าที่ลดทอนแรงดันแล้ว นำคำสั่งที่ได้ส่งไปยังไอซี MC 33033เพื่อไปขับมอสเฟต (Mosfets)

จากผลการทดสอบการทำงานของโครงการรถจักรยานไฟฟ้า สามารถควบคุมให้มีการเคลื่อนไปข้างหน้า โดยการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ที่ล้อ หน้าจำนวน 2 ล้อและเมื่อเลี้ยวมอเตอร์ ทั้ง 2 ตัวมีความเร็วรอบไม่เท่ากัน รถจักรยานไฟฟ้ามีน้ำหนักรวมแบตเตอรี่ 80 กิโลกรัม สามารถวิ่งบนทางเรียบด้วยความเร็วสูงสุด 32 กิโลเมตร/ชั่วโมง และสามารถวิ่งได้ระดับที่ความชัน 20,27 และ 32 องศา ด้วยความเร็วสูงสุด 5 กิโลเมตร /ชั่วโมง สามารถ วิ่งใน ระยะทางต่อการประจุแบตเตอรี่ 1 ครั้ง ได้ 22.5 กิโลเมตร ที่น้ำหนักบรรทุก 80 กิโลกรัม



## 5.2 ปัญหาและแนวทางแก้ไข

จากการดำเนินงานที่ผ่านมา ปัญหาที่เกิดขึ้นระหว่างการดำเนินงาน สามารถสรุปได้ดังนี้

5.2.1 ในส่วนของไอซีเบอร์ MC 33033 ยังขาดประสิทธิภาพในการตรวจจับสัญญาณ Encoder ส่งผลทำให้ในการออกตัวของรถอาจเกิดการกระตุกได้ แนวทางแก้ปัญหา ควรจะเปลี่ยนมาใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งสามารถที่จะควบคุม PI ได้ภายในตัวเดียว

5.2.2 ในการเลี้ยวใช้ R บาลานซ์ เป็นตัวควบคุม มอเตอร์ในการเลี้ยว ไม่สามารถกำหนดความเร็วรอบของมอเตอร์ทั้ง 2 ตัว ในองศาที่ต่างกันได้ แนวทางแก้ปัญหา ควรมี Sensor ตรวจจับระยะมุมมองของการเลี้ยว

## 5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 ในการเบรกควรมีการชาร์ตพลังงานกลับเข้าแบตเตอรี่

5.3.2 ในการไต่ระดับที่ความชันต่างกันควรที่จะให้ความเร็วสูงสุดที่เวลาเท่ากัน

5.3.3 ในการไต่ระดับที่ความชันต่างกันควรที่จะใช้กระแสที่ต่ำกว่าเดิมเพื่อให้ระยะทางเพิ่มขึ้น

## บรรณานุกรม

### ภาษาไทย

ชาญชนก ทองพรีด, วัชรินทร์ มณีฉาย “แก้อັขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบแม่เหล็กถาวร ” ปรินญาณิพนธ์ ภาควิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม ,มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2548.

ณัฐพล ประสิทธิ์สุวรรณ, พัทธ์ชัย วงศ์คำหาร “รถจักรยานไฟฟ้า ” ปรินญาณิพนธ์ ภาควิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ , 2549.

ณรงค์ฤทธิ์ นามมนตรี, สิทธิศักดิ์ กิจสุภี. “ระบบขับเคลื่อนสำหรับหุ่นยนต์กู้ภัย ” ปรินญาณิพนธ์ ภาควิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2549.

วิษณุ ทองสัมฤทธิ์, ทศพล ทั้งรอด “รถจักรยานไฟฟ้าขับเคลื่อนด้วย Brushless DC Motor” ปรินญาณิพนธ์ ภาค วิชาครุศาสตร์ ไฟฟ้า คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม ,มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2552.

### ภาษาอังกฤษ

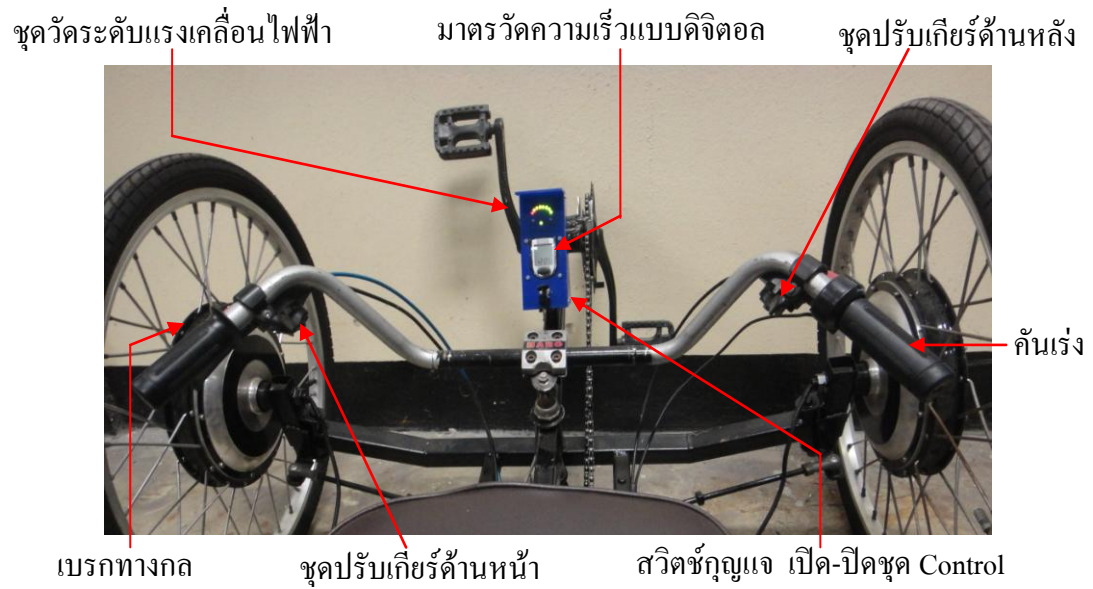
Friedrich Frohr and Fritz Ortttenburger, “ **Introduction to Electronic Control Engineering**” Siemens Aktiengesllschaft 1970.

J. Bliss, “**The MOSFET Turn-Off Device-A New Circuit Building Block**” Motorola Semiconductor, Engineering Bulletin EB142, 1990.

R. Erickson, “**Lecture 20, The Transistor as a Switching Device**” Power Electronics ECE579 Course Notes, Fall 1987.

ภาคผนวก ก  
คู่มือการใช้งาน

## คู่มือการใช้งานรถจักรยานไฟฟ้า



สวิทช์เซอร์กิตเบรกเกอร์ เปิด-ปิด ชุดวงจรกำลัง

ภาพที่ ก-1 ขั้นตอนการใช้งานรถจักรยานไฟฟ้า

### ลำดับขั้นตอนการใช้รถจักรยานไฟฟ้า

1. เปิดเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่บริเวณด้านข้างผู้ควบคุม
2. เปิดสวิทช์กุญแจที่บริเวณด้านหน้าคนขับ
3. บิดคันเร่งบริเวณแฮนด์รถด้านขวามือเมื่อต้องการให้รถเคลื่อนที่ไปข้างหน้า

4. เมื่อต้องการเบรคให้บีบเบรคทางกรรวมทั้งตัดสัญญาณไฟฟ้าบริเวณแฮนด์รถด้านซ้ายมือค้างไว้
5. เมื่อต้องการเอาแบตเตอรี่ออกไปชาร์จให้ทำตามขั้นตอนดังต่อไปนี้
  - 5.1 ปิดเซอร์กิตเบรคเกอร์และสวิตช์กุญแจ
  - 5.2 ถอดสายไฟที่ต่อเข้ากับแบตเตอรี่ออกให้หมด
  - 5.3 ยกแบตเตอรี่ออกไปชาร์จกับชุดชาร์จภายนอก



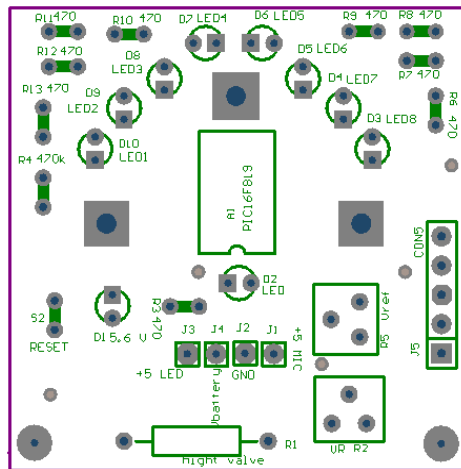
ภาพที่ ก - 2 แสดงขนาดต่างๆ ของรถจักรยานไฟฟ้า

#### ขนาดของรถจักรยานไฟฟ้า 3 ล้อ

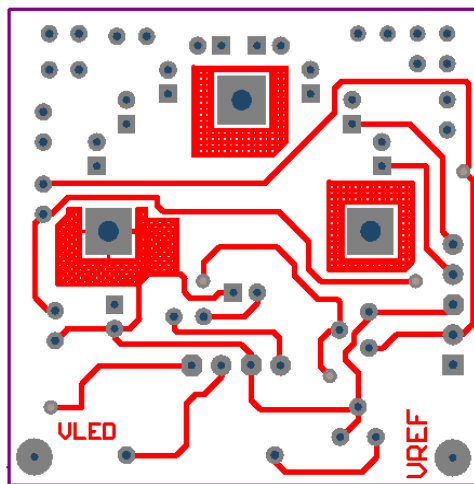
1. ความกว้างสูงสุด	203	เซนติเมตร
2. ความยาวสูงสุด	89	เซนติเมตร
3. ความสูงจากพื้นตู้ควบคุม	90	เซนติเมตร
4. ความสูงจากพื้นถึงเพลาล้อหลัง	35	เซนติเมตร
5. ความสูงจากพื้นถึงเพลาล้อหน้า	30	เซนติเมตร
6. น้ำหนักรถ ไม่รวมแบตเตอรี่	60	กิโลกรัม
7. น้ำหนักกรรวมแบตเตอรี่	80	กิโลกรัม

ภาคผนวก ข

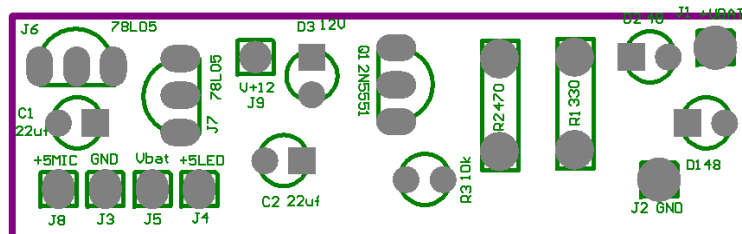
ลายวงจรพิมพ์และตำแหน่งการวางอุปกรณ์



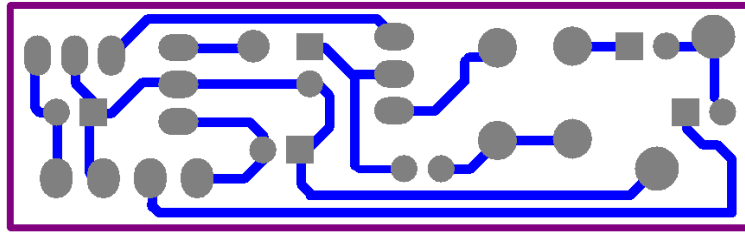
ภาพที่ ข-1 การวางอุปกรณ์ของวงจรถูควักระดับแรงดัน



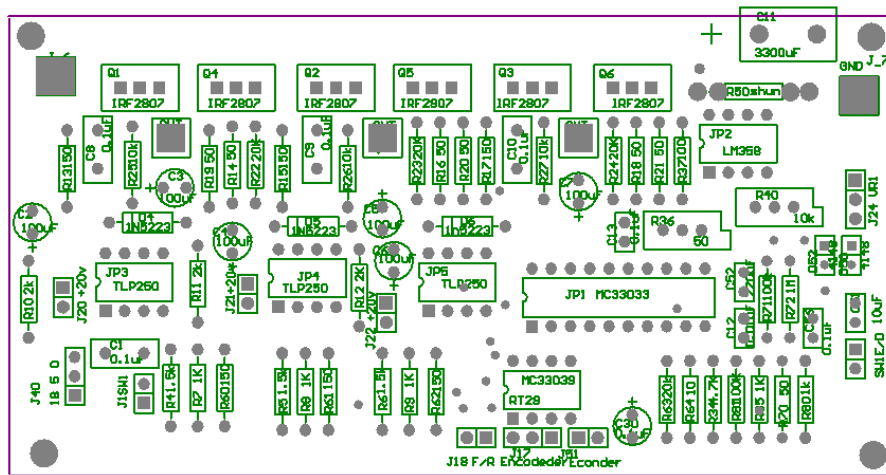
ภาพที่ ข-2 ลายวงจรพิมพ์ด้านล่างของวงจรถูควักระดับแรงดัน



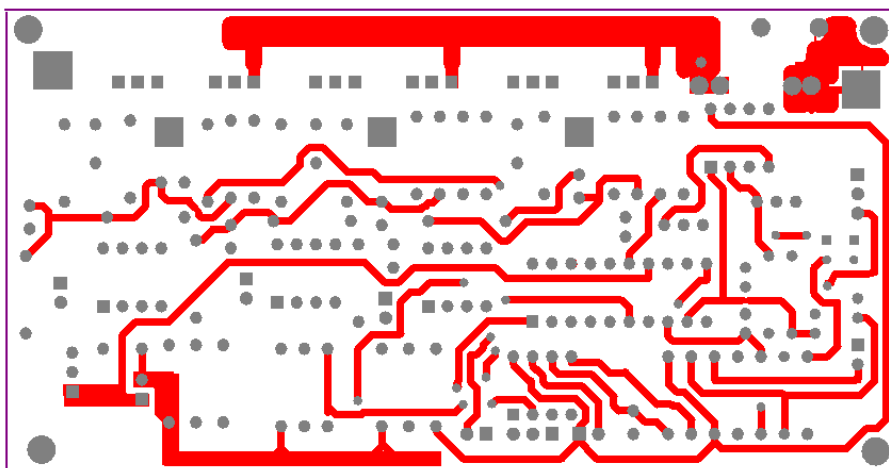
ภาพที่ ข-3 การวางอุปกรณ์ของแหล่งจ่ายวงจรถูควักระดับแรงดัน



ภาพที่ ข-4 ลายวงจรพิมพ์ด้านล่างของแหล่งจ่ายชุดวัดระดับแรงดัน

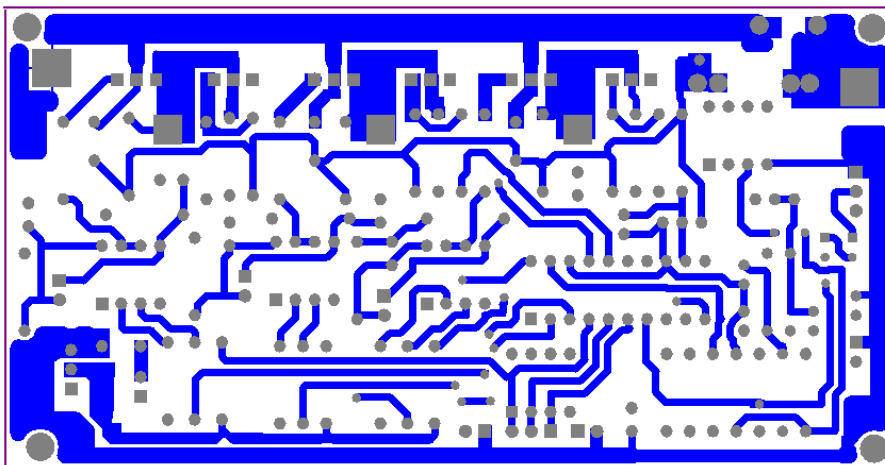


ภาพที่ ข-5 การวางอุปกรณ์ของวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบปราศจากแปรงถ่าน



ภาพที่ ข-6 ลายวงจรพิมพ์ด้านบนของวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบปราศจากแปรงถ่าน





ภาพที่ ข-7 ลายวงจรพิมพ์ด้านล่างของวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบปราศจากแปรงถ่าน

ภาคผนวก ค  
โปรแกรมควบคุมชุดวัดแบตเตอรี่

```

/* ////////////////////////////////////////////////////////////////////
โปรแกรมควบคุมชุดวัดแบตเตอรี่โดยใช้ PIC16F819
////////////////////////////////////////////////////////////////// */
#include <16F819.h>
#fuses INTRC_IO ,NOPUT,NOBROWNOUT,NOCPD,NOPROTECT
//,INTRC_IO HS,
#use delay (clock=2000000)
##device ADC = 10

float b,c,d,e,f,g,h,i,j,k,l,m,n,x,y,z;
void main(void)
{
    delay_ms(2000); //500
    set_tris_b(0x00);
    setup_port_a(ALL_ANALOG);
    setup_adc(ADC_CLOCK_INTERNAL);
    //set port b is output & set port a0,a2 is analog input

    set_adc_channel(0);
    delay_us(5000); //500
    y = read_adc();
    //set high value=y
    //a=y;

    set_adc_channel(2);
    delay_us(5000);
    m = read_adc();
    //set low value=m
//while(true)
// {

```

```
n = m / 255 ;
b = n * 255 ;
c = 255 - b ;
d = c / 7 ;

//set distance (led)
e = 255-1 ; //8 lamp
f = 255-d ; //7 lamp
g = f-d ; //6 lamp
h = g-d ; //5 lamp
i = h-d ; //4 lamp
j = i-d ; //3 lamp
k = j-d ; //2 lamp
l = k-d ; //1 lamp

//set value each lamp
//-----
//loop check
while(true)
{
    set_adc_channel(0);
    delay_us(1000);
    k = read_adc();
    delay_us(5000);
    //read value for compare
    if (z<y)
    {
        x=z;
        y=x; //use data low_y is value hold
        if (x>e)
        {
```

```
    output_b(0x00); // 8 lamp
  }
else if (x>f)
  {
    output_b(0x80); // 7 lamp
  }

else if ( x >g)
  {
    output_b(0xC0); // 6 lamp
  }
else if ( x >h)
  {
    output_b(0xE0); // 5 lamp
  }
else if ( x >i)
  {
    output_b(0xF0); // 4 lamp
  }
else if ( x >j)
  {
    output_b(0xF8); // 3 lamp
  }
else if ( x >k)
  {
    output_b(0xFC); // 2 lamp
  }
else if ( x >l)
  {
    output_b(0xFE); // 1 lamp
```

```
    }  
    else  
    {  
output_b(0xFE); // bring  
delay_ms(600);  
output_b(0xFF);  
delay_ms(600);  
    }  
}  
else if(z>=y)  
{  
    x=y; // y is value hold  
if (x>e)  
    {  
        output_b(0x00); // 8 lamp  
    }  
else if (x >f)  
    {  
output_b(0x80); // 7 lamp  
    }  
else if ( x >g)  
    {  
        output_b(0xC0); // 6 lamp  
    }  
else if ( x >h)  
    {  
        output_b(0xE0); // 5 lamp  
    }  
else if ( x >i)  
    {
```

```
    output_b(0xF0); // 4 lamp
  }
  else if ( x > j)
  {
    output_b(0xF8); // 3 lamp
  }
  else if ( x > k)
  {
    output_b(0xFC); // 2 lamp
  }
  else if ( x > l)
  {
    output_b(0xFE); // 1 lamp
  }
  else
  {
    output_b(0xFE); // bring
    delay_ms(600);
    output_b(0xFF);
    delay_ms(600);
  }
}
delay_us(9000);

}
}
```

ภาคผนวก ง  
อุปกรณ์และงบประมาณของโครงการ



ตารางที่ ง-1 งบประมาณรายจ่ายของโครงการ

1. วงจรรับแบบ DC Brushless

ลำดับที่	รายการ	จำนวน	หน่วยละ	รวม	หมายเหตุ
1.	IC MC33033P	4	108	432	WT
2.	IC MC33039P	4	52	208	WT
3.	IC TLP 250	12	34.96	419.52	ES
4.	ZENER DIODE 1/2W,2.7V	12	1.03	12.36	ES
5.	IC LM358	4	14.74	58.96	ES
6.	Capacitor 100 $\mu$ F 25V	24	1.17	28.08	ES
7.	Capacitor 3300 $\mu$ F 50V	2	31.46	62.92	ES
8.	Mosfet IRF2807	20	28.08	561.6	ES
9.	Capacitor 10nF , 100nF	30	3	90	ES
10.	Trim pot 500 $\Omega$	2	25	50	ES
11.	Resistor 20K $\Omega$ , 10K $\Omega$ , 4.7K $\Omega$ , 2K $\Omega$ , 1.5K $\Omega$ , 1K $\Omega$ $\frac{1}{4}$ W	50	.50	25	NPE
12.	Resistor 20K $\Omega$ , 10K $\Omega$ , 4.7K $\Omega$ , 2K $\Omega$ , 1.5K $\Omega$ , 1K $\Omega$ $\frac{1}{4}$ W	50	.50	25	NPE
13.	Socket 8 Pin	20	8	160	NPE
14.	Socket 20 Pin	1	20	20	NPE
รวมทั้งสิ้น (บาท)				2153.47	

2. ชุดแหล่งจ่ายไฟ

ลำดับที่	รายการ	จำนวน	หน่วยละ	รวม	หมายเหตุ
1.	Voltage Regulators LM7805	4	12.50	50	ES
2.	Capacitor 1 $\mu$ F	5	4	20	ES
3.	Capacitor 10 $\mu$ F	5	4	20	ES
4.	PT 4504	2	-	-	IT
5.	PT	6	-	-	IT
รวมทั้งสิ้น (บาท)				90	

ตารางที่ ง-1 งบประมาณรายจ่ายของโครงการ (ต่อ)

3. วงจรชุดตัวระดับแรงดัน

ลำดับที่	รายการ	จำนวน	หน่วยละ	รวม	หมายเหตุ
1.	PIC 16F819-I/SO	1	90.12	90.12	ES
2.	C 470 $\mu$ F 16 V	1	1.18	1.18	ES
3.	1N5232BA-TC/NO (5.6V)	2	1.04	2.08	ES
4.	3362P-103LF (VR10K)	2	8.25	16.5	ES
5.	LED เขียว LG2040 3mm.	5	.74	3.7	ES
6.	LED แดง LH2040 3mm.	5	.69	3.45	ES
7.	LED เหลือง SY3511 3mm.	5	.51	2.55	ES
8.	MC78L05ACP	2	5.30	10.6	ES
9.	1N4148	2	.18	0.36	ES
10.	1N4742TA-/NO (12V)	2	1.27	2.54	ES
11.	2N5551RLRAG	2	1.75	3.5	ES
12.	Pin Header Right Angle SINGLE 21R-1*40G	1	6.35	6.35	ES
13.	C 16 $\mu$ F 50 V	2	1.17	2.34	ES
14.	R680E 1/8 1 %	5	.75	3.75	NPE
15.	R10K 1/2W 1%	5	.75	3.75	NPE
16.	R 330E วายวาล์ว ROYAL 3 W	5	.75	3.75	NPE
17.	R 470E วายวาล์ว ROYAL 3 W	5	.75	3.75	NPE
18.	R 10K 1/4 W 1%	5	.75	3.75	NPE
19.	R 10K 1/8 W 1%	5	.75	3.75	NPE
รวมทั้งสิ้น (บาท)				167.77	

ตารางที่ ง-1 งบประมาณรายจ่ายของโครงการ (ต่อ)

4. อื่น ๆ

ลำดับที่	รายการ	จำนวน	หน่วยละ	รวม	หมายเหตุ
1.	โครงรถ	1	2,000	2,000	
2.	มอเตอร์ DC Brushless Hub motor 36 V 250 W	2	3,900	7,800	ฟ้าใส
3.	ดิสเบรก ขนาด 5 นิ้ว	1	580	580	ฟ้าใส
4.	มาตรวัดความเร็วแบบดิจิตอล	1	490	490	วรจักร
5.	กล่องใส่วงจร	1	450	450	NPE
6.	ล้อรถ	3	1,500	1,500	วรจักร
7.	สายไฟต่อวงจร	1	400	400	NPE
8.	นอตตัวผู้และตัวเมีย	1	120	120	วรจักร
9.	กุญแจ switch	1	50	50	NPE
10.	เกียร์รถจักรยาน	1	1,800	1,800	วรจักร
10.	เบาะรถ	1	350	350	-
รวมทั้งสิ้น (บาท)				15,540	

รวมงบประมาณทั้งสิ้น

ลำดับที่	รายการ	จำนวน
1.	วงจรขับแบบ DC Brushless	2153.47
2.	ชุดแหล่งจ่ายไฟ	90
3.	วงจรชุดวัดระดับแรงดัน	167.77
4.	อื่น ๆ	15,540
รวมงบประมาณทั้งสิ้น (บาท)		17,951.24

ภาคผนวก จ  
ข้อมูลทางเทคนิค

## MC33033, NCV33033

### Brushless DC Motor Controller

The MC33033 is a high performance second generation, limited feature, monolithic brushless dc motor controller which has evolved from ON Semiconductor's full featured MC33034 and MC33035 controllers. It contains all of the active functions required for the implementation of open loop, three or four phase motor control. The device consists of a rotor position decoder for proper commutation sequencing, temperature compensated reference capable of supplying sensor power, frequency programmable sawtooth oscillator, fully accessible error amplifier, pulse width modulator comparator, three open collector top drivers, and three high current totem pole bottom drivers ideally suited for driving power MOSFETs. Unlike its predecessors, it does not feature separate drive circuit supply and ground pins, brake input, or fault output signal.

Included in the MC33033 are protective features consisting of undervoltage lockout, cycle-by-cycle current limiting with a selectable time delayed latched shutdown mode, and internal thermal shutdown.

Typical motor control functions include open loop speed, forward or reverse direction, and run enable. The MC33033 is designed to operate brushless motors with electrical sensor phasings of 60°/300° or 120°/240°, and can also efficiently control brush dc motors.

#### Features

- 10 to 30 V Operation
- Undervoltage Lockout
- 6.25 V Reference Capable of Supplying Sensor Power
- Fully Accessible Error Amplifier for Closed Loop Servo Applications
- High Current Drivers Can Control External 3-Phase MOSFET Bridge
- Cycle-By-Cycle Current Limiting
- Internal Thermal Shutdown
- Selectable 60°/300° or 120°/240° Sensor Phasings
- Also Efficiently Control Brush DC Motors with External MOSFET H-Bridge
- NCV Prefix for Automotive and Other Applications Requiring Site and Control Changes
- Pb-Free Packages are Available



ON Semiconductor®

<http://onsemi.com>

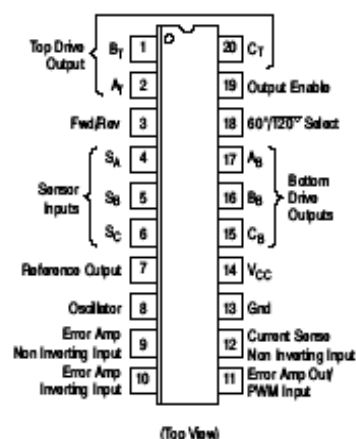
PDIP-20  
P SUFFIX  
CASE 738



SO-20L  
DW SUFFIX  
CASE 751D



#### PIN CONNECTIONS



#### ORDERING INFORMATION

See detailed ordering and shipping information in the package dimensions section on page 25 of this data sheet.

#### DEVICE MARKING INFORMATION

See general marking information in the device marking section on page 25 of this data sheet.

## MC33033, NCV33033

## MAXIMUM RATINGS

Rating	Symbol	Value	Unit
Power Supply Voltage	$V_{CC}$	30	V
Digital Inputs (Pins 3, 4, 5, 6, 18, 19)	-	$V_{ref}$	V
Oscillator Input Current (Source or Sink)	$I_{OSC}$	30	mA
Error Amp Input Voltage Range (Pins 9, 10, Note 1)	$V_{IR}$	-0.3 to $V_{ref}$	V
Error Amp Output Current (Source or Sink, Note 2)	$I_{Out}$	10	mA
Current Sense Input Voltage Range	$V_{Sense}$	-0.3 to 5.0	V
Top Drive Voltage (Pins 1, 2, 20)	$V_{CE(top)}$	40	V
Top Drive Sink Current (Pins 1, 2, 20)	$I_{sink(top)}$	50	mA
Bottom Drive Output Current (Source or Sink, Pins 15, 16, 17)	$I_{DRV}$	100	mA
Electrostatic Discharge Sensitivity (ESD)	-	-	-
Human Body Model (HBM) Class 2, JESD22 A114-C	-	2000	V
Machine Model (MM) Class A, JESD22 A115-A	-	200	V
Charged Device Model (CDM), JESD22 C101-C	-	2000	V
Power Dissipation and Thermal Characteristics			
P Suffix, Dual-in-Line, Case 738	$P_D$	667	mW
Maximum Power Dissipation @ $T_A = 85^\circ\text{C}$	$R_{\theta JA}$	75	$^\circ\text{C/W}$
Thermal Resistance, Junction-to-Air			
DW Suffix, Surface Mount, Case 751D	$P_D$	619	mW
Maximum Power Dissipation @ $T_A = 85^\circ\text{C}$	$R_{\theta JA}$	105	$^\circ\text{C/W}$
Thermal Resistance, Junction-to-Air			
Operating Junction Temperature	$T_J$	150	$^\circ\text{C}$
Operating Ambient Temperature Range (Note 3)	$T_A$	-40 to +85 -40 to +125	$^\circ\text{C}$
	MC33033 NCV33033		
Storage Temperature Range	$T_{stg}$	-65 to +150	$^\circ\text{C}$

Stresses exceeding Maximum Ratings may damage the device. Maximum Ratings are stress ratings only. Functional operation above the Recommended Operating Conditions is not implied. Extended exposure to stresses above the Recommended Operating Conditions may affect device reliability.

1. The input common mode voltage or input signal voltage should not be allowed to go negative by more than 0.3 V.
2. The compliance voltage must not exceed the range of -0.3 to  $V_{ref}$ .
3. NCV33033:  $T_{low} = -40^\circ\text{C}$ ,  $T_{high} = 125^\circ\text{C}$ . Guaranteed by design. NCV prefix is for automotive and other applications requiring site and change control.

## MC33033, NCV33033

## PIN FUNCTION DESCRIPTION

Pin	Symbol	Description
1, 2, 20	$B_T, A_T, C_T$	These three open collector Top Drive Outputs are designed to drive the external upper power switch transistors.
3	Fwd/Rev	The Forward/Reverse input is used to change the direction of motor rotation.
4, 5, 6	$S_A, S_B, S_C$	These three Sensor inputs control the commutation sequence.
7	Reference Output	This output provides charging current for the oscillator timing capacitor $C_T$ and a reference for the Error Amplifier. It may also serve to furnish sensor power.
8	Oscillator	The Oscillator frequency is programmed by the values selected for the timing components, $R_T$ and $C_T$ .
9	Error Amp Noninverting Input	This input is normally connected to the speed set potentiometer.
10	Error Amp Inverting Input	This input is normally connected to the Error Amp Output in open loop applications.
11	Error Amp Out/PWM Input	This pin is available for compensation in closed loop applications.
12	Current Sense Noninverting Input	A 100 mV signal, with respect to Pin 13, at this input terminates output switch conduction during a given oscillator cycle. This pin normally connects to the top side of the current sense resistor.
13	Gnd	This pin supplies a separate ground return for the control circuit and should be referenced back to the power source ground.
14	$V_{CC}$	This pin is the positive supply of the control IC. The controller is functional over a $V_{CC}$ range of 10 to 30 V.
15, 16, 17	$C_B, B_B, A_B$	These three totem pole Bottom Drive Outputs are designed for direct drive of the external bottom power switch transistors.
18	60°/120° Select	The electrical state of this pin configures the control circuit operation for either 60° (high state) or 120° (low state) sensor electrical phasing inputs.
19	Output Enable	A logic high at this input causes the motor to run, while a low causes it to coast.

## MC33033, NCV33033

Inputs (Note 2)									Outputs (Note 3)							
Sensor Electrical Phasing (Note 4)						Current Sense			Top Drives			Bottom Drives				
60°			120°						A <sub>T</sub>	B <sub>T</sub>	C <sub>T</sub>	A <sub>B</sub>	B <sub>B</sub>	C <sub>B</sub>		
S <sub>A</sub>	S <sub>B</sub>	S <sub>C</sub>	S <sub>A</sub>	S <sub>B</sub>	S <sub>C</sub>	F/R	Enable									
1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	1	(Note 5) F/R = 1
1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	1	0	0	1		
1	1	1	0	1	0	1	1	0	1	0	1	1	0	0		
0	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	0	1	0	0		
0	0	1	0	0	1	1	1	0	1	1	0	0	1	0		
0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	1	1	0	1	0		
1	0	0	1	0	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	(Note 5) F/R = 0	
1	1	0	1	1	0	0	1	0	1	1	0	0	1	0		
1	1	1	0	1	0	0	1	0	0	1	1	0	1	0		
0	1	1	0	1	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1		
0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	1		
0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0	0		
1	0	1	1	1	1	X	X	X	1	1	1	0	0	0	(Note 6)	
0	1	0	0	0	0	X	X	X	1	1	1	0	0	0		
V	V	V	V	V	V	X	0	X	1	1	1	0	0	0	(Note 7)	
V	V	V	V	V	V	X	1	1	1	1	1	0	0	0	(Note 8)	

NOTES: 1. V = Any one of six valid sensor or drive combinations.

X = Don't care.

2. The digital inputs (Pins 3, 4, 5, 6, 18, 19) are all TTL compatible. The current sense input (Pin 12) has a 100 mV threshold with respect to Pin 13. A logic 0 for this input is defined as < 85 mV, and a logic 1 is > 115 mV.

3. The top drive outputs are open collector design and active in the low (0) state.

4. With 60°/120° (Pin 18) in the high (1) state, configuration is for 60° sensor electrical phasing inputs. With Pin 18 in the low (0) state, configuration is for 120° sensor electrical phasing inputs.

5. Valid 60° or 120° sensor combinations for corresponding valid top and bottom drive outputs.

6. Invalid sensor inputs; All top and bottom drives are off.

7. Valid sensor inputs with enable = 0; All top and bottom drives are off.

8. Valid sensor inputs with enable and current sense = 1; All top and bottom drives are off.

Figure 20. Three Phase, Six Step Commutation Truth Table (Note 1)

#### Current Limit

Continuous operation of a motor that is severely over-loaded results in overheating and eventual failure. This destructive condition can best be prevented with the use of cycle-by-cycle current limiting. That is, each on-cycle is treated as a separate event. Cycle-by-cycle current limiting is accomplished by monitoring the stator current build-up each time an output switch conducts, and upon sensing an over current condition, immediately turning off the switch and holding it off for the remaining duration of oscillator ramp-up period. The stator current is converted to a voltage by inserting a ground-referenced sense resistor  $R_S$  (Figure 35) in series with the three bottom switch transistors (Q4, Q5, Q6). The voltage developed across the sense resistor is monitored by the current sense input (Pin 12), and compared to the internal 100 mV reference. If the current sense threshold is exceeded, the comparator resets the lower latch and terminates output switch conduction. The value for the sense resistor is:

$$R_S = \frac{0.1}{\text{stator(max)}}$$

The dual-latch PWM configuration ensures that only one single output conduction pulse occurs during any given oscillator cycle, whether terminated by the output of the Error Amplifier or the current limit comparator.

#### Reference

The on-chip 6.25 V regulator (Pin 7) provides charging current for the oscillator timing capacitor, a reference for the Error Amplifier, and can supply 20 mA of current suitable for directly powering sensors in low voltage applications. In higher voltage applications it may become necessary to transfer the power dissipated by the regulator off the IC. This is easily accomplished with the addition of an external pass transistor as shown in Figure 22. A 6.25 V reference level was chosen to allow implementation of the simpler NPN circuit, where  $V_{ref} - V_{BE}$  exceeds the minimum voltage required by Hall Effect sensors over temperature. With proper transistor selection, and adequate heatsinking, up to one amp of load current can be obtained.

#### Undervoltage Lockout

A dual Undervoltage Lockout has been incorporated to prevent damage to the IC and the external power switch transistors. Under low power supply conditions, it guarantees that the IC and sensors are fully functional, and that there is sufficient Bottom Drive Output voltage. The positive power supply to the IC ( $V_{CC}$ ) is monitored to a threshold of 8.9 V. This level ensures sufficient gate drive necessary to attain low  $R_{DS(on)}$  when interfacing with standard power MOSFET devices. When directly powering the Hall sensors from the reference, improper sensor

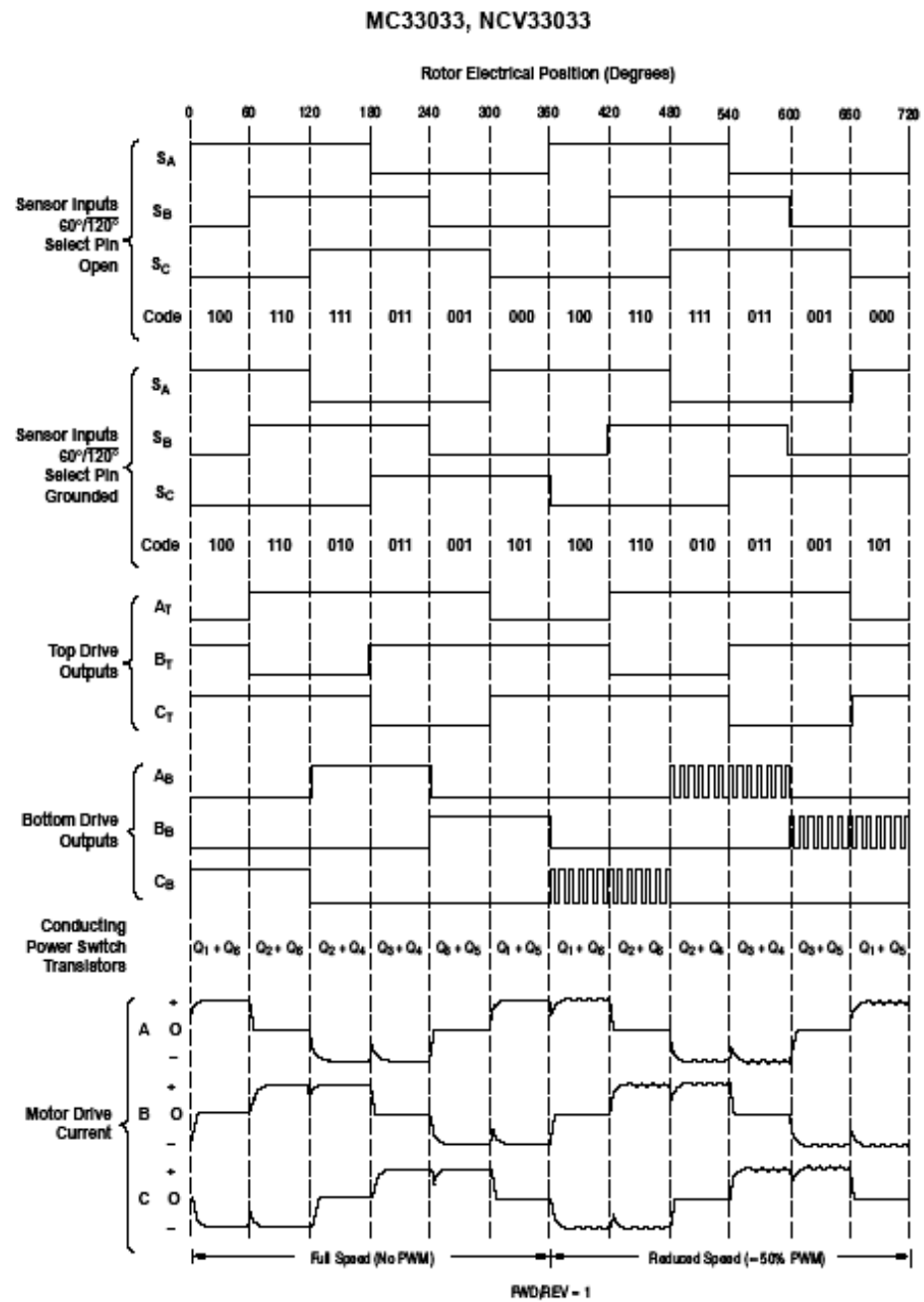


Figure 36. Three Phase, Six Step, Full Wave Commutation Waveforms



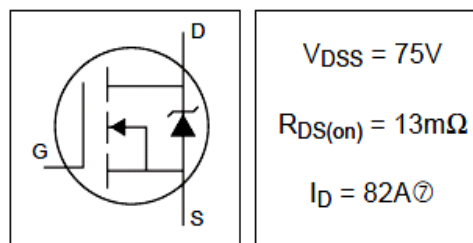
International  
**IR** Rectifier

PD - 91517

**IRF2807**

HEXFET® Power MOSFET

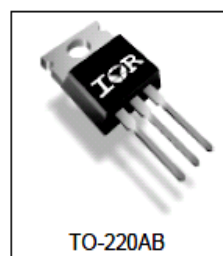
- Advanced Process Technology
- Ultra Low On-Resistance
- Dynamic  $dv/dt$  Rating
- 175°C Operating Temperature
- Fast Switching
- Fully Avalanche Rated



### Description

Advanced HEXFET® Power MOSFETs from International Rectifier utilize advanced processing techniques to achieve extremely low on-resistance per silicon area. This benefit, combined with the fast switching speed and ruggedized device design that HEXFET power MOSFETs are well known for, provides the designer with an extremely efficient and reliable device for use in a wide variety of applications.

The TO-220 package is universally preferred for all commercial-industrial applications at power dissipation levels to approximately 50 watts. The low thermal resistance and low package cost of the TO-220 contribute to its wide acceptance throughout the industry.



### Absolute Maximum Ratings

	Parameter	Max.	Units
$I_D @ T_C = 25^\circ\text{C}$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10\text{V}$	82 <sup>①</sup>	A
$I_D @ T_C = 100^\circ\text{C}$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10\text{V}$	58	
$I_{DM}$	Pulsed Drain Current <sup>①</sup>	280	
$P_D @ T_C = 25^\circ\text{C}$	Power Dissipation	230	W
	Linear Derating Factor	1.5	W/°C
$V_{GS}$	Gate-to-Source Voltage	$\pm 20$	V
$I_{AR}$	Avalanche Current <sup>①</sup>	43	A
$E_{AR}$	Repetitive Avalanche Energy <sup>①</sup>	23	mJ
$dv/dt$	Peak Diode Recovery $dv/dt$ <sup>③</sup>	5.9	V/ns
$T_J$	Operating Junction and Storage Temperature Range	-55 to + 175	°C
$T_{STG}$			
	Mounting torque, 6-32 or M3 screw	10 lbf•in (1.1N•m)	

### Thermal Resistance

	Parameter	Typ.	Max.	Units
$R_{\theta JC}$	Junction-to-Case	—	0.65	°C/W
$R_{\theta CS}$	Case-to-Sink, Flat, Greased Surface	0.50	—	
$R_{\theta JA}$	Junction-to-Ambient	—	62	

www.irf.com

1

3/16/01

# IRF2807

International  
IR Rectifier

## Electrical Characteristics @ $T_J = 25^\circ\text{C}$ (unless otherwise specified)

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
$V_{(BR)DSS}$	Drain-to-Source Breakdown Voltage	75	—	—	V	$V_{GS} = 0V, I_D = 250\mu A$
$\Delta V_{(BR)DSS}/\Delta T_J$	Breakdown Voltage Temp. Coefficient	—	0.074	—	V/°C	Reference to $25^\circ\text{C}, I_D = 1\text{mA}$
$R_{DS(on)}$	Static Drain-to-Source On-Resistance	—	—	13	m $\Omega$	$V_{GS} = 10V, I_D = 43A$ ④
$V_{GS(th)}$	Gate Threshold Voltage	2.0	—	4.0	V	$V_{DS} = V_{GS}, I_D = 250\mu A$
$g_{fs}$	Forward Transconductance	38	—	—	S	$V_{DS} = 50V, I_D = 43A$ ④
$I_{DSS}$	Drain-to-Source Leakage Current	—	—	25	$\mu A$	$V_{DS} = 75V, V_{GS} = 0V$
		—	—	250		$V_{DS} = 60V, V_{GS} = 0V, T_J = 150^\circ\text{C}$
$I_{GSS}$	Gate-to-Source Forward Leakage	—	—	100	nA	$V_{DS} = 20V$
	Gate-to-Source Reverse Leakage	—	—	-100		$V_{GS} = -20V$
$Q_g$	Total Gate Charge	—	—	160	nC	$I_D = 43A$
$Q_{gs}$	Gate-to-Source Charge	—	—	29		$V_{DS} = 60V$
$Q_{gd}$	Gate-to-Drain ("Miller") Charge	—	—	55		$V_{GS} = 10V$ , See Fig. 6 and 13
$t_{d(on)}$	Turn-On Delay Time	—	13	—	ns	$V_{DD} = 38V$
$t_r$	Rise Time	—	64	—		$I_D = 43A$
$t_{d(off)}$	Turn-Off Delay Time	—	49	—		$R_G = 2.5\Omega$
$t_f$	Fall Time	—	48	—		$V_{GS} = 10V$ , See Fig. 10 ④
$L_D$	Internal Drain Inductance	—	4.5	—	nH	Between lead, 6mm (0.25in.) from package and center of die contact
$L_S$	Internal Source Inductance	—	7.5	—		
$C_{iss}$	Input Capacitance	—	3820	—	pF	$V_{GS} = 0V$
$C_{oss}$	Output Capacitance	—	610	—		$V_{DS} = 25V$
$C_{rss}$	Reverse Transfer Capacitance	—	130	—		$f = 1.0\text{MHz}$ , See Fig. 5
$E_{AS}$	Single Pulse Avalanche Energy ②	—	1280 ③	340 ⑥	mJ	$I_{AS} = 50A, L = 370\mu H$

## Source-Drain Ratings and Characteristics

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
$I_S$	Continuous Source Current (Body Diode)	—	—	82 ⑦	A	MOSFET symbol showing the integral reverse p-n junction diode.
$I_{SM}$	Pulsed Source Current (Body Diode) ①	—	—	280		
$V_{SD}$	Diode Forward Voltage	—	—	1.2	V	$T_J = 25^\circ\text{C}, I_S = 43A, V_{GS} = 0V$ ④
$t_{rr}$	Reverse Recovery Time	—	100	150	ns	$T_J = 25^\circ\text{C}, I_F = 43A$
$Q_{rr}$	Reverse Recovery Charge	—	410	610	nC	$di/dt = 100A/\mu s$ ④
$t_{on}$	Forward Turn-On Time	Intrinsic turn-on time is negligible (turn-on is dominated by $L_S + L_D$ )				

### Notes:

- ① Repetitive rating; pulse width limited by max. junction temperature. (See fig. 11)
- ② Starting  $T_J = 25^\circ\text{C}, L = 370\mu H$   
 $R_G = 25\Omega, I_{AS} = 43A, V_{GS} = 10V$  (See Figure 12)
- ③  $I_{SD} \leq 43A, di/dt \leq 300A/\mu s, V_{DD} \leq V_{(BR)DSS}, T_J \leq 175^\circ\text{C}$
- ④ Pulse width  $\leq 400\mu s$ ; duty cycle  $\leq 2\%$ .
- ⑤ This is a typical value at device destruction and represents operation outside rated limits.
- ⑥ This is a calculated value limited to  $T_J = 175^\circ\text{C}$ .
- ⑦ Calculated continuous current based on maximum allowable junction temperature. Package limitation current is 75A.



December 1994

## LM158/LM258/LM358/LM2904 Low Power Dual Operational Amplifiers

### General Description

The LM158 series consists of two independent, high gain, internally frequency compensated operational amplifiers which were designed specifically to operate from a single power supply over a wide range of voltages. Operation from split power supplies is also possible and the low power supply current drain is independent of the magnitude of the power supply voltage.

Application areas include transducer amplifiers, dc gain blocks and all the conventional op amp circuits which now can be more easily implemented in single power supply systems. For example, the LM158 series can be directly operated off of the standard +5V power supply voltage which is used in digital systems and will easily provide the required interface electronics without requiring the additional  $\pm 15V$  power supplies.

### Unique Characteristics

- In the linear mode the input common-mode voltage range includes ground and the output voltage can also swing to ground, even though operated from only a single power supply voltage.
- The unity gain cross frequency is temperature compensated.
- The input bias current is also temperature compensated.

### Advantages

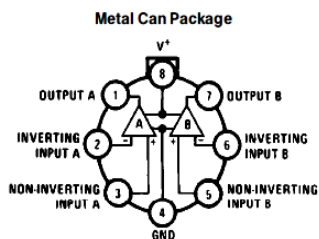
- Two internally compensated op amps in a single package
- Eliminates need for dual supplies
- Allows directly sensing near GND and  $V_{OUT}$  also goes to GND
- Compatible with all forms of logic
- Power drain suitable for battery operation
- Pin-out same as LM1558/LM1458 dual operational amplifier

### Features

- Internally frequency compensated for unity gain
- Large dc voltage gain 100 dB
- Wide bandwidth (unity gain) 1 MHz (temperature compensated)
- Wide power supply range:
  - Single supply 3V to 32V
  - or dual supplies  $\pm 1.5V$  to  $\pm 16V$
- Very low supply current drain (500  $\mu A$ )—essentially independent of supply voltage
- Low input offset voltage 2 mV
- Input common-mode voltage range includes ground
- Differential input voltage range equal to the power supply voltage
- Large output voltage swing 0V to  $V^+ - 1.5V$

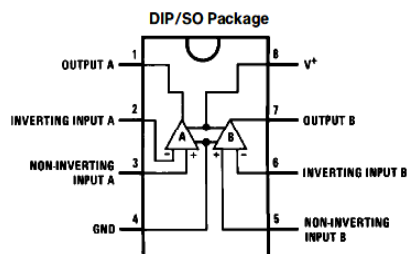
LM158/LM258/LM358/LM2904  
Low Power Dual Operational Amplifiers

### Connection Diagrams (Top Views)



TL/H/7787-1

Order Number LM158AH, LM158AH/883\*,  
LM158H, LM158H/883\*, LM258H or LM358H  
See NS Package Number H08C



TL/H/7787-2

Order Number LM158J, LM158J/883\*,  
LM158AJ or LM158AJ/883\*  
See NS Package Number J08A  
Order Number LM358M, LM358AM or LM2904M  
See NS Package Number M08A  
Order Number LM358AN, LM358N or LM2904N  
See NS Package Number N08E

\*LM158 is available per SMD #5962-8771001  
LM158A is available per SMD #5962-8771002



# PIC16F818/819

## 18/20-Pin Enhanced FLASH Microcontrollers with nanoWatt Technology

### Low Power Features:

- Power Managed modes:
  - Primary RUN XT, RC oscillator, 87  $\mu$ A, 1 MHz, 2V
  - INTRC 7  $\mu$ A, 31.25 kHz, 2V
  - SLEEP 0.2  $\mu$ A, 2V
- Timer1 oscillator 1.3  $\mu$ A, 32 kHz, 2V
- Watchdog Timer 0.7  $\mu$ A, 2V
- Wide operating voltage range:
  - Industrial: 2.0V to 5.5V

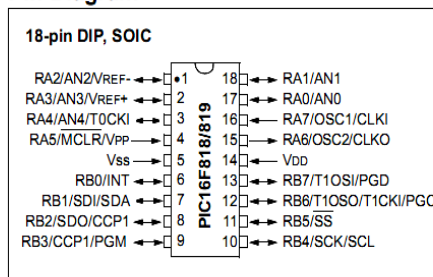
### Oscillators:

- Three Crystal modes:
  - LP, XT, HS up to 20 MHz
- Two External RC modes
- One External Clock mode:
  - ECIO up to 20 MHz
- Internal oscillator block:
  - 8 user selectable frequencies: 31 kHz, 125 kHz, 250 kHz, 500 kHz, 1 MHz, 2 MHz, 4 MHz, 8 MHz

### Peripheral Features:

- 16 I/O pins with individual direction control
- High sink/source current: 25 mA
- Timer0: 8-bit timer/counter with 8-bit prescaler
- Timer1: 16-bit timer/counter with prescaler, can be incremented during SLEEP via external crystal/clock
- Timer2: 8-bit timer/counter with 8-bit period register, prescaler and postscaler
- Capture, Compare, PWM (CCP) module:
  - Capture is 16-bit, max. resolution is 12.5 ns
  - Compare is 16-bit, max. resolution is 200 ns
  - PWM max. resolution is 10-bit
- 10-bit, 5-channel Analog-to-Digital converter
- Synchronous Serial Port (SSP) with SPI™ (Master/Slave) and I<sup>2</sup>C™ (Slave)

### Pin Diagram



### Special Microcontroller Features:

- 100,000 erase/write cycles Enhanced FLASH program memory typical
- 1,000,000 typical erase/write cycles EEPROM data memory typical
- EEPROM Data Retention: > 40 years
- In-Circuit Serial Programming™ (ICSP™) - via two pins
- Processor read/write access to program memory
- Low Voltage Programming
- In-Circuit Debugging via two pins

Device	Program Memory		Data Memory		I/O Pins	10-bit A/D (ch)	CCP (PWM)	SSP		Timers 8/16-bit
	FLASH (bytes)	# Single Word Instructions	SRAM (bytes)	EEPROM (bytes)				SPI	Slave I <sup>2</sup> C	
PIC16F818	1792	1024	128	128	16	5	1	Y	Y	2/1
PIC16F819	3584	2048	256	256	16	5	1	Y	Y	2/1

**TOSHIBA**

TLP250(INV)

TOSHIBA PHOTOCOUPLER GaAlAs IRED &amp; PHOTO-IC

**TLP250(INV)**

TRANSISTOR INVERTER  
 INVERTERS FOR AIR CONDITIONER  
 IGBT GATE DRIVE  
 POWER MOS FET GATE DRIVE

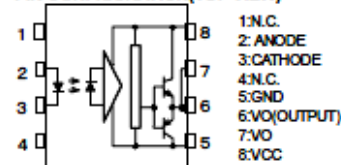
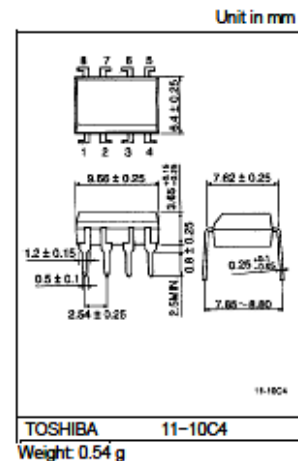
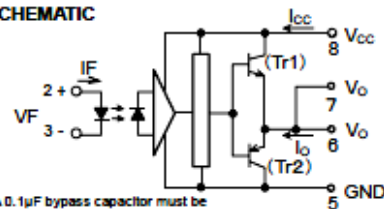
The TOSHIBA TLP250(INV) consists of a GaAlAs light emitting diode and a integrated photodetector.  
 This unit is 8-lead DIP.

TLP250(INV) is suitable for gate driving circuit of IGBT or power MOS FET.

- Input Threshold Current :  $I_V=5\text{mA}(\text{MAX})$
  - Supply Current( $I_{CC}$ ) :  $11\text{mA}(\text{MAX})$
  - Supply Voltage(VCC) :  $10\sim 35\text{V}$
  - Output Current( $I_O$ ) :  $\pm 2.0\text{A}(\text{MAX})$
  - Switching Time( $t_{pLH}/t_{pHL}$ ) :  $0.5\mu\text{s}(\text{MAX})$
  - Isolation Voltage :  $2500\text{Vrms}$
  - UL Recognized : UL1577, File No.E67349
  - Option(D4)
    - VDE Approved : DIN VDE0884/08.92 Certificate No.76823
    - Maximum Operating Insulation Voltage :  $630\text{V}_{PK}$
    - Highest Permissible Over Voltage :  $4000\text{V}_{PK}$
- (Note):When a VDE0884 approved type is needed,  
 Please designate the "Option(D4)"
- Creepage Distance :  $6.4\text{mm}(\text{MIN})$
  - Clearance :  $6.4\text{mm}(\text{MIN})$

**TRUTH TABLE**

		Tr 1	Tr 2
INPUT LED	ON	ON	OFF
	OFF	OFF	ON

**PIN CONFIGURATION(TOP VIEW)****SCHEMATIC**

**TOSHIBA****TLP250(INV)****MAXIMUM RATINGS (Ta=25°C)**

CHARACTERISTIC		SYMBOL	RATING	UNIT		
LED	Forward Current	$I_F$	20	mA		
	Forward Current Derating (Ta=70°C)	$\Delta I_F / \Delta T_a$	-0.36	mA/°C		
	Peak Transient Forward Current (Note 1)	$I_{FPT}$	1	A		
	Reverse Voltage	$V_R$	5	V		
	Junction Temperature	TJ	125	°C		
DETECTOR	"H" Peak Output Current	PW ≤2.5μs, f=15 kHz	(Note 2)	$I_{OH1}$	-1.5	A
				PW≤1.0μs, f=15 kHz	-2.0	
	"L" Peak Output Current	PW≤2.5μs, f=15 kHz	(Note 2)	$I_{OL1}$	+1.5	A
					PW ≤1.0μs, f=15 kHz	
	Output Voltage	(Ta=70°C)	$V_O$	35	V	
				(Ta=85°C)		24
	Supply Voltage	(Ta=70°C)	$V_{CC}$	35	V	
				(Ta=85°C)		24
	Output Voltage Derating (Ta=70°C)		$\Delta V_O / \Delta T_a$	-0.73	V/°C	
	Supply Voltage Derating (Ta=70°C)		$\Delta V_{CC} / \Delta T_a$	-0.73	V/°C	
	Junction Temperature		TJ	125	°C	
Operating Frequency (Note 3)		f	25	kHz		
Operating Temperature Range		T <sub>op</sub>	-20~85	°C		
Storage Temperature Range		T <sub>stg</sub>	-55~125	°C		
Lead Soldering Temperature(10s)		T <sub>sol</sub>	260	°C		
Isolation Voltage (AC, 1min., R.H. ≤60%, Ta=25°C) (Note 4)		BV <sub>s</sub>	2500	Vrms		

(Note 1) : Pulse width PW=1μs,300pps

(Note 2) : Exponential Waveform

(Note 3) : Exponential Waveform  $I_{OH1} \leq -1.0A (\leq 2.5\mu s)$ ,  $I_{OL1} \leq +1.0A (\leq 2.5\mu s)$ 

(Note 4) : Device considered a two terminal device : pins 1,2,3 and 4 shorted together and pins 5,6,7 and 8 shorted together.

(Note 5) : A ceramic capacitor(0.1μF) should be connected from pin 8 to pin 5 to stabilize the operation of the high gain linear amplifier.Failure to provide the bypassing may impair the switching property.The total lead length between capacitor and coupler should not exceed 1cm.

**RECOMMENDED OPERATING CONDITIONS**

CHARACTERISTIC	SYMBOL	MIN	TYP.	MAX	UNIT	
Input Current, ON	$I_{F(OH)}$	7	8	10	mA	
Input Voltage, OFF	$V_{F(OFF)}$	0	—	0.8	V	
Supply Voltage	$V_{CC}$	15	—	30	20	V
Peak Output Current	$I_{OH1} / I_{OL1}$	—	—	±0.5	A	
Operating Temperature	T <sub>op</sub>	-20	25	70	85	°C

## ประวัติผู้เขียน

## 1. ประวัติส่วนตัว

ชื่อ-นามสกุล นายกิตติศักดิ์ หมึกแดง วัน/เดือน/ปีเกิด 17 กรกฎาคม พ.ศ. 2530  
 บิดาชื่อ นายนิวัติ หมึกแดง มารดาชื่อ นางกุนมาลี หมึกแดง  
 ที่อยู่ปัจจุบัน 43/7 ม. 5 ต.ทุ่งมะพร้าว อ.ท้ายเหมือง จ.พังงา รหัสไปรษณีย์ 82120  
 หมายเลขโทรศัพท์ 083-5429197

## 2. ประวัติการศึกษา

ประเภทการศึกษา (Education)	ปีที่จบ	ชื่อสถาบันการศึกษา (Name of Institute)	วิชาเอก (Major)
ประกาศนียบัตรวิชาชีพ	2548	วิทยาลัยเทคนิคพังงา	ไฟฟ้ากำลัง
ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง	2550	วิทยาลัยเทคนิคพังงา	ไฟฟ้ากำลัง
ปริญญาตรี	2553	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอม เกล้าพระนครเหนือ	วิศวกรรมไฟฟ้า

## 1. ประวัติส่วนตัว

ชื่อ-นามสกุล นายอดิศักดิ์ คามพินิจ วัน/เดือน/ปีเกิด 30 มิถุนายน พ.ศ. 2530  
 บิดาชื่อ นายธวัชชัย คามพินิจ มารดาชื่อ นางธิยาภัทร เกษมโสภา  
 ที่อยู่ปัจจุบัน 70 ม.1 ต. โนนบุรี อ. สหสขันธ์ จ. กาฬสินธุ์ รหัสไปรษณีย์ 46140  
 หมายเลขโทรศัพท์ 084-7974589

## 2. ประวัติการศึกษา

ประเภทการศึกษา (Education)	ปีที่จบ	ชื่อสถาบันการศึกษา (Name of Institute)	วิชาเอก (Major)
ประกาศนียบัตรวิชาชีพ	2548	วิทยาลัยเทคนิคกาฬสินธุ์	ไฟฟ้ากำลัง
ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง	2550	วิทยาลัยเทคนิคกาฬสินธุ์	ไฟฟ้ากำลัง
ปริญญาตรี	2553	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอม เกล้าพระนครเหนือ	วิศวกรรมไฟฟ้า