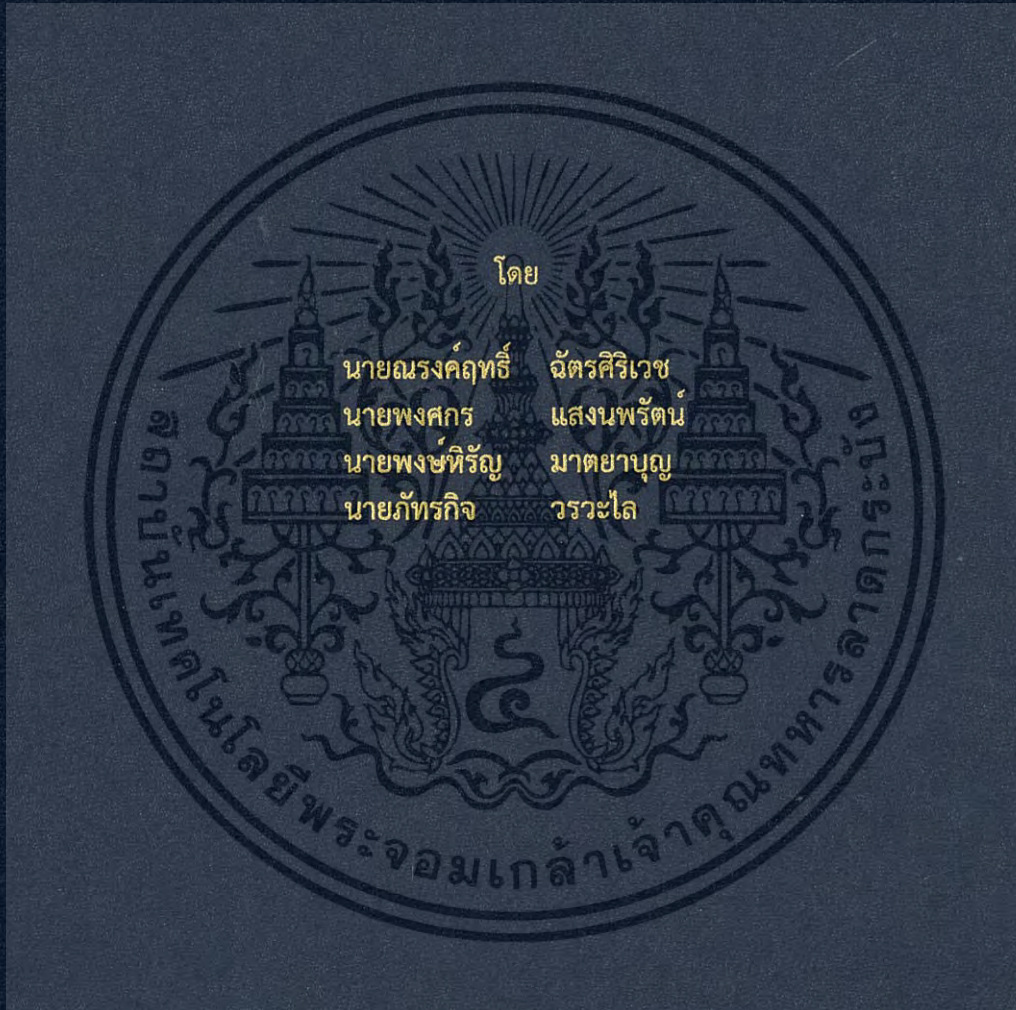


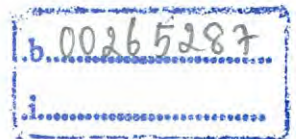
ระบบควบคุมมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านสมรรถนะสูงสำหรับรถยนต์ไฟฟ้า
High performance BLDC Motor Control for Electric Vehicle



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2560

ระบบควบคุมมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านสมรรถนะสูงสำหรับรถยนต์ไฟฟ้า

High performance BLDC Motor Control for Electric Vehicle



TB00111

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

High performance BLDC Motor Control for Electric Vehicle



THIS PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT
FOR THE BACHELOR DEGREE IN ELECTRICAL ENGINEERING
DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2017

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2560

ระบบควบคุมมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านสมรรถนะสูงสำหรับรถยนต์ไฟฟ้า

High performance BLDC Motor Control for Electric Vehicle



อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ร.อ.ดร.วีระเชษฐ ชันเงิน

ดร.วิวัฒน์ เกยุรวงศ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2560

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง ระบบควบคุมมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านสมรรถนะสูงสำหรับรถยนต์ไฟฟ้า

ผู้จัดทำ

1. นายณรงค์ฤทธิ ฉัตรศิริเวช
2. นายพงศกร แสงนพรัตน์
3. นายพงษ์หิรัญ มาตยาบุญ
4. นายภัทรกิจ วรระไล



..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รศ.ร.อ.ดร.วีระเชษฐ์ ชันเงิน)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ดร.วิวัฒน์ เกยรวงศ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบควบคุมมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านสมรรถนะสูงสำหรับรถยนต์ไฟฟ้า

นายณรงค์ฤทธิ์ ฉัตรศิริเวช

นายพงศกร แสงนพรัตน์

นายพงษ์สิทธิ์ มาตยาบุญ

นายภัทรกิจ วรระไล

รศ.ร.อ.ดร.วีระเชษฐ์ ชันเงิน อาจารย์ที่ปรึกษา

ดร.วิวัฒน์ เกียรติวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

ปีการศึกษา 2560

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอเกี่ยวกับการออกแบบระบบควบคุมมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านสมรรถนะสูงสำหรับรถยนต์ไฟฟ้า โดยมุ่งเน้นไปที่ส่วนเฟืองท้ายของรถยนต์ไฟฟ้า ซึ่งจะใช้ระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลังในการควบคุม ประโยชน์ของ Electronic Differential คือ สามารถควบคุมความเร็วของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านให้มีความแตกต่างกันระหว่างล้อหลังด้านซ้ายและล้อหลังด้านขวาให้มีความสมดุลขณะเลี้ยวโค้ง โดยไม่ต้องใช้ระบบเฟืองท้ายที่ต้องอาศัยการขบกัน ซึ่งทำให้เกิดการสูญเสียทางกล ดังนั้นจึงเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบขับเคลื่อนของรถยนต์ไฟฟ้า

High performance BLDC Motor Control for Electric Vehicle

Narongrit Chatsiriwech

Pongsakorn Sangnopparat

Ponghiran Mattayaboon

Pattarakij Worawalai

Assoc.Prof. Dr. Werachet Khan-Ngern Advisor

Dr. Wiwat Keyoonwong Advisor Assistant

ABSTRACT

The project presents about design of high performance BLDC motor control for electric vehicle focusing on rear differential of electric car which uses electronic control system or well known as electronic differential. The advantage of electronic differential is help to adjust wheel speed while cornering by driving two BLDC motor attached to two rear wheels that two wheel speed is different without rear differential system which results in mechanical losses. Therefore, electronic differential using will enhances efficiency of electric vehicle driving system.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาอย่างสูงจาก รองศาสตราจารย์ ร้อยเอก ดร.วิระเชษฐ์ ชันเงิน อาจารย์ที่ปรึกษาควบคุมโครงการ และ ดร.วิวัฒน์ เกียรติวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมโครงการ ที่กรุณาให้คำแนะนำปรึกษา ติดตามความก้าวหน้าในการ ดำเนินการ ตลอดจนปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆด้วยความเอาใจใส่อย่างดียิ่ง เพื่อให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ซึ่งผู้วิจัยตระหนักถึงความตั้งใจจริงและความทุ่มเทของอาจารย์ และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน และขอขอบคุณ คุณนครศักดิ์ แสงศรี เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ ตลอดจนเจ้าหน้าที่ทุกฝ่ายที่เกี่ยวข้องในการทำโครงการวิจัยนี้ ที่ได้คอยประสิทธิ์ประสาทวิชา ให้การสนับสนุนอำนวยความสะดวกในการยืมอุปกรณ์ที่จำเป็นที่ใช้ในการทำโครงการ สถานที่ในการดำเนินการ ตลอดจนอบรมให้ความรู้และแนวคิดต่างๆ ที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อโครงการนี้จนบรรลุผลสำเร็จไปด้วยดี

ท้ายนี้ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้การอุปการะอบรมเลี้ยงดู ตลอดจนส่งเสริมการศึกษาและให้กำลังใจเป็นอย่างดี อีกทั้งขอขอบคุณเพื่อนๆที่ร่วมทุกข์ร่วมสุข และให้ความช่วยเหลือเกื้อกูลกันด้วยดีตลอดมา ตลอดจนบุคคลต่างๆที่ผู้วิจัยไม่สามารถกล่าวนามได้หมดในที่นี้ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความกรุณาและความปรารถนาดีของท่านเป็นอย่างยิ่ง จึงขอกราบขอบพระคุณไว้ในโอกาสนี้ และสุดท้ายขอขอบพระคุณเจ้าของเอกสารและงานวิจัยทุกท่าน ที่ผู้วิจัยได้นำมาอ้างอิงในการทำวิจัย จนกระทั่งงานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

อนึ่ง ผู้วิจัยหวังว่าปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จะมีประโยชน์อยู่ไม่น้อย จึงขอมอบส่วนดีทั้งหมดนี้ให้แก่เหล่าคณาจารย์ ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาจนทำให้ผลงานวิจัยเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่เกี่ยวข้อง และขอมอบความกตัญญูกตเวทิตาคุณ แต่บิดา มารดา และผู้มีพระคุณทุกท่าน สำหรับข้อบกพร่องต่างๆที่อาจจะเกิดขึ้นนั้น ผู้วิจัยขอน้อมรับผิดเพียงผู้เดียว และยินดีที่จะรับฟังคำแนะนำจากทุกท่านที่ได้เข้ามาศึกษา เพื่อเป็นประโยชน์ในการพัฒนางานวิจัยต่อไป

คณะผู้จัดทำ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูปภาพ	VII
สารบัญตาราง	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	1
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ	2
1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงการ	2
1.5 แผนการดำเนินโครงการ	3
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการศึกษา	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 มอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน	5
2.1.1 ทฤษฎีมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน	5
2.1.2 หลักการทำงานของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน	5
2.2 Hall sensors	8
2.3 อินเวอร์เตอร์	9
2.4 แบตเตอรี่	11
2.5 Electronic Differential	14
2.6 ระบบควบคุมแบบวงปิด	16
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	18
2.7.1 Design and Implementation of an Electric Differential for traction application	18
2.7.2 Speed Control of BLDC motor for Electric Vehicle	19
2.7.3 Design and implementation of electronic differential for electric vehicle employing BLDC motors application	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.7.4 Control of the Brushless DC Motor in Combine Mode	21
2.7.5 Analysis of Closed loop Current controlled	23
BLDC Motor Drive	
บทที่ 3 การออกแบบและจำลองการทำงาน	24
3.1 บทนำ	24
3.2 การออกแบบอุปกรณ์เพื่อเก็บค่ามุมจากพวงมาลัย (δ) และ ความเร็ว (ω_v) จากคันเร่ง	24
3.2.1 การตั้งค่าให้ potentiometer เป็น พวงมาลัย	26
3.2.2 การตั้งค่าให้ potentiometer เป็น คันเร่ง	26
3.3 การจำลองการคำนวณเพื่อหาค่าระยะเลี้ยว (R)	27
3.4 การจำลองการคำนวณผลต่างของความเร็วที่ล้อหลังทั้ง 2 ล้อ ($\Delta\omega$) และความเร็วที่ล้อหลังด้านซ้ายและขวา ($\omega_{r_L}, \omega_{r_R}$)	28
3.5 การจำลองการทำงาน Electronic Differential	30
3.6 การออกแบบ Electronic differential	31
3.7 การทดสอบประสิทธิภาพของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน	33
3.7.1 จุดประสงค์ของการทดสอบ	33
3.7.2 อุปกรณ์และเครื่องมือวัดทางไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบ	34
มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน	
3.7.3 ขอบเขตของการทดลอง	34
3.7.4 วิธีการทดลอง	34
3.7.5 สมการที่ใช้ในการคำนวณ	36
3.8 การทดสอบมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านที่มีชุดควบคุม Electronic differential	37
3.8.1 จุดประสงค์การทดสอบ	37
3.8.2 อุปกรณ์และเครื่องมือวัดทางไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบ	37
3.8.3 วิธีการทดสอบ	38
3.9 การทดสอบมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านที่มีชุดคำสั่ง feedback ความเร็ว	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.9.1 จุดประสงค์การทดสอบ	39
3.9.2 อุปกรณ์และเครื่องมือวัดทางไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบ	39
3.9.3 วิธีการทดสอบ	40
บทที่ 4 ผลการทดลอง	42
4.1 ผลการทดลองมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านแบบมีภาระทางกล ที่พิกัด 48 โวลต์	42
4.1.1 วิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ไร้แปรงถ่านแบบมีภาระทางกล	44
4.2 ผลการจำลอง Electronic Differential จาก MATLAB/Simulink	48
4.2.1 ผลการจำลองขณะเลีย่วขวาและซ้ายด้วยมุม 45 องศา เมื่อความเร็วคงที่ 500 rpm	49
4.2.2 ผลการจำลองขณะเลีย่วขวาด้วยมุม 45 องศาคงที่ เมื่อความเร็วเปลี่ยนจาก 500-600 rpm	50
4.2.3 ผลการจำลองขณะเลีย่วขวาและซ้าย ด้วยมุมและ ความเร็วที่เปลี่ยนแปลง	50
4.3 ผลการทดสอบมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านที่มีชุดควบคุม Electronic differential	51
4.3.1 วิเคราะห์ผลการทดสอบ	53
4.4 การทดสอบมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านที่มีชุดคำสั่ง feedback ความเร็ว	53
4.4.1 วิเคราะห์ผลการทดสอบ	55
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	56
เอกสารอ้างอิง	58
ภาคผนวก	59
ภาคผนวก ก บทความทางวิชาการ	60
ภาคผนวก ข ข้อมูลอุปกรณ์	69
ประวัติผู้เขียน	84

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 วงจรควบคุมมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน	6
2.2 แสดงลำดับการจ่ายกระแสไฟฟ้า	6
2.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Hall sensor signal, Back EMF, Output torque, Phase current กับแกนเวลา	7
2.4 Brushless DC motor ง่ายในการใช้ Hall element 1 ตัว	8
2.5 การทำงานพื้นฐานของ Brushless DC motor โดยใช้ Hall element 1 ตัว	8
2.6 อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส สำหรับมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน	9
2.7 ลำดับการทำงานของอุปกรณ์สวิตซ์ที่องค์ต่างๆ ตามตารางที่ 2.1	10
2.8 เปรียบเทียบ จุดเด่น จุดด้อย ของเบตเตอร์ชนิดต่างๆ	11
2.9 เปรียบเทียบ Wh/kg และ Wh/L ของเบตเตอร์ชนิดต่างๆ	12
2.10 Ackerman geometry model	14
2.11 Diagram of closed-loop speed control of BLDC Motor	16
2.12 Closed-loop motor control	17
2.13 Propulsion control chip architecture implemented on a dSPACE DS1103.	18
2.14 โครงสร้างและบล็อกไดอะแกรมของ Electronic Differential	20
2.15 ไดอะแกรมการทำงานของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านอย่างง่าย	21
2.16 Timing diagram สำหรับมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน	21
2.17 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน	22
2.18 Combine mode Driver circuit	22
2.19 แผนภาพระบบควบคุมความเร็วแบบวงปิดสำหรับมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน	23
3.1 การออกแบบเพื่อเก็บค่ามุมเลี้ยว (δ) และความเร็ว (ω_v) จากคันเร่ง	24
3.2 วงจรการทำงานของ potentiometer	25
3.3 การแปลงค่าแรงดันให้เป็นดิจิตอล	25
3.4 การแปลงค่า Step ให้เป็นองศา	26
3.5 การแปลงค่าดิจิตอลให้เป็นเปอร์เซ็นต์ความเร็ว	27
3.6 บล็อกไดอะแกรม จำลองการคำนวณหาค่าระยะเลี้ยว (R)	27
3.7 บล็อกไดอะแกรม จำลองการคำนวณผลต่างของความเร็ว ($\Delta\omega$)	28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา VII และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
3.8	บล็อกไดอะแกรม จำลองการคำนวณความเร็วล้อด้านซ้าย	28
3.9	บล็อกไดอะแกรม จำลองการคำนวณความเร็วล้อด้านขวา	29
3.10	บล็อกไดอะแกรม จำลองการทำงาน Electronic Differential	30
3.11	วงจรขับเคลื่อน Drive circuit	31
3.12	digital potentiometer เบอร์ MCP41010	31
3.13	ออกแบบ Electronic differential	32
3.14	มอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน	33
3.15	การต่อวงจรที่ใช้ในการทดลอง	35
3.16	การทดลองโดยใส่ภาระทางกลที่มอเตอร์	35
3.17	วงจรทดสอบชุดควบคุม Electronic differential	38
3.18	การต่อวงจรที่ใช้ในการทดลอง feedback	40
4.1	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง โทลด์และประสิทธิภาพของ Motor	43
4.2	รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟส a b และกระแสไฟฟ้าเฟส a ขณะมอเตอร์หมุนที่ความเร็วพิกัด และ (ก) ค่าแรงดันไฟฟ้า, (ข) ค่ากระแสไฟฟ้า	45
4.3	รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟส b c และกระแสไฟฟ้าเฟส b ขณะมอเตอร์หมุนที่ความเร็วพิกัด และ (ก) ค่าแรงดันไฟฟ้า, (ข) ค่ากระแสไฟฟ้า	46
4.4	รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟส c a และกระแสไฟฟ้าเฟส c ขณะมอเตอร์หมุนที่ความเร็วพิกัด และ (ก) ค่าแรงดันไฟฟ้า, (ข) ค่ากระแสไฟฟ้า	47
4.5	Electronic Differential จาก MATLAB/Simulink	48
4.6	ผลการจำลองขณะเลีย่วขวาและซ้ายด้วยมุม 45 องศา เมื่อความเร็วคงที่	49
4.7	ผลการจำลองขณะเลีย่วขวาด้วยมุม 45 องศา เมื่อความเร็วเปลี่ยน จาก 500-600 rpm	50
4.8	ผลการจำลองขณะเลีย่วขวาและซ้าย ด้วยมุมและความเร็วที่เปลี่ยนแปลง	50

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แผนการดำเนินงาน	3
2.1 แสดงลำดับสำหรับการขับเคลื่อนเครื่องกระแสดึงไร้แปรงถ่าน ในทิศทางเข็มนาฬิกา	5
2.2 สรุปการเลือกใช้งานแบตเตอรี่	13
2.3 แสดงตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบ Electronic Differential	20
4.1 ตารางบันทึกผลการทดลอง	42
4.2 การจำลองความเร็วจาก MATLAB/Simulink	51
4.3 ทดสอบความเร็วของชุดควบคุม Electronic differential	52
4.4 ผลการทดสอบชุดควบคุม Electronic differential	53



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากในปัจจุบันเริ่มมีการนำรถยนต์ไฟฟ้าที่ใช้แบตเตอรี่มาใช้งานแทนรถยนต์ที่ใช้น้ำมันเป็นเชื้อเพลิง เพราะว่ารถยนต์ที่ใช้น้ำมันนั้นสร้างมลภาวะให้กับสิ่งแวดล้อมแต่สามารถสร้างกำลังทางกลได้สูงกว่ารถยนต์ไฟฟ้า โดยรถยนต์ที่ใช้น้ำมันประเภทขับเคลื่อนล้อหลังจะใช้เฟืองท้าย (Rear Differential) เพื่อปรับความเร็วที่แตกต่างกันระหว่างล้อด้านซ้ายและล้อด้านขวา ให้มีความสมดุลขณะเลี้ยวโค้ง ดังนั้นสำหรับรถยนต์ไฟฟ้าที่สร้างกำลังทางกลได้น้อยกว่ารถยนต์ที่ใช้น้ำมัน จึงจำเป็นต้องลดอุปกรณ์ที่ต้องใช้กำลังทางกลออกไปเพื่อให้การขับเคลื่อนมีประสิทธิภาพในการใช้งานได้ดียิ่งขึ้น

โดยเหตุผลข้างต้นจึงทำให้เริ่มออกแบบชุดขับเคลื่อนที่ Electronics Differential มาใช้สำหรับรถยนต์ไฟฟ้า เพื่อมาแทนอุปกรณ์เฟืองท้าย สำหรับชุดขับเคลื่อน Electronics Differential ประกอบไปด้วย อินเวอร์เตอร์, ไมโครคอนโทรลเลอร์ และมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน ดังนั้นจึงจำลองการสร้างชุดคำสั่งที่ป้อนเข้าไมโครคอนโทรลเลอร์ ให้สามารถรับ, อ่าน และส่งค่าให้กับอินเวอร์เตอร์ เพื่อควบคุมความเร็วของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านที่ล้อด้านซ้ายและล้อด้านขวาซึ่งแตกต่างกันขณะเลี้ยวโค้งให้สมดุลกัน ซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้งานมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านสำหรับรถยนต์ไฟฟ้าและสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานจริงได้ในอนาคตเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการขับเคลื่อนได้ดียิ่งขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ศึกษาการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าโดยใช้มอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน
2. ศึกษาระบบการเลี้ยวของรถไฟฟ้าโดยใช้ Electronic Differential
3. ศึกษาวิธีควบคุมการหมุนของล้อหลังในขณะเลี้ยว โดยขึ้นกับองศาจากพวงมาลัยและความเร็วของล้อ

1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการงาน

1. จำลองและทดสอบการป้อนค่ามุมขณะเสี้ยวให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์
2. จำลองและทดสอบชุดคำสั่งควบคุมความเร็วมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน
3. จำลองและทดสอบชุดคำสั่งควบคุมความเร็วมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านให้สมดุลกันขณะเสี้ยวโค้ง
4. ทดสอบหาประสิทธิภาพสูงสุดของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน

1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงการงาน

1. ศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับการทำงานของอินเวอร์เตอร์
2. ศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับการทำงานของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน
3. ศึกษาวิธีการควบคุมมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านโดยใช้อินเวอร์เตอร์
4. ศึกษาภาษาซี เพื่อออกแบบชุดคำสั่งให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์
5. จำลองการทำงานของชุดขับเคลื่อนผ่านโปรแกรม MATLAB Simulink เพื่อสร้างชุดขับเคลื่อน
6. ออกแบบวงจร Electronic Differential
7. สรุปลงผลการใช้งาน Electronic Differential สำหรับรถยนต์ไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 แผนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงาน

แผนงานในแต่ละสัปดาห์	สิงหาคม				กันยายน				ตุลาคม				พฤศจิกายน				ธันวาคม				มกราคม				กุมภาพันธ์				มีนาคม			
	สัปดาห์ที่				สัปดาห์ที่				สัปดาห์ที่				สัปดาห์ที่				สัปดาห์ที่				สัปดาห์ที่				สัปดาห์ที่							
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1.ศึกษาหลักการทํางานและวิธีการควบคุมของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน	↔																															
2.เตรียมอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบเพื่อหาประสิทธิภาพของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน					↔																											
3.ทำการทดสอบประสิทธิภาพของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน							↔																									
4.จำลองการควบคุมความเร็วและรับค่าองศาจากพวงมาลัยของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน โดยใช้โปรแกรม MATLAB									↔																							
5.ออกแบบและสร้างชุดขับเคลื่อนสำหรับรถยนต์ไฟฟ้า													↔																			
6. ทดสอบชุดขับเคลื่อนและแก้ไขปัญหา																	↔															
7. สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ																													↔			

1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการศึกษา

1. ทำให้เข้าใจหลักการทำงานของอินเวอร์เตอร์และมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน
2. สามารถออกแบบชุดคำสั่งของอินเวอร์เตอร์เพื่อควบคุมมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน
3. ทำให้มีความรู้ ความเข้าใจในการสร้างชุดขับเคลื่อนสำหรับรถยนต์ไฟฟ้า
4. เป็นชุดการเรียนรู้สำหรับผู้สนใจหรือต้องการศึกษาเพื่อต่อยอดได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 มอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน

2.1.1 ทฤษฎีมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน มอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน มีขดลวดอาร์มาเจอร์ที่สเตเตอร์ และใช้แม่เหล็กถาวรสร้างสนามแม่เหล็กแทนขดลวดสนามที่โรเตอร์ ทำให้ไม่ต้องการแหล่งจ่ายไฟภายนอกมาการะดับสร้างสนามแม่เหล็ก โดยมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านจะใช้ Hall sensors ในการตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์ เพื่อส่งสัญญาณป้อนกลับไปอินเวอร์เตอร์ ซึ่งทำให้สามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าได้ถูกต้อง ทำให้มอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านไม่มีแปรงถ่านและไม่มี คอมมิวเตเตอร์ ส่งผลให้ไม่มีความเสียหายที่เกิดจากแปรงถ่านเสียดสีกับ คอมมิวเตเตอร์

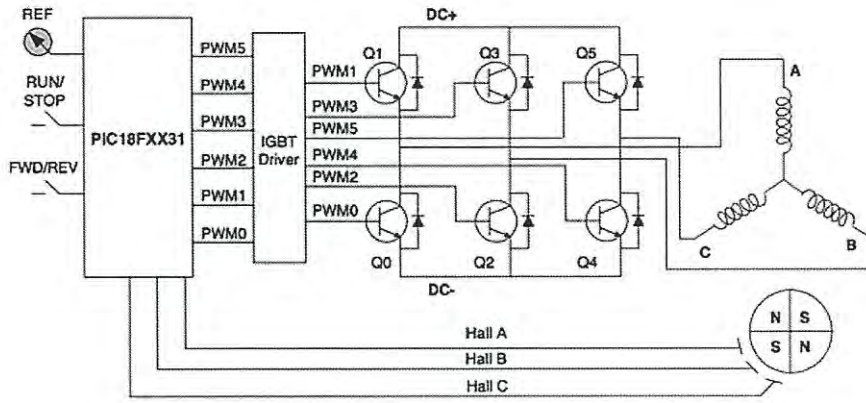
2.1.2 หลักการทำงานของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน อินเวอร์เตอร์จ่ายกระแสไฟฟ้าไปยังขดลวดอาร์มาเจอร์ 3 เฟสที่สเตเตอร์ ทำให้เมื่อมีสนามแม่เหล็กทั้งที่สเตเตอร์และโรเตอร์จะเกิดการผลักและดูดกันของขั้วเหนือ และขั้วใต้ ทำให้เกิดแรงบิดให้โรเตอร์หมุน โดยแรงบิดที่เกิดขึ้นจะขึ้นกับมุมของแกนโรเตอร์และสเตเตอร์ เมื่อมูมมีค่า 90 องศา จะทำให้เกิดแรงบิดสูงสุด

ดังนั้น Hall sensor ทั้ง 3 ตัวจะคอยตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์ทุกๆ 60 องศา ทางไฟฟ้าจนครบหนึ่งลูกคลื่นทางไฟฟ้า(กรณีมอเตอร์ไฟฟ้ามี่ 4 ขั้วแม่เหล็ก มุมทางกล 60 องศาจะตรงกับมุมทางไฟฟ้า 120 องศา) โดยทุกๆ 60 องศาทางไฟฟ้า หนึ่งในสามของ Hall sensor จะมีการเปลี่ยนสถานะ จึงทำให้เกิด 6 เงื่อนไขที่แตกต่างกัน โดยแต่ละเงื่อนไขที่ Hall sensor ตรวจจับและส่งผลกลับไปอินเวอร์เตอร์ ส่งผลให้อินเวอร์เตอร์เกิดลำดับในการสับเปลี่ยนการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดอาร์มาเจอร์ ซึ่งกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้ขดลวดอาร์มาเจอร์ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุน ทำให้โรเตอร์เกิดการหมุน โดยขดลวดที่หนึ่งมีกระแสไหลเข้าเป็นบวก ขดลวดที่สองกระแสไหลออกเป็นลบ และขดลวดที่สามจะไม่ได้รับกระแส

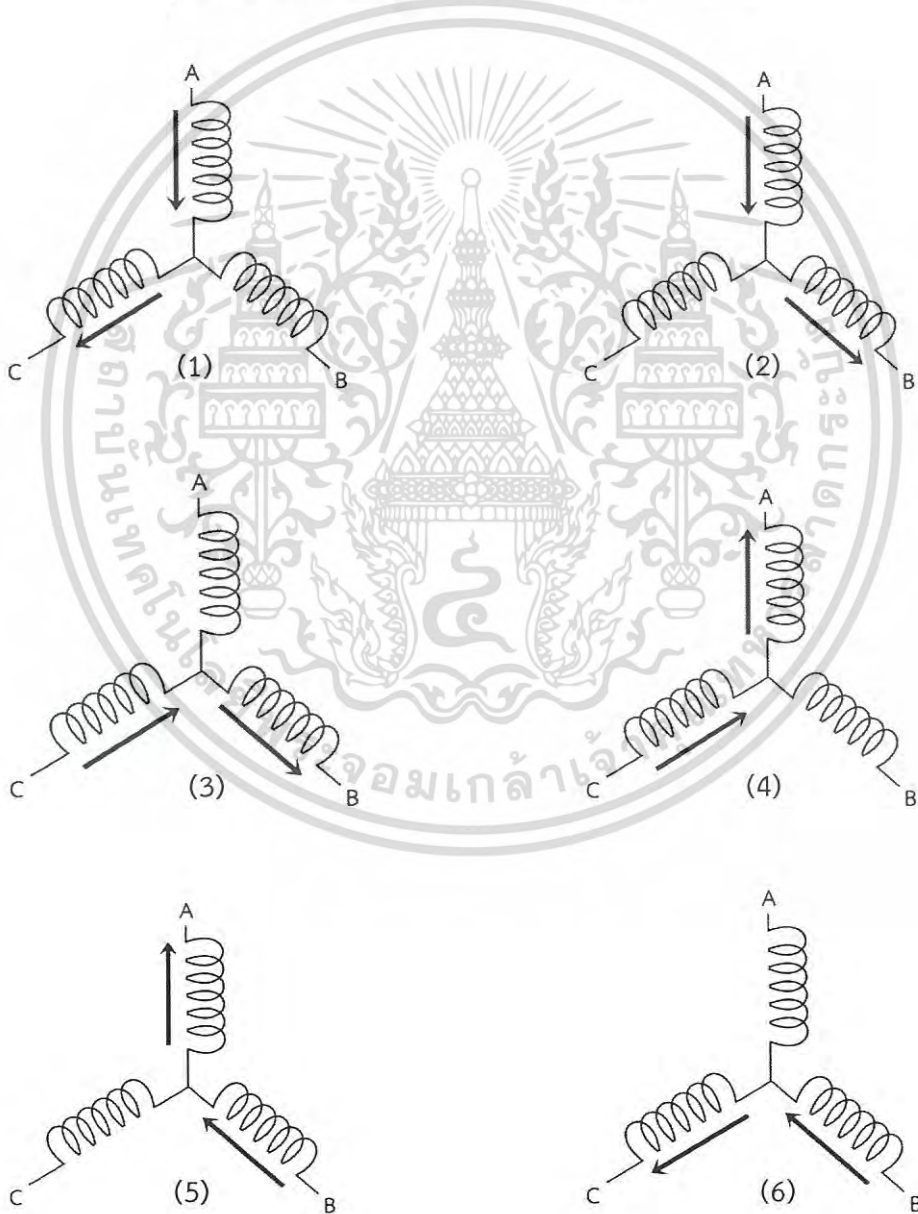
ตารางที่ 2.1 แสดงลำดับสำหรับการขับมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน ในทิศทางเข็มนาฬิกา

Sequence	Hall Sensor Input			Active PWMs		Phase Current		
	A	B	C			A	B	C
1	0	0	1	PWM1(Q1)	PWM4(Q4)	DC+	off	DC-
2	0	0	0	PWM1(Q1)	PWM2(Q2)	DC+	DC-	off
3	1	0	0	PWM5(Q5)	PWM2(Q2)	off	DC-	DC+
4	1	1	0	PWM5(Q5)	PWM0(Q0)	DC-	off	DC+
5	1	1	1	PWM3(Q3)	PWM0(Q0)	DC-	DC+	off
6	0	1	1	PWM3(Q3)	PWM4(Q4)	off	DC+	DC-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

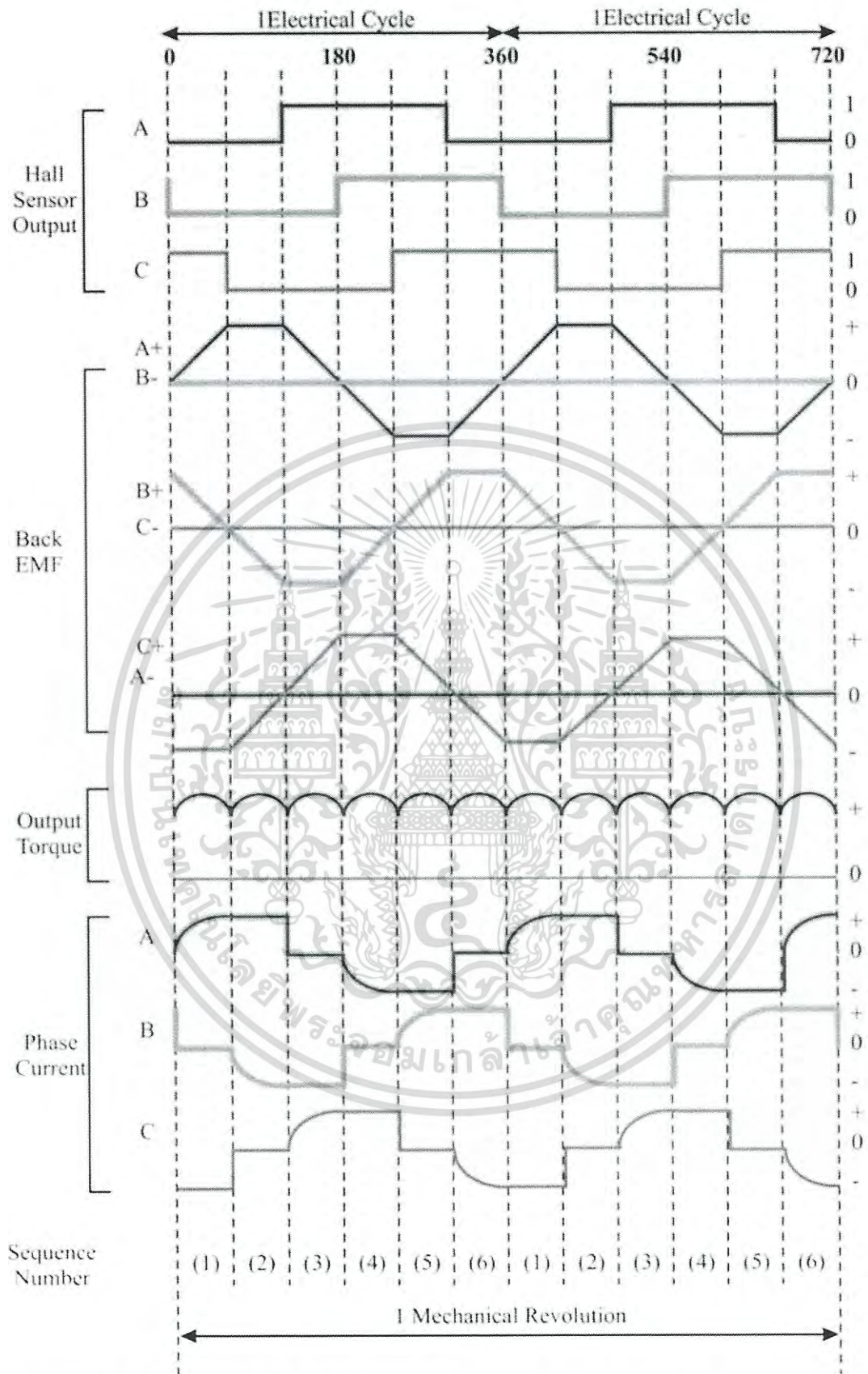


รูปที่ 2.1 วงจรควบคุมมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน



รูปที่ 2.2 แสดงลำดับการจ่ายกระแสไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

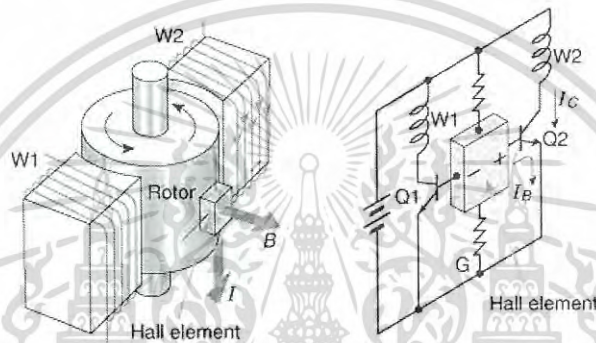


รูปที่ 2.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Hall sensor signal, Back EMF, Output torque, Phase current กับแกนเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 Hall sensors

Hall sensor มีคุณสมบัติเบื้องต้นคือ สามารถตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์ของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านที่ตำแหน่งต่างๆได้ โดยต้องใช้ Hall sensor ทั้งหมด 3 ตัว เมื่อได้ตำแหน่งของโรเตอร์แล้ว Hall sensor จะส่งค่า High หรือ Low กลับไปที่ไมโครคอนโทรลเลอร์ ไมโครคอนโทรลเลอร์จะส่งค่าให้กับทรานซิสเตอร์เพื่อให้เกิดการจ่ายกระแสที่เหมาะสมเข้าขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน ดังนั้นเมื่อตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์ที่แตกต่างกันได้ ทำให้เกิดลำดับของการจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าขดลวดสเตเตอร์จึงส่งผลให้โรเตอร์หมุน จากรูปที่ 2.4 เป็นตัวอย่างการทำงานของ Hall sensor 1 ตัว อย่างง่ายโดยสัญญาณที่ออกจาก Hall sensor จะสั่งให้ทรานซิสเตอร์ 2 ตัวทำงานเพื่อไปควบคุมกระแสไฟฟ้าในขดลวดอาร์มาเจอร์ W1 และ W2



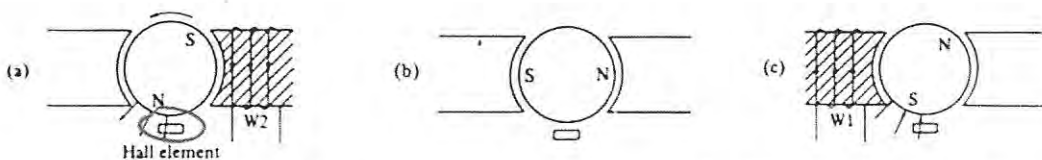
รูปที่ 2.4 Brushless DC motor อย่างง่ายในการใช้ Hall element 1 ตัว

การทำงานพื้นฐานของ Brushless DC motor โดยใช้ Hall sensor 1 ตัว จะแสดงในรูปที่ 2.5 ดังนี้

(1) เมื่อ Hall sensor ตรวจจับเจอขั้วเหนือ ทำให้ทรานซิสเตอร์ Q2 อยู่ในสถานะ ON จะทำให้ขดลวด W2 เกิดขั้วได้ออกมาทำให้เกิดการผลักรันของขั้วใต้ส่งผลให้โรเตอร์หมุนในทิศทวนเข็มนาฬิกา

(2) เมื่อ Hall sensor ไม่ตรวจเจอสนามแม่เหล็ก ทำให้ทรานซิสเตอร์อยู่ในสถานะ OFF ส่งผลให้ไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลในขดลวด W1 และ W2 แต่โรเตอร์ยังคงหมุนเนื่องจากมีความเฉื่อยจากการเคลื่อนที่ในข้อแรก

(3) เมื่อ Hall element ตรวจจับเจอขั้วใต้ จะทำให้ขดลวด W1 เกิดขั้วได้ออกมาทำให้เกิดการผลักรันของขั้วใต้ส่งผลให้โรเตอร์หมุนในทิศทวนเข็มนาฬิกา

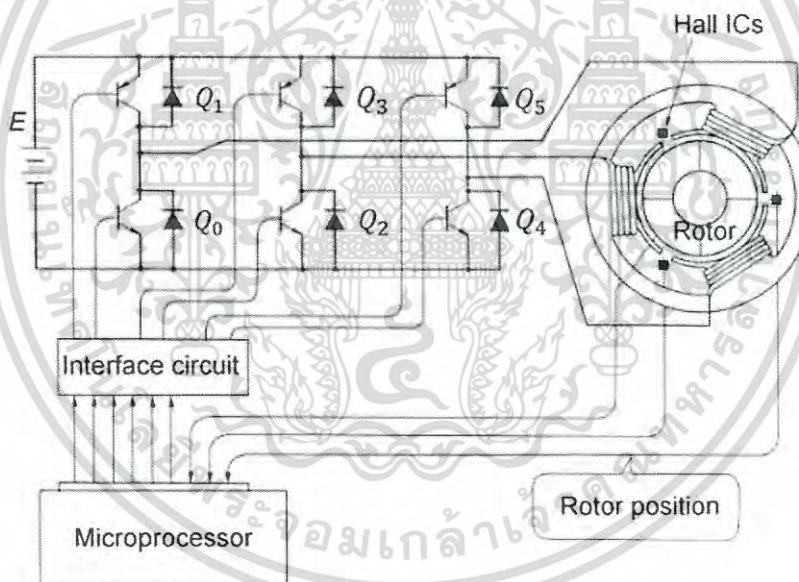


รูปที่ 2.5 การทำงานพื้นฐานของ Brushless DC motor โดยใช้ Hall element 1 ตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

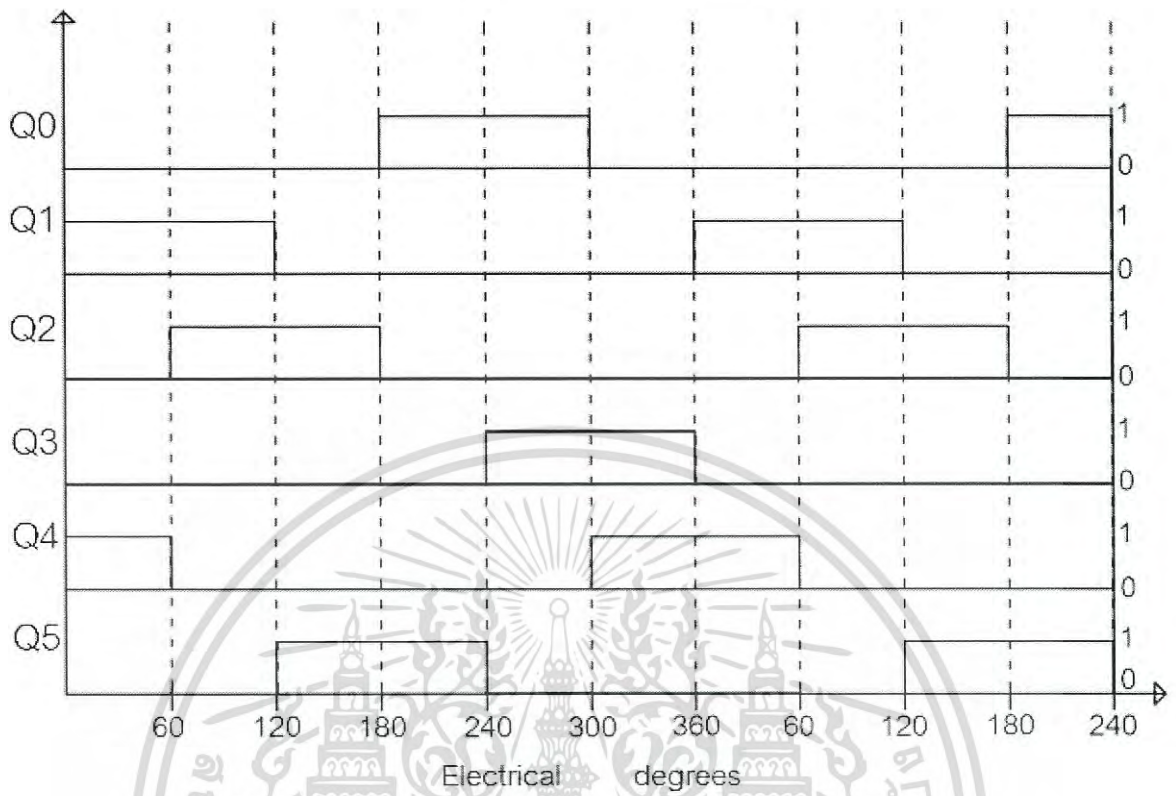
2.3 อินเวอร์เตอร์

อินเวอร์เตอร์มีหลักการทำงานคือ เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ และสามารถควบคุมขนาดและความถี่ของแรงดันขาออกได้ โดยอินเวอร์เตอร์ที่เลือกใช้สำหรับควบคุมความเร็วมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน คือ อินเวอร์เตอร์ชนิด 3 เฟส ประกอบไปด้วยอุปกรณ์สวิตช์ทั้งหมด 6 ตัว ส่วนใหญ่จะเลือกใช้อุปกรณ์สวิตช์ซึ่งเป็น Mosfet หรือ IGBT โดยหลักการทำงานในการควบคุมสวิตช์ทั้ง 6 ตัวนั้น จะเริ่มจาก Hall sensor จะตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์ตามที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น จากนั้นจะส่งค่าย้อนกลับไปที่ยังวงจรควบคุมที่ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ไมโครคอนโทรลเลอร์จะส่งสัญญาณ PWM ให้กับวงจรขับเคลื่อนเพื่อสั่งให้สวิตช์ทำงาน โดยสวิตช์ในแต่ละกิ่งที่ต่อเข้ามอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านจะไม่ทำงานพร้อมกัน สัญญาณที่ส่งมาให้อุปกรณ์สวิตช์จะมีทั้งหมด 6 กรณี ในแต่ละกรณีสวิตช์จะทำงานแค่ 2 ตัว ทำให้เกิดกระแสไหลผ่านขดลวดมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านแค่ 2 ขด จึงส่งผลให้โรเตอร์หมุน โดยสัญญาณ PWM จะเป็นสัญญาณที่ใช้ปรับแรงดันเฉลี่ยเข้ามอเตอร์เพื่อทำให้สามารถควบคุมความเร็วมอเตอร์ได้ โดยความถี่ก็จะเปลี่ยนไปตามความเร็วของมอเตอร์ ทำให้ตรงตามวัตถุประสงค์ของอินเวอร์เตอร์คือ สามารถปรับขนาดและความถี่ได้



รูปที่ 2.6 อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส สำหรับมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน

1 = MOSFET ON , 0 = MOSFET OFF



รูปที่ 2.7 ลำดับการทำงานของอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งที่องศาต่างๆ ตามตารางที่ 2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 แบตเตอรี่

แบตเตอรี่ (Battery) คือ อุปกรณ์ที่ใช้ในการแปลงพลังงานเคมีไปเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยอาศัยเซลล์ไฟฟ้าเคมีในการเปลี่ยนแปลงพลังงานซึ่งอาจจะใช้เพียงหนึ่งเซลล์หรือมากกว่า การใช้งานแบตเตอรี่จะทำได้โดยการเชื่อมต่อแบตเตอรี่เข้ากับอุปกรณ์ไฟฟ้า เพื่อให้กำลังงาน

ประเภทของแบตเตอรี่

แบตเตอรี่สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่

1. แบตเตอรี่ปฐมภูมิ คือ แบตเตอรี่ที่สามารถนำมาใช้งานได้เพียงครั้งเดียว ไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีก โดยขั้วไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปในการเกิดปฏิกิริยาจะไม่สามารถคืนรูปนำกลับมาใช้งานได้อีก แบตเตอรี่ชนิดนี้เหมาะสำหรับใช้งานในอุปกรณ์ที่มีขนาดเล็ก เช่น แบตเตอรี่อัลคาไลน์

2. แบตเตอรี่ทุติยภูมิ คือ แบตเตอรี่ที่สามารถนำกลับมาใช้งานได้ สามารถอัดและคายประจุใหม่ได้หลายครั้ง แบตเตอรี่ชนิดนี้สามารถชาร์จประจุไฟฟ้าใหม่ได้ก็ต่อเมื่อไฟจากแบตเตอรี่หมด ตัวอย่างเช่น ลิเธียมไอออน

เปรียบเทียบ จุดเด่น จุดด้อย ของแบตเตอรี่ชนิดต่างๆ

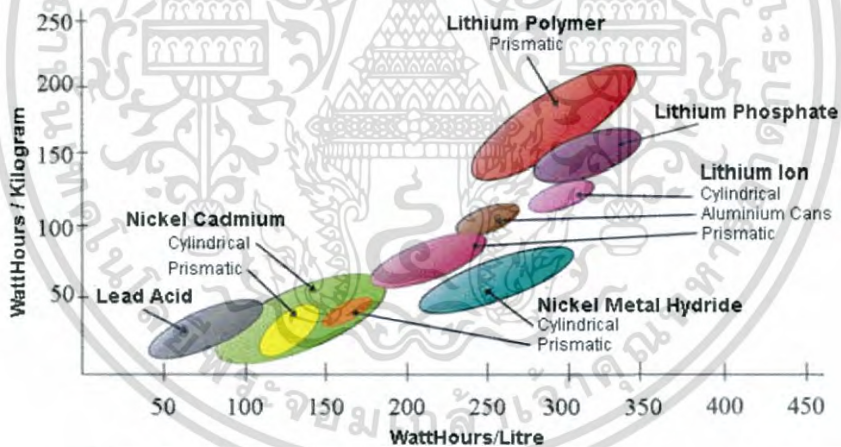
		Lead-acid	Nickel-cadmium	Nickel-metal-hydride	Lithium-ion		
		sealed	sealed		cobalt	manganese	phosphate
gravimetric energy density	Wh/kg	30-50	45-80	60-120 250kJ/kg	150-190	100-135	90-120
volumetric energy density	Wh/L	60-70	50-150	140-300 360MJ/m ³	270		
power density	W/kg	180	150	250-1000	1800		
cell voltage	V	2	1.25	1.25	3.6	3.7	3.3
internal resistance	mΩ/cell	20	30	40	100	50	35
load current	Peak, C	5	20	5	< 3	> 40	> 35
	Optimum Depth of discharge	0.2 80%	1 100%	0.5 80%	< 1 80%	< 10 80%	< 8 80%
operating temperature range	°C	-20 to 60	-40 to 60	-20 to 60		-20 to 60	
cycle lifetime	80% capacity	250	1500	400	400	400	>1000

รูปที่ 2.8 เปรียบเทียบ จุดเด่น จุดด้อย ของแบตเตอรี่ชนิดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

		Lead-acid	Nickel-cadmium	Nickel-metal-hydride	Lithium-ion		
		sealed	sealed		cobalt	manganese	phosphate
fast charge	hr	8	1	3	2	> 1	> 1
Charge V limit	V	2.4	constant I	constant I	4.2	4.2	3.7
overcharge tolerance		high	moderate	low	Low - no trickle charge tolerated		
self-discharge	%/month @ 20°C	5	20	30	< 10		
maintenance	discharge to months	6	1V/cell 2	1V/cell 3	Not required		
cool storage	% charge top-up yr	100 ½	40 ½	40 ½	40 Not required		
safety		Thermally stable	Fuse Thermally stable	Fuse Thermally stable	Mandatory protection Stable to 150°C	Protection needed Stable to 150°C	protection needed Stable to 150°C
electrolyte	liquid	H ₂ SO ₄ 4M	KOH 7M	KOH 6M	LiPF ₆ + solvent		
toxicity		Toxic lead and acid	Highly toxic	Low toxicity, recyclable	Low toxicity		
cost		low	low	medium	high		
commercialisation		1970	1950	1990	1991	1996	2006
other features		Heavy Inexpensive Rugged	Long-life Durable	Bulky High pressure	Low weight Low maintenance Needs temperature monitoring Needs over/under V and I protection		

รูปที่ 2.8 (ต่อ) เปรียบเทียบ จุดเด่น จุดด้อย ของแบตเตอรี่ชนิดต่างๆ



รูปที่ 2.9 เปรียบเทียบ Wh/kg และ Wh/L ของแบตเตอรี่ชนิดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 สรุปการเลือกใช้งานแบตเตอรี่

	ตะกั่วกรด	นิเกิล เมทัลไฮไดรด์ Ni-MH	ลิเทียม	
			โพลีเมอร์	ไอออนฟอสเฟต
พลังงาน/กก. (Wh/kg)	30-40	30-80	130-200	90-120
พลังงาน/ลิตร (Wh/L)	60-75	140-300	300	220
อายุการใช้งาน	300-500	500-1,000	500-1,000	>2,000
ความปลอดภัย	ระวังมลพิษ	ระวังโอเวอร์ ชาร์ต	ติดไฟได้	ดีมาก
ราคา(เท่า)	1	2-3	3-5	5-10

จากตารางพบว่า แบตเตอรี่แบบลิเทียมไอออนจะให้ปริมาณพลังงานมากกว่า แบตเตอรี่ชนิดอื่น ๆ นอกจากนี้ยังมีความปลอดภัยสูง แต่อาจจะมีข้อเสียตรงที่ราคาค่อนข้างแพงเมื่อเทียบกับแบตเตอรี่ชนิดอื่น ๆ ซึ่งในที่นี้เราจะเลือกใช้แบตเตอรี่แบบลิเทียมไอออนในรถยนต์ไฟฟ้า

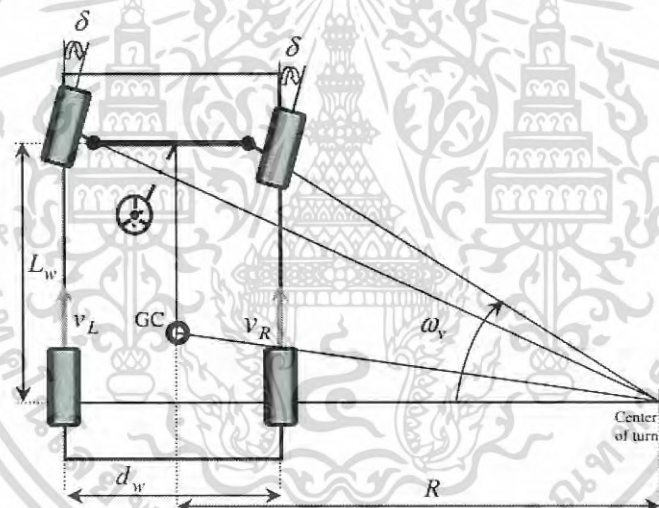
Lithium-ion battery

แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน ถ้านำไปใช้งานอย่างผิดวิธีจะทำให้แบตเตอรี่เสียหายได้ง่าย ในการใช้งานจึงจำเป็นต้องทำการติดตั้งวงจรป้องกัน เพื่อควบคุมให้แบตเตอรี่ทำงานอยู่ในย่านที่ปลอดภัย วงจรป้องกันของแบตเตอรี่จะทำหน้าที่ในการจำกัดแรงดันไฟขณะชาร์จไม่ให้เกินขีดจำกัด โดยหน้าที่ของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนจะเป็นแหล่งพลังงานไฟฟ้าให้กับรถยนต์ไฟฟ้า โดยเลือกใช้ขนาด 48 V เพื่อจ่ายให้กับระบบขับเคลื่อนรถยนต์ไฟฟ้า และขนาด 12 V เพื่อจ่ายให้กับหลอดไฟเช่น ไฟเลี้ยวและไฟเบรก เป็นต้น

2.5 Electronic Differential

การเคลื่อนที่ของรถโดยทั่วไปขณะเลี้ยว จะเป็นการให้พลังงานกลไปที่ล้อโดยตรง ทำให้เกิดการหมุนที่ต่างกัน แต่ในกรณีของการขับเคลื่อนด้วยระบบไฟฟ้าจะเป็นการสั่งงานมอเตอร์ที่อยู่ติดกับล้อให้หมุนตามที่ต้องการ โดยการควบคุมเกิดจากการรับค่าอินพุตเป็นความเร็วของล้อ และมุมที่เกิดจากการเลี้ยวของพวงมาลัย ซึ่งในการหมุนแต่ละครั้งของพวงมาลัยจะทำให้ความเร็วของล้อทั้ง 2 ซ้างมีความเร็วที่แตกต่างกัน ไม่ว่าจะความเร็วขณะนั้นจะมากหรือน้อย โดยอุปกรณ์ควบคุมนี้มีชื่อว่า Electronics Differential

ชุดขับเคลื่อนที่เรียกว่า Electronics Differential จะใช้สำหรับรถยนต์ไฟฟ้า เพื่อมาแทนอุปกรณ์เฟืองท้าย (Rear Differential) ซึ่งช่วยในเรื่องการปรับความเร็วของล้อขณะเลี้ยวโค้ง โดยการขับเคลื่อน BLDC motor 2 ตัว ที่ติดอยู่ที่ด้านหลังทั้ง 2 ล้อ โดยล้อด้านในและด้านนอกจะมีความเร็วในการหมุนที่แตกต่างกันขณะเลี้ยว เนื่องจากล้อด้านในมีรัศมีการเลี้ยวที่น้อยกว่าล้อด้านนอก โดย Electronic Differential จะใช้พวงมาลัยและความเร็วล้อในการส่งสัญญาณ เพื่อควบคุมความเร็วในแต่ละล้อ ตามรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 Ackerman geometry model

สมการ : ความเร็วของล้อทั้ง 2 ซ้าง

$$V_L = \omega_v \left(R + \frac{d_w}{2} \right) \quad (2.1)$$

$$V_R = \omega_v \left(R - \frac{d_w}{2} \right) \quad (2.2)$$

สมการ : ระยะวงเลี้ยว หรือ ระยะจากจุดศูนย์กลางวงถึงจุดศูนย์กลางวงเลี้ยว

$$R = \frac{L_w}{\tan \delta} \quad (2.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการ : ความเร็วเชิงมุมของทั้ง 2 ล้อเมื่อเทียบกับวงเลี้ยว

$$\omega_{r_L} = \frac{L_w + (d_w/2) \tan \delta}{L_w} \omega_v \quad (2.4)$$

$$\omega_{r_R} = \frac{L_w - (d_w/2) \tan \delta}{L_w} \omega_v \quad (2.5)$$

สมการ : ความเร็วเชิงมุมที่แตกต่างกันของ 2 ล้อ

$$\Delta\omega = \omega_{r_L} - \omega_{r_R} = \frac{d_w \tan \delta}{L_w} \omega_v \quad (2.6)$$

$$\delta > 0 \Rightarrow \text{Turn right}$$

$$\delta = 0 \Rightarrow \text{Straight ahead} \quad (2.7)$$

$$\delta < 0 \Rightarrow \text{Turn left}$$

สมการ : ความเร็วเชิงมุมของล้อซ้ายและล้อขวาขณะเลี้ยว

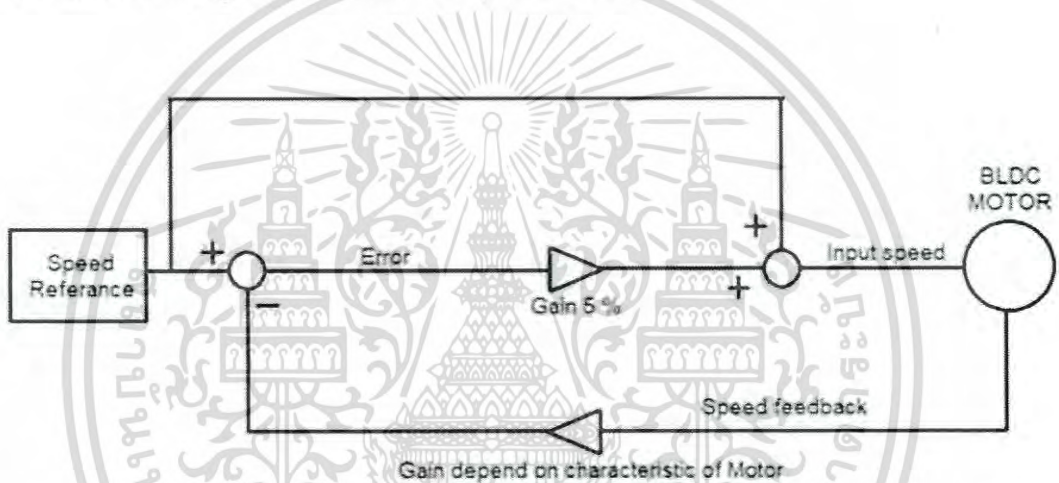
$$\omega_{r_L}^* = \omega_v + \frac{\Delta\omega}{2} \quad (2.8)$$

$$\omega_{r_R}^* = \omega_v - \frac{\Delta\omega}{2} \quad (2.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 ระบบควบคุมแบบวงปิด

ระบบควบคุมที่ปริมาณเอาต์พุตไม่แปรผันต่อปริมาณอินพุตที่ป้อนให้แก่ระบบในกระบวนการควบคุมจะถูกเรียกว่า “ระบบควบคุมแบบวงเปิด” ซึ่งเป็นระบบปลายเปิดที่ไม่มีการป้อนกลับของข้อมูล แต่จุดประสงค์หลักโดยทั่วไปของระบบควบคุมทางไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ คือ การวัด ตรวจสอบ และควบคุมกระบวนการ ซึ่งการที่จะควบคุมกระบวนการประมวลผลได้อย่างถูกต้องและแม่นยำสามารถทำได้โดย การตรวจสอบเอาต์พุตของกระบวนการ และทำการป้อนกลับเอาต์พุตที่ได้เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับเอาต์พุตที่เกิดขึ้นจริงกับเอาต์พุตที่ต้องการเพื่อลดข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้น และในกรณีที่ระบบควบคุมถูกรบกวน ระบบจะมีการป้อนกลับเอาต์พุตที่ได้กลับไปยังจุดเริ่มต้นที่ถูกรบกวนหรือจุดที่ต้องการเพื่อลดข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้น ปริมาณของเอาต์พุตที่ตรวจสอบได้ถูกเรียกว่า “สัญญาณป้อนกลับ” และประเภทของระบบควบคุมที่ใช้สัญญาณป้อนกลับเพื่อควบคุมและปรับระบบของตนเองถูกเรียกว่า “ระบบควบคุมแบบวงปิด”



รูปที่ 2.11 Diagram of closed-loop speed control of BLDC Motor

ลักษณะที่สำคัญหรือหน้าที่ของการควบคุมแบบวงปิด คือ

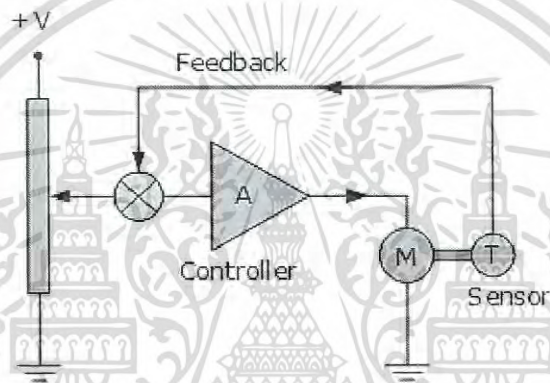
- เพื่อลดข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้น โดยการปรับอินพุตของระบบโดยอัตโนมัติ
- เพื่อปรับปรุงเสถียรภาพของระบบที่ไม่เสถียร
- เพื่อเพิ่มหรือลดความไวของระบบ
- เพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับกระบวนการหรือระบบที่ถูกรบกวนจากภายนอก
- เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพที่เชื่อถือได้และสามารถทำซ้ำได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การควบคุมมอเตอร์โดยระบบควบคุมแบบวงปิด

เมื่อพิจารณาถึงระบบควบคุมของ DC motor ถ้าเราเชื่อมต่อตัวทรานสดิวเซอร์ที่ใช้ตรวจจับความเร็ว เช่น Tachometer ไปยังเพลลาของ DC motor ทำให้สามารถตรวจจับความเร็วของตัวมอเตอร์และส่งสัญญาณที่เป็นสัดส่วนกับความเร็วของมอเตอร์กลับไปยัง Amplifier Tachometer หรือที่เรียกว่า Tacho-generator เป็น Permanent-magnet DC generator อย่างง่าย ซึ่งให้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขาออกตามสัดส่วนกับความเร็วของมอเตอร์

จากรูปที่ 2.19 ตำแหน่งของ Potentiometers slider จะแสดงถึงอินพุต (θ_i) ซึ่งจะถูกขยายโดย Amplifier (ตัวควบคุม) เพื่อที่จะขับเคลื่อน DC motor ที่ความเร็วที่กำหนดไว้ M แสดงถึงเอาต์พุต (θ_o) ของระบบ และ T (Tachometer) แสดงถึงการป้อนกลับแบบวงปิดไปยังตัวควบคุม ซึ่งความแตกต่างระหว่างการตั้งค่าแรงดันไฟฟ้าเข้ากับระดับแรงดันไฟฟ้าป้อนกลับทำให้เกิดสัญญาณความผิดพลาดขึ้น



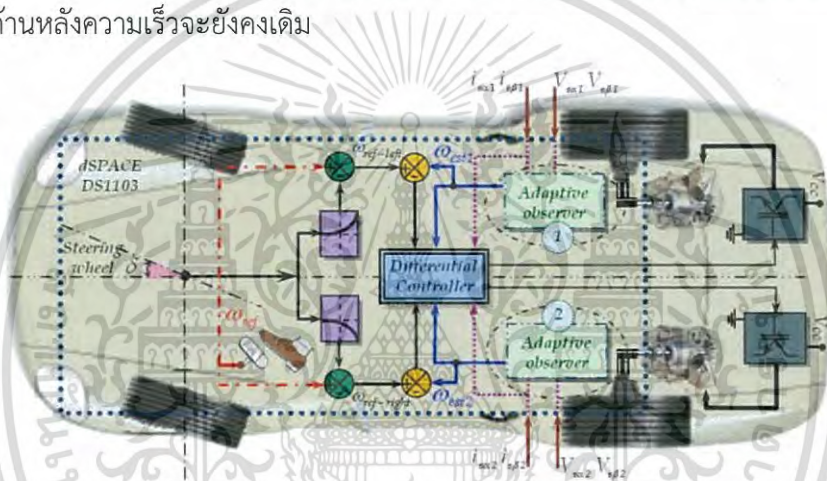
รูปที่ 2.12 Closed-loop motor control

ระบบควบคุมแบบวงปิด มีข้อดีกว่าระบบควบคุมแบบวงเปิดอย่างมาก ข้อดีประการหนึ่ง คือ การใช้กระบวนการป้อนกลับ หรือระบบควบคุมแบบวงปิดจะทำให้การตอบสนองของระบบไม่ได้รับผลกระทบมากนักจากสัญญาณรบกวนภายนอก และจากความผันแปรของพารามิเตอร์ของระบบ เช่น อุณหภูมิ เป็นต้น ดังนั้นจึงเป็นไปได้ที่จะเลือกใช้วัสดุอุปกรณ์หรือองค์ประกอบในการทำงานที่ราคาไม่แพง และไม่ต้องมีแม่นยำมากนัก เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ถูกต้องและแม่นยำในกระบวนการทำงานที่กำหนด

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.7.1 Design and Implementation of an Electric Differential for traction application [1] การใช้งาน Electric Differential (ED) ถือได้ว่าเป็นความก้าวหน้าทางด้านเทคโนโลยีในการออกแบบยานยนต์ ซึ่งมีความสอดคล้องกับแนวคิดของรถยนต์ไฟฟ้าเป็นอย่างมาก Electric Differential มีข้อได้เปรียบอย่างมากในเรื่องของการสูญเสียภาระทางกลน้อย และมีการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าจากมอเตอร์ซึ่งมีขนาดเล็กและเบาไปยังล้อโดยตรง ซึ่งอาจจะส่งผ่านกำลังจากมอเตอร์ไปยังฟันเฟืองก่อน แล้วให้ฟันเฟืองเป็นตัวขับล้อให้หมุน หรือส่งผ่านกำลังจากมอเตอร์ไปยังล้อโดยตรงก็ได้ ในงานวิจัยนี้เกี่ยวข้องกับ Electric Differential System (EDS) สำหรับรถยนต์ไฟฟ้า ซึ่งขับเคลื่อนโดยใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำสองตัวควบคุมล้อหลังขณะเคลื่อนที่

ถ้าวล้อไฟฟ้าเลี้ยวขวา ล้อซ้ายด้านหลังจะหมุนด้วยความเร็วที่เพิ่มขึ้น และล้อขวาด้านหลังความเร็วจะยังคงเดิม, ถ้าวล้อไฟฟ้าเลี้ยวซ้าย ล้อขวาด้านหลังจะหมุนด้วยความเร็วที่เพิ่มขึ้น และล้อซ้ายด้านหลังความเร็วจะยังคงเดิม



รูปที่ 2.13 Propulsion control chip architecture implemented on a dSPACE DS1103.

2.7.2 Speed Control of BLDC motor for Electric Vehicle [2]

การหมุนของมอเตอร์ BLDC ถูกควบคุมโดยการสับเปลี่ยนกระแสไฟฟ้า ขดลวดสเตเตอร์ถูกกระตุ้นเป็นลำดับเพื่อหมุนมอเตอร์ เราควรรู้ตำแหน่งของโรเตอร์เพื่อที่จะสับเปลี่ยนกระแสไฟฟ้าผ่านขดลวดตามลำดับ แม่เหล็กถาวรของมอเตอร์ BLDC ต้องทำงานร่วมกับระบบตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์

มอเตอร์ BLDC จะตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์โดยใช้ hall sensor 3 ตัว โดยทั้ง 3 ตัวจะได้รับค่าความเป็นไปได้อยู่ 6 สถานะ hall sensor 3 ตัวจะถูกวางไว้ในมอเตอร์ โดยห่างกัน 120 องศา hall sensor แต่ละอันจะให้ค่าเอาต์พุตสูงหรือต่ำขึ้นอยู่กับขั้วแม่เหล็กที่อยู่ใกล้ๆมัน ตำแหน่งของโรเตอร์สามารถวิเคราะห์ได้จากเอาต์พุตของ hall sensor 3 ตัว แรงดันของมอเตอร์ 3 เฟสจะถูกเปลี่ยนเนื่องจาก output ของ hall sensor

ในการปรับระดับแรงดันบนมอเตอร์ มีเพียงแรงดันค่าเดียวที่ควบคุมความเร็วของมอเตอร์ เมื่อใช้ PWM เอาต์พุต ควบคุมสวิตช์ 6 ตัวของ three phase bridge เราสามารถปรับระดับแรงดันของมอเตอร์ได้ง่ายๆโดยเปลี่ยน duty cycle ของสัญญาณ three phase, BLDC จะถูกควบคุมความเร็วโดยใช้ทั้งแบบ open loop และ close loop

การควบคุมแบบ open loop จะใช้ควบคุมความเร็วของมอเตอร์โดยควบคุม duty cycle ของสัญญาณ PWM ซึ่งต่อกับวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์โดยตรง duty cycle ของสัญญาณ PWM ควบคุมเวลาเปิดของ power switch ใน half bridge ของวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์และจะควบคุมแรงดันเฉลี่ยที่จ่ายให้กับขดลวดของมอเตอร์

การควบคุมแบบ close loop ควบคุมความเร็วของมอเตอร์โดยควบคุม duty cycle ของสัญญาณ PWM ซึ่งต่อกับวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์โดยตรง

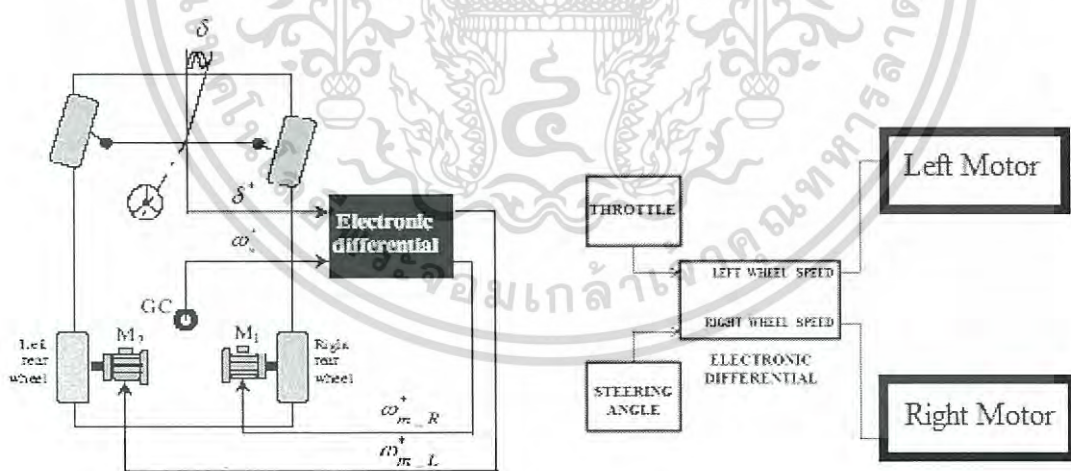
ความแตกต่างหลักๆของ 2 ระบบนี้คือ การควบคุมแบบ open loop จะพิจารณาเฉพาะอินพุตของ speed control เพื่อใช้อัพเดท PWM duty cycle ในทางตรงกันข้าม การควบคุมแบบ close loop จะพิจารณาทั้ง speed input control และความเร็วของมอเตอร์ที่ส่งไปยัง controller เพื่ออัพเดท PWM duty cycle และความเร็วมอเตอร์ตามลำดับ PID controller คือการควบคุมแบบ close loop ที่นิยมใช้เป็น feedback controller

2.7.3 Design and implementation of electronic Differential for electric vehicle employing BLDC motors [3] รถยนต์ไฟฟ้าที่ใช้ Electronic Differential มีเสถียรภาพ และสามารถควบคุมล้อยขณะเลี้ยวเข้าโค้งได้ดีกว่า Mechanical Differential โดยงานวิจัยนี้จะ ออกแบบและจำลอง Electronic Differential โดยเลือกใช้มอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน 2 ตัวในการขับเคลื่อนล้อหลัง และทำการทดสอบอินเวอร์เตอร์และวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink ในการออกแบบ และใช้โปรแกรม Opal RT ในการทดสอบเพื่อตรวจจับความเร็ว ณ เวลาต่างๆ

Electronic Differential ถูกออกแบบโดยกำหนดให้ อินพุต คือ มุมที่ได้จาก พวงมาลัย (Steering angle) และความเร็วของตัวรถ (Throttle speed), เอาท์พุท คือ ความเร็วที่ล้อ หลังด้านซ้ายและด้านขวา

ตารางที่ 2.3 แสดงตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบ Electronic Differential

Symbols	Meaning
L_w	ระยะห่างล้อหน้ากับล้อหลัง
δ	มุมเลี้ยวของล้อ
d_w	ความกว้างของล้อในแกนเพลาเดียวกัน
R	ระยะจากจุดศูนย์กลางถึงจุดศูนย์กลางวงเลี้ยว
ω_R และ ω_L	ความเร็วเชิงมุมของล้อซ้ายและขวา ตามลำดับ



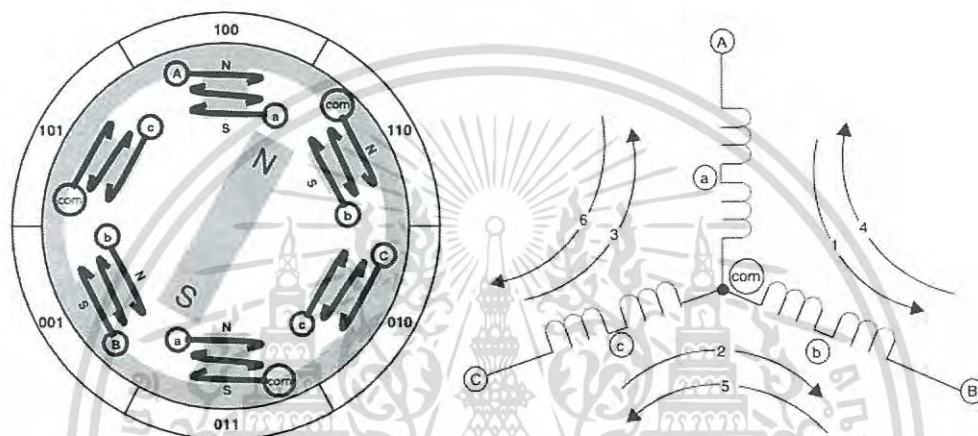
รูปที่ 2.14 โครงสร้างและบล็อกไดอะแกรมของ Electronic Differential

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

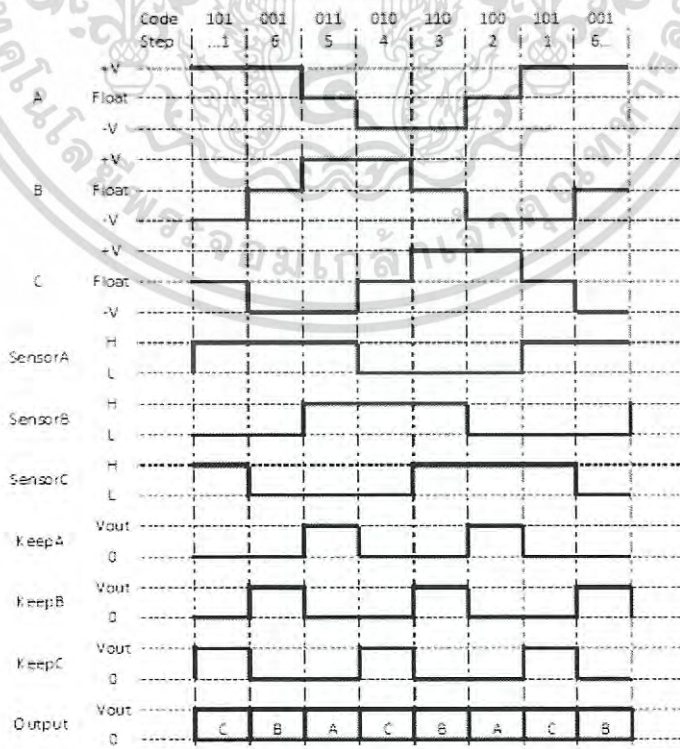
2.7.4 Control of the Brushless DC Motor in Combine Mode [4]

การทำงานของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน ใน Combine Mode

1. เมื่อเราทำการการกระตุ้นไฟ 2 เฟส จะสร้างสนามแม่เหล็กหมุนที่สเตเตอร์ โดยกระแสที่ไหลจะไหลผ่านขด A และ B ในกรณีที่ 1 ดังรูปที่ 2.15 เมื่อมีสนามแม่เหล็กที่สเตเตอร์ และโรเตอร์ จะเกิดการผลักและดูดกันทำให้โรเตอร์หมุน
2. โรเตอร์จะหมุนครบรอบ 360° เมื่อทำงานถึงกรณีที่ 6
3. จากรูปที่ 2.15 เมื่อการทำงานของมอเตอร์ที่มุมต่างๆ จะใช้งานเพียง 2 ขด ดังนั้นจะมี 1 ขด ที่กระแสไม่ไหล ซึ่งเราจะนำขดดังกล่าวมาใช้ประโยชน์ เนื่องจากมีพลังงานสะสมอยู่

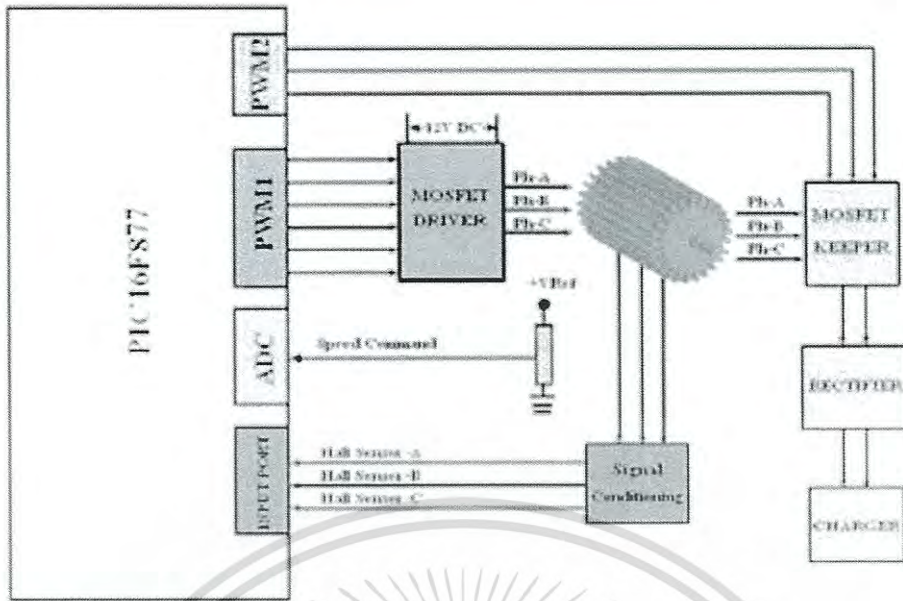


รูปที่ 2.15 ไดอะแกรมการทำงานของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านอย่างง่าย



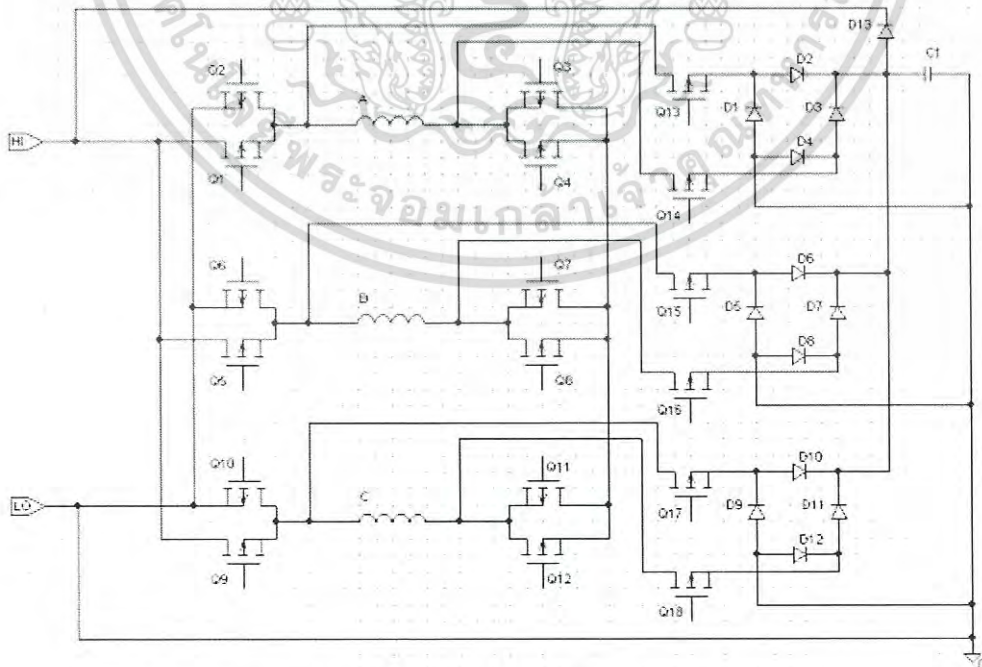
รูปที่ 2.16 Timing diagram สำหรับมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน

จากรูปที่ 2.17 สัญญาณที่รับจาก Hall sensors จะถูกส่งไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ แล้วตัวไมโครคอนโทรลเลอร์จะคำนวณแล้วควบคุมสัญญาณ PWM1 ซึ่งสัญญาณ PWM1 จะควบคุม MOSFET driver สำหรับการควบคุมการหมุนของมอเตอร์ ในขณะที่เดียวกัน PWM2 จะใช้ควบคุม MOSFET keeper ในการรับพลังงานจากขดลวดที่ไม่มีกระแสไหลผ่าน ประโยชน์ คือ สามารถเก็บพลังงานไว้ในแบตเตอรี่แล้วนำไปใช้ประโยชน์ได้

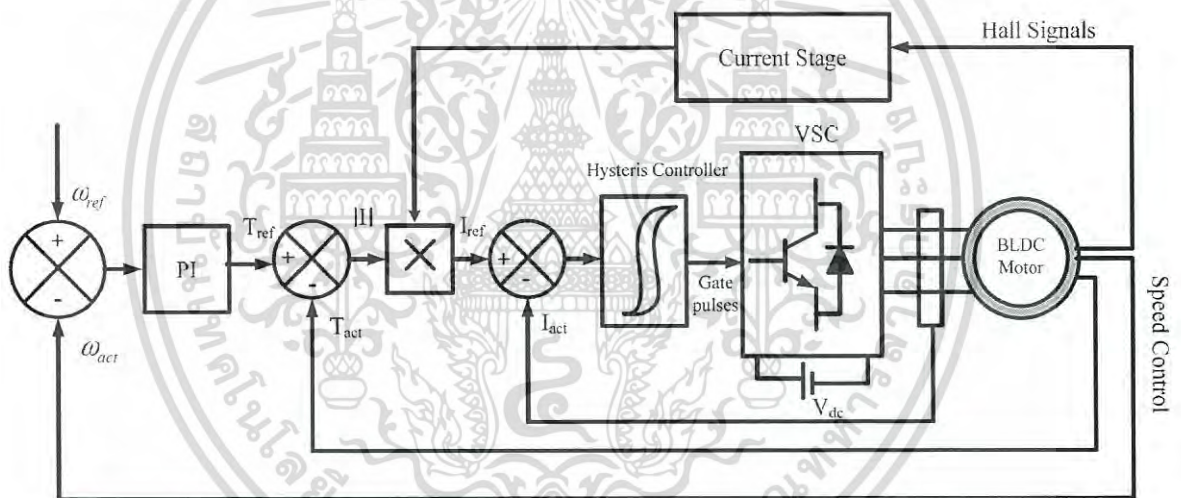


รูปที่ 2.18 Combine mode Driver circuit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.5 Analysis of Closed loop Current controlled BLDC Motor Drive [5]

ในการขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านจำเป็นต้องควบคุมความเร็วและควบคุมชุดขับเคลื่อนของมอเตอร์ให้ทำงานเป็นไปอย่างราบรื่นด้วยความเร็วที่แตกต่างกันได้ ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านที่ถูกควบคุมด้วยระบบวงปิด แสดงดังรูปที่ 2.19 จะช่วยทำให้ชุดขับเคลื่อนสามารถทำงานได้อย่างราบรื่นในทุกย่านความเร็วที่ต้องการ ในระบบควบคุมแบบวงเปิดความเร็วที่เกิดขึ้นจะถูกตั้งค่าให้เป็นความเร็วอ้างอิง ซึ่งในระบบควบคุมแบบวงปิดความเร็วอ้างอิงนี้สามารถปรับเปลี่ยนได้ตลอดเวลาตามที่ต้องการเพื่อให้ชุดขับเคลื่อนสามารถทำงานตามย่านความเร็วที่ต้องการได้ ซึ่งความเร็วรอบของมอเตอร์ที่เกิดขึ้นจริงจะถูกป้อนกลับไปยังอินพุต ถ้าใช้ระบบควบคุมที่เหมาะสมความเร็วรอบที่เกิดขึ้นจริงนี้จะสามารถถูกปรับไปสู่ความเร็วที่ต้องการได้ ความเร็วที่เกิดขึ้นจะถูกป้อนกลับไปยังอินพุตและถูกนำไปเปรียบเทียบกับค่าความเร็วอ้างอิง แล้วนำค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้ไปสร้างสัญญาณผิดพลาดเพื่อลดข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้น สัญญาณผิดพลาดที่ได้จะถูกส่งไปยังตัวควบคุม PI ซึ่งจะช่วยควบคุมความเร็วของมอเตอร์ด้วยค่า Gain ที่เหมาะสม ส่งผลให้ค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นกลายเป็นศูนย์



รูปที่ 2.19 แผนภาพระบบควบคุมความเร็วแบบวงปิดสำหรับมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน

บทที่ 3

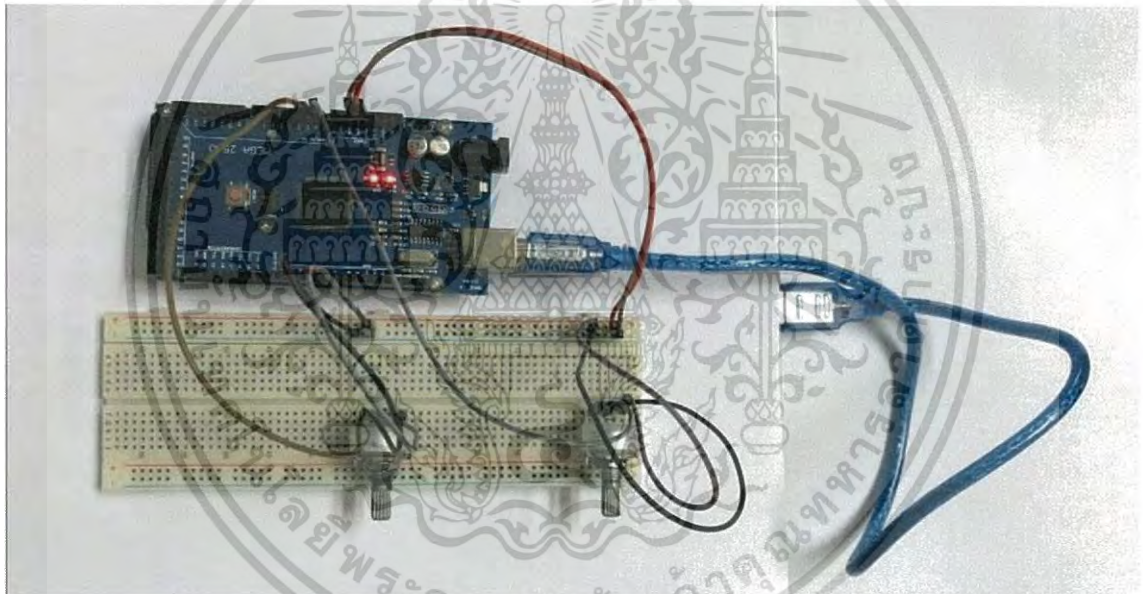
การออกแบบและจำลองการทำงาน

3.1 บทนำ

การออกแบบ Electronics Differential จะแบ่งเป็น 3 ส่วน ดังนี้

1. การออกแบบอุปกรณ์ที่เก็บค่ามุมเลี้ยวจากพวงมาลัยของยานพาหนะ (δ) และนำมาจำลองการคำนวณเพื่อหาระยะเลี้ยวของยานพาหนะ (R)
2. จำลองการคำนวณผลต่างของความเร็วที่ล้อหลังทั้ง 2 ล้อ ($\Delta\omega$) , ความเร็วที่ล้อหลังด้านซ้ายและขวา ($\omega_{r_L}, \omega_{r_R}$)
3. จำลองการทำงานและออกแบบ Electronic Differential โดยการจำลองการคำนวณต่างๆเลือกใช้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK

3.2 การออกแบบอุปกรณ์เพื่อเก็บค่ามุมจากพวงมาลัย (δ) และความเร็ว (ω_v) จากคันเร่ง



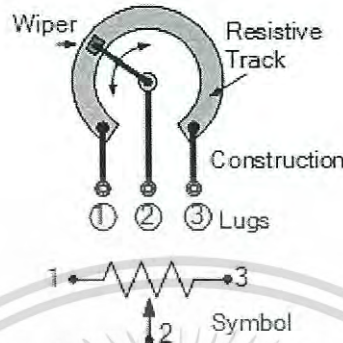
รูปที่ 3.1 การออกแบบเพื่อเก็บค่ามุมเลี้ยว (δ) และความเร็ว (ω_v) จากคันเร่ง

ในการออกแบบเพื่อจำลองการเก็บค่ามุมเลี้ยว (δ) จากพวงมาลัยและความเร็ว (ω_v) จากคันเร่งจะเลือกใช้อุปกรณ์ 3 ชิ้น คือ

1. Arduino Mega 2560 1 ตัว
2. Potentiometer 2 ตัว

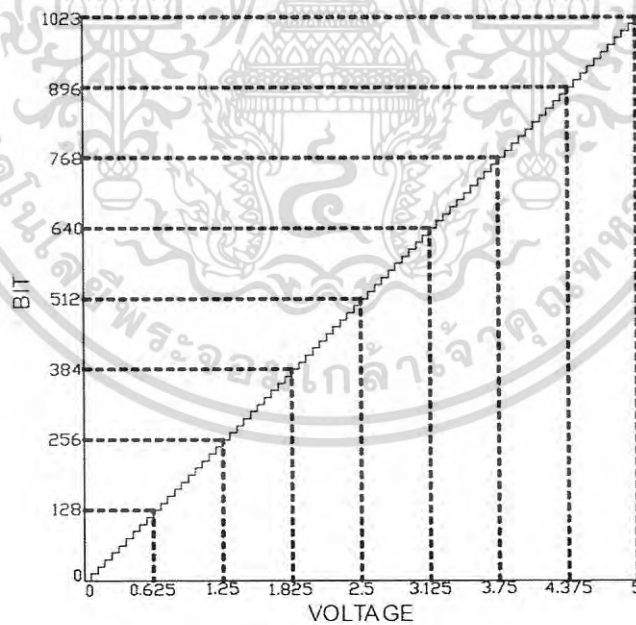
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีขั้นตอนการออกแบบดังนี้ Arduino จะเป็นตัวจ่ายแรงดัน 5 V ให้กับ Potentiometer โดยการต่อสายไฟเข้าขาที่ 1 และ 3 ทำให้เกิดแรงดัน 5 V ตกคร่อมขาที่ 1 และ 3, ขาที่ 2 ทำหน้าที่ให้เกิด Voltage divider ระหว่างขาที่ 1-2 และ 2-3 ด้วยการหมุนเพื่อปรับค่าความต้านทานดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 วงจรการทำงานของ potentiometer

ตั้งค่าให้ Arduino รับและอ่านค่าจาก potentiometer ค่าแรงดัน 5 V เป็นค่า Analog input จะถูกแปลงให้ค่ากลายเป็น 0 – 1023 ตามจำนวน บิต ของ Arduino ดังรูปที่ 3.3 เมื่อปรับค่าความต้านทานที่ potentiometer จะได้ค่าแรงดันป้อนกลับ Arduino



รูปที่ 3.3 การแปลงค่าแรงดันให้เป็นดิจิตอล

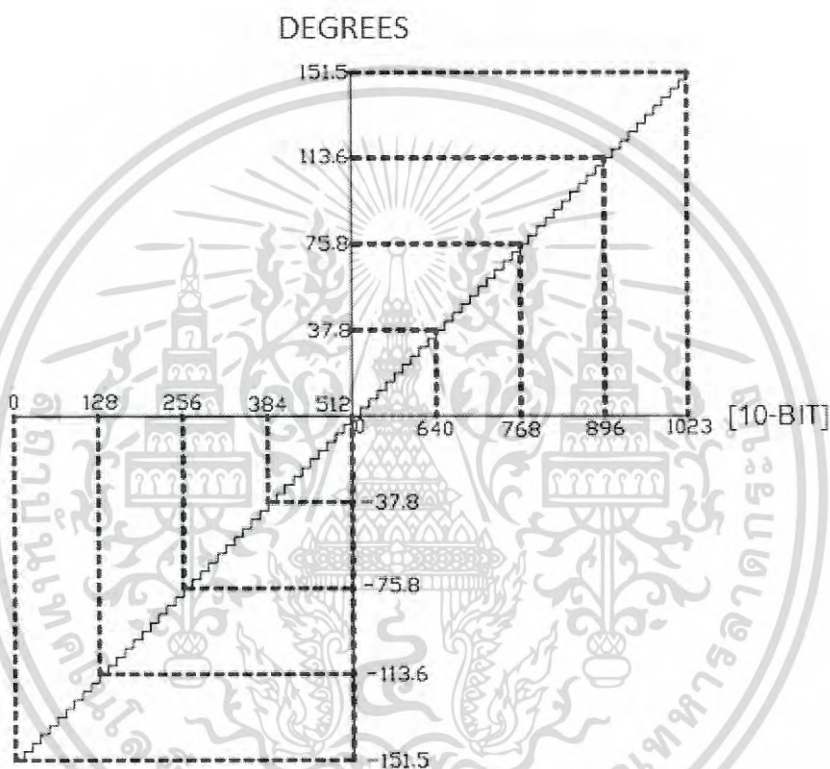
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1 การตั้งค่าให้ potentiometer เป็น พวงมาลัย

ค่าที่ 512 เกิดแรงดัน 2.5 V กลับเข้า Arduino ดังรูปที่ 3.3 และตั้งค่า Arduino ให้อ่านค่า 512 เป็นตำแหน่ง 0 องศา ดังรูปที่ 3.4 ซึ่งก็คือการขับเป็นทางตรง โดย

- หมุนไปฝั่งขวา 1 จะเป็นการลดค่า analog input ทำให้ค่าบิตต่ำกว่า 512 และ มุม (δ) จะติดลบ เปรียบเสมือนการเลี้ยวไปทางซ้าย

- หมุนไปฝั่งขวา 3 จะเป็นการเพิ่มค่า analog input ทำให้ค่าบิตสูงกว่า 512 และ มุม (δ) จะเป็นบวก เปรียบเสมือนการเลี้ยวไปทางขวา



รูปที่ 3.4 การแปลงค่า Step ให้เป็นองศา

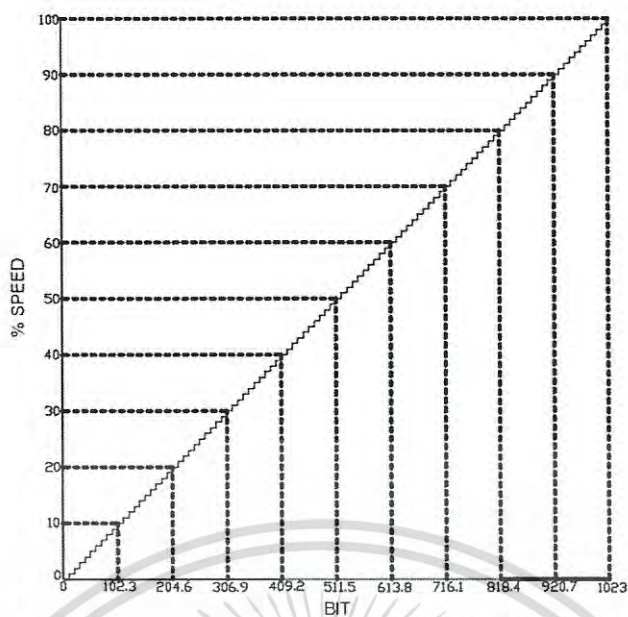
3.2.2 การตั้งค่าให้ potentiometer เป็น คันเร่ง

การเหยียบคันเร่งเป็นการเพิ่มความต้านทานของ potentiometer ซึ่งทำให้ค่าแรงดันเพิ่มขึ้นและบิตเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 3.3 ส่งผลให้ความเร็วที่ส่งไปให้มอเตอร์ที่ล้อหลังเพิ่มขึ้นด้วย

การผ่อนคันเร่งเป็นการลดค่าความต้านทานของ potentiometer ซึ่งทำให้ค่าแรงดันลดลงและบิตลดลง ส่งผลให้ความเร็วที่ส่งไปให้มอเตอร์ที่ล้อหลังลดลงด้วย

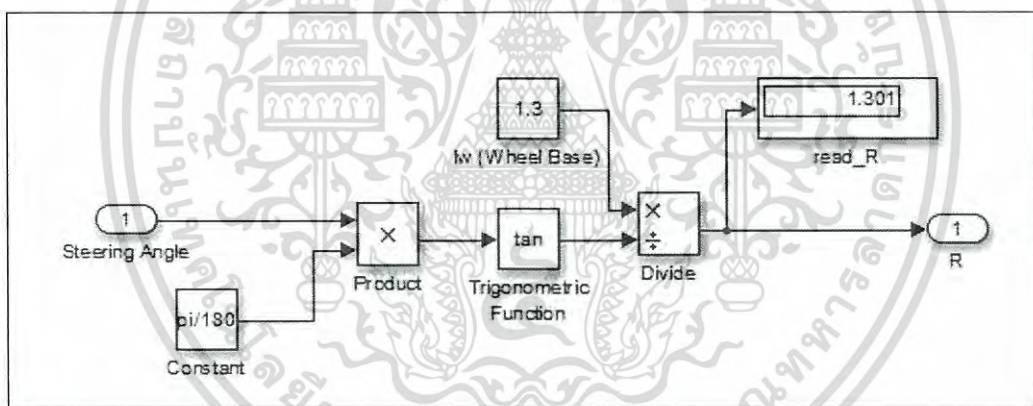
โดยตั้งค่าให้ Arduino อ่านค่า 1023 เป็นความเร็วพิกัดของมอเตอร์คือ 100% (No-load) และค่า 512 เป็นความเร็ว 50% ของพิกัดมอเตอร์ ดังรูปที่ 3.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 การแปลงค่าดิจิทัลให้เป็นเปอร์เซ็นต์ความเร็ว

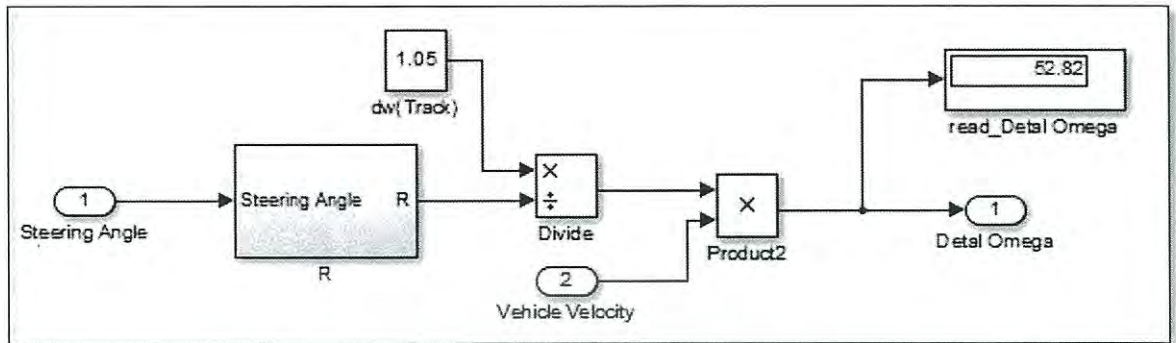
3.3 การจำลองการคำนวณเพื่อหาค่าระยะเลี้ยว (R)



รูปที่ 3.6 บล็อกไดอะแกรม จำลองการคำนวณหาค่าระยะเลี้ยว (R)

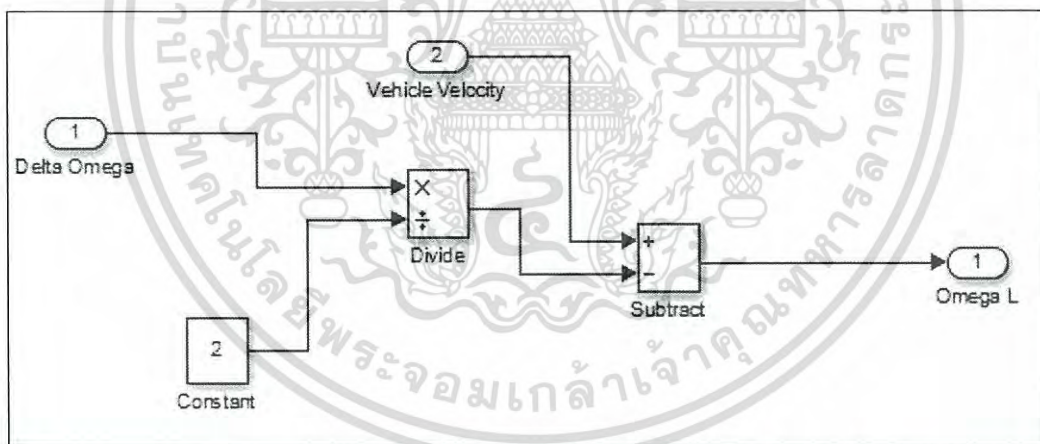
จากสมการที่ 2.3 $R = \frac{l_w}{\tan \delta}$ โดยที่ค่า l_w คือระยะจากล้อหลังถึงล้อหน้าซึ่งวัดได้มีค่าเท่ากับ 1.3 เมตรและมุม (δ) คือ มุมที่ล้อหน้าทั้ง 2 ล้อเคลื่อนออกจากแกนอ้างอิงด้วยการขยับพวงมาลัย (โดยอัตราส่วนของมุมที่ล้อหน้าที่เคลื่อนที่กับพวงมาลัยคือ 1: 1) ซึ่งได้อธิบายการเก็บค่าตั้งที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ดังนั้นจะสามารถสร้างบล็อกไดอะแกรม เพื่อจำลองการคำนวณได้ดังรูป 3.6

3.4 การจำลองการคำนวณผลต่างของความเร็วที่ล้อหลังทั้ง 2 ล้อ ($\Delta\omega$) และความเร็วที่ล้อหลังด้านซ้ายและขวา ($\omega_{r_L}, \omega_{r_R}$)



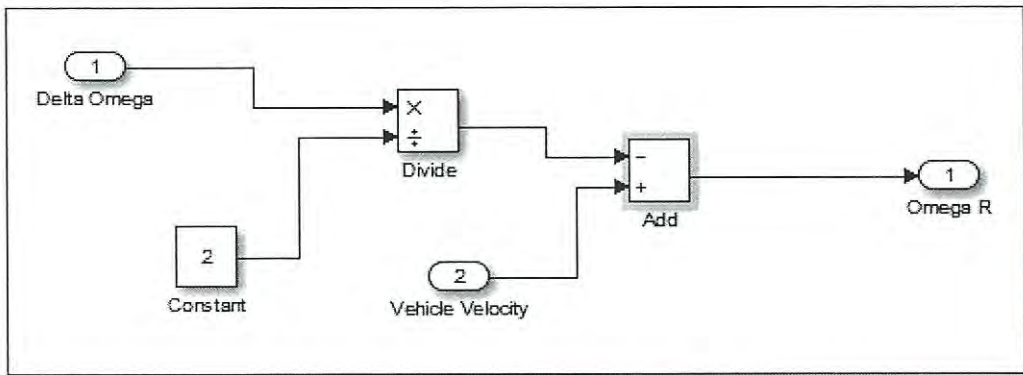
รูปที่ 3.7 บล็อกไดอะแกรม จำลองการคำนวณผลต่างของความเร็ว ($\Delta\omega$)

จากสมการที่ 2.6 $\Delta\omega = \frac{d_w}{R} \omega_v$ โดยค่า d_w คือระยะห่างระหว่างล้อหลังด้านซ้ายและด้านขวาซึ่งวัดได้มีค่าเท่ากับ 1.05 เมตร, R คือค่าที่ได้จากการคำนวณดังรูป 3.6 และ ω_v คือความเร็วของยานพาหนะที่วัดจากจุดศูนย์กลางมวล ดังนั้นจะสร้างบล็อกไดอะแกรมเพื่อจำลองการคำนวณได้ดังรูป 3.7



รูปที่ 3.8 บล็อกไดอะแกรม จำลองการคำนวณความเร็วล้อด้านซ้าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

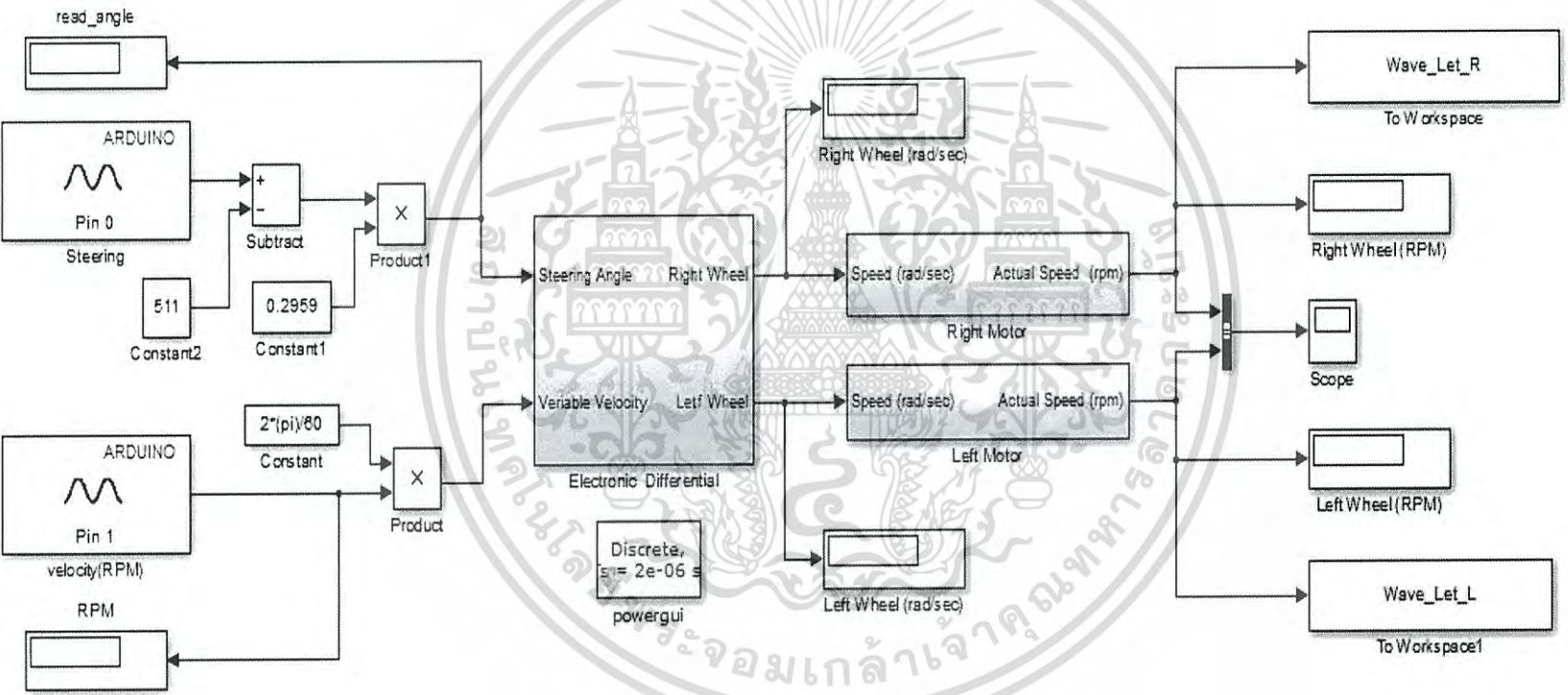


รูปที่ 3.9 บล็อกไดอะแกรม จำลองการคำนวณความเร็วล้อด้านขวา

จากสมการที่ 2.8 และ 2.9 $\omega_L = \omega_v + \frac{\Delta\omega}{2}$, $\omega_R = \omega_v - \frac{\Delta\omega}{2}$ ซึ่ง $\Delta\omega$ ได้จากการคำนวณดังรูปที่ 3.7 นำมาสร้างบล็อกไดอะแกรม เพื่อคำนวณค่าความเร็วที่ล้อหลังด้านซ้าย (ω_L) และด้านขวา (ω_R)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



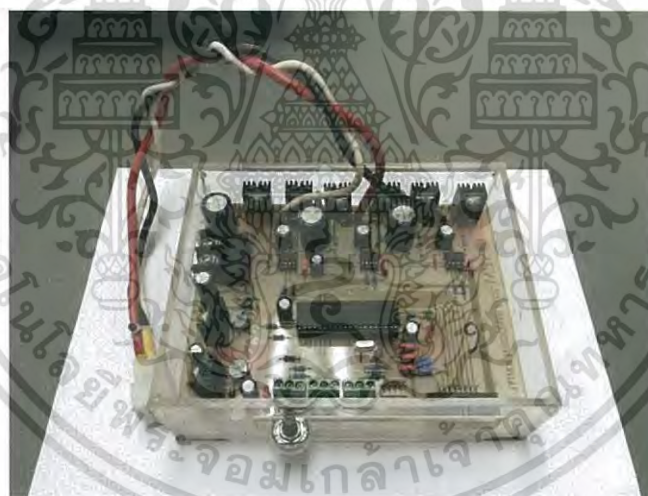
รูปที่ 3.10 บล็อกโปรแกรม จำลองการทำงาน Electronic Differential

การจำลองการทำงานให้สามารถรับค่ามุมและสามารถปรับความเร็วที่ล้อหลังได้ มีดังนี้ บล็อกไดอะแกรม Pin 0 จะมีค่า 0-1023 ซึ่งการแปลงค่าได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 3.2 นำค่าที่ได้มาลบกับ 511 ถ้าผลลัพธ์เป็นเครื่องหมายบวกมีความหมายว่ารถกำลังเลี้ยวไปทางขวาและผลลัพธ์เป็นเครื่องหมายลบมีความหมายว่ารถกำลังเลี้ยวไปทางซ้าย นำผลลัพธ์มาคูณกับ 0.2959 เพื่อเปลี่ยนจากค่า step ให้เป็นมุม (δ) และเข้าช่อง Steering Angle ซึ่งเป็น Subsystem ของบล็อกไดอะแกรม Electronic differential เพื่อนำไปคำนวณหาค่าระยะเลี้ยว(R)จากที่กล่าวในหัวข้อ 3.3 บล็อกไดอะแกรม Pin 1 จะมีค่า 0-1023 ซึ่งการแปลงค่าได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 3.2.2 นำมาคูณกับ $\frac{2\pi}{60}$ เพื่อเปลี่ยนหน่วยจาก rpm ให้เป็น rad/sec จะได้ค่า (ω_v) และนำผลลัพธ์(ω_v) มาเข้าช่อง Variable Velocity ซึ่งเป็น Subsystem ของบล็อกไดอะแกรม Electronic differential จากนั้นค่า R และ ω_v จะถูกนำไปคำนวณหาค่าผลต่างของความเร็วที่ล้อหลังทั้ง 2 ล้อ ($\Delta\omega$) นำผลลัพธ์ไปคำนวณหาค่าความเร็วที่ล้อหลังด้านซ้ายและขวา(ω_L, ω_R)ดังที่กล่าวในหัวข้อ 3.4

3.6 การออกแบบ Electronic differential

ในการออกแบบจะใช้มอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านจำนวน 2 ตัว โดยการควบคุมความเร็วของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านแต่ละตัวจะใช้วงจรรีบเคลื่อน Drive circuit ดังรูปที่

3.11



รูปที่ 3.11 วงจรรีบเคลื่อน Drive circuit

โดยมีส่วนประกอบเบื้องต้นดังนี้

- 1.แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (voltage regulation)
2. ไมโครคอนโทรลเลอร์ (PIC30F4011)
- 3.วงจรรีบเกิด ใช้ IR2101 จำนวน 3 ตัว
4. วงจรอินเวอร์เตอร์ใช้ Mosfet เบอร์ IRF 2807 จำนวน 6 ตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การปรับแรงดันเฉลี่ยที่จ่ายเข้ามอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านและสามารถควบคุมความเร็วได้ทั้ง 2 ตัวพร้อมกัน จะเลือกใช้ digital potentiometer เบอร์ MCP41010 เป็นตัวกลาง ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 digital potentiometer เบอร์ MCP41010

เนื่องจาก digital potentiometer มีคุณสมบัติคือ สามารถรับค่าจาก Arduino mega 2560 ที่ถูกนำมาใช้เป็นตัวเก็บค่าจาก potentiometer ทั้ง 2 ตัว ที่ถูกออกแบบให้เป็น พวงมาลัยและคันเร่งดังหัวข้อที่ 3.2.1 และ 3.2.2 ตามลำดับ จากนั้น digital potentiometer จะส่งค่าให้วงจร drive circuit ทั้ง 2 ตัวเพื่อควบคุมความเร็วมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน โดยชุดคำสั่งที่ถูกเขียนใน Arduino mega 2560 จะเป็นไปตามสมการ 2.6, 2.8 และ 2.9

$$\Delta\omega = \omega_{r_L} - \omega_{r_R} = \frac{d_w \tan \delta}{L_w} \omega_v$$

$$\omega_{r_L}^* = \omega_v + \frac{\Delta\omega}{2}$$

$$\omega_{r_R}^* = \omega_v - \frac{\Delta\omega}{2}$$

เพื่อให้วงจร drive circuit สามารถควบคุมความเร็วให้เหมาะสมกับค่ามุมเฉลี่ย (δ)

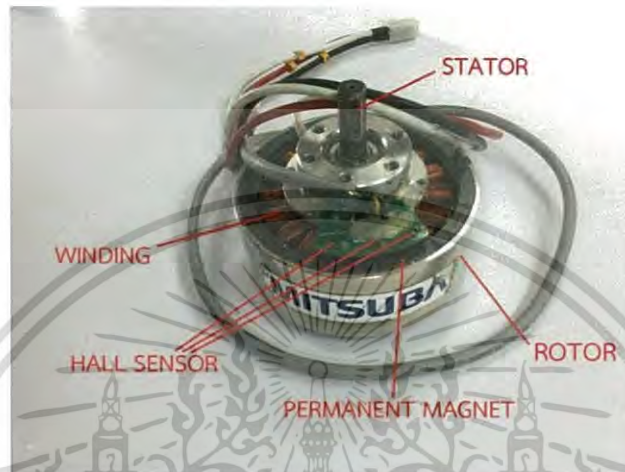


รูปที่ 3.13 ออกแบบ Electronic differential

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7 การทดสอบประสิทธิภาพของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการทดสอบประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านที่แรงดัน 48 โวลต์ โดยจะทำการทดสอบวัดค่าแรงดันไฟฟ้าขาเข้ามอเตอร์ระหว่างสายกระแสไฟฟ้าขาเข้ามอเตอร์ในแต่ละสาย กำลังไฟฟ้าขาเข้ามอเตอร์ในแต่ละสาย และความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน แล้วนำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์และสรุปผล



รูปที่ 3.14 มอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านที่นำมาทดสอบ มีข้อมูลจำเพาะดังนี้

- ชนิด 3 เฟส 120 องศาไฟฟ้า 60 องศาทางกล
- 18 Stator poles / 12 Rotor poles
- พิกัดแรงดันไฟฟ้าที่ 48 โวลต์
- พิกัดกำลังเอาต์พุตที่ 20-1000 วัตต์
- มวลเฉพาะมอเตอร์ 2.4 kg
- เส้นผ่านศูนย์กลางของมอเตอร์ 11.56 เซนติเมตร

3.7.1 จุดประสงค์ของการทดสอบ

1. เพื่อศึกษาคุณลักษณะของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน
2. เพื่อศึกษาหาประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านที่ภาระทางกลต่าง ๆ
3. เพื่อศึกษารูปคลื่นสัญญาณแรงดันและกระแสที่จ่ายเข้ามอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7.2 อุปกรณ์และเครื่องมือวัดทางไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้า

กระแสตรงไร้แปรงถ่าน

อุปกรณ์และเครื่องมือวัดทางไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน และการทำงานของชุดควบคุม มีดังนี้

1. Multi-meter UNI-T แบบดิจิตอล ใช้ในการวัดแรงดันไฟฟ้า
2. Oscilloscope RIGOL รุ่น DS1102E
3. Photo/contact Techometer ใช้ในการวัดความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้า
4. Clamp meter แบบดิจิตอล ใช้ในการวัดกระแสไฟฟ้า
5. Power meter แบบดิจิตอล ใช้ในการวัดกระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และ

กำลังไฟฟ้า

6. Digital Force Gauge ใช้ในการวัดแรงดึงของเชือก ในหน่วยกิโลกรัม

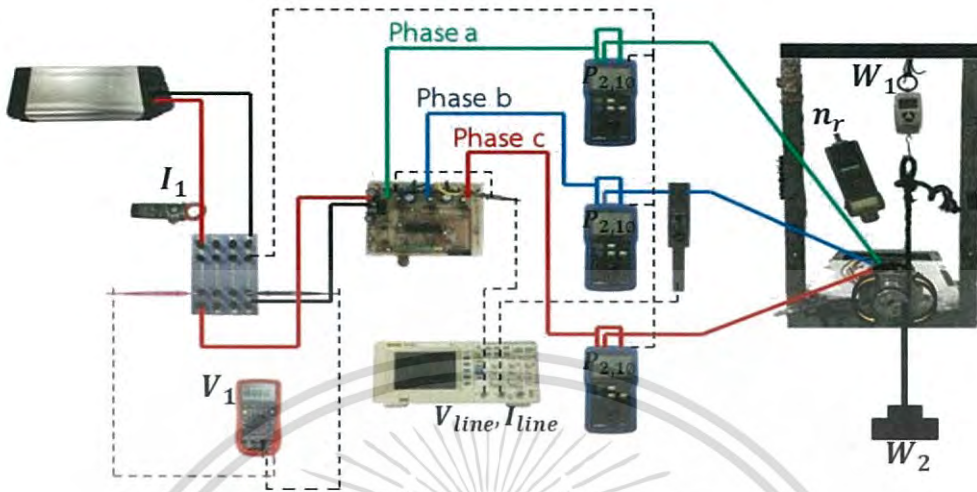
3.7.3 ขอบเขตของการทดลอง

หาประสิทธิภาพของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านที่ภาระทางกลต่างๆ โดยมีอินเวอร์เตอร์เป็นตัวขับ

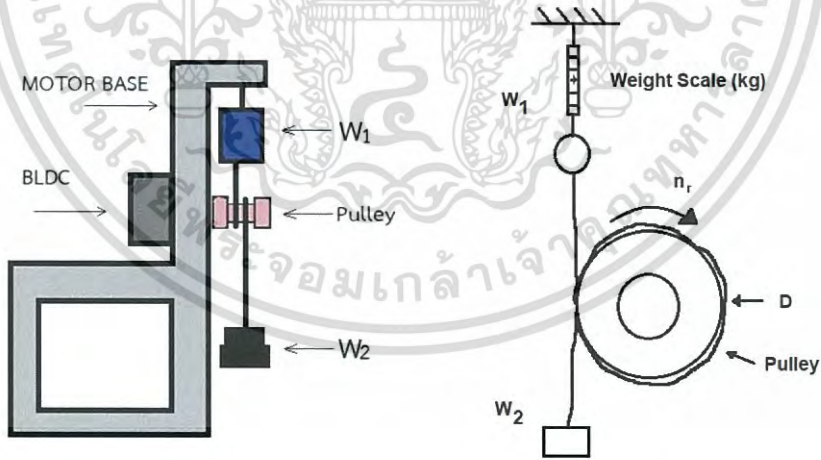
3.7.4 วิธีการทดลอง

1. ทำการต่อวงจรการทดลองดังรูปที่ 4.2
2. ทำการทดลองโดยใส่ภาระทางกลที่มู่เล่ ดังรูปที่ 4.3 โดยทำการรักษาแรงดันไฟฟ้าให้คงที่ที่ 48 โวลต์
3. ทำการบันทึกค่า $W_1, W_2, V_{an}, I_{an}, V_{bn}, I_{bn}, V_{cn}, I_{cn}, n_r, P_{2a}, P_{2b}$ และ P_{2c} ลงในตารางบันทึกผลการทดลอง แล้วคำนวณหาค่า $T_{output}, \omega_r, P_{2,3\phi}, P_3$ หรือกำลังไฟฟ้าขาออกของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน และ η_{motor} หรือประสิทธิภาพของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน
4. ทำการเปลี่ยนภาระทางกลจาก 2.27 kg เป็น 4.27 kg, 6.27 kg, 8.27 kg และ 10.27 kg ตามลำดับ
5. ที่ภาระทางกลค่าต่าง ๆ ทำการทดลองซ้ำตามข้อที่ 3-4 แล้วบันทึกผลที่ได้ลงในตารางบันทึกผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.15 การต่อวงจรที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 3.16 การทดลองโดยใช้ภาระทางกลที่มู่เล่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7.5 สมการที่ใช้ในการคำนวณ

จากการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านแบบมีการใส่ภาระทางกล โดยทำการเพิ่มภาระทางกลมวลตั้งแต่ 2.27 กิโลกรัม จนถึง 10.27 กิโลกรัม ซึ่งจะทำการเพิ่มโหลดขึ้นทีละ 2 กิโลกรัม แล้วค่อย ๆ เพิ่มโหลดให้ละเอียดยิ่งขึ้นในช่วงที่สนใจ โดยสมการที่ใช้ในการคำนวณประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน มีดังนี้

$$T_{output} = 9.81(W_2 - W_1) \times \frac{D}{2} \quad (3.1)$$

$$\omega_r = \frac{2\pi n_r}{60} \quad (3.2)$$

$$P_3 = T_{output} \omega_r \quad (3.3)$$

$$P_{2,3\emptyset} = P_{2a} + P_{2b} + P_{2c} \quad (3.4)$$

$$\eta_{motor} = \frac{P_3}{P_{2,3\emptyset}} \times 100\% \quad (3.5)$$

โดย

T_{output}	คือ	แรงบิดลัพธ์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน (Nm)
W_1	คือ	ค่ามวลของตุ้มน้ำหนัก (kg)
W_2	คือ	ค่ามวลที่อ่านได้จากตราชั่ง (kg)
$D/2$	คือ	ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางของมอเตอร์ถึงตำแหน่งของเชือกที่พันบนมู่เล่ (m) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.025 m
ω_r	คือ	ความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน (rad/s)
n_r	คือ	ความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน (rpm)
P_3	คือ	กำลังไฟฟ้าขาออกสามเฟสของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน (W)
η_{motor}	คือ	ประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน (%)
$P_{2,3\emptyset}$	คือ	กำลังไฟฟ้าขาเข้าสามเฟสของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน (W)
P_{2a}	คือ	กำลังไฟฟ้าขาเข้าของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน phase a (W)
P_{2b}	คือ	กำลังไฟฟ้าขาเข้าของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน phase b (W)
P_{2c}	คือ	กำลังไฟฟ้าขาเข้าของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน phase c (W)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.8 การทดสอบมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านที่มีชุดควบคุม Electronic differential

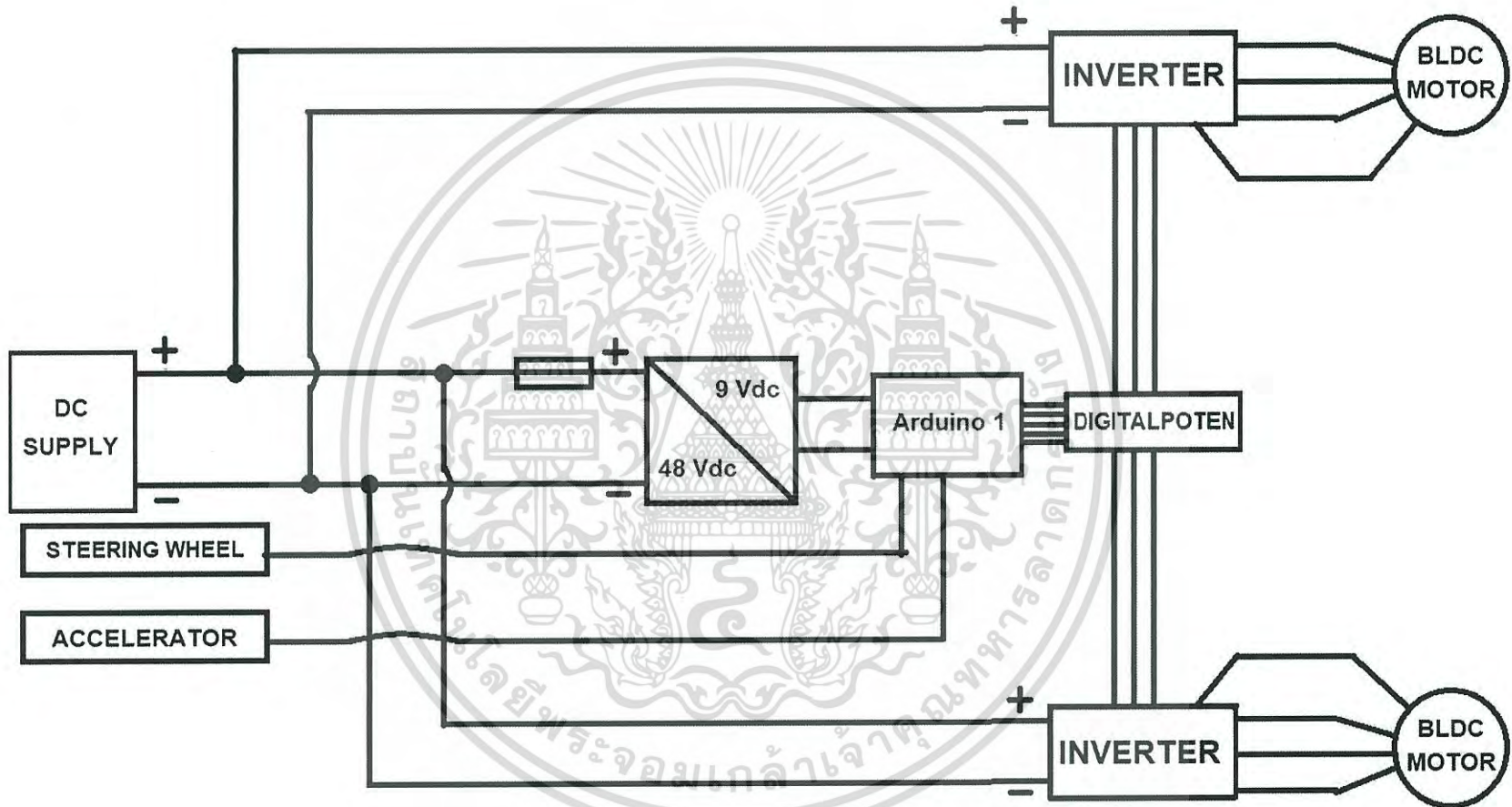
การทดสอบมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านที่มีชุดควบคุม Electronic differential เป็นการทดสอบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน ในการทดสอบจะใช้มอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านจำนวน 2 ตัว และชุดควบคุม Electronic differential ซึ่งประกอบไปด้วย digital potentiometer เป็นตัวป้อนค่าเพื่อควบคุมความเร็วของมอเตอร์กระแสตรงทั้ง 2 ตัว ,potentiometer 2 ตัวที่ทำหน้าที่เป็นพวงมาลัยและคันเร่งเพื่อป้อนค่ามุมเลี้ยว(δ) และความเร็วของรถ(ω_v)

3.8.1 จุดประสงค์การทดสอบ

1. เพื่อศึกษาความเร็วของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านที่มีชุดควบคุม Electronic differential
2. เปรียบเทียบความเร็วที่ได้จากการทดสอบ กับ ความเร็วที่ได้จากการจำลองจาก MATLAB/Simulink

3.8.2 อุปกรณ์และเครื่องมือวัดทางไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบ

1. มอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน
2. ชุดควบคุม Electronic differential
3. Photo/contact Tachometer ใช้ในการวัดความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้า
4. DC supply ในการทดลองจะรักษาแรงดันให้คงที่ที่ 57 โวลต์



รูปที่ 3.17 วงจรทดสอบชุดควบคุม Electronic differential

High performance BLDC motor control for electric vehicle

KMITL

ต่อวงจรทดสอบตามรูปที่ 4.12 โดยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงจะรักษาแรงดันให้คงที่ที่ 57 โวลต์เพื่อจ่ายเข้ากับ วงจรขับเคลื่อน Drive circuit จากนั้นปรับค่ามุลีวจาก potentiometer ที่ตั้งค่าให้เป็นพวงมาลัย โดยปรับค่ามุลีวตามตารางทดสอบ ปรับค่าความเร็วของรถจาก potentiometer ที่ตั้งค่าให้เป็นคันเร่ง โดยจะเป็นการปรับค่า level (step) เพื่อส่งค่าไปยัง digital potentiometer จากนั้น digital potentiometer จะส่งค่าต่อไปยังวงจรขับเคลื่อน drive circuit ทั้ง 2 ชุด เพื่อปรับความเร็วของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านให้เหมาะสมวัดค่าความเร็วของมอเตอร์จาก Tachometer และบันทึกผลการทดสอบลงในตาราง

3.9 การทดสอบมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านที่มีชุดคำสั่ง feedback ความเร็ว

เป็นการทดสอบโดยใส่ภาระทางกลที่ค่าต่างๆเพื่อทำให้ความเร็วตกลงจากความเร็วที่เกิดขึ้นในสถานะที่ไม่มีภาระทางกล ชุดคำสั่ง feedback ความเร็ว จะสามารถปรับค่าความเร็วที่ตกลงจากการใส่ภาระทางกลให้มีค่าความเร็วเพิ่มขึ้นเพื่อให้ใกล้เคียงกับความเร็วในสถานะที่ไม่มีภาระทางกล ดังนั้นชุดคำสั่งนี้จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านให้ดียิ่งขึ้น

3.9.1 จุดประสงค์การทดสอบ

1. เพื่อศึกษาความเร็วของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านที่มีชุดคำสั่ง feedback ความเร็ว
2. เปรียบเทียบความเร็วที่มีชุดคำสั่ง feedback ความเร็ว และ ไม่มีชุดคำสั่ง feedback ความเร็ว ที่ภาระโหลดค่าต่างๆ

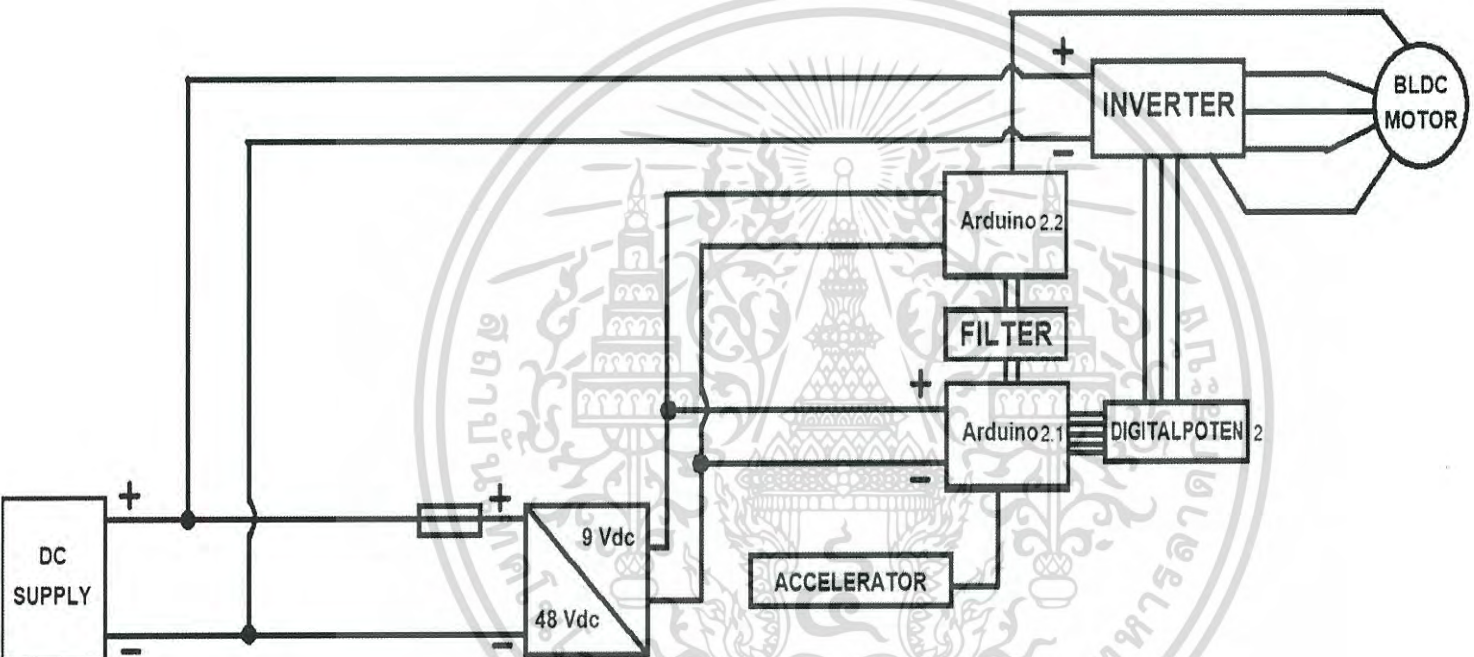
3.9.2 อุปกรณ์และเครื่องมือวัดทางไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบ

1. มอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน
2. Arduino Mega 2560 ที่มีชุดคำสั่งควบคุมความเร็ว 2 ล้อและลิ้มิตความเร็ว
3. Arduino UNO ที่มีชุดคำสั่ง feedback ความเร็ว
4. Photo/contact Tachometer ใช้ในการวัดความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้า
5. DC supply ในการทดลองจะรักษาแรงดันให้คงที่ที่ 57 โวลต์
6. Hall sensor เบอร์ 02K
7. Filter
8. Digital potentiometer MCP41010

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Arduino UNO ที่มีชุดคำสั่ง feedback เราจะคิดจากการนำค่าของ ความเร็วที่เกิดขึ้นจริงในหน่วย level (step) เทียบกับ ค่าการสั่งงานเป็น level ซึ่งทุกๆครั้งที่เกิด error กระบวนการ feedback แบบ PI controller จะเอาค่า 5% ของ error มาคิดวนซ้ำๆ

3.9.3 วิธีกาทดสอบ



High performance BLDC motor control for electric vehicle KMITL

รูปที่ 3.18 การต่อวงจรที่ใช้ในการทดลอง feedback

- 1.ต่อวงจรดังรูปที่ 4.13
- 2.ป้อนค่าจาก digital potentiometer ที่ level = 0.70 p.u. เพื่อให้มอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านหมุนด้วยความเร็วค่าหนึ่งโดยไม่มีชุดคำสั่ง feedback ความเร็ว
- 3.บันทึกค่าความเร็ว Not set feedback speed ในตารางบันทึกผลช่อง No-load
4. เปลี่ยนค่าที่ป้อนจาก digital potentiometer จาก level = 0.70 p.u. เป็น 0.78 p.u. และ 1.00 p.u. ตามลำดับ
5. ค่าที่ป้อนจาก digital potentiometer ค่าต่างๆทำการทดสอบซ้ำตามหัวข้อที่ 3 แล้วบันทึกผลลงในช่อง No-load
- 6.ทำการทดสอบโดยใส่ภาระทางกลที่มู่เล่ 0.5 kg ดังรูปที่ 4.3 และบันทึกค่าความเร็ว Not set feedback speed ในตารางบันทึกผล ที่ level = 0.70 p.u. เป็น 0.78 p.u. และ 1.00 p.u. ตามลำดับ
7. จากนั้นเปลี่ยนภาระทางกลที่มู่เล่ใน ข้อ 6 เป็น 1 kg, 2 kg, 3 kg ตามลำดับ และทำตามข้อที่ 6 อีกครั้ง
8. ใส่ชุดคำสั่ง feedback ลงใน Arduino mega 2560
9. ทำการทดสอบตามข้อ 3 ถึง ข้อ 7 โดยเปลี่ยนเป็นบันทึกค่าความเร็ว Set feedback speed ในตารางบันทึกผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
ผลการทดลอง

4.1 ผลการทดลองมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านแบบมีภาระทางกลที่ฝึกัด 48 โวลต์

ตารางที่ 4.1 ตารางบันทึกผลการทดลอง

W_1 (kg)	W_2 (kg)	Motor														
		V_{an} (V)	I_{an} (A)	V_{bn} (V)	I_{bn} (A)	V_{cn} (V)	I_{cn} (A)	P_{2a} (W)	P_{2b} (W)	P_{2c} (W)	$P_{2,3\phi}$ (W)	T_{output} (Nm)	n_r (rpm)	ω_r (rad/s)	P_3 (W)	η_{motor}
0.61	2.27	21.75	0.89	21.50	0.90	21.52	0.86	17.87	18.10	17.47	53.43	0.41	887.23	92.91	37.94	71.00
1.10	4.27	22.17	1.61	21.88	1.60	21.88	1.52	31.60	34.13	29.00	94.73	0.78	830.50	86.97	67.65	71.41
1.82	6.27	22.07	2.13	21.96	2.09	21.52	2.05	41.10	41.07	38.00	120.17	1.09	767.53	80.38	87.69	72.97
1.65	6.52	21.94	2.37	21.36	2.22	22.21	2.15	43.60	42.83	40.10	126.53	1.19	765.87	80.21	95.79	75.71
1.22	6.77	21.69	2.44	21.71	2.36	21.75	2.53	48.13	47.27	44.57	139.97	1.36	740.23	77.52	105.54	75.41
1.38	7.02	21.67	2.52	21.52	2.48	21.52	2.53	49.17	48.70	45.53	143.40	1.38	742.40	77.75	107.60	75.04
1.94	7.27	21.77	2.61	21.48	2.51	21.40	2.41	47.27	46.87	47.53	137.67	1.31	748.87	78.42	102.54	74.49
2.07	7.77	21.69	2.67	21.52	2.57	21.94	2.51	50.07	48.77	46.20	145.03	1.40	736.67	77.14	107.84	74.36
2.44	8.27	22.07	3.01	21.84	2.82	21.44	2.71	53.33	52.67	49.87	155.87	1.43	721.37	75.54	108.07	69.34
1.98	10.27	21.77	4.11	21.50	3.72	21.42	3.8	68.60	68.63	63.37	201.60	2.03	656.10	68.71	139.77	69.33

ตัวอย่างการคำนวณ ที่ภาระทางกล 6.52 กิโลกรัม

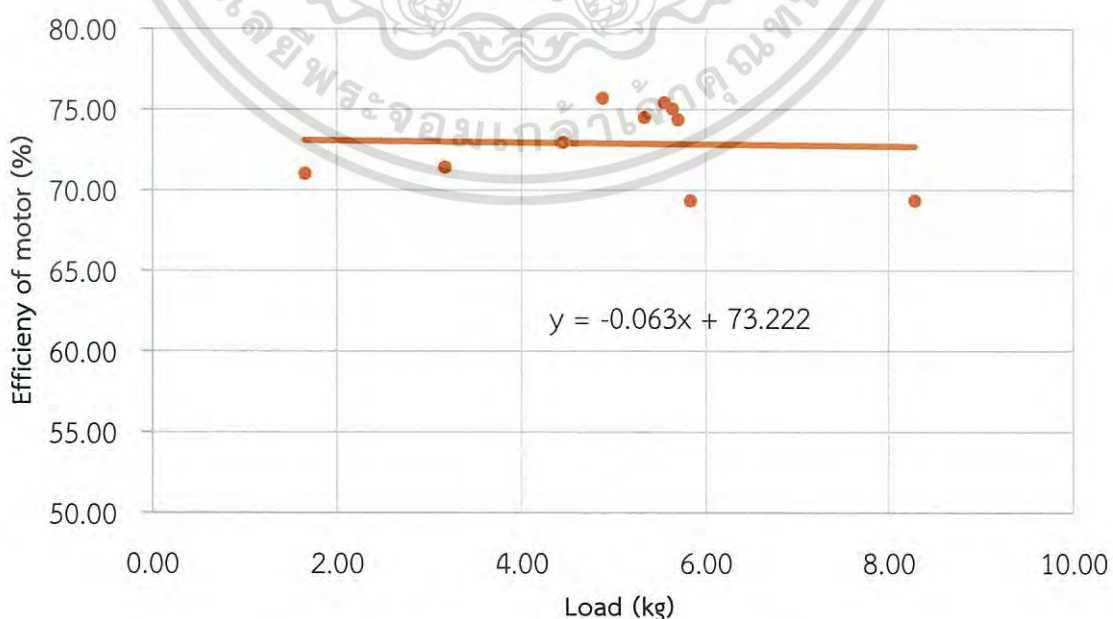
$$\begin{aligned} \text{จากสมการ 3.1} \quad T_{output} &= 9.81(W_2 - W_1) \times \frac{D}{2} \\ &= 9.81 (6.52 - 1.65) \times 0.025 \\ &= 1.19 \text{ Nm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{จากสมการ 3.2} \quad \omega_r &= \frac{2\pi n_r}{60} \\ &= \frac{2\pi \times 765.87}{60} \\ &= 80.21 \text{ rad/s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{จากสมการ 3.3} \quad P_3 &= T_{output} \omega_r \\ &= 1.19 \times 80.21 \\ &= 95.79 \text{ W} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{จากสมการ 3.4} \quad P_{2,3\phi} &= P_{2a} + P_{2b} + P_{2c} \\ &= 43.60 + 42.83 + 40.10 \\ &= 126.53 \text{ W} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{จากสมการ 3.5} \quad \eta_{motor} &= \frac{P_3}{P_{2,3\phi}} \times 100\% \\ &= \frac{95.79}{43.60 + 42.83 + 40.10} \times 100\% \\ &= 75.71 \% \end{aligned}$$



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง โหลดและประสิทธิภาพของ Motor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ขึ้นด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.1 วิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านแบบมี

ภาระทางกล

จากการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านแบบมีภาระทางกล พบว่า เมื่อทำการเพิ่มภาระทางกลให้แก่มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน จะทำให้มอเตอร์มีการดึงกระแสไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น โดยกระแสไฟฟ้าจะแปรผันตรงกับขนาดของภาระทางกล ดังนั้นการเพิ่มขนาดของภาระทางกลที่ใช้ถ่วงมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน จะทำให้มอเตอร์ไฟฟ้ามีการดึงกำลังไฟฟ้ามากยิ่งขึ้น ส่งผลทำให้แรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงและความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านมีขนาดลดลง

จากการทดสอบหาประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านที่ใช้ในการทดลอง พบว่าประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้าตกลงเล็กน้อย เนื่องจากมีการสูญเสียในรูปของความร้อนของขดลวดสเตเตอร์ แต่ในส่วนของโรเตอร์ซึ่งมีโครงสร้างแบบ Outlet rotor ทำให้โรเตอร์สามารถระบายความร้อนออกจากตัวมอเตอร์ได้ดี

รูปสัญญาณที่ได้จากการทดลอง

ในการทดลองได้ทำการวัดค่าตัวแปรต่าง ๆ และบันทึกรูปคลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าระหว่างสาย และกระแสไฟฟ้าในแต่ละสาย ขณะมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านหมุนด้วยความเร็วพิกัดที่ค่าภาระทางกลต่าง ๆ

ในที่นี้จะทำการแสดงรูปคลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าระหว่างสาย และกระแสไฟฟ้าในแต่ละสาย ขณะมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านหมุนด้วยความเร็วพิกัดที่ภาระทางกล 6.55 กิโลกรัม



(ก) ค่าแรงดันไฟฟ้า



(ข) ค่ากระแสไฟฟ้า

รูปที่ 4.2 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟส a b และกระแสไฟฟ้าเฟส a ขณะมอเตอร์หมุนด้วยความเร็ว

พิกัด และ (ก) ค่าแรงดันไฟฟ้า, (ข) ค่ากระแสไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



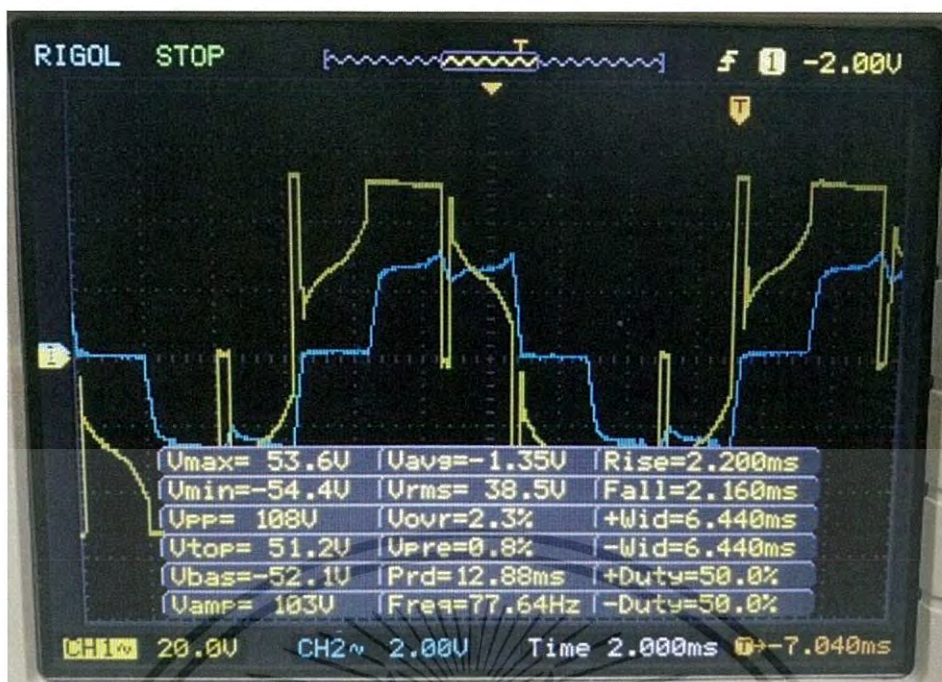
(ก) ค่าแรงดันไฟฟ้า



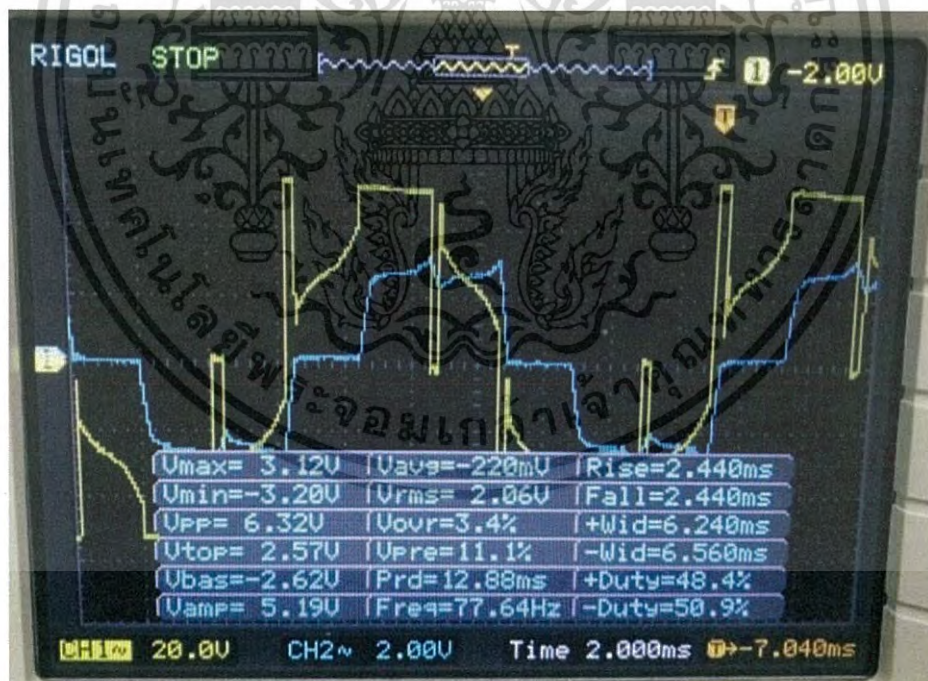
(ข) ค่ากระแสไฟฟ้า

รูปที่ 4.3 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟส b c และกระแสไฟฟ้าเฟส b ขณะมอเตอร์หมุนที่ความเร็ว
 พิกัด และ (ก) ค่าแรงดันไฟฟ้า, (ข) ค่ากระแสไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ค่าแรงดันไฟฟ้า



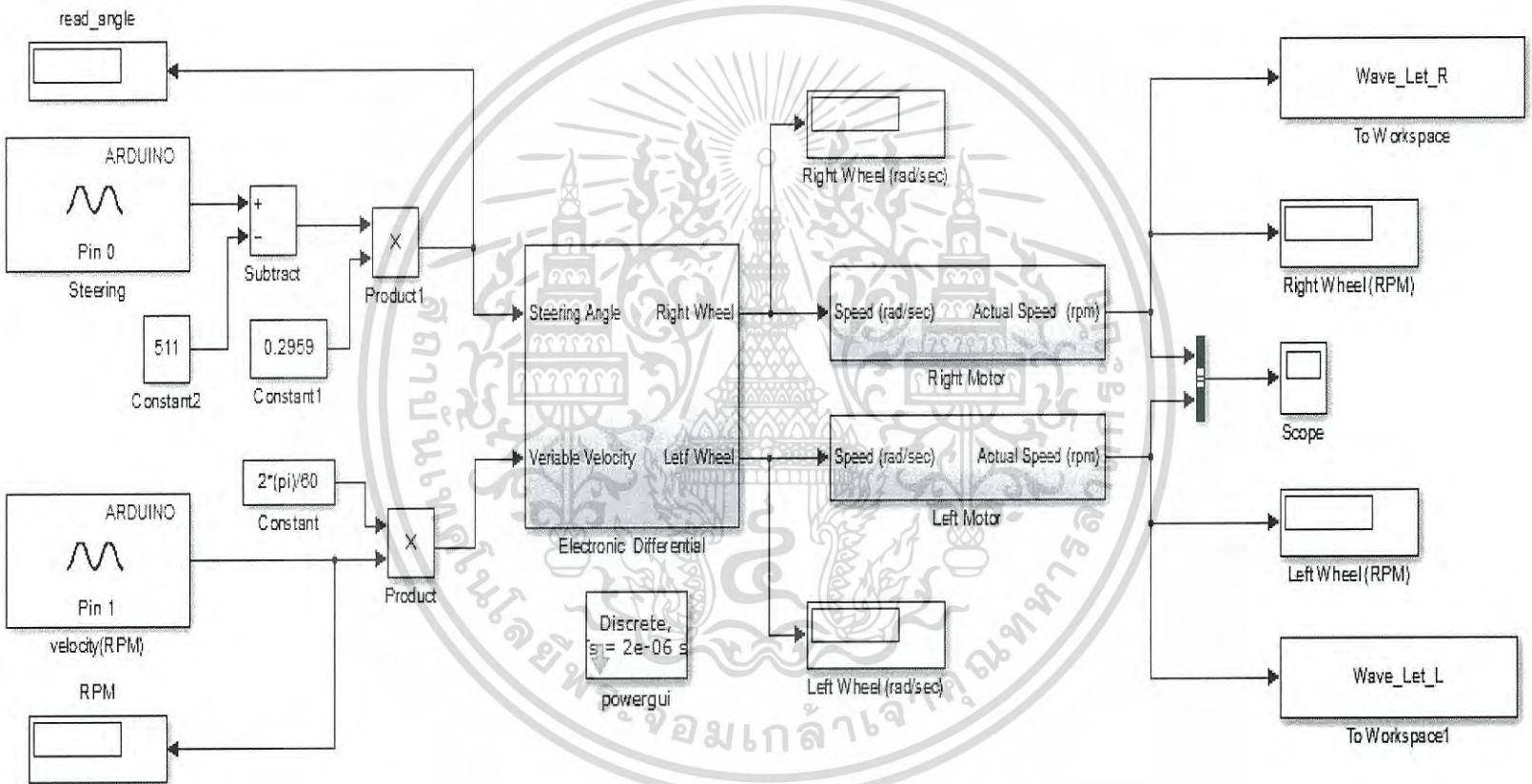
(ข) ค่ากระแสไฟฟ้า

รูปที่ 4.4 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟส c a และกระแสไฟฟ้าเฟส c ขณะมอเตอร์หมุนที่ความเร็ว

พิกัด และ (ก) ค่าแรงดันไฟฟ้า, (ข) ค่ากระแสไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

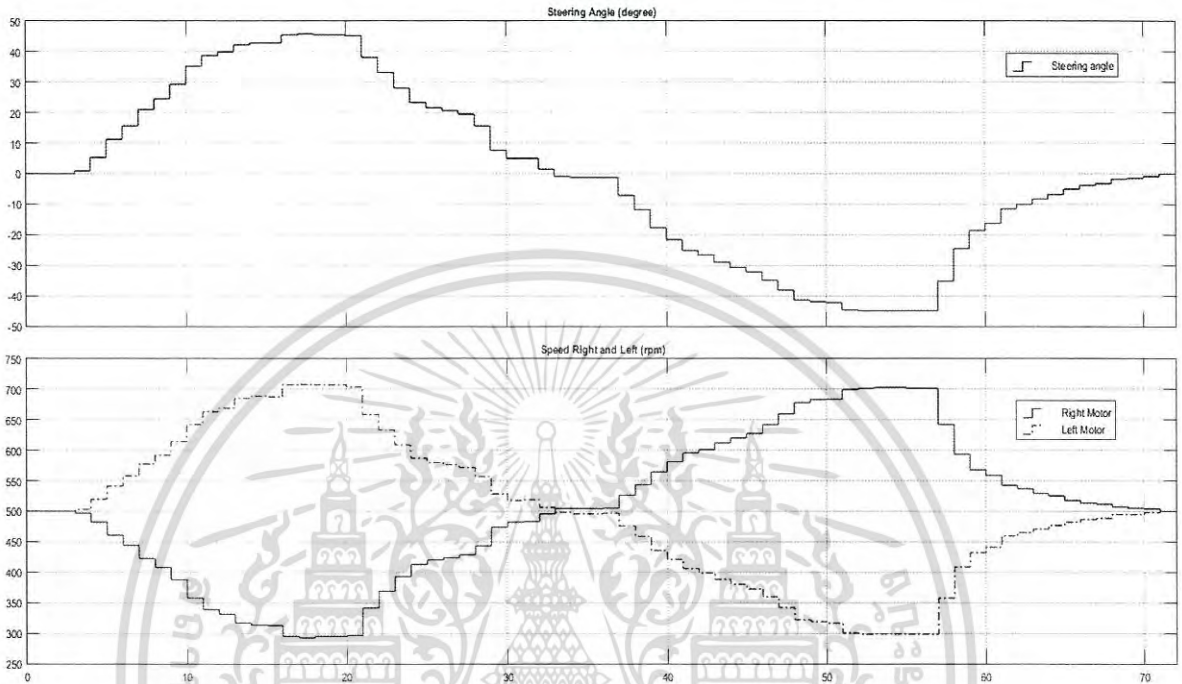
4.2 การจำลอง Electronic differential จาก MATLAB/Simulink



รูปที่ 4.5 Electronic differential จาก MATLAB/Simulink

4.2.1 ผลการจำลองขณะเลี้ยวขวาและซ้ายด้วยมุม 45 องศา เมื่อความเร็วคงที่ 500 rpm

เมื่อความเร็วของตัวรถคงที่ 500 rpm และเลี้ยวขวาด้วยมุม 45 องศา จะทำให้ล้อซ้ายหมุนด้วยความเร็ว 700 rpm, ล้อขวา 300 rpm โดยประมาณ และหากเลี้ยวซ้ายล้อขวาจะเร็วกว่าล้อซ้ายด้วยความเร็วเช่นเดียวกันกับการเลี้ยวขวา

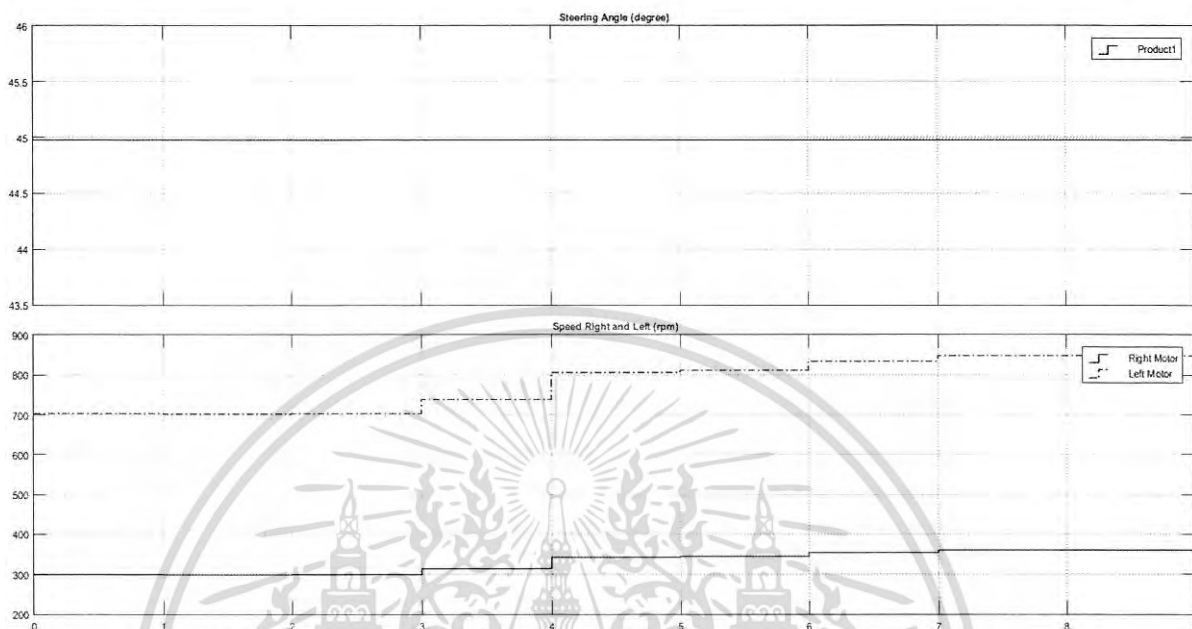


รูปที่ 4.6 ผลการจำลองขณะเลี้ยวขวาและซ้ายด้วยมุม 45 องศา เมื่อความเร็วคงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 ผลการจำลองขณะเลี้ยวขวาด้วยมุม 45 องศาขณะที่ เมื่อความเร็วเปลี่ยนจาก 500-600 rpm

จากรูปที่ 4.10 เมื่อเวลา 3 วินาทีทำการเพิ่มความเร็วจาก 500 rpm จะเห็นได้ว่า ความเร็วของล้อซ้ายจะเร็วกว่าล้อขวา และขณะเลี้ยวความเร็วของล้อทั้งสองจะเพิ่มขึ้นตามความเร็วของตัวรถ



รูปที่ 4.7 ผลการจำลองขณะเลี้ยวขวาด้วยมุม 45 องศา เมื่อความเร็วเปลี่ยนจาก 500-600 rpm

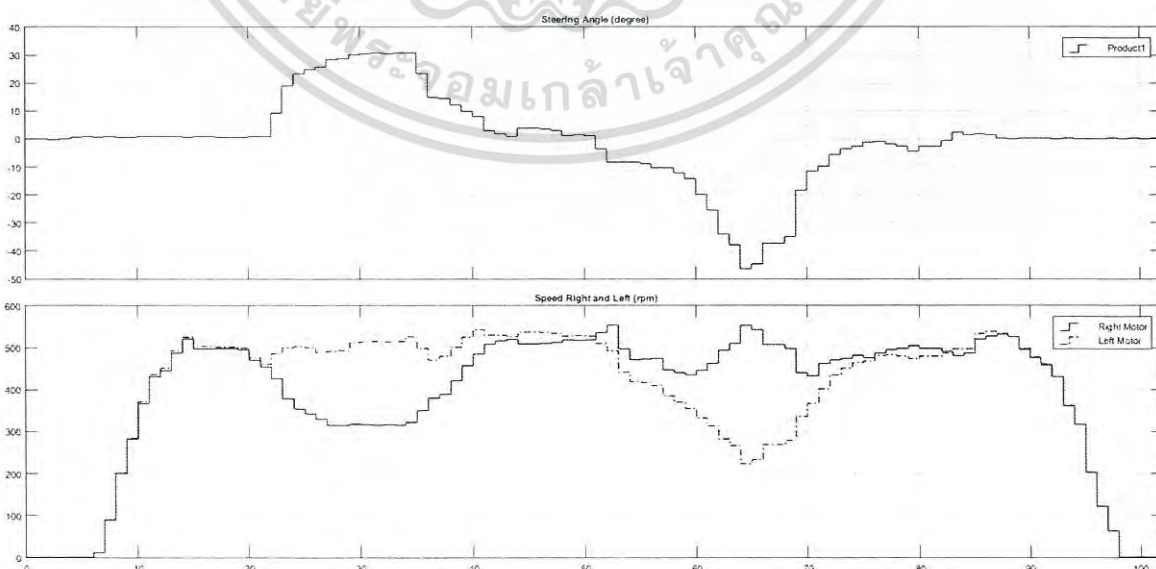
4.2.3 ผลการจำลองขณะเลี้ยวขวาและซ้าย ด้วยมุมและความเร็วที่เปลี่ยนแปลง

ช่วง 0-15 วินาที : รถวิ่งในทางตรงและเร่งความเร็วเพิ่มขึ้นจาก 0

ช่วง 16-50 วินาที : รถเลี้ยวขวาโดยมีการผ่อนและเร่งคันเร่ง

ช่วง 16-50 วินาที : รถเลี้ยวซ้ายโดยมีการผ่อนและเร่งคันเร่ง

ช่วง 51-90 วินาที : รถวิ่งในทางตรงและลดความเร็วลงจนเป็น 0



รูปที่ 4.8 ผลการจำลองขณะเลี้ยวขวาและซ้าย ด้วยมุมและความเร็วที่เปลี่ยนแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ผลการทดสอบมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านที่มีชุดควบคุม Electronic differential

ตารางที่ 4.2 การจำลองความเร็วจาก MATLAB/Simulink

Level (p.u.)	δ (degrees)	n_V (rpm)	n_{r_L} (rpm)	n_{r_R} (rpm)
0.70 (600 rpm)	0	600	600.00	600.00
	5	600	621.20	578.80
	-5	600	578.80	621.20
	10	600	642.73	557.27
	-10	600	557.27	642.73
	20	600	688.19	511.81
	-20	600	511.81	688.19
0.78 (730 rpm)	0	730	730.00	730.00
	5	730	755.79	704.21
	-5	730	704.21	755.79
	10	730	781.98	678.02
	-10	730	678.02	781.98
	20	730	837.30	622.70
	-20	730	622.70	837.30
1.00 (930 rpm)	0	930	930.00	930.00
	5	930	962.86	897.14
	-5	930	897.14	962.86
	10	930	996.22	863.78
	-10	930	863.78	996.22
	20	930	1066.70	793.30
	-20	930	793.30	1066.70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ทดสอบความเร็วของชุดควบคุม Electronic differential

Level (p.u.)	δ (degrees)	n_V (rpm)	n_{r_L} (rpm)	n_{r_R} (rpm)
0.70 (600.0 rpm)	0	600.0	600	600
	5	601.0	642	560
	-5	598.5	555	642
	10	603.0	695	511
	-10	603.0	507	699
	20	624.0	819	429
	-20	626.5	431	822
0.78 (730.5 rpm)	0	730.5	730	731
	5	730.0	786	674
	-5	726.5	665	788
	10	739.0	858	620
	-10	739.0	616	862
	20	719.0	932	506
	-20	715.0	500	930
1.00 (930.0 rpm)	0	930.0	930	930
	5	930.5	931	930
	-5	930.5	932	929
	10	868.5	930	807
	-10	871.0	812	930
	20	735.5	930	541
	-20	735.0	538	932

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.1 วิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากการทดสอบมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านที่มีชุดควบคุม Electronic differential พบว่า เมื่อป้อนค่ามุมเลี้ยวที่ $\delta = 0^\circ$ ในการจำลองจาก MATLAB/Simulink ความเร็วของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านจะมีค่าเท่ากันพอดี แต่เมื่อนำมาทดสอบจริงความเร็วของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านทั้ง 2 ตัว มีคุณลักษณะเฉพาะที่แตกต่างกัน เมื่อป้อนค่ามุมเลี้ยวที่ $\delta = 10^\circ$ เป็นสถานะของการเลี้ยวขวา ในการจำลองความเร็วของล้อฝั่งขวาจะช้ากว่าความเร็วของล้อฝั่งซ้าย ซึ่งในการทดสอบก็ให้ผลเช่นเดียวกัน และเมื่ออยู่ในสถานะของการเลี้ยวซ้าย การจำลองและการทดสอบให้ผลเหมือนกันคือ ความเร็วของล้อฝั่งซ้ายช้ากว่าความเร็วของล้อฝั่งขวา สำหรับการจำลองจาก MATLAB/Simulink เมื่อป้อนค่าจาก potentiometer ที่ตั้งค่าให้เป็นคั่นแรงที่ 1.00 p.u. และมุมเลี้ยว $\delta = 20^\circ$ จะทำให้ความเร็วที่ล้อฝั่งซ้ายมีค่าเท่ากับ 1066.70 rpm ซึ่งเกินพิกัดของมอเตอร์ที่ 930 rpm จะทำให้มอเตอร์เกิดความเสียหายได้ ดังนั้นชุดควบคุม Electronic differential จะมีชุดคำสั่งป้องกันไม่ให้ความเร็วเกินพิกัด จึงส่งผลให้ในการทดสอบจริง ความเร็วที่ล้อฝั่งซ้ายจะมีความเร็วเหลือเพียง 930 rpm และความเร็วรวมของรถ (n_v) มีความเร็วลดลงและมีค่าเท่ากับ 735.5

4.4 การทดสอบมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านที่มีชุดคำสั่ง feedback ความเร็ว

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบชุดควบคุม Electronic differential

Level (p.u.)	Load (kg)	Not set feedback speed (rpm)	Set feedback speed (rpm)
0.70 (600 rpm)	No-load	552	552
	0.5	510	551
	1.0	469	550
	2.0	412	551
	3.0	369	545
0.78 (730 rpm)	No-load	680	680
	0.5	630	665
	1.0	584	666
	2.0	514	668
	3.0	460	611
1.00 (930 rpm)	No-load	881	881
	0.5	824	822
	1.0	772	771
	2.0	687	687
	3.0	622	621

ขณะไม่มีชุดคำสั่ง feedback ความเร็ว (Not set feedback speed)

Level = 0.70 p.u. ที่ภาระทางกล 0.5 kg ความเร็วจะตกลงไปจาก 552 rpm เป็น 510 rpm

$$\begin{aligned} \text{Speed regulation} &= \frac{(No-load)-(ON-load)}{No-load} \times 100\% \\ &= \frac{552-510}{552} \times 100\% = 7.61\% \text{ หรือ ความเร็วตกลงไป } 7.61\% \end{aligned}$$

Level = 0.70 p.u. ที่ภาระทางกล 1.0 kg ความเร็วจะตกลงไปจาก 552 rpm เป็น 469 rpm

$$\begin{aligned} \text{Speed regulation} &= \frac{(No-load)-(ON-load)}{No-load} \times 100\% \\ &= \frac{552-469}{552} \times 100\% = 15.04\% \text{ หรือ ความเร็วตกลงไป } 15.04\% \end{aligned}$$

ขณะมีชุดคำสั่ง feedback ความเร็ว (Set feedback speed)

Level = 0.70 p.u. ที่ภาระทางกล 0.5 kg ความเร็วจะตกลงจาก 552 rpm เป็น 551 rpm

$$\begin{aligned} \text{Speed regulation} &= \frac{(No-load)-(ON-load)}{No-load} \times 100\% \\ &= \frac{552-551}{552} \times 100\% = 0.18\% \text{ หรือ ความเร็วตกลงไป } 0.18\% \end{aligned}$$

Level = 0.70 p.u. ที่ภาระทางกล 1.0 kg ความเร็วจะตกลงไปจาก 552 rpm เป็น 550 rpm

$$\begin{aligned} \text{Speed regulation} &= \frac{(No-load)-(ON-load)}{No-load} \times 100\% \\ &= \frac{552-550}{552} \times 100\% = 0.36\% \text{ หรือ ความเร็วตกลงไป } 0.36\% \end{aligned}$$

4.4.1 วิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากการทดสอบมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านที่มีชุดคำสั่ง feedback ความเร็ว และ ไม่มีชุดคำสั่ง feedback ความเร็ว เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน โดยการป้อนค่าจาก digital potentiometer ทั้งหมด 3 ค่า คือ 0.70 , 0.78 และ 1.00 p.u. ตามลำดับ จากนั้นวัดค่าความเร็วที่เกิดขึ้นเพื่อเปรียบเทียบความเร็วที่เปลี่ยนแปลงไประหว่างสถานะที่ไม่มีภาระทางกล (No-load) กับสถานะที่มีภาระทางกล (ON-load) โดยภาระทางกลที่ใช้มี 4 ค่า คือน้ำหนัก 0.5 kg, 1.0 kg, 2.0 kg และ 3.0 kg จะเห็นได้ว่าเมื่อป้อนค่า digital potentiometer ที่ 0.70 p.u. ให้กับมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านที่ไม่มีชุดคำสั่ง feedback ความเร็ว และใส่ภาระทางกลที่ 0.5 kg (ON-load) ความเร็วจะตกลงจากสถานะที่ไม่มีภาระทางกล (No-load) จาก 552 rpm เป็น 510 rpm หรือ ความเร็วตกลงไป 7.61 % แต่เมื่อใส่ชุดคำสั่ง feedback ความเร็ว และทดสอบโดยใช้น้ำหนักของภาระทางกลเดียวกัน ความเร็วจะเปลี่ยนแปลงน้อยลงเหลือเพียง 0.18 % และเห็นได้ชัดในการทดสอบเมื่อใส่ภาระทางกล 1.0 kg ความเร็วจะเปลี่ยนแปลงเพียง 0.36 % เท่านั้น เมื่อมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านมีชุดคำสั่ง feedback ความเร็ว

เมื่อทดสอบโดยป้อนค่า digital potentiometer ที่ 1.00 p.u. พบว่ามอเตอร์ที่มีชุดคำสั่ง feedback ความเร็วและไม่มีชุดคำสั่ง feedback ความเร็ว ความเร็วจะตกลงด้วยค่าที่เท่ากัน เนื่องจากค่าที่ป้อนเป็นค่าที่สูงสุดคือ 1.00 p.u. ทำให้ชุดคำสั่ง feedback ความเร็วไม่สามารถปรับความเร็วให้สูงขึ้นได้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

โดยทั่วไปยานพาหนะไฟฟ้าจะใช้มอเตอร์หนึ่งตัวต่อเข้ากับชุดเฟืองท้ายเพื่อขับเคลื่อนล้อหลังของยานพาหนะและปรับความเร็วของล้อหลังให้เหมาะสมขณะเลี้ยว ซึ่งชุดเฟืองท้ายดังกล่าวทำให้มวลของยานพาหนะมีน้ำหนักมาก จึงได้มีการพัฒนาปรับปรุงโดยใช้ระบบขับเคลื่อนแบบ Electronic Differential แทนชุดขับเคลื่อนแบบเฟืองท้ายที่มีน้ำหนักมากและมีการสูญเสีย โดยระบบขับเคลื่อนแบบ Electronic Differential จะปรับความเร็วของล้อหลังให้เหมาะสมขณะเลี้ยวได้เช่นเดียวกับชุดเฟืองท้ายแต่มีน้ำหนักที่เบากว่าและสูญเสียน้อยกว่า ซึ่งมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านเป็นตัวเลือกที่เหมาะสม เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูงและมีชุดควบคุมความเร็วซึ่งสามารถสร้างชุดคำสั่งให้ทำงานแบบ Electronic Differential ได้ จึงเหมาะแก่การนำมาใช้ในยานพาหนะไฟฟ้าและเป็นการเพิ่มสมรรถนะให้กับมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านด้วย

ทำการทดสอบเพื่อหาภาระทางกลที่เหมาะสมที่ทำให้มอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านใช้ประสิทธิภาพได้สูงสุด ใช้แหล่งจ่ายเป็นแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนจ่ายแรงดัน 48 โวลต์ ทดสอบโดยใช้เชือกพันรอบมอเตอร์ ปลายเชือกด้านบนเกี่ยวกับ Digital Force Gauge เพื่อวัดแรงดึงเชือก ปลายเชือกด้านล่างเกี่ยวกับน้ำหนักที่ใช้เป็นภาระทางกล ทดสอบที่น้ำหนัก 2.27 กิโลกรัม ถึงน้ำหนัก 10.27 กิโลกรัม โดยเพิ่มขึ้นทีละ 2 กิโลกรัม และทำการทดสอบซ้ำโดยใส่น้ำหนักที่ละเอียดมากขึ้นในช่วงน้ำหนักที่มอเตอร์มีประสิทธิภาพสูง บันทึกค่า แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า และความเร็วรอบของมอเตอร์ พบว่าเมื่อมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านรับภาระทางกลที่ 6.52 กิโลกรัม วัดความเร็วรอบของมอเตอร์ได้ 756.87 rpm และคำนวณหาความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์ (ω_r) มีค่าเท่ากับ 80.21 rad/s คำนวณหาแรงบิดลัพธ์ของมอเตอร์ (T_{output}) มีค่าเท่ากับ 1.19 Nm คำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าขาออกสามเฟสของมอเตอร์ (P_3) มีค่าเท่ากับ 95.79 วัตต์ วัดค่ากำลังไฟฟ้าขาเข้าของมอเตอร์ไฟฟ้าทั้งสามเฟส (P_{2a}, P_{2b}, P_{2c}) และนำมาบวกกันได้ $P_{2,3\phi}$ เท่ากับ 126.53 วัตต์ นำค่ากำลังไฟฟ้าขาออกสามเฟสและกำลังไฟฟ้าขาเข้าสามเฟสมาคำนวณหาประสิทธิภาพจะได้ 75.71% ซึ่งเป็นประสิทธิภาพสูงสุด

จำลองการทำงาน ของระบบ Electronic Differential ในโปรแกรม MATLAB/Simulink จากนั้นสร้างชุดควบคุม Electronic Differential เพื่อทดสอบการทำงานและบันทึกค่า มุมเลี้ยว ความเร็วรวม ความเร็วของล้อด้านซ้ายและล้อด้านขวา ทดสอบสภาวะทางตรงที่มุมเลี้ยว $\delta = 0^\circ$ ป้อนค่า Level = 200 step มีค่าความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 730.5 rpm ความเร็วที่ล้อด้านซ้ายมีค่าเท่ากับ 730 rpm และความเร็วที่ล้อด้านขวามีค่าเท่ากับ 731 rpm ซึ่งค่าความเร็วทั้ง 2 ล้อ มีค่าใกล้เคียงกัน ทดสอบสภาวะเลี้ยวขวาที่มุมเลี้ยว $\delta = 5^\circ$ ป้อนค่า Level = 200 step จะทำให้ล้อซ้ายมีความเร็วมากกว่าล้อขวา ค่าความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 730 rpm ความเร็วที่ล้อด้านซ้ายมีค่าเท่ากับ 786rpm และความเร็วที่ล้อด้านขวามีค่าเท่ากับ 674 rpm เมื่ออยู่ในสถานะของการเลี้ยวซ้าย ความเร็วของล้อฝั่งซ้ายช้ากว่าความเร็วของล้อฝั่งขวา ผลของการทดลองแสดงถึงการดำเนินงานของชุดควบคุม Electronic differential ที่สามารถควบคุมความเร็วของมอเตอร์ให้เป็นไปตามความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหมาะสม ขณะมุมเลี้ยวค่าต่าง ๆ ได้เป็นอย่างดี ป้อนค่า Level = 255 step และมุมเลี้ยว δ มากขึ้น ความเร็วเฉลี่ยจะมีค่าลดลงเนื่องจากชุดควบคุม Electronic differential มีชุดคำสั่งที่ป้องกันความเร็วเกินพิกัดที่ 930 rpm ทำให้สมรรถนะในการใช้งานของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านดีขึ้น และมีความน่าเชื่อถือเนื่องจากมีชุดคำสั่งที่ป้องกันความเร็วเกินพิกัด จึงสามารถทำงานได้ใกล้เคียงกับชุดเฟืองท้ายของรถน้ำมัน

การทดสอบชุดคำสั่ง feedback ความเร็ว โดยใส่ภาระทางกลค่าต่างๆ ให้กับมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านที่ยังไม่มีชุดคำสั่งและวัดความเร็วที่เกิดขึ้น ทำการทดสอบซ้ำโดยใส่ชุดคำสั่งให้กับมอเตอร์ พบว่าความเร็วที่มีค่าลดลงเนื่องจากมีภาระทางกล จะมีค่าเพิ่มขึ้นจนใกล้เคียงกับค่าความเร็วขณะไม่มีภาระทางกล ซึ่งผลการทดสอบแสดงถึงการทำงานของชุดคำสั่งกับมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านให้ผลออกมาเป็นที่น่าพอใจ แต่เมื่อทดสอบโดยป้อนค่าสูงสุดที่ level = 255 step ชุดคำสั่งจะไม่สามารถเพิ่มความเร็วให้กับมอเตอร์ได้ เพราะค่าที่ป้อนเป็นค่าสูงสุด จึงส่งผลให้ความเร็วตกลง การทดสอบทั้งชุดคำสั่งป้องกันความเร็วเกินพิกัดและชุดคำสั่ง feedback ความเร็ว แสดงให้เห็นถึงการทำงานของมอเตอร์ได้หลากหลายหน้าที่และจะเป็นประโยชน์อย่างมากเมื่อล้อรถข้างหนึ่งเกิดตกหลุมหรือลื่นไถล ซึ่งการมีชุดคำสั่งป้องกันความเร็วเกินพิกัดและชุดคำสั่ง feedback ความเร็ว จะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบขับเคลื่อน

ข้อเสนอแนะ

1. เพื่อการเลือกใช้งานของมอเตอร์ที่หลากหลาย ตามความเหมาะสมของผู้ใช้ ควรทดสอบ EDs กับมอเตอร์ชนิดอื่นๆ
2. ใช้ Tachometer วัดความเร็วรอบของมอเตอร์แบบสัมผัส จะให้ค่าแม่นยำกว่า
3. คุณลักษณะของมอเตอร์ทั้ง 2 ตัว ที่นำมาใช้ควรมีคุณลักษณะทางไฟฟ้าและทางกลเหมือนกัน เพื่อไม่ให้เกิดความคลาดเคลื่อน
4. ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุม EDs จะมีความเสถียรมากกว่าการใช้ Arduino
5. กระบวนการ feedback ที่เราได้ทำนั้น เป็นแบบ PI controller ที่จะเอาค่า 5% ของ error มาคิดวนซ้ำๆ ซึ่งเป็นกระบวนการที่เสี่ยงต่อการเกิด over shoot สูง ขณะรถขับเคลื่อนด้วยความเร็วสูง เป็นผลทำให้รถอาจเกิดการสะบัด ข้อเสนอแนะคือถ้าค่าของ error ที่เกิดขึ้นมีค่าสูง ค่า feedback ควรน้อยกว่า 5 % หรือควบคุมค่าที่สั่งไม่ให้มากจนเกินไป แต่ถ้า error ที่เกิดขึ้น มีค่าต่ำ ค่า feedback ควรมีค่าสูงประมาณ 5 % ซึ่งมันก็คือ PID controller ที่มีค่า over shoot ต่ำ และเกิดค่า error ที่สภาวะคงตัวต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Abdelhakim Haddoun, Mohamed Benbouzid, Demba Diallo, Rachid Abdessemed, Jamel Ghouili, Kamel Srairi, “Design and implementation of an electric differential for traction application”, *IEEE VPPC 2010*, Sep 2010, pp.1-6.
- [2] Juhi Nishat Ansari, Sapna L, “Speed control of BLDC motor for electric vehicle”, *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, Vol.3 Issue 5, May-2014, pp.1-6.
- [3] Aditya Gupta, Anshul Jain, and Arpit Rastogi, “Design and implementation of electronic differential for electric vehicle employing BLDC motors”, 2016, pp.1-35
- [4] I. Janpana, R. Chaisricharoenb, P. Boonyananta, “Control of the Brushless DC Motor in Combine Mode”, *Procedia Engineering* 32, 2012, pp.279-285.
- [5] P.Sarala, Dr. S. F Kodad, and Dr. B. Sarvesh, “Analysis of Closed loop Current controlled BLDC Motor Drive”, *International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT)*, 2016, pp.1464-1468.
- [6] A. Ravi and Sankaran Palani, “Robust electronic differential controller for an electric vehicle”, *American Journal of Applied Science* 10 (11), 2013, pp.1356-1362.
- [7] Merve Yildirim, Eyyüp Öksüztepe, Burak Tanyeri, and Hasan Kürüm, “Design of electronic differential system for an electric vehicle with In-wheel motor”, *IEEE*, 2016.
- [8] K. Hartani, Y. Miloud, and A. Miloudi, “Electric vehicle stability with rear electronic differential traction”, *Electric vehicle stability with rear electronic differential traction*, pp.1-5, 2-4 November 2010.
- [9] Guillermo A. Magallan, Cristian H. De Angelo, Guillermo Bisheimer and Guillermo Garcia, “A neighborhood electric vehicle with electronic differential traction control”, *IEEE*, 2016.
- [10] Ma Xiaojun, Wang Guodong, Liu Chunguang and Yang Huaibin, “The electric drive system for brushless DC motor”, *ITEC Asia-Pacific*, 2014.
- [11] Y. E. Zhao, J. W. Zhang and X. Q. Guan, “Modeling and simulation of electronic differential system for an electric vehicle with two-motor-wheel drive”, *IEEE*, 2009.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

High Performance BLDC Motor Control for Electric Vehicle

Werachet Khan-Ngern, Wiwat Keyoonwong

Narongrit Chatsiriwech, Pongsakorn Sangnopparat, Ponghiran Mattayaboon and Pattarakij Worawalai

Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

1 Soi Chalongkrung 1, Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand, Office: +66 2329 8000 ext 3515, 3939

Email: kkveerac@kmitl.ac.th

Abstract— This paper presents about design of high performance brushless dc motor (BLDC) control for electric vehicle (EV) which focusing on rear differential of electric car uses electronic control system or well known as electronic differential system (EDs). The advantage of EDs is help to adjust wheel speed while cornering by driving two BLDC motor attached to two rear wheels that two wheel speed is different. This system can accurately control process by monitoring output and feeding some of it back to compare actual output with desired output so as to reduce the error. It is well known as closed loop control system. The speed of BLDC is experimentally measured by a tachometer. The steering angle and speed of EV is calculated by equations derived from Ackermann-Jeantand model using Arduino. Load simulation using MATLAB Simulink. The experimental results electronic differential using will enhances efficiency of electric vehicle driving system.

Keywords— brushless dc; electric vehicle; electronic differential system

I. INTRODUCTION

In the present, electric vehicles that use battery are going to replace fuel vehicles because vehicles that use petroleum or fuel vehicles create pollution to environment, but they can generate mechanical power higher than electric vehicles. Fuel vehicles use rear differential to vary speed between left wheels and right wheels to be different and provide a balance while curving, but it causes a mechanical loss. Therefore, electric vehicles are necessary to reduce mechanical loss to make drive high performance and reduce pollution to make good environment.

The selection of the right electric motor is very important to the electric vehicles. Various types of electric motors have been used in electric vehicles in the past. However, from efficiency point of view, BLDC motor drives are the best choice for electric vehicles. BLDC motors are very popular in a wide variety of applications. When compared with a DC motor, it has simple structure, light weight, higher speed range, noiseless operation, maintenance free operation, large starting torque, precise and accurate control and high dynamic response. The BLDC motor uses an electric commutator rather than a mechanical commutator, so it is more reliable than the DC

motor. In a BLDC motor, rotor magnets generate the rotor's magnetic flux, so BLDC motors achieve higher efficiency.

The usual configuration of vehicle presents one motor to drive two wheels with a differential gear. However, the total mass of an electric vehicle is extremely increased by its accessories. From the above reasons, The Electronic Differential has been developed for use in electric vehicles to replace the rear differential or the conventional heavy gear box because it can reduce electric vehicle body mass. For Electronics Differential drives include a brushless DC motor (BLDC) driven by an inverter. The Electronics Differential is characterized by some characteristics in that there is no mechanical link between the two drive wheels, the traction is separately applied to each wheel by the controller that will apply less power to the inner wheel in curving.

The goal of any electronic or electrical control system is to measure, monitor, and control a process which can accurately control process by monitoring its output and feeding some of it back to compare the actual output with the desired output so as to reduce the error and if disturbed, it brings the output of system back to the original or desired response. The quantity of measured output is called "feedback signal", and the type of control system which uses feedback signals to both control and adjust itself is called "Close loop System".

Closed-loop control systems have many advantages over open-loop systems. One advantage is the fact that the use of feedback makes system response relatively insensitive to external disturbances and internal variations in system parameters such as temperature. Therefore, it is possible to use relatively inaccurate and inexpensive components to obtain the accurate control of a given process.

This paper presents about design of high performance brushless dc motor (BLDC) control for electric vehicles (EV) which focus on rear differential of electric car uses electronic control system or well known as Electronic Differential system (EDs). Electronic Differential system help to adjust wheel speed while cornering by driving two BLDC motor attached to two rear wheels that two wheel speed is different. This system uses

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

closed loop control system which can accurately control process by monitoring output and feeding some of it back to compare actual output with desired output so as to reduce the error. The speed of BLDC is experimentally measured by a tachometer. The steering angle and speed of EV is calculated by equations derived from Ackermann-Jeantand model using Arduino. Load simulation using MATLAB Simulink. The experimental results with Electronic Differential using will enhances efficiency of electric vehicle driving system.

II. ELECTRONIC DIFFERENTIAL SYSTEM

When an EV is driven on a curved road. The speed of the outer wheel must be higher than the speed of the inner wheel. If the vehicle is turning right, the left wheel speed is increased and the right wheel speed remains equal to the common reference speed ω_{ref} . If the vehicle is turning left, the right wheel speed is increased and the left wheel speed remains equal to the common reference speed ω_{ref} . Ackermann-Jeantand model of EDS for an EV with in-wheel motor is given in Fig. 1.

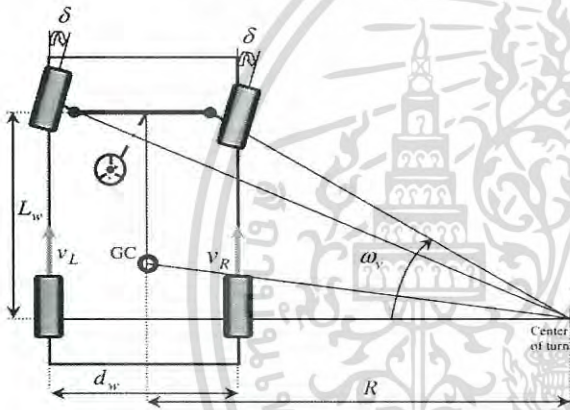


Fig. 1. Ackerman geometry model [2].

A position encoder is used for the steering angle (δ). Once δ is zero, it is explained that EV drives on a straight road. If δ is different from zero, it means that EV turns left or right. The equations derived from this model are as follows

The linear speed of each wheel drive

$$V_L = \omega_v \left(R + \frac{d_w}{2} \right) \quad (1)$$

$$V_R = \omega_v \left(R - \frac{d_w}{2} \right) \quad (2)$$

The radius of curve or distance from center of gravity to center of circle.

$$R = \frac{L_w}{\tan \delta} \quad (3)$$

The angular speed of each wheel by substituted the radius of curve.

$$\omega_{r_L} = \frac{L_w + (d_w/2) \tan \delta}{L_w} \omega_v \quad (4)$$

$$\omega_{r_R} = \frac{L_w - (d_w/2) \tan \delta}{L_w} \omega_v \quad (5)$$

The difference between the angular speeds of the wheel drive.

$$\Delta\omega = \omega_{r_L} - \omega_{r_R} = \frac{d_w \tan \delta}{L_w} \omega_v \quad (6)$$

$$\delta > 0 \Rightarrow \text{Turn right}$$

$$\delta = 0 \Rightarrow \text{Straight ahead}$$

$$\delta < 0 \Rightarrow \text{Turn left}$$

The angular speed of left wheel and right wheel while cornering.

$$\omega_{r_L}^* = \omega_v + \frac{\Delta\omega}{2} \quad (8)$$

$$\omega_{r_R}^* = \omega_v - \frac{\Delta\omega}{2} \quad (9)$$

III. DESIGN AND SIMULATION IN MATLAB/SIMULINK

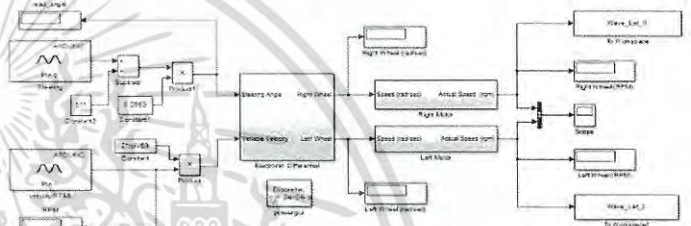


Fig. 2. Block diagram of EDS in MATLAB

In design to simulate the collection of turn angle (δ) from steering wheel and speed (ω_v) from accelerator, we will use three items:

- 1.) Arduino Mega 2560 1 item
- 2.) Potentiometer 2 item

Arduino Mega 2560 and two potentiometers are used in design that potentiometer is set to be accelerator and steering wheel respectively. Arduino is set to receive and read values from potentiometer. Voltage 5 V is analog input, which is transform into 0 – 1023 bit. By the number of bits of Arduino as shown in Figure 3.

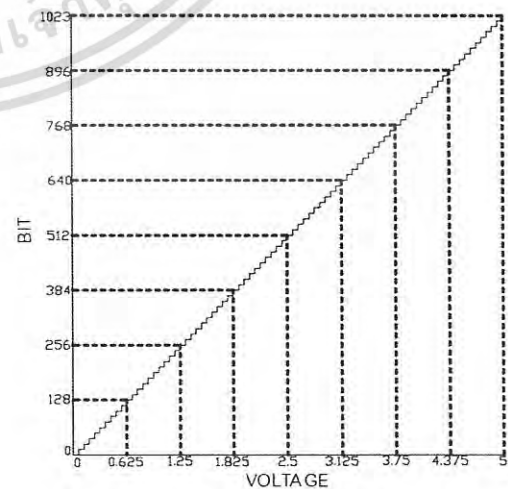


Figure 3. Relations between VOLTAGE and BIT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A. Potentiometer setting is steering wheel

Voltage 2.5 V is bit value at 512 as shown in figure 3. Then, set Arduino to read value at 512 bit to be 0 degree ($\delta = 0$) as shown in figure 4. This is Straight ahead.

When decrease the analog input, resulting in bit value is less than 512 and the turn angle (δ) will be negative. This is left turning.

When increase the analog input, resulting in bit value is more than 512 and the turn angle (δ) will be positive. This is right turning.

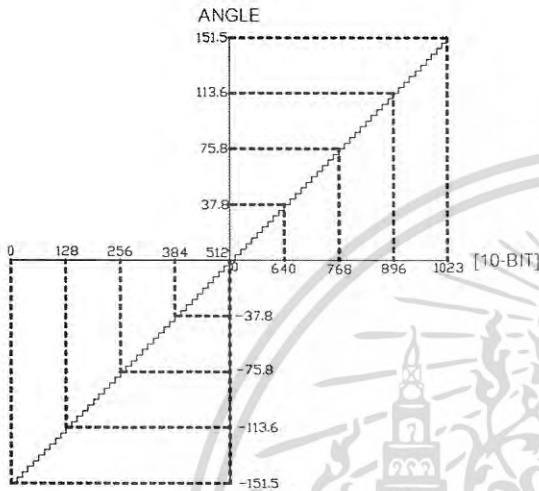


Figure 4. Relations between BIT and ANGLE

B. Potentiometer setting is accelerator

Accelerating is voltage and bit increasing as shown in figure 3. As a result, the speed of motor at rear wheels increase.

Deceleration is voltage and bit decreasing. As a result, the speed of motor at rear wheels decrease.

Then, set Arduino to read bit value at 1023 as the rated motor speed is 100% (No-load) and bit value at 512 as the rated motor speed is 50%. As shown in Figure 5.

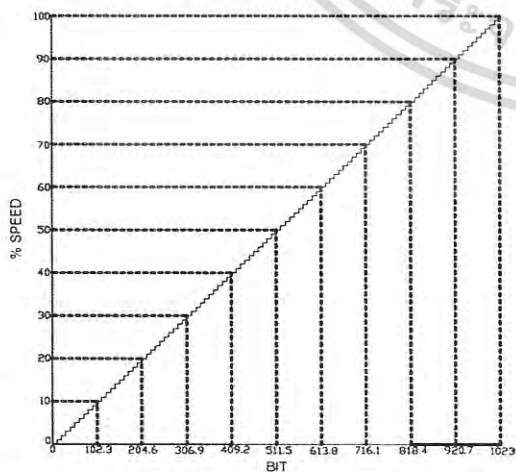


Figure 5. Relations between BIT and Speed percent

IV. SPEED FEEDBACK

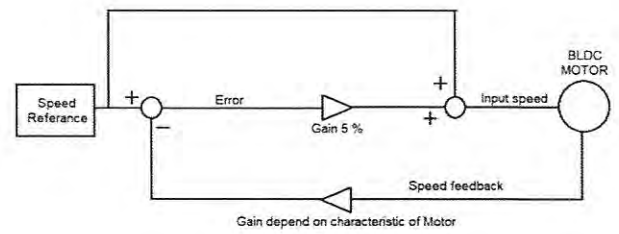


Fig. 6. Block diagram of speed feedback

This paper simulates an incident situation when a vehicle faces unusual road conditions, such as slippery road or rough road. These conditions result in distortion speed. Therefore, in order to cope with these problems, speed feedback has been studied to adjust suitable speed. Simulation of speed feedback has 2 states including No load state and On load state (rough road).

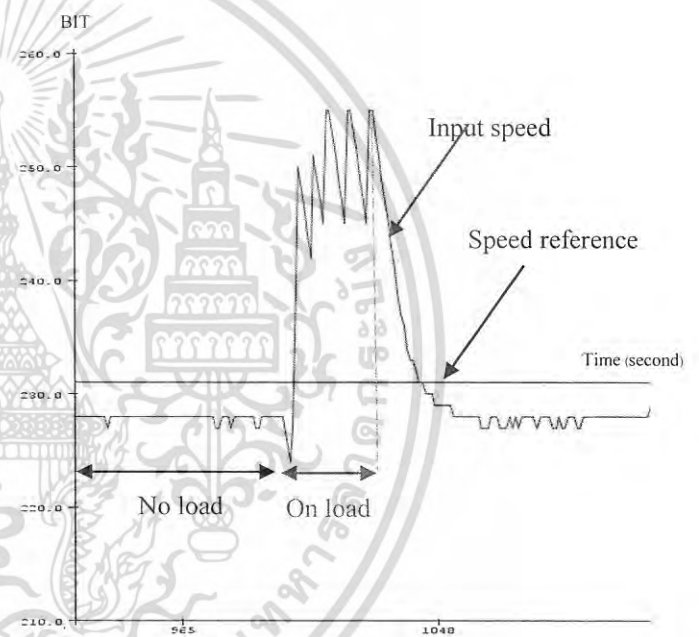


Fig. 7. Experimental result of input speed

No load : Input speed is lower than Speed reference because of error and slight swing.

On load : Load make BLDC motor to rotate with low speed, which is lower than the optimum speed. Input speed is adjusted upward and the swing is quite high. When load is removed, Input speed decreases and returns to optimum speed.

V. EXPERIMENTAL RESULTS

A. Simulation results while turning right and left with 45 degrees at 500 rpm (constant speed)

When the speed of the car is constant at 500 rpm and turns right at 45 degrees, the speed of left wheel rotates at about 700 rpm and the speed of right wheel rotates at about 300 rpm. On the other hand, the right wheel is faster than the left wheel with same speed as left turning.

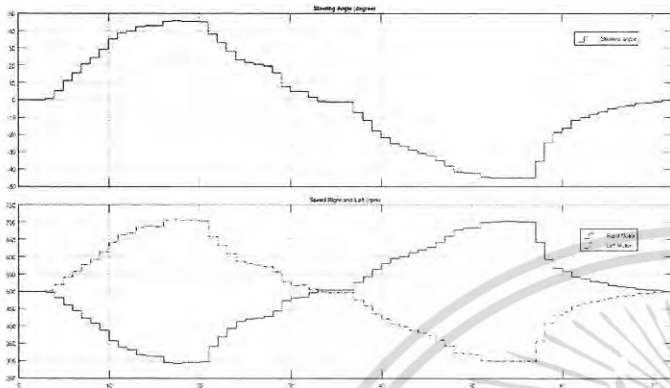


Figure 8. Simulation results while turning right and left with 45 degrees at constant speed.

B. Simulation results while turning right with 45 degrees at speed changing from 500-600 rpm

At 3 seconds, speed increasing from 500 rpm will show that the speed of left wheel is faster than the speed of right wheel. While turning, the speed of the two wheels will increase according to the speed of the car. As shown in Figure 9.

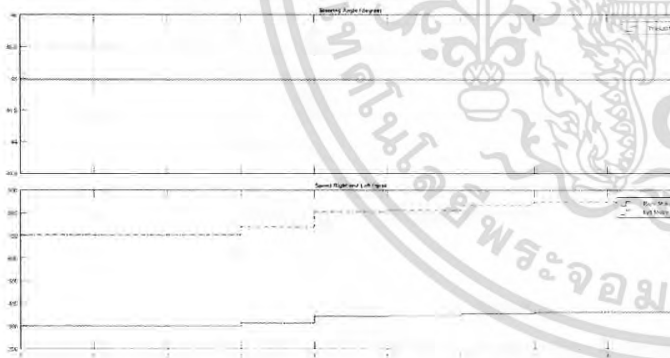


Figure 9. Simulation results while turning right with 45 degrees at speed changing from 500-600 rpm

C. Simulation results while turning right and left with angle and speed changing

During 0-15 seconds: Run in a straight line and accelerate from 0 speed.

During 16-50 seconds: Turn right car with deceleration and acceleration.

During 51-90 seconds: Turn left car with deceleration and acceleration.

During 91-100 seconds: Run in a straight line and decelerate to 0 speed

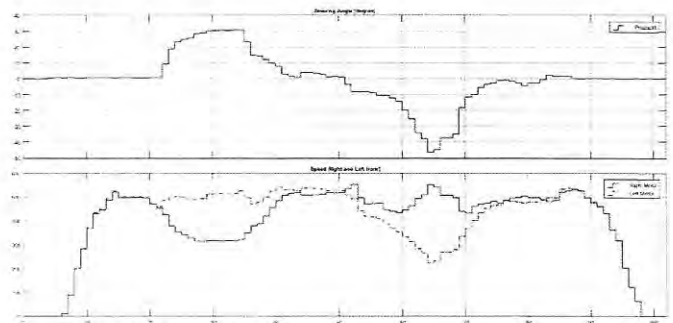


Figure 10. Simulation results while turning right and left with angle and speed changing

VI. CONCLUSION

This paper has described the design and simulation of EDs and speed feedback for an EV driving by brushless DC motor (BLDC). This system consists of BLDC motor, Arduino and potentiometer. Potentiometer is set to be accelerator and steering wheel. The speed of BLDC while cornering is estimated by Ackermann-Jeantand model using MATLAB. The steering angle is adjusted from 1 to 45 degrees. Experimental results show that speed is different while cornering. Simulation of speed feedback has 2 states including No load state and On load state which can be used for further development in the future.

REFERENCES

- [1] Merve Yıldırım, Eyyüp Öksüztepe, Burak Tanyeri, and Hasan Kürüm, "Design of electronic differential system for an electric vehicle with In-wheel motor", *IEEE*, 2016.
- [2] K. Hartani, Y. Miloud, and A. Miloudi, "Electric vehicle stability with rear electronic differential traction", *Electric vehicle stability with rear electronic differential traction*, pp.1-5, 2-4 November 2010.
- [3] Juhi Nishat Ansari, and Sapna L, "Speed control of BLDC motor for electric vehicle", *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, Vol.3 Issue 5, pp.1-6, May-2014
- [4] Guillermo A. Magallan, Cristian H. De Angelo, Guillermo Bisheimer and Guillermo Garcia, "A neighborhood electric vehicle with electronic differential traction control", *IEEE*, 2016.
- [5] Ma Xiaojun, Wang Guodong, Liu Chunguang and Yang Huaibin, "The electric drive system for brushless DC motor", *ITEC Asia-Pacific*, 2014.
- [6] Abdelhakim Haddoun, Mohamed Benbouzid, Demba Diallo, Rachid Abdessemed, and Jamel Ghouili, Kamel Srairi, "Design and implementation of an electric differential for traction application", *IEEE VPPC 2010*, pp.1-6, Sep 2010.
- [7] Santanu Sharma, Rubi Pegu, and Pranjal Barman, "Electronic differential for electric vehicle with single wheel reference", *JCPDEN*, 2015.
- [8] Y. E. Zhao, J. W. Zhang and X. Q. Guan, "Modeling and simulation of electronic differential system for an electric vehicle with two-motor-wheel drive", *IEEE*, 2009.
- [9] A. Ravi and Sankaran Palani, "Robust electronic differential controller for an electric vehicle", *American Journal of Applied Science*, 10 (11), pp.1356-1362, 2013.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Embedded Electronic Differential System on Two Brushless DC Motor Drives for Electric Vehicle Steering Control

Werachet Khan-Ngern, Wiwat Keyoonwong

Narongrit Chatsiriwech, Pongsakorn Sangnopparat, Ponghiraan Mattayaboon and Pattarakij Worawalai

Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

1 Soi Chalongkrung 1, Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand, Office: +66 2329 8000 ext 3515, 3939

Email: kkveerac@kmitl.ac.th

Abstract— The project present about Embedded Electronic Differential System(EDs) on Two Brushless DC (BLDC) Motors Drives for Electric Vehicle Steering Control. EDs using for steering control to balance speed between two BLDC motors and enhances efficiency of electric vehicle driving system. Efficiency testing on BLDC motor driving system to determine the efficiency of BLDC motor driving system including inverter and BLDC motor at various load conditions. The maximum efficiency of BLDC motor at 48 volts is 75.71% with 6.52 kg load Embedded system including speed limit to protect BLDC motor from overrated speed and feedback speed, Handwriting coding by Arduino mega 2560. The steering control using digital potentiometer, MCP41010. When the turning angle of electric vehicle is any degrees (right or left turning status), the control system will command. And when BLDC motor near overrated speed and turning status, the overall speed of electric vehicle is reduced because the both BLDC motors speed are limited at 840 rpm. The experimental results give satisfactory performance.

Keywords— brushless dc; electric vehicle; electronic differential system

I. INTRODUCTION

At present, the electric vehicle has become popular that only one motor driving two rear wheels with a mechanical differential gear. It produces a loss and heavy weights. Therefore, Electronic Differential system (EDs) with BLDC motors can control the speed while the car is turning like a mechanical differential gear but it has lighter weight and less loss. EDs isn't mechanical link between the two drive rear wheels, the traction power is separately applied to each wheel by the controller. This project presents Embedded system with code of BLDC motor command set that controls the speed of BLDC motors and feedback speed to compare between actual speed and reference speed. Coding by Arduino Mega 2560. resulting in a high performance BLDC motor and the electrical circuit design was made by Altium designer

Efficiency testing of BLDC motor driving system that is behalf of High performance BLDC motor control for electric

vehicle. Load test with using pulley. The rotational direction of BLDC motor causes friction to help pull the weight plates. First, put slot weight to the pulley. Second, keep the constant voltage at 48 volts. Then, increase load to system and change load from 2kg to 10kg. The maximum efficiency load is applied to be the position of BLDC motor on electric vehicle

The purpose of this study is focusing on embedded system with Arduino coding. In the system, digital potentiometer (MCP41010) sends analog input to two drive circuit of two BLDC motors. Tachometer is used to detect speed and then record results to the table. Electrical diagram for embedded system is designed by Altium. Experimental results and more detail are presented

II. ELECTRONIC DIFFERENTIAL SYSTEM FOR EV

When an EV is driven on a curved road. The speed of the outer wheel must be higher than the speed of the inner wheel. Ackermann-Jeantand model of EDS for an EV with in-wheel motor is given in Fig. 1.

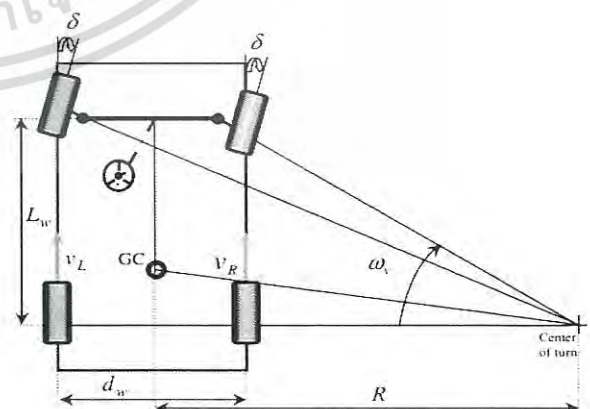


Fig. 1. Ackerman geometry model [2].

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A position encoder is used for the steering angle (δ). Once δ is zero, it is explained that EV drives on a straight road. If δ is different from zero, it means that EV turns left or right. The equations derived from this model are as follows

The linear speed of each wheel drive

$$V_L = \omega_v \left(R + \frac{d_w}{2} \right) \quad (1)$$

$$V_R = \omega_v \left(R - \frac{d_w}{2} \right) \quad (2)$$

The radius of curve or distance from center of gravity to center of circle.

$$R = \frac{L_w}{\tan \delta} \quad (3)$$

The angular speed of each wheel by substituted the radius of curve.

$$\omega_{wheel_left} = \frac{L_w + (d_w/2) \tan \delta}{L_w} \omega_v \quad (4)$$

$$\omega_{wheel_right} = \frac{L_w - (d_w/2) \tan \delta}{L_w} \omega_v \quad (5)$$

The difference between the angular speeds of the wheel drive.

$$\Delta\omega = \omega_{wheel_left} - \omega_{wheel_right} = \frac{d_w \tan \delta}{L_w} \omega_v \quad (6)$$

$$\delta > 0 \Rightarrow \text{Turn right} \quad (7)$$

$$\delta = 0 \Rightarrow \text{Straight ahead} \quad (7)$$

$$\delta < 0 \Rightarrow \text{Turn left} \quad (7)$$

The angular speed of left wheel and right wheel while cornering.

$$\omega_{wheel_left}^* = \omega_v + \frac{\Delta\omega}{2} \quad (8)$$

$$\omega_{wheel_right}^* = \omega_v - \frac{\Delta\omega}{2} \quad (9)$$

III. EFFICIENCY TESTING OF BLDC MOTOR DRIVING SYSTEM

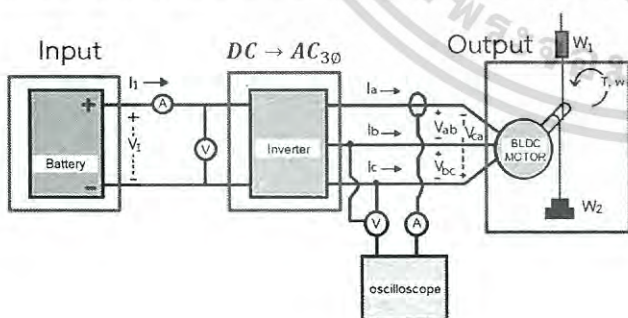


Fig. 2. The circuit diagram

Battery will supply power to inverter and constant at 48 volt. Then inverter convert dc to ac three phase power for feeding to BLDC motor. Oscilloscope is used to show graph of voltage and current input of motor. Efficiency of system is power output motor is divided by power input inverter.

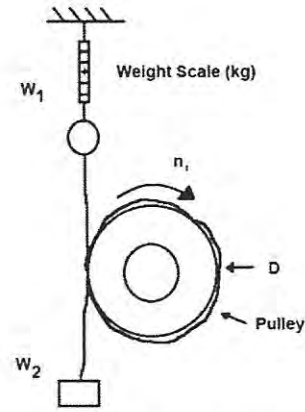


Fig. 3. Load test on BLDC using a pulley

W_1 represented digital Force Gauge, W_2 represented mass, D represented Diameter of pulley.

The direction of rotation of Brushless DC Motor cause friction which helps pull the weight plates.

Therefore, weight of W_1 is lighter than weight of W_2 when read values from the scale.

$$\text{If } n_r = 0 \text{ rpm} : W_1 = W_2 \quad (10)$$

$$\text{If } n_r > 0 \text{ rpm} : W_1 < W_2 \quad (11)$$

$$F_{output} = 9.81(W_2 - W_1) \quad (12)$$

$$T_{output} = 9.81(W_2 - W_1) \times \frac{D}{2} \quad (13)$$

$$P_{out} = P_3 = T_{output} \omega_r \quad (14)$$

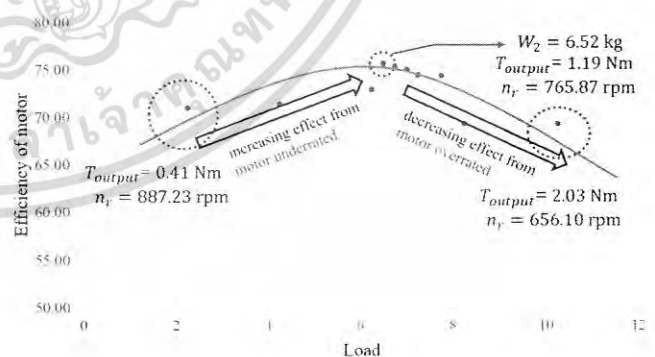


Fig. 4. Efficiency of motor

From Fig. 4, found that mass 6.52 kg will give optimum motor efficiency. As the brushless DC motor rotates at rated speed. The maximum efficiency of BLDC motor at 48 volts is 75.71% with 6.52 kg load

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

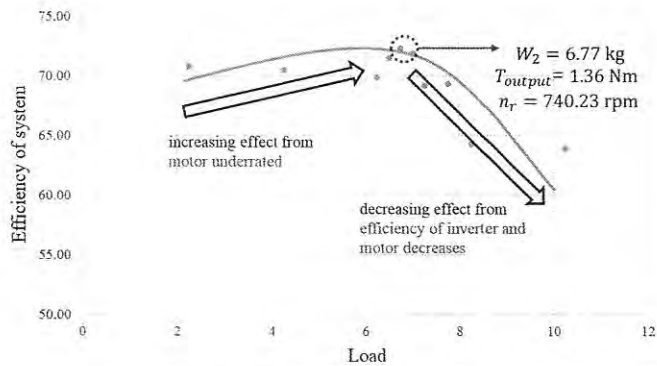


Fig. 5. Efficiency of system

The efficiency of system decreases slightly as load increases due to efficiency of inverter decreases with increasing load.

-In range 2-5 kg, efficiency of system increases due to motor underload.

-In range 5-8 kg, efficiency of system decreases due to motor overload.

IV. EMBEDDED SYSTEM

A. The speed limit to be not overrated for EDs.

Table 1. EDs simulation

Level (p.u.)	δ (degrees)	n_v (rpm)	$n_{r,L}$ (rpm)	$n_{r,R}$ (rpm)
0.70	0	600	600.00	600.00
	5	600	621.20	578.80
	-5	600	578.80	621.20
	10	600	642.73	557.27
	-10	600	557.27	642.73
	20	600	688.19	511.81
	-20	600	511.81	688.19
0.78	0	730	730.00	730.00
	5	730	755.79	704.21
	-5	730	704.21	755.79
	10	730	781.98	678.02
	-10	730	678.02	781.98
	20	730	837.30	622.70
	-20	730	622.70	837.30
1.00	0	930	930.00	930.00
	5	930	962.86	897.14
	-5	930	897.14	962.86
	10	930	996.22	863.78
	-10	930	863.78	996.22
	20	930	1066.70	793.30
	-20	930	793.30	1066.70

Table 2. EDs Test

Level (p.u.)	δ (degrees)	n_v (rpm)	$n_{r,L}$ (rpm)	$n_{r,R}$ (rpm)
0.70	0	600.0	600	600
	5	601.0	642	560
	-5	598.5	555	642
	10	603.0	695	511
	-10	603.0	507	699
	20	624.0	819	429
	-20	626.5	431	822
0.78	0	730.5	730	731
	5	730.0	786	674
	-5	726.5	665	788
	10	739.0	858	620
	-10	739.0	616	862
	20	719.0	932	506
	-20	715.0	500	930
1.00	0	930.0	930	930
	5	930.5	931	930
	-5	930.5	932	929
	10	868.5	930	807
	-10	871.0	812	930
	20	735.5	930	541
	-20	735.0	538	932

EDs can adjust the speed to provide a balance between the two-rear wheel. The inputs of system are steering angle (δ) and analog input from digital potentiometer (MCP41010). EDs diagram is designed by Altium. Digital potentiometer will send analog input to drive circuit for speed control of BLDC motor with range from 0-255 step. The speed limit command to be not overload and the ED equation are handwriting coded in Arduino mega 2560.

From the table1, when level = 200 step and $\delta = 0$, it causes $n_{r,L} = n_{r,R}$. In the same condition, Table 2 show that $n_{r,L}$ and $n_{r,R}$ are similar.

From the table1, when level = 200 step and $\delta = 5$, it causes $n_{r,L} > n_{r,R}$ which the obtained value from table2 gives the same result.

From the table1, when level = 255 step and $\delta = 10$, calculated $n_{r,L} = 996.22$ rpm which is speed overrated of BLDC motor (rated at 930 rpm with 57 V), so it can't actually work. From the table 2, the test with same condition show that $n_{r,L}$ is 930 rpm which does not speed overrated because of the speed limit command. As a result, the motor isn't damaged by over speed rotation. But the overall speed of the vehicle will fall from 930 rpm to 868.5 rpm.

B. Feedback speed for EDs.

Table3. Feedback speed with load test

Level (step)	Load (kg)	Not set feedback speed (rpm)	Set feedback speed (rpm)
180	No-load	552	552
	0.5	510	551
	1.0	469	550
	2.0	412	551
200	No-load	680	680
	0.5	630	665
	1.0	584	666
	2.0	514	668
255	No-load	881	881
	0.5	824	822
	1.0	772	771
	2.0	687	687

Based on the BLDC motor test with feedback speed and no feedback speed set by analog input of digital potentiometers are 170, 200 and 255 steps respectively.

Then, Tachometer using detect of speed was performed to compare the speed difference between the no-load conditions and the on-load conditions.

The loads are 0.5 kg, 1.0 kg and 2.0kg. The digital potentiometer at 200 steps to BLDC motor with no feedback speed and load at 0.5 kg (on-load), the speed falls from a no-load condition of 680 rpm to 630 rpm or a drop of 7.35%.

However, when speed feedback was set and tested using the same load, the speed is 665 rpm just drop of 2.2% and is obviously seen when tested with load at 1.0 kg, the speed drop of 2.2% when the BLDC motor has a feedback speed but BLDC motor with no feedback speed drop of 14.11%

Input the digital potentiometer at 255 steps (rated speed) and put various load. It was found that the BLDC motor with feedback speed set and no feedback speed set have the same speed due to the maximum step input value. So, the BLDC motor with the feedback speed set can not speed up

V. CONCLUSION

This paper has described the design of Embedded EDs for an electric vehicle driving by two brushless DC (BLDC) motor. This system consists of BLDC motor, Arduino, drive circuit and digital potentiometer. Potentiometers are set to be accelerator and steering wheel. The steering angle is adjusted from 1 to 45 degrees. Experimental results show Embedded EDs can protect BLDC motor from overrated speed that varied actual speed while turning is different from simulation because actual speed is based on many factors such as characteristic of BLDC motor, instrument accuracy. Embedded EDs with feedback will make the system more efficient because it can adjust actual speed to equal reference speed which can be used for further development in the future.

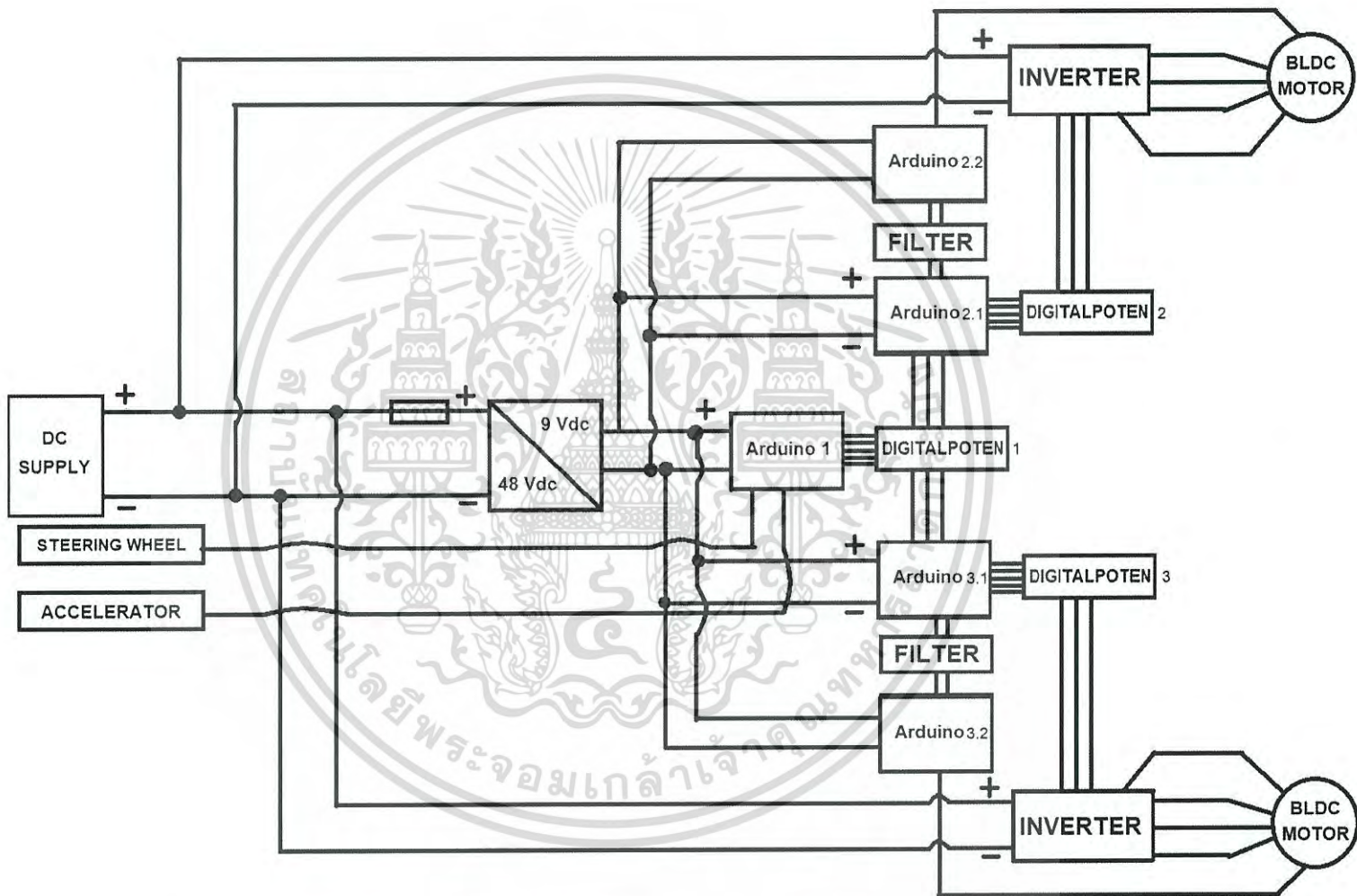
REFERENCES

- [1] Merve Yıldırım, Eyyüp Öksüztepe, Burak Tanyeri, and Hasan Kürüm, "Design of electronic differential system for an electric vehicle with In-wheel motor," IEEE 2016, 19-20 Feb 2016 [Power and Energy Conference at Illinois (PECI)].
- [2] K. Hartani, Y. Miloud, and A. Miloudi, "Electric vehicle stability with rear electronic differential traction," International Symposium on Environment Friendly Energies in Electrical Applications, pp.1-5, November 2010 [Ghardaia, Algeria].
- [3] Juhi Nishat Ansari, and Sapna L, "Speed control of BLDC motor for electric vehicle," International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), Vol.3 Issue 5, pp.1-6, May 2014
- [4] Guillermo A. Magallan, Cristian H. De Angelo, Guillermo Bisheimer and Guillermo Garcia, "A neighborhood electric vehicle with electronic differential traction control," IEEE, pp.2757-2763, 2018.
- [5] Ma Xiaojun, Wang Guodong, Liu Chunguang and Yang Huaibin, "The electric drive system for brushless DC motor," ITEC Asia-Pacific, pp.1-3, 2014.
- [6] Lin Bai, "Electric Drive System with BLDC Motor," IEEE 2011, 15-17 April 2011 [Electric Information and Control Engineering (ICEICE)].
- [7] Santanu Sharma, Rubi Pegu, and Pranjal Barman, "Electronic differential for electric vehicle with single wheel reference," IEEE 2015, 10-11 Jan. 2015 [Power, Dielectric and Energy Management at NERIST (ICPDEN)].
- [8] Y. E. Zhao, J. W. Zhang and X. Q. Guan, "Modeling and simulation of electronic differential system for an electric vehicle with two-motor-wheel drive," IEEE, pp.1209-1214, 2009.
- [9] Y. Zhou, S. Li, X. Zhou, and Z. Fang, "The control strategy of electronic differential for EV with four in-wheel motors," in IEEE Control and Decision Conference (CCDC), pp. 4190-4195, 2010.



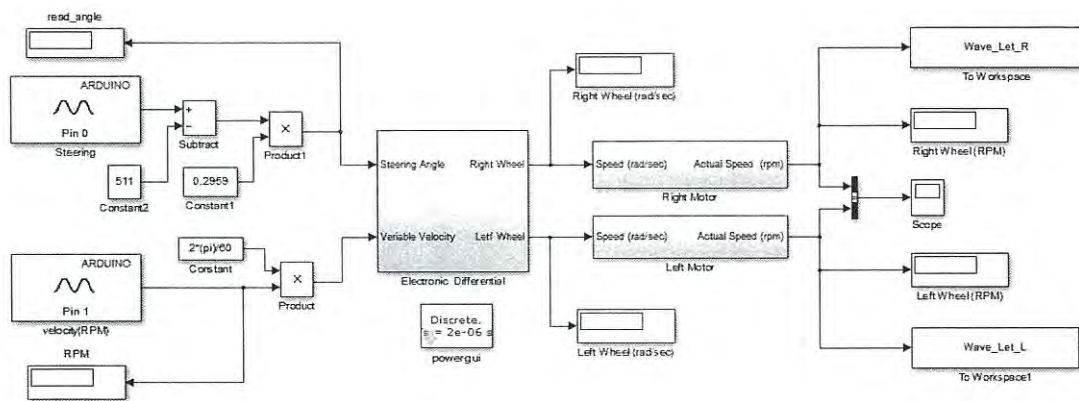
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ข.1 การต่อวงจรที่ใช้ในระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้า

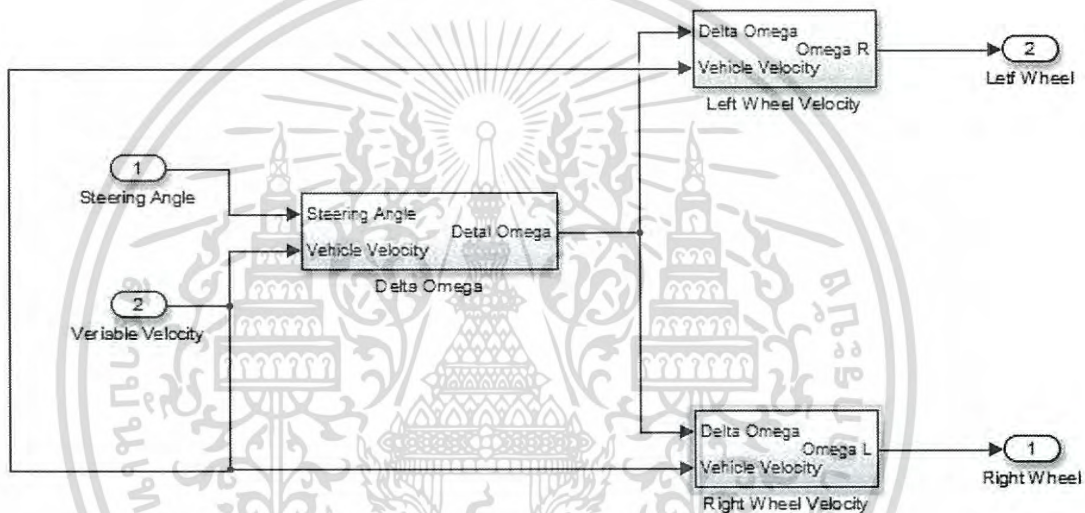


High performance BLDC motor control for electric vehicle

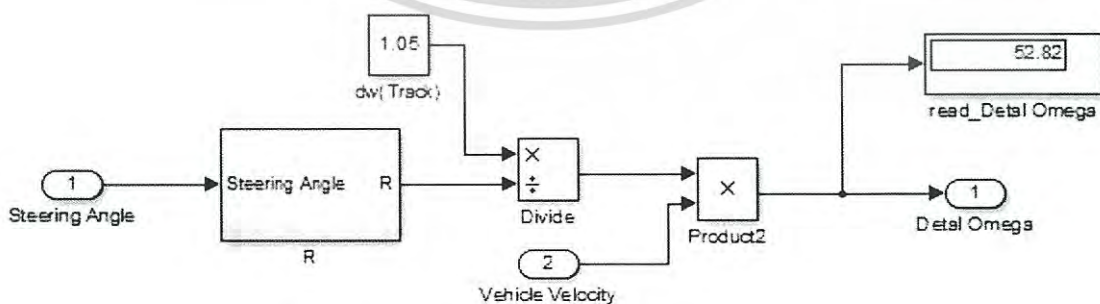
KMITL



รูปที่ ข.2 Electronic differential จาก MATLAB/Simulink

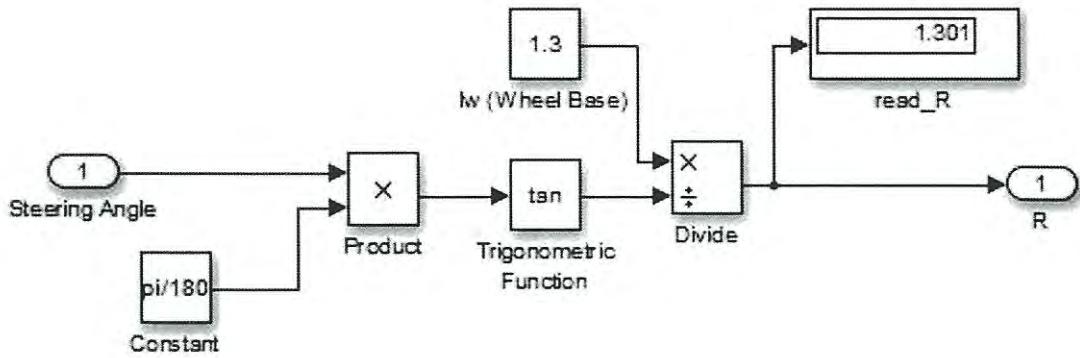


รูปที่ ข.3 Subsystem of Electronic differential

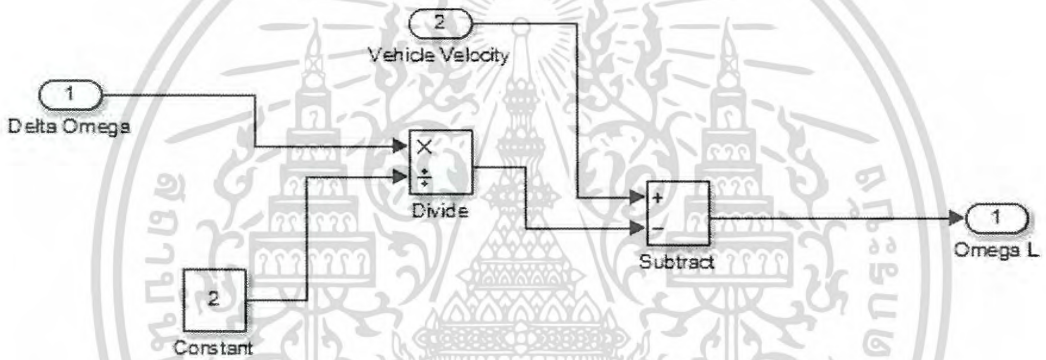


รูปที่ ข.4 Subsystem of Delta Omega

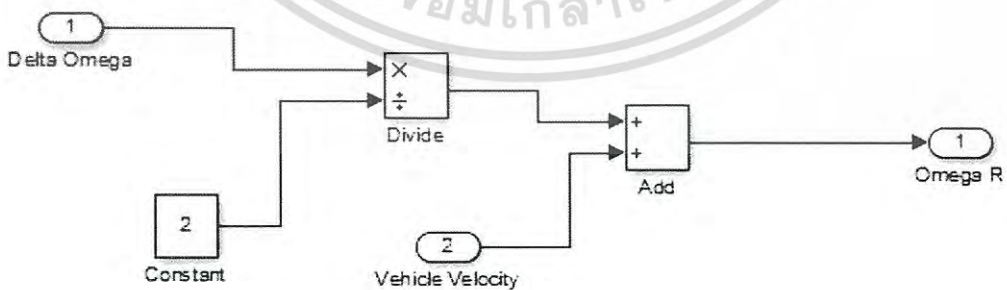
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.5 Subsystem of R

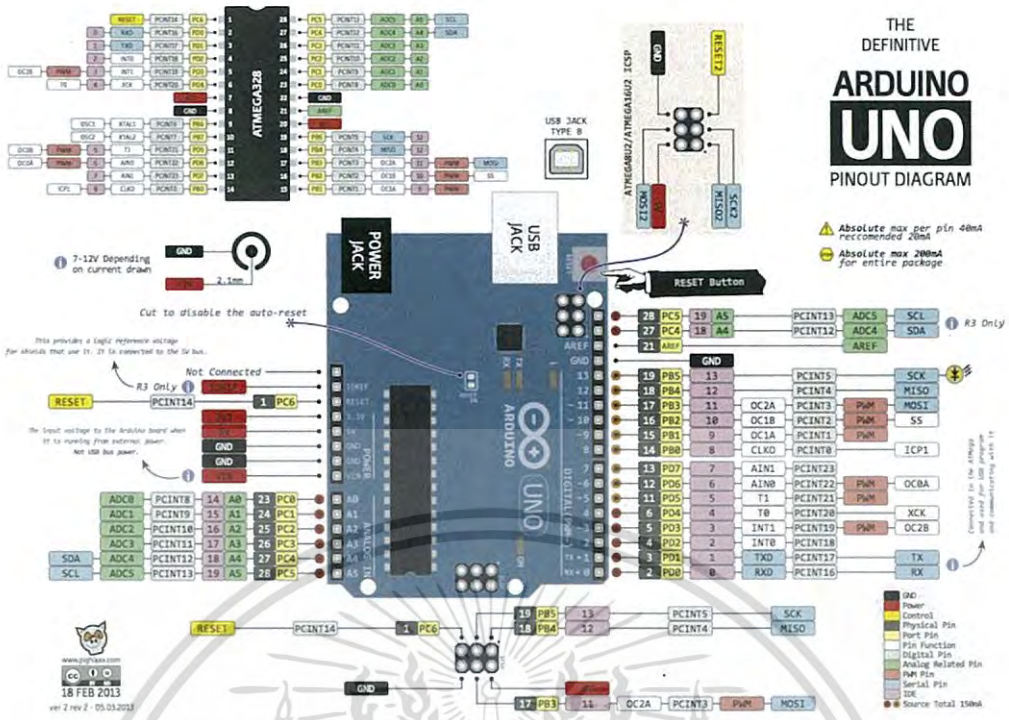


รูปที่ ข.6 Subsystem of Left Wheel Velocity

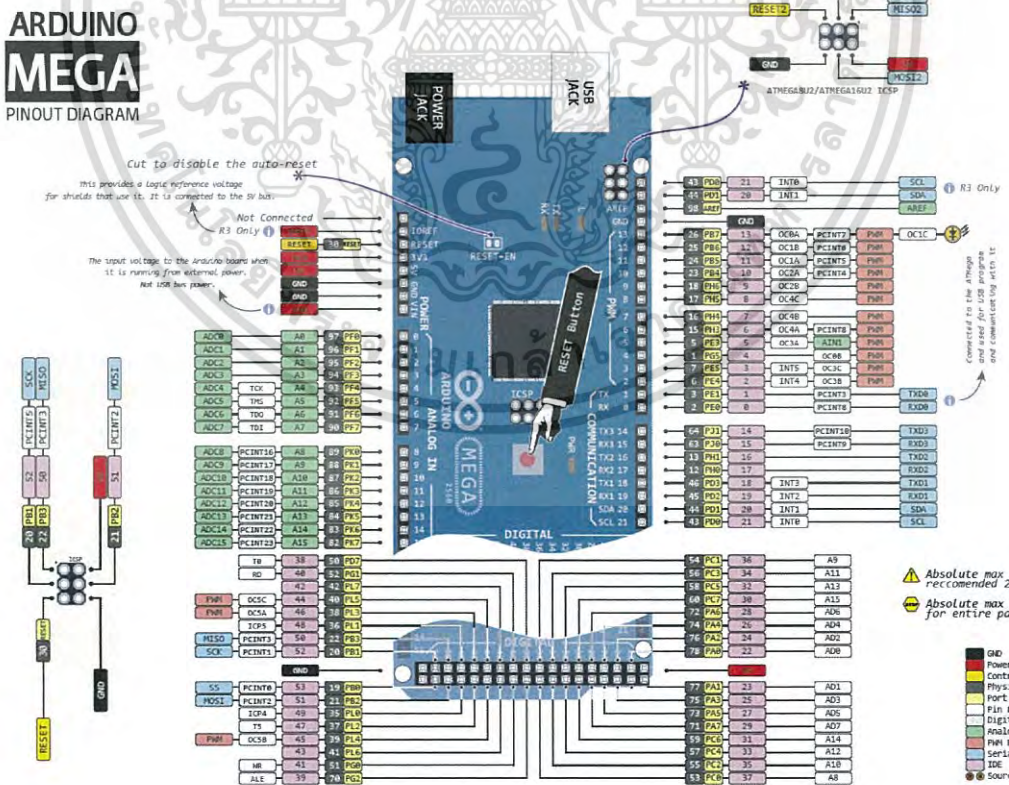


รูปที่ ข.7 Subsystem of Right Wheel Velocity

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



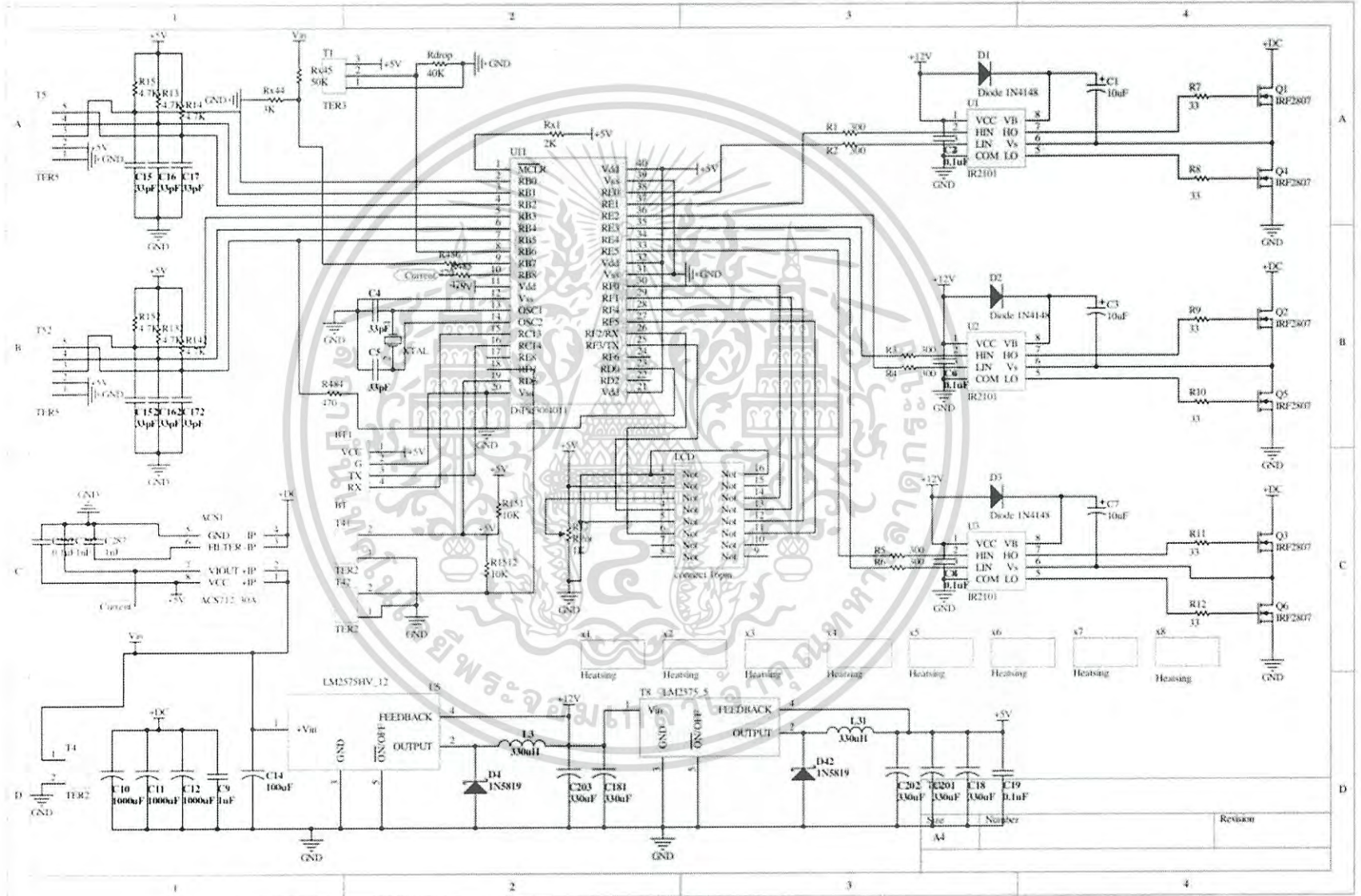
รูปที่ ข.8 Arduino UNO



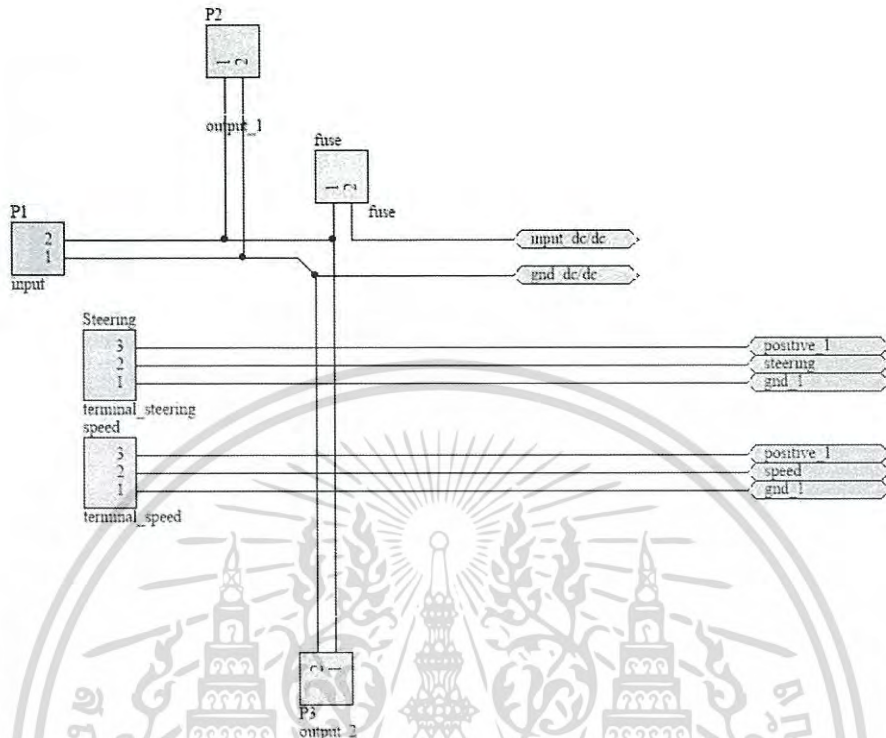
รูปที่ ข.9 Arduino MEGA 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

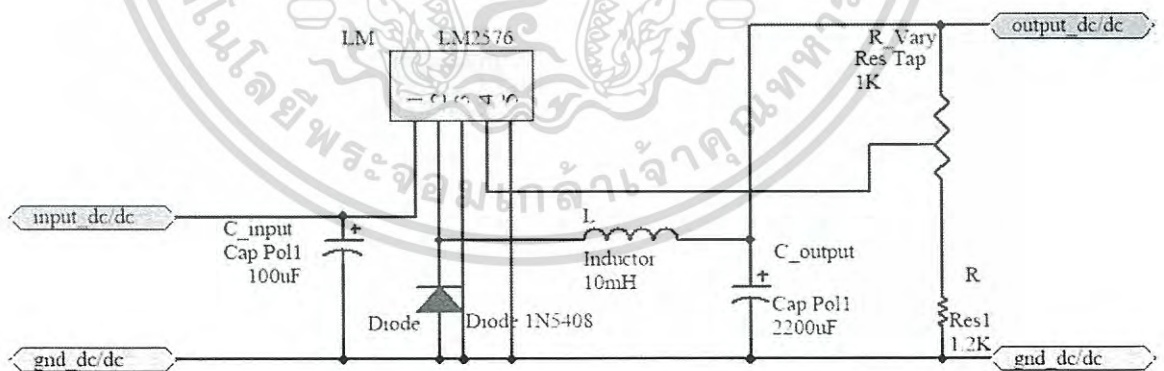
รูปที่ 9.10 SCHEMATIC INVERTER



SCHEMATIC TWO WHEELS AND FEEDBACK

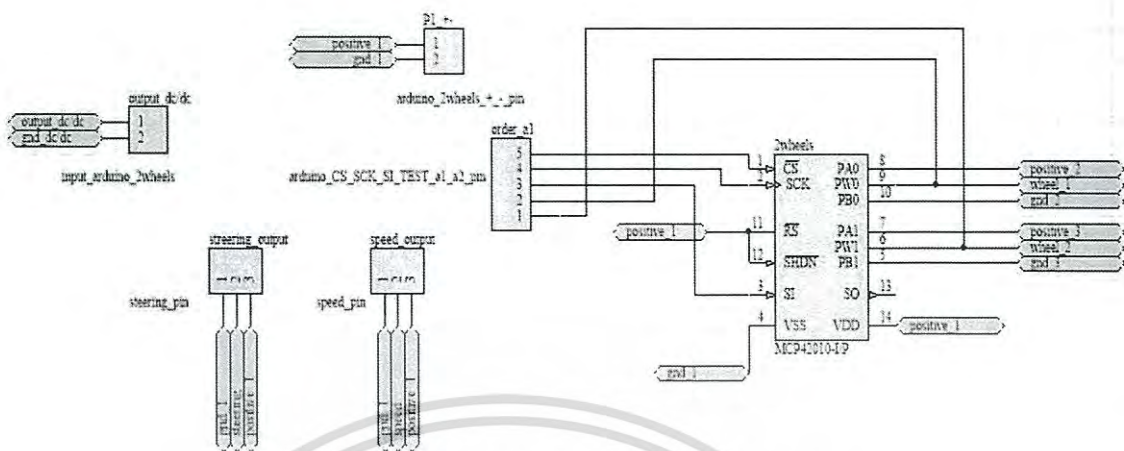


รูปที่ ข.11 SCHEMATIC FRONT

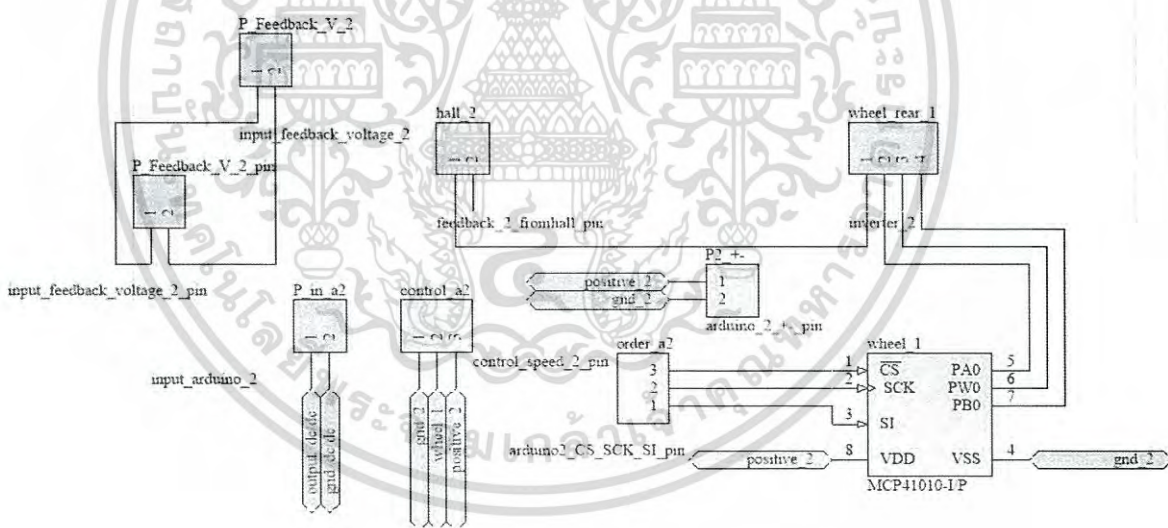


รูปที่ ข.12 SCHEMATIC DC/DC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

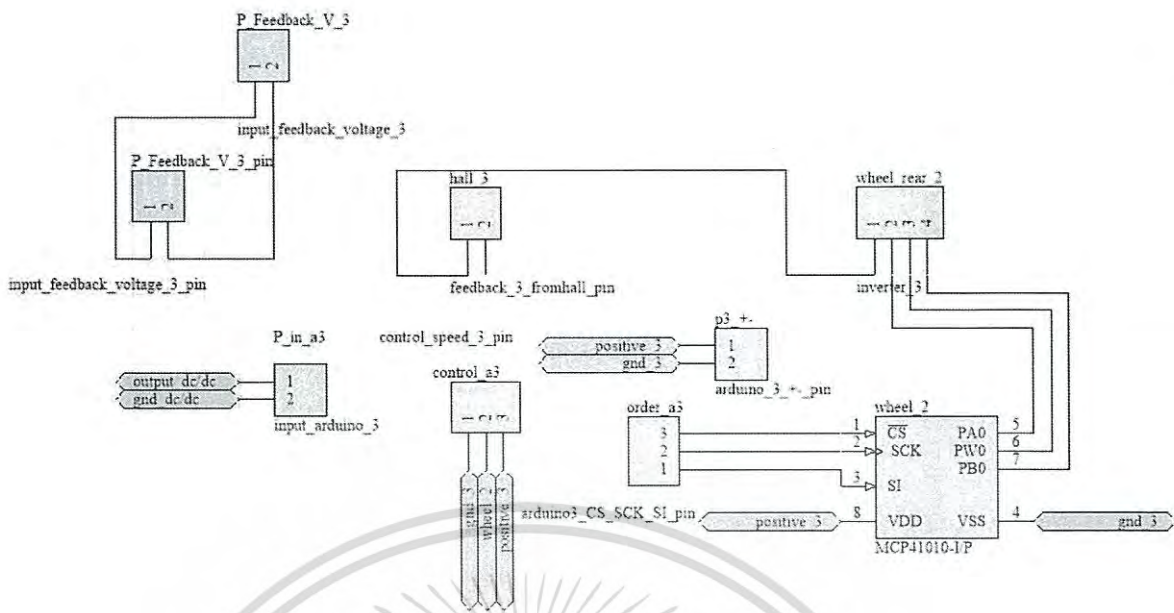


รูปที่ ข.13 SCHEMATIC TWO WHEELS CONTROL WITH ARDUINO 1



รูปที่ ข.14 SCHEMATIC FEEDBACK WITH ARDUINO 2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

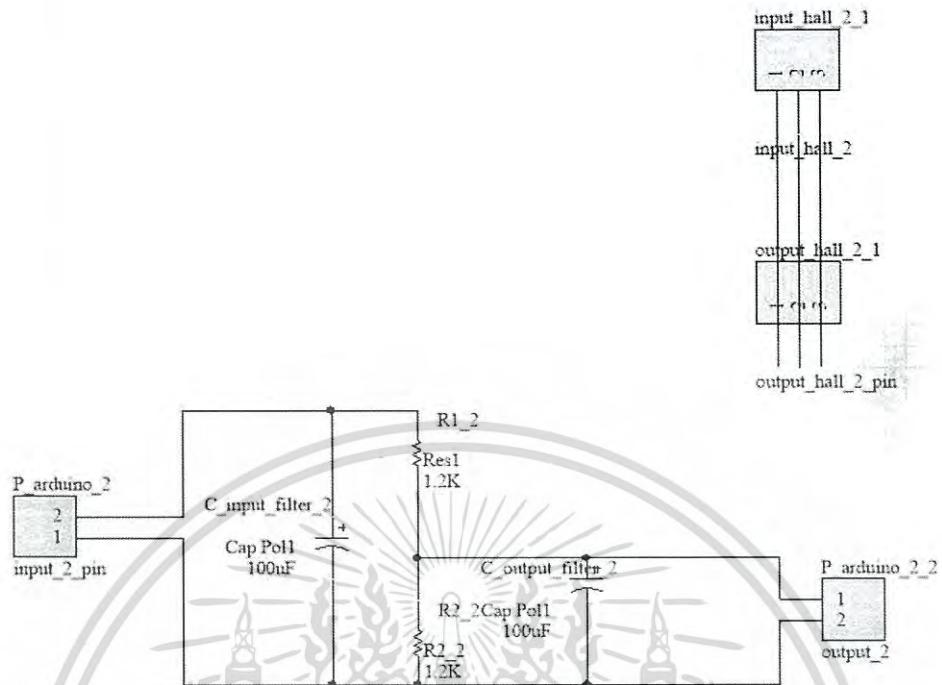


รูปที่ ข.15 SCHEMATIC FEEDBACK WITH ARDUINO 3.1

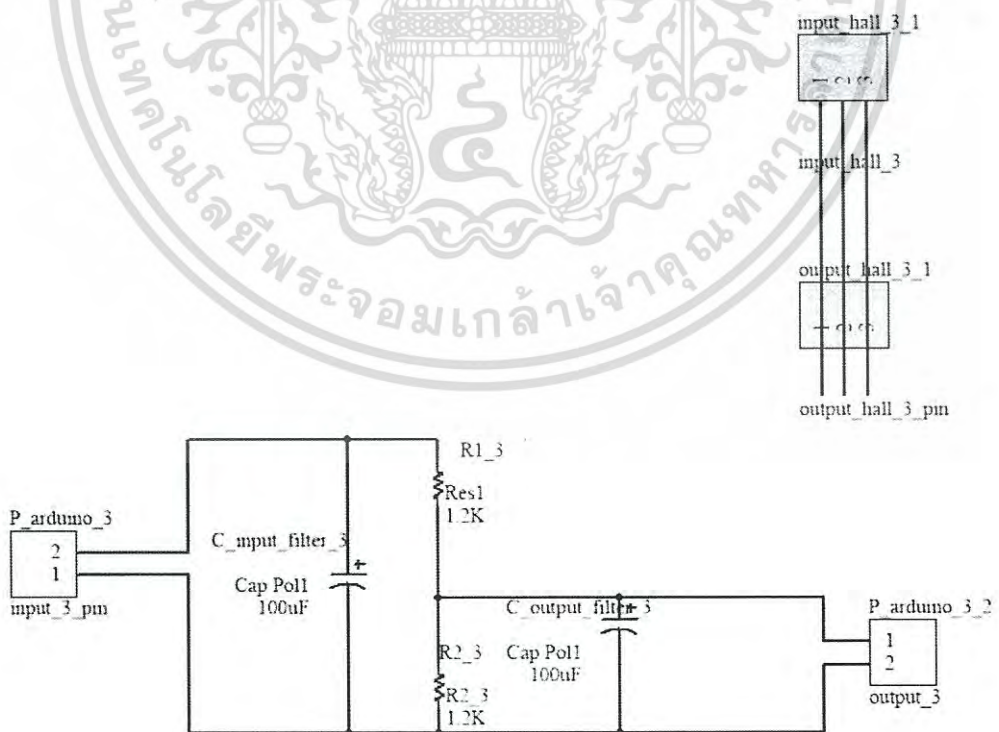


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PCB FEEDBACK WITH ARDUINO 2.2 AND 3.2



รูปที่ ข.16 SCHEMATIC FEEDBACK WITH ARDUINO 2.2



รูปที่ ข.17 SCHEMATIC FEEDBACK WITH ARDUINO 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CODE TWO WHEELS

```

#include <SPI.h>
const int CS = 10;
#define Poten_in_Angle A0
#define Poten_in_speed A1
#define PotWiperVoltage_0 A2
#define PotWiperVoltage_1 A3
//input
int angle_in;
float A_angle_in;
int Velocity_in;
int level_R;
int level_L;
//process
int Read_Vout_0 = 0;
int Read_Vout_1 = 0;
float Vin_256_BIT = 0;
void setup() {
  pinMode (CS, OUTPUT);
  Serial.begin(9600);
  SPI.begin(); // initialize SPI
}
void loop() {
  poten_V(); //resive velocity
  poten_Angle();
  //-----
  // A_angle_in = 0 ;
  // Vin_256_BIT = 0 ;
  //-----
  int lw = 1.3 ;
  int dw = 1.05 ;

  int delta_Omega ;
  int Omega_R ;
  int Omega_L ;
  int Omega_more_Angle = 0 ;
  float TAN ;

  delta_Omega = ((tan(( A_angle_in * 3.14 )/180)) * Vin_256_BIT * dw) / lw ;
  Omega_R = Vin_256_BIT - (delta_Omega/2);
  Omega_L = Vin_256_BIT + (delta_Omega/2);
  level_R = Omega_R; //เอาไว้คูณ gear
  level_L = Omega_L; //เอาไว้คูณ gear

  TAN = (tan(A_angle_in * 3.14/180));

  if( level_L > 255 || A_angle_in > 0 || level_R < 255 ) { //เลี้ยวขวา
    Omega_more_Angle = 255 - (( 255 * dw * TAN ) * ( lw * 2 ) ) ;
    level_R = Omega_more_Angle - (( Omega_more_Angle * dw * TAN ) * ( lw * 2 ) ) ;
    level_L = Omega_more_Angle + (( Omega_more_Angle * dw * TAN ) * ( lw * 2 ) ) ;
  }
  if( level_R > 255 || A_angle_in < 0 || level_L < 255 ) { //เลี้ยวซ้าย
    Omega_more_Angle = 255 + (( 255 * dw * TAN ) * ( lw * 2 ) ) ;
    level_R = Omega_more_Angle - (( Omega_more_Angle * dw * TAN ) * ( lw * 2 ) ) ;
    level_L = Omega_more_Angle + (( Omega_more_Angle * dw * TAN ) * ( lw * 2 ) ) ;
  }

  MCP42010Write_0(level_R); //1
  MCP42010Write_1(level_L); //0

  Read_Vout_0 = analogRead(PotWiperVoltage_0);
  Read_Vout_1 = analogRead(PotWiperVoltage_1);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Serial.print("angle = " );
Serial.print(A_angle_in);
Serial.print("\tdelta_Omega = " );
Serial.print(delta_Omega);
Serial.print("\t\tVin = " );
Serial.print(Vin_256_BIT);
Serial.print("\tTAN = " );
Serial.print(TAN);
Serial.print("\tOmega_more_Angle = ");
Serial.print(Omega_more_Angle);
Serial.print("\t Vout_L = ");
Serial.print(level_L);
Serial.print("\t Vout_R= ");
Serial.println(level_R);

delay(10);
}
void poten_Angle(){
  angle_in = analogRead(Poten_in_Angle);
  A_angle_in = -((angle_in - 511)*0.2959) ; // 0.2958= 303จุดค่า/1023
  //Serial.println(A_angle_in); // WNNNN
}
void poten_V(){ //คณิเรจ
  Velocity_in = analogRead(Poten_in_speed);
  Vin_256_BIT = Velocity_in * ( 256.0 / 1024.0); // 256 เติริมเข้าเพื่อคำนวณ
  Vin_256_BIT = map(Vin_256_BIT, 44, 218, 0, 255);
}

void MCP42010Write_0(short value) { // 1
  digitalWrite(CS,LOW); // select the chip
  SPI.transfer(B00010010); // command byte
  SPI.transfer(value); // data byte
  digitalWrite(CS,HIGH); // de-select the chip
}
void MCP42010Write_1(short value) { // 0
  digitalWrite(CS,LOW); // select the chip
  SPI.transfer(B00010001); // command byte
  SPI.transfer(value); // data byte
  digitalWrite(CS,HIGH); // de-select the chip
}

```

รูปที่ ข.11 CODE TWO WHEELS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CODE FEEDBACK

```

#include <math.h>
#include <SPI.h>
const int CS = 10;
int RawVoltage = 0;
int level ;
float Voltage = 0 ;
#define Poten_in_speed A1
#define PotWiperVoltage A2
int Velocity_in ;
int Velocity_in_2 ;
int Vin_256_BIT ;
int Vin_poten ;
int error ;
float feedback ;
int subvelocity ;
int input_subvelocity ;
//time

void setup() {
  pinMode (CS, OUTPUT);
  Serial.begin(9600);
  SPI.begin();
}

void loop() {

  poten_V() ;

  // TEST 1 -----
  // Vin_256_BIT = 0 ;
  //-----

  if ( Vin_256_BIT > 125 )
  {
    input_subvelocity = analogRead(A0);
    subvelocity = map(input_subvelocity , 0 , 525 , 0 , 255 ) ;
    delay(200);

    error = (Vin_256_BIT - subvelocity);
    feedback = feedback + (error)^(0.05);

    level = Vin_256_BIT ; // + feedback ; //บรรทัดนี้ feedback
    level = constrain(level,0,255);

  }
  else
  {
    level = Vin_256_BIT ;
  }
  MCP41010Write(level);

  Serial.print("Vin_256_BIT :");
  Serial.print(Vin_256_BIT);
  Serial.print("\t\t\t");
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Serial.print("subvelocity :");
Serial.print(subvelocity);
Serial.print("\t");

Serial.print("level :");
Serial.print(level);
Serial.println("\t");
}
void MCP41010Write(short value) {
  digitalWrite(CS, LOW); // select the chip
  SPI.transfer(B00010001); // command byte
  SPI.transfer(value); // data byte
  digitalWrite(CS, HIGH); // de-select the chip
}
void poten_V() { //input_1
  Velocity_in = analogRead(Poten_in_speed);
  Vin_256_BIT = Velocity_in * ( 256.0 / 1024.0); // 256 เติร์มเข้าเพื่อคำนวณ
}

```

รูปที่ ข.12 CODE FEEDBACK

CODE HALL SENSOR

```

#include <math.h>
#include <SPI.h>
const int CS = 10;
int RawVoltage = 0;
int level ;
float Voltage = 0 ;
#define Poten_in_speed A1
#define PotWiperVoltage A2
int Velocity_in ;
int Velocity_in_2 ;
int Vin_256_BIT ;
int Vin_poten ;

//time

int hall = 2; // แต่เอาไว้ยกมา 2 ใน uno เพราะเป็น interrupt
unsigned long Time_1 ;
unsigned long Time_2 = 0 ;
float Deta_Time ;
float pulse;
float sub_Velocity ;
float feedback = 0 ;
float error = 0 ;
float RPM ;
int hallsend = 6 ;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

void setup() {
  pinMode (CS, OUTPUT);
  Serial.begin(9600);
  pinMode(hall, INPUT);
  attachInterrupt(0 ,count_pulse, RISING);
  SPI.begin();
  pinMode(hallsend,OUTPUT);
}
void loop() {
  interrupts();
  RPM = 0 ;
  pulse = 0 ;
  Deta_Time = 1000 ; // 1000 = 1 วิ
  while ( (Time_1 - Time_2) < Deta_Time )
  {
    Time_1 = millis();
  }
  Time_2 = Time_1 ;
  noInterrupts();
  // 7 pulse = 1 รอบ
  float sub_pulse = pulse / 7 ;
  RPM = (( ( sub_pulse ) / ( Deta_Time*0.001 ) ) * 60) * 1.162 ; // จำนวนรอบ ต่อ นาที = RPM
  Substitute();
  delay(100);

  // TEST 3 -----
  Serial.print("pulse :");
  Serial.print(pulse);
  Serial.print("\t");

  Serial.print("RPM :");
  Serial.print(RPM);
  Serial.print("\t");

  Serial.print("sub_Velocity :");
  Serial.print(sub_Velocity);
  Serial.println("\t");
  //-----

  analogWrite (hallsend, sub_Velocity);
}
void Substitute() {
  sub_Velocity = (0.00009*(pow(RPM,2))) + ((0.072)*(RPM)) + 80.61 ; // ต้องทำสมการให้ได้ by gun จากกราฟทดลอง
  sub_Velocity = constrain(sub_Velocity,0,255);
}
void count_pulse()
{
  pulse++;
}

```

รูปที่ ข.13 CODE HALL SENSOR

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน



Mr. Narongrit Chatsiriwech
 Date of Birth: 19 December 1994
 Birthplace: Yala
 Tel: 094-560-5075
 E-mail: john.kaze19@gmail.com



Mr. Pattarakij Worawalai
 Date of Birth: 9 August 1996
 Birthplace: Roi-et
 Tel: 090-130-0533
 E-mail: gatoon2539@gmail.com



Mr. Ponghiran Mattayaboon
 Date of Birth: 25 October 1995
 Birthplace: Chiang Mai
 Tel: 081-673-8255
 E-mail: ponghiran.parker@gmail.com



Mr. Pongsakorn Sangnopparat
 Date of Birth: 23 September 1995
 Birthplace: Samutprakarn
 Tel: 086-989-2575
 E-mail: Gun23.Pongsakorn@gmail.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้