



ชุดควบคุมความเร็วสำหรับรถที่ใช้มอเตอร์ไฟฟ้าขับเคลื่อน
โดยใช้การวัดระยะห่างจากสิ่งกีดขวาง
ด้วยอัลตราโซนิกเซ็นเซอร์

โดย
โกวิท พิเภก

สนับสนุนงบประมาณโดย
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ประจำปีงบประมาณ ๒๕๕๘

Speed Control For The Car Using Electric-motor Driven
By Measured The Distance From Ultrasonic Sensor

By
Kowit Phipek

Granted by
Rajamangala University of Technology Rattanakosin
Fiscal year 2015

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วง บรรลุตามวัตถุประสงค์ได้ด้วยดีนั้น ผู้จัดทำขอขอบคุณอาจารย์อดิศักดิ์ แซ่สารกิจ หัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม ที่ได้ให้คำแนะนำสำหรับการเขียนงานวิจัยฉบับนี้และช่วยตรวจสอบข้อผิดพลาดของงานวิจัยให้มีความถูกต้อง เรียบร้อย สมบูรณ์

ขอขอบคุณคณาบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์ที่ช่วยให้การสนับสนุนการทำวิจัยฉบับนี้

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีที่ได้ให้การสนับสนุนการทำวิจัยนี้ตั้งแต่เริ่มต้นจนงานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วง ไม่ว่าจะเป็นเรื่องงบประมาณในการทำวิจัย การสนับสนุนบุคลากร ผู้ช่วยวิจัยและวัสดุที่ใช้ในการทำวิจัย การให้ข้อเสนอแนะสำหรับการแก้ไขปัญหาต่างๆ ที่ทางผู้จัดทำได้พบเจอจนทำให้ผู้จัดทำได้คัดกรองงานวิจัยเล่มนี้ให้มีความเรียบร้อย สมบูรณ์

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ช่วยเป็นกำลังใจให้ผู้จัดทำได้มีกำลังใจในการจัดทำ และแสวงหาข้อมูลต่างๆ จนสามารถที่จะจัดทำงานวิจัยฉบับนี้ขึ้นมาให้เรียบร้อยสมบูรณ์ ซึ่งงานวิจัยนี้ทางผู้จัดทำหวังเป็นอย่างยิ่งว่าจะสามารถช่วยเผยแพร่เป็นวิทยาทานให้ความรู้กับนักศึกษา หรือบุคคลทั่วไปที่สนใจในงานวิจัยฉบับนี้ให้ได้รับความรู้ และแนวคิดที่สามารถนำไปใช้ในการเรียนหรือการทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

โกวิท พิภกและคณะผู้จัดทำ
มีนาคม ๒๕๕๙



บทคัดย่อ

รหัสโครงการ : Inno ๐๑๒/๒๕๕๘

ชื่อโครงการ : ชุดควบคุมความเร็วสำหรับรถที่ใช้มอเตอร์ไฟฟ้าขับเคลื่อนโดยใช้การวัดระยะห่างจากสิ่งกีดขวางด้วยอัลตราโซนิกเซ็นเซอร์

ชื่อนักวิจัย : อาจารย์โกวิท พิภก (หัวหน้าโครงการวิจัย)
อาจารย์เรืองยศ เกตุรักษา (ผู้ร่วมโครงการวิจัย)

งานวิจัยฉบับนี้นำเสนอการควบคุมความเร็วของรถที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า โดยจะมีการตรวจพบสิ่งกีดขวางทางด้านหน้าของรถ โดยจะเป็นการใช้อุปกรณ์เซ็นเซอร์จำนวนสองชนิดคืออัลตราโซนิกเซ็นเซอร์ที่เป็นอุปกรณ์สำหรับตรวจวัดระยะทางและอินคริเมนทัลเอนโค้ดเดอร์ที่ใช้ในการตรวจวัดความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้า โดยที่อุปกรณ์ทั้งสองชนิดจะมีผลต่อการควบคุมการทำงานของระบบหลัก เพราะวาระบบควบคุมสามารถกำหนดความเร็วของรถให้มีค่าตามที่ต้องการได้ การทำงานจะเป็นการทำงานที่ช่วยให้เกิดความปลอดภัยสำหรับการควบคุมความเร็วของรถ เมื่อตรวจพบเจอสิ่งกีดขวางที่ด้านหน้าของรถจึงทำให้สามารถชะลอความเร็วหรือหยุดรถได้อย่างแม่นยำ ซึ่งแนวคิดของการทำงานของระบบนี้สามารถที่จะช่วยให้การควบคุมความเร็วของรถที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าเป็นไปด้วยดีและมีประสิทธิภาพที่สูง

คำสำคัญ : การควบคุมความเร็ว, มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง, พัดดับลิวเอ็ม, อัลตราโซนิกเซ็นเซอร์, อินคริเมนทัลเอนโค้ดเดอร์

E-mail Address : Kowit.phil@rmutr.ac.th หรือ pipektop@hotmail.com

ระยะเวลาโครงการ : ตุลาคม ๒๕๕๗ – มีนาคม ๒๕๕๙

Abstract

Code of project : Inno 012/2558
Project name : Speed Control For The Car Using Electric-motor Driven By Measured The Distance From Ultrasonic Sensor
Researcher name : Mr.Kowit Phipek (Head-Project)
Mr.Ruangyos Keteruksa (Co-Project)

This inquiry is presented the speed control of the automobile using electric-motor driven while device detected the barrier from the front side of the machine. The detectors consist of the two sensor devices, the ultrasonic sensor is used to detect the distance and the incremental encoder is used to determine the speed of the electric-motor. That is effected to the master control scheme because there can determine the desired speed of the car. They will be used to safe for pushing the automobile wheel found the barrier at the front position of the automobile to reduce speed or accuracy braking the car. The thought helped to determine the speed of the electric car good performance and high efficiency.

Keywords: Speed control, DC motor, PWM, Ultrasonic sensor, Incremental encoder
E-mail Address : Kowit.phil@rmutr.ac.th or Pipektop@hotmail.com
Period of project : October 2014 – March 2016

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ซ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	4
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับและหน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์	4
1.5 วิธีการดำเนินการวิจัย และสถานที่ทำการทดลอง/เก็บข้อมูล	4
1.6 ระยะเวลาทำการวิจัย และแผนการดำเนินงานตลอดโครงการวิจัย	5
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	6
2.1.1 หลักการแปลงแรงดันให้ลดลงโดยวงจรช้อปเปอร์	6
2.1.2 หลักการแปลงแรงดันให้สูงขึ้นโดยวงจรช้อปเปอร์	9
2.1.3 วงจรแปลงผันแรงดัน DC-DC แบบเต็มบริดจ์	12
2.2 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	12
2.2.1 หลักการของมอเตอร์	12
2.2.2 แรงดันไฟฟ้าต้านกลับ	13
2.2.3 สมการของแรงดันไฟฟ้าต้านกลับในมอเตอร์	14
2.2.4 แรงบิด	14
2.2.5 ความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	14
2.2.6 คุณลักษณะของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	15
2.2.7 การควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	17
2.3 การเบรกของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	20
2.3.1 ปลั๊กกิ้ง	20
2.3.2 ไดนามิก	21
2.3.3 รีเจนเนอเรทีฟ	23
2.4 อุปกรณ์ตรวจจ็ับระยะทาง	23
2.4.1 อุปกรณ์ตรวจวัดระยะทางแบบเชิงเส้น	24
2.4.2 อุปกรณ์ตรวจวัดระยะทางแบบเชิงมุม	24

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.3 อุปกรณ์ตรวจจับความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้า	24
บทที่ 3 การออกแบบงานวิจัย	32
3.1 วงจรที่ใช้ในการควบคุมมอเตอร์	32
3.2 วงจรมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	34
3.3 การออกแบบการควบคุมแบบลูปปิด	35
3.4 โพลซาร์ทการทำงานของระบบ	37
3.5 การจำลองการทำงานของระบบ	38
บทที่ 4 การทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง	40
4.1 การออกแบบโครงสร้างทำงานของรถไฟฟ้าขับเคลื่อนอัตโนมัติ	40
4.1.1 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของรถไฟฟ้า	40
4.1.2 การออกแบบโครงสร้างของตัวรถ	41
4.1.3 การออกแบบวงจรภาคกำลังขับ	41
4.1.4 การออกแบบชุดประมวลผลและแสดงผล	45
4.2 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของระบบ (Identification)	46
4.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทำวิจัย	48
4.4 การทดลองสร้างสัญญาณพัลส์วิดมอดูเลต	48
4.5 การทดสอบค่าตัวแปรการควบคุมแบบ PI	50
4.6 ผลของการทดลองระบบจริงที่ได้ทำการปรับจูนค่า PI	
4.7 การทดลองระยะทางโดยเซ็นเซอร์อัลตราโซนิกที่มีผลต่อความเร็วมอเตอร์ที่ได้จากการควบคุมแบบ PI	53
4.7.1 กำหนดความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ 50 rpm	53
4.7.2 กำหนดความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ 100 rpm	53
4.7.3 กำหนดความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ 150 rpm	54
4.7.4 กำหนดความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ 170 rpm	54
4.8 การทดลองความเร็วของรถที่มีผลต่อกระแสของมอเตอร์	55
4.9 การสอบเทียบระยะทางของเซ็นเซอร์อัลตราโซนิก	55
4.10 โครงงานจริงและลักษณะการเคลื่อนที่	56
บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินงาน	58
5.1 สรุปผล	58
5.2 ปัญหาและแนวทางการแก้ไข	58
5.3 การนำไปใช้ประโยชน์ / ประยุกต์ใช้กับกรณีศึกษาอื่นๆ	58

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บรรณานุกรม
ประวัติผู้วิจัย

59

60



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1-1 แผนการดำเนินงานวิจัย	5
4-1 ผลการทดลองค่าเปอร์เซ็นต์ดีวีทีไอเคลลที่มีผลต่อเอาต์พุต (Voltage)	48
4-2 ผลการทดลองหาค่าเปอร์เซ็นต์ดีวีทีไอเคลลที่มีผลต่อความเร็วรอบมอเตอร์ (RPM)	49
4-3 ความเร็วของรถที่มีผลต่อกระแสของมอเตอร์ขณะไม่มีโหลด	55
4-4 ความเร็วของรถที่มีผลต่อกระแสของมอเตอร์ขณะมีโหลด (49Kg)	55
4-5 การสอบเทียบระยะทางของเซ็นเซอร์อัลตราโซนิก	55



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1-1 ภาพรวมของงานวิจัย	2
1-2 การตรวจวัดระยะห่างของอุปกรณ์อุลตราโซนิกเซ็นเซอร์	2
1-3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากับดิวตี้ไซเคิล	2
1-4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างดิวตี้ไซเคิลกับระยะห่างของจุดสองจุด	3
1-5 โพลซาร์ทแสดงการตัดสินใจการทำงานของงานวิจัย	3
2-1 วงจรซีออปเปอร์แบบแปลงแรงดันให้ลดลง	7
2-2 รูปคลื่นการทำงานของแรงดันเอาต์พุตและกระแส	7
2-3 วงจรซีออปเปอร์แบบแปลงแรงดันให้สูงขึ้น	9
2-4 รูปคลื่นของกระแสและกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับค่าดิวตี้ไซเคิล	9
2-5 วงจรซีออปเปอร์แบบแปลงแรงดันให้สูงขึ้นและโหมดการทำงาน	10
2-6 วงจรดีซีซีออปเปอร์แบบเต็มบริดจ์	12
2-7 ขดลวดที่มีกระแสไฟฟ้าและวางอยู่ในสนามแม่เหล็ก	13
2-8 ทิศทางการไหลของแรงดันไฟฟ้าต้านกลับ	13
2-9 กราฟคุณลักษณะของแรงบิดกับกระแสในอาร์เมเจอร์ของซันต์มอเตอร์	16
2-10 กราฟคุณลักษณะของความเร็วรอบกับกระแสในอาร์เมเจอร์ของซันต์มอเตอร์	16
2-11 กราฟคุณลักษณะของความเร็วรอบกับแรงบิดของซันต์มอเตอร์	17
2-12 วงจรของการต่อรีโอสแตต	18
2-13 วงจรของการต่อคอนโทรลเลอร์รีซีสแตนซ์	18
2-14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ว (N) และกระแสอาร์เมเจอร์ (I_M)	19
2-15 วงจรของวาร์ดเลียนาร์ดในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์	20
2-16 การเบรกมอเตอร์ไฟฟ้าด้วยวิธีการกลับขั้วไฟฟ้าของระบบที่ต่อเข้ากับขั้วของอาร์เมเจอร์ในมอเตอร์ที่เรียกว่า “ปลั๊กกิ้ง”	21
2-17 การเบรกมอเตอร์ชานด้วยวิธีไดนามิก	22
2-18 การเบรกมอเตอร์อนุกรมด้วยวิธีการไดนามิก	23
2-19 พื้นฐานของเอนโค้ดเดอร์	25
2-20 รูปแบบงาน BCD code ทั้งสองแบบ	25
2-21 โรตารีเอนโค้ดเดอร์แบบแมกนิติก	26
2-22 ออปติคัลโรตารีเอนโค้ดเดอร์	27
2-23 หลักการของออปติคัลโรตารีเอนโค้ดเดอร์	28
2-24 อุปกรณ์ของออปติคัลโรตารีเอนโค้ดเดอร์	28
2-25 หลักการการสะท้อนของคลื่นอุลตราโซนิกที่ไปกระทบของแข็ง	29
2-26 วงจรของอุปกรณ์อุลตราโซนิกที่มีการปล่อยและรับคลื่นพร้อมกัน	29
2-27 แสดงรูปสัญญาณของการรับ-ส่งคลื่นในรูปแบบของเวลา	30

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3-1 วงจรควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและวงจรถีชีซี้อปเปอร์	32
3-2 วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	33
3-3 การควบคุมการทำงานของวงจรถีชีซี้อปเปอร์ด้วยค่าดิวตี้ไซเคิล	34
3-4 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	35
3-5 อินทรีย์เมนทอล เอนโค้ดเดอร์	36
3-6 การใช้วงจรถีชีซี้อปเปอร์ในการควบคุมความเร็วให้คงที่	36
3-7 ไดอะแกรมของการควบคุมแบบลููปปิดโดยวงจรถีชีซี้อปเปอร์และมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	36
3-8 การรับและส่งสัญญาณโดยอุปกรณ์อัลตราโซนิกเซ็นเซอร์	37
3-9 โพลซาร์ทแสดงการตัดสินใจการทำงานของงานวิจัย	37
3-10 ภาพรวมของงานวิจัย	38
3-11 การจำลองระบบผ่านโปรแกรมจำลอง Matlab/Simulink	38
3-12 ผลการจำลองการตอบสนองภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงความเร็ว	39
3-13 ผลการจำลองค่ากระแสอาร์เมเจอร์และความเร็วของมอเตอร์ที่ใช้	39
4-1 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของรถไฟฟ้า	40
4-2 การออกแบบโครงสร้างรถขับเคลื่อนอัตโนมัติ	41
4-3 วงจรส่วน Opto Driver	42
4-4 วงจรขับมอเตอร์แบบ H-Bridge	42
4-5 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง $24 V_{DC}$	43
4-6 ชุดขับ DC Motor แบบ H-Bridge	43
4-7 แสดงการเชื่อมต่อสัญญาณแบบ Pull Up จาก Encoder	44
4-8 ชุดวัดระยะห่าง Ultrasonic Sensor HC-SR04	45
4-9 ชุดแสดงผลจอ LCD	45
4-10 (ก) สัญญาณทดสอบ Unit step	46
4-10 (ข) ผลตอบสนอง S-Curve ของมอเตอร์ในระบบ	46
4-11 บล็อกไดอะแกรมของระบบที่มีตัวควบคุม PI	48
4-12 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ดิวตี้ไซเคิลที่มีผลต่อเอาต์พุต (Voltage)	49
4-13 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ดิวตี้ไซเคิลที่มีผลต่อความเร็วรอบ (RPM)	50
4-14 Simulink Gain by Open Loop PI Tuning	50
4-15 เปรียบเทียบผลตอบสนอง Gain PI จาก Open Loop	51
4-16 ค่าความผิดพลาดระหว่างระบบจริงกับระบบจำลอง Open Loop Gain	51
4-17 ระบบจริงค่า PI ที่ได้ทำการปรับจูน 170 rpm	52
4-18 ระบบจริงค่า PI ที่ได้ทำการปรับจูน 50 rpm, 10 rpm, 150 rpm, 170 rpm	52
4-19 แสดงค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ 50 rpm	53
4-20 แสดงค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ 100 rpm	53

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่

หน้า

4-21	แสดงค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ 150 rpm	54
4-22	แสดงค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ 170 rpm	54
4-23	โครงสร้างจริง	56
4-24	ชุดควบคุมและขับเคลื่อน	56
4-25 (ก)	ลักษณะการเคลื่อนที่ของรถขณะเคลื่อนที่	57
4-25 (ข)	ลักษณะการเคลื่อนที่ของรถขณะหยุดนิ่ง	57



บทที่ 1

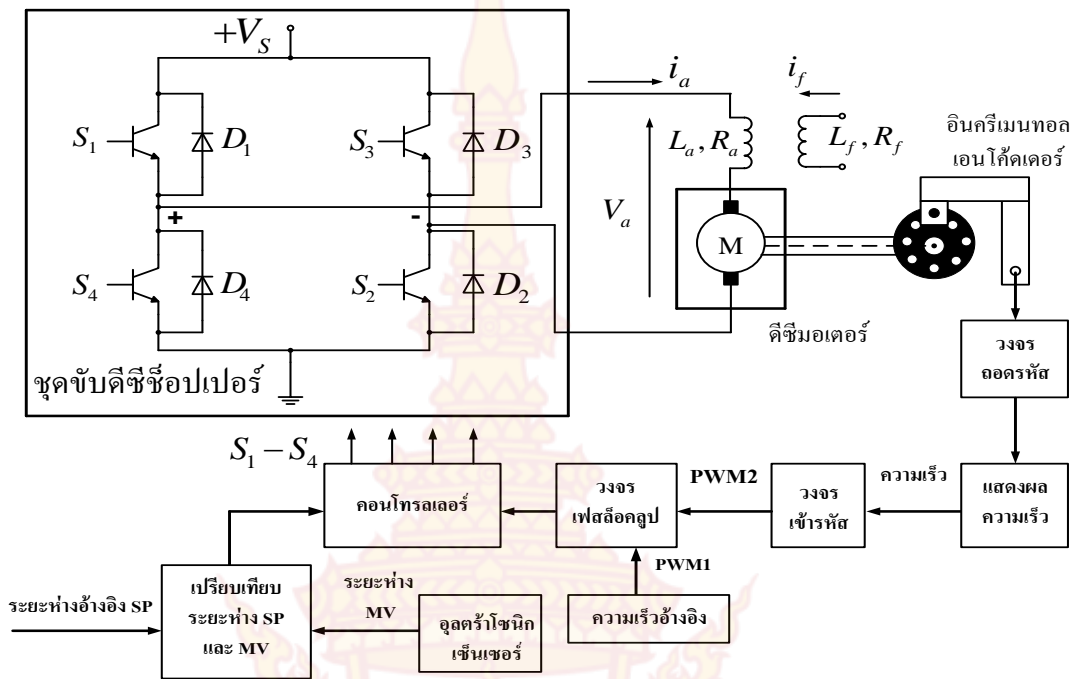
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

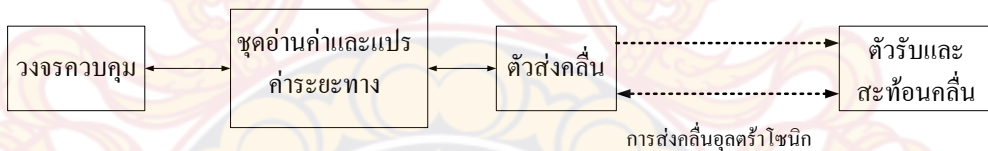
ปัจจุบันมอเตอร์ไฟฟ้าทั้งกระแสตรงและกระแสสลับ ได้ถูกนำมาใช้ในกระบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรมเป็นอย่างมากและเป็นที่แพร่หลาย เนื่องจากการทำงานในโรงงานอุตสาหกรรมจะมีกระบวนการที่มีการลำเลียงส่งถ่ายวัตถุดิบ การใช้เครื่องปั๊ม การนำมอเตอร์ไปใช้งานทางด้านต่างๆ เป็นต้น แต่สิ่งหนึ่งที่มีการพัฒนาการเมื่อไม่นานมานี้ ซึ่งก็คือการนำมอเตอร์ไฟฟ้าไปใช้ในรถยนต์ ซึ่งนำไปใช้ในระบบขับเคลื่อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าแทนการใช้พลังงานธรรมชาติ เช่น น้ำมันหรือก๊าซธรรมชาติ เป็นต้น ดังนั้นการนำมอเตอร์ไปใช้งานในระบบขับเคลื่อนรถยนต์นั้น สามารถที่จะมีการควบคุมการหมุนหรือความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพและแม่นยำ โดยการเทคนิคการควบคุมทางไฟฟ้า

ดังนั้น ทางสาขาวิศวกรรมการวัดคุม จึงมองเห็นถึงการนำมอเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้ในระบบขับเคลื่อนที่ถูกนำมาใช้งานในรถประเภทต่างๆ ให้มีการทำงานที่มีประสิทธิภาพควบคู่กับการควบคุม ซึ่งจำเป็นที่จะต้องมีการตรวจสอบการหมุนของมอเตอร์ที่เป็นการประยุกต์ใช้งานอุปกรณ์เซ็นเซอร์ในการตรวจจับความเร็วรอบและแสดงผลได้อย่างแม่นยำ ที่เทคโนโลยีสมัยใหม่ได้มีการนำการควบคุมแบบอัตโนมัติมาใช้ในการทำงานต่างๆเป็นจำนวนมาก ซึ่งในส่วนของการใช้มอเตอร์ไฟฟ้าในระบบขับเคลื่อนจึงมีข้อที่ควรคำนึงถึงก็คือความปลอดภัยทางด้านไฟฟ้าสำหรับผู้ที่ใช้ในการนำไปใช้ในการประยุกต์ร่วมกับการขับเคลื่อนในรถยนต์ ที่ในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้าจะควบคุมให้มอเตอร์มีค่าคงที่และปลอดภัยสำหรับผู้ใช้งาน ซึ่งงานวิจัยนี้ได้เล็งเห็นถึงความปลอดภัยของผู้ใช้งาน จึงได้มีแนวคิดในการตรวจจับระยะห่างระหว่างของรถที่กำลังขับเคลื่อนกับสิ่งกีดขวางทางด้านหน้า แล้วทำการลดค่าความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้าให้กับรถมีความเร็วลดลงและทำการรักษาระดับความเร็วของรถให้คงที่ โดยอาศัยการควบคุมระยะห่างเป็นหลัก เพื่อเป็นการป้องกันการชนของรถอันจะทำให้ผู้ใช้งานหรือที่ทำการขับขี่มีความระมัดระวังและปลอดภัยยิ่งขึ้น

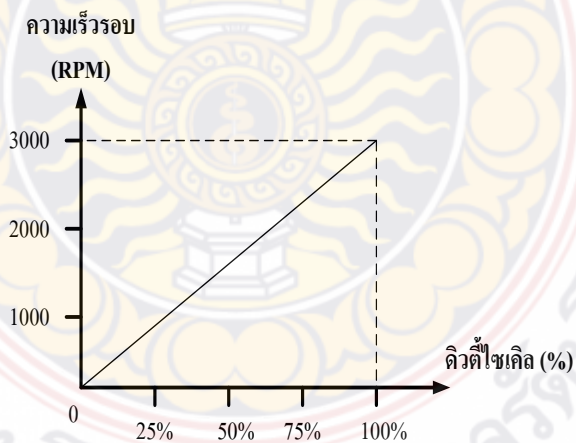
สำหรับแนวคิดของงานวิจัยนี้ สามารถแสดงเป็นภาพรวมการทำงานได้ดังรูปที่ 1-1 ที่เป็นการควบคุมความเร็วในการหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC motor) โดยผ่านวงจรชุดควบคุมดิจิตอลไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งหลักการในการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์คือการควบคุมการทำงานเปิด-ปิดของตัวอุปกรณ์สวิตซ์ $S_1 - S_4$ ที่จะมีผลต่อความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง จากนั้นในส่วนของการตรวจจับทางเอาท์พุทจะมีอิน ครีเมนทอล เอนโค้ดเดอร์เป็นตัวตรวจจับความเร็วในการหมุนและแสดงผลออกมาในรูปของความเร็ว ในส่วนของวงจรเฟสล็คคูลูปนั้นจะมีเป็นตัวช่วยรักษาระดับความเร็วของมอเตอร์ให้มีค่าคงที่ตามกราฟความสัมพันธ์ในรูปที่ 1-3 และ 1-4 ตามลำดับ และในส่วนของการตรวจจับระยะห่างระหว่างตัวรถกับสิ่งกีดขวางนั้นจะมีอุปกรณ์อัลตราโซนิกเซ็นเซอร์ตามรูปที่ 1-2 เป็นตัวตรวจจับระยะห่างและจะส่งผลกับมายังชุดควบคุมความเร็วของมอเตอร์ เพื่อที่จะนำมาใช้ในการประมวลผลการควบคุมความเร็วรอบให้สอดคล้องกับระยะห่างของทั้งสองจุดตามกราฟในรูปที่ 1-3 และ 1-4 ซึ่งกระบวนการทำงานภาพรวมของระบบนี้สามารถแสดงให้เห็นการควบคุมการทำงานและการตัดสินใจได้ดังโฟลวชาร์ทในรูปที่ 1-5 ได้



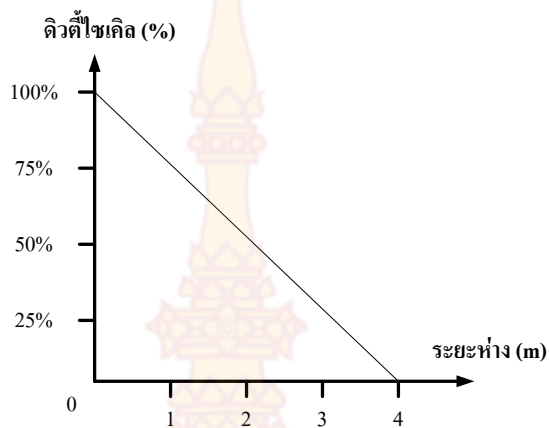
รูปที่ 1-1 ภาพรวมของงานวิจัย



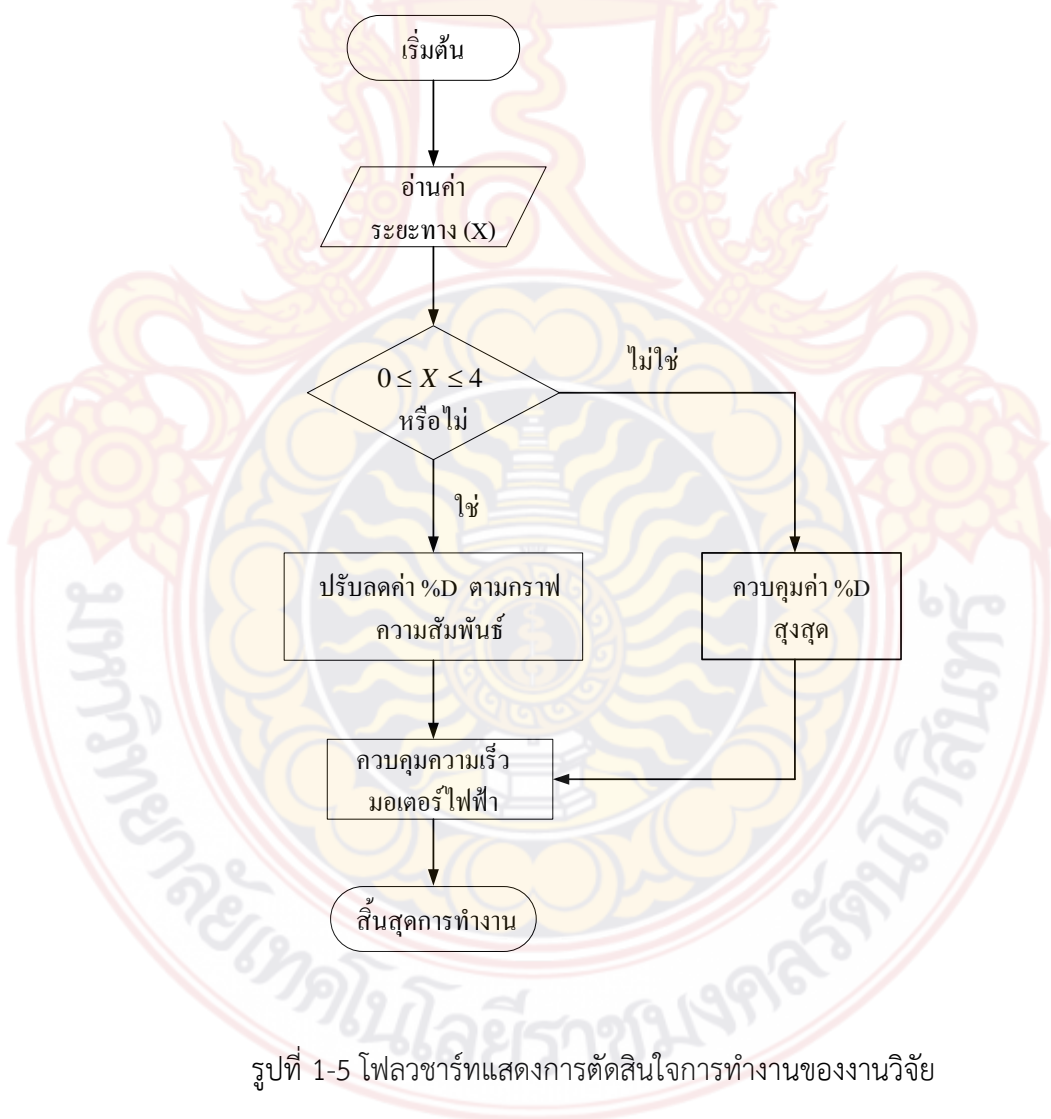
รูปที่ 1-2 การตรวจวัดระยะทางของอุปกรณ์อุลตราโซนิกเซ็นเซอร์



รูปที่ 1-3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากับดิวตี้ไซเคิล



รูปที่ 1-4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างดิวตี้ไซเคิลกับระยะห่างของจุดสองจุด



รูปที่ 1-5 โฟลวชาร์ทแสดงการตัดสินใจการทำงานของงานวิจัย

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาและรวบรวมข้อมูลของการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้าที่ถูกนำไปใช้ในรถที่ใช้มอเตอร์ไฟฟ้าขับเคลื่อน ซึ่งจะถูควบคุมด้วยวงจรดีซีช็อปเปอร์
- 1.2.2 เพื่อศึกษาการใช้งานตัวตรวจวัดระยะทางแบบอัลตราโซนิกในการประมวลหาระยะห่างระหว่างจุดเริ่มต้นกับสิ่งกีดขวาง
- 1.2.3 เพื่อศึกษาการทำงานในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้าด้วยหลักการเฟสล็อกคลูป
- 1.2.4 เพื่อศึกษาการใช้งานตัวตรวจวัดความเร็วรอบโดยอินครีเมนทัลเอนโค้ดเดอร์แบบจานหมุน
- 1.2.5 เพื่อศึกษาการนำระยะห่างจากตัวรถกับสิ่งกีดขวางที่ได้จากอุปกรณ์อัลตราโซนิกเซ็นเซอร์ไปใช้ในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้ขับเคลื่อนรถ

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

- 1.3.1 ออกแบบวงจรดีซีช็อปเปอร์และเขียนโปรแกรมในไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อสร้างสัญญาณพีดีบีลิวเอ็มสำหรับนำไปใช้ในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้าได้
- 1.3.2 สามารถนำอินครีเมนทัลเอนโค้ดเดอร์แบบจานหมุน ไปใช้ในการตรวจวัดความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าและนำไปแสดงผลที่ไมโครคอนโทรลเลอร์ได้
- 1.3.3 สามารถนำอุปกรณ์อัลตราโซนิกเซ็นเซอร์ไปใช้วัดระยะห่างระหว่างจุดเริ่มต้นและจุดสุดท้ายได้
- 1.3.4 สามารถประยุกต์รวมค่าระยะห่างระหว่างจุดเริ่มต้นและจุดสุดท้ายมาใช้ในการควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้าให้คงที่โดยผ่านวงจรดีซีช็อปเปอร์ได้

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ และหน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

- 1.4.1 ได้ทราบถึงลักษณะต่างๆ การทำงานของระบบควบคุมดีซีช็อปเปอร์ต่อมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรง
- 1.4.2 ได้ทราบถึงขั้นตอนการออกแบบระบบควบคุมการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและการประยุกต์ใช้งานที่เป็นการควบคุมความเร็วโดยการวัดระยะห่างจากอุปกรณ์อัลตราโซนิก
- 1.4.3 ได้ชุดวัดระยะห่างที่นำไปใช้ในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ได้ สำหรับนักศึกษาของสาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม และสาขาที่เกี่ยวข้อง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ได้นำไปศึกษาและทดลองปรับค่าความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้าตามระยะห่าง

1.5 วิธีการดำเนินการวิจัย และสถานที่ทำการทดลอง/เก็บข้อมูล

- 1.5.1 ศึกษา ค้นคว้าข้อมูลและออกแบบการใช้วงจรดีซีช็อปเปอร์ควบคุมการหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง
- 1.5.2 สร้างวงจรเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ควบคุมกับวงจรดีซีช็อปเปอร์และชุดวัดความเร็วรอบด้วยอินครีเมนทอลเอนโค้ดเดอร์
- 1.5.3 ออกแบบและสร้างชุดวัดระยะห่างด้วยอุปกรณ์อัลตราโซนิก
- 1.5.4 ทดสอบส่วนต่างๆ ของการทำงานที่เป็นการเปลี่ยนค่าความเร็วในการหมุนโดยสัมพันธ์กับระยะห่างที่ทำการตรวจวัด

1.5.5 จัดทำเอกสาร เพื่อใช้เป็นสื่อการเรียนการสอนวิชาเซ็นเซอร์และทรานสดิวเซอร์ วิชาเครื่องจักรกลไฟฟ้า วิชาอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

1.5.6 เผยแพร่งานวิจัย และอบรมการใช้งานให้กับนักศึกษา เพื่อเป็นประโยชน์ในการนำไปใช้งานจริง

1.6 ระยะเวลาทำการวิจัย และแผนการดำเนินงานตลอดโครงการวิจัย (ให้ระบุขั้นตอนอย่างละเอียด)

กำหนดระยะเวลาการดำเนินงาน 1 ปี เริ่มตั้งแต่ 1 ตุลาคม 2557 ถึง 30 กันยายน 2558 ซึ่งมีแผนการดำเนินงานตลอดโครงการดังนี้

กระบวนการวิจัย	ระยะเวลาดำเนินการ												
	ต.ค. 57	พ.ย. 57	ธ.ค. 57	ม.ค. 58	ก.พ. 58	มี.ค. 58	เม.ย. 58	พ.ค. 58	มิ.ย. 58	ก.ค. 58	ส.ค. 58	ก.ย. 58	
1 ศึกษาค้นคว้าเอกสาร	←	→											
2 วางแผนการวิจัย			←	→									
3 ออกแบบชิ้นส่วนต่างๆของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์					←	→							
4 เขียนโปรแกรมควบคุมการทำงานของระบบต่างๆ							←	→					
5 ทดสอบการทำงานและแก้ไขข้อบกพร่อง									←	→			
6 สรุปรายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์											←	→	
7 นำผลงานไปเผยแพร่ ฯลฯ												←	→

ตารางที่ 1-1 แผนการดำเนินงานวิจัย

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะนำเสนอทฤษฎีที่เกี่ยวข้องที่ได้นำหลักการต่างๆมาใช้ในการงานวิจัยเล่มนี้ ไม่ว่าจะเป็นทฤษฎีการควบคุมกำลังของวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ตัวตรวจจับความเร็วรอบ ตัวตรวจจับระยะทาง และวงจรแปลงสัญญาณทางไฟฟ้าอื่นๆที่เกี่ยวข้อง เป็นต้น

2.1 วงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

สำหรับการขับเคลื่อนรถไฟฟ้าที่ใช้มอเตอร์ไฟฟ้านั้นจะมีส่วนประกอบหลักก็คือมอเตอร์ไฟฟ้า ซึ่งในที่นี้จะใช้มอเตอร์ไฟฟ้าประเภทไฟฟ้ากระแสตรงเป็นอุปกรณ์หลักในการขับเคลื่อน เนื่องจากจะใช้พลังงานที่อยู่ในแบตเตอรี่เป็นแหล่งพลังงานหลักที่จ่ายให้แก่มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง สำหรับวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่จะใช้ในการขับเคลื่อนให้แก่มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงนั้นจะใช้วงจรแปลงผันกำลัง dc-dc ซึ่งเป็นวงจรที่ทำหน้าที่ในการแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงไปเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเช่นเดิม แต่มีความสามารถในการปรับแต่งค่ากำลังให้สามารถเป็นไปตามที่ต้องการได้

สำหรับการสร้างวงจรขับเคลื่อนอิเล็กทรอนิกส์กำลังนั้นจะมีอุปกรณ์ที่ใช้ในการกำหนดการทำงานของวงจรก็คือ อุปกรณ์ที่ใช้ในการจุดชนวนหรือวงจรสวิตช์ซึ่งนั่นเอง ที่อาจจะใช้อุปกรณ์เช่น บีเจที (BJT), เอสซีอาร์ (SCR), จีทีโอ (GTO) หรือไอจีบีที (IGBT) เป็นต้น ซึ่งอุปกรณ์ที่ว่ามาดังกล่าวนี้จะถูกนำไปเป็นอุปกรณ์สวิตช์ที่สามารถควบคุมตัวที่ไซเคิลของรูปคลื่นเอาต์พุตที่จะมีผลต่อแรงดันเอาต์พุตในวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังได้ โดยวงจรแปลงผันที่ใช้ในการควบคุมกำลังของแรงดันไฟตรงไปเป็นแรงดันไฟตรงนี้จะเรียกว่าวงจรช็อปเปอร์ (Chopper)

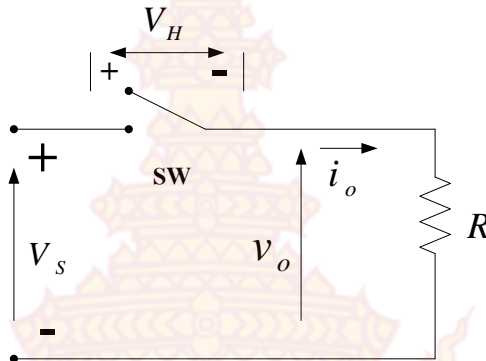
วงจรช็อปเปอร์ เป็นวงจรที่ช่วยในการควบคุมอัตราการเร่งของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงได้ดี ได้รูปสัญญาณที่ราบเรียบ มีประสิทธิภาพสูง และมีการตอบสนองในการปรับเปลี่ยนค่าได้อย่างรวดเร็ว[1] จึงทำให้วงจรช็อปเปอร์นี้เป็นที่นิยมใช้ในงานของการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงหลายประเภท เช่น การควบคุมมอเตอร์ลากจูงในรถไฟฟ้าหรือรถยก, ใช้ในการปรับแต่งแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นหรือลดลงได้ หรือใช้ในการเบรกของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อให้พลังงานกลับคืนสู่แหล่งจ่ายพลังงานทำให้ช่วยในการประหยัดพลังงาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระบบขนส่งที่มีการหยุดบ่อยๆ เป็นต้น

ดังนั้น จากข้อดีของวงจรช็อปเปอร์ที่จะสามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตให้มีค่าเพิ่มขึ้น (Step-up) หรือมีค่าลดลง (Step-down) ได้ตามที่ต้องการ จึงเป็นข้อดีของการนำไปประยุกต์ใช้ในงานวิจัยเล่มนี้ที่จะช่วยในการเบรกของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้นไปอีกด้วย

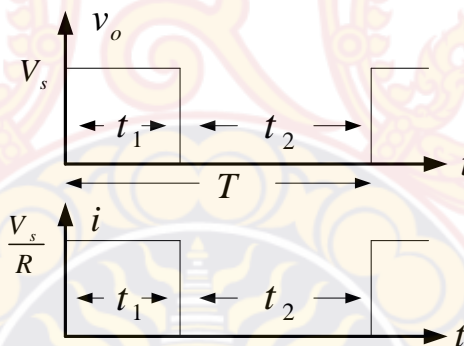
2.1.1 หลักการแปลงแรงดันให้ลดลงโดยวงจรช็อปเปอร์

จากหลักการแปลงแรงดันไฟฟ้าให้มีค่าลดลงโดยวงจรช็อปเปอร์นั้น จะสามารถต่อวงจรได้ดังรูปที่ 2-1 ซึ่งเป็นวงจรช็อปเปอร์ชนิดที่แปลงแรงดันให้ลดลง โดยแรงดันเอาต์พุตจะได้จากแรงดันที่ตกคร่อมโหลด R สำหรับหลักการคือจะมีสวิตช์ (SW) 1 ตัวในการทำหน้าที่เป็นสะพานไฟในการเปิด-ปิด เพื่อที่จะทำให้วงจรสามารถทำงานได้ ซึ่งระยะเวลาที่ใช้ในการปิดหรือระยะเวลาที่ใช้ในการเปิดนั้นจะเรียกว่าค่าตัวที่ไซเคิล

(Duty cycle: K) ซึ่งสามารถแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ได้จากวงจรช้อปเปอร์ได้เป็นรูปคลื่นแรงดันที่สัมพันธ์กับค่าเวลา (T) ได้ดังรูปที่ 2-2 ที่จะเห็นได้ว่าค่า t_1 นั้นจะเป็นช่วงเวลาของรูปคลื่นที่แทนระยะเวลาในการทำงานของวงจรโดยจะได้ค่าแรงดันออกมาเป็น V_s ส่วนค่า t_2 นั้นจะแทนด้วยระยะเวลาที่วงจรไม่ได้ทำงาน โดยแรงดันที่ได้จะมีค่าเป็นศูนย์ ส่วนค่าระยะเวลาของ $t_1 + t_2$ จะแทนได้เป็นค่า T ซึ่งเป็นระยะเวลาการทำงานหนึ่งรอบของอุปกรณ์สวิตซ์นี้



รูปที่ 2-1 วงจรช้อปเปอร์แบบแปลงแรงดันให้ลดลง



รูปที่ 2-2 รูปคลื่นการทำงานของแรงดันเอาต์พุตและกระแส

จากรูปที่ 2-1 ถ้าไม่ทำการคิดแรงดันที่ตกคร่อมอุปกรณ์สวิตซ์ (คือกำหนดให้แรงดันตกคร่อมสวิตซ์ V_H มีค่าเป็นศูนย์) จะได้ค่าเฉลี่ยของแรงดันเอาต์พุตทั้งหมดของวงจรเป็นสมการคือ

$$V_a = \frac{1}{T} \int_0^{t_1} v_o dt = \frac{t_1}{T} V_s = f t_1 V_s = k V_s \quad 2.1$$

โดยที่ค่าเฉลี่ยของกระแสที่ไหลลงจะได้เป็น

$$I_a = V_a / R = k V_s / R \quad 2.2$$

โดยที่ T เป็นคาบเวลาทั้งหมดของการทำงานครบ 1 รอบ

$k = t_1 / T$ เป็นดิวิตีไซเคิลหรือระยะเวลาที่เปิดการทำงานของการทำงานใน 1 รอบ

f เป็นความถี่ของการสวิตชิงและสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของแรงดันเอาต์พุต rms ได้เป็น

$$V_o = \left(\frac{1}{T} \int_0^{kT} v_0^2 dt \right)^{1/2} = \sqrt{k} V_s \quad 2.3$$

จากสมการที่ 2.3 ค่าดิวิตีไซเคิล (k) มีค่าได้ตั้งแต่ 0 ถึง 1 โดยปรับค่า t_1 , T หรือ f ดังนั้น จึงปรับค่า V_o ได้ตั้งแต่ 0 ถึง V_s โดยการควบคุมค่า k

ถ้ากำหนดให้วงจรช้อปเปอร์ไม่มีการสูญเสีย เราสามารถหาค่ากำลังอินพุตของวงจรช้อปเปอร์ ซึ่งจะมีค่าเท่ากับค่ากำลังเอาต์พุตได้จาก

$$P_i = \frac{1}{T} \int_0^{kT} v_o i dt = \frac{1}{T} \int_0^{kT} \frac{v_0^2}{R} dt = k \frac{V_s^2}{R} \quad 2.4$$

สำหรับค่าความต้านทานอินพุตของวงจรช้อปเปอร์เมื่อพิจารณาจากแหล่งจ่าย มีค่าเป็น

$$R_1 = \frac{V_s}{I_o} = \frac{V_s}{k V_s / R} = \frac{R}{k} \quad 2.5$$

การควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าในวงจรช้อปเปอร์จะมีอยู่ 2 ลักษณะคือการทำงานที่ความถี่คงที่และการทำงานที่ความถี่เปลี่ยนค่าได้

1.การทำงานที่ความถี่คงที่

การทำงานที่ความถี่คงที่ จะมีความถี่ช้อปปีง (f) หรือคาบเวลาช้อปปีง (T) คงที่ แต่เวลาในการเปิด (t_1) รวมทั้งความกว้างของสัญญาณพัลส์นั้นสามารถแปรค่าได้ การควบคุมประเภทนี้เรียกว่า การควบคุมการมอดูเลชันตามความกว้างพัลส์ (PWM)

2.การทำงานที่ความถี่แปรค่าได้

การทำงานที่ความถี่แปรค่าได้ มีค่าความถี่ช้อปปีงที่แปรค่าได้ แต่เวลาในการเปิด (t_1) หรือเวลาในการปิด (t_2) อย่างใดอย่างหนึ่งเป็นค่าคงที่ การควบคุมประเภทนี้เรียกว่า การมอดูเลชันความถี่ เนื่องจากการทำงานนี้มีการเปลี่ยนแปลงความถี่เป็นช่วงกว้างเพื่อให้ได้แรงดันเอาต์พุตเต็มคลื่น การควบคุมประเภทนี้มีการเปลี่ยนแปลงความถี่เป็นช่วงกว้างเพื่อให้ได้ช่วงแรงดันเอาต์พุตเต็มคลื่น การควบคุมประเภทนี้จึงสร้างฮาร์โมนิกส์จำนวนมาก ทำให้การออกแบบวงจรมีความยุ่งยากมากเนื่องจากต้องเพิ่มวงจรกรองฟิลเตอร์เข้าไปในวงจร ดังนั้นวงจรช้อปเปอร์ทั่วไปมักเป็นการทำงานที่ความถี่คงที่

จากภาพที่ 2-1 ถ้าเราคิดค่าแรงดันตกคร่อมสวิตช์ (v_{off} ; ขณะสวิตช์เปิด) จะได้ค่ากำลังเอาต์พุต มีค่าเป็น

$$P_o = \frac{1}{T} \int_0^{kT} \frac{v_o^2}{R} dt = \frac{1}{T} \int_0^{kT} \frac{(V_S - v_{ch})^2}{R} dt = k \frac{(V_S - v_{ch})^2}{R} \quad 2.6$$

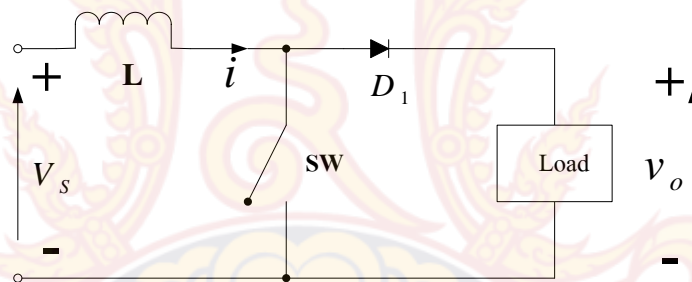
กำลังอินพุตของวงจรช้อปเปอร์ มีค่าเป็น

$$P_i = \frac{1}{T} \int_0^{kT} V_S i dt = \frac{1}{T} \int_0^{kT} \frac{V_S (V_S - v_{ch})}{R} dt = k \frac{V_S (V_S - v_{ch})}{R} \quad 2.7$$

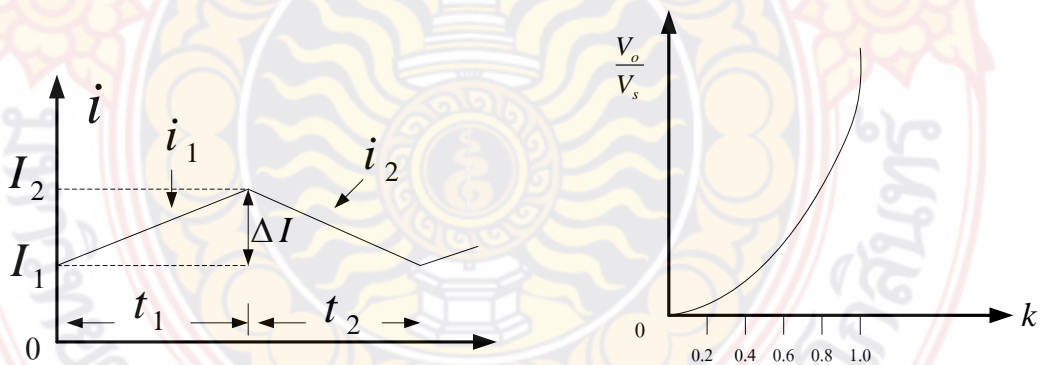
สังเกตว่า กรณีคิดค่า v_{ch} ; ค่า $V_o = V_S - v_{ch}$

2.1.2 หลักการแปลงแรงดันให้สูงขึ้นโดยวงจรช้อปเปอร์

สำหรับวงจรช้อปเปอร์พื้นฐานที่ใช้ในการแปลงแรงดันเอาต์พุตให้มีค่าสูงขึ้น จะมีลักษณะวงจรตามรูปที่ 2-3



รูปที่ 2-3 วงจรช้อปเปอร์แบบแปลงแรงดันให้สูงขึ้น



รูปที่ 2-4 รูปคลื่นของกระแสและกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับค่าตัวชี้เซลล์

เมื่อสวิตช์ SW เปิดเป็นเวลา t_1 กระแสที่อินดักเตอร์จะเพิ่มขึ้นและเก็บพลังงานไว้ในตัวอินดักเตอร์ ถ้าสวิตช์ปิดเป็นเวลา t_2 พลังงานที่เก็บในอินดักเตอร์จะถ่ายโอนผ่านไดโอด D_1 ไปยังโหลด จากนั้นกระแสที่อินดักเตอร์จึงค่อยๆ ลดลง ถ้ากระแสไหลอย่างต่อเนื่อง รูปคลื่นของกระแสที่อินดักเตอร์จะเป็นดังรูปที่ 2-

เมื่อสวิตช์ของช้อปเปอร์เปิด แรงดันตกคร่อมอินดักเตอร์จะมีค่าเป็น

$$v_L = L \frac{di}{dt} \quad 2.8$$

หาค่าพีคพิคของกระแสรีเปลในอินดักเตอร์ได้จาก

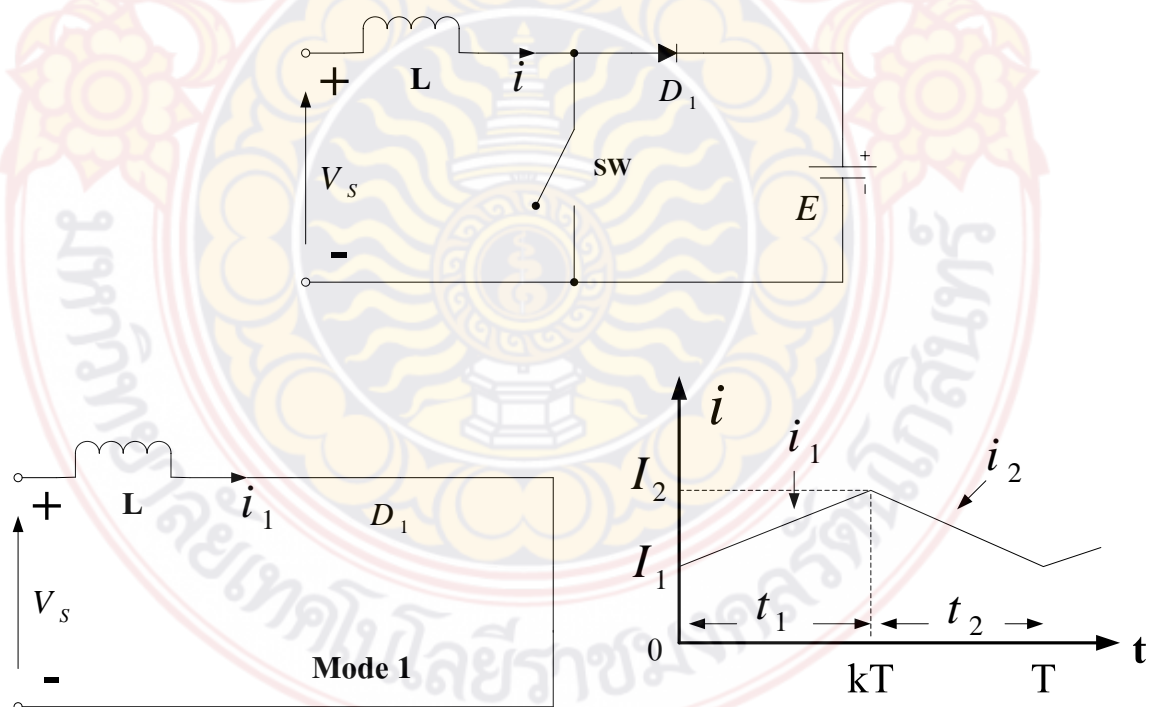
$$\Delta I = \frac{V_s}{L} t_1 \quad 2.9$$

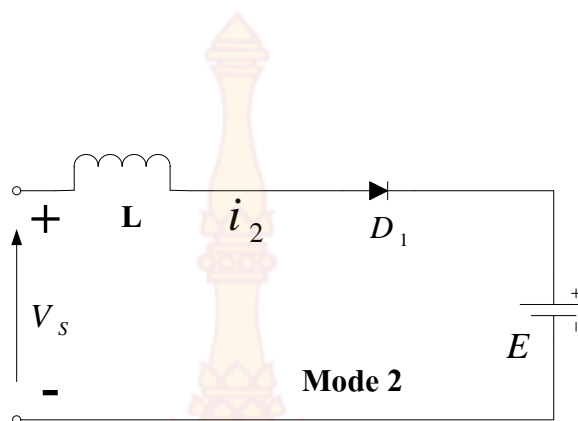
ค่าชั่วขณะของแรงดันเอาท์พุท มีค่าเป็น

$$v_o = V_s + L \frac{\Delta I}{t_2} = V_s \left(1 + \frac{t_1}{t_2} \right) = V_s \left(\frac{1}{1-k} \right) \quad 2.10$$

จากสมการที่ 2.10 สังเกตว่า การแปลงแรงดันตกคร่อมโวลต์ให้มีค่าสูงขึ้น ทำได้โดยปรับค่าตัวดีไซเคิล (k) ผลก็คือ เมื่อค่า $k=0$ แรงดันเอาท์พุทจะมีค่าต่ำสุดคือ V_s อย่างไรก็ตามจะเห็นได้ว่าไม่สามารถทำให้ค่า $k=1$ ได้ ทั้งนี้เพราะว่าเมื่อค่า k มีค่าใกล้ 1 แรงดันเอาท์พุทเริ่มมีค่ามากและไวต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า k ดังนั้น v_o จึงมีค่าสูงกว่า V_s เสมอ

พิจารณาวงจรช้อปเปอร์ที่เป็นการถ่ายโอนพลังงานจากแหล่งจ่ายแรงดันหนึ่งไปยังอีกแหล่งจ่ายแรงดันหนึ่งได้ดังรูปที่ 2-5





รูปที่ 2-5 วงจรช้อปเปอร์แบบแปลงแรงดันให้สูงขึ้นและโหมดการทำงาน

โหมดที่ 1 กระแสชั่วขณะของวงจรมีค่าเป็น

$$V_s = L \frac{di}{dt} \quad 2.11$$

$$i_1(t) = \frac{V_s}{L} t + I_1 \quad 2.12$$

เมื่อ I_1 เป็นกระแสเริ่มต้นของโหมดที่ 1

ในช่วงโหมดที่ 1 กระแสจะเพิ่มขึ้น สภาวะของกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่เป็นไปได้คือ

$$\frac{di_1}{dt} > 0 \text{ หรือ } V_s > 0 \quad 2.13$$

โหมดที่ 2 กระแสชั่วขณะของวงจรมีค่าเป็น

$$V_s = L \frac{di_2}{dt} + E \quad 2.14$$

$$i_2(t) = \frac{V_s - E}{L} t + I_2$$

เมื่อ I_2 เป็นกระแสเริ่มต้นของโหมดที่ 2

ในช่วงโหมดที่ 2 กระแสจะลดลง สภาวะของกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่เป็นไปได้คือ

$$\frac{di_2}{dt} < 0 \text{ หรือ } V_s < E \quad 2.15$$

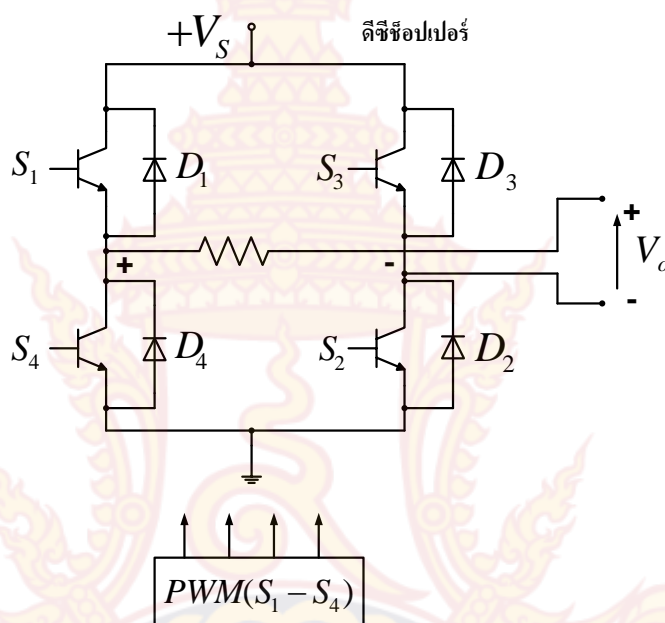
ดังนั้น เงื่อนไขที่เป็นไปได้สำหรับแรงดันทั้งสองคือ

$$0 < V_s < E \quad 2.16$$

สมการ 2.16 แสดงให้เห็นว่าแรงดันที่แหล่งจ่าย V_S มีค่าต่ำกว่าแรงดัน E

2.1.3 วงจรแปลงผันแรงดัน DC-DC แบบเต็มบริดจ์

จากหัวข้อที่ 2.2.1 และ 2.2.2 ที่เป็นหลักการของวงจรช็อบเปอร์ที่เป็นการเพิ่มแรงดันและการลดแรงดันให้สามารถควบคุมได้ตามที่ต้องการนั้น ซึ่งจากที่อธิบายหลักการมาจะเป็นการควบคุมแบบ 1 ทิศทาง หรือ 1 ควอดแดนซ์ ที่ไม่สามารถให้ทำงานในลักษณะที่ตรงกันข้ามได้ จึงได้มีการนำหลักการของวงจรทั้งสองมาประยุกต์รวมเข้าด้วยกันเป็นวงจรแปลงผัน DC-DC แบบเต็มบริดจ์ มีลักษณะดังรูปที่ 2-6



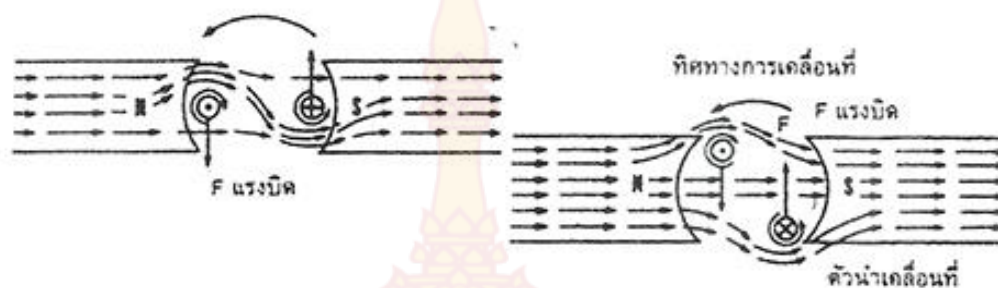
รูปที่ 2-6 วงจรดีซีช็อบเปอร์แบบเต็มบริดจ์

2.2 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง คือ เครื่องจักรกลไฟฟ้าที่ทำหน้าที่ในการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานทางกล โดยจะมีส่วนประกอบที่สำคัญคือ ขดลวดอาร์เมเจอร์และขดลวดสนามแม่เหล็ก ทั้งนี้ข้อดีของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจะมีแรงบิดเริ่มหมุนสูง และยังสามารถควบคุมความเร็วในช่วงกว้างกับวิธีการควบคุมความเร็วนั้นจะง่ายกว่าและค่าใช้จ่ายน้อยกว่าการใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับในการขับหรือเริ่มเดินเครื่องอีกด้วย

2.2.1 หลักการของมอเตอร์

เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลในตัวนำซึ่งอยู่ในสนามแม่เหล็กนั้น จะทำให้เกิดแรงขึ้นในตัวนำทิศทางของแรงที่เกิดขึ้น แรงที่เกิดขึ้นจะอยู่ในแนวที่ตั้งฉากกับเส้นแรงแม่เหล็กและกระแสที่ไหลผ่านในตัวนำนั้นๆ ดังนั้นเมื่อมีกระแสไหลในขดลวดตัวนำที่พันอยู่บนแกนเหล็กอาร์เมเจอร์ จะเกิดเส้นแรงแม่เหล็กขึ้นรอบๆ ตัวนำและจะเกิดการทำปฏิกิริยากับเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจากขั้วแม่เหล็กของมอเตอร์ ทำให้เกิดแรงผลักดันบนตัวนำ จึงทำให้แกนอาร์เมเจอร์นั้นหมุนได้ [2] ดังรูปที่ 2-7



รูปที่ 2-7 ขดลวดที่มีกระแสไฟฟ้าและวางอยู่ในสนามแม่เหล็ก

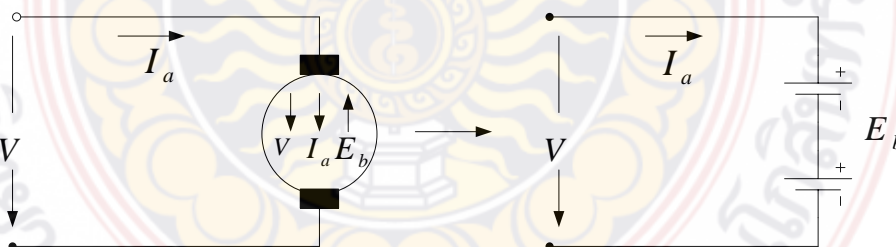
การกระทำของแรงที่เกิดขึ้นกับตัวนำที่มีกระแสไหลผ่านในขณะที่วางอยู่ในสนามแม่เหล็กนั้น จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก ความยาวของตัวนำและค่าของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวนำ ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$F = BiL \quad 2.17$$

- เมื่อ F = แรงที่เกิดขึ้นบนตัวนำ (N)
 B = ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (Wb/m^2)
 i = กระแสที่ไหลในตัวนำ (A)
 L = ความยาวของลวดตัวนำ (m)

2.2.2 แรงดันไฟฟ้าต้านกลับ (Back EMF.)

เมื่อมอเตอร์ทำงาน คือ ขดลวดอาร์เมเจอร์หมุน ตัวนำที่แกนอาร์เมเจอร์จะตัดกับเส้นแรงแม่เหล็ก ซึ่งเป็นไปตามกฎของการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า ดังนั้น แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำจึงเกิดขึ้นในแกนอาร์เมเจอร์ ซึ่งจะมีทิศทางไปในทิศทางตรงกันข้ามกับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ เพราะว่ามีทิศทางตรงกันข้ามจึงเรียกว่า แรงดันไฟฟ้าต้านกลับ (Back emf. หรือ E_b) ซึ่งสามารถแสดงในรูปของวงจรได้ดังรูปที่ 2-8



รูปที่ 2-8 ทิศทางการไหลของแรงดันไฟฟ้าต้านกลับ

เมื่ออาร์เมเจอร์หมุนจะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าต้านกลับออกมา ซึ่งจะแสดงในรูปของสมการได้เป็น

$$I_a = (V - E) / R_a \quad \text{A} \quad 2.18$$

เมื่อ R_a = ความต้านทานในวงจรของอาร์เมเจอร์ (Ω)

$$\text{แต่ } E_b = \Phi ZNP / 60A \quad (\text{V})$$

จากสมการที่ 2.18 ถ้าความเร็วรอบสูง แรงดันไฟฟ้าต้านกลับก็จะมาก ดังนั้นกระแสที่ไหลในอาร์เมเจอร์ (I_a) นั้นมีค่าน้อย ถ้าความเร็วรอบต่ำกว่าแรงดันไฟฟ้าต้านกลับก็จะน้อย กระแสที่อาร์เมเจอร์ (I_a) ก็จะมาก ดังนั้นแรงบิด (Torque) ที่เกิดขึ้นก็จะสูงกว่าเมื่อมีความเร็วรอบสูง

2.2.3 สมการของแรงดันไฟฟ้าต้านกลับในมอเตอร์

$$V = E_b + I_a R_a \quad 2.19$$

เมื่อ V เป็นแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับวงจรของมอเตอร์
 และ E_b เป็นแรงดันไฟฟ้าต้านกลับที่เกิดขึ้นในอาร์เมเจอร์
 ซึ่ง $I_a R_a$ เป็นแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมที่ความต้านทานของอาร์เมเจอร์

2.2.4 แรงบิด (Torque)

$$T = F \times r \quad 2.20$$

ซึ่งเป็นงานที่ทำได้จากแรงใน 1 รอบของการหมุน

$$\begin{aligned} &= \text{แรง} \times \text{ระยะทาง} \\ &= F \times 2\pi r && \text{จูล} \\ \text{กำลังที่เกิดขึ้น} &= F \times 2\pi r \times N / 60 && \text{จูล/วินาที} \\ &= (F \times r) \times 2\pi N / 60 && \text{จูล/วินาที} \\ \text{เมื่อ } 2\pi N / 60 &= \text{ความเร็วเชิงมุม คือ } \omega \text{ มีหน่วยเป็น เรเดียน/วินาที} \\ \text{และ } F \times r &= \text{แรงบิด (T)} \\ \text{ดังนั้น กำลังที่เกิดขึ้น} &= T \times \omega && \text{จูล/วินาที (W)} \end{aligned}$$

2.2.5 ความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

จากสมการของแรงดันไฟฟ้า หรือ Back emf. ของมอเตอร์

$$E_b = V - I_a R_a \quad 2.21$$

$$\begin{aligned} \text{หรือ} & (\Phi ZN / 60)(P / A) = V - I_a R_a \\ \text{เพราะฉะนั้น} & N = [(V - I_a R_a) / \Phi](A / ZP) && \text{รอบ/วินาที (rps)} \\ \text{เมื่อ} & V - I_a R_a = E_b \\ \text{เพราะฉะนั้น} & N = (E_b / \Phi)(A / ZP) && \text{รอบ/วินาที} \\ \text{หรือ} & N = K(E_b / \Phi) && \text{รอบ/วินาที} \end{aligned}$$

ดังนั้น จะได้ว่าความเร็วของมอเตอร์นั้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับแรงดันไฟฟ้าต้านกลับ และเป็นสัดส่วนกลับกับเส้นแรงแม่เหล็ก (Φ) นั่นคือ $N \approx E_b / \Phi$

สำหรับขั้วต่อมอเตอร์

ในกรณีเช่นนี้จะได้สมการที่คล้ายกับของซีรีย์มอเตอร์ คือ

$$N_2 / N_1 = (E_{b2} / E_{b1}) \times (\Phi_1 / \Phi_2) \quad 2.22$$

$$\begin{aligned} \text{ถ้า } \Phi_1 &= \Phi_2 \\ \text{ดังนั้น } N_2 / N_1 &= (E_{b2} / E_{b1}) \end{aligned}$$

เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความเร็ว สามารถหาได้จากสมการคือ
ความแตกต่างระหว่างความเร็วรอบของมอเตอร์ในกรณีที่ไม่มีโหลด กับในกรณีที่มีโหลดนั้น
เรียกว่า speed regulation

ความเร็วที่เปลี่ยนแปลง = ความเร็วกรณีที่ไม่มีโหลด - ความเร็วกรณีที่มีโหลดเต็มที่
ความเร็วที่เปลี่ยนแปลงนี้สามารถคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ได้ โดยการเปรียบเทียบกับความเร็ว กรณีที่
โหลดเต็มที่ นั่นคือ

เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความเร็ว = (ความเร็วที่เปลี่ยนแปลง/ความเร็วกรณีที่โหลดเต็มที่)
× 100 หรือ

$$\% \text{ speed regulation} = [(No \text{ Load} - Full \text{ Load}) / Full \text{ Load}] \times 100 \quad 2.23$$

2.2.6 คุณลักษณะของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

เส้นโค้งคุณลักษณะของมอเตอร์นั้น เป็นเส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณต่างๆที่
เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

1. แรงบิดและกระแสในอาร์เมเจอร์ (T_a / I_a) เราเรียกว่า คุณลักษณะทางไฟฟ้า
2. ความเร็วและกระแสในอาร์เมเจอร์ (N / I_a)
3. ความเร็วและแรงบิด (N / T_a) เราเรียกว่า คุณลักษณะทางกล ซึ่งสามารถหาได้จาก
คุณลักษณะของ T_a / I_a และ N / I_a

คุณลักษณะของมอเตอร์จะมีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน ดังนี้คือ

$$T_a = \Phi I_a \quad 2.24a$$

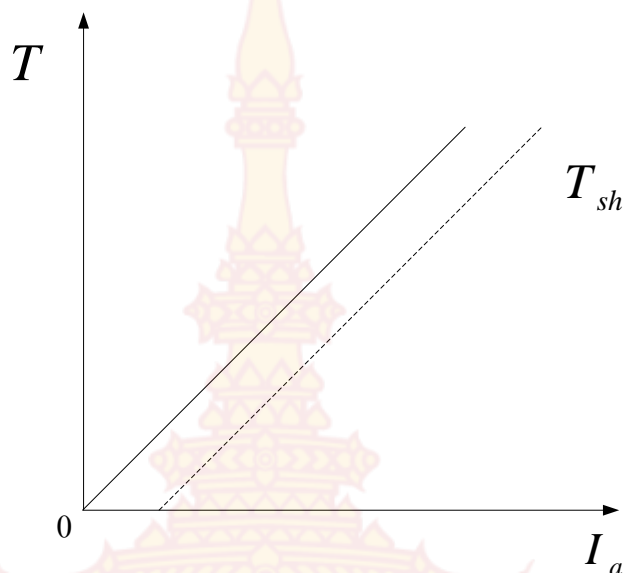
และ
$$N = E_b / \Phi \quad 2.24b$$

คุณลักษณะของขั้วต่อมอเตอร์

1. คุณลักษณะของแรงบิดกับกระแสในอาร์เมเจอร์ สมมติให้ Φ ในทางปฏิบัติมีค่าคงที่ (เมื่อมี
โหลดมากๆ Φ จะลดลง เพราะอาร์เมเจอร์รีแอกชันมีค่าเพิ่มขึ้น) จะพบว่า

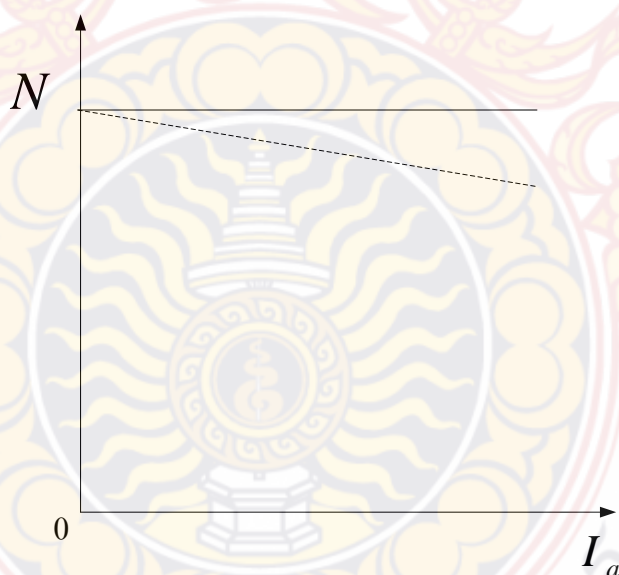
$$T_a \sim I_a \quad 2.25$$

ดังนั้น คุณลักษณะทางไฟฟ้าจึงแสดงได้ดังรูปที่ 2-9 ในทางปฏิบัตินั้นจะเป็นเส้นตรง ที่เป็นกราฟ
ที่มีลักษณะที่เพิ่มขึ้นแบบสัดส่วนโดยตรงที่เป็นเชิงเส้น



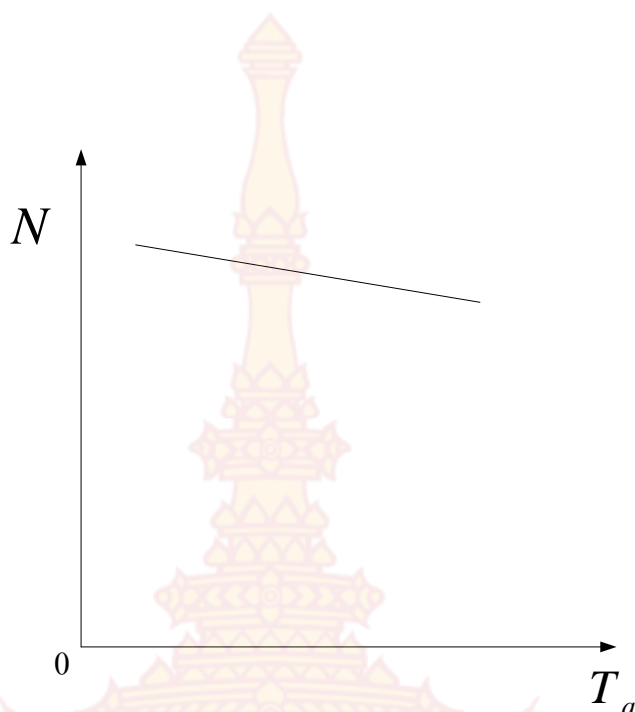
รูปที่ 2-9 กราฟคุณลักษณะของแรงบิดกับกระแสในอาร์เมเจอร์ของชั้นต์มอเตอร์

2.คุณลักษณะของความเร็วกับกระแสในอาร์เมเจอร์ ถ้าสมมุติให้ Φ มีค่าคงที่ ดังนั้น $N \sim E_b$ และ E_b ในทางปฏิบัติถือว่ามีความคงที่ ดังนั้น ความเร็วรอบของมอเตอร์จึงมีค่าคงที่ไปด้วยและสามารถเขียนเป็นเส้นโค้งความสัมพันธ์ได้ดังรูปที่ 2-10



รูปที่ 2-10 กราฟคุณลักษณะของความเร็วรอบกับกระแสในอาร์เมเจอร์ของชั้นต์มอเตอร์

3.คุณลักษณะของความเร็วรอบกับแรงบิด สามารถหาได้จาก T_a / I_a และคุณลักษณะของ N / I_a ซึ่งสามารถเขียนเส้นโค้งได้ดังรูปที่ 2-11



รูปที่ 2-11 กราฟคุณลักษณะของความเร็วรอบกับแรงบิดของขั้วตัมอเตอร์

2.2.7 การควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

องค์ประกอบในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจะเห็นได้ว่าความเร็วของมอเตอร์นั้นมีความสัมพันธ์กันดังต่อไปนี้ คือ

$$N = (V - I_a R_a)(A/P) / Z\Phi \quad \text{รอบ/นาที}$$

เพราะฉะนั้น

$$N = K(V - I_a R_a) / \Phi \quad \text{รอบ/นาที}$$

$$= KE_b / \Phi \quad \text{รอบ/นาที}$$

จะเห็นได้ว่าความเร็วรอบของมอเตอร์สามารถควบคุมความเร็วได้ 3 วิธีโดย

1. การเปลี่ยนแปลงเส้นแรงแม่เหล็กหรือเส้นแรงแม่เหล็กต่อขั้ว
2. ความต้านทานของวงจรรอาร์เมเจอร์
3. การควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายเข้าไป

การควบคุมความเร็วของขั้วตัมอเตอร์

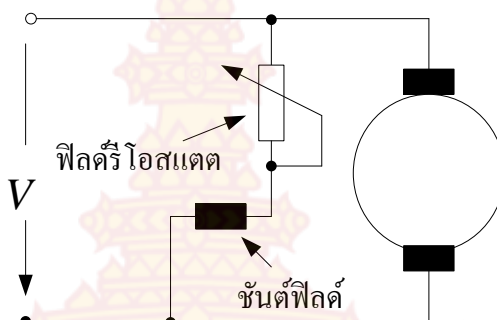
1. การเปลี่ยนแปลงเส้นแรงแม่เหล็กหรือการควบคุมเส้นแรงแม่เหล็ก
- จากสมการในหัวข้อก่อนหน้านี้ จะเห็นได้ว่า

$$N \approx 1/\Phi$$

2.26

เมื่อ Φ ลดลง จะทำให้ความเร็วรอบของมอเตอร์เพิ่มขึ้น เรียกว่า วิธีการควบคุมเส้นแรงแม่เหล็ก ซึ่งสามารถควบคุมได้ด้วยการเปลี่ยนแปลงกระแสที่ไหลในฟิลด์คอยล์ (I_F) โดยการใช้ความต้านทานที่ปรับ

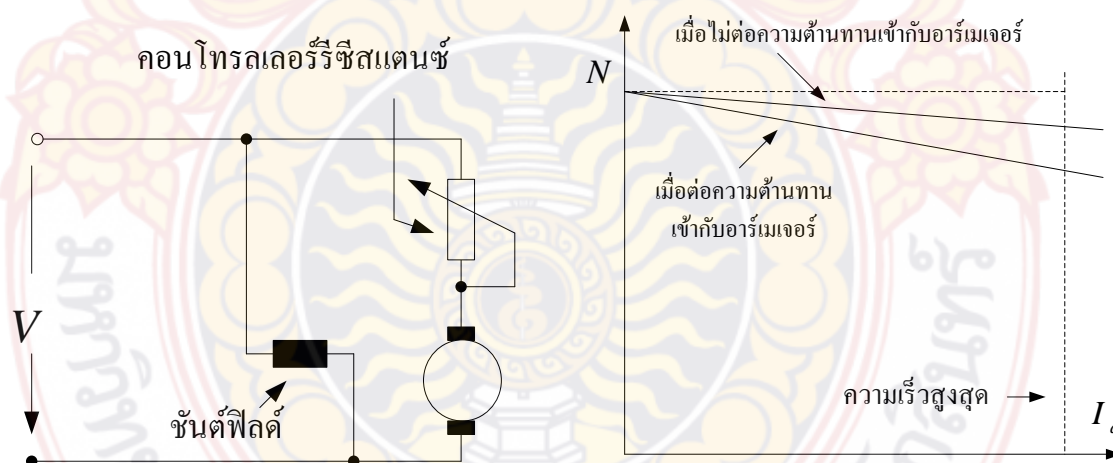
ค่าได้ต่ออนุกรมเข้ากับชุดชั้นดีฟิลด์ ดังแสดงในรูปที่ 2-12 เมื่อ I_F มีค่าน้อย โดยการปรับรีโอสแตตจะทำให้กำลังสูญเสียในขดลวดอาร์เมเจอร์จะมีค่าน้อยลงด้วย ซึ่งเมื่อ I_F น้อย Φ จะน้อยด้วย แต่ความเร็วรอบของมอเตอร์จะสูงขึ้น แต่ถ้า I_F สูง Φ จะสูงขึ้นด้วย ความเร็วรอบก็จะน้อยลง และเมื่อ I_F มีค่าน้อยลง จึงทำให้กำลังสูญเสียน้อย เพราะกระแสที่ไหลผ่านรีโอสแตตและฟิลด์คอยล์จะมีค่าน้อยลง



รูปที่ 2-12 วงจรของการต่อรีโอสแตต

2.อาร์เมเจอร์หรือการควบคุมแบบรีโอสแตต

การควบคุมความเร็วด้วยวิธีการนี้ จะใช้เมื่อต้องการให้ความเร็วต่ำกว่าความเร็วเมื่อขณะที่ไม่มีโหลด เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับมอเตอร์มีค่าคงที่ แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมที่อาร์เมเจอร์นั้นจะเปลี่ยนแปลงไปตามการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของรีโอสแตตที่ต่ออนุกรมอยู่กับอาร์เมเจอร์นั้น เรียกว่า เครื่องควบคุมความต้านทานหรือคอนโทรลเลอร์รีซิสแตนซ์ ในวงจรอาร์เมเจอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2-13



รูปที่ 2-13 วงจรของการต่อคอนโทรลเลอร์รีซิสแตนซ์

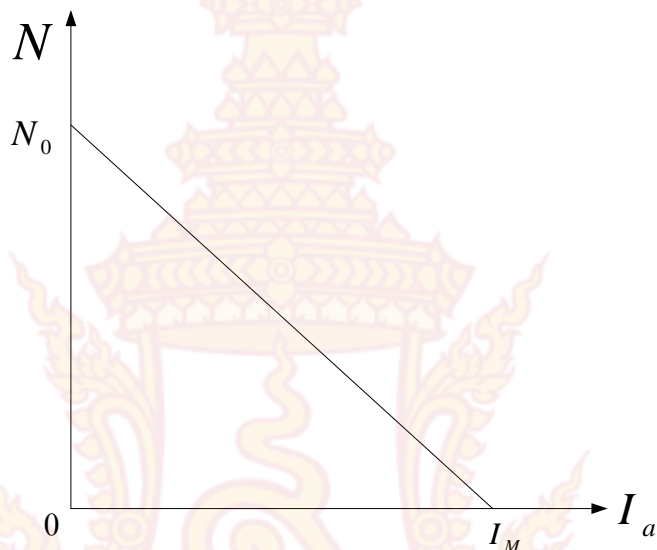
เมื่อคอนโทรลเลอร์รีซิสแตนซ์เพิ่มมากขึ้น แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมที่อาร์เมเจอร์จะลดลง ทำให้ความเร็วรอบของมอเตอร์ลดลง สำหรับที่โหลดที่มีแรงบิดคงที่ ความเร็วจะเป็นสัดส่วนโดยประมาณกับแรงดันตกคร่อมที่อาร์เมเจอร์

จากคุณลักษณะของความเร็วกับกระแสอาร์เมเจอร์ จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มความต้านทานในวงจรของอาร์เมเจอร์จะทำให้ความเร็วลดลง

$$\begin{aligned}
 N_1 &= V - I_a R_a \approx E_{b1} & 2.27a \\
 N_2 &= V - I_a R_a \approx E_{b2} & 2.27b \\
 \text{ดังนั้น } N_1 / N_2 &= E_{b2} / E_{b1} & 2.27c
 \end{aligned}$$

ส่วนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับกระแสที่อาร์เมเจอร์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2-

14



รูปที่ 2-14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ว (N) และกระแสอาร์เมเจอร์ (I_M)

3.การควบคุมแรงดันไฟฟ้า

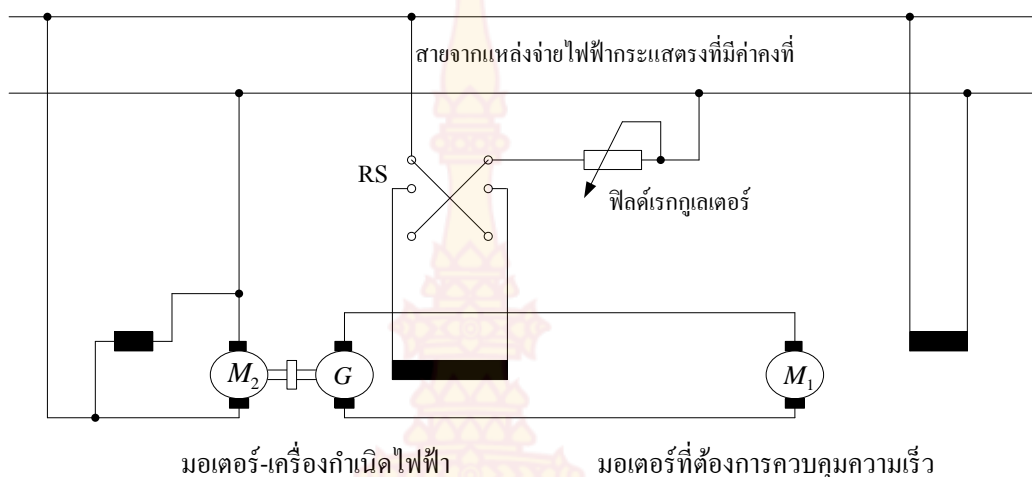
3.1 มัลติเพิลโวลเตจคอนโทรล

การควบคุมความเร็วด้วยวิธีการนี้ ชนัตฟิลด์ของมอเตอร์จะต่ออยู่กับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่คงที่ แต่อาร์เมเจอร์จะถูกต่ออยู่กับแหล่งจ่ายที่สามารถปรับค่าได้ ซึ่งเป็นแหล่งจ่ายอีกอันหนึ่งแยกจากชนัตฟิลด์ ความเร็วของอาร์เมเจอร์โดยประมาณจะเป็นสัดส่วนกับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับอาร์เมเจอร์ แต่การควบคุมความเร็วด้วยวิธีการนี้ไม่ค่อยนิยมใช้กัน

3.2 วิธีการของวาร์ดเลียวนาร์ด

วิธีการควบคุมความเร็วด้วยวิธีการนี้ ใช้กับระบบที่ต้องการควบคุมความเร็วของมอเตอร์แบบ

ความไว



รูปที่ 2-15 วงจรของวาร์ดเลียวนาร์ดในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์

จากรูปที่ 2-15 มอเตอร์ M_1 เป็นมอเตอร์ที่ต้องการควบคุมความเร็ว ฟิลด์ของมอเตอร์ M_1 จะต่อคร่อมเข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่คงที่ แล้วเปลี่ยนแปลงแรงดันที่ตกคร่อมอาร์เมเจอร์ของ M_1 จะทำให้ได้ความเร็วตามที่ต้องการ แรงดันที่ถูกเปลี่ยนแปลงนี้จะถูกจ่ายให้โดยมอเตอร์หรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งมอเตอร์ที่เป็นตัวขับเคลื่อน อาจเป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงหรือมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับก็ได้ คือ M_2 และต่อเข้าโดยตรงกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง (G) โดยมอเตอร์ M_2 จะต้องมีความเร็วที่ค่อนข้างจะคงที่ แรงดันที่ออกจากเครื่องกำเนิด G จะถูกต่อเข้ากับมอเตอร์ M_1 แรงดันไฟฟ้าที่ออกจากเครื่องกำเนิดนี้จะถูกเปลี่ยนแปลงโดยฟิลด์เรกกูเลเตอร์ โดยการปรับค่าจาก 0 ถึงค่าสูงสุด ถ้าจะกลับทิศทางการหมุนของ M_1 ทำได้โดยการกลับทิศทางการไหลของกระแสจากเครื่องกำเนิด G ด้วยการใช้นิวส์วิตช์กลับทาง (RS: Reversing switch)

2.3 การเบรกของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

การชะลอความเร็วของมอเตอร์ให้หมุนช้าลงและหยุดหมุนด้วยความรวดเร็ว ในช่วงเวลาทันทีทันใดนั้น เรียกว่า การเบรกมอเตอร์ (Braking) และการเบรกทางไฟฟ้าที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย ในการเบรกมอเตอร์นั้นได้แก่ ปลั๊กกิ้ง (Plugging), ไดนามิก (Dynamic) และรีเจนเนอเรทีฟ (Regenerative braking) ซึ่งสามารถอธิบายหลักการแต่ละวิธีการได้ดังนี้ [3]

2.3.1 ปลั๊กกิ้ง เป็นการเบรกมอเตอร์ด้วยวิธีการกลับขั้วไฟฟ้าของแรงดันอาร์เมเจอร์ เพื่อป้องกันกำลังไฟฟ้าให้แก่อาร์เมเจอร์ ในทางกลับกันกระแสมอเตอร์ขณะที่เบรก จะได้เป็นสมการคือ

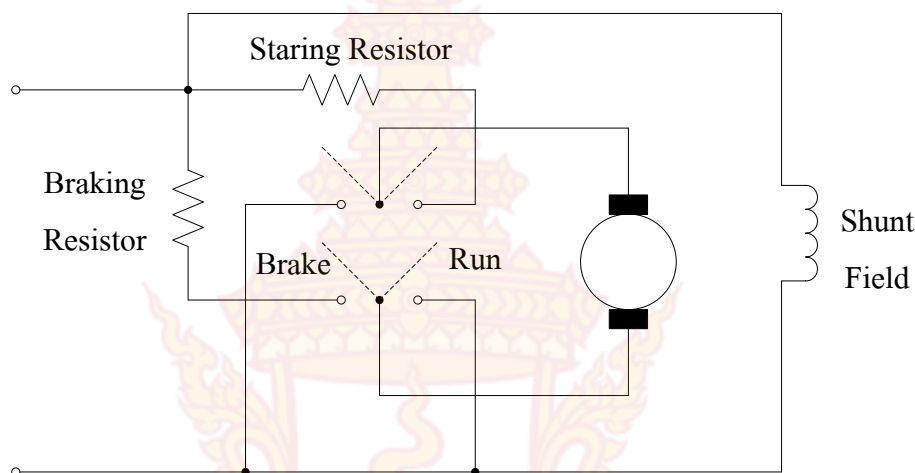
$$\text{กระแสมอเตอร์ขณะหมุนขั้วโพลด} : I_A = (V_M - E_C) / R_A \quad 2.28$$

$$\text{กระแสมอเตอร์ขณะเบรก} : I_A = -(V_M + E_C) / R_A \quad 2.29$$

กระแสมอเตอร์ขณะเบรกตามสมการที่ 2.29 แสดงว่ามีทิศทางการไหลตรงกันข้ามกับกระแสโพลด ดังนั้นแรงบิดที่เบรกมอเตอร์ จะมีทิศทางตรงกันข้ามในลักษณะต่อต้านกับแรงบิดที่หมุนมอเตอร์ตามปกติ และการกลับขั้วแรงดันอาร์เมเจอร์ขณะเบรกมอเตอร์นี้มีผลให้แรงดันเหนี่ยวนำกลับของมอเตอร์

เกือบเท่ากับแรงดันอาร์เมเจอร์ทั้งยังมีทิศทางเสริมกัน (ทิศทางเดียวกัน) อีกด้วย แรงดันของวงจรรอาร์เมเจอร์นี้เป็นผลรวมระหว่างแรงดันทั้งสอง ($V_M = V_A + E_C$)

กระแสมอเตอร์ขณะเบรกนั้นไม่ควรให้มีค่าสูงเกินไป ต้องจำกัดให้อยู่ในพิสัยประมาณ 1.4-1.75 เท่าของกระแสเต็มโหลด ด้วยการต่อตัวต้านทานเป็นอนุกรมกับอาร์เมเจอร์ ซึ่งเรียกว่า “Braking resistor” เช่นเดียวกับความต้านทานเริ่มหมุน “Starting resistor” ดังในรูปที่ 2-16



รูปที่ 2-16 การเบรกมอเตอร์ไฟฟ้าด้วยวิธีการกลับขั้วไฟฟ้าของระบบที่ต่อเข้ากับขั้วของอาร์เมเจอร์ในมอเตอร์ที่เรียกว่า “ปลั๊กกิ้ง”

เส้นแรงแม่เหล็กในขดลวดสนามแม่เหล็กจะยังคงที่ในทิศทางเดิม ถึงแม้ว่าจะกลับขั้วไฟฟ้าของระบบไฟที่ต่อเข้าอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์ขณะเบรกแล้วก็ตาม แรงบิดของมอเตอร์เป็นปฏิภาคโดยตรงกับกระแสอาร์เมเจอร์ตามสมการความสัมพันธ์ของแรงบิดกับกระแส และแรงบิดจะลดลงเมื่อความเร็วมอเตอร์ลดลงอันเนื่องมาจากแรงดันอาร์เมเจอร์ลดลง ขณะเดียวกันขณะเริ่มหมุน แรงบิดหมุนของมอเตอร์ขึ้นอยู่กับกระแสเริ่มหมุนตามสมการที่ 2.30

มอเตอร์ขณะเริ่มหมุน : $E_C = 0$

$$I_{Sr} = -V_M / (R_A - R_{br}) \quad 2.30$$

โดยที่

I_{sr} = กระแสเริ่มหมุน (ขณะมอเตอร์หยุดอยู่กับที่พร้อมจะหมุน)

$-V_M$ = แรงดันอาร์เมเจอร์ขณะเบรก

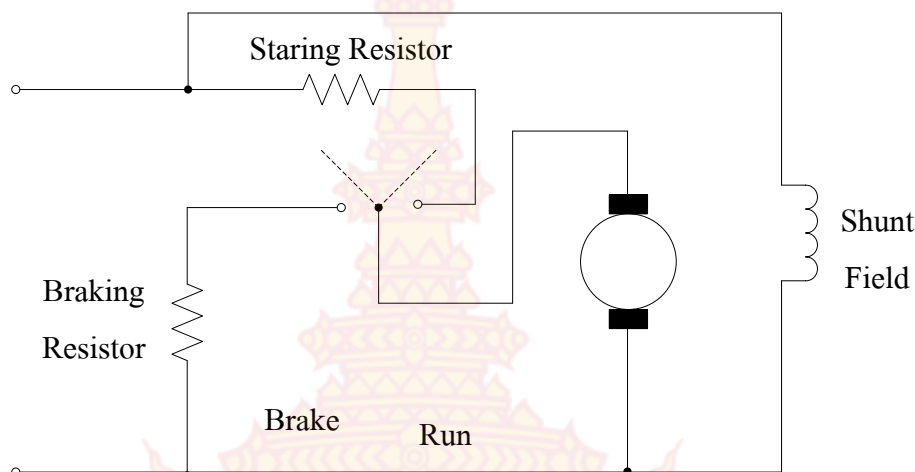
R_A = ความต้านทานอาร์เมเจอร์

R_{br} = ความต้านทานของวงจรถบเบรกที่ต่ออนุกรมกับอาร์เมเจอร์ขณะเบรก

มอเตอร์

2.3.2 ไดนามิก เป็นการเบรกมอเตอร์ด้วยการทำให้มอเตอร์เปลี่ยนสภาพการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และส่งพลังงานไฟฟ้าทั้งหมดจากอาร์เมเจอร์ไปป้องกันการสูญเสียเนื่องจากตัวต้านทานของวงจรถบเบรก กล่าวคือ ขณะเบรกมอเตอร์ให้ต่อตัวต้านทานค่าต่ำ เป็นการอนุกรมกับมอเตอร์ แล้วตัดวงจรรอาร์เมเจอร์ออกจากระบบไฟ โดยที่ขดลวดสนามแม่เหล็กยังคงต่ออยู่กับแรงดันหลักและให้กำเนิดเส้นแรง

แม่เหล็กในสนามแม่เหล็กอยู่ตลอดเวลา ขณะนี้มอเตอร์จะเปลี่ยนสภาพเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ส่งพลังงานไฟฟ้าทั้งหมดจากอาร์เมเจอร์ไปป้อนพลังสูญเสียใน “Braking resistor”



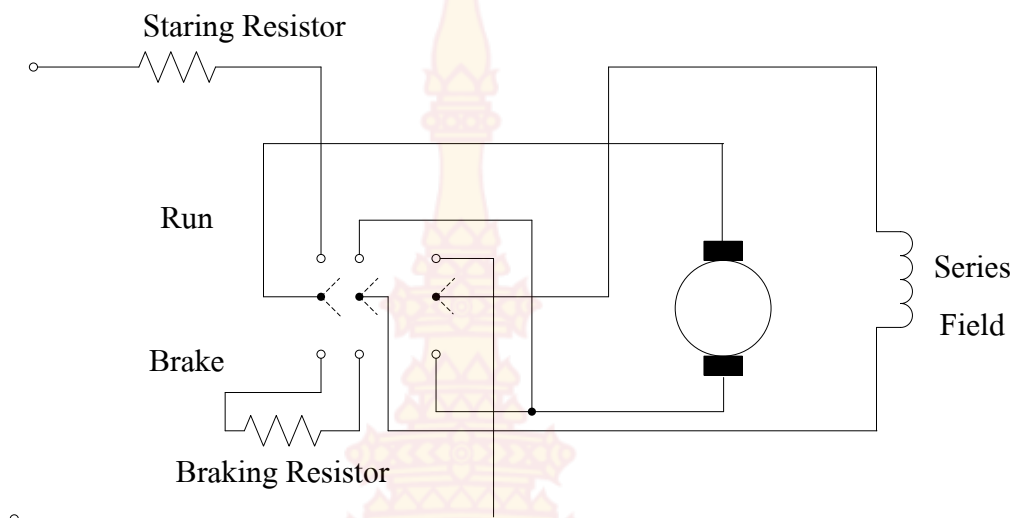
รูปที่ 2-17 การเบรกมอเตอร์ชานด้วยวิธีไดนามิก

$$I_{br} = E_C / (R_A + R_{br}) \quad 2.31$$

ขณะที่ความเร็วมอเตอร์ลดลง แรงดันเหนี่ยวนำกลับของมอเตอร์ซึ่งได้เปลี่ยนสภาพเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไปเรียบบ่อยแล้วและลดลง และที่ความเร็วต่ำๆจะทำให้กระแสเบรกไหลผ่านความต้านทานเพียงเล็กน้อย เบรกทอร์คจะลดลงไปตามสัดส่วนเช่นเดียวกัน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องติดตั้งเบรกทางกล เพื่อตั้งอาร์เมเจอร์ให้หยุดนิ่ง รูปที่ 2-18 แสดงให้เห็นถึงวงจรการเบรกมอเตอร์ชานด้วยวิธี “ไดนามิก”

ในกรณีของมอเตอร์อนุกรมจะมีวิธีการเบรกมอเตอร์ไฟฟ้าด้วย 2 วิธี ดังนี้ 1) อาจจะทำให้ขดลวดสนามแม่เหล็กชุดอนุกรมต่อกับระบบไฟ เป็นอนุกรมกับตัวต้านทานที่ควบคุมกระแสให้อยู่ในพิสัยที่ต้องการ วิธีนี้เป็นการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าไปในตัวต้านทานโดยไม่จำเป็น ส่วนวิธีที่ 2) อาจจะต้องวงจรในลักษณะที่ให้กระแสอาร์เมเจอร์ไหลผ่านขดลวดสนามแม่เหล็กชุดอนุกรม ในทิศทางเดียวกันกับกระแสอาร์เมเจอร์ ขณะที่หมุนเป็นมอเตอร์ และขณะนี้ถึงแม้ว่าความต้านทานของขดลวดอนุกรม จะเป็นส่วนหนึ่งของความต้านทานในวงจรเบรกไปแล้วก็ตาม ขดลวดอนุกรมนี้ยังคงให้กำเนิดเส้นแรงแม่เหล็กในสนามแม่เหล็กอยู่ตามปกติ การเบรกมอเตอร์อนุกรมด้วยวิธี “Dynamic braking” แสดงให้เห็นในวงจรตามรูปที่ 2-18 กระแสอาร์เมเจอร์ขณะเบรกอาจหาได้ตามสมการที่ 2.32

$$I_{br} = E_C / (R_A + R_D + R_{br}) \quad 2.32$$



รูปที่ 2-18 การเบรกมอเตอร์อนุกรมด้วยวิธีการไดนามิก

2.3.3 รีเจนเนอเรทีฟ คล้ายกับวิธีการของไดนามิก เพียงแต่พลังงานจลน์ทั้งหมดของมอเตอร์ขณะเบรกแทนที่จะใช้ไปเพื่อการสูญเสียเนื่องจาก Braking resistor เพียงอย่างเดียวดังเช่น Dynamic braking กลับนำไปใช้ป้อนย้อนกลับคืนให้แก่ระบบไฟของมอเตอร์ ด้วยการเพิ่มเส้นแรงแม่เหล็กในสนามแม่เหล็กของมอเตอร์ให้สูงขึ้น หรือปรับให้มอเตอร์หมุนเร็วขึ้นกว่าเดิม เพื่อมอเตอร์จะได้ให้กำเนิดแรงดันเหนี่ยวนำกลับให้สูงกว่าแรงดันหลักของมอเตอร์ ดังนั้นระบบนี้จึงไม่จำเป็นต้องมี Braking resistor

วิธีการเบรกแบบรีเจนเนอเรทีฟนี้ ใช้สำหรับจำกัดความเร็วของมอเตอร์มากกว่าที่จะหยุดมอเตอร์ จึงนิยมใช้ในมอเตอร์หมุนขับเคลื่อนเครื่องจักรในสถานที่ลาดชันหรือที่สูงๆ ในระยะทางไกลๆ หรือสูงๆ และกระแสมอเตอร์ขณะเบรกหาได้จากสมการที่ 2.33

$$I_{br} = (E_{C2} - E_{C1}) / R_A \quad 2.33$$

เมื่อ E_{C1} = แรงดันเหนี่ยวนำกลับของมอเตอร์ก่อนที่จะเบรกด้วยการเพิ่มเส้นแรงแม่เหล็กในสนามแม่เหล็ก

E_{C2} = แรงดันเหนี่ยวนำกลับของมอเตอร์หลังจากเบรกด้วย

“Regenerative Braking” โดยการเพิ่มเส้นแรงแม่เหล็กในสนามแม่เหล็กให้สูงขึ้นเรียบร้อยแล้ว

2.4 อุปกรณ์ตรวจจับระยะทาง

สำหรับในหัวข้อนี้จะนำเสนออุปกรณ์ตรวจจับระยะทาง ซึ่งในงานวิจัยเล่มนี้จะมีอุปกรณ์ตรวจจับระยะทางอยู่ 2 ประเภทด้วยกันคือ 1) อุปกรณ์ตรวจจับระยะทางแบบเชิงเส้น 2) อุปกรณ์ตรวจจับระยะทางแบบเชิงมุม ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจจับระยะทางแบบเชิงเส้นนี้จะใช้ในการตรวจวัดระยะทางของสิ่งกีดขวางซึ่งจะเป็นการใช้อุปกรณ์การวัดแบบเส้นตรง ส่วนอุปกรณ์การวัดที่ใช้ในการวัดระยะทางแบบเชิงมุมนี้จะใช้สำหรับในการตรวจวัดความเร็วรอบของมอเตอร์ที่จะมีความสัมพันธ์กันกับการควบคุมความเร็วและการเคลื่อนที่ของรถที่ขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้าอีกด้วย

2.4.1 อุปกรณ์ตรวจวัดระยะทางแบบเชิงเส้น

ระยะทางแบบเชิงเส้น หมายถึง การเคลื่อนที่ของวัตถุจากตำแหน่งอ้างอิงไปยังจุดที่กำหนดไว้หรือจุดที่ต้องการในลักษณะแบบเส้นตรง ซึ่งระยะทางที่วัตถุเคลื่อนที่ได้ นั้น จะให้เป็นตัวแปรระยะทาง (Distance : d) โดยที่ระยะทางที่วัตถุเคลื่อนที่ได้ นั้นยังมีความสัมพันธ์ต่อความเร็ว (Velocity : v) และความเร่ง (Acceleration : a) อีกด้วย โดยความเร็วเป็นค่าที่วัตถุใช้ในการเคลื่อนที่จากจุดเริ่มต้นไปยังจุดอ้างอิง ซึ่งมีหน่วยเป็น เมตรต่อวินาที (m/s) ส่วนความเร่งเป็นค่าความเร็วที่วัตถุใช้ในการเคลื่อนที่ไปใน 1 วินาที ซึ่งความเร่งนี้จะมีหน่วยเป็น เมตรต่อวินาที² (m/s²)

สำหรับอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัดระยะทางการเคลื่อนที่แบบเชิงเส้นนั้นจะมีอุปกรณ์เช่น ดีทีไอ (DTI), โปเทนทีอมิเตอร์ (Potentiometer), แอลวีดีที (LVDT) และอุปกรณ์แสงอัลตราโซนิก (Ultrasonic laser) เป็นต้น

2.4.2 อุปกรณ์ตรวจวัดระยะทางแบบเชิงมุม

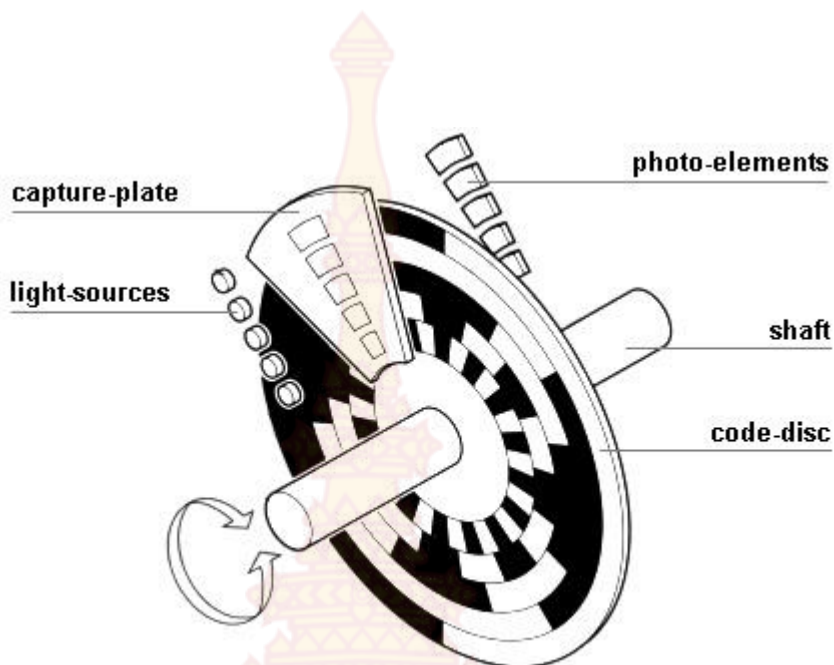
ระยะทางแบบเชิงมุม หมายถึง การเคลื่อนที่ของวัตถุที่เป็นการเคลื่อนที่แบบหมุนรอบตัวเอง ยกตัวอย่างเช่น ล้อรถ ที่จะเป็นการหมุนรอบแกนของเพลลา ซึ่งจะทำให้มีการเคลื่อนที่แบบเป็นวงกลมเกิดขึ้นของล้อรถ ซึ่งระยะทางที่ได้จากการเคลื่อนที่แบบเชิงมุม (θ) คือระยะการหมุนครบ 1 รอบหรือความยาวของเส้นรอบวงของล้อนั้นเอง (มีค่าเท่ากับ $\theta = 2\pi \times r$) โดยที่ระยะทางเชิงมุมมีหน่วยเป็น เรเดียน (Rad) ส่วนความเร็วของการหมุนเชิงมุมนั้นคือค่า ความเร็วเชิงมุม (ω) ที่เป็นการใช้เวลาในการหมุนครบ 1 รอบ มีหน่วยเป็นเรเดียนต่อวินาที (Rad/s) และสำหรับค่าความเร่งเชิงมุม (α) นั้นเป็นค่าความเร็วของการหมุนที่ใช้เวลาในการหมุนในช่วงเวลา 1 วินาที มีหน่วยเป็น เรเดียนต่อวินาที² (rad/s²)

สำหรับอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัดระยะทางการเคลื่อนที่แบบเชิงมุมนั้นจะมีอุปกรณ์เช่น โปเทนทีอมิเตอร์แบบโรตารี, ออปติคอลลอนโค๊ดเดอร์, ทักโคมิเตอร์, พรอกซิมิตี้ หรือออปติคอลลเซ็นเซอร์ เป็นต้น

2.4.3 อุปกรณ์ตรวจจับความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้า

1. เ็นโค้ดเดอร์ (Encoder)

เ็นโค้ดเดอร์เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณเชิงกลในรูปแบบของการหมุนหรือการกระจัดมาเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า โดยใช้หลักการทางแสง (Optical) เข้ามาช่วย การใช้งานส่วนใหญ่จะถูกนำมาใช้เป็นอุปกรณ์นับรอบการหมุนของมอเตอร์หรืออุปกรณ์วัดองศาการหมุนของมอเตอร์ก็ได้ สัญญาณทางเอาต์พุตของเ็นโค้ดเดอร์มีทั้งแบบที่เป็นสัญญาณดิจิตอลและแบบที่เป็นสัญญาณอนาล็อก แต่ที่นิยมใช้งานส่วนใหญ่จะเป็นแบบดิจิตอล



รูปที่ 2-19 พื้นฐานของเอนโค้ดเดอร์

จากรูปจะเห็นว่าส่วนประกอบที่สำคัญของเอนโค้ดเดอร์ประกอบด้วย ตัวส่งแสง ตัวรับแสง และ จานรหัส โดยส่วนที่เป็นตัวส่งและตัวรับแสงจะติดตั้งคนละด้านโดยมีจานรหัสเป็นตัวคั่นกลาง จานรหัสจะยึดกับมอเตอร์ที่เราต้องการวัดรอบ ลักษณะของจานรหัสจะมีส่วนที่เป็นช่องที่แสงผ่านได้และส่วนที่ทึบแสง เมื่อมอเตอร์หมุนจะทำให้จานรหัสหมุนตามไปด้วย ถ้าจานรหัสหมุนส่วนทึบแสงจะไปกั้นลำแสงทำให้เอาท์พุทที่ส่วนรับแสงเป็นลอจิก 0 แต่ถ้าจานรหัสหมุนส่วนที่แสงผ่านได้ตรงกับลำแสง ทำให้ตัวรับสามารถรับแสงได้ เอาท์พุทที่ตัวรับแสงจะเป็นลอจิก 1 สลับกันเป็นเช่นนี้จนครบรอบ เอนโค้ดเดอร์ขนาด 1 บิต มีรหัสเพียงหลักเดียวในการใช้งานจริง ตัวรับและตัวส่งแสงอาจมีมากกว่า 1 บิต เพื่อให้สามารถระบุตำแหน่งของงานได้ละเอียดขึ้น และตัวจานรหัสเองก็จะมีหลายชั้นขึ้นขึ้นสอดคล้องกับจำนวนบิต รหัสที่ได้ออกมาจะมีหลายรูปแบบแล้วแต่การออกแบบ โดยทั่วไปรหัสที่ใช้ได้แก่ Binary code, BCD code เป็นต้น

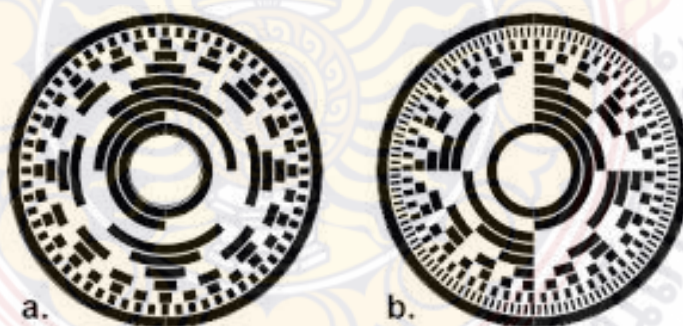


Figure 1.3: Rotating an 8-bit absolute Gray code disk.
 a. Counterclockwise rotation by one position increment will cause only one bit to change.
 b. The same rotation of a binary-coded disk will cause all bits to change in the particular case (255 to 0) illustrated by the reference line at 12 o'clock.
 [Everett, 1995].

รูปที่ 2-20 รูปแบบงาน BCD code ทั้งสองแบบ

2. โรตารีเอนโค้ดเดอร์แบบแม่เหล็ก (Magnetic Type Rotary Encoder)

จะอาศัยหลักการของฮอลล์เซนเซอร์ (Hall Sensor) และทรงกลมหมุนที่เป็นแม่เหล็ก, ทรงกลมหมุนที่เป็นแม่เหล็กนี้ จะมีแม่เหล็กเล็ก ๆ วางอยู่ในตำแหน่งถาวร, ฮอลล์เซนเซอร์ จะถูกติดตั้งกับทรงกลมหมุน ในขณะที่ทรงกลมหมุนสนามแม่เหล็กจากขั้วเหนือจะวิ่งไปสู่ขั้วใต้จะผ่านฮอลล์เซนเซอร์ ทำให้ความต้านทานของฮอลล์เซนเซอร์นี้เปลี่ยนแปลงไปและการเปลี่ยนแปลงที่ถูกตรวจจับได้นี้ จะเป็นสัญญาณให้รู้ว่าขณะนี้ทรงกลมกำลังหมุน ดังนั้น บางเวลาระบบอาจจะถูกออกแบบให้สัญญาณเฟสเป็นตัวบอกทิศทางการหมุนด้วย

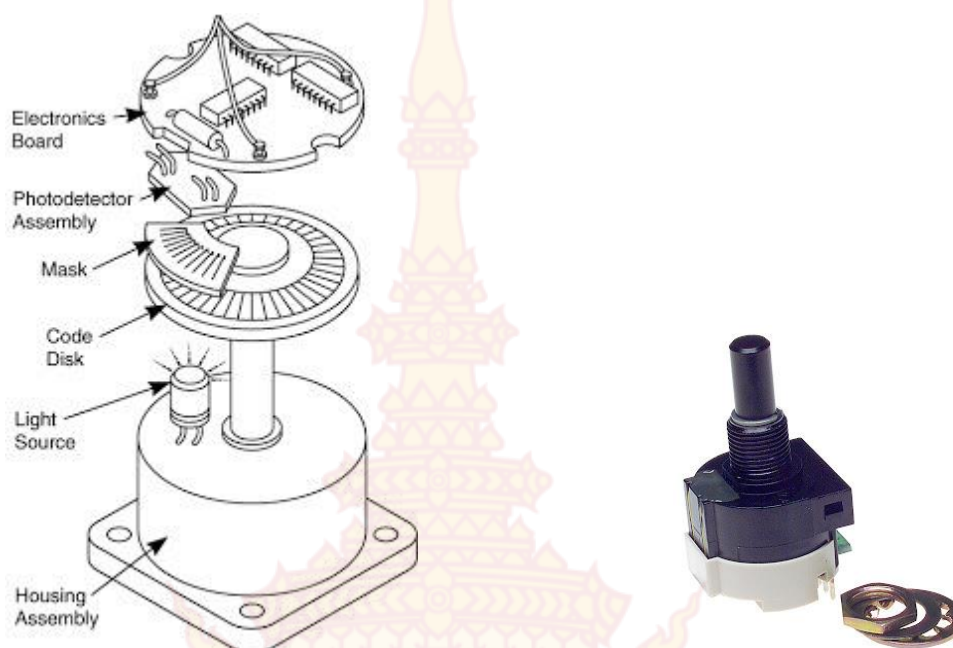


รูปที่ 2-21 โรตารีเอนโค้ดเดอร์แบบแม่เหล็ก

จากรูปที่ 2-21 จะเป็นโรตารีเอนโค้ดเดอร์แบบแม่เหล็ก ที่อาศัยหลักการของฮอลล์เซนเซอร์ (Hall Sensor) มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ดังนั้นจึงต้องการวางจรรยาบรรณสัญญาณ หรือวงจรบริดจ์เข้ามาช่วยด้วย ข้อได้เปรียบของ Encoder ชนิดนี้คือจะมีความทนทานต่อการสั่นสะเทือนทางกล รวมทั้งมีการปฏิบัติงานที่ดีในความเร็วสูง ดังนั้นมันจึงเหมาะสมที่จะใช้ในวงจรควบคุมเซอร์โวมอเตอร์ (Servo motor) *สำหรับการใช้งาน* จะใช้ในการตรวจจับความเร็วใน AC/DC Servo Motor, วัดความเร็วรอบ (RPM) ของมอเตอร์

3. โรตารีเอนโค้ดเดอร์แบบออปติคัล (Optical Type Rotary Encoder)

ออปติคัลโรตารีเอนโค้ดเดอร์ (Optical Rotary Encoder) จะไม่มีผลตอบสนองต่ออุณหภูมิและการสั่นสะเทือนทางกลมากนัก แผ่นดิสก์นี้จะมีน้ำหนักรวมและมันสามารถที่จะหมุนและหยุดหมุนได้โดยไม่มีการหน่วงจึงทำให้ค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้นในข้อมูลจะน้อยมาก ดังนั้นมันจึงง่ายมากที่จะขับแผ่นดิสก์ให้หมุน ส่วนหลักการทำงานและรูปตัวอย่างของโรตารีเอนโค้ดเดอร์แบบออปติคัลแสดงไว้ในรูปที่ 2-22 *สำหรับการใช้งาน* ตรวจจับความเร็วและตำแหน่งของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเล็ก ๆ และเครื่องจักรกลหมุนต่าง ๆ

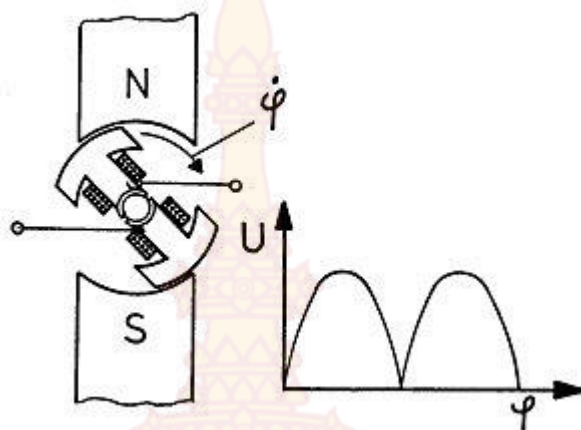


รูปที่ 2-22 ออปติคัลโรตารีเอ็นโค้ดเดอร์

4. ทักโคเจนเนอเรเตอร์ (Tacho Generator)

ทักโคเจนเนอเรเตอร์ เป็นอุปกรณ์เชิงกลที่เปลี่ยนการหมุนเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าอีกชนิดหนึ่งที่มีนิยมนำใช้งาน เป็นอุปกรณ์เซนเซอร์แบบแอคทีฟ คือใช้หลักการของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในการทำงาน มีทั้งแบบที่ให้สัญญาณเอาต์พุตเป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงและแบบที่เป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ

หลักการกำเนิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีอุปกรณ์สำคัญ 2 ตัวคือ ขดลวด และแม่เหล็กถาวร ถ้าขดลวดหมุนในสนามแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวรครบ 1 รอบ จะได้สัญญาณไฟฟ้ารูปคลื่นไซน์ที่สมบูรณ์ 1 ลูก โดยความแรงของสัญญาณขึ้นอยู่กับความเร็วในการหมุนของขดลวด ยิ่งหมุนเร็วสัญญาณที่ออกมาก็จะมี ความแรงมาก ถ้าเราต่อแกนของมอเตอร์ที่เราต้องการวัดรอบเข้ากับขดลวด ก็จะได้สัญญาณที่ทักโคเจนเนอเรเตอร์เปลี่ยนแปลงตามความเร็วของการหมุนของมอเตอร์ตัวนั้นได้ ส่วนทักโคเจนเนอเรเตอร์แบบไฟฟ้ากระแสตรง ก็มีโครงสร้างพื้นฐานเหมือนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2-23 สามารถทดลอง โดยนำมอเตอร์ในรถของเล่นมาปั่น LED ให้ติดสว่างได้ โดยความแรงของสัญญาณจะเปลี่ยนแปลงตามความเร็วของการหมุนเช่นเดียวกับทักโคเจนเนอเรเตอร์แบบกระแสสลับ



รูปที่ 2-23 หลักการของออปติคัลโรตารีเอ็นโค้ดเดอร์



รูปที่ 2-24 อุปกรณ์ของออปติคัลโรตารีเอ็นโค้ดเดอร์

5. อุปกรณ์อัลตราโซนิก (Ultrasonic)

อัลตราโซนิกเซ็นเซอร์ เป็นอุปกรณ์ที่ใช้หลักการพื้นฐานของการแผ่กระจายคลื่นความถี่สูงที่อยู่ในช่วงระหว่าง 20 kHz ถึง 1 GHz ออกไปกระทบกับวัตถุที่อยู่ภายในบริเวณของสนามคลื่นความถี่และสามารถสะท้อนกลับมายังตัวรับสัญญาณที่อยู่ ณ ตำแหน่งเดียวกันกับตัวส่งสัญญาณ ซึ่งสัญญาณเอ้าท์พุทที่ส่งไปและรับอินพุทเข้ามานั้นสามารถที่จะเป็นได้ทั้งสัญญาณอนาล็อกและสัญญาณดิจิทัลขึ้นอยู่กับการใช้งาน สำหรับคลื่นอัลตราโซนิกนี้สามารถที่จะนำไปใช้สะท้อนได้ทั้งในอากาศและในของเหลวได้เช่นเดียวกัน [4]

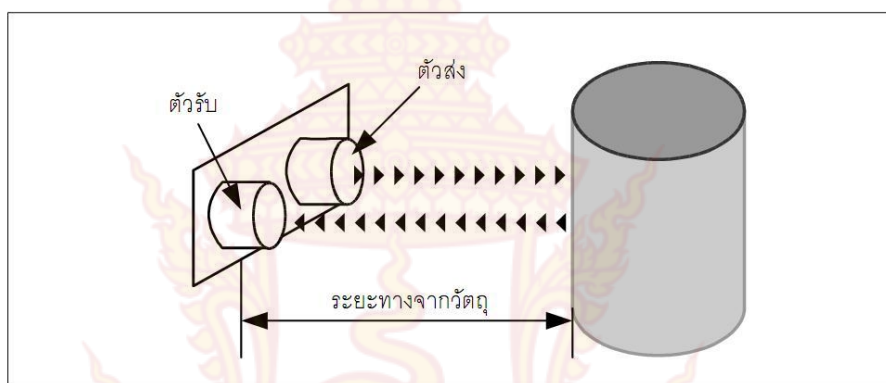
โครงสร้างของอัลตราโซนิกเซ็นเซอร์ ประกอบด้วย

1. อุปกรณ์รับ-ส่งสัญญาณ ในส่วนนี้จะทำหน้าที่ในการปล่อยสัญญาณออกมาเพื่อสะท้อนกับวัสดุที่ต้องการและยังมีตัวรับสัญญาณที่คลื่นได้วิ่งกลับมาอีกด้วยแล้วจึงนำไปใช้ในการประมวลผลต่อไป
2. วงจรเปรียบเทียบและแยกแยะความถี่ ทำหน้าที่เปรียบเทียบและแยกแยะระหว่างคลื่นความถี่ที่ส่งออกไปกับคลื่นความถี่ที่ได้ทำการสะท้อนกลับมาและคำนวณหาระยะทางที่ห่างจากวัสดุ ในรูปของความเร็วที่เป็นการเดินทางของคลื่นสัญญาณให้อยู่ในรูปของเวลา

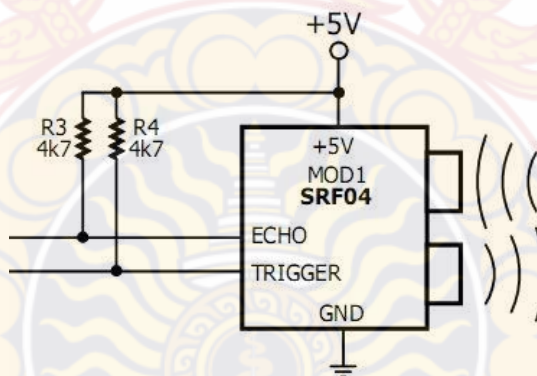
3. อุปกรณ์จัดระดับของสัญญาณทางด้านเอาต์พุต ทำหน้าที่เป็นตัวกำเนิดสัญญาณไฟฟ้าที่แปลงมาจากคลื่นความถี่ โดยผ่านอุปกรณ์เชื่อมต่อทั้งในรูปแบบของสัญญาณอนาล็อกและสัญญาณดิจิทัล ในส่วนของสัญญาณรูปดิจิทัลจะมีการแสดงสถานะแค่สองระดับคือ 0 กับ 1 ส่วนสัญญาณรูปอนาล็อกจะมีการแสดงค่าออกมาในรูปแบบของสัดส่วนตามระยะทางของคลื่นความถี่ที่ได้ทำการส่งออกไป

4. ความถี่ที่ใช้งาน โดยทั่วไปช่วงความถี่ใช้งานของอัลตราโซนิก ในทางอุตสาหกรรมจะอยู่ระหว่าง 25 kHz ถึง 500 kHz ในทางการแพทย์จะอยู่ในช่วงตั้งแต่ 5 MHz หรืออาจจะมากกว่านั้น อย่างไรก็ตามความถี่ที่ใช้สำหรับการตรวจวัดจะเป็นสัดส่วนผกผันกับระยะห่างของวัสดุ

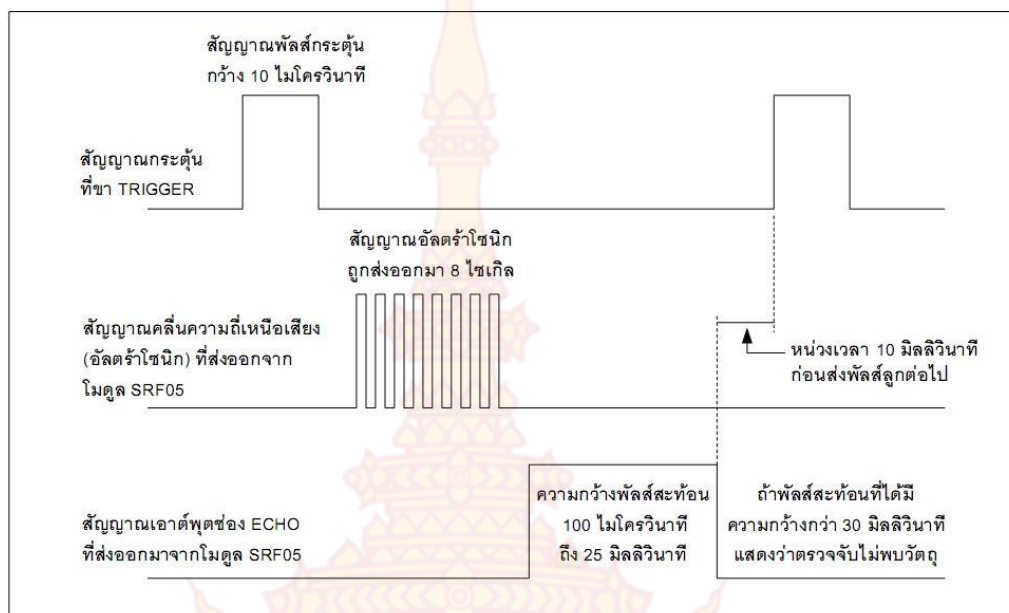
สำหรับหลักการทำงานของอัลตราโซนิก สามารถแสดงให้เห็นได้ชัดเจนยิ่งขึ้นในรูปที่ 2-25 ถึงรูปที่ 2-27



รูปที่ 2-25 หลักการการสะท้อนของคลื่นอัลตราโซนิกที่ไปกระทบของแข็ง



รูปที่ 2-26 วงจรของอุปกรณ์อัลตราโซนิกที่มีการปล่อยและรับคลื่นพร้อมกัน



รูปที่ 2-27 แสดงรูปสัญญาณของการรับ-ส่งคลื่นในรูปของเวลา

ในการแผ่กระจายคลื่นความถี่สูงของอัลตราโซนิกนี้มีความสัมพันธ์กับค่าความเร็วที่คงที่ตลอดช่วงเวลาในการสะท้อนกลับของคลื่นความถี่ที่กระทบกับวัสดุ และจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับระยะห่างของวัสดุ ด้วยเหตุนี้อัลตราโซนิกจึงเป็นอุปกรณ์ที่ประยุกต์ใช้ความถี่สำหรับตรวจวัดระยะห่างของวัสดุได้ดี

อัลตราโซนิกเซ็นเซอร์ สามารถใช้ตรวจจับชนิดของวัสดุได้อย่างหลากหลายทั้งชนิดที่เป็นโลหะหรือที่ไม่ใช่โลหะ วัสดุโปร่งแสงหรือทึบแสง ของเหลวหรือของแข็ง หรือวัสดุที่มีขนาดเล็กๆ ที่มีพื้นที่เพียงพอต่อการสะท้อนกลับของคลื่นได้

ข้อดีของอัลตราโซนิกเซ็นเซอร์

1. สามารถใช้กับวัสดุได้หลากหลาย ตั้งแต่ขนาดเล็กจนถึงขนาดใหญ่ได้
2. ผลตอบสนองของอุปกรณ์อัลตราโซนิก ไม่ขึ้นอยู่กับสีของพื้นผิววัสดุหรือคุณสมบัติในการสะท้อนแสงของวัสดุ
3. อัลตราโซนิกที่ให้สัญญาณเอาต์พุตในรูปแบบดิจิตอลจะมีความแม่นยำมากกว่าสัญญาณเอาต์พุตในรูปแบบอนาล็อก ซึ่งจะมีความแม่นยำที่ต่ำมากสำหรับการตรวจวัดแบบซ้ำๆ ค่าเดิม เพราะมีความสม่ำเสมอ
4. ส่วนสัญญาณเอาต์พุตในรูปแบบของสัญญาณอนาล็อกจะมีผลตอบสนองแบบที่เป็นเชิงเส้นมากกว่า เนื่องจากจะมีค่าแปรผันตามระยะทางของการตรวจวัด จึงนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย

ข้อด้อยของอัลตราโซนิกเซ็นเซอร์

1. การนำไปใช้งานมีความจำเป็นจะต้องคำนึงถึงสภาพพื้นผิวที่มีความราบเรียบพอสมควร เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานให้กับตัวอุปกรณ์ เพราะฉะนั้น ถ้าการนำไปใช้งานที่มีสภาพพื้นผิวที่ขรุขระจึงจะส่งผลกระทบต่อความถูกต้องนั้นลดน้อยลงไปด้วย
2. อาจจะทำให้เกิดสัญญาณรบกวนของคลื่นสัญญาณอื่นที่อยู่บริเวณรอบข้างได้ ซึ่งจะส่งผลให้การทำงานเกิดการผิดพลาดได้เช่นกัน

3. ต้องใช้เวลาในการรับ-ส่งคลื่นความถี่ของการตรวจวัดในแต่ละครั้ง ซึ่งอุปกรณ์จะไม่สามารถทำงานในรอบใหม่ได้ ถ้ากระบวนการรับ-ส่งคลื่นนั้นยังไม่สมบูรณ์

4. การเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมอาจจะส่งผลต่อการทำงานของอุปกรณ์ได้เช่น ความชื้น อุณหภูมิ ความดัน และสิ่งทีก่อให้เกิดการทำงานผิดพลาดอื่นๆ

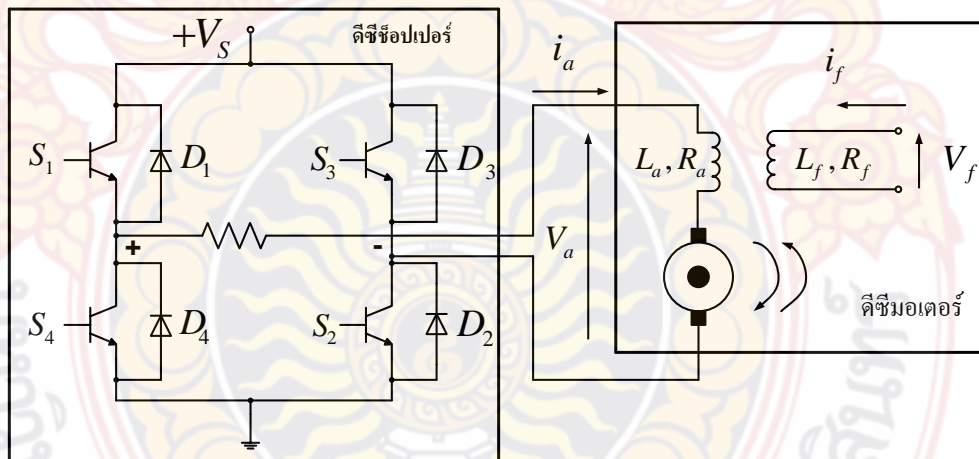


บทที่ 3 การออกแบบงานวิจัย

ในบทนี้จะนำเสนอการนำทฤษฎีที่เกี่ยวข้องมาใช้ในการออกแบบวงจรควบคุมความเร็วของรถที่ขับเคลื่อนด้วยระบบไฟฟ้า ซึ่งจะมีความสัมพันธ์ของความเร็วแปรผันกับตัวตรวจจับความระยะทางด้วยอุปกรณ์อุลตราโซนิก และจะเป็นการจำลองการทำงานของงานวิจัยนี้ด้วยโปรแกรมจำลองการทำงาน เป็นต้น

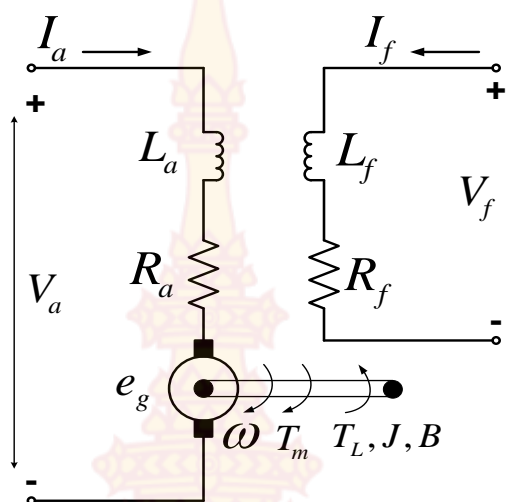
3.1 วงจรที่ใช้ในการควบคุมมอเตอร์

ในงานวิจัยนี้จะมีการนำทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC Motor) โดยผ่านวงจรดีซีช็อบเปอร์ ที่จะมีอุปกรณ์สวิตช์ $S_1 - S_4$ ที่คอยควบคุมการเปิดและปิดโดยการป้อนสัญญาณที่ดับบลิวเอ็ม ที่สามารถปรับเปลี่ยนค่าดิวิตีไซเคิลได้ในช่วงระหว่าง 0%-100% ซึ่งค่าดิวิตีไซเคิลนี้จะมีผลต่อความเร็วรอบของมอเตอร์ ถ้าค่าดิวิตีไซเคิลมีค่าเปอร์เซ็นต์มากยิ่งทำให้ค่าความเร็วรอบมากขึ้นตามไปด้วย ตามความสัมพันธ์ของกราฟในรูปที่ 1-3 (ในบทที่ 1) ซึ่งการทำงานของวงจรควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงนั้นสามารถนำสัญญาณควบคุมในรูปที่ 3-3 มาใช้กับการทำงานในรูปที่ 3-1 และรูปที่ 3-2 ได้ตามลำดับ



รูปที่ 3-1 วงจรควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและวงจรดีซีช็อบเปอร์

สำหรับวงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบแยกส่วนการกระตุ้นดังแสดงในรูปที่ 3-2 ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่าจะมีกระแสฟิลด์ (i_f) ไหลอยู่ในส่วนทางด้านฟิลด์และมีกระแสอาร์เมเจอร์ (i_a) ไหลอยู่ทางด้านอาร์เมเจอร์ ดังนั้นแรงดันอาร์เมเจอร์ (V_a) จะมีผลต่อการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในวงจร นอกจากนี้มอเตอร์ไฟฟ้ายังมีการส่งกลับค่า EMF และแรงบิดที่จะส่งผลกระทบต่อความเร็วในโหลดอีกด้วย



รูปที่ 3-2 วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

จากรูปที่ 3-2 แรงดันเอาต์พุต (V_a) จะสามารถเปลี่ยนแปลงค่าได้โดยการปรับค่าตัวต้อไซเคิลได้ตั้งแต่ 0% – 100% ซึ่งค่าตัวต้อไซเคิลนี้จะเป็นตัวแปรที่ควบคุมแรงดันของเอาต์พุตให้สามารถมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงได้ โดยที่โหลดมอเตอร์ไฟฟ้านั้นยังคงมีพารามิเตอร์เท่าเดิม

$$V_a \propto D\%$$

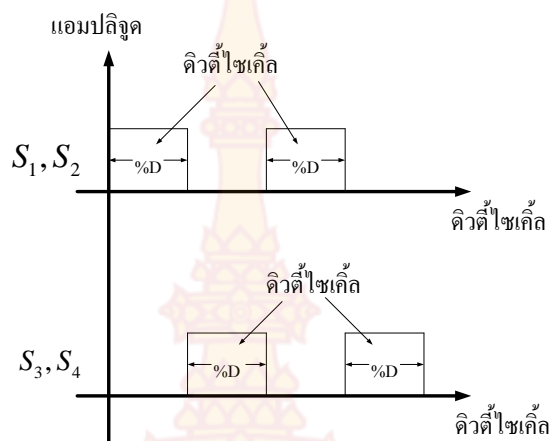
จากความสัมพันธ์ของแรงดันเอาต์พุตและค่าตัวต้อไซเคิลสามารถหาแรงดันเอาต์พุตได้จาก

$$V_a = \sqrt{D}V_s \quad 3.1$$

ซึ่งค่า V_s เป็นแรงดันที่แรงจ่ายได้จ่ายให้กับวงจรตีซีซิปเปอร์และนอกจากนี้ค่ากระแส I_a จะมีความสอดคล้องตามสมการเป็น

$$I_a = \frac{V_a}{Z_{load}} \quad 3.2$$

ซึ่งค่ากระแส (I_a) เป็นกระแสที่ขดลวดอาร์เมเจอร์ที่จะมีผลต่อความเร็วรอบการหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้า



รูปที่ 3-3 การควบคุมการทำงานของวงจรถิซซึซ้อปเปอร์ด้วยค่าดิวตี้ไซเคิล

3.2 วงจรมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

แรงดันอาร์เมเจอร์สามารถเขียนในรูปของสมการได้เป็น

$$v_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + e_g \quad 3.3$$

โดยที่กำหนดให้ R_a, L_a แทนความต้านทานอาร์เมเจอร์และความเหนี่ยวนำอาร์เมเจอร์ตามลำดับ ส่วนค่าแรงดันย้อนกลับ EMF (e_g) ของมอเตอร์ ที่จะแทนในรูปแรงดันของความเร็ว สามารถเขียนได้เป็น

$$e_g = K_v \omega i_f \quad 3.4$$

เมื่อ K_v แทนค่าคงที่ของแรงดันและ ω แทนความเร็วของมอเตอร์ ซึ่งจะทำให้สามารถหาค่ากระแสอาร์เมเจอร์ (i_a) ได้เป็น

$$i_a = \frac{V_{RL}}{R_a + sL_a} \quad 3.5$$

เมื่อ V_{RL} คือ แรงดันตกคร่อมตัวต้านทานอาร์เมเจอร์และตัวเหนี่ยวนำอาร์เมเจอร์ ตามลำดับเช่นเดียวกันนั้น ค่าแรงบิดที่ต้องการ (T_d) สามารถแสดงได้เป็น

$$T_d = K_v i_f i_a \quad 3.6$$

ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดที่ต้องการ (T_d) และแรงบิดที่โหลด (T_L) สามารถแสดงให้เห็นเป็น

$$T_d = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega + T_L \quad 3.7$$

ส่วนแรงบิดที่มอเตอร์ (T_m) สามารถอธิบายในรูปของสมการทางคณิตศาสตร์ได้เป็น

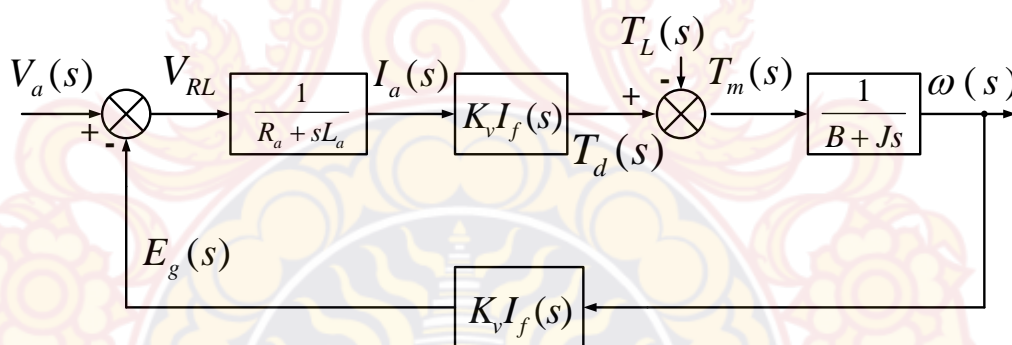
$$T_m = T_d - T_L \quad 3.8$$

ความเร็วมอเตอร์ (ω) จะถูกเปลี่ยนรูปโดยรูปแบบลาปลาซและจะถูกนำไปใช้แทนตำแหน่งของโรเตอร์ ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นได้ชัดเจนในรูปของทรานสเฟอร์ฟังก์ชันเป็น

$$\omega(s) = \frac{T_m}{Js + B} \quad 3.9$$

3.3 การออกแบบการควบคุมแบบลูปปิด

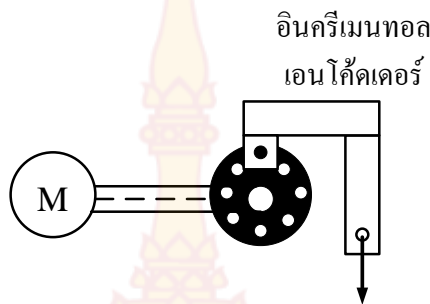
สำหรับการควบคุมของระบบที่ทำการออกแบบนี้จะสามารถเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 3-4



รูปที่ 3-4 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

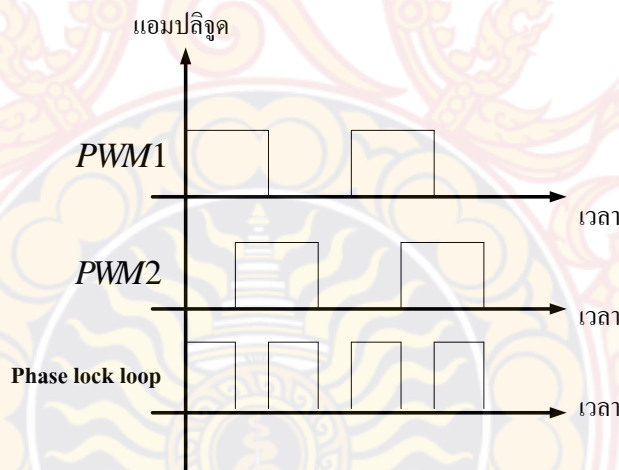
ความเร็วทางกลของมอเตอร์นั้นจะถูกวัดและทำการเปลี่ยนให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้าโดยอินครีเมนทอลเอ็นโค้ดเดอร์ ซึ่งมันจะใช้แทนตำแหน่งของโรเตอร์และแรงบิดทางสนามแม่เหล็กและพารามิเตอร์ต่างๆเหล่านั้นจะมีความสอดคล้องกับการควบคุมความเร็วในมอเตอร์

ในส่วนของตัวตรวจจับความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงนั้น จะทำการใช้เซ็นเซอร์คืออินครีเมนทอล เอนโค้ดเดอร์เป็นตัวตรวจจับความเร็วของมอเตอร์ตามที่แสดงในภาพที่ 3-5 ซึ่งอินครีเมนทอลเอ็นโค้ดเดอร์นั้นจะมีส่วนที่เป็นจานหมุนและถูกต่ออยู่กับเพลลาของมอเตอร์ไฟฟ้า โดยที่จานหมุนนั้นจะมีรูเล็กๆเจาะอยู่จำนวนหลายรู ซึ่งรูจำนวนมากนี้จะทำให้อินครีเมนทอลเอ็นโค้ดเดอร์นั้นแสดงค่าออกมาเป็นสัญญาณพัลส์ที่มีจำนวนมากซึ่งสัญญาณเหล่านี้จะแสดงค่าออกมาแทนความเร็วรอบการหมุนของมอเตอร์นั่นเอง ซึ่งจะนำสัญญาณที่ได้นี้ไปใช้แปลงค่าออกมาเป็นความเร็วรอบการหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้าอีกทอดหนึ่ง

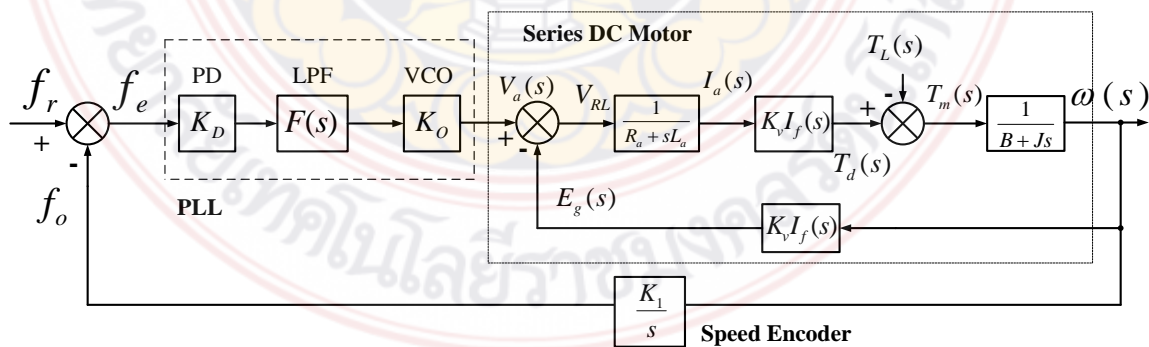


รูปที่ 3-5 อินกรีเมนทอล เอนโค้ดเดอร์

ส่วนสัญญาณที่ได้จากอินกรีเมนทอลเอนโค้ดเดอ์นั้นจะนำไปเข้าวงจรรหัสที่เป็นการแปลงสัญญาณเป็นในรูปของสัญญาณพัลส์บลิวเอ็มของความเร็วมอเตอร์ (PWM2) เพื่อที่จะนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณพัลส์บลิวเอ็มของความเร็วอ้างอิง (PWM1) ที่ได้ตั้งไว้ เพื่อที่จะได้เป็นสัญญาณควบคุมสำหรับนำไปใช้ในการควบคุมความเร็วมอเตอร์ในรูปที่ 3-2 โดยผ่านวงจรควบคุมดิซีซีอ็อปเปอร์ตามรูปที่ 3-1 ต่อไป ซึ่งจะสามารถปรับค่าดิวิตีไซเคิลได้จากชุดควบคุมหลัก โดยวงจรเฟสล็อคลูปที่แสดงในรูปที่ 3-6 นั้นวงจรชุดนี้จะช่วยให้การรักษาระดับความเร็วกับระยะห่างที่สัมพันธ์กันเป็นไปอย่างมีความแม่นยำ โดยจะนำสัญญาณพัลส์ที่ได้จากวงจรเฟสล็อคลูปไปเข้าสู่วงจรควบคุมหลักและจะทำการปรับค่าดิวิตีไซเคิลให้สอดคล้องกับความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้า ตามบล็อกไดอะแกรมของการควบคุมดังในรูปที่ 3-7



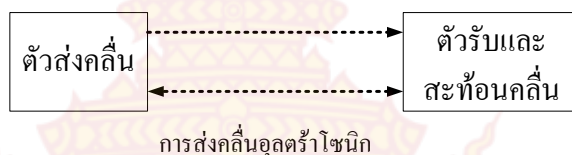
รูปที่ 3-6 การใช้วงจรเฟสล็อคลูปในการควบคุมความเร็วให้คงที่



รูปที่ 3-7 ไดอะแกรมของการควบคุมแบบลูปปิดโดยวงจรเฟสล็อคลูปและมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

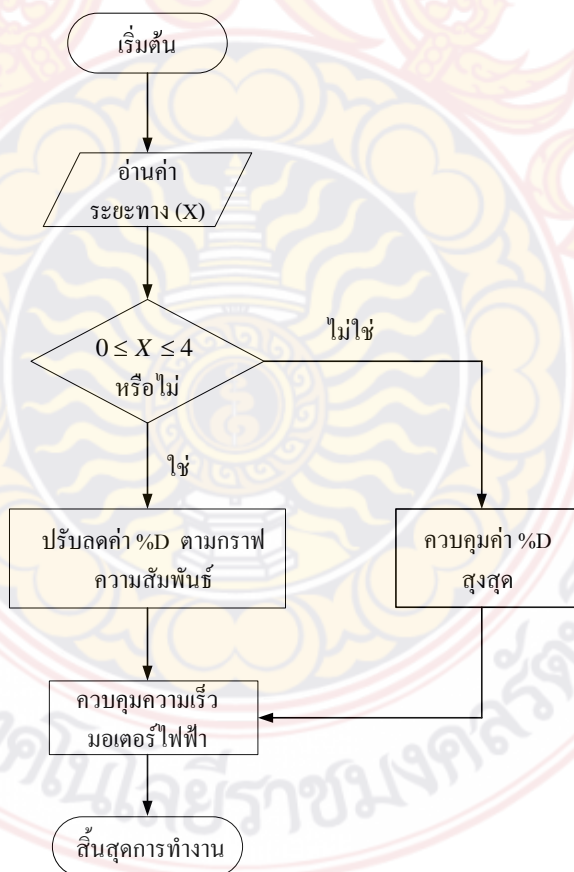
ในส่วนของหลักการทำงานของอุปกรณ์ตรวจจับระยะห่างนั้นจะใช้อุปกรณ์อัลตราโซนิกมาใช้ในการตรวจวัดระยะห่าง ซึ่งหลักการทำงานนั้นจะมีตัวส่งคลื่นอัลตราโซนิกไปยังสิ่งที่ต้องการจะวัดหรืออาจจะไปเจอกับสิ่งกีดขวางข้างหน้าก็จะทำการสะท้อนคลื่นสัญญาณอัลตราโซนิกกลับมาอย่างตัวส่งสัญญาณอีกครั้งหนึ่ง เป็นการเคลื่อนที่ไป-กลับของสัญญาณที่จะทราบถึงระยะเวลาในการเคลื่อนที่ของคลื่นอัลตราโซนิกทั้งหมด และจะนำเวลาที่ได้จากการเคลื่อนที่ไปและกลับทั้งหมดนี้ไปคูณกับค่าคงที่ของคลื่นอัลตราโซนิกที่จะทำให้ทราบถึงระยะทางทั้งหมดได้ตามสมการที่ 3.10

$$X = v_{ultra} \times t_{total} \quad 3.10$$

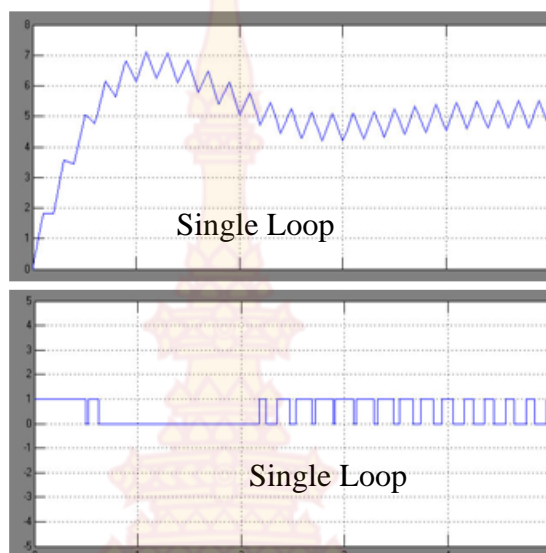


รูปที่ 3-8 การรับและส่งสัญญาณโดยอุปกรณ์อัลตราโซนิกเซ็นเซอร์

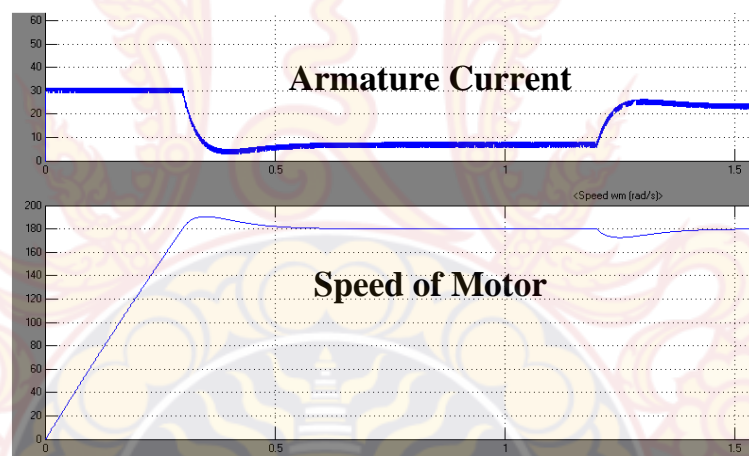
3.4 โฟลวชาร์ทการทำงานของระบบ



รูปที่ 3-9 โฟลวชาร์ทแสดงการตัดสินใจการทำงานของงานวิจัย



รูปที่ 3-12 ผลการจำลองการตอบสนองภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงความเร็ว



รูปที่ 3-13 ผลการจำลองค่ากระแสอาร์เมเจอร์และความเร็วของมอเตอร์ที่ใช้

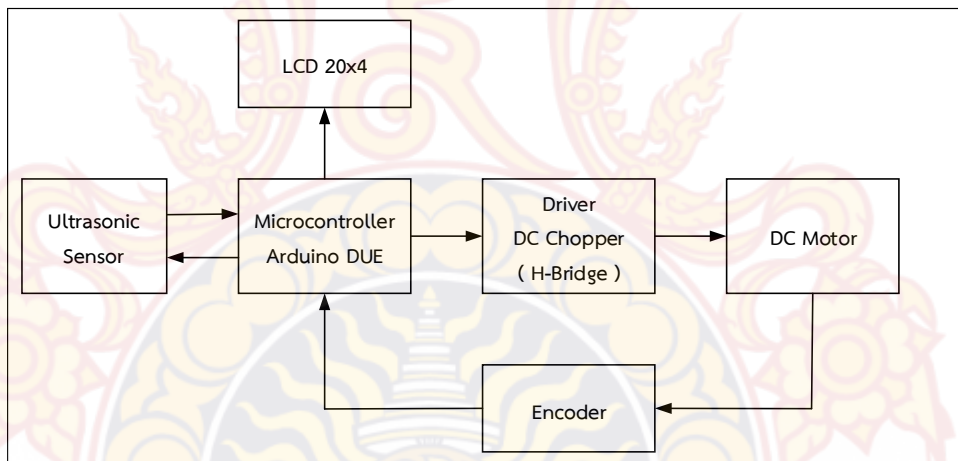
บทที่ 4

การทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

รถจำลองควบคุมความเร็วอัตโนมัติเป็นการศึกษาการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ในโครงการปริญญาโท ใช้การควบคุมมอเตอร์กระแสตรงและใช้อุปกรณ์เอ็นโค้ดเดอร์ในการวัดสัญญาณป้อนกลับของกระบวนการ โดยมีการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ ซึ่งการทดลองได้นำตัวควบคุมแบบ PI มาใช้ในการควบคุมและทดสอบค่าพารามิเตอร์ เพื่อให้ได้ความเร็วรอบที่ต้องการโดยแสดงผลตอบสนองของระบบด้วยซอฟต์แวร์โปรแกรม MATLAB

4.1 การออกแบบโครงสร้างทำงานของรถไฟฟ้าขับเคลื่อนอัตโนมัติ

4.1.1 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของรถไฟฟ้า



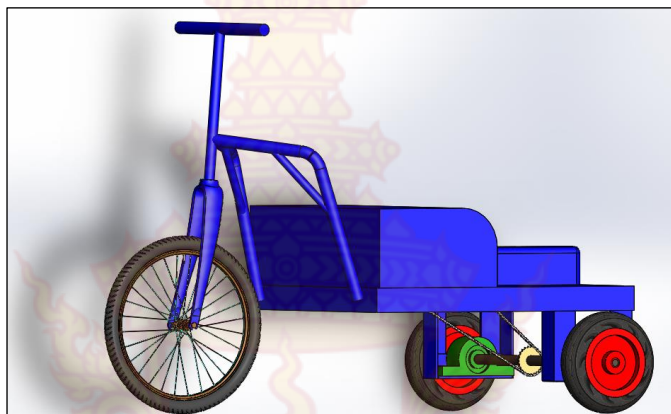
รูปที่ 4-1 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของรถไฟฟ้า

จากบล็อกไดอะแกรมจะเป็นการควบคุมความเร็วของรถที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าโดยการวัดระยะห่างจากเซ็นเซอร์อัลตราโซนิก โดยมีหลักการทำงานของ การควบคุมความเร็วของรถที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าโดยการวัดระยะห่างจากเซ็นเซอร์อัลตราโซนิก (Ultrasonic Sensor) จะได้รับสัญญาณ Trigger pulse จากไมโครคอนโทรลเลอร์และเซ็นเซอร์นั้นจะทำการส่งคลื่นสัญญาณที่มีค่าความถี่ 40KHz เข้าไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อคำนวณหาค่าระยะทางออกมาและแสดงผลทางจอ LCD จากนั้นไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำการสร้างสัญญาณ PWM เข้าสู่ภาค Driver DC Chopper (H-Bridge) เพื่อควบคุมความเร็วของมอเตอร์ โดยมี Encoder เป็นตัวป้อนกลับสัญญาณ PWM และส่งกลับเข้าไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่ออ่านค่าความเร็วรอบของ DC Motor

4.1.2 การออกแบบโครงสร้างของตัวรถ

ในการออกแบบรถขับเคลื่อนอัตโนมัติ มีส่วนประกอบในการทำงานทั้งหมด 3 ส่วนหลักๆ ด้วยกัน คือ

1. ส่วนของโครงสร้างรถขับเคลื่อนอัตโนมัติ
2. ส่วนของโปรแกรมในวงจรของรถขับเคลื่อนอัตโนมัติ
3. ส่วนประกอบด้านวงจรอื่นๆ ที่ใช้ในการควบคุมการทำงาน



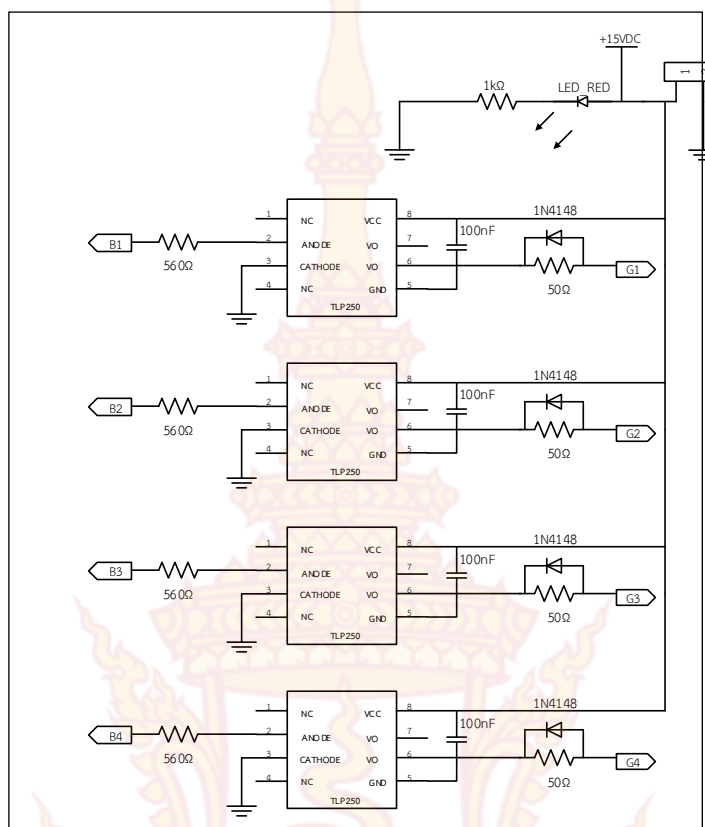
รูปที่ 4-2 การออกแบบโครงสร้างรถขับเคลื่อนอัตโนมัติ

4.1.3 การออกแบบวงจรภาคกำลังขับ

วงจรภาคกำลังขับ จะประกอบด้วยวงจรขับมอเตอร์ที่เป็นภาคขับสัญญาณจากไมโครคอนโทรลเลอร์ให้กับมอเตอร์ ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อระบบจริงและมีส่วนเกี่ยวข้องในการรับคำสั่งสัญญาณกลับและทำการควบคุมสัญญาณที่จ่ายให้กับระบบจริง

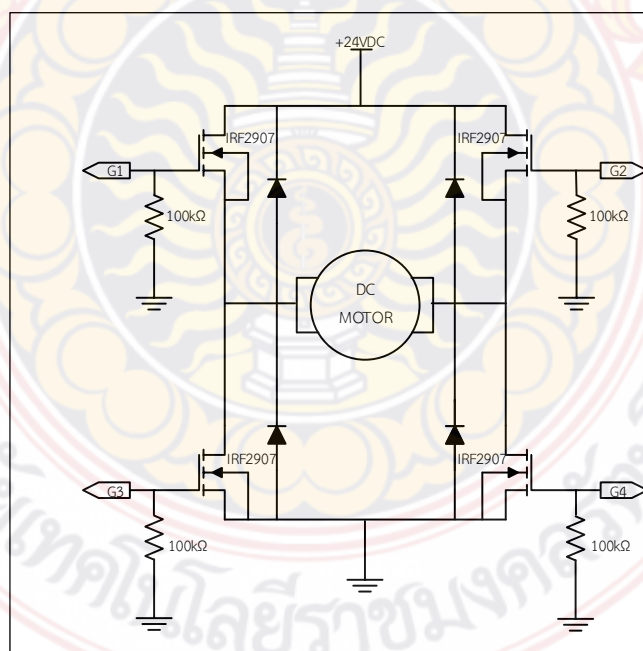
4.1.3.1 วงจรขับมอเตอร์

ในส่วนของวงจรขับมอเตอร์ใช้ Opto เบอร์ TLP250 ซึ่งมีการใช้ Opto เป็นตัวแยกกราวด์ระหว่างชุดคอนโทรลเลอร์กับส่วนขับมอเตอร์และใช้มอสเฟสเป็นตัวขับมอเตอร์ ซึ่งสามารถขับมอเตอร์ได้ตั้งแต่ 12V-48V ทนกระแสสูงสุด 80A



รูปที่ 4-3 วงจรส่วน Opto Driver

จากรูปที่ 4-3 ที่เป็นชุดขับมอเตอร์ จะรับสัญญาณจากชุดควบคุมมา 4 สัญญาณและผ่าน Opto เบอร์ TLP250 โดยภายใน Opto จะทำหน้าที่รับสัญญาณและส่งสัญญาณโดยใช้ความถี่ของแสงเพื่อส่งต่อไปยังชุดขับมอเตอร์แบบ H-Bridge ดังรูปที่ 4-4



รูปที่ 4-4 วงจรขับมอเตอร์แบบ H-Bridge

โดยสามารถควบคุมทิศทางในการหมุนของมอเตอร์ได้จากการจ่ายลอจิกและ PWM ให้กับชุดขับมอเตอร์ที่ควบคุมของวงจร

4.1.3.2 การเลือกขนาดของมอเตอร์

ในงานวิจัยนี้จะใช้มอเตอร์ 1 ตัว คือมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบทดเกียร์ ซึ่งใช้ในการขับเคลื่อนล้อหลังและมอเตอร์นั้นซึ่งมีภาระโหลดได้มากอยู่แล้ว ดังนั้นมอเตอร์ที่เลือกใช้จึงควรเลือกใช้มอเตอร์ที่เหมาะสมโดยจะต้องพิจารณาเลือกความเร็วของมอเตอร์และขนาดของมอเตอร์ที่ใช้ในการขับเคลื่อนของรถ



รูปที่ 4-5 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง 24 V_{dc}

4.1.3.3 ชุดขับ DC Motor แบบ H-Bridge



รูปที่ 4-6 ชุดขับ DC Motor แบบ H-Bridge

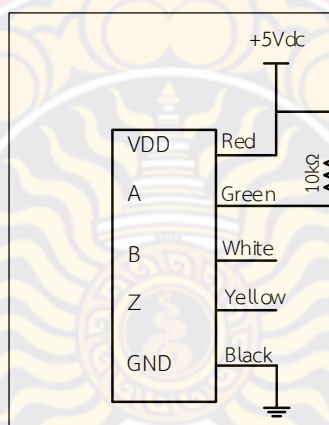
คุณสมบัติของชุดขับ DC Motor แบบ H-Bridge (IRF2807)

1. Output : Single Motor Driver

- DC Motor supply 12-48v 80A (MAX)
 - Full-complementary power Mosfet Driver with Ultra-fast reverse recovery protection diodes
2. Input :
 - Full Opto-isolated input interface signals
 - 5v 8mA TTL-Level
 3. Drive mode : independently with :
 - On-Off Control
 - Direction Control
 - Speed Control (PWM Drives)
 4. PWM Frequency : 400Hz – 1KHz (800Hz Recommend)

4.1.3.4 วงจรอ่านค่า Encoder

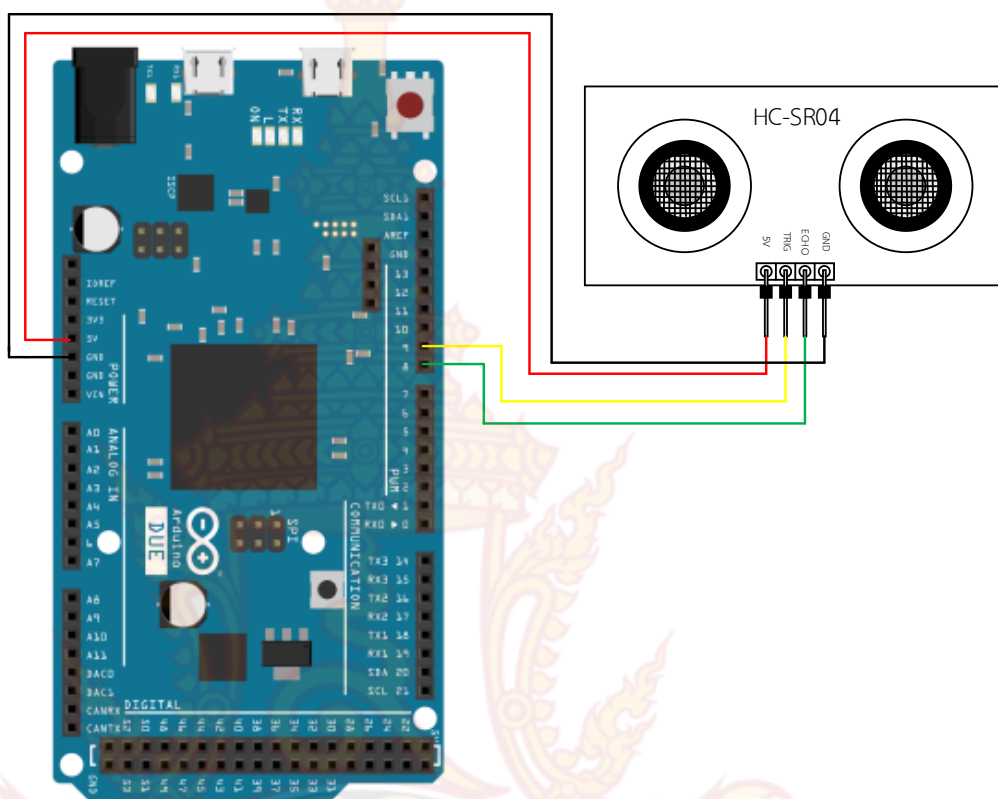
ในการออกแบบวงจรเชื่อมต่อแบบ Pull Up นั้นจะขึ้นอยู่กับรูปแบบของเอาต์พุต โดยสามารถดูได้จาก Data Sheet ของ Encoder ซึ่ง Encoder จะจ่ายสัญญาณ Output เป็นสัญญาณดิจิทัลแบบ Open Collector Output การนำไปใช้งานจะต้องมีการต่อ Pull Up ที่ขา A และขา B ของ Encoder และทำการส่งสัญญาณ Output จากรูปที่ 3-14 มีการออกแบบให้มีตัวต้านทานเพื่อรับแรงดันจากภายนอกเข้ามาจ่ายให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยค่าที่มาจาก Encoder จะเป็นสัญญาณ Trigger เพื่อให้แหล่งจ่ายภายนอกส่งสัญญาณเข้าภายในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์



รูปที่ 4-7 แสดงการเชื่อมต่อสัญญาณแบบ Pull Up จาก Encoder

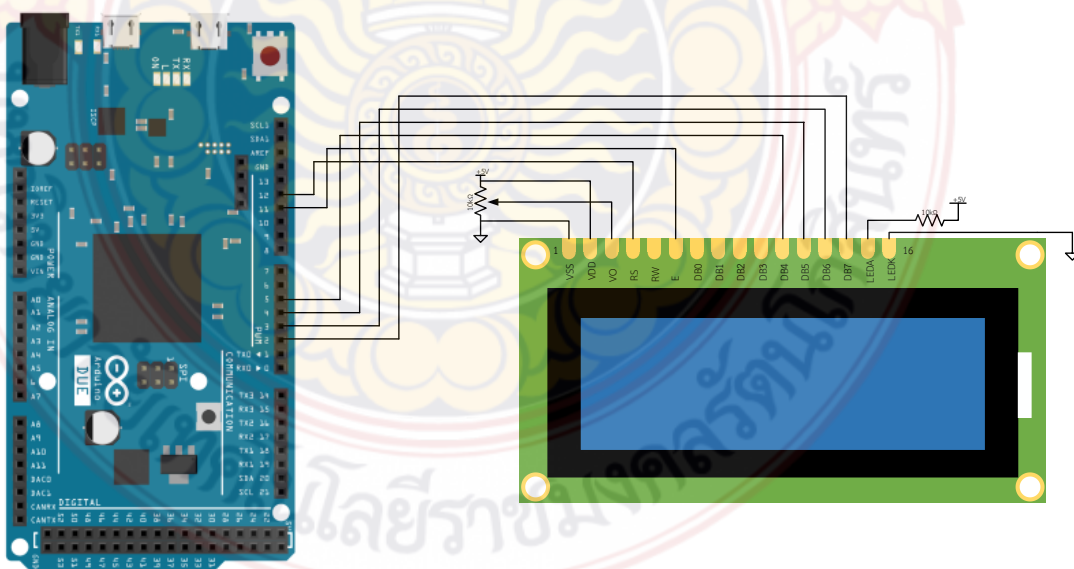
4.1.4 การออกแบบชุดประมวลผลและแสดงผล

4.1.4.1 ชุดวัดระยะทาง Ultrasonic Sensor HC-SR04



รูปที่ 4-8 ชุดวัดระยะทาง Ultrasonic Sensor HC-SR04

4.1.4.2 ชุดแสดงผลจอ LCD

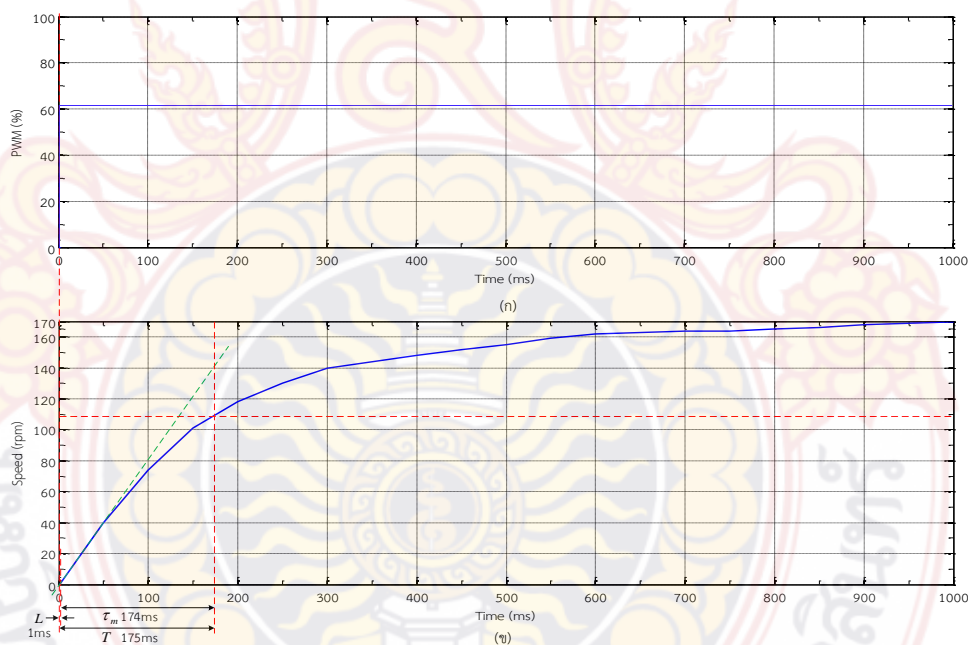


รูปที่ 4-9 ชุดแสดงผลจอ LCD

4.2 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของระบบ (Identification)

ในการทดลองหาพารามิเตอร์ของระบบหรือการพิสูจน์เอกลักษณ์ของระบบนั้นในปริญญานิพนธ์นี้เป็นการทดลองการควบคุม Open Loop โดยการป้อนสัญญาณอินพุตให้กับระบบ แล้วนำค่าจาก Serial Monitor ในโปรแกรมการทำงานของ Arduino แล้วนำค่าที่ได้มาทำการพล็อตกราฟลงในโปรแกรม MATLAB ทำการลากเส้นสัมผัสส่วนโค้งของผลตอบสนองของระบบขณะกำลังเข้าสู่จุดอิ่มตัวและหาค่าอัตราการขยายของระบบขณะอิ่มตัว เมื่อได้ค่าพารามิเตอร์ของระบบแล้ว ขั้นตอนการพิสูจน์ว่าระบบจำลองที่หามาได้ใกล้เคียงกับระบบจริงหรือไม่ โดยการนำผลตอบสนองของระบบจริงและระบบจำลองมาทำการพล็อตกราฟเพื่อเปรียบเทียบโดยใช้โปรแกรม MATLAB

การทดลองนี้ได้ทำการเลือกใช้วิธีการคำนวณค่าพารามิเตอร์แบบวิธี Process Reaction Curve ในการพิสูจน์เอกลักษณ์ของระบบโดยทำการป้อนค่า PWM ที่ 61.6% ให้กับระบบ จะได้ผลตอบสนองของระบบโดยเริ่มจากขณะมอเตอร์หยุดการทำงาน 0 rpm เปลี่ยนแปลงเป็น 170 rpm รอจนกระทั่งสัญญาณเอาต์พุตที่ได้เกิดการเสถียรภาพกับระบบเกิดขึ้น จากนั้นนำผลตอบสนองที่ได้มาทำการหาจุดตัดที่มีความชันมากที่สุด เพื่อหาฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบ (Transfer function) แสดงดังรูปที่ 4-10 โดยวิธีการนี้จะแยกการพิจารณาค่าคงที่ได้ 2 ค่า คือ ค่าหน่วงเวลา (Delay time, L) กับค่าคงที่เวลา (Time Constant, τ_m) จะได้เส้นตรงตัดกับแกนเวลาและแกนเอาต์พุต



รูปที่ 4-10 (ก) สัญญาณทดสอบ Unit step

(ข) ผลตอบสนอง S-Curve ของมอเตอร์ในระบบ

จากภาพที่ 4-10 หาค่าพารามิเตอร์ของระบบได้ดังนี้

$$\Delta PV = 170 \text{ rpm} = 89.6\%$$

$$L = 1 \text{ ms}$$

$$\tau_m = 174 \text{ ms}$$

$$T = 175 \text{ ms}$$

อัตราขยายของ Open Loop หาได้จากสมการที่ 4.1

$$K_m = \frac{\Delta PV}{\Delta MV} \quad 4.1$$

แทนค่า

$$K_m = \frac{89.6\%}{61.6\%} = 1.454$$

ฟังก์ชันการถ่ายโอนของดีซีมอเตอร์ตามสมการคุณลักษณะ

$$H(s) = \frac{\omega(s)}{E_a(s)} = \frac{K_m}{(\tau_m s + 1)}$$

แทนค่า

$$H(s) = \frac{1.454}{(0.174 s + 1)}$$

จากสูตรหาค่า Gain PI ของ Zeigler Nichols Open Loop Tuning Method

$$K_p = \frac{0.9T}{K_m L}, \quad T_i = 3.3 L$$

แทนค่า

$$K_p = \frac{0.9 \times 0.175}{1.454 \times 0.001} = 108.32$$

$$T_i = 3.3 \times 0.001 = 0.0033$$

4.2

ฟังก์ชันการถ่ายโอนข้อมูลตัวควบคุม PI หาได้จากสมการที่ 4.2

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left[1 + \frac{1}{T_i s} \right]$$

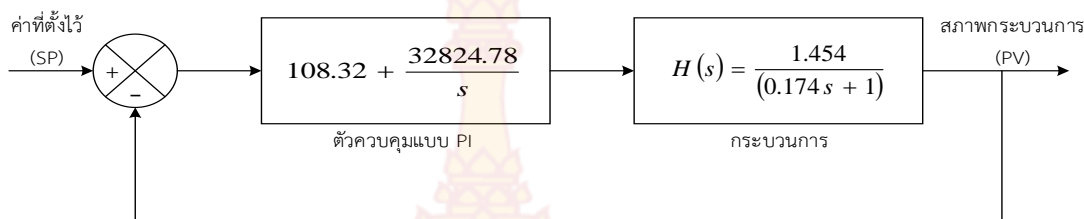
4.3

แทนค่า

$$\frac{U(s)}{E(s)} = 108.32 \left[1 + \frac{1}{0.0033 s} \right]$$

$$\frac{U(s)}{E(s)} = 108.32 + \frac{32824.78}{s}$$

บล็อกไดอะแกรมของระบบวงรอบเปิดกับตัวควบคุมจะแสดงดังรูปที่ 4-11



รูปที่ 4-11 บล็อกไดอะแกรมของระบบที่มีตัวควบคุม PI

4.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทำวิจัย

1. มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง
2. แบตเตอรี่ 12V จำนวน 4 ก้อน
3. ชุดวงจรขยายสัญญาณและวงจรขับมอเตอร์ไฟฟ้า
4. อุปกรณ์ตรวจจับความเร็วรอบของมอเตอร์และเอนโค้ดเดอร์
5. โครงสร้างรถพร้อมตัวถัง
6. อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่นๆที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

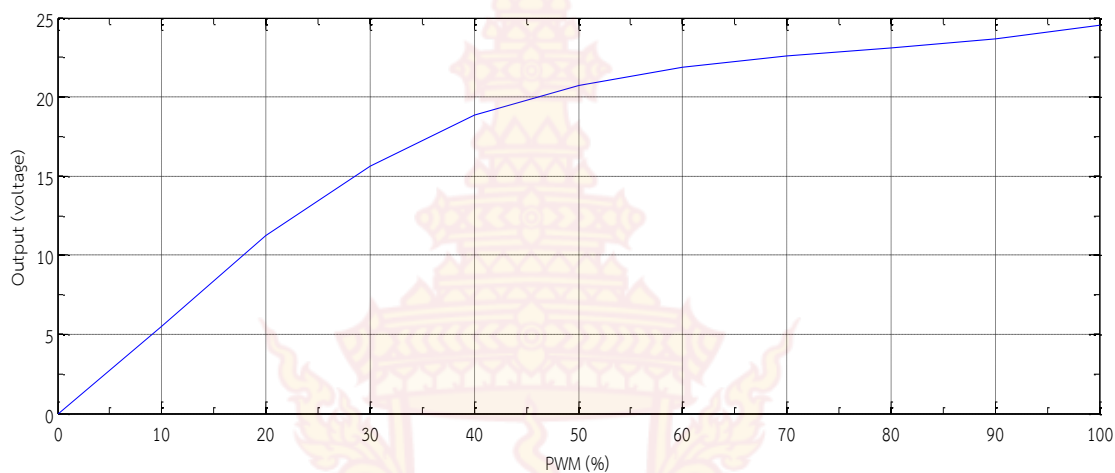
4.4 การทดลองสร้างสัญญาณพัลส์วิดมอดูเลต (PWM)

ในการทดสอบสร้างสัญญาณพัลส์วิดมอดูเลชัน (PWM) ในที่นี้ได้กำหนดความถี่เอาไว้ที่ 1KHz ซึ่งเป็นความถี่ที่ใช้ในการดำเนินงานสร้างสัญญาณพัลส์วิดมอดูเลชัน (PWM) เพื่อนำไปควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ โดยทำการปรับเปลี่ยนค่าดิวตี้ไซเคิลและทำการวัดเอาต์พุตที่ได้จากวงจรขับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่เป็นสัมพันธ์ของแรงดันกับความเร็วรอบ

ตารางที่ 4-1 ผลการทดลองค่าเปอร์เซ็นต์ดิวตี้ไซเคิลที่มีผลต่อเอาต์พุต (Voltage)

PWM Duty cycle (%)	ค่าที่วัดได้จาก Output ของวงจร ขับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (V_{dc})
10	5.48
20	11.22
30	15.64
40	18.89
50	20.7
60	21.9
70	22.6
80	23.1
90	23.7

PWM Duty cycle (%)	ค่าที่วัดได้จาก Output ของวงจร ขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (V_{DC})
100	24.5

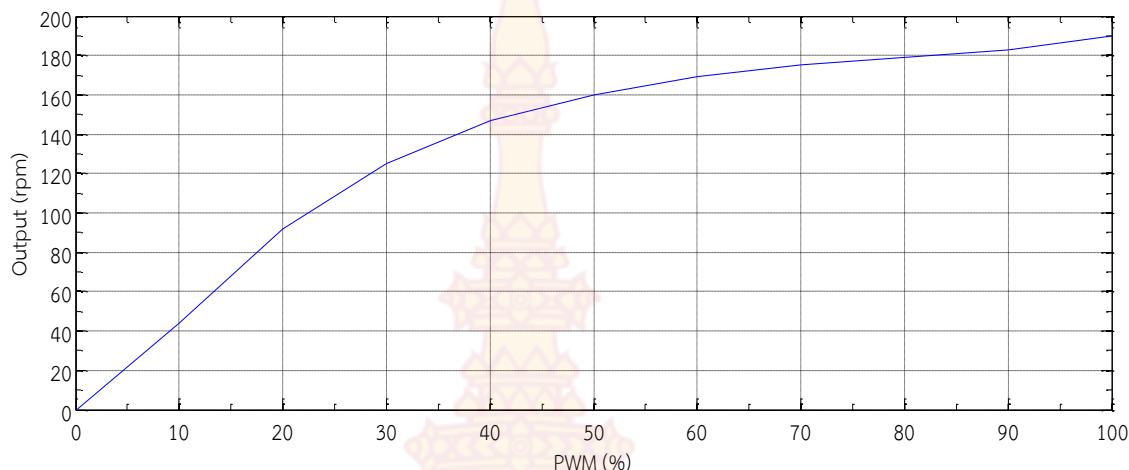


รูปที่ 4-12 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ดีวตี้ไซเคิลที่มีผลต่อเอาต์พุต (Voltage)

จากตารางที่ 4-1 และรูปที่ 4-12 แสดงให้เห็นว่าเอาต์พุตที่ออกมาจากระบบในรูปแบบที่เราทำการปรับเปลี่ยนค่าดีวตี้ไซเคิล ถ้าเราปรับเปลี่ยนค่าดีวตี้ไซเคิลยิ่งมากเอาต์พุตก็จะเปลี่ยนแปลงค่ามาก ถ้าเราปรับเปลี่ยนน้อยค่าเอาต์พุตก็จะน้อยไปตามที่เราทำการเปลี่ยนแปลง

ตารางที่ 4-2 ผลการทดลองหาค่าเปอร์เซ็นต์ดีวตี้ไซเคิลที่มีผลต่อความเร็วรอบมอเตอร์ (RPM)

PWM Duty cycle (%)	ค่าที่วัดได้จาก Output RPM (Revolutions Per Minute)
10	44
20	92
30	125
40	147
50	160
60	169
70	175
80	179
90	183
100	190

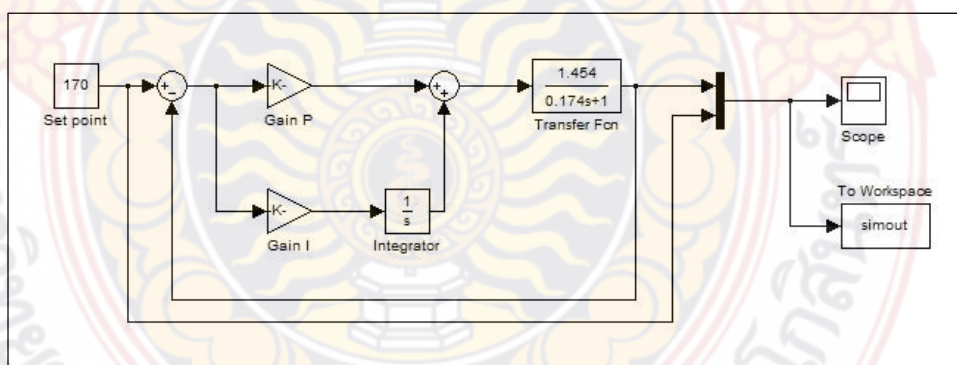


รูปที่ 4-13 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ดิวตี้ไซเคิลที่มีผลต่อความเร็วรอบ (RPM)

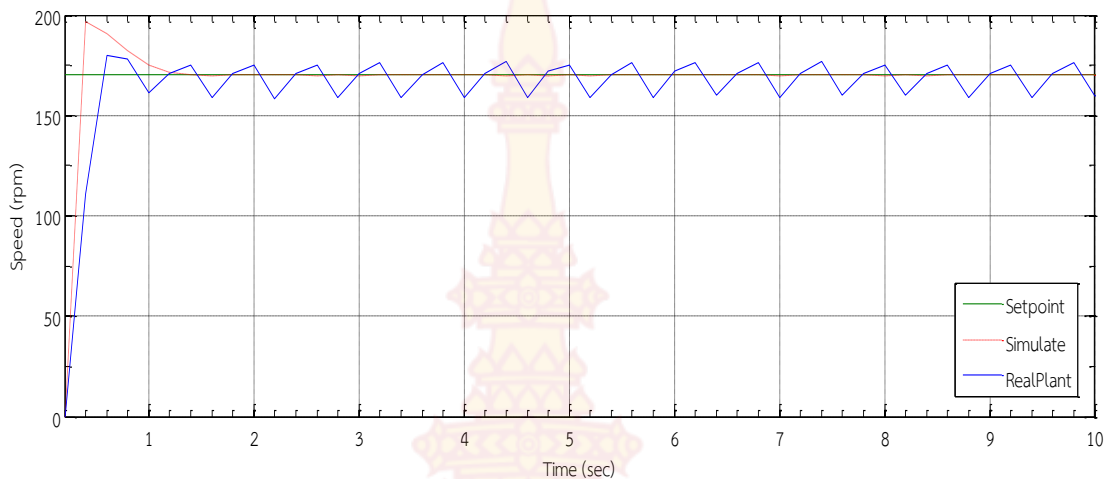
จากตารางที่ 4-2 และรูปที่ 4-13 แสดงให้เห็นว่าเอาต์พุตที่ออกมาจากระบบในรูปแบบที่เราทำการปรับเปลี่ยนค่าดิวตี้ไซเคิล ถ้าเราปรับเปลี่ยนค่าดิวตี้ไซเคิลยิ่งมากเอาต์พุตก็จะเปลี่ยนแปลงค่ามาก ถ้าเราปรับเปลี่ยนน้อยค่าเอาต์พุตก็จะน้อยไปตามที่เราทำการเปลี่ยนแปลง

4.5 การทดสอบค่าตัวแปรการควบคุมแบบ PI

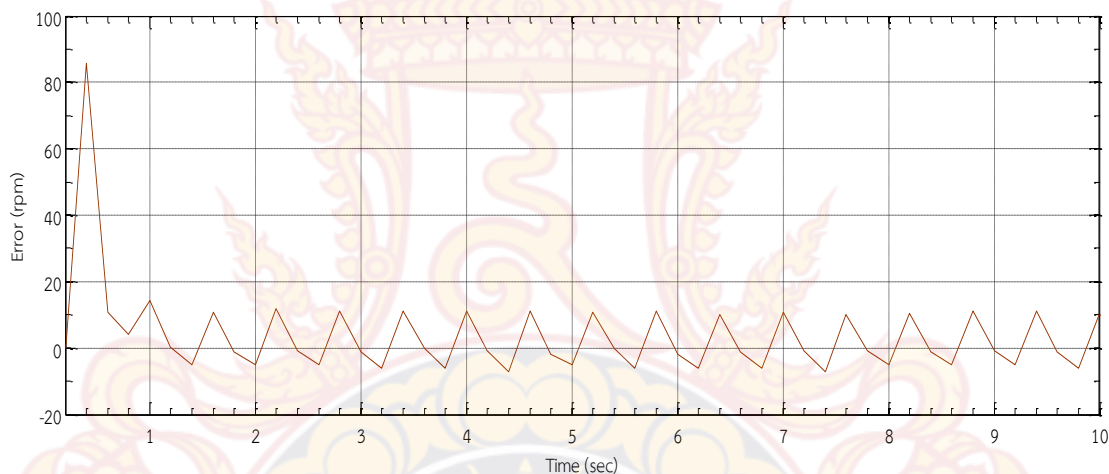
อัตราการขยาย PI สามารถหาได้จากหลายวิธี ซึ่งให้ผลตอบสนองต่อระบบที่แตกต่างกันดังนั้นจึงทำการทดสอบเพื่อหาค่าอัตราการขยาย PI ที่เหมาะสมกับระบบจริง โดยการเปรียบเทียบค่าอัตราการขยาย PI ที่ได้จากการปรับแต่งสัญญาณแบบ Open Loop Tuning ทำการทดสอบระบบจริงเทียบกับระบบจำลองจากจะได้อัตราการขยาย PI ที่ได้จาก Open Loop Tuning ทำการทดสอบโดยการต่อวงจร MATLAB Simulink ดังรูปที่ 4-14



รูปที่ 4-14 Simulink Gain by Open Loop PI Tuning



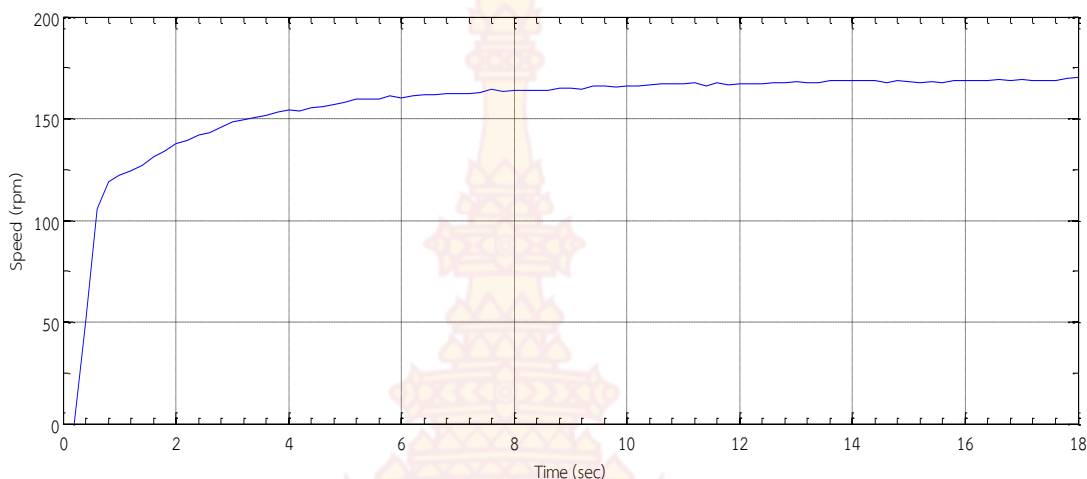
รูปที่ 4-15 เปรียบเทียบผลตอบสนอง Gain PI จาก Open Loop



รูปที่ 4-16 ค่าความผิดพลาดระหว่างระบบจริงกับระบบจำลอง Open Loop Gain

จากรูปที่ 4-16 แสดงการเปรียบเทียบผลตอบสนองของระบบ เมื่อใช้อัตราการขยาย PI ที่ได้จาก Open Loop Tuning เส้นประสีแดงคือ ผลตอบสนองที่ได้จากแบบจำลอง เส้นทึบสีน้ำเงินคือผลตอบสนองที่ได้จากระบบจริง เส้นทึบสีเขียวคือ Set Point อ้างอิง ค่า PI ที่ได้จากการคำนวณเมื่อนำมาใช้กับระบบจริง เกิดการแกว่ง เนื่องจากระบบเป็นมอเตอร์เกียร์ซึ่งขับโหลดด้วยชุดโซ่ จึงต้องทำการปรับจูนค่าพารามิเตอร์การควบคุมแบบ PI ใหม่

4.6 ผลของการทดลองระบบจริงที่ได้ทำการปรับจูนค่า PI



รูปที่ 4-17 ระบบจูนค่า PI ที่ได้ทำการปรับจูน 170 rpm

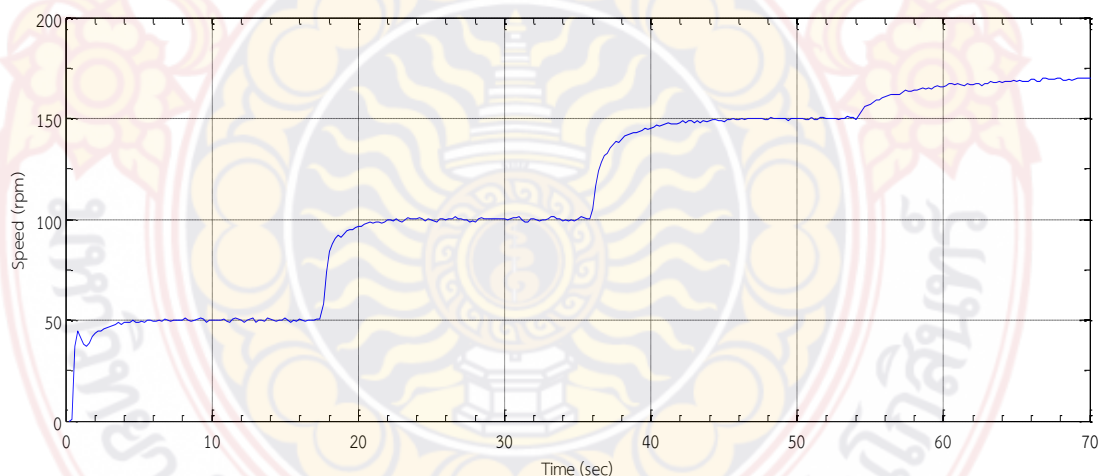
จากรูปที่ 4-17 เป็นการทดสอบค่าระบบจริงของการควบคุมแบบ PI ที่ได้ทำการปรับจูน ค่า K_p = 0.9, T_i = 0.66

การวิเคราะห์ผลตอบสนองของระบบที่ได้ทำการปรับจูน

Delay Time = 1 ms

Rise Time = 200 ms

Setting Time = 8 sec

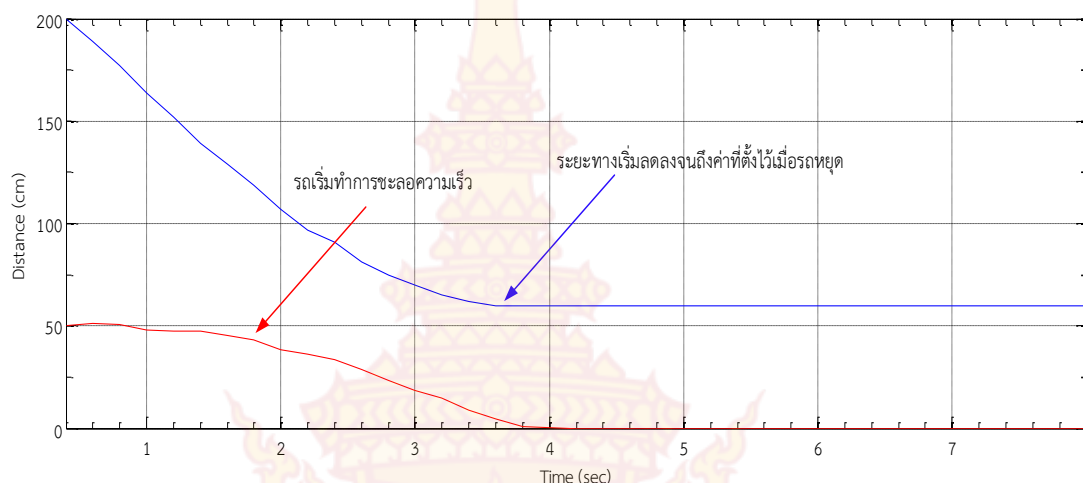


รูปที่ 4-18 ระบบจูนค่า PI ที่ได้ทำการปรับจูน 50 rpm, 10 rpm, 150 rpm, 170 rpm

จากรูปที่ 4-18 จะเป็นการทดลองเพื่อทดสอบค่าระบบจริงที่ใช้การควบคุมแบบ PI ความเร็วรอบของมอเตอร์จะทำงานเป็นแบบขั้นบันได โดยทำการปรับจูนค่า 50 rpm, 100 rpm, 150 rpm และ 170 rpm

4.7 การทดลองระยะทางโดยเซ็นเซอร์อัลตราโซนิกที่มีผลต่อความเร็วมอเตอร์ที่ได้จากการควบคุมแบบ PI

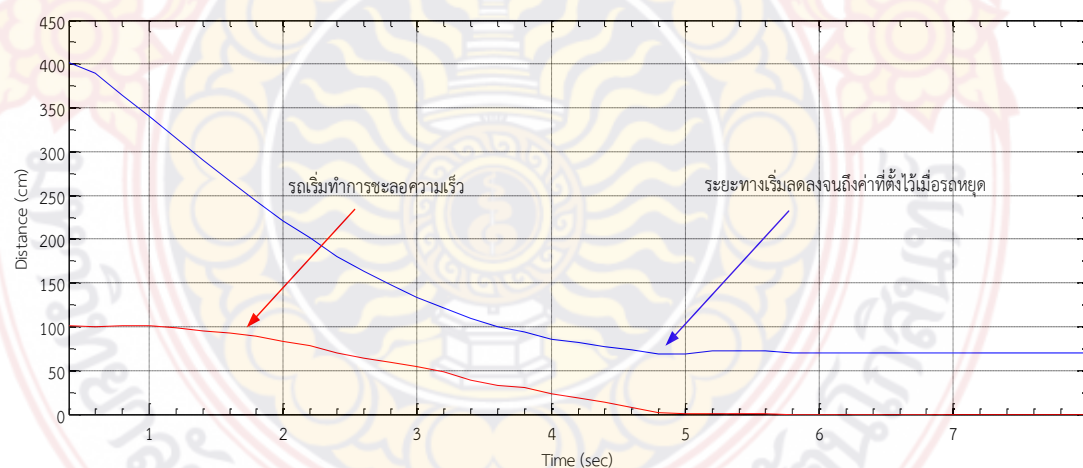
4.7.1 กำหนดความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ 50 rpm



รูปที่ 4-19 แสดงค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ 50 rpm

จากรูปที่ 4-19 เส้นสีน้ำเงินเมื่อระยะห่างระหว่างตัวรถกับผนังกำแพงที่มีระยะห่าง 200 เซนติเมตร เส้นสีแดงความเร็วของรถขณะขับเคลื่อนที่มีความเร็วรอบ 50 rpm และความเร็วของรถเริ่มทำการชะลอความเร็วลดลงที่มีค่าเวลา 3.8 sec หลังจากนั้นรถก็จะเริ่มหมดความเร็วลงจนเหลือ 0 rpm และรถจะหยุดโดยอัตโนมัติ

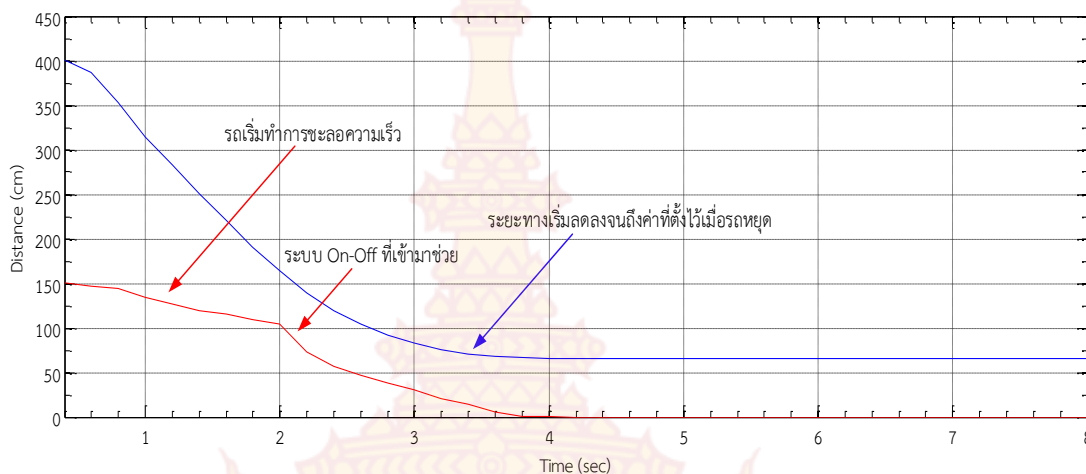
4.7.2 กำหนดความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ 100 rpm



รูปที่ 4-20 แสดงค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ 100 rpm

จากรูปที่ 4-20 เส้นสีน้ำเงินเมื่อระยะห่างระหว่างตัวรถกับผนังกำแพงที่มีระยะห่าง 400 เซนติเมตร เส้นสีแดงความเร็วของรถขณะขับเคลื่อนที่มีความเร็วรอบ 100 rpm และความเร็วของรถเริ่มทำการชะลอความเร็วลดลงที่มีค่าเวลา 4.8 sec หลังจากนั้นรถก็จะเริ่มหมดความเร็วลงจนเหลือ 0 rpm และรถจะหยุดโดยอัตโนมัติ

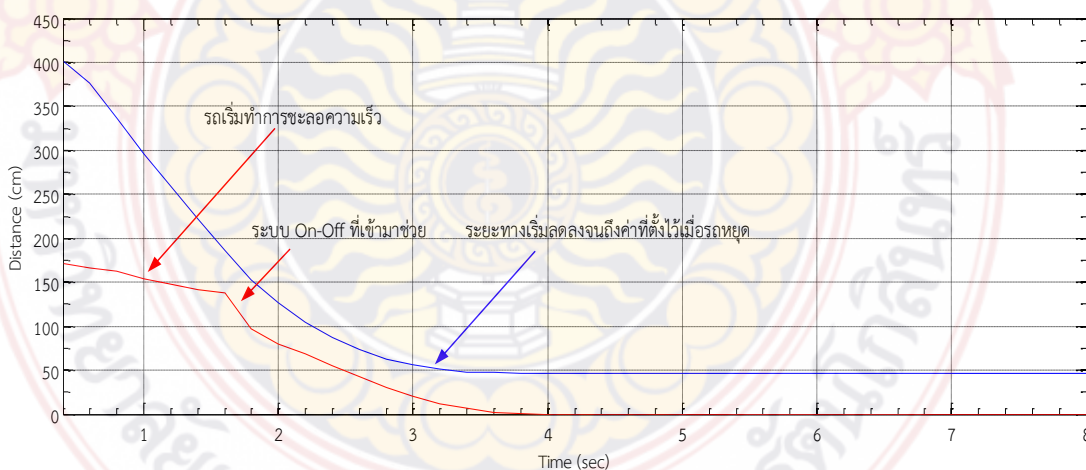
4.7.3 กำหนดความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ 150 rpm



รูปที่ 4-21 แสดงค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ 150 rpm

จากรูปที่ 4-21 เส้นสีน้ำเงินเมื่อระยะห่างระหว่างตัวรถกับผนังกำแพงที่มีระยะห่าง 400 เซนติเมตร เส้นสีแดงความเร็วของรถขณะขับเคลื่อนที่มีความเร็วรอบ 150 rpm และความเร็วของรถเริ่มทำการชะลอความเร็วลดลงที่มีค่าเวลา 3.8 sec หลังจากนั้นรถก็จะเริ่มหมดความเร็วลงจนเหลือ 0 rpm และจะหยุดในที่สุด ในความเร็ว 150 rpm นั้นจะเห็นได้ว่าการควบคุมแบบ On-Off เข้ามาควบคุมเนื่องจากความเร็วรอบ 150 rpm ถือว่ามีความเร็วสูงพอสมควรและมีแรงเฉื่อยสะสม จึงได้ทำการเบรกล่วงหน้าที่ระยะทาง 170 เซนติเมตร เพราะอัลตราโซนิกมีค่าตรวจวัดระยะห่างได้สูงสุด 4 เมตร

4.7.4 กำหนดความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ 170 rpm



รูปที่ 4-22 แสดงค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ 170 rpm

จากรูปที่ 4-22 เส้นสีน้ำเงินเมื่อระยะห่างระหว่างตัวรถกับผนังกำแพงที่มีระยะห่าง 400 เซนติเมตร เส้นสีแดงความเร็วของรถขณะขับเคลื่อนที่มีความเร็วรอบ 170 rpm และความเร็วของรถเริ่มทำการชะลอความเร็วลดลงที่มีค่าเวลา 3.6 sec หลังจากนั้นรถก็จะเริ่มหมดความเร็วลงจนเหลือ 0 rpm

และจะหยุดในที่สุด ในความเร็ว 170 rpm นั้นจะเห็นได้ว่าการควบคุมแบบ On-Off เข้ามาควบคุม เนื่องจากความเร็วรอบ 170 rpm ถือว่ามีความเร็วสูงพอสมควรและมีแรงเฉื่อยสะสมจึงได้ทำการเบรกล่วงหน้าที่ระยะทาง 200 เซนติเมตร เพราะอัลตราโซนิคมีค่าตรวจวัดระยะห่างได้สูงสุด 4 เมตร

4.8 การทดลองความเร็วของรถที่มีผลต่อกระแสของมอเตอร์

ตารางที่ 4-3 ความเร็วของรถที่มีผลต่อกระแสของมอเตอร์ขณะไม่มีโหลด

rpm	Amp
50	1.32A
100	1.63A
150	1.82A
170	1.89A

ตารางที่ 4-4 ความเร็วของรถที่มีผลต่อกระแสของมอเตอร์ขณะมีโหลด (49Kg)

rpm	Amp
50	2.58A
100	2.72A
150	5.09A
170	6.63A

4.9 การสอบเทียบระยะทางของเซ็นเซอร์อัลตราโซนิค

ตารางที่ 4-5 การสอบเทียบระยะทางของเซ็นเซอร์อัลตราโซนิค

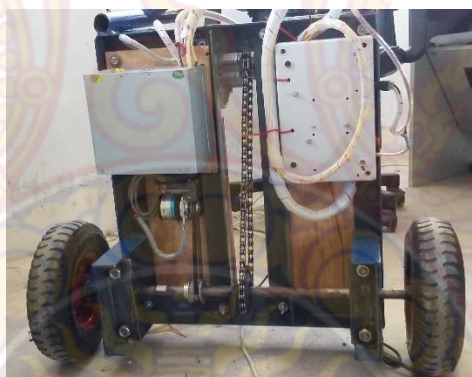
ระยะทางมาตรฐาน (cm)	ระยะทางที่อ่านได้จากอัลตราโซนิค (cm)	ค่าผิดพลาด (Error)
50	51	1
100	98	-2
150	147	-3
200	197	-3
250	246	-4
300	295	-5
350	345	-5
400	394	-6

4.10 โครงการงานจริงและลักษณะการเคลื่อนที่



รูปที่ 4-23 โครงสร้างจริง

จากรูปที่ 4-23 เป็นภาพของรถไฟฟ้าที่ใช้งานจริงและเสร็จสมบูรณ์ตามที่ผู้จัดทำได้กำหนดไว้



รูปที่ 4-24 ชุดควบคุมและขับเคลื่อน

จากรูปที่ 4-24 เป็นภาพใต้ท้องรถของรถไฟฟ้าซึ่งจะประกอบด้วยชุดขับเคลื่อนระบบเฟืองตามชุดโซ่ ขับเคลื่อนล้อ อุปกรณ์ควบคุมต่างๆ รวมไปถึงอุปกรณ์ตรวจวัดความเร็วรอบมอเตอร์



(ก)



(ข)

รูปที่ 4-25 (ก) ลักษณะการเคลื่อนที่ของรถขณะเคลื่อนที่
(ข) ลักษณะการเคลื่อนที่ของรถขณะหยุดนิ่ง

จากรูปที่ 4-25 (ก) ลักษณะการเคลื่อนที่ของรถขณะเคลื่อนที่ เป็นการขับเคลื่อนรถไฟฟ้าโดยมีมอเตอร์เป็นตัวขับเคลื่อน และจากรูปที่ 4-25 (ข) ลักษณะการเคลื่อนที่ของรถขณะหยุดนิ่ง เมื่อรถไฟฟ้าเจอผนังกำแพงอัลตราโซนิกจะทำการตรวจวัดระยะห่างเมื่อผนังกำแพงอยู่ใกล้ รถก็จะเริ่มทำการชะลอความเร็วและหยุดลงโดยอัตโนมัติ

บทที่ 5

สรุปผลการดำเนินงาน

5.1 สรุปผล

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาและการค้นคว้า เพื่อทำการสร้างรถไฟฟ้าโดยการวัดระยะห่างจากอุลตราโซนิกมาเป็นตัวตรวจจับระยะในการเบรกของรถเพื่อไม่ให้นั้นเกิดการชนโดยอาศัยหลักการควบคุมแบบ PI มาเป็นตัวควบคุมความเร็วของรถ จากการทดลองโดยใช้เซ็นเซอร์ อุลตราโซนิกวัดระยะทางได้สูงสุด 4 เมตร ในการเบรกจะต้องใช้ระบบควบคุมแบบ On-Off เข้ามาช่วยจึงจะทำการเบรกได้ทัน เนื่องจากรถยังมีแรงเฉื่อยหลงเหลืออยู่ ถ้าใช้ระบบควบคุมแบบ PI เป็นตัวควบคุมการเบรกเซ็นเซอร์ที่ใช้วัดจะต้องมีระยะทางการตรวจจับวัดระยะทางได้มากกว่านี้

5.2 ปัญหาและแนวทางการแก้ไข

5.2.1 จากการวิจัยทดลองครั้งนี้ถือว่ารถไฟฟ้าทำงานได้ดีแต่ยังไม่ดีที่สุดเป็นเพราะอุลตราโซนิกนั้นมีระยะการตรวจจับวัตถุได้ไม่ไกลและยังมีค่าความผิดพลาดของเซ็นเซอร์อยู่ด้วย แต่ในย่านการทดลองการวัดแต่ละค่า เป็นไปตามขอบเขตที่ได้ตั้งไว้

5.2.2 รถไฟฟ้าสามล้อโดยการวัดระยะห่างจากอุลตราโซนิกและควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบ PI เป็นรถจำลองขนาดเล็กและมีอุลตราโซนิกที่จับระยะทางได้ไม่ไกลมาก จึงสร้างมาเพื่อเป็นรถแบบจำลองที่สามารถทำงานได้จริง แต่ยังใช้งานในบริเวณกว้างได้ไม่ดีเท่าที่ควร

5.3 การนำไปใช้ประโยชน์ / ประยุกต์ใช้กับกรณีศึกษาอื่นๆ

5.3.1 ใช้สำหรับการศึกษากระบวนการควบคุมแบบ PI

5.3.2 ใช้เป็นรถต้นแบบการทำงานของรถไฟฟ้าโดยใช้เซ็นเซอร์ในการหยุดรถโดยอัตโนมัติเพื่อความปลอดภัยในการขับขึ้นยานพาหนะ

5.3.3 สามารถนำไปต่อยอดเพื่อให้ใช้งานได้ดีขึ้นโดยการเปลี่ยนเซ็นเซอร์อุลตราโซนิกให้มีการตรวจจับวัดระยะทางได้มากขึ้น

บรรณานุกรม

- [1] มงคล ทองสงคราม. อิเล็กทรอนิกส์กำลัง. กรุงเทพฯ : วี.เจ.พรีนติ้ง, 2546.
- [2] ไชยชาญ หินเกิด. เครื่องจักรกลไฟฟ้า 1. พิมพ์ครั้งที่ 18. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ ส.ส.ท., 2553.
- [3] ศุภชัย สุรินทร์วงศ์. เครื่องจักรกลไฟฟ้า 1 ตอน 2 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ ส.ส.ท., 2538.
- [4] วิศรุต ศรีรัตนะ. เซ็นเซอร์และทรานสดิวเซอร์ในงานอุตสาหกรรม. กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดดูเคชั่น., 2550.
- [5] V. Tipsuwanporn, A. Numsomran, K. Phipek and C. Sompracha, "Design and compensation of DC chopper for speed control in DC motor using PLL controller", SICE Annual conference 2013, pp.2207-2211, September, 2013, Nagoya, Japan, 2013.
- [6] Vittaya Tipsuwanporn, Arjin Numsomran, Kowit Phipek and Adisak Khaengsarigid, "The speed control of induction motor using 11-level inverter", Proceedings of IASTED (AsiaPES 2013), pp.457-461, April, Phuket, Thailand, 2013.



ประวัติผู้วิจัย

1. หัวหน้าโครงการ

ชื่อ-นามสกุล นายโกวิท พิเภก

(Mr. Kowit Phipek)

ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์

หน่วยงาน สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

สถานที่อยู่ที่ติดต่อได้สะดวก 96 หมู่ 3 ถนนพุทธมณฑลสาย 5 ต.ศาลายา อ.พุทธมณฑล

จ.นครปฐม 73170

หมายเลขโทรศัพท์ที่ทำงาน 02-8894585-7 ต่อ 2690

โทรศัพท์มือถือ 089-0999224

โทรสาร 02-8894585-7 ต่อ 2695

(E-mail): Kowit.phi@rmutr.ac.th

2. ผู้ร่วมโครงการ

ชื่อ-นามสกุล นายเรืองยศ เกตุรักษา

(Mr. Ruangyos Keteruksa)

ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์

หน่วยงาน สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

สถานที่อยู่ที่ติดต่อได้สะดวก 96 หมู่ 3 ถนนพุทธมณฑลสาย 5 ต.ศาลายา อ.พุทธมณฑล

จ.นครปฐม 73170

หมายเลขโทรศัพท์ที่ทำงาน 02-8894585-7 ต่อ 2690

โทรศัพท์มือถือ 081-9091785

โทรสาร 02-8894585-7 ต่อ 2695

(E-mail): Ruangyos.k@rmutr.ac.th