

การควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไร้แปรงถ่านสำหรับ  
หุ่นยนต์ไต่ผนังท่อเหล็กด้วยเทคนิคฟัซซี  
SPEED CONTROL OF BLDC MOTOR FOR STEEL PIPE WALL CLIMBLING  
ROBOT BASE ON FUZZY TECHNIQUE



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2561

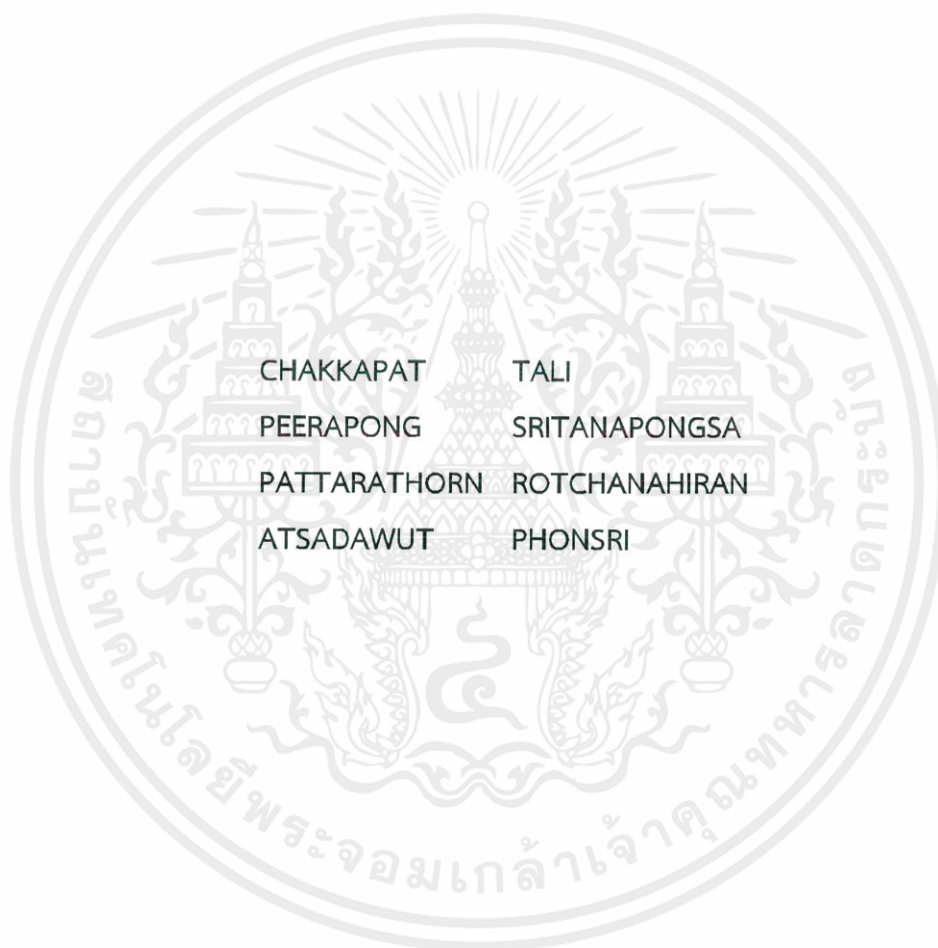
การควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไร้แปรงถ่านสำหรับ  
หุ่นยนต์ไต่ผนังท่อเหล็กด้วยเทคนิคฟัซซี่  
SPEED CONTROL OF BLDC MOTOR FOR STEEL PIPE WALL CLIMBLING  
ROBOT BASE ON FUZZY TECHNIQUE



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SPEED CONTROL OF BLDC MOTOR FOR STEEL PIPE WALL CLIMBLING  
ROBOT BASE ON FUZZY TECHNIQUE



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

2018

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2561

การควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไร้แปรงถ่านสำหรับ

หุ่นยนต์ไต่ผนังท่อเหล็กด้วยเทคนิคฟัซซี

SPEED CONTROL OF BLDC MOTOR FOR STEEL PIPE WALL CLIMBLING

ROBOT BASE ON FUZZY TECHNIQUE



นายจักรภัทร

ทะลิ

นายพีรพงศ์

ศรีธนพงศา

นายภัทรธร

โรจนหิรัณย์

นายอัษฎาวุธ

พลศรี

อาจารย์ที่ปรึกษา

ดร. ภูมิ คงห้วยรอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2561


สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไร้แปรงถ่านสำหรับหุ่นยนต์ใต้น้ำท้อเหล็กด้วย  
เทคนิคพีซีซี

ผู้จัดทำ

- 
1. นายจักรภัทร ทะลี
  2. นายพีรพงศ์ ศรีธนพงศา
  3. นายภัทรธร โรจนหิรัณย์
  4. นายอัษฎาวุธ พลศรี

..........อาจารย์ที่ปรึกษา  
( ดร. ภูมิ คงห้วยรอบ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไร้แปรงถ่านสำหรับ  
หุ่นยนต์ไต่ผนังท่อเหล็กด้วยเทคนิคพีซีซี

นายจักรภัทร ทะลี  
นายพีรพงศ์ ศรีธนพงศา  
นายภัทรธร โรจนหิรัณย์  
นายอัษฎาวุธ พลศรี  
ดร. ภูมิ คงห้วยรอบ อาจารย์ที่ปรึกษา  
ปีการศึกษา 2561

**บทคัดย่อ**

ปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์ในการออกแบบและสร้างชุดควบคุมมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน ซึ่งนำมาประยุกต์ใช้กับการทำหุ่นยนต์ไต่ผนังสำหรับทำความสะอาดหม้อต้มไอน้ำ โดยการทำงานจะเริ่มจาก (๑) ฮอลล์เซ็นเซอร์ตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์เพื่อจัดลำดับการทำงานของมอเตอร์ (๒) สัญญาณพัลส์วิดท์มอดูเลชันถูกส่งในการขับสวิตช์ของวงจรรีเลย์อินเวอร์เตอร์ (๓) ใช้เทคนิคพีซีซีลอจิกควบคุมค่าดีวตีไซเคิลของสัญญาณพัลส์วิดท์มอดูเลชันเพื่อปรับความเร็วจริงของมอเตอร์ให้มีความเร็วเท่ากับความเร็วอ้างอิงอยู่ตลอดเวลา นอกจากนี้ล้อของหุ่นยนต์ถูกออกแบบให้แม่เหล็กมีการวางตัวอย่างเหมาะสม ส่งผลให้หุ่นยนต์ที่นำเสนอสามารถเกาะติดกับผนังเหล็กของหม้อต้มไอน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ

# SPEED CONTROL OF BLDC MOTOR FOR STEEL PIPE WALL CLIMBLING ROBOT BASE ON FUZZY TECHNIQUE.

CHAKKAPAT TALI  
PEERAPONG SRITANAPONGSA  
PATTARATHORN ROTCHANAHIRAN  
ATSADAWUT PHONSRI  
DR.POOM KONGHUAYROB Advisor  
Year 2018

## ABSTRACT

This thesis aims to design and create a control module for the Brushless DC Motor applied to the robot to climb the wall for cleaning the steam boiler. The operation of the system started from. (1) Hall sensor detects the position of the rotor for arranging working sequence. (2) PWM signals are used to drive the switch of the 3 phase inverter. (3) Fuzzy logic control technique is proposed in this project to control the duty cycle of the PWM signal in order to adjust the actual speed to equals to the reference speed at all time. Moreover, the robot wheels are designed based on the suitable placing of bar magnet causing the proposed robot can stick on the iron wall of the steam boiler efficiently.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ด้วยการช่วยเหลือจากหลายท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งต้องขอขอบคุณ ดร. ภูมิ คงห้วยรอบ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้ให้ข้อเสนอแนะ ข้อคิดเห็น และคำปรึกษาต่างๆ ในการทำโครงการฉบับนี้มาด้วยดีเสมอมา จนปริญญาานิพนธ์สำเร็จเรียบร้อยด้วยดี

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สมยศ เกียรติวนิชวิไล ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการตัดสินใจเลือกหัวข้อปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณ คุณปณณวีร์ ฉายศิริ และเจ้าหน้าที่ประจำภาควิศวกรรมไฟฟ้าที่ได้กรุณาให้ข้อเสนอแนะและข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อปริญญาานิพนธ์มาด้วยดีตลอด

ขอขอบพระคุณเพื่อนๆ พี่ๆ ในห้อง 305 โครงการวิจัยและพัฒนามอเตอร์ไฟฟ้า (ELECTRICAL MOTOR DESIGN AND DEVELOPMENT CENTRE)

ขอขอบพระคุณ คุณกมลวรรณ เจ้าหน้าที่ห้องธุรการที่ให้คำแนะนำเกี่ยวกับการเบิกใบเสร็จของโครงการ

สุดท้ายนี้คณะผู้จัดทำ ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา และครอบครัว ซึ่งให้การสนับสนุนให้กำลังใจอีกทั้งเพื่อน พี่ และน้องๆ ที่ให้การช่วยเหลือในการทำโครงการครั้งนี้จนสำเร็จได้ด้วยดีจึงขอขอบคุณมาด้วย ณ ที่นี้

คณะผู้จัดทำ

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูปภาพ	VII
สารบัญตาราง	X
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	1
1.3 ขอบเขตการดำเนินการ	1
1.4 แผนการดำเนินงาน	2
1.5 ตารางการดำเนินงาน	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC Motor)	3
2.1.1 ส่วนประกอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	5
2.2 ทฤษฎี Brushless DC motor	6
2.2.1 หลักการทำงาน Brushless DC motor ด้วยเซนเซอร์	7
2.2.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน	11
2.3 หลักการทำงาน inverter	13
2.3.1 อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส แบบชั้้นบันได	13
2.4 Pulse Width Modulation (PWM)	14
2.5 เทคนิคในการควบคุม inverter ด้วย PWM	16
2.5.1 เทคนิคการสวิตช์แบบ 120 องศา (120 degree switching)	16
2.5.2 เทคนิคการสวิตช์แบบ 60 องศา (60 degree switching)	16
2.5.3 เทคนิคการสวิตช์แบบฮาร์ด (Hard switching)	17
2.6 รูปแบบของหุ่นยนต์ใต้น้ำ	18
2.6.1 หุ่นยนต์ที่ติดตั้งแม่เหล็กถาวรบนลำตัว	18
2.6.2 หุ่นยนต์ที่ติดตั้งแม่เหล็กถาวรที่ล้อ	18
2.7 ล้อแม่เหล็ก	19
2.8 ตรรกศาสตร์ฟัซซี(Fuzzy logic)	19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

2.8.1	ฟัซซีเซต (Fuzzy Set)	20
2.8.2	ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (membership function)	20
2.8.3	ตัวแปรภาษา (linguistic variable)	21
2.8.4	กฎฟัซซี (fuzzy rules)	21
2.8.5	การดำเนินการทางฟัซซีเซต(operation)	21
2.8.6	การอนุมานฟัซซีแบบ Sugeno (Sugeno-style Inference)	22
2.8.7	ข้อดีของฟัซซีลอจิก	24
2.9	วิธีการนำตรรกศาสตร์ฟัซซีมาใช้ในระบบควบคุม	24
<b>บทที่ 3 การจำลองการทำงานและการออกแบบ</b>		27
3.1	การจำลองการทำงานของ BLDC Motor โดยใช้ MATLAB/SIMULINK	27
3.2	การออกแบบระบบควบคุมความเร็ว BLDC motor ด้วยเทคนิคฟัซซี	29
3.3	การออกแบบแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงสำหรับวงจร	32
3.4	การออกแบบควบคุมโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์(Microcontroller)	33
3.5	วงจรแสดงผลผ่าน LCD (LCD monitoring)	34
3.6	การออกแบบวงจรขั้วเบรกสำหรับมอเตอร์กำลัง	34
3.7	การออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์3เฟส (three phase inverter)	36
3.7.1	คำนวณหาค่าพิกัดแรงดันขาออกของอินเวอร์เตอร์	37
3.7.2	คำนวณหาค่าพิกัดแรงดันขาออกของอินเวอร์เตอร์	37
3.7.3	คำนวณหาค่าพิกัดกำลังไฟฟ้าขาเข้า	38
3.7.4	คำนวณหาค่าพิกัดกระแสไฟฟ้าขาเข้าของอินเวอร์เตอร์	38
3.8	การออกแบบวงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง	38
3.9	การออกแบบหุ่นยนต์ไต่ผนัง	39
3.9.1	การออกแบบล้อแม่เหล็กด้านหน้าของหุ่นยนต์	39
<b>บทที่ 4 การทดสอบและการประมวลผล</b>		41
4.1	อุปกรณ์และเครื่องมือวัดทางไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบมอเตอร์	42
4.2	การทดสอบมอเตอร์	42
4.2.1	จุดประสงค์ของการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน	42
4.2.2	การทดสอบ	43
4.2.3	ผลการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน กรณี Open loop	43
4.2.4	ผลการทดสอบความเร็วมอเตอร์	44
4.2.5	ผลการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน กรณี Close loop ไม่มีโหลด	45
4.2.6	ผลการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน	

กรณี Close loop มีโหด	46
4.2.7 ผลการทดสอบการรักษาเสถียรสภาพ	48
4.2.8 ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงความเร็วในระดับต่างๆ	49
4.3 การทดสอบหุ่นยนต์	49
4.4 สรุปผลการทดลอง	51
<b>บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง</b>	52
5.1 สรุปผลการทดลอง	52
5.2 ปัญหาที่พบและข้อเสนอแนะ	52
<b>เอกสารอ้างอิง</b>	54
<b>ภาคผนวก</b>	55
ภาคผนวก ก บทความทางวิชาการ	56
ภาคผนวก ข โปสเตอร์	60
<b>ประวัติผู้เขียน</b>	62



## สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 ส่วนประกอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	3
2.2 วงจรการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรม	3
2.3 วงจรการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนาน	4
2.4 วงจรการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขั้วต่อคอมปาต์มอเตอร์	4
2.5 วงจรการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบบลองซ์คอมปาต์มอเตอร์	4
2.6 วงจรการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าไร้แปรงถ่าน	5
2.7 Brushless DC Motor	7
2.8 การทำงานของHall sensorลำดับที่ 1	8
2.9 การทำงานของHall sensorลำดับที่ 2	8
2.10 การทำงานของHall sensorลำดับที่ 3	9
2.11 การทำงานของHall sensorลำดับที่ 4	9
2.12 การทำงานของHall sensorลำดับที่ 5	10
2.13 การทำงานของHall sensorลำดับที่ 6	10
2.14 อินเวอร์เตอร์ 3 เฟสแบบนำกระแส $120^\circ$	14
2.15 อินเวอร์เตอร์ 3 เฟสแบบนำกระแส $180^\circ$	14
2.16 แรงดันไฟฟ้าขาออกของPWM	15
2.17 120 degree switching	16
2.18 60 degree switching	17
2.19 Hard switching	17
2.20 ลักษณะของล้อแม่เหล็ก	18
2.21 การเปรียบเทียบรูปคลื่นลอจิกกับฟิซซีลอจิก	20
2.22 ฟิซซีเซตแบบต่างๆ	20
2.23 การยูเนียน	21
2.24 การอินเตอร์เซกชัน	22
2.25 การคอมพลีเมนต์	22
2.26 ฟังก์ชันสมาชิกของเอาต์พุตแบบ Sugeno	23
2.27 ขั้นตอนการประมวลผลแบบฟิซซี	24
2.28 ขั้นตอนที่ 1 ของการประมวลผลแบบฟิซซีลอจิก	25
2.29 ขั้นตอนที่ 2 ของการประมวลผลแบบฟิซซีลอจิก	25

2.30	ขั้นตอนที่ 3 ของการประมวลผลแบบฟัซซีลอจิก	26
2.31	ขั้นตอนที่ 4 ของการประมวลผลแบบฟัซซีลอจิก	26
3.1	การจำลองการทำงานBCDC motor โดย MATLAB/SIMULINK	27
3.2	กล่องไดอะแกรม Decoder ที่รับสัญญาณ Hall จากมอเตอร์	27
3.3	วงจรภายในกล่องไดอะแกรม Decoder	28
3.4	กล่องไดอะแกรม Fuzzy ที่รับสัญญาณความเร็วอ้างอิงกับความเร็วจริงของมอเตอร์	28
3.5	วงจรภายในกล่องไดอะแกรม Fuzzy	28
3.6	อินพุทของค่าความแตกต่างของความเร็ว	29
3.7	แสดงอินพุทของอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าผิดพลาด	30
3.8	เอาท์พุทของตัวตี	30
3.9	Surface Viewer ของฟังก์ชันFuzzy Simulink	31
3.10	วงจรไฟเลี้ยง	32
3.11	dsPIC30F4011	33
3.12	ออกแบบdspic30F4011 โดยโปรแกรมAltium	33
3.13	วงจรบอร์ด PCB	34
3.14	วงจรLCD	34
3.15	วงจร bootstrap	36
3.16	3-phase inverter	37
3.17	วงจรตรวจจับกระแสไฟฟ้า	39
3.18	โปรแกรม Autodesk Fusion 360	39
3.19	แบบจำลองรถไต่ผนัง	40
3.20	แบบจำลองล้อแม่เหล็ก	40
4.1	ผลการจำลองการควบคุมความเร็วแบบ close loop ใน Simulink	41
4.2	มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน	41
4.3	อุปกรณ์การทดสอบมอเตอร์	42
4.4	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวตีไซเคิลกับความเร็วรอบ (rpm)	43
4.5	วงจร frequency to voltage	44
4.6	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดัน (V) กับความเร็วรอบ (rpm)	44
4.7	แรงดันที่ความเร็วรอบ 30 rpm	45
4.8	แรงดันที่ความเร็วรอบ 60 rpm	45
4.9	แรงดันที่ความเร็วรอบ 85 rpm	46
4.10	แรงดันที่ความเร็วรอบ 30 rpm	47
4.11	แรงดันที่ความเร็วรอบ 60 rpm	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

4.12 แรงดันที่ความเร็วรอบ 85 rpm	48
4.13 การรักษาเสถียรภาพ	48
4.14 การเปลี่ยนแปลงความเร็วในระดับต่างๆ	49
4.15 หุ่นยนต์ในขณะไต่ขึ้นผนัง	50
4.16 แอปพลิเคชันที่ใช้ควบคุมหุ่นยนต์	50



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 การดำเนินงาน	2
2.1 ตารางแสดงขั้นตอนการทำงานของHall sensor	11
3.1 การทำงานของ BLDC motor	29
3.2 ค่าความจริงของเทคนิคฟัซซี่	31
4.1 ผลการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน กรณี Open loop	43
4.2 การทดสอบความเร็วมอเตอร์	44
4.3 ผลการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน กรณี Close loop ไม่มีโหลด	46
4.4 ผลการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน กรณี Close loop มีโหลด	48
4.5 การเปลี่ยนแปลงความเร็วในระดับต่างๆ	59



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากในปัจจุบันบริษัทหรือโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ ที่มีการใช้หม้อต้มไอน้ำขนาดใหญ่ สำหรับกระบวนการผลิต แล้วต้องมีการบำรุงรักษาหม้อต้มไอน้ำตามตารางซ่อมบำรุงอยู่เสมอ เช่น ตรวจสอบสภาพประสิทธิภาพของอุปกรณ์ ทำความสะอาดและเคลือบสารที่ผิวของหม้อต้มไอน้ำ โดยมีการตั้งนั่งร้านเพื่อให้คนงานขึ้นไปทำความสะอาดและเคลือบสารที่ผิว ซึ่งต้องใช้งบประมาณสูง อีกทั้งยังเป็นงานที่เสี่ยงต่ออันตรายสำหรับคนงาน

จากที่กล่าวมาจึงได้มีการริเริ่มแนวคิดในการใช้หุ่นยนต์ในการทำงานข้างต้นแทนคน เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว โดยการออกแบบหุ่นยนต์นั้นอาศัยหลักการว่า ผนังของหม้อต้มไอน้ำเป็นเหล็ก จึงได้ใช้ล้อที่เป็นแม่เหล็กเพื่อการเกาะยึดผนังในการเคลื่อนที่ขึ้นไปแทนการใช้แรงงานคน และการขับเคลื่อนหุ่นยนต์ได้มีการเลือกใช้มอเตอร์โดยพิจารณาจากประสิทธิภาพ อายุการใช้งาน เป็นเหตุผลสำคัญเพื่อช่วยลดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาหม้อต้มไอน้ำและหุ่นยนต์ จึงได้เลือกมอเตอร์ชนิดมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านในการขับเคลื่อน โดยออกแบบระบบควบคุมด้วยเทคนิคพีซีแบบซูกินโอะ เพื่อให้ง่ายต่อการออกแบบคำสั่งควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อตอบสนองต่องานที่ทำได้อย่างเหมาะสม

### 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาการทำงานของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านที่ใช้ขับเคลื่อนหุ่นยนต์
2. เพื่อศึกษาระบบควบคุมความเร็วของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านโดยใช้เทคนิคพีซี
3. เพื่อออกแบบลักษณะล้อและส่วนประกอบของหุ่นยนต์ให้เหมาะสมกับลักษณะหม้อต้มไอน้ำ
4. เพื่อออกแบบระบบควบคุมมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน
5. เพื่อศึกษาการใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC30F4011

### 1.3 ขอบเขตการดำเนินการ

1. เพื่อสร้างชุดควบคุมมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านโดยใช้เทคนิคพีซี
2. เพื่อออกแบบการขับเคลื่อนให้หุ่นยนต์ไปในทิศทางที่ต้องการได้
3. เพื่อสร้างชุดควบคุมหุ่นยนต์ที่ควบคุมโดยรีโมทคอนโทรล

### 1.4 แผนการดำเนินงาน

1. ศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับหุ่นยนต์ไต่ผนังหม้อต้มไอน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน
3. ศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับ Inverter 3 phase
4. ศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับวิธีการควบคุมมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านรวมไปถึง ออกแบบขับเคลื่อนมอเตอร์และชุดควบคุมมอเตอร์
5. สร้างแบบจำลองสำหรับหุ่นยนต์ใต้น้ำหม้อต้มไอน้ำ โดยขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน
6. ทำการทดลองชุดขับเคลื่อนมอเตอร์และชุดควบคุมมอเตอร์ พร้อมทั้งปรับปรุงแก้ไขให้มีเสถียรภาพมากที่สุด

### 1.5 ตารางการดำเนินงาน

การดำเนินการ	ก.ค. 2561	ส.ค. 2561	ก.ย. 2561	ต.ค. 2561	พ.ย. 2561	ธ.ค. 2561	ม.ค. 2561	ก.พ. 2561
1.ศึกษาการทำงานของมอเตอร์	←→							
2.จำลองการทำงานของมอเตอร์	←→							
3.ศึกษาการใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์			←→					
4.สร้างชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไร้แปรงถ่าน					←→			
5.สร้างชุดควบคุมมอเตอร์ไร้แปรงถ่าน					←→			
6.สร้างหุ่นยนต์ใต้น้ำ						←→		
7.ปรับปรุงและแก้ไข						←→		
8.จัดทำปริญญานิพนธ์						←→		

←→ ดำเนินการจริง

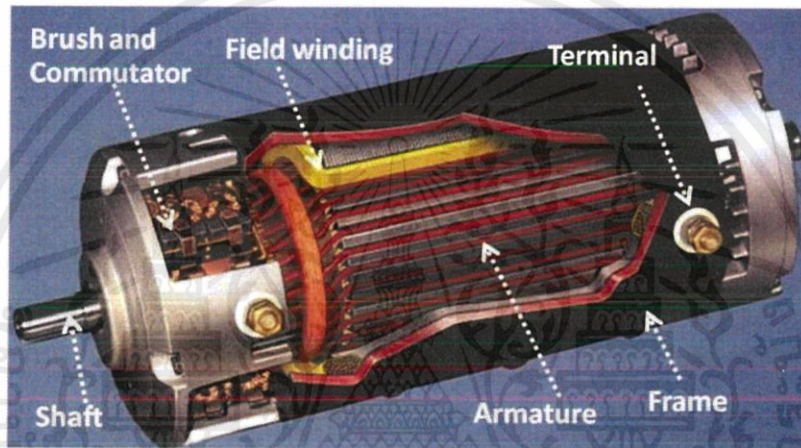
ตารางที่ 1.1 การดำเนินงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC Motor)

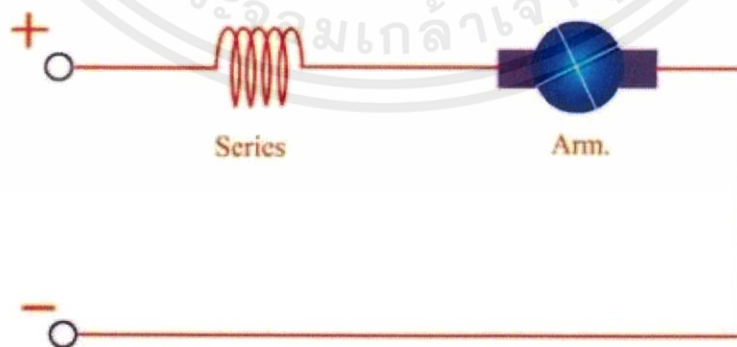
มอเตอร์ไฟฟ้า (Motor) หมายถึงเป็นเครื่องกลไฟฟ้าชนิดหนึ่ง que เปลี่ยนแปลงพลังงานไฟฟ้ามาเป็นพลังงานกล มอเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้พลังงานไฟฟ้าเปลี่ยนเป็นพลังงานกลมีทั้งพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับและพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง [1]



รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

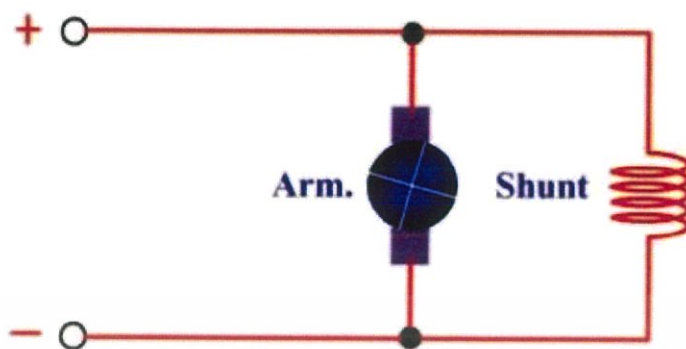
มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (Direct Current Motor) การแบ่งชนิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบ่งออกเป็น 4 ชนิดได้แก่

- 1.) มอเตอร์แบบอนุกรมหรือเรียกว่าซีรี่ส์มอเตอร์ (Series Motor)



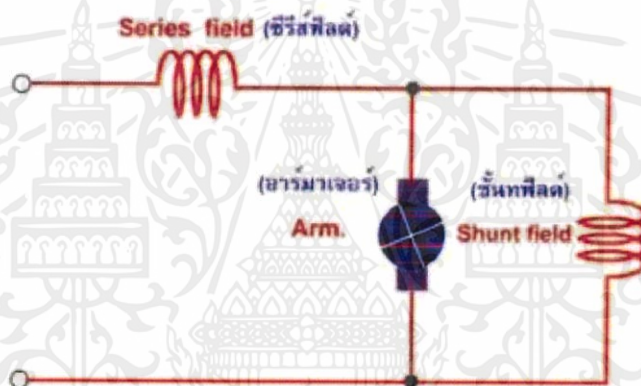
รูปที่ 2.2 วงจรการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรม

2.) มอเตอร์แบบอนุขนานหรือเรียกว่าชัณฑ์มอเตอร์ (Shunt Motor)

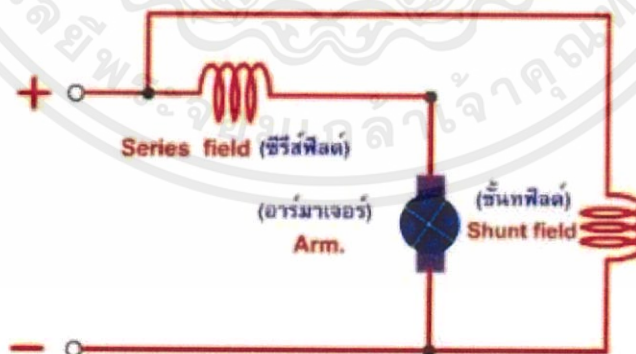


รูปที่ 2.3 วงจรการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนาน

3.) มอเตอร์ไฟฟ้าแบบผสมหรือเรียกว่าคอมปาวด์มอเตอร์ (Compound Motor)

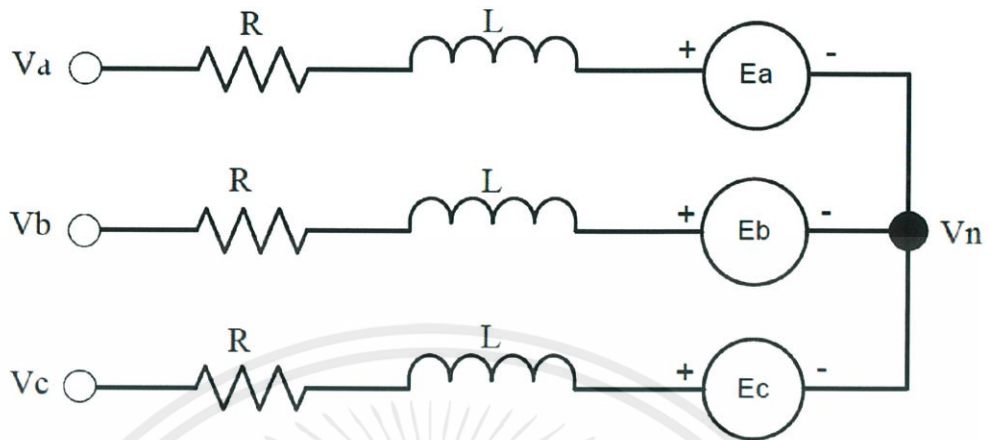


รูปที่ 2.4 วงจรการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบชอร์ตชัณฑ์คอมปาวด์มอเตอร์



รูปที่ 2.5 วงจรการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบลونغชัณฑ์คอมปาวด์มอเตอร์

#### 4.) มอเตอร์ไฟฟ้าไร้แปรงถ่าน (Brushless DC motor)



รูปที่ 2.6 วงจรการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าไร้แปรงถ่าน

##### 2.1.1 ส่วนประกอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

ส่วนประกอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีส่วนประกอบที่สำคัญ 2 ส่วนดังนี้

###### 1. ส่วนที่อยู่กับที่หรือที่เรียกว่าสเตเตอร์ (Stator) ประกอบด้วย

- เฟรมหรือโยค (Frame or Yoke) เป็นโครงภายนอกทำหน้าที่เป็นทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็กจากขั้วเหนือไปขั้วใต้ให้ครบวงจรและยึดส่วนประกอบอื่นๆให้แข็งแรง ทำด้วยเหล็กหล่อหรือเหล็กแผ่นหนาม้วนเป็นรูปทรงกระบอก

- ขั้วแม่เหล็ก (Pole) ประกอบด้วย 2 ส่วนคือ แกนขั้วแม่เหล็กและขดลวด

1.) แกนขั้วแม่เหล็ก (Pole Core) ทำด้วยแผ่นเหล็กบาง ๆ กั้นด้วยฉนวนประกบกันเป็นแท่งยึดติดกับเฟรม ส่วนปลายที่ทำเป็นรูปโค้งนั้นเพื่อโค้งรับรูปกลมของตัวโรเตอร์เรียกว่า ขั้วแม่เหล็ก (Pole Shoes) มีวัตถุประสงค์ให้ขั้วแม่เหล็กและโรเตอร์ใกล้ชิดกันมากที่สุด เพื่อให้เกิดช่องอากาศน้อยที่สุด จะมีผลให้เส้นแรงแม่เหล็กจากขั้วแม่เหล็กผ่านไปยังโรเตอร์มากที่สุด ทำให้เกิดแรงบิดหรือกำลังบิดของโรเตอร์มากทำให้มอเตอร์มีกำลังหมุน

2.) ขดลวดสนามแม่เหล็ก (Field Coil) จะพันอยู่รอบๆแกนขั้วแม่เหล็กขดลวดนี้ทำหน้าที่รับกระแสจากภายนอกเพื่อสร้างเส้นแรงแม่เหล็ก และเส้นแรงแม่เหล็กนี้จะเกิดการหักล้างและเสริมกันกับสนามแม่เหล็กของอามเจอร์ทำให้เกิดแรงบิดขึ้น

2. ตัวหมุน (Rotor) ตัวหมุนหรือเรียกว่าโรเตอร์ตัวหมุนนี้ทำให้เกิดกำลังงานมีแกนวางอยู่ในตลับลูกปืน (Ball Bearing) ซึ่งประกอบอยู่ในแผ่นปิดหัวท้าย (End Plate) ของมอเตอร์ ตัวโรเตอร์ประกอบด้วย 4 ส่วนด้วยกัน คือ

1.) แกนเพลลา (Shaft) เป็นตัวสำหรับยึดคอมมิวเตเตอร์และยึดแกนเหล็กอาร์มาเจอร์(Armature Core) ประกอบเป็นตัวโรเตอร์ แกนเพลลานั้นจะวางอยู่บนแบร์ริงเพื่อบังคับให้หมุนอยู่ในแนวหนึ่งไม่มีการสั่นสะเทือนได้

2.) แกนเหล็กอาร์มาเจอร์ (Armature Core) ทำด้วยแผ่นเหล็กบางอาบฉนวน (Laminated Sheet Steel) เป็นที่สำหรับพันขดลวดอาร์มาเจอร์ซึ่งสร้างแรงบิด (Torque)

3.) คอมมิวเตเตอร์ (Commutator) ทำด้วยทองแดงออกแบบเป็นซี่ แต่ละซี่มีฉนวนไมก้า (mica) คั่นระหว่างซี่ของคอมมิวเตเตอร์ ส่วนหัวซี่ของคอมมิวเตเตอร์จะมีร่องสำหรับใส่ปลายสายของขดลวดอาร์มาเจอร์ ตัวคอมมิวเตเตอร์นี้อัดแน่นติดกับแกนเพลลาเป็นรูปกลมทรงกระบอก มีหน้าที่สัมผัสกับแปรงถ่าน (Carbon Brushes) เพื่อรับกระแสจากสายป้อนเข้าไปยังขดลวดอาร์มาเจอร์ เพื่อสร้างเส้นแรงแม่เหล็กอีกส่วนหนึ่งให้เกิดการหักล้างและเสริมกันกับเส้นแรงแม่เหล็กอีกส่วนซึ่งเกิดจากขดลวดขั้วแม่เหล็กดังกล่าวมาแล้วเรียกว่า ปฏิกริยามอเตอร์ (Motor action)

4.) ขดลวดอาร์มาเจอร์ (Armature Winding) เป็นขดลวดพันอยู่ในร่องสลอต (Slot) ของแกนอาร์มาเจอร์ ขนาดของลวดจะเล็กหรือใหญ่และจำนวนรอบจะมากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับกรออกแบบของตัวโรเตอร์ชนิดนั้นๆ เพื่อที่จะให้เหมาะสมกับงานต่างๆ

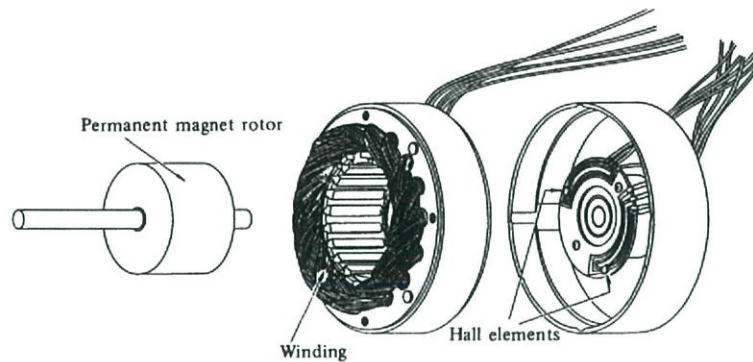
## 2.2 ทฤษฎี Brushless DC motor

มอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน (Brushless DC Motor) เป็นมอเตอร์ไฟฟ้าประเภทซิงโครนัสมอเตอร์ที่มีโรเตอร์เป็นแม่เหล็กถาวร จะใช้หลักการให้วงจรอิเล็กทรอนิกส์จ่ายกระแสให้ขดลวดสเตเตอร์แต่ละเฟสสลับกันไปเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กให้สัมพันธ์กับการหมุนของโรเตอร์ การออกแบบเช่นนี้ทำให้ไม่ต้องมีการใช้แปรงถ่าน(Brush) ทำให้ไม่มีการเสียดสีและลดการบำรุงรักษา มอเตอร์ อีกทั้งยังช่วยให้ไม่มีเสียงและประกายไฟที่เกิดจากแปรงถ่าน ซึ่งที่นิยมใช้จะเป็นมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านแบบ 3 เฟส โครงสร้างประกอบไปด้วย [1]

1. สเตเตอร์(Stator) โครงสร้างเหมือนกับมอเตอร์ซิงโครนัส ซึ่งมีขดลวดพันอยู่รอบแบบการพันมี 2 รูปแบบด้วยกันคือ การพันแบบกระจุกตัว(Concentrated Winding) กับการพันขดลวดแบบกระจายตัว(Distributed Winding)

2. โรเตอร์(Rotor) ประกอบไปด้วยแม่เหล็กถาวร(Permanent Magnet) อย่างน้อย 1 คู่

3. ตัวตรวจจับตำแหน่งที่โรเตอร์ ทำหน้าที่ตรวจจับตำแหน่งที่โรเตอร์ แล้วแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้า เพื่อควบคุมการทำงานของสวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังให้จ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าแต่ละเฟสให้สัมพันธ์กับขั้วของโรเตอร์ การตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ที่นิยมมีอยู่ด้วยกัน 2 วิธีคือ การตรวจจับด้วยฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์(Hall Effect Sensor) มักจะติดอยู่ส่วนหลังของมอเตอร์ ซึ่งติดอยู่ 3 ตัว ทำมุมห่างกัน 120 องศา และอีกวิธีคือ หาตำแหน่งจุดผ่านศูนย์กลางของแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับโดยวิธี Back EMF Based Method หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า วิธี Sensorless



รูปที่ 2.7 Brushless DC Motor

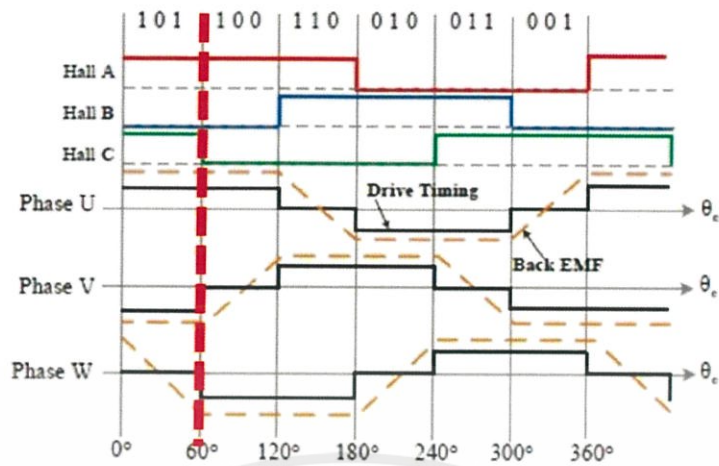
### 2.2.1 หลักการทำงาน Brushless DC motor ด้วยเซนเซอร์

ปัจจัยที่ทำให้มอเตอร์ทำงานหรือหมุนได้นั้น คือขดลวด 3 เฟสที่ Stator วัดตำแหน่งแม่เหล็กถาวรที่ Rotor และอุปกรณ์ตรวจจับขั้วแม่เหล็ก 3 ขั้ว (Hall sensor) โดยติดตั้งเป็นส่วนหนึ่งของ Stator ซึ่งทำหน้าที่แทนแปรงถ่านและ คอมมิวเตเตอร์ (Commutator) โดยขณะที่มอเตอร์หมุนจะส่งสัญญาณ (Code) ที่เปลี่ยนแปลงไปยังกล่องควบคุมมอเตอร์ เพื่อทำการเปลี่ยนแปลงหรือถอดรหัส (Decode) และส่ง Output voltage ไปยังขดลวด Stator อย่างละเฟส เพื่อให้เกิดการดูดและผลักกันระหว่างขั้วแม่เหล็กใน Rotor

ลักษณะการต่อมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน ปกติแล้วจะมีอุปกรณ์ในการตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์แบบฮอลล์เซนเซอร์ (Hall effect sensor) ลักษณะการนำไปใช้งานประเภทนี้จะต้องประกอบไปด้วยวงจรควบคุมสำหรับขับเคลื่อนอินเวอร์เตอร์สามเฟส และยังมีอีกวิธีสำหรับขับเคลื่อนโดยไม่ต้องอาศัยการตรวจจับตำแหน่ง ซึ่งในการศึกษานี้จะใช้วิธีการควบคุมด้วยการตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์แบบฮอลล์เซนเซอร์ (Hall effect sensor)

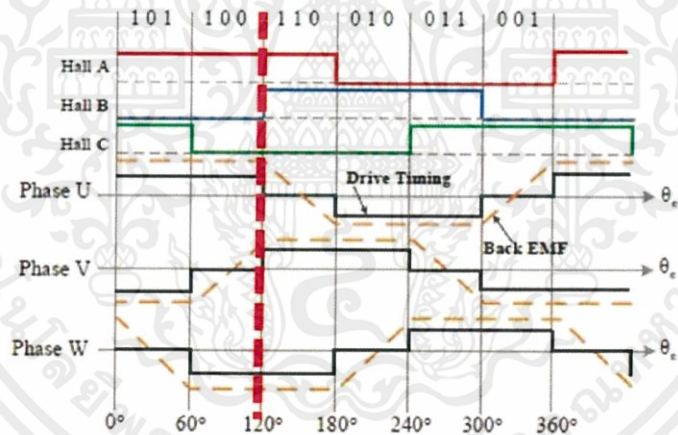
การทำงานของ Hall Effect Sensor ทั้ง 3 ตัวจะทำหน้าที่เหมือนคอมมิวเตเตอร์ (Commutator) โดยจะส่งสัญญาณทำให้กล่องควบคุมตัดต่อและสลับขั้วบวกขั้วลบของแรงดันที่เข้าขดลวด Stator แต่ละเฟส ที่ทำให้ Rotor หมุน ซึ่งการศึกษานี้จะพิจารณาการหมุนมอเตอร์ในทิศทางตามเข็มนาฬิกา โดยลักษณะการทำงานจะมี 6 ขั้นตอน ดังนี้

การทำงานของ Hall Sensor ลำดับที่ 1 คือ Hall A และ Hall C จะตรวจเจอขั้วแม่เหล็ก จากนั้นจะส่งผลตรวจไปยังส่วน Controller โดยมีสัญญาณการทำงานเป็น 1 0 1 และจ่ายไฟ +Vdc ให้กลับ เฟส U และจ่ายไฟ -Vdc ให้กลับเฟส V



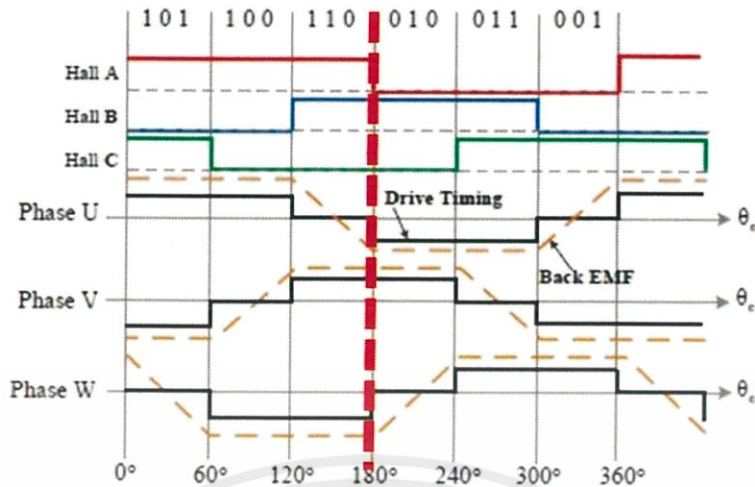
รูปที่ 2.8 การทำงานของHall sensorลำดับที่ 1

การทำงานของ Hall Sensor ลำดับที่ 2 คือ Hall A จะตรวจเจอขั้วแม่เหล็ก จากนั้นจะส่งผลตรวจไปยังส่วน Controller โดยมีสัญญาณการทำงานเป็น 1 0 0 และจ่ายไฟ +Vdc ให้กลับ เฟส U และจ่ายไฟ -Vdc ให้กลับเฟส W



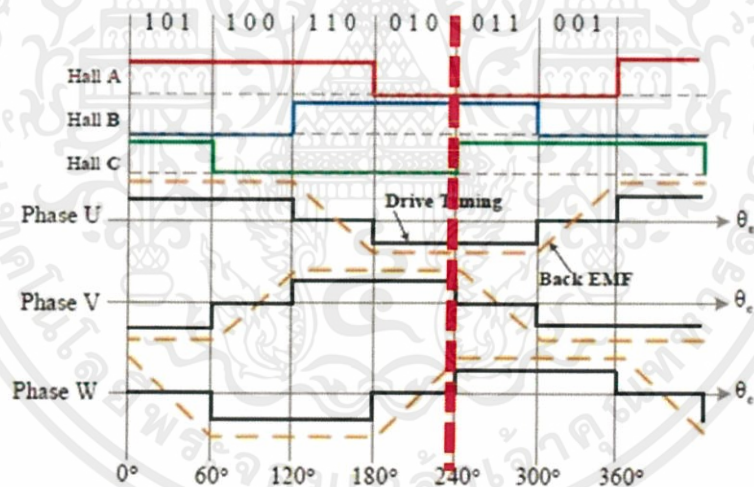
รูปที่ 2.9 การทำงานของHall sensorลำดับที่ 2

การทำงานของ Hall Sensor ลำดับที่ 3 คือ Hall A และ Hall B จะตรวจเจอขั้วแม่เหล็ก จากนั้นจะส่งผลตรวจไปยังส่วน Controller โดยมีสัญญาณการทำงานเป็น 1 1 0 และจ่ายไฟ +Vdc ให้กลับ เฟส V และจ่ายไฟ -Vdc ให้กลับเฟส W



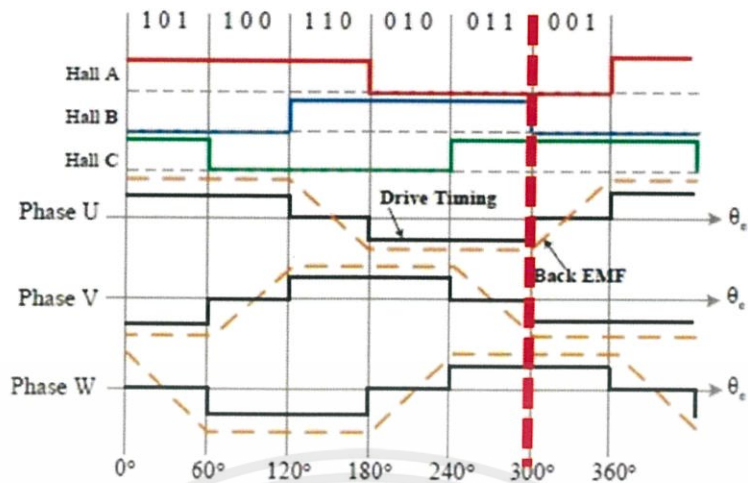
รูปที่ 2.10 การทำงานของHall sensorลำดับที่ 3

การทำงานของ Hall Sensor ลำดับที่ 4 คือ Hall B จะตรวจเจอขั้วแม่เหล็ก จากนั้นจะส่งผลตรวจไปยังส่วน Controller โดยมีสัญญาณการทำงานเป็น 0 1 0 และจ่ายไฟ +Vdc ให้กลับ เฟส V และจ่ายไฟ -Vdc ให้กลับเฟส U



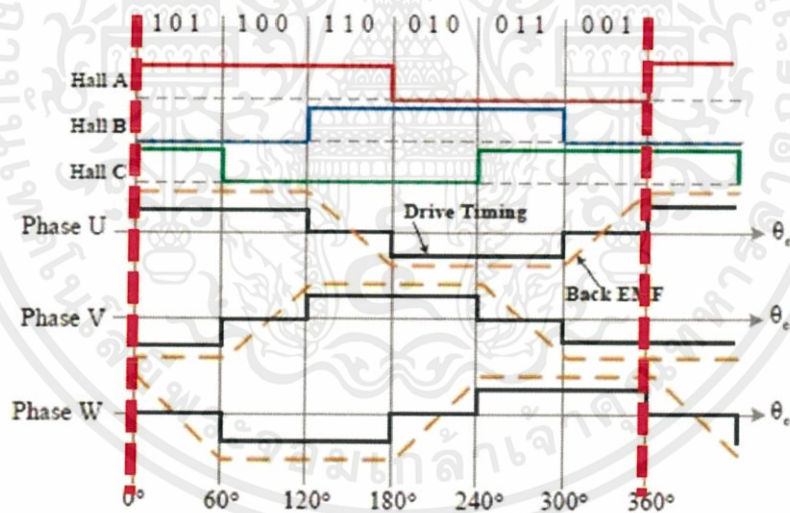
รูปที่ 2.11 การทำงานของHall sensorลำดับที่ 4

การทำงานของ Hall Sensor ลำดับที่ 5 คือ Hall B และ Hall C จะตรวจเจอขั้วแม่เหล็ก จากนั้นจะส่งผลตรวจไปยังส่วน Controller โดยมีสัญญาณการทำงานเป็น 0 1 1 และจ่ายไฟ +Vdc ให้กลับ เฟส W และจ่ายไฟ -Vdc ให้กลับเฟส U



รูปที่ 2.12 การทำงานของHall sensorลำดับที่ 5

การทำงานของ Hall Sensor ลำดับที่ 6 คือ Hall C จะตรวจเจอขั้วแม่เหล็ก จากนั้นจะส่งผลตรวจจับไปยังส่วน Controller โดยมีสัญญาณการทำงานเป็น 0 0 1 และจ่ายไฟ +Vdc ให้กลับ เฟส W และจ่ายไฟ -Vdc ให้กลับเฟส V



รูปที่ 2.13 การทำงานของHall sensorลำดับที่ 6

จากการทำงานของสัญญาณHall Sensor ทั้ง 6 ขั้นตอนดังกล่าว จะสามารถเขียนเป็นตารางความสัมพันธ์ได้ดังนี้

ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงขั้นตอนการทำงานของHall sensor

Hall a	Hall b	Hall c	EMF U	EMF V	EMF W	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6
1	0	1	+Vdc	- Vdc	-	1	0	0	1	0	0
1	0	0	+ Vdc	-	- Vdc	1	0	0	0	0	1
1	1	0	-	+ Vdc	- Vdc	0	0	1	0	0	1
0	1	0	- Vdc	+ Vdc	-	0	1	1	0	0	0
0	1	1	- Vdc	-	+ Vdc	0	1	0	0	1	0
0	0	1	-	- Vdc	+ Vdc	0	0	0	1	1	0

## 2.2.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน

จะได้สมการของชุดขดลวดในตัวแปรเฟส

$$V_a = Ri_a + L di_a / dt + e_a \quad (2.1)$$

$$V_b = Ri_b + L di_b / dt + e_b$$

(2.2)

$$V_c = Ri_c + L di_c / dt + e_c \quad (2.3)$$

โดย

$V_a, V_b, V_c$  คือ แรงดันเฟสของสเตเตอร์เทียบกับจุด N (V)

$i_a, i_b, i_c$  คือ กระแสเฟสของเฟสของสเตเตอร์ (A)

R คือ ความต้านทานสเตเตอร์ (Ohm)

L คือ ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดในแต่ละเฟส รวมกับความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างเฟส (H)

$e_a, e_b, e_c$  คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับของแต่ละเฟส (V)

$$e_a = K_w \omega_m f_a(\theta) \quad (2.4)$$

$$e_b = K_w \omega_m f_b(\theta) \quad (2.5)$$

$$e_c = K_w \omega_m f_c(\theta) \quad (2.6)$$

โดย

$K_w$  คือ ค่าคงที่ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ ( V/(rad/s) )

$\omega_m$  คือ ความเร็วที่โรเตอร์ (rad/s)

$f_a(\theta), f_b(\theta), f_c(\theta)$  คือ ฟังก์ชันของเฟสนั้นๆที่ขึ้นกับค่ามุมของโรเตอร์ โดยจะมีค่าในแต่ละมุมดังนี้

$$f_a(\theta) = \begin{cases} \left(\frac{6}{\pi}\right)\theta & (0 < \theta < \pi/6) \\ 1 & (\pi/6 < \theta < 5\pi/6) \\ -\left(\frac{6}{\pi}\right)\theta + 6 & (5\pi/6 < \theta < 7\pi/6) \\ -1 & (7\pi/6 < \theta < 11\pi/6) \\ \left(\frac{6}{\pi}\right)\theta - 12 & (11\pi/6 < \theta < 2\pi) \end{cases} \quad (2.7)$$

$$f_b(\theta) = \begin{cases} -1 & (0 < \theta < \pi/2) \\ \left(\frac{6}{\pi}\right)\theta - 4 & (\pi/2 < \theta < 5\pi/6) \\ 1 & (5\pi/6 < \theta < 9\pi/6) \\ -\left(\frac{6}{\pi}\right)\theta + 10 & (9\pi/6 < \theta < 11\pi/6) \\ 1 & (11\pi/6 < \theta < 2\pi) \end{cases} \quad (2.8)$$

$$f_c(\theta) = \begin{cases} 1 & (0 < \theta < \pi/6) \\ -\left(\frac{6}{\pi}\right)\theta + 2 & (\pi/6 < \theta < \pi/2) \\ -1 & (\pi/2 < \theta < 7\pi/6) \\ \left(\frac{6}{\pi}\right)\theta - 8 & (7\pi/6 < \theta < 9\pi/6) \\ 1 & (9\pi/6 < \theta < 2\pi) \end{cases} \quad (2.9)$$

จากสมการ (2.7) - (2.9) จะเห็นว่าค่าของฟังก์ชันเมื่อโรเตอร์หมุนครบรอบจะเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมู จึงทำให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมูตามไปด้วย

สมการกำลังไฟฟ้าและแรงบิดของมอเตอร์เป็นไปตามสมการ 2.10 และ 2.11 ตามลำดับ

$$P_e = V_a i_a + V_b i_b + V_c i_c \quad (2.10)$$

$$\tau = P_e / \omega_m \quad (2.11)$$

โดย  $P_e$  คือ กำลังไฟฟ้าของมอเตอร์(W)

$\tau$  คือ แรงบิดของมอเตอร์(Nm)

จะเห็นว่า กำลังไฟฟ้าจะขึ้นกับแรงดันกับกระแสไฟฟ้าโดยในการควบคุมสามารถปรับได้เพียงค่าแรงดันไฟฟ้าจึงจะเพิ่มกระแสไฟฟ้าได้ แล้วแรงบิดของมอเตอร์จะแปรผกผันกับความเร็วของมอเตอร์และจะแปรผันกับกำลังไฟฟ้า

## 2.3 หลักการทำงาน inverter

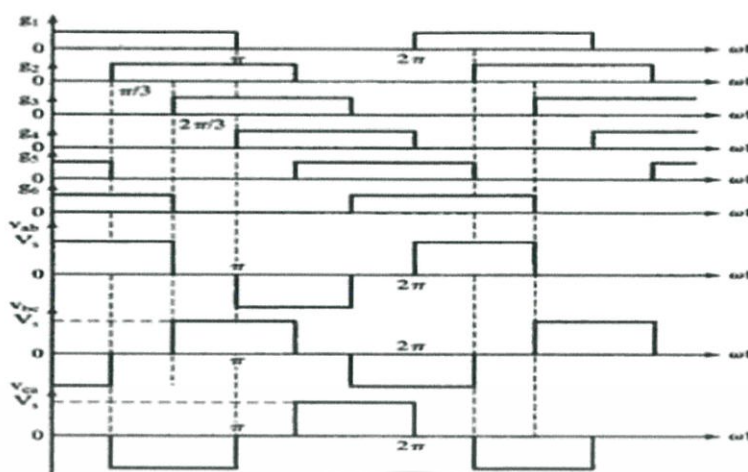
อินเวอร์เตอร์(inverter) คือ วงจรแปลงผันพลังงานไฟกระแสดตรงให้เป็นกระแสสลับ เพื่อให้ได้แรงดันไฟสลับที่มีค่าแรงดันคงที่หรือปรับค่าได้ หรือ เพื่อให้ได้ความถี่ไฟสลับเอาต์พุตให้มีค่าคงที่หรือปรับค่าได้ โดยใช้หลักการปรับค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสดตรงด้านอินพุต หรือใช้หลักการควบคุมเทคนิคการสวิตช์ภายในตัวอินเวอร์เตอร์ เช่น เทคนิคแบบมอดูเลตความกว้างพัลส์(PWM) ซึ่งในการศึกษานี้ใช้เทคนิคนี้ เป็นต้น สำหรับอินเวอร์เตอร์ที่ใช้งานควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส จะใช้หลักการควบคุมอัตราส่วนจองแรงดันเอาต์พุตและความถี่เอาต์พุตคงที่ ก็อาจใช้อินเวอร์เตอร์ที่ควบคุมการเปิด-ปิด สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังด้วยวิธีที่ไม่ซับซ้อน เช่น วิธีมอดูเลตแบบ 180 องศา หรือแบบ 120 องศา เป็นต้น สำหรับรูปคลื่นจองแรงดันเอาต์พุตไฟสลับของอินเวอร์เตอร์ในอุดมคติ คือรูปคลื่นไซน์ แต่ในทางปฏิบัตินั้นจะไม่ใช้รูปคลื่นไซน์แต่จะเป็นรูปสี่เหลี่ยมหรือสี่เหลี่ยมคางหมู

เนื่องจากอินเวอร์เตอร์มีอินพุตเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสดตรง ซึ่งมาจากแบตเตอรี่หรือแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสดตรง หรือ แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ ดังนั้น เมื่อพิจารณาการเชื่อมโยงด้านอินพุตของอินเวอร์เตอร์ แบ่งออกได้ 3 รูปแบบ คือ อินเวอร์เตอร์แบบป้อนด้วยแรงดัน(VFI : Voltage-Fed Inverter , VSI : Voltage Source Inverter) อินเวอร์เตอร์แบบป้อนด้วยกระแส(CFI : Current-Fed Inverter , CSI : Current Source Inverter) และ อินเวอร์เตอร์แบบป้อนแรงดันไฟตรงปรับค่าได้(Variable DC Linked Inverter) [2]

### 2.3.1 อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส แบบขับเคลื่อน

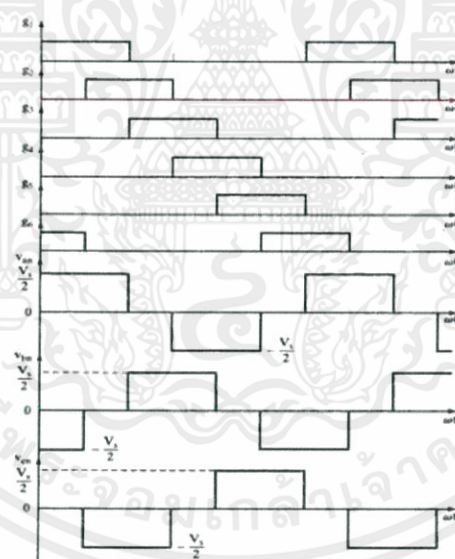
อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส ประกอบไปด้วยสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง 6 ตัว คือ สวิตช์  $S_1$  และ  $S_2$  ต่ออยู่กับเอาต์พุตเฟสที่ 1(U) สวิตช์  $S_3$  และ  $S_4$  ต่อกับเอาต์พุตของเฟสที่ 2(V) และ สวิตช์  $S_5$  และ  $S_6$  ต่อกับเอาต์พุตของเฟสที่ 3(W) โดยโหลดทั้ง 3 เฟสต่อด้านเอาต์พุตที่ขั้ว U,V,W ส่วนสัญญาณสำหรับควบคุมการเปิด-ปิดสวิตช์  $S_1 - S_6$  สามารถควบคุมให้สวิตช์แต่ละตัวทำงานได้ 2 แบบ คือ แบบนำกระแส 180 องศา ( $180^\circ$  Conduction) และ แบบนำกระแส 120 องศา ( $120^\circ$  Conduction) สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในวงจร คือ มอสเฟส(MOSFET)( $S_1 - S_6$ ) และ ไดโอด ( $D_1 - D_6$ ) [2]

1.อินเวอร์เตอร์ 3 เฟสแบบนำกระแส  $120^\circ$  เมื่อควบคุมให้สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังแต่ละตัวนำกระแสแต่ละ  $120^\circ$  โดยใช้สัญญาณควบคุมการเปิด - ปิดเกตของมอสเฟตตามลำดับ จะพบว่ามอสเฟต 2 ตัว ทำงานพร้อมกันในแต่ละช่วงตามลำดับดังนี้  $S_1S_4, S_1S_6, S_3S_2, S_3S_6, S_5S_2, S_5S_4$  จึงได้รูปคลื่นแรงดันคร่อมโหลดระหว่างเฟส  $V_{1N}, V_{2N}, V_{3N}$  ซึ่งการศึกษาจะใช้อินเวอร์เตอร์ชนิดนี้



รูปที่ 2.14 อินเวอร์เตอร์ 3 เฟสแบบนำกระแส  $120^\circ$

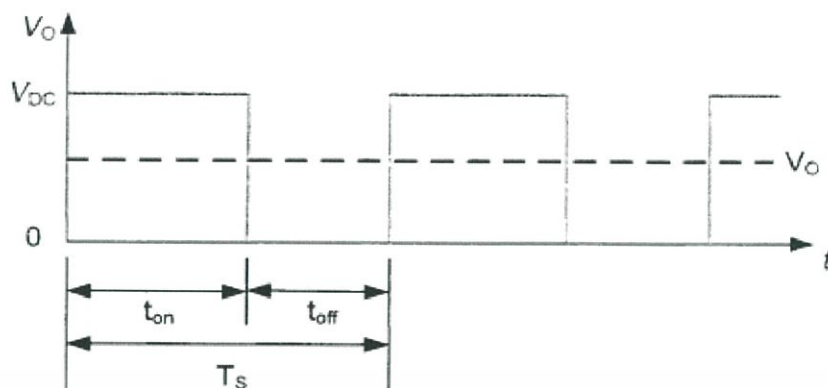
2.อินเวอร์เตอร์ 3 เฟสแบบนำกระแส  $180^\circ$  จากอินเวอร์เตอร์เมื่อสร้างสัญญาณควบคุมการเปิด - ปิด มอสเฟตให้สวิทซ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังแต่ละตัวนำกระแสแต่ละ  $180^\circ$  ในการทำงานใน 1 วัฏจักรไฟสลัبد้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์จะมีมอสเฟตทำงานพร้อมกัน 3 ตัวตามลำดับ



รูปที่ 2.15 อินเวอร์เตอร์ 3 เฟสแบบนำกระแส  $180^\circ$

## 2.4 Pulse Width Modulation (PWM)

Pulse Width Modulation (PWM) ทำหน้าที่ในการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยขาออกที่แรงดันไฟฟ้าเข้าคองที่ โดยใช้เพาเวอร์สวิทซ์เพื่อเปลี่ยนแปลงเอาต์พุต dc ที่ให้โหลดที่แสดงดังภาพ



รูปที่ 2.16 แรงดันไฟฟ้าขาออกของPWM

โดย  $T_{on}$  คือ เวลาที่สวิตช์ปิด(ทำงาน)ระหว่างที่แหล่งจ่ายกระแสตรงจ่ายให้โหลด,  $T_{off}$  คือ เวลาที่สวิตช์เปิด(ไม่ทำงาน) ลักษณะการเปลี่ยนของ inverter ทำให้ค่าแรงดันเฉลี่ยที่เอาต์พุตเปลี่ยนไป ช่วงเวลาการทำงานของการสวิตช์ ( $T_s$ ) เป็นผลรวมของเวลาทำงานและเวลาไม่ทำงาน PWM จะเป็นไปตามลักษณะของช่วงเวลาเปลี่ยน ถ้าช่วงเวลาสวิตช์ทำงานเปลี่ยนไป จะเป็นการควบคุม PWM แบบเปลี่ยนแปลงความถี่ ในทางกลับกันถ้าช่วงเวลาสวิตช์ทำงานเป็นค่าคงที่เรียกว่า การควบคุม PWM แบบความถี่คงที่

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าเข้ากับแรงดันขาออกเป็นฟังก์ชันของเวลาที่สวิตช์ทำงานและเวลาไม่ทำงาน พารามิเตอร์ที่เรียกว่า duty ratio (D) หมายถึงอัตราส่วนของระยะเวลาในการทำงานกับช่วงเวลาของสวิตช์ ตามที่กำหนดโดยสมการ 2.12

$$D = \frac{t_{on}}{T_s} \quad (2.12)$$

การรวมเอาต์พุตของแรงดันไฟฟ้าในช่วงเวลาหนึ่ง ๆ จะทำให้เกิดความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตกับขาออก

$$V_o = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} V_o(t) dt \quad (2.13)$$

$$V_o = \frac{t_{on}}{T_s} V_{dc} \quad (2.14)$$

แทนสมการ 2.12 ใน 2.14 จะได้

$$V_o = D \cdot V_{dc} \quad (2.15)$$

วิธีหนึ่งในการขจัดความดันไฟฟ้าสูงในช่วงเวลาเปิดปิดคือการอนุญาตให้กระแสไฟฟ้าลดลงไปที่ศูนย์ในอัตราที่ช้า ไดโอดถูกนำมาใช้ในวงจรเพื่อให้กระแสไฟฟ้าในระหว่างการไม่ทำงาน ไดโอดเรียกว่า freewheeling diode เนื่องจากกระแสที่ผ่าน freewheeling จะลดลงเหลือศูนย์

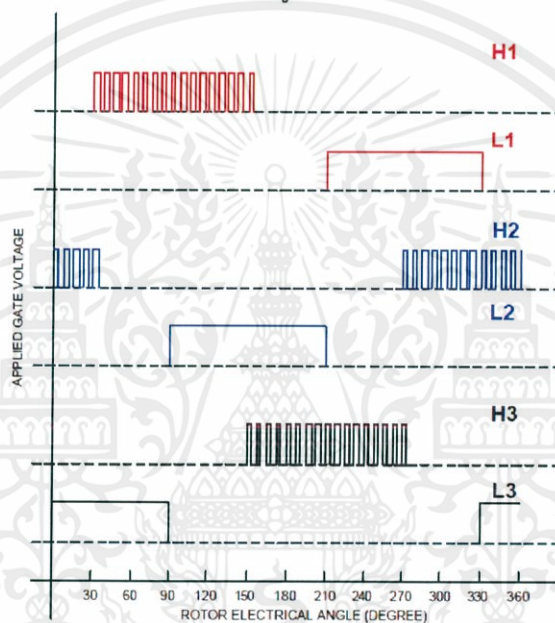
วิธีที่คณะผู้จัดทำได้ทำการศึกษา คือ การนำช่วง  $T_{on}$  ของมอสเฟต(สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ทำการ PWM อีกที เพื่อเสมือนลดแรงดันไฟฟ้าระหว่าง inverter จากความสัมพันธ์ 2.15)

## 2.5 เทคนิคในการควบคุม inverter ด้วย PWM

ในส่วนนี้จะอธิบายถึง ความแตกต่างของเทคนิควิธีการควบคุม inverter ด้วย PWM

### 2.5.1 เทคนิคการสวิตช์แบบ 120 องศา (120 degree switching)

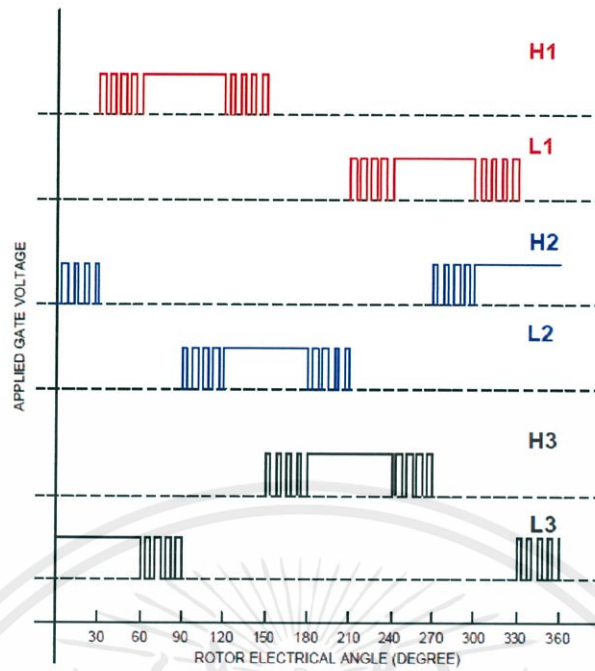
เทคนิคนี้มอสเฟตจะทำงานอย่างละ 1 คู่ โดยมอสเฟตฝั่ง high จะทำงานพร้อมกับมอสเฟตฝั่ง low ซึ่งจะทำงาน 120 องศา ซึ่งจะควบคุม PWM ที่มอสเฟตฝั่ง high เท่านั้น ซึ่งงานวิจัยนี้จะใช้เทคนิคนี้ เนื่องจาก เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมสูงและเกิดความเสียหายต่อมอสเฟตได้ยาก



รูปที่ 2.17 120 degree switching

### 2.5.2 เทคนิคการสวิตช์แบบ 60 องศา (60 degree switching)

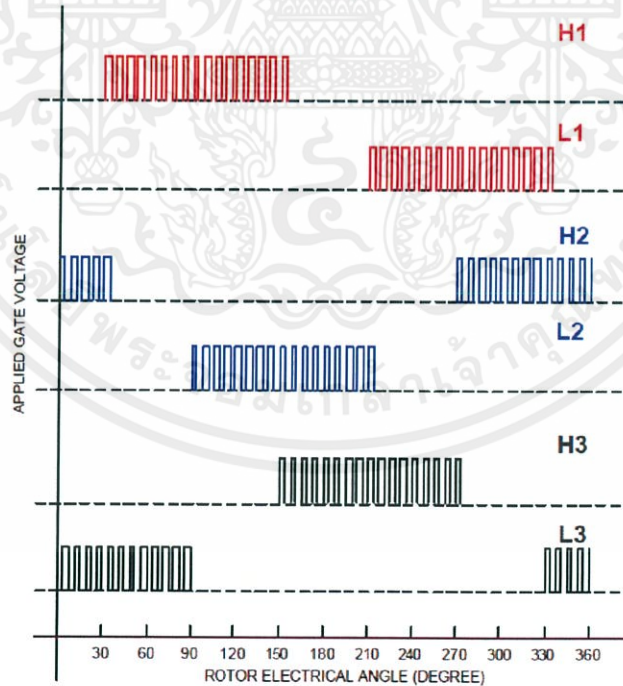
เทคนิคนี้มอสเฟตจะทำงาน(สวิตช์)อย่างละ 1 คู่ โดยมอสเฟตฝั่ง high จะทำงานพร้อมกับมอสเฟตฝั่ง low ซึ่งจะทำงาน 60 องศา ซึ่งจะควบคุม PWM ที่มอสเฟตฝั่ง high เท่านั้น



รูปที่ 2.18 60 degree switching

### 2.5.3 เทคนิคการสวิตช์แบบฮาร์ด (Hard switching)

เทคนิคนี้ จะควบคุมPWM ที่มอสเฟตฝั่งhighและฝั่งlow ในเทคนิคนี้ ข้อเสีย คือ มอสเฟตทั้ง6ตัว จะทำงานหนัก ทำให้เกิดความร้อนสูงและเสียหายได้ง่าย



รูปที่ 2.19 Hard switching

## 2.6 รูปแบบของหุ่นยนต์ใต้น้ำ

หุ่นยนต์ใต้น้ำมีการติดตั้งแม่เหล็กถาวรสองรูปแบบได้แก่ การติดตั้งบนลำตัวและการติดตั้งที่ล้อ ซึ่งมีโครงสร้างและลักษณะการขับเคลื่อนหุ่นยนต์แตกต่างกัน [6]

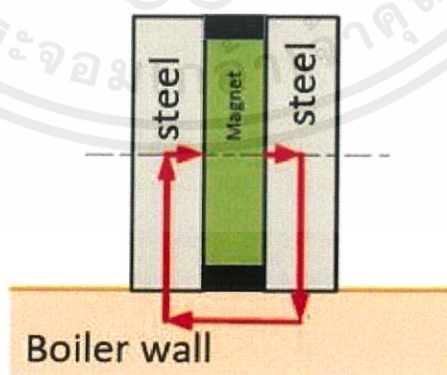
### 2.6.1 หุ่นยนต์ที่ติดตั้งแม่เหล็กถาวรบนลำตัว

แม่เหล็กถาวรถูกติดตั้งไว้ที่ด้านใต้ของลำตัวหุ่นยนต์ โดยให้แม่เหล็กมีระยะห่างจากผนังเหล็กเล็กน้อย เพื่อไม่ให้ช่องว่างระหว่างแม่เหล็กกับผนังเหล็กมากจนทำให้แรงดึงดูดเหล็กน้อยเกินไป การติดตั้งแม่เหล็กลักษณะนี้มีข้อดีคือ หุ่นยนต์ยังคงสามารถยึดเกาะกับผนังเหล็กได้โดยไม่ขึ้นอยู่กับความสะอาดของผนังเหล็ก แต่ก็มีข้อเสียคือ แรงดึงดูดแม่เหล็กแรงสูงอาจทำให้โครงสร้างของหุ่นยนต์เสียรูปได้ ดังนั้นโครงสร้างของหุ่นยนต์จะต้องถูกออกแบบให้มีความแข็งแรงเป็นพิเศษ

### 2.6.2 หุ่นยนต์ที่ติดตั้งแม่เหล็กถาวรที่ล้อ

การติดตั้งแม่เหล็กที่ล้อของหุ่นยนต์ใต้น้ำมีข้อดีคือ แม่เหล็กสัมผัสกับผนังเหล็กโดยตรงจึงทำให้ไม่มีช่องว่างระหว่างแม่เหล็กกับผนังเหล็กและเกิดแรงดึงดูดสูง แต่หุ่นยนต์จะสามารถยึดเกาะบนผนังที่มีความสะอาดพอสมควรเท่านั้น เช่น ไม่มีเศษผงเหล็กเกาะบนผนัง มิเช่นนั้นแม่เหล็กอาจดูดผงเหล็กไว้ เมื่อล้อกลิ้งทับผงเหล็กเหล่านั้น ล้อจะไม่สัมผัสกับผนัง ช่องว่างระหว่างแม่เหล็กกับผนังที่เกิดขึ้นจะทำให้แรงดึงดูดแม่เหล็กน้อยลงและอาจทำให้หุ่นยนต์ไม่สามารถยึดเกาะกับผนังเหล็กได้

นอกจากการติดตั้งแม่เหล็กถาวรที่ล้อเพื่อให้สัมผัสกับผนังเหล็กโดยตรงแล้ว ยังสามารถติดตั้งแม่เหล็กให้อยู่ภายในล้อหุ่นยนต์ซึ่งเรียกว่า ล้อแม่เหล็ก (Magnetic wheel) โดยมีลักษณะภายนอกดังรูปที่ 2.19 การติดตั้งแม่เหล็กลักษณะนี้ทำให้แรงดึงดูดเพิ่มมากขึ้นกว่าการดึงดูดด้วยแม่เหล็กเพียงอย่างเดียว โดยใช้พื้นที่ในการติดตั้งน้อย (เนื่องจากเป็นส่วนหนึ่งของล้อ) ดังนั้นทางคณะผู้จัดทำจึงเลือกรูปแบบนี้ในงานวิจัย



รูปที่ 2.20 ลักษณะของล้อแม่เหล็ก

## 2.7 ล้อแม่เหล็ก

ล้อแม่เหล็กโดยทั่วไปมีโครงสร้างคือ แม่เหล็กถาวรและแผ่นเหล็กที่ประกอบเข้ากับทั้งสองด้านของแม่เหล็ก (ขั้วเหนือและขั้วใต้ของแม่เหล็ก) โดยที่แผ่นเหล็กจะต้องมีเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่าแม่เหล็กวงแหวนเล็กน้อยเพื่อให้วงจรแม่เหล็ก (Magnetic circuit) ของล้อแม่เหล็กมีลักษณะดังรูปที่ 2.19 ล้อแม่เหล็กที่มีโครงสร้างรูปแบบนี้จะทำให้ฟลักซ์แม่เหล็กส่วนใหญ่อยู่ภายในแผ่นเหล็กและผนังเหล็ก เพราะวัสดุเหล็กมีค่าความสามารถในการให้สนามแม่เหล็กซึมผ่านสัมพัทธ์เท่ากับ 100 ในขณะที่อากาศมีค่านี้เท่ากับ 1 ฟลักซ์แม่เหล็กจึงไม่ฟุ้งกระจายในอากาศแต่จะถูกส่งผ่านแผ่นเหล็กด้านขั้วเหนือของแม่เหล็กไปยังผนังเหล็กและกลับเข้าสู่แผ่นเหล็กด้านขั้วใต้ของแม่เหล็ก รูปแบบของวงจรแม่เหล็กนี้จึงส่งผลให้แรงดึงดูดของล้อแม่เหล็กกับผนังเหล็กมากกว่าการใช้แม่เหล็กเพียงอย่างเดียว [6]

## 2.8 ตรรกศาสตร์ฟัซซี(Fuzzy logic)

ฟัซซีลอจิกเป็นตรรกะที่อยู่บนพื้นฐานความเป็นจริง ที่ว่า ทุกสิ่งบนโลกแห่งความเป็นจริงไม่ใช่มีเฉพาะสิ่งมีความแน่นอนเท่านั้น แต่มีหลายสิ่งหลาย เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นอย่างไม่เที่ยงและไม่แน่นอน (uncertain) อาจเป็นสิ่งที่คลุมเครือ (fuzzy) ไม่ใช่ ชัดเจน (exact) ยกตัวอย่างเช่น เซตของอายุคน อาจแบ่งเป็น วัยทารก วัยเด็ก วัยรุ่น วัยกลางคน และวัย ชรา จะเห็นได้ว่าในแต่ละช่วงอายุคนไม่สามารถระบุได้แน่ชัดว่าวัยทารกกับวัย เด็กแยกจากกันแน่ชัด ช่วงใด วัยทารกอาจถูกตีความว่าเป็นอายุระหว่าง 0 ถึง 1 ปี บางคนอาจตีความว่าวัยทารกอยู่ในช่วงอายุ 0 ถึง 2 ปี ในทำนองเดียวกัน วัยเด็กและวัยรุ่น ก็ไม่สามารถระบุได้ชัดเจนว่าช่วงต่อของอายุควรจะอยู่ในช่วงใด อาจตีความว่าวัยเด็กมีอายุอยู่ในช่วง 1 ถึง 12 ปี หรืออาจเป็น 2 ถึง 10 ปี เป็นต้น สิ่งเหล่านี้เป็น ตัวอย่างของความไม่แน่นอน ซึ่งเป็นลักษณะทางธรรมชาติที่เกิดขึ้นทั่วไป เซตของเหตุการณ์ที่ไม่ แน่นนอนเช่นนี้ เรียกว่า ฟัซซีเซต (fuzzy set)

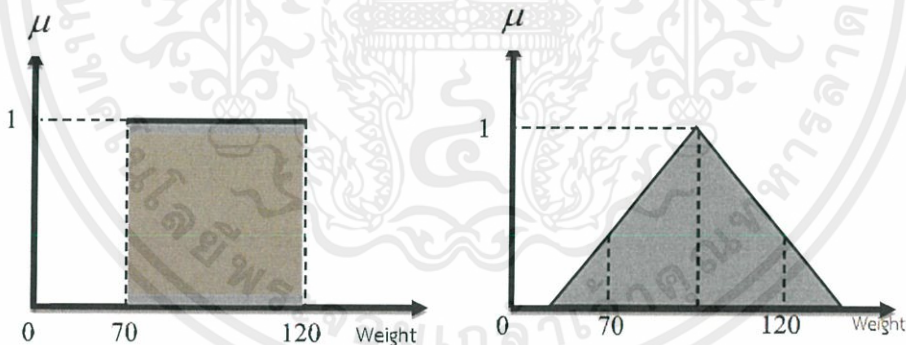
ตรรกะแบบฟัซซี(fuzzy logic) เป็นเครื่องมือที่ช่วยในการตัดสินใจภายในได้ความไม่แน่นอนของข้อมูลโดยยอมให้มีความยืดหยุ่นได้ ใช้หลักเหตุผลที่คล้ายการเลียนแบบวิถีความคิดที่ซับซ้อนของมนุษย์ ฟัซซีลอจิก มีลักษณะที่พิเศษกว่าตรรกะแบบจริงเท็จ (Boolean logic) เป็นแนวคิด ที่มีการต่อขยายในส่วนของความจริง(partial true) โดยค่าความจริงจะอยู่ในช่วงระหว่างจริง (completely true) กับเท็จ(completely false) ส่วนตรรกศาสตร์เดิมจะมีค่าเป็นจริงกับเท็จเท่านั้น [9]



รูปที่ 2.21 การเปรียบเทียบบูลีนลอจิกกับฟัซซีลอจิก

### 2.8.1 ฟัซซีเซต (Fuzzy Set)

เป็นเซตที่มีขอบเขตที่ราบเรียบ ทฤษฎีฟัซซีเซตจะครอบคลุมทฤษฎีเซต แบบฉบับ โดยฟัซซีเซตยอมให้มีค่าความเป็นสมาชิกของเซตระหว่าง 0 และ 1 ในโลกแห่งความเป็นจริงเซตไม่ใช่มีเฉพาะเซตแบบฉบับเท่านั้น จะมีเซตแบบฟัซซีด้วย ฟัซซีเซตจะมีขอบเขตแบบฟัซซี ไม่ใช่เปลี่ยนแปลงทันทีทันใดจากขาวเป็นดำ การใช้เซตแบบดั้งเดิมจึงไม่เหมาะสม ยกตัวอย่างเกี่ยวกับความอ้วน นิยามคำว่าคนอ้วนในเซตทวินัยอาจกำหนดเป็นคนที่มีน้ำหนัก ตั้งแต่ 70 ถึง 120 กิโลกรัม โดยนิยามแบบฟัซซีเซตอาจกำหนดเป็นคนที่มีความอ้วนประมาณ 80 กิโลกรัม ซึ่งเป็นการให้นิยามที่ไม่แสดงถึงขอบเขตที่แน่นอน



รูปที่ 2.22 ฟัซซีเซตแบบต่างๆ

### 2.8.2 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (membership function)

เป็นฟังก์ชันที่มีการกำหนดระดับความ เป็นสมาชิกของตัวแปรที่ต้องการใช้งาน โดยเริ่มจากการแทนที่กับตัวแทนที่มีความไม่ชัดเจน ไม่แน่นอน และคลุมเครือ ดังนั้นส่วนที่สำคัญต่อคุณสมบัติหรือการดำเนินการของฟัซซี เพราะรูปร่างของ ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกมีความสำคัญต่อกระบวนการคิดและแก้ไขปัญหา โดยฟังก์ชันความเป็นสมาชิกจะไม่สมมาตรกันหรือสมมาตรกันทุกประการก็ได้ ชนิดของฟังก์ชันก็ได้แก่ ฟังก์ชันสามเหลี่ยม(triangular),ฟังก์ชันสี่เหลี่ยมคางหมู (trapezoidal) , ฟังก์ชันเกาส์เซียน (Gaussian membership function) ,ฟังก์ชันระฆังคว่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Bell – shaped membership function), ฟังก์ชันตัวเอส (Smooth membership function) และ ฟังก์ชันตัวแซต (Z-membership function) ซึ่งการเลือกฟังก์ชันของความเป็นสมาชิก จะต้องเลือกตามความเหมาะสมครอบคลุมของ ข้อมูลที่จะรับเข้ามา โดยสามารถที่ทับซ้อนกันเพื่อให้การดำเนินงานราบเรียบ ซึ่งมีความเป็นสมาชิกหลายค่าได้ และฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเปลี่ยนแปลงแก้ไขให้เหมาะกับงานที่กำลังปฏิบัติงานหรือตามความต้องการ

### 2.8.3 ตัวแปรภาษา (linguistic variable)

เซตแบบฟัซซีสามารถประยุกต์ใช้ในการอธิบายค่าของตัวแปรเช่นเดียวกับเซตแบบดั้งเดิม ซึ่งเป็นแนวคิดที่สำคัญมากในตรรกะแบบฟัซซี ตัวแปรภาษาช่วยกำหนดค่าของสิ่งที่จะอธิบายทั้งในรูปคุณภาพ โดยใช้พจน์ภาษา (linguistic term) และในรูปปริมาณ โดยใช้ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (membership function) ซึ่งมีประโยชน์ในการจัดการกับอินพุตที่เป็นข้อมูลเชิงตัวเลข

### 2.8.4 กฎฟัซซี (fuzzy rules)

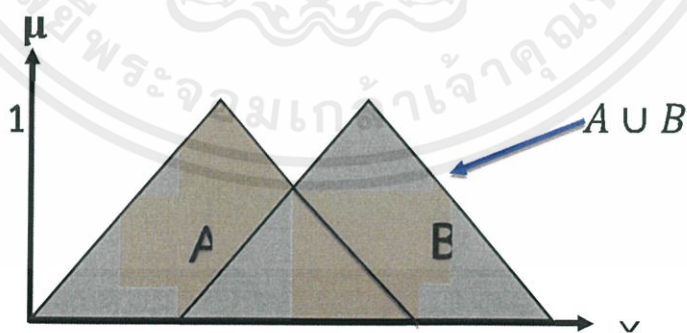
คือระบบเงื่อนไขการปฏิบัติการที่อยู่ในรูปแบบของ IF-THEN ( ถ้า-แล้ว ) โดยหลักการทำงานก็คือถ้าส่วนของเงื่อนไขเริ่มต้นด้วย IF เป็นจริง ส่วนของ THEN จะถูกประเมินด้วยค่าระดับความเป็นสมาชิก ซึ่งค่าอินพุต (IF) และเอาท์พุต (THEN) นั้น สามารถมีได้หลายค่า สำหรับทุกเงื่อนไขของ IF จะถูกประเมินพร้อมกันแล้วนำไปรวมกันด้วยค่าปฏิบัติการเซต

### 2.8.5 การดำเนินการทางฟัซซีเซต(operation)

การดำเนินการของฟัซซีเซตมีคุณสมบัติเหมือนกับเซตโดยทั่วไป มีการดำเนินการ (operation) คือ Union, Intersection และ Complement

- 1 ยูเนียน (Union) ของฟัซซีเซต จะเป็น OR operation ในสมการ

$$\begin{aligned}\mu_{A \cup B}(x) &= \mu_A(x) \cup \mu_B(x) \\ &= \max(\mu_A(x), \mu_B(x))\end{aligned}$$

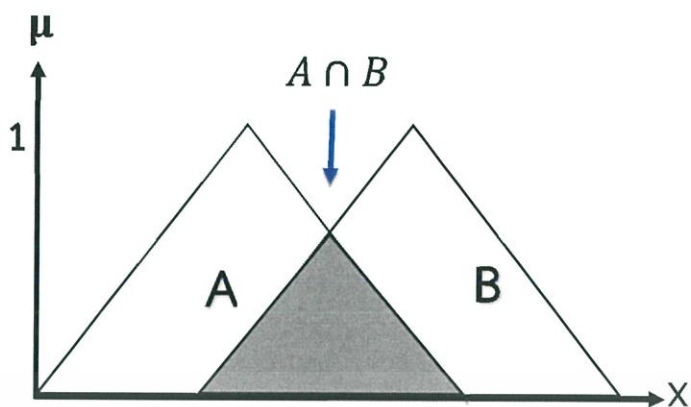


รูปที่ 2.23 การยูเนียน

2. อินเตอร์เซกชัน (Intersection) ของฟัซซีเซต จะเป็น AND operation ในสมการ

$$\begin{aligned}\mu_{A \cap B}(x) &= \mu_A(x) \cap \mu_B(x) \\ &= \min(\mu_A(x), \mu_B(x))\end{aligned}$$

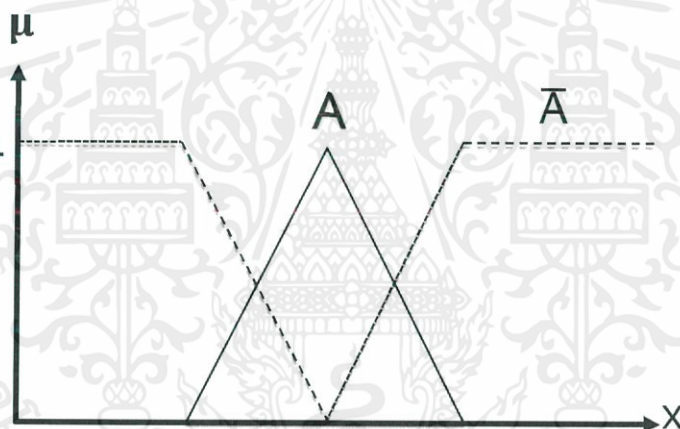
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.24 การอินเตอร์เซกชัน

## 3. คอมพลิเมนต์ (Complement) ของฟัซซีเซต ในสมการ

$$\mu_{A^c}(x) = 1 - \mu_A(x)$$



รูปที่ 2.25 การคอมพลิเมนต์

## 2.8.6 การอนุมานฟัซซีแบบ Sugeno (Sugeno-style Inference)

การอนุมานฟัซซีสามารถนิยามว่าเป็นการส่งค่า (mapping) จากค่าอินพุตของระบบ ไปยังเอาต์พุต โดยใช้หลักการของทฤษฎีเซต การอนุมานฟัซซีมีอยู่ 2 วิธีใหญ่ๆ คือแบบ Mamdani และแบบ Sugeno ในโครงการนี้ใช้การอนุมานฟัซซีแบบ Sugeno มีรายละเอียดต่อไปนี้

Michio Sugeno ได้นำเสนอวิธีการอนุมาน (1985) ที่แตกต่างไปจากวิธีของ Mamdani โดยต้องการลดขั้นตอนการคำนวณหาจุดศูนย์กลางในการทำดีฟัซซี Sugeno ได้ใช้เส้นตรงในแนวแกนตั้งในการแทนฟังก์ชันสมาชิกของส่วน THEN ในกฎของฟัซซี ซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

IF x is A

AND y is B

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THEN z is f(x, y)

โดยที่ x y และ z เป็นตัวแปรภาษา A และ B เป็นค่าเชิงภาษา (หรือฟัซซีเซต) f(x,y) คือฟังก์ชันของตัวแปร x และ y ตัวอย่างของฟังก์ชัน f(x, y) ที่นิยมใช้ในแบบจำลองฟัซซีของ Sugeno อันดับศูนย์ (zero-order Sugeno fuzzy model) คือ

IF x is A

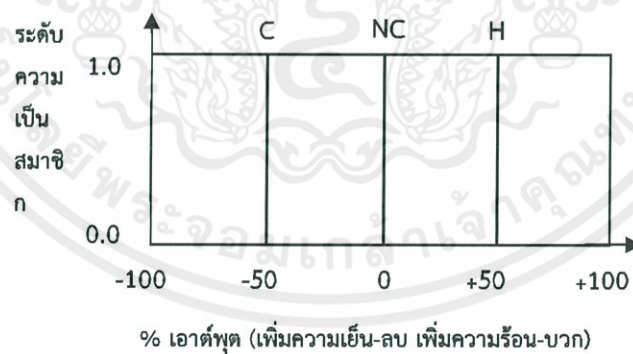
AND y is B

THEN z is k

โดยที่ k เป็นค่าคงที่ ในที่นี้ค่าเอาต์พุตของแต่ละกฎจะเป็นเส้นตรงในแนวแกนตั้ง (ดูตัวอย่างในรูปที่ 2.26) ซึ่งทำให้ค่อนข้างสะดวกสำหรับขั้นตอนการรวมกฎ จะเห็นได้ว่าความแตกต่างของระบบฟัซซีแบบ Sugeno มีเพียงส่วนเอาต์พุตเท่านั้น สังเกตความง่ายในการรวมกฎรวมไปถึงการทำดีฟัซซี เอาต์พุตของระบบสามารถคำนวณหาได้ดังต่อไปนี้ ค่าเอาต์พุตที่ได้จากการทำดีฟัซซีนี้เรียกว่าค่าน้ำหนักเฉลี่ย (weighted average หรือ WA) ในการโครงการนี้คณะผู้จัดทำใช้เป็น COG (central of gravity)

$$WA = \frac{\sum_{m=1}^L \mu(k_m) \times k_m}{\sum_{m=1}^L (k_m)} \quad (2.16)$$

โดยที่  $\mu(k_m)$  คือค่าระดับความเป็นสมาชิกของเส้นตรงในแนวแกนตั้ง  $k_m$



รูปที่ 2.26 ฟังก์ชันสมาชิกของเอาต์พุตแบบ Sugeno

ข้อดีของการอนุมานฟัซซีแบบ Sugeno สรุปได้ดังนี้

- มีประสิทธิภาพเชิงการคำนวณ
- ใช้งานได้ดีกับระบบเชิงเส้น เช่นตัวควบคุมแบบ PID ฯลฯ
- ใช้งานได้ดีกับระบบหาค่าเหมาะที่สุดและระบบเชิงปรับตัวได้
- มีค่าเอาต์พุตที่ต่อเนื่อง

– เหมาะสมในการวิเคราะห์เชิงคณิตศาสตร์

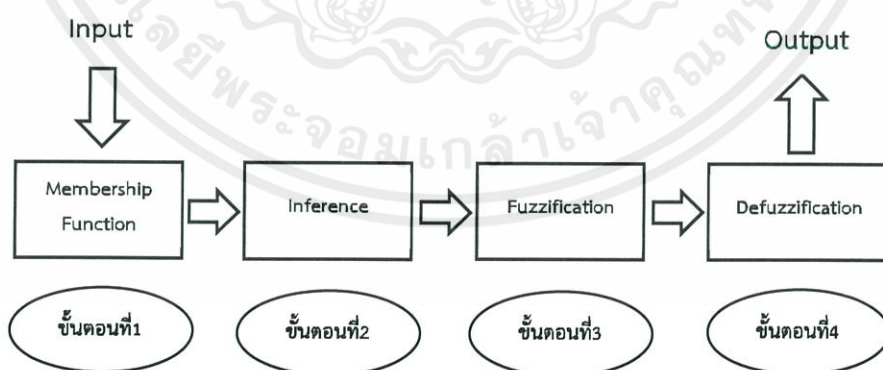
### 2.8.7 ข้อดีของฟัชซีลอจิก

ฟัชซีลอจิกมีคุณลักษณะเด่นหลายๆ อย่าง ทำให้มีการนำเอาฟัชซีลอจิกมาประยุกต์ใช้อย่างมากมายและอย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะงานทางด้านระบบควบคุม ข้อดีของ ฟัชซีลอจิกสรุปคร่าวๆ ได้ดังนี้

- ฟัชซีลอจิกเป็นระบบที่มีเสถียรภาพสูง ไม่จำเป็นจะต้องใช้งานกับระบบที่มีอินพุตที่มีค่าแน่นอนหรือปราศจากสัญญาณรบกวน กล่าวคือระบบสามารถรองรับอินพุต ที่มีความคลุมเครือได้อย่างหลากหลาย
- ฟัชซีลอจิกประมวลผลด้วยการใช้กฎที่กำหนดหรือนิยามด้วยผู้ใช้ (หรือผู้สร้างระบบ ซึ่งก็คือผู้เชี่ยวชาญนั่นเอง) ดังนั้นจึงเป็นการสะดวกในการปรับแต่งระบบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ
- ฟัชซีลอจิกไม่มีข้อจำกัดของจำนวนอินพุตหรือเอาต์พุต ทำให้การออกแบบระบบสามารถทำได้หลากหลาย สามารถใช้ตัวตรวจจับที่ไม่มีความแม่นยำมากนักและมีราคาถูกได้พร้อมๆ กันหลายๆ ตัว เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบในขณะที่ความยุ่งยากและราคารวมของระบบไม่เพิ่มขึ้น
- ฟัชซีลอจิกมีโครงสร้างที่สามารถแบ่งแยกเป็นหน่วยประมวลผลย่อยๆ ได้ ทำให้ได้ระบบที่มีการกระจายการทำงาน ง่ายต่อการดูแลและปรับปรุงแก้ไข
- ฟัชซีลอจิกสามารถใช้กับงานที่ไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear) ได้ ทำให้ลดภาระการคำนวณแบบจำลองระบบทางคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อน

### 2.9 วิธีการนำตรรกศาสตร์ฟัชซีมาใช้ในระบบควบคุม

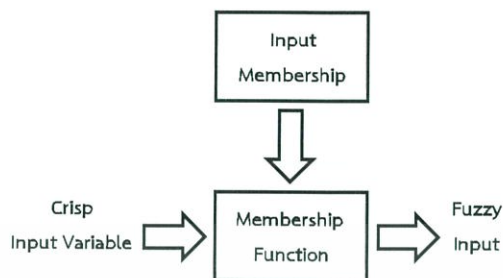
การนำตรรกศาสตร์ฟัชซีมาใช้ในระบบควบคุมจะมีการทำงานทั่วไปอยู่ 4 ขั้นตอน



รูปที่ 2.27 ขั้นตอนการประมวลผลแบบฟัชซี

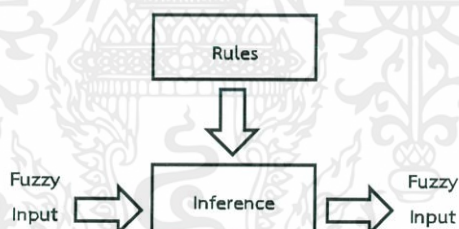
ขั้นตอนที่ 1 ฟัชซีฟิเคชัน คือ การแปลงการอินพุตแบบทวินัยเปลี่ยนเป็นการอินพุตแบบตัวแปรฟัชซี โดยจะสร้างฟังก์ชันความเป็นสมาชิก โดยไม่จำเป็นต้องมีลักษณะเดียวกัน ขึ้นกับ

คุณลักษณะของแต่ละการอินพุต (Input) และความสำคัญต่อการเอาต์พุต (Output) ที่น่าสนใจโดยฟังก์ชันจะมีลักษณะเป็นการกำหนดภาษาสามัญ เพื่อให้เป็นฟัซซีการอินพุต



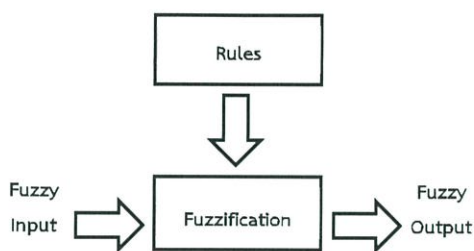
รูปที่ 2.28 ขั้นตอนที่ 1 ของการประมวลผลแบบฟัซซีลอจิก

ขั้นตอนที่ 2 กฎพื้นฐานของฟัซซี (Rule based) คือเป็นการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างการอินพุตทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับเอาต์พุตที่อาศัยหลักการของการหาเหตุและผล อาจจะมีการเก็บข้อมูล การคาดการณ์จากการตัดสินใจของมนุษย์ หรือค่าจากการทดลอง โดยเขียนเป็นกฎการควบคุมระบบ ซึ่งจะมีลักษณะอยู่ในรูปแบบ ถ้า (If) และ (And) หรือ (Or) ซึ่งเป็นภาษาสามัญ นำกฎทั้งหมดมาประมวลผลรวมกัน เพื่อการหาตัดสินใจที่เหมาะสม



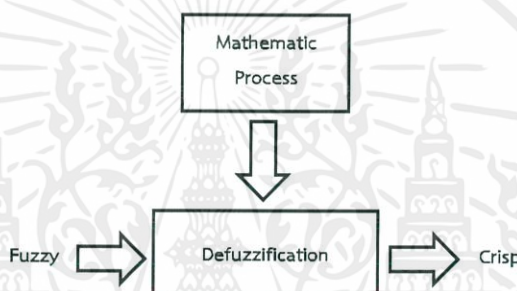
รูปที่ 2.29 ขั้นตอนที่ 2 ของการประมวลผลแบบฟัซซีลอจิก

ขั้นตอนที่ 3 อินเฟอเรนซ์ แมคคาณิชิม คือ เป็นการหาฟัซซีเอาต์พุต โดยการนำกฎการควบคุมที่สร้างขึ้น ในขั้นตอนที่ 2 มาประมวลผลกับฟัซซีอินพุต โดยใช้วิธีการทางคณิตศาสตร์ เพื่อนำค่าที่ได้ประมวลผล วิธีการทำเป็นค่าคลุมเครือ (Fuzzification) วิธีการที่นิยมใช้ในการตีความหาเหตุผลเลือกใช้ Max-Min method และ Max-Dot method



รูปที่ 2.30 ขั้นตอนที่ 3 ของการประมวลผลแบบฟัซซีลอจิก

ขั้นตอนที่ 4 ดีฟัซซีฟิเคชัน เป็นขั้นตอนสุดท้ายหรือขั้นตอนการสรุปเหตุผลฟัซซี โดยจะเปลี่ยนฟัซซีเอาต์พุตให้เป็นทวินัยเอาต์พุตด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์ เช่น วิธีการหาจุดศูนย์กลางถ่วง (Central of Gravity) เพื่อนำค่าที่ได้มาใช้ในการตัดสินใจเพื่อควบคุมระบบในสถานการณ์นั้นๆ



รูปที่ 2.31 ขั้นตอนที่ 4 ของการประมวลผลแบบฟัซซีลอจิก

วิธีการทำค่าฟัซซีให้เป็นค่าปกติ (Defuzzification) วิธีการที่เป็นเทคนิคการเลือกค่าสูงสุดหรือสรุปหาเหตุผลจากหลาย ๆ เซตมาเพียงค่าเดียว ซึ่งเป็นการใช้ค่าสูงสุดของค่าระดับการเป็นสมาชิกจากการกระทำหลายๆ แบบ และเลือกกระทำเพียงรูปแบบเดียว วิธีการหาจุดศูนย์กลางถ่วง (Central of Gravity: COG) เป็นวิธีการเฉลี่ยผลที่ได้จากการตีความหาเหตุที่นิยมใช้ในปัจจุบัน ค่าที่ได้จะคำนวณจุดศูนย์กลางถ่วงโดยรวมจะหาได้จากการประมาณค่าจากสมการ

$$COG = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i w_i}{\sum_{i=1}^n \alpha_i} \quad (2.17)$$

โดย

COG คือ ค่าของจุดศูนย์กลางถ่วง (Central Gravity)

N คือ ค่าตั้งแต่ตำแหน่งที่ 1 ถึงตำแหน่งที่ i

$\alpha_i$  คือ ค่าฟัซซีของเอาต์พุตในเซตฟัซซีตำแหน่งที่ i

$w_i$  คือ พื้นที่ใต้โค้งของเซตฟัซซีตำแหน่งที่ i

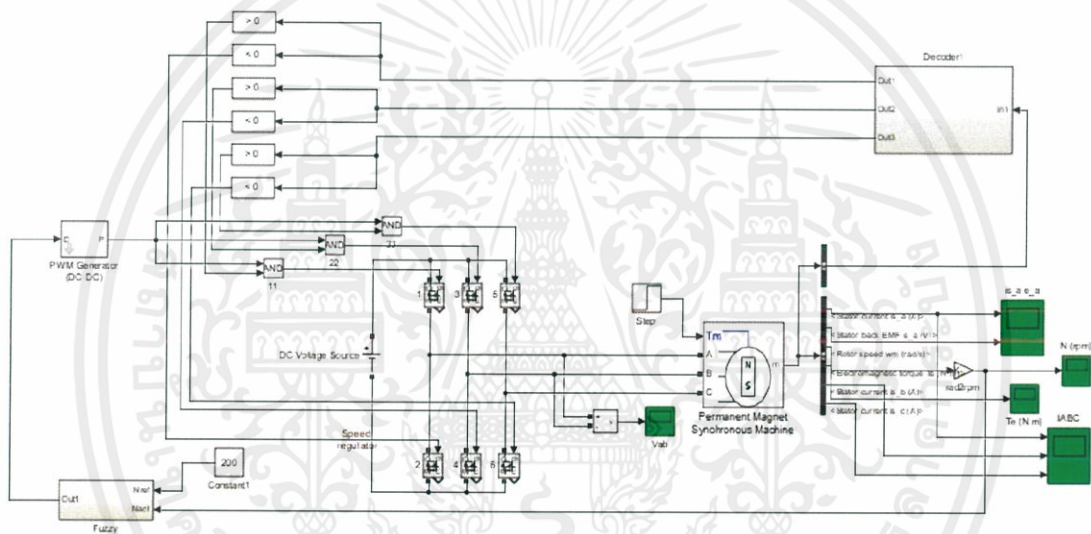
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

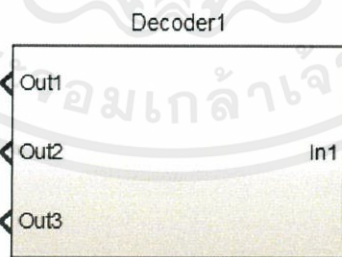
## การจำลองการทำงานและการออกแบบ

### 3.1 การจำลองการทำงานของ BLDC Motor โดยใช้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK

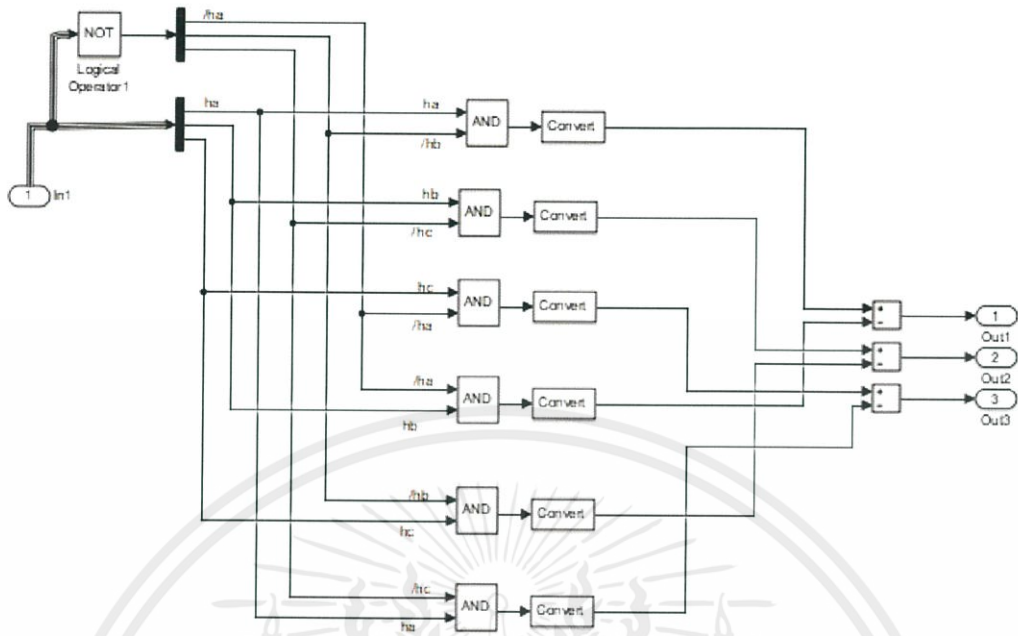
ในการจำลองการทำงาน BLDC Motor เป็นแบบใช้ Hall effect ในการตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์ ส่วนการควบคุมความเร็วจะใช้การควบคุมแรงดันที่จ่ายเข้าสเตเตอร์ด้วยการปรับค่า Duty cycle ของสัญญาณ PWM ซึ่งถูกควบคุมโดยการใช้ Fuzzy logic controller ซึ่งการออกแบบระบบทั้งหมดจากโปรแกรม MATLAB/SIMULINK จะเป็นไปตามรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 การจำลองการทำงานBCDC motor โดย MATLAB/SIMULINK



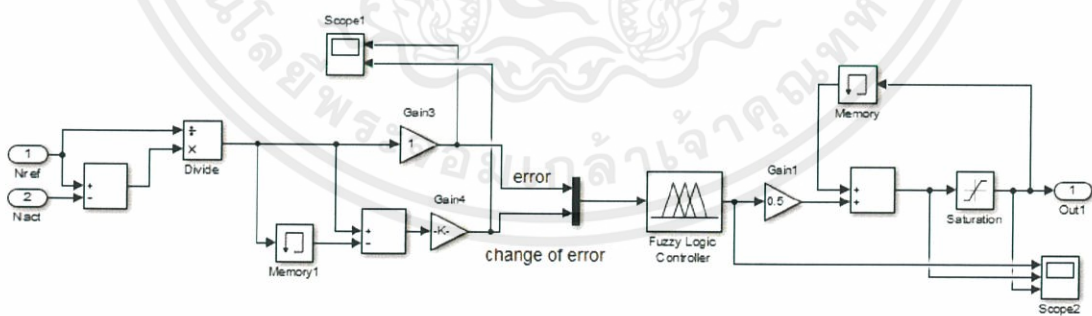
รูปที่ 3.2 กล่องไดโอะแกรม Decoder ที่รับสัญญาณ Hall จากมอเตอร์



รูปที่ 3.3 วงจรภายในกล่องไดอะแกรม Decoder



รูปที่ 3.4 กล่องไดอะแกรม Fuzzy ที่รับสัญญาณความเร็วอ้างอิงกับความเร็วจริงของมอเตอร์



รูปที่ 3.5 วงจรภายในกล่องไดอะแกรม Fuzzy

โดยการออกแบบข้างต้นนี้ มีขั้นตอนการทำงานดังนี้

1. มีแหล่งจ่าย DC source ขนาด 24 V จ่ายเข้าวงจร Inverter ที่มี Mosfet 6 ตัว แล้วเข้าทั้ง 3 เฟสของ BLDC motor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. แปลงสัญญาณ Hall sensor จาก BLDC motor มาเป็นรหัส 6 ชุด ที่กล่องไดอะแกรม Decoder เพื่อสั่งการให้ Mosfet แต่ละตัวทำงานตามสถานะของรหัสนั้นๆ
3. ระบบ Fuzzy control ในวงจรของกล่องไดอะแกรม Fuzzy จะรับค่าความเร็วที่มาจาก BLDC motor มาเป็นสัญญาณ Input แล้ว Output ที่ได้จากระบบ Fuzzy control จะเป็นค่า Duty cycle คูณด้วย 0.5 เพื่อให้ค่าที่ไปบวกเพิ่มมีค่าน้อยลงเพื่อค่า Duty cycle ค่อยๆ มีการเปลี่ยนแปลงเร็วเกินไป แล้วเอาไปบวกเพิ่มกับค่า Duty cycle ก่อนหน้า จนได้ค่า Duty cycle ที่ต้องการ แล้วส่งค่าเข้า Mosfet เพื่อควบคุมแรงดันที่ออกจากวงจร Inverter ให้ได้ความเร็วที่ต้องการ

ในการจำลองจากโปรแกรม MATLAB/SIMULINK นี้ได้ใช้เงื่อนไขการตรวจจับสัญญาณ Hall และการสั่งงาน Mosfet ตามตารางที่ 3.1

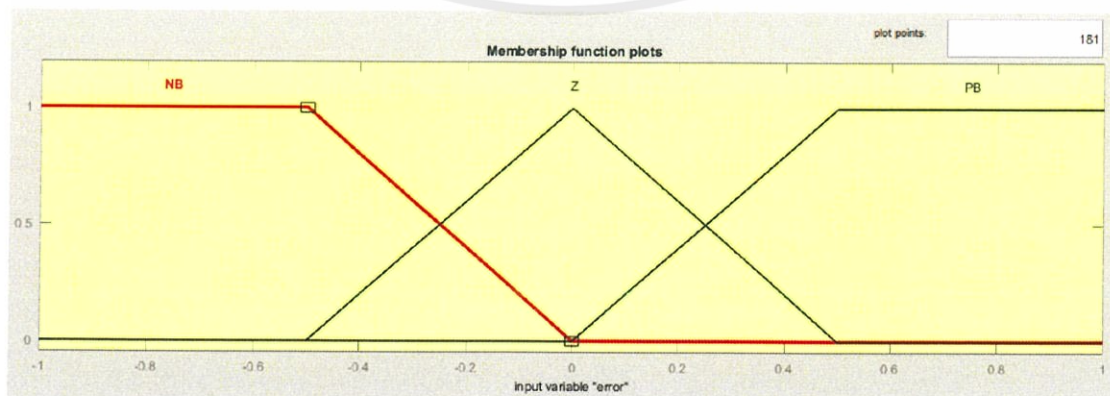
ตารางที่ 3.1 การทำงานของ BLDC motor

Halla	Hallb	Hallc	Emf U	Emf V	EmfW	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6
1	0	1	+	-	0	1	0	0	1	0	0
1	0	0	+	0	-	1	0	0	0	0	1
1	1	0	0	+	-	0	0	1	0	0	1
0	1	0	-	+	0	0	1	1	0	0	0
0	1	1	-	0	+	0	1	0	0	1	0
0	0	1	0	-	+	0	0	0	1	1	0

### 3.2 การออกแบบระบบควบคุมความเร็ว BLDC motor ด้วยเทคนิคฟัซซี(Fuzzy logic)

กำหนดให้ฟัซซีอินพุตมี 2 ค่า คือ

1. ความแตกต่างของความเร็วและหารด้วยความเร็วอ้างอิง (Error)

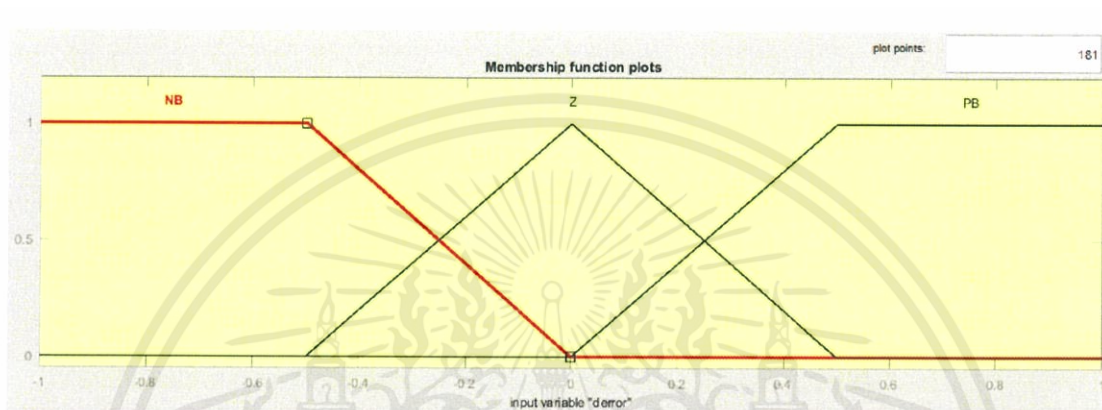


รูปที่ 3.6 อินพุตของค่าความแตกต่างของความเร็ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยค่าที่นำมาใช้นั้น คือค่าที่ได้มาจากการทดลอง โดยมีค่า Error เป็นลบมากที่สุด(NB)อยู่ในช่วง  $-\infty$  ถึง 0 มีค่า Error เป็นศูนย์(Z)อยู่ในช่วง -0.5 ถึง 0.5 และมีค่า Error เป็นบวกมากที่สุด(PB) อยู่ในช่วง 0 ถึง  $\infty$

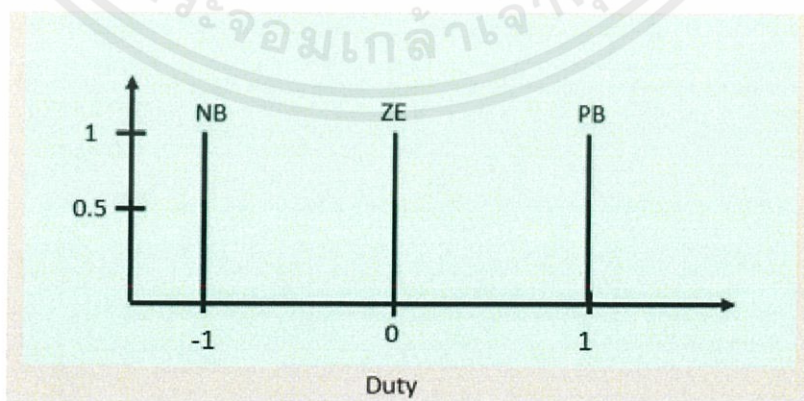
2. ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความแตกต่างของความเร็วที่หารด้วยความเร็วอ้างอิง (Delta Error)



รูปที่ 3.7 แสดงอินพุทของอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าผิดพลาด

โดยมีค่า Delta Error เป็นลบมากที่สุด(NB)อยู่ในช่วง  $-\infty$  ถึง 0 มีค่า Error เป็นศูนย์(Z) อยู่ในช่วง -0.5 ถึง 0.5 ค่า และมี Error เป็นบวกมากที่สุด(PB) อยู่ในช่วง 0 ถึง  $\infty$

3.. กำหนดให้พีชชีเอาร์ทพุทมี 1 ค่า คือ ผลต่างของ duty cycle (duty)



รูปที่ 3.8 เอาท์พุทของดีวตี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

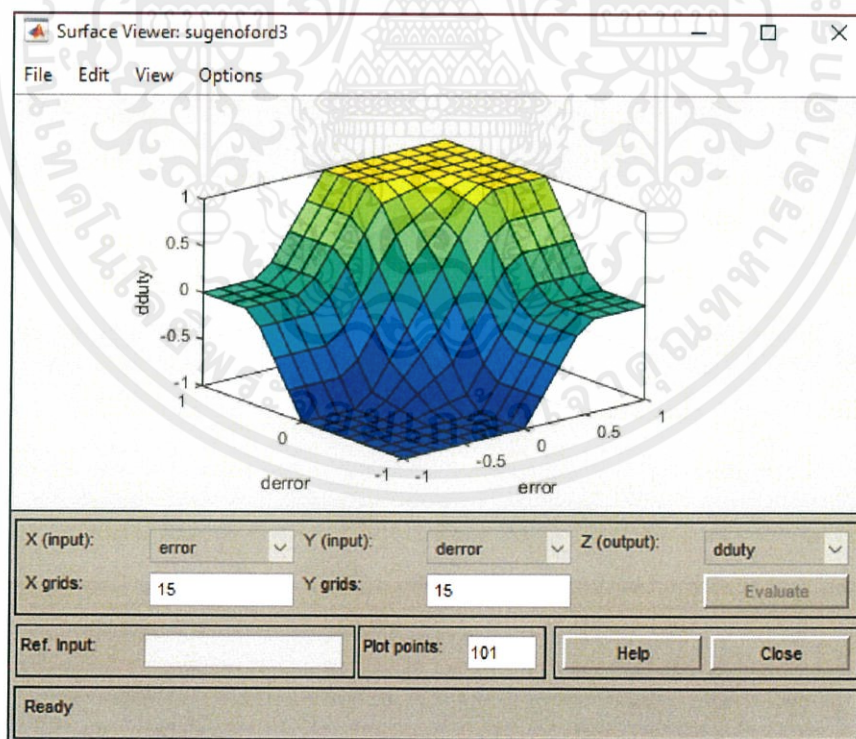
โดยมี ค่าผลต่างDutyน้อยที่สุด(NB) เป็นกราฟเส้นตรงที่ -1 มีค่าผลต่างDutyเป็นศูนย์(ZE) เป็นกราฟเส้นตรงที่ 0 และมีค่าผลต่างDutyมากที่สุด(PB) เป็นกราฟเส้นตรงที่ 1

### 3.2.1 การกำหนดกฎการควบคุมแบบ Fuzzy

ตารางที่ 3.2 ค่าความจริงของเทคนิคฟัซซี่

Delta Duty		Delta Error (De)		
		NB	Z	PB
Error (E)	NB	NB	NB	Z
	Z	NB	Z	PB
	PB	Z	PB	PB

ในการศึกษานี้ ทางคณะผู้จัดทำเลือกใช้ค่าความจริงข้างต้นมา 3 ค่าทั้งค่าerror และค่าDelta error ทำให้ได้ Rule base ทั้งหมด 9 ค่า ดังตารางที่ 3.2

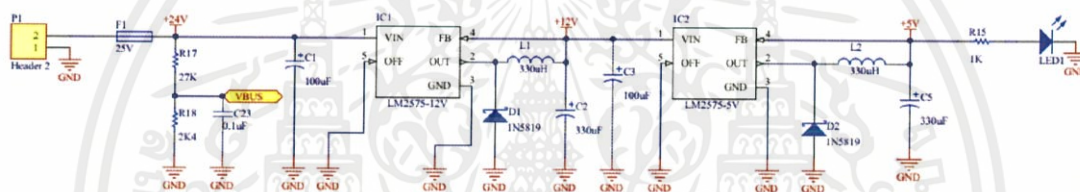


รูปที่ 3.9 Surface Viewer ของฟังก์ชันFuzzy Simulink

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 การออกแบบแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงสำหรับวงจร

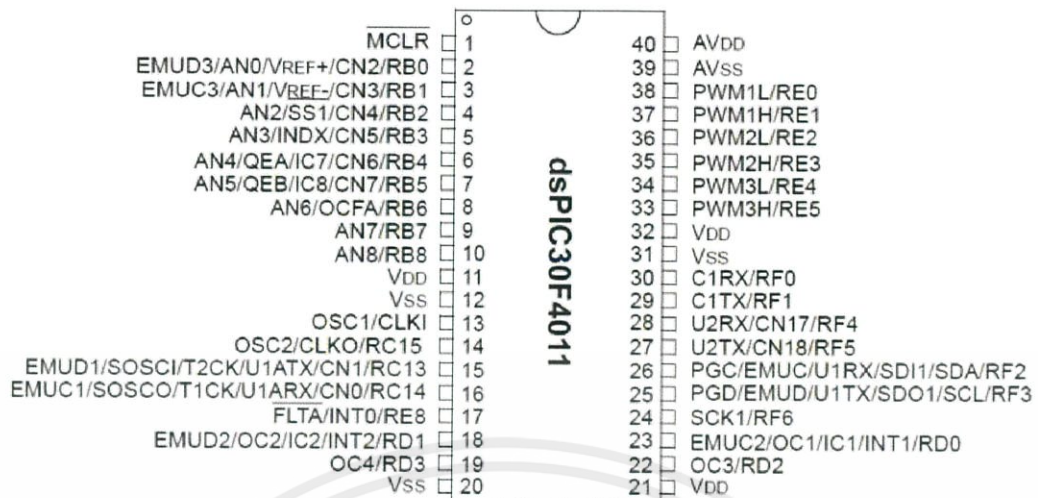
การออกแบบวงจรควบคุมมอเตอร์ไร้แปรงถ่านจะต้องมีไฟเลี้ยงเพื่อใช้ในการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์(Microcontroller)และซิปเกตของมอเตอร์ ซึ่งจะออกแบบชุดควบคุมแรงดันแบบสวิตซ์ซิง LM2575-12 (Switching regulators step down) ที่มีประสิทธิภาพสูงและสูญเสียพลังงานต่ำ ทำหน้าที่แปลงแรงดันขาเข้าจากแบตเตอรี่ 24 โวลต์ให้เหลือเพียง 12 โวลต์ สำหรับป้อนให้วงจรบูทสแตรป์(Bootstrap) และมอเตอร์ไร้แปรงถ่านโดยวงจรแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงสำหรับเลี้ยงวงจร และใช้ LM2575-5(Switching regulators step down) ทำหน้าที่แปลงแรงดันขาเข้าจาก12โวลต์ ให้เหลือ 5โวลต์ สำหรับป้อนให้ไมโครคอนโทรลเลอร์(Microcontroller) ซึ่งในวงจรจะใช้ฟิวส์(Fuse)ขนาด 10แอมแปร์ 25 โวลต์ เป็นตัวตัดวงจร แสดงดังรูปที่ 3.10



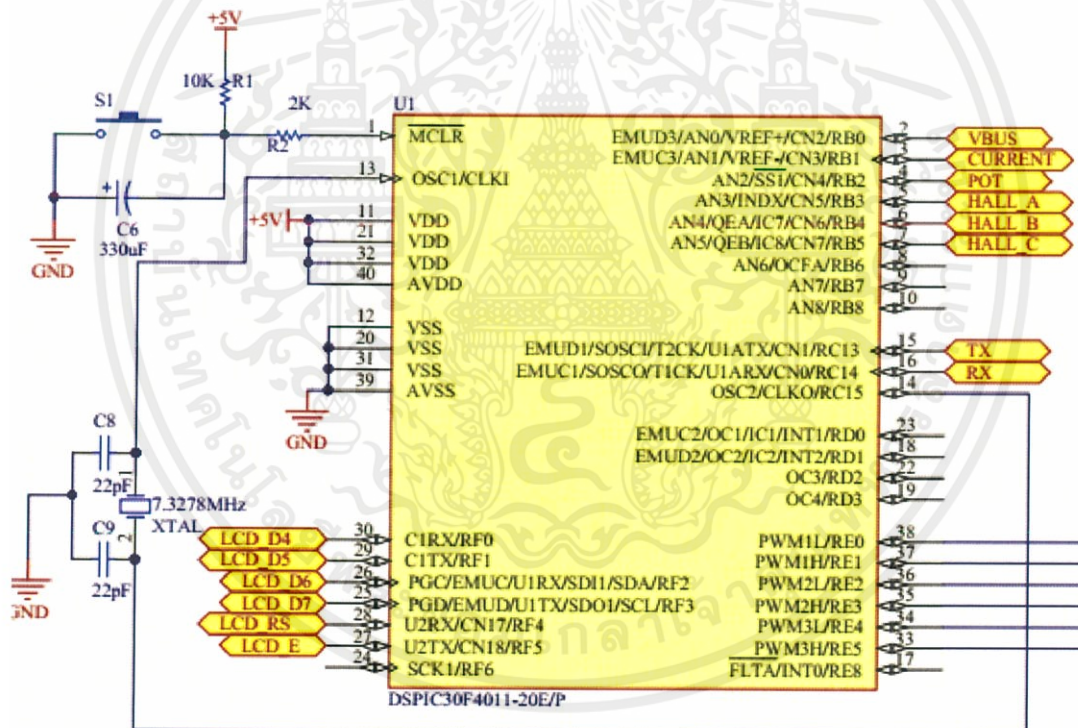
รูปที่ 3.10 วงจรไฟเลี้ยง

### 3.4 การออกแบบควบคุมโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์(Microcontroller)

ไมโครคอนโทรลเลอร์ 16 บิตที่ใช้ในโครงการเป็นชนิด dsPIC30F4011 ที่เป็นที่รู้จักและนิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย ด้วยความสามารถในการประมวลผลสัญญาณดิจิทัลสำหรับระบบควบคุมอัตโนมัติที่มีความสามารถสูง และมีฟังก์ชันสำหรับการควบคุมมอเตอร์ และชุดควบคุมสัญญาณที่ดับเบิลเอ็ม(PWM)สำหรับขับเคลื่อนวงจรอินเวอร์เตอร์(inverter) โดยชุดประมวลผลจะประกอบไปด้วยอินพุท(input)รับคำสั่ง ตรวจสอบสัญญาณป้อนกลับ และส่งคำสั่งทำงานไปยังเอาต์พุท(output) เพื่อสั่งการและแสดงผล

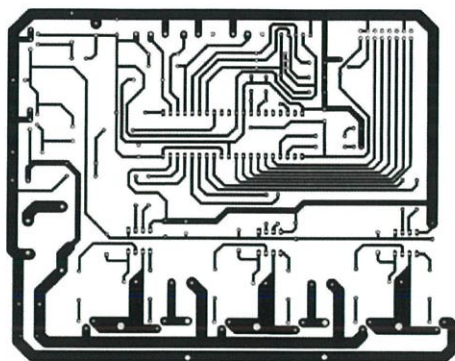


รูปที่ 3.11 dsPIC30F4011



รูปที่ 3.12 ออกแบบdsPIC30F4011 โดยโปรแกรมAltium

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.13 วงจรบอร์ด PCB

### 3.5 วงจรแสดงผลผ่าน LCD (LCD monitoring)

เป็นการใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์ร่วมกับการแสดงผล เพื่อให้ทราบถึงการทำงานของมอสเฟต(Duty cycle) และ ความเร็วของมอเตอร์ไร้แปรงถ่าน ภายในตัววงจรจะประกอบไปด้วย หน้าจอ 16x2 (16อักษร 2 บรรทัด) ไฟเลี้ยงที่ใช้งาน 5 โวลต์ ตัวต้านทานปรับค่าได้ในบอร์ด ไมโครคอนโทรลเลอร์ ทำหน้าที่ปรับความเข้มของตัวอักษร



รูปที่ 3.14 วงจรLCD

### 3.6 การออกแบบวงจรขับเคลื่อนสำหรับมอสเฟตกำลัง

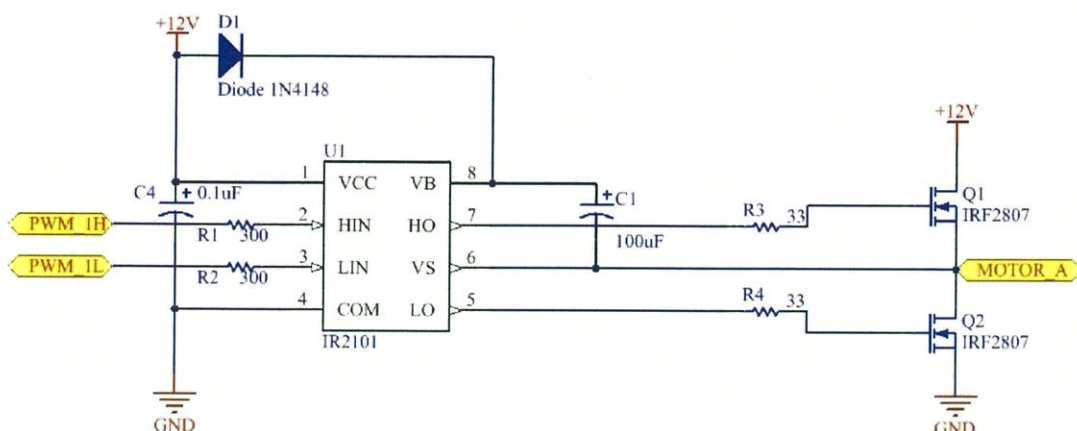
มอสเฟตกำลังเป็นสวิตช์ที่ควบคุมด้วยแรงดัน(voltage-controlled) ทำให้ง่ายต่อการควบคุม ให้เริ่มนำกระแสหรือเริ่มหยุดนำกระแส ซึ่งจะเป็นข้อดีที่เหนือกว่ากรณีของทรานซิสเตอร์กำลัง มอสเฟตกำลังจะนำกระแสก็ต่อเมื่อแรงดันตกคร่อมขาเกตเทียบกับขาซอส( $V_{GS}$ )มีค่าสูงกว่าแรงดันขีดเริ่ม(threshold voltage)และเมื่อระดับแรงดัน  $V_{GS}$ สูงกว่าแรงดันขีดเริ่ม ทำให้มอสเฟตกำลังเข้าการทำงานโหมตโอห์มมิก(ohmic region) ซึ่งโดยทั่วไปแรงดัน  $V_{GS}$  เพื่อให้สวิตช์เริ่มนำกระแสจะมีค่าอยู่ระหว่าง 10 ถึง 20 แลเพื่อให้สวิตช์ไม่นำกระแสสามารถทำได้โดยให้  $V_{GS}$  มีค่าต่ำกว่าแรงดันขีดเริ่ม และ ในขณะที่สวิตช์นำกระแสและไม่นำกระแส กระแสที่ป้อนเข้าขาเกตจะมีค่าเท่ากับศูนย์ อย่างไรก็ตาม ความเร็วในการสวิตช์ จะสามารถหาได้จากความเร็วในการเก็บและคายประจุของค่าตัวเก็บประจุ

แฝงด้านเข้าของมอสเฟตกำลัง(Parasitic input capacitance) ซึ่งตัวเก็บประจุแฝงจะต้องทำการสะสมประจุ เพื่อให้สวิตช์นำกระแส และจะต้องทำการคายประจุเพื่อทำให้สวิตช์ไม่นำกระแส

วงจรขับเคลื่อนของมอสเฟตกำลังจะต้องสามารถจ่ายกระแส(sourcing) และดึงกระแส(sinking)ได้อย่างรวดเร็วเพื่อให้มอสเฟตกำลังสามารถทำงานได้ที่ความถี่สูง และ นอกจากนั้นถ้าสัญญาณด้านเข้าได้รับแรงดันจากอุปกรณ์ลอจิกดิจิทัลแรงดันต่ำ(low-voltage digital device) แรงดันด้านออกอาจจะไม่เพียงพอที่จะขับให้มอสเฟตกำลังนำกระแสได้ จึงต้องมีการปรับปรุงวงจรขับด้วยการใช้คู่วงจรมิตเตอร์ตาม(double emitter follower)หรือ โทเท็มโพล(totem pole)ซึ่งเป็นวงจรที่ประกอบด้วยคู่ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์แบบNPN และ PNP สำหรับการทำงานองวงจรขับเกตเมื่อแรงดันด้านเข้าของวงจรขับเกตมีค่าสูง ทรานซิสเตอร์Q1 จะเริ่มนำกระแส และ ทรานซิสเตอร์Q2 ไม่นำกระแส เป็นผลทำให้มอสเฟตกำลัง เริ่มนำกระแส และเมื่อแรงดันด้านเข้าของวงจรขับเกตมีค่าต่ำ ทรานซิสเตอร์Q1 จะไม่นำกระแสและทรานซิสเตอร์Q2 นำกระแส ซึ่งจะเป็นการย้ายประจุจากขาเกต เป็นผลทำให้มอสเฟตกำลังเริ่มหยุดนำกระแสได้ นอกจากนั้นสัญญาณด้านเข้าอาจจะมาจากวงจรถอแลคเตอร์แบบเปิด(Open collector TTL)ที่ประกอบด้วย โทเท็มโพล ซึ่งจะใช้เป็นบัฟเฟอร์(buffer) สำหรับแหล่งจ่ายกระแส(Source) และดึงกระแส(sink)ที่ขาเกต

นอกจากนี้ยังมีคอนเวอร์เตอร์บางชนิด เช่น วงจรบักคอนเวอเตอร์(Buck converter) ที่ใช้มอสเฟตกำลังแบบ n-channel ซึ่งจะเป็นวงจรที่ต้องการขับมอสเฟตกำลังที่มีกราวด์ลอย(floating ground) เมื่อเทียบกับกราวด์ของวงจร(circuit ground) โดยวงจรขับเกตสำหรับวงจรถักกล่าวจะเรียกว่า วงจรขับเกตด้านบัสบวก(high-side drivers)โดยจะมีโครงสร้างของวงจรที่เรียกว่า “บูตสเตรป(bootstrap)”

หลักการการทำงานของวงจรถักบูตสเตรป จะเริ่มจากเมื่อแรงดัน  $V_i$  มีค่าสูง(high) ทรานซิสเตอร์ $Q_1$  และมอสเฟต  $M_2$  จะนำกระแส และเมื่อมอสเฟต  $M_2$  นำกระแส จะทำให้ตัวเก็บประจุ  $C_1$  สะสมประจุผ่านทางไดโอดโดยจะมีแรงดันเท่ากับ  $V_s$  ในทำนองกลับกัน เมื่อแรงดัน  $V_i$  มีค่าต่ำ(low) ทรานซิสเตอร์  $Q_1$  จะไม่นำกระแส ทำให้มีแรงดันที่ขาเกตของมอสเฟต  $M_1$  เพิ่มขึ้นเท่ากับ  $V_{C_1}$  ทำให้มอสเฟต  $M_1$  นำกระแสและเมื่อมอสเฟต  $M_1$  นำกระแส แรงดันด้านออก  $V_o$  จะมีค่าเท่ากับ  $V_s$  โดยที่แรงดันขาเกตของมอสเฟต  $M_1$  จะมีค่าเท่ากับ  $2V_s$  เพราะพลังงานที่สะสมในตัวเก็บประจุ  $C_1$  ทำให้แรงดันขาเกต-ซอส (gate-to-source voltage :  $V_{GS}$ )ของมอสเฟต  $M_1$  ยังคงมีค่าเท่ากับ  $V_s$  ขณะที่มอสเฟต  $M_1$  นำกระแสและเมื่อ  $V_i$  กลับมีค่าสูงอีกครั้ง ทำให้ทรานซิสเตอร์  $Q_1$  นำกระแส ทำให้แรงดันขาเกตของมอสเฟต  $M_1$  จะมีค่าลดต่ำลง จนกระทั่งมอสเฟต  $M_1$  ไม่นำกระแสในที่สุด



รูปที่ 3.15 วงจร bootstrap

วงจรขับนำแกตมอสเฟตจะรับสัญญาณขับนำสวิตช์มาจากไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งสัญญาณที่ใช้เป็นลักษณะสัญญาณพีดับบิวเอ็ม(PWM) เมื่อรับสัญญาณจะมีช่วง HIN กับ LIN ทั้งสองช่วงนี้จะทำงานสลับกัน ไม่สามารถทำงานพร้อมกันได้เพราะจะทำให้เกิดการลัดวงจรของแกตมอสเฟตกำลัง ซึ่งวงจรบูตสเตรปจะใช้ความสามารถของ IC เบอร์ IR2101 ที่มีคุณสมบัติในการสับสวิตช์ HIN และ LIN ที่ความถี่สูง ใช้ไฟเลี้ยงในวงจร Vcc +12V เมื่อช่วง HIN ทำงาน สัญญาณจะถูกขับออกไปที่ขา HO ส่งไปที่ อุปกรณ์มอสเฟตกำลัง โดยพิจารณาทางด้านบน หรือ ด้านบวก(High side)จะถูกขับด้วยการยกระดับแรงดันจากตัวเก็บประจุบูตสเตรป จะทำให้ขาแกตมีแรงดันสูงขึ้นถึง 12 โวลต์เมื่อเทียบกับ Vs ใช้ไดโอด 1N4148 เป็นตัวป้องกันไม่ให้เกิดกระแสไหลกลับเข้าแหล่งจ่าย ส่วนในการขับแกตด้านล่าง หรือ ด้านลบ(low side)เกิดจากการได้รับสัญญาณพีดับบิวเอ็ม(PWM) ด้านLIN จากนั้นสัญญาณจะถูกขับออกจากขา LO มีขนาดแรงดัน 12 โวลต์เมื่อเทียบกับกราวด์ของระบบ โดยชุดวงจรบูตสเตรปมี 3 ชุด

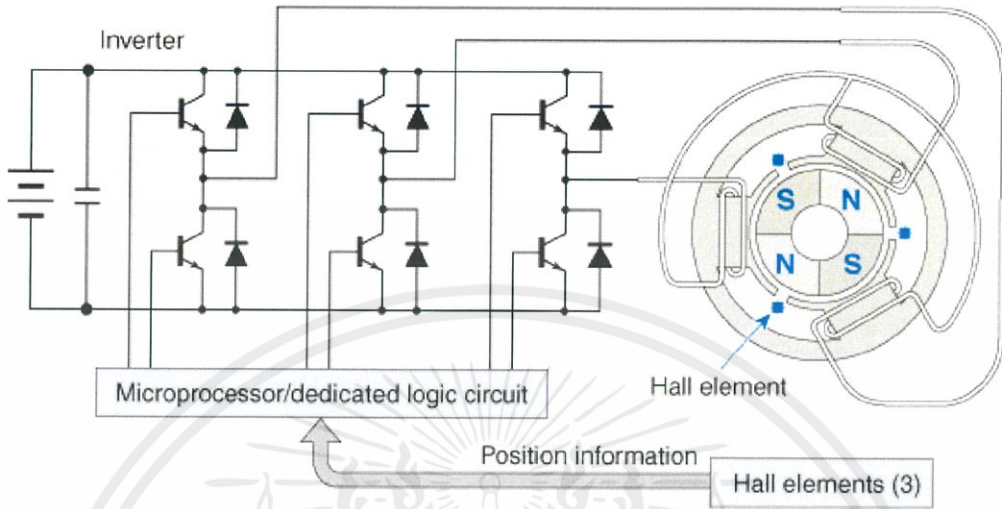
### 3.7 การออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส (three phase inverter)

อินเวอร์เตอร์กำลังเป็นวงจรที่ใช้ในการแปลงไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ ในการสับเปลี่ยนทิศทางการไหลไฟฟ้าแต่ละกิ่งของชุดอินเวอร์เตอร์โหนดของชุดอินเวอร์เตอร์จะเป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน 3 เฟส ในที่นี้จะกล่าวถึงการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ขับเคลื่อนมอเตอร์ตามสัญญาณขับอุปกรณ์สวิตช์ และการออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์

สำหรับการออกแบบนี้จะเลือกอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่สวิตช์ คือ มอสเฟตกำลัง จุดเด่นของมอสเฟตกำลัง คือ ทำงานได้ดีที่ความถี่สวิตช์สูง ตั้งแต่ 100kHz ถึง 400 kHz ใช้เวลาในการเปลี่ยนสถานะสั้นๆ ฝึกการทำงานของแรงดันไฟฟ้าต่ำถึงแรงดันไฟฟ้าสูง แต่มีข้อจำกัดกระแสไฟฟ้าสูงและการพัฒนาในปัจจุบันมีแนวโน้ม ทำให้มอสเฟตกำลังทำงานที่ความถี่สวิตช์สูงมากขึ้นไปอีก ซึ่งจะเป็นผลดีในการลดขนาดของอินเวอร์เตอร์ และมอสเฟตจะไม่เกิด การเบรกดาวน เพราะความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้านทานระหว่างขาเดรน(Drain) กับ ขาซอส (Source) ขณะนำกระแสไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ อุณหภูมิเพิ่มขึ้นทำให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านน้อยลง กำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นในขณะที่มอเตอร์กำลังทำงาน จะเป็นไปได้ 2 ลักษณะ คือ การสูญเสียขณะนำกระแสไฟฟ้า และ การสูญเสียขณะสวิตช์



รูปที่ 3.16 3-phase inverter

### 3.7.1 คำนวณหาค่าพิกัดแรงดันขาออกของอินเวอร์เตอร์

เมื่อกำหนดแรงดันขาเข้า  $V_d = 24$  โวลต์

$$\begin{aligned}
 V_{LL1} &= \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} (V_{LL})_1 = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \frac{V_d}{2} & (3.1) \\
 &= \frac{\sqrt{6}}{\pi} \cdot V_d \\
 &= 0.78V_d \\
 &= 0.78 \times 24 \\
 &= 18.72 \text{ V}
 \end{aligned}$$

### 3.7.2 คำนวณหาค่าพิกัดแรงดันขาออกของอินเวอร์เตอร์

เมื่อกำหนดให้พิกัดกำลังขาออก เท่ากับ 100 วัตต์ ค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.8

$$\begin{aligned}
 P_{LL1} &= \sqrt{3} V_{LL1} I_{LL1} \cos \theta & (3.2) \\
 I_{LL1} &= \frac{100}{\sqrt{3} \times 18.72 \times 0.8} \\
 I_{LL1} &= 5.45 \text{ A}
 \end{aligned}$$

### 3.7.3 คำนวณหาค่าพิกัดกำลังไฟฟ้าขาเข้า

เมื่อกำหนดให้พิกัดกำลังขาออก เท่ากับ 100 วัตต์ ค่าประสิทธิภาพมอเตอร์ 80%

$$eff = \frac{P_{in}}{P_{out}} \times 100\% \quad (3.3)$$

$$P_{in} = \frac{100}{80} \times 100 \\ = 120 \text{ W}$$

### 3.7.4 คำนวณหาค่าพิกัดกระแสไฟฟ้าขาเข้าของอินเวอร์เตอร์

$$P_d = V_d I_d \quad (3.4)$$

$$I_d = \frac{120}{24} \\ = 5 \text{ A}$$

ในการเลือกใช้งานมอสเฟสจำเป็นต้องเพื่อพิกัดการใช้งานที่ 70% เพื่อป้องกันการใช้งานเกินพิกัด และการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าอย่างทันทีทันใด จึงเลือกใช้งาน มอสเฟตกำลัง IRF2807 พิกัด 82 แอมแปร์ 75 โวลต์ แบบเอ็นแชนแนล(N-channel) โดยมีค่าความต้านทานขณะนำกระแส ( $R_{ds,on}$ ) เท่ากับ 0.013 โอห์ม

### 3.8 การออกแบบวงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (Voltage divider sensor)

วงจรตรวจจับแรงดันจะเป็นการนำตัวต้านทานสองตัวมาต่ออนุกรมกันและแบ่งแรงดันออกเป็นสัญญาณส่งไปที่ไมโครคอนโทรลเลอร์ ดังสมการ

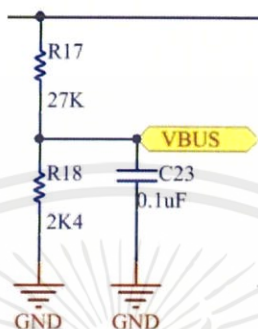
$$V_{out} = V_{in} \times \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (3.5)$$

ในโครงการนี้ คณะผู้จัดทำ กำหนดให้  $V_{in} = 24$ ,  $R_1 = 27 \text{ K}\Omega$ ,  $R_2 = 24 \text{ K}\Omega$  แทนสมการที่ 3.5 จะได้

$$V_{out} = 24 \times \frac{2,400}{27,000 + 2,400} \\ V_{out} = 1.96 \text{ V}$$

นำค่าของแรงดันที่ได้จากแหล่งไฟฟ้ากระแสตรง ส่งต่อให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ต่อไป โดยไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถรับแรงดันได้อยู่ในช่วง 0-5 โวลต์ ดังนั้นจะต้องตรวจสอบสัญญาณแรงดันไม่ให้เกินค่าพิกัดของไมโครคอนโทรลเลอร์

ในการศึกษานี้ คณะผู้จัดทำได้ออกแบบวงจรให้ป้องกันการทำงานที่ผิดพลาดของการทำงานในย่านแรงดัน 24 โวลต์



รูปที่ 3.17 วงจรตรวจสอบจ่ายกระแสไฟฟ้า

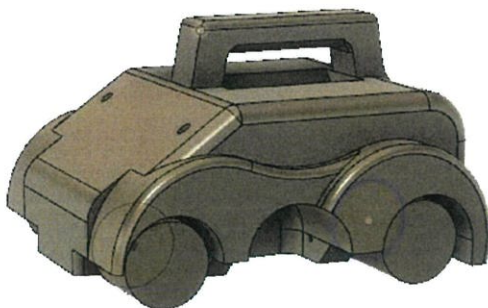
### 3.9 การออกแบบหุ่นยนต์ไต่ผนัง

การออกแบบโครงสร้างและล้อของหุ่นยนต์นั้น ออกแบบโดยใช้โปรแกรม Autodesk Fusion 360 โดยลักษณะของหุ่นยนต์ไต่ผนังที่กำหนดไว้ดังรูปที่ 3.17 ภายในประกอบด้วยมอเตอร์ที่ใช้ขับเคลื่อน และแผงวงจรควบคุม ส่วนล้อแม่เหล็กมีจำนวนสี่ล้อ ล้อแม่เหล็กด้านหลังทำหน้าที่ขับเคลื่อนให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ ในขณะที่ล้อแม่เหล็กด้านหน้าทั้งสองจะต้องมีแรงดึงดูดกับผนังเพียงพอที่จะทำให้หุ่นยนต์สามารถยึดเกาะบนผนังเหล็กที่วางตัวได้ ถึงแม้ว่าล้อด้านหน้าจะไม่ใช่ในการขับเคลื่อนหุ่นยนต์แต่จะต้องสามารถเปลี่ยนทิศทางของแกนหมุนให้สอดคล้องกับการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์



AUTODESK®  
FUSION 360™

รูปที่ 3.18 โปรแกรม Autodesk Fusion 360



รูปที่ 3.19 แบบจำลองรถไต้ผนั่ง

### 3.9.1 การออกแบบล้อแม่เหล็กของหุ่นยนต์

เนื่องจากล้อแม่เหล็กของหุ่นยนต์ทำหน้าที่ขับเคลื่อนหุ่นยนต์ให้เคลื่อนที่ ดังนั้นล้อแม่เหล็กประเภทนี้จะต้องสามารถสร้างแรงเสียดทานสถิตระหว่างล้อกับพื้นได้มาก เพื่อให้ล้อสามารถขับเคลื่อนหุ่นยนต์โดยไม่เกิดการไถล ดังนั้นล้อแม่เหล็กนี้จึงควรออกแบบให้มีแรงดึงดูดกับผนังเหล็กมาก เพื่อให้แรงปฏิกิริยาในแนวตั้งฉากกับผนังมีค่ามาก

โดยการออกแบบจะใช้โครงล้อที่ทำจากเครื่องปริ้นเตอร์สามมิติ โดยมีแท่งแม่เหล็กอยู่ภายใน และถูกประกบด้วยแผ่นเหล็กวงกลม แล้วหุ้มโครงล้อด้วยแผ่นกันลื่นเพื่อเพิ่มแรงเสียดทานในการยึดเกาะ และออกแบบให้พื้นผิวของแผ่นเหล็กวงกลมกับแผ่นกันลื่นมีการสัมผัสกับผนังเหล็กไปพร้อมกัน ดังรูปที่ 3.18

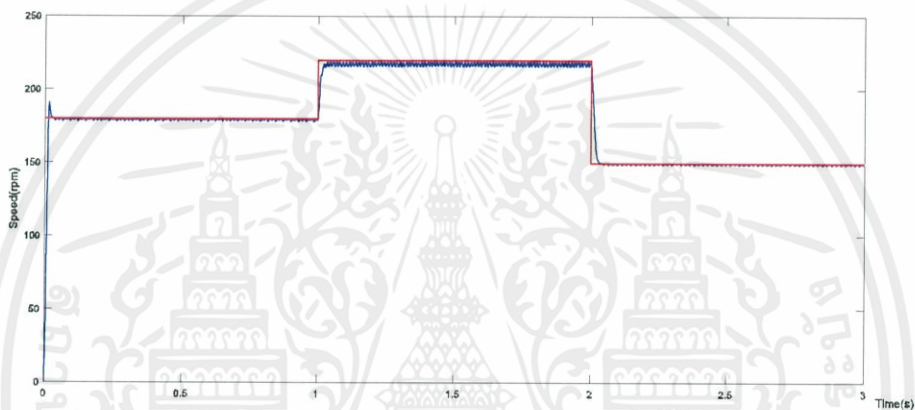


รูปที่ 3.20 แบบจำลองล้อแม่เหล็ก

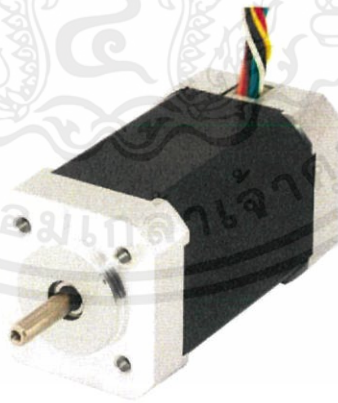
## บทที่ 4

### การทดสอบและการประมวลผล

ในบทนี้จะแสดงผลการทดสอบการควบคุมความเร็วแบบป้อนกลับของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านโดยใช้การควบคุมเทคนิคแบบพีซีคอนโทรล ซึ่งการทดสอบจะเป็นการทดสอบกับตัวรถหุ่นยนต์สำหรับการไต่ผนังขึ้นลงในแนวตั้ง เป็นระยะทาง 150 เซนติเมตร แล้วนำผลของความเร็วมาเปรียบเทียบกับความเร็วอ้างอิงที่กำหนดไว้ โดยทำการแสดงผลความเร็วผ่านทางจอ LCD โดยมีผลการควบคุมความเร็วแบบ close loop ซึ่งทำการทดสอบใน Simulink ได้ผลดังนี้



รูปที่ 4.1 ผลการจำลองการควบคุมความเร็วแบบ close loop ใน Simulink



รูปที่ 4.2 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านที่นำมาทดลอง มีข้อมูลจำเพาะดังนี้

- เป็นมอเตอร์ที่มีขั้วแม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet)

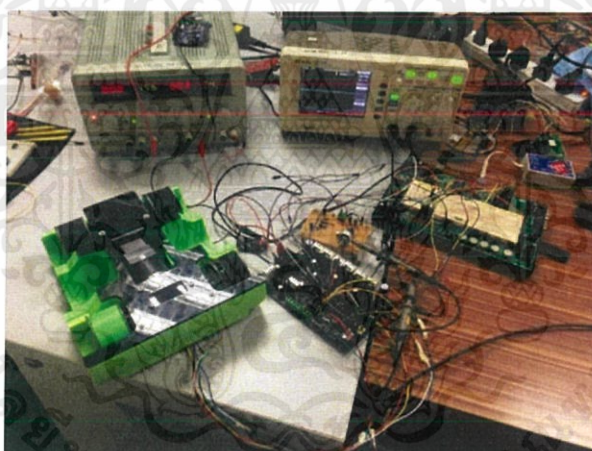
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ชนิด 3 เฟส 120 องศา ทางไฟฟ้า 8 ขั้ว
- แรงดันไฟฟ้า 24 โวลต์
- พิกัดกำลังเอาต์พุต 30 วัตต์
- พิกัดความเร็วรอบ 80 รอบ/นาที
- พิกัดแรงบิด 3.2 นิวตันเมตร

#### 4.1 อุปกรณ์และเครื่องมือวัดทางไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบมอเตอร์

อุปกรณ์และเครื่องมือวัดทางไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบการทำงานของชุดควบคุมและการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน

1. มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน
2. ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน
3. Oscilloscope
4. แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง
5. จอ LCD ใช้แสดงผลของความเร็วรอบ



รูปที่ 4.3 อุปกรณ์การทดสอบมอเตอร์

#### 4.2 การทดสอบมอเตอร์

##### 4.2.1 จุดประสงค์ของการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน

1. เพื่อศึกษาสมรรถนะของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน
2. เพื่อศึกษาชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน
3. เพื่อศึกษาการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน โดยใช้การควบคุมแบบ Fuzzy logic

#### 4.2.2 การทดสอบ

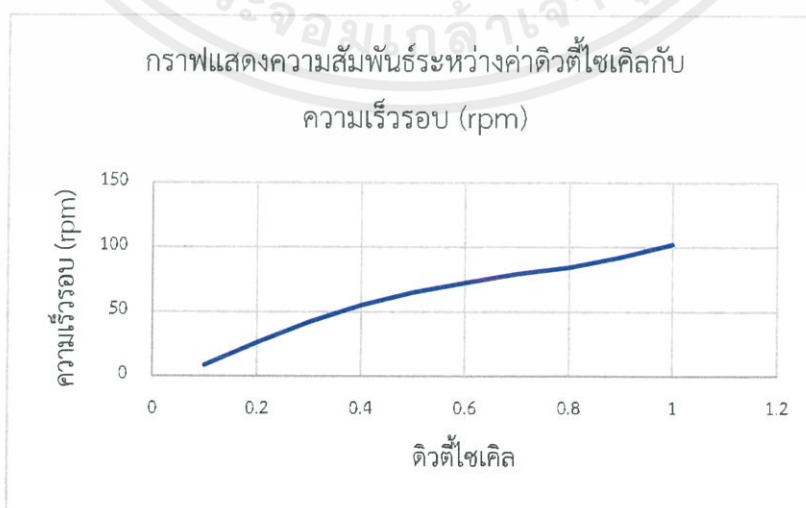
วงจรการทดสอบประกอบด้วย แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 24 โวลต์ ต่อเข้ากับชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ แสดงผลผ่านจอ LCD และต่อเข้ากับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน โดยในการทดสอบได้มีการปรับค่าความเร็วที่ป้อนเข้าไปเพื่อให้ได้ค่าความเร็วอ้างอิง

#### 4.2.3 ผลการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน กรณี Open loop

จากการทดลองมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน โดยจ่ายแรงดันไฟฟ้า 24 โวลต์ ได้ผลการทดลองดังนี้

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน กรณี Open loop

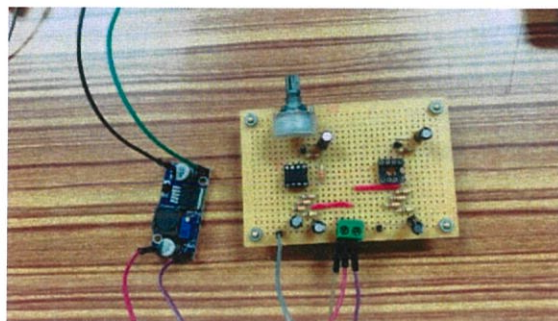
Duty Cycle	ความเร็วรอบ(rpm)
0.1	8
0.2	26
0.3	42
0.4	55
0.5	65
0.6	72
0.7	75
0.8	84
0.9	92
1	102



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าดิวตี้ไซเคิลกับความเร็วรอบ (rpm)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.4 ผลการทดสอบความเร็วมอเตอร์

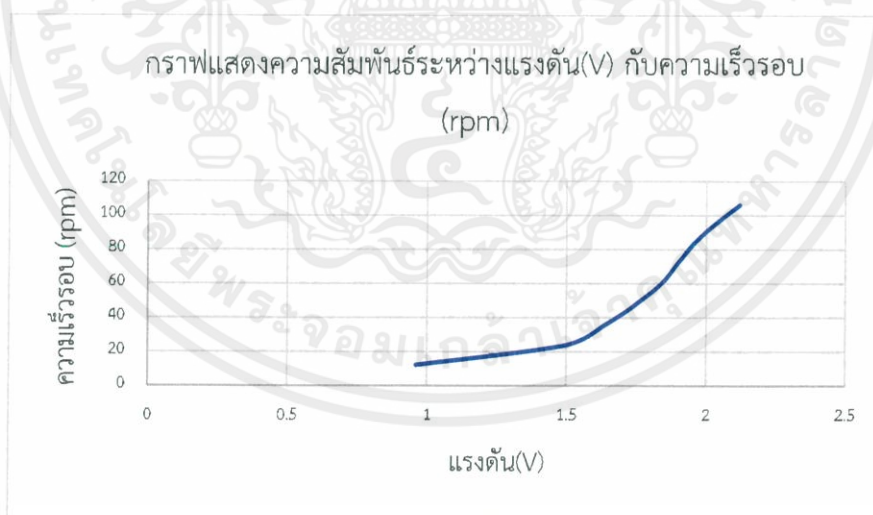


รูปที่ 4.5 วงจร frequency to voltage

จากการใช้วงจร frequency to voltage เพื่อหาความเร็วที่แรงดันไฟฟ้าต่างๆ ได้ผลการทดลอง ดังนี้

#### ตารางที่ 4.2 การทดสอบความเร็วมอเตอร์

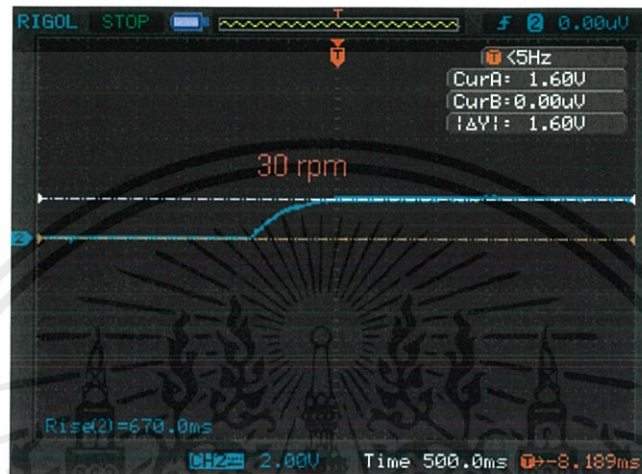
ความเร็ว (rpm)	12	24	36	48	60	72	84	96	106
แรงดัน (V)	0.96	1.5	1.64	1.75	1.84	1.9	1.96	2.04	2.12



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดัน (V) กับความเร็วรอบ (rpm)

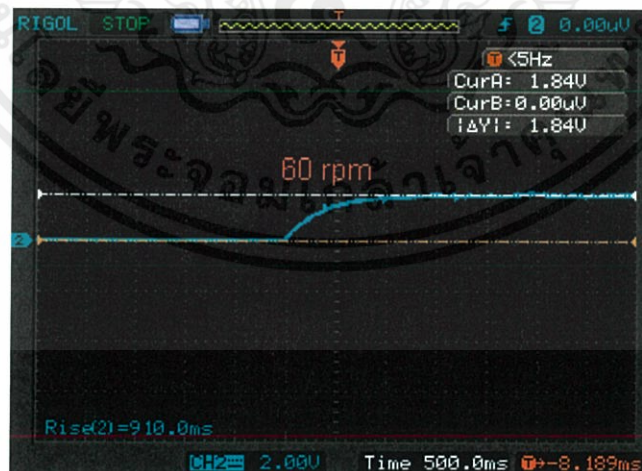
#### 4.2.5 ผลการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน กรณี Close loop ไม่มีโหลด

จากการทดลองมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน โดยจ่ายแรงดันไฟฟ้า 24 โวลต์ ทำการทดสอบ 3 ครั้งที่ความเร็วอ้างอิงต่างกัน ดังนี้  
 ครั้งที่ 1 ทดสอบที่ความเร็วอ้างอิง 30 rpm ได้ผลการทดลองดังนี้ ความเร็วจริง=30 rpm, rise time=670 ms และ setting time=500 ms



รูปที่ 4.7 แรงดันที่ความเร็วรอบ 30 rpm

ครั้งที่ 2 ทดสอบที่ความเร็วอ้างอิง 60 rpm ได้ผลการทดลองดังนี้ ความเร็วจริง=59 rpm, rise time=910 ms และ setting time=750 ms



รูปที่ 4.8 แรงดันที่ความเร็วรอบ 60 rpm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ครั้งที่ 3 ทดสอบที่ความเร็วอ้างอิง 85 rpm ได้ผลการทดลองดังนี้ ความเร็วจริง=84 rpm, rise time=850 ms และ setting time=700 ms



รูปที่ 4.9 แรงดันที่ความเร็วรอบ 85 rpm

จากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง สามารถนำมาเขียนบันทึกผลได้ ดังนี้

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน กรณี Close loop ไม่มีโหลด

ความเร็วอ้างอิง (rpm)	ความเร็วจริง (rpm)	Rise time (mS)	Setting time (mS)
30	30	670	500
60	59	910	750
85	84	850	700

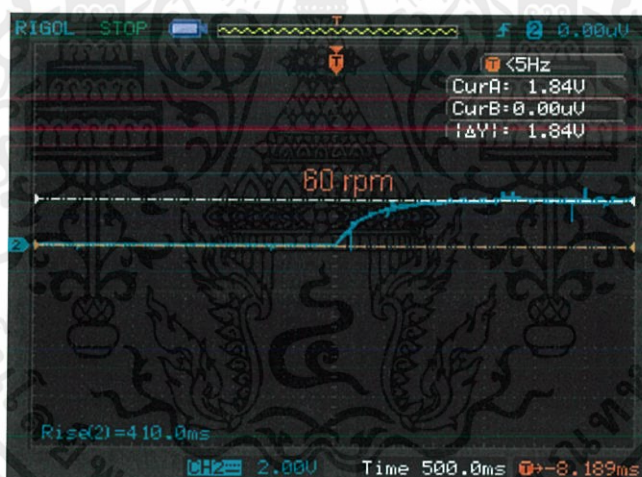
#### 4.2.6 ผลการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน กรณี Close loop มีโหลด

จากการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน โดยจ่ายแรงดันไฟฟ้า 24 โวลต์ โดยมี โหลดน้ำหนัก 6 กิโลกรัม ทำการทดสอบ 3 ครั้งที่ความเร็วอ้างอิงต่างกัน ดังนี้  
ครั้งที่ 1 ทดสอบที่ความเร็วอ้างอิง 30 rpm ได้ผลการทดลองดังนี้ ความเร็วจริง=29 rpm, rise time=830 ms และ setting time=500 ms



รูปที่ 4.10 แรงดันที่ความเร็วรอบ 30 rpm

ครั้งที่ 2 ทดสอบที่ความเร็วอ้างอิง 60 rpm ได้ผลการทดลองดังนี้ ความเร็วจริง=61 rpm, rise time=410 ms และ setting time=700 ms



รูปที่ 4.11 แรงดันที่ความเร็วรอบ 60 rpm

ครั้งที่ 3 ทดสอบที่ความเร็วอ้างอิง 85 rpm ได้ผลการทดลองดังนี้ ความเร็วจริง=86 rpm, rise time=850 ms และ setting time=750ms



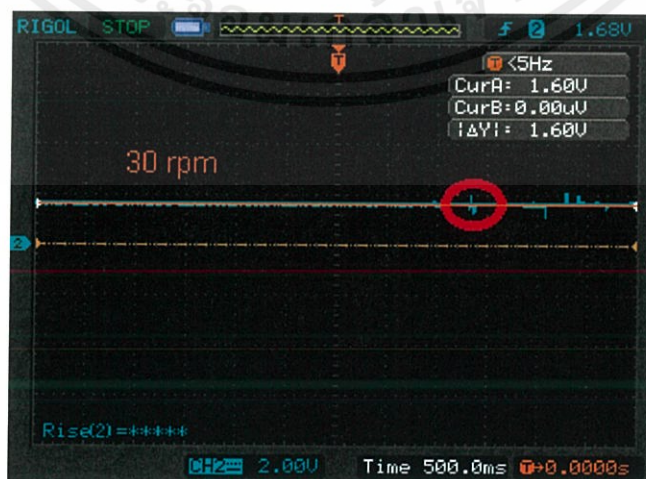
รูปที่ 4.12 แรงดันที่ความเร็วรอบ 85 rpm

จากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง สามารถนำมาเขียนบันทึกผลได้ ดังนี้

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน กรณี Close loop มีโหลด

ความเร็วอ้างอิง (rpm)	ความเร็วจริง (rpm)	Rise time (ms)	Setting time (ms)
30	29	830	500
60	61	410	700
85	86	850	750

#### 4.2.7 ผลการทดสอบการรักษาเสถียรสภาพ



รูปที่ 4.13 การรักษาเสถียรภาพ

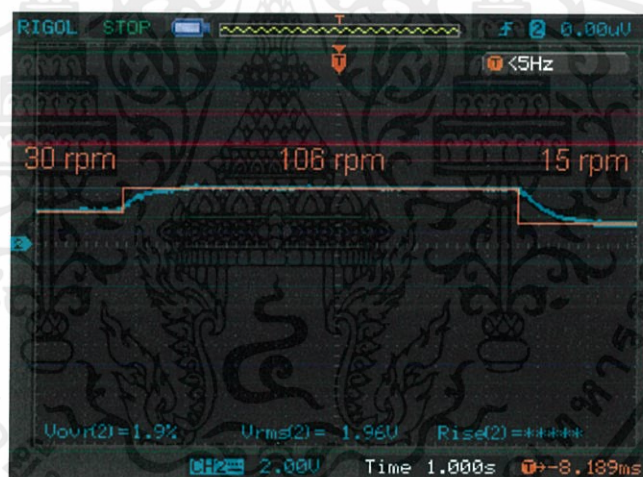
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.13 แสดงถึงการรักษาสภาพความเร็วในขณะใส่โหลด 6 กิโลกรัม โดยมีความเร็วอ้างอิงที่ 30 rpm ซึ่งในจุดที่วงกลมไว้คือช่วงเวลาในขณะใส่โหลดเข้าไปในการทดสอบ จะเห็นได้ว่าความเร็วมีค่าตกลงเล็กน้อย แล้วกลับเข้าสู่ความเร็วอ้างอิงเดิมได้อย่างรวดเร็ว

#### 4.2.8 ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงความเร็วในระดับต่างๆ

ตารางที่ 4.5 การเปลี่ยนแปลงความเร็วในระดับต่างๆ

ช่วงที่	ความเร็วรอบ (rpm)	Vrms (V)	Rise time (ms)
1	30	1.64	-
2	106	2.12	440
3	15	0.96	800



รูปที่ 4.14 การเปลี่ยนแปลงความเร็วในระดับต่างๆ

#### 4.3 การทดสอบหุ่นยนต์

ในการทดสอบการไต่ของหุ่นยนต์กับผนังเหล็กเพื่อทดสอบการควบคุมความเร็ว โดยได้นำไปไต่กับผนังเหล็กที่ทำมุมตั้งฉากกับพื้น ซึ่งมีความสูงของผนังประมาณ 150 ซม. แล้วใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแหล่งจ่ายสำหรับหุ่นยนต์ ในการทำงานและการขับเคลื่อนของหุ่นยนต์จะถูกควบคุมโดยใช้โทรศัพท์มือถือผ่านแอปพลิเคชัน Blynk ในการเคลื่อนที่ได้ออกแบบให้มีการเคลื่อนไปข้างหน้าทิศทางเดียวและหยุดเท่านั้น(ไม่สามารถเลี้ยวหรือถอยหลังได้) และในขณะที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่ มีการบอกความเร็วของหุ่นยนต์ผ่านแอปพลิเคชันนี้ได้ด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 หุ่นยนต์ในขณะไต่ขึ้นผนัง



รูปที่ 4.16 แอปพลิเคชันที่ใช้ควบคุมหุ่นยนต์

ผลการทดสอบในการไต่กับผนังจริงพบว่า หุ่นยนต์สามารถไต่ขึ้นไปได้โดยมีความเร็วคงที่ แต่บางครั้งล้อมีการไถลกับผนัง เนื่องจากแรงเสียดทานไม่พอในจุดนั้น หรืออาจเป็นเพราะความสกปรกของล้อและผนังในจุดนั้น อีกทั้งบางจุด เช่น รอยต่อของผนังไม่ราบเรียบ จึงอาจส่งผลต่อความเร็วระหว่างเคลื่อนที่ทำให้ความเร็วไม่นิ่งในช่วงนั้น

#### 4.4 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน ในกรณี open loop พบว่าค่า เมื่อปรับค่า Duty cycle เพิ่มขึ้นความเร็วรอบของมอเตอร์ก็จะเพิ่มขึ้นด้วย

จากการทดลองการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน ในกรณี close loop พบว่า ความเร็วอ้างอิงและความเร็วจริงของมอเตอร์มีค่าใกล้เคียงกันมาก คือ หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่บนผนังเหล็กโดยคงสภาพความเร็วที่ต้องการได้และระบบยังสามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความเร็วได้อย่างรวดเร็ว



## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

โครงการนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษา ออกแบบ และสร้างหุ่นยนต์ไต่ผนังหม้อต้มไอน้ำโดยใช้ ล้อแม่เหล็ก โดยใช้การควบคุมด้วยเทคนิคฟัซซี (Fuzzy logic)

จากการทดสอบหุ่นยนต์ไต่ผนังที่สร้างขึ้น พบว่า หุ่นยนต์สามารถยึดเกาะและเคลื่อนที่บน ผนังเหล็กแบน 1.28 มิลลิเมตร ที่มีระนาบเอียงมุมทดสอบ เท่ากับ 90 องศาได้ นอกจากนี้การใช้ตัว ควบคุมส่งค่าความเร็วป้อนกลับด้วยเทคนิคฟัซซี (Fuzzy logic) ทำให้หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่บน ผนังเหล็กโดยคงสภาพความเร็วที่ต้องการได้และระบบยังสามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลง ความเร็วได้อย่างรวดเร็ว (ค่าRise time น้อยกว่า 1 วินาที) นอกจากนี้ระบบยังมีเสถียรภาพ เนื่องจาก สามารถทนต่อการรบกวนทางกล ดังจะเป็นได้จากผลการทดลองการเปลี่ยนแปลงโวลต์ที่ตัวหุ่นยนต์

#### 5.2 ปัญหาที่พบและข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากสายส่งสัญญาณอาจเป็นอุปสรรคต่อการทำงานของหุ่นยนต์บนผนังเหล็ก เพราะ สายไฟอาจมีความยาว ทำให้หุ่นยนต์ต้องรับภาระเพิ่มในการยึดเกาะกับผนังเหล็ก จึงต้องมีการติดต่อบน ผนังเหล็กกับหุ่นยนต์ เช่น แบตเตอรี่ รวมทั้งอุปกรณ์ส่งและรับสัญญาณไร้สายบนหุ่นยนต์
2. เนื่องจากการออกแบบของหุ่นยนต์ไต่ผนังมีความผิดพลาด ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ไม่เป็น เส้นตรง จึงต้องมีการควบคุมทิศทางในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ไต่ผนังเหล็กโดยการควบคุมการเลี้ยว ของล้อได้
3. เนื่องจากในวงจรขับมอเตอร์ไร้แปรงถ่านยังมีขนาดใหญ่และมีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ หลายชิ้น อาจจะเป็นปัญหาในด้านการบำรุงรักษาได้ในอนาคต ดังนั้นสามารถลดขนาดของวงจรได้ โดยการใช Smart power module (SPM) เป็นต้น
4. เมื่อมีการติดตั้งระบบทำความสะอาดในหุ่นยนต์ จะมีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักอยู่เสมอ จึง เลือกใช้ระบบควบคุมแบบฟัซซีแทนการใช้การควบคุมแบบ PID เพราะระบบควบคุมแบบฟัซซีมีไดนามิกในการรักษาความเร็วมากกว่า และไม่ต้องจูนค่าใหม่เมื่อโวลต์มีการเปลี่ยนแปลง
5. เนื่องจากการใช้กราฟรูป 4 เหลี่ยมในการคำนวณระบบการควบคุมฟัซซี จะได้แค่ค่าสูงสุด และต่ำสุด จึงเลือกใช้กราฟรูป 3 เหลี่ยมแทนเพื่อให้ได้ค่าที่หลากหลายมากขึ้น
6. การเลือกใช้กราฟรูป 3 เหลี่ยม ในระบบฟัซซีจะได้สมการที่นำไปเขียนใน ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นสมการเส้นตรง ซึ่งทำให้ระบบมีกระบวนการที่เร็วกว่าสมการที่เป็นกราฟ ประเภทอื่นๆ และ ผลลัพธ์ที่ได้ก็ไม่ได้แตกต่างกับกราฟประเภทอื่นๆ

7. การเลือกใช้ Membership เพียง 3 ตัวนั้น เพราะว่า เมื่อมี Membership มากกว่านี้แล้ว การทำงานของระบบก็จะล่าช้าขึ้น อีกทั้งการใช้ Membership เพียง 3 ตัว ก็เพียงพอต่อการทำงานของระบบนี้แล้ว



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] ศรีวิชัย พรหมทอง, “การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านแบบไรต์ตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์พร้อมลดการกระเพื่อมแรงบิดมอเตอร์,” *วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี*, 2556.
- [2] กฤตภาส ผินสันเทียะ และคณะ, “การออกแบบและสร้างชุดควบคุมมอเตอร์กระแสตรงแบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่าน,” *ปริญญาานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง*, 2554.
- [3] สำเร็จ เต็มราม, “การควบคุมมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านในย่านกำลังไฟฟ้าคงที่ด้วยหลักการชดเชยมุมเฟสก้าวหน้าด้วยการประยุกต์ใช้บอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัล dsPIC30F2010,” *วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี*, 2556.
- [4] ดวงดาว ลอมไธสง, ภัทรวดี จันทกุล และ สิทธิพันธ์ สังข์ทอง, “ระบบควบคุมมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร,” *ปริญญาานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง*, 2559.
- [5] รศ.ดร. วีระเชษฐ ชันเงิน และ วุฒิพล ธาราธิรเศรษฐ์, *อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (Power Electronics)*, พิมพ์ครั้งที่10, กรุงเทพฯ, วี.เจ. พรินตติ้ง, 2553.
- [6] ตฤณโชค เอี่ยมมนัสสกุล, “การออกแบบและสร้างหุ่นยนต์ไต่ผนังด้วยล้อแม่เหล็ก,” *วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย*, 2556.
- [7] Aaron Burmeister, Maxwell Kerber, Brian Dick and Anson Brune, “Design and Optimization of a Magnetic Wheel for Hull Climbing”
- [8] C. SHEEBA JOICE and P.NIVEDHITHA, SIMULATION OF SPEED CONTROL OF BRUSHLESS DC MOTOR, WITH FUZZY LOGIC CONTROLLER, *Electronics and Data Communication*, Volume.2, 2014, pp. 25-29
- [9] วัชรพันธ์ ประเสริฐสิทธิ์, “ระบบควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิก,” *วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย*, 2538.
- [10] Datasheet dsPIC30F4011 [ออนไลน์]. <http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/70135C.pdf>
- [11] ET-BEST dsPIC30F4011 [ออนไลน์]. <http://www.ett.co.th/product2009/ET-PIC/man%20ET-BASE%20dsPIC30.pdf>
- [12] Control Arduino Uno Using ESP8266 WiFi Module and Blynk App [ออนไลน์]. <https://www.hackster.io/adithya-tg/control-arduino-uno-using-esp8266-wifi-module-and-blynk-app-504494>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# การควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไร้แปรงถ่านสำหรับหุ่นยนต์ไต่ผนังท่อเหล็กด้วยเทคนิคฟัซซี่

## Speed Control of BLDC Motor for Steel Pipe Wall Climbing Robot Base on Fuzzy

### Technique

จักรภัทร ทะลิก, พีรพงศ์ ศรีธนพงศา, กัทธธร โรจนหิรัญย์ และ อัมฉฎาฐ พลศรี

ดร.ภูมิ คงห้วยรอบ

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1 ซอย ฉลองกรุง 1 ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์ 02-329-8000 ต่อ 3515 E-Mail : power@kmitl.com

### บทคัดย่อ

ปัญหานิวตันฉบับนี้มีวัตถุประสงค์ในการออกแบบและสร้างชุดควบคุมมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน ซึ่งนำมาประยุกต์ใช้กับการทำหุ่นยนต์ไต่ผนังสำหรับทำความสะอาดหม้อต้มไอน้ำ โดยการทำงานจะเริ่มจาก (๑) ฮอลล์เซนเซอร์ตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์เพื่อจัดลำดับการทำงานของมอเตอร์ (๒) สัญญาณพัลส์วิดท์มอดูเลชันถูกส่งในการขับสวิตช์ของวงจรถูกอินเวอร์เตอร์ (๓) ใช้เทคนิคฟัซซี่ลอจิกควบคุมค่าตัวที่ไซเคิลของสัญญาณพัลส์วิดท์มอดูเลชันเพื่อปรับความเร็วจริงของมอเตอร์ให้มีความเร็วอ้างอิงอยู่ตลอดเวลา นอกจากนี้ล้อของหุ่นยนต์ถูกออกแบบให้แม่เหล็กมีการวางตัวอย่างเหมาะสม ส่งผลให้หุ่นยนต์ที่นำเสนอสามารถเกาะติดกับผนังเหล็กของหม้อต้มไอน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ

### Abstract

This thesis aims to design and create a control module for the Brushless DC Motor applied to the robot to climb the wall for cleaning the steam boiler. The operation of the system started from. (1) Hall sensor detects the position of the rotor for arranging working sequence. (2) PWM signals are used to drive the switch of the 3 phase inverter. (3) Fuzzy logic control technique is proposed in this project to control the duty cycle of the PWM signal in order to adjust the actual speed to equals to the reference speed at all time. Moreover, the robot wheels are designed based on the suitable placing of bar magnet causing the proposed robot can stick on the iron wall of the steam boiler efficiently.

### 1. บทนำ

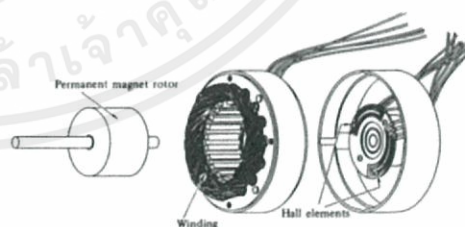
ในปัจจุบันโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ ที่มีการใช้หม้อต้มไอน้ำขนาดใหญ่ต้องมีการบำรุงรักษาหม้อต้มไอน้ำตามตารางซ่อมบำรุงอยู่เสมอ โดยให้คนงานขึ้นไปทำความสะอาดและเคลือบสารที่ผิว ซึ่งต้องใช้งบประมาณสูง อีกทั้งยังเป็นงานที่เสี่ยงต่ออันตรายสำหรับคนงาน จึงได้มีการริเริ่มแนวคิดในการใช้หุ่นยนต์ในการทำงานข้างต้นแทนคน แล้ว

เนื่องจากผนังของหม้อต้มไอน้ำเป็นเหล็ก จึงได้ใช้ล้อที่เป็นแม่เหล็กเพื่อการเกาะติดผนังในการเคลื่อนที่ และการขับเคลื่อนหุ่นยนต์ได้มีการเลือกใช้มอเตอร์โดยพิจารณาจากประสิทธิภาพ อายุการใช้งาน จึงได้เลือกมอเตอร์ชนิดมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านในการขับเคลื่อน โดยออกแบบระบบควบคุมด้วยเทคนิคฟัซซี่แบบฟลูโคโนะ เพื่อให้ง่ายต่อการออกแบบคำสั่งควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อตอบสนองต่องานที่ทำได้เหมาะสม

### 2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ทฤษฎี Brushless DC motor

มอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน (Brushless DC Motor) เป็นมอเตอร์ไฟฟ้าประเภทซิงโครนัสมอเตอร์ที่มีโรเตอร์เป็นแม่เหล็กถาวร จะใช้หลักการให้วงจรอิเล็กทรอนิกส์จ่ายกระแสให้ขดลวดสเตเตอร์แต่ละเฟสสลับกันไปเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กให้สัมพันธ์กับการหมุนของโรเตอร์ การออกแบบเช่นนี้ทำให้ไม่ต้องมีการใช้แปรงถ่าน (Brush) ทำให้ไม่มีการเสียดสีและลดการบำรุงรักษามอเตอร์ อีกทั้งยังช่วยให้ไม่มีเสียงและประกายไฟที่เกิดจากแปรงถ่าน ซึ่งที่นิยมใช้จะเป็นมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านแบบ 3 เฟส



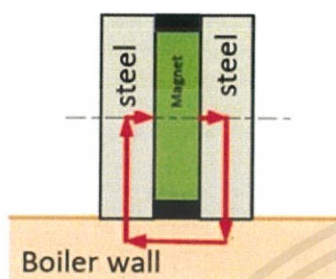
รูปที่ 1 Brushless DC Motor

#### 2.2 ล้อแม่เหล็ก

ล้อแม่เหล็กมีโครงสร้างคือ แม่เหล็กถาวรและแผ่นเหล็กที่ประกอบเข้ากับทั้งสองด้านของแม่เหล็ก (ขั้วเหนือและขั้วใต้ของแม่เหล็ก) โดยที่แผ่นเหล็กจะต้องมีเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่าแม่เหล็กวงแหวนเล็กน้อยเพื่อให้วงจรแม่เหล็ก (Magnetic circuit) ของล้อแม่เหล็กมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะดังรูปที่ 2 ล้อแม่เหล็กที่มีโครงสร้างรูปแบบนี้จะทำให้ฟลักซ์แม่เหล็กส่วนใหญ่อยู่ภายในแผ่นเหล็กและผนังเหล็ก จะถูกส่งผ่านแผ่นเหล็กด้านซ้ายเหนือของแม่เหล็กไปยังผนังเหล็กและกลับเข้าสู่แผ่นเหล็กด้านขวาใต้ของแม่เหล็ก รูปแบบของวงจรแม่เหล็กนี้จึงส่งผลให้แรงดึงดูดของล้อแม่เหล็กกับผนังเหล็กมากกว่าการใช้แม่เหล็กเพียงอย่างเดียว



รูปที่ 2 ลักษณะของล้อแม่เหล็ก

### 2.3 ตรรกศาสตร์ฟัซซี (Fuzzy logic)

ตรรกะแบบฟัซซี (fuzzy logic) เป็นเครื่องมือที่ช่วยในการตัดสินใจภายในได้ความไม่แน่นอนของข้อมูล โดยยอมให้มีความยืดหยุ่นได้ ใช้หลักเหตุผลที่คล้ายการเขียนแบบวิธีความคิดที่ซับซ้อนของมนุษย์ (uncertain) อาจเป็นสิ่งที่คลุมเครือ (fuzzy) ไม่ใช่ ชัดเจน (exact) การนำตรรกศาสตร์ฟัซซีมาใช้ในระบบควบคุมจะมีการทำงานทั่วไปอยู่ 4 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ฟัซซีฟิเคชัน คือ การแปลงการอินพุตแบบทวินัยเปลี่ยนเป็นการอินพุตแบบตัวแปรฟัซซี

ขั้นตอนที่ 2 กฎพื้นฐานของฟัซซี (Rule based) คือเป็นการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างการอินพุตทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับเอาต์พุตที่อาศัยหลักการของการหาเหตุและผล

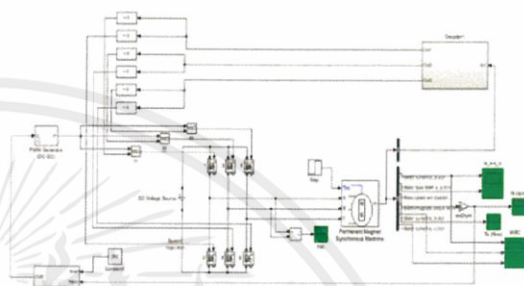
ขั้นตอนที่ 3 อินเฟอเรนซ์ แมคคาโมนิซึม คือ เป็นการหาฟัซซีเอาต์พุต โดยการนำกฎการควบคุมที่สร้างขึ้น ในขั้นตอนที่ 2 มาประมวลผลกับฟัซซีอินพุต โดยใช้วิธีการทางคณิตศาสตร์

ขั้นตอนที่ 4 ดีฟัซซีฟิเคชัน เป็นขั้นตอนสุดท้ายหรือขั้นตอนการสรุปเหตุผลฟัซซี โดยจะเปลี่ยนฟัซซีเอาต์พุตให้เป็นทวินัยเอาต์พุตด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์

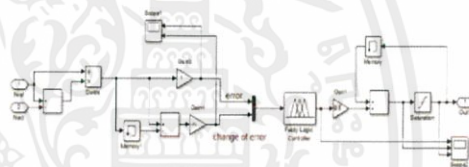
### 3. การจำลองการทำงานและการออกแบบ

#### 3.1 การจำลองการทำงานของ BLDC Motor โดยใช้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK

ในการจำลองการทำงาน BLDC Motor เป็นแบบใช้ Hall effect ในการตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์ ส่วนการควบคุมความเร็วจะใช้ Fuzzy logic controller



รูปที่ 3 การจำลองการทำงาน BLDC motor โดย MATLAB/SIMULINK



รูปที่ 4 วงจรภายในกล่องไดอะแกรม Fuzzy

### 4. การทดสอบและการประมวลผล

การทดสอบจะเป็นการทดสอบกับตัวรถหุ่นยนต์สำหรับการไต่ผนังขึ้นลงในแนวตั้ง เป็นระยะทาง 60 เซนติเมตร วงจรการทดสอบประกอบด้วย แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 24 โวลต์ ต่อเข้ากับชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ แสดงผลผ่านจอ LCD และต่อเข้ากับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน โดยในการทดสอบได้มีการปรับค่าความเร็วที่ป้อนเข้าไปเพื่อให้ได้ค่าความเร็วอ้างอิง

#### 4.1 การทดสอบ Close loop กรณีไม่มีโหลด

จากการทดลองมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน โดยจ่ายแรงดันไฟฟ้า 24 โวลต์ ทำการทดสอบ 3 ครั้งที่ความเร็วอ้างอิงต่างกักัน ดังนี้

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน กรณี Close loop ไม่มีโหลด

Reference speed (rpm)	Actual speed (rpm)	Rise time (mS)	Setting time (mS)
30	30	670	500
60	59	910	750
85	84	850	700

#### 4.2 การทดสอบ Close loop กรณีมีโหลด

จากการทดลองมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน โดยจ่ายแรงดันไฟฟ้า 24 โวลต์ โดยมีโหลดน้ำหนัก 6 กิโลกรัม ทำการทดสอบ 3 ครั้งที่ความเร็วอ้างอิงต่างกัน ดังนี้

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน กรณี Close loop มีโหลด

Reference speed (rpm)	Actual speed (rpm)	Rise time (ms)	Setting time (ms)
30	29	830	500
60	61	410	700
85	86	850	750

จากการทดลองการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน ในกรณี open loop พบว่าค่า เมื่อปรับค่า Duty cycle เพิ่มขึ้นความเร็วรอบของมอเตอร์ก็จะเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งสามารถนำมาเขียนสมการความสัมพันธ์ได้ คือ  $y = 115.94x + 1.0228$

#### 5 สรุปผลการทดลอง

จากการทดสอบหุ่นยนต์ไต่ผนังที่สร้างขึ้น พบว่า หุ่นยนต์สามารถยึดเกาะและเคลื่อนที่บนผนังเหล็กแบน 1.28 มิลลิเมตร ที่มีระนาบเอียงมุมทดสอบ เท่ากับ 90 องศาได้ นอกจากนี้การใช้ตัวควบคุมสังค่าความเร็วป้อนกลับด้วยเทคนิคฟัซซี(Fuzzy logic) ทำให้หุ่นยนต์

สามารถเคลื่อนที่บนผนังเหล็ก โดยคงสภาพความเร็วที่ต้องการได้และระบบยังสามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความเร็วได้อย่างรวดเร็ว (ค่าRise time น้อยกว่า 1 วินาที) นอกจากนี้ระบบยังมีเสถียรภาพ เนื่องจากสามารถทนต่อการรบกวนทางกล ดังจะเป็นได้จึงผลการทดลองการเปลี่ยนแปลงโหลดที่ตัวหุ่นยนต์

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] กฤตภาส ผินสันเทียะ และคณะ, "การออกแบบและสร้างชุดควบคุมมอเตอร์กระแสตรงแบบอัตโนมัติไม่มีแปรงถ่าน," **ปริญญาพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง**, 2554.
- [2] ดำเรียง เค็มราม, "การควบคุมมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน ในย่านกำลังไฟฟ้าคงที่ด้วยหลักการชดเชยมุมเฟสก้าวหน้าด้วยการประยุกต์ใช้บอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัล dsPIC30F2010," **วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี**, 2556.
- [3] ดฤณ โชค เอี่ยมมนัสสกุล, " การออกแบบและสร้างหุ่นยนต์ไต่ผนังด้วยล้อแม่เหล็ก," **วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย**, 2556.
- [4] C. SHEEBA JOICE and P.NIVEDHITHA, SIMULATION OF SPEED CONTROL OF BRUSHLESS DC MOTOR, WITH FUZZY LOGIC CONTROLLER, **Electronics and Data Communication**, Volume.2, 2014, pp. 25-29
- [5] Aaron Burmeister, Maxwell Kerber, Brian Dick and Anson Brune, "Design and Optimization of a Magnetic Wheel for Hull Climbing"



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Speed Control of BLDC Motor for Steel Pipe Wall Climbing Robot Base on Fuzzy Technique

Chakkapat Tali<sup>1</sup>, Peerapong Sritanapongsa<sup>2</sup>,  
Pattarathorn Rotchanahiran<sup>3</sup>, Atsadawut Phonsri<sup>4</sup> and Dr. Poom Konghuayrob<sup>4</sup>

### Abstract

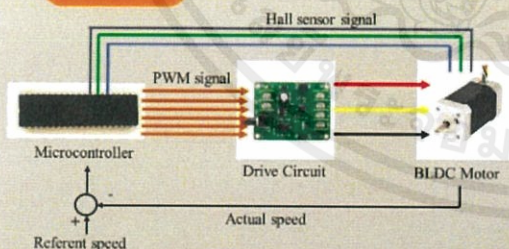
This project aims to design and create a control module for the Brushless DC Motor applied to the robot to climb the wall for cleaning the steam boiler. The operation of the system started from. (1) Hall sensor detects the position of the rotor for arranging working sequence. (2) PWM signals are used to drive the switch of the 3 phase inverter. (3) Fuzzy logic control technique is proposed in this project to control the duty cycle of the PWM signal in order to adjust the actual speed to equals to the reference speed at all time. Moreover, the robot wheels are designed based on the suitable placing of bar magnet causing the proposed robot can stick on the iron wall of the steam boiler efficiently.

### Introduction

Nowadays, companies or factories that use large steam boilers for the production process causing the boiler must be maintained according to the maintenance schedule such as checking the condition of the device, cleaning and coat the surface of the steam boiler. But it is dangerous to do by humans.

From the above problems. Therefore initiated the concept of using robots in the work instead of the worker to solve this problem. The robot design relies on the principle that the wall of the steam boiler is steel. Therefore, used a magnetic wheel to hold the wall in motion to work instead of the worker. By driving the robot we choose BLDC motor because it has high efficiency, long lifetime and inexpensive. With a control system, we use fuzzy logic control to respond appropriately to work.

### Methodology



The robot's work begins with hall sensors send signals to the microcontroller to drive motor. The microcontroller will control working system to close loop that the actual speed of the motor equal to the reference speed at all time, which is controlled by fuzzy logic control with the principle of increase or decrease duty cycles. If the actual speed is over than the reference speed, it will order to reduce the duty cycle. If the actual speed is less than the reference speed, it will be ordered to increase the duty cycle value.

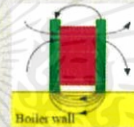


Figure 2: Magnetic flux movement

Structure of magnetic wheel includes Permanent magnet and iron sheets. The permanent magnet is between iron sheets and diameters of iron sheets are more than diameters of Permanent magnet because magnetic flux is in iron sheets and iron wall mostly.

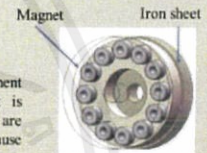


Figure 3: Structure of magnetic wheel

### Results

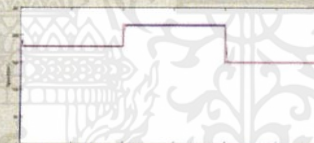


Figure 4: actual speed (blue line) compare with reference speed (red line)



Figure 5: Robot model

### Conclusion

Fuzzy logic control system can control the speed of the motor to steady by using a little time. Resulting in the robot can smooth working. Makes it easy to maintenance, cleaning and coating the surface of the steam boiler are more efficiency.

### References

- [1] Kittapas Pinsuntia, "Design of brushless DC hub motor control prototype", KMITL.
- [2] Sanraeng Tenram, "The Constant Power Mode Control of Brushless DC Motor by Phase Advanced Angle Commutation Technique using dsPIC30F2010 Board, RMUTT
- [3] C. Sheeba Joice and P. Nivedhitha, simulation of speed control of brushless dc motor with fuzzy logic controller, **Electronics and Data Communication**
- [4] Aaron Burmeister, Maxwell Kerber, Brian Dick and Anson Brune, "Design and Optimization of a Magnetic Wheel for Hull Climbing"

## ประวัติผู้เขียน



ชื่อ-นามสกุล นายพีรพงศ์ ศรีธนพงศา  
วัน เดือน ปี 19 มกราคม 2540  
ที่อยู่ 342 หมู่ 4 ตำบล สวนแดง อำเภอ เมือง จังหวัด  
สุพรรณบุรี 72100

## ประวัติการศึกษา

ปีการศึกษา 2557

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนนครพนมวิทยาสรรพ  
วิทยาคาร จังหวัดสุพรรณบุรี

ปีการศึกษา 2561

สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขา  
วิศวกรรมพลังงานไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร  
ลาดกระบัง

ฝึกงานภาคฤดูร้อน

บริษัท เดียววงสีลม จำกัด แผนก วิศวกรรม



ชื่อ-นามสกุล นายภัทรธร โรจนศิริณัย  
วัน เดือน ปี 4 ธันวาคม 2539  
ที่อยู่ 81/1 ถ.ร่วมจิตต์ ต.หมากแข้ง อ.เมือง จ.อุดรธานี  
41000

## ประวัติการศึกษา

ปีการศึกษา 2557

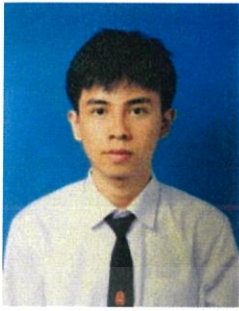
สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนอุดรพิทยานุกูล  
จังหวัดอุดรธานี

ปีการศึกษา 2561

สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขา  
วิศวกรรมพลังงานไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร  
ลาดกระบัง

ฝึกงานภาคฤดูร้อน

บริษัท เน็กซ์เต็ปแพลนนิ่ง จำกัด แผนก วิศวกรรม



ชื่อ-นามสกุล นายอัษฎาวุธ พลศรี  
วัน เดือน ปี 15 ตุลาคม พ.ศ.2539  
ที่อยู่ 364 หมู่ 15 ถ.แมชี ตำบล ขามใหญ่ อ.เมือง  
จ. อุบลราชธานี 34000

#### ประวัติการศึกษา

ปีการศึกษา 2557

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนโรงเรียนเบ็ญจะ  
มะมหาราช จังหวัดอุบลราชธานี

ปีการศึกษา 2561

สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขา  
วิศวกรรมพลังงานไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร  
ลาดกระบัง

ฝึกงานภาคฤดูร้อน

บริษัท ชันฟู้ด อินเทอร์เน็ตเนชั่นแนล จำกัด แผนก วิศวกรรม



ชื่อ-นามสกุล นายจักรภัทร ทะลิ  
วัน เดือน ปี 28 กรกฎาคม 2539  
ที่อยู่ 575/10 ตำบล บ้านต้อม อำเภอ เมือง จังหวัด  
พะเยา 56000

#### ประวัติการศึกษา

ปีการศึกษา 2557

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนพะเยาพิทยาคม  
จังหวัดพะเยา

ปีการศึกษา 2561

สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขา  
วิศวกรรมพลังงานไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร  
ลาดกระบัง

ฝึกงานภาคฤดูร้อน

บริษัท เทียวหงส์สิลม จำกัด แผนก วิศวกรรม