

การเปรียบเทียบระหว่างระบบการควบคุมพีไอและพีไอดีสำหรับการควบคุมความเร็ว
มอเตอร์ไร้แปรงถ่าน

Comparison between PI and PID for Speed Control to Brushless DC
Motor



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2560

การเปรียบเทียบระหว่างระบบการควบคุมพีไอและพีไอดีสำหรับการควบคุมความเร็ว
มอเตอร์ไร้แปรงถ่าน

Comparison between PI and PID for Speed Control to Brushless DC
Motor



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Comparison between PI and PID for Speed Control to Brushless DC Motor

Nattajak Peeravisith

Rojanus Inkubjun

Athitep Jaiya



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

2017

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2560

การเปรียบเทียบระหว่างระบบการควบคุมพีไอและพีไอดีสำหรับการควบคุมความเร็ว
มอเตอร์ไร้แปรงถ่าน

Comparison between PI and PID for Speed Control to Brushless DC Motor



อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร.วีระเชษฐ์ ชันเงิน

ดร.วิวัฒน์ เกียรติวงศ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา2560

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การเปรียบเทียบระหว่างระบบการควบคุมพีไอและพีไอดีสำหรับการควบคุมความเร็วมอเตอร์ไร้
แปรงถ่าน

ผู้จัดทำ

1. นายณัฐจักร พีราวิศิษฐ์
2. นายโรจน์สถ์ อินทร์กับจันทร์
3. นายอดิเทพ ใจยา



..........อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร.วีระเชษฐ์ ชันเงิน)

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

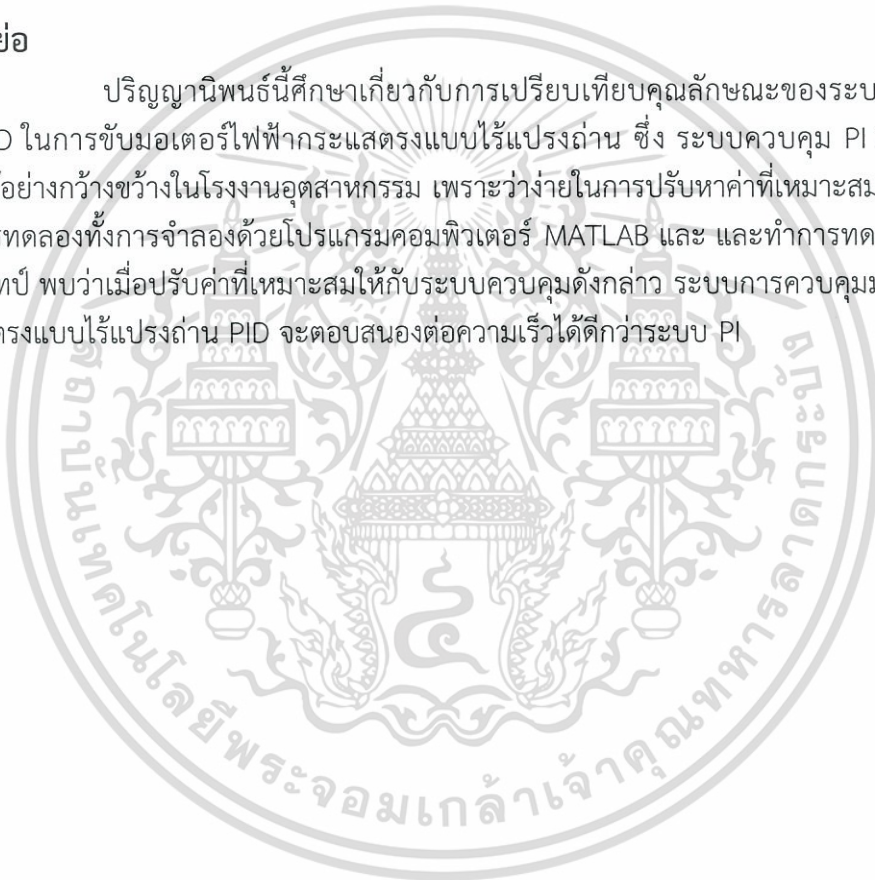
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเปรียบเทียบระหว่างระบบการควบคุมพีไอและพีไอดีสำหรับการควบคุมความเร็ว
มอเตอร์ไร้แปรงถ่าน

นายณัฐจักร์ พิราวิศิษฐ์
นายโรจน์สทธิ์ อินทร์กับจันทร์
นายอติเทพ ใจยา
รศ.ดร.วีระเชษฐ์ ชันเงิน
ดร.วิวัฒน์ เกียรติวงศ์
ปีการศึกษา 2560

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้ศึกษาเกี่ยวกับการเปรียบเทียบคุณลักษณะของระบบควบคุม PI และ PID ในการขับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน ซึ่ง ระบบควบคุม PI และ PID ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในโรงงานอุตสาหกรรม เพราะว่าง่ายในการปรับค่าที่เหมาะสมตัวแปรต่างๆ จากการทดลองทั้งการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ MATLAB และ และทำการทดสอบกับวงจรโปรโตไทป์ พบว่าเมื่อปรับค่าที่เหมาะสมให้กับระบบควบคุมดังกล่าว ระบบการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน PID จะตอบสนองต่อความเร็วได้ดีกว่าระบบ PI



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Comparison between PI and PID for Speed Control to Brushless DC Motor

Mr.Nattajak Peeravisith

Mr.Rojanus Inkubjun

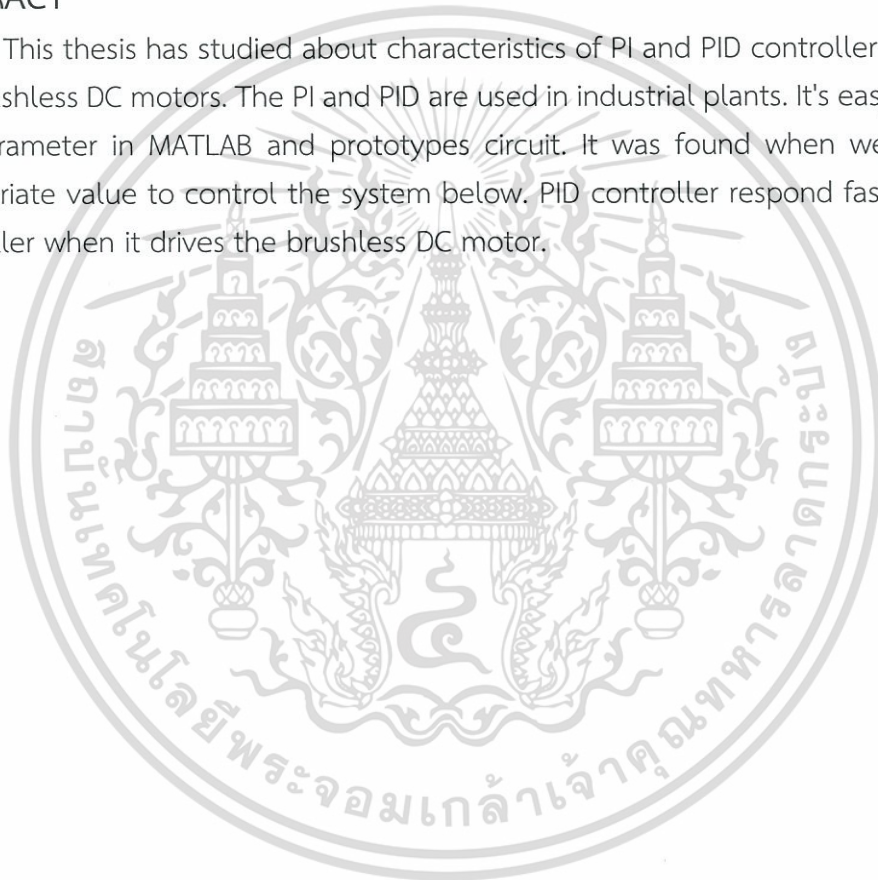
Mr.Athitep Jaiya

Assoc.Prof.Dr.Werachet Khan-ngern

Dr.Wiwat Keyoonwong

ABSTRACT

This thesis has studied about characteristics of PI and PID controller to control the brushless DC motors. The PI and PID are used in industrial plants. It's easy to adjust the parameter in MATLAB and prototypes circuit. It was found when we adjusting appropriate value to control the system below. PID controller respond faster than PI controller when it drives the brushless DC motor.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดีก็ด้วยการช่วยเหลือจากบุคคลหลายท่าน และหน่วยงานต่าง ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง รองศาสตราจารย์ ดร.วีระเชษฐ์ ชันเงิน และ ดร.วิวัฒน์ เกษุวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่คำแนะนำข้อคิดเห็นต่าง ๆ รวมทั้ง อาจารย์คุณากร คิตติ ที่ให้คำปรึกษาทางด้านเทคนิคทำให้โครงการมีเป้าหมายและแนวทางที่ถูกต้องชัดเจน และให้ความรู้ที่เป็นประโยชน์มากมายต่อผู้ทำโครงการหลายๆประการ

ท้ายนี้คณะผู้จัดทำ ขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดา และครอบครัวซึ่งให้การสนับสนุนในด้านกำลังใจอีกทั้งเพื่อนๆ ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านการจัดหาอุปกรณ์ต่างๆ ในการทำโครงการครั้งนี้จนสำเร็จได้ด้วยดี จึงขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ|||้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูปภาพ	VI
สารบัญตาราง	VIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ	
1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงการ	
1.5 ตารางแสดงแผนการดำเนินโครงการ	2
1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย	
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 ระบบควบคุม (Controller)	
2.1.1 PI Controller	
2.1.2 PID Controller	4
2.2 ทฤษฎีการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	5
2.3 ทฤษฎีการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน	8
2.4 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน	10
2.4.1 6 ขั้นตอนการทำงานของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน	11
2.4.2 ข้อดีของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน	16
2.4.3 ข้อจำกัดของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน	
2.4.4 ข้อแตกต่างระหว่าง DC และ Brush less DC	
2.5 Hall Effect sensors	17
2.5.1 หลักการทำงานของ Hall effect sensors	
2.6 อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส	18
2.6.1 โครงสร้างภายในอินเวอร์เตอร์	
บทที่ 3 การออกแบบวงจร และการออกแบบการทดลอง	19
3.1 ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน	
3.2 การออกแบบวงจร และการคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ	
3.2.1 การออกแบบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ของมอเตอร์ไฟฟ้าไร้แปรงถ่าน	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ IV อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.2.2 การคำนวณพิกัดของอินเวอร์เตอร์สำหรับวงจรโปรโตรไทป์	22
3.2.3 การออกแบบวงจรจำลองการควบคุมมอเตอร์กระแสตรง ไร้แปลงถ่าน ด้วย โปรแกรม Matlab	23
3.2.4 การออกแบบวงจรโปรโตรไทป์ด้วยโปรแกรม Circuit Wizard	27
3.2.5 วงจรอินเวอร์เตอร์	28
3.2.6 ทดสอบสัญญาณที่ขาเกทของมอสเฟต	29
3.3 คำสั่งในการใช้ซิมมูเลเตอร์ไร้แปลงถ่าน	
3.4 การออกแบบการทดลอง	31
3.4.1 เราจะทำการจำลองตัวควบคุมแบบ PI และ PID โดยไร้ซึ่งภาระทางกล	
3.4.2 เราจะทำการจำลองตัวควบคุมแบบ PI และ PID โดยมีภาระทางกลอยู่ที่ 10 นิวตัน	
3.4.3 เราจะทำการจำลองตัวควบคุมแบบ PI และ PID โดยมีภาระทางกลอยู่ที่ 20 นิวตัน	
บทที่ 4 ผลการทดลอง	32
4.1 ผลการจำลองตัวควบคุมแบบ PI และ PID ไร้ภาระทางกล	
4.2 ผลการจำลองตัวควบคุมแบบ PI และ PID ภาระทางกล 10 นิวตัน	34
4.3 ผลการจำลองตัวควบคุมแบบ PI และ PID ภาระทางกล 20 นิวตัน	37
4.4 ผลการทดสอบการขับมอเตอร์แบบไร้ภาระทางกล	39
4.5 ผลการทดสอบการขับมอเตอร์แบบมีภาระทางกล 10 N	40
4.6 ผลการทดสอบการขับมอเตอร์แบบมีภาระทางกล 20 N	
4.7 การเปรียบเทียบผลการจำลอง และผลการทดสอบจริง	41
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	43
5.1 บทสรุป	
5.2 ข้อเสนอแนะ	
เอกสารอ้างอิง	44
ภาคผนวก ก	45
ภาคผนวก ข	50
ภาคผนวก ค	52
ภาคผนวก ง	62
ภาคผนวก จ	68

ประวัติผู้เขียน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และvต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.1 วงจร PI คอนโทรลเลอร์	4
รูปที่ 2.2 ส่วนประกอบของ DC motor	6
รูปที่ 2.3 วงจรสมมูลของมอเตอร์กระแสตรง	
รูปที่ 2.4 วงจรมอเตอร์กระแสตรงแสดงถึงส่วนประกอบภายในของมอเตอร์	
รูปที่ 2.5 ไดอะแกรมแผนผังของมอเตอร์กระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน	9
รูปที่ 2.6 การควบคุมมอเตอร์ไร้แปรงถ่านกระแสตรง	10
รูปที่ 2.7 กาทำงานของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านขั้นตอนที่ 1	11
รูปที่ 2.8 กาทำงานของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านขั้นตอนที่ 2	12
รูปที่ 2.9 กาทำงานของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านขั้นตอนที่ 3	13
รูปที่ 2.10 กาทำงานของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านขั้นตอนที่ 4	14
รูปที่ 2.11 กาทำงานของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านขั้นตอนที่ 5	15
รูปที่ 2.12 กาทำงานของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านขั้นตอนที่ 6	16
รูปที่ 2.13 กาทำงานของ Hall effect sensor	17
รูปที่ 2.14 รูปวงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส	18
รูปที่ 3.1 หน้าต่างโปรแกรม MATLAB	23
รูปที่ 3.2 หน้าต่างฟังก์ชัน Simulink	24
รูปที่ 3.3 หน้าต่าง Simulink library browser	
รูปที่ 3.4 การควบคุมมอเตอร์ด้วย PI บนโปรแกรม MATLAB	26
รูปที่ 3.5 การควบคุมมอเตอร์ด้วย PID บนโปรแกรม MATLAB	27
รูปที่ 3.6 แบบวงจรอินเวอร์เตอร์บนโปรแกรม Circuit Wizard	
รูปที่ 3.7 วงจรอินเวอร์เตอร์หลังจากการบัดกรี	28
รูปที่ 3.8 ทดลองวัดสัญญาณขาเกทของมอเตอร์ที่ความถี่ 0.5 kHz	29
รูปที่ 3.9 สัญญาณขาเกทของมอเตอร์ที่ความถี่ 0.5 kHz	
รูปที่ 4.1 กราฟความเร็วมอเตอร์ของระบบควบคุมพีไอ ที่ความเร็ว 500 rpm เทียบกับเวลา (s)	32
รูปที่ 4.2 กราฟความเร็วมอเตอร์ของระบบควบคุมพีไอดี ที่ความเร็ว 500 rpm เทียบกับเวลา (s)	33
รูปที่ 4.3 กราฟความเร็วมอเตอร์ของระบบควบคุมพีไอ ที่ความเร็ว 600 rpm เทียบกับเวลา (s)	
รูปที่ 4.4 กราฟความเร็วมอเตอร์ของระบบควบคุมพีไอดี ที่ความเร็ว 600 rpm เทียบกับเวลา (s)	34
รูปที่ 4.5 กราฟความเร็วมอเตอร์ของระบบควบคุมพีไอ ที่ความเร็ว 500 rpm เทียบกับเวลา (s)	35

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 4.6 กราฟความเร็วมอเตอร์ของระบบควบคุมพีไอดี ที่ความเร็ว 500 rpm เทียบกับเวลา (s)	35
รูปที่ 4.7 กราฟความเร็วมอเตอร์ของระบบควบคุมพีไอ ที่ความเร็ว 600 rpm เทียบกับเวลา (s)	36
รูปที่ 4.8 กราฟความเร็วมอเตอร์ของระบบควบคุมพีไอดี ที่ความเร็ว 600 rpm เทียบกับเวลา (s)	36
รูปที่ 4.9 กราฟความเร็วมอเตอร์ของระบบควบคุมพีไอ ที่ความเร็ว 500 rpm เทียบกับเวลา(s)	37
รูปที่ 4.10 กราฟความเร็วมอเตอร์ของระบบควบคุมพีไอดี ที่ความเร็ว 500 rpm เทียบกับเวลา	38
รูปที่ 4.11 กราฟความเร็วมอเตอร์ของระบบควบคุมพีไอ ที่ความเร็ว 600 rpm เทียบกับเวลา(s)	
รูปที่ 4.12 กราฟความเร็วมอเตอร์ของระบบควบคุมพีไอดี ที่ความเร็ว 600 rpm เทียบกับเวลา(s)	39



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แผนการดำเนินโครงการ	2
3.1 ทฤษฎี Ziegler-Nichols	21
3.2 ตำแหน่ง ไอคอน และค่าตัวแปรต่างๆ (parameters)	25
4.1 การจำลองตัวควบคุมแบบ PI ไร้ภาระทางกล	32
4.2 การจำลองตัวควบคุมแบบ PID ไร้ภาระทางกล	
4.3 การจำลองตัวควบคุมแบบ PI น้ำหนัก 10 นิวตัน	34
4.4 การจำลองตัวควบคุมแบบ PID น้ำหนัก 10 นิวตัน	
4.5 การจำลองตัวควบคุมแบบ PI ภาระทางกล น้ำหนัก 20 นิวตัน	37
4.6 การจำลองตัวควบคุมแบบ PID น้ำหนัก 20 นิวตัน	
4.7 ผลการทดสอบการขับมอเตอร์แบบไร้ภาระทางกล ที่แรงดัน 30 V	39
4.8 ผลการทดสอบการขับมอเตอร์แบบมีภาระทางกล 10 N ที่แรงดัน 35 V	40
4.9 ผลการทดสอบการขับมอเตอร์แบบมีภาระทางกล 20 N ที่แรงดัน 40 V	



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา แะ VIII อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ยานยนต์ไฟฟ้า ณ เวลานี้ ได้รับความนิยมนใจเป็นอย่างสูง พลังงานที่จะใช้ในการขับเคลื่อนตัวยานยนต์ไฟฟ้าในตอนนี้คือแบตเตอรี่ ยานยนต์ไฟฟ้าจะใช้มอเตอร์เป็นมอเตอร์ไฟฟ้าแบบกระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน ซึ่งเมื่อมอเตอร์ขับเคลื่อนมีการหมุนความเร็วเปลี่ยนไปในทุกช่วงเวลา ดังนั้นเราจึงสนใจในประเด็นของการควบคุมการหมุนของมอเตอร์ เพื่อให้ตอบโจทย์การใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น การควบคุมนั้นเราสนใจไปที่การใช้ PID Controller เข้ามาควบคุมปรับปรุงประสิทธิภาพให้ดียิ่งขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อศึกษาระบบควบคุมโดยการใช้ PI และ PID
2. เพื่อเปรียบเทียบระบบควบคุม PI และ PID ในการขับเคลื่อนมอเตอร์
3. เพื่อศึกษาการตอบสนองต่อความเร่งของมอเตอร์ในระบบควบคุม PI และ PID

1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ

โครงการนี้ศึกษาเกี่ยวกับการควบคุมระบบสำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์โดยเปรียบเทียบระบบควบคุมระหว่าง PI และ PID การตอบสนองความเร่งของมอเตอร์ระหว่างระบบควบคุม PI และ PID โดยการจำลองผลด้วยโปรแกรม MATLAB และการทดสอบมอเตอร์ด้วยระบบควบคุม PI และ PID ที่ทำในห้องปฏิบัติการจริง นำผลที่ได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการจริงและการจำลองด้วยโปรแกรมมาเปรียบเทียบผลและวิเคราะห์ตามวัตถุประสงค์ของโครงการ

1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงการ

จำลองโปรแกรมระบบควบคุมการขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วย PI และ PID และออกแบบการทดลองโมเดลตัวอย่างซึ่งทั้งสองการทดลองจะมีอยู่ 2 ระบบควบคุม คือ ระบบที่ใช้ PI ในการควบคุม และระบบที่ใช้ PID ในการควบคุม โดยทดลองเปรียบเทียบเวลาในการตอบสนองของความเร่งของมอเตอร์ และนำผลที่ได้มาทำการเปรียบเทียบเวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัว ค่าความผิดพลาดคงตัว

1.5 ตารางแสดงแผนการดำเนินโครงการ

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินโครงการ

ลำดับที่	ขั้นตอนการดำเนินงาน	2560					2561		
		ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.
1	สืบค้นข้อมูลออกแบบและจัดเตรียมวัสดุอุปกรณ์	←→							
2	ออกแบบการทดลองและจัดเตรียมวัสดุอุปกรณ์		←→						
3	ออกแบบวงจรด้วยโปรแกรมแมทแลป			←→	→				
4	ออกแบบวงจรโปรโตไทป์				←→	→			
5	ทดลองวงจรจำลองและวงจรโปรโตไทป์					←→	→		
6	บันทึกผลและปรับปรุงการทดลอง							←→	
7	สรุปผลการทดลอง								←→

1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

1. ได้ความรู้ในเรื่องของระบบควบคุมพีไอและพีไอดี ในการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรงไร้แปรงถ่าน
2. สามารถเปรียบเทียบคุณลักษณะของการควบคุมแต่ละระบบได้
3. สามารถคำนวณออกแบบสัดส่วนของพีไอดีในระบบการควบคุมได้
4. เป็นปริญญาานิพนธ์ที่สามารถนำไปต่อยอดและเป็นข้อมูลที่เป็นประโยชน์ในการไปใช้งานจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ระบบควบคุม (Controller)

ระบบควบคุมเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมได้ตามรูปที่ 2.1 และเมื่อพิจารณาสิ่งที่ได้ออกจากระบบ คือสัญญาณขาออกหรือสัญญาณเอาต์พุต อาจจะได้เป็นค่าระยะทาง ความดัน หรือ อุณหภูมิ เป็นต้น เมื่อนำค่าที่ได้ไปเปรียบเทียบกับค่าของสัญญาณขาเข้าหรือสัญญาณอินพุต จะได้ค่าความผิดพลาด และจะถูกส่งต่อไปยังตัวควบคุมเพื่อทำการสร้างสัญญาณเพื่อนำไปควบคุมระบบต่อไป โดยจะกระทำไปเรื่อยๆจนกว่าค่าสัญญาณขาออกจะมีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับค่าสัญญาณขาเข้า หรืออีกอย่างคือมีความผิดพลาดที่ลดลงหรือเท่ากับศูนย์

2.1.1 PI Controller

คือวงจรประมวลผลที่นำค่าที่ผิดพลาดเล็กน้อย จากค่าที่ตั้งไว้ ซึ่งเป็นค่าที่จะต้องถูกควบคุม และค่าจริงที่ตั้งไว้เรียกว่า set point ในกรณีของการควบคุมความเร็วมอเตอร์ ค่าผิดพลาดนี้สามารถที่จะแสดงโดยสมการ

$$e(t) = W_{sp}(T) - W_{pv}(t) \quad (2.1)$$

$e(t)$ คือ ค่าผิดพลาดจากค่า set point

$W_{sp}(t)$ คือ ค่าความเร็วอ้างอิง

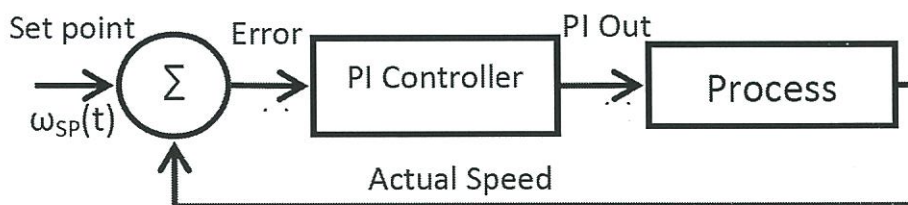
$W_{pv}(t)$ คือ ค่าความเร็วมอเตอร์จริง

PID Controller ถูกแบ่งออกเป็น 3 ส่วน 1 คือ ส่วนที่ประกอบด้วยพจน์ K_p 2 เป็นส่วนปริพันธ์ หรือส่วนของพจน์ K_i และ 3 เป็นส่วนที่ประกอบด้วยพจน์ของ K_D ตามสมการ

$$G(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_D \frac{de}{dt} \quad (2.2)$$

ซึ่งถ้าเป็นระบบควบคุมแบบ PI K_D จะมีค่าเป็นศูนย์

$$G(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt \quad (2.3)$$



รูปที่ 2.1 วงจร PI คอนโทรลเลอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.1 เป็นรูปที่อธิบายการทำงานของระบบการควบคุมแบบ PI controller ถ้าเป็นระบบของ PID ก็จะเปลี่ยนกล่องการควบคุม PI เป็น PID ซึ่งเราสามารถศึกษาสมรรถนะต่างๆของระบบควบคุมด้วยพารามิเตอร์ต่างๆดังนี้

1. เวลาหน่วง (Delay time) คือเวลาที่ระบบมีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการดำเนินการของระบบจนมีค่า 50 เปอร์เซ็นต์ ของค่าสุดท้ายของระบบ
2. เวลาขาขึ้น (Rise time) คือเวลาที่ระบบมีการเปลี่ยนแปลงในการดำเนินการ อาจจะนับตั้งแต่ 5% ถึง 95% หรือ 10% ถึง 90% ของค่าสุดท้ายของระบบก็ได้
3. การพุ่งเกินสูงสุด (maximum overshoot) คือ ค่าเอาต์พุตที่มีค่ามากที่สุดในการดำเนินการเมื่อเทียบ กับค่าสุดท้ายของระบบ

$$M_p = \frac{y_{\max} - y_{ss}}{y_{ss}} \quad (2.4)$$

M_p คือ ค่าการพุ่งเกินสูงสุด

y_{\max} คือ ค่าผลตอบสนองเอาต์พุตสูงสุดที่มากกว่าค่าเอาต์พุตที่สภาวะคงตัว

y_{ss} คือ ค่าเอาต์พุตที่สภาวะคงตัว

4. เวลาการเข้าสู่สภาวะคงตัว (Setting time) เวลาที่ระบบใช้จนกระทั่งถึงจุดที่ระบบเกือบจะเป็นสภาวะคงตัว

2.1.2 PID Controller

ตัวควบคุมแบบ Proportional Integral Derivative (PID)

เป็นระบบควบคุมแบบป้อนกลับที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง ซึ่งค่าที่นำไปใช้ในการคำนวณเป็นค่าความผิดพลาดที่หามาจากความแตกต่างของตัวแปรในกระบวนการและค่าที่ต้องการ ตัวควบคุมจะพยายามลดค่าผิดพลาดให้เหลือน้อยที่สุดด้วยการปรับค่าสัญญาณขาเข้าของกระบวนการ ค่าตัวแปรของ PID ที่ใช้จะปรับเปลี่ยนตามธรรมชาติของระบบ โดยสามารถเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$G(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = \left(k_p + \frac{K_i}{s} + k_d s \right) = \left(\frac{k_d s^2 + k_p s + k_i}{s} \right) \quad (2.5)$$

คุณสมบัติของระบบควบคุม

ระบบควบคุมโดยทั่วไป สามารถแบ่งคุณสมบัติของระบบได้เป็น 4 แบบ สามารถสรุปรายละเอียดได้ดังนี้

1. ระบบควบคุมแบบ P (P Controller) จะมีคุณสมบัติ

-ลดค่า Rise Time (t_r) ส่งผลให้ระบบทำงานเร็วขึ้นในช่วงแรก

-เพิ่ม Over Shoot (M_p) ส่งผลให้ระบบแกว่งในช่วงเริ่มต้น แต่ส่งผลให้ค่า Steady State Error ลดลง

2. ระบบควบคุมแบบ PD (PD Controller) จะมีคุณสมบัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ลด Over Shoot (M_p) ส่งผลให้ระบบมีการแกว่งน้อยลงในช่วงเริ่มต้น
- ลด Setting Time (t_s) ส่งผลให้ระบบทำงานถึงจุดคงที่ (Steady State) เร็วขึ้น

3.ระบบควบคุมแบบ PI (PI Controller) จะมีคุณสมบัติ

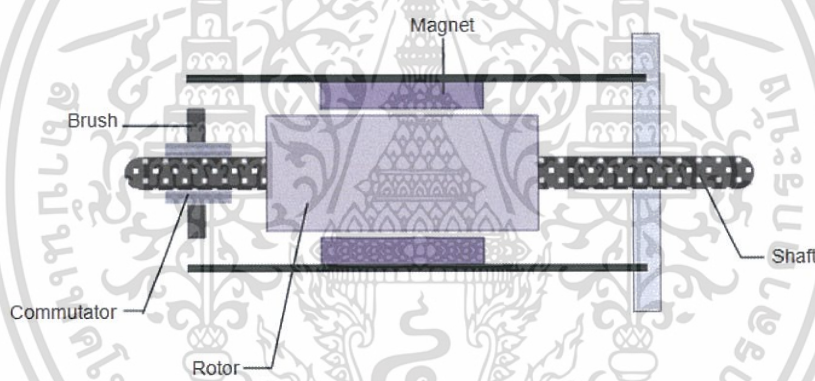
- ลดค่า Rise Time (t_r) ส่งผลให้ระบบทำงานเร็วขึ้นในช่วงแรก
- กำจัดค่า Steady State Error (e_{ss}) ส่งผลให้ได้ค่าเอาต์พุตเทียบเท่ากับค่าอินพุต

4.ระบบควบคุมแบบ PID (PID Controller)

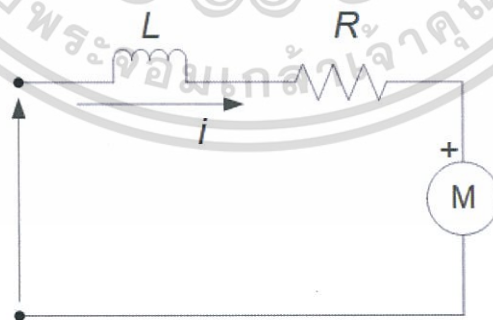
เป็นการนำคุณสมบัติของระบบควบคุมทั้ง 3 แบบ คือ P, PD และ PI มารวมกัน โดยสามารถกำหนดค่าเกนทั้ง 3 แบบคือ P, I และ D ได้อย่างอิสระ ทำให้สามารถออกแบบระบบควบคุมให้เป็นไปตามที่ต้องการได้ โดยทำการปรับค่าเกนทั้ง 3 แบบ และนำมาพิจารณาผลตอบสนองเมื่อปรับค่าเกนจนได้ผลตอบสนองตามต้องการแล้ว จึงนำค่าที่ได้ไปติดตั้งหรือออกแบบเป็นวงจรให้งานต่อไป

2.2 ทฤษฎีการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

เริ่มจากมอเตอร์กระแสตรงมีวงจรที่คล้ายคลึงกันกับมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านซึ่งประกอบไปด้วย 5 ส่วนคือ 1.แกนเพลา 2.คอมมิวเตเตอร์ 3.ขดลวดอาร์มาเจอร์ (Rotor) 4.ขดลวดสนาม 5.แปรงถ่าน ตามรูปที่ 2.2.1

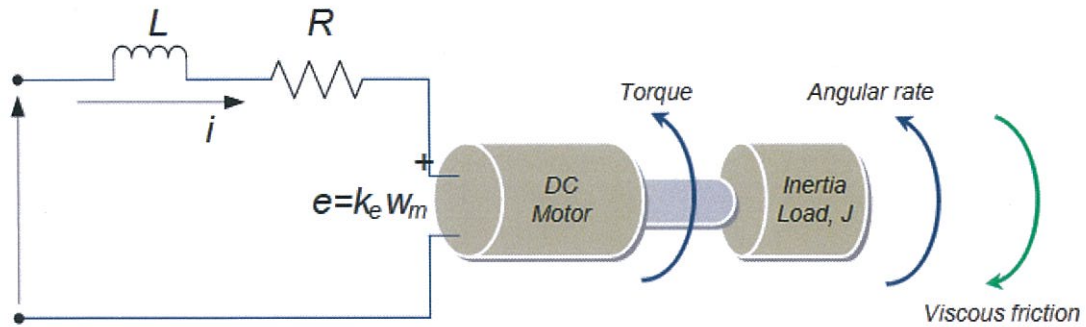


รูปที่ 2.2 ส่วนประกอบของ DC motor



รูปที่ 2.3 วงจรสมมูลของมอเตอร์กระแสตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 วงจรมอเตอร์กระแสตรงแสดงถึงส่วนประกอบภายในของมอเตอร์
เมื่อใช้กฎของเคอร์ชอฟ (KVL) สมการที่จะได้ว่า

$$V_s = Ri + L \frac{di}{dt} + e \quad (2.6)$$

เมื่ออยู่ในสภาวะคงตัว

$$V_s = Ri + e \quad (2.7)$$

ดังนั้นที่สถานะไม่คงตัว เราสามารถจัดเรียงสมการใหม่ได้ดังนี้

$$e = -Ri - L \frac{di}{dt} + V_s \quad (2.8)$$

โดยที่

V_s = แรงดันต้นกำเนิด

i = กระแสในขดลวดอาร์มาเจอร์

เมื่อเราพิจารณาถึงสมบัติเชิงกลของมอเตอร์กระแสตรง จากกฎของนิวตันข้อที่ 2 เมื่อคิดในเชิงแรงบิด สมการจัดรูปสมการใหม่จากสมการข้างต้นได้ โดยที่ J = โมเมนต์ความเฉื่อย และ ω_m = ความเร็วเชิงมุมมีค่าเท่ากับผลรวมของแรงบิดทั้งหมด

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = \sum T_i \quad (2.9)$$

$$T_e = k_f \omega_m + J \frac{d\omega_m}{dt} + T_L \quad (2.10)$$

โดยที่

T_e = แรงบิดทางไฟฟ้า

k_f = ค่าคงที่แรงเสียดทาน

J = โมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์

ω_m = ความเร็วเชิงมุม

เมื่อแรงบิดไฟฟ้าและแรงเคลื่อนไฟฟ้าสามารถเขียนได้ดังนี้

$$e = k_e \omega_m \quad \text{และ} \quad T_e = k_t \omega_m \quad (2.11)$$

โดยที่

k_e = ค่าคงที่ของแรงเคลื่อนไฟฟ้า

k_t = ค่าคงที่ของแรงบิด

ดังนั้นเมื่อเราเขียนสมการใหม่จะได้ว่า

$$\frac{di}{dx} = -i \frac{R}{L} - \frac{k_e}{L} \omega_m + \frac{1}{L} V_s \quad (2.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{d\omega_m}{dt} = i \frac{k_t}{J} - \frac{k_f}{J} \omega_m + \frac{1}{J} T_L \quad (2.13)$$

ใช้ลาปลาซในการแก้ไขสองสมการด้านบนโดยให้ถือว่าเงื่อนไขเริ่มต้นทั้งหมดถือว่ามีค่าเป็น 0 จากสมการที่

$$\mathcal{L}\left\{\frac{di}{dt} = -i \frac{R}{L} - \frac{k_e}{L} \omega_m + \frac{1}{L} V_s\right\} \quad (2.14)$$

ซึ่งหมายถึง

$$si = -i \frac{R}{L} - \frac{k_e}{L} \omega_m + \frac{1}{L} V_s \quad (2.15)$$

จากสมการที่

$$\mathcal{L}\left\{\frac{d\omega_m}{dt} = i \frac{k_t}{J} - \frac{k_f}{J} \omega_m + \frac{1}{J} T_L\right\} \quad (2.16)$$

ซึ่งหมายถึง

$$s\omega_m = i \frac{k_t}{J} - \frac{k_f}{J} \omega_m + \frac{1}{J} T_L \quad (2.17)$$

ที่สภาวะวะไม่มีโหลด ($T_L = 0$)

$$s\omega_m = i \frac{k_t}{J} - \frac{k_f}{J} \omega_m \quad (2.18)$$

จากสมการข้างต้น จัดให้อยู่ในรูปของ i

$$i = \frac{s\omega_m + \frac{k_f}{J} \omega_m}{\frac{k_t}{J}} \quad (2.19)$$

$$\left(\frac{s\omega_m + \frac{k_f}{J} \omega_m}{\frac{k_t}{J}}\right) \left(s + \frac{R}{L}\right) = -\frac{k_e}{L} \omega_m + \frac{1}{L} V_s \quad (2.20)$$

จัดรูปใหม่จะได้ว่า

$$\left\{\left(\frac{s^2 J}{k_t} + \frac{sk_f}{k_t} + \frac{sRJ}{k_t L} + \frac{k_f R}{k_t L}\right) + \frac{k_e}{L}\right\} \omega_m = \frac{1}{L} V_s \quad (2.21)$$

จัดให้อยู่ในรูปของ V_s

$$V_s = \left\{\frac{s^2 J L + sk_f L + sRJ + k_f R + k_e k_t}{k_t}\right\} \omega_m \quad (2.22)$$

ฟังก์ชันถ่ายโอนจะได้จากอัตราส่วนของความเร็วเชิงมุมกับแรงดันจากแหล่งจ่าย ดังนั้น

$$G(s) = \frac{\omega_m}{V_s} = \frac{k_t}{s^2 J L + sk_f L + sRJ + k_f R + k_e k_t} \quad (2.23)$$

จากสมการนี้ ฟังก์ชันการถ่ายโอนที่ได้มานั้นสามารถจัดรูปได้ดังนี้

$$G(s) = \frac{\omega_m}{V_s} = \frac{k_t}{s^2 J L + (RJ + k_f L)s + k_f R + k_e k_t} \quad (2.24)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าพิจารณาจากสมมติฐานดังต่อไปนี้

1. ค่าคงที่ของแรงเสียดทานนั้นน้อยจนเปรียบได้ว่า $k_f = 0$ นี้หมายถึง
2. $RJ \gg k_f L$ และ
3. $k_e k_t \gg Rk_f$

และค่าที่น้อยมากจนเปรียบได้ว่าเป็นศูนย์นั้นสามารถเขียนสมการฟังก์ชันการถ่ายโอนได้ว่า

$$G(s) = \frac{\omega_m}{V_s} = \frac{k_t}{s^2 J L + R J s + k_e k_t} \quad (2.25)$$

ดังนั้นเมื่อทำการจัดเรียงใหม่บน JL โดยการคูณทั้งบนและล่าง จะได้ว่า

$$\left(\frac{R}{k_e k_t}\right) \left(\frac{1}{R}\right) \quad (2.26)$$

จากสมการด้านบน หลังจากจัดการแล้วจะได้ว่า

$$G(s) = \frac{\frac{1}{k_e}}{\left(\frac{R}{k_e k_t}\right) \left(\frac{1}{R}\right) (s^2) + \left(\frac{R}{k_e k_t}\right) (s) + 1} \quad (2.27)$$

จากสมการ เมื่อเชิงทางกลคงที่จะได้ว่า

$$\tau_m = \frac{RJ}{k_e k_t} \quad (2.28)$$

ในเชิงไฟฟ้า เมื่อเวลาคงที่

$$\tau_e = \frac{L}{R} \quad (2.29)$$

แทนค่าลงไปจะได้ว่า

$$G(s) = \frac{\frac{1}{k_e}}{(\tau_m)(\tau_e)(s^2) + (\tau_m)(s) + 1} \quad (2.30)$$

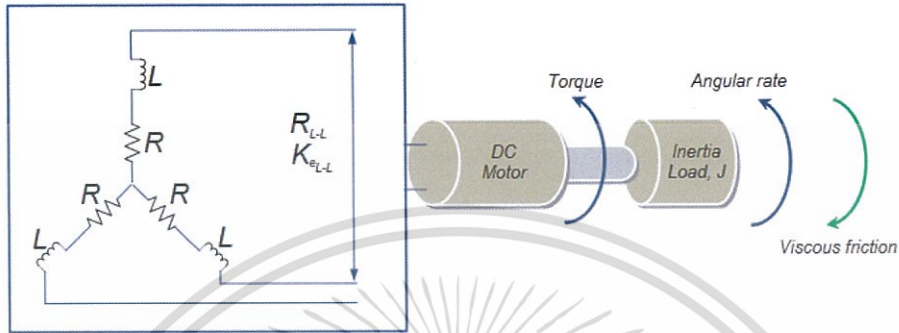
2.3 ทฤษฎีการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน

หนึ่งในสิ่งที่สำคัญที่สุดของมอเตอร์กระแสตรงแบบแปรงถ่านและมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านนั้นนอกจากชื่อแล้ว มอเตอร์กระแสตรงนั้นมีแปรงถ่าน แต่มอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านยังไม่มีแปรงถ่านที่ตัวสเตเตอร์อีกสิ่งหนึ่งคือมอเตอร์กระแสตรงนั้นคอมมิวเตเตอร์สามารถควบคุมได้ด้วยวงจรรีเลย์ทรานซิสเตอร์ส่วนมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้ถ่านแปรงนั้นขดลวดสเตเตอร์มีการเชื่อมโยงกันเป็นชุดสำหรับการหมุนของมอเตอร์แล้วยังมีเรื่องของเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าแบบฮอลล์ซึ่งเซนเซอร์เหล่านี้มีระบบที่คงตัวโรเตอร์และถูกใช้เป็นส่วนสำคัญของของตัวเซนเซอร์ถูกฝังอยู่ในตัวสเตเตอร์ ตัวมอเตอร์ไร้แปรงถ่านนั้นมีหลายเฟสแต่ส่วนมากจะถูกพบในระบบมอเตอร์ 3 เฟส มอเตอร์ชนิดนี้มีประสิทธิภาพที่สูงและทอร์กการหมุนนั้นต่ำมีความแม่นยำที่ดีในการหมุนและมีประโยชน์มากมายในการควบคุมกระแสในตัวโรเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โมเดลทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไร้แปรงถ่าน

โดยทั้งหมดนั้นมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านนั้นแทบไม่มีความแตกต่างอะไรกับตัวมอเตอร์กระแสตรง มอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านนั้นเพิ่มระบบของเฟสเข้ามาซึ่งจะมีผลกระทบโดยตรง ส่งผลกระทบต่อความต้านทานและอุปนัยของการจัดเรียงแบบมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน เช่น การเรียงตัวกันอย่างสมมาตรของระบบ 3 เฟส



รูปที่ 2.5 ไดอะแกรมแผนผังของมอเตอร์กระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน

สำหรับทางกลศาสตร์นั้นเมื่อเวลาคงที่(เมื่อจัดเรียงแบบสมมาตร)

$$\tau_m = \sum \frac{Rl}{K_e K_t} = \frac{J \sum R}{K_e K_t} \quad (2.31)$$

ในทางไฟฟ้า(เมื่อเวลาคงที่)

$$\tau_e = \sum \frac{L}{R} = \frac{L}{\sum R} \quad (2.32)$$

ดังนั้นเมื่อารจัดเรียงนั้นสมมาตรและเป็นระบบสามเฟส ในทางกลศาสตร์และไฟฟ้าจะได้ว่าทางกลศาสตร์(เมื่อคงที่)

$$\tau_m = \frac{J3R}{K_e K_t} \quad (2.33)$$

ในทางไฟฟ้า(เมื่อคงที่)

$$\tau_e = \frac{L}{3R} \quad (2.34)$$

เมื่อพิจารณาผลกระทบทางเฟส

$$\tau_m = \frac{3R\phi J}{(K_e(L-L)/\sqrt{3})K_t} \quad (2.35)$$

จากสมการเมื่อสักครู่นี้จะได้ว่า

$$\tau_m = \frac{3R\phi J}{K_e K_t} \quad (2.36)$$

โดยที่ K_e คือค่าเฟสของแรงเคลื่อนทางไฟฟ้า

$$K_e = K_e(L-L)/\sqrt{3} \quad (2.37)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสัมพันธ์ระหว่าง K_e กับ K_t โดยใช้กำลังทางไฟฟ้าด้านซ้ายมือและใช้กำลังทางกลด้านขวามือ ดังสมการ

$$(\sqrt{3})(E)(I) = A = \left(\frac{2\pi}{60}\right) (N)(T) \tag{2.38}$$

$$\frac{E}{N} = \frac{T}{I} \frac{2\pi}{60\sqrt{3}} \tag{2.39}$$

$$K_e = K_t \frac{2\pi}{60\sqrt{3}} \tag{2.40}$$

$$K_e = K_t(0.0605) \tag{2.41}$$

โดยที่

$K_e = \left[\frac{\text{V-sec}}{\text{rad}}\right]$ ทอร์กทางไฟฟ้า

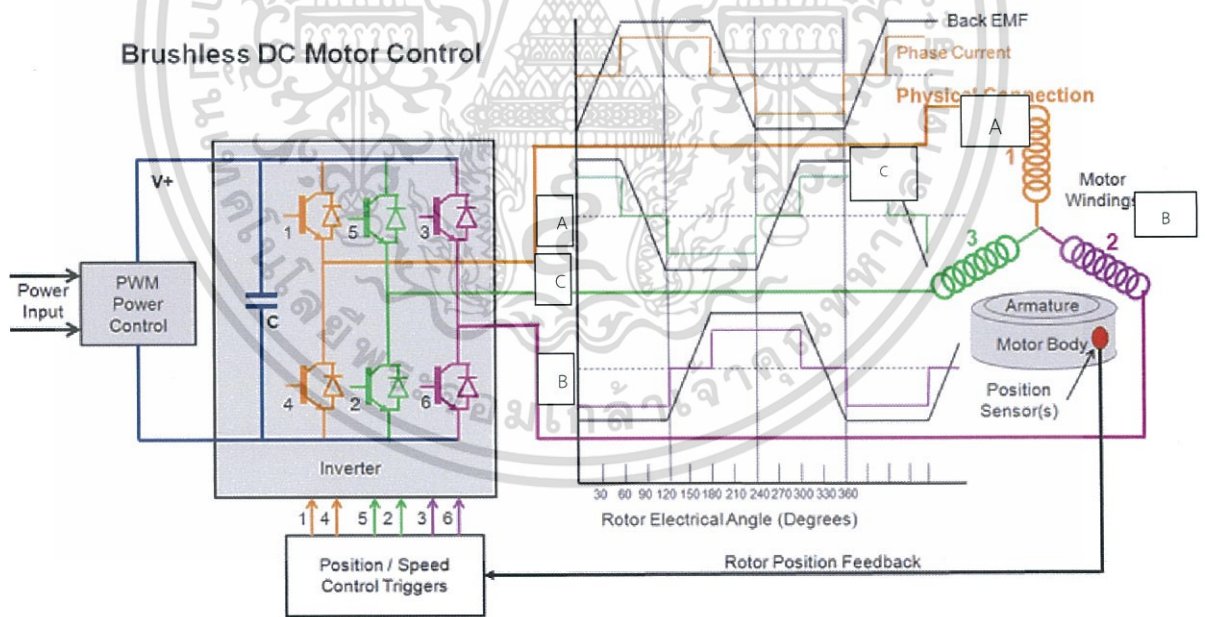
$K_t = \left[\frac{\text{N-m}}{\text{A}}\right]$ ค่าทอร์กคงที่

ทั้งนี้ สมการสำหรับมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านสามารถรับได้จากสมการฟังก์ชันถ่ายโอนดังนี้

$$G(s) = \frac{1}{\tau_m \tau_e s^2 + \tau_m s + 1} \frac{1}{K_e} \tag{2.42}$$

2.4 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน

คือเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน และ คอมมิวเตเตอร์ โดยจะใช้ชุดควบคุมสัญญาณในการทำหน้าที่แทน เรียกได้อีกชื่อหนึ่งว่า Permanent Magnet Synchronous



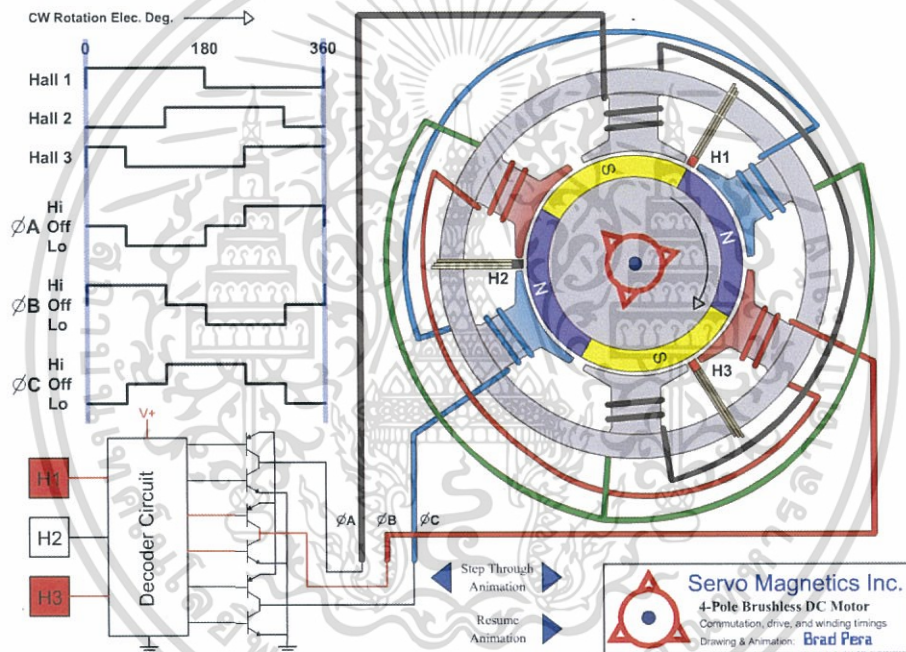
รูปที่ 2.6 การควบคุมมอเตอร์ไร้แปรงถ่านกระแสตรง

โดยจะใช้แม่เหล็กถาวรในส่วนของ Rotor ซึ่งมี Hall sensor ตามรูปภาพจะอยู่ใน ส่วนของ Position sensor ติดอยู่บน Stator คอยตรวจจับการเคลื่อนตัวของแม่เหล็กถาวรในส่วน ของ rotor และส่งคำสั่งไปยังชุดควบคุมสัญญาณ ซึ่งเราจะใช้ Microcontroller ซึ่งอยู่ในส่วนของ control triggers ในการประมวลผลในการควบคุมความเร็วของ Motor ควบคุมการทำงานของ MOSFET (metal-oxide-semiconductor field-effect transistor) ตัวที่ 1-6 ซึ่งทำงานสัมพันธ์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติให้หน้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กับ PWM (Pulse Width Modulation) ในการสร้างสัญญาณแบบ Bipolar driver จาก Microcontroller ซึ่งมีผลทำให้สัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงเปลี่ยนเป็นกระแสสลับ และเกิดการสร้างสนามแม่เหล็กหมุนที่ขดลวด 3 phase ในฝั่ง stator ซึ่งต่อกันอยู่ในรูปแบบของ Y-connection และ Synchronize สนามแม่เหล็กระหว่างขดลวดที่ stator กับแม่เหล็กถาวรที่ Rotor เกิดการหมุนที่ Rotor ตามรูปที่ 2.6

2.4.1 6 ขั้นตอนการทำงานของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน ขั้นตอน 1

เมื่อ Hall sensors 1 และ 3 ตรวจจับตำแหน่งของ Rotor ที่มีอำนาจขั้วแม่เหล็กได้ ได้ จะส่งสัญญาณไปยังวงจรควบคุมสั่งให้ MOSFET ตัวที่ 3 และ 2 ทำงาน เฟส B จะจ่ายแรงดัน กระแสตรงบวก จากแบตเตอรี่เข้าสู่ Inverter ในขดลวด Phase B แรงจ่ายแรงดันกระแสตรงลบจาก แบตเตอรี่เข้าสู่ inverter ในขดลวด Phase C

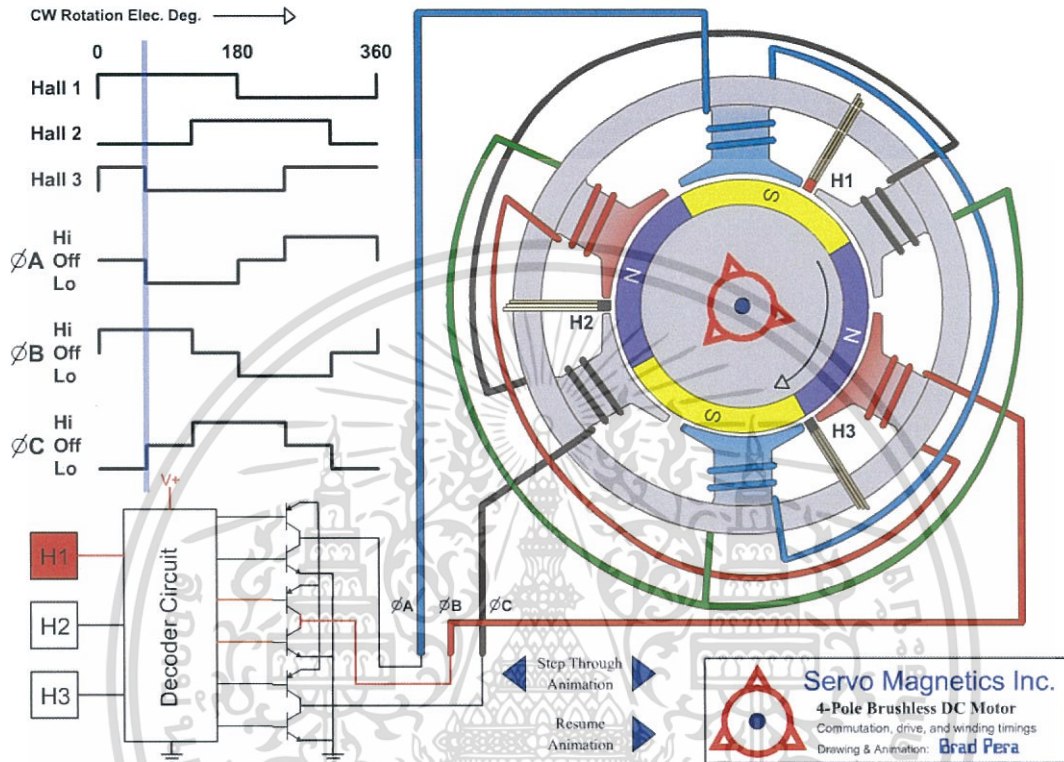


รูปที่ 2.7 ภาพการทำงานของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านขั้นตอนที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอน 2

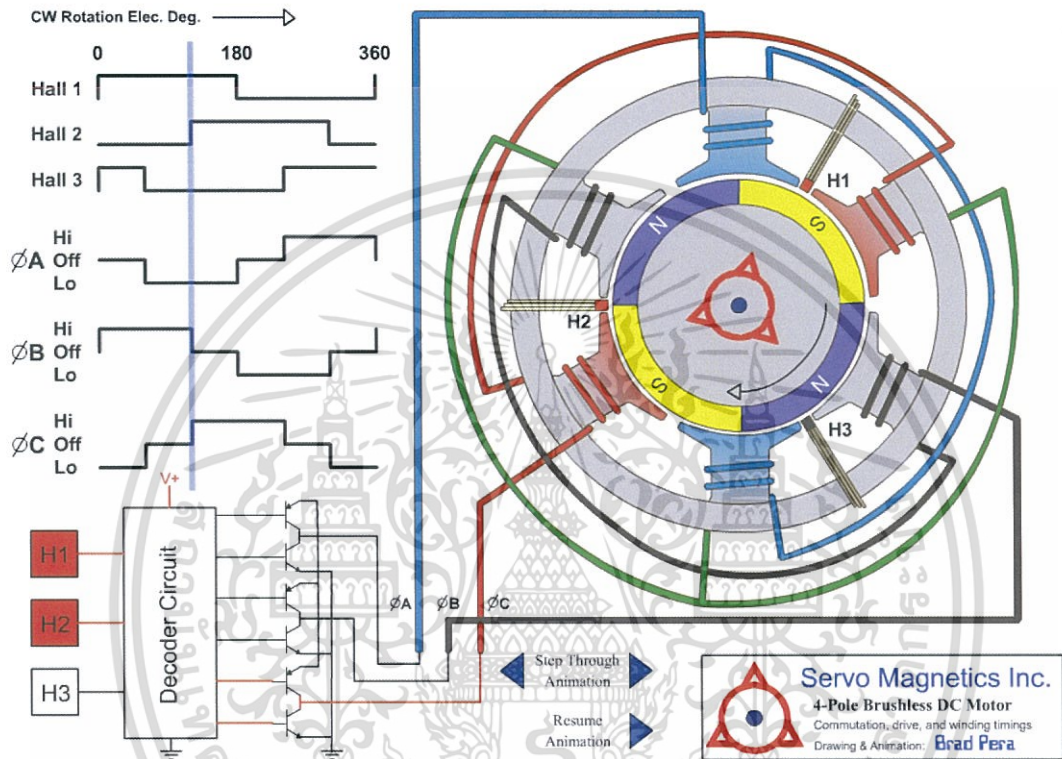
เมื่อ Hall sensor 1 ตรวจจับตำแหน่งของ Rotor ที่มีอำนาจขั้วแม่เหล็กใต้ได้ จะส่งสัญญาณไปยังวงจรควบคุมสั่งให้ MOSFET ตัวที่ 3 และ 4 ทำงาน เฟส B จะจ่ายแรงดันกระแสตรงบวก จากแบตเตอรี่เข้าสู่ Inverter ในขดลวด Phase B แรงจ่ายแรงดันกระแสตรงลบจากแบตเตอรี่เข้าสู่ inverter ในขดลวด Phase A



รูปที่ 2.8 กาทำงานของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านขั้นตอนที่ 2

ขั้นตอน 3

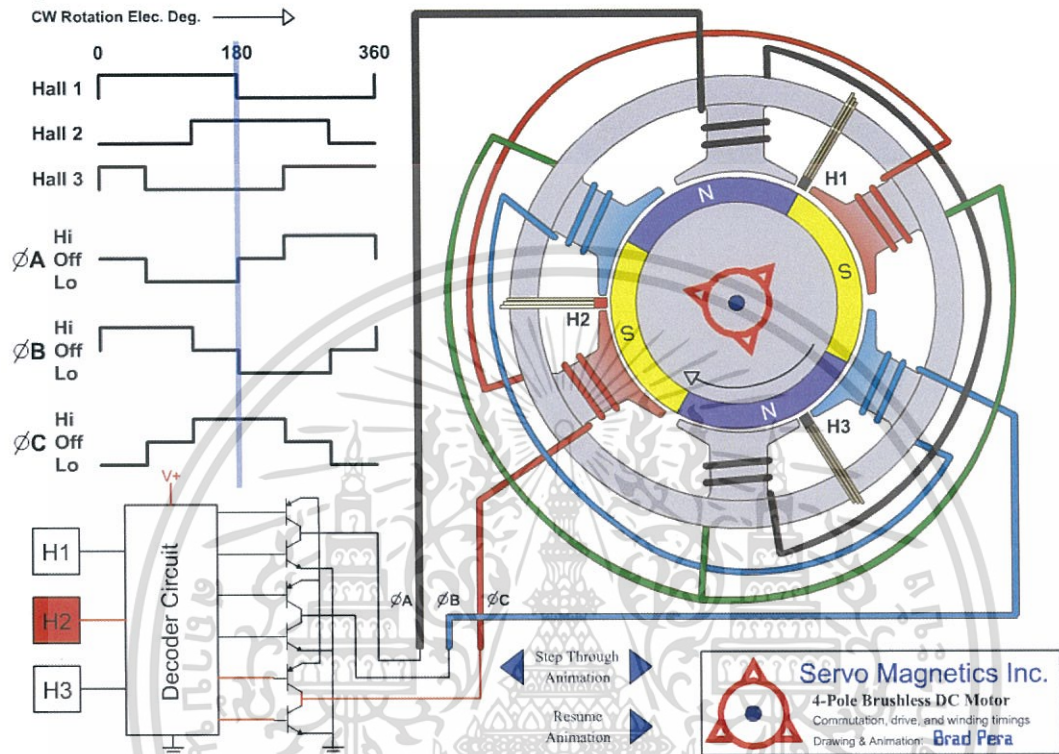
เมื่อ Hall sensors 1 และ 2 ตรวจจับตำแหน่งของ Rotor ที่มีอำนาจขั้วแม่เหล็กได้ จะส่งสัญญาณไปยังวงจรควบคุมสั่งให้ MOSFET ตัวที่ 5 และ 4 ทำงาน เฟส C จะจ่ายแรงดัน กระแสตรงบวก จากแบตเตอรี่เข้าสู่ Inverter ในขดลวด Phase C แรงจ่ายแรงดันกระแสตรงลบจาก แบตเตอรี่เข้าสู่ inverter ในขดลวด Phase A



รูปที่ 2.9 ภาพการทำงานของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านขั้นตอนที่ 3

ขั้นตอน 4

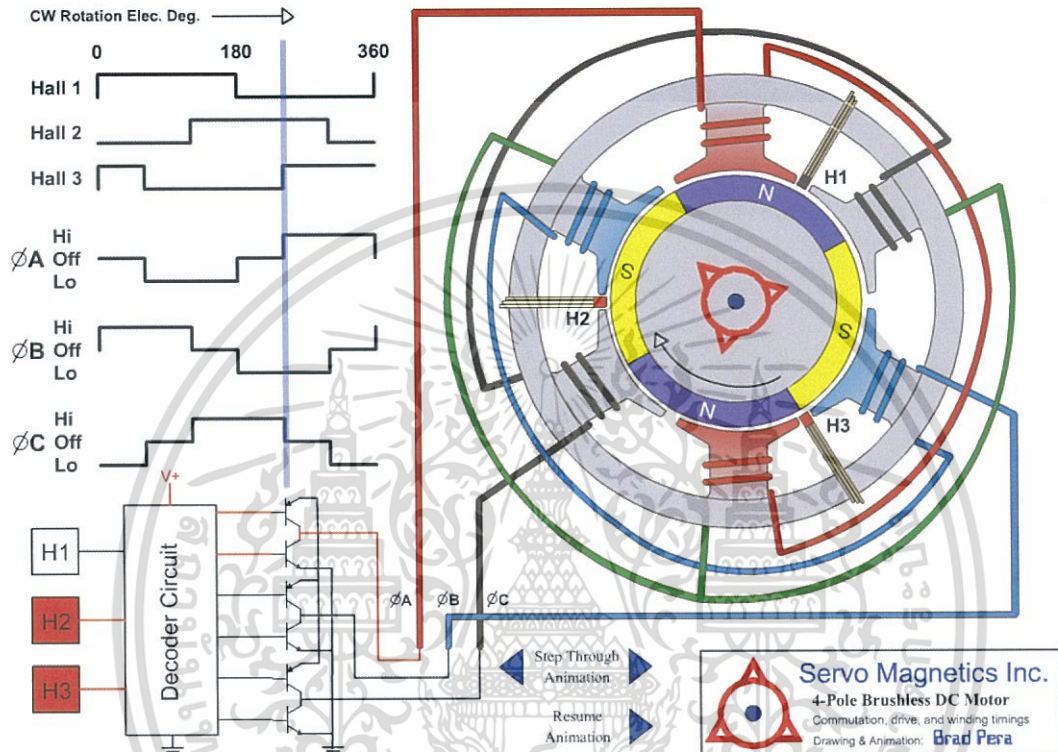
เมื่อ Hall sensor 2 ตรวจจับตำแหน่งของ Rotor ที่มีอำนาจขั้วแม่เหล็กได้ได้ จะส่งสัญญาณไปยังวงจรควบคุมสั่งให้ MOSFET ตัวที่ 5 และ 6 ทำงาน เฟส C จะจ่ายแรงดันกระแสตรงบวก จากแบตเตอรี่เข้าสู่ Inverter ในขดลวด Phase C แรงจ่ายแรงดันกระแสตรงลบจากแบตเตอรี่เข้าสู่ inverter ในขดลวด Phase B



รูปที่ 2.10 กาทำงานของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านขั้นตอนที่ 4

ขั้นตอน 5

เมื่อ Hall sensors 2 และ 3 ตรวจจับตำแหน่งของ Rotor ที่มีอำนาจขั้วแม่เหล็กได้ ได้ จะส่งสัญญาณไปยังวงจรควบคุมสั่งให้ MOSFET ตัวที่ 1 และ 6 ทำงาน เฟส A จะจ่ายแรงดัน กระแสตรงบวก จากแบตเตอรี่เข้าสู่ Inverter ในขดลวด Phase A แรงจ่ายแรงดันกระแสตรงลบจาก แบตเตอรี่เข้าสู่ inverter ในขดลวด Phase B

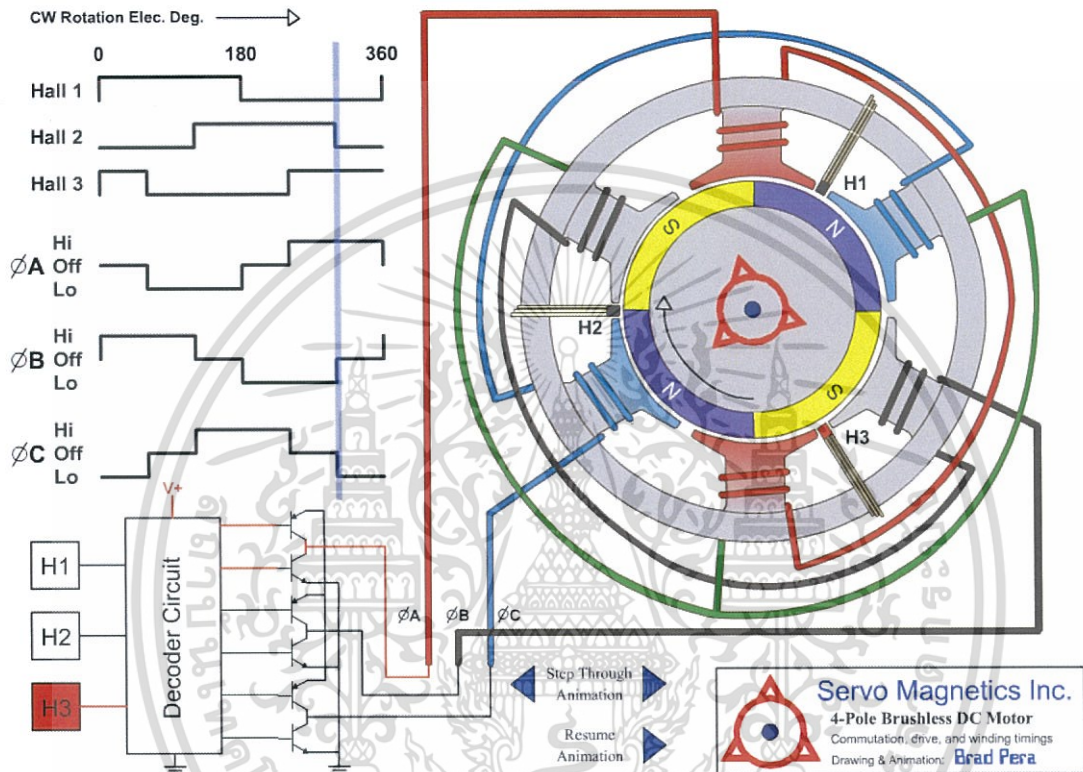


รูปที่ 2.11 ภาพการทำงานของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านขั้นตอนที่ 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอน 6

เมื่อ Hall sensors 1 และ 3 ตรวจจับตำแหน่งของ Rotor ที่มีอำนาจขั้วแม่เหล็กได้ จะส่งสัญญาณไปยังวงจรควบคุมสั่งให้ MOSFET ตัวที่ 1 และ 4 ทำงาน เฟส A จะจ่ายแรงดัน กระแสตรงบวก จากแบตเตอรี่เข้าสู่ Inverter ในขดลวด Phase A แรงจ่ายแรงดันกระแสตรงลบจาก แบตเตอรี่เข้าสู่ inverter ในขดลวด Phase C



รูปที่ 2.12 ภาพการทำงานของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านขั้นตอนที่ 6

2.4.2 ข้อดีของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน

- ไม่มีแปรงถ่านและ commutator ช่วยลดกำลังสูญเสียในส่วนนี้
- สามารถทำงานได้อย่างเสถียรที่รอบการทำงานสูง
- ใช้ระบบอิเล็กทรอนิกส์ควบคุม ไม่ต้องบำรุงรักษาบ่อย
- สามารถควบคุมความเร็วได้ง่าย

2.4.3 ข้อจำกัดของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน

- มีต้นทุนค่าใช้จ่ายกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สูง

2.4.4 ข้อแตกต่างระหว่าง DC และ Brush less DC

- Brush DC ใช้แปรงถ่านและ Commutator แต่ Brush less DC ใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์
- Brush less DC สามารถควบคุมแรงดันที่เกินพิกัดได้ดีกว่า Brush DC

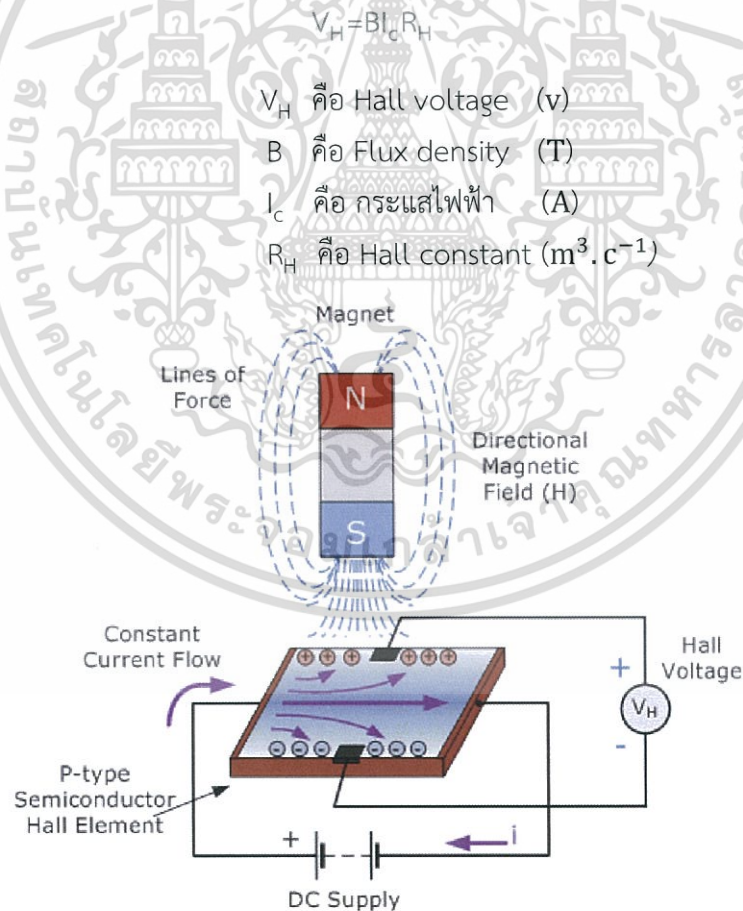
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 Hall Effect sensors

คืออุปกรณ์ที่ถูกคิดค้นโดย E.H.Hall ในปี ค.ศ. 1878 มีหน้าที่ตรวจจับสนามแม่เหล็กของ Rotor เพื่อบอกตำแหน่งของ Rotor และส่งสัญญาณไปยังชุดควบคุมสัญญาณเปิดปิด MOSFET ซึ่งเป็น Solid State เปลี่ยนจากระบบไฟฟ้ากระแสตรง เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ หรือ หรือที่เรียกว่า อุปกรณ์ inverter นั้นเอง และส่งสัญญาณให้ Microcontroller เพื่อประมาณผลและควบคุมความเร็วของเครื่องจักรกลไฟฟ้า

2.5.1 หลักการทำงานของ Hall effect sensors เมื่อเราจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง กับวัสดุสารกึ่งตัวนำไฟฟ้า แบบแผ่นระนาบ ทำให้เกิดการเรียงตัวกันของ electron และ hole ทำให้เกิดความต่างศักย์ V_H เรียกว่า Hall Voltage เมื่อแม่เหล็กถาวรหรือ Rotor มีการเคลื่อนที่ผ่าน Hall sensors ที่ถูกจ่ายด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง อำนาจสนามแม่เหล็กจาก Rotor มีทิศทาง Flux ราบกวนอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำทำให้กระแสเกิดการเปลี่ยนแปลง แรงดัน Hall Voltage เปลี่ยนแปลง ทำให้ input ของ Microcontroller เกิดการเปลี่ยนแปลง ทำให้ Microcontroller รู้ว่า Rotor อยู่ตำแหน่งอะไร สามารถประมวลผลควบคุมความเร็วได้ และสามารถสั่งเปิด-ปิด MOSFET ในช่วงเวลาที่เหมาะสมในแต่ละการรับสัญญาณ จาก Hall sensors ได้โดยสามารถคำนวณแรงดัน V_H ได้จากสมการที่ 2.32

(2.32)



รูปที่ 2.13 ภาพการทำงานของ Hall effect sensor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส

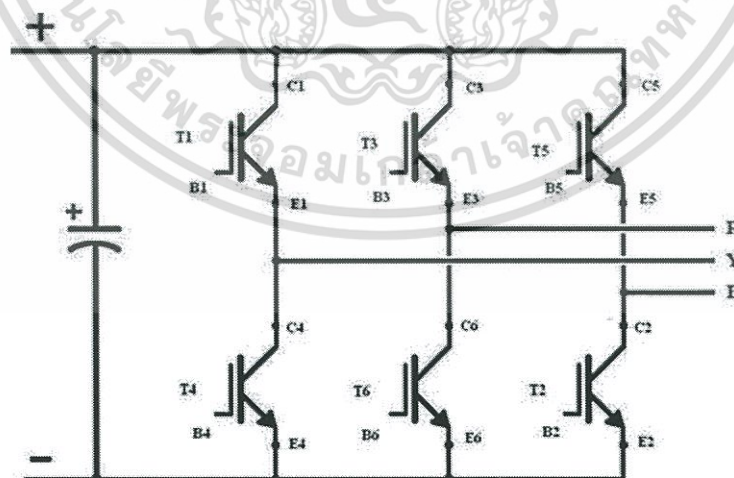
คืออุปกรณ์ที่เปลี่ยนลักษณะของสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ (DC to AC Converter) โดยใช้อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำสำหรับการทำงานแบบสลับการทำงาน (switching mode) ควบคุมไปกับการควบคุมลักษณะของสัญญาณ (PWM : Pulse Width Modulation) เพื่อสร้างสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับที่ไม่เกิดกำลังสูญเสียในสารกึ่งตัวนำสูง เพราะการควบคุมสัญญาณแบบ PWM มีส่วนช่วยให้ ลักษณะของสัญญาณไฟฟ้ามีความเข้าใกล้คลื่นรูปไซน์ (Sinusoidal Waveform) และลดผลของ Harmonics อันเนื่องมาจากกระแสที่ผิดรูปไปจากคลื่นรูปไซน์

Inverter ของเราที่ใช้ในการทำลองเป็น Inverter 3 Phase ซึ่งต่ออยู่กับโหลด BLDC Motor 3 Phase โดยขดลวดที่ stator ถูกต่อแบบ Y-connection โดยมี MOSFET เบอร์ IRF540 6 ตัว เป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำสำหรับการทำงาน (On-Off) ถูกควบคุมด้วยวงจรขับแบบโทเท็มโพล บัฟเฟอร์

2.6.1 โครงสร้างภายในอินเวอร์เตอร์ มีอยู่ 3 อย่างคือ

1. ชุดคอนเวอร์เตอร์ (Converter Circuit) ทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสสลับจากแหล่งจ่าย ให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง
2. ชุดอินเวอร์เตอร์ (Inverter Circuit) ทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ และสามารถเปลี่ยนแปลงแรงดันและความถี่ได้
3. ชุดวงจรควบคุม (Control Circuit) ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของชุดคอนเวอร์เตอร์และชุดอินเวอร์เตอร์

การนำ Inverter มาใช้กับมอเตอร์เพื่อทำการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับโดยใช้การควบคุมความถี่ของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ เพื่อต้องการให้แรงบิด (Torque) คงที่ในทุก ๆ ความเร็วที่เปลี่ยนแปลง



รูปที่ 2.14 รูปวงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส

บทที่ 3

การออกแบบวงจร และการออกแบบการทดลอง

3.1 ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน

พิกัดแรงดัน	48 [v]
กำลังไฟฟ้าต่อเนื่อง (P)	200 [w]
ค่าคงที่แรงบิด (k_t)	125.0 [mNm/A]
ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยการหมุน (J)	430 [gcm ²]
น้ำหนักมอเตอร์ (m)	1440 [g]
ค่าความต้านทานต่อเฟส (R)	0.32 [Ω]
ค่าความเหนี่ยวนำต่อเฟส (L)	0.69 [mH]

3.2 การออกแบบวงจร และการคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ

3.2.1 การออกแบบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าไร้แปรงถ่าน

$$R = 0.32 \Omega$$

$$L = 0.69 \text{ mH}$$

$$K_t = 125 \text{ mNm/A}$$

$$J = 430 \text{ gcm}^2$$

หาค่าคงที่แรงดันย้อนกลับจาก

$$\begin{aligned}k_e &= k_t \times 0.0605 \\ &= 125 \times 10^{-3} \times 0.0605 \\ k_e &= 7.563 \times 10^{-3}\end{aligned}$$

หาค่าแรงบิดทางไฟฟ้าจาก

$$\begin{aligned}\tau_e &= \frac{2L}{3R} \\ &= \frac{2(0.69 \times 10^{-3})}{3 \times 0.32} \\ \tau_e &= 0.718 \text{ mNm}\end{aligned}$$

หาค่าแรงบิดทางกลจาก

$$\begin{aligned}\tau_m &= \frac{3RJ}{k_t k_e} \\ &= \frac{3(0.32)(430 \times 10^{-6})}{(125 \times 10^{-3})(7.563 \times 10^{-3})} \\ \tau_m &= 7.563 \times 10^{-3} \text{ Nm}\end{aligned}$$

จากสมการวงรอบปิดของมอเตอร์

$$\begin{aligned}G(s) &= \frac{1}{k_e} \\ &= \frac{1}{(7.563 \times 10^{-3} \times 0.718 \times s^2) + (7.563 \times 10^{-3} \text{ s}) + 1}\end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$G(s) = \frac{132}{3.134 \times 10^{-4}s^2 + 0.436s + 1}$$

กำหนดให้สมการวงรอบปิดของ PID

$$G(s) = \frac{k_d s^2 + k_p s + k_u}{s} = k_u$$

โดยที่ k_p คือ ค่าสัดส่วนจำนวนจริง

k_d คือ ค่าสัดส่วนอนุพันธ์

k_p คือ ค่าสัดส่วนปริพันธ์

หาค่า k_u ที่ทำให้สมการวงรอบปิดของมอเตอร์ไฟฟ้ามีเสถียรภาพ

จาก

$$1 + G(s)k_u = 0$$

$$G(s) = \frac{132}{3.134 \times 10^{-4}s^2 + 0.436s + 1}$$

$$1 + \left(\frac{132}{3.134 \times 10^{-4}s^2 + 0.436s + 1} \right) k_u = 0$$

$$3.134 \times 10^{-4}s^2 + 0.436s + 132.03k_u + 1 = 0$$

หาค่า k_u ที่ทำให้ระบบควบคุมมีเสถียรภาพ

จากทฤษฎีของเราที่ฮิววิท

$$\begin{array}{l} s^2 \quad 3.134 \times 10^{-4} \quad 132.03k_u + 1 \\ s^1 \quad 0.436 \\ s^0 \quad 132.03k_u + 1 \end{array}$$

$$132.03k_u + 1 \geq 0$$

$$k_u \geq \frac{-1}{132.03}$$

$$k_u = 7.574 \times 10^{-3}$$

เมื่อแทน k_u ลงในสมการ

$$3.134 \times 10^{-4}s^2 + 0.436s + 132.03(7.574 \times 10^{-3}) + 1 = 0$$

หาค่า ω จาก $s = j\omega$

$$\begin{aligned} 3.134 \times 10^{-4}(j\omega)^2 + 0.436(j\omega) + 132.03(7.574 \times 10^{-3}) + 1 &= 0 \\ \omega &= 79.685 \text{ rad/s} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หาค่า T_u จาก

$$T_u = \frac{2\pi}{\omega}$$

$$= \frac{2\pi}{79.685}$$

$$T_u = 0.078 \text{ s}$$

ตารางที่ 3.1 ทฤษฎี Ziegler-Nichols

Types of Controller	K_p	T_i	T_d
P	$0.5K_\alpha$	∞	0
PI	$0.45K_\alpha$	$\frac{1}{1.2}P_\alpha$	0
PID	$0.6K_\alpha$	$0.5P_\alpha$	$0.125P_\alpha$

จากตารางที่ 3.1 กำหนดให้ $k_\alpha = k_u$ และ $T_\alpha = T_u$
จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบควบคุม PI

$$G(s) = k_p \left(1 + \frac{1}{T_i} \right)$$

ระบบการควบคุมแบบ PI สามารถหา P และ I ได้จาก

$$P = k_p$$

$$= 0.45k_u$$

$$= 0.6(7.574 \times 10^{-3})$$

$$k_p = 3.408 \times 10^{-3}$$

$$I = k_i$$

$$k_i = \frac{k_p}{T_i}$$

$$k_i = \frac{7.574 \times 10^{-3}}{\frac{0.078}{1.2}}$$

$$k_i = 0.047$$

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบควบคุม PID

$$G(s) = k_p \left(1 + \frac{1}{T_i} + T_d \right)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบการควบคุมแบบ PID สามารถหา PI และ D ได้จาก

$$\begin{aligned}
 P &= k_p \\
 &= 0.6k_u \\
 &= 0.6(7.574 \times 10^{-3}) \\
 k_p &= 4.544 \times 10^{-3} \\
 I &= k_i \\
 k_i &= \frac{k_p}{0.5T_u} \\
 k_i &= \frac{7.574 \times 10^{-3}}{0.5(0.078)} \\
 k_i &= 0.104 \\
 D &= k_d \\
 k_d &= k_p(0.125T_u) \\
 &= (4.544 \times 10^{-3})(0.125)(0.075) \\
 k_d &= 4.941 \times 10^{-5}
 \end{aligned}$$

3.2.2 การคำนวณพิกัดของอินเวอร์เตอร์สำหรับวงจรโปรโตไทป์

เมื่อแรงดันจากแบตเตอรี่ = 48 V = V_d

$$V_{LL} = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \times \frac{4}{\pi} \times \frac{V_d}{2}$$

$$V_{LL} = 0.98 V_d$$

$$V_{LL} = 0.98 (48 \text{ V})$$

$$V_{LL} = 47.04 \text{ V} = V_{out}$$

$$V_{LL} = \frac{V_{out}}{\sqrt{2}} = \frac{47.04}{\sqrt{2}}$$

$$V_{LL} = 33.26 \text{ V}$$

พิกัดกระแสไฟฟ้าขาออกของอินเวอร์เตอร์ $P = 200 \text{ W}$

$$P_{LL} = \sqrt{3} V_{LL} I_{LL} \cos \phi$$

$$I_{LL} = \frac{P_{LL}}{\sqrt{3} V_{LL} \cos \phi}$$

$$I_{LL} = \frac{200}{\sqrt{3} * 33.26 * 0.8}$$

$$I_{LL} = 4.34 \text{ A}$$

เมื่อกำหนดประสิทธิภาพของมอเตอร์ 80%

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100$$

$$P_{in} = \frac{P_{out}}{\eta} \times 100$$

$$P_{in} = \frac{200 \text{ W}}{0.8}$$

$$P_{in} = 250 \text{ W}$$

กำลังไฟฟ้าสูญเสียในอินเวอร์เตอร์

$$P_{loss} = P_{in} - P_{out}$$

$$P_{loss} = 250 \text{ W} - 200 \text{ W}$$

$$P_{loss} = 50 \text{ W}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิกัดกระแสด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์

$$P_d = I_d \times V_d$$

$$I_d = \frac{P_d}{V_d}$$

$$I_d = \frac{250W}{40V}$$

$$I_d = 6.25A$$

สรุปพิกัดของอินเวอร์เตอร์

แรงไฟฟ้าด้านเข้า (V_d)	48 V
กระแสไฟฟ้าด้านเข้า (I_d)	4.34 A
กำลังไฟฟ้าด้านเข้า (P_d)	250 W
แรงดันไฟฟ้าขาออก (V_{out})	33.26 V
กระแสไฟฟ้าขาออก (I_{out})	6.543 A
กำลังไฟฟ้าจริงขาออก (P_{out})	200 W
กำลังไฟฟ้าสูญเสียในอินเวอร์เตอร์ (P_{loss})	50 W
ประสิทธิภาพ	80%
ตัวประกอบกำลังไฟฟ้า	0.8

3.2.3 การออกแบบวงจรจำลองการควบคุมมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน ด้วย

โปรแกรม Matlab Simulink

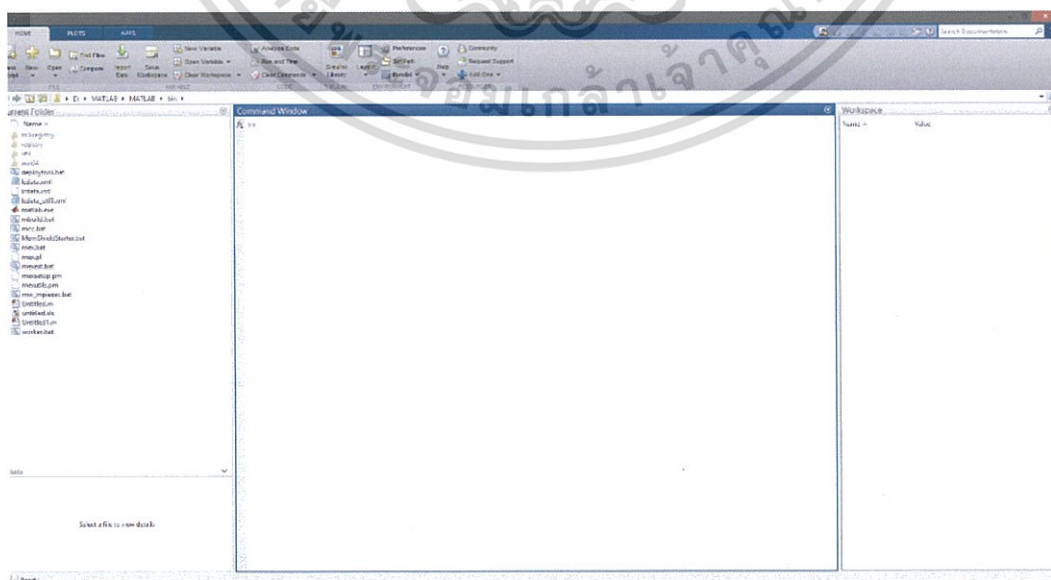
อุปกรณ์การทดลอง

1. โปรแกรม MATLAB และฟังก์ชัน Simulink

ขั้นตอนการทดลอง

1. เปิดโปรแกรม MATLAB โดยการกดที่ไอคอน  บนหน้า desktop เมื่อกดแล้ว

โปรแกรมจะแสดงหน้าต่างดังรูป 3.1

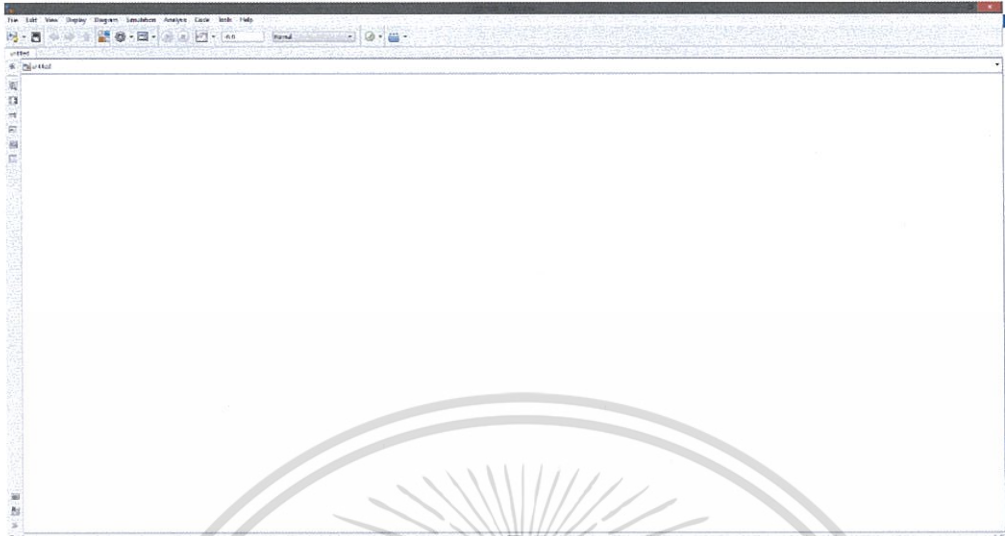


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 3.1 หน้าต่างโปรแกรม MATLAB อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. กดเปิดหน้าต่างฟังก์ชัน Simulink ที่ไอคอน



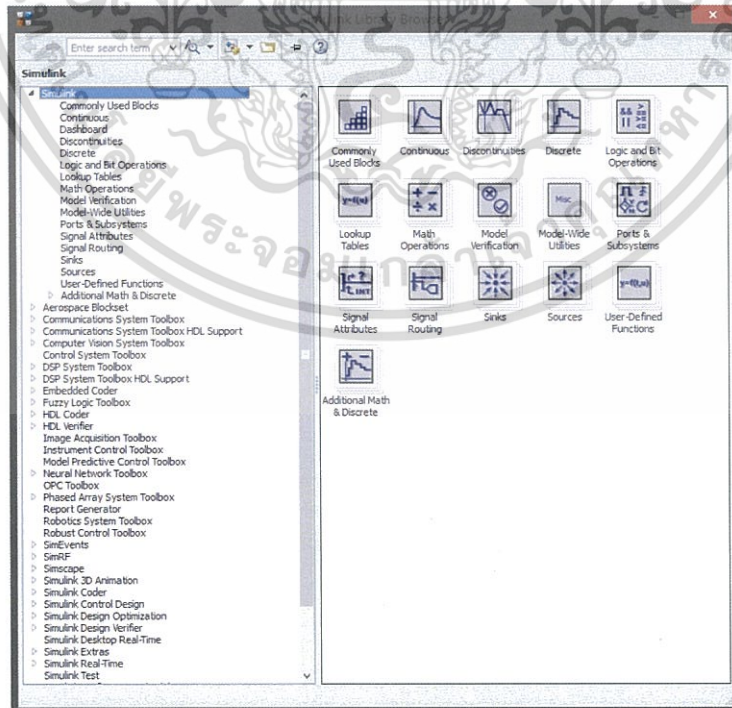
จะแสดงหน้าต่างดังรูป 3.2



รูปที่ 3.2 หน้าต่างฟังก์ชัน Simulink

3. เลือกอุปกรณ์โดยกดที่ปุ่ม


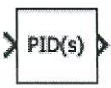


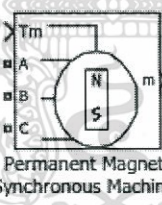



จะแสดงหน้าต่าง Simulink library browser ดังรูป 3.3






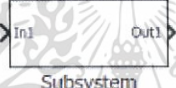
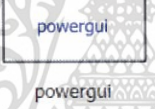
รูปที่ 3.2 หน้าต่าง Simulink library browser

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

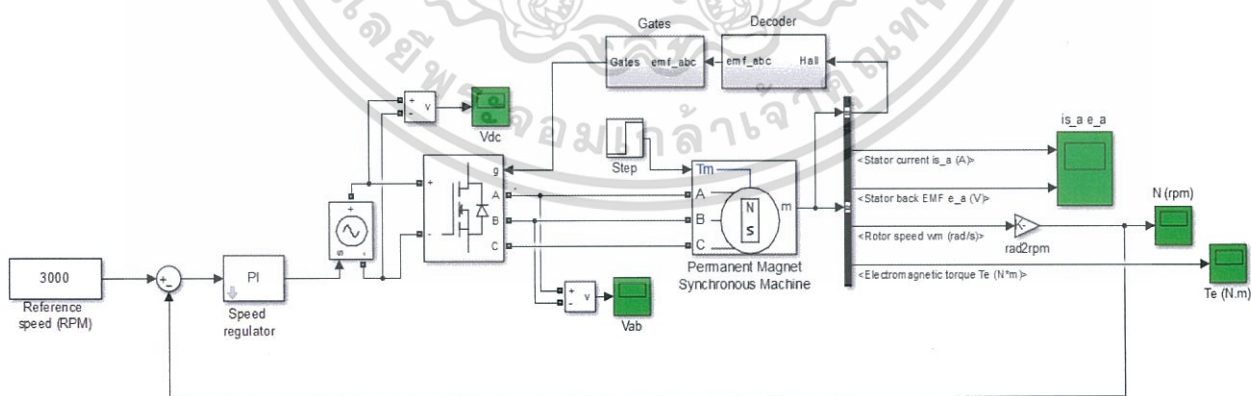
4. ทำการเพิ่มอุปกรณ์ลงในหน้าต่าง Simulink และตั้งค่าตัวแปรต่างๆตามตารางที่ 3.2
ตารางที่ 3.2 ตำแหน่ง ไอคอน และค่าตัวแปรต่างๆ (parameters)

ตำแหน่ง(location)	หน้าตา(icon)	parameter
Simulink/Commonly Used Blocks/Constant	 Constant	Value : 500-600
Simulink/Continuous/PID Controller	 PID Controller	Source: Internal Proportional (P): 4.544e-3 Integral (I): 0.194 Derivative (D): 7.384e-5 Filter coefficient (N): 100
Simulink/Continuous/PID Controller	 Speed regulator	Integral : 0.047 Proportional : 3.4083e-3 Minimum and maximum outputs: [-500,500]
Simscape/Power Systems/Specialized Technology/Fundamental Blocks/Power Electronics/Universal Bridge	 Universal Bridge	Number of bridge arms: Snubber resistance Rs (Ohms): 5000 Snubber capacitance Cs (F): 1e-6 Power Electronic device : MOSFET/Diodes Ron (Ohms): 1e-3
Simscape/Power Systems/Specialized Technology/Fundamental Blocks/Machines/Permanent Magnet Synchronous Machine	 Permanent Magnet Synchronous Machine	Stator phase resistance Rs (ohm): 0.32 Stator phase inductance Ls (H): 0.69e-3 Torque constant: 125e-3 Back EMF flat area (degrees): 120
Simulink/Commonly Used Blocks/Bus Selector	 Bus Selector	Stator current is_a (A) Stator back EMF e_a (V) Rotor speed wm (rad/s) Electromagnetic torque Te (N*m)
Simscape/Power Systems/Specialized Technology/Fundamental Blocks/Electrical Source/Controlled Voltage Source	 Controlled Voltage Source	Initial amplitude (V): 500 Initial phase (deg): 0 Initial frequency (Hz): 0
Simulink/Sources/Step	 Step	Step time: 0.1 Initial value: 0 Final value: 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ในวงกว้าง
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

		Sample time: 0
Simulink/Commonly Used Blocks/Gain	 Gain	Gain: 30/pi Multiplication: Element-wise(K.*u)
Simscape/Power Systems/Specialized Technology/Fundamental Blocks/Measurements/Voltage measurement	 Voltage Measurement	-
Simulink/Commonly Used Blocks/Scope	 Scope	-
Simulink/Commonly Used Blocks/Subsystem	 Subsystem	-
Simscape/Power Systems/Specialized Technology/Fundamental Blocks/powergui	 powergui	-

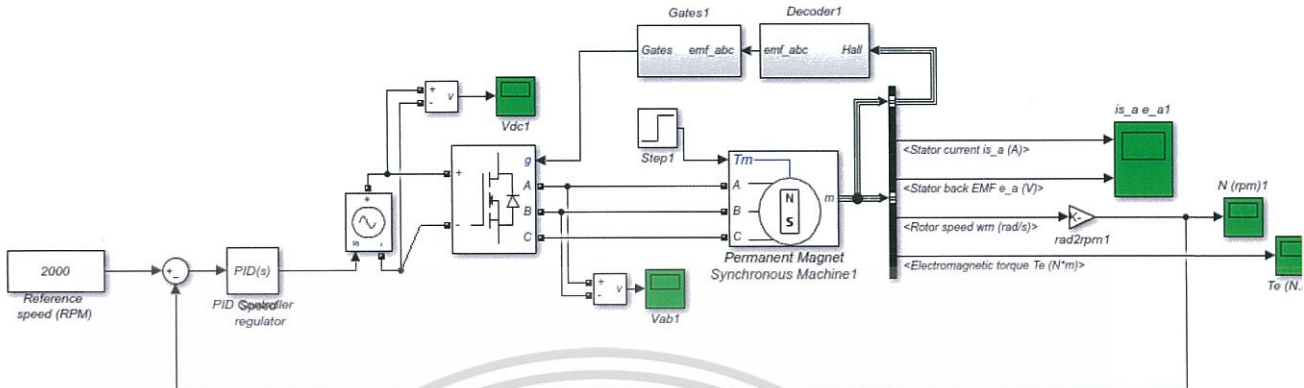
5.ทำการเพิ่มอุปกรณ์ลงในหน้าต่าง Simulink ตามรูปที่ 3.4 เป็นการแสดงการควบคุมด้วย PI



รูปที่ 3.4 การควบคุมมอเตอร์ด้วย PI บนโปรแกรม MATLAB

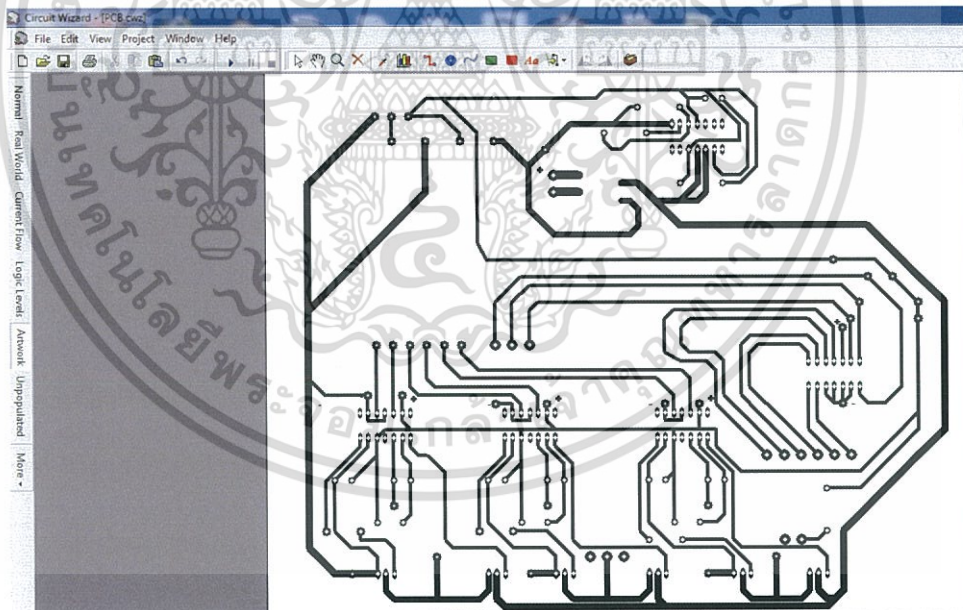
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.ทำการเพิ่มอุปกรณ์ลงในหน้าต่าง Simulink ตามรูปที่ 3.5 เป็นการแสดงการควบคุมด้วย PID



รูปที่ 3.5 การควบคุมมอเตอร์ด้วย PID บนโปรแกรม MATLAB

3.2.4 การออกแบบวงจรโปรโตไทป์ด้วยโปรแกรม Circuit Wizard



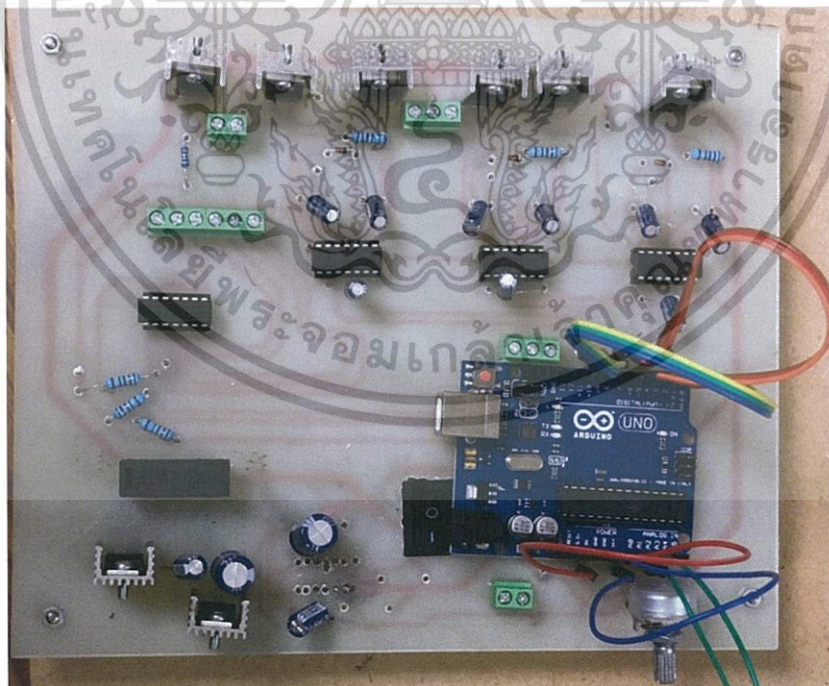
รูปที่ 3.6 แบบวงจรอินเวอร์เตอร์บนโปรแกรม Circuit Wizard

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.5 วงจรอินเวอร์เตอร์

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทำวงจรอินเวอร์เตอร์

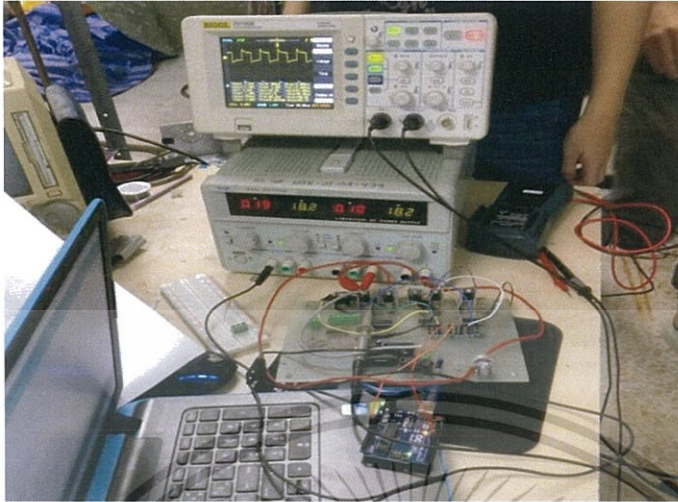
1. MOSFET IRF 540 6 ตัว
2. R 10k ohm 3 ตัว
3. R 100 ohm 3 ตัว
4. C มีขั้ว 50V 2.2uF 5 ตัว
5. C มีขั้ว 10uF 3 ตัว
6. C มีขั้ว 220uF 2 ตัว
7. C มีขั้ว 47uF 2 ตัว
5. IC LM7812 1 ตัว
6. IC LM7824 1 ตัว
7. IC IR2113 3 ตัว
8. สวิตช์ 1 ตัว
9. Diode 1N4148 3 ตัว
10. Terminal 5 ตัว
11. Arduino UNO R3 1 ตัว
12. Fuse 10 A 1 ตัว
13. ตัวต้านทานปรับค่าได้ 1 ตัว



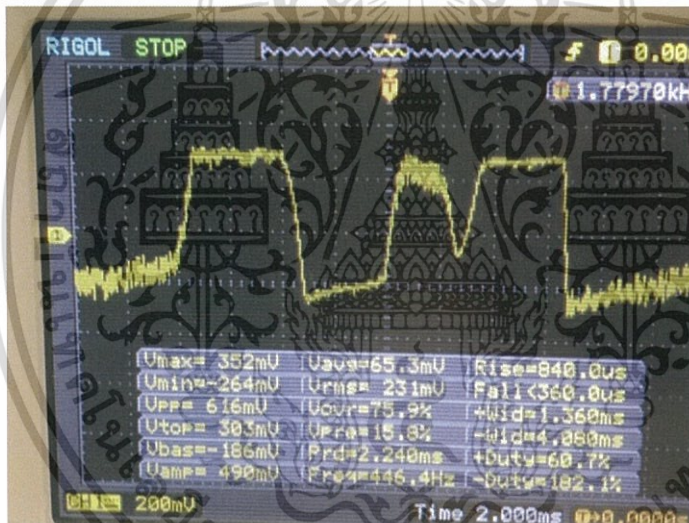
รูปที่ 3.7 วงจรอินเวอร์เตอร์หลังจากการบัดกรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.6 ทดสอบสัญญาณที่ขาเกทซอสของมอเตอร์เฟต



รูปที่ 3.8 ทดลองวัดสัญญาณขาเกทซอสของมอเตอร์เฟต ที่ความถี่ 0.5 kHz



รูปที่ 3.9 สัญญาณขาเกทซอสของมอเตอร์เฟต ที่ความถี่ 0.5 kHz

3.3 คำสั่งในการใช้ขับเคลื่อนมอเตอร์ไร้แปรงถ่าน

```
byte motor_speed, bldc_step, pwm_pin = 2;
```

```
void setup() {
```

```
  DDRD |= 0xFC;
```

```
  PCICR = 1;
```

```
  PCMSK0 = 7;
```

```
  TCCR2A = 0;
```

```
  TCCR2B = 2;
```

```
  TCNT2 = 0;
```

```
  ADMUX = 0x60;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

ADCSRA = 0x84;
bldc_step = PINB & 7;
bldc_move();
}
ISR (PCINT0_vect){
  bldc_step = PINB & 7;
  bldc_move();
}
void bldc_move(){
  switch(bldc_step){
    case 1:
      PORTD = 0x48;
      pwm_pin = 2;
      break;
    case 2:
      PORTD = 0x24;
      pwm_pin = 4;
      break;
    case 3:
      PORTD = 0x60;
      pwm_pin = 4;
      break;
    case 4:
      PORTD = 0x90;
      pwm_pin = 6;
      break;
    case 5:
      PORTD = 0x18;
      pwm_pin = 2;
      break;
    case 6:
      PORTD = 0x84;
      pwm_pin = 6;
      break;
    default:
      PORTD = 0;
      break;
  }
}

```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

}
void loop() {
  ADCSRA |= 1 << ADSC;
  while(ADCSRA & 0x40);
  motor_speed = ADCH;
  if(motor_speed < 1000){
    while(TCNT2 < motor_speed) ;
    digitalWrite(pwm_pin, LOW);
  }
  if(motor_speed > 0){
    while(TCNT2 >= motor_speed) ;
    digitalWrite(pwm_pin, HIGH);
  }
}
}

```

3.4 การออกแบบการทดลอง

3.4.1 เราจะทำการจำลองตัวควบคุมแบบ PI และ PID โดยไร้ซึ่งภาระทางกล มีแค่น้ำหนักของมอเตอร์ และเราจะเปรียบเทียบตัวควบคุมแบบ PI และ PID ที่ความเร็ว 500 rpm กับ 600 rpm ซึ่งเราจะดูผลความเร็วของการตอบสนอง, settling time และ Steady state error ของมอเตอร์ ว่าตัวควบคุมแบบ PI และ PID ต่างกันมากน้อยเพียงใด จากนั้นทำการทดลองการขับมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน แล้วนำมาเปรียบเทียบกัน

3.4.2 เราจะทำการจำลองตัวควบคุมแบบ PI และ PID โดยมีภาระทางกลอยู่ที่ 10 นิวตัน มีทอร์คอยู่ที่ 0.4 นิวตันเมตร และเราจะเปรียบเทียบตัวควบคุมแบบ PI และ PID ที่ความเร็ว 500 rpm กับ 600 rpm ซึ่งเราจะดูผลความเร็วของการตอบสนอง, settling time และ Steady state error ของมอเตอร์ ว่าตัวควบคุมแบบ PI และ PID ต่างกันมากน้อยเพียงใด จากนั้นทำการทดลองการขับมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน แล้วนำมาเปรียบเทียบกัน

3.4.3 เราจะทำการจำลองตัวควบคุมแบบ PI และ PID โดยมีภาระทางกลอยู่ที่ 20 นิวตัน มีทอร์คอยู่ที่ 2 นิวตันเมตร และเราจะเปรียบเทียบตัวควบคุมแบบ PI และ PID ที่ความเร็ว 500 rpm กับ 600 rpm ซึ่งเราจะดูผลความเร็วของการตอบสนอง, settling time และ Steady state error ของมอเตอร์ ว่าตัวควบคุมแบบ PI และ PID ต่างกันมากน้อยเพียงใด จากนั้นทำการทดลองการขับมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน แล้วนำมาเปรียบเทียบกัน

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 ผลการจำลองตัวควบคุมแบบ PI และ PID ไร้ภาระทางกล

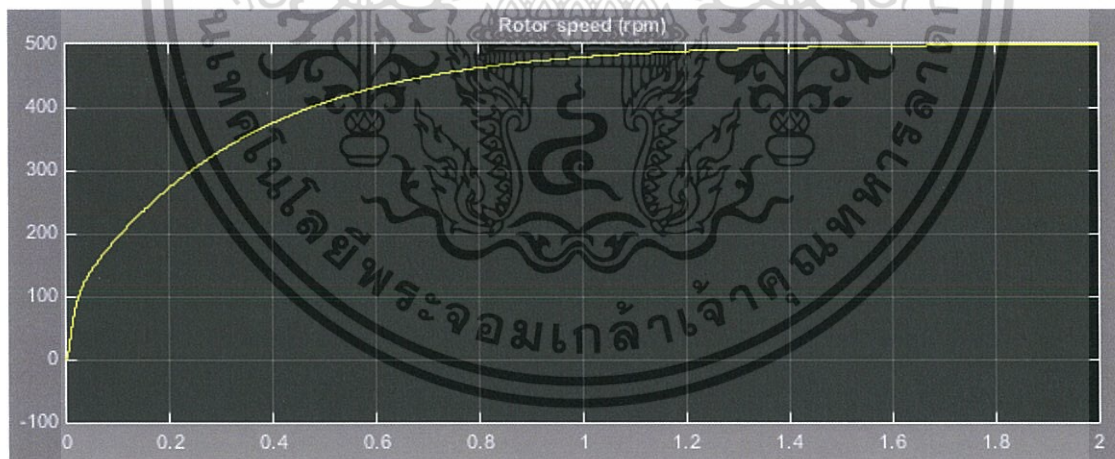
ตารางที่ 4.1 การจำลองตัวควบคุมแบบ PI ไร้ภาระทางกล

Speed Set-Point (rpm)	Settling time (s)	Steady state error (rpm)	เวลาที่แรงบิดคงที่ (s)
500	1.83	5	1.9
600	1.85	6.5	2.0

ตารางที่ 4.2 การจำลองตัวควบคุมแบบ PID ไร้ภาระทางกล

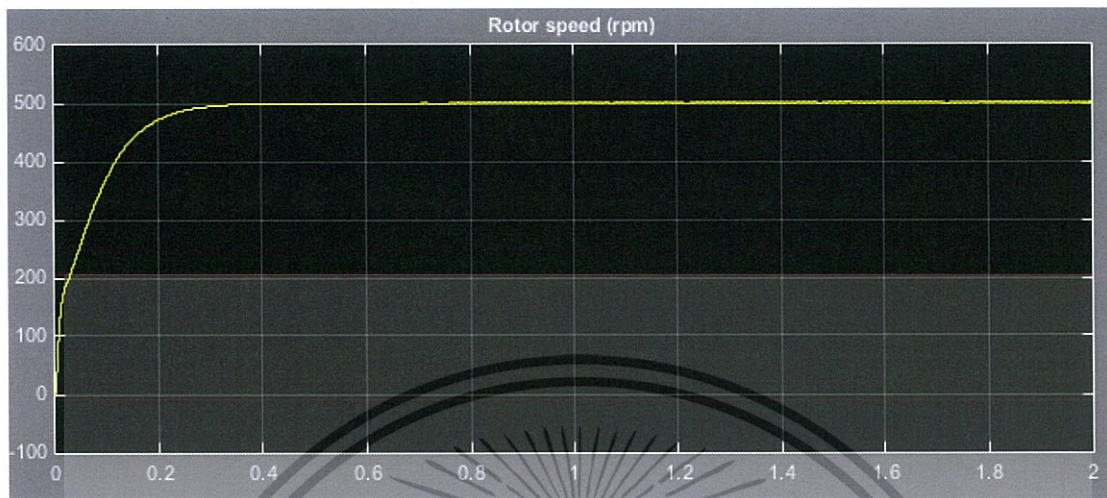
Speed Set-Point (rpm)	Settling time (s)	Steady state error (rpm)	เวลาที่แรงบิดคงที่ (s)
500	0.9	0	0.43
600	0.6	0	0.4

ระบบฟีดแบ็คคอนโทรลเลอร์ ที่ความเร็วมอเตอร์ 500 rpm จะสังเกตเห็นกราฟมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างช้าคือความเร็วคงตัวที่เวลา 1.83 วินาที คือ มีผลตอบสนองที่ต่ำ ทำให้ค่าเวลา setting time มีค่ามากตามไปด้วย



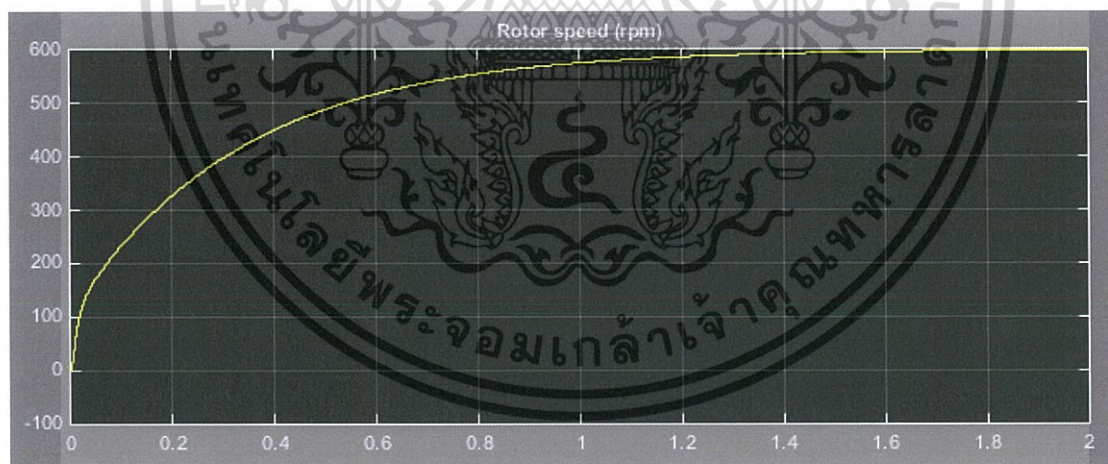
รูปที่ 4.1 กราฟความเร็วมอเตอร์ของระบบควบคุมพีไอ ที่ความเร็ว 500 rpm เทียบกับเวลา (s)

ระบบพีไอคอนโทรลเลอร์ที่ความเร็วมอเตอร์ 500 rpm เราจะสังเกตเห็นได้ว่ากราฟมีการเปลี่ยนแปลงเร็วขึ้นกว่าพีไอคือความเร็วคงตัวที่เวลา 0.9 วินาที คือ มีผลตอบสนองที่ดีขึ้นมาก



รูปที่ 4.2 กราฟความเร็วมอเตอร์ของระบบควบคุมพีไอ ที่ความเร็ว 500 rpm เทียบกับเวลา (s)

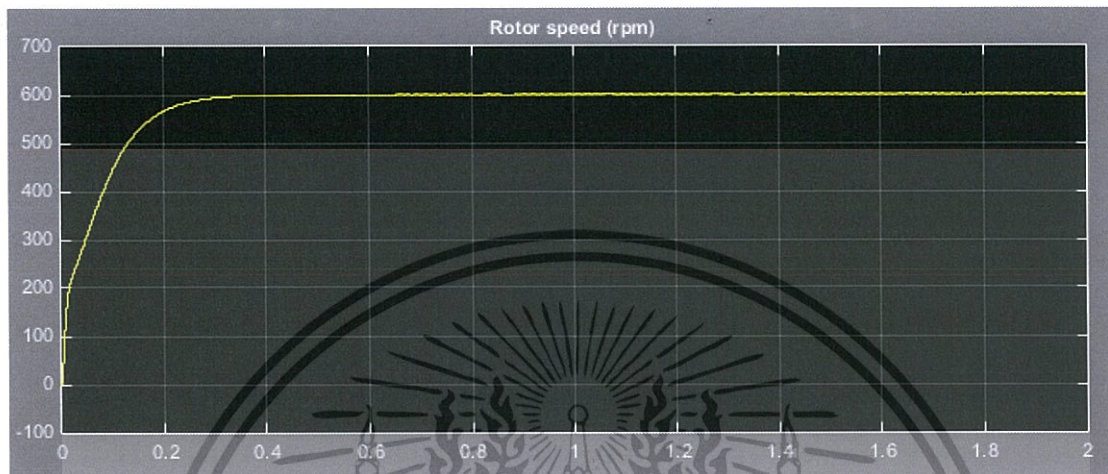
ระบบพีไอคอนโทรลเลอร์ ที่ความเร็วมอเตอร์ 600 rpm จะสังเกตเห็นกราฟมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างช้าคือความเร็วคงตัวที่เวลา 1.85 วินาที คือ มีผลตอบสนองที่ต่ำ ซึ่งจะตอบสนองช้ากว่าความเร็ว 500 rpm แต่ไม่แตกต่างกันมาก ทำให้ค่าเวลา setting time มีค่ามากที่สุด



รูปที่ 4.3 กราฟความเร็วมอเตอร์ของระบบควบคุมพีไอ ที่ความเร็ว 600 rpm เทียบกับเวลา (s)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบพีไอดีคอนโทรลเลอร์ ที่ความเร็วมอเตอร์ 600 rpm จะสังเกตเห็นกราฟ มีการเปลี่ยนแปลงเร็วขึ้นกว่าพีไอคือความเร็วคงตัวที่เวลา 0.6 วินาที คือ มีผลตอบสนองที่ดีขึ้นมาก เร็วกว่า 500 rpm แต่ไม่มาก ทำให้ค่าเวลา setting time มีค่าน้อยลง กว่าควบคุมระบบด้วย พีไอคอนโทรลที่ความเร็ว 500 rpm มาก แต่มีค่ามากกว่าการควบคุมความเร็วด้วยพีไอดีที่ความเร็ว 500 rpm เล็กน้อย



รูปที่ 4.4 กราฟความเร็วมอเตอร์ของระบบควบคุมพีไอดี ที่ความเร็ว 600 rpm เทียบกับเวลา (s)

4.2 ผลการจำลองตัวควบคุมแบบ PI และ PID ภาระทางกล 10 นิวตัน

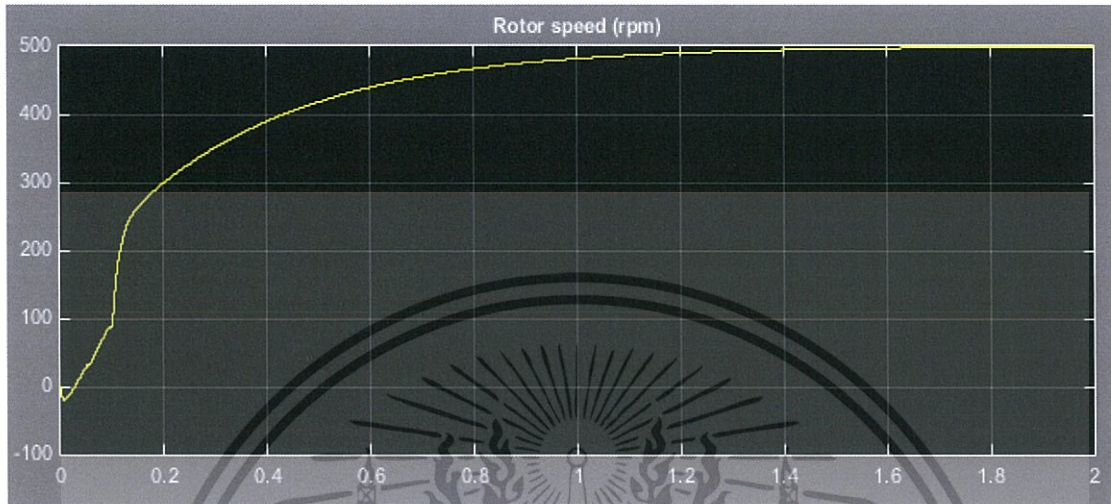
ตารางที่ 4.3 การจำลองตัวควบคุมแบบ PI น้ำหนัก 10 นิวตัน

Speed Set-Point (rpm)	Settling time (s)	Steady state error (rpm)	เวลาที่แรงบิดคงที่ (s)
500	2.08	10	1.5
600	2.32	10	1.75

ตารางที่ 4.4 การจำลองตัวควบคุมแบบ PID น้ำหนัก 10 นิวตัน

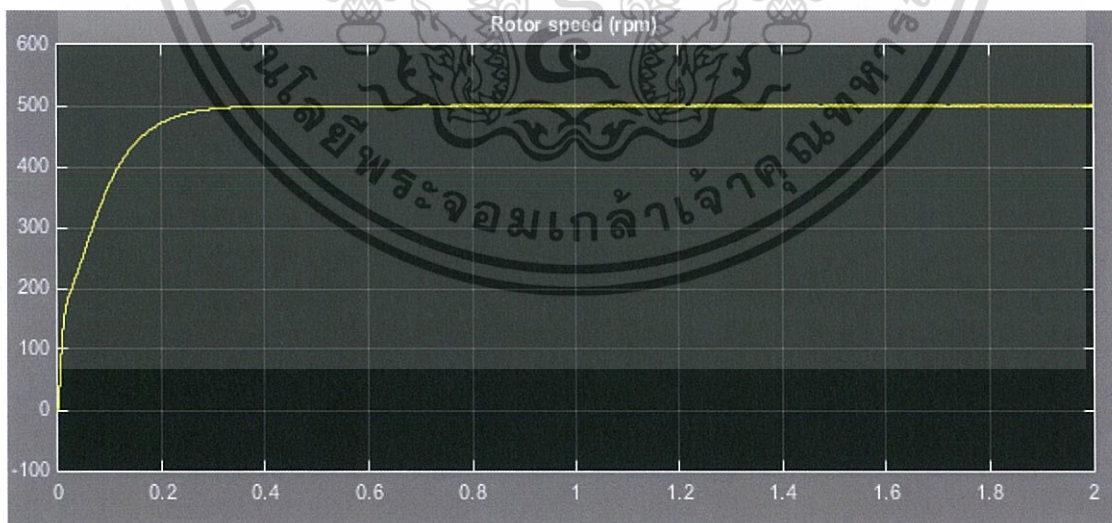
Speed Set-Point (rpm)	Settling time (s)	Steady state error (rpm)	เวลาที่แรงบิดคงที่ (s)
500	0.75	0	0.64
600	0.65	0	0.5

ระบบฟิวคอนโทรลเลอร์ ที่ความเร็วมอเตอร์ 500 rpm สำหรับภาระทางกล 10 นิวตัน จะสังเกตเห็นกราฟมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างช้าคือเข้าใกล้ค่าความเร็วคงตัวที่ 2.08 วินาที มีผลตอบสนองที่ต่ำ ทำให้ค่าเวลา setting time มีค่ามากตามไปด้วย รวมทั้งยังเกิดการแกว่งของสัญญาณในตอนเริ่มระบบซึ่งยังมีค่ามากทำให้ระบบสูญเสียเวลาจากการแกว่งของระบบ



รูปที่ 4.5 กราฟความเร็วมอเตอร์ของระบบควบคุมพีเอ ที่ความเร็ว 500 rpm เทียบกับเวลา (s)

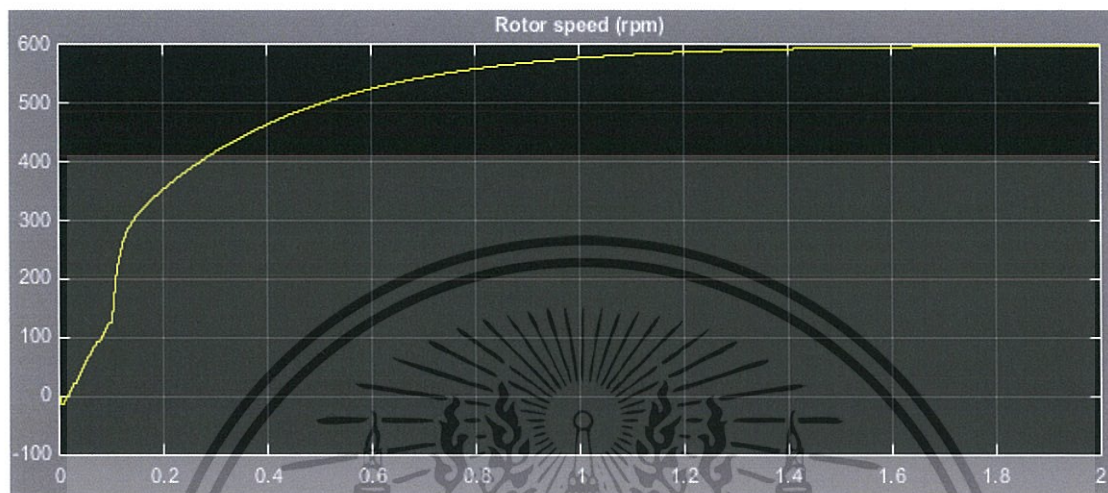
ระบบฟิวคอนโทรลเลอร์ ที่ความเร็ว 500 rpm สำหรับภาระทางกล 10 นิวตัน จะสังเกตเห็นกราฟมีการเปลี่ยนแปลงเร็วขึ้นกว่าพีเอคือความเร็วคงตัวที่เวลา 0.75 วินาที คือมีผลตอบสนองที่ดีขึ้นมาก ทำให้ค่าเวลา setting time มีค่าน้อยลง รวมทั้งยังเกิดการแกว่งของสัญญาณในตอนเริ่มระบบซึ่งยังมีค่าน้อยลงทำให้ระบบสูญเสียเวลาจากการแกว่งของระบบ



รูปที่ 4.6 กราฟความเร็วมอเตอร์ของระบบควบคุมพีไอดี ที่ความเร็ว 500 rpm เทียบกับเวลา (s)

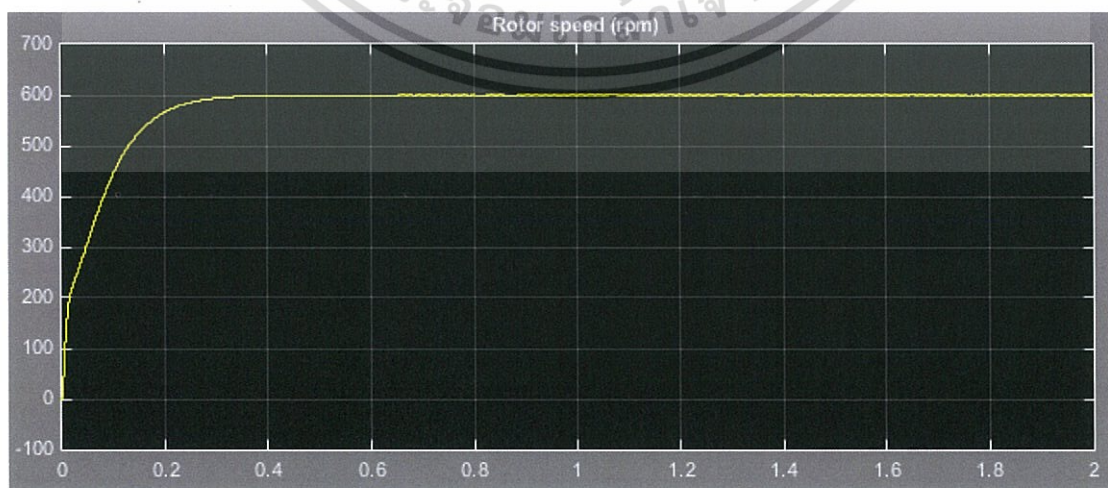
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบฟิวส์คอนโทรลเลอร์ ที่ความเร็วมอเตอร์ 600 rpm สำหรับภาระทางกล 10 นิวตัน จะสังเกตเห็นกราฟมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างช้าคือความเร็วคงตัวที่เวลา 2.32 วินาที คือ มีผลตอบสนองที่ต่ำ ซึ่งจะตอบสนองช้ากว่าความเร็ว 500 rpm คือ แต่ไม่แตกต่างกันมาก ทำให้ค่าเวลา setting time มีค่ามากตามไปด้วย รวมทั้งยังเกิดการแกว่งของสัญญาณในตอนเริ่มระบบซึ่งมีค่าน้อยลงกว่าที่ความเร็วรอบมอเตอร์ 500 rpm ทำให้ระบบสูญเสียเวลาจากการแกว่งของระบบน้อยลง



รูปที่ 4.7 กราฟความเร็วมอเตอร์ของระบบควบคุมฟิวส์ ที่ความเร็ว 600 rpm เทียบกับเวลา (s)

ระบบฟิวส์คอนโทรลเลอร์ ที่ความเร็วมอเตอร์ 600 rpm สำหรับภาระทางกล 10 นิวตัน ระบบฟิวส์คอนโทรลเลอร์ ที่ความเร็วมอเตอร์ 600 rpm จะสังเกตเห็นกราฟมีการเปลี่ยนแปลงเร็วขึ้นกว่าฟิวส์คือความเร็วคงตัวที่เวลา 0.65 วินาที คือ มีผลตอบสนองที่ดีขึ้นมาก แต่ช้ากว่าการควบคุมความเร็วมอเตอร์ด้วย ฟิวส์คอนโทรลเลอร์ที่ความเร็ว 500 rpm แต่ไม่มาก ทำให้ค่าเวลา setting time มีค่าน้อยลงกว่าการควบคุมระบบด้วย ฟิวส์คอนโทรลเลอร์ที่ความเร็ว 500 rpm มาก แต่มีค่ามากกว่าการควบคุมความเร็วด้วยฟิวส์ที่ความเร็ว 500 rpm เล็กน้อย รวมทั้งยังเกิดการแกว่งของสัญญาณในตอนเริ่มระบบซึ่งยังมีค่าน้อยลงมากทำให้ระบบสูญเสียเวลาจากการแกว่ง เมื่อเทียบกับฟิวส์คอนโทรลเลอร์ของ ที่ความเร็ว 500 rpm



รูปที่ 4.8 กราฟความเร็วมอเตอร์ของระบบควบคุมฟิวส์ ที่ความเร็ว 600 rpm เทียบกับเวลา (s)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาดให้มาใช้ขอสงวนสิทธิ์ในการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ผลการจำลองตัวควบคุมแบบ PI และ PID ภาระทางกล 20 นิวตัน

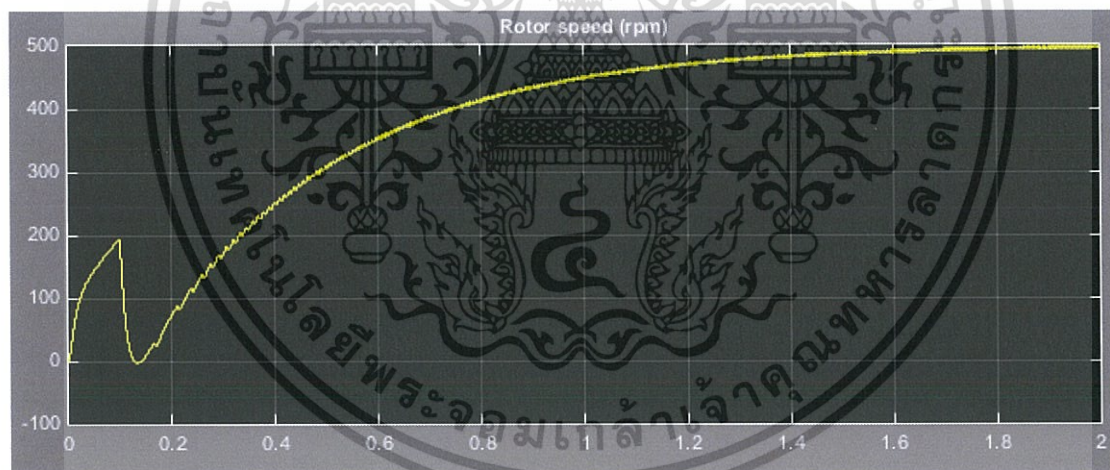
ตารางที่ 4.5 การจำลองตัวควบคุมแบบ PI ภาระทางกล น้ำหนัก 20 นิวตัน

Speed Set-Point (rpm)	Settling time (s)	Steady state error (rpm)	เวลาที่แรงบิดคงที่ (s)
500	2.63	9	0.6
600	2.7	10	2

ตารางที่ 4.6 การจำลองตัวควบคุมแบบ PID น้ำหนัก 20 นิวตัน

Speed Set-Point (rpm)	Settling time (s)	Steady state error (rpm)	เวลาที่แรงบิดคงที่ (s)
500	1.2	0.5	0.66
600	1.25	0.5	0.75

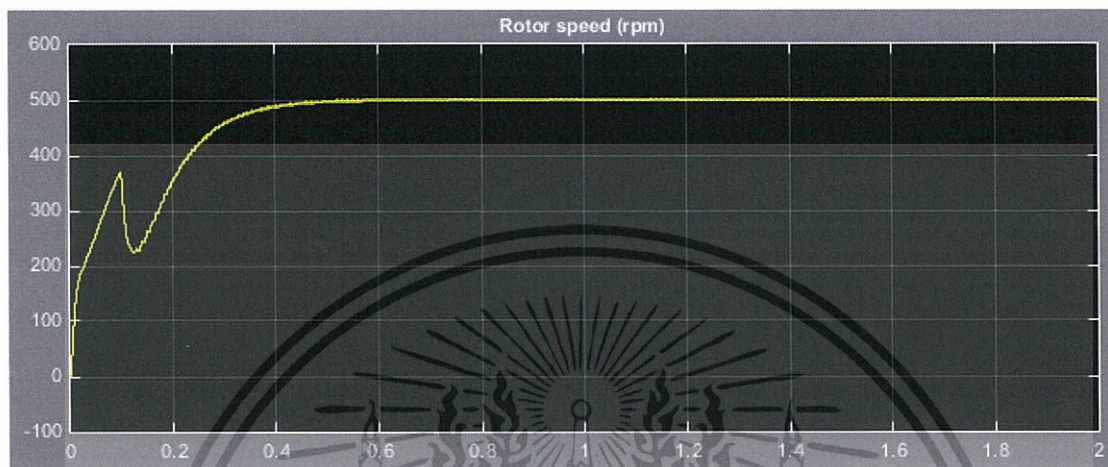
ระบบพีไอคอนโทรลเลอร์ ที่ความเร็วมอเตอร์ 500 rpm จะสังเกตเห็นกราฟมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างช้าคือเข้าใกล้ค่าความเร็วคงตัวที่ 2.63 วินาที คือ มีผลตอบสนองที่ต่ำ ทำให้ค่าเวลา setting time มีค่ามากตามไปด้วย รวมทั้งยังเกิดการแกว่งของสัญญาณในตอนเริ่มระบบซึ่งยังมีค่ามากทำให้ระบบสูญเสียเวลาจากการแกว่งของระบบ



รูปที่ 4.9 กราฟความเร็วมอเตอร์ของระบบควบคุมพีไอ ที่ความเร็ว 500 rpm เทียบกับเวลา(s)

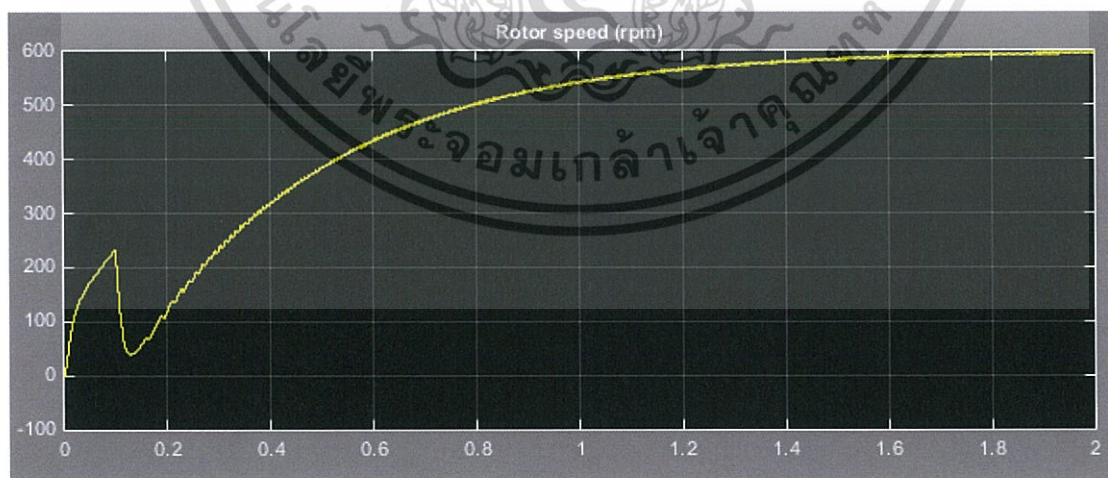
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบฟีดแบ็คคอนโทรลเลอร์ ที่ความเร็ว 500 rpm ระบบฟีดแบ็คคอนโทรลเลอร์ ที่ความเร็วมอเตอร์ 500 rpm จะสังเกตเห็นกราฟมีการเปลี่ยนแปลงเร็วขึ้นกว่าฟีดแบ็คคือความเร็วคงตัวที่เวลา 1.2 วินาที คือ มีผลตอบสนองที่ดีขึ้นมาก ทำให้ค่าเวลา setting time มีค่าน้อยลง รวมทั้งยังเกิดการแกว่งของสัญญาณในตอนเริ่มระบบซึ่งมีค่าน้อยลงทำให้ระบบสูญเสียเวลาจากการแกว่งของระบบ



รูปที่ 4.10 กราฟความเร็วมอเตอร์ของระบบควบคุมฟีดแบ็ค ที่ความเร็ว 500 rpm เทียบกับเวลา (s)

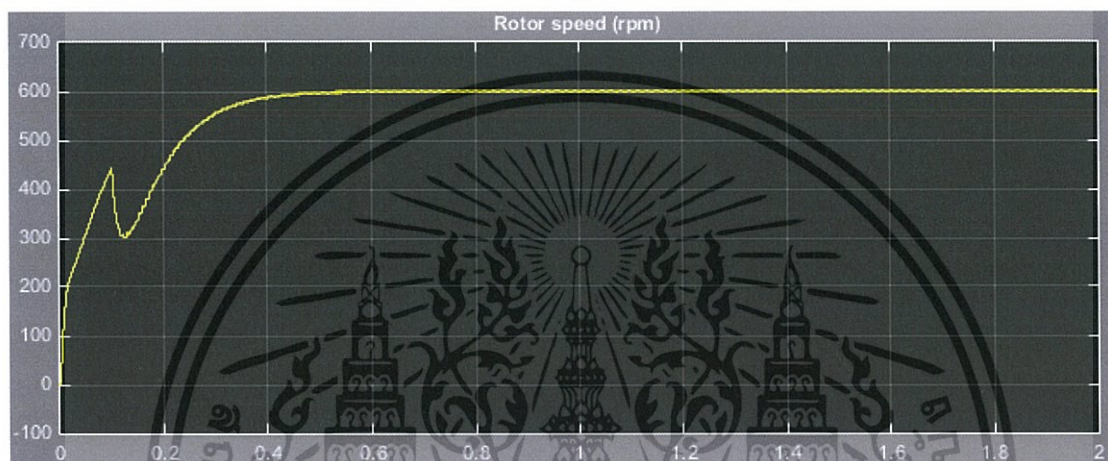
ระบบฟีดแบ็คคอนโทรลเลอร์ ที่ความเร็วมอเตอร์ 500 rpm จะสังเกตเห็นกราฟมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างช้าคือความเร็วคงตัวที่เวลา 2.7 วินาที คือ มีผลตอบสนองที่ต่ำ ซึ่งจะตอบสนองช้ากว่าความเร็ว 500 rpm คือ 2.63 แต่ไม่แตกต่างกันมาก ทำให้ค่าเวลา setting time มีค่ามากตามไปด้วย รวมทั้งยังเกิดการแกว่งของสัญญาณในตอนเริ่มระบบซึ่งมีค่าน้อยลงกว่าที่ความเร็วรอบมอเตอร์ 500 rpm ทำให้ระบบสูญเสียเวลาจากการแกว่งของระบบน้อยลง



รูปที่ 4.11 กราฟความเร็วมอเตอร์ของระบบควบคุมฟีดแบ็ค ที่ความเร็ว 600 rpm เทียบกับเวลา(s)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบพีไอดีคอนโทรลเลอร์ ที่ความเร็วมอเตอร์ 600 rpm ระบบพีไอคอนโทรลเลอร์ ที่ความเร็วมอเตอร์ 600 rpm จะสังเกตเห็นกราฟมีการเปลี่ยนแปลงเร็วขึ้นกว่าพีไอคือความเร็วคงตัวที่เวลา 1.25 วินาที คือ มีผลตอบสนองที่ดีขึ้นมาก แต่ช้ากว่าการควบคุมความเร็วมอเตอร์ด้วย พีไอดีคอนโทรลเลอร์ที่ความเร็ว 500 rpm แต่ไม่มาก ทำให้ค่าเวลา setting time มีค่าน้อยลง กว่า การควบคุมระบบด้วย พีไอคอนโทรลที่ความเร็ว 500 rpm มาก แต่มีค่ามากกว่าการควบคุมความเร็วด้วยพีไอดีที่ความเร็ว 500 rpm เล็กน้อย รวมทั้งยังเกิดการแกว่งของสัญญาณในตอนเริ่มระบบซึ่งยังมีค่าน้อยลงมากทำให้ระบบสูญเสียเวลาจากการแกว่ง เมื่อเทียบกับพีไอคอนโทรลเลอร์ของ ที่ความเร็ว 500 rpm



รูปที่ 4.12 กราฟความเร็วมอเตอร์ของระบบควบคุมพีไอดี ที่ความเร็ว 600 rpm เทียบกับเวลา (s)

4.4 ผลการทดสอบการขับมอเตอร์แบบไร้ภาระทางกล

ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบการขับมอเตอร์แบบไร้ภาระทางกล ที่แรงดัน 30 V

Speed (rpm)	$V_{\text{ขาออกเฉลี่ย}}$ (v)	$I_{\text{ขาออกเฉลี่ย}}$ (A)	$P_{\text{ขาออกเฉลี่ย}}$ (w)	Settling time (s)	Steady state error (rpm)
500	19.74	0.072	2.46	2.64	7
600	23.26	0.092	3.71	2.66	7.5

จากผลการทดลองจะเห็นว่าเมื่อเราขับมอเตอร์โดยไม่มีภาระทางกลของมอเตอร์ ที่ความเร็วรอบ 500 rpm และ 600 rpm และทำการวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น settling time steady state error พบว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการจำลองในคอมพิวเตอร์ การตอบสนองของมอเตอร์ในการทำงาน (settling time) จะช้ากว่าเนื่องจาก ค่ากำลังสูญเสียในเส้นเชือก และการหมุนของมอเตอร์

4.5 ผลการทดสอบการขับมอเตอร์แบบมีภาระทางกล 10 N

ตารางที่ 4.8 ผลการทดสอบการขับมอเตอร์แบบมีภาระทางกล 10 N ที่แรงดัน 35 V

Speed (rpm)	V _{ขาออกเฉลี่ย} (v)	I _{ขาออกเฉลี่ย} (A)	P _{ขาออกเฉลี่ย} (w)	Settling time (s)	Steady state error (rpm)
500	20.93	0.536	19.43	2.31	12
600	24.73	0.536	22.96	2.53	12

จากผลการทดลองจะเห็นว่าเมื่อเราขับมอเตอร์โดยใส่ภาระทางกลของมอเตอร์เป็นมวลหนัก 1 กิโลกรัม ที่ความเร็วรอบ 500 rpm และ 600 rpm และทำการวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น settling time steady state error พบว่าเมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองในคอมพิวเตอร์ การตอบสนองของมอเตอร์ในการทำงาน (settling time) จะช้ากว่าและยังช้ากว่าการขับมอเตอร์โดยไม่มีภาระทางกล เนื่องจาก ค่ากำลังสูญเสียในเส้นเชือก และการหมุนของมอเตอร์ นอกจากนี้ยังใช้กำลังไฟฟ้าที่มากกว่าตอนที่ยังไม่ใส่ภาระทางกล เนื่องจากมอเตอร์ต้องการกระแสไปไปสร้างแรงดันเหนี่ยวนำในขดลวดอามาเจอร์มากขึ้น

4.6 ผลการทดสอบการขับมอเตอร์แบบมีภาระทางกล 20 N

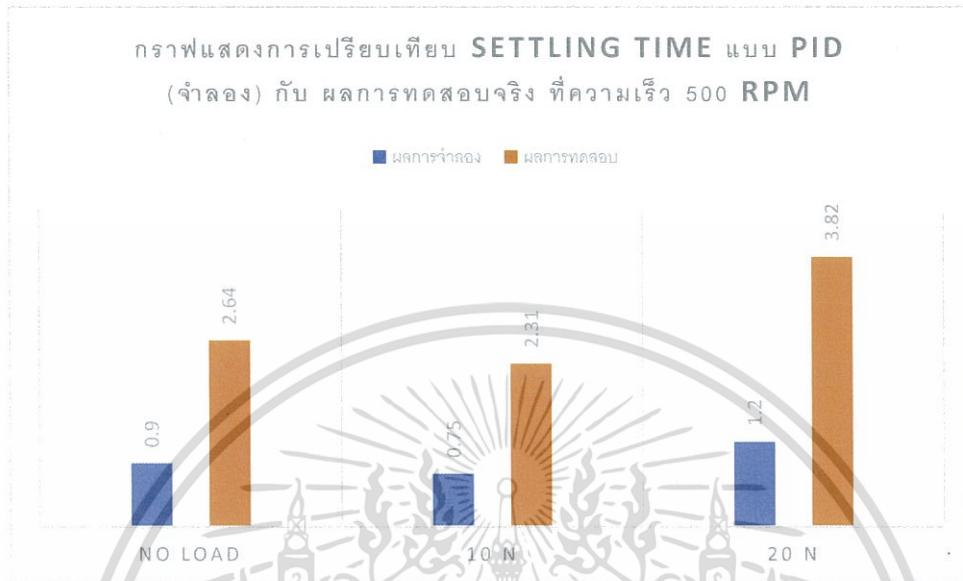
ตารางที่ 4.9 ผลการทดสอบการขับมอเตอร์แบบมีภาระทางกล 20 N ที่แรงดัน 40 V

Speed (rpm)	V _{ขาออกเฉลี่ย} (v)	I _{ขาออกเฉลี่ย} (A)	P _{ขาออกเฉลี่ย} (w)	Settling time (s)	Steady state error (rpm)
500	21.96	0.834	31.72	3.82	12
600	25.86	0.831	37.21	4.51	13

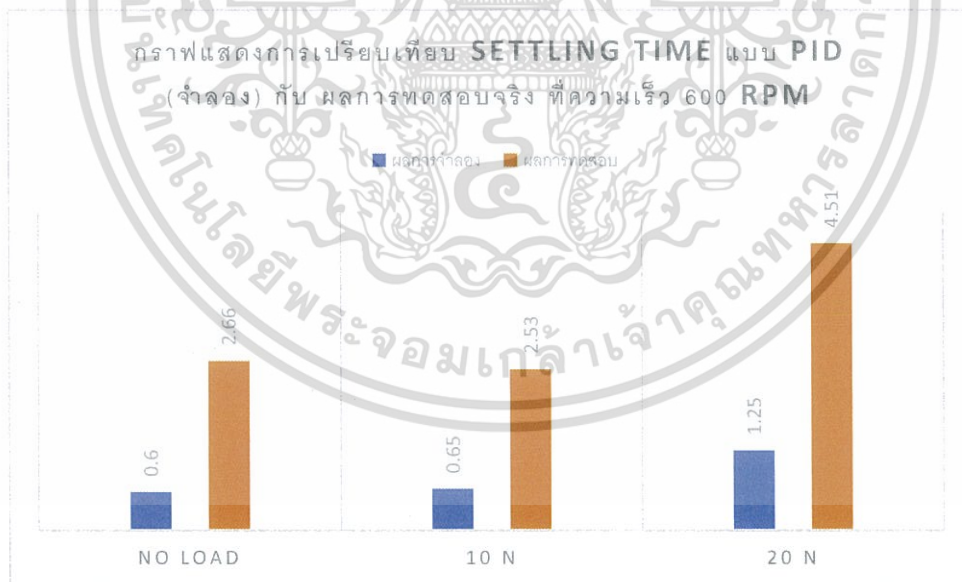
จากผลการทดลองจะเห็นว่าเมื่อเราขับมอเตอร์โดยใส่ภาระทางกลของมอเตอร์เป็นมวลหนัก 2 กิโลกรัม ที่ความเร็วรอบ 500 rpm และ 600 rpm และทำการวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น settling time steady state error พบว่าเมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองในคอมพิวเตอร์ การตอบสนองของมอเตอร์ในการทำงาน (settling time) จะช้ากว่าและยังช้ากว่าการขับมอเตอร์โดยไม่มีภาระทางกลและตอนที่ใส่ภาระทางกล 1 กิโลกรัม เนื่องจาก ค่ากำลังสูญเสียในเส้นเชือก และการหมุนของมอเตอร์ นอกจากนี้ยังใช้กำลังไฟฟ้าที่มากกว่าตอนที่ยังไม่ใส่ภาระทางกล และเมื่อใส่ภาระทางกล 1 กิโลกรัมเนื่องจากมอเตอร์ต้องการกระแสไปไปสร้างแรงดันเหนี่ยวนำในขดลวดอามาเจอร์มากขึ้น

4.7 การเปรียบเทียบผลการจำลอง และผลการทดสอบจริง

4.7.1 การเปรียบเทียบ Settling time แบบ PID (จำลอง) กับ ผลการทดสอบจริง ที่ความเร็ว 500 rpm

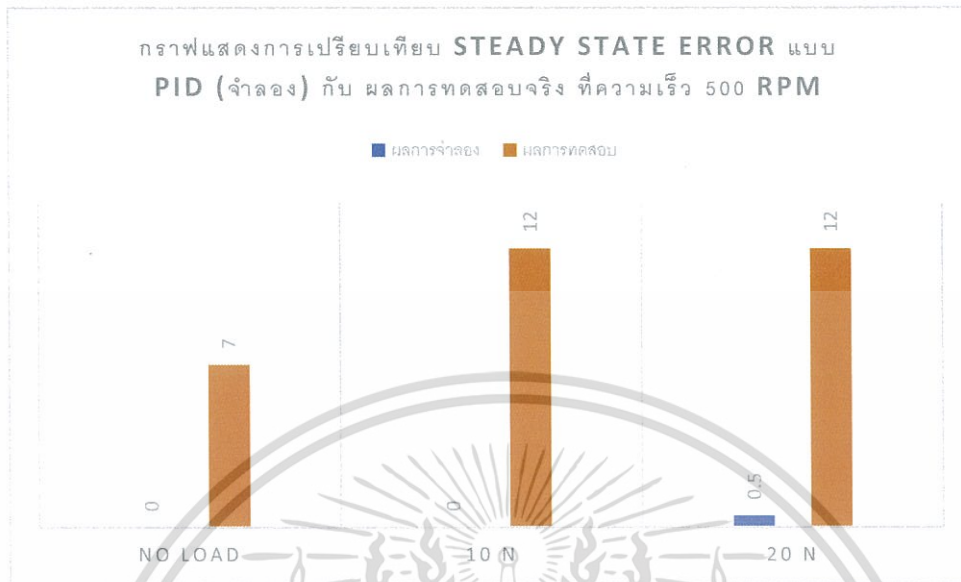


4.7.2 การเปรียบเทียบ Settling time แบบ PID (จำลอง) กับ ผลการทดสอบจริง ที่ความเร็ว 600 rpm

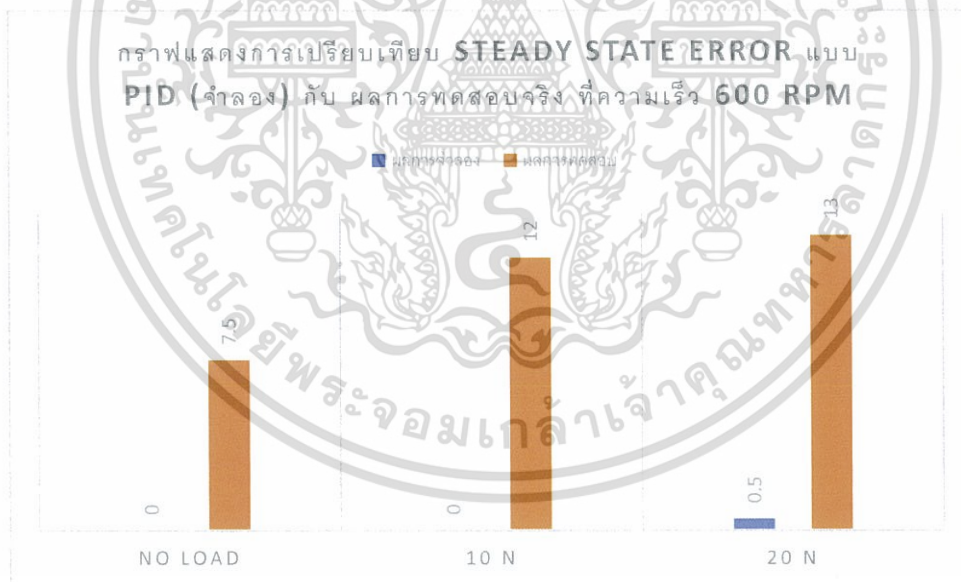


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.7.3 การเปรียบเทียบ Steady state error แบบ PID (จำลอง) กับ ผลการทดสอบจริง ที่ ความเร็ว 500 rpm



4.7.4 การเปรียบเทียบ Steady state error แบบ PID (จำลอง) กับ ผลการทดสอบจริง ที่ ความเร็ว 600 rpm



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 บทสรุป

จากการทดสอบการควบคุมมอเตอร์ไร้แปรงถ่านด้วยการควบคุมแบบ PI และ PID โดยใช้ความเร็วรอบเป็นตัวแปรหลัก เพื่อดูความแตกต่างระหว่างการควบคุมด้วยพีไอและพีไอดี ทำให้เห็นได้ว่าที่ความเร็ว 500 rpm และ 600 rpm ค่า setting time, steady state error และ เวลาที่แรงบิดคงที่ ของตัวควบคุมแบบ PID นั้นน้อยกว่าการควบคุมด้วย PI อย่างเห็นได้ชัดตามตารางที่ 4.1 และ 4.2 ซึ่งบอกได้ว่าการควบคุมแบบ PID นั้นมีผลการตอบสนองที่เร็วกว่าการควบคุมแบบ PI การควบคุมแบบ PID นั้นดีกว่าการควบคุม PI และจากการทดสอบตัวควบคุมแบบ PI และ PID โดยภาระทางกลอยู่ที่ 10 นิวตัน และ ภาระทางกลอยู่ที่ 20 นิวตัน นั้น ก็แสดงให้เห็นว่าการควบคุมแบบ PID มีการตอบสนองที่เร็ว ทำให้ค่า setting time น้อยลงไปด้วย รวมทั้งยังเกิดการแกว่งของสัญญาณในตอนเริ่มต้นของระบบซึ่งมีค่าน้อยลงกว่าการควบคุมแบบ PI ทำให้ระบบสูญเสียเวลาจากการแกว่งของระบบน้อยลง และเมื่อเพิ่มความเร็วรอบให้สูงขึ้น ความแกว่งของระบบก็จะยิ่งน้อยลงจากเดิมทั้งการควบคุมด้วย PI และ PID ตามรูปที่ 4.7-4.10 และเมื่อทำการทดลองเปรียบเทียบกับการขับมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านด้วยวงจรโปรโตไทป์แบบการควบคุมทั่วไปพบว่า ในการควบคุมความเร็วมอเตอร์จริงนั้นจะประสบกับปัญหามากกว่าเช่นค่าความสูญเสียในขดลวดอาามาเจอร์ ค่าความสูญเสียจากแรงเสียดทานของเชือกเมื่อพ่วงภาระทางกล ทำให้เกิดแรงเสียดทานและกำลังสูญเสียในการหมุน เพราะฉะนั้นการตอบสนองต่อการควบคุมจึงช้ากว่าการทดลองด้วยโปรแกรมจำลองในคอมพิวเตอร์ที่ความเร็ว 500 rpm เฉลี่ย 2.06 เท่า และ 600 rpm เฉลี่ย 2.976 เท่า

สุดท้ายนี้ จะบอกได้ว่าการควบคุมด้วย PID นั้นดีกว่าการควบคุมด้วย PI ทั้งในเรื่องของความเร็วการตอบสนอง เวลาที่แรงบิดคงที่ และ ค่าความคลาดเคลื่อนคงที่

5.2 ข้อเสนอแนะ

การจำลองสถานการณ์ของระบบที่น่าเสนอ การออกแบบตัวควบคุมความเร็วรอบ ควรออกแบบหลายวิธี เพื่อเปรียบเทียบผลตอบสนอง

ในการออกแบบปริญญานิพนธ์นี้ยึดการออกแบบตามทฤษฎีของซีเจอร์-นิโคลซึ่งเป็นที่ยอมรับกันหากแต่ยังไม่สร้างสรรค์ให้เกิดสิ่งใหม่ อาจจะมีสูตรคำนวณหาระบบที่ดีกว่านี้ ที่ดีกว่าตารางที่ตายตัว

เอกสารอ้างอิง

- [1] Åstrom, K and Hagglund, T (1994), PID Controllers: theory, design and tuning. 2nd edition .
- [2] Microchip Technology Incorporated 2003, Padmaraja Yedamale, “Brushless DC motor fundamentals”.
- [3] Brain R Copeland , The Design of PID Controllers using Ziegler Nichols Tuning, 2008
- [4] P.C. Sen. Principles of Electric Machines and Power Electronics. John Wiley & Sons,1997.
- [5] Siemens Training Education Program, STEP 2000 Series, “Basic of DC drives and related products”.
- [6] (2017, Decembor ,31). Sensored brushless DC motor control with Arduino. Retrieved from <http://www.suple-circuit.com/Arduino-blDC-brushless-dc-motor-control>



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเปรียบเทียบระหว่างระบบการควบคุมพีไอและพีไอดีสำหรับการควบคุมความเร็วมอเตอร์ไร้ แปรงถ่าน

Comparison between PI and PID for Speed Control to Brushless DC Motor

ณัฐจักร พีราวิศิษฐ์ โจรจน์สต์ อินทร์กัมจันทร์ และ อติเทพ ใจยา

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1 ซอย ฉลองกรุง 1 ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์ 02-329-8000 ต่อ 3925 E-Mail: prasopchok_ho@hotmail.com

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้ศึกษาเกี่ยวกับการเปรียบเทียบคุณลักษณะของระบบควบคุม PI และ PID ในการขับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน ซึ่ง ระบบควบคุม PI และ PID ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในโรงงานอุตสาหกรรม เพราะง่ายในการปรับค่าที่เหมาะสมตัวแปรต่างๆ จากการทดลองทั้งการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ MATLAB และ การทำการทดสอบกับวงจรโปรโตไทป์ พบว่าเมื่อปรับค่าที่เหมาะสมให้กับระบบควบคุมดังกล่าว ระบบการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน PID จะตอบสนองต่อความเร็วได้ดีกว่าระบบ PI

ABSTRACT

This thesis has studied about characteristics of PI and PID controller to control the brushless DC motors. The PI and PID are used in industrial plants. It's easy to adjust the parameter in MATLAB and prototypes circuit. It was found when we adjusting appropriate value to control the system below. PID controller respond faster than PI controller when it drives the brushless DC motor.

1. บทนำ

ยานยนต์ไฟฟ้า ณ เวลานี้ ได้รับความนิยมนิยมเป็น อย่างสูง พลังงานที่จะใช้ในการขับเคลื่อนด้วยยานยนต์ไฟฟ้า ในตอนนี้คือแบตเตอรี่ ยานยนต์ไฟฟ้าจะใช้มอเตอร์เป็นมอเตอร์ ไฟฟ้าแบบกระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน ซึ่งเมื่อมอเตอร์ขับนั้นมีการหมุนความเร็วเปลี่ยนไปในทุกช่วงเวลา ดังนั้นเราจึงสนใจ ในประเด็นของการควบคุมการหมุนของมอเตอร์ เพื่อให้ตอบ โจทย์การใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น

การควบคุมนั้นเราสนใจไปที่การใช้ PID Controller เข้ามาควบคุมปรับปรุงประสิทธิภาพให้ดียิ่งขึ้น

2. หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ระบบควบคุม

ระบบควบคุมจะพิจารณาสัญญาณที่ออกจากระบบ คือสัญญาณขาออกหรือสัญญาณเอาต์พุต อาจจะได้เป็นค่า ระยะทาง ความดัน หรืออุณหภูมิเป็นต้น เมื่อนำค่าที่ได้ไป เปรียบเทียบกับค่าของสัญญาณขาเข้าหรือสัญญาณอินพุต จะได้ ค่าความผิดพลาด และจะถูกส่งต่อไปยังตัวควบคุมเพื่อทำการ สร้างสัญญาณเพื่อนำไปควบคุมระบบต่อไป โดยจะกระทำไป เรื่อยๆจนกว่าค่าสัญญาณขาออกจะมีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับค่า สัญญาณขาเข้า หรืออีกอย่างคือมีความผิดพลาดที่ลดลงหรือ เท่ากับศูนย์ ซึ่งในปริญญานิพนธ์นี้จะศึกษา 2 ระบบควบคุมคือ

1. ระบบควบคุมพีไอ คือ วงจรประมวลผลที่นำค่าที่ผิดพลาด เล็กน้อย จากค่าที่ตั้งไว้ ซึ่งเป็นค่าที่จะต้องถูกควบคุม และค่า จริงที่ตั้งไว้นี้เรียกว่า set point ในกรณีของการควบคุมความเร็ว มอเตอร์ ค่าผิดพลาดนี้สามารถที่จะแสดงโดยสมการ

$$e(t) = W_{sp}(T) - W_{pv}(t)$$

2. ระบบควบคุมพีไอดี คือ ระบบควบคุมแบบป้อนกลับที่ใช้กัน อย่างกว้างขวาง ซึ่งค่าที่นำไปใช้ในการคำนวณเป็นค่าความ ผิดพลาดที่หามาจากความแตกต่างของตัวแปรในกระบวนการ และค่าที่ต้องการ ตัวควบคุมจะพยายามลดค่าผิดพลาดให้เหลื น้อยที่สุดด้วยการปรับค่าสัญญาณขาเข้าของกระบวนการ ค่าตัว แปรของ PID ที่ใช้จะปรับเปลี่ยนตามธรรมชาติของระบบ โดย สามารถเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$G(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = \left(k_p + \frac{K_i}{s} + k_d s \right) = \frac{(k_d s^2 + k_p s + k_i)}{s}$$

2.2 ทฤษฎีการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์

ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน เป็นการหาค่าสมการโดยใช้การ แปลงลาปลาซเข้ามาช่วยในการแก้ไขสมการ ซึ่งจะได้เป็นสมการ สำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน ตามสมการนี้

$$G(s) = \frac{1}{\tau_m \tau_e s^2 + \tau_m s + 1}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน

คือเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน และคอมมิวเตเตอร์ โดยจะใช้ชุดควบคุมสัญญาณในการทำหน้าที่แทน เรียกได้อีกชื่อหนึ่งว่า Permanent Magnet Synchronous

โดยจะใช้แม่เหล็กถาวรในส่วนของ Rotor ซึ่งมี Hall sensor ตามรูปภาพจะอยู่ในส่วนของ Position sensor ติดอยู่บน Stator คอยตรวจจับการเคลื่อนตัวของแม่เหล็กถาวรในส่วนของ rotor และส่งคำสั่งไปยังชุดควบคุมสัญญาณ ซึ่งเราจะใช้ Microcontroller ซึ่งอยู่ในส่วนของ control triggers ในการประมวลผลในการควบคุมความเร็วของ Motor ควบคุมการทำงานของ MOSFET (metal-oxide-semiconductor field-effect transistor) ตัวที่ 1-6 ซึ่งทำงานสัมพันธ์กับ PWM (Pulse Width Modulation) ในการสร้างสัญญาณแบบ Bipolar driver จาก Microcontroller ซึ่งมีผลทำให้สัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงเปลี่ยนเป็นกระแสสลับ และเกิดการสร้างสนามแม่เหล็กหมุนที่ขดลวด 3 phase ในฝั่ง stator ซึ่งคั่นกันอยู่ในรูปแบบของ Y-connection และ Synchronize สนามแม่เหล็กระหว่างขดลวดที่ stator กับแม่เหล็กถาวรที่ Rotor เกิดการหมุนที่ Rotor

2.5 Hall effect sensors

คืออุปกรณ์ที่ถูกคิดค้นโดย E.H.Hall ในปี ค.ศ. 1878 มีหน้าที่ตรวจจับสนามแม่เหล็กของ Rotor เพื่อบอกตำแหน่งของ Rotor และส่งสัญญาณไปยังชุดควบคุมสัญญาณเปิดปิด MOSFET ซึ่งเป็น Solid State เปลี่ยนจากระบบไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ หรือ หรือที่เรียกว่าอุปกรณ์ inverter นั้นเอง และส่งสัญญาณให้ Microcontroller เพื่อประมวลผลและควบคุมความเร็วของเครื่องจักรกลไฟฟ้า

2.6 อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส

คืออุปกรณ์ที่เปลี่ยนลักษณะของสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ (DC to AC Converter) โดยใช้อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำสำหรับการทำงานแบบสลับการทำงาน (switching mode) ควบคุมไปกับการควบคุมลักษณะของสัญญาณ (PWM : Pulse Width Modulation) เพื่อสร้างสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับที่ไม่เกิดกำลังสูญเสียในสารกึ่งนำสูง เพราะการควบคุมสัญญาณแบบ PWM มีส่วนช่วยให้ ลักษณะของสัญญาณไฟฟ้ามีความเข้าใกล้คลื่นรูปไซน์ (Sinusoidal Waveform) และลดผลของ Harmonics อันเนื่องมาจากกระแสที่ผิดรูปไปจากคลื่นรูปไซน์

3. การออกแบบวงจร และการออกแบบการทดลอง

3.1 การออกแบบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าไร้แปรงถ่าน

หาทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันจาก ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ โดยใช้สูตร

$$Vs = Ri + L \frac{di}{dt} + e \dots (1)$$

และ

$$Te = k_f \omega_m + J \frac{d\omega_m}{dt} + T_L \dots (2)$$

แก้สมการหาทรานส์เฟอร์ฟังก์ชัน

$$G(s) = \frac{\omega_m}{Vs} = \frac{k_t}{s^2 J L + R J s + k_e k_t}$$

แทนค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์จะได้ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชัน

$$G(s) = \frac{132}{3.134 \times 10^{-4} s^2 + 0.436 s + 1}$$

แทนค่าโดยใช้วิธีการหาของ Ziegler-Nichols

Types of controller	K_p	T_i	T_d
P	$0.5 K_u$	∞	0
PI	$0.45 K_u$	$\frac{1}{1.2} T_u$	0
PID	$0.6 K_u$	$0.5 T_u$	$0.125 T_u$

จะได้ค่า เกิน ของการควบคุมแบบ PI และ PID คือ

$$K_p = 3.408 \times 10^{-3} \quad K_i = 0.047 \quad \text{สำหรับ PI และ}$$

$$K_p = 4.544 \times 10^{-3} \quad K_i = 0.104$$

$$K_d = 4.941 \times 10^{-5} \quad \text{สำหรับการควบคุม PID}$$

3.2 การออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์

ในการออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์เราจะต้องคิดจากพิกัดกำลังทางไฟฟ้าของมอเตอร์ และแรงดันที่ใช้ ซึ่งเราใช้มอเตอร์ขนาด 200 วัตต์และแรงดันไม่เกิน 48 โวลต์ จากสูตร

$$I_{LL} = \frac{P_{LL}}{\sqrt{3} V_{LL} \cos \phi}$$

ก็จะสามารถหากระแสที่คิดได้ โดย I_{LL} ออกเท่ากับ 4.43 A และกระแสด้านขาเข้าของอินเวอร์เตอร์จาก

$$P_d = I_d \times V_d$$

ซึ่งแก้สมการแล้วจะได้ $I_d = 6.25 A$

3.3 ออกแบบการทดลอง

3.3.1 เราจะทำการจำลองตัวควบคุมแบบ PI และ PID โดยวิธีซึ่งภาระทางกล มีแค่น้ำหนักของมอเตอร์ และเราจะเปรียบเทียบตัวควบคุมแบบ PI และ PID ที่ความเร็ว 500 rpm กับ 600 rpm ซึ่งเราจะดูผลความเร็วของการตอบสนอง, settling time และ Steady state error ของมอเตอร์ ว่าตัวควบคุมแบบ PI และ PID ต่างกันมากน้อยเพียงใด จากนั้นทำการทดลองการจับมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน แล้วนำมาเปรียบเทียบกัน

3.3.2 เราจะทำการจำลองตัวควบคุมแบบ PI และ PID โดยมีภาระทางกลอยู่ที่ 10 นิวตัน มีทอร์คอยู่ที่ 0.4 นิวตันเมตร และเราจะเปรียบเทียบตัวควบคุมแบบ PI และ PID ที่ความเร็ว 500 rpm กับ 600 rpm ซึ่งเราจะดูผลความเร็วของการตอบสนอง,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาศึกษาเท่านั้น เมื่อนักเรียนเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

settling time และ Steady state error ของมอเตอร์ ว่าตัวควบคุมแบบ PI และ PID ต่างกันมากน้อยเพียงใด จากนั้นทำการทดลองการขับมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน แล้วนำมาเปรียบเทียบกัน

3.3.3 เราจะทำการจำลองตัวควบคุมแบบ PI และ PID โดยมีภาระทางกลอยู่ที่ 20 นิวตัน มีทอร์คอยู่ที่ 2 นิวตันเมตร และเราจะเปรียบเทียบตัวควบคุมแบบ PI และ PID ที่ความเร็ว 500 rpm กับ 600 rpm ซึ่งเราจะดูผลความเร็วของการตอบสนอง, settling time และ Steady state error ของมอเตอร์ ว่าตัวควบคุมแบบ PI และ PID ต่างกันมากน้อยเพียงใด จากนั้นทำการทดลองการขับมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน แล้วนำมาเปรียบเทียบกัน

4. ผลการทดลอง

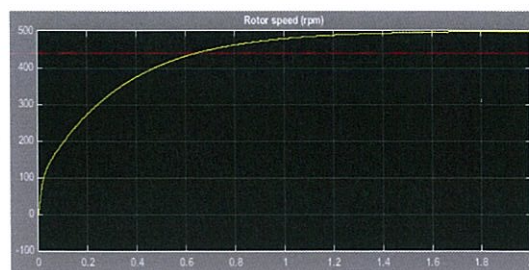
เมื่อเราออกแบบระบบในด้วยโปรแกรมเมทแลปในคอมพิวเตอร์เสร็จแล้ว ก็จะใส่ค่าพารามิเตอร์เพื่อวิเคราะห์ผลการทดลองดังตาราง ตารางที่ 4.1 การจำลองตัวควบคุมแบบ PI ไร้ภาระทางกล

Speed Set-Point (rpm)	Settling time (s)	Steady state error (rpm)	เวลาที่แรงบิดคงที่ (s)
500	1.83	5	1.9
600	1.85	6.5	2.0

ตารางที่ 4.2 การจำลองตัวควบคุมแบบ PID ไร้ภาระทางกล

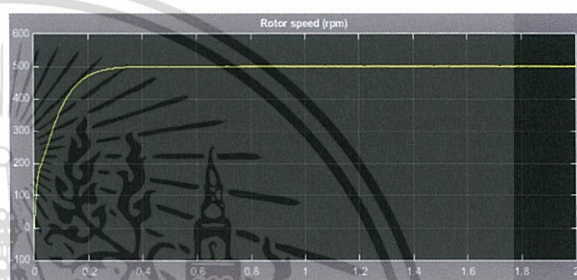
Speed Set-Point (rpm)	Settling time (s)	Steady state error (rpm)	เวลาที่แรงบิดคงที่ (s)
500	0.9	0	0.43
600	0.6	0	0.4

เมื่อเราเทียบการจำลองระบบด้วยฟิโอดีและฟิโอดีคอนโทรลเลอร์ ในความเร็ว 500 rpm ระบบฟิโอดีคอนโทรลเลอร์ ที่ความเร็วมอเตอร์ 500 rpm จะสังเกตเห็นกราฟที่มีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างช้าคือความเร็วคงตัวที่เวลา 1.83 วินาที คือ มีผลตอบสนองที่ต่ำ ทำให้ค่าเวลา settling time มีค่ามากตามไปด้วย



รูปที่ 4.1 กราฟความเร็วมอเตอร์ของระบบควบคุมฟิโอดี ที่ความเร็ว 500 rpm เทียบกับเวลา (s)

และระบบฟิโอดี ระบบฟิโอดีคอนโทรลเลอร์ที่ความเร็วมอเตอร์ 500 rpm เราจะสังเกตเห็นได้ว่ากราฟมีการเปลี่ยนแปลงเร็วขึ้นกว่าฟิโอดีคือความเร็วคงตัวที่เวลา 0.9 วินาที คือ มีผลตอบสนองที่ดีขึ้นมาก



รูปที่ 4.2 กราฟความเร็วมอเตอร์ของระบบควบคุมฟิโอดี ที่ความเร็ว 500 rpm เทียบกับเวลา (s)

และเมื่อทำการทดลองขับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านขนาด 200 วัตต์ ทำการวัดจริงเมื่อมอเตอร์หมุนและบันทึกค่าต่างๆ ลงในตาราง จะได้ค่าตามตารางที่ 4.7

Speed (rpm)	V _{ช้อต} (v)	I _{ช้อต} (A)	P _{ช้อต} (w)	Settling time (s)	Steady state error (rpm)
500	19.74	0.072	2.46	2.64	7
600	23.26	0.092	3.71	2.66	7.5

ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบการขับมอเตอร์แบบไร้ภาระทางกลที่แรงดัน 30 V

จากผลการทดลองจะเห็นว่าเมื่อเราขับมอเตอร์โดยไม่มีภาระทางกลของมอเตอร์ ที่ความเร็วรอบ 500 rpm และ 600 rpm และทำการวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น settling time steady state error พบว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกรจำลองในคอมพิวเตอร์ การตอบสนองของมอเตอร์ในการทำงาน(settling time) จะช้ากว่าเนื่องจาก ค่ากำลังสูญเสียในเส้นเชือก และการหมุนของมอเตอร์

5.สรุป

จากการทดสอบการควบคุมมอเตอร์ไร้แปรงถ่านด้วยการควบคุมแบบ PI และ PID โดยใช้ความเร็วรอบเป็นตัวแปรหลัก เพื่อดูความแตกต่างระหว่างการควบคุมด้วยฟิโอดี

พีไอดี ทำให้เห็นได้ว่าที่ความเร็ว 500 rpm และ 600 rpm ค่า setting time, steady state error และ เวลาที่แรงบิดคงที่ ของตัวควบคุมแบบ PID นั้นน้อยกว่าการควบคุมด้วย PI อย่างเห็นได้ชัดตามตารางที่ 4.1 และ 4.2 ซึ่งบอกได้ว่าการควบคุมแบบ PID นั้นมีผลการตอบสนองที่เร็วกว่าการควบคุมแบบ PI การควบคุมแบบ PID นั้นดีกว่าการควบคุม PI และจากการทดสอบตัวควบคุมแบบ PI และ PID โดยภาระทางกลอยู่ที่ 10 นิวตัน และ ภาระทางกลอยู่ที่ 20 นิวตัน นั้น ก็แสดงให้เห็นว่าการควบคุมแบบ PID มีการตอบสนองที่เร็ว ทำให้ค่า setting time น้อยลงไปด้วย รวมทั้งยังเกิดการแกว่งของสัญญาณในตอนเริ่มต้นของระบบซึ่งมีค่าน้อยลงกว่าการควบคุมแบบ PI ทำให้ระบบสูญเสียเวลาจากการแกว่งของระบบน้อยลง และเมื่อเพิ่มความเร็วยุโรปให้สูงขึ้น ความแกว่งของระบบก็จะยิ่งน้อยลงไปจากเดิมทั้งการควบคุมด้วย PI และ PID ตามรูปที่ 4.7-4.10 และเมื่อทำการทดลองเปรียบเทียบกับกรณีมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านด้วยวงจร โปรโตไทป์แบบการควบคุมทั่วไปพบว่า ในการควบคุมความเร็วมอเตอร์จริงนั้นจะประสบกับปัญหามากกว่าเช่นค่าความสูญเสียในขดลวดอาามาเจอร์ ค่าความสูญเสียจากแรงเสียดทานของเชือกเมื่อห้วงภาระทางกลทำให้เกิดแรงเสียดทานและกำลังสูญเสียในการหมุน เพราะฉะนั้นการตอบสนองต่อการควบคุมจึงช้ากว่าการทดลองด้วยโปรแกรมจำลอง ในคอมพิวเตอร์ที่ความเร็ว 500 rpm เฉลี่ย 2.06 เท่า และ 600 rpm เฉลี่ย 2.976 เท่า

สรุปทำนี้ จะบอกได้ว่าการควบคุมด้วย PID นั้นดีกว่าการควบคุมด้วย PI ทั้งในเรื่องของความเร็วการตอบสนอง เวลาที่แรงบิดคงที่ และ ค่าความคลาดเคลื่อนคงที่

เอกสารอ้างอิง

- [1] Åstrom, K and Hagglund, T (1994), **PID Controllers: theory, design and tuning**. 2nd edition .
- [2] Microchip Technology Incorporated 2003, Padmaraja Yedamale, “**Brushless DC motor fundamentals**”.
- [3] Brain R Copeland , **The Design of PID Controllers using Ziegler Nichols Tuning**, 2008
- [4] P.C. Sen. **Principles of Electric Machines and Power Electronics**. John Wiley & Sons,1997.
- [5] Siemens Training Education Program, STEP 2000 Series, “**Basic of DC drives and related products**”.

ประวัติผู้เขียน



นายณัฐจักร พิราวิชญ์ เกิดวันที่ 25 กันยายน 2538 จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษา โรงเรียนชุมแพศึกษา จบการศึกษาระดับปริญญาตรี หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สาขาวิศวกรรมพลังงานไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



นายโรจน์ลต์ อินทร์กัจจันท์ เกิดวันที่ 20 พฤษภาคม 2538 จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษา โรงเรียนวัดราชบพิธ จบการศึกษาระดับปริญญาตรี หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สาขาวิศวกรรมพลังงานไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



นายอดิเทพ ใจยา เกิดวันที่ 23 เมษายน 2539 จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษา โรงเรียนสารสาสน์วิเทศร่มเกล้า จบการศึกษาระดับปริญญาตรี หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สาขาวิศวกรรมพลังงานไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางการแปลงลาปลาซ

	$f(t)$	$F(s)$
1	<i>Unit Step</i>	1
2	<i>Unit Step 1(t)</i>	$\frac{1}{s}$
3	t	$\frac{1}{s^2}$
4	e^{-at}	$\frac{1}{s+a}$
5	$\sin \omega t$	$\frac{\omega}{s^2 + \omega^2}$
6	$\cos \omega t$	$\frac{s}{s^2 + \omega^2}$
7	t^n	$\frac{n!}{s^{n+1}}$

คุณสมบัติของการแปลงลาปลาซ

1	$\mathcal{L}[Af(t)] = AF(s)$
2	$\mathcal{L}[f_1(t) \pm f_2(t)] = F_1(s) \pm F_2(s)$
3	$\mathcal{L}_\pm \left[\frac{d}{dt} f(t) \right] = sF(s) - f(0\pm)$
4	$\mathcal{L}_\pm \left[\frac{d^2}{dt^2} f(t) \right] = s^2 F(s) - sf(0\pm) - f(0\pm)$
5	$\mathcal{L}_\pm \left[\int f(t) dt \right] = \frac{F(s)}{s} + \frac{1}{s} \left[\int f(t) dt \right]_{t=0\pm}$
6	$\mathcal{L} \left[\int_0^t f(t) dt \right] = \frac{F(s)}{s}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


IRF540, SiHF540

Vishay Siliconix

Power MOSFET

PRODUCT SUMMARY	
V_{DS} (V)	100
$R_{DS(on)}$ (Ω)	$V_{GS} = 10\text{ V}$ 0.077
Q_g (Max.) (nC)	72
Q_{gs} (nC)	11
Q_{gd} (nC)	32
Configuration	Single

FEATURES

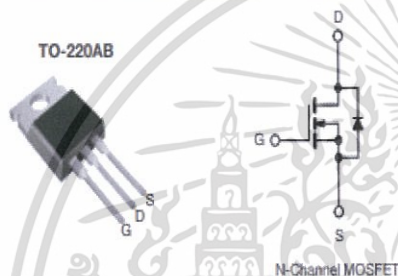
- Dynamic dV/dt Rating
- Repetitive Avalanche Rated
- 175 °C Operating Temperature
- Fast Switching
- Ease of Paralleling
- Simple Drive Requirements
- Compliant to RoHS Directive 2002/95/EC


 RoHS*
COMPLIANT

DESCRIPTION

Third generation Power MOSFETs from Vishay provide the designer with the best combination of fast switching, ruggedized device design, low on-resistance and cost-effectiveness.

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



ORDERING INFORMATION	
Package	TO-220AB
Lead (Pb)-free	IRF540PbF SiHF540-E3
SnPb	IRF540 SiHF540

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS ($T_C = 25\text{ }^\circ\text{C}$, unless otherwise noted)				
PARAMETER		SYMBOL	LIMIT	UNIT
Drain-Source Voltage		V_{DS}	100	V
Gate-Source Voltage		V_{GS}	± 20	
Continuous Drain Current	V_{GS} at 10 V	$T_C = 25\text{ }^\circ\text{C}$	28	A
			$T_C = 100\text{ }^\circ\text{C}$	
Pulsed Drain Current ^a		I_{DM}	110	
Linear Derating Factor			1.0	W/ $^\circ\text{C}$
Single Pulse Avalanche Energy ^b		E_{AS}	230	mJ
Repetitive Avalanche Current ^a		I_{AR}	28	A
Repetitive Avalanche Energy ^a		E_{AR}	15	mJ
Maximum Power Dissipation	$T_C = 25\text{ }^\circ\text{C}$	P_D	150	W
Peak Diode Recovery dV/dt ^c		dV/dt	5.5	V/ns
Operating Junction and Storage Temperature Range		T_J, T_{stg}	- 55 to + 175	$^\circ\text{C}$
Soldering Recommendations (Peak Temperature)	for 10 s		300 ^d	
Mounting Torque	6-32 or M3 screw		10	lbf · in
			1.1	N · m

Notes

- Repetitive rating; pulse width limited by maximum junction temperature (see fig. 11).
- $V_{DS} = 25\text{ V}$, starting $T_J = 25\text{ }^\circ\text{C}$, $L = 440\text{ }\mu\text{H}$, $R_{\theta} = 25\text{ }^\circ\text{C}$, $I_{AS} = 28\text{ A}$ (see fig. 12).
- $I_{SD} \leq 28\text{ A}$, $dI/dt \leq 170\text{ A}/\mu\text{s}$, $V_{DS} \leq V_{DS}$, $T_J \leq 175\text{ }^\circ\text{C}$.
- 1.6 mm from case.



* Pb containing terminations are not RoHS compliant, exemptions may apply

IRF540, SiHF540

Vishay Siliconix



THERMAL RESISTANCE RATINGS				
PARAMETER	SYMBOL	TYP.	MAX.	UNIT
Maximum Junction-to-Ambient	R_{thJA}	-	62	°C/W
Case-to-Sink, Flat, Greased Surface	R_{thCS}	0.50	-	
Maximum Junction-to-Case (Drain)	R_{thJC}	-	1.0	

SPECIFICATIONS ($T_J = 25\text{ }^\circ\text{C}$, unless otherwise noted)						
PARAMETER	SYMBOL	TEST CONDITIONS	MIN.	TYP.	MAX.	UNIT
Static						
Drain-Source Breakdown Voltage	V_{DS}	$V_{GS} = 0\text{ V}, I_D = 250\text{ }\mu\text{A}$	100	-	-	V
V_{DS} Temperature Coefficient	$\Delta V_{DS}/T_J$	Reference to $25\text{ }^\circ\text{C}$, $I_D = 1\text{ mA}$	-	0.13	-	$\text{V}/^\circ\text{C}$
Gate-Source Threshold Voltage	$V_{GS(th)}$	$V_{DS} = V_{GS}, I_D = 250\text{ }\mu\text{A}$	2.0	-	4.0	V
Gate-Source Leakage	I_{GSS}	$V_{GS} = \pm 20\text{ V}$	-	-	± 100	nA
Zero Gate Voltage Drain Current	I_{DSS}	$V_{DS} = 100\text{ V}, V_{GS} = 0\text{ V}$	-	-	25	μA
		$V_{DS} = 80\text{ V}, V_{GS} = 0\text{ V}, T_J = 150\text{ }^\circ\text{C}$	-	-	250	
Drain-Source On-State Resistance	$R_{DS(on)}$	$V_{GS} = 10\text{ V}, I_D = 17\text{ A}^b$	-	-	0.077	Ω
Forward Transconductance	g_{fs}	$V_{DS} = 50\text{ V}, I_D = 17\text{ A}^b$	8.7	-	-	S
Dynamic						
Input Capacitance	C_{iss}	$V_{GS} = 0\text{ V},$ $V_{DS} = 25\text{ V},$ $f = 1.0\text{ MHz, see fig. 5}$	-	1700	-	pF
Output Capacitance	C_{oss}		-	560	-	
Reverse Transfer Capacitance	C_{rss}		-	120	-	
Total Gate Charge	Q_g	$V_{GS} = 10\text{ V},$ $I_D = 17\text{ A}, V_{DS} = 80\text{ V},$ see fig. 6 and 13 ^a	-	-	72	nC
Gate-Source Charge	Q_{gs}		-	-	11	
Gate-Drain Charge	Q_{gd}		-	-	32	
Turn-On Delay Time	$t_{d(on)}$	$V_{DD} = 50\text{ V}, I_D = 17\text{ A},$ $R_g = 9.1\text{ }\Omega, R_D = 2.9\text{ }\Omega,$ see fig. 10 ^b	-	11	-	ns
Rise Time	t_r		-	44	-	
Turn-Off Delay Time	$t_{d(off)}$		-	53	-	
Fall Time	t_f		-	43	-	
Internal Drain Inductance	L_D	Between lead, 6 mm (0.25") from package and center of die contact 	-	4.5	-	nH
Internal Source Inductance	L_S		-	7.5	-	
Drain-Source Body Diode Characteristics						
Continuous Source-Drain Diode Current	I_S	MOSFET symbol showing the integral reverse p - n junction diode 	-	-	28	A
Pulsed Diode Forward Current ^a	I_{SM}		-	-	110	
Body Diode Voltage	V_{SD}	$T_J = 25\text{ }^\circ\text{C}, I_S = 28\text{ A}, V_{GS} = 0\text{ V}^b$	-	-	2.5	V
Body Diode Reverse Recovery Time	t_{rr}	$T_J = 25\text{ }^\circ\text{C}, I_F = 17\text{ A}, dI/dt = 100\text{ A}/\mu\text{s}^b$	-	180	360	ns
Body Diode Reverse Recovery Charge	Q_{rr}		-	1.3	2.8	μC
Forward Turn-On Time	t_{on}	Intrinsic turn-on time is negligible (turn-on is dominated by L_S and L_D)				

Notes

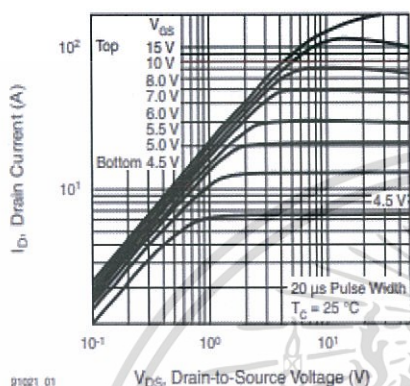
- a. Repetitive rating; pulse width limited by maximum junction temperature (see fig. 11).
b. Pulse width $\leq 300\text{ }\mu\text{s}$; duty cycle $\leq 2\%$.



IRF540, SiHF540

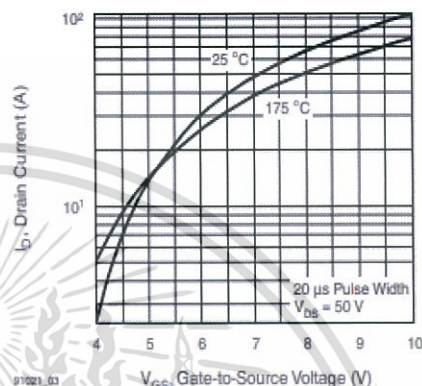
Vishay Siliconix

TYPICAL CHARACTERISTICS (25 °C, unless otherwise noted)



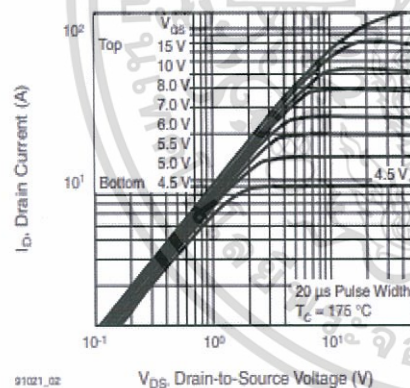
91021_01

Fig. 1 - Typical Output Characteristics, $T_C = 25\text{ }^\circ\text{C}$



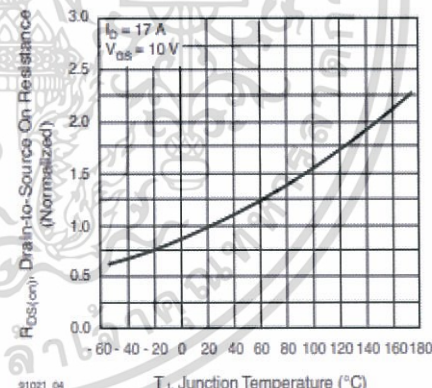
91021_03

Fig. 3 - Typical Transfer Characteristics



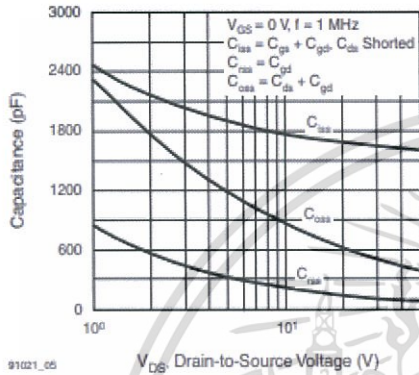
91021_02

Fig. 2 - Typical Output Characteristics, $T_C = 175\text{ }^\circ\text{C}$



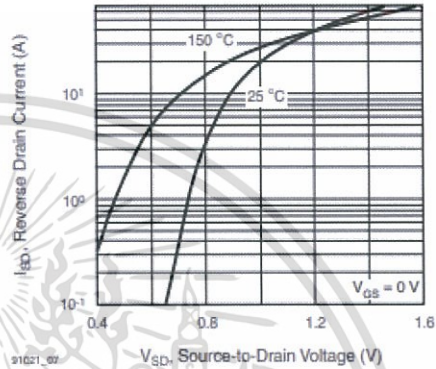
91021_04

Fig. 4 - Normalized On-Resistance vs. Temperature



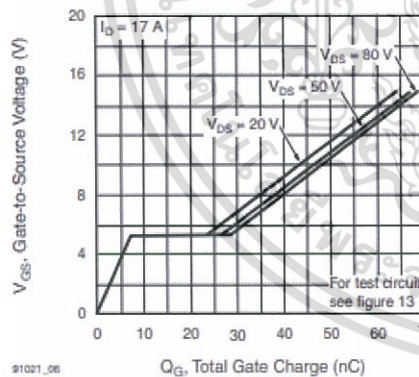
91021_05

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



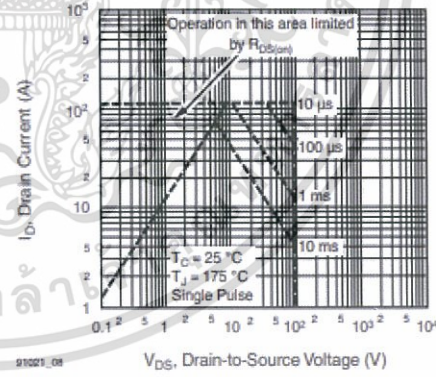
91021_07

Fig. 7 - Typical Source-Drain Diode Forward Voltage



91021_06

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



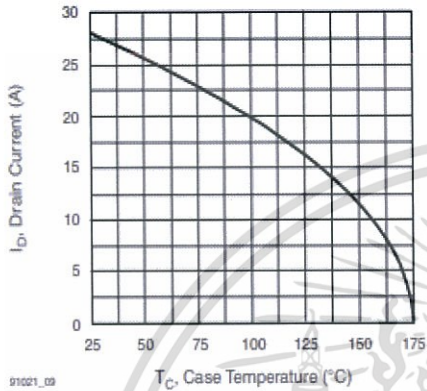
91021_08

Fig. 8 - Maximum Safe Operating Area



IRF540, SiHF540

Vishay Siliconix



91021_03

Fig. 9 - Maximum Drain Current vs. Case Temperature

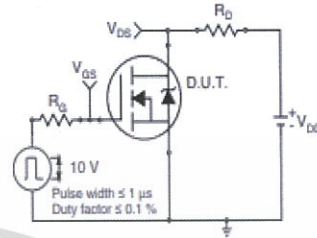


Fig. 10a - Switching Time Test Circuit

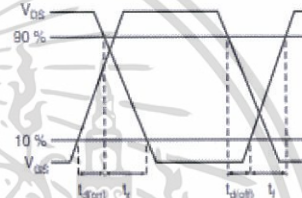
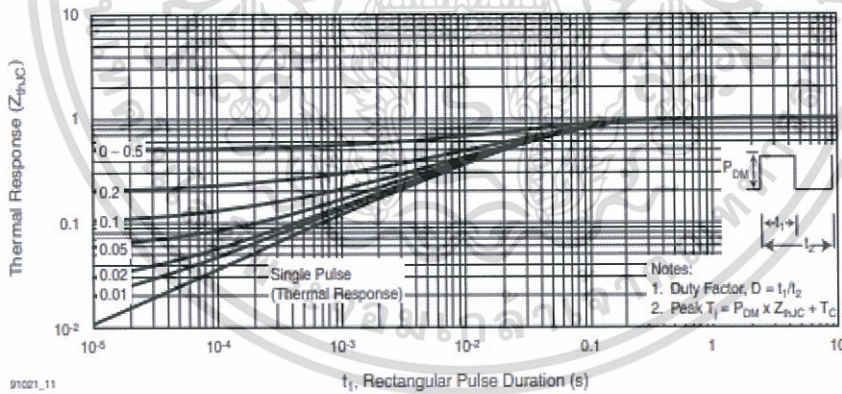


Fig. 10b - Switching Time Waveforms



91021_11

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

IRF540, SiHF540

Vishay Siliconix

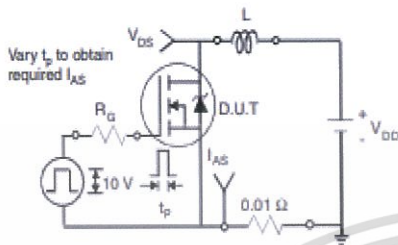


Fig. 12a - Unclamped Inductive Test Circuit

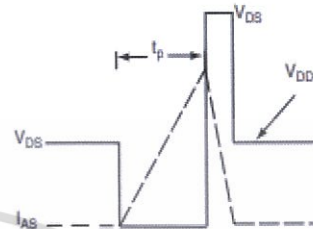


Fig. 12b - Unclamped Inductive Waveforms

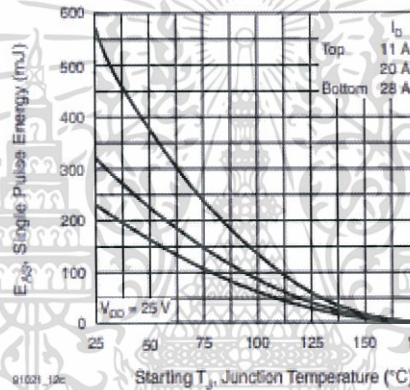


Fig. 12c - Maximum Avalanche Energy vs. Drain Current

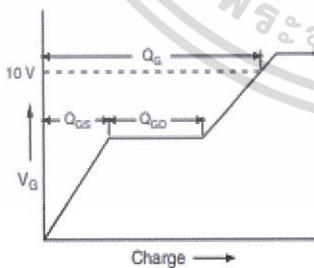


Fig. 13a - Basic Gate Charge Waveform

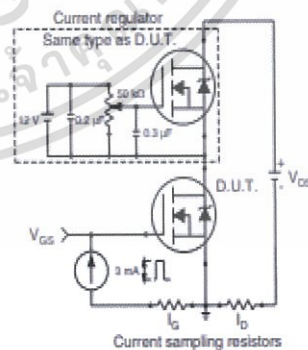


Fig. 13b - Gate Charge Test Circuit



IRF540, SiHF540

Vishay Siliconix

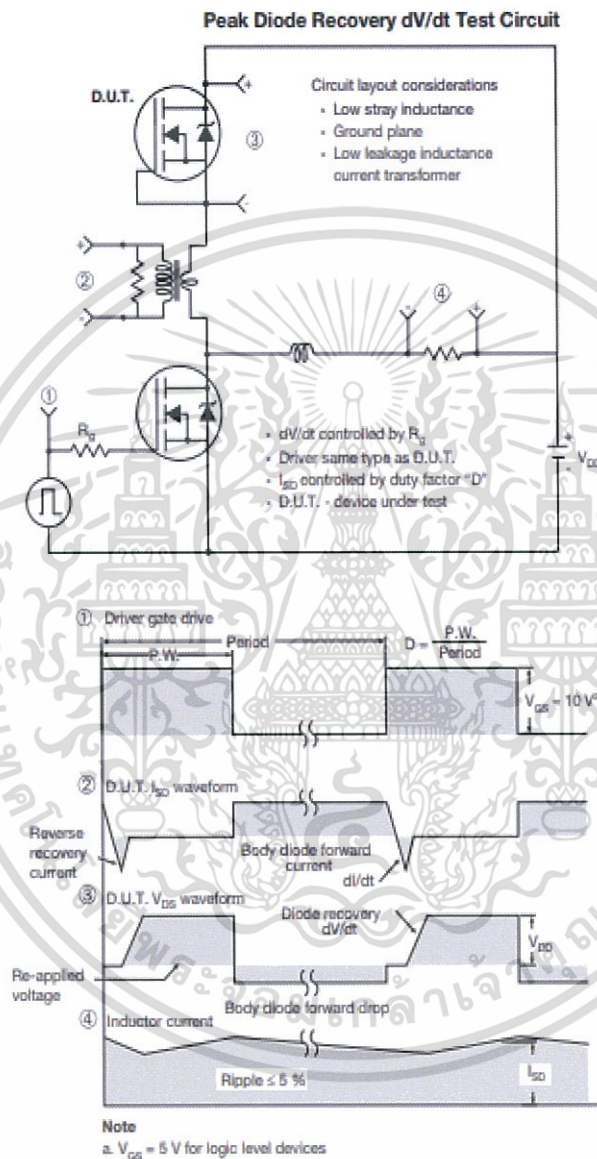


Fig. 14 - For N-Channel

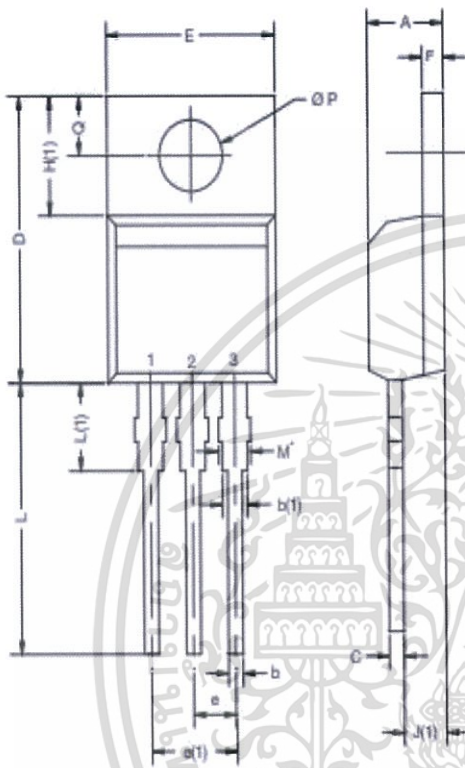
Vishay Siliconix maintains worldwide manufacturing capability. Products may be manufactured at one of several qualified locations. Reliability data for Silicon Technology and Package Reliability represent a composite of all qualified locations. For related documents such as package/tape drawings, part marking, and reliability data, see <http://www.vishay.com/doc291021>.


www.vishay.com

Package Information

Vishay Siliconix

TO-220-1



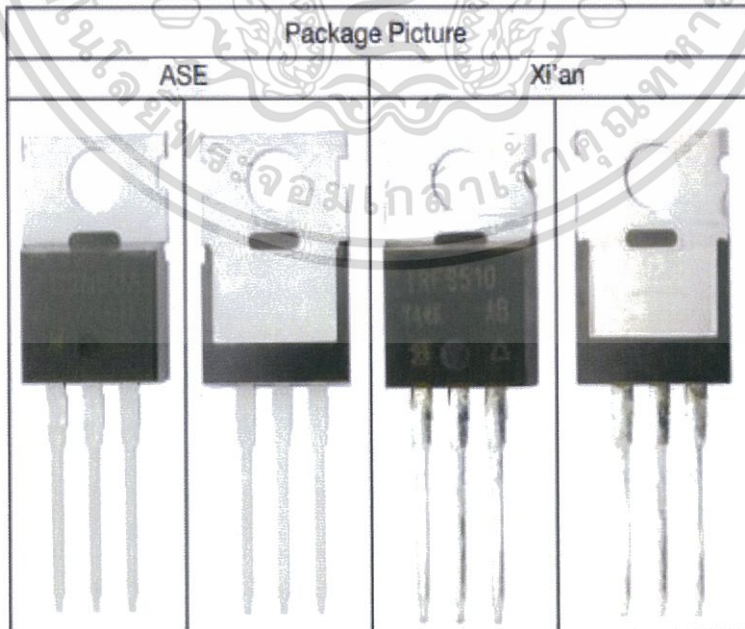
DIM.	MILLIMETERS		INCHES	
	MIN.	MAX.	MIN.	MAX.
A	4.24	4.65	0.167	0.183
b	0.69	1.02	0.027	0.040
b(1)	1.14	1.78	0.045	0.070
c	0.36	0.61	0.014	0.024
D	14.33	15.85	0.564	0.624
E	9.96	10.52	0.392	0.414
e	2.41	2.67	0.095	0.105
e(1)	4.88	5.28	0.192	0.208
F	1.14	1.40	0.045	0.055
H(1)	6.10	6.71	0.240	0.264
J(1)	2.41	2.92	0.095	0.115
L	13.38	14.40	0.526	0.567
L(1)	3.33	4.04	0.131	0.159
ØP	3.53	3.94	0.139	0.155
Q	2.54	3.00	0.100	0.118

 ECN: X15-0364-Rev. C, 14-Dec-15
 DWG: 6031

Note

- * M' = 0.052 inches to 0.064 inches (dimension including protrusion), heatsink hole for HVM

Package Picture



Revision: 14-Dec-15

1

Document Number: 66542

 For technical questions, contact: twm@vishay.com

 THIS DOCUMENT IS SUBJECT TO CHANGE WITHOUT NOTICE. THE PRODUCTS DESCRIBED HEREIN AND THIS DOCUMENT ARE SUBJECT TO SPECIFIC DISCLAIMERS, SET FORTH AT www.vishay.com/doc791009

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่... ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Disclaimer

ALL PRODUCT, PRODUCT SPECIFICATIONS AND DATA ARE SUBJECT TO CHANGE WITHOUT NOTICE TO IMPROVE RELIABILITY, FUNCTION OR DESIGN OR OTHERWISE.

Vishay Intertechnology, Inc., its affiliates, agents, and employees, and all persons acting on its or their behalf (collectively, "Vishay"), disclaim any and all liability for any errors, inaccuracies or incompleteness contained in any datasheet or in any other disclosure relating to any product.

Vishay makes no warranty, representation or guarantee regarding the suitability of the products for any particular purpose or the continuing production of any product. To the maximum extent permitted by applicable law, Vishay disclaims (i) any and all liability arising out of the application or use of any product, (ii) any and all liability, including without limitation special, consequential or incidental damages, and (iii) any and all implied warranties, including warranties of fitness for particular purpose, non-infringement and merchantability.

Statements regarding the suitability of products for certain types of applications are based on Vishay's knowledge of typical requirements that are often placed on Vishay products in generic applications. Such statements are not binding statements about the suitability of products for a particular application. It is the customer's responsibility to validate that a particular product with the properties described in the product specification is suitable for use in a particular application. Parameters provided in datasheets and / or specifications may vary in different applications and performance may vary over time. All operating parameters, including typical parameters, must be validated for each customer application by the customer's technical experts. Product specifications do not expand or otherwise modify Vishay's terms and conditions of purchase, including but not limited to the warranty expressed therein.

Except as expressly indicated in writing, Vishay products are not designed for use in medical, life-saving, or life-sustaining applications or for any other application in which the failure of the Vishay product could result in personal injury or death. Customers using or selling Vishay products not expressly indicated for use in such applications do so at their own risk. Please contact authorized Vishay personnel to obtain written terms and conditions regarding products designed for such applications.

No license, express or implied, by estoppel or otherwise, to any intellectual property rights is granted by this document or by any conduct of Vishay. Product names and markings noted herein may be trademarks of their respective owners.



ภาคผนวก ง

DATA SHEET IR2113

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

HIGH AND LOW SIDE DRIVER

Features

- Floating channel designed for bootstrap operation
Fully operational to +500V or +600V
Tolerant to negative transient voltage
dV/dt immune
- Gate drive supply range from 10 to 20V
- Undervoltage lockout for both channels
- 3.3V logic compatible
Separate logic supply range from 3.3V to 20V
Logic and power ground $\pm 5V$ offset
- CMOS Schmitt-triggered inputs with pull-down
- Cycle by cycle edge-triggered shutdown logic
- Matched propagation delay for both channels
- Outputs in phase with inputs

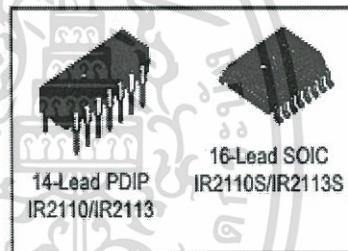
Product Summary

V_{OFFSET} (IR2110)	500V max.
(IR2113)	600V max.
$I_{O+/-}$	2A / 2A
V_{OUT}	10 - 20V
$t_{on/off}$ (typ.)	120 & 94 ns
Delay Matching (IR2110)	10 ns max.
(IR2113)	20ns max.

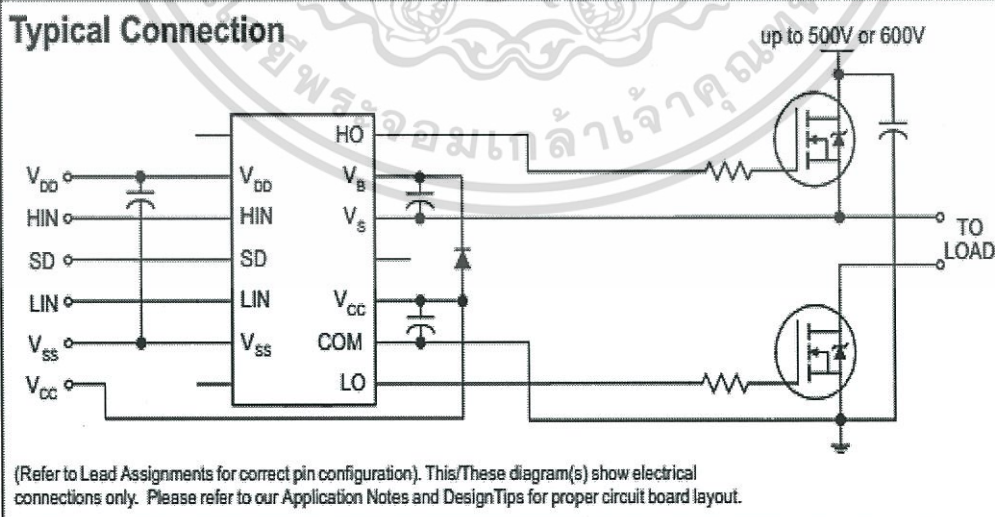
Description

The IR2110/IR2113 are high voltage, high speed power MOSFET and IGBT drivers with independent high and low side referenced output channels. Proprietary HVIC and latch immune CMOS technologies enable ruggedized monolithic construction. Logic inputs are compatible with standard CMOS or LSTTL output, down to 3.3V logic. The output drivers feature a high pulse current buffer stage designed for minimum driver cross-conduction. Propagation delays are matched to simplify use in high frequency applications. The floating channel can be used to drive an N-channel power MOSFET or IGBT in the high side configuration which operates up to 500 or 600 volts.

Packages



Typical Connection



IR2110(-1-2)(S)PbF/IR2113(-1-2)(S)PbF

International
IR Rectifier

Absolute Maximum Ratings

Absolute maximum ratings indicate sustained limits beyond which damage to the device may occur. All voltage parameters are absolute voltages referenced to COM. The thermal resistance and power dissipation ratings are measured under board mounted and still air conditions. Additional information is shown in Figures 28 through 35.

Symbol	Definition	Min.	Max.	Units
V _B	High side floating supply voltage (IR2110)	-0.3	525	V
	(IR2113)	-0.3	625	
V _S	High side floating supply offset voltage	V _B - 25	V _B + 0.3	
V _{HO}	High side floating output voltage	V _S - 0.3	V _B + 0.3	
V _{CC}	Low side fixed supply voltage	-0.3	25	
V _{LO}	Low side output voltage	-0.3	V _{CC} + 0.3	
V _{DD}	Logic supply voltage	-0.3	V _{SS} + 25	
V _{SS}	Logic supply offset voltage	V _{CC} - 25	V _{CC} + 0.3	
V _{IN}	Logic input voltage (HIN, LIN & SD)	V _{SS} - 0.3	V _{DD} + 0.3	
dV _S /dt	Allowable offset supply voltage transient (figure 2)	—	50	
P _D	Package power dissipation @ T _A ≤ +25°C (14 lead DIP)	—	1.6	W
	(16 lead SOIC)	—	1.25	
R _{THJA}	Thermal resistance, junction to ambient (14 lead DIP)	—	75	°C/W
	(16 lead SOIC)	—	100	
T _J	Junction temperature	—	150	°C
T _S	Storage temperature	-55	150	
T _L	Lead temperature (soldering, 10 seconds)	—	300	

Recommended Operating Conditions

The input/output logic timing diagram is shown in figure 1. For proper operation the device should be used within the recommended conditions. The V_S and V_{SS} offset ratings are tested with all supplies biased at 15V differential. Typical ratings at other bias conditions are shown in figures 36 and 37.

Symbol	Definition	Min.	Max.	Units
V _B	High side floating supply absolute voltage	V _S + 10	V _S + 20	V
V _S	High side floating supply offset voltage (IR2110)	Note 1	500	
	(IR2113)	Note 1	600	
V _{HO}	High side floating output voltage	V _S	V _B	
V _{CC}	Low side fixed supply voltage	10	20	
V _{LO}	Low side output voltage	0	V _{CC}	
V _{DD}	Logic supply voltage	V _{SS} + 3	V _{SS} + 20	
V _{SS}	Logic supply offset voltage	-5 (Note 2)	5	
V _{IN}	Logic input voltage (HIN, LIN & SD)	V _{SS}	V _{DD}	
T _A	Ambient temperature	-40	125	

Note 1: Logic operational for V_S of -4 to +500V. Logic state held for V_S of -4V to -V_{SS}. (Please refer to the Design Tip DT97-3 for more details).

Note 2: When V_{DD} < 5V, the minimum V_{SS} offset is limited to -V_{DD}.

Dynamic Electrical Characteristics

V_{BIAS} (V_{CC} , V_{BS} , V_{DD}) = 15V, C_L = 1000 pF, T_A = 25°C and V_{SS} = COM unless otherwise specified. The dynamic electrical characteristics are measured using the test circuit shown in Figure 3.

Symbol	Definition	Figure	Min.	Typ.	Max.	Units	Test Conditions
t_{on}	Turn-on propagation delay	7	—	120	150	ns	$V_S = 0V$
t_{off}	Turn-off propagation delay	8	—	94	125		$V_S = 500V/600V$
t_{sd}	Shutdown propagation delay	9	—	110	140		$V_S = 500V/600V$
t_r	Turn-on rise time	10	—	25	35		
t_f	Turn-off fall time	11	—	17	25		
MT	Delay matching, HS & LS turn-on/off	(IR2110) (IR2113)	— —	— —	10 20		

Static Electrical Characteristics

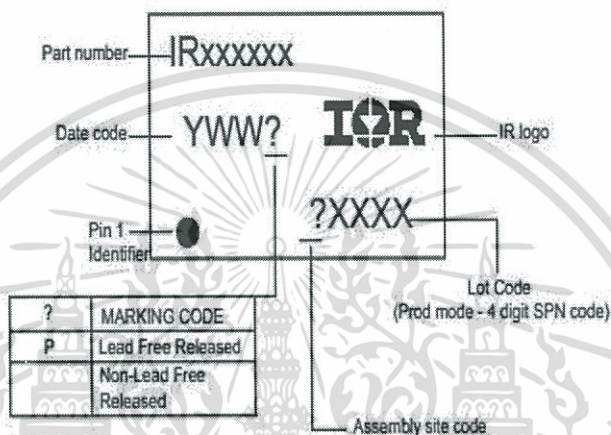
V_{BIAS} (V_{CC} , V_{BS} , V_{DD}) = 15V, T_A = 25°C and V_{SS} = COM unless otherwise specified. The V_{IH} , V_{TH} and I_{IN} parameters are referenced to V_{SS} and are applicable to all three logic input leads: HIN, LIN and SD. The V_O and I_O parameters are referenced to COM and are applicable to the respective output leads: HO or LO.

Symbol	Definition	Figure	Min.	Typ.	Max.	Units	Test Conditions
V_{IH}	Logic "1" input voltage	12	9.5	—	—	V	
V_{IL}	Logic "0" input voltage	13	—	—	6.0		
V_{OH}	High level output voltage, $V_{BIAS} - V_O$	14	—	—	1.2		$I_O = 0A$
V_{OL}	Low level output voltage, V_O	15	—	—	0.1		$I_O = 0A$
I_{LK}	Offset supply leakage current	16	—	—	50	μA	$V_B = V_S = 500V/600V$
I_{QBS}	Quiescent V_{BS} supply current	17	—	125	230		$V_{IN} = 0V$ or V_{DD}
I_{QCC}	Quiescent V_{CC} supply current	18	—	180	340		$V_{IN} = 0V$ or V_{DD}
I_{QDD}	Quiescent V_{DD} supply current	19	—	15	30		$V_{IN} = 0V$ or V_{DD}
I_{IN+}	Logic "1" input bias current	20	—	20	40		$V_{IN} = V_{DD}$
I_{IN-}	Logic "0" input bias current	21	—	—	1.0		$V_{IN} = 0V$
V_{BSUV+}	V_{BS} supply undervoltage positive going threshold	22	7.5	8.6	9.7	V	
V_{BSUV-}	V_{BS} supply undervoltage negative going threshold	23	7.0	8.2	9.4		
V_{CCUV+}	V_{CC} supply undervoltage positive going threshold	24	7.4	8.5	9.6		
V_{CCUV-}	V_{CC} supply undervoltage negative going threshold	25	7.0	8.2	9.4		
I_{O+}	Output high short circuit pulsed current	26	2.0	2.5	—	A	$V_O = 0V$, $V_{IN} = V_{DD}$ $PW \leq 10 \mu s$
I_{O-}	Output low short circuit pulsed current	27	2.0	2.5	—		$V_O = 15V$, $V_{IN} = 0V$ $PW \leq 10 \mu s$

IR2110(-1-2)(S)PbF/IR2113(-1-2)(S)PbF

International
IR Rectifier

LEADFREE PART MARKING INFORMATION



ORDER INFORMATION

Part only available Lead Free

- 14-Lead PDIP IR2110 order IR2110PbF
- 14-Lead PDIP IR2110-1 order IR2110-1PbF
- 14-Lead PDIP IR2110-2 order IR2110-2PbF
- 14-Lead PDIP IR2113 order IR2113PbF
- 14-Lead PDIP IR2113-1 order IR2113-1PbF
- 14-Lead PDIP IR2113-2 order IR2113-2PbF
- 16-Lead SOIC IR2110S order IR2110SPbF
- 16-Lead SOIC IR2113S order IR2113SPbF

International
IR Rectifier

IR WORLD HEADQUARTERS: 233 Kansas St., El Segundo, California 90245 Tel: (310) 252-7105

This product has been qualified per Industrial level

Data and specifications subject to change without notice 3/23/2005

www.irf.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

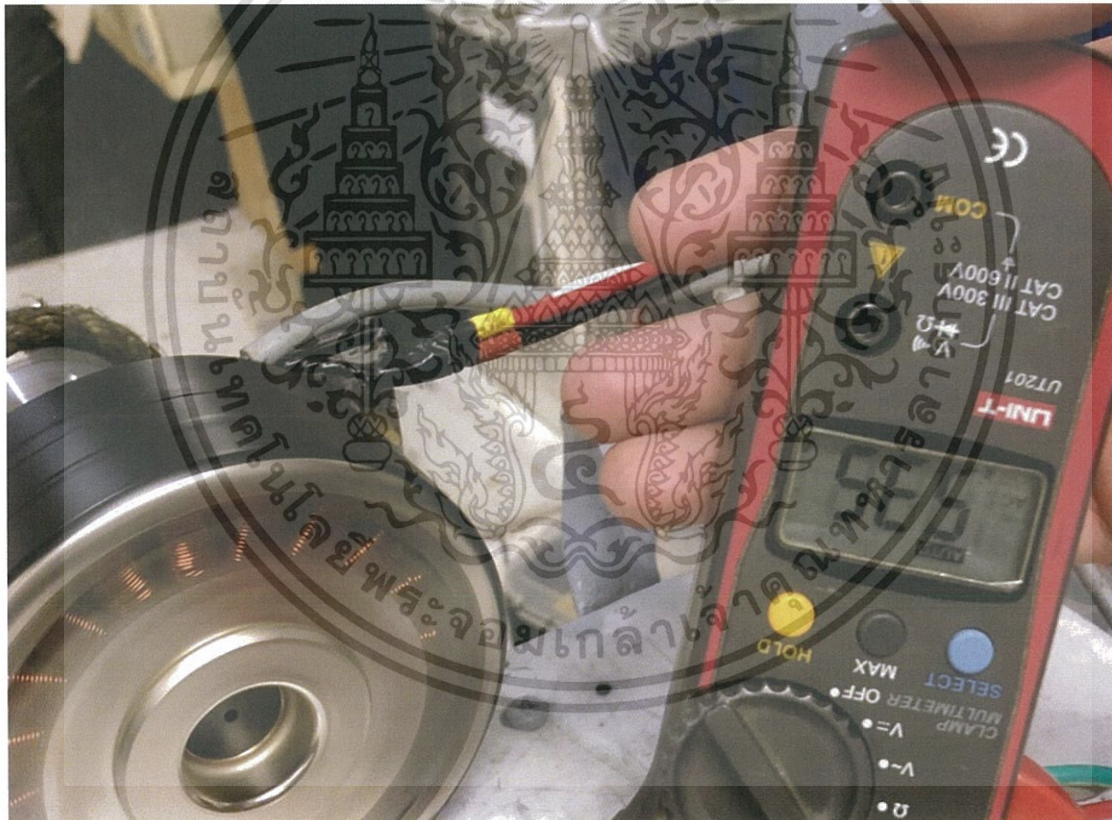


ภาคผนวก จ
ภาพประกอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



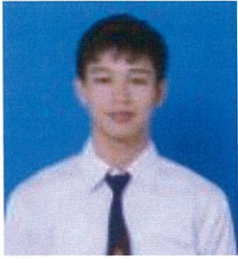
วัดความเร็วรอบมอเตอร์และแรงดันขาออกในสาย ที่ความเร็ว 400 rpm



วัดกระแสขาออกในสาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน



ชื่อ นายณัฐจักร์ พีราวิศิษฐ์

เกิดเมื่อวันที่ 25 กันยายน 2538

ที่อยู่ 122 หมู่ 13 ตำบลหนองไผ่ อำเภอชุมแพ จังหวัดขอนแก่น 40130

ประวัติการศึกษา

ปีการศึกษา 2556

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนชุมแพศึกษา

ปีการศึกษา 2560

สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมพลังงานไฟฟ้า

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ฝึกงานภาคฤดูร้อน

บริษัท เวิลด์เอนเนอจี้กรุ๊ป จำกัด ตำแหน่ง วิศวกรทั่วไป ระหว่างวันที่ 1

มิถุนายน 2560 ถึงวันที่ 28 กรกฎาคม 2560



ชื่อ นายโรจน์สัท อินทร์กำบังจันทร์

เกิดเมื่อวันที่ 20 พฤษภาคม 2538

ที่อยู่ 10/206 ซ.เสียบคลองผิงเหนือ 20/3 แขวงหนองแขม เขตหนองแขม กรุงเทพฯ 10160

ประวัติการศึกษา

ปีการศึกษา 2556

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนวัดราชบพิธ

ปีการศึกษา 2560

สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมพลังงานไฟฟ้า

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ฝึกงานภาคฤดูร้อน

บมจ. โปรเจกแพลนนิ่ง เซอร์วิส จำกัด (มหาชน) ตำแหน่ง วิศวกรสนาม

ตรวจสอบงานติดตั้งระบบไฟฟ้าในอาคาร โครงการ Magnolias

Waterfront Residences ไอคอนสยาม ซี 1 ระหว่างวันที่ 1 มิถุนายน

2560 ถึงวันที่ 28 กรกฎาคม 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ชื่อ นายอติเทพ ใจยา

เกิดเมื่อวันที่ 23 เมษายน 2539

ที่อยู่ 99/504 หมู่บ้านชลลดา หมู่ 1 ถ.ลาดกระบัง 54 ต.ศิระชะระเข้ น้อย

อ.บางเสาธง จ.สมุทรปราการ 10570

ประวัติการศึกษา

ปีการศึกษา 2556

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนสารสาสน์วิเทศ
ร่มเกล้า

ปีการศึกษา 2560

สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมพลังงานไฟฟ้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ฝึกงานภาคฤดูร้อน

ที่ บมจ.ทีโอที จำกัด (มหาชน) ฝ่าย ปฏิบัติการซ่อมบำรุงรักษา
เครื่องปรับอากาศ ระหว่างวันที่ 1 มิถุนายน 2560 ถึงวันที่ 28 กรกฎาคม
2560



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้