

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

รถจักรยานไฟฟ้า

ELECTRIC BIKE



นายกิตติศักดิ์

หาญผัดแก้ว

นางสาวชนิตา

อินทวิเศษ

นายณัฐพงษ์

ทาปลัด

ว/พ.
ก 6753
2549

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 71949
วัน,เดือน,ปี..... 6 ส.ย. 2550

๒ 11๖ ๒๐๓๘๓

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม

ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ELECTRIC BIKE



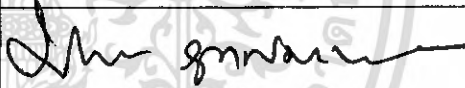

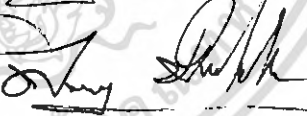
A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN INSTRUMENTATION ENGINEERING
DEPARTMENT OF INSTRUMENTATION ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2006

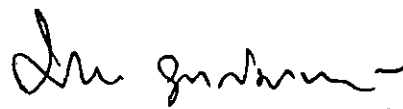
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองปริญญาโท

หัวข้อปริญญาโท รถจักรยาน ไฟฟ้า
ELECTRIC BIKE
นักศึกษาจัดทำ นายกิตติศักดิ์ หาญผักแว่น รหัสนักศึกษา 46012073
นางสาวชนิตา อินทรวิเศษ รหัสนักศึกษา 46012079
นาย ฌ์ฐพันธ์ ทาปลัด รหัสนักศึกษา 46012090
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมการวัดคุม
ปีการศึกษา 2549

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาโท	ลายมือชื่อ
รศ. ประภาพร อุดคกิมพันธ์	
รศ. ไสว พงศ์สวัสดิ์	
ผศ. พิทยา ปานนิล	

ภาควิชารับรองแล้ว



(รศ. ประภาพร อุดคกิมพันธ์)

หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์	รถจักรยานไฟฟ้า ELECTRIC BIKE		
นักศึกษาผู้จัดทำ	นายกิตติศักดิ์	หาญศึกแว่น	รหัสนักศึกษา 46012073
	นางสาวชนิตา	อินทวิเศษ	รหัสนักศึกษา 46012079
	นาย ณัฐพนธ์	ทาปลัด	รหัสนักศึกษา 46012090
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ประภาส	อุคคกิมพันธ์	
	รศ.ไสว	พงศ์สวัสดิ์	
	ผศ.พิทยา	ปานนิล	
ปีการศึกษา	2549		

บทคัดย่อ

โครงการนี้ได้ศึกษาถึงหลักการการทำงานของดิซิมอเตอร์แบบไม่ใช้แปรงถ่าน โดยอาศัยหลักการของตัวฮอลล์เซ็นเซอร์มาเป็นตัวบอกให้แหล่งจ่ายไฟจ่ายกระแสให้สเตเตอร์ตามจังหวะที่กำหนดหรือมาควบคุมการทำงานของดิซิมอเตอร์แบบไม่ใช้แปรงถ่านนั่นเอง โครงการนี้ได้นำมอเตอร์มาช่วยในการชดเชยแรงเสียดทานจากภายนอกที่มากระทำขณะปั่นจักรยาน ซึ่งจะช่วยให้สามารถปั่นจักรยาน โดยแรงที่ออกนั้นให้กับการปั่นเท่านั้นไม่ต้องสูญเสียให้กับแรงเสียดทานเสมือนกับการปั่นโดยไร้แรงเสียดทาน

Thesis Title	Electric Bike	
Authors	Mr.Kittisak	Hanpakvan
	Miss.Chanita	Intarawiset
	Mr.Nattapon	Taparud
Thesis Advisor	Assoc.Prof. Prapart	Ukakimapurn
	Assoc.Prof. Sawai	Pongswatd
	Asst.Prof. Pittaya	Pannin
Year	2006	

ABSTRACT

This project is the study of Brushless DC Motor . By use Hall Effect Sensor is controller for Brushless DC Motor .This project also helps us to get to compensate friction from the riding of the bike. The outside friction during the riding of the bike will lose. You can riding the bike without friction.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงมาได้เพราะได้รับความเมตตาจาก รองศาสตราจารย์
ประภาส อุกคติกิมาพันธุ์ ที่ให้คำแนะนำแก่ผู้วิจัยตลอดมาอีกทั้งยังเอื้อเฟื้ออุปกรณ์และเครื่องมือใน
การทำปริญญาานิพนธ์นี้ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณ คุณ เจตติยะ ศรีพิทักษ์ ที่คอยให้คำปรึกษา ทางด้าน Hard ware และ Soft ware
อย่างเต็มกำลัง

ขอขอบพระคุณอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุมทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้
กับผู้จัดทำ

ขอขอบคุณหอสมุดกลาง ที่เป็นแหล่งค้นคว้าข้อมูลและเป็นสถานที่ใช้ในการทำงานวิจัย
และที่สืมเสียมได้ก็คือ ขอกราบขอบพระคุณคุณพ่อคุณ แม่ อันเป็นที่รักยิ่ง ที่สนับสนุนและ
เป็นแรงบันดาลใจในการทำปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

คณะผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญรูป.....	VII
สารบัญตาราง.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญของปริญญาโท.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญาโท.....	1
1.3 ขอบเขตของปริญญาโท.....	1
1.4 ขั้นตอนการศึกษา.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับจักรยาน.....	3
2.2 หลักการของดีซีมอเตอร์.....	3
2.2.1 ตัวคอนโทรลเลอร์.....	4
2.2.2 วงจรไดรเวอร์.....	4
2.2.3 ฟีดแบ็คทรานสดิวเซอร์หรือเอนโคเดอร์.....	4
2.2.4 ดีซีมอเตอร์และโหลด.....	4
2.3 ลักษณะการควบคุมของระบบดีซีมอเตอร์.....	4
2.3.1 ระบบอนาลอกคอนโทรล.....	5
2.4 หลักการทำงานของดีซีมอเตอร์.....	6
2.5 โมเดลคณิตศาสตร์ของดีซีมอเตอร์.....	6
2.5.1 โมเดลอิเล็กทรอนิกส์โทรแมคคานิกส์.....	7
2.6 ทรานสเฟอร์ฟังก์ชันของดีซีมอเตอร์.....	10
2.7 ระบบเกียร์.....	12
2.8 ระบบสายพานและคานงัด.....	16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.9 เซ็นเซอร์และเอนโคเดอร์ในระบบการควบคุมมอเตอร์.....	16
2.9.1 โปเทนทิโอมิเตอร์.....	16
2.10 ลิเนียร์เพาเวอร์แอมพลิไฟ.....	19
2.10.1 ไบไดเรกชันแนลเซอร์โวแอมพลิไฟ.....	20
2.11 การควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	22
2.12 ตัวรับรู้ฮอลล์ (Linear Hall sensor).....	23
2.13 ปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall Effect).....	25
2.14 ฮอลล์ดีไวซ์ (Hall devices).....	28
2.14.1 ปรากฏการณ์กัลป์วานอร์แมกเนติก.....	28
2.14.2 แฟกเตอร์ G (Geometry Factor).....	32
2.14.3 ออฟเซ็ท.....	34
2.14.4 ความเป็นเชิงเส้น.....	35
2.14.5 ความไว.....	35
2.15 มอเตอร์ชนิดไม่ใช้แปรงถ่าน (Brushless DC Motor).....	35
2.16 อัตราทด.....	37
2.17 แรงเสียดทาน.....	37
2.17.1 ความต้องการการเคลื่อนที่ของรถ (Automotive Resistance).....	37
2.17.2 ความต้านทานเนื่องจากอากาศ (Air Resistance).....	37
2.17.3 ความต้านทานเนื่องจากการหมุน (Rolling Resistance).....	38
2.17.3.1 ความต้านทานของการกระทบ (Impact Resistance).....	38
2.17.3.2 ความต้านทานที่ผิวถนน (Surface Resistance).....	38
2.17.3.3 ความต้านทานภายในตัวรถ (Internal Resistance).....	38
บทที่ 3 หลักการในการออกแบบ.....	39
3.1 กล่าวนำ.....	39
3.2 ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ของจักรยานไฟฟ้า.....	39
3.3 ชุดขับเคลื่อน.....	40
3.3.1 ทอร์กเซนเซอร์ (Torque sensor).....	41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3.1.1 ค่ามุมเริ่มต้นของ Potentiometer.....	42
3.3.1.2 Torque เริ่มต้นที่ทำให้ Potentiometer เริ่มเคลื่อนที่.....	42
3.3.1.3 ค่า Friction เริ่มต้นที่ทำให้มอเตอร์ทำงาน.....	43
3.4 การบอกเปอร์เซ็นต์การทำงานของมอเตอร์.....	44
3.5 ชิ้นส่วนทั้งหมด.....	45
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง.....	48
4.1 กล่าวนำ.....	48
4.2 การทดลองวัดระดับแรงดัน.....	48
4.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	48
4.2.2 ขั้นตอนการทดลอง.....	48
4.2.3 ผลการทดลอง.....	48
4.2.4 สรุปผลการทดลอง.....	49
4.3 การทดลองวัดระดับการทำงานของมอเตอร์.....	49
4.3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	49
4.3.2 ขั้นตอนการทดลอง.....	49
4.3.3 ผลการทดลอง.....	49
4.3.4 สรุปผลการทดลอง.....	50
4.4 ข้อมูลจำเพาะของจักรยานไฟฟ้า.....	51
บทที่ 5 สรุป.....	52
5.1 สรุป.....	52
5.2 ปัญหาที่พบ.....	52
5.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา.....	53
บรรณานุกรม.....	54
ภาคผนวก.....	55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ระบบการคอนโทรลดีซีมอเตอร์แบบพื้นฐาน.....	3
2.2 บล็อกไดอะแกรมของระบบบังคับความเร็วที่มีทาโคมิเตอร์เป็นตัวป้อนกลับ.....	5
2.3 บล็อกไดอะแกรมของระบบการบังคับตำแหน่ง.....	5
2.4 โมเดลคณิตศาสตร์ของดีซีมอเตอร์.....	7
2.5 โมเดลของดีซีมอเตอร์แบบฟิลด์แยกกระตุ้น.....	7
2.6 แสดงถึงแรงบิดต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นต่อโหลดของมอเตอร์.....	8
2.7 บล็อกไดอะแกรมของดีซีมอเตอร์โมเดล.....	10
2.8 ระบบการคัพปลิงของเกียร์.....	13
2.9 ระบบการคัพปลิงเกียร์ที่มีแรงเฉื่อย.....	14
2.10 ระบบสายพาน.....	16
2.11 โรตารีโปเทนทิโอมิเตอร์แบบเพลาหมุนได้ 10 รอบ.....	17
2.12 โครงสร้างภายในของโปเทนทิโอมิเตอร์แบบเพลาหมุนได้รอบเดียว.....	17
2.13 แสดงถึงวงจรของโปเทนทิโอมิเตอร์แบบลิเนียร์.....	18
2.14 บล็อกไดอะแกรมที่ใช้งานวงจรของโปเทนทิโอมิเตอร์.....	19
2.15 ไบโคเร็กซ์ชนแนลเซอร์ไวแอนมพลิไฟแสดงการบังคับได้เต็มที่ทั้งสี่ควอดรันต์.....	21
2.16 ภาคเอาต์พุทของลิเนียร์ไบโพลาร์.....	21
2.17 ภาคเอาต์พุทของลิเนียร์บริดจ์.....	21
2.18 ระบบการบังคับความเร็วแบบปิดลูป.....	23
2.19 ตัวรับรู้ฮอลล์.....	23
2.20 การต่อตัวรับรู้ฮอลล์กับแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงและโวลต์มิเตอร์.....	24
2.21 การวัดความเข้มของสนามแม่เหล็ก.....	24
2.22 แสดงการเกิดปรากฏการณ์ฮอลล์.....	25
2.23 การวัดความต่างศักย์ฮอลล์ V_H	26
2.24 แสดงแรงดันฮอลล์ ระหว่าง ขั้ว 1 กับ 2 และทิศทางของกระแส.....	31
2.25 แสดงรูปร่าง Hall plate รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า.....	33
2.26 แสดงส่วนประกอบของดีซีมอเตอร์แบบไม่ใช้แปรงถ่าน.....	36
2.27 แสดงการวางตำแหน่งของฮอลล์เซนเซอร์.....	36
2.28 แสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของแกนโรเตอร์.....	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.1 แสดงส่วนประกอบของจักรยาน.....	39
3.2 แสดงถึงบล็อกไดอะแกรมการทำงานของจักรยาน.....	40
3.3 แสดงถึงส่วนประกอบที่สำคัญของชุดขับเคลื่อน.....	40
3.4 กลไกการขับเคลื่อนขณะรถยังไม่ได้เคลื่อนที่.....	41
3.5 กลไกการขับเคลื่อนขณะที่รถเคลื่อนที่.....	41
3.6 ชิ้นส่วนด้านหน้าเฟืองที่ต่อกับมอเตอร์.....	44
3.7 ชิ้นส่วนด้านนอกของเฟืองที่ต่อกับมอเตอร์.....	44
3.8 กล้องสัญญาณไฟแสดงสถานะการทำงานของมอเตอร์.....	44
3.9 ชุดทอร์กเซนเซอร์.....	45
3.10 การติดตั้งฮอลล์เซนเซอร์เข้ากับชุดขับเคลื่อน.....	45
3.11 ชิ้นส่วนด้านหน้าเฟืองที่ต่อกับมอเตอร์.....	46
3.12 แบตเตอรี่ที่ใช้กับจักรยาน.....	46
3.13 จักรยานขณะยังไม่ติดตั้งอุปกรณ์.....	47
3.14 จักรยานเมื่อประกอบอุปกรณ์ครบแล้ว.....	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงค่าของสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน.....	38
4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่ของ Potentiometer กับการจ่ายแรงดันไฟฟ้า.....	48
4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหลอดไฟแสดงผลกับการทำงานของมอเตอร์.....	50
4.3 แสดงข้อมูลจำเพาะของจักรยานไฟฟ้า.....	51



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของปริญญานิพนธ์

ในปัจจุบันผู้คนได้หันมาออกกำลังกายกันมากขึ้น และจักรยานถือว่าเป็นหนึ่งในตัวเลือกที่ไม่ว่าบุคคลระดับไหนก็สามารถปั่นได้ จักรยานเป็นอุปกรณ์ที่ต้องใช้แรงมากพอสมควรในการใช้ให้ขับเคลื่อนและรักษาระดับความเร็ว ทางผู้วิจัยจึงคิดว่าน่าจะมีอุปกรณ์ที่จะช่วยผ่อนแรงช่วยเราได้ จากการศึกษาดังกล่าวถึงหลักการการทำงานของมอเตอร์พบว่ามีความสอดคล้องกับความต้องการของผู้วิจัย

ดังนั้นจึงได้คิดที่นำเอามอเตอร์มาช่วยผ่อนแรง โดยให้มอเตอร์ทำหน้าที่ชดเชยแรงให้กับเรา โดยที่ชดเชยแรงที่ต้องเสียไปให้กับแรงเสียดทานจากภายนอก เช่น จากลม เนินสูง สะพาน ผิวดินที่ขรุขระ และแรงเสียดทานที่เกิดจากภายในตัวรถ เช่น จากตลับลูกปืน เพลา แกนล้อ เป็นต้น

ผู้วิจัยได้พยายามพัฒนาจักรยานให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น เพื่อที่จะให้ผู้ปั่นรู้สึกว่าการปั่นจักรยานเป็นเรื่องไม่ยากอีกต่อไป การชดเชยแรงนี้จะช่วยทำให้ผู้ปั่นไม่ต้องออกแรงเพิ่มให้กับแรงเสียดทานต่าง ๆ และปั่นด้วยแรงที่สม่ำเสมอตลอดระยะทาง และมีจอแสดงผลให้ทราบถึงสถานะของมอเตอร์ว่าตอนนี้มอเตอร์ชดเชยแรงให้กับผู้ปั่นคิดเป็นกี่เปอร์เซ็นต์ และยังช่วยส่งเสริมให้คนหันมาออกกำลังกายมากขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญานิพนธ์

เพื่อศึกษาดังหลักการการทำงานของดีซีมอเตอร์ชนิดแบบไม่ใช้แปรงถ่าน การนำเอาฮอลล์เอฟเฟ็กต์(Hall Effect) เซนเซอร์มาร่วมใช้งานกับดีซีมอเตอร์ การศึกษาดังตัวเซนเซอร์แบบต่างๆ และสามารถนำเซนเซอร์มาประยุกต์ใช้งานได้อย่างถูกต้อง การเขียน โปรแกรมควบคุมการทำงานของตัวรถจักรยาน

1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้จะกล่าวถึงการพัฒนาออกแบบ และการเลือกเอาเซนเซอร์มาประยุกต์ใช้กับงานได้ถูกต้อง รถจักรยานไฟฟ้าได้นำเอาทฤษฎีเกี่ยวกับดีซีมอเตอร์มาใช้ และออกแบบวงจรที่ใช้แสดงผลของทั้งระยะทางการเคลื่อนที่และระดับแรงดัน ในการออกแบบโปรแกรม เพื่อควบคุมการทำงานของตัวรถจักรยาน และการประยุกต์ใช้เซนเซอร์กับรถจักรยาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ขั้นตอนการศึกษา

การทำโครงการวิจัยในปริญญาโทฉบับนี้มีขั้นตอนการศึกษาเริ่มต้น จากการศึกษาเกี่ยวกับทฤษฎีพื้นฐานของคีมอเตอร์ การพัฒนาคีมอเตอร์มาเป็นแบบไม่ใช้แปรงถ่าน (Brushless DC Motor) ศึกษาเซนเซอร์(Hall Effect Sensor)ที่ใช้ร่วมกับมอเตอร์ ปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall Effect) โปเทนทิโอมิเตอร์ ศึกษาการเขียนโปรแกรมภาษาซี ซึ่งเป็นตัวควบคุมการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ ศึกษาวงจรที่ใช้ควบคุมความเร็วของมอเตอร์ ในขั้นแรกเราต้องทำการศึกษากฎการทำงานของมอเตอร์ ความสัมพันธ์ของชิ้นส่วนว่ามีผลต่อกันอย่างไรเมื่อรู้แล้วจึงนำเอาความสัมพันธ์นั้นมาใช้ร่วมกับการประยุกต์ใช้งาน วางแผนและออกแบบชิ้นงานว่าจะให้เป็นอย่างไร แล้วก็ลองเอาไปทดลองในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ว่ามันเป็นอย่างไร จากนั้นจึงลงมือทำจริง ทดลองและเก็บผล สรุปผลงานถ้าผลงานไม่เป็นไปตามต้องการหาทางแก้ไขให้อยู่ในแผนที่ตั้งไว้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับจักรยาน

จักรยานทั่วไป ส่วนมากเป็นจักรยานไม่มีเกียร์ มักจะขายสำเร็จรูปพร้อมอุปกรณ์ประกอบ เช่น บังโคลน ไฟหน้า ขาค้าง บังโช่ อานซ้อนท้าย รวมไปถึงตะแกรงหน้า จักรยานทั่วไปแบบนี้ มีน้ำหนักมาก จึงต้องใช้แรงมาก แต่มีข้อดีคือ ราคาถูก (ประมาณ 1,500-3,000 บาท) และหาซื้อได้ทั่วไปรวมทั้งเมื่อซำรุดก็มีร้านซ่อมอยู่ทั่วไป

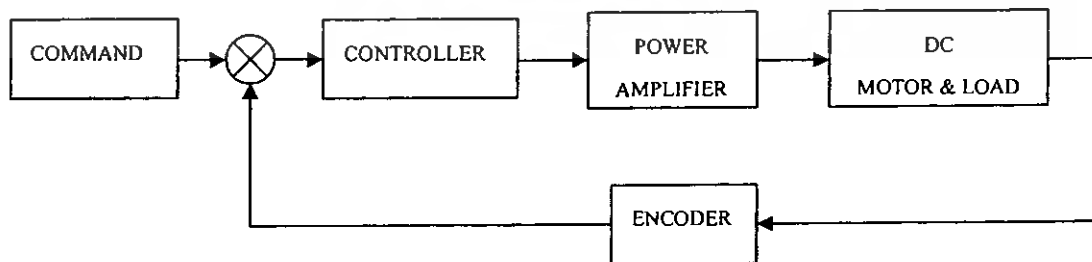
จักรยานมีเกียร์ จักรยานประเภทนี้ก็คือจักรยานทั่วไปที่นำมาพัฒนาให้เหมาะสมกับแต่ละกิจกรรมและปั่นให้เบาแรง โดยมีเกียร์ให้เลือกตั้งแต่ 5 ถึง 18 เกียร์ และลดน้ำหนักกรลง ราคาสูงกว่าจักรยานทั่วไป หาซื้อได้ในราคา 2,000-5,000 บาท

จักรยานไฟฟ้า มีรูปร่างไม่ต่างจากจักรยานทั่วไป เพียงแต่นำระบบไฟฟ้ามาประกอบรวมเพิ่มเข้าไปและขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ เมื่อแบตเตอรี่หมดสามารถใช้เท้าปั่นเป็นจักรยานธรรมดาได้ราคาจะค่อนข้างแพง เนื่องจากโครงสร้างที่สิ้นเปลืองเหล็กมากกว่า อีกทั้งต้องมีระบบขับเคลื่อนของจักรยานด้วย

2.2 หลักการของดีซีมอเตอร์

ส่วนประกอบพื้นฐานของระบบคอนโทรลดีซีมอเตอร์แสดงได้ในบล็อกไดอะแกรมรูปที่ 2.1 ซึ่งประกอบด้วยบล็อกที่สำคัญ 4 บล็อกคือ

1. ตัวคอนโทรลเลอร์
2. วงจรไดเรกเตอร์ หรือเพาเวอร์แอมพลิไฟ
3. ฟีดแบ็คทรานสดิวเซอร์ หรือเอนโคเดอร์
4. ดีซีมอเตอร์และโหลด



รูปที่ 2.1 ระบบการคอนโทรลดีซีมอเตอร์แบบพื้นฐาน

2.2.1 ตัวคอนโทรลเลอร์

ตัวคอนโทรลเลอร์เป็นส่วนที่ทำให้ระบบที่ทำให้เกิดสัญญาณคอนโทรลไปบังคับ ดี.ซี มอเตอร์และโหลด คอนโทรลเลอร์ที่ให้สัญญาณอนาลอกคอนโทรลเลอร์ ส่วนคอนโทรลเลอร์ที่ให้สัญญาณคอนโทรลเป็นสัญญาณดิจิทัลเราเรียกว่าดิจิทัลคอนโทรลเลอร์

2.2.2 วงจรไดรเวอร์

เป็นส่วนประกอบของระบบที่อยู่ระหว่างตัวคอนโทรลเลอร์กับดีซีมอเตอร์ แลโหลดมีหน้าที่ปรับรูปและขยายสัญญาณให้เหมาะสมก่อนที่จะป้อนเข้าไปขับดีซีมอเตอร์และโหลด วงจรไดรเวอร์ส่วนใหญ่ได้แก่ เพาเวอร์แอมพลิไฟซึ่งอาจแบ่งย่อยเป็น ลิเนียร์เพาเวอร์แอมพลิไฟ และพัลส์วิดท โมดูเลชันแอมพลิไฟ

2.2.3 ฟีดแบ็คทรานสดิวเซอร์หรือเอนโคเดอร์

เป็นสิ่งประดิษฐ์ที่ใช้รับรู้หรือตีเทตสัญญาณเอาท์พุทที่ต้องการ โดยไม่มีผลของการโหลดคิง (loading) สัญญาณที่ตีเทตได้นี้จะป้อนกลับไปเปรียบกับสัญญาณอ้างอิงทำให้ได้สัญญาณเออร์เรอร์ ฟีดแบ็คทรานสดิวเซอร์แบ่งออกได้เป็น 2 แบบคือ อนาลอกทรานสดิวเซอร์ คือสิ่งประดิษฐ์ใช้เปลี่ยนพลังงานรูปหนึ่งให้ เป็นสัญญาณอนาลอกได้แก่ ทาโคเจนเนอเรเตอร์ โปเทนทิโอมิเตอร์และจิงโคร เป็นต้น ส่วนฟีดแบ็คทรานสดิวเซอร์อีกแบบหนึ่งคือ ดิจิตอลทรานสดิวเซอร์ เป็นสิ่งประดิษฐ์ที่ใช้เปลี่ยนพลังงานรูปหนึ่งให้เป็นสัญญาณดิจิทัล ได้แก่ พว อินครีเมนทัลเอนโคเดอร์ ไชลเวอร์ แมกนิติกพิคอัพ เป็นต้น

2.2.4 ดีซีมอเตอร์และโหลด

คือระบบที่ถูกคอนโทรลหรือส่วนที่ออกแรงทำงานซึ่งจะเป็นเครื่องจักรกล (ดีซีมอเตอร์) หรืออะไรก็ตามที่ให้ตัวแปร ดีซีมอเตอร์ในที่นี้เป็นแบบแม่เหล็กถาวรที่มีคุณสมบัติการทำงานสูง มีอาร์เมเจอร์อินดักเต้นซ์และแรงเฉื่อยของโรเตอร์ต่ำ

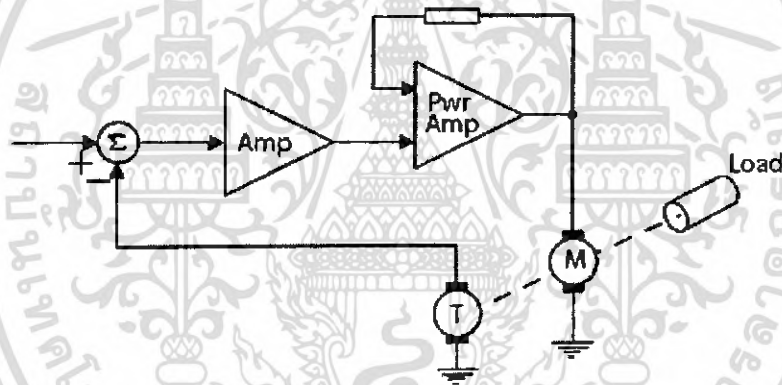
2.3 ลักษณะการควบคุมของระบบดีซีมอเตอร์

ระบบการคอนโทรลดีซีมอเตอร์สามารถที่จะจำแนกลักษณะการคอนโทรลได้เป็น 2 แบบ คือระบบอนาลอกคอนโทรลและระบบดิจิทัลคอนโทรล

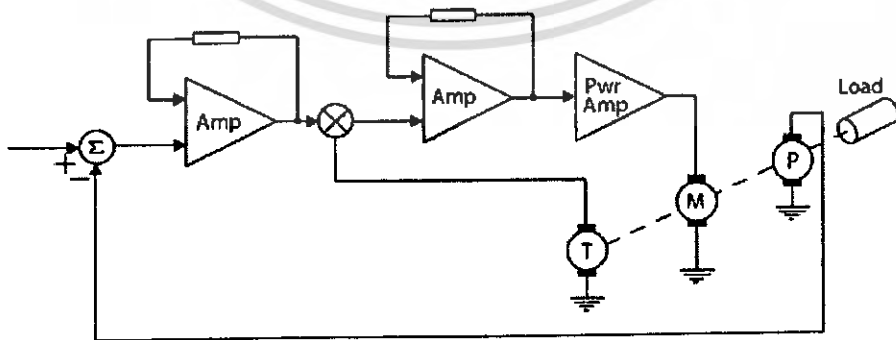
2.3.1 ระบบอนาลอกคอนโทรล

ในคอนโทรลลูปของระบบอนาลอกคอนโทรล เอาต์พุตของระบบจะถูกวัดค่าหรือดีทีเคค่าได้เป็นสัดส่วนกับสัญญาณจะถูกบังคับโดยพัลส์วิดท์โมดูเลชั่น 12 โวลท์ พัลส์วิดท์สามารถอินเคอเรฟกับไมโครคอมพิวเตอร์ได้ง่าย การคอนโทรลเป็นแบบ PI คอนโทรล ไฟฟ้าที่เป็นสัญญาณอนาลอก เช่นระบบที่มีการป้อนกลับด้วยทาโคมิเตอร์ รูปที่ 2.2 โวลท์เดจเอาต์พุตของทาโคมิเตอร์จะเป็นอนาลอกของความเร็วมอเตอร์ ในทำนองเดียวกันระบบการบังคับตำแหน่งดังรูปที่ 2.3 ไดนามิกวาริเอเบิล(การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของโหลด) จะเป็นสัดส่วนกับโวลท์เดจเอาต์พุตที่ได้จากโปเทนทิโอมิเตอร์ นั่นคือตำแหน่งเอาต์พุตของระบบอนาลอกของไดนามิกวาริเอเบิล

สรุปได้ว่าระบบอนาลอกคอนโทรลก็คือ คอนโทรลลูปที่มีพีดีแบ็คทรานสดิวเซอร์เป็นอนาลอกทรานสดิวเซอร์วัดค่าไดนามิกวาริเอเบิลออกเป็นสัญญาณอนาลอกป้อนกลับ ไปให้ยังตัวอนาลอกคอนโทรลเลอร์เพื่อคอนโทรลให้ได้คุณสมบัติการทำงานเป็นไปตามที่ต้องการ



รูปที่ 2.2 บล็อกไดอะแกรมของระบบบังคับความเร็วที่มีทาโคมิเตอร์เป็นตัวป้อนกลับ



รูปที่ 2.3 บล็อกไดอะแกรมของระบบการบังคับตำแหน่งที่มีทาโคมิเตอร์เป็นตัวเสริมเสถียรภาพให้ดีขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 หลักการทำงานของดีซีมอเตอร์

ดีซีมอเตอร์เป็นทรานสดิวเซอร์แรงบิดซึ่งมีการออกแบบให้มีคุณลักษณะพิเศษคือแรงบิดของเพลลาของดีซีมอเตอร์จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสอาร์เมเจอร์ แรงบิดของเพลลาของดีซีมอเตอร์จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสอาร์เมเจอร์ แรงบิดของเพลลาของดีซีมอเตอร์จะได้จากผลระหว่างสนามแม่เหล็กและขดลวดตัวนำ หลักการแสดงในรูปที่ 2.4 ในที่นี้กระแสที่ไหลในขดลวดตัวนำจะสร้างฟลักซ์ที่ประกอบด้วยเส้นแรงแม่เหล็ก ϕ และขดลวดตัวนำเหล่านั้นอยู่ห่างจากศูนย์กลางการหมุนเท่ากับ r ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดของเพลลาและกระแสเท่ากับ

$$T = K\phi I$$

เมื่อ T คือ แรงบิดของเพลลา มีหน่วยเป็นนิวตัน - เมตร

ϕ คือ เส้นแรงแม่เหล็ก มีหน่วยเป็นเวเบอร์

I คือ กระแสเป็นแอมแปร์

K คือ ค่าคงที่

ดังนั้นแรงบิดของเพลลาจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับผลคูณของเส้นแรงแม่เหล็กและกระแส เมื่อขดลวดตัวนำเคลื่อนที่ในสนามแม่เหล็กก็จะทำให้เกิดโวลต์เตจคคร่อมตัวมันเอง โวลต์เตจนี้จะเป็นสัดส่วนกับความเร็วของเพลลาของมอเตอร์และด้านกรไหลของกระแส ความสัมพันธ์ระหว่างโวลต์เตจย้อนกลับนี้และความเร็วของเพลลามอเตอร์คือ

$$E = K\phi\omega$$

เมื่อ E คือ โวลต์เตจย้อนกลับ emf มีหน่วยเป็นโวลต์

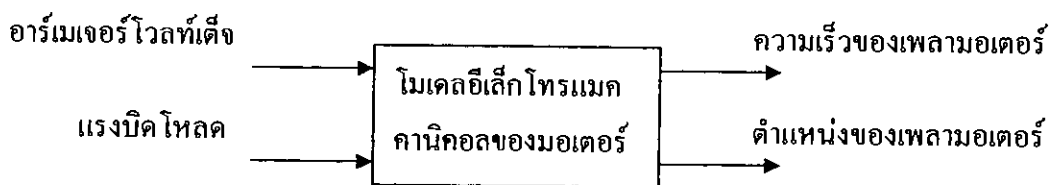
ϕ คือ เส้นแรงแม่เหล็ก มีหน่วยเป็นเวเบอร์

ω คือ ความเร็วของมอเตอร์ มีหน่วยเป็นเรเดียน / วินาที

2.5 โมเดลคณิตศาสตร์ของดีซีมอเตอร์

ดีซีมอเตอร์ที่ใช้ร่วมกับดีซีแอมพลิไฟท์ในระบบบังคับตำแหน่งและการบังคับความเร็ว มักจะได้รับการประยุกต์ใช้ เป็นส่วนประกอบสร้างกำลังงานในระบบการบังคับต่าง ๆ และเนื่องจากวิทยาการเกี่ยวกับสารแม่เหล็กและการขยายด้วยโซลิตสเตรททำให้ดีซีมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวรได้รับความนิยมใช้เป็นส่วนประกอบการขับเคลื่อนในระบบการบังคับแบบปิดลูปต่าง ๆ มากขึ้น การออกแบบและชดเชยระบบดังกล่าวได้เหมาะสมจะต้องใช้โมเดลคณิตศาสตร์ของส่วนประกอบทั้งหมดในระบบ ในหัวข้อนี้เราจะได้พัฒนาลิเนียร์โมเดลของดีซีมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวรและแบบฟลักซ์แยกกระดุน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 โมเดลคณิตศาสตร์ของดีซีมอเตอร์

2.5.1 โมเดลอิเล็กทรอนิกส์โทรแมคคานิคอล

ส่วนสำคัญของดีซีมอเตอร์แบบฟิลด์แยกกระดุนมีโมเดลดังรูปที่ 2.5

R_a : ความต้านทานของอาร์เมเจอร์

L_a : อินдукแตนซ์ของอาร์เมเจอร์

V_g : โวลต์เตจกำเนิดในอาร์เมเจอร์ (โวลต์เตจย้อนกลับ)

R_f : ความต้านทานของฟิลด์

L_f : อินдукแตนซ์ของฟิลด์

ϕ : ช่องว่างอากาศของเส้นแรงสนามแม่เหล็ก

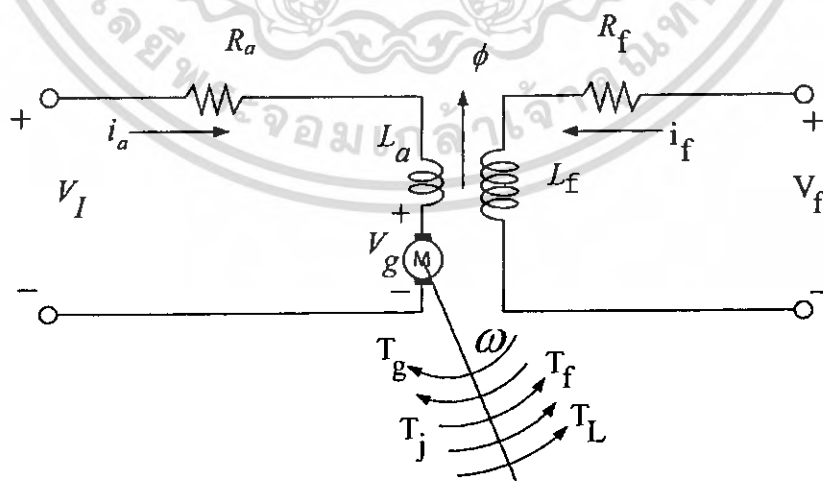
ω : ความเร็วของเพลาอาร์เมเจอร์

T_g : แรงบิดที่พัฒนาขึ้นในมอเตอร์

T_f : แรงบิดเสียดทานของมอเตอร์

T_j : แรงเฉื่อยของมอเตอร์

T_L : แรงบิด โทลด์บนเพลาของมอเตอร์



รูปที่ 2.5 โมเดลของดีซีมอเตอร์แบบฟิลด์แยกกระดุน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นแรกเราจะหาสมการพื้นฐานโมเดลของดีซีมอเตอร์ได้จากรูปของอาร์เมเจอร์

$$V_i(t) = R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + V_g(t) \quad (2-1)$$

เทอมโวลต์เตจ $V_g(t)$ ในสมการ (2-1) คือโวลต์เตจย้อนกลับของมอเตอร์ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อเส้นลวดตัวนำของอาร์เมเจอร์หมุนตัดเส้นแรงแม่เหล็กซึ่งเกิดขึ้นโดยกระแสของฟิลด์ (i_f) ตามกฎของฟาราเดย์รูปของเส้นลวดตัวนำหมุนในฟิลด์แม่เหล็กคงที่จะมีการเหนี่ยวนำโวลต์เตจขึ้นในขลวดนั้น

$$V(t) = \frac{d\lambda(t)}{dt} \quad (2-2)$$

เมื่อ $\lambda(t)$ เส้นแรงแม่เหล็กที่ลิงเคจ (linkages) ไปยังขลวดและ t คือเวลาในการหมุนของคอมมิวเตเตอร์ของมอเตอร์การควบคุมวงจรของแต่ละส่วนของตัวนำในโรเตอร์จะเกิดโวลต์เตจขึ้นในส่วนของตัวนำนั้นตามสมการ (2-2) เมื่อ $\frac{d\lambda(t)}{dt}$ จะเป็นสัดส่วนต่อเส้นแรงแม่เหล็กในช่องว่างอากาศและความเร็วเชิงมุม $\omega(t)$ หรือเราจะได้ว่า

$$V_g(t) = K\phi(t)\omega(t) \quad (2-3)$$

สมมติให้กระแสของฟิลด์มีค่าคงที่และไม่คิดถึงส่วนการเปลี่ยนแปลงในเส้นแรงฟิลด์เนื่องจากอาร์เมเจอร์รีแอกซ์ชันเส้นแรงฟิลด์ก็จะมีค่าคงที่ดังสมการค่าคงที่ดังนั้นสมการ (2-3) ก็จะกลายเป็น

$$V_g(t) = K_e\omega(t) \quad (2-4)$$

เมื่อเราสมมติให้เส้นแรงของฟิลด์มีค่าคงที่ แรงบิดของแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งเกิดขึ้นแก่โรเตอร์ของมอเตอร์จะเป็นสัดส่วนกับกระแสอาร์เมเจอร์

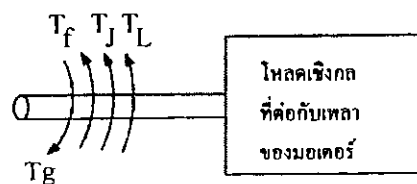
$$T_g(t) = K_t i_a(t) \quad (2-5)$$

เมื่อ K_t คือค่าคงที่ของแรงบิดของมอเตอร์

กำลังงานเชิงกลที่เกิดขึ้นในโรเตอร์คือผลคูณของแรงบิดที่เกิดขึ้นและความเร็วเชิงมุม

$$P_g(t) = T_g(t)\omega(t) \quad (2-6)$$

กำลังงานเชิงกลที่เกิดขึ้นในโรเตอร์ทั้งหมดนี้จะเข้าไปยังโหลดที่ค่ออยู่กับเพลลาของมอเตอร์แต่กำลังงานนี้บางส่วนจะสูญเสียไปกับมอเตอร์ การสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทาน หมายถึงความหน่วงเนื่องจากลมที่ต่อโรเตอร์ แรงเสียดทานตัวรองรับโรเตอร์ กระแสที่ไหลวนในเหล็กของโรเตอร์ และฮีสเทรีซิส จากรูปที่ 2.6 แสดงให้เห็นถึงแรงบิดต่างๆที่เกิดขึ้นต่อโหลดของมอเตอร์คือ



รูปที่ 2.6 แสดงถึงแรงบิดต่างๆ ที่เกิดขึ้นต่อโหลดของมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$T_g(t)$: แรงบิดของมอเตอร์

$T_f(t)$: แรงบิดที่ต้องชนะการสูญเสียเนื่องจากการเสียดทาน

$T_J(t)$: แรงบิดเพื่อใช้เพิ่มอัตราเร่งแก่ความเฉื่อยของโหลด

$T_L(t)$: แรงบิดโหลด

ในช่วงเวลาใด ๆ ก็ตาม แรงบิดของมอเตอร์จะต้องเท่ากับและมีทิศทางตรงข้ามกับผลรวมแรงบิด $T_f(t)$ $T_J(t)$ และ $T_L(t)$ ดังนั้น

$$T_g(t) = T_f(t) + T_L(t) + J \frac{d\omega(t)}{dt} \quad (2 - 7)$$

เมื่อ J คือผลรวมของโมเมนต์แรงเฉื่อยของโรเตอร์และโหลดที่ต่ออยู่ที่เพลาของมอเตอร์ ผลรวมของแรงบิดเสียดทานที่ประกอบกันขึ้นที่เพลาของมอเตอร์ซึ่งเป็นลิเนียร์ฟังก์ชันกับความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์เรียกว่า ส่วนประกอบของวิสกอสฟริกชันและมักจะถูกอยู่ในเทอมที่แยกออกจาก ฟริกชันอื่น ๆ ซึ่งแสดงได้ด้วยสมการต่อไปนี้

$$T_g(t) = T_f(t) + T_L(t) + J \frac{d\omega(t)}{dt} + B\omega(t) \quad (2 - 8)$$

เมื่อ B คือสัมประสิทธิ์ของวิสกอสฟริกชันของมอเตอร์และโหลดที่ต่ออยู่กับเพลาของมอเตอร์ $T_f(t)$ คือผลรวมของฟริกชันของโหลดและของมอเตอร์ทั้งหมด มีแรงต้านของลมและการสูญเสียกำลังในเหล็กของเพลามอเตอร์ยกเว้นวิสกอสฟริกชัน สมการ (2 - 1) (2 - 5) (2 - 6) และ (2-8) เป็นชุดสมการพื้นฐานของดีซีมอเตอร์โมเดลและจากสมการเหล่านี้เราสามารถจะหาทรานสเฟอร์ ฟังก์ชันของดีซีมอเตอร์ได้ โดยใส่ตาปลาทรานสฟอร์มทั้งสองข้างของชุดสมการพื้นฐานและเขียน ได้ใหม่เป็น

$$V_1(s) - V_g = (R_a + sL_a)I_a(s) \quad (2 - 9)$$

$$V_g(s) = K_e\omega(s) \quad (2 - 10)$$

$$T_g = K_t I_a(s) \quad (2 - 11)$$

$$T_g(s) - T_f(s) - T_L(s) = (B + sJ)\omega(s) \quad (2 - 12)$$

บล็อกไดอะแกรมที่แสดงถึงสมการพื้นฐานเหล่านี้แสดงดังในรูปที่ 2.7

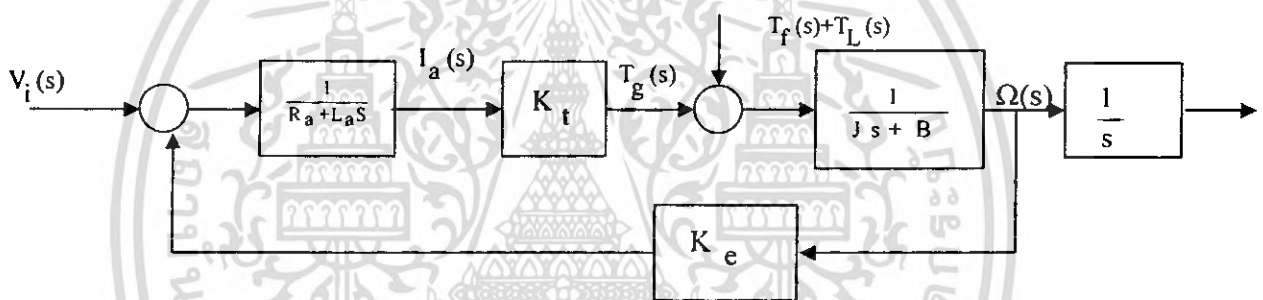
ข้อควรสังเกต

สมมติว่า โวลต์เตจที่ป้อนให้กับวงจรอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์มีค่าคงที่ ดังนั้นมอเตอร์จะหยุดหมุนด้วยความเร็วคงที่คือทำงานอยู่ที่สภาวะสงบนิ่งที่โหลดคงที่ กำลังงานเชิงกลที่เกิดขึ้นโดยโรเตอร์จะหาได้จากสมการ (2 - 6) และเมื่อร่วมกับสมการ (2 - 5) ก็จะได้

$$P_g = T_g \omega = K_t I_a \omega \quad (2 - 13)$$

เมื่อทุกเทอมในสมการสุดท้ายมีค่าคงที่เนื่องจากมอเตอร์ทำงานอยู่ที่สภาวะสงบนิ่งกำลังไฟฟ้าที่ถูกดูดกลืนโดยอาร์เมเจอร์ต้องเท่ากับผลคูณของโวลต์เตจตกคร่อมอาร์เมเจอร์และกระแสที่ไหลผ่าน ดังนั้น

$$P = V_g I_a = K_e \omega I_a \quad (2 - 14)$$



รูปที่ 2.7 บล็อกไดอะแกรมของดีซีมอเตอร์โวลต์

ดังนั้นเราจะได้ว่า กำลังงานเชิงกลที่เกิดขึ้นต้องเท่ากับกำลังงานไฟฟ้าที่ถูกดูดกลืนในโรเตอร์คือสรุปได้ว่า $K_t = K_e$

2.6 ทรานสเฟอร์ฟังก์ชันของดีซีมอเตอร์

บล็อกไดอะแกรมของรูป 2.7 แสดงถึงระบบที่มีสองอินพุต และมีเอาต์พุตเป็นทั้งความเร็วเชิงมุมและการเคลื่อนที่แบบเชิงมุม θ จากรูป 2.28 ความเร็วเอาต์พุตของระบบเขียนได้เป็น

$$\omega(s) = G_1(s) V_i + G_2(s) [T_f(s) + T_L(s)] \quad (2 - 15)$$

เมื่อ

$$G_1(s) = \frac{\omega(s)}{V_i(s)} |_{T_f(s) + T_L = 0} \quad (2 - 16)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$G_2 = \frac{\omega(s)}{T_f(s) + T_L(s)} \Big|_{V_i(s)=0} \quad (2-17)$$

$G_1(s)$ คือทรานสเฟอร์ฟังก์ชันระหว่างโวลต์เด็งและความเร็ว

$$\begin{aligned} G_1 &= \frac{\omega(s)}{V_i} = \frac{K_t}{(L_a + R_a)(Js + B) + K_t K_e} \\ &= \frac{K_m}{\alpha s^2 + \beta s + 1} \end{aligned} \quad (2-18)$$

$$K_m = \frac{K_t}{R_a B + K_t K_e}$$

$$\alpha = \frac{L_a J}{R_a + K_t K_e}$$

$$\beta = \frac{R_a J + L_a B}{R_a B + K_t K_e}$$

สมการ (2-18) เป็นโวลต์เด็งทรานสเฟอร์ฟังก์ชันของดิซิมอเตอร์ในเมื่อสมมติว่า T_f และ T_L มีค่าเป็นศูนย์ สมการ (2-18) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$G_1(s) = \frac{K_t}{R_a B(1 + \tau_e s)(1 + \tau_m s) + K_t K_e} \quad (2-19)$$

เมื่อ $\tau_e = L_a / R_a$ = ไทม์คอนสแตนต์ทางไฟฟ้า

$\tau_m = J/B$ = ไทม์คอนสแตนต์ทางเชิงกล

ถ้าอินดักเต้นท์ของอาร์มเจอร์มีค่าน้อย ไทม์คอนสแตนต์ทางไฟฟ้าสามารถตัดทิ้งได้และสมการ(2-18) ได้เป็น

$$\begin{aligned} G_v(s) &= \frac{\omega(s)}{V_i(s)} = \frac{K_t}{R_a (Js + B) + K_t K_e} \\ &= \frac{K_m}{\tau s + 1} \end{aligned} \quad (2-20)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{เมื่อ } \tau = \frac{R_a J}{R_a B + K_t K_m}$$

ในสมการ (2-25) ค่าคงที่ K_m อาจเรียกได้ว่าเป็นค่าคงที่ของมอเตอร์ ทรานสเฟอร์ฟังก์ชันแรงบิดโหลด $G_2(s)$ หาได้เป็น

$$G_2(s) = \frac{\omega(s)}{T_f(s) + T_L(s)} = \frac{1}{1 + \frac{Js+B}{K_t K_e} (Js+B)(L_a s + R_a)}$$

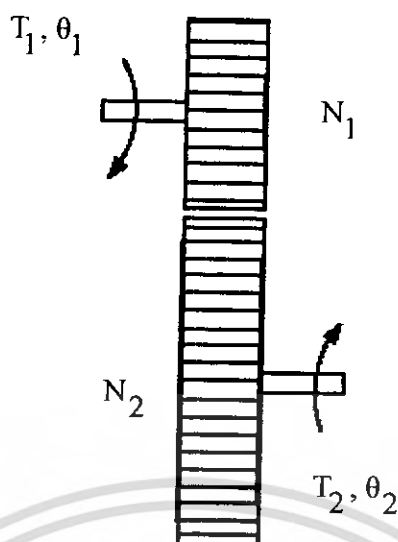
$$G_2(s) = \frac{\frac{R_a}{K_t} K_m \left[\frac{L}{R_a} s + 1 \right]}{\alpha s^2 + \beta s + 1} \quad (2-21)$$

ซึ่งถ้าอินตทิเกรตค่าของอาร์เมเจอร์ไม่นำมาคิดถึง สมการ (2-21) ก็ลดลงได้

$$G_L(s) = \frac{\omega(s)}{T_f(s) + T_L(s)} = \frac{\frac{R_a}{K_t} K_m}{\tau s + 1}$$

2.7 ระบบเกียร์

ระบบเกียร์ คานจัดหรือสายพานในลูกโลก เป็นอุปกรณ์เครื่องกลซึ่งสามารถส่งพลังงานจากส่วนหนึ่งของระบบไปยังส่วนอื่นๆ ได้ในรูปของแรงงาน แรงบิด ความเร็ว และการเคลื่อนที่ นอกจากนั้นอุปกรณ์เหล่านี้ยังเป็นเสมือนอุปกรณ์สำหรับประสาน (matching) ที่สามารถใช้ส่งผ่านกำลังงานให้ได้ค่าสูงสุด รูปที่ 2.8 แสดงถึงการคัปปลิงเกียร์ 2 ตัวเข้าด้วยกัน แรงตื้อและแรงเสียดทานของเกียร์จะไม่นำมาคิดในเมื่อพิจารณาถึงเกียร์อุดมคติ



รูปที่ 2.8 ระบบการคัปปลิงของเกียร์

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด T_1 และ T_2 การเคลื่อนที่เชิงมุม θ_1 และ θ_2 และจำนวนซี่ฟัน N_1 และ N_2 ของระบบเกียร์สามารถหาได้จากหลักเกณฑ์ต่อไปนี้

(1) จำนวนซี่ฟันของเกียร์จะเป็นสัดส่วนกับรัศมี r_1 และ r_2 ของเกียร์ นั่นคือ

$$r_1 N_2 = r_2 N_1 \quad (2 - 22)$$

(2) ระยะทางการเคลื่อนที่ไปของเกียร์แต่ละตัวจะมีค่าเท่ากันดังนั้น

$$\theta_1 r_1 = \theta_2 r_2 \quad (2 - 23)$$

(3) แรงงานที่ได้จากเกียร์ตัวหนึ่งจะเท่ากับแรงงานที่ได้จากเกียร์อีกตัวหนึ่ง เนื่องจากสมมติให้ว่าไม่มีการสูญเสียแรงงานดังนั้น

$$T_1 \theta_1 = T_2 \theta_2 \quad (2 - 24)$$

ถ้าความเร็วเชิงมุมของเกียร์ทั้งสองคือ ω_1 และ ω_2 ในรูปที่ 2.8 สมการ (2 - 22) (2 - 23) และ (2 - 24) เขียนใหม่ได้เป็น

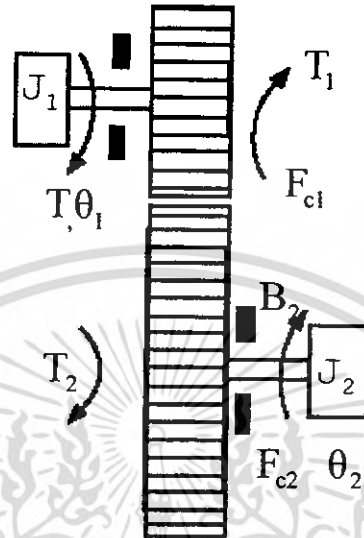
$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{\theta_2}{\theta_1} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{\eta}{\tau} \quad (2 - 25)$$

ในการปฏิบัติตัวเกียร์จริงๆ จะต้องมีแรงเฉื่อยและแรงเสียดทานเกิดขึ้นเนื่องจากการคัปปลิงระหว่างฟันของเกียร์ซึ่งไม่สามารถจะตัดทิ้งได้ ระบบสมมูลของเกียร์ที่มีวิสกอสฟริกชัน คู่วาล์วสปริง และแรงเฉื่อยพิจารณา เป็นส่วนประกอบของระบบดังแสดงในรูปที่ 2.9 ตัวแปรและพารามิเตอร์ต่อไปนี้อธิบายระบบเกียร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

T = แรงบิดป้อนให้ระบบเกียร์

θ_1 และ θ_2 = ระยะทางการเคลื่อนที่เป็นแบบเชิงมุม



รูปที่ 2.9 ระบบการคัพปลิงเกียร์ที่มีแรงเฉื่อย

T_1 และ T_2 = แรงบิดที่ส่งผ่านมายังเกียร์

J_1 และ J_2 = แรงเฉื่อยของเกียร์

N_1 และ N_2 = จำนวนซี่ฟัน

F_{c1} และ F_{c2} = ตัวสัมประสิทธิ์ของควูลอมบ์ฟรคชั่น

B_1 และ B_2 = ตัวสัมประสิทธิ์ของวิสคอสฟรคชั่น

สมการแรงบิดของเกียร์ทั้งสองเขียนได้เป็น

$$T_2(t) = J_2 \frac{d^2\theta_2}{dt^2} + B_2 \frac{d\theta_2(t)}{dt} + F_{c2} \frac{\dot{\theta}_2}{|\theta_2|} \quad (2-26)$$

สมการแรงบิดทางข้างของเกียร์ของเกียร์ตัวแรกได้เป็น

$$T(t) = J_1 \frac{d^2\theta_1}{dt^2} + B_1 \frac{d\theta_1(t)}{dt} + F_{c1} \frac{\dot{\theta}_1}{|\theta_1|} + T_1(t) \quad (2-27)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยใช้สมการ (2- 25) สมการ (2- 26) จะแปลงใหม่ได้เป็น

$$T_1(t) = \frac{N_1}{N_2} T_2(t) = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 J_2 \frac{d^2\theta_1(t)}{dt^2} + \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 B_2 \frac{d\theta_1(t)}{dt} + \left(\frac{N_1}{N_2}\right) F_{c2} \frac{\dot{\theta}_1}{\dot{\theta}_2} \quad (2-28)$$

สมการ (2 - 28) แสดงให้เห็นว่าเป็นไปได้ที่จะสะท้อนแรงเฉื่อยแรงเสียดทาน แรงบิด ความเร็ว และการเคลื่อนที่จากข้างหนึ่งของระบบเกียร์ไปยังอีกข้างหนึ่งของระบบเกียร์

ดังนั้นเราจะได้ปริมาณค่าต่างๆ ต่อไปนี้ เมื่อพารามิเตอร์ต่างๆ ของเกียร์ตัวที่สองสะท้อนไปยังเกียร์ตัวหนึ่ง

แรงเฉื่อย $(N_1/N_2)^2 J_2$

ตัวสัมประสิทธิ์ของวิสกอสฟริกชัน : $(N_1/N_2)^2 B_2$

แรงบิด : $(N_1/N_2) T_2$

การเคลื่อนที่เชิงมุม : $(N_1/N_2) \theta_2$

ความเร็วเชิงมุม : $(N_1/N_2) \omega_2$

แรงบิดควัวลอมป์ฟริกชัน : $(N_1/N_2) F_{c2} (\omega_2/|\omega_2|)$

ถ้าผลการบิดของสปริงเกิดขึ้น ค่าคงที่ของสปริงจะได้รับการคูณด้วย $(N_1/N_2)^2$ ในการสะท้อน ผลการบิดของแทนค่าสมการ (2 - 28) ลงในสมการ (2 - 27) จะได้

$$T(t) = J_{le} \frac{d^2\theta_1(t)}{dt^2} + B_{le} \frac{d\theta_1(t)}{dt} + T_F \quad (2-29)$$

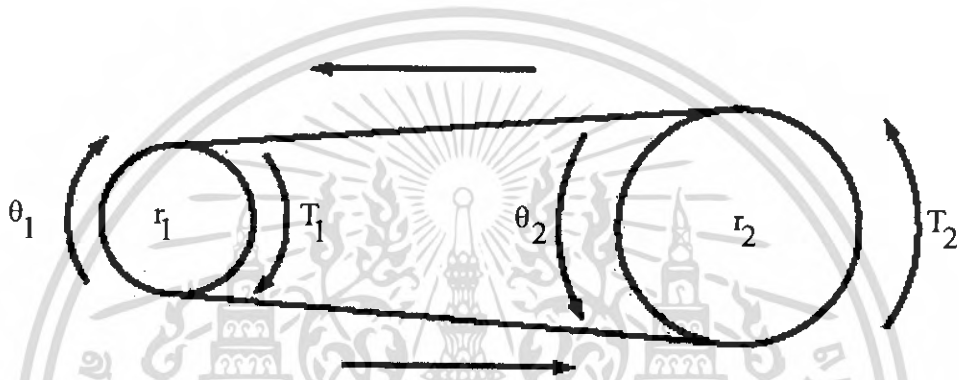
$$J_{le} = J_1 + \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 J_2 \quad (2-30)$$

$$B_{le} = B_1 + \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 B_2 \quad (2-31)$$

$$T_F = F_{c1} \frac{\dot{\theta}_1}{|\dot{\theta}_1|} + \left(\frac{N_1}{N_2}\right) F_{c2} \frac{\dot{\theta}_2}{\dot{\theta}_2} \quad (2-32)$$

2.8 ระบบสายพานและคานงัด

ระบบขับเคลื่อนด้วยสายพานหรือโซ่ก็มีจุดมุ่งหมายเดียวกับระบบเกียร์ นอกจากว่าระบบสายพานหรือ โซ่สามารถส่งผ่านพลังงานไปได้ระยะทางไกลกว่าโดยไม่ต้องใช้เกียร์จำนวนมาก รูปที่ 2.30 แสดงถึงไดอะแกรมของระบบการขับเคลื่อนด้วยสายพานหรือโซ่ระหว่างลูกกลอกทั้งสอง สมมติว่าไม่มีการเลื่อนไปได้ระหว่างสายพานและลูกกลอกเราก็ยังสามารถใช้สมการ (2 - 33) กับกรณีนี้ซึ่งเป็นเรื่องจริงว่าการสะท้อนหรือทรานสมิทเด็นซ์ของแรงบิด แรงเฉื่อยและแรงเสียดทานเป็นต้นก็คล้ายคลึงกับการสะท้อนกลับของระบบเกียร์



รูปที่ 2.10 ระบบสายพาน

2.9 เซ็นเซอร์และเอนโคเดอร์ในระบบการควบคุมมอเตอร์

เซ็นเซอร์และเอนโคเดอร์เป็นส่วนประกอบที่สำคัญในระบบคอนโทรลที่มีการป้อนกลับ ในระบบคอนโทรลแบบเปิดลูฟเอนโคเดอร์มักจะใช้สำหรับตรวจสอบคุณสมบัติการทำงานจากระบบ ส่วนในระบบคอนโทรลแบบลูฟปิดเซ็นเซอร์และเอนโคเดอร์ใช้เป็นตัวป้อนสัญญาณกลับเพื่อการคอนโทรล นอกจากนั้นส่วนประกอบเหล่านี้ยังใช้สำหรับพิสูจน์ความเหมือนกันของกระบวนการที่ไม่รู้ค่าหรือกระบวนการที่มีการเปลี่ยนแปลงในบทยังจะได้กล่าวถึงหลักการทำงานและการนำไปใช้งานของเซ็นเซอร์และเอนโคเดอร์ที่ใช้กันมากในระบบคอนโทรลเช่น โปเทนทิโอมิเตอร์ ออฟติกกอลเอนโคเดอร์ แมกเนติกพิคอัพทรานสดิวเซอร์จำพวกแม่เหล็กไฟฟ้า และรีโซลเวอร์

2.9.1 โปเทนทิโอมิเตอร์

โปเทนทิโอมิเตอร์เป็นเครื่องมือที่เปลี่ยนพลังงานกลไปเป็นพลังงานไฟฟ้าอินพุทที่ป้อนเข้า โปเทนทิโอมิเตอร์จะอยู่ในรูปของการเคลื่อนที่แบบเชิงกล และอาจเป็นการเคลื่อนที่แบบหมุนรอบหรือเคลื่อนที่เป็นเชิงเส้นก็ได้ เมื่อป้อนโวลต์เดจเข้าที่ปลายข้างที่อยู่กับที่ของโปเทนทิโอมิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างความคลาดเคลื่อนของความต้านทานของโปเทนทิโอมิเตอร์ชนิดมาตรฐานจะอยู่ระหว่าง ± 5 เปอร์เซ็นต์ และ ± 10 เปอร์เซ็นต์และโปเทนทิโอมิเตอร์ชนิดพิเศษจะมีความคลาดเคลื่อนประมาณ ± 1 เปอร์เซ็นต์ความเป็นลิเนียร์ของความต้านทานของโปเทนทิโอมิเตอร์จะอยู่ในพิสัย ± 0.25 ถึง ± 0.5 เปอร์เซ็นต์ในรูป 2.33 แสดงถึงวงจรสมมูลของโปเทนทิโอมิเตอร์ที่เป็นแบบลิเนียร์และแบบโรตารีเนื่องจากโวลต์เดจคกร่อมขั้วที่ปรับค่าได้และขั้วอ้างอิง(กราวนด์)จะเป็นสัดส่วนกับการเคลื่อนที่ของเพลลาของโปเทนทิโอมิเตอร์เมื่อป้อนโวลต์เดจคกร่อมขั้วที่อยู่กับที่โปเทนทิโอมิเตอร์สามารถใช้แสดงค่าตำแหน่งสมมูลของเพลลาหรือแสดงค่าตำแหน่งสัมพัทธ์ของเพลลาสองอัน



ในรูปที่ 2.34 (ก) แสดงการจัดวงจรเมื่อให้โครงของโปเทนทิโอมิเตอร์เป็นจุดอ้างอิง (กราวนด์) เอาท์พุทโวลต์เดจ $e(t)$ จะเป็นสัดส่วนตำแหน่งเพลลา $\theta_c(t)$ โรตารีโปเทนทิโอมิเตอร์ $\theta_c(t)$ แสดงถึงค่าการเคลื่อนที่เชิงมุมเป็นเรเดียนหรือองศาแสดงในสมการ

$$e(t) = K_s \theta_c(t) \tag{2 - 33}$$

เมื่อ K_s คือค่าคงที่ เมื่อ N คือจำนวนรอบของโปเทนทิโอมิเตอร์ผลรวมการหมุนของเพลลาเท่ากับเรเดียน ดังนั้น K_s จะมีค่าเป็น

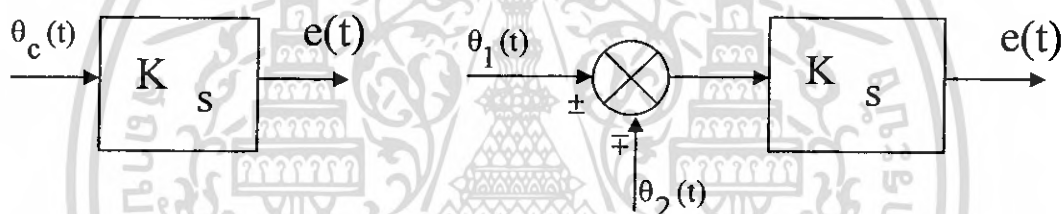
$$K_s = \frac{V}{2\pi N} \tag{2 - 34}$$

เมื่อ V คือ แมกนิจูดของโวลต์เดจอ้างอิงที่ป้อนให้กับขั้วของโปเทนทิโอมิเตอร์ในรูปที่ 2.14(ข) แสดงการต่อโปเทนมิโอมิเตอร์ 2 ตัวขนานกันการจัดวิธีนี้สามารถทำการเปรียบเทียบตำแหน่งการ

หมุนของเพลลา 2 อันผลต่อของการหมุนจะออกมาในรูปของโวลต์เต็มคร่อมปลายของส่วนที่เคลื่อนที่ของโปเทนทิโอมิเตอร์ทั้งสองแสดงในสมการได้ดังนี้

$$e(t) = K_s [\theta_1(t) - \theta_2(t)] \quad (2-35)$$

รูปที่ 2.36 แสดงถึงบล็อกไดอะแกรมของการจัดวงจรของโปเทนทิโอมิเตอร์ ในระบบคอนโทรลดิซิสมอเตอร์เรอแมกจะใช้โปเทนทิโอมิเตอร์สำหรับการบังคับตำแหน่งแบบปิดลูป รูปที่ 2.14 แสดงถึงไดอะแกรมของระบบการบังคับตำแหน่งด้วยดิซิสมอเตอร์ โปเทนทิโอมิเตอร์จะถูกใช้เป็นส่วนป้อนกลับเพื่อเปรียบเทียบตำแหน่งของโหลดกับตำแหน่งอ้างอิงที่ต้องการ ผลต่างที่ได้จากการเปรียบเทียบโปเทนทิโอมิเตอร์จะกำเนิดสัญญาณเออร์เรอร์ออกมาเป็นโวลต์เต็มนำไปขยายเพื่อไปขับเคลื่อนมอเตอร์และโหลดให้อยู่ในตำแหน่งที่ต้องการ



รูปที่ 2.14 บล็อกไดอะแกรมที่ใช้งานวงจรของ โปเทนทิโอมิเตอร์

2.10 ลิเนียร์เฟาเวอร์แอมพลิไฟ

ลิเนียร์เซอร์โวแอมพลิไฟ โดยปกติสร้างขึ้นเพื่อใช้เป็นอุปกรณ์ขยายแบบลิเนียร์ เช่นเดียวกับ ออฟ-แอมป์ หรือดิฟเฟอเรนเชียลแอมพลิไฟที่ใช้ไปกระตุ้นภาคเพาเวอร์ให้ไปขับมอเตอร์ ภาคเพาเวอร์จะมีการป้อนกลับแบบลูปปิดเพื่อทำให้พารามิเตอร์ที่ต้องการได้แก่ มอเตอร์โวลต์เต็ม กระแสของมอเตอร์หรือพารามิเตอร์ทั้งสองดังกล่าวมีความเป็นลิเนียร์ ในกรณีนี้ความไม่เป็นลิเนียร์และครีฟที่เกิดขึ้นจากอุณหภูมิในภาคเพาเวอร์จะลดลงโดยอัตราขยายลูปของระบบ นอกจากนี้ ออฟ-แอมป์ยังมักใช้เป็นเหมือนการชดเชยหรือใช้เป็น ซัมมิ่งแอมพลิไฟทำหน้าที่เหมือนจุดรวมของสัญญาณบังคับและสัญญาณป้อนกลับของระบบซึ่งได้แก่สัญญาณที่ได้จากอนาลอกทาโคมิเตอร์ (ในระบบการบังคับความเร็ว) และสร้างสัญญาณเออร์เรอร์ซึ่งจะถูกขยายโดยภาคเพาเวอร์เพื่อไปแก้พารามิเตอร์ที่ต้องการบังคับให้มีค่าที่ถูกต้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

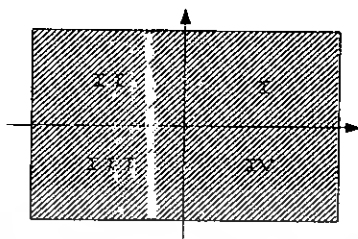
ลิเนียร์แอมพลิไฟจะเป็นตัวควบคุมโวลต์เตจหรือกระแสของมอเตอร์โดยการบังคับขนาดของโวลต์เตจที่จ่ายให้กับมอเตอร์ดังนั้นจะเป็นตัวที่ลดโวลต์เตจเอาไว้ซึ่งเท่ากับผลต่างของแหล่งจ่ายของแหล่งจ่ายโวลต์เตจใช้งานจริงในขณะที่มีกระแสที่เหมาะสมไหลผ่าน กำลังงานจะสูญเสียในเอาท์พุททรานซิสเตอร์เป็นจำนวนมากโดยเฉพาะขณะที่มอเตอร์วิ่งที่ความเร็วต่ำแรงบิดสูง เพราะขณะนั้นโวลต์เตจย้อนกลับของมอเตอร์ต่ำกระแสจึงสูง นี่เป็นความแตกต่างที่เห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับสวิตชิงแอมพลิไฟ สวิตชิงแอมพลิไฟควบคุมโวลต์เตจของมอเตอร์โดยปรับ duty cycle ของโวลต์เตจที่จ่ายให้กับมอเตอร์และให้มันทำงานทุกๆ สภาวะอิมตัวหรือที่สภาวะออฟ ดังนั้นการสูญเสียของกำลังงานจะน้อยในแต่ละสภาวะทำให้ประสิทธิภาพการทำงานสูงขึ้นอย่างไรก็ตาม สวิตชิงแอมพลิไฟก็สร้างปัญหาใหม่ขึ้นอีก เพื่อหลีกเลี่ยงการสูญเสียการสวิตซ์ที่ความถี่สูง ค่าของอินดักเตนซ์ของมอเตอร์ (หรือภายนอก) ต้องมีค่าน้อย ดังนั้นจึงเป็นการเพิ่ม time constant ของระบบซึ่งจะทำให้แบนด์วิดท์ของระบบลดลงด้วย นอกจากนั้นยังเกิดปัญหาการรบกวนของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (EMI) ซึ่งมักเกิดขึ้นรุนแรงทำให้ระบบเกิดความยุ่งยากและทำงานผิดพลาดขึ้นได้ ดังนั้นจึงเป็นการยากที่จะตัดสินใจว่าแอมพลิไฟชนิดไหนดีกว่ากันลิเนียร์แอมพลิไฟตามปกตินิยมใช้ในระยะที่มีแบนด์วิดท์กว้างและกำลังงานต่ำ(น้อยกว่า 2-3 วัตต์) และมักจะใช้สำหรับขับเคลื่อนขดลวดหมุนของมอเตอร์ที่มีความเฉื่อยต่ำให้เพิ่มกระแสด้วยอัตราเร่งสูงในช่วงเวลาอันสั้น (2-3 มิลลิวินาที) ซึ่งกระแสฟลักที่กำหนดไว้ของเอาท์พุททรานซิสเตอร์อาจจะยังใช้งานได้ดี

ในทางตรงกันข้ามสวิตชิงแอมพลิไฟโดยทั่วๆ ไปมักจะใช้ในระบบที่ใหญ่ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งระบบดังกล่าวต้องการขยายช่วงการทำงานที่ความเร็วต่ำและมีแรงบิดสูงซึ่งจะทำให้เกิดสูญเสียกำลังงานอย่างมากในลิเนียร์แอมพลิไฟ

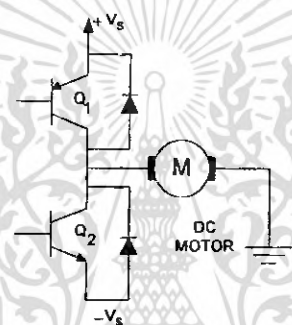
2.10.1 ไบไดเร็กชันแนลเชอร์โวลแอมพลิไฟ

ไบไดเร็กชันแนลเชอร์โวลแอมพลิไฟสามารถทำให้ออเตอร์ทำงานได้ทั้งสองทิศทาง และมีลิเนียร์ทรานเฟอร์ฟังก์ชันตลอดถึงช่วงความเร็วเป็นศูนย์ แอมพลิไฟแบบนี้สามารถบังคับได้เต็มทั้ง 4 ควอเตอร์ดังในรูปที่ 2.38 และสามารถป้อนโวลต์เตจและกระแสทั้งสองขั้วบวกหรือลบให้กับมอเตอร์ได้ไบไดเร็กชันแนลแอมพลิไฟแบบพื้นฐาน 2 แบบ ได้แก่ลิเนียร์ไบโพลาาร์ตามรูปที่ 2.39 และลิเนียร์บริคจ์ตามรูปที่ 2.40 ซึ่งแบ่งออกตามลักษณะโครงสร้างของภาคเอาท์พุทไบไดเร็กชันแนลแอมพลิไฟ จะใช้เพาเวอร์ซัพพลายถึงสองลักษณะสำหรับการทำงานแบบฟอร์เวอร์ด และรีเวอร์สโวลต์เตจที่ป้อนให้ออเตอร์ เท่ากับผลต่างระหว่างซัพพลายโวลต์เตจตกคร่อมคอลเลกเตอร์อิมิตอร์ของ Q_1 หรือ Q_2 ในขณะที่ตัวใดตัวหนึ่งนำกระแส เนื่องด้วยลิเนียร์แอมพลิไฟโดยทั่วไปมีประสิทธิภาพไม่ค่อยดีนัก โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่สภาวะความเร็วต่ำแรงบิดสูงซึ่งในสภาวะนี้

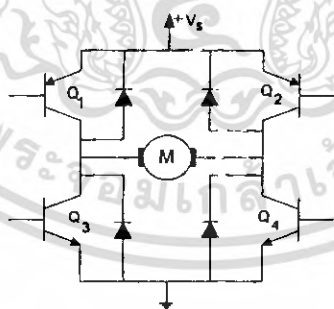
กระแสจะไหลสูงและโวลต์เต็จตกคร่อมเอาท์พุททรานซิสเตอร์สูงด้วย ดังนั้นในระบบใหญ่ จำเป็นต้องใช้ตัวระบายความร้อนขนาดใหญ่หรือใช้พัดลมสำหรับระบายความร้อนด้วย



รูปที่ 2.15 ไบโคเร็กซ์ชั้นเนลเซอร์โวแอมพลิไฟแสดงการบังคับได้เต็มที่ทั้งสี่ควอดรันท์



รูปที่ 2.16 ภาคเอาท์พุทของลิเนียร์ไบโพลาร์



รูปที่ 2.17 ภาคเอาท์พุทของลิเนียร์บริดจ์

ลิเนียร์ไบโพลาร์แอมพลิไฟเป็นแอมพลิไฟที่ออกแบบได้ง่ายกว่าลิเนียร์บริดจ์แต่การออกแบบไบโพลาร์มีข้อเสีย ที่สำคัญหลายข้อซึ่งควรจะได้ประเมินข้อดีข้อเสียของระบบเสียก่อน

1. เพาเวอร์ซัพพลายเป็นแบบไบโพลาร์คือมีสองขั้ว บวกและลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ค่า V_{ce0} ของเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ต้องสูงกว่าผลบวกของซัพพลายโวลต์เต็มทั้งสอง ($2V_S$)
3. ลิเนียร์ไบโพลาร์แอมพลิไฟเออร์จะต้องทนต่อ ฟอร์เวิร์ด – ไบอัสเบรกควาน์ที่สอง เอาท์พุทเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์อาจจะเสียได้ในช่วงการลดความเร็วลงของโหลดที่มีความเฉื่อยสูงลงจากความเร็วสูง ๆ

ลิเนียร์บริดจ์จะใช้เพาเวอร์ซัพพลายเพียงขั้วเดียวคือ บวกหรือลบเพื่อป้อนให้กับมอเตอร์ซึ่งโวลต์เต็มที่ป้อนให้มอเตอร์นี้จะมีขนาดเกือบเท่ากับโวลต์เต็มของเพาเวอร์ซัพพลาย

ในวงจรบริดจ์ Q_1 และ Q_4 จะนำกระแส เมื่อมอเตอร์ได้รับโวลต์เต็มที่ หมุนไปในทิศทางหนึ่งและ Q_2 และ Q_3 จะนำกระแสเมื่อมอเตอร์ได้รับโวลต์เต็มให้หมุนไปในทิศทางตรงข้าม ดังนั้นโวลต์เต็มตกคร่อมทรานซิสเตอร์แต่ละตัวที่นำกระแสจะเท่ากับ $\frac{1}{2}$ (ซัพพลายโวลต์เต็ม – โวลต์เต็มตกคร่อมมอเตอร์) โครงสร้างของลิเนียร์บริดจ์จะต้องการให้ V_{ce0} ของเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์มีค่าสูงกว่า V_S ตามรูปที่ 2.16 หรือ 2.17 ฟรี-ควิลลิ่งไดโอดต่อคร่อม Q_1 และ Q_2 สำหรับไบโพลาร์และคร่อม Q_1 และ Q_4 สำหรับบริดจ์ ไดโอดจะเป็นตัวกดให้เอาท์พุทโวลต์เต็มลดลงเท่ากับโวลต์เต็มตกคร่อมไดโอดที่เป็นบวกหรือลบมากกว่า $\pm V_S$ สำหรับไบโพลาร์สำหรับบริดจ์ไดโอดจะกดโวลต์เต็มแต่ละขาของบริดจ์เพื่อให้โวลต์เต็มตกคร่อมไดโอดตัวหนึ่งเป็นบวกมากกว่า V_S กับให้โวลต์เต็มตกคร่อมไดโอดอีกตัวหนึ่งมีค่าต่ำกว่ากราวด์ ดังนั้นเอาท์พุททรานซิสเตอร์จะไม่ขึ้นกับโวลต์เต็มผลัดกันที่มีค่ามากกว่า V_S หลายเท่าสำหรับบริดจ์ และเท่ากับ $2V_S$ สำหรับไบโพลาร์

ข้อดีอีกอันหนึ่งของบริดจ์คือช่วงลดโวลต์เต็มผลัดกันบนตัวทรานซิสเตอร์ที่นำกระแส ถ้าบริดจ์ได้รับการออกแบบอย่างเหมาะสมความแตกต่างระหว่างซัพพลายโวลต์เต็มและโวลต์เต็มที่มอเตอร์ต้องการจะถูกแบ่งเท่า ๆ กันระหว่างทรานซิสเตอร์ที่นำกระแสทั้ง 2 ตัวนั้น จากผลอันนี้ช่วงเพิ่มกระแสของเอาท์พุททรานซิสเตอร์ก่อนที่จะเกิดความเสียหายจากฟอร์เวิร์ด – ไบอัสเบรกควาน์ครั้งที่สอง การเพิ่มกระแสเอาท์พุทอย่างปลอดภัยสำหรับการทำงานของมอเตอร์ควรจะใช้เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์

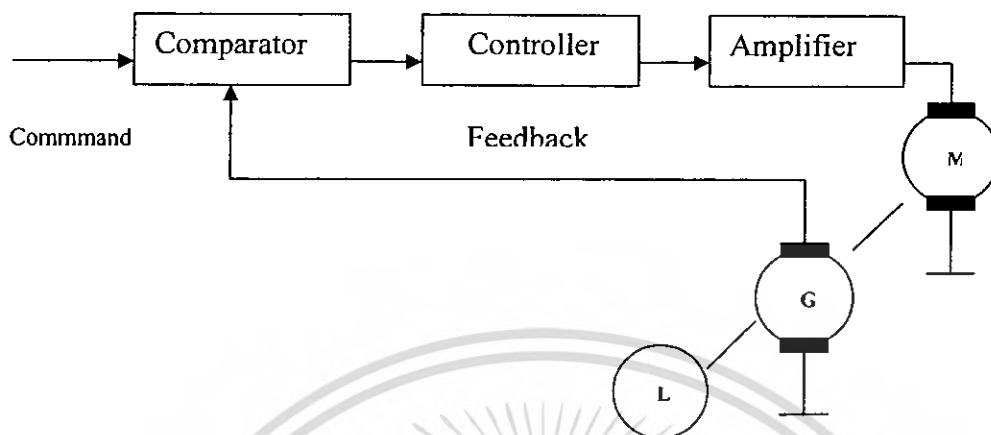
2.11 การควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

การควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง สามารถทำได้ดังนี้

1. การควบคุมแบบรูปเปิด
2. การควบคุมแบบรูปปิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในที่นี้จะขออธิบายเพียงการควบคุมแบบป้อนกลับ ซึ่งเป็นแบบที่ใช้ในโรงงานนี้

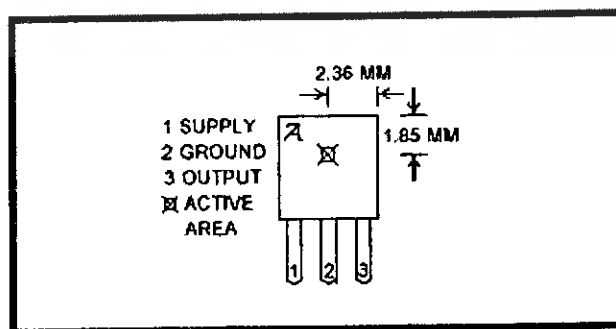


รูปที่ 2.18 ระบบการบังคับความเร็วแบบป้อนกลับ

แม้ว่าการบังคับเปิดลู่จำนวนมากสามารถใช้งานได้อย่างเพียงพอในปัจจุบันก็ตาม แต่แนวโน้มของความต้องการเร็วคูณขั้นของความเร็วกว่า ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้เป็นแบบป้อนกลับในระบบของการบังคับแบบป้อนกลับประกอบด้วยมอเตอร์ คอมพาราเตอร์ เครื่องขยายและเซ็นเซอร์ตามรูป

การบังคับความเร็วแบบมีการป้อนกลับเพื่อเปิดลู่ สามารถกระทำด้วยวงจร SCR และใช้ทาโคมิเตอร์เป็นตัวป้อนกลับ ระบบแบบนี้สามารถให้พิสัยการปรับความเร็วได้ถึง 100 : 1 เนื่องจากลักษณะเป็นพัลส์ของการบังคับด้วยเทคนิค มอเตอร์ที่มีขนาดต่ำกว่า 2 แรงม้าอาจมีเสถียรภาพความเร็วในพิสัยความเร็วต่ำๆ ไม่ดี เนื่องจากมอเตอร์ขนาดเล็กมีความเฉื่อยต่ำและเนื่องจากโหลดด้วย อย่างไรก็ตามมอเตอร์ขนาดเล็กให้ช่วงพิสัยการบังคับความเร็วได้กว้างดี

2.12 ตัวรับรู้ฮอลล์ (Linear Hall sensor)



รูปที่ 2.19 ตัวรับรู้ฮอลล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

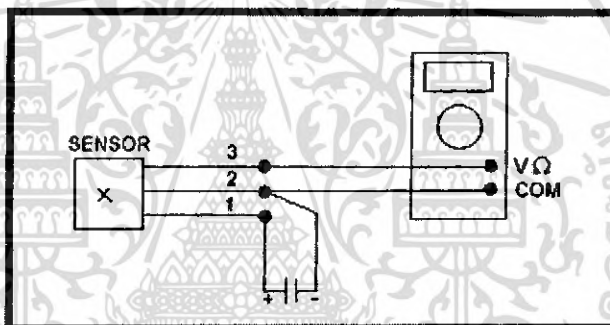
ตัวรับรู้ออสลล์เป็นวงจรรวม มีขนาดและลักษณะดังรูปที่ 1 และมีสมบัติดังนี้

input voltage 4.5-6V

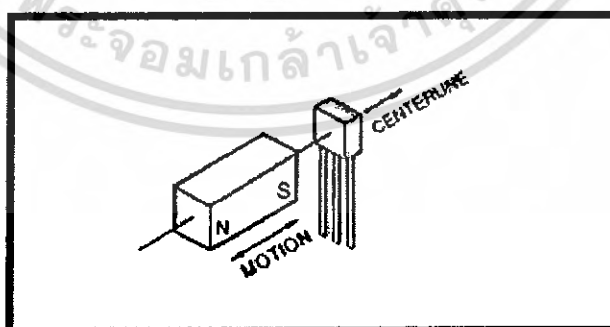
offset voltage 2.5 V (ประมาณ)

sensitivity 13 V/T

เมื่อต่อแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงหรือเซลล์ไฟฟ้า 4.5-6 โวลต์ เข้ากับขา 1 และขา 2 และต่อโวลต์มิเตอร์เข้ากับขา 2 และขา 3 ดังรูปที่ 2 โวลต์มิเตอร์จะแสดงค่าประมาณ 2.5 โวลต์ ค่านี้เป็นความต่างศักย์ขณะที่ไม่มีความแม่เหล็ก เรียกว่า offset voltage ค่านี้อาจเปลี่ยนแปลงได้เล็กน้อยขึ้นอยู่กับโวลเตจของแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงที่ต่อกับขา 1 และขา 2 แต่จะมีค่าประมาณครึ่งหนึ่งของโวลเตจของแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง



รูปที่ 2.20 การต่อตัวรับรู้ออสลล์กับแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงและโวลต์มิเตอร์



รูปที่ 2.21 การวัดความเข้มของสนามแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำแม่เหล็กเข้าใกล้ active area ของตัวรับรู้ฮอลล์ ความต่างศักย์จะมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงขึ้นอยู่กับทิศของสนามแม่เหล็ก กล่าวคือถ้านำขั้วใต้เข้าใกล้ ความต่างศักย์จะมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ถ้านำขั้วเหนือเข้าใกล้ ความต่างศักย์จะมีค่าลดลง ความต่างศักย์ที่เปลี่ยนไปมีความสัมพันธ์กับความเข้มของสนามแม่เหล็กหรือความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก หรือความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (magnetic flux density) ดังนี้

$$B = (V_{\text{out (B)}} - V_{\text{out (O)}}) S^{-1}$$

เมื่อ $V_{\text{out (O)}}$ เป็นความต่างศักย์ขณะไม่มีสนามแม่เหล็ก

$V_{\text{out (B)}}$ เป็นความต่างศักย์ขณะมีสนามแม่เหล็ก

S เป็นสัมประสิทธิ์ความไว มีหน่วยเป็น โวลต์ต่อเทสลา (V/T)

สำหรับตัวรับรู้ฮอลล์ที่ใช้ในบทความนี้ $S = 13 \text{ V/T}$

B เป็นความเข้มของสนามแม่เหล็ก หรือความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก

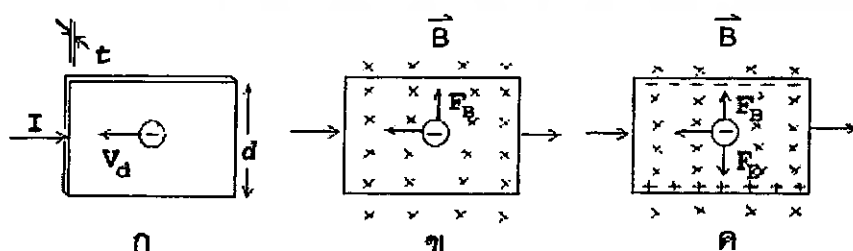
มีหน่วยเป็นเทสลา (T)

ตัวรับรู้ฮอลล์สามารถวัดสนามแม่เหล็กในบริเวณใกล้แม่เหล็กถาวร สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นบริเวณปลายโซเลนอยด์และสนามแม่เหล็กใกล้เส้นลวดตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้าผ่านได้

2.13 ปฏิกิริยาฮอลล์ (Hall Effect)

Hall Effect เป็นหลักการฟิสิกส์ที่พบโดย Edwin Hall (1855-1938) เป็นปรากฏการณ์ที่ว่า “เมื่อมีกระแสไฟฟ้าที่ผ่านตัวนำ(หรือวัตถุใดๆหรือแผ่นสารใดๆเช่น สารกึ่งตัวนำ) ที่วางอยู่ในสนามแม่เหล็ก จะมีแรงดันเกิดขึ้นคร่อมตัวนำนั้น โดยทิศของแรงดันจะตั้งฉากกับทิศสนามแม่เหล็กและทิศของกระแสไฟฟ้า” ความจริงหลักการดังกล่าวนี้เป็นไปแรงลอเรนทซ์(Lorentz force)

$$F = qE + qv \times B$$



รูปที่ 2.22 ก-ค แสดงการเกิดปรากฏการณ์ฮอลล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเกิดปรากฏการณ์ฮอลล์อาจอธิบายได้โดยใช้รูปที่ 2.22 ก-ค ดังนี้

รูปที่ 2.22 ก แสดงแผ่นตัวนำบางที่มีความกว้าง d หนา t และมีกระแสไฟฟ้า (conventional current) I ผ่านในทิศจากด้านซ้ายไปด้านขวา พาหะประจุคืออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ (ด้วยอัตราเร็วลอยเลื่อน V_d) ในทิศตรงข้ามกับกระแสไฟฟ้า I จากด้านขวาไปด้านซ้าย

รูปที่ 2.22 ข เมื่อใส่สนามแม่เหล็ก (B) ในทิศพุ่งเข้าหาและตั้งฉากกับระนาบแผ่นตัวนำบางหรือกระดาษ จะเกิดแรงแม่เหล็ก F_B กระทำกับอิเล็กตรอน ทำให้อิเล็กตรอนเบนไปทางขอบด้านบนของแผ่นตัวนำบาง

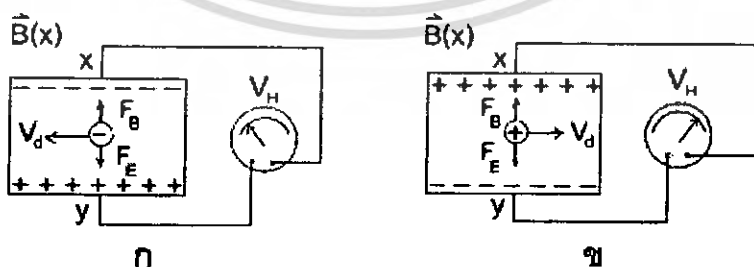
รูปที่ 2.22 ค เมื่อเวลาผ่านไปจะมีอิเล็กตรอนถูกผลักไปที่ขอบด้านบนจำนวนมาก ส่วนขอบด้านล่างจะเกิดประจุไฟฟ้าบวกจำนวนมากเช่นกัน การที่มีประจุไฟฟ้าต่างชนิดกันที่ขอบทั้งสอง ทำให้เกิดสนามไฟฟ้า เรียกว่า สนามไฟฟ้าฮอลล์ (hall field) E_H ในแผ่นตัวนำบางมีทิศจากขอบด้านล่างไปขอบด้านบน สนามไฟฟ้าจะทำให้เกิดแรงไฟฟ้า F_E กระทำกับอิเล็กตรอน ซึ่งจะทำให้อิเล็กตรอนถูกผลักไปทางขอบด้านล่าง เมื่อแรงไฟฟ้าและแรงแม่เหล็กมีขนาดเท่ากัน อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ในทิศไปทางซ้ายโดยไม่เบน

สนามไฟฟ้าที่เกิดในแผ่นตัวนำบางมีความสัมพันธ์กับความต่างศักย์หรือโวลต์แดง V ดังนี้

$$E_H = \frac{V}{d} \tag{2-36}$$

ความต่างศักย์หรือ โวลต์แดงที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า ความต่างศักย์ฮอลล์ (hall potential difference หรือ hall voltage) V_H พบว่า ความต่างศักย์ฮอลล์มีค่ามากที่สุด เมื่อแผ่นตัวนำบางทำจากสารกึ่งตัวนำ เช่น ซีลีคอน และเจอร์เมเนียม ส่วนตัวนำไฟฟ้าที่ดี ความต่างศักย์ฮอลล์จะมีค่าน้อยกว่ามากจากสมการ(2-36) จะได้ว่า

$$V_H = E_H d \tag{2-37}$$



รูปที่ 2.23 การวัดความต่างศักย์ฮอลล์ V_H

เราสามารถวัด V_H โดยต่อ มิลลิโวลต์มิเตอร์เข้ากับจุด x และจุด y ดังรูปที่ 2.23 ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สภาพผิวของ V_H ทราบได้จากเครื่องหมายที่อ่านได้จาก มิลลิโวลต์มิเตอร์

จากรูปที่ 2.23 ก พาหะประจุคืออิเล็กตรอนจึงมีประจุลบ ถ้าพาหะประจุมีประจุบวก ทิศของ V_d และ E_H จะตรงข้ามกับในรูป 2.23 ก แต่ทิศของ F_B และ E_E ยังคงเดิม ดังแสดงในรูป 2.23 ข ทำให้ประจุบวกถูกผลักไปที่ขอบด้านขวา ส่วนประจุลบถูกผลักไปที่ขอบด้านซ้าย และสภาพผิวของ V_H จะตรงข้ามกับกรณีที่พาหะประจุมีประจุลบ

จากรูปที่ 2.22 ค ขณะที่แรงแม่เหล็กและแรงไฟฟ้ามีขนาดเท่ากัน เราจะได้

$$(-e)E_H = (-e)V_d B \quad (2-38)$$

$$E_H = V_d B \quad (2-39)$$

จากสมการ(2-37) จะได้

$$V_H = E_H d \quad (2-40)$$

$$V_H = V_d B d \quad (2-41)$$

เนื่องจากอัตราเร็วลอยเลื่อน V_d มีค่า

$$V_d = \frac{I}{neA} \quad (2-42)$$

เมื่อ n คือจำนวนพาหะประจุต่อลูกบาศก์เมตรหรือความหนาแน่นของพาหะประจุ และ A คือพื้นที่หน้าตัดของแผ่นตัวนำบาง แทนสมการ(2-42)ลงในสมการ(2-41) จะได้

$$V_H = \frac{IBd}{neA} \quad (2-43)$$

เนื่องจาก $t = \frac{A}{d}$ คือความหนาของแผ่นตัวนำบาง ดังนั้น

$$V_H = \frac{IB}{net} \quad (2-44)$$

สมการ(2-44) เขียนได้ใหม่เป็น

$$B = neti^{-1}V_H \quad (2-45)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริมาณ $V_H I$ และ e ในสมการ (2 - 45) หาได้จากการวัด ส่วนค่า n ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่ใช้ทำหัววัด วัสดุที่เป็นสารกึ่งตัวนำจะมีจำนวนพาหะประจุน้อยกว่าตัวนำไฟฟ้าที่ดี แต่ก็ยังมีค่ามากพอที่จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าที่สามารถวัดได้ ส่วนฉนวนมีจำนวนพาหะประจุน้อยมาก แต่ก็ยอมให้กระแสไฟฟ้าปริมาณเล็กน้อยผ่าน จากการศึกษาพบว่า สารกึ่งตัวนำที่เจือสิ่งเจือปนมีค่า $n \cong 10^{22} \text{ m}^{-3}$ และโลหะทั่วไปมีค่า $n \cong 10^{28} \text{ m}^{-3}$ ดังนั้น เราจึงสามารถหาความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ไม่ทราบค่าจากสมการ (2 - 45) ได้

ความเข้มของสนามแม่เหล็กมีหน่วยในระบบเอสไอเป็นเทสลา (tesla) แทนด้วยสัญลักษณ์ T หน่วยเดิมของความเข้มของสนามแม่เหล็กคือ เกาส์ (gauss) แทนด้วยสัญลักษณ์ G โดยที่ $1 \text{ T} = 10^4 \text{ G}$

2.14 ฮอลล์ดีไวซ์ (Hall devices)

อุปกรณ์แมกเนติกเซนเซอร์ (Magnetic Sensor) จะทำหน้าที่เป็นตัวแปลงสนามแม่เหล็กให้อยู่ในรูปของสัญญาณไฟฟ้า อุปกรณ์แมกเนติกเซนเซอร์ที่สร้างจากสารกึ่งตัวนำ จะใช้ประโยชน์จากปรากฏการณ์ที่เรียกว่า “ปรากฏการณ์กัลวานอร์แมกเนติก (Galvanomagnetic Effects)” อันเกิดจากกระแสที่ไหลผ่านวัสดุ เกิดการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากสนามแม่เหล็ก หรือเรียกว่า “ปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall Effect)” สนามแม่เหล็กที่ตั้งฉากกับกระแสไฟฟ้า ทำให้เกิดแรงกระทำต่อประจุพาหะ เรียกว่า “แรงลอเรนทซ์ (Lorentz Force)” ผลทำให้เกิดสนามไฟฟ้าที่มีทิศทางตั้งฉากกับทิศทางของสนามแม่เหล็ก และทิศทางของกระแส

อุปกรณ์แมกเนติกเซนเซอร์ ที่สร้างจากสารกึ่งตัวนำ โดยทั่วไปจะเกิดผลที่เรียกว่า “ปรากฏการณ์กัลวานอร์แมกเนติก (Galvanomagnetic Effects)” หรือ “ปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall Effects)” และนำผลที่เกิดขึ้นไปใช้งาน ดังนั้นการศึกษาปรากฏการณ์กัลวานอร์แมกเนติก จะเป็นขั้นพื้นฐานในการศึกษาฮอลล์ดีไวซ์

2.14.1 ปรากฏการณ์กัลวานอร์แมกเนติก

หลักการต่าง ๆ ในทฤษฎีนี้จะถูกอธิบายด้วยการแก้สมการทางคณิตศาสตร์ สมมุติสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (N-type) ในขณะที่ไม่จ่ายสนามแม่เหล็ก ความหนาแน่นกระแส $J_n(0)$ จะเกิดขึ้นจากกระแสการแพร่ (Diffusion) และกระแสที่เกิดจากสนามไฟฟ้า (Drift) จะประมาณด้วยสมการ Boltzman

$$J_n(0) = \sigma_n \varepsilon + q \cdot D_n \cdot \nabla n \quad (2 - 46)$$

โดยที่ $\sigma_n = q \cdot \mu_n \cdot n$ เป็นความนำไฟฟ้าของอิเล็กตรอน (Electron) เมื่อไม่มีสนามแม่เหล็ก

$\varepsilon = \varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ เป็นสนามไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

n = ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน

$\mu_n = \frac{v_n}{|E|}$ ความคล่องตัวของอิเล็กตรอน

v_n = ความเร็วเฉลี่ยของอิเล็กตรอน

∇ = Gradient

เมื่อจ่ายสนามไฟฟ้าจะเกิดแรงกระทำต่อประจุพาหะขึ้นเรียกว่า “แรงลอเรนซ์ (Lorentz Force)”

$$F = q(v \times B) \quad (2-47)$$

โดยที่ v = ความเร็วของอิเล็กตรอน

B = สนามแม่เหล็ก

พิจารณาแรงลอเรนซ์ (Lorentz Force) ที่เกิดขึ้นในทิศทางเดียว ศักการกระเจิงของอิเล็กตรอน ทำให้ประมาณความหนาแน่นกระแสในขณะที่ย่ำสนามแม่เหล็กได้

$$J_n(B) \approx J_n(0) - \mu_n J_n(B) \times B \quad (2-48)$$

$J_n(B)$ เป็นความหนาแน่นในกระแสในขณะที่มีสนามแม่เหล็ก

ทำการ scalar product แล้วจัดสมการใหม่

$$J_n(B) \approx [J_n(0) + \mu_n B \times J_n(0) + \mu_n^2 B J_n(0) B] [1 + \mu_n B]^{-1} \quad (2-49)$$

ในสารกึ่งตัวนำ พลังงานการแพร่กระจายของอิเล็กตรอน จะขึ้นกับกลไกการแพร่ ผลที่ได้สามารถอธิบายในรูปของตัวแปร r_H ซึ่งเรียกว่า “แฟกเตอร์ฮอลล์ (Hall Factor)” โดยจะมีค่าขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ สนามแม่เหล็ก และตัวแปรอื่นๆ และสามารถหาค่า r_H ได้

$$r_H = \frac{\langle \tau^2 \rangle}{\langle \tau \rangle^2} \quad (2-50)$$

$$\langle \tau \rangle = \frac{\int_0^\infty \tau(E) E^{3/2} \exp(-E/k_B T) dE}{\int_0^\infty E^{3/2} \exp(-E/k_B T) dE} \quad (2-51)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\langle \tau^2 \rangle = \frac{\frac{4}{3\sqrt{\pi}} \int \tau^2(E) E^{3/2} \exp(-E/k_B T) dE}{\int E^{3/2} \exp(-E/k_B T) dE} \quad (2-52)$$

โดยที่ $\tau(E)$ คือ เวลาพักชั่วขณะ (Momentum relaxation time)

ในทางทฤษฎีแล้วสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ มีค่า $r_n = 1.18$ แต่จากการทดลองในแผ่นซิลิกอนชนิดเอ็น $r_n=1.15$ และชนิดพี $r_n=0.7$ ที่อุณหภูมิห้อง และมีความหนาแน่นต่ำ ค่าแฟคเตอร์ r_n จะมีผลต่อความคล่องตัวของประจุพาหะ ฉะนั้นความคล่องตัวของประจุพาหะฮอลล์ (Hall Mobility) มีค่าเป็น

$$\mu_n^* = r_n \mu_n \quad (2-53)$$

เมื่อนำค่า Hall mobility แทนในสมการที่ (2-49)

$$J_n(B) = \left[J_n(0) + \mu_n^* B \times J_n(0) + k(\mu_n^*)^2 B J_n(0) B \right] \cdot \left[1 + (\mu_n^* B)^2 \right] \quad (2-54)$$

k เป็นผลรวมของพลังงานเฉลี่ยสูง

ในสารกึ่งตัวนำที่มีรอยต่อแบบ โอห์มมิก (Ohmic Contact) และความหนาแน่นของประจุพาหะมีลักษณะการกระจายแบบ Gradients ∇n จะถูกตัดทิ้งทำให้สมการ (2-54) เปลี่ยนเป็น

$$J_n(B) = \sigma_{nB} \left[\varepsilon + \mu_n^* B \times \varepsilon + k(\mu_n^*)^2 (B \cdot E) B \right] \quad (2-55)$$

ความนำจะขึ้นอยู่กับสนามแม่เหล็ก

$$\sigma_{nB} = \sigma_n \left[1 + (\mu_n^* B)^2 \right]^{-1} \quad (2-56)$$

เมื่อสนามแม่เหล็ก (B) ตั้งฉากกับสนามไฟฟ้า ε ในกรณีของ $B \cdot \varepsilon = 0$ ฉะนั้นความหนาแน่นของกระแสจึงเปลี่ยนไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

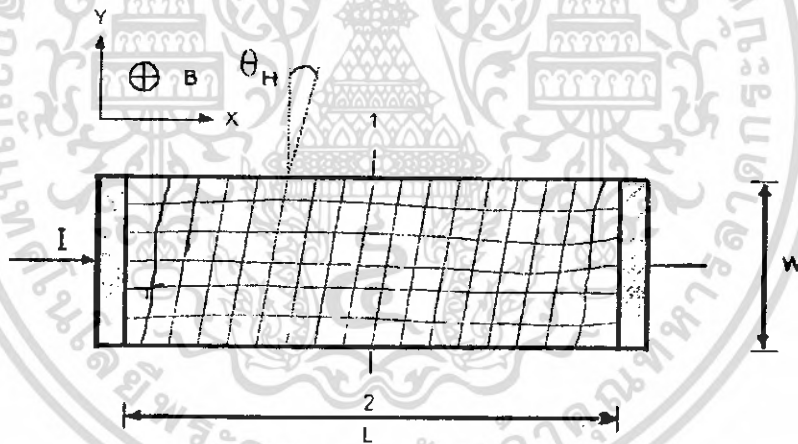
$$J_n(B) = \sigma_{nb}(\epsilon + \mu_n^* B \times \epsilon) \quad (2-57)$$

ซึ่งจากสมการที่ (2-57) เป็นการอธิบายผลของปรากฏการณ์กัลป์วานอร์แมกเนติก สมมติให้สนามไฟฟ้า ϵ และความหนาแน่นกระแส $J_n(B)$ อยู่ในระนาบ X-Y และสนามแม่เหล็ก (B) มีทิศทางไปทางแกน Z ดังนั้น $\epsilon = (\epsilon_x, \epsilon_y, 0)$, $J_n(B) = (J_{nx}, J_{ny}, 0)$ และ $B = (0, 0, B)$ จากสมการที่ (2-57) จะได้

$$J_{nx} = \sigma_n B (\epsilon_x - \mu_n^* B \epsilon_y) \quad (2-58)$$

$$J_{ny} = \sigma_n B (\epsilon_y - \mu_n^* B \epsilon_x) \quad (2-59)$$

ทั้ง 2 กรณี กล่าวถึงความยาว $L \gg W$ และความกว้าง $W \ll L$ แต่ในที่นี้จะกล่าวถึง $L \gg W$ ซึ่งความยาว L มีค่าเป็น infinite เพียงอย่างเดียวซึ่งแสดงในรูปที่ 2.26



รูปที่ 2.24 แสดงแรงดันฮอลล์ ระหว่าง ขั้ว 1 กับ 2 และทิศทางของกระแส (Line Current)

เมื่อพิจารณาเงื่อนไข $W \ll L$ ความหนาแน่นกระแส จะเกิดในระนาบ X เพียงอย่างเดียว $J_{ny} = 0$ ฉะนั้นจากสมการ (2-58) และ (2-59) จะได้

$$\epsilon_y = -\mu_n^* B \epsilon_x = R_H J_{nx} B \quad (2-60)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

$$R_H = \frac{-\mu_n^*}{\sigma_n} = \frac{-r_n}{q_n} \quad (2-61)$$

ซึ่ง R_H ถูกเรียกว่า “สัมประสิทธิ์ของฮอลล์ (Hall Coefficient)” โดยขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและสารเจือที่ โดปเข้าไปในสารกึ่งตัวนำ สนามไฟฟ้าฮอลล์ (Hall field) ทำให้เกิด equip potential lines ขึ้น โดยทำ เป็นมุม θ_H (Hall angle)

$$\tan \theta_H = \frac{\mathcal{E}_y}{\mathcal{E}_x} = -\mu_n^* B = \sigma_n R_H B \quad (2-62)$$

จากสมการที่ (2 - 61) ทำให้เราทราบว่า ความหนาแน่นของประจุพาหะต่ำทำให้ค่า สัมประสิทธิ์ของฮอลล์มีค่ามาก ดังนั้นสารกึ่งตัวนำจึงเป็นที่นิยมใช้มากกว่าโลหะ เมื่อกำหนดให้ Hall pate มีความหนา t และกระแสไหลผ่าน I จะสามารถแสดงแรงดันฮอลล์ (Hall Voltage) ได้จาก สมการที่ (2- 60)

$$V_H = \frac{R_H IB}{t} \quad (2-63)$$

ผลิตตอบสนองของความไว (sensitivity) คือแรงดันฮอลล์ต่อหนึ่งหน่วยกระแสและสนามแม่เหล็ก จะเป็น

$$s = \frac{V_H}{IB} = \frac{R_H}{t} = \frac{-r_n}{qnt} \quad (2-64)$$

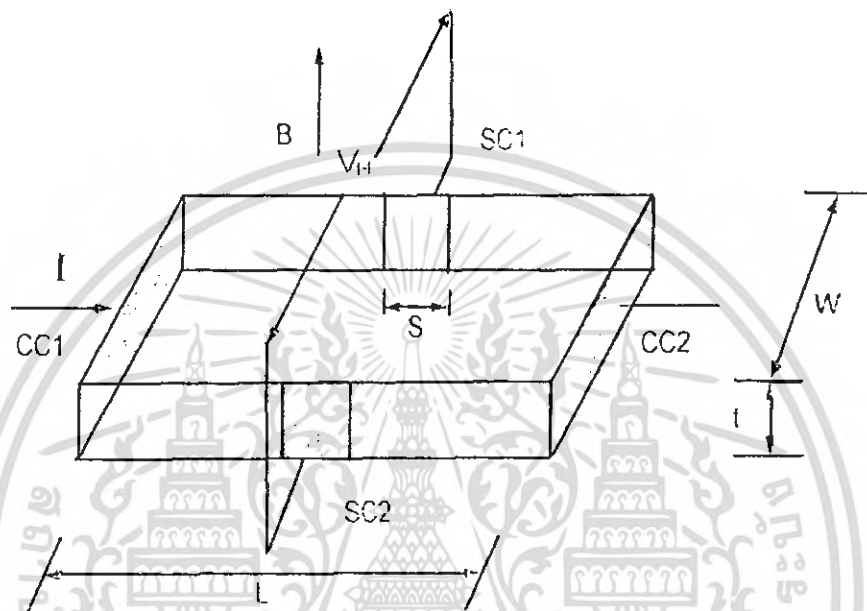
จะเห็นว่า Sensitivity ที่สูง จะมีความหนาแน่นของประจุพาหะมีค่าต่ำและฮอลล์เพลทจะต้องมีความหนาน้อย ๆ

2.14.2 แฟคเตอร์ G (Geometry Factor)

ฮอลล์เพลทของฮอลล์ดีไวซ์ โดยปกติแล้วจะถูกสร้างเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีความ หนาน้อยๆ วัสดุที่นำมาสร้างต้องมีความหนาแน่นต่ำ มี 4 ชั้น และรอยต่อระหว่างชั้นเป็นแบบ ไอห้มมิก ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.25 แรงดันฮอลล์จะวัดได้จากขั้ว SC1 และ SC2 จากสมการ(2 - 63)

จะสามารถหาแรงดันฮอลล์ได้ แต่ในฮอลล์เพลทที่มีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า จะขึ้นอยู่กับค่าแฟคเตอร์ G อยู่ด้วย ซึ่งแรงดันฮอลล์จะหาได้จาก

$$V_H = \frac{R_H G \cdot I \cdot B}{t} = \frac{G \cdot I \cdot B \cdot r_n}{qnt} \quad (2-65)$$



รูปที่ 2.25 แสดงรูปร่าง Hall plate รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

แฟคเตอร์ G เป็นค่าทางเรขาคณิตซึ่งเป็นผลมาจากรูปร่างของฮอลล์เพลท โดยขึ้นอยู่กับความยาว L ความกว้าง W ขนาดของขั้วเซนเซอร์คอนแทค ($SC1, SC2$) และมุมฮอลล์ (Hall angle)

ค่าแฟคเตอร์ G , ค่าประมาณเข้าใกล้ 1 ถ้าช่วงความยาวของฮอลล์เพลท L มีค่ามากๆ โดยอธิบายได้ว่ากระแสที่ไหลระหว่างขั้วทั้ง 2 จะประมาณเป็นแนวเส้นตรง ทำให้ไม่มีผลหรือ อาจมีแต่น้อยมากต่อแรงดันฮอลล์ ซึ่งสามารถหาได้จาก

$$G \approx \left[1 - \left(\frac{16}{\pi^2} \right) \exp \left(\frac{\pi L}{2W} \right) \frac{\theta_H}{\tan \theta_H} \right] \left[1 - \frac{2S \theta_H}{\pi W \tan \theta_H} \right] \quad (2-66)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับค่ามุมฮอลล์ (Hall angle) ที่มีค่าน้อยๆ เทอมแรกในวงเล็บ [] จะแสดงผลของระยะห่างระหว่างขั้วเทอร์เรนต์คอนแทค หรือความยาว L ขณะที่เทอมที่ 2 จะจำกัดขนาดของขั้วเซนเซอร์คอนแทค หรือขนาด s และค่าที่คำนวณได้จะใกล้เคียงมากกว่า 4% ค่า G จะประมาณเข้าใกล้ 1 ถ้า $\frac{L}{W} > 3$ และ $\frac{S}{W} < \frac{1}{20}$ และในทางตรงกันข้ามถ้า $L < W$ และ SC1, SC2 อยู่ตำแหน่ง $Y = \frac{L}{2}$ ค่า G จะประมาณค่าได้

$$G \approx 0.74 \frac{L}{W} \quad (2 - 67)$$

จากสมการที่ (2 - 66) เราสามารถแทนค่ากระแส I ที่ป้อน ให้กับขั้วเทอร์เรนต์คอนแทคให้เป็นแรงดัน V แทน และจะสามารถหา V_H ได้จาก

$$V_H = \mu_n^* \left[\frac{GW}{L} \right] B \quad (2 - 68)$$

กรณิ ในฮอลล์แพลตฟอร์มที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า เราสามารถค่าแฟกเตอร์ G ได้ดังนี้

$\frac{L}{W} > 3$	ค่า $G \approx 1$
$\frac{L}{W} < 1$	ค่า $G < 0.7$
$\frac{L}{W} \approx 1.35$	ค่า $G \approx 0.7$

จะเห็นว่าเมื่อต้องการค่าแรงดันฮอลล์สูงๆ จากสมการที่ (2 - 68) จะต้องให้ $\frac{L}{W}$ มีค่าต่ำๆ แต่เมื่อค่า $\frac{L}{W}$ ต่ำๆ ทำให้ค่า G มีค่าน้อย ดังนั้นค่า G จึงมีผลให้แรงดันฮอลล์ลดลง ฉะนั้นค่า $\frac{L}{W}$ จึงต้องเลือกให้เหมาะสม

2.14.3 ออฟเซ็ท

เกณฑ์ที่สำคัญของแมกเนติกเซนเซอร์ คือการตรวจจับสัญญาณแม่เหล็กต่ำๆ แล้วได้ผลของสัญญาณเอาต์พุตสูง ๆ สาเหตุอย่างหนึ่งของการจำกัดผลดังกล่าวคือ ออฟเซ็ท ซึ่งออฟเซ็ทเป็นค่าสัญญาณเอาต์พุต เมื่อไม่ได้จ่ายสนามแม่เหล็ก ($B=0$)

สาเหตุสำคัญของออฟเซ็ทอาจเกิดจากความไม่สมบูรณ์แบบ (imperfections) ของเทคโนโลยีในกระบวนการผลิต (process technology) การปรับซ็อนมาร์ค (Alignment) การดัดในกระบวนการบรรจุลงถึง (Packaging) และอายุการใช้งานของเซนเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.14.4 ความเป็นเชิงเส้น

ความเป็นเชิงเส้น (Linearity) เป็นค่าแสดงของสัญญาณเอาต์พุต เนื่องจากการเปลี่ยนค่าสัญญาณทางอินพุต โดยเมื่อสัญญาณอินพุตเปลี่ยนแปลงไปเท่าไรก็ตาม สัญญาณทางเอาต์พุตก็เปลี่ยนแปลงในลักษณะเชิงเส้น

2.14.5 ความไว

ความไว (sensitivity) คือผลตอบสนองของอัตราส่วนระหว่างสัญญาณเอาต์พุตต่อสัญญาณอินพุตซึ่งค่าความไว เป็นส่วนสำคัญที่สุด ที่บ่งบอกถึงความสามารถของเซนเซอร์ ที่สามารถรับรู้สนามแม่เหล็กที่ตื้นนั้น จะต้องมีการตอบสนองค่าสัญญาณเอาต์พุตค่ามาก ๆ ที่ค่าสนามแม่เหล็กต่ำๆ

ค่าความไว ที่มีค่าการไบแอสด้วยกระแสจะสามารถหาค่าได้จาก

$$S_i = \frac{V_H}{I \cdot B} = \frac{R_H G}{t} = \frac{G \cdot r_n}{qnt} \quad (2-69)$$

ตัวอย่าง สมมติให้วัสดุที่ใช้ทำ ฮอลล์แพลทเป็นแผ่นซิลิกอนชนิด N มีความหนาแน่นของสารเจือประมาณ $4.5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ดังนั้นสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ $R_H \approx -1.4 \times 10^{-3} \text{ C}^{-1} \text{ m}^3$ กำหนดให้ความยาว $L=300 \text{ um}$, ความกว้าง $W=100 \text{ um}$ และความยาว $t=20 \text{ um}$ มีค่าความต้านทานประมาณ $1.5 \times 10^3 \Omega$ ที่แรงดันไบแอส 10 โวลต์ สามารถนำกระแสประมาณ 6.7 mA จ่ายสนามแม่เหล็กได้มาถึง 1T สามารถคำนวณค่าแรงดันฮอลล์ $V_H \approx 0.46$ โวลต์ ค่าความคล่องตัวของประจุพาหะอิเล็กตรอน $\mu_n \approx 0.14 \text{ m}^2/\text{V-s}$ นำค่าต่างๆ เหล่านี้มาคำนวณค่าความไวประมาณ 70 V/A-T และเมื่อลดค่าความหนาแน่นครั้งหนึ่งเหลือ $t=10 \text{ um}$ ทำได้โดยลดเวลาในการแพร่สารเจือ เมื่อคำนวณค่าความไว จะได้ค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 700 V/A-T

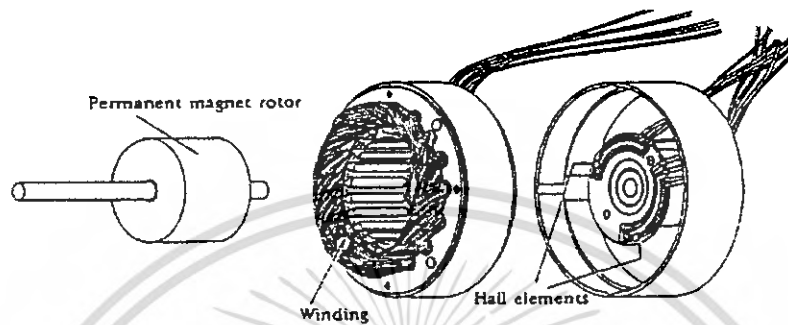
จากตัวอย่างจะเห็นได้ว่าค่าความหนาแน่นมีผลต่อความไวมาก ดังนั้นในการสร้างฮอลล์แพลทควรมีความหนาแน่นน้อยๆ สามารถทำได้โดยการแพร่ของสารเจือควรใช้เวลาน้อยๆ

2.15 ดีซีมอเตอร์ชนิดไม่ใช้แปรงถ่าน (Brushless DC Motor)

ดีซีมอเตอร์ชนิดไม่ใช้แปรงถ่านพัฒนามาจากดีซีมอเตอร์แบบใช้แปรงถ่านและนำมาใช้ร่วมกับ การใช้สารกึ่งตัวนำไฟฟ้ากำลัง ดีซีมอเตอร์ชนิดไม่ใช้แปรงถ่านเหมือนกับมอเตอร์ซึ่งได้นักกระแสดตรง ดีซีมอเตอร์สมัยใหม่จะไม่ใช้แปรงถ่าน (brushless motor) แต่จะใช้หัววัดสนามแม่เหล็กเป็นระบบประสาทคอยบอกให้แหล่งจ่ายไฟจ่ายกระแสให้สเตเตอร์ตามจังหวะที่กำหนด ระบบแบบนี้จะดีกว่าการใช้แปรงถ่านซึ่งมีข้อเสียหลายประการเช่นเกิดการ Spark ของกระแสไฟฟ้า

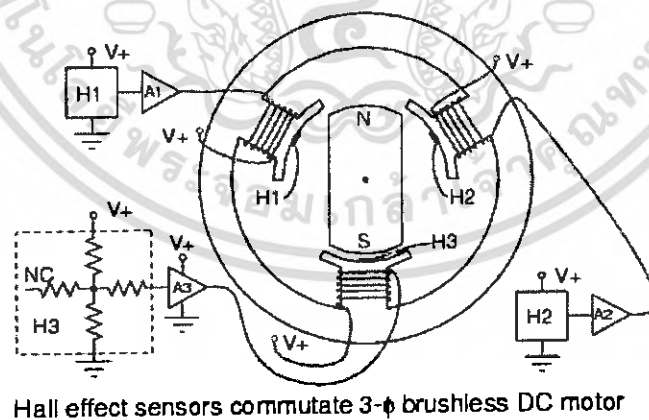
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดความร้อนมาก และเกิดการสึกหรอเพราะแปรงถ่านจะกดบนโรเตอร์ตลอดเวลา การใช้ เซนเซอร์สนามแม่เหล็กยังสามารถออกแบบใช้ในงานอื่นๆ ได้อีกมาก เช่น วัดมุม กระแส ตำแหน่ง ระยะทาง อุณหภูมิ แรง วัดระดับของเหลว การนับรอบ ในระบบเกียร์



รูปที่ 2.26 แสดงส่วนประกอบของคีมอเตอร์แบบไม่ใช้แปรงถ่าน

จากรูปที่ 2.28 แสดงให้เห็นถึงส่วนประกอบของคีมอเตอร์แบบไม่ใช้แปรงถ่านมีการพันขดลวดที่ตัวสเตเตอร์ แม่เหล็กถาวรที่ตัวโรเตอร์ และตัวเซนเซอร์ที่ใช้วัดความเข้มของสนามแม่เหล็ก

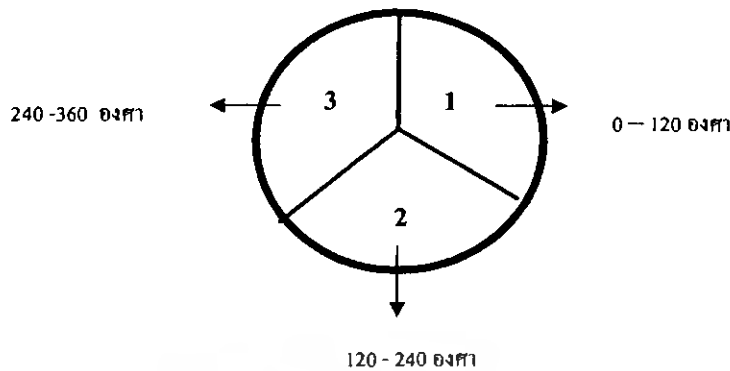


รูปที่ 2.27 แสดงการวางตำแหน่งของฮอลล์เซนเซอร์

จากรูปที่ 2.27 แสดงจำนวนของโพลซึ่งมอเตอร์ที่ใช้ในโครงการนี้ประกอบด้วยโพล

จำนวน 3 โพลและติดตั้งฮอลล์เซนเซอร์ทั้งหมด 3 ตัวเพื่อวัดระดับความเข้มของสนามแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.28 แสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของแกนโรเตอร์

จากรูปที่ 2.278 แสดงถึงเฟสการทำงานของมอเตอร์เนื่องจากหมุน 360 องศาเพราะฉะนั้นจึงแบ่งการทำงานได้ดังรูปที่ 2.28 คือ เฟส 1 จะหมุนทำงานในช่วง 0- 120 องศา เฟส 2 จะหมุนทำงานในช่วง 120- 240 องศา และเฟส 3 จะหมุนทำงานในช่วง 240- 360 องศา

2.16 อัตราทด

อัตราทด (velocity ratio) m_w คือ อัตราส่วนระหว่างความเร็วของล้อขับต่อความเร็วรอบของล้อตามสมการ

$$m_w = \frac{n_1}{n_2}$$

โดยที่ m_w คือ อัตราทด

n คือ ความเร็วรอบ rpm

2.17 แรงเสียดทาน

2.17.1 ความต้องการการเคลื่อนที่ของรถ (Automotive Resistance)

ในการเคลื่อนที่รถมีความต้านทานที่จะต้องพิจารณา คือ ความต้านทานจากลม ความต้านทานการหมุน เราได้นำค่าความต้านทานเนื่องจากแรงเสียดมาคิดเพียงอย่างเดียว

2.17.2 ความต้านทานเนื่องจากอากาศ (Air Resistance)

รถทุกชนิดที่วิ่งบนท้องถนนนั้นเมื่อสัมผัสกับถนนในขณะที่ล้อหมุนเพื่อวิ่งไปข้างหน้า จะเกิดแรงเสียดทานการหมุนก่อกับถนน และอีกอย่างหนึ่งคือ แรงต้านการหมุนจากรถเนื่องจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รถต้องวิ่งแหวกอากาศออกไปซึ่งที่ความเร็วต่ำ แรงต้านทานการหมุนจากลมจะน้อยมากจนไม่สามารถเปรียบเทียบกับแรงเสียดทานการหมุน แต่ถ้ารถวิ่งเร็วสูงแรงต้านทานจากลมจะมีผลต่อการขับเคลื่อนอย่างยิ่ง

2.17.3 ความต้านทานเนื่องจากการหมุน (Rolling Resistance)

ความต้านทานนี้เกิดเมื่อรถเคลื่อนที่ โดยมีองค์ประกอบ 3 อย่างคือ

2.17.3.1 ความต้านทานของการกระแทก (Impact Resistance) ผิวถนนที่ขรุขระทำให้ล้ออย่างยืดหยุ่นและเปลี่ยนไปตามรอยขรุขระ ถ้ารอยขรุขระรถมีมากหรือยางมีสภาพยืดหยุ่นไม่ดี จะเกิดการกระแทกขึ้นระหว่างยาง และผิวถนนขนาดของแรงกระแทกขึ้นอยู่กับวัตถุที่ทำพื้นถนน น้ำหนักรถ และความเร็ว

2.17.3.2 ความต้านทานเนื่องจากที่ผิว (Surface Resistance) คือ ความเสียดทานระหว่างยางกับผิวถนนระหว่างรถเคลื่อนที่ค่าของความต้านทานที่อยู่กับผิวถนนและสภาพพื้นถนนที่ขรุขระแห้งหรือเปียก หรือเหลวเป็นโคลน ผิวถนนที่แห้งจะมีค่าความต้านทานน้อยกว่าผิวถนนที่เปียกหรือเป็นโคลน

2.17.3.3 ความต้านทานภายในตัวรถ (Internal Resistance) จะเกิดขึ้นจากดัดปลิง ปืน เพลลา แกนล้อ เป็นต้น เมื่อชิ้นส่วนเหล่านี้เคลื่อนที่จะเกิดการเสียดสีกับชิ้นงานส่วนอื่นๆ ทำให้เกิดการสึกหรอ ปัจจัยที่มีผลต่อความเคลื่อนที่นี้คือ ชนิดของน้ำมันหล่อลื่นปริมาณอากาศในล้อและชนิดของยาง ขณะรถเคลื่อนที่นั้นความต้านทานที่ผิวถนนและความต้านทานในตัวรถจะค่อนข้างมีค่าคงที่ จะไม่ขึ้นอยู่กับความเร็วของรถ โดยมีความต้านทานของการกระแทกจะเพิ่มขึ้นตามความเร็วรถ

ตารางที่ 2.1 แสดงค่าของสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน

ชนิดของผิวสัมผัส	μ_s	μ_k
ยางบนคอนกรีต (แห้ง)	1.00	0.80
ยางบนคอนกรีต (เปียก)	0.30	0.25

บทที่ 3

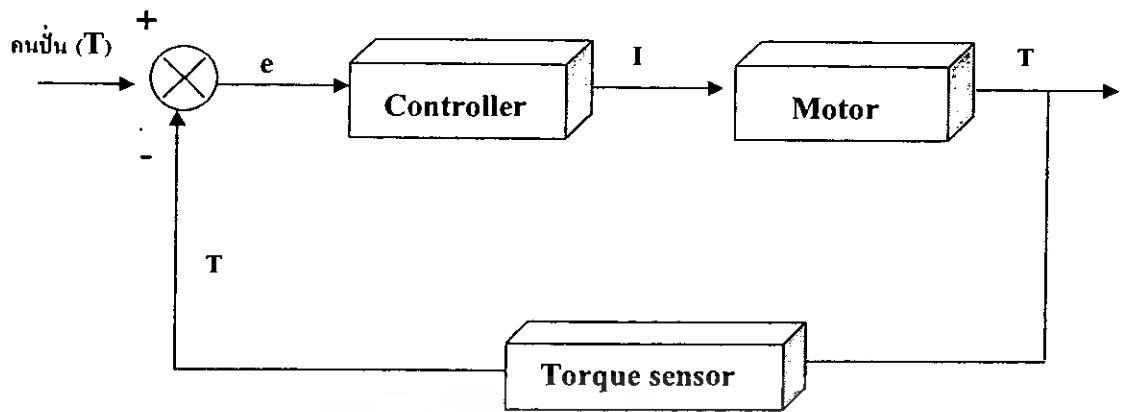
หลักการในการออกแบบ

3.1 กล่าวนำ

จากหลักการและทฤษฎีต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับหลักการงานของจักรยานไฟฟ้านี้สามารถทำการออกแบบลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์ได้ดังรูปที่ 3.1 ซึ่งมีลักษณะการควบคุมการทำงานตามรูปที่ 3.2 ซึ่งแสดงถึงบล็อกไดอะแกรมการทำงานของจักรยาน และส่วนที่สำคัญมากที่สุดคือ ส่วนของชุดขับเคลื่อนที่แบ่งส่วนย่อยที่สำคัญได้อีก 2 ส่วนดังรูปที่ 3.3

3.2 ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ของจักรยานไฟฟ้า

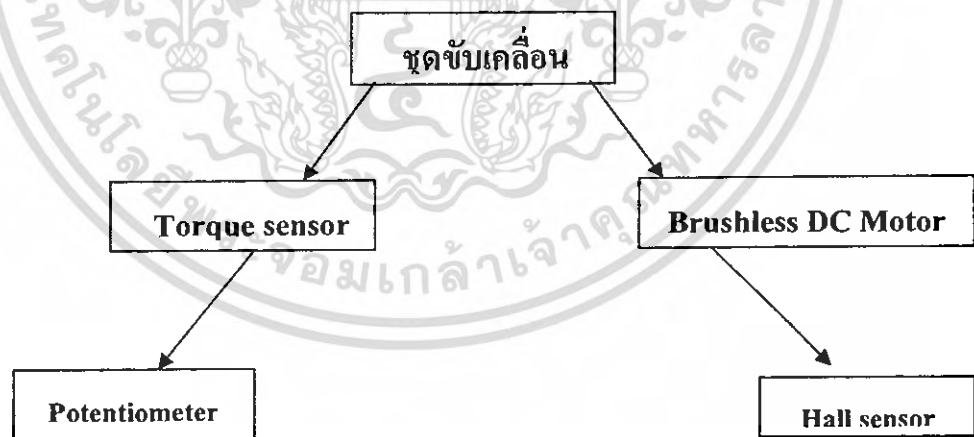




รูปที่ 3.2 แสดงถึงบล็อกไดอะแกรมการทำงานของจักรยาน

จากบล็อกไดอะแกรมแสดงให้เห็นว่าสิ่งที่ป้อนเข้ามาได้มาจากตัวผู้ปั่นซึ่งเริ่มแรกเมื่อปั่นจะเกิดแรงบิดที่ยังไม่มีการเปรียบเทียบ แรงบิดตัวนี้ตัวเข้ามาที่ตัวคอนโทรลเลอร์ และไปที่มอเตอร์ จากนั้นจะเกิดการวัดแรงบิดเกิดขึ้นที่ทอร์กเซนเซอร์เป็นค่าแรงบิดออกไปเปรียบเทียบกับผู้ปั่นตามรูป สรุปได้ว่าจักรยานคันนี้ใช้ ทอร์กเซนเซอร์ที่มีตัวโปเทนทิโอมิเตอร์เป็นตัววัดแบ็กย้อนกลับไปเปรียบเทียบค่า

3.3 ชุดขับเคลื่อน



รูปที่ 3.3 แสดงถึงส่วนประกอบที่สำคัญของชุดขับเคลื่อน

จากรูปแสดงให้เห็นว่าชุดขับเคลื่อนแบ่งออกเป็นส่วนที่สำคัญ 2 ส่วนคือ ส่วนแรกเป็นทอร์กเซนเซอร์ที่มีตัวโปเทนทิโอมิเตอร์มาช่วยในการวัดค่า โปเทนทิโอมิเตอร์สำหรับโครงการนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นแบบหมุน และส่วนที่ 2 เป็นมอเตอร์แบบไม่ใช้แปรงถ่านที่มีฮอลล์เซนเซอร์มาช่วยเป็นตัวบอกว่าจะให้จ่ายกระแสตรงตำแหน่งไหนของสเตเตอร์

3.3.1 ทอร์กเซนเซอร์ (Torque sensor)

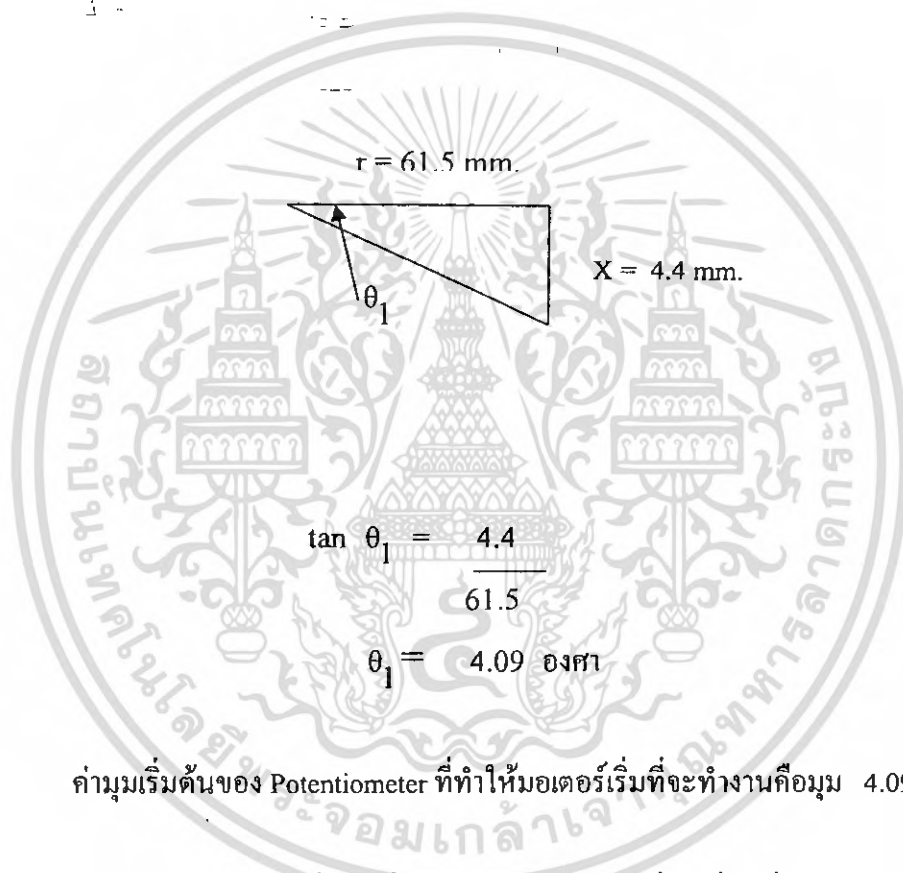
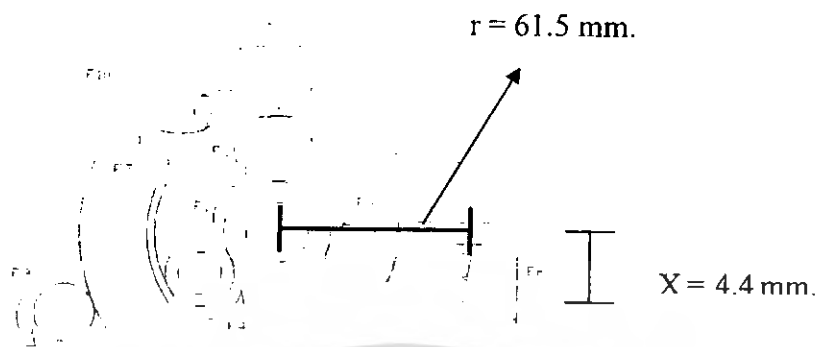
รูปที่ 3.4 กลไกการขับเคลื่อนขณะรถยังไม่ได้เคลื่อนที่

รูปที่ 3.5 กลไกการขับเคลื่อนขณะที่รถเคลื่อนที่

ขณะปั่นปกติ ยังไม่มีแรงเสียดทานจากภายนอกมากระทำ คือแรง friction ด้านนอกน้อยกว่าแรงสปริง ทำให้เมื่อปั่นที่ถีบบันไดไปข้างหน้าทำให้ F1 หมุน เมื่อ F1 หมุนทำให้ F2, F3, F4 หมุนด้วยอัตรา 30:15 (2:1) แต่เมื่อเกิด friction ด้านนอกมากกระทำมากกว่าแรงสปริงมีผลทำให้ F2, F3, F4 ไม่หมุนและทำให้ F5 เกิดการหมุนด้วยอัตรา 60:15 (4:1) ในลักษณะตามเข็มนาฬิกา ดังรูป ทำให้ไปกดสปริงลงและเนื่องจากเป็นชิ้นส่วนเดียวกันตามรูปที่ 7 จึงทำให้ F7 หมุนไปดัน F8 ซึ่งเป็น potentiometer เกิดการเคลื่อนที่เป็นมุมตามแรงที่มาจากรถเริ่มต้นตามรูปที่ 3.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.1.1 ค่ามุมเริ่มต้นของ Potentiometer



ค่ามุมเริ่มต้นของ Potentiometer ที่ทำให้มอเตอร์เริ่มที่จะทำงานคือมุม 4.09 องศา

3.3.1.2 Torque เริ่มต้นที่ทำให้ Potentiometer เริ่มเคลื่อนที่

$$T = F \times r$$

$$T = (9 \times 0.2) \text{ Nm.}$$

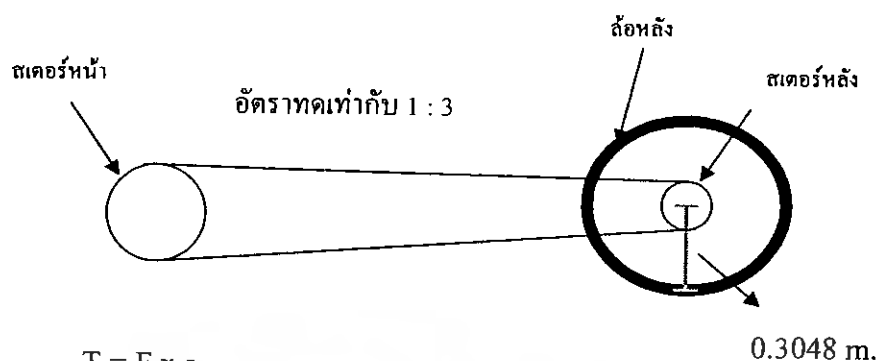
$$T = 1.8 \text{ Nm.}$$

ทำให้มอเตอร์เริ่มที่จะช่วยผ่อนแรง โดยแรงบิดมอเตอร์เริ่มต้นที่ค่า $T = 0.163 \text{ N}$. ซึ่งกิน

กระแส 2.9743 A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.1.3 ค่า Friction เริ่มต้นที่ทำให้มอเตอร์ทำงาน



$$T = F \times r$$

$$= 9 \times 0.2$$

$$= 1.8 \text{ Nm.}$$

$$T = F \times r$$

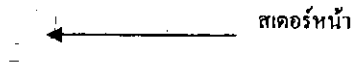
$$F = \frac{T}{r}$$

$$= \frac{1.8}{0.3048}$$

$$= 1.97 \text{ N.}$$

แรง Friction ที่เกิดที่ล้อที่มีค่าน้อยที่สุดที่ทำให้มอเตอร์เริ่มทำงานมีค่าเท่ากับ 1.97 N.

หลังจากที่ potentiometer เกิดการเคลื่อนที่เป็นมุมก็จะมีสัญญาณไปเข้าที่ขาอินพุทของ ตัวฮอลล์เซนเซอร์ซึ่งรับค่า 0-5 โวลต์ ค่าที่ได้จะแปรผันตรงกับการเคลื่อนที่เป็นมุมของ potentiometer จากนั้นตัวฮอลล์เซนเซอร์จะเป็นตัวคอยบอกว่าจะจ่ายกระแสตรงตำแหน่งไหน ของสเตเตอร์ซึ่งเป็นการปล่อยกระแสมาขับ motor คือ F9 หมุนอัตราทด 120:11 (10:1) มีผลทำให้ F10 หมุนตามด้วยอัตราทด 120:11 (11 :1) และ F10 คือ เฟืองด้านนอกที่คล้องกับ โซ่ด้านนอกก็เลยทำให้เฟืองหมุนตามทีมอเตอร์ขับ



รูปที่ 3.6 ชั้นส่วนด้านหน้าเฟืองที่ต่อกับมอเตอร์

รูปที่ 3.7 ชั้นส่วนด้านนอกของเฟืองที่ต่อกับมอเตอร์ซึ่งจะผ่านเฟืองด้านหน้าที่คล้องกับโซ่เพื่อส่งกำลังไปยังเฟืองตัวหลังซึ่งมีอัตราทด 16:21

3.4 การบอกเปอร์เซ็นต์การทำงานของมอเตอร์

การบอกเปอร์เซ็นต์การทำงานของมอเตอร์ถูกออกแบบให้มีขึ้นเนื่องจากเป็นตัวบอกถึงสถานการณ์ทำงานของมอเตอร์ว่าขณะที่กำลังปั่นอยู่นั้นมอเตอร์ทำงานช่วยผ่อนแรงอยู่ที่ระดับใด ซึ่งรับค่ามาจาก potentiometer



รูปที่ 3.8 กล้องสัญญาณไฟแสดงสถานะการทำงานของมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



0-5 V รับค่ามาจาก potentiometer จากนั้นก็มาเข้าวงจร Differential Amplifier แปลงค่าออกมาเป็น 0-100 %

3.5 ชิ้นส่วนทั้งหมด

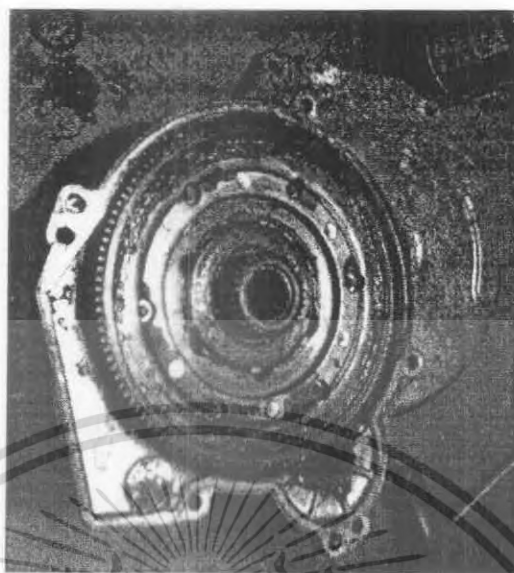


รูปที่ 3.9 ชุดทอร์เกเซนเซอร์



รูปที่ 3.10 การติดตั้งสอลล์เซนเซอร์เข้ากับชุดขับเคลื่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยนาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

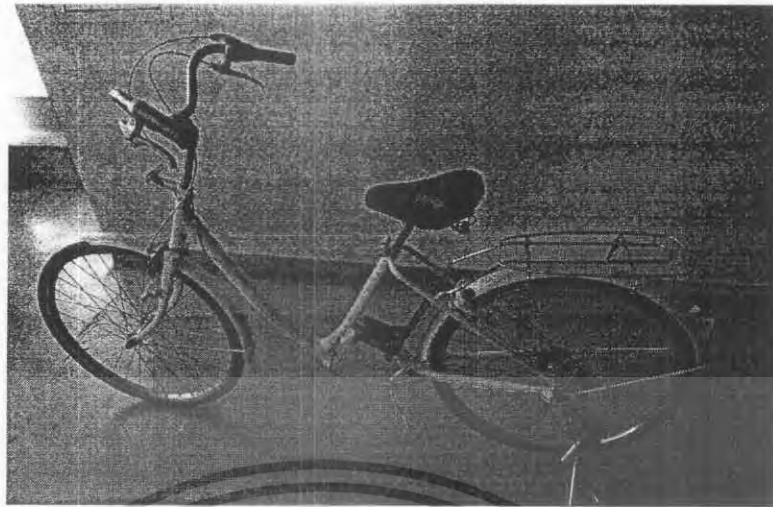


รูปที่ 3.11 ชิ้นส่วนคั่นหน้าเฟืองที่ต่อกับมอเตอร์



รูปที่ 3.12 แบตเตอรี่ที่ใช้กับจักรยาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.13 จักรยานขณะยังไม่ติดตั้งอุปกรณ์



รูปที่ 3.14 จักรยานเมื่อประกอบอุปกรณ์ครบแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

4.1 กล่าวนำ

การทดลองการทำงานของจักษยานไฟฟ้า สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ การทดลองการทำงานของวงจรต่างๆ และการทดลองการทำงานของจักษยานไฟฟ้า

4.2 การทดลองวัดระดับแรงดันของ Potentiometer

4.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- 1) Power Supply
- 2) Potentiometer
- 3) โวลต์มิเตอร์

4.2.2 ขั้นตอนการทดลอง

- 1) ตรวจสอบขั้วของ Potentiometer ให้ถูกต้องและจ่ายไฟ 24 V ให้กับวงจร
- 2) กดที่ Potentiometer เพื่อการเปลี่ยนแปลงระหว่างองศาและแรงดัน
- 3) ใช้โวลต์มิเตอร์วัดแรงดันที่เปลี่ยนไปและบันทึกผล

4.2.3 ผลการทดลอง

ตารางที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่ของ Potentiometer กับการจ่ายแรงดันไฟฟ้า

องศา	แรงดัน (V)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
0	0	0	0
60	5	5	5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.4 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองพบว่าในขณะที่ยังไม่กด Potentiometer วัดแรงดันได้ 0 V แต่เมื่อกด Potentiometer ลงจนสุดคือมุม 60 องศา วัดแรงดันได้ 5 V แสดงว่าเมื่อยังไม่กดจะไม่มีกระแสจ่ายแรงดันไฟฟ้า แต่เมื่อกดจนสุดจะเกิดการจ่ายแรงดันไฟฟ้าสูงสุดคือ 5 V ซึ่งค่าแรงดันที่ได้นี้จะมีผลต่อการจ่ายกระแสให้มอเตอร์

4.3 การทดลองวัดระดับการทำงานของมอเตอร์

4.3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- 1) Power Supply
- 2) ชุดขับเคลื่อนทั้งชุด
- 3) โวลต์มิเตอร์
- 4) กล้องแสดงผล

4.3.2 ขั้นตอนการทดลอง

- 1) ตรวจสอบขั้วของ Potentiometer ให้ถูกต้องและจ่ายไฟ 24 V ให้กับวงจร
- 2) กดที่ Potentiometer ให้เคลื่อนที่ไปตามมุมจนทำให้เกิดแรงดันตามที่กำหนด
- 3) ใช้โวลต์มิเตอร์วัดแรงดันที่เปลี่ยนไปและบันทึกผล
- 4) สังเกตที่กล้องแสดงผลว่ามีไฟขึ้นหรือไม่และบันทึกผล

4.3.3 ผลการทดลอง

ตารางที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหลอดไฟแสดงผลกับการทำงานของมอเตอร์

แรงดันที่เกิดขึ้น จากการทำให้ Potentiometer เคลื่อนที่ (V)	จำนวนไฟที่ติด (ดวง)				คิดเป็น เปอร์เซ็นต์ การทำงาน ของมอเตอร์
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	
0	0	0	0	0	0
1	2	2	2	2	20
2	4	4	4	4	40
3	6	6	6	6	60
4	8	8	8	8	80
5	10	10	10	10	100

4.3.4 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าการทำงานของมอเตอร์ขึ้นกับการเคลื่อนที่ของ Potentiometer ว่าเคลื่อนที่ไปเป็นมุมเท่าใด และยังสอดคล้องกับหลอดไฟที่แสดงถึงสถานะทำงานของมอเตอร์ คือ ถ้ามอเตอร์มีการช่วยในการผ่อนแรงมากหลอดไฟก็จะติดตามจำนวนที่ตั้งค่าไว้ซึ่งในการทดลองนี้กำหนดให้ทุก ๆ แรงดัน 1 โวลต์ให้หลอดไฟติดเพิ่มขึ้นทีละ 2 ดวง

4.4 ข้อมูลจำเพาะของจักรยานไฟฟ้า

ตารางที่ 4.3 แสดงข้อมูลจำเพาะของจักรยานไฟฟ้า

มอเตอร์ชนิดไม่ใช้แปรงถ่าน	160 Watt
แบตเตอรี่	ชนิดแห้ง 24 V
ความเร็วสูงสุด	20 กม./ชม.
ระยะทาง/การประจุไฟ	15 กม. (โดยประมาณ)
ระยะเวลาชาร์จ	4 ชม.
น้ำหนักโดยรวม	30 กก. (โดยประมาณ)
ค่า Torque เริ่มต้นที่ทำให้มอเตอร์ทำงาน	1.8 Nm.
ค่ามุมเริ่มต้นของ Potentiometer ที่ทำให้มอเตอร์ทำงาน	4.09 องศา
ค่า Torque เริ่มต้นที่ทำให้มอเตอร์ทำงาน	0.1636 Nm.
การกินกระแสเริ่มต้นของมอเตอร์	2.9743 A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุป

5.1 สรุป

จักรยานไฟฟ้าเป็นการออกแบบพัฒนาให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น ให้สามารถขับเคลื่อนด้วยระบบไฟฟ้า โดยไม่ต้องอาศัยแรงในการปั่นจักรยานมากนัก จริงๆ แล้วจักรยานไฟฟ้าคันนี้จะต้องใช้ทั้งกำลังของผู้ปั่นร่วมกับกำลังของมอเตอร์ที่มาใช้ขับเคลื่อน เนื่องจากกำลังของมอเตอร์นั้นมีขนาดที่จำกัด มอเตอร์จะช่วยได้ตามแรงบิดสูงสุดที่ตัวมันทำได้ ถ้าหากการขับเคลื่อนต้องใช้แรงบิดที่สูงกว่านั้น ก็ต้องเป็นหน้าที่ของผู้ปั่นที่จะออกแรงในส่วนที่เกินจากที่มอเตอร์จะช่วยได้ จักรยานไฟฟ้าคันนี้ยังมีจุดเด่นที่ต่างจากจักรยานไฟฟ้าทั่วไปคือ มีจอแสดงผลบอกระยะทาง และบอกถึงเปอร์เซ็นต์การช่วยออกจักรยาน ซึ่งวงจรการทำงานเหล่านี้ถูกควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ทำให้ผู้ปั่นทราบถึงสถานะการปั่นด้วย

5.2 ปัญหาที่พบ

จากการดำเนินการสร้างและทดลองโครงการพบว่ามีปัญหาเกิดขึ้นหลายประการ ซึ่งสรุปได้ดังนี้

1. อุปกรณ์ที่เลือกใช้บางครั้งไม่เหมาะสมเนื่องจากไม่ได้คำนึงถึงสภาพแวดล้อมเช่น ฝนตก ทำให้อุปกรณ์ที่ซื้อมาใช้ไม่ได้ต้องซื้อใหม่ ทำให้สิ้นเปลือง
2. การสื่อสารกันภายในทีมผู้วิจัยไม่ละเอียดครอบคลุมพอ ทำให้เข้าใจไม่ตรงกันเกิดความล่าช้าในการทำงาน
3. การออกแบบบอร์ดเซนเซอร์ผู้วิจัยคำนึงถึงการเอาไปใช้งานจริงน้อยเกินไป ทำให้ต้องเปลี่ยนการออกแบบใหม่หลายครั้งทำให้เกิดความล่าช้าในการประกอบเข้ากับจักรยาน
4. ฟิวส์ที่ป้องกันแบตเตอรี่ขาดหลายครั้ง เนื่องจากผู้วิจัยไม่มีความรอบคอบในการจ่ายไฟให้กับแบตเตอรี่
5. ทีมขาดความร่วมมือที่ดีทำให้งานทุกอย่างไปอยู่ที่คนเพียงคนเท่านั้น งานจึงล่าช้ามาก

5.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา

ในการพัฒนาจักษยานไฟฟ้าให้มีความสามารถในการทำงานได้ดีขึ้นสามารถพัฒนาโครงการได้ดังนี้

1. พัฒนาให้รถจักษยานมีน้ำหนักโดยรวมน้อยกว่านี้
2. พัฒนาให้มีการชาร์จแบตเตอรี่ในขณะที่มีการปั่นจักษยานด้วยเท้า
3. พัฒนาให้มีไฟหน้าและไฟท้ายเพื่อความปลอดภัยในการขับขี่เวลากลางคืน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

วิเคราะห์และการออกแบบระบบการควบคุมมอเตอร์ ผู้แต่ง ผศ. โยชิน เปรมปราณีรักษ์

พิเชษฐ คงชนะ, อติศักดิ์ เกิดมุสิก:ฮอลล์ดีไวซ์, ปริญญา นิพนธ์, ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์,
คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2543

จเร ดั่งศิริเสถียร, คำเนิน พันตัน, สมเกียรติ เลียดประดม : จักรยานไฟฟ้าเกียร์อัตโนมัติ, ปริญญา
นิพนธ์, สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม, คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม,สถาบันเทคโนโลยีพระจอม
เกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2548

หัววัดสนามแม่เหล็ก :<http://science.psu.ac.th/~physics/Hall-effect%20probe.pdf>



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3503
RATIOMETRIC,
LINEAR
HALL-EFFECT SENSORS



Allegro MicroSystems, Inc. reserves the right to make, from time to time, such departures from the detail specifications as may be required to permit improvements in the design of its products.

The information included herein is believed to be accurate and reliable. However, Allegro MicroSystems, Inc. assumes no responsibility for its use; nor for any infringements of patents or other rights of third parties which may result from its use.



115 Northeast Cutoff, Box 15036
Worcester, Massachusetts 01615-0036 (508) 853-5000

บริษัทนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ยัดให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A3503

Ratiometric Linear Hall Effect Sensors

Discontinued Product

These parts are no longer in production. The device should not be purchased for new design applications. Samples are no longer available.

Date of status change: October 31, 2005

Recommended Substitutions:

The drop-in replacement is the A1302, with a more sensitive option also available, the A1301.

NOTE: For detailed information on purchasing options, contact your local Allegro field applications engineer or sales representative.

Allegro MicroSystems, Inc. reserves the right to make, from time to time, revisions to the anticipated product life cycle plan for a product to accommodate changes in production capabilities, alternative product availabilities, or market demand. The information included herein is believed to be accurate and reliable. However, Allegro MicroSystems, Inc. assumes no responsibility for its use; nor for any infringements of patents or other rights of third parties which may result from its use.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3503

Data Sheet
27501C

RATIOMETRIC, LINEAR HALL-EFFECT SENSORS

The UGN3503LT, UGN3503U, and UGN3503UA Hall-effect sensors accurately track extremely small changes in magnetic flux density—changes generally too small to operate Hall-effect switches.

As motion detectors, gear tooth sensors, and proximity detectors, they are magnetically driven mirrors of mechanical events. As sensitive monitors of electromagnets, they can effectively measure a system's performance with negligible system loading while providing isolation from contaminated and electrically noisy environments.

Each Hall-effect integrated circuit includes a Hall sensing element, linear amplifier, and emitter-follower output stage. Problems associated with handling tiny analog signals are minimized by having the Hall cell and amplifier on a single chip.

Three package styles provide a magnetically optimized package for most applications. Package suffix 'LT' is a miniature SOT-89/TO-243AA transistor package for surface-mount applications; suffix 'U' is a miniature three-lead plastic SIP, while 'UA' is a three-lead ultra-mini-SIP. All devices are rated for continuous operation over the temperature range of -20°C to +85°C.

FEATURES

- Extremely Sensitive
- Flat Response to 23 kHz
- Low-Noise Output
- 4.5 V to 6 V Operation
- Magnetically Optimized Package

Pinning is shown viewed from branded side.

Dwg. PH-006

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

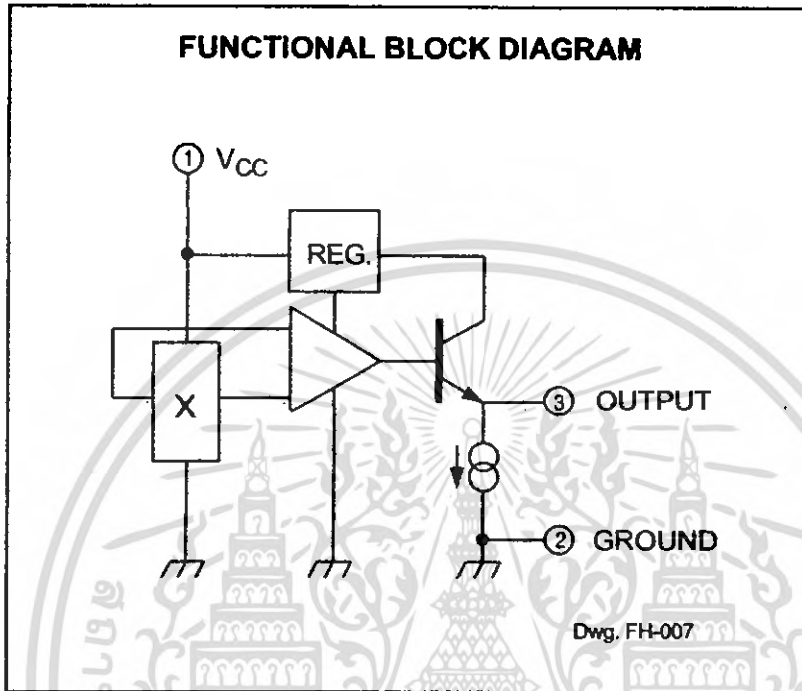
Supply Voltage, V_{CC}	8 V
Magnetic Flux Density, B	Unlimited
Operating Temperature Range,	
T_A	-20°C to +85°C
Storage Temperature Range,	
T_S	-65°C to +150°C

Always order by complete part number, e.g., **UGN3503UA**.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3503
RATIOMETRIC,
LINEAR
HALL-EFFECT SENSORS



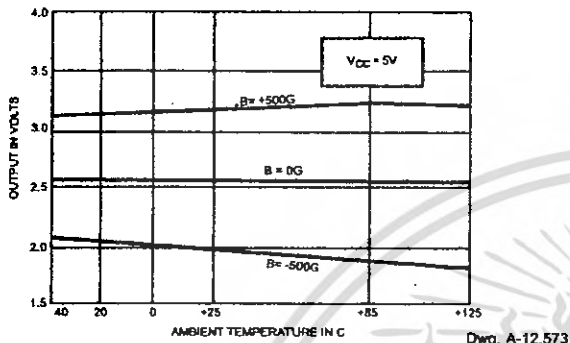
ELECTRICAL CHARACTERISTICS at $T_A = +25^\circ\text{C}$, $V_{CC} = 5\text{V}$

Characteristic	Symbol	Test Conditions	Limits			Units
			Min.	Typ.	Max.	
Operating Voltage	V_{CC}		4.5	—	6.0	V
Supply Current	I_{CC}		—	9.0	13	mA
Quiescent Output Voltage	V_{OUT}	$B = 0\text{ G}$	2.25	2.50	2.75	V
Sensitivity	ΔV_{OUT}	$B = 0\text{ G to } \pm 900\text{ G}$	0.75	1.30	1.75	mV/G
Bandwidth (-3 dB)	BW		—	23	—	kHz
Broadband Output Noise	V_{out}	$BW = 10\text{ Hz to } 10\text{ kHz}$	—	90	—	μV
Output Resistance	R_{OUT}		—	50	220	Ω

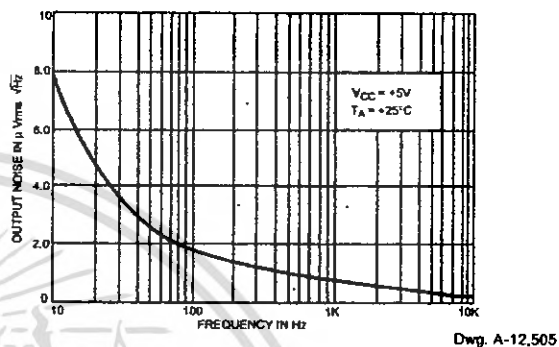
All output-voltage measurements are made with a voltmeter having an input impedance of at least 10 k Ω .
 Magnetic flux density is measured at most sensitive area of device located 0.0165" (0.42 mm) below the branded face of the 'U' package; 0.0195" (0.50 mm) below the branded face of the 'UA' package; and 0.0305" (0.775 mm) below the branded face of the 'LT' package.

3503 RATIOMETRIC, LINEAR HALL-EFFECT SENSORS

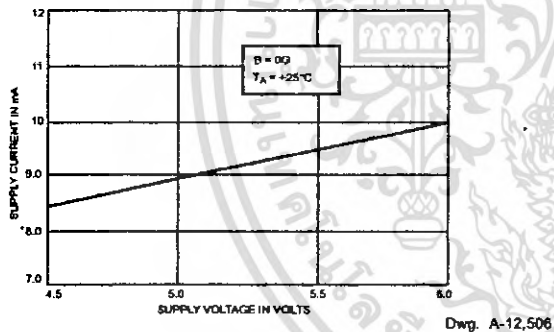
OUTPUT VOLTAGE AS A FUNCTION OF TEMPERATURE



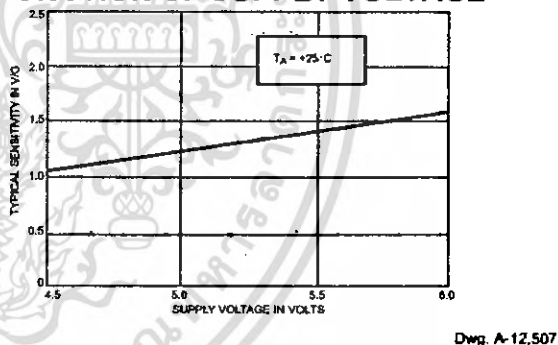
OUTPUT NOISE AS A FUNCTION OF FREQUENCY



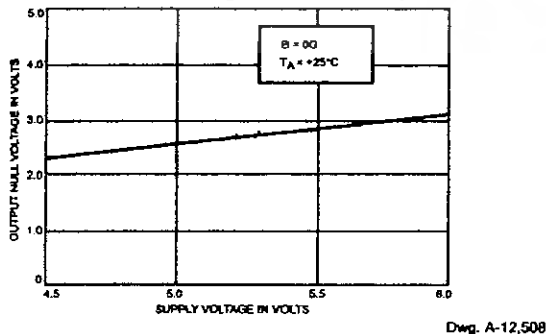
SUPPLY CURRENT AS A FUNCTION OF SUPPLY VOLTAGE



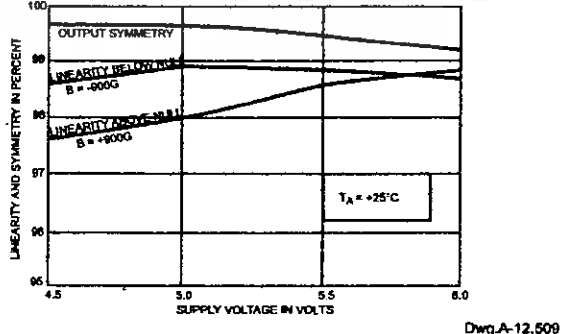
DEVICE SENSITIVITY AS A FUNCTION OF SUPPLY VOLTAGE



OUTPUT NULL VOLTAGE AS A FUNCTION OF SUPPLY VOLTAGE

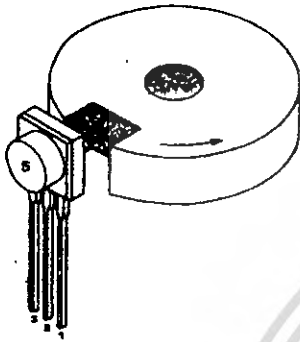


LINEARITY AND SYMMETRY AS A FUNCTION OF SUPPLY VOLTAGE



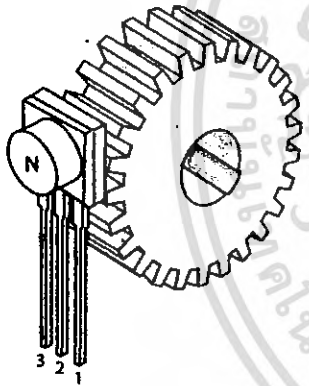
3503 RATIOMETRIC, LINEAR HALL-EFFECT SENSORS

NOTCH SENSOR



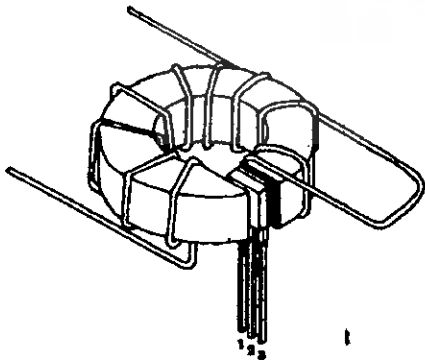
Dwg. A-12,574

GEAR TOOTH SENSOR



Dwg. A-12,512

CURRENT MONITOR



Dwg. A-12,513

OPERATION

The output null voltage ($B = 0$ G) is nominally one-half the supply voltage. A south magnetic pole, presented to the branded face of the Hall-effect sensor will drive the output higher than the null voltage level. A north magnetic pole will drive the output below the null level.

In operation, instantaneous and proportional output-voltage levels are dependent on magnetic flux density at the most sensitive area of the device. Greatest sensitivity is obtained with a supply voltage of 6 V, but at the cost of increased supply current and a slight loss of output symmetry. The sensor's output is usually capacitively coupled to an amplifier that boosts the output above the millivolt level.

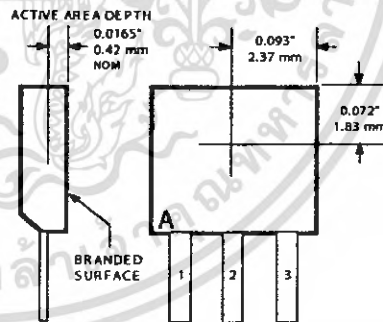
In two applications shown, a permanent bias magnet is attached with epoxy glue to the back of the epoxy package. The presence of ferrous material at the face of the package acts as a flux concentrator.

The south pole of a magnet is attached to the back of the package if the Hall-effect IC is to sense the presence of ferrous material. The north pole of a magnet is attached to the back surface if the integrated circuit is to sense the absence of ferrous material.

Calibrated linear Hall devices, which can be used to determine the actual flux density presented to the sensor in a particular application, are available.

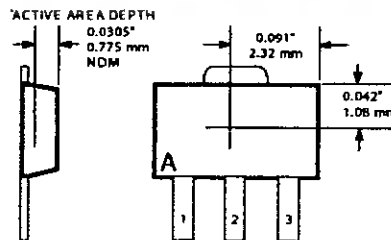
SENSOR LOCATIONS

SUFFIX "U"



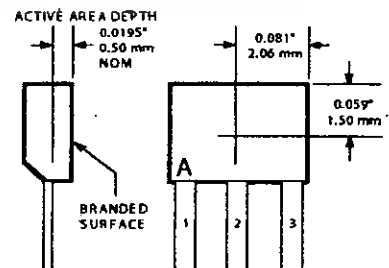
Dwg. MH-002-50

SUFFIX "LT"



Dwg. MH-008-9A

SUFFIX "UA"



Dwg. MH-011-3D



115 Northeast Cutoff, Box 15036
Worcester, Massachusetts 01615-0036 (508) 853-5000

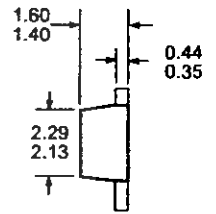
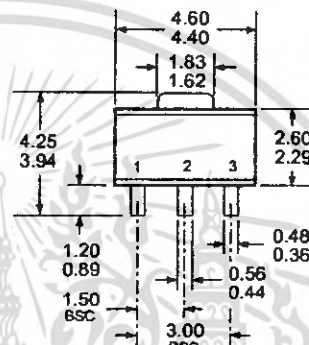
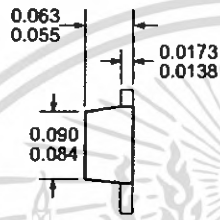
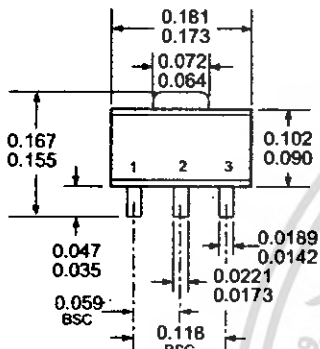
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3503 RATIOMETRIC, LINEAR HALL-EFFECT SENSORS

UGN3503LT (SOT89/TO-243AA)

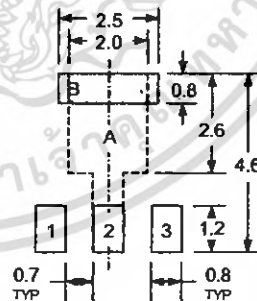
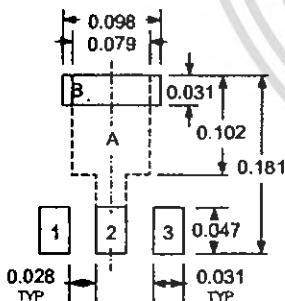
Dimensions in Inches
(for reference only)

Dimensions in Millimeters
(controlling dimensions)



Dwg. MA-009-3A in

Dwg. MA-009-3A mm



Pads 1, 2, 3, and A — Standard SOT89 Layout
Pads 1, 2, 3, and B — Low-Stress Version
Pads 1, 2, and 3 only — Lowest Stress, But Not Self Aligning

Pads 1, 2, 3, and A — Standard SOT89 Layout
Pads 1, 2, 3, and B — Low-Stress Version
Pads 1, 2, and 3 only — Lowest Stress, But Not Self Aligning

Dwg. MA-012-3 in

Dwg. MA-012-3 mm

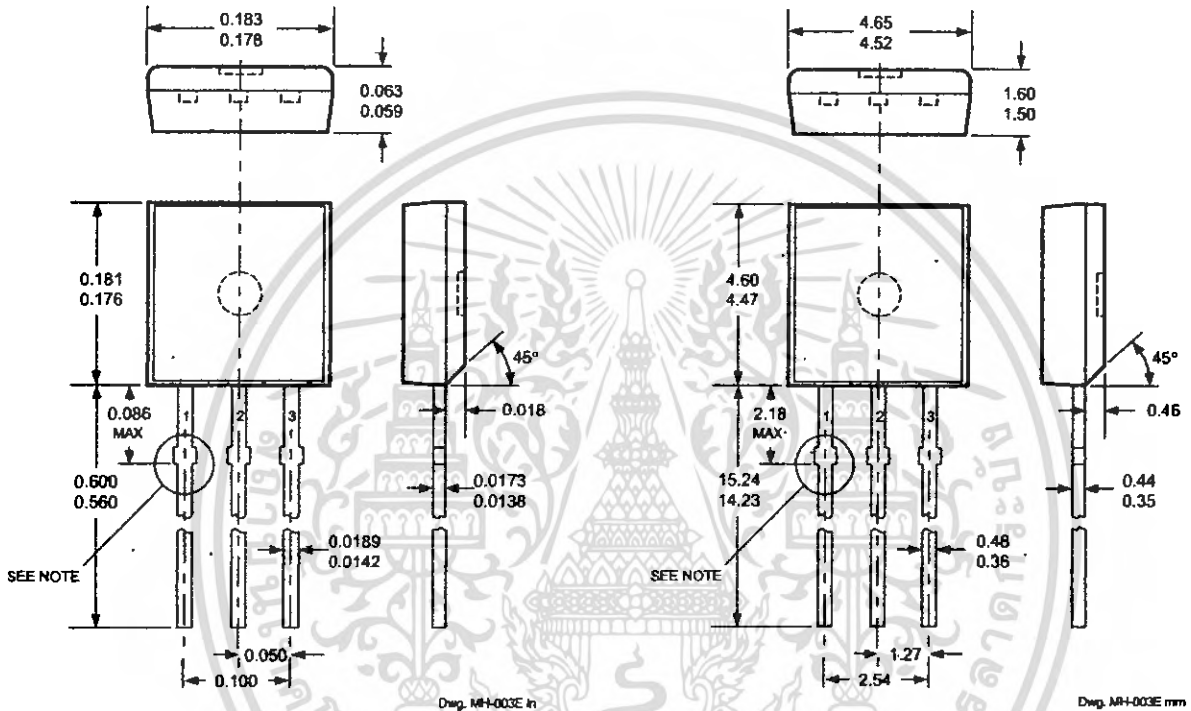
- NOTES:
- Exact body and lead configuration at vendor's option within limits shown.
 - Supplied in bulk pack (500 pieces per bag) or add "TR" to part number for tape and reel.
 - Only low-temperature ($\leq 240^\circ\text{C}$) reflow-soldering techniques are recommended for SOT89 devices.

**3503
RATIOMETRIC,
LINEAR
HALL-EFFECT SENSORS**

UGN3503U

Dimensions in Inches
(controlling dimensions)

Dimensions in Millimeters
(for reference only)



- NOTES: 1. Tolerances on package height and width represent allowable mold offsets. Dimensions given are measured at the widest point (parting line).
2. Exact body and lead configuration at vendor's option within limits shown.
3. Height does not include mold gate flash.
4. Recommended minimum PWB hole diameter to clear transition area is 0.035" (0.89 mm).
5. Minimum lead length was 0.500" (12.70 mm). If existing product to the original specifications is not acceptable, contact sales office before ordering.



115 Northeast Cutoff, Box 15036
Worcester, Massachusetts 01615-0036 (508) 853-5000

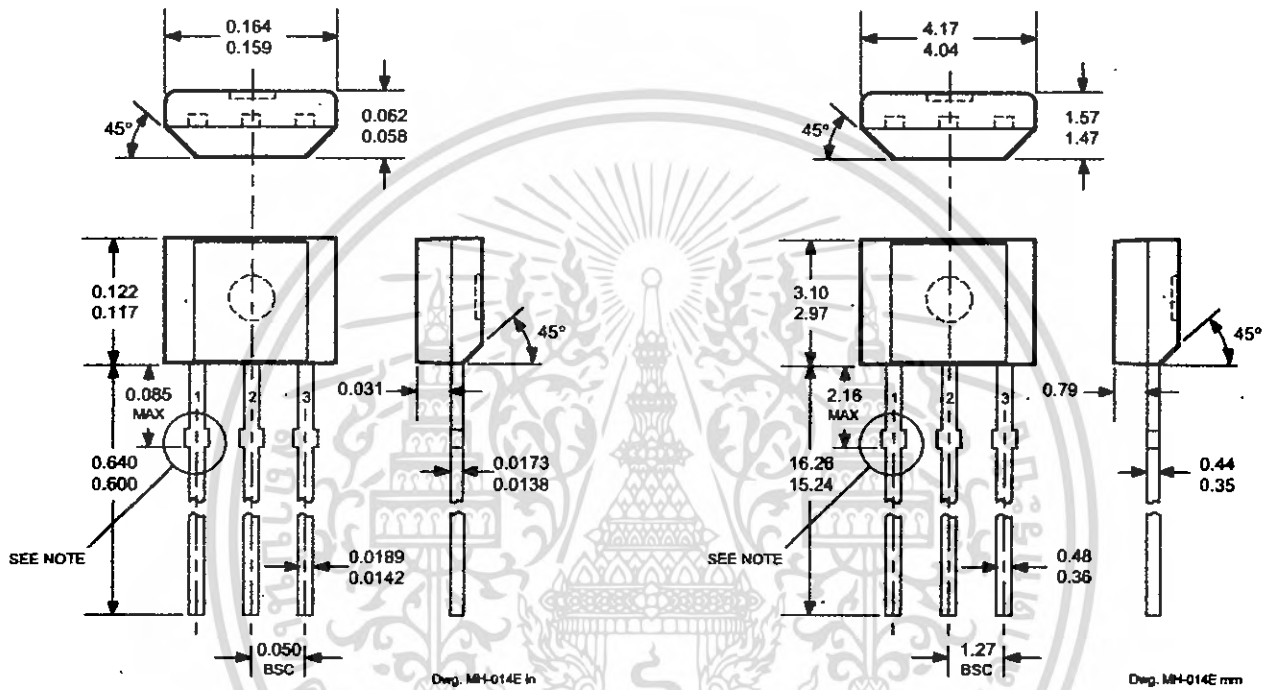
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3503
RATIOMETRIC,
LINEAR
HALL-EFFECT SENSORS

UGN3503UA

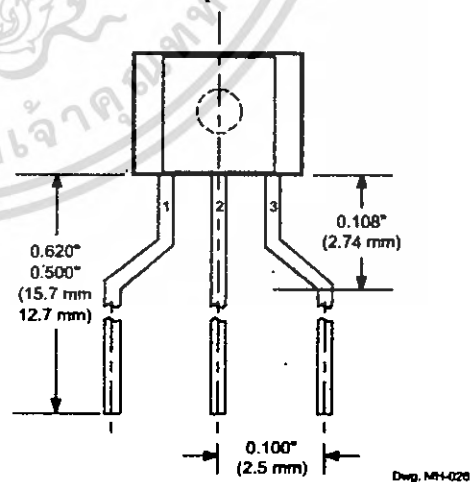
Dimensions in Inches
(controlling dimensions)

Dimensions in Millimeters
(for reference only)



Radial Lead Form (order UGN3503UA-LC)

- NOTES:
1. Tolerances on package height and width represent allowable mold offsets. Dimensions given are measured at the widest point (parting line).
 2. Exact body and lead configuration at vendor's option within limits shown.
 3. Height does not include mold gate flash.
 4. Recommended minimum PWB hole diameter to clear transition area is 0.035" (0.89 mm).
 5. Where no tolerance is specified, dimension is nominal.
 6. Supplied in bulk pack (500 pieces per bag).



NOTE: Lead-form dimensions are the nominals produced on the forming equipment. No dimensional tolerance is implied or guaranteed for bulk packaging (500 pieces per bag).