

รถไฟฟ้าขับเคลื่อนสี่ล้อ

FOUR-WHEEL DRIVE ELECTRIC CAR

โสภณ สวัสดิ์นาวิน
SOPHON SAWATNAVIN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2549

ISBN 974-15-2664-4

รถไฟฟ้าขับเคลื่อนสี่ล้อ

FOUR - WHEEL DRIVE ELECTRIC CAR

โสภณ สวัสดิ์นาวิน

SOPHON SAWATNAVIN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2549

ISBN 974-15-2664-4

FOUR - WHEEL DRIVE ELECTRIC CAR

SOPHON SAWATNAVIN

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2006

ISBN 974-15-2664-4

COPYRIGHT 2006

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	รถไฟฟ้าขับเคลื่อนสี่ล้อ
นักศึกษา	นายโสภณ สวัสดิ์นาวิน
รหัสนักศึกษา	44061046
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2549
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ประภาส ไพรสุวรรณ

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอถึงหลักการทำงานของรถไฟฟ้าขับเคลื่อนสี่ล้อโดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสี่ตัวเป็นตัวขับเคลื่อน ซึ่งรถไฟฟ้าขับเคลื่อนสี่ล้อนี้จะประกอบไปด้วยส่วนหลักสองส่วนคือ ชุดวงจรขับเคลื่อนกับชุดคิฟเฟอเรนเชียลมอเตอร์ ส่วนที่หนึ่งใช้หลักการของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์เป็นตัวควบคุมความเร็วของมอเตอร์ ส่วนที่สองใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรม 4 ตัว แยกอิสระทางกลแต่ต่ออนุกรมกันทางไฟฟ้า 2 ตัว และขนานกัน 2 ชุด เพื่อทดแทนชุดคิฟเฟอเรนเชียลเกียร์ของรถยนต์ที่กั้นอยู่ทั่วไป และไม่มีอาการท้ายปัดเวลาเลี้ยวโค้งและสามารถออกตัวได้อย่างราบเรียบ นุ่มนวลกว่ารถไฟฟ้าทั่วไป นอกจากนั้นยังคำนึงถึงการออกแบบในการใช้งานของแบตเตอรี่และการออกแบบโครงสร้างของรถยนต์ที่เหมาะสมด้วย

Thesis Title	Four - wheel drive electric car
Student	Mr. Sophon Sawatnavin
Student ID.	44061046
Degree	Master of Engineering
Programme	Electrical Engineering
Year	2006
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Prapas Prisuwan

ABSTRACT

The thesis presents the principles of a four - wheel drive electric car technique system consisting of two parts. The first part is an electronic drive circuit, and the second one is a differential motor. The electronic drive circuit is a dc – dc buck converter to control speed ranges of the motor, and the differential motor system consists of four DC motors divided into two parts. However, two - motors series connection and two parallel parts for replacing the differential gear is available in this car. It is found that the drive system operates smoother than the general electric car. In addition, the optimized design of battery and car structure are considered.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้อย่างดีด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาจาก รศ.ประภษา ไพรสุวรรณ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์, ผศ.ดร.อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านอาจารย์ทั้งสองท่าน และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณ บริษัทเอลิท โฟร์คลิฟ พาร์ท แอนด์ เซอร์วิส จำกัด ที่ให้ความช่วยเหลือและให้คำแนะนำ

ขอกราบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุก ๆ ท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้กับข้าพเจ้า

ขอขอบคุณบัณฑิตศึกษาและบัณฑิตวิทยาลัยคณะวิศวกรรมศาสตร์ที่ให้ความช่วยเหลือในเรื่องต่างๆ

สุดท้ายนี้ ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาและครอบครัวของข้าพเจ้าที่เป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนในทุกเรื่องๆ ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี คุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ข้าพเจ้าขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

โสภณ สวัสดิ์นาวิน

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	IX
สารบัญรูป.....	X
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	3
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.6 ขั้นตอนการศึกษา.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 หลักการของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง.....	5
2.2 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	7
2.2.1 คุณสมบัติของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรม.....	9
2.2.2 ผลของการนำมอเตอร์มาต่ออนุกรมทางไฟฟ้า.....	10
2.2.3 การควบคุมความเร็วของมอเตอร์.....	11
2.2.4 การกลับทางหมุนของมอเตอร์.....	11
2.3 หลักการเบื้องต้นการควบคุมความเร็วของมอเตอร์แบบชอปเปอร์.....	12
2.3.1 เทคนิคในการควบคุมแบบ Chopper.....	14
2.3.2 เทคนิคการควบคุมแบบ Constant frequency TRC.....	15
2.3.3 การวิเคราะห์ในโหมดการนำกระแสต่อเนื่อง.....	16
2.3.4 ช่วงรอยต่อระหว่างโหมดการนำกระแสต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง.....	17
2.3.5 ริปเปิ้ลของแรงดันทางด้านเอาต์พุต.....	19

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4 การควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	20
2.4.1 ปรับแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าขดลวดสนามแม่เหล็ก.....	20
2.4.2 ปรับแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าขดลวดอาร์เมเจอร์.....	20
2.4.3 ปรับแรงดันและกระแสไฟฟ้า ที่ป้อนเข้าขดลวดอาร์เมเจอร์และขดลวด สนามแม่เหล็กไปพร้อมๆกัน	21
2.5 เครื่องสับไฟฟ้า (Chopper).....	21
2.6 การควบคุมมอเตอร์แบบ 4 จตุภาค (4 – Quadrant control).....	22
2.7 มอสเฟตกำลัง (POWER MOSFET).....	27
2.7.1 วงจรสมมูลของมอสเฟต.....	28
2.7.2 เทคโนโลยีของมอส.....	28
2.7.3 โครงสร้างของมอสเฟต.....	30
2.7.4 ทฤษฎีการทำงานของมอสเฟต.....	31
2.7.5 สัญลักษณ์ของมอสเฟต.....	36
2.7.6 ชนิดของมอสเฟต.....	37
2.7.7 แรงดันสไปค์.....	39
2.7.8 การขนานมอสเฟต.....	40
2.8 วงจรขับ.....	41
บทที่ 3 การออกแบบวงจรควบคุมความเร็วของมอเตอร์.....	42
3.1 ภาควงจรควบคุมสัญญาณขับเคลื่อนมอเตอร์.....	42
3.1.1 วงจรออสซิลเลเตอร์.....	42
3.1.2 การคอมพาราเตอร์ และปรับอัตราเร่ง.....	43
3.1.3 วงจรป้องกันอุณหภูมิ.....	44
3.1.4 วงจรป้องกันกระแสเกิน.....	45
3.2 ภาควงจรกำลัง.....	46

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 เพื่อง่ายรถยนต์.....	49
4.1 โครงสร้างของเพื่อง่าย.....	50
4.2 ชนิดของเพื่อง่ายที่ใช้กับเพื่อง่าย.....	52
4.3 หลักการทำงานของเพื่อง่าย.....	54
4.4 อัตราทดของเพื่อง่าย.....	56
4.5 ระยะแบ็กแลชของเพื่อง่ายและเพื่อง่ายขี.....	57
4.6 ระยะแบ็กแลชของเพื่อง่ายคอกจอกและเพื่อง่ายข้าง.....	57
4.7 ระยะฟรีโหลด.....	58
4.8 เพื่อง่ายชนิดล้อยึด.....	59
4.8.1 เพื่อง่ายชนิดล้อยึดแบบค็อกคัลด์ซ์.....	59
4.8.2 เพื่อง่ายชนิดล้อยึดแบบอัตโนมัติและลิมิเต็ดสลิป.....	60
4.9 เพื่อง่ายแบบแพลนนิทรีเกียร์.....	66
4.10 การถอดชุดเพื่อง่าย.....	67
4.11 การตรวจสอบเพื่อง่าย.....	71
4.11.1 เสียงดังกังวานและรถสั่นผิดปกติ.....	71
4.11.2 เสียงดังผิดปกติอื่นนอกเหนือจากเสียงดังกังวาน.....	72
4.12 การประกอบเพื่อง่าย.....	74
บทที่ 5 โครงสร้างและการคำนวณ.....	84
5.1 ลักษณะโครงสร้าง.....	84
5.1.1 แชสซีส์ (chassis).....	84
5.1.2 ระบบบังคับเลี้ยว.....	85
5.1.3 ระบบกันสะเทือน.....	85
5.1.4 ระบบเบรก.....	86
5.1.5 ระบบขับเคลื่อน.....	87
5.2 การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและพิกัดกำลังของมอเตอร์.....	88
5.2.1 การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน.....	88
5.2.2 การคำนวณหาพิกัดกำลังของมอเตอร์ที่ใช้กับรถในงานวิจัย.....	89
5.2.3 การทดสอบของมอเตอร์โดยใช้เพื่อง่าย.....	90

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 6 แบตเตอรี่.....	91
6.1 ทฤษฎีเบื้องต้นของแบตเตอรี่.....	91
6.1.1 หลักการทำงานของแบตเตอรี่.....	91
6.1.2 ส่วนประกอบของแบตเตอรี่ชนิด ตะกั่ว-กรด.....	91
6.1.3 ขนาดความจุของแบตเตอรี่.....	92
6.1.4 แรงดันแบตเตอรี่.....	92
6.1.5 ความต้านทานภายในของแบตเตอรี่.....	93
6.1.6 อุณหภูมิของแบตเตอรี่.....	93
6.1.7 การอัดประจุไฟฟ้าแบตเตอรี่.....	93
6.1.8 การคายประจุและการทำงานของแบตเตอรี่.....	93
6.2 แบตเตอรี่ที่ใช้ในงานวิทยานิพนธ์.....	94
6.2.1 การหาขนาดแบตเตอรี่.....	94
6.2.2 ขั้นตอนการอัดประจุ.....	94
6.2.3 ข้อควรระวังของแบตเตอรี่.....	95
บทที่ 7 ผลการทดลอง.....	96
7.1 การทดสอบชุดควบคุมความเร็วของมอเตอร์.....	96
7.2 การทดสอบหาสมรรถนะเกี่ยวกับ DIFFERENTIAL.....	99
7.3 การทดสอบหาสมรรถนะกับพื้นเอียง 15°.....	100
7.4 การทดสอบหาสมรรถนะกับพื้นเอียง 30°.....	101
7.5 การเปรียบเทียบเวลาในการทำงานแบตเตอรี่ที่สภาวะใช้งานต่างๆกัน.....	103
7.6 การทดสอบหาสมรรถนะรวมของระบบเทียบกับ 2 ล้อ.....	103
บทที่ 8 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	107
8.1 บทนำ.....	107
8.2 ประสิทธิภาพของการขับเคลื่อนของรถไฟฟ้าด้วยเครื่อง Chassis Dynamometer.....	107
8.3 การวิเคราะห์ลักษณะและความเหมาะสมในการขับขี่.....	107
8.4 การวิเคราะห์การใช้พลังงานของรถไฟฟ้าที่เหมาะสม.....	108

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
8.4.1 การวิเคราะห์การสิ้นเปลืองพลังงานต่อน้ำหนักบรรทุก.....	108
8.4.2 การวิเคราะห์การใช้พลังงานต่อเนื้อจวรอบการประจุแบตเตอรี่.....	108
บรรณานุกรม.....	109
ภาคผนวก.....	110
ภาคผนวก ก คู่มือการใช้งานและการซ่อมบำรุง.....	110
ภาคผนวก ข ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	119
ประวัติผู้เขียน.....	126

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 แสดงการหมุนเคลื่อนที่สัมพันธ์กันระหว่างเฟืองบายศรีและเฟืองข้าง.....	55
7.1 การทดสอบหาสมรรถนะเกี่ยวกับ DIFFERENTIAL.....	99
7.2 การทดสอบหาสมรรถนะกับพื้นเอียง 15°	100
7.3 การทดสอบหาสมรรถนะกับพื้นเอียง 30°	102
7.4 การเปรียบเทียบเวลาใช้งานของแบตเตอรี่ที่สภาวะต่าง ๆ.....	103
7.5 การทดสอบหาสมรรถนะรวมของระบบเทียบกับ 2 ล้อ.....	103
7.6 การเปรียบเทียบคุณลักษณะเฉพาะของรถไฟฟ้าทั่วไปกับรถไฟฟ้า 2 ล้อ.....	105
7.7 การเปรียบเทียบคุณลักษณะเฉพาะของรถไฟฟ้า 2 ล้อกับรถไฟฟ้า 4 ล้อ.....	106

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้าแบบอนุกรม.....	5
2.2 เส้นโค้งแสดงสมบัติอัตราเร็วของมอเตอร์ DC แบบอนุกรม – ผสม – ขนาน.....	8
2.3 คุณลักษณะของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรม.....	9
2.4 การนำมอเตอร์มาต่ออนุกรมกันทางไฟฟ้า.....	10
2.5 การกลับทิศทางหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	11
2.6 ไดอะแกรมการต่อสาย.....	12
2.7 บั๊กคอนเวอร์เตอร์ (BUCK CONVERTER).....	13
2.8 การสร้างสัญญาณ PWM.....	14
2.9 การทำงานแบบ Pulse width control.....	16
2.10 การทำงานในโหมดการนำกระแสต่อเนื่อง.....	17
2.11 กระแสในตัวเหนี่ยวนำที่ช่วงรอยต่อของโหมดการนำกระแส.....	18
2.12 ความสัมพันธ์ระหว่าง I_{LB} ในฟังก์ชันของ D.....	18
2.13 รีปเปิ้ลในแรงดันเอาต์พุตของวงจร Step – down converter.....	19
2.14 การมอดูเลตแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง.....	21
2.15 การหยุดมอเตอร์ดีซีด้วยวิธีไดนามิกเบรกกิ้ง.....	22
2.16 การทำงานของมอเตอร์ในจุดภาคต่างๆ.....	23
2.17 วงจรกำลังแบบ H – BRIDGE.....	23
2.18 แสดงสภาวะการทำงานในจุดภาคที่ 1 ขณะที่มอสเฟตนำกระแส.....	24
2.19 แสดงสภาวะการทำงานในจุดภาคที่ 1 ขณะที่มอสเฟตหยุดนำกระแส.....	25
2.20 แสดงสภาวะการทำงานในจุดภาคที่ 2.....	25
2.21 แสดงสภาวะการทำงานในจุดภาคที่ 3 ขณะที่มอสเฟตหยุดนำกระแส.....	26
2.22 แสดงสภาวะการทำงานในจุดภาคที่ 3 ขณะที่มอสเฟตหยุดนำกระแส.....	26
2.23 แสดงสภาวะการทำงานในจุดภาคที่ 4.....	27
2.24 วงจรสมมูลของมอสเฟต.....	28
2.25 แผนผังของเทคโนโลยีวงจรรวม.....	29
2.26 โครงสร้างของมอส (Metal – Oxide Semiconductor : MOS).....	29
2.27 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุ (C) กับแรงดัน (V).....	30
2.28 โครงสร้างของ มอสเฟต.....	31

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.29 มอสเฟตในกรณีที่อิ่มตัว (saturation : Pinch – off).....	33
2.30 ความสัมพันธ์ของกระแสเดรนกับแรงดันที่ขาเกต.....	34
2.31 ความสัมพันธ์ของกระแสเดรนและแรงดันขาเดรนกับซอร์ส.....	34
2.32 แสดงสัญลักษณ์ของมอสเฟตชนิดต่างๆ.....	36
2.33 โครงสร้างของมอสเฟตแบบ D – MOSFET.....	37
2.34 โครงสร้างของมอสเฟตแบบ E – MOSFET.....	38
2.35 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง I_D กับ V_{DS}	39
2.36 การป้องกันแรงดันสไปค์คร่อม เกต-ซอร์ส.....	40
2.37 การป้องกันแรงดันสไปค์คร่อมเดรน-ซอร์ส.....	40
2.38 การขนานมอสเฟต.....	41
2.39 วงจรขับเกต.....	41
3.1 วงจรออสซิลเลเตอร์.....	42
3.2 เอาต์พุตของสัญญาณ V_{O1} และ V_{O2}	43
3.3 การคอมพาราเตอร์และปรับอัตราเร่ง.....	44
3.4 วงจรป้องกันอุณหภูมิเกิน.....	44
3.5 การป้องกันกระแสเกิน.....	46
3.6 วงจรกำลัง.....	46
3.7 แสดงภาพถ่ายชุดควบคุมความเร็วมอเตอร์ที่ใช้มอสเฟตขนานกันจำนวน 15 ตัว.....	48
4.1 แสดงตำแหน่งติดตั้งของเฟืองท้ายรถยนต์ที่ขับเคลื่อนล้อหลัง.....	49
4.2 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพหมุนเคลื่อนที่ของล้อด้านซ้ายและล้อด้านขวาในขณะ เลี้ยวเข้าโค้ง.....	50
4.3 ภาพตัดแสดงโครงสร้างภายในเฟืองท้ายที่ใช้กับรถยนต์ที่ขับเคลื่อนล้อหลัง.....	51
4.4 ส่วนประกอบของเฟืองท้ายที่ใช้กับรถยนต์ที่ขับเคลื่อนล้อหลัง.....	51
4.5 ส่วนประกอบของเฟืองท้ายที่ใช้กับรถยนต์ที่ขับเคลื่อนล้อหน้า.....	52
4.6 ตำแหน่งการจัดวางของเฟืองขับเฟืองและเฟืองบายศรีแบบสเปอร์บีเวล.....	52
4.7 ตำแหน่งการจัดวางของเฟืองขับกับเฟืองบายศรีแบบไฮปอยด์บีเวล.....	53
4.8 ตำแหน่งการจัดวางของเฟืองขับและเฟืองบายศรีแบบสไปรอลบีเวล.....	53
4.9 ตำแหน่งการจัดวางเฟืองขับและเฟืองบายศรีแบบเฮลิคอลล.....	54

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.10	แสดงการทำงานของเฟืองท้ายในขณะที่รถเคลื่อนที่ไปข้างหน้า.....54
4.11	แสดงการทำงานของเฟืองท้ายในขณะที่เลี้ยวเข้าโค้ง.....55
4.12	แสดงวิธีการวัดระยะเบรกแลชระหว่างเฟืองขับและเฟืองบายศรี.....57
4.13	การวัดระยะเบรกแลชระหว่างเฟืองคอกจอกกับเฟืองข้าง.....58
4.14	ภาพตัดแสดงวิธีการปรับตั้งระยะพรีโหลคแบบปรับตั้งโดยการเพิ่มแรงบีบกับปลอกกรอง.....58
4.15	ภาพตัดแสดงวิธีการปรับตั้งระยะพรีโหลคแบบใช้แผ่นชิมรอง.....59
4.16	แสดงส่วนประกอบของเฟืองท้ายชนิดล้อยึดแบบค็อกคัลด์ซ์.....60
4.17	แสดงส่วนประกอบของเฟืองท้ายชนิดล้อยึดอัตโนมัติแบบสไลด์ลิงบล็อก.....61
4.18	แสดงการหมุนเคลื่อนที่ของวงแหวนใน วงแหวนนอก และสไลด์ลิงบล็อก ซึ่งทำให้เกิดการล้อยึดเคลื่อนตัวไปด้วยกัน.....61
4.19	ภาพตัดแสดงส่วนประกอบของเฟืองท้ายลิมิเต็ดสลลิปแผ่นคลัตช์หลายแผ่น.....62
4.20	แสดงชิ้นส่วนและโครงสร้างของเฟืองท้ายแบบลิมิเต็ดสลลิปแบบคลัตช์หลายแผ่น.....63
4.21	การส่งถ่ายแรงบิดของเฟืองท้ายลิมิเต็ดสลลิปแบบแผ่นคลัตช์หลายแผ่นขณะเคลื่อนไปข้างหน้า.....64
4.22	การส่งถ่ายแรงบิดของเฟืองท้ายลิมิเต็ดสลลิปแผ่นคลัตช์หลายแผ่นเมื่อเลี้ยวเข้าโค้ง.....65
4.23	ภาพตัดแสดงส่วนประกอบภายในของเฟืองท้ายลิมิเต็ดสลลิปแบบทอร์คเซนซิ่ง.....66
4.24	แสดงส่วนประกอบของเฟืองท้ายลิมิเต็ดสลลิปแบบทอร์คเซนซิ่ง.....66
4.25	แสดงส่วนประกอบของเฟืองท้ายแบบแพลนนิทารีเกียร์.....67
4.26	แสดงส่วนประกอบของชุดเฟืองท้าย.....68
4.27	ใช้ค้อนและสก็ดสก็ดรอยย้าของหัวนอตและคลายนอตยึดเฟืองขับ.....68
4.28	การถอดหน้าแปลนของเพลลาเฟืองขับ โดยใช้เหล็กคูดลูกปืน.....69
4.29	ก่อนถอดฝาประกบลูกปืนทั้งสองตัว ให้ทำเครื่องหมายที่ฝาประกบลูกปืนกับตัวเรือนเฟืองท้าย.....69
4.30	ใช้ค้อนทองแดงเคาะที่ปลายเพลลาเบาๆ เพื่อถอดสลักลูกปืนตัวหน้า.....69
4.31	แสดงการถอดลูกปืนขับตัวหลัง.....70
4.32	แสดงการถอดเข้าลูกปืนตัวหน้าและตัวหลัง.....70
4.33	แสดงการถอดแยกเฟืองบายศรีกับตัวเรือนเฟืองท้าย.....70
4.34	ใช้เหล็กคูดลูกปืนแยกลูกปืนข้างออกจากตัวเรือนเฟืองท้าย.....71

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.35 แสดงการถอดแยกตัวเรือนของเฟืองท้าย.....	71
4.36 แสดงการตรวจสอบการหลอมและชำรุดของเฟืองขับและลูกปืน.....	72
4.37 การใช้ไดอัลเกจตรวจสอบการบิดเบี้ยวของหน้าแปลนเฟืองท้าย.....	72
4.38 ใช้ไดอัลเกจตรวจสอบวัดการบิดเบี้ยวของหน้าแปลนเฟืองท้าย.....	72
4.39 ใช้ไดอัลเกจวัดระยะเบี่ยงเลขของเฟืองบายศรี.....	73
4.40 แสดงรอยสัมผัสของเฟืองบายศรีกับเฟืองขับที่ถูกต้อง.....	73
4.41 ใช้ไดอัลเกจตรวจวัดระยะเบี่ยงเลขของเฟืองข้าง.....	73
4.42 ใช้ประแจกวัดแรงบิดวัดระยะฟรีโหลด.....	74
4.43 แสดงการประกอบแผ่นกันรุนเข้ากับเฟืองข้าง.....	74
4.44 แสดงการประกอบเฟืองข้าง เฟืองคอกจอก และแผ่นกันรุนเข้ากับตัวเรือนเฟืองท้าย.....	74
4.45 ใช้ไดอัลเกจวัดระยะเบี่ยงเลขของเฟืองข้าง.....	75
4.46 การประกอบเฟืองบายศรีเข้ากับตัวเรือนเฟืองท้าย.....	75
4.47 แสดงการใช้ค้อนและเหล็กส่งดอกย้ำแผ่นล้อคหัว โบลต์.....	75
4.48 แสดงการอัดลูกปืนข้างเข้ากับตัวเรือนเฟืองท้าย.....	76
4.49 แสดงการใช้ไดอัลเกจวัดการบิดเบี้ยวของเฟืองบายศรี.....	76
4.50 แสดงการประกอบลูกปืนตัวหน้าแหวนรอง ลูกปืนตัวหลังและเฟืองขับเข้าเสื้อเฟืองท้าย.....	76
4.51 การวัดค่าฟรีโหลด.....	77
4.52 แสดงการประกอบตัวเรือนเฟืองท้ายและนอตปรับตั้งลงในเสื้อเฟืองท้าย.....	77
4.53 แสดงการประกอบฝาครอบลูกปืนให้เครื่องหมายตรงกัน.....	77
4.54 แสดงการกดขัน โบลต์ยึดฝาครอบลูกปืนให้ได้ค่าตามที่กำหนด.....	78
4.55 แสดงการปรับตั้งเบี่ยงเลขด้านเฟืองบายศรี.....	78
4.56 แสดงการขันนอตปรับตั้งด้านเฟืองขับ.....	78
4.57 แสดงการวัดระยะกันรุนด้านเฟืองบายศรี.....	79
4.58 แสดงการปรับเฟืองบายศรีกับเฟืองขับ.....	79
4.59 แสดงการปรับตั้งระยะเบี่ยงและระหว่างเฟืองบายศรีกับเฟืองขับ.....	79
4.60 แสดงการกดขัน โบลต์ภายหลังจากตรวจระยะเบี่ยงเลขได้ตามค่าที่กำหนด.....	80
4.61 ใช้ประแจแรงบิดวัดค่าฟรีโหลด.....	80
4.62 การตรวจรอยสัมผัส โดยใช้สีเสน.....	80

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.63 แสดงลักษณะรอยสัมผัสของเฟืองบายนครีกับเฟืองขับที่ไม่ถูกต้องและถูกต้อง.....	81
4.64 การเปลี่ยนแหวนรองที่เฟืองขับเมื่อตรวจสอบรอยสัมผัสของฟันเฟืองไม่ถูกต้อง.....	81
4.65 ประกอบปลอกกรองและลูกปืนตัวใหม่.....	81
4.66 ประกอบแผ่นกั้นน้ำมันและซีลตัวใหม่.....	82
4.67 ใช้ประแจประกอบหน้าแปลนเฟืองท้าย.....	82
4.68 ใช้เครื่องมือยึดหน้าแปลนและขันนอตยึด.....	82
4.69 ใช้ไดอัลเกจวัดระยะเบี่ยงเบนของเฟืองบายนครี.....	83
4.70 ใช้ไดอัลเกจวัดระยะเบี่ยงเบนของเฟืองท้าย.....	83
4.71 ประกอบตัวล๊อคนอตปรับตั้งที่ฝาประกบลูกปืนข้าง.....	83
5.1 โครงสร้างของรถไฟฟ้าขับเคลื่อนสี่ล้อที่สร้างขึ้น.....	84
5.2 ชุดบังคับเลี้ยวหน้า.....	85
5.3 ระบบกันสะเทือนหน้า – หลัง.....	86
5.4 ระบบเบรคล้อหน้า.....	86
5.5 เบรคมือ.....	87
5.6 ชุดสำหรับวางมอเตอร์ล้อหน้าและล้อหลัง.....	87
5.7 ชุดเฟืองปรับตั้งโซ่.....	88
6.1 แบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด.....	92
7.1 แสดงสัญญาณจากวงจรออสซิลเลต.....	96
7.2 แสดงสัญญาณขับเกด.....	97
7.3 แสดงสัญญาณขับเกด(G-S) (CH.1)และแรงดันคร่อมมอเตอร์(D-S) (CH.2).....	97
7.4 แสดงแรงดันคร่อมเดน-ซอร์สเมื่อต่อคาปาซิเตอร์.....	98
7.5 แสดงลักษณะรูปคลื่นคร่อมเดน-ซอร์สขณะมอเตอร์นำกระแส.....	99
7.6 กราฟแสดงคุณสมบัติของมอเตอร์เกี่ยวกับ DIFERENTIAL.....	100
7.7 กราฟแสดงคุณสมบัติของมอเตอร์เกี่ยวกับพื้นเอียง 15°	101
7.8 กราฟแสดงคุณสมบัติของมอเตอร์เกี่ยวกับพื้นเอียง 30°	102

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันคนทั่วไปเริ่มให้ความสนใจต่อการหาพลังงานทดแทนน้ำมันที่มีราคาแพงและมีปริมาณที่ลดลงเรื่อย ๆ จึงหันมาให้ความสนใจกับรถไฟฟ้ามากขึ้น รถไฟฟ้าขับเคลื่อน 2 ล้อหลังเป็นรถไฟฟ้าที่มีขนาดเล็กที่มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายในสนามกอล์ฟ และเป็นรถไฟฟ้าประเภทเดียวที่มีการใช้งานกันมากที่สุดในประเทศ แต่อุปกรณ์ต่างๆที่จำเป็นต้องนำมาจากต่างประเทศ และมีราคาที่สูงมากรวมไปถึงค่าบำรุงรักษาต่างๆ ด้วย จึงทำให้มีการจำกัดใช้งานเฉพาะในสนามกอล์ฟเท่านั้น

ในปัจจุบันรถไฟฟ้าขับเคลื่อน 2 ล้อหลังซึ่งมักจะมีชุดคิฟเฟอเรนเชียลเป็นส่วนประกอบในการขับเคลื่อนและช่วยให้เวลาเลี้ยวทางโค้งเป็นไปด้วยความราบรื่นและในงานวิจัยนี้ จึงได้มีแนวคิดที่จะสร้างรถไฟฟ้าขับเคลื่อนสี่ล้อขึ้น ซึ่งรถไฟฟ้าขับเคลื่อนสี่ล้อในงานวิจัยนี้จะใช้มอเตอร์ชนิดอนุกรม 2 ตัวต่ออนุกรมกันทางไฟฟ้า แต่จะอิสระทางกลกับแทนชุดเกียร์แบบคิฟเฟอเรนเชียลและเพิ่มมอเตอร์ล้อหน้าอีก 2 ตัวในลักษณะเดียวกัน ซึ่งจะทำให้ความเร็วรอบเพิ่มขึ้น กำลังขับเคลื่อนได้ดี และที่สำคัญคือสามารถใช้งานสมบุกสมบันขึ้น เช่น เมื่อเจอที่เป็นหลุมขรุขระเป็นบ่อโคลน เป็นต้น

ด้วยเหตุผลดังกล่าว จึงได้มีแนวคิดที่จะสร้างรถไฟฟ้าขับเคลื่อนสี่ล้อขึ้น โดยใช้ชื่อและอุปกรณ์ทั้งหมดที่มีภายในประเทศเพื่อเป็นการประหยัดต้นทุนที่ต้องนำเข้าจากต่างประเทศ โดยใช้การขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อลดปัญหาทางด้านมลพิษและเสียงรบกวน โดยได้ทำการออกแบบรถให้มีขนาดที่ใกล้เคียงกับรถที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ เพื่อให้สามารถใช้งานได้เหมาะสมกับการใช้งานจริง ๆ ไม่ว่าจะเป็นส่วนของมอเตอร์ แบตเตอรี่ที่ใช้เก็บพลังงาน และวงจรควบคุมความเร็วของรถ หากสิ่งเหล่านี้ได้รับการพัฒนาต่อไป รถไฟฟ้าที่ผลิตโดยคนไทย จะได้รับความนิยมและใช้งานกันอย่างแพร่หลายแน่นอน และสามารถนำรถไปดัดแปลงกับการใช้งานประเภทอื่นๆ ทำให้มีการใช้งานที่กว้างขวางขึ้น

ในงานวิจัยนี้รถไฟฟ้าขับเคลื่อนสี่ล้อที่สร้างขึ้นจะมีกำลังและความเร็วรอบมากขึ้นจึงได้คิดค้นและออกแบบรถไฟฟ้าขับเคลื่อนสี่ล้อขึ้น โดยเฉพาะในส่วนขับเคลื่อนใช้มอเตอร์กระแสตรงแบบอนุกรม 2 ตัวต่ออนุกรมกันและขนานกัน 2 ชุดแต่แยกอิสระกันทางกลเพื่อทำงานแทนชุดคิฟเฟอเรนเชียลเกียร์ป้องกันท้ายปิดเวลาเข้าโค้งซึ่งเป็นแนวความคิดใหม่ ในส่วนของชุดควบคุมความเร็วของมอเตอร์จะใช้วงจรคิฟฟิซีคอนเวอร์เตอร์ (DC-DC Converter) แบบบัคคอนเวอร์เตอร์ (Buck converter) ในการควบคุม และพยายามออกแบบให้มีขนาดเล็กสามารถนำไปใช้งานได้จริง

1.2 ความมุ่งหมาย และวัตถุประสงค์ของการศึกษา

จุดมุ่งหมายในการทำวิทยานิพนธ์นี้ จัดสร้างรถไฟฟ้าขนาดบรรทุก 2 ที่นั่ง ความเร็วสูงสุด 60 กิโลเมตรต่อชั่วโมงสามารถวิ่งได้ต่อเนื่องนาน 1 ชั่วโมง อัตราเร่ง 15 เมตรต่อวินาทีเพื่อที่จะนำไปเป็นต้นแบบในการทดสอบ และบันทึกข้อมูลการใช้พลังงานของความเหมาะสมในการใช้งานในสนามกอล์ฟ และลากจูงรวมถึงประสิทธิภาพของการขับเคลื่อนของรถไฟฟ้าโครงสร้างของรถยนต์ที่ใช้เชื้อเพลิงน้ำมันเปลี่ยนเป็นระบบขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้าโดยนำมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมาขับเคลื่อนแทนเครื่องยนต์แบบเดิมระบบควบคุมการขับเคลื่อนใช้แบตเตอรี่ ที่ป้อนให้กับมอเตอร์โดยการควบคุมผ่านวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ เพื่อเป็นการควบคุมความเร็วในการขับเคลื่อนให้เป็นไปตามความต้องการของผู้ขับขี่ และทำการศึกษาลักษณะการนำไปใช้งานภายใต้เงื่อนไขของการขับเคลื่อนที่แตกต่างกันออกไปเพื่อทดสอบด้านการใช้พลังงานของรถไฟฟ้า และพลังงานต่อระยะทางรวมถึงหาประสิทธิภาพของรถไฟฟ้าต้นแบบที่ได้จัดสร้างขึ้น ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบจะนำไปวิเคราะห์และออกแบบ และปรับปรุงรถไฟฟ้าที่ใช้หลักการขับเคลื่อนในลักษณะเดียวกันเพื่อให้การใช้พลังงานของรถไฟฟ้าต้นแบบเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ และเกิดประโยชน์สูงสุดเพื่อใช้ในการจัดสร้างรถไฟฟ้าสำหรับขนส่งหรือทดแทนพาหนะทางการเกษตรกรรมต่อไปในอนาคต

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

สำหรับสมมติฐานของการศึกษาจะแบ่งออกเป็น 3 หัวข้อคือ

1) ออกแบบและจัดสร้างรถต้นแบบที่ใช้ในการศึกษา และทดสอบประสิทธิภาพการใช้งาน โดยทำการศึกษาและออกแบบขั้นต้นถึงต้นกำลังที่ใช้ในการขับเคลื่อนชนิดต่างๆ ข้อดีและข้อเสีย ความเหมาะสมในแง่การใช้งานและประสิทธิภาพ การเลือกและออกแบบอุปกรณ์ในการควบคุมระบบขับเคลื่อนศึกษาในหลักการที่ใช้ในการควบคุม และคุณสมบัติที่เหมาะสมในแง่ของการใช้งานการขับเคลื่อนรถไฟฟ้า

2) การกำหนดแหล่งพลังงานที่ใช้ในการขับเคลื่อนเป็นชนิดใดและประสิทธิภาพในการใช้งานซึ่งจะพิจารณาในแง่ความเหมาะสมในการใช้พลังงานในการขับเคลื่อน

3) พิจารณาลักษณะการใช้งานของรถไฟฟ้าในการใช้กำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายพลังงานของรถไฟฟ้าว่าในการใช้งานนั้นกินกำลังไฟฟ้าจากแบตเตอรี่เป็นลักษณะใด และเหมาะสมที่จะนำไปใช้งานหรือไม่ และสามารถนำไปหาค่า Ah ต่อ ระยะทางในการวิ่งเพื่อนำข้อมูลในส่วนนี้ไปออกแบบพิกัดของแบตเตอรี่ที่เหมาะสม พลังงานต่อน้ำหนักและความเร็ว

1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการออกแบบรถไฟฟ้าที่ส่วนใหญ่จะต้องคำนึงถึงภาระในการขับเคลื่อนจะต้องใช้วิธีคำนวณหาแรงต้านที่กระทำของรถนั้นคือหลักการทางกลศาสตร์และการคำนวณหาแรงทางฟิสิกส์เป็นวิธีและหลักการพื้นฐานในการหาแรงลัพท์ต่างๆ [1,2] ที่กระทำต่อการเคลื่อนที่อีกส่วนหนึ่งคือหลักการของเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดต่างๆ และความเหมาะสมที่จะนำไปใช้งานสำหรับใช้เป็นต้นกำลังในการขับเคลื่อนรถไฟฟ้า ซึ่งมีอยู่ด้วยกันหลายชนิดเช่น มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับแบบ 1 เฟส และ 3 เฟส ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้จะนำเสนอหลักการของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง 2 ตัวอนุกรมกันและขนานกัน 2 ชุด เทคนิคการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบบรัคคอนเวอร์เตอร์ หลักการออกแบบการใช้พลังงานของรถไฟฟ้าและการวิเคราะห์การใช้พลังงานอย่างเหมาะสมในการขับเคลื่อนรถไฟฟ้า โดยหลักการที่ได้เป็นหลักการใหม่ซึ่งได้กล่าวอ้างถึงในข้างต้นแล้ว

1.5 ขอบเขตการวิจัย

จุดมุ่งหมายในการทำวิทยานิพนธ์นี้ เป็นการศึกษาถึงระบบการขับเคลื่อน และการใช้พลังงานที่สภาวะต่างๆ ในการใช้งานรถไฟฟ้า โดยทำการสร้างต้นแบบการศึกษาด้วยการนำโครงรถยนต์ที่ใช้ในเชิงขนส่งนำมาดัดแปลงให้เปลี่ยนมาใช้ระบบการขับเคลื่อนที่เป็นระบบไฟฟ้าให้มีขนาดรอบบรรทุก 2 ที่นั่ง ความเร็วสูงสุด 60 กิโลเมตรต่อชั่วโมง สามารถวิ่งได้ต่อเนื่องนาน 1 ชม. อัตราเร่ง 15 เมตรต่อวินาที ซึ่งใช้มอเตอร์ไฟฟ้าอนุกรมกัน แบตเตอรี่ขนาด 12 โวลท์ จำนวน 4 ลูกนำมาต่ออนุกรมเพื่อให้ได้แรงดันไฟตรง 48 โวลท์ เป็นชุดควบคุมการขับเคลื่อนในแบบต่างๆ ที่เหมาะสมกับการใช้งาน ผลจากการกำหนดสามารถนำไปใช้ในการคำนวณหาพลังงานของรถจากแบตเตอรี่ที่ใช้ในการขับเคลื่อนที่สภาวะต่างๆ เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปพัฒนาการออกแบบขนาดของมอเตอร์และโครงสร้างรถที่เหมาะสมกับการใช้งานของรถไฟฟ้าให้ได้ประสิทธิภาพสูงขึ้น

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

ในงานวิทยานิพนธ์นี้ สามารถที่จะแบ่งรายละเอียดเป็นบทๆ ได้ 8 บท ดังมีรายละเอียดพอสังเขปดังนี้

บทที่ 1 กล่าวถึงความจำเป็นมาของงานวิจัย และความสำคัญของปัญหาขอบเขตของการวิจัย และขั้นตอนการศึกษา

บทที่ 2 เป็นการกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง เช่น ทฤษฎีของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง และทฤษฎีวงจรควบคุมความเร็วของมอเตอร์แบบบรัคคอนเวอร์เตอร์ เทคนิคการควบคุมแบบ Chopper การควบคุมมอเตอร์แบบ 4 Quadrant control โครงสร้างและการทำงานของ Mosfet

บทที่ 3 จะกล่าวถึงรายละเอียดต่าง ๆ ทั้งหมดของชุดควบคุมความเร็วของมอเตอร์ เช่น เทคนิคการสร้างสัญญาณพัลส์วิดมอดูเลชัน (Pulsewidth, Modulation ; PWM) โดยใช้อปแอมป์ (Operational Amplifier : OP-AMP) การออกแบบวงจรกำลัง (Power circuit) เพื่อลดค่าความเหนี่ยวนำ (Inductance) และจุดที่น่าสนใจก็คือการป้องกันกระแสเกิน (Over current) ที่สามารถป้องกันมอสเฟต (MOSFET) ซึ่งทำหน้าที่เป็นสวิตช์ (Switch) ได้ทุกตัวและใช้อุปกรณ์น้อย

บทที่ 4 จะอธิบายถึงเฟืองท้ายรถยนต์ และโครงสร้างหลักการทำงานของเฟืองท้ายและชนิดของเฟืองที่ใช้กับเฟืองท้าย

บทที่ 5 จะอธิบายถึงโครงสร้างที่ได้จัดทำขึ้นเองทั้งหมดรายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้สร้างโครงรถในส่วนที่สองจะอธิบายถึงการคำนวณประสิทธิภาพแรงเสียดทานของรถไฟฟ้าขับเคลื่อนสล็อตเพื่อที่จะใช้หาขนาดของพิกัดกำลังมอเตอร์ที่ใช้ในการขับเคลื่อน

บทที่ 6 จะกล่าวถึงแบตเตอรี่ จะประกอบไปด้วย การคำนวณหาขนาดความจุของแบตเตอรี่ ตามการใช้งานของรถไฟฟ้า ข้อมูลจำเพาะของแบตเตอรี่ วิธีการชาร์จและข้อควรระวัง

บทที่ 7 แสดงผลการทดลองทั้งที่ได้จากการทดสอบในห้องทดลองและภาคสนามโดยการหาข้อมูลจำเพาะทางไฟฟ้าของมอเตอร์ในแต่ละตัว การทดสอบจริงโดยใช้เครื่องทดสอบ (Chassis Dynamometer) ที่ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล เพื่อหาความเร็วสูงสุดและประสิทธิภาพรวม

บทที่ 8 เป็นการสรุปรวมถึงการทำงาน และการสรุปรวมโดยการจับชี้จริงเพื่อเปรียบเทียบกับรถไฟฟ้าที่มีอยู่โดยทั่วไป และข้อเสนอแนะแนวทางการดำเนินงาน

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 หลักการของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง

หลักการพื้นฐานของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงสามารถแสดงรายละเอียดทฤษฎีเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง ศึกษาได้จาก [1,2,3]

ในที่นี้จะสรุปสมการหลักของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงไม่ว่าจะเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหรือมอเตอร์ไฟฟ้า จะมีสมการหลักอยู่ 2 สมการ คือ

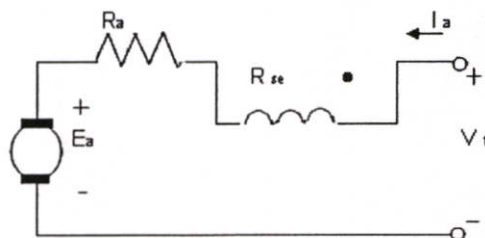
$$E_a = K_a \cdot \Phi_p \cdot \omega \quad (2-1)$$

และ

$$T_e = K_a \cdot \Phi_p \cdot I_a \quad (2-2)$$

เมื่อ	E_a	คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (V)
	T_e	คือ แรงบิดที่เกิดจากสนามแม่เหล็ก (N-m)
	Φ_p	คือ เส้นแรงแม่เหล็กต่อขั้ว (Wb)
	ω	คือ ความเร็วของอาร์เมเจอร์ (rad/sec)
	I_a	คือ กระแสไฟฟ้าของอาร์เมเจอร์ (A)
	K_a	คือ ค่าคงที่ของอาร์เมเจอร์

ถ้านำสมการที่ (2-1) และ (2-2) มาพิจารณากับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรม ซึ่งมีวงจรสมมูลทางไฟฟ้างambarkanที่ 2.1 กระแสไฟฟ้า I_a (กระแสอาร์เมเจอร์) เป็นกระแสไฟฟ้าตัวเดียวกันที่นำไปสร้างสนามแม่เหล็กและพิจารณาในช่วงที่แกนเหล็กยังไม่อิ่มตัว (saturated)



รูปที่ 2.1 วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้าแบบอนุกรม

จากวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของมอเตอร์ที่แสดงในรูปที่ 2.1 กำหนดให้

V_t คือ แรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว

R_a คือ ค่าความต้านทานของลวดอาร์เมเจอร์

R_{sc} คือ ค่าความต้านทานของลวดสนามแม่เหล็ก

สามารถเขียนสมการที่ (2-1) และ (2-2) ได้ดังสมการ (2-4) และ(2-5)

$$\phi_p = K I_a \quad (2-3)$$

$$E_a = K_a \cdot K I_a \cdot \omega = K_m \cdot I_a \cdot \omega \quad (2-4)$$

$$T_c = K_a \cdot K I_a \cdot I_a = K_m \cdot I_a^2 \quad (2-5)$$

โดยที่ $K_m = K_a K$ เป็นค่าคงตัวของอาร์เมเจอร์

สมการที่ (2-4) แสดงให้เห็นว่ามอเตอร์ชนิดนี้มีแรงบิดขณะสตาร์ท (starting torque) ที่สูงซึ่งแปรตามกระแสอาร์เมเจอร์ยกกำลังสอง

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่มีขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กต่ออนุกรมกับขดลวดอาร์เมเจอร์ ดังนั้นกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กจะไหลผ่านขดลวดอาร์เมเจอร์ด้วย เมื่อภาวะเพิ่มขึ้นกระแสอาร์เมเจอร์เพิ่มจะมีผลทำให้เส้นแรงแม่เหล็กต่อขั้ว (ϕ_p) มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดนี้เมื่อรับภาระทางกลจะมีผลทำให้ความเร็วรอบตกลงมาก แต่มีผลดีทางด้านที่ว่ากระแสอาร์เมเจอร์ เพิ่มน้อยกว่าแบบขนานรวมไปถึงเส้นแรงแม่เหล็กต่อขั้ว (ϕ_p) เพิ่มจะมีผลทำให้ได้ค่าแรงบิดที่เกิดจากสนามแม่เหล็ก T_c เพิ่มขึ้นมากกว่ามอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนาน

สามารถเขียนสมการของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วจากวงจร ได้ดังนี้

$$V_t = E_a + I_a(R_a + R_{sc}) \quad (2-6)$$

ถ้ากำหนดให้ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นแรงแม่เหล็กต่อขั้ว ϕ_p กับกระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กเป็นไปอย่างเชิงเส้น เขียนได้ว่า

$$\text{โดยที่} \quad K = \frac{K_m}{K_T} \quad \text{คือค่าคงตัวของมอเตอร์}$$

จากสมการ (2-1)

$$E_a = K_a \phi_p \omega \quad (2-7)$$

โดยที่ K_a คือ ค่าคงที่ของแรงบิด

แทนค่า และ E_a จาก ϕ_p ลงในสมการ (2-6) จะได้

$$V_t - I_a(R_a + R_{sc}) = K_T K I_a \omega \quad (2-8)$$

จากสมการ (2-8) ถ้านำมาใช้งานกับแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้ามีค่าคงที่ และถ้าผลของแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมค่าความต้านทานอนุกรม $R_a + R_{sc}$ มีค่าน้อย เมื่อเทียบกับแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้า V_f จะได้ว่าความเร็วเชิงมุม ω แปรผกผันกับกระแสแอมแปร์ I_a

ในส่วนทางด้านแรงบิดที่เกิดจากสนามแม่เหล็ก T_c ตามสมการ (2-5) ด้วยเงื่อนไขค่าคงตัว K_T และ K แทนค่าจะได้สมการของแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรม ดังนี้

$$T_c = K_T K I_a^2 \quad (2-9)$$

ค่าแรงบิดที่เกิดจากสนามแม่เหล็กจะแปรผันกับกระแสแอมแปร์ยกกำลังสอง

2.2 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีข้อดี คือ

1. มีพิสัยของความเร็วกว้างมาก ซึ่งสามารถเพิ่มความเร็วให้สูงหรือต่ำกว่าความเร็วของพิกัดได้

2. มีแรงบิดขณะเริ่มหมุนสูงมาก ซึ่งเหมาะสมกับงาน ยกของ ชูคลากและขับเคลื่อน มีวิธีการควบคุมความเร็วที่ง่ายและนุ่มนวลกว่ามอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับที่ทำงานคล้ายกันมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีข้อเสีย คือ

1. ต้องจัดหาแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงไว้ใช้งานเป็นพิเศษ (ถ้ามาใช้ในรถไฟฟ้าไม่ใช่เพราะใช้พลังงานจาก Battery)

2. ในขนาดแรงม้าที่เท่ากัน มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีขนาดใหญ่และมีราคาสูงกว่ามอเตอร์เหนี่ยวนำ

3. ในการเริ่มหมุน มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงต้องมีวิธีพิเศษและยุ่งยากกว่ามอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับยกเว้นมอเตอร์ขนาดเล็กมากๆ เท่านั้นที่ไม่ต้องมีวิธีเริ่มหมุนแบบพิเศษ

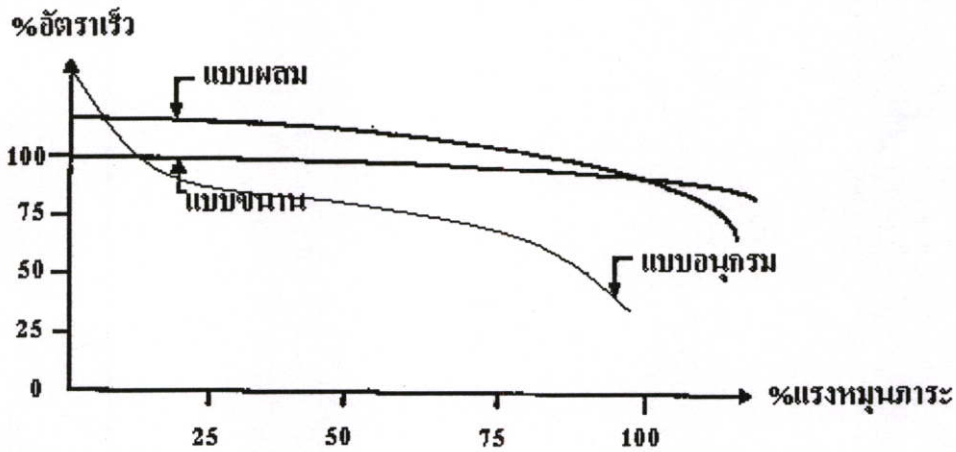
4. ต้องการการบำรุงรักษามากกว่ามอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ ทั้งนี้เนื่องมาจากซี่คอมมิวเตเตอร์ (commutator) และแปรงถ่านเพราะฉะนั้นจึงไม่สามารถสร้างมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงให้มีขนาดแรงดันสูงกว่า 600 โวลต์ และมีขนาดหลายพันแรงม้าได้

ถึงแม้ว่ามอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีข้อดีเพียงสองสามข้อ แต่เป็นข้อได้เปรียบที่สำคัญมาก ทำให้จึงยังมีการใช้งานมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงอยู่กระทั่งทุกวันนี้

ในปัจจุบันมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีแบบขดลวดกระตุ้นแยก (separately excited dc Motor) แบบขนาน (shunt dc motor) แบบอนุกรม (series dc motor) แบบผสม (compound dc motor) และยังมีแบบแม่เหล็กถาวร (permanent magnet dc motor, PM motor) ซึ่งในปัจจุบันนี้ได้มีการผลิตแม่เหล็กที่ให้ความเข้มสนามแม่เหล็กมากขึ้นและมีราคาถูกลงมาก เช่น อัลนิโค - ห้า (Alnico V) และแม่เหล็กเซรามิก (ceramic magnet) เป็นต้น ซึ่งนิยมนำไปประดิษฐ์เป็นมอเตอร์

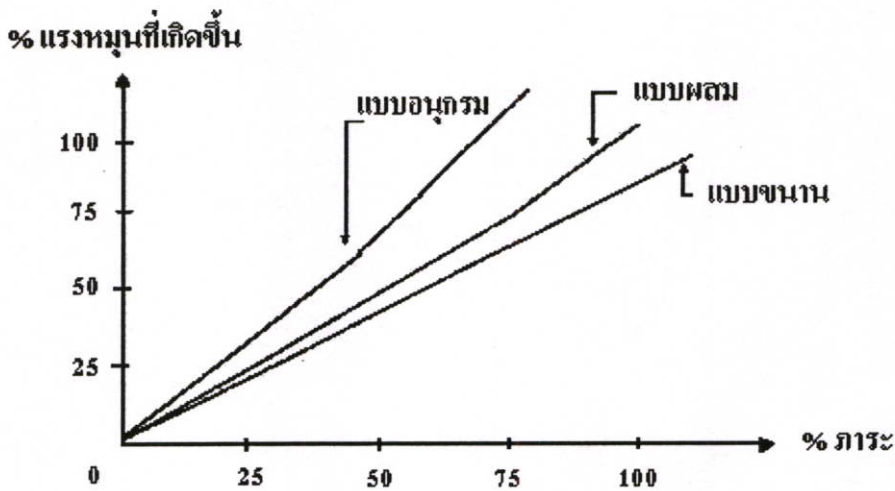
ขนาดเล็กที่มีแรงม้าเป็นค่าเศษส่วน (fractional horse power) โดยนิยมนำไปใช้ในงานควบคุมต่างๆ เช่น นำไปใช้ในรถยนต์ เป็นเครื่องปัคน้ำฝน เครื่องยกกระจากหน้าต่าง เครื่องยกหรือเลื่อนที่นั้ง เป็นต้น

มอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวรมีลักษณะคล้ายกับสมบัติของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนาน โดยมีอัตราเร็วเกือบคงที่แต่มีค่าลดลงบ้างเล็กน้อยตามค่าของภาวะหรือแรงหมุนของภาระดั่งเส้นโค้งลักษณะสมบัติระหว่างอัตราเร็วกับแรงหมุนภาวะที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.2



(ก)

เส้นโค้งแสดงสมบัติอัตราเร็วของมอเตอร์ DC แบบอนุกรม - ผลม - ขนาน



(ข)

- รูปที่ 2.2 (ก) เส้นโค้งลักษณะสมบัติอัตราเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนาน อนุกรม และผลม (cumulative)
 (ข) เส้นโค้งลักษณะสมบัติ แรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนาน อนุกรม และผลม (cumulative)

สรุปได้ว่ามอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรมเหมาะสำหรับขั้วภาระที่ต้องการแรงบิดสูง และไม่ค่อยให้ความสำคัญกับความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ตกลงในทางตรงข้ามจุดอ่อนของมอเตอร์ชนิดนี้ ถ้าไม่มีภาระต่ออยู่ที่เพลลาของมอเตอร์จะทำให้มอเตอร์ต้องการแรงบิดที่เกิดจากสนามแม่เหล็กน้อยมีผลทำให้กระแสแอมเพอร์ต่ำ จะส่งผลให้ความเร็วรอบของมอเตอร์ชนิดนี้สูงมากขณะไร้ภาระ ดังนั้นจึงเป็นข้อกำหนดว่ามอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรมห้ามไร้ภาระ คือ ต้องต่อภาระตลอดเวลา

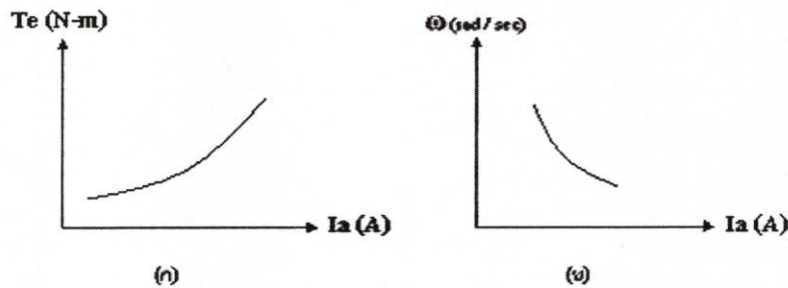
2.2.1 คุณลักษณะของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรม

ลักษณะสมบัติที่น่าสนใจของมอเตอร์ชนิดนี้ คือ คุณลักษณะแรงบิดกับความเร็ว และ ความเร็วกับกระแสแอมเพอร์ พิจารณาสมการที่ 2-3 เขียนใหม่ได้ว่า

$$\omega = \frac{E_a}{K_m \cdot I_a} \quad (2-10)$$

เนื่องจาก E_a เปลี่ยนแปลงน้อยมากเพราะว่าค่าความต้านทานของขดลวดมีค่าน้อย ดังนั้น ความเร็ว ω แปรผกผันกับกระแสแอมเพอร์

ส่วนสมการที่ (2-4) แรงบิดแปรตามกระแสแอมเพอร์ยกกำลังสองและสมการที่ (2-10) ความเร็วผกผันกับกระแสแอมเพอร์อยู่ในรูปของฟังก์ชันไฮเพอร์โบล่าทั้งสองสมการนี้เขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้



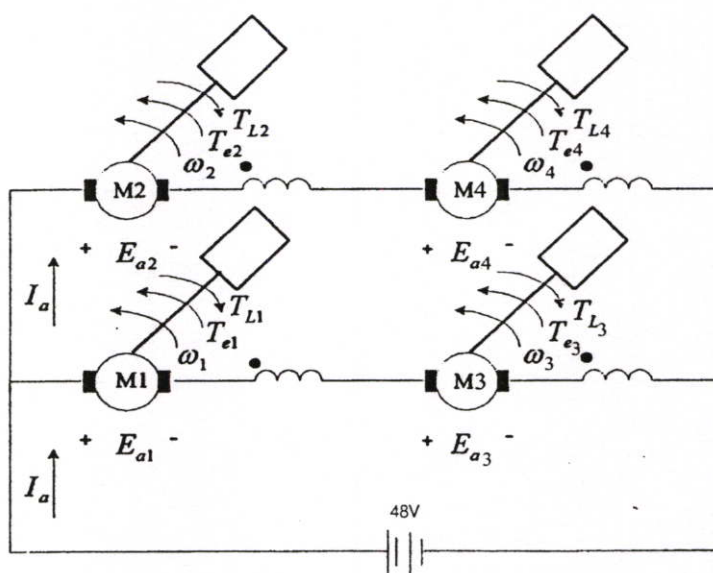
รูปที่ 2.3 คุณลักษณะของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรม

- ก) แรงบิดกับกระแสแอมเพอร์
- ข) ความเร็วกับกระแสแอมเพอร์

จากรูปที่ 2-3 ข) พบว่ามอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรมห้ามไร้ภาระ (No-load) เนื่องจาก การไร้ภาระกระแสแอมเพอร์มีค่าน้อยทำให้ความเร็วมีค่าสูงมากจนเป็นอันตรายแก่มอเตอร์ได้ และ ความเร็วของมอเตอร์แบบนี้จะลดลงมากเมื่อภาระเพิ่มขึ้นจุดด้อยตรงนี้เองนำมาใช้ให้เป็นประโยชน์ในงานวิจัยนี้ จะได้กล่าวถึงในหัวข้อ 2.2.2

2.2.2 ผลของการนำมอเตอร์มาต่ออนุกรมทางไฟฟ้า

จากผลดีและผลเสียของการใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรมสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานกับงานวิจัยนี้ได้โดยจุดเด่นก็คือ ใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรมมาต่ออนุกรมทางไฟฟ้า เพื่อใช้แทนชุดคิฟเฟอเรนเชียลเกียร์ (differential gear) ซึ่งหมายถึงการทำให้ความเร็วรอบของมอเตอร์วงในและวงนอกมีความเร็วแตกต่างกันขึ้นกับภาระโหลด จุดด้อยของมอเตอร์ไฟฟ้าแบบอนุกรมนั้นก็คือ มีเรกิวเลชัน ของความเร็ว (speed regulations) ไม่ดีนั่นคือ ความเร็วรอบของมอเตอร์เปลี่ยนแปลงอย่างมากเมื่อภาระเปลี่ยนไป



รูปที่ 2.4 การนำมอเตอร์มาต่ออนุกรมกันทางไฟฟ้า

ในงานวิจัยนี้จะใช้มอเตอร์ 4 ตัว แยกขั้วล่อซ้ายและขวา ซึ่งทำหน้าที่แทนชุดคิฟเฟอเรนเชียลเกียร์ จากรูป 2.4 ถ้าสมมติให้มอเตอร์ M1 ขั้วล่อซ้ายหน้า และมอเตอร์ M2 ขั้วล่อขวาหน้า มอเตอร์ M3 ขั้วล่อซ้ายหลังและมอเตอร์ M4 ขั้วล่อขวาหลัง ถ้าล่อซ้ายมอเตอร์ M1, M3 จะรับภาระเพิ่มขึ้นทำให้ความเร็ว ω_1 ลดลงและ E_{a1} ลดลงด้วยดังนั้น E_{a2} ของมอเตอร์ M2, M4 จะเพิ่มขึ้น มีผลให้ความเร็ว ω_2 เพิ่มขึ้นด้วยนั่นคือ ขณะล่อซ้ายและล่อขวา หมุนไม่เท่ากัน ทำให้เวลาล่อซ้ายจรดจึงไม่ปิดแต่เวลาวิ่งทางตรงความเร็วของมอเตอร์ทั้งสองจะมีค่าเท่ากันทั้งนี้อิมพีแดนซ์ (Impedance) ของมอเตอร์ทั้งสองต้องมีค่าเท่ากันหรือใกล้เคียงกับแนวความคิดนี้จะใช้งานได้ดีหรือไม่นั้น ต้องเก็บผลจากการทดลองวิ่งจริง

2.2.3 การควบคุมความเร็วของมอเตอร์

$$\text{จากสมการ (2-8)} \quad \omega = \frac{V_t - I_a (R_a + R_{se})}{K_a \cdot \phi_p} \quad (2-11)$$

$$\text{โดยที่} \quad K_a = K_T K = K_m$$

ω คือ ความเร็วของอาร์เมเจอร์ (rad/sec)

I_a คือ กระแสไฟฟ้าของอาร์เมเจอร์ (A)

K_a คือ ค่าคงที่ของอาร์เมเจอร์

V_t คือ แรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว

R_a คือ ค่าความต้านทานของลวดอาร์เมเจอร์

R_{se} คือ ค่าความต้านทานของลวดสนามแม่เหล็ก

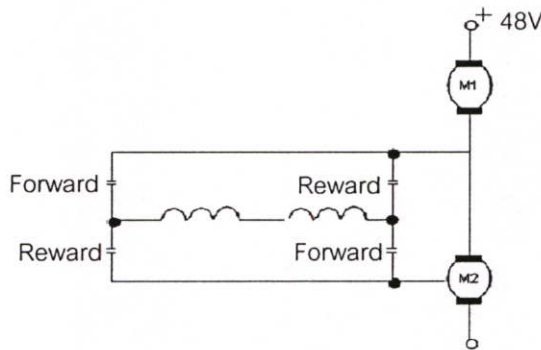
ϕ_p คือ เส้นแรงแม่เหล็กต่อขั้ว (Wb)

พิจารณาสมการที่ (2-11) สามารถควบคุมความเร็วของมอเตอร์ได้หลายวิธีแต่ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือการควบคุมความเร็วโดยปรับแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้า V_t นั่นคือ ความเร็วแปรตามแรงดันที่ป้อนเข้าเส้นแรงแม่เหล็กต่อขั้ว (ϕ_p) การปรับ V_t นั้นจะใช้วงจรบีคคอนเวอร์เตอร์จะได้อีกว่าถึงในหน้าที่ 13 ซึ่งแรงดันไฟฟ้าที่คร่อมมอเตอร์จะขึ้นอยู่กับค่าดีวตี้ไซเคิล (duty cycle;D) ซึ่งจะได้กล่าวต่อไป

2.2.4 การกลับทางหมุนของมอเตอร์

การกลับทางหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงทำได้ 2 วิธี คือ

1. เปลี่ยนทิศทางกระแสที่ไหลผ่านอาร์เมเจอร์
2. เปลี่ยนทิศทางกระแสที่ไหลผ่านขลวลวดสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 2.5 การกลับทิศทางหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

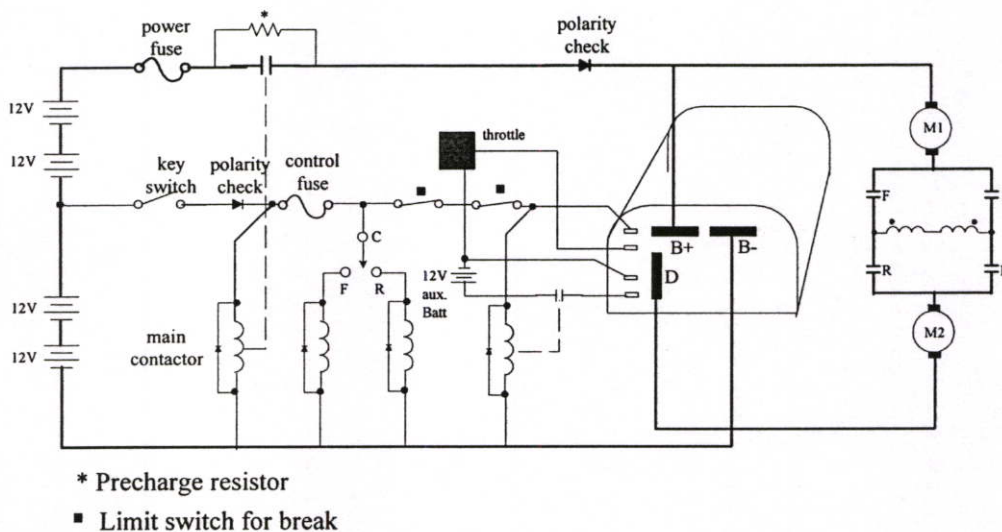
โดยที่ F = Forward คือ มอเตอร์หมุนเดินหน้า

R = Reward คือ มอเตอร์หมุนถอยหลัง

B+ คือ แบตเตอรี่ไฟบวก

B- คือ แบตเตอรี่ไฟลบ

รูปที่ 2.5 สามารถขยายการต่อได้ดังรูปที่ 2.6

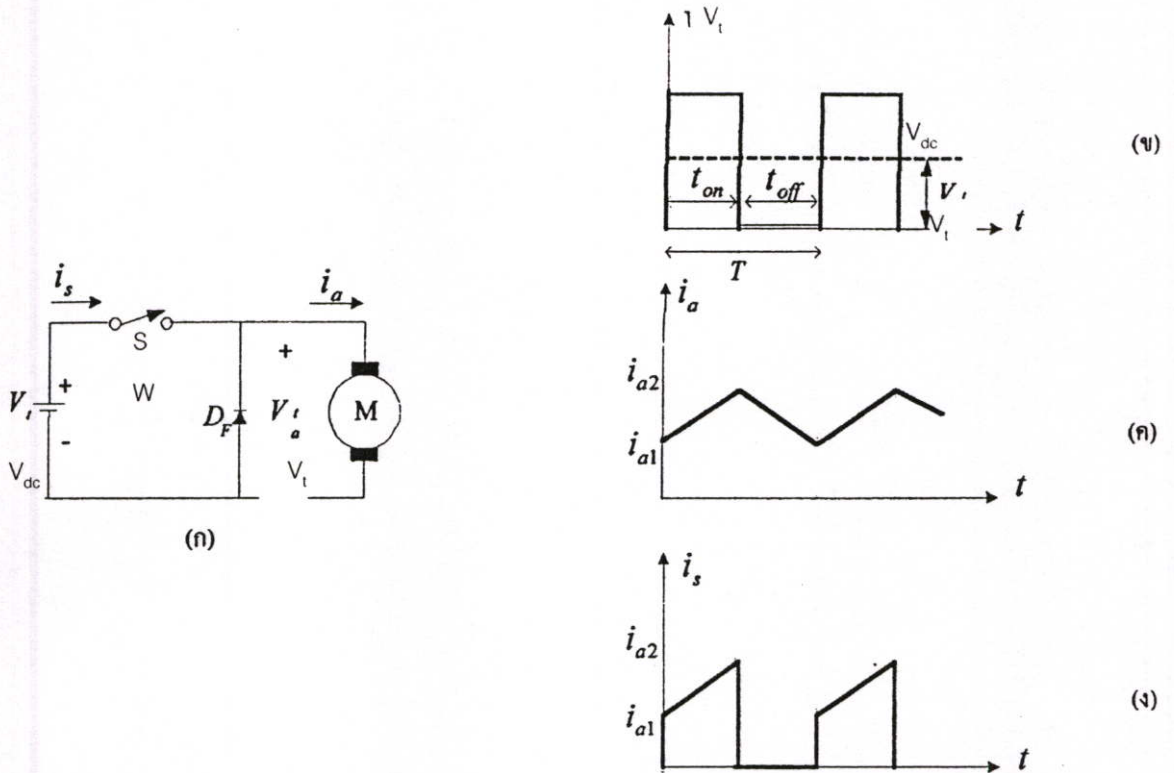


รูปที่ 2.6 ไดอะแกรมการต่อสาย

2.3 หลักการเบื้องต้นการควบคุมความเร็วของมอเตอร์แบบชอปเปอร์

การควบคุมความเร็วแบบชอปเปอร์ (Chopper) มีหลายชนิดส่วนชนิดที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้เป็นแบบบ็อคคอนเวอร์เตอร์ เพื่อให้แรงดันที่ป้อนให้มอเตอร์มีขนาดเล็กลงเพื่อเป็นผลดีต่อการปรับลดความเร็วของมอเตอร์ ในรูปที่ 2.7 แสดงวงจรบ็อคคอนเวอร์เตอร์อาศัยสวิตช์(SW)ให้ตัดและต่อแรงดันไฟฟ้าเป็นช่วงๆ ทำให้ได้แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยที่คร่อมมอเตอร์ (V_i) เปลี่ยนแปลงตามต้องการ ซึ่งขนาดของแรงดัน V_i ขึ้นอยู่กับช่วงเวลานำกระแส (turn on time; t_{on}) และช่วงเวลาหยุดนำกระแส (turn off time; t_{off}) วิธีการหนึ่งที่จะควบคุมแรงดัน V_i ที่มีความถี่ในการสวิตซ์คงที่คือการเปลี่ยนแปลงช่วงเวลานำกระแสวิธีการนี้เรียกว่าพัลส์วิดโมดูเลชัน

Pulse Width Modulation ; PWM) ในงานวิจัยนี้ความถี่ในการทดสอบจะไม่คงที่สามารถแปรเปลี่ยนได้เนื่องจาก ω สัมพันธ์กับความถี่เปลี่ยนแปลงสูงขึ้น โดยความถี่ของสวิตซ์จะแปรตรงกับความเร็วและส่งผลให้กำลังงานที่เอาต์พุตที่มอเตอร์เพิ่มขึ้นด้วย



รูปที่ 2.7 บัคคอนเวอร์เตอร์ (BUCK CONVERTER)

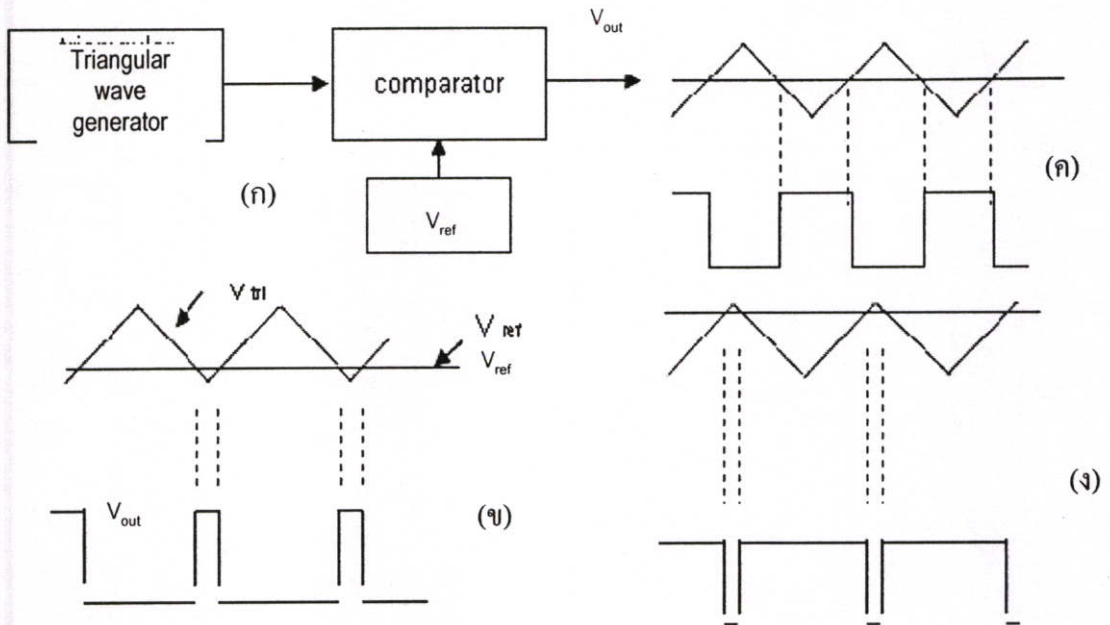
- ก) วงจรบัคคอนเวอร์เตอร์พื้นฐาน
- ข) ช่วงเวลาการนำกระแสและหยุดนำกระแสของสวิตช์
- ค) กระแสอาร์เมเจอร์
- ง) กระแสที่ไหลผ่านสวิตช์

ค่าเฉลี่ยของแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้ามอเตอร์ (V_t) หาได้จาก

$$V_t = \frac{1}{T} \int_0^{t_{on}} v_{dc} \cdot dt = \frac{t_{on}}{T} \cdot V_{dc} \quad (2-12)$$

โดยที่ $\frac{t_{on}}{T}$ คือ ค่าดิวตี้ไซเคิลการทำงาน (duty cycle; D)

แรงดันเฉลี่ย V_t สามารถเปลี่ยนแปลงได้จาก 0 ถึง V_{dc} โดยการควบคุม ดิวตี้ไซเคิล (D) วิธีการสร้างสัญญาณ PWM เบื้องต้นเพื่อที่จะนำไปควบคุมการสวิตช์แสดงดังรูปที่ 2.7 รายละเอียดต่างๆของทฤษฎีบัคคอนเวอร์เตอร์และการสร้างสัญญาณ PWM ศึกษาได้จาก [4,5]



รูปที่ 2.8 การสร้างสัญญาณ PWM

- ก) บล็อกไดอะแกรมการสร้าง PWM ข) สัญญาณ PWM ที่ คิวตี้ไซเคิล 10%
 ค) สัญญาณ PWM ที่ คิวตี้ไซเคิล 50% ง) สัญญาณ PWM ที่ คิวตี้ไซเคิล 90%

จากรูปที่ 2.7 สัญญาณ PWM ที่คิวตี้ไซเคิลต่างๆ ดูได้จาก Triangular wave เทียบกับ V_{ref} โดยที่ V_{ref} มากกว่า Triangular wave จะสร้างสัญญาณพัลส์บวกแต่ถ้า V_{ref} น้อยกว่า Triangular wave จะสร้างสัญญาณที่เป็นศูนย์

2.3.1 เทคนิคในการควบคุมแบบ Chopper มี 2 วิธี คือ

1) Time Ratio Control (TRC)

วิธีนี้รู้จักในชื่อของ Pulse width modulation control ซึ่งเทคนิคการควบคุมแบบ TRC ยังแบ่งได้เป็น 2 ชนิดย่อยๆ คือ

ก. Constant frequency TRC : คาบการทำงาน T_s คงที่แต่จะปรับช่วง on ของ switch เพื่อควบคุม duty ratio D

ข. Variable frequency TRC : จะปรับ duty ratio D โดย

- ให้ t_{on} คงที่ ปรับ T_s
- ปรับทั้ง t_{on} และ T_s

ในการควบคุมแบบ Variable frequency โดยให้ t_{on} คงที่นั้นจะได้ output voltage คงที่ frequency การทำงานของ chopper ใน mode chopper ที่ความถี่ต่ำมากๆ จึงไม่ดี นอกจากนั้นการทำงาน of chopper ใน mode variable frequency ยังทำให้ออกแบบ input filter ยากอีกด้วย

เพราะฉะนั้น variable frequency control จึงไม่เป็นที่นิยม แต่ในงานวิจัยนี้ความถี่ในการทดสอบจะไม่คงที่สามารถแปรเปลี่ยนได้เนื่องจาก ω สัมพันธ์กับความถี่ขณะเปลี่ยนแปลงสูงขึ้น โดยความถี่ของสวิตช์จะแปรตรงกับความเร็วและส่งผลให้กำลังงานที่เอาต์พุตที่มอเตอร์เพิ่มขึ้นด้วย

2) Current Limit Control (CLC)

วิธีนี้เรียกอีกอย่างว่า point by point control เราจะควบคุม duty ratio โดยควบคุม load current ให้อยู่ระหว่างค่า min กับ max ที่เรากำหนดเมื่อ load current ขึ้นไปถึงค่า max switch จะ off และ on อีกทีเมื่อ load current ลงมาสู่ค่า min

2.3.2 เทคนิคการควบคุมแบบ Constant frequency TRC

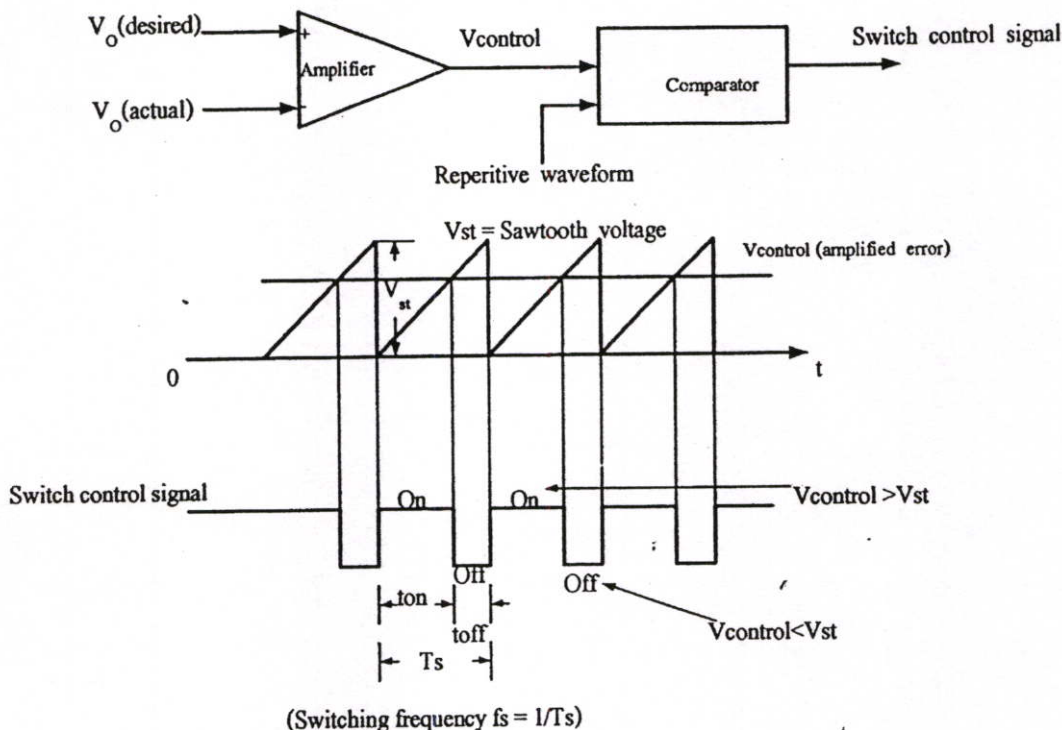
จากรูปที่ 2.9 ในการทำงานแบบ Pulse width control นั้นสัญญาณการควบคุม switch ซึ่งจะควบคุมการ on, off ได้จากการเปรียบเทียบสัญญาณควบคุม V_{control} กับ waveform รูปฟันเลื่อย ซึ่ง V_{control} ได้จากการขยายค่าแตกต่างระหว่าง V_o (actual) กับ V_o ที่ต้องการ ความถี่ของคลื่นรูปฟันเลื่อยจะเป็นตัวกำหนดความถี่ของการ switching ซึ่งในการควบคุมแบบ Pulse width ความถี่การ switching จะคงที่ และมีค่าตั้งแต่ 1KHz ความสัมพันธ์ในการทำงานคือ

- เมื่อ $V_{\text{control}} > V_{\text{st}}$: switch control signal จะ high ทำให้ switch on
- เมื่อ $V_{\text{control}} < V_{\text{st}}$: switch control signal จะ low ทำให้ switch off

ซึ่งเราจะได้ duty ratio ดังนี้

$$D = \left(\frac{t_{\text{on}}}{T_s} \right) = \left(\frac{V_{\text{control}}}{V_{\text{ts}}} \right) \quad (2-13)$$

โดยที่ V_{ts} = peak value ของคลื่นฟันเลื่อย



รูปที่ 2.9 การทำงานแบบ Pulse width control

ฉะนั้นจะเห็นได้ว่าการปรับค่า t_{on}/T_s ก็สามารถควบคุม V_o ได้ โดยต่อ diode เข้าไปเพื่อให้เป็นทางไหลของ load current ในช่วงที่ switch off และ load current ไหลเองจากพลังงานสะสมใน L ซึ่งเราเรียก diode นี้ว่า freewheel diode ส่วน L และ C นั้นเป็น low pass filter มีประโยชน์คือขจัด ripple เนื่องจาก harmonic ลำดับสูงๆ ออกซึ่ง V_{on} ซึ่งเป็นอินพุตของ low pass filter ค่า corner frequency (f_c) ของ filter จะต้องต่ำกว่า f_s มากๆ เพื่อที่จะกำจัด switch frequency ripple ใน output voltage

ในการวิเคราะห์ทาง steady state ถือว่าตัว C ใน low pass filter มีค่ามากพอที่จะทำให้ $V_o(t) = V_o$ และกระแสเฉลี่ยของ inductor จะเท่ากับ output current เฉลี่ย I_o โดยที่กระแส capacitor เฉลี่ยในช่วง steady state เป็นศูนย์

2.3.3 การวิเคราะห์ในโหมดการนำกระแสต่อเนื่อง

ในสถานะอยู่ตัวค่าเฉลี่ยแรงดันที่ตกคร่อม L จะเท่ากับศูนย์ในหนึ่งคาบเวลาจากรูปที่ 2.10 ค. จะได้ว่าพื้นที่ $A +$ พื้นที่ $B = 0$

$$\int_0^{T_s} (v_L) dt = \int_0^{t_{on}} (v_L) dt + \int_{t_{on}}^{T_s} (v_L) dt = 0 \quad (2-14)$$

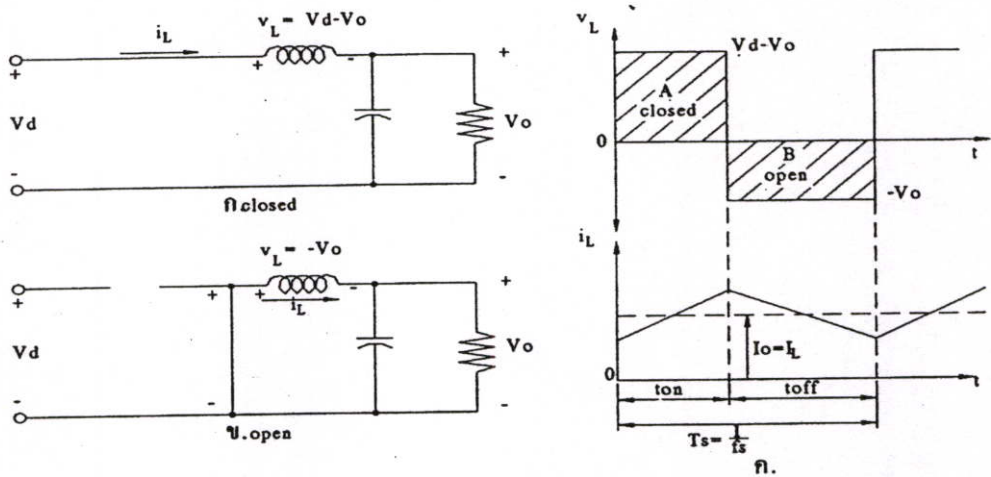
$$(V_d - V_o)DT = V_o(1-D)T$$

หรือ (duty ratio)

$$V_0 = DV_d$$

$$\frac{V_0}{V_d} = D$$

(2-15)



รูปที่ 2.10 การทำงานในโหมดการนำกระแสต่อเนื่อง

ดังนั้นในโหมดนี้แรงดันทางด้านเอาต์พุตจะแปรผันอย่างลิเนียร์กับค่า Duty ratio ของ สวิตซ์ที่ใช้ในการเปิด - ปิดแรงดันทางด้านอินพุต โดยแรงดันทางด้านเอาต์พุตจะไม่ขึ้นอยู่กับ พารามิเตอร์ใดๆของวงจรและถ้าเราไม่ใส่ใจหรือละทิ้งการสูญเสียภายในวงจรแล้ว(เพราะมีค่าต่ำ) กำลังทางด้านอินพุต (P_d) จะเท่ากับกำลังทางด้านเอาต์พุต (P_o)

$$P_d = P_o$$

$$V_d I_d = V_o I_o$$

จะได้

$$\frac{V_d}{V_o} = \frac{I_o}{I_d} = \frac{1}{D}$$

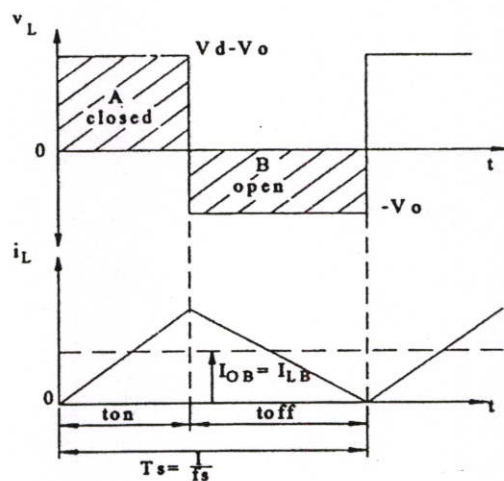
(2-16)

ดังนั้นในโหมดของการนำกระแสต่อเนื่องนี้วงจร Step - down Converter จะทำหน้าที่ คล้ายๆ กันกับหม้อแปลงไฟฟ้ากระแสตรง โดยที่ Turn ratio สมมูลย์ของหม้อแปลงตัวนี้สามารถ ที่จะปรับได้ในย่าน 0 - 1 โดยการควบคุมที่ Duty ration ของสวิตซ์

เราสามารถที่จะหากระแสเฉลี่ยทางด้านอินพุตของคอนเวอร์เตอร์ได้จากความสัมพันธ์เดียวกับ หม้อแปลง รูปคลื่นของกระแสทางด้านอินพุตจะเป็นลักษณะที่สวิงไปมาระหว่างค่า Peak กับศูนย์ ทุกๆ ช่วงเวลาที่สวิตซ์ OFF ดังนั้นบางครั้งก็อาจต้องวงจรฟิลเตอร์เข้ากับทางด้านอินพุตเพื่อกำจัด ในเรื่องของฮาร์มอนิกส์ได้

2.3.4 ช่วงรอยต่อระหว่างโหมดการนำกระแสต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง

ในหัวข้อนี้จะพูดถึงช่วงรอยต่อระหว่างโหมดการนำกระแสต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง โดย สามารถแสดงรูปคลื่นของ v_L และ i_L ได้ดังรูปที่ 2.11

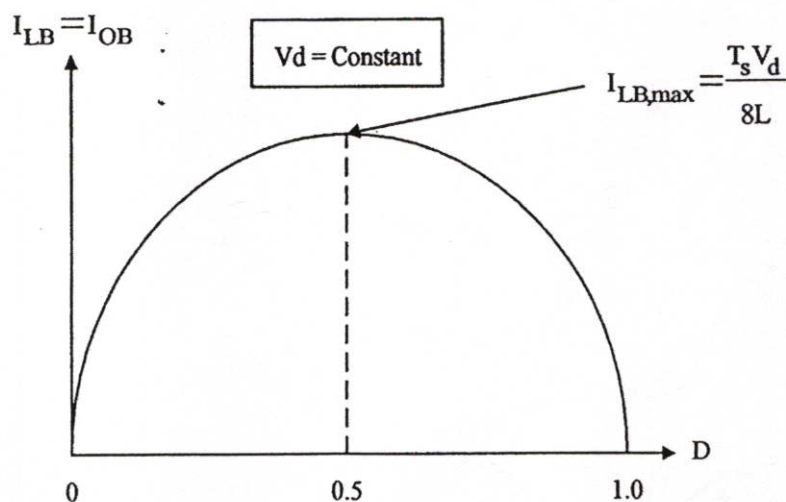


รูปที่ 2.11 กระแสในตัวเหนี่ยวนำที่ช่วงรอยต่อของโหมคการนำกระแสต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่องที่ตรงช่วงรอยต่อนี้จะได้ว่า กระแสเฉลี่ยใน L

$$\begin{aligned}
 I_{LB} &= \frac{1}{2} i_{L, \text{peak}} \\
 &= \frac{1}{2} \cdot \frac{L}{L} (V_d - V_o) t_{on} \\
 I_{LB} &= \frac{DT_s}{2L} (V_d - V_o) \quad (2-17)
 \end{aligned}$$

$$I_{LB} = I_{OB} \quad (2-18)$$

เมื่อนำสมการที่ (2 - 18) ไป plot graph โดยให้ I_{LB} อยู่ในฟังก์ชันของ D จะได้กราฟที่มีลักษณะดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่าง I_{LB} ในฟังก์ชันของ D

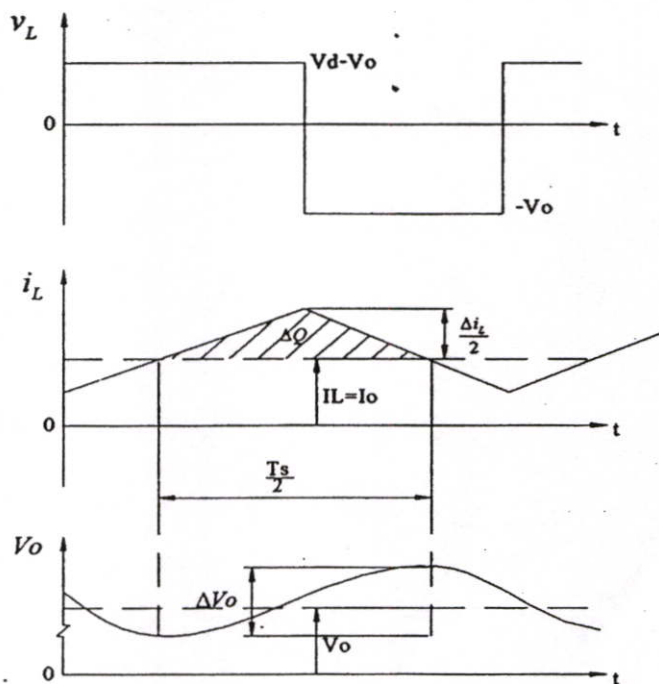
ดังนั้นช่วงเวลาในการควบคุมสถานะนี้ (โดยกำหนดให้ค่า T_s , V_d , V_o , L และ D มีค่าคงที่) ถ้ากระแสเฉลี่ยทางด้านเอาต์พุต (ซึ่งเป็นค่าเดียวกับค่าเฉลี่ยของกระแส i_L ด้วย) มีค่าต่ำกว่า I_{LB} ตามที่ได้กำหนดไว้ในสมการที่ 2 - 18 แล้ว สถานะการทำงานก็จะเปลี่ยนไปอยู่ในโหมดของการนำกระแสไม่ต่อเนื่องทันที

ช่วงรอยต่อระหว่างโหมดการนำกระแสต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่องนี้จะมีประโยชน์สำหรับการคำนวณหาค่า L ค่าสุดที่ใช้ในวงจรที่ยังสามารถให้กระแสที่ไหลผ่านตัวมันยังมีความต่อเนื่องอยู่ได้ โดยถ้านำกราฟในรูปที่ 2.11 ไปวิเคราะห์หาค่า L_{min} จะได้สมการหาค่า L ค่าสุดดังสมการที่ 2-19

$$L_{min} = \frac{(1-D)R}{2f} \quad (2-19)$$

2.3.5 ริปเปิ้ลของแรงดันทางด้านเอาต์พุต

ในหัวข้อข้างต้นที่ได้กล่าวไปนั้นเราได้สมมติให้ $v_o(t) = V_o$ แต่ในทางปฏิบัติ แล้วจะมีริปเปิ้ลในแรงดันทางด้านเอาต์พุตอยู่ และค่าของตัวเก็บประจุ (C - filter) จะสามารถคำนวณหาได้จากรูปคลื่นที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.13 ซึ่งเป็นโหมดของการนำกระแสต่อเนื่อง โดยการสมมติให้ริปเปิ้ลใน i_L ไหลผ่าน C ทั้งหมดส่วนค่ากระแสเฉลี่ยจะเป็นกระแสที่ไหลผ่านโหลดตัวต้านทาน



รูปที่ 2.13 ริปเปิ้ลในแรงดันเอาต์พุตของวงจร Step - down converter

จากรูปจะได้ว่า
$$\Delta v_o = \frac{\Delta Q}{C} = \frac{1}{3} \times \left[\frac{1}{2} \times \frac{\Delta i_L}{2} \times \frac{T_s}{2} \right]$$

$$\Delta i_L \text{ ขณะ OFF} = \frac{V_o}{L} (1 - D)T_s$$

$$\therefore \Delta v_o = \frac{1}{8C} \cdot \frac{V_o}{L} (1 - D)T_s \cdot T_s$$

นั่นคือ
$$\frac{\Delta v_o}{V_o} = \frac{1}{8} \cdot \frac{T_s^2}{LC} (1 - D) \quad (2-20)$$

ดังนั้น ขนาดของ C-filter จะสามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ 2-20 โดยกำหนดคริปเปิลของแรงดันได้ตามที่ต้องการซึ่งปกติจะกำหนดให้มีค่าต่ำกว่า 1%

2.4 การควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสามารถควบคุมความเร็วได้โดยการควบคุมแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้ามอเตอร์ สามารถทำได้ 3 วิธีดังนี้

2.4.1 ปรับแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าขดลวดสนามแม่เหล็ก

การควบคุมความเร็วสามารถทำได้โดยใช้ตัวต้านทานปรับค่าได้ต่ออนุกรมกับขดลวดสนามแม่เหล็กเมื่อปรับให้แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าขดลวดสนามแม่เหล็กลดลงมอเตอร์จะหมุนด้วยความเร็วรอบเพิ่มขึ้น ในทางตรงข้ามถ้าปรับให้แรงดันและกระแสมีค่าเพิ่มขึ้น มอเตอร์จะหมุนด้วยความเร็วรอบลดลง การควบคุมความเร็วด้วยวิธีนี้สามารถเพิ่มความเร็วให้สูงกว่าปกติได้ในอัตราส่วน 2 : 1 แต่แรงบิดที่ได้จะมีค่าแปรผกผันกับความเร็วยรอบหรือแปรผันตรงกับกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าขดลวดสนามแม่เหล็กนั่นเอง

2.4.2 ปรับแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าขดลวดอาร์เมเจอร์

การควบคุมความเร็วรอบด้วยวิธีนี้ ทำให้อัตราการบิดของขดลวดอาร์เมเจอร์สามารถทำได้โดยใช้ตัวต้านทานปรับค่าได้ต่ออนุกรมขดลวดอาร์เมเจอร์ เมื่อปรับให้แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าขดลวดอาร์เมเจอร์ลดลง มอเตอร์จะหมุนด้วยความเร็วรอบลดลง ในทางตรงกันข้ามถ้าปรับให้แรงดันและกระแสมีค่าเพิ่มขึ้น มอเตอร์จะหมุนด้วยความเร็วรอบเพิ่มขึ้น แต่วิธีนี้ทำให้เกิดกำลังสูญเสียที่ตัวต้านทานปรับค่าได้สูง ทำให้ระบบโดยรวมมีประสิทธิภาพต่ำมีวิธีปรับแรงดัน และกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าขดลวดอาร์เมเจอร์อีกวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงกว่าวิธีแรก แต่มีความยุ่งยากในการจัดสร้าง คือใช้เครื่องสับไฟฟ้า (chopper)

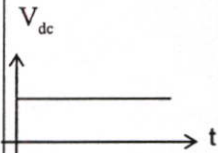
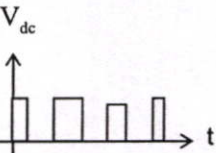
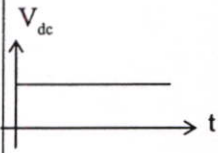
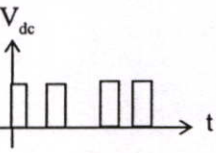
2.4.3 ปรับแรงดันและกระแสไฟฟ้า ที่ป้อนเข้าขดลวดอาร์มเจอร์และขดลวดสนามแม่เหล็กไปพร้อมๆ กัน

ปรับแรงดันและกระแสไฟฟ้า ที่ป้อนเข้าขดลวดอาร์มเจอร์และขดลวดสนามแม่เหล็กไปพร้อมๆ กัน วิธีนี้สามารถปรับทั้งความเร็วรอบและแรงบิดไปพร้อมๆ กันได้

2.5 เครื่องสับไฟฟ้า (Chopper)

วงจรสับไฟฟ้าเป็นวงจรที่เปลี่ยนกำลังไฟฟ้ากระแสตรงไปเป็นกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่สามารถปรับเปลี่ยนแรงดันขาออกได้ ซึ่งจะทำให้ได้ด้วยการบังคับให้มอสเฟตปิดๆ เปิดๆ การนำกระแสอย่างรวดเร็วจึงวิธีการนี้จะทำให้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขาเข้าถูกสับ (chop) ให้ขาออกเป็นห้วงๆ หรือเป็นสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมจำนวนมากที่แรงดันขาออกทำให้แรงดันขาออกมีค่าเฉลี่ยน้อยกว่าแรงดันขาเข้า เราสามารถปรับค่าเฉลี่ยของแรงดันขาออกได้ด้วยการปรับอัตราส่วนของเวลาที่มอสเฟตเปิดให้นำกระแสต่อเวลาที่ปิดให้หยุดนำกระแส เรียกว่า “อัตราส่วนมาร์คสเปซ” (mark – space ratio) หรือ “ควบคุมอัตราส่วนเวลา” (time ratio control, TRC) ซึ่งสามารถทำได้ 2 วิธีดังนี้

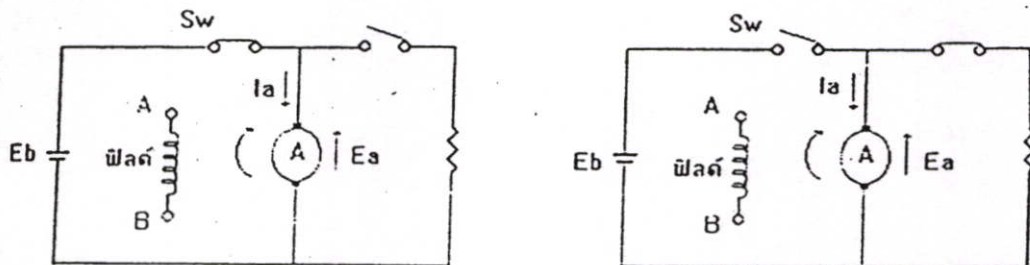
1. ปรับค่าของช่วงเวลานำกระแสแต่รักษาคาบเวลาให้คงที่เรียกว่า “วิธีควบคุมความกว้างของรูปสัญญาณ” (pulse- width modulation)
2. รักษาช่วงเวลานำกระแส หรือ หยุดนำกระแสอย่างใดอย่างหนึ่งให้คงที่ แต่ปรับค่าของคาบเวลาที่เรียกว่า “วิธีควบคุมความถี่” (frequency modulation)

ลักษณะ	การควบคุมด้วยโรติเตอร์	รูปคลื่นของแรงดันอินพุท	รูปคลื่นของแรงดันเอาต์พุท
คี่ซี่ → คี่ซี่	ควบคุมความกว้างของพัลส์		
	ควบคุมให้ความกว้างของพัลส์ คงที่ แต่เปลี่ยนคาบ		

รูปที่ 2.14 การมอดูเลทแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

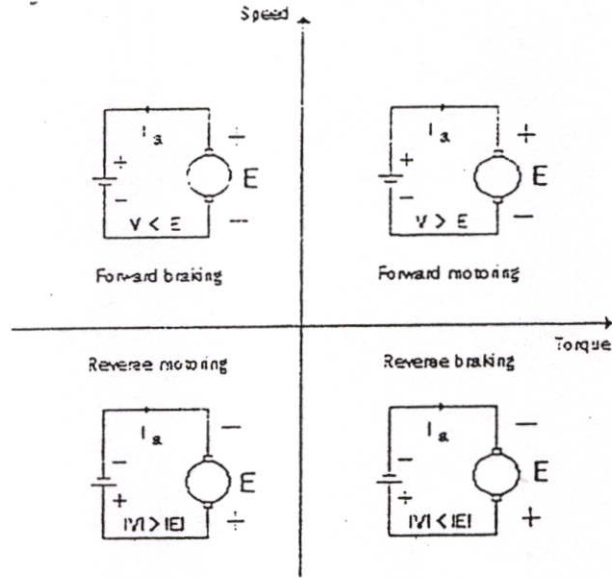
2.6 การควบคุมมอเตอร์แบบ 4 จตุภาค (4 – Quadrant control)

ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่งนั้น ไม่เพียงแต่จะเป็นการป้อนพลังงานจลน์ในมอเตอร์เป็นพลังงานความร้อนที่ตัวมอเตอร์ เรายังหาหนทางให้มอเตอร์ทำหน้าที่เปลี่ยนเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แล้วให้กระแสที่เกิดขึ้นไหลผ่านเข้าไปในตัวต้านทานภายนอกและวนกลับครบวงจรผ่านขดลวดของมอเตอร์ก็จะทำให้มีความร้อนเกิดขึ้นแล้วกระจายหายไป และพร้อมกันนั้นก็จะมีแรงหมุน หมุนกลับทิศทางของการหมุนมอเตอร์ วิธีนี้จะเห็นได้ง่ายถ้าเป็นมอเตอร์ดีซี เมื่อต้องการเบรกมอเตอร์ ให้ยกสวิตช์วงจรอาร์เมเจอร์ให้เปิดออกและปิดสวิตช์ของวงจรตัวต้านทานภายนอกลง แต่ยังคงค้างสวิตช์ในวงจรฟิลต์ไว้ตามเดิมมอเตอร์ก็จะยังคงหมุนต่อไปด้วยความเฉื่อย จึงทำหน้าที่เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แล้วจึงจ่ายกระแสผ่านความต้านทานภายนอก โดยมีทิศทางของกระแสกลับทิศทางกับทิศทางของกระแสกลับกันกับกระแสเดิมจะทำให้เราเห็นว่าแรงหมุนที่เกิดขึ้นใหม่ในตัวมอเตอร์จะมีทิศทางกลับกับการหมุนของมอเตอร์ และจะมีความร้อนเกิดขึ้นกระจายไป ทำให้มอเตอร์หยุดหมุนอย่างรวดเร็ว แล้วเราก็ยกสวิตช์ใหญ่ออกและเมื่อการขับเคลื่อนมอเตอร์เป็นไปได้อีกทั้ง 2 ทิศทาง ทำให้การทำงานของมอเตอร์เป็นไปได้ถึง 4 จตุภาค ดังรูป 2.15 ซึ่งจำแนกการทำงานได้ดังนี้

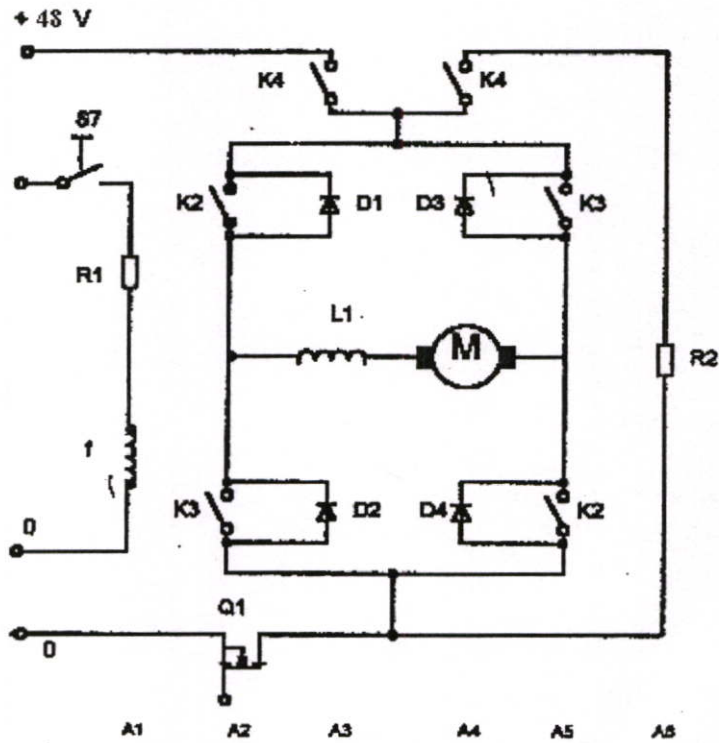


รูปที่ 2.15 มอเตอร์ดีซีด้วยวิธีไดนามิกเบรกกึ่ง

- * จตุภาคที่ 1 คือ สภาวะที่มอเตอร์หมุนด้วยความเร็วที่ไปในทิศทางเดียวกับแรงบิด ซึ่งเกิดจากการป้อนพลังงานจากแหล่งจ่ายให้กับมอเตอร์
- * จตุภาคที่ 2 คือ สภาวะที่มอเตอร์มีทิศทางการหมุน (ทิศทางเดียวกับจตุภาคที่ 1) ตรงข้ามกับทิศทางของแรงบิด ซึ่งเกิดจากการหยุดจ่ายพลังงานให้กับมอเตอร์
- * จตุภาคที่ 3 คือ มีสภาวะการทำงานเช่นเดียวกับจตุภาคที่ 1 แต่มีทิศทางการหมุนและแรงบิดตรงกันข้ามกับจตุภาคที่ 1
- * จตุภาคที่ 4 คือ มีสภาวะการทำงานเช่นเดียวกับจตุภาคที่ 2 แต่มีทิศทางการหมุนและแรงบิดตรงกันข้ามกับจตุภาคที่ 2



รูปที่ 2.16 การทำงานของมอเตอร์ในจุดภาคต่างๆ

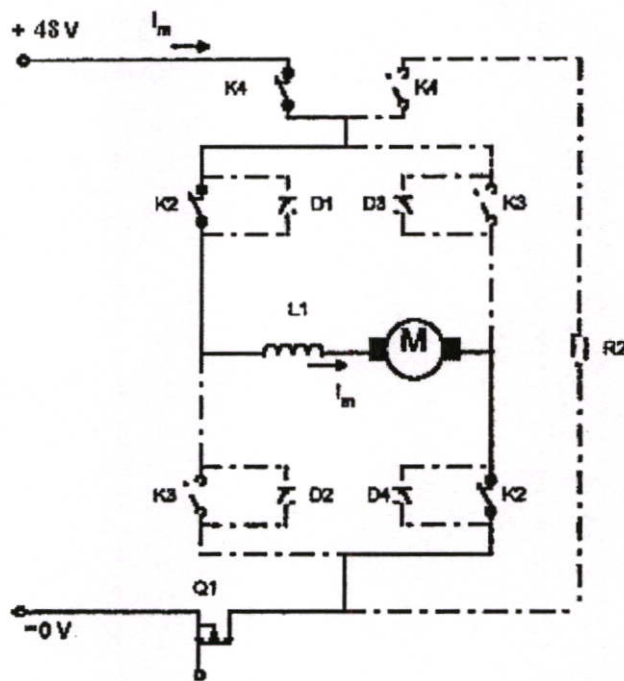


รูปที่ 2.17 วงจรกำลังแบบ H - BRIDGE

จากรูปที่ 2.17 เป็นลักษณะการต่อวงจรเป็นแบบ เอช - บริดจ์ (H - bridge) โดยลักษณะการต่อแบบนี้สามารถเลือกทิศทางกระแสไหลของกระแสและแรงดันตกคร่อมมอเตอร์ได้ ทำให้สามารถ

ควบคุมมอเตอร์ให้หมุนซ้ายมีทิศทางของกระแสและแรงดันเป็นลบ หรือหมุนขวามีทิศทางของกระแสและแรงดันเป็นบวกหรือหมุนไปทางซ้ายโดยจ่ายพลังงานออกมา มีทิศทางของกระแสเป็นบวกแต่แรงดันเป็นลบ หรือหมุนไปทางขวาโดยจ่ายพลังงานออกมามีทิศทางของกระแสเป็นลบแต่แรงดันเป็นบวก ซึ่งวิธีการทั้งหมดนี้เรียกว่า “การควบคุมแบบจตุภาค 4 Quadrant” สามารถควบคุมได้โดยกำหนดให้แมกเนติกคอนแทกเตอร์แต่ละตัวทำงานดังนี้

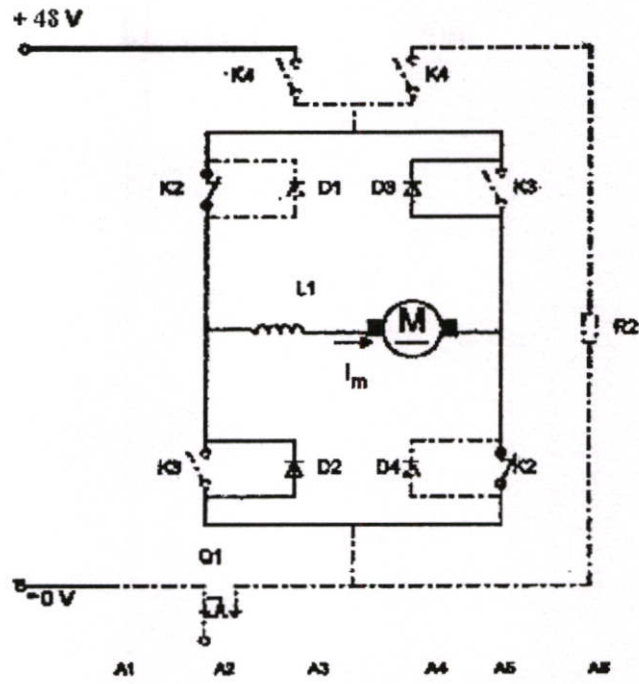
จตุภาคที่ 1



รูปที่ 2.18 แสดงสภาวะการทำงานในจตุภาคที่ 1 ขณะที่มอเตอร์นำกระแส

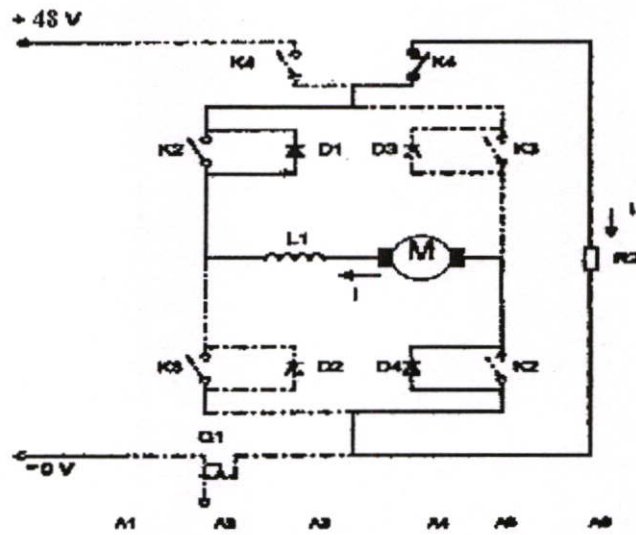
ในสภาวะนี้จะให้แมกเนติก K2 และ K4 ทำงาน เมื่อ Q1 อยู่ในสภาวะนำกระแสจะทำให้กระแสไหลเข้ามอเตอร์จากซ้ายมาขวา ดังรูปที่ 2.18

เมื่อ Q1 อยู่ในสภาวะไม่นำกระแสจะยังไหลผ่านมอเตอร์จากซ้ายมาขวาผ่านฟรีวิลลิงไดโอด ดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 แสดงสภาวะการทำงานในจุดภาคที่ 1 ขณะที่มอเตอร์หยุดนำกระแส

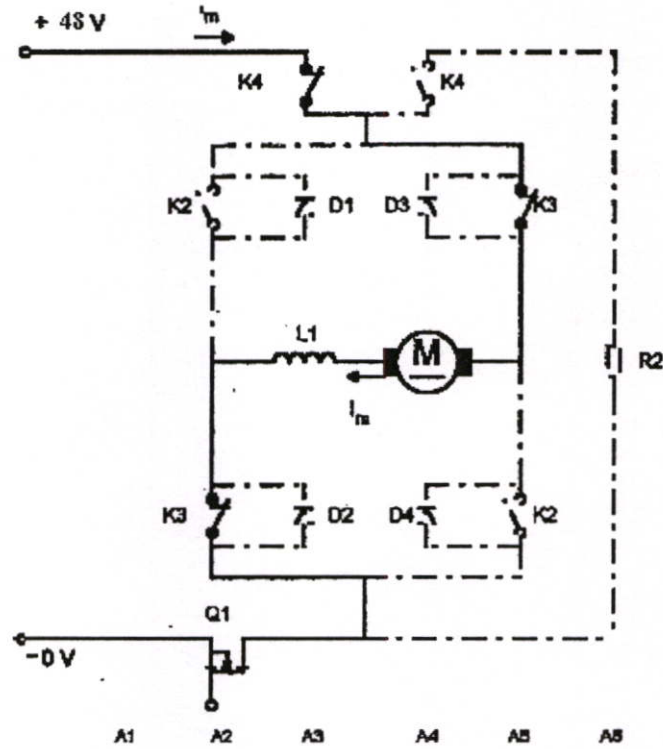
จุดภาคที่ 2



รูปที่ 2.20 แสดงสภาวะการทำงานในจุดภาคที่ 2

ในสภาวะนี้จะหยุดจ่ายไฟให้กับมอเตอร์ มอเตอร์จะยังคงหมุนต่อไปด้วยแรงเฉื่อยและทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จ่ายกระแสไฟฟ้าผ่านฟริววลิ่งไดโอด ผ่านภาระทางไฟฟ้า R2 พลังงานไฟฟ้าจะสูญเสียในภาระทางไฟฟ้า R2 จะทำให้มอเตอร์หยุดหมุนเร็วขึ้น ดังรูปที่ 2.20

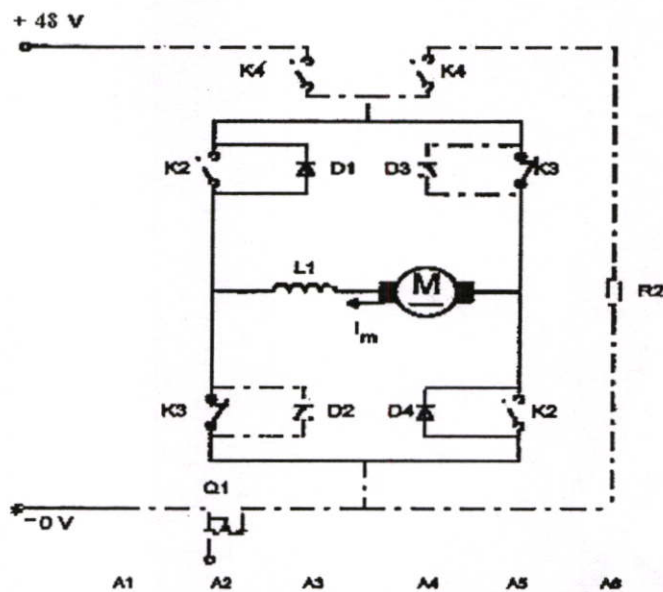
จุดภาคที่ 3



รูปที่ 2.21 แสดงสภาวะการทำงานในจุดภาคที่ 3 ขณะที่มอเตอร์หยุดนำกระแส

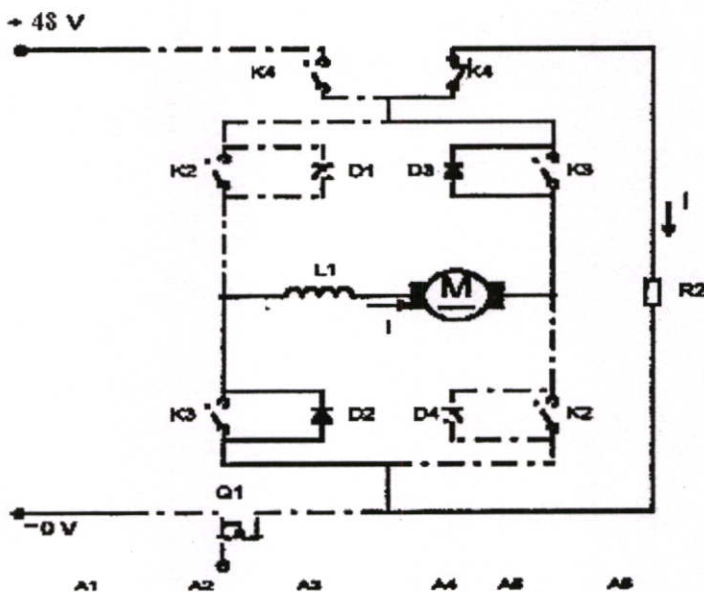
ในสภาวะนี้จะให้แมกเนติก K2 และ K4 ทำงาน เมื่อ Q1 อยู่ในสภาวะนำกระแสจะทำให้กระแสไหลเข้ามอเตอร์จากขวามาซ้าย ดังรูปที่ 2.21

เมื่อ Q1 อยู่ในสภาวะไม่นำกระแส กระแสก็จะยังไหลผ่านมอเตอร์จากขวามาซ้าย ผ่านฟิวลิ่งไดโอด ดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 แสดงสภาวะการทำงานในจุดภาคที่ 3 ขณะที่มอเตอร์หยุดนำกระแส

จุดภาคที่ 4



รูปที่ 2.23 แสดงสภาวะการทำงานในจุดภาคที่ 4

ในสภาวะนี้จะหยุดจ่ายไฟให้กับมอเตอร์ มอเตอร์จะยังคงหมุนต่อไปด้วยแรงเฉื่อยจะทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จ่ายกระแสไฟฟ้าผ่านฟริววิลลิงไดโอดผ่านความต้านทาน R_2 พลังงานไฟฟ้าจะสูญเสียในความต้านทาน R_2 จะทำให้มอเตอร์หยุดหมุนเร็วขึ้น ดังรูปที่ 2.23

2.7 มอสเฟตกำลัง (POWER MOSFET)

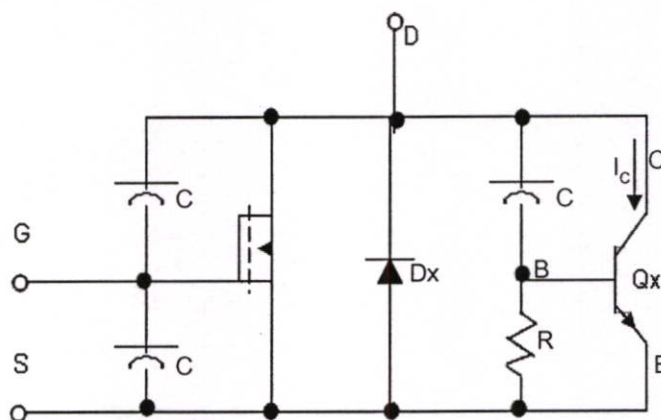
ส่วนที่สำคัญของวงจรควบคุมความเร็วของมอเตอร์แบบขับเคลื่อนเวอเตอร์เตอร์ อีกส่วนหนึ่งก็คือสวิตช์ ในงานวิจัยนี้จะใช้มอสเฟต (MOSFET) ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ ดังนั้นจะต้องให้ความสำคัญเป็นพิเศษในการที่จะนำมอสเฟตมาใช้งานในลักษณะนี้

มอสเฟตเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่สำคัญชนิดหนึ่ง ซึ่งนิยมใช้กันมากในวงจรสวิตช์เพาเวอร์ซัพพลายเพื่อใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ เนื่องจากมีข้อดีกว่าทรานซิสเตอร์(BJT) คือ

- กำลังงานสูญเสียขณะสวิตช์ต่ำ
- ไม่มีช่วงแรงดันพังทลายที่ 2
- มีอัตราขยายสูงและสร้างวงจรจับได้ง่าย ราคาถูก
- มีความต้านทานและเสถียรภาพทางอุณหภูมิดี
- สามารถนำมาต่อขนานได้ง่าย เนื่องจากสัมประสิทธิ์ความต้านทานเป็นบวก
- ใช้ในวงจรความถี่สูงได้ดี

2.7.1 วงจรสมมูลของมอสเฟต

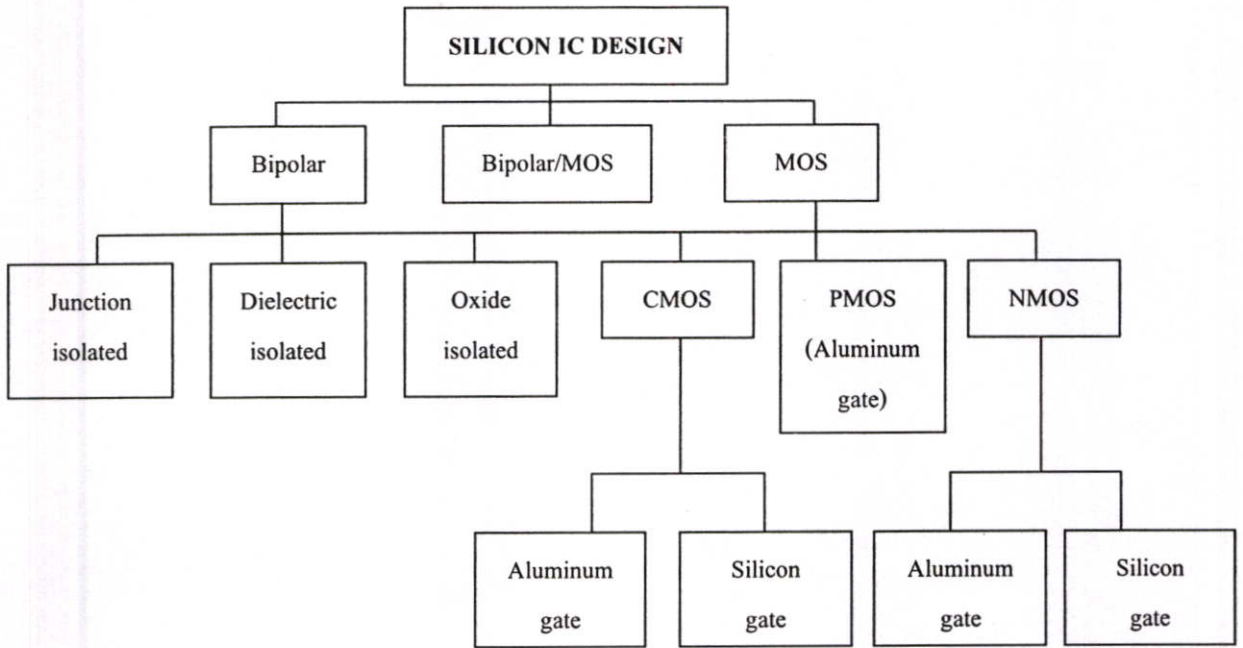
จากโครงสร้างของมอสเฟตสามารถสร้างเป็นวงจรสมมูล ซึ่งประกอบไปด้วยไดโอด(Dx), ค่าความจุ, ค่าความต้านทาน(ซึ่งมีค่าน้อยมาก) และทรานซิสเตอร์ชนิด NPN (Qx) ดังรูปที่ 2.24 การพิจารณาวงจรสมมูลนี้มีความสำคัญมากในการใช้งานมอสเฟต (MOSFET) ควบคุมความเร็วมอเตอร์แบบ PWM เพราะในขณะที่มอสเฟต (MOSFET) กำลังหยุดนำกระแสไฟฟ้าค่าแรงดันระหว่างเดรน (D) กับซอร์ส (S) จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ($\frac{dV_x}{dt}$) กระแสส่วนหนึ่งจะไหลผ่านค่าความจุที่ต่ออยู่ระหว่าง คอลเล็กเตอร์ (C) และเบส (B)ของทรานซิสเตอร์ Qx ค่ากระแสนี้ ($I_c = c \frac{dV_x}{dt}$) จะทำให้เกิดแรงดันที่ความต้านทาน (R) ของเบสและอิมิตเตอร์ของ Qx ซึ่งแรงดันนี้อาจทำให้เกิดการลัดวงจรขึ้นได้ จุดนี้ต้องได้รับการป้องกันไม่ให้แรงดันระหว่างเดรนและซอร์สเพิ่มขึ้นสูงเกินกว่าพิกัดแรงดันของมอสเฟต (MOSFET)



รูปที่ 2.24 วงจรสมมูลของมอสเฟต

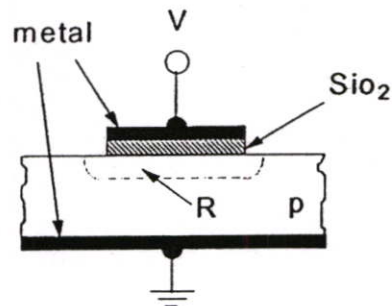
2.7.2 เทคโนโลยีของมอส

ในการพัฒนาการของเทคโนโลยี VLSI (Very Large Scale Integration) เป็นการผลิตวงจรรวมที่เป็นเทคโนโลยีที่นิยมกันมากเพราะมีข้อดีกว่าเทคโนโลยีแบบอื่นๆ หลายประการ เช่น การสูญเสียของพลังงานต่ำกว่า มีอินพุตอิมพีแดนซ์สูงมาก การออกแบบง่าย ๆ ฯลฯ ซึ่งมีความต้องการมากของงานด้าน การประมวลผลสัญญาณ (Signal Processing) แบบเป็นวงจรรวมอยู่บนชิปเดียว (Single Chip) การทำงานจะมีประสิทธิภาพมากที่สุด ซึ่งในวงจร Analog ก็เป็นบทบาทสำคัญของการผลิตไอซีโดยออกแบบเป็น VLSI ในการออกแบบ VLSI ในระบบที่เป็นวงจรรอนาลอก (Analog Circuit) ส่วนใหญ่ที่เรารู้จักก็คือวงจรกรองสัญญาณ วงจรแปลงอนาลอกเป็นดิจิตอลและดิจิตอลเป็นอนาลอก วงจรเปรียบเทียบแรงดัน (Voltage Comparator) วงจรควบคุมอัตราขยายอัตโนมัติ (Automatic Gain Control)



รูปที่ 2.25 แผนผังของเทคโนโลยีวงจรรวม

วิธีการออกแบบไอซีจะนิยมใช้เทคโนโลยีอยู่ 2 แบบคือ แบบไบโพลาร์ (BJT) และ มอส (MOS) โดยจะแบ่งเป็นส่วนย่อยๆ ดังรูปที่ 2.25 โดยทั้งหมด จะอยู่บนรากฐานของเทคโนโลยีวงจรรวมซิลิกอน (Silicon Integrate - Circuit Technology) โดยเมื่อก่อนการออกแบบวงจรรวมนั้น จะใช้เทคโนโลยีของไบโพลาร์ แต่ในสมัยนี้เทคโนโลยีของมอสได้เจริญเติบโตขึ้นอย่างมาก ซึ่งในส่วนของเทคโนโลยีของมอส ทำให้สามารถบรรจุวงจรถูกออกแบบไว้มีความหนาแน่นมากขึ้น เช่น หน่วยความจำ (Memory) หน่วยประมวลผล (Microprocessor)



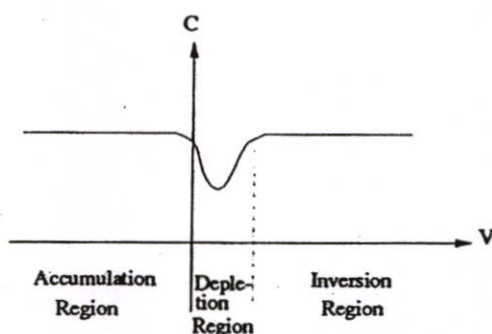
รูปที่ 2.26 โครงสร้างของมอส (Metal - Oxide Semiconductor : MOS)

2.7.3 โครงสร้างของมอสเฟต

จากรูปที่ 2.26 เป็นการประกอบของชั้นต่างๆ ของโครงสร้างแบบมอส ประกอบด้วยโลหะชั้นบนซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ซึ่งเป็นฉนวนที่สมบูรณ์ ซิลิกอนชนิดพี และโลหะชั้นล่างที่ซึ่งต่อกับกราวด์

สมมติให้ V เป็นลบจะมีสนามไฟฟ้าคร่อมชั้นของซิลิกอน (โอส) ไปที่บริเวณ R ได้โลหะชั้นล่างประจุลบจะรวมตัวอยู่แผ่นโลหะ (Electrode) ด้านบน และประจุบวกจะรวมตัวอยู่ที่บริเวณ R ซึ่งในกรณีนี้อุปกรณ์นี้จะแสดงตัวเป็นตัวเก็บประจุมีค่าของขนาดความจุไฟฟ้า เป็น

$$C \approx \epsilon_{\text{ox}} \frac{A}{l} \quad (2-21)$$

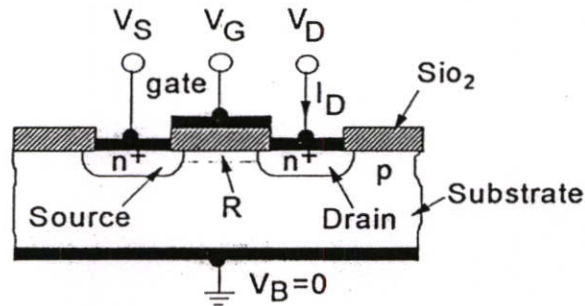


รูปที่ 2.27 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุ (C) กับแรงดัน (V)

จากสมการที่ (2.21) ϵ_{ox} เป็นค่าการยอมให้กระแสไฟฟ้าผ่านของ SiO_2 โดย $\epsilon_{\text{ox}} = \epsilon_0 k_{\text{ox}}$ มีค่า $\cong 0.35 \text{ pF/cm}$. โดนที่ k_{ox} คือค่าความเป็นฉนวนของ SiO_2 ($k_{\text{ox}} = 3.9$) ϵ_0 คือค่าการยอมให้กระแสไฟฟ้าผ่านของบรรยากาศ ($\epsilon_0 \cong 8.854 \times 10^{-14} \text{ F/cm}$) สำหรับ A คือพื้นที่หน้าตัดของขั้วโลหะด้านบน และ l เป็นความหนาของชั้นออกไซด์ ซิลิกอนชนิดพี ที่อยู่ระหว่าง R และโลหะชั้นล่างจะแสดงตัวเป็นความต้านทาน หรือ อีกนัยหนึ่งก็คือค่าตัวเก็บประจุ ความสูญเสียแน่นอน

ขั้นต่อไปสมมติให้ V มีแรงดันเป็นบวกค่าน้อยๆ จะเกิดสนามไฟฟ้าซึ่งจะผลักโอส ผลที่ได้คือประจุลบจะแยกออกจากกัน โดยโอสที่เคลื่อนที่ จะเป็นผลให้ไม่มีประจุอยู่ที่บริเวณ R ซึ่งเรียกว่า Depletion Layer และประจุบวกก็จะรวมตัวอยู่ที่ Electrode ด้านบน และจะเป็นเสมือนตัวเก็บประจุ เมื่อ V เพิ่มขึ้นทำให้ประจุใน R จะมากขึ้นและทำให้ Depletion layer กว้างขึ้นตาม ถ้า V เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จะมีปรากฏการณ์ใหม่เกิดขึ้น โดยความร้อนที่เกิดจาก โอส และอิเล็กตรอนเกิดขึ้นเรื่อยๆ ในสารกึ่งตัวนำ ถ้าสนามไฟฟ้าที่ถูกสร้างจาก V ที่เป็นบวกอย่างเพียงพอ จะสามารถดูดความร้อนจากอิเล็กตรอนทั้งหมดไปที่ R และอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปที่ ผิวหน้า จากสมการที่ (2.21) ค่าของ l ซึ่งเป็นความหนาของ SiO_2 และค่าของ C จะมีค่าเท่ากับกับกรณีที่ V ที่เป็นบวกกับ

ในกรณีที่ค่า V ที่เป็นลบ แต่ในกรณีที่ V เป็นบวกน้อยๆ จะอยู่ใน Depletion Region, Depletion Region, Inversion Region โดยพิจารณาจากรูปที่ 2.4 แสดงถึงรายละเอียดของมอสเฟต ซึ่งจะเห็น n^+ (การโคปสารชนิด n) Region อยู่ 2 ตัวในสารกึ่งตัวนำชนิดพี ในด้านซ้ายจะเรียกว่า ซอร์ส (Source) ซึ่งแรงดันที่ต่ออยู่จะเรียกว่า V_S ในด้านขวาจะเรียกว่า เคน (Drain) ซึ่งแรงดันที่ต่ออยู่จะเรียกว่า V_D โลหะที่ทำ Electrode จะเรียกว่า เกต ซึ่งแรงดันที่ต่ออยู่จะเรียกว่า V_G และ ตัวถังของอุปกรณ์ตัวนี้จะเรียกว่า ซับสเตรท (Substrate) หรือ บัค (Bulk) ซึ่งแรงดันที่ต่ออยู่ จะเรียกว่า V_B



รูปที่ 2.28 โครงสร้างของ มอสเฟต

NMOS ประกอบด้วยส่วนซับสเตรท (Substrate) ที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิด พี (P-Type) ซึ่งมีสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น 2 ชุด ถูกแพร่ลงบนฐานรองสารกึ่งตัวนำนี้เรียกว่า ซอร์ส (Source) และ เคน (Drain) บนผิวหน้าระหว่างซอร์สกับเคน จะมีแผ่นฟิล์มบางๆ ของซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ส่วนบนของซิลิกอนไดออกไซด์จะมีโพลีซิลิกอนซึ่งทำหน้าที่เรียกว่า เกต (Gate) ถ้าส่วนของฐานรองทำด้วยสารกึ่งตัวนำชนิดอื่นและสารกึ่งตัวนำชนิด พี ถูกแพร่ลงบนฐานรอง โครงสร้างชนิดนี้เรียกว่า PMOS

ระยะห่างระหว่างสารกึ่งตัวนำที่เป็น ซอร์ส และ เคน เรียกว่า ความยาวแชนแนล (Channel Length : L) และ ความกว้างของช่องระหว่างซอร์สและเคน เรียกว่า ความกว้างแชนแนล (Channel Width : W)

2.7.4 ทฤษฎีการทำงานของมอสเฟต

มอสทรานซิสเตอร์หรือมอสเฟต (MOSFET) มาจากคำเต็มว่า Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor และมีชื่ออีกอย่างหนึ่งว่า อินซูลเกตเดทเกตเฟต (Insulated Gate FET) หรือ IGFET เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดหนึ่งซึ่ง ใช้สนามไฟฟ้าควบคุมปริมาณการไหลของกระแสของนำกระแส ในปัจจุบันมอสเฟตได้เข้ามาแทนทรานซิสเตอร์ชนิดไบโพลาร์ เนื่องจากโครงสร้างง่าย มีขั้นตอนการผลิตไม่ยุ่งยาก มีขนาดเล็กทำให้ผลิตได้ปริมาณมากๆ ต่อผลึกสารกึ่งตัวนำหนึ่งชิ้นมีความต้านทานอินพุตสูง (High Input Impedance) การสูญเสียต่ำ (Low Dissipation) สัญญาณ

รบกวนต่ำ แต่มอสเฟตก็ยังมีข้อเสียเมื่อเปรียบเทียบกับทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์ คือ การทำงานที่กำลังต่ำ และ อัตราการขยายต่ำ

จากรูปที่ 2.28 สมมติให้ซอร์สเป็นกราวด์ ($V_S = 0$) เป็นบวกน้อยๆ ประมาณ 0.5 โวลต์ พิจารณากระแส เคน (I_D) โดยให้ V_G เพิ่มขึ้นจาก 0 ไปเรื่อยๆ ในทางบวก เห็นได้ชัดที่เกตจะมีฉนวนกันโดยชั้นของออกไซด์ (SiO_2) จะไม่มีกระแส I_G ที่ n^+ ของขาเคนและรอบๆคือซัปสเตรทชนิด P จากทฤษฎีสารกึ่งตัวนำ P - N Junction เมื่อซัปสเตรทเป็นกราวด์ และ $V_D > 0$ จะเป็น Reverse Bias ขณะที่ $V_G = 0, I_D = 0$

ให้ V_G เพิ่มขึ้น บริเวณ R ก็ว่างเปล่าและเมื่อ R ว่างเปล่าทำให้ I_D เป็น 0 เนื่องจากยังเป็น Reverse Bias เช่นเดียวกัน ในทางตรงกันข้าม V_G เปลี่ยนไปเป็นขั้วตรงกันข้าม จะทำให้บริเวณ R มี อิเล็กตรอนเข้ามา ในชั้นที่มีอิเล็กตรอนเคลื่อนที่อยู่ นั้นจะเรียกว่า Inversion layer หรือ แชนแนล (Channel) ซึ่งจะทำให้การเชื่อมขาเคน กับขาซอร์ส และเมื่อเคน เป็นบวกเมื่อเทียบกับ ซอร์ส อิเล็กตรอนจะไหลจาก ซอร์ส ไปหา เคน ซึ่งเป็นผลทำให้กระแส, $I_D > 0$ ซึ่งขณะเดียวกันจะต้องมีแรงดันค่าน้อยๆ ที่ขาเกต V_G ในการสร้างแชนแนล เรียกว่า Threshold Voltage ซึ่งใช้สัญลักษณ์ V_T

อิเล็กตรอนในแชนแนลนั้น ส่วนน้อยจะเกิดจากผลของความร้อนจากฐานรองแต่ส่วนมากจะเกิดจากสนามไฟฟ้าโดยแรงดัน V_G อิเล็กตรอนนอกจากขาซอร์ส และอิเล็กตรอนบางตัวจะเกิดจากขาเคน แต่เมื่อ $V_G > 0$ ขาเคนและฐานรองจะอยู่ในสภาวะ Reverse Bias ซึ่งอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ออกได้ยากจากขาเคน

เมื่อเกิดค่าความต่างศักย์ขึ้นระหว่างปลายสองข้างของแชนแนลอิเล็กตรอนในแชนแนลจะถูกดึงออกไปที่ขาเคน จึงเป็นการเพิ่มอิเล็กตรอนความร้อนเคลื่อนที่แบบไม่มีทิศทาง การเคลื่อนที่อย่างไม่สม่ำเสมอเป็นเหตุมาจากกระแสไหลเมื่อค่า V_G น้อยๆ ทำให้แชนแนล แสดงตัวเป็นความต้านทาน จากค่า $I_D \approx \frac{V_D}{R}$ โดยที่ความต้านทานของแชนแนล R มีค่าเป็น

$$R = \frac{L}{w\mu_n|Q_n|} \quad (2-22)$$

โดยที่ μ_n คือ ค่าความคล่องของอิเล็กตรอน, Q_n คือความเข้มข้นของประจุของอิเล็กตรอนในแชนแนล และ V_G เป็นแรงดันที่ขาเกต มีสองเทอมเป็น $(V_G - V_T)$ ได้เป็น

$$Q = -C_{ox}(V_G - V_T) \quad (2-23)$$

โดยที่ $C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{l}$ คือความจุ (ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่) ของชั้นออกไซด์ที่กั้นระหว่าง เกต กับ แชนแนล ใช้ในกรณีของ V_D มีค่าน้อยๆ ($V_D \ll (V_G - V_T)$) ได้เป็น

$$I_D = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_G - V_T) V_D \quad (2-24)$$

ซึ่งทรานซิสเตอร์แสดงตัวเป็นความต้านทานโดยควบคุมโดย V_G มีสมการเป็น

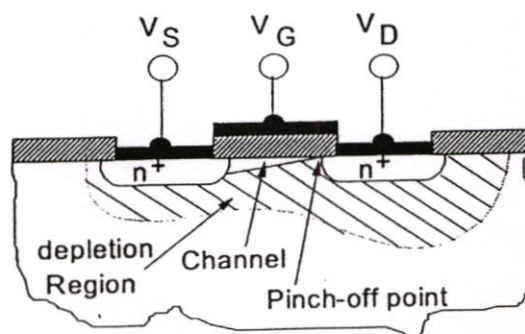
$$R = \left(\mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_G - V_T) \right)^{-1} \quad (2-25)$$

เมื่อ V_D เพิ่มขึ้น และ จะไม่สามารถพิจารณา V_G แต่เพียงอย่างเดียวได้ ดังนั้นสมการที่ จึงไม่สามารถที่จะใช้ได้ สักคาของแชนแนล ที่ซอร์ส มีค่าเป็น 0 และขณะเดียวกันที่เดรนมีค่าเป็น V_D โดยสามารถสมมติค่าแรงดันเฉลี่ยในแชนแนล มีค่าเท่ากับ $V_D/2$ เป็นผลให้ค่าแรงดันเฉลี่ยระหว่างเกต กับ แชนแนล มีค่าเป็น $(V_G - V_D/2)$ แล้วนำไปแทน V_G ในสมการที่ (2.4) ได้เป็น

$$I_D = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} \left(V_G - V_T - \frac{V_D}{2} \right) V_D \quad (2-26)$$

ซึ่งในสมการที่ (2.26) เป็นการประมาณที่ใช้ได้ดีในกรณี $V_D < (V_G - V_T)$ ซึ่งเรียกช่วงการทำงานของ มอสเฟตนี้ว่าช่วง Linear Region หรือ Ohmic Region หรือ Tridode Region

เมื่อ $V_D > (V_G - V_T)$ จะเกิดปรากฏการณ์อีกอย่างหนึ่งขึ้นพิจารณา จากรูปที่ 2.29 แสดงถึงค่าศักดาที่แปรเปลี่ยนไปภายในแชนแนล และปริมาณความเข้มของประจุที่ Q_n ที่ค่อยๆ ลดลงเมื่อใกล้กับขาเดรนถ้าที่ขาเดรนมีแรงดันเท่ากับ $V_D = V_G - V_T$ ทำให้แรงดันระหว่างเกต กับ แชนแนล มีค่าไม่เพียงพอที่จะรักษาสภาพของแชนแนล Depletion Region จะแผ่ไปรอบๆ ขาซอร์ส แชนแนล และ ขา เดรน ในบางที่จะเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า Pinch - off ในรูปที่ 2.29 จะเห็นจุด Pinch - off ซึ่งจะเคลื่อนที่ไปทางขาซอร์สเมื่อแรงดันที่ขาเดรนเพิ่มขึ้น ในขณะที่แชนแนลได้แผ่จากขาซอร์สไปถึงจุด Pinch - off ที่ใดที่หนึ่งได้ขาเกต ช่วงระหว่างจุด Pinch - off จะเป็น Depletion Region อีเล็กตรอนจากแชนแนล และ จะถูกฉีดออกไปที่จุด Pinch - off ไปที่ Depletion Region และจะถูกดูดไปที่ขาเดรน โดยสนามไฟฟ้าที่เกิดจากความต่างศักย์ที่ขาเดรนกับจุด Pinch - off

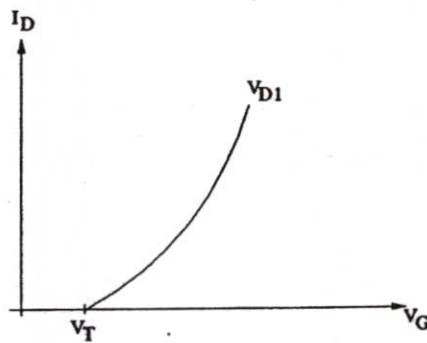


รูปที่ 2.29 มอสเฟตในกรณีที่ยึดตัว (saturation : Pinch - off)

โดยแรงที่ดัน $V_{DS} \triangleq (V_D - V_S)$ จะถูกแบ่งเป็นสองส่วนคือที่แซนแนระหว่างขาซอสกับจุด Pinch - off และ ที่ Depletion Region ระหว่างจุด Pinch - off กับขาเดรน ซึ่งจุดนี้จะมีค่าความต้านทานสูงกว่า และ ค่า V_{DS} ส่วนใหญ่จะอยู่ที่ส่วนนี้ และเมื่อเพิ่มค่า I_D ขึ้นไปก็เป็นการประมาณค่าที่ใช้ได้ดี ผลที่ได้เมื่อแรงดันที่ Depletion Region เพิ่มขึ้นจะทำให้กระแส I_D เมื่อ $V_D > (V_G - V_T)$ ดังสมการที่ (2.27)

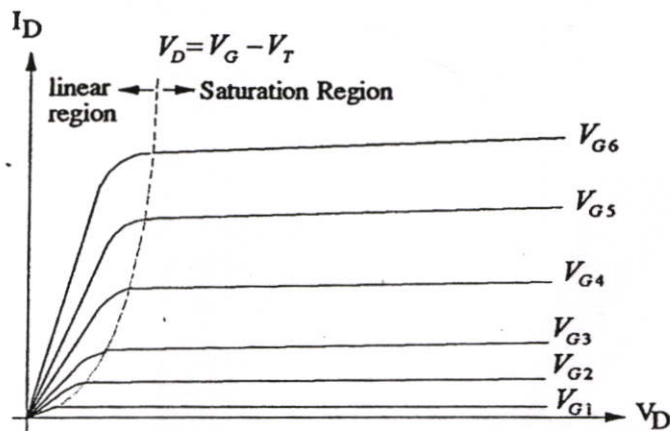
$$I_D(V_D) \approx I_{D_{SAT}} \triangleq I_D(V_{D_{SAT}}) \quad (2.27)$$

$$I_D = \frac{\mu_n C_{ox}}{2} \frac{W}{L} (V_G - V_T)^2 \quad (2.28)$$



รูปที่ 2.30 ความสัมพันธ์ของกระแสเดรนกับแรงดันที่ขาเกต

จากสมการที่ (2.28) เห็นได้ว่ากระแส I_D จะเพิ่มขึ้นเมื่อ L ลดลง มีผลกระทบอีกอย่างหนึ่งของค่า L ที่เกิดขึ้นเรียกว่า Channel Length Modulation โดยจะคูณสมการที่ (2.28) ด้วย $(1 + \lambda V_D)$ โดยที่ค่าของ λ จะเป็นค่าคงที่แปรผกผันกับค่า L โดยทั่วไปเช่น $L = 10 \mu\text{m}$. ค่า λ มีค่าเท่ากับ 0.03 V^{-1} หรือ $\lambda \propto 1/L$



รูปที่ 2.31 ความสัมพันธ์ของกระแสเดรนและแรงดันขาเดรนกับซอร์ส

ซึ่งความสัมพันธ์ของแรงดัน V_G กับ กระแส I_D ในขณะที่แรงดันขาเกตคงที่และมอสเฟตทำงานในย่านอิมิตัว สามารถเขียนเป็นกราฟได้ดังรูปที่ 2.30 และ รูปที่ 2.31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนและแรงดันที่ขาเดรนกับขาซอร์ส โดยเปลี่ยนค่า V_G โดยที่

$$V_{G1} < V_{G2} < V_{G3} < V_{G4} \dots$$

การทำงานของมอสเฟตเป็นลักษณะของการใช้แรงดันไฟฟ้าควบคุมปริมาณของกระแสสมการกระแสเดรนของมอสเฟต ถูกคิดขึ้นโดย Sha, Shichman และ D.Hodges ดังสมการที่ (2.29) แสดงคุณสมบัติการทำงานของมอสเฟต

$$I_D = K' \frac{W}{L} (V_{GS} - V_T - \frac{V_{DS}}{2}) V_{DS} \quad ; \quad V_{GS} > V_T \quad (2-29)$$

โดยที่

- K' = ค่าทรานสคอนดักแตนซ์ (Transconductance) มีค่าเท่ากับ $\mu_o C_{ox}$
- μ_o = ค่าความคล่องของโฮลหรืออิเล็กตรอน (Surface Mobility of Carrier)
- C_{ox} = ค่าความจุต่อพื้นที่ของเกตออกไซด์ (Capacitance Per Unit Area of the Gate Oxide)
- W = ความกว้างของแชนแนล (Channel Width)
- L = ความยาวของแชนแนล (Channel Length)
- V_{GS} = แรงดันระหว่างขาเกต กับ ซอร์ส
- V_T = แรงดันขีดเริ่ม (Threshold Voltage)
- V_{DS} = แรงดันระหว่างขาเดรน กับ ซอร์ส
- I_D = กระแสเดรน

มอสเฟตมีการทำงานแบ่งเป็น 3 ช่วง โดยแต่ละช่วงการทำงานขึ้นอยู่กับค่า $V_{GS} - V_T$ และค่า V_{DS} ถ้าค่า $V_{GS} - V_T$ เป็นศูนย์หรือเป็นค่าลบ มอสเฟตจะอยู่ในช่วงไม่นำกระแส (Cut - off Region)

$$I_D = 0 \quad ; \quad |V_{GS}| - |V_T| < 0 \quad (2-30)$$

ในช่วงไม่นำกระแสนี้ ช่องนำกระแสจะทำตัวเหมือนวงจรเปิด ถ้าค่า $|V_{GS}| - |V_T| > 0$ และ $0 < |V_{DS}| < |V_{GS}| - |V_T|$ แล้วมอสเฟตจะอยู่ในช่วงของการนำกระแสไม่อิมิตัว (Triode Region)

$$I_D = K' \frac{W}{L} (V_{GS} - V_T - \frac{V_{DS}}{2}) V_{DS} \quad (2-31)$$

ถ้าค่า $|V_{GS}| - |V_T| > 0$ และ $|V_{DS}| > |V_{GS}| - |V_T|$ แล้วมอสเฟตจะทำงานอยู่ในช่วงของการนำกระแสอิมิตัว (Saturation Region)

$$I_D = K' \frac{W}{2L} (V_{GS} - V_T)^2 \quad (2-32)$$

คุณสมบัติทางเอาท์พุทของมอสเฟต คุณสมบัติของมอสเฟตที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งคือการแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง I_D และ V_{GS} โดยใช้สมการที่ (2.32) คุณสมบัติของมอสเฟตแบบนี้เรียกว่า ทรานสคอนดักแตนซ์ เป็นการแสดงผลของ แรงดันระหว่างซอร์ส กับ บอดี้ (V_{SB}) ขณะที่ V_{SB} มีการเพิ่มขึ้น ค่าของแรงดันขีดเริ่ม (V_T) สำหรับ มอสเฟตแบบ พีเซนแนลจะมีค่าลดลงเมื่อมีการเพิ่มของแรงดันระหว่าง บอดี้ กับซอร์ส (V_{BS})

2.7.5 สัญลักษณ์ของมอสเฟต

สัญลักษณ์ของมอสเฟตสามารถบอกได้ว่าเป็น มอสเฟตชนิด N หรือ P โดยดูที่หัวลูกศรที่ขาซอร์สถ้าหัวลูกศรหันเข้าหาขาเกตแสดงว่าเป็น PMOS แต่ถ้าหัวลูกศรหันออกจากขาเกตแสดงว่าเป็น NMOS หรือดูที่ทิศทางของหัวลูกศรที่ขาบอดี้ (Body) หรือ ฐานรอง (Substrate) หรือบางที่อาจจะเรียกว่า Bulk โดยถ้าหัวลูกศรหันเข้าหาขาเกตแสดงว่าเป็น NMOS แต่ถ้าหัวลูกศรหันออกจากขาเกตแสดงว่าเป็น PMOS และสัญลักษณ์ยังสามารถบอกได้อีกว่ามอสเฟตเป็นเอ็นฮานเม้นท์มอส หรือ ดีพลีชันมอสเฟตอีกด้วย ดังรูปที่ 2.32

มอสเฟตแบ่งตามชนิดของการทำงานได้ 2 ชนิดคือ เอ็นฮานเม้นท์มอส (Enhancement MOSFET) และ ดีพลีชันมอส (Depletion MOSFET) ซึ่งแต่ละชนิดจะแบ่งออกได้อีกเป็น N - Channel หรือ NMOS สร้างของ NMOS จะแสดงไว้ในรูปที่ 2.32 ก. ส่วนโครงสร้างของ PMOS จะแสดงไว้ดังรูปที่ 2.32 ข.

NMOS	PMOS	MODE
		Enhancement
		Depletion
		Enhancement
		Depletion

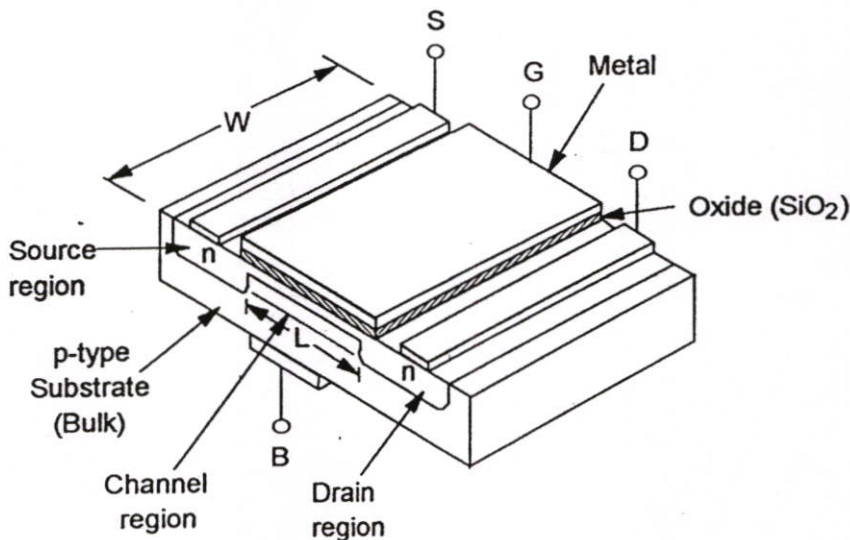
รูปที่ 2.32 แสดงสัญลักษณ์ของมอสเฟตชนิดต่างๆ

จากรูปที่ 2.32 แสดงสัญลักษณ์ของมอสเฟตชนิดต่างๆ สัญลักษณ์ในรูปที่ 2.32 ก. คือ Enhancement NMOS เมื่อโวลต์เดจระหว่างบอดี้และซอร์ส ($V_{BS} \neq 0$) สัญลักษณ์ในรูปที่ 2.3ข. คือ Enhancement PMOS เมื่อ $V_{BS} \neq 0$ สัญลักษณ์ในรูปที่ 2.32 ค. และ ง. คือ Depletion PMOS เมื่อ $V_{BS} \neq 0$ สัญลักษณ์ในรูปที่ 2.32 ก. และ ข. กับ 2.32 จ. และ ฉ. แต่แตกต่างกันที่ $V_{BS} \neq 0$ และ $V_{BS} = 0$

2.7.6 ชนิดของมอสเฟต

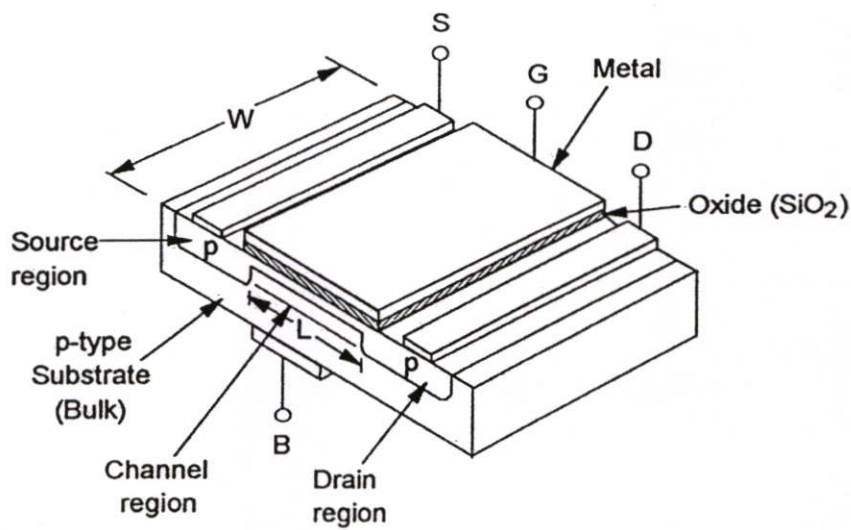
มอสเฟตแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ เอ็นฮานเมนท์โหมดมอสเฟต หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า E-MOSFET และ ดีพลีชันมอสเฟต หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า D - MOSFET ดังรูปที่ 2.33 และ 2.34 แสดงโครงสร้างของ มอสเฟตชนิด เอ็น และ พี ทั้ง 2 แบบตามลำดับ

จากรูปที่ 2.33 จะเห็นว่าโครงสร้างของ D - MOSFET จะคล้ายกับ E - MOSFET จะแตกต่างกันตรงที่ช่องระหว่าง ซอร์ส กับ เดรน ของ D - MOSFET จะมีการแพร่สารเอ็นอยู่ ดังนั้นจึงมีกระแสไหลระหว่างเดรนกับ ซอร์ส เมื่อแรงดันที่ เดรน เป็นบวกเมื่อเทียบกับ ซอร์ส และแรงดันระหว่าง เกต กับ ซอร์ส เป็นศูนย์ ($V_{GS} = 0$) เมื่อ V_{GS} มีค่าเป็นลบกระแสเดรนจะลดลงถ้า V_{GS} มีค่าเป็นบวกกระแสเดรนจะเพิ่มขึ้น ส่วนการทำงานของ E - MOSFET จะไม่มีกระแสไหลระหว่าง เดรน กับ ซอร์ส เมื่อแรงดันที่เดรนเป็นบวกเมื่อเทียบกับ ซอร์ส และแรงดันระหว่างเกตกับ ซอร์สเป็นศูนย์ เมื่อ V_{GS} มีค่าเป็นบวกจะทำให้กระแสเดรนไหล และเมื่อ V_{GS} มีค่าเป็นบวกมากขึ้นจะทำให้กระแสเดรนไหลเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 2.35 แสดงกราฟคุณสมบัติของ E - MOSFET และ D - MOSFET



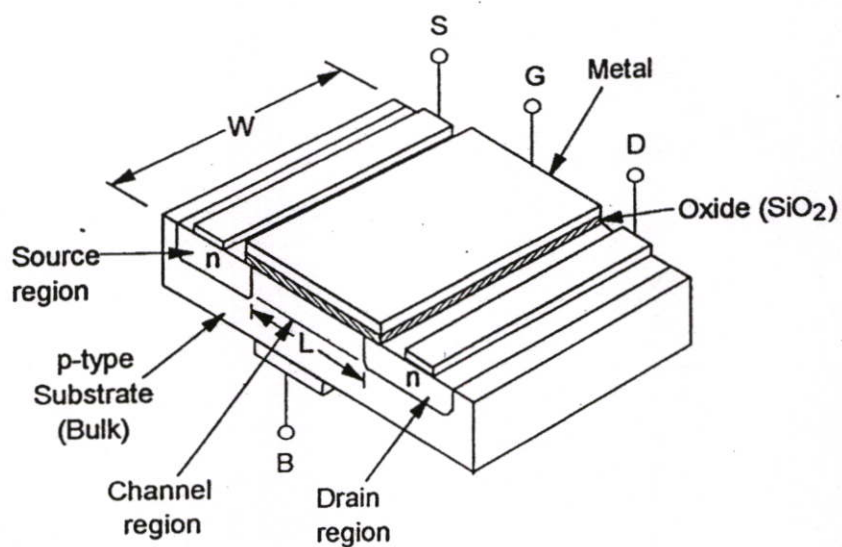
(ก) ชนิด N - Channel

รูปที่ 2.33 โครงสร้างของมอสเฟตแบบ D-MOSFET



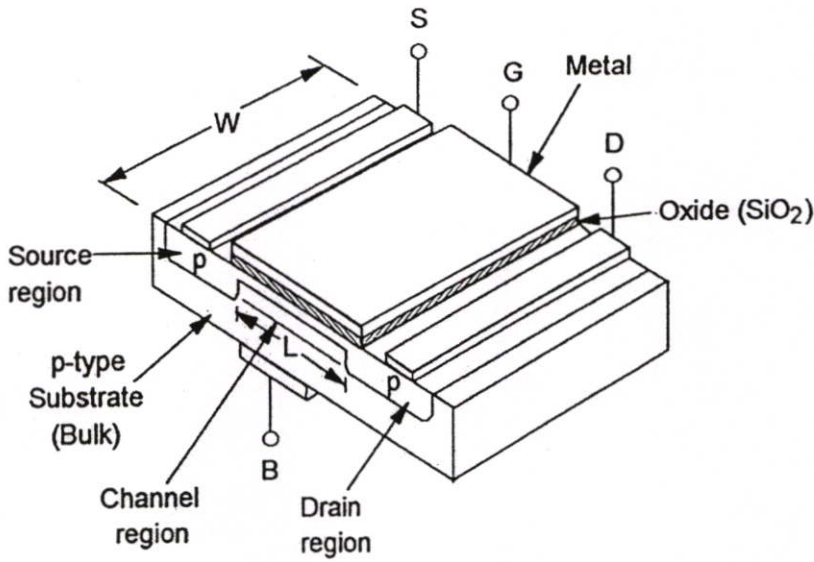
(ข) ชนิด P - Channel

รูปที่ 2.33 (ต่อ)



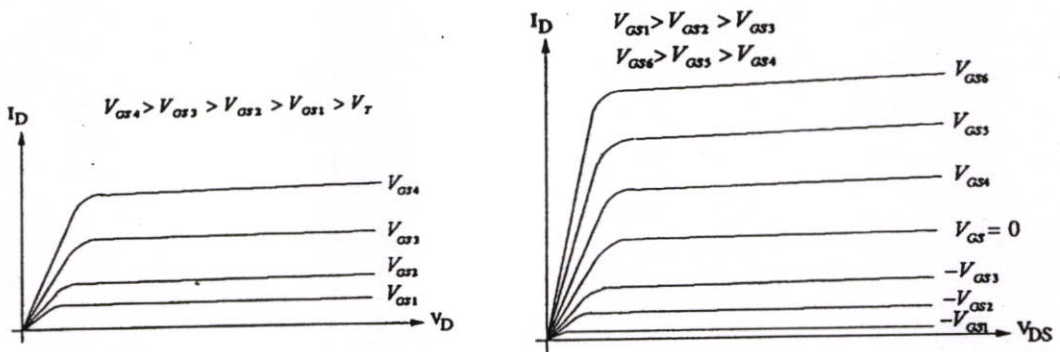
(ค) ชนิด N - Channel

รูปที่ 2.34 โครงสร้างของมอสเฟตแบบ E-MOSFET



(จ) ชนิด P - Channel

รูปที่ 2.34 (ต่อ)

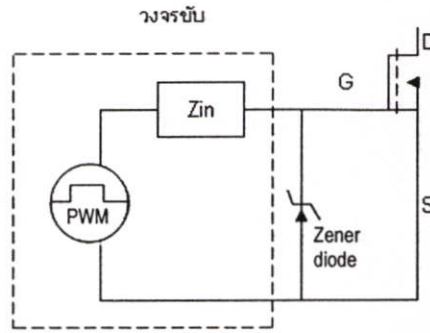


รูปที่ 2.35 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง I_D กับ V_{DS} (จ) E-MOSFET (ข) D-MOSFET

2.7.7 แรงดันสไปค์

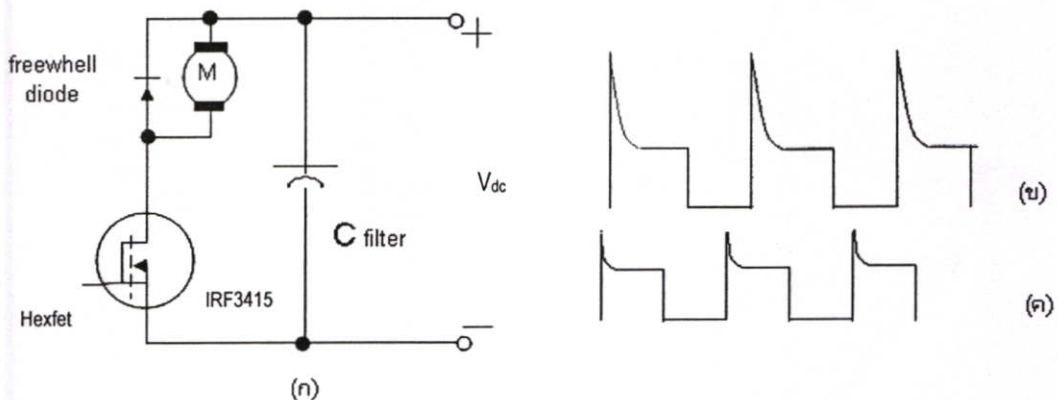
แรงดันสไปค์ (spike voltage) ที่เกิดขึ้นส่วนมากจะเกิดจากการคายพลังงานของค่าความเหนี่ยวนำที่แฝงอยู่ในระบบแรงดันสไปค์ที่ทำให้มอสเฟตเสียหายอย่างถาวรคือแรงดันสไปค์คร่อมเกต-ซอร์สและแรงดันสไปค์คร่อมเดรน-ซอร์ส

แรงดันสไปค์เกต-ซอร์สสามารถป้องกันได้โดยใช้ซีเนอริไดโอด (Zener diode) มาต่อคร่อมเกต-ซอร์ส ดังรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.36 การป้องกันแรงดันสไปค์คร่อม เกต-ซอร์ส

แรงดันสไปค์คร่อมเกต-ซอร์สเป็นส่วนที่รุนแรงที่สุดเพราะโหลดเป็นมอเตอร์นั่นคือเป็นพวกค่าความเหนี่ยวนำเหนี่ยวนำในช่วงเวลาที่มอสเฟตตัดต่อทำงานจากต่อมาเป็นตัดทำให้แรงดันตกคร่อมขั้วของมอสเฟตเพิ่มจากศูนย์ (หรือเกือบศูนย์) ไปเป็นแรงดันระดับไฟเลี้ยงในทันที จากรูป 2.37 ก) แม้ว่าแรงดันไฟเลี้ยง (V_{dc}) จะมีค่าต่ำกว่าอัตราทนแรงดันของมอสเฟตก็ตามแต่ด้วยแรงดันที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของขดลวดทำให้แรงดันตกคร่อมมอสเฟตสูงขึ้นอย่างมากเป็นแรงดันสไปค์ถ้ามอสเฟตทำงานตัดต่อเร็วเท่าใดแรงดันนี้ก็จะยิ่งสูงเท่านั้นวิธีแก้ปัญหานี้โดยทั่วไปจะใช้ฟลิวไรโดไดโอด (freewheel diode) ต่อคร่อมโหลด และไดโอดนี้จะต้องมีคุณสมบัติของการรีคัฟเวอรี (recovery) ที่ดีพอ นั่นคือเป็นไดโอดประเภทฟาสต์รีคัฟเวอรี (fast recovery) แต่การใช้ไดโอดอาจแก้แรงดันส่วนนี้ได้ไม่ดีพอจึงต้องมีคาปาซิเตอร์ (Capacitor) ต่อคร่อมแหล่งจ่าย ไฟอีกส่วนหนึ่งซึ่งคาปาซิเตอร์นี้มีประโยชน์หลายด้าน การออกแบบและรายละเอียดในส่วนนี้จะกล่าวในส่วนต่อไป

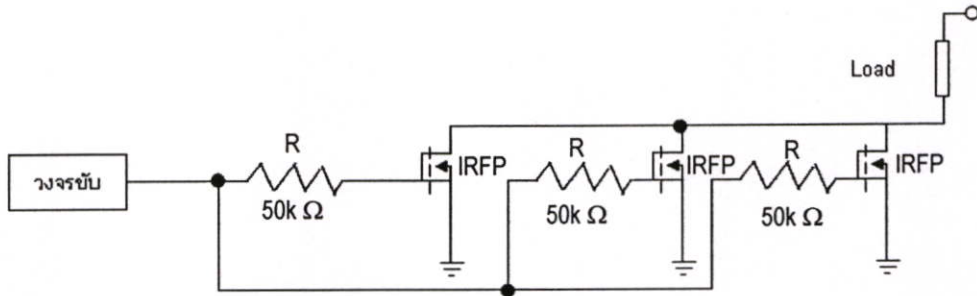


รูปที่ 2.37 ก) การป้องกันแรงดันสไปค์คร่อมเกต-ซอร์ส

ข) ไม่ได้ต่อคาปาซิเตอร์ ค) เมื่อต่อคาปาซิเตอร์และไดโอด

2.7.8 การขนานมอสเฟต

เนื่องจากสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของค่าต้านทานระหว่าง เกรน-ซอร์ส $R_{ds(on)}$ มีค่าเป็นบวก นั่นคือค่าต้านทาน $R_{ds(on)}$ จะสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิที่ตัวมันมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นปริมาณกระแสที่ไหลผ่านมอสเฟตที่ต่อขนานกันดังแสดงในรูปที่ 2.38 จึงมีปริมาณใกล้เคียงกันที่อุณหภูมิเดียวกัน

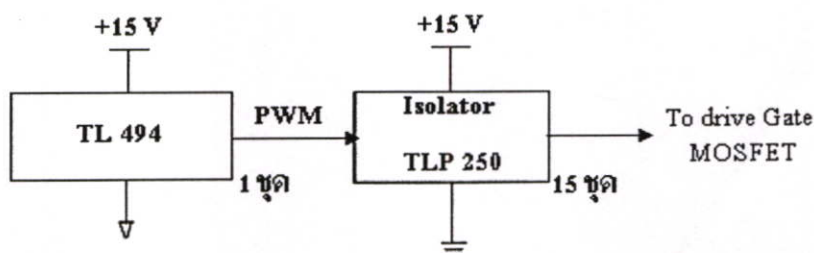


รูปที่ 2.38 การขนานมอสเฟต

นั่นคือต้องติดตั้งไว้บนแผ่นระบายความร้อนเดียวกันแต่การต่อขนานมอสเฟตในการทำงานช่วงแรกอาจจะนำกระแสและหยุดนำกระแสไม่พร้อมกันทำให้มอสเฟตตัวที่นำกระแสก่อนอาจรับกระแสมากกว่าพิกัดของตัวเอง ดังนั้น จะต้องมียังจรรยาจำกัดกระแสเกิน (current limiting) ดังจะได้กล่าวในส่วนต่อไป

2.8 วงจรถับ

การใช้งานมอสเฟตเป็นสวิตช์ความถี่สูงนั้นจำเป็นต้องใช้วงจรถับซึ่งแสดงการต่อในรูปที่ 2.38 ซึ่งมีความสามารถในการรับกระแสและจ่ายกระแสได้ ถึงแม้ว่ามอสเฟตต้องการกระแสไฟฟ้าเพียงเล็กน้อย แต่ในการนำมอสเฟตมาต่อขนานกันหลายๆ ตัวนั้น วงจรถับจะต้องมีความสามารถจ่ายกระแสได้เพียงพอด้วย เพื่อไม่ให้ขณะทำงานเกิดการรบกวนระหว่างวงจรถับกำลัง และวงจรถับควบคุมจะต้องทำการแยกกราวด์ของวงจรถับกับส่วนของการสร้างสัญญาณ PWM ออกจากกันโดยการสร้าง PWM จะอาศัยไอซีสำเร็จรูป TL 494 ในการสร้างสัญญาณเอาต์พุตของสัญญาณ 1 ชุดส่งสัญญาณให้กับไอซีไอ โซเลเตอร์ TLP 250 เพื่อแยกสัญญาณ 15 ชุดในการขับเคลื่อนมอสเฟต



รูปที่ 2.39 วงจรถับเกต

บทที่ 3

การออกแบบวงจรควบคุมความเร็วของมอเตอร์

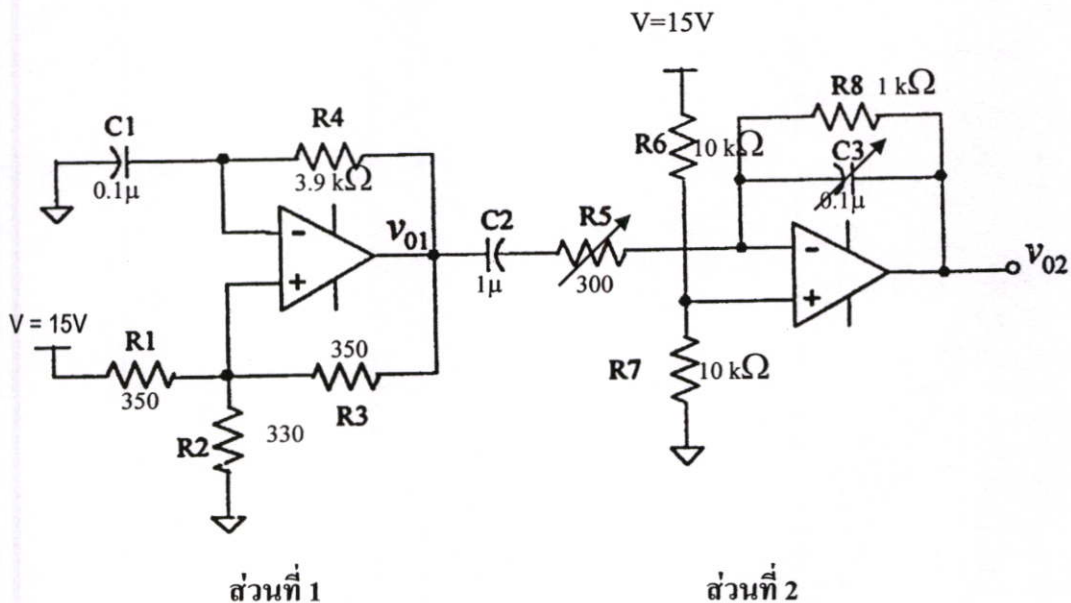
ในบทนี้ จะเป็นการกล่าวถึงรายละเอียดต่าง ๆ ของการออกแบบวงจรควบคุมความเร็วของมอเตอร์ ส่วนประกอบหลัก ๆ ของวงจรควบคุมความเร็วมีอยู่ 2 ส่วน คือ ภาควงจรควบคุมสัญญาณ ชับเกต และภาควงจรกำลัง (power circuit)

3.1 ภาควงจรควบคุมสัญญาณขับเคลื่อนมอเตอร์

ในส่วนนี้จะแบ่งออกเป็นส่วนย่อย ๆ คือ วงจรออสซิลเลเตอร์ ซึ่งเป็นวงจรกำเนิดสัญญาณ สามเหลี่ยม, PWM คอมพาราเตอร์, ภาควับเกต, ภาควัดอัตราเร่ง และวงจรป้องกันต่าง ๆ คือ ป้องกันกระแสเกินและอุณหภูมิเกิน ซึ่งแต่ละส่วนมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1.1 วงจรออสซิลเลเตอร์

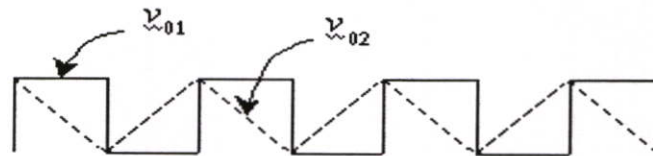
การที่สร้างสัญญาณ PWM จะต้องมีสัญญาณพาหะ (carrier signal) ในที่นี้คือสัญญาณ สามเหลี่ยม และสัญญาณอ้างอิง (reference signal) มาทำการเปรียบเทียบ เพื่อให้ได้สัญญาณ PWM ตามต้องการ โดยอาศัยออปแอมป์ภายในตัวไอซี TL 494



รูปที่ 3.1 วงจรออสซิลเลเตอร์

จากรูปที่ 3.1 ส่วนที่ 1 จะเป็นวงจรสร้างพัลส์สี่เหลี่ยมซีกบวกราบละเอียดศึกษาได้จาก [6,7,8] เป็นดังนี้ให้ควิตซ์ไซเคิลเท่ากับ 50% แล้วความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตของ V_{01} จะหาได้จาก

$$f = \frac{1}{1.39 \cdot R_4 \cdot C_1} \quad (3-1)$$

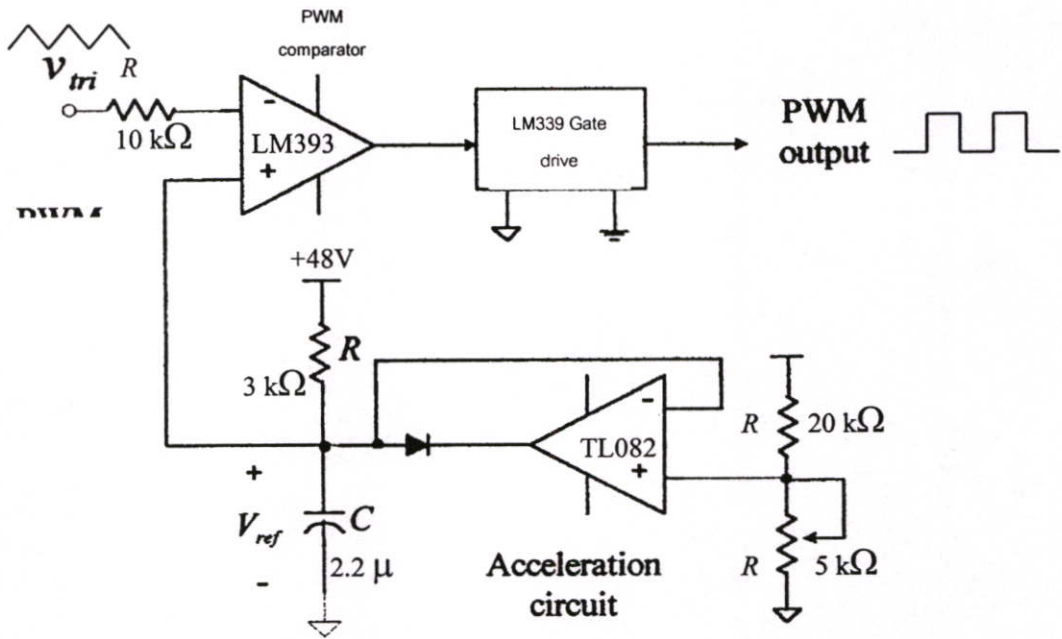


รูปที่ 3.2 เอาต์พุตของสัญญาณ V_{01} และ V_{02}

จากนั้น นำสัญญาณพัลส์ที่ได้มาเข้าวงจรอินทิเกรเตอร์ในส่วนที่ 2 จะได้สัญญาณเอาต์พุต V_{02} เป็นสัญญาณสามเหลี่ยมตามต้องการความถี่ที่ได้จากสมการ (3-1) นั้นเป็นความถี่ในการสวิตซ์ (Switching) ของมอสเฟตด้วย ความถี่ที่ใช้ในทางปฏิบัติอยู่ในช่วง 1-10 kHz ซึ่งเป็นความถี่ที่เหมาะสมเพื่อลดการสูญเสียกำลังงานจากการสวิตซ์และการสูญเสีย Eddy current และ Hysterresis ที่เกิดขึ้นกับมอเตอร์ ทำให้มอเตอร์เกิดความร้อน เพื่อที่จะได้สัญญาณสามเหลี่ยมมีรูปลักษณะไม่เพี้ยน ควรเลือกค่า $R_5 \cdot C_3 > R_4 \cdot C_1$ และควรให้สัญญาณสามเหลี่ยมมีลักษณะลอยขึ้นจากระดับกราวด์พอสมควรเพื่อให้สะดวกต่อการทำวงจรป้องกันต่างๆ ซึ่งกำหนดได้จาก R6 และ R7 ศึกษาได้จาก [9,10]

3.1.2 การคอมพาราเตอร์ และปรับอัตราเร่ง

ในส่วนนี้จะเป็นการนำเอาสัญญาณสามเหลี่ยมมาเปรียบเทียบกับสัญญาณอ้างอิงที่ได้จากวงจรปรับอัตราเร่งทำให้ได้สัญญาณ PWM เพื่อที่จะนำไปขับเกตของมอสเฟต ดังรูปที่ 3.3 ในส่วนวงจรปรับอัตราเร่งนั้นจะปรับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง หรือแรงดันอ้างอิงจากตัวต้านทานปรับค่าให้ (คันเร่ง) และจะมีบัฟเฟอร์ (buffer) เพื่อป้องกันผลของโหลด (loading effect) R และ C ที่ใส่เข้าไปเพื่อจะให้มีเวลาหน่วง (time delay) แรงดันอ้างอิงไม่ให้เปลี่ยนแปลงในทันทีทันใด เมื่อเหยียบคันเร่ง ในส่วนนี้มีความสำคัญมาก ถ้าไม่มีการหน่วงทันทีทันใดเต็มที่ จะเหมือนกับว่าทำการสตาร์ทมอเตอร์ที่พิกัดแรงดันทำให้เกิดกระแสสูงเกิน (over current) อาจทำให้อุปกรณ์ต่าง ๆ ในวงจรควบคุมเสียหายได้ ส่วนภาคขับเกต (gate driver) ได้กล่าวไปแล้วในบทที่ผ่านมา

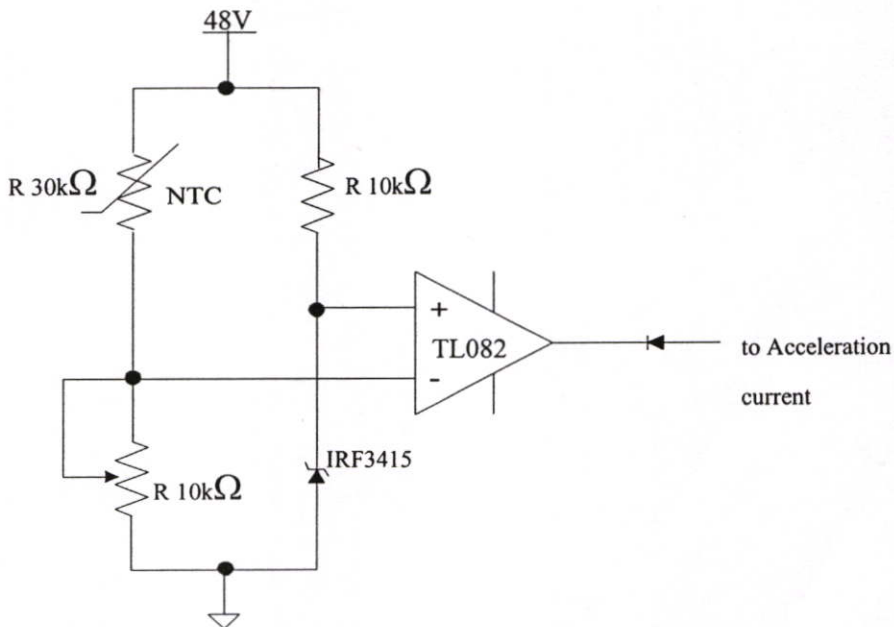


To Temperature Limiting

รูปที่ 3.3 การคอมพาราเตอร์และปรับอัตราเร่ง

3.1.3 วงจรป้องกันอุณหภูมิ

วงจรป้องกันอุณหภูมิเป็นวงจรป้องกันพื้นฐานที่ต้องมีในระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลังโดยทั่วไป เพื่อป้องกันอุณหภูมิของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ไม่ให้สูงเกินไป จนเป็นอันตรายต่อตัวอุปกรณ์



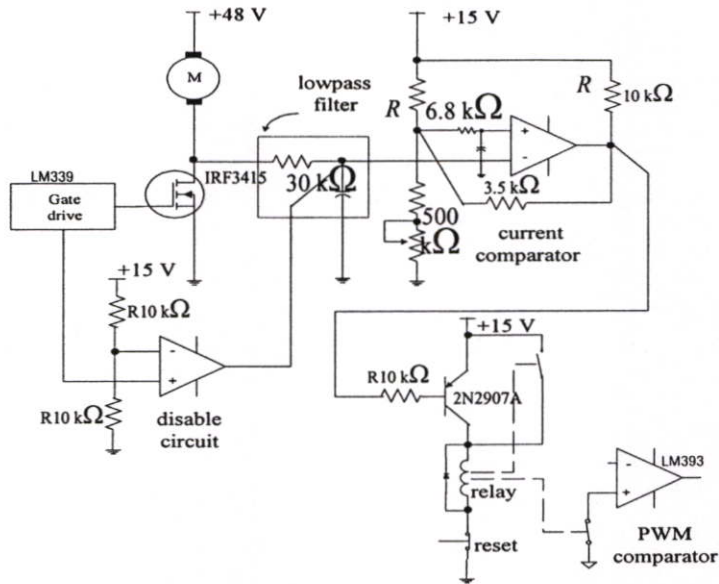
รูปที่ 3.4 วงจรป้องกันอุณหภูมิเกิน

วงจรรูปที่ 3.4 เทอร์มิสเตอร์ (NTC) จะเป็นตัวตรวจอุณหภูมิ ซึ่งถูกแปะติดกับแผ่นระบายความร้อนของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง เทอร์มิสเตอร์จะมีสัมประสิทธิ์ของค่าความต้านทานเป็นลบ นั่นคือค่าความต้านทานที่ตัวมันจะลดต่ำลงเพื่อให้อุณหภูมิสูงขึ้น ถ้าอุณหภูมิปกติเอาต์พุตของออปแอมป์จะมีค่าประมาณเท่ากับแหล่งจ่ายไฟเลี้ยง แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ค่าความต้านทานของเทอร์มิสเตอร์จะต่ำลง ซึ่งค่าความต้านทานที่แปรตามอุณหภูมิของเทอร์มิสเตอร์ ทำให้แรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทานปรับค่าได้สูงขึ้น เมื่อถึงอุณหภูมิที่ตั้งไว้ $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ เอาต์พุตของออปแอมป์จะมีค่าประมาณระดับกราวด์ทำให้ขาบวกของ PWM คอมพาราเตอร์มีค่าเป็นศูนย์มอสเฟตก็ไม่ทำงานและจะเข้าสู่สภาวะปกติเมื่ออุณหภูมิลดลงในค่าที่เหมาะสม

3.1.4 วงจรป้องกันกระแสเกิน

วงจรป้องกันกระแสเกินของมอสเฟต พิจารณาจากกระแสที่ไหลผ่านจากวงจรบัคคอนเวอเตอร์หรือมอเตอร์ซึ่งมีค่ากำลังงานค่อนข้างสูง ซึ่งจะกล่าวรายละเอียดในบทถัดไปในที่นี้จำเป็นต้องใช้มอสเฟตขนาดกันหลายตัวโดยใช้มอสเฟต 15 ตัว โดยแต่ละตัวรับกระแส 30 แอมป์ สาเหตุที่ใช้มอสเฟตขนาดกันก็เพื่อเหตุผลทางเศรษฐศาสตร์ เพราะว่าถ้าใช้มอสเฟตแบบโมดูล (modules) จะมีราคาแพงมากกว่า ดังนั้น การตรวจสอบกระแสเกินจะพิจารณาตัวต้านทานค่าต่ำ ๆ มาต่ออนุกรมกับมอสเฟต แล้วนำแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทานไปตรวจสอบกระแสเกินนั้น โดยจะต้องตรวจสอบกระแสทุกตัวที่ขนานกันอยู่ เพราะในช่วงแรกมอสเฟตอาจนำกระแสไม่พร้อมกัน ตัวที่นำกระแสก่อนอาจเสียหายได้ วิธีนี้ถึงแม้จะไม่เหมาะสมนัก แต่จะทำให้ขนาดของชุดควบคุมมีขนาดเล็กลง และลดการสูญเสียกำลังไฟฟ้าที่ตัวต้านทานที่ขนานกันของมอสเฟตด้วย

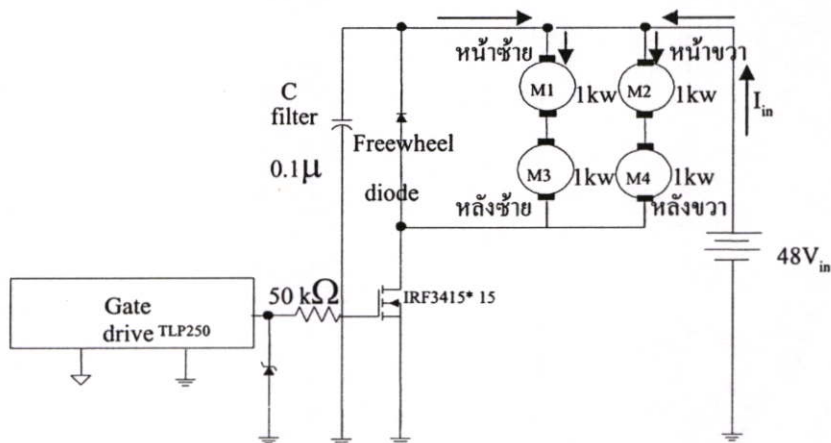
มอสเฟตขณะนำกระแสแน่นอนจะมีแรงดันค่าน้อย ๆ ตกคร่อมตัวมอสเฟตอยู่ เนื่องจากค่า $R_{ds(on)}$ (ซึ่งดูได้จากภาคผนวก ก) ดังนั้นเราจะนำแรงดันนี้ไปใช้งานยังกระแสไหลผ่านมอสเฟตมากแรงดันตกคร่อมก็ยังมากขณะมอสเฟตหยุดนำกระแสแรงดันตกคร่อมตัวมันจะมีค่าสูงเท่ากับแหล่งจ่าย วงจรเปรียบเทียบกระแสจะเข้าใจว่าเป็นช่วงกระแสเกิน ดังนั้นจึงต้องมีวงจรที่ไม่ให้พิจารณาในส่วนนี้ (disable circuit) การทำงานนั้นจะพิจารณาในช่วงมีสัญญาณเกตเท่านั้น (ซึ่งหมายถึงมอสเฟตนำกระแส) เมื่อวงจรเปรียบเทียบกระแสตรวจจับได้ว่ากระแสเกิน ก็จะสั่งให้รีเลย์ทำงานและดึงขาบวกของ PWM คอมพาราเตอร์ลงกราวด์ ซึ่งมีลักษณะเช่นเดียวกับการป้องกันอุณหภูมิ เพื่อที่จะให้วงจรเปรียบเทียบกระแส (current comparator) ทำงานไม่ผิดพลาด ดังรูปที่ 3.5 และ ควรมีฟิลเตอร์ (Low - pass filter) เล็กน้อยเพื่อกรองความถี่สูงออก ศึกษาได้จาก [11]



รูปที่ 3.5 การป้องกันกระแสเกิน

3.2 ภาควงจรกำลัง

จากรูปที่ 3.6 แสดงวงจรกำลังมอเตอร์เฟดดูค่อขนาน และคิดตั้งอยู่บนแผ่นระบายความร้อนเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.7 เพื่อทำให้จ่ายกระแสได้เฉลี่ยแล้วเท่านั้น ในกรณีนี้จะขนานมอเตอร์เฟดที่จำนวน 15 ตัว ตัวละ 30 A โดยพิจารณาจากพิกัดกระแสของมอเตอร์ดังกล่าวในหัวข้อ 3.1.4 ขณะมอเตอร์ทนกระแสได้ 450A กระแสจะไหลผ่านมอเตอร์ทั้ง 4 ตัว (รายละเอียดการคำนวณแสดงในบทที่ 4) และขณะที่มอเตอร์หยุดนำกระแส กระแสของมอเตอร์จะไหลผ่านอย่างต่อเนื่องโดยผ่านไดโอดฟรีวีล



รูปที่ 3.6 วงจรกำลัง

ไดโอดฟรีวิลควอร์เป็นไดโอดชนิดฟาสต์รีคัฟเวอร์รี ตัวเก็บประจุ (C -filter) ถูกต่อพร้อม แบตเตอรี่โดยตรง เพื่อลดกระแสริปเปิล (ripple current) ของแบตเตอรี่เนื่องจากถ้ากระแสมีริปเปิลสูง จะทำให้อายุการใช้งานแบตเตอรี่สั้น และที่สำคัญลดแรงดันสไปค์ที่คร่อมมอสเฟตขณะหยุดนำกระแส และต้องต่อตัวเก็บประจุให้ใกล้มอสเฟตที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ตัวเก็บประจุที่ใช้ควรเป็นชนิดอิเล็กโทรไลต์เพราะการคายและเก็บประจุได้รวดเร็วจึงควรต่อขนานกันหลายๆ ตัวเพื่อเพิ่มอัตราทน กระแสริปเปิลของตัวเก็บประจุ และทำให้ชุดควบคุมมีขนาดที่เล็กลงด้วยในการเดินสายไฟขนาน ตัวเก็บประจุต้องให้ความสำคัญอย่างมากเพราะขณะทำงานผลของค่าความเหนี่ยวนำแฝงจะทำให้ เกิดแรงดันสไปค์ขึ้นได้ดังนั้นเพื่อลดผลของค่าความเหนี่ยวนำของการเดินสายไฟควรขนานตัวเก็บ ประจุบนแผ่นลายทองแดงสองหน้า

ขนาดของตัวเก็บประจุที่ใส่เข้าไปนั้น โดยแท้จริงแล้วค่าของตัวเก็บประจุยังมีค่ามากยิ่งก็ ถ้าให้ค่าของตัวตัวเก็บประจุมีค่าเป็นอนันต์ (Infinity) และคิดว่าตัวเก็บประจุไม่มีค่าสูญเสีย กระแส ของแบตเตอรี่จะไม่มีการริปเปิลซึ่งถือว่าดีที่สุดแต่ในทางปฏิบัติแล้วเป็นไปได้ ดังนั้นอาจหาค่าของ ตัวเก็บประจุได้ดังนี้ โดยคิดว่าพลังงานที่เกิดจากค่าความเหนี่ยวนำถ่ายเทให้ตัวเก็บประจุทั้งหมดนั้น คือ

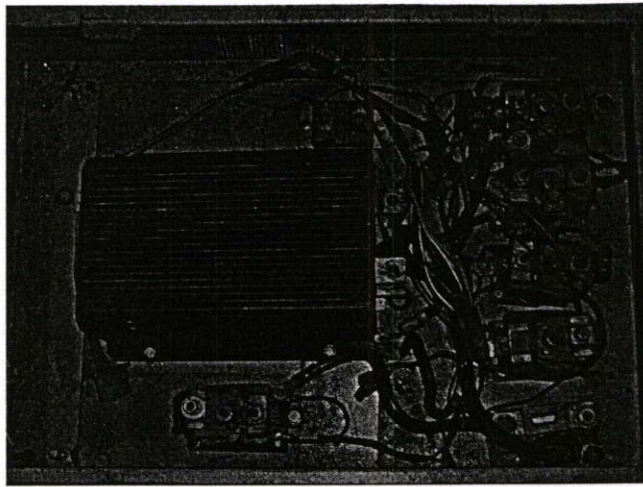
$$\frac{1}{2} C \cdot V_c^2 = \frac{1}{2} L \cdot i_p^2 \quad (3-2)$$

และเนื่องจาก V_c จะมีค่าได้ไม่เกิน $V_{DS} - V_{max}$ ดังนั้น

$$C = \frac{L \cdot i_p^2}{(V_{DS} - V_{max})^2} \quad (3-3)$$

- เมื่อ L คือ ค่าความเหนี่ยวนำของแฝงทั้งหมดในระบบ (H)
 i_p คือ ค่ากระแสสูงสุดขณะเริ่มหยุดนำกระแสของมอสเฟต (A)
 V_{DS} คือ อัตราทนแรงดันตกคร่อมสูงสุดของมอสเฟต (V)
 V_{max} คือ ค่าแรงดันสูงสุดที่ยอมให้เกิดขึ้นได้เมื่อมอสเฟตเริ่มหยุดนำกระแส (V)

จากสมการ (3-2) และ(3-3) โดยที่สมมติว่า $i_p = 450 \text{ A}$, $V_{DS} = 48 \text{ V}$, $V_{max} = 30 \text{ V}$ และ $L = 0.1 \text{ } \mu\text{H}$ จะได้ว่า $C = 0.1 \text{ } \mu\text{F}$ ซึ่งจะเป็นไปตามการออกแบบ C -filter ดังในรูปที่ 3.6

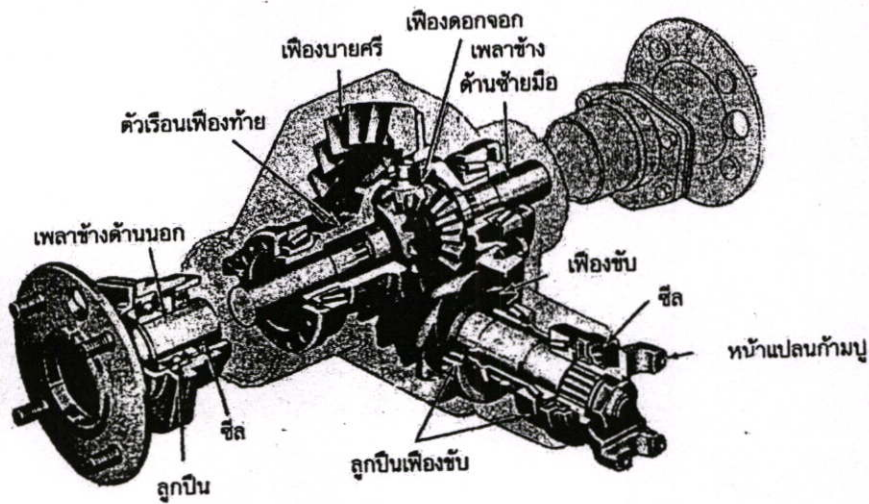


รูปที่ 3.7 แสดงภาพถ่ายชุดควบคุมความเร็วมอเตอร์ที่ใช้มอสเฟตขนานกัน จำนวน 15 ตัว
ซึ่งจะติดอยู่บนแผ่นระบายความร้อนที่ใช้ในงานวิจัยนี้ (เชิงพาณิชย์)

บทที่ 4

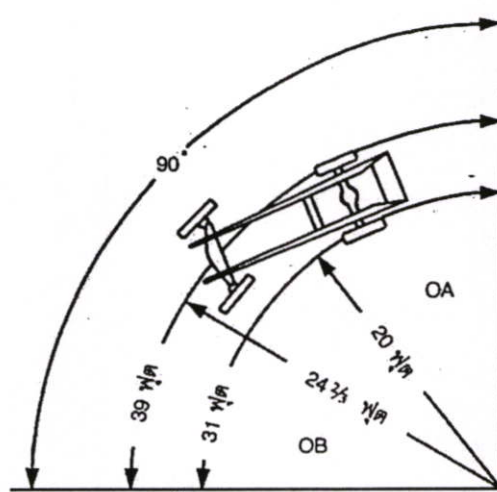
เฟืองท้ายรถยนต์

เมื่อมีความต้องการที่จะขับรถโค้ง ล้อด้านซ้ายและด้านขวาจะหมุนเคลื่อนที่ไปในความเร็วที่เท่ากันเสมอทั้งนี้เป็นสาเหตุมาจากสภาพของพื้นผิวถนนในระหว่างที่เลี้ยวเข้าโค้ง ดังนั้นรถยนต์ส่วนใหญ่จึงมีความจำเป็นที่จะต้องมียุทธวิธีพิเศษไว้เพื่อให้ล้อด้านซ้าย และล้อด้านขวา หมุนไปด้วยความเร็วที่แตกต่างกัน ยุทธวิธีนั้นก็คือ เฟืองท้าย (differential) ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ซึ่งแสดงตำแหน่งติดตั้งของเฟืองท้ายในรถยนต์ที่ขับเคลื่อนล้อหลัง ศึกษาได้จาก [12]



รูปที่ 4.1 แสดงตำแหน่งติดตั้งของเฟืองท้ายรถยนต์ที่ขับเคลื่อนล้อหลัง

จากการเปรียบเทียบการหมุนเคลื่อนที่ของล้อด้านซ้าย (A) และล้อด้านขวา (B) ในขณะที่รถเลี้ยวเข้าโค้ง จะเห็นได้ว่าล้อด้านขวาจะมีรัศมีส่วนโค้งเป็นระยะ OB และล้อด้านซ้ายจะมีระยะเท่ากับ OA ดังนั้นจึงทำให้ระยะการเดินทางของล้อด้านขวามีระยะทางที่ยาวกว่าล้อด้านซ้าย ดังแสดงในรูปที่ 4.2

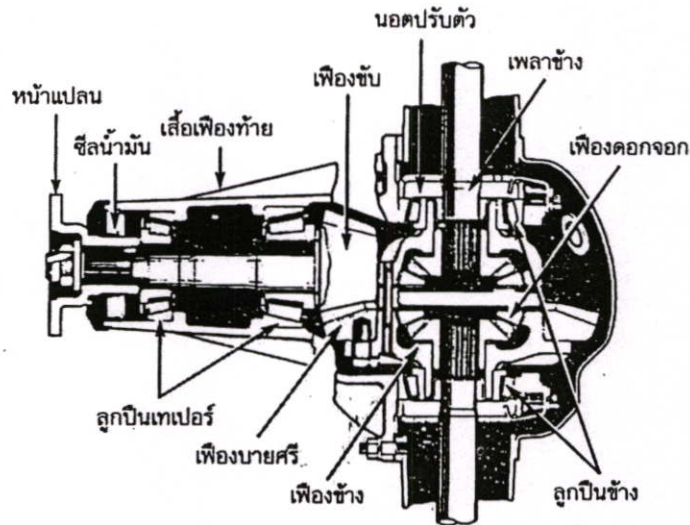


รูปที่ 4.2 แสดงการเปรียบเทียบอัตราการหมุนเคลื่อนที่ของล้อด้านซ้ายและล้อด้านขวาในขณะที่เลี้ยวเข้าโค้ง

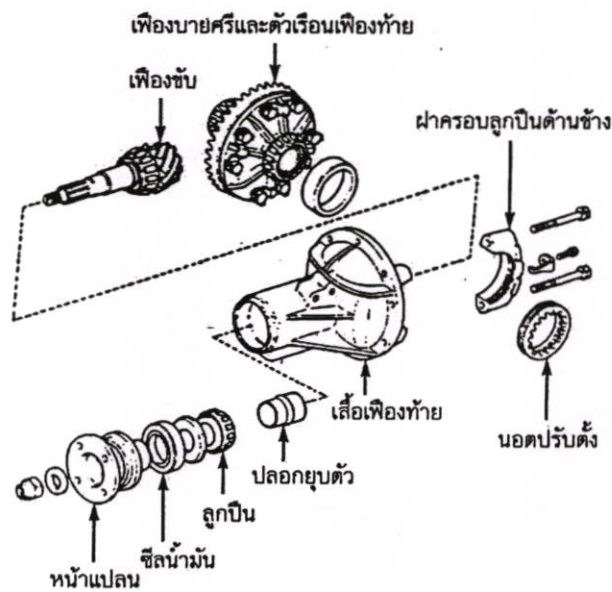
จากสาเหตุนี้จึงทำให้ล้อด้านขวาหมุนเร็วกว่าล้อด้านซ้าย ในทำนองเดียวกัน ถ้าล้อด้านใดด้านหนึ่งหมุนเคลื่อนที่อยู่บนผิวของพื้นที่ราบเรียบกว่าอีกด้าน และอีกด้านอยู่ในพื้นที่ผิวของถนนที่ขรุขระ จะมีความเร็วรอบในการเคลื่อนที่สูงกว่าล้อด้านที่อยู่บนผิวพื้นถนนที่ราบเรียบ ทั้งนี้เป็นเพราะการออกแบบเพื่อง่ายให้มีรอบการหมุนที่แตกต่างกันในขณะที่ย้ายทอดแรงบิดที่เท่ากัน

4.1 โครงสร้างของเฟืองท้าย

ในรูปที่ 4.3 ภายในตัวเรือนของเฟืองท้ายที่ใช้กับรถยนต์ขับเคลื่อนล้อหลังจะประกอบด้วยเฟืองวงแหวนหรือเฟืองบายศรีและเฟืองขับ โดยจะติดตั้งรวมเข้ากับตัวเรือนเฟืองท้ายส่งผ่านแรงบิดให้ผ่านลูกปืนข้างทั้งสองด้าน การหมุนส่งกำลังงานจากเพลากลางจะไปหมุนให้เฟืองขับหมุน โดยส่งผ่านหน้าแปลนเฟืองท้ายและลูกปืนเทเปอร์ที่สามารถปรับความตึงของลูกปืนได้ ส่วนนอตที่ติดตั้งยึดลูกปืนข้างทั้งสองด้านจะมีไว้ปรับตั้งระยะห่างของเฟืองขับกับเฟืองบายศรีหรือแบ็กแกช ส่วนเฟืองคอกจอกและเฟืองข้างจะทำหน้าที่หมุนให้ความเร็วของเพลทั้งสองมีความเร็วที่แตกต่างกัน โดยเฟืองข้างทั้งสองด้านจะมีร่องสไปลน์ไว้ติดตั้งเพลข้าง ในรูปที่ 4.4 แสดงส่วนประกอบของเฟืองท้ายที่ใช้กับรถยนต์ที่ขับเคลื่อนล้อหลัง



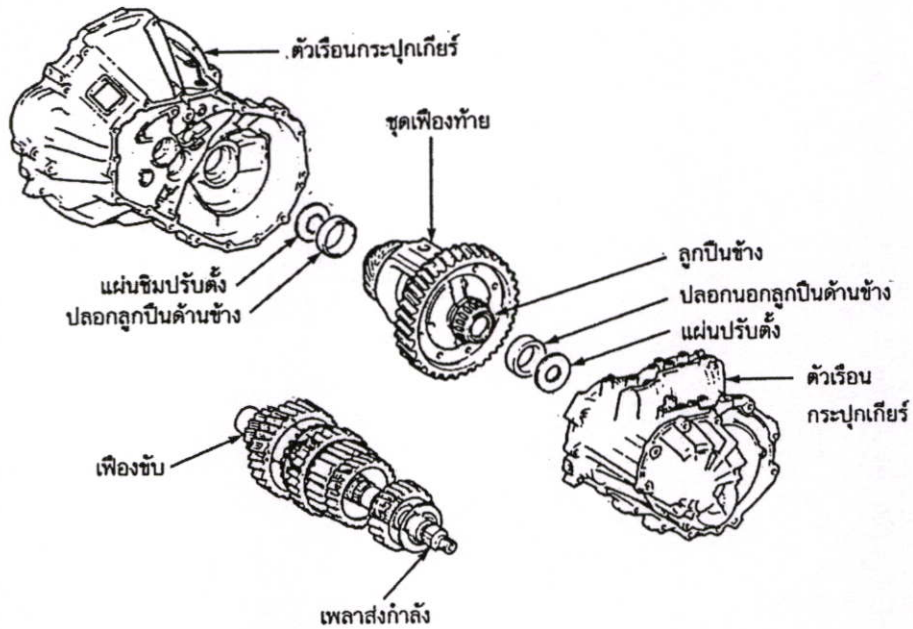
รูปที่ 4.3 ภาพตัดแสดงโครงสร้างภายในเฟืองท้ายที่ใช้กับรถยนต์ที่ขับเคลื่อนล้อหลัง



รูปที่ 4.4 ส่วนประกอบของเฟืองท้ายที่ใช้กับรถยนต์ที่ขับเคลื่อนล้อหลัง

สำหรับรถยนต์ที่ขับเคลื่อนล้อหน้า ชุดเฟืองท้ายจะติดตั้งอยู่ระหว่างตัวเรือนของกระปุกเกี่ยวกับตัวเรือนของชุดส่งกำลัง โดยมีเฟืองวงแหวนหรือเฟืองบายศรีซึ่งจะใช้เป็นแบบเฟืองเฮลิคอลลซึ่งมันจะติดตั้งรวมเป็นหน่วยเดียวกันกับชุดเฟืองท้าย และติดตั้งอยู่เหนือชุดส่งกำลังและจะส่งกำลังผ่านลูกปืนข้างทั้งสองตัว แสดงในรูปที่ 4.5 แผ่นซิมที่ใช้ปรับตั้งจะสอดคอบนลูกปืนด้านซ้าย

และด้านขวา ซึ่งค่าพรีโหลดของลูกปืนจะสามารถกระทำได้โดยการเปลี่ยนความหนาของแผ่นชิมนี้ ส่วนเพลาคับของล้อหน้าจะสวมขบอยู่กับร่องสไปนซ์ของเฟืองข้างทั้งสอง



รูปที่ 4.5 ส่วนประกอบของเฟืองท้ายที่ใช้กับรถยนต์ที่ขับเคลื่อนล้อหน้า

4.2 ชนิดของเฟืองที่ใช้กับเฟืองท้าย

เฟืองวงแหวนหรือเฟืองบายศรีและเฟืองขับที่ใช้กับเฟืองท้ายรถยนต์มีอยู่หลายแบบด้วยกัน คือ

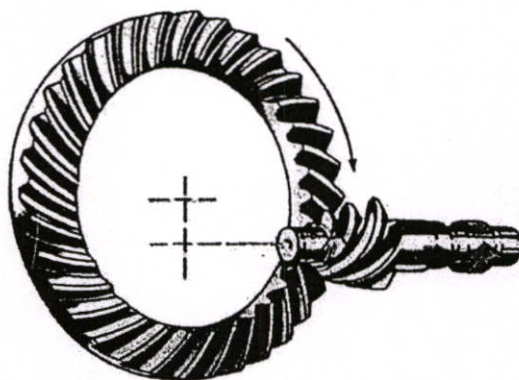
4.2.1 เฟืองแบบสเปอร์บีเวล (spur bevel gear) จะมีลักษณะของฟันเฟืองตรง เฟืองขับจะถูกจัดวางไว้ในตำแหน่งกึ่งกลางของเฟืองบายศรี จึงทำให้มีจุดสัมผัสของฟันเฟืองเพียงคู่เดียวเท่านั้น ดังนั้นการขับเคลื่อนจึงมีเสียงดังและการสึกหรอสูงมาก ปัจจุบันไม่เป็นที่นิยมนำมาใช้กับเฟืองท้าย ดังแสดงในรูปที่ 4.6



เฟืองแบบสเปอร์บีเวล

รูปที่ 4.6 ตำแหน่งการจัดวางของเฟืองขับและเฟืองบายศรีแบบสเปอร์บีเวล

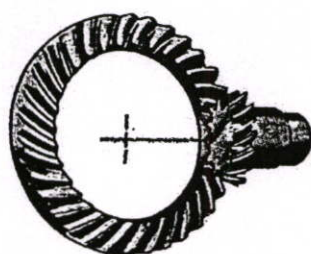
4.2.2 เฟืองแบบไฮโปอยด์บีเวล (hypoid bevel gear) เฟืองขับจะถูกจัดให้วางอยู่ในตำแหน่งที่เยื้องจากเส้นผ่าศูนย์กลางของเฟืองบายศรี ทำให้ฟันเฟืองมีอัตราการขบที่มากกว่า ดังนั้นเฟืองท้ายที่ใช้ฟันเฟืองแบบไฮโปอยด์บีเวลจึงมีเสียงเงียบ และลูกปืนที่ใช้จึงทนแรงกดได้ทั้งแนวรัศมีและตามแนวยาว การหล่อลื่นจึงต้องใช้น้ำมันเกียร์ไฮโปอยด์โดยเฉพาะ เพื่อป้องกันการสึกหรอที่เร็วเกินไป ดังแสดงในรูปที่ 4.7



เฟืองแบบไฮโปอยด์บีเวล

รูปที่ 4.7 ตำแหน่งการจัดวางของเฟืองขับกับเฟืองบายศรีแบบไฮโปอยด์บีเวล

4.2.3 เฟืองแบบสไปรอลบีเวล (spiral bevel gear) ลักษณะของฟันเฟืองจะเฉียงโค้ง ทำให้ความกว้างของหน้าสัมผัสของเฟืองบายศรีและเฟืองขับจะเหลื่อมล้ำกัน เป็นเหตุให้ฟันเฟืองที่ขบกันในขณะที่หมุนไม่มีเสียงดัง การถ่ายทอดแรงบิดในเฟืองถัดไปจะเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่อง จึงเป็นการกระจายโหลดไปยังฟันเฟืองแต่ละฟันได้อย่างเท่ากัน ดังแสดงในรูปที่ 4.8

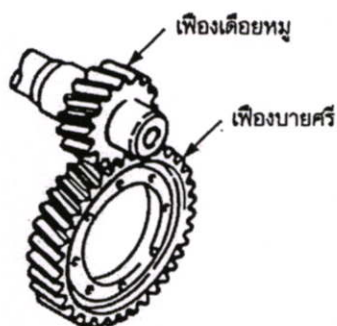


เฟืองแบบสไปรอลบีเวล

รูปที่ 4.8 ตำแหน่งการจัดวางของเฟืองขับและเฟืองบายศรีแบบสไปรอลบีเวล

4.2.4 เฟืองแบบเฮลิคอล (helical gear) มีลักษณะของฟันเฟืองที่เฉียงทั้งเฟืองขับและเฟืองบายศรีฟันเฟืองทั้งสองจะสัมผัสกันในตำแหน่งเดียวกัน โดยจะไม่เลื่อนไหลไปยังฟันเฟืองถัดไป จึง

ทำให้เกิดการสั่นและเสียงดังที่ตำการส่งถ่ายกำลังของเฟืองจะราบเรียบ ดังนั้นการจัดวางของเฟืองแบบนี้จึงนิยมนำมาใช้กับเฟืองท้ายของรถยนต์ที่ขับเคลื่อนล้อหน้าเท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 4.9

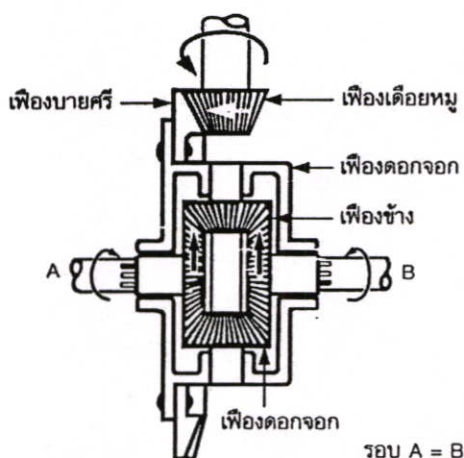


รูปที่ 4.9 ตำแหน่งการจัดวางเฟืองขับและเฟืองบายศรีแบบเฮลิคอลล

4.3 หลักการทำงานของเฟืองท้าย

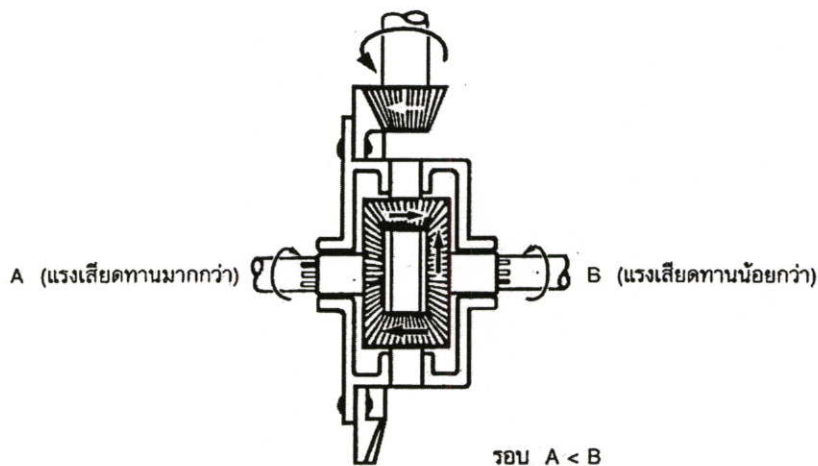
ชุดเฟืองท้ายที่ประกอบด้วยเฟืองบายศรี เฟืองขับ และเฟืองดอกจอกจะมีหลักการทำงานพื้นฐานที่สามารถทำความเข้าใจได้ดังนี้

- ในขณะที่รถเคลื่อนที่วิ่งไปข้างหน้า ในรูปที่ 4.10 เมื่อรถวิ่งตรงไปข้างหน้าบนถนนที่มีระดับเดียวกันเพลาข้างทั้งสองด้านจะหมุนเคลื่อนที่ไปด้วยความเร็วที่เท่ากัน ทำให้ส่วนประกอบของเฟืองท้ายทั้งหมดหมุนเคลื่อนที่ไปเป็นหน่วยเดียวกัน ดังนั้นเมื่อมีแรงเสียดทานในการขับเคลื่อนที่เท่ากัน เฟืองดอกจอกจะไม่หมุนเคลื่อนที่ด้วยตัวเอง แต่มันจะหมุนไปพร้อมกับเฟืองบายศรี แต่อย่างไรก็ตาม เฟืองดอกจอกก็จะทำหน้าที่เชื่อมต่อการขับเคลื่อนระหว่างเฟืองข้างด้านซ้ายและด้านขวาให้เคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่เท่ากัน



รูปที่ 4.10 แสดงการทำงานของเฟืองท้ายในขณะที่รถเคลื่อนที่ไปข้างหน้า

- เมื่อรถลิ่วเข้าโค้ง ในรูปที่ 4.11 ในขณะที่รถวิ่งเข้าโค้ง ก็จะทำให้ล้อด้านในมีระยะทางในการเคลื่อนที่ที่น้อยกว่าล้อด้านนอก เนื่องจากแรงขับที่ส่งถ่ายกำลังผ่านเฟืองคอกจอกไปยังเฟืองข้างด้านนอกหมุนด้วยความเร็วที่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงทำให้เฟืองข้างด้านนอกมีรอบที่หมุนเพิ่มมากขึ้น นั่นก็คือเมื่อเฟืองคอกจอกหมุนรอบเฟืองข้างด้านใดด้านหนึ่ง มันจะทำให้จำนวนรอบของเฟืองทั้งสองหมุนเป็นสองเท่าของเฟืองบายศรี ดังแสดงตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.11 แสดงการทำงานของเฟืองท้ายในขณะที่ลิ่วเข้าโค้ง

ตารางที่ 4.1 แสดงการหมุนเคลื่อนที่สัมพันธ์กันระหว่างเฟืองบายศรีและเฟืองข้าง

การหมุนเคลื่อนที่ของเฟืองท้าย		
เฟืองบายศรี	เฟืองข้างด้านซ้าย	เฟืองข้างด้านขวา
1 รอบ	หมุนไปข้างหน้า 1 รอบ	หมุนไปข้างหน้า 1 รอบ
1 รอบ	หมุนไปข้างหน้า 1 ½ รอบ	หมุนไปข้างหน้า 1 ½ รอบ
1 รอบ	ไม่หมุน	หมุนไปข้างหน้า 2 รอบ
ไม่หมุน	หมุนไปข้างหน้า 1 รอบ	หมุนกลับ 1 รอบ

- ล้อรถด้านหนึ่งติดหลุมหรือโคลนตม เมื่อล้อด้านหนึ่งด้านใดเกิดติดโคลนหรือหลุมอาการของล้อจะหมุนฟรีมาก เนื่องจากขาดแรงเสียดทานจากโคลน ทำให้เกิดการลื่นไถล ดังนั้นการเคลื่อนที่ในการทำงานของเฟืองคอกจอกและเฟืองข้างจึงมีลักษณะที่แตกต่างจากการลิ่วเข้าโค้งโดยสิ้นเชิง

4.4 อัตราทดของเฟืองท้าย

อัตราทดของเฟืองท้ายก็คืออัตราทดของแรงบิดภายหลังจากถูกเปลี่ยนโดยกระปุกเกียร์ที่ส่งถ่ายกำลังไปยังเพลากลาง (รถยนต์ขับเคลื่อนล้อหลัง) หรือแรงบิดที่ส่งถ่ายกำลังจากเพลากำลัง (รถยนต์ขับเคลื่อนล้อหน้า) (A) กับความเร็วรอบและแรงบิดที่เป็นจริงของเครื่องยนต์ (B) ซึ่งทั้งหมดนี้เราเรียกว่า อัตราทดของเฟืองท้าย

ดังนั้นอัตราทดของเฟืองท้ายจึงสามารถคำนวณหาได้ดังนี้

$$\text{อัตราทดของเฟืองท้าย} = \frac{\text{จำนวนฟันของเฟืองบายศรี(A)}}{\text{จำนวนฟันของเฟืองขับ(B)}}$$

ตัวอย่างเช่น ถ้าเฟืองบายศรีมีจำนวน 43 ฟันและเฟืองขับมีจำนวน 10 ฟัน ดังนั้นอัตราทดของเฟืองท้ายจะเท่ากับ $43/10 = 4,300$

จากตัวอย่างดังกล่าวข้างต้น ซึ่งตามธรรมดาโดยทั่วไปแล้วจำนวนอัตราทดจะไม่เป็นตัวเลขจำนวนเต็มสาเหตุที่เป็นเช่นนี้ก็เพื่อป้องกันการป้องกันคู่ฟันเฟืองที่ขบกันอยู่ไปขบกับเฟืองถัดไป และเป็นการทำให้การสึกหรอของฟันเฟืองเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอเท่าๆ กัน นอกจากนี้ยังทำให้ความเร็วรอบลดลง แต่จะเพิ่มแรงบิดในการส่งถ่ายกำลังให้สูงขึ้น

ดังนั้นในการคำนวณหาลำดับของเครื่องยนต์ที่เป็นจริง จึงมีวิธีการคำนวณหาได้ดังนี้

$$\text{กำลังงานของเครื่องยนต์ (PS)} = \text{ค่าคงที่ (K)} \times \text{ความเร็วรอบ (N)} \times \text{แรงบิด (T)}$$

ซึ่งค่าของ K นั้นเป็นค่าคงที่ของความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานจากเพลากำลังและล้อหลัง ซึ่งก็มีวิธีการคำนวณหาได้ดังนี้

$$\text{ความเร็วรอบของเพลาส่งกำลัง} \times T = \text{ความเร็วรอบของล้อหลัง} \times T$$

จากการคำนวณหาทางสมการจะทำให้แรงบิดเพิ่มขึ้นแต่ความเร็วรอบลดลง อัตราทดของเฟืองท้ายที่ถ่ายทอดแรงบิดไปยังล้อหลังจึงถูกกำหนดได้โดยกำลังงานของเครื่องยนต์ โทลคของรถ และสมรรถนะการเร่งของไต่ขั้นที่สูง จากความต้องการสมรรถนะให้ไต่ขั้นที่สูงได้นี้ จึงทำให้ต้องมีอัตราทดเพิ่มขึ้นแต่สมรรถนะความเร็วลดลง ด้วยเหตุนี้รถบรรทุกจึงต้องมีกลไกสำหรับเปลี่ยนแปลงอัตราทดจากสูงไปต่ำเพื่อให้สอดคล้องกับโหลด

อัตราทดรวม เป็นการรวมของอัตราทดเกียร์ส่งกำลังและอัตราทดของเฟืองท้ายเข้าด้วยกัน

ดังสมการ

$$R_r T = R_g \times R_r F$$

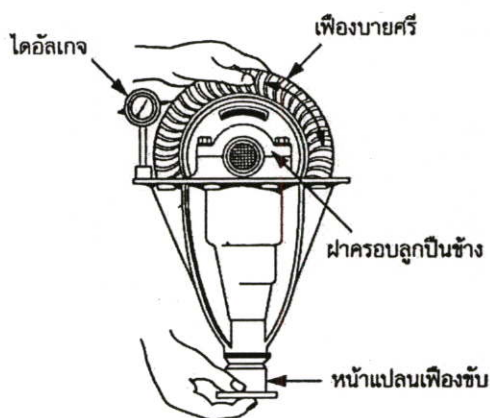
$$R_r T = \text{อัตราทดรวม}$$

โดยที่ $R_g =$ อัตราทดของกระปุกเกียร์

$R_r =$ อัตราทดของเฟืองท้าย

4.5 ระยะแบ็กแลชของเฟืองขับและเฟืองบายศรี

ระยะแบ็กแลช (back lash) คือระยะช่องว่างระหว่างฟันเฟืองเพื่อให้ น้ำมันหล่อลื่นเคลือบหล่อลื่นผิวหน้าสัมผัสของเฟืองขับกับเฟืองบายศรี ทั้งนี้เป็นการป้องกันผิวหน้าสัมผัสของเฟืองทั้งสองให้เกิดการสึกหรอที่น้อยลง ถ้าระยะแบ็กแลชมีมากเกินไปจะทำให้รถยนต์มีอาการกระตุก ในขณะที่เริ่มออกกรดและมีเสียงดังมากในทำนองเดียวกัน ถ้าระยะแบ็กแลชมีน้อยเกินไปก็จะทำให้เกิดเสียงดังและมีอุณหภูมิสูงเช่นกัน ดังนั้นระยะช่องว่างจึงควรปรับให้ได้ตามค่าที่กำหนดของบริษัทผู้ผลิตที่ได้กำหนดไว้ ดังแสดงในรูปที่ 4.12

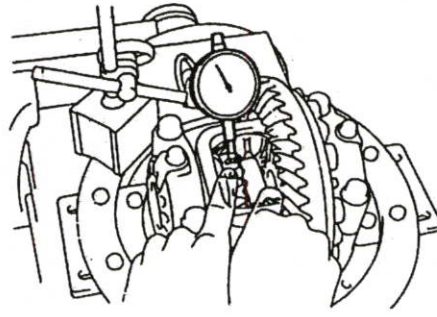


รูปที่ 4.12 แสดงวิธีการวัดระยะแบ็กแลชระหว่างเฟืองขับและเฟืองบายศรี

4.6 ระยะแบ็กแลชของเฟืองดอกจอกและเฟืองข้าง

ระยะแบ็กแลชของเฟืองดอกจอกและเฟืองข้างและต้องมีเช่นเดียวกับเฟืองขับและเฟืองบายศรี แต่ระยะค่าที่กำหนดจะแตกต่างกัน เนื่องจากเฟืองดอกจอกหมุนเคลื่อนที่ช้ากว่า และบางครั้งจะต้องหมุนเคลื่อนที่ไปพร้อมกับเฟืองข้าง จากสาเหตุนี้เสียงดังที่เกิดขึ้นเป็นบางครั้งแต่อย่างไรก็ตามระยะแบ็กแลชของเฟืองดอกจอกและเฟืองข้างนั้นจะมีน้อยกว่าดังแสดงในรูปที่ 4.13

ดังนั้นวิธีการปรับระยะแบ็กแลชจึงกระทำได้โดยการเปลี่ยนแปลงขนาดของแผ่นชิมที่ติดตั้งอยู่ระหว่างเฟืองทั้งสอง



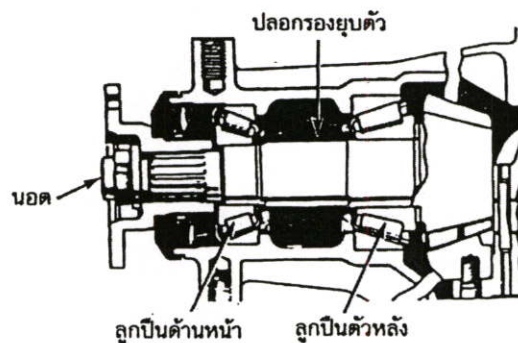
รูปที่ 4.13 การวัดระยะแบ็กแลระหว่างเฟืองคอกจอกกับเฟืองข้าง

4.7 ระยะเวลาฟรีโหลด

ระยะเวลาฟรีโหลด (pre – load) หรือค่าความตึงของลูกปืนเฟืองขับ ถ้าเฟืองขับของเฟืองทำที่ติดตั้งด้วยลูกปืนตัวหน้าและตัวหลังปราศจากค่าฟรีโหลด ก็จะทำให้เกิดระยะช่องว่างขึ้นที่ส่วนปลายของลูกปืนเมื่อมีโหลดกับเฟืองขับ ระยะช่องว่างนี้มักจะเกิดขึ้นกับลูกปืนใหม่เท่านั้น ซึ่งเป็นผลสืบเนื่องมาจากการสึกหรอของเฟืองและลูกปืนที่หมุนไม่คงที่ในตอนแรก ถ้าไม่พยายามป้องกันสาเหตุที่เกิดจากปัญหานี้ เมื่อมีโหลดเพิ่มมากขึ้นลูกปืนก็จะได้รับแรงต้านทานเพิ่มขึ้นตาม ดังนั้นจึงควรตั้งระยะเวลาฟรีโหลดให้กับเฟืองขับ

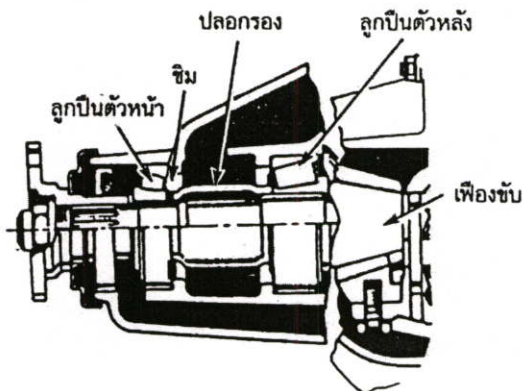
ค่าฟรีโหลดของลูกปืนสามารถวัดได้จากค่าความต้านทานในการหมุนกลิ้งตัวไปของลูก ซึ่งก็ทำการปรับตั้งได้ถึง 2 วิธีคือ

4.7.1 การปรับตั้งโดยการเพิ่มของแรงบีบกับปลอกกรอง เป็นการเปลี่ยนแปลงระยะความยาวของปลอกกรองระหว่างลูกปืนตัวหน้ากับลูกปืนตัวหลัง โดยการเพิ่มแรงกดขันนอตเฟืองกับหน้าแปลกให้ปลอกกรองยุบตัวลงตามค่าที่กำหนดไว้ ดังแสดงในรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 ภาพตัดแสดงวิธีการปรับตั้งระยะเวลาฟรีโหลดแบบปรับตั้งโดยการเพิ่มแรงบีบกับปลอกกรอง

4.7.2 การปรับตั้งโดยการใช้แผ่นชิมรอง เป็นวิธีการปรับตั้งระยะฟรี โหลดอีกวิธีหนึ่งที่สามารถกระทำได้โดยการเพิ่มขนาดความหนาของแผ่นชิมให้ได้ค่าฟรีโหลดตามที่กำหนดไว้ ดังแสดงในรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 ภาพตัดแสดงวิธีการปรับตั้งระยะฟรี โหลดแบบใช้แผ่นชิมรอง

4.8 เฟืองท้ายชนิดล็อก

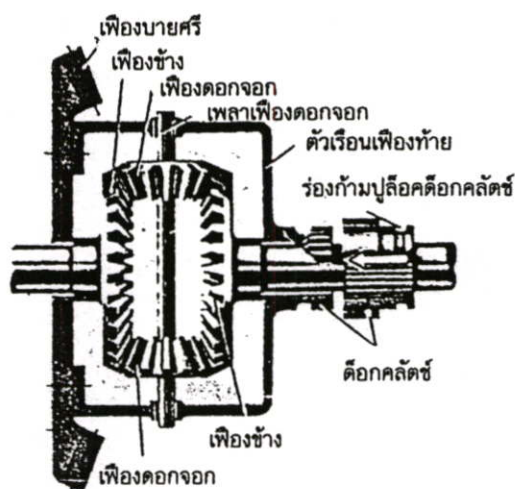
เฟืองท้ายชนิดล็อก (differential lock) การถ่ายทอดแรงบิดของเฟืองท้ายไปยังล้อจะต้องสามารถถ่ายทอดแรงบิดได้อย่างเต็มที่ แต่ทั้งนี้จะต้องขึ้นอยู่กับแรงเสียดทานระหว่างล้อกับพื้นผิวถนน จากสาเหตุนี้เฟืองท้ายจะต้องมีสมรรถนะสูงต่อการยึดเกาะถนนโดยปราศจากการลื่นไถล ดังนั้น ล้อจะต้องขับเคลื่อนไปด้วยความเร็วที่เท่ากันแม้ว่าพื้นผิวดนจะเป็น โคลนตมก็ตาม ในทางตรงกันข้าม ล้อจะต้องมีแรงขับที่เพียงพอโดยไม่ทำให้สมรรถนะในการขับเคลื่อนลดลง และยิ่งไปกว่านั้นมันจะต้องมีแรงส่งให้กับรถในสภาพติดหล่ม ถนนลื่น ว่างบนทราย โคลนตม และการเข้าโค้ง

ด้วยเหตุนี้เฟืองท้ายชนิดล็อกจึงถูกออกแบบมาเพื่อลดปัญหาที่เกิดขึ้น โดยการเพิ่มหน้าที่ในการจำกัดระยะฟรีของเฟืองท้ายที่มีใช้กันอยู่ทั่วไป

เฟืองท้ายชนิดล็อกที่นำมาใช้กับรถยนต์จึงมีอยู่ด้วยกัน 2 แบบคือ เฟืองท้ายชนิดล็อกแบบค็อกคลัตช์และเฟืองท้ายชนิดล็อกแบบอัตโนมัติและลิมิเต็ดสลิป

4.8.1 เฟืองท้ายชนิดล็อกแบบค็อกคลัตช์ (Dog Clutch Differential Lock)

เฟืองท้ายชนิดล็อกแบบค็อกคลัตช์เป็นเฟืองท้ายชนิดล็อกอีกแบบหนึ่งที่ควบคุมการล็อกด้วยกลไกเลื่อนเข้าหรือแป้นเหยียบ เพื่อให้ค็อกคลัตช์เลื่อนเข้าล็อกเฟืองท้าย ดังแสดงในรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 แสดงส่วนประกอบของเฟืองท้ายชนิดล็อกแบบค็อกคลัตช์

การทำงาน เมื่อเลื่อนเฟืองค็อกคลัตช์เข้าขบกับกับเฟืองที่เพลลาข้าง มันจะล็อกขับเคลื่อนไปพร้อมกับเฟืองบายศรีและตัวเรือนเฟืองท้าย การล็อกเฟืองท้ายจะกระทำเฉพาะเมื่อผิวหน้าของพื้นถนนเกิดการลื่นไถลเท่านั้น ในทางตรงกันข้าม ถ้าล็อกเฟืองท้ายตลอดไป เมื่อเลี้ยวเข้าโค้ง จะทำให้เกิดอาการเบรกในขณะเลี้ยวท้ายรถจะปัดทันที ดังนั้นเฟืองท้ายแบบนี้จึงไม่เหมาะที่จะนำมาใช้กับรถยนต์ที่มีความเร็วสูง แต่จะนิยมใช้กับรถบรรทุกขนาดหนัก รถแทรกเตอร์ หรือรถยนต์ที่ขับเคลื่อน 4 ล้อแบบบางเวลา (part time 4 wheel drive) เท่านั้น

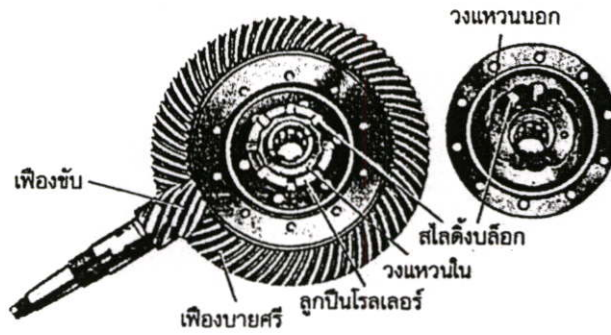
4.8.2 เฟืองท้ายชนิดล็อกแบบอัตโนมัติและลิมิตเต็ดสลลิป (Automatic Differential Locks and Limited Slip Differential)

เฟืองท้ายชนิดล็อกแบบอัตโนมัติและลิมิตเต็ดสลลิปเป็นเฟืองท้ายชนิดล็อกที่ทำงานได้โดยอาศัยแรงบิดและสัมประสิทธิ์ความฝืดในการควบคุมการล็อก เพื่อให้เฟืองท้ายทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพในขณะเข้าโค้งหรือติดโคลนคม

ปัจจุบันเฟืองท้ายชนิดล็อกแบบอัตโนมัติมีใช้อยู่ด้วยกัน 2 แบบก็คือ

1. เฟืองท้ายชนิดล็อกอัตโนมัติแบบสไลด์บล็อกล็อก (sliding – block differential lock) เฟืองท้ายแบบนี้ถูกนำมาใช้กับรถที่วิ่งในภูมิประเทศที่ทุรกันดาร แต่จะทำให้ผู้ขับขี่มีสมรรถนะในการขับขี่ที่ดี

เฟืองท้ายชนิดล็อกอัตโนมัติแบบสไลด์บล็อกล็อกจึงประกอบด้วยลูกปืนโรลเลอร์สไลด์บล็อกลวงแหวนในและวงแหวนนอก ดังแสดงในรูปที่ 4.17 วงแหวนในและวงแหวนนอกจะถูกยึดติดอยู่กับเพลลาข้างทั้งสองวงแหวนนอกจะมีรูปร่างเว้าคล้ายลูกเบี้ยวและมีขนาดที่โตกว่าวงแหวนในสไลด์บล็อกล็อกหรือลูกปืนโรลเลอร์จะถูกติดตั้งอยู่ระหว่างวงแหวนทั้งสอง ทำให้ชิ้นส่วนทั้งสามนี้ทำงานร่วมกันเป็นไปโดยอัตโนมัติ



รูปที่ 4.17 แสดงส่วนประกอบของเฟืองท้ายชนิดล้อยึดอัตโนมัติแบบสไลด์บังคับล็อก

การทำงาน มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- รถเคลื่อนที่ไปข้างหน้า เมื่อรถเคลื่อนที่ไปข้างหน้า สไลด์บังคับล็อกจะส่งถ่ายแรงบิดจากวงแหวนนอกไปยังวงแหวนในให้เคลื่อนที่ตามด้วยความเร็วที่เท่ากัน ซึ่งจากรูปทรงที่เว้าและมีลักษณะเป็นลูกเบี้ยวที่แตกต่างกันของวงแหวนทั้งสองนี้ จึงทำให้เกิดการเคลื่อนตัวของลูกปืนโรลเลอร์ สไลด์บังคับล็อกในเบ้า และจะล็อกตัวเมื่อเคลื่อนไปสัมผัสกับปลายยอดลูกเบี้ยวของวงแหวน ทั้งสองอย่างใดก็ตาม เมื่อเกิดการล็อกตัวของวงแหวนทั้งสองจะทำให้เกิดการถ่ายทอดแรงบิดไปยังเพลาข้างทันที ดังแสดงในรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 แสดงการหมุนเคลื่อนที่ของวงแหวนใน วงแหวนนอก และสไลด์บังคับล็อก ซึ่งทำให้เกิดการล็อกเคลื่อนตัวไปด้วยกัน

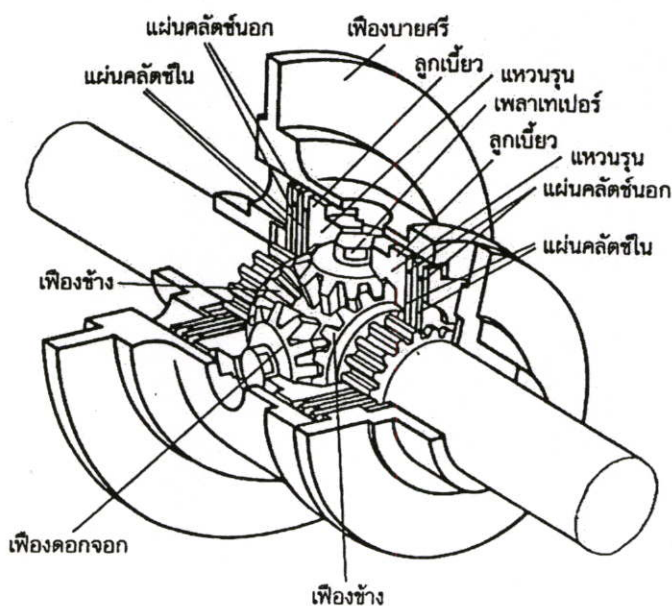
- ขณะเลี้ยวเข้าโค้ง เมื่อเลี้ยวเข้าโค้ง สไลด์บังคับล็อกจะขอมให้วงแหวนในและวงแหวนนอกหมุนไปด้วยความเร็วที่แตกต่างกัน ปลายยอดลูกเบี้ยวแต่ละยอดของวงแหวนทั้งสองจะเคลื่อนที่ไต่ข้ามลูกปืนโรลเลอร์ไปอย่างช้าๆ ในขณะที่เฟืองท้ายหมุน

ดังนั้นจึงพอสรุปได้ว่าเฟืองท้ายชนิดล้อยึดอัตโนมัติแบบสไลด์บังคับล็อกจึงเป็นอุปกรณ์ที่นำมาใช้กับเฟืองท้ายที่ต้องการแรงบิดที่แตกต่างกันสูงมาก

2. เฟืองท้ายลิมิตเต็ดสลลิปแบบแผ่นคลัตช์หลายแผ่น (multi - plate clutch limited slip differential) ไม่เพียงพอแต่รถยนต์ที่ออกแบบให้มีเฟืองท้ายชนิดลื่นเพื่อใช้กับสภาพภูมิประเทศที่ทุรกันดารเท่านั้น แต่ในปัจจุบันนี้รถแข่งและรถยนต์นั่งได้นำเอาเฟืองท้ายแบบลิมิตเต็ดสลลิปซึ่งจัดเป็นเฟืองท้ายชนิดลื่นอีกแบบหนึ่งมาใช้ด้วยเช่นกัน เฟืองท้ายที่มีอุปกรณ์ชนิดนี้จะไม่ทำให้เกิดการลื่นของล้อทั้งสอง แต่จะช่วยป้องกันล้อไม่ให้เกิดการลื่นไถลได้อย่างมาก เนื่องจากได้รับแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงไปจากสภาพของพื้นถนนเป็นหลัก

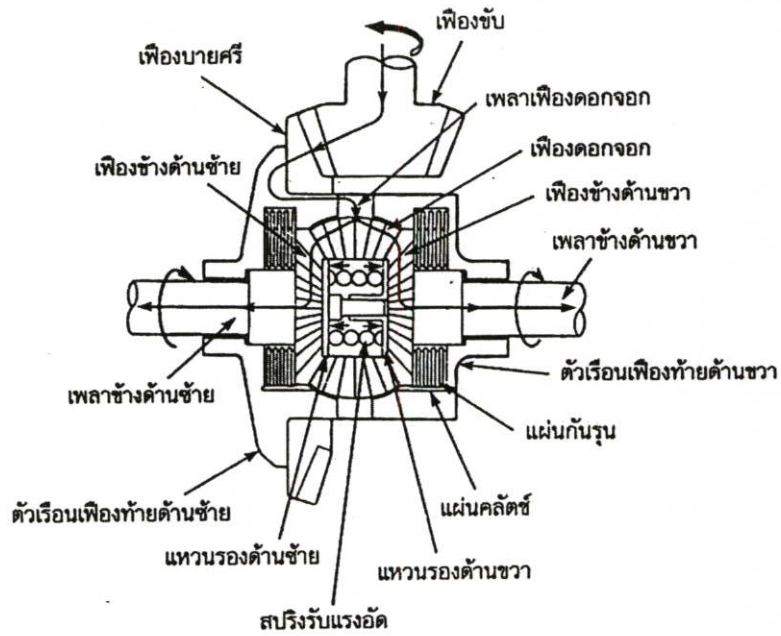
ดังนั้นจึงทำให้ผู้ขับขี่รถยนต์มีความปลอดภัยและมีสมรรถนะของการขับขี่ในขณะที่เข้าโค้งในพื้นที่ผิวถนนที่ลื่นด้วยความเร็วสูงได้ดี ซึ่งเฟืองท้ายลิมิตเต็ดสลลิปแบบนี้จะทำให้โหลดของล้อภายนอกมีแรงบิดค่อยๆ เพิ่มขึ้น ในทางตรงกันข้าม โหลดของล้อภายในจะลดลง ซึ่งตามปกติเฟืองท้ายโดยทั่วไปจะถ่ายทอดแรงบิดของล้อด้านนอกด้านหนึ่งเมื่อเริ่มการลื่นไถลอย่างรุนแรงให้เคลื่อนที่ไปข้างหน้าได้เท่าๆ กัน ด้วยเหตุนี้เฟืองท้ายลิมิตเต็ดสลลิปแบบแผ่นคลัตช์หลายแผ่นจึงนำเอาแผ่นคลัตช์และแผ่นกันรุนมาติดตั้งสลับกันอยู่ระหว่างเฟืองข้างกับเรอเนเพลาท้ายทั้งสองด้าน ดังแสดงในรูปที่

4.19



รูปที่ 4.19 ภาพตัดแสดงส่วนประกอบของเฟืองท้ายลิมิตเต็ดสลลิปแบบแผ่นคลัตช์หลายแผ่น

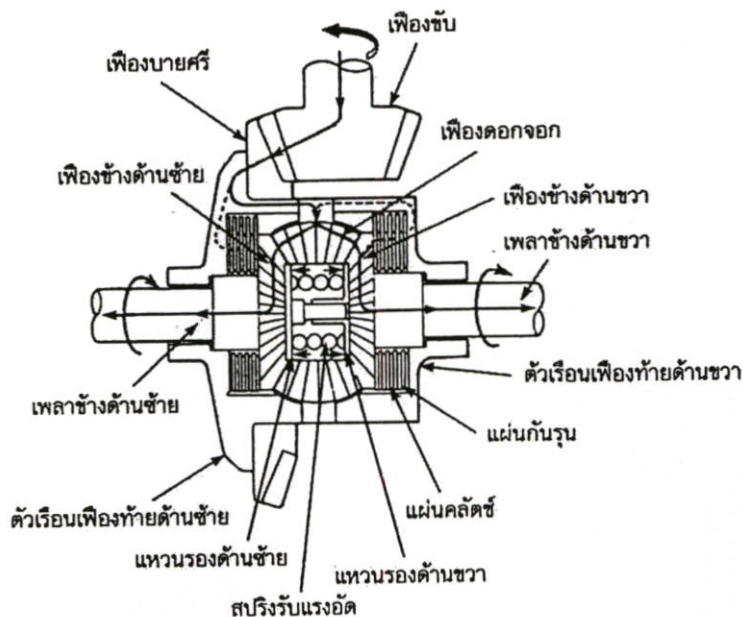
โครงสร้าง เฟืองท้ายแบบลิมิตเต็ดสลลิปแบบแผ่นคลัตช์หลายแผ่นประกอบด้วยแผ่นกันรุน แผ่นคลัตช์ที่ติดตั้งสลับกันอยู่ระหว่างเฟืองข้างและตัวเรอเนเฟืองท้าย โดยปลายทั้งสี่ด้านของแผ่นกันรุนจะถูกจัดวางให้อยู่ในร่องของเรอเนเฟืองท้าย และร่องสไปนซ์ของแผ่นคลัตช์จะถูกสวมอยู่กับเฟืองข้าง สปริงรับแรงอัดจะติดตั้งอยู่ระหว่างเฟืองข้างด้านซ้ายและด้านขวา และรับแรงอัดจากแผ่นกันรุนที่ติดอยู่กับแผ่นคลัตช์ผ่านแผ่นรองและเฟืองข้าง ด้วยเหตุนี้ผลรับที่ได้จะทำให้เฟืองข้าง



รูปที่ 4.21 การส่งถ่ายแรงบิดของเฟืองท้ายลิ้มิต์คสลิปแบบแผ่นคลัตช์หลายแผ่นขณะเคลื่อนไปข้างหน้า

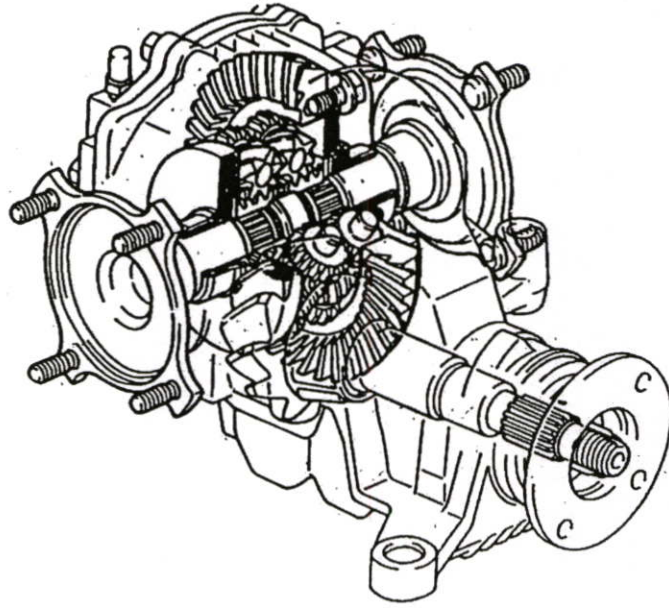
- เมื่อเลี้ยวเข้าโค้ง ในรูปที่ 4.22 ขณะที่รถเลี้ยวเข้าโค้ง ความเร็วของล้อทั้งซ้ายและขวาจะหมุนเคลื่อนที่ไปด้วยความเร็วที่แตกต่างกัน ทำให้ความเร็วของเฟืองข้างและตัวเรือนเฟืองท้ายทั้งซ้ายและขวาเคลื่อนที่ไปด้วยความเร็วที่แตกต่างกัน เป็นเหตุให้เกิดการลื่นขึ้นระหว่างแผ่นกันรุนและแผ่นคลัตช์ แต่อย่างไรก็ตามแผ่นกันรุนและแผ่นคลัตช์จะถูกกดให้แนบสนิทกันด้วยแรงอัดของสปริงรับแรงอัด ทำให้เกิดแรงบิดความฝืดเกิดขึ้นกับแผ่นกันรุนและแผ่นคลัตช์

เพราะฉะนั้นเมื่อรถวิ่งเข้าโค้ง แผ่นกันรุนและแผ่นคลัตช์จึงเกิดการลื่นขึ้นเพียงเล็กน้อย เป็นสาเหตุให้รอบการหมุนของเฟืองข้างทั้งซ้ายและขวามีความแตกต่างกันด้วยเช่นกัน

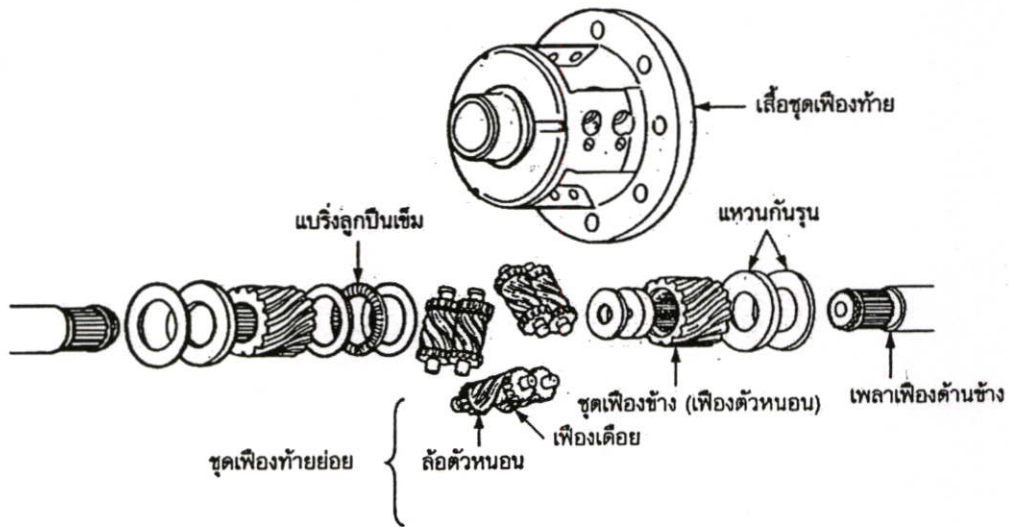


รูปที่ 4.22 การส่งถ่ายแรงบิดของเฟืองท้ายลิมิเต็ดสลลิปแผ่นคลัตช์หลายแผ่นเมื่อเลียวเข้าโค้ง

3. เฟืองท้ายลิมิเต็ดสลลิปแบบใช้ทอร์กเซนซิ่ง (torque sensing limited slip differential) ดังแสดงในรูปที่ 4.23 เป็นเฟืองท้ายที่ประกอบด้วยเฟืองตัวหนอนจำนวนสองตัว เฟืองเดี่ยวจำนวนสองตัว เฟืองข้างและแหวนกันรุน แรงขับของเฟืองท้ายจะเกิดขึ้นได้จากความฝืดของหน้าสัมผัสระหว่างเฟืองตัวหนอนกับเฟืองข้างที่ขบกัน และตัวเรือนเฟืองท้าย แหวนกันรุนกับเฟืองข้าง ซึ่งก็ทำให้แรงขับของเฟืองท้ายแบบนี้เปลี่ยนแปลงและเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เพื่อให้สอดคล้องกับแรงบิดที่ต้องการใช้ อย่างไรก็ตาม เฟืองท้ายแบบนี้จะทำงานเป็นปกติเหมือนกับเฟืองท้ายแบบธรรมดา ก็ต่อเมื่อผู้ขับขี่ถอนคันเร่งในขณะที่เลียวเข้าโค้ง ดังแสดงในรูปที่ 4.24 ซึ่งเป็นส่วนประกอบของเฟืองท้ายลิมิเต็ดสลลิปแบบทอร์กเซนซิ่ง



รูปที่ 4.23 ภาพตัดแสดงส่วนประกอบภายในของเฟืองท้ายลิมิตีเต็ดิสลิปแบบทอร์กเซนซิ่ง



รูปที่ 4.24 แสดงส่วนประกอบของเฟืองท้ายลิมิตีเต็ดิสลิปแบบทอร์กเซนซิ่ง

4.9 เฟืองท้ายแบบแพลนนิทารีเกียร์

เฟืองท้ายแบบแพลนนิทารีเกียร์ (planetary gear differential) เป็นเฟืองท้ายที่นำมาใช้กับรถที่ขับเคลื่อนล้อหน้าเท่านั้น เป็นการออกแบบเพื่อให้เกิดความเหมาะสมกับเนื้อที่ที่มีปริมาณจำกัด โดยเฉพาะ ดังนั้นเฟืองท้ายแบบแพลนนิทารีเกียร์จึงประกอบด้วยเฟืองขับ เฟืองบายศรี ริงเกียร์ หรือเกียร์เฟืองในจะยึดติดอยู่กับกับเฟืองบายศรีและจะเคลื่อนที่ไปพร้อมกันเมื่อรถเคลื่อนที่

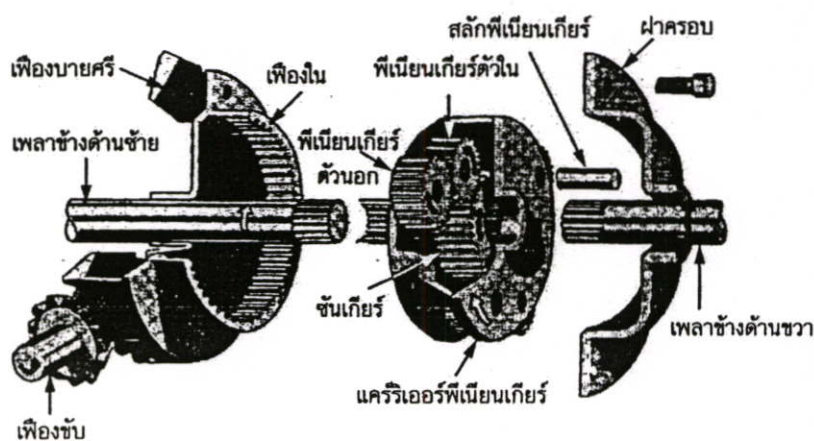
ริงเกียร์จะขบอยู่กับพีเนียนตัวออก พีเนียนเกียร์ตัวใน และชันเกียร์ ตามลำดับ โดยที่ชันเกียร์จะสวมอยู่กับสไปลน์ของเพลลาขับทั้งด้านซ้ายและด้านขวา และชุดแพลนนิทารีเกียร์ทั้งชุดนี้จะหมุนอยู่ภายในแคร์ริเออร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.25

การทำงาน มีรายละเอียดดังนี้

- รถเคลื่อนที่ไปในทางตรง ในรูปที่ 4.25 เมื่อเฟืองบายศรีถูกขับให้หมุนเคลื่อนที่ ริงเกียร์จะหมุนตามทำให้พีเนียนเกียร์หมุนเคลื่อนที่ไปรอบๆ ชันเกียร์ เป็นสาเหตุให้ชันเกียร์ขับให้เพลลาทั้งสองหมุนเคลื่อนที่ไปพร้อมกันในขณะที่รถเคลื่อนที่ไปในทิศทางตรง

- เมื่อรถเลี้ยวขวา ในรูปที่ 4.25 ชันเกียร์จะถูกล็อกให้อยู่กับที่ แคร์ริเออร์จะหมุนตามไปกับริงเกียร์สัมประสิทธิ์ความฝืดระหว่างยางของล้อด้านขวากับพื้นถนนที่เกิดในขณะรถเลี้ยวจะทำให้ความเร็วของเพลลาทั้งสองมีความแตกต่างกัน พีเนียนเกียร์ที่อยู่ในแคร์ริเออร์จะหมุนได้ไปรอบๆ ชันเกียร์ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ล้อด้านซ้ายพยายามหมุนให้เร็วกว่าล้อด้านขวา

- เมื่อรถเลี้ยวซ้าย ในรูปที่ 4.25 ความเร็วรอบของแคร์ริเออร์จะหมุนเคลื่อนที่ไม่เท่ากับชันเกียร์ เนื่องจากเกิดความฝืดขึ้นที่ล้อด้านซ้าย เป็นสาเหตุให้พีเนียนเกียร์ถูกดันให้ไต่ไปรอบๆ ริงเกียร์ ดังนั้นจึงทำให้ล้อด้านขวาหมุนเคลื่อนที่ได้เร็วกว่าล้อด้านซ้าย



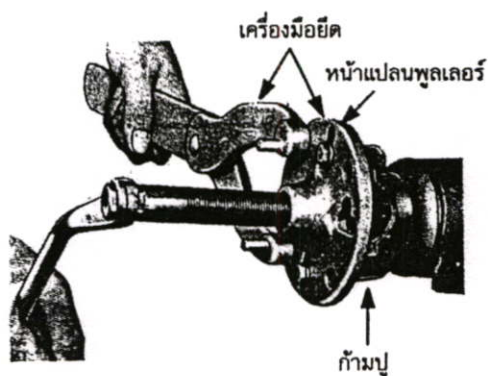
รูปที่ 4.25 แสดงส่วนประกอบของเฟืองท้ายแบบแพลนนิทารีเกียร์

4.10 การถอดชุดเฟืองท้าย

การถอดชุดเฟืองท้ายสามารถปฏิบัติได้ตามขั้นตอนต่อไปนี้

1. ถอดหน้าแปลนเฟืองท้ายโดยใช้ค้อนและสกัดสกัดรอยย้าของหัวนอต และใช้เครื่องมือยึดหน้าแปลนเพื่อคลายนอตยึดเฟืองขับ ดังแสดงในรูปที่ 4.27

2. ถอดหน้าแปลนเพลลาเฟืองขับออกโดยใช้เหล็กคูดลูกปืน ดังแสดงในรูปที่ 4.28

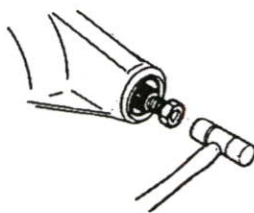


รูปที่ 4.28 การถอดหน้าแปลนของเพลลาเฟืองขับโดยใช้เหล็กคูดลูกปืน



- รูปที่ 4.29 ก่อนถอดฝาประกบกับลูกปืนทั้งสองตัวให้ทำเครื่องหมายที่ฝาประกบกับลูกปืนกับตัวเรือนเฟืองท้าย

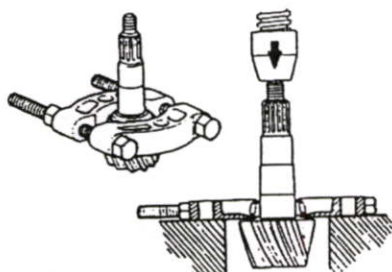
4. ถอดคัลลูกปืนตัวหน้า โดยใช้ค้อนทองแดงเคาะที่ปลายเพลลาเบาๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.30



รูปที่ 4.30 ใช้ค้อนทองแดงเคาะที่ปลายเพลลาเบาๆ เพื่อถอดคัลลูกปืนตัวหน้า

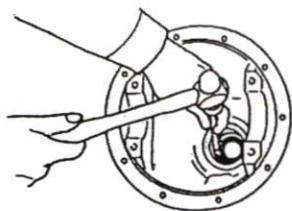
หมายเหตุ ก่อนถอดคัลลูกปืนตัวหน้า ให้ใส่โบลด์ที่ปลายเพลลา ก่อนใช้ค้อนเคาะ

5. ถอดลูกปืนเฟืองขับตัวหลัง โดยใช้เครื่องอัดไฮดรอลิกและเหล็กคูดูดลูกปืนตัวหลัง
ออกจากเฟืองขับดังแสดงในรูปที่ 4.31



รูปที่ 4.31 แสดงการถอดลูกปืนขับตัวหลัง

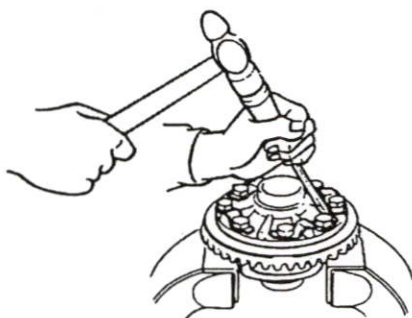
6. ถอดเบ้าลูกปืนเฟืองขับตัวหน้าและตัวหลัง โดยใช้เหล็กส่งตอกออก ดังแสดงในรูปที่
4.32



รูปที่ 4.32 แสดงการถอดเบ้าลูกปืนตัวหน้าและตัวหลัง

หมายเหตุ ก่อนทำการถอดเบ้าลูกปืนออก ให้ทำเครื่องหมายไว้ทั้งตัวหน้าและตัวหลัง
เพื่อป้องกันการสลับกันของเบ้าลูกปืน

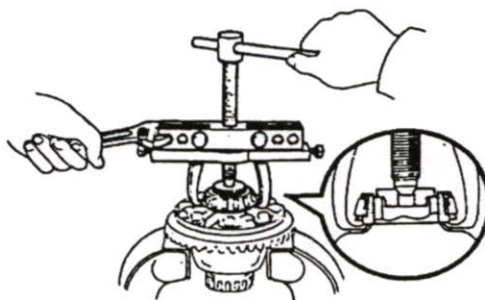
7. ถอดแผ่นล้อค โบลต์ยึดเฟืองบายศรี และใช้ค้อนทองแดงเคาะที่เฟืองให้แยกออกจากตัว
เรือนเฟืองท้ายดังแสดงในรูปที่ 4.33



รูปที่ 4.33 แสดงการถอดแยกเฟืองบายศรีกับตัวเรือนเฟืองท้าย

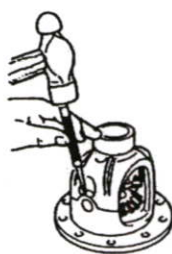
หมายเหตุ ให้ทำเครื่องหมายไว้ที่เฟืองบายศรีกับตัวเรือนเฟืองท้ายก่อนทำการแยกออกจากกัน

8. ใช้เหล็กคูดูดลูกปืนแยกลูกปืนข้างออกจากตัวเรือนเฟืองท้าย ดังแสดงในรูปที่ 4.34



รูปที่ 4.34 ใช้เหล็กคูดูดลูกปืนแยกลูกปืนข้างออกจากตัวเรือนเฟืองท้าย

9. ใช้ค้อนและเหล็กส่งดอกเฟืองคอกจอก และแยกเฟืองข้างและแหวนรองออกจากตัวเรือนเฟืองท้ายดังแสดงในรูปที่ 4.35



รูปที่ 4.35 แสดงการถอดแยกตัวเรือนของเฟืองท้าย

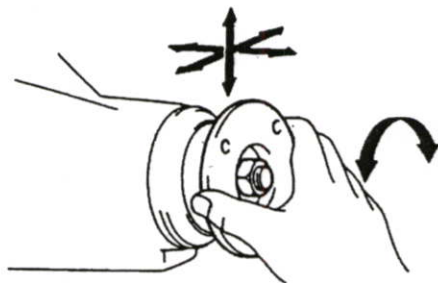
4.11 การตรวจสอบเฟืองท้าย

การตรวจสอบเฟืองท้ายสามารถทำการตรวจสอบประสิทธิภาพในการทำงานของมันได้ โดยพิจารณาอาการที่ผิดปกติ เพื่อเป็นแนวทางในการถอดและประกอบต่อไป ดังนั้นในการตรวจสอบชุดเฟืองท้ายจึงพิจารณาอาการที่ผิดปกติได้ดังนี้

4.11.1 เสียงดังกังวานและร่อนผิดปกติ

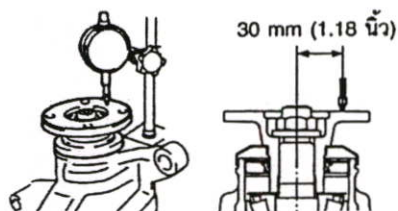
การเกิดเสียงดังกังวานและร่อนผิดปกติสามารถทำการตรวจสอบเฟืองท้ายได้โดย

1. ตรวจสอบการหลอมของเฟืองขับ
2. ตรวจสอบการชำรุดของลูกปืนเฟืองขับ ดังแสดงในรูปที่ 4.36



รูปที่ 4.36 แสดงการตรวจสอบการหลอมและชำรุดของเฟืองขับและลูกปืน

3. ตรวจสอบการบิดเบี้ยวของหน้าแปลนเฟืองท้าย (ค่าบิดเบี้ยวไม่ควรเกิน 0.10 มิลลิเมตร) ดังแสดงในรูปที่ 4.37

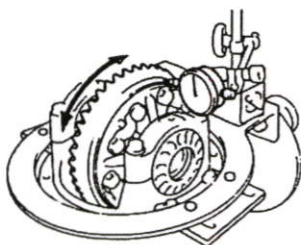


รูปที่ 4.37 การใช้ไดอัลเกจตรวจสอบการบิดเบี้ยวของหน้าแปลนเฟืองท้าย

4.11.2 เสียงดังผิดปกตินอกเหนือจากเสียงดังกังวาน

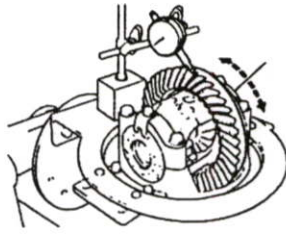
การเกิดเสียงดังผิดปกตินอกเหนือจากเสียงดังกังวานสามารถทำการตรวจสอบเฟืองท้ายได้โดย

1. ใช้ไดอัลเกจวัดความบิดเบี้ยวของเฟืองบายศรี (ค่าบิดเบี้ยวไม่ควรเกิน 0.10 มิลลิเมตร) ดังแสดงในรูปที่ 4.38



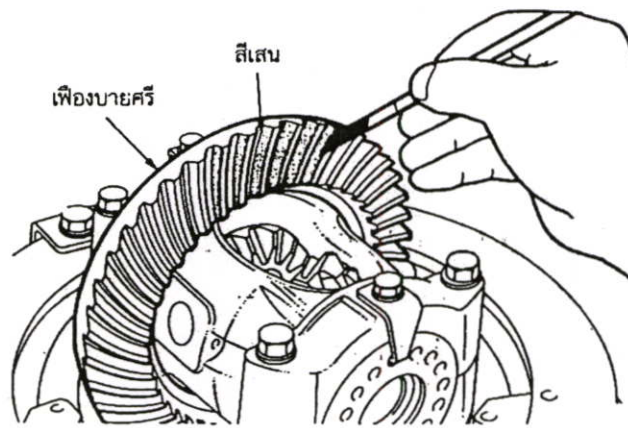
รูปที่ 4.38 ใช้ไดอัลเกจตรวจสอบวัดการบิดเบี้ยวของหน้าแปลนเฟืองท้าย

2. ใช้ไดอัลเกจวัดระยะแบ็กแลชของเฟืองบายศรี (ค่าระยะแบ็กแลชควรอยู่ระหว่าง 0.13 ถึง 0.18 มิลลิเมตร) ดังแสดงในรูป 4.39



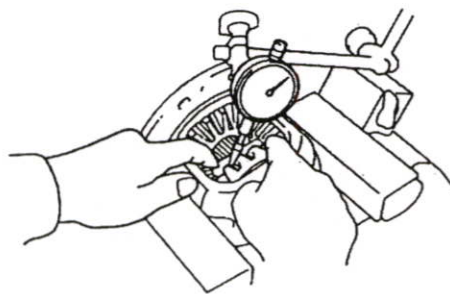
รูปที่ 4.39 ใช้ไดอัลเกจวัดระยะเบี่ยงเบนของเฟืองบายศรี

3. ตรวจสอบรอยสัมผัสระหว่างเฟืองบายศรีกับเฟืองขับ และการหลวมของลูกปืนข้าง
 ดังแสดงในรูปที่ 4.40 (ให้ดูรอยสัมผัสของฟันเฟืองจากการปรับเฟืองบายศรีกับเฟืองขับ)



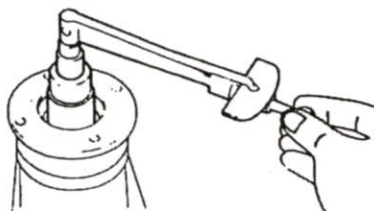
รูปที่ 4.40 แสดงรอยสัมผัสของเฟืองบายศรีกับเฟืองขับที่ถูกต้อง

4. ใช้ไดอัลเกจตรวจวัดระยะเบี่ยงเบนของเฟืองข้าง โดยการจับยึดเฟืองดอกจอกตัวใดตัว
 หนึ่งไว้ ดังแสดงในรูปที่ 4.41



รูปที่ 4.41 ใช้ไดอัลเกจตรวจวัดระยะเบี่ยงเบนของเฟืองข้าง

5. ใช้ประแจควดแรงบิดวักระยะฟรีโหลตในช่วงระยะแบ็กแลชของเฟืองบายศรีกับเฟืองขับ (ค่าฟรีโหลตจะอยู่ระหว่าง 9 ถึง 13 กิโลกรัม – เซนติเมตร) ดังแสดงในรูปที่ 4.42

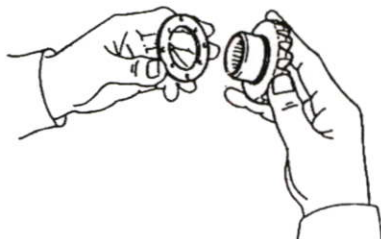


รูปที่ 4.42 ใช้ประแจควดแรงบิดวักระยะฟรีโหลต

4.12 การประกอบเฟืองท้าย

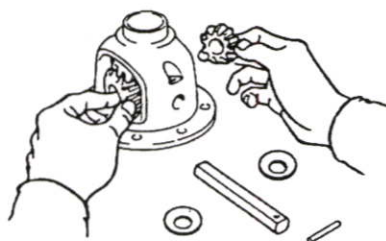
การประกอบเฟืองท้ายจะสามารถกระทำได้ภายหลังจากทำความสะอาดและเปลี่ยนชิ้นส่วนที่ชำรุดแล้วซึ่งก็มีขั้นตอนดังนี้

1. ประกอบแผ่นกันรุนที่มีขนาดความหนาที่ถูกต้องเข้ากับเฟืองข้าง ดังแสดงในรูปที่ 4.43



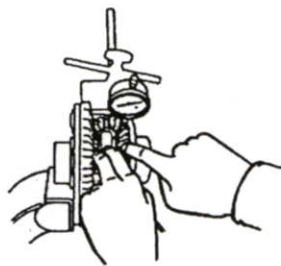
รูปที่ 4.43 แสดงการประกอบแผ่นกันรุนเข้ากับเฟืองข้าง

2. ประกอบเฟืองข้าง เฟืองดอกจอก แผ่นกันรุน สลักเฟืองดอกจอกเข้ากับตัวเรือนเฟืองท้าย ดังแสดงในรูปที่ 4.44



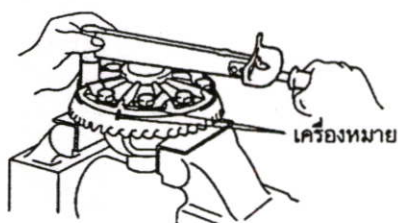
รูปที่ 4.44 แสดงการประกอบเฟืองข้าง เฟืองดอกจอก และแผ่นกันรุนเข้ากับตัวเรือนเฟืองท้าย

3. หลังจากประกอบเฟืองข้างและเฟืองคอกจอก ให้ตรวจวัดระยะแบ็กเลขของเฟืองข้าง (ระยะแบ็กเลขประมาณ 0.05 ถึง 0.20 มิลลิเมตร) ดังแสดงในรูปที่ 4.45



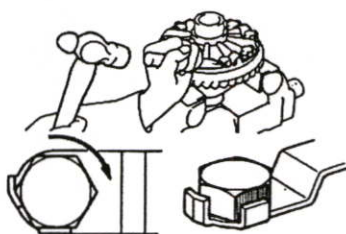
รูปที่ 4.45 ใช้ไดอัลเกจวัดระยะแบ็กเลขของเฟืองข้าง

4. ประกอบเฟืองบายศรีเข้ากับตัวเรือนเฟืองท้าย โดยให้เครื่องหมายที่ทำไว้ตรงกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.46



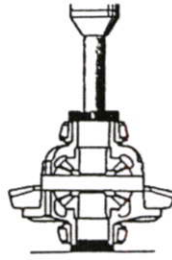
รูปที่ 4.46 การประกอบเฟืองบายศรีเข้ากับตัวเรือนเฟืองท้าย

5. ใช้ค้อนและเหล็กส่งตอกย้ำแผ่นล้อยกหัวโบลต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.47



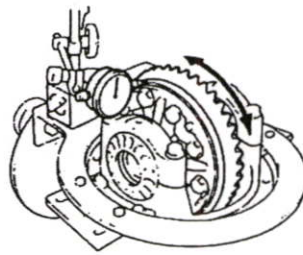
รูปที่ 4.47 แสดงการใช้ค้อนและเหล็กส่งตอกย้ำแผ่นล้อยกหัวโบลต์

6. ใช้เครื่องอัดลูกปืนข้างเข้ากับตัวเรือนเฟืองท้าย ดังแสดงในรูปที่ 4.48



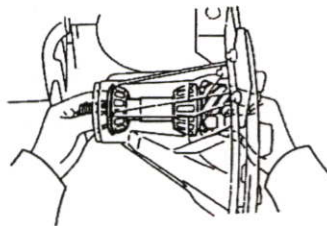
รูปที่ 4.48 แสดงการอัดลูกปืนข้างเข้ากับตัวเรือนเฟืองท้าย

7. ประกอบตัวเรือนเฟืองท้ายเข้ากับเสื้อเฟืองท้าย และใช้ไดอัลเกจวัดการบิดเบี้ยวของเฟืองบายศรี (ค่าบิดเบี้ยวไม่ควรเกิน 0.10 มิลลิเมตร) ดังแสดงในรูปที่ 4.49



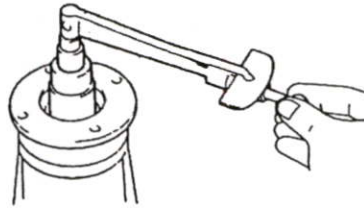
รูปที่ 4.49 แสดงการใช้ไดอัลเกจวัดการบิดเบี้ยวของเฟืองบายศรี

8. ประกอบลูกปืนตัวหน้า แหวนรอง ลูกปืนตัวหลัง และเฟืองขับเข้ากับเสื้อเฟืองท้ายตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.50



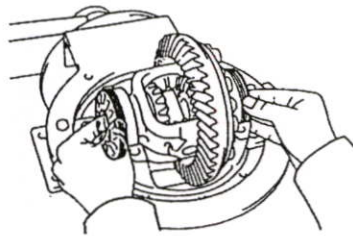
รูปที่ 4.50 แสดงการประกอบลูกปืนตัวหน้าแหวนรอง ลูกปืนตัวหลังและเฟืองขับเข้าเสื้อเฟืองท้าย

9. ใช้ประแจควดแรงบิดวัดค่าพรีโหลด (ก่อนทำการตรวจวัดค่าพรีโหลด ให้หมุนเฟืองขับกลับไปกลับมา เพื่อให้บารองลูกปืนเข้าที่ จากนั้นจึงวัดค่าพรีโหลด) ดังแสดงในรูปที่ 4.5



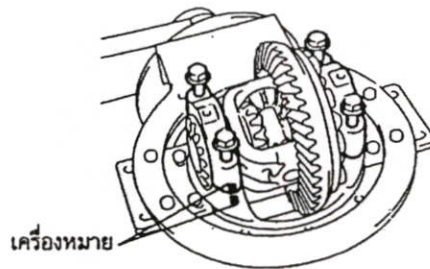
รูปที่ 4.51 การวัดค่าพรีโหลด

10. ประกอบตัวเรือนเฟืองท้ายนอตปรับตั้งลงในเสื้อเฟืองท้าย ดังแสดงในรูปที่ 4.52



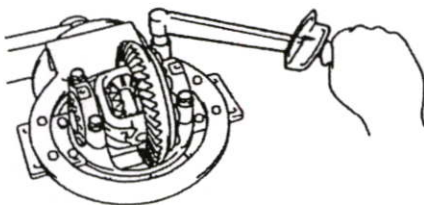
รูปที่ 4.52 แสดงการประกอบตัวเรือนเฟืองท้ายและนอตปรับตั้งลงในเสื้อเฟืองท้าย

11. ประกอบฝาครอบลูกปืนให้เครื่องหมายที่ฝาครอบลูกปืนตรงกัน และขัน โบลต์ยึดฝาครอบลูกปืนทั้งสองด้านเข้าประมาณ 2 หรือ 3 รอบ ดังแสดงในรูปที่ 4.53



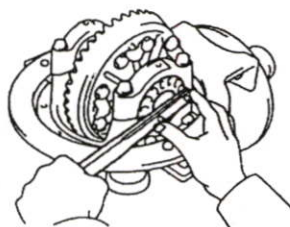
รูปที่ 4.53 แสดงการประกอบฝาครอบลูกปืนให้เครื่องหมายตรงกัน

12. ขัน โบลต์ยึดฝาครอบลูกปืนข้างให้ได้อัตราตามที่กำหนดไว้ (ค่าแรงขัน โบลต์ 800 กิโลกรัม – เซนติเมตร หรือ 58 ฟุต – ปอนด์) ดังแสดงในรูปที่ 4.54



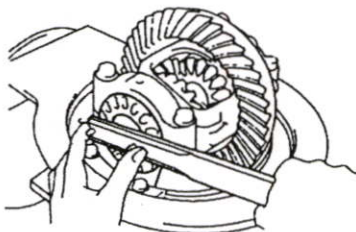
รูปที่ 4.54 แสดงการกวดขัน โบลต์ยึดฝาครอบลูกปืนให้ได้อัตราตามที่กำหนด

13. ใช้เครื่องมือขันนอตปรับตั้งด้านเฟืองบายศรีเข้าจนมีระยะแบ็กแลชประมาณ 2 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.55



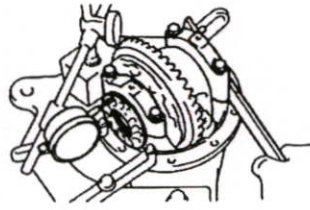
รูปที่ 4.55 แสดงการปรับตั้งแบ็กแลชด้านเฟืองบายศรี

14. ใช้เครื่องมือขันนอตปรับตั้งด้านเฟืองขับเข้าจนสุด และคลายออกจนได้อัตราที่กำหนด ดังแสดงในรูปที่ 4.56



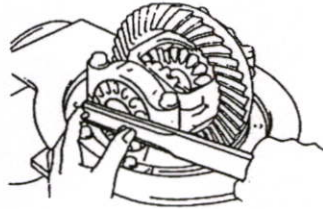
รูปที่ 4.56 แสดงการขันนอตปรับตั้งด้านเฟืองขับ

15. ใช้ไดอัลเกจวัดระยะกันรุนด้านเฟืองบายศรี และขันนอตปรับตั้งด้านตรงข้ามเฟืองบายศรีให้ระยะฟรีโหลดอยู่ที่ศูนย์และเข็มของไดอัลเกจเริ่มขยับ ดังแสดงในรูปที่ 4.57



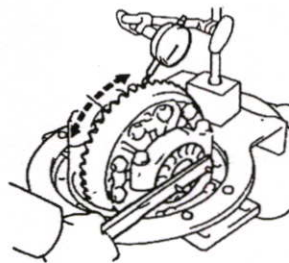
รูปที่ 4.57 แสดงการวัดระยะกันรุนด้านเฟืองบายศรี

16. ขันนอตปรับตั้งเข้าอีกประมาณ 1 ถึง 1 รอบครึ่ง จากตำแหน่งของฟรีโหลดที่ศูนย์ ดังแสดงในรูปที่ 4.58



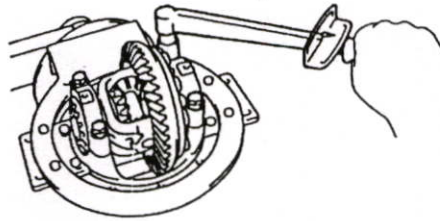
รูปที่ 4.58 แสดงการปรับเฟืองบายศรีกับเฟืองขับ

17. ใช้ไดอัลเกจวัดระยะแบ็กแลชและขันนอตปรับตั้งเฟืองบายศรีและเฟืองขับจนกระทั่งได้ค่าที่กำหนดดังแสดงในรูปที่ 4.59



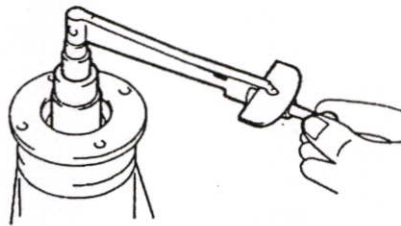
รูปที่ 4.59 แสดงการปรับตั้งระยะแบ็กแลชระหว่างเฟืองบายศรีกับเฟืองขับ

18. ชั้น โบลต์ยึดฝาครอบลูกปืนให้ได้ค่าที่กำหนด (แรงกดขัน โบลต์ประมาณ 800 กิโลกรัม – เซนติเมตร หรือ 58 ฟุต – ปอนด์) ดังแสดงในรูปที่ 4.60



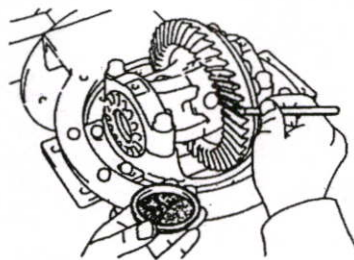
รูปที่ 4.60 แสดงการกดขัน โบลต์ภายหลังจากตรวจสอบระยะแบ็กแลชได้ตามค่าที่กำหนด

19. ใช้ประแจกดแรงบิดวัดค่าฟรีโหลดรวมอีกครั้ง ดังแสดงในรูปที่ 4.61

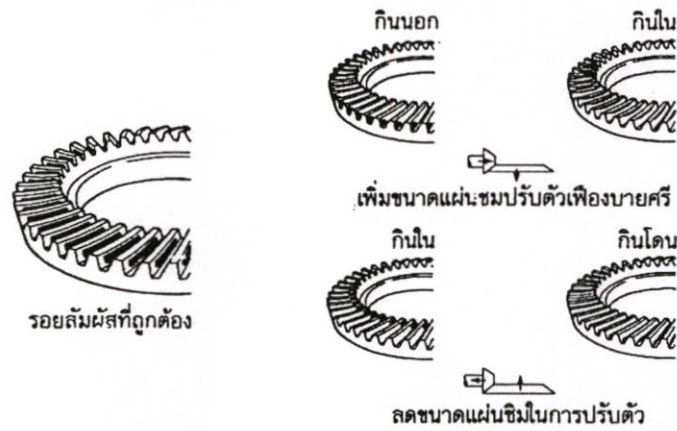


รูปที่ 4.61 ใช้ประแจแรงบิดวัดค่าฟรีโหลด

20. ใช้สีเสนาทาที่ฟันเฟืองบายศรีและหมุนไปมาเพื่อตรวจสอบรอยสัมผัสระหว่างเฟืองบายศรีกับเฟืองขับดังแสดงในรูปที่ 4.62 และรูปที่ 4.63

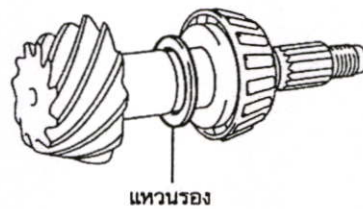


รูปที่ 4.62 การตรวจสอบรอยสัมผัสโดยใช้สีเสนา



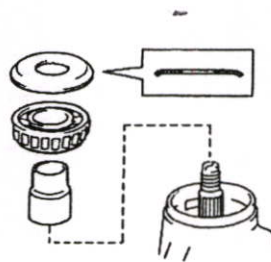
รูปที่ 4.63 แสดงลักษณะรอยสัมผัสของเฟืองบายศรีกับเฟืองขับที่ไม่ถูกต้องและถูกต้อง

21. ถ้าตรวจสอบรอยสัมผัสของฟันเฟืองไม่ถูกต้อง ให้เลือกแหวนรองที่เฟืองขับใหม่ ดังแสดงในรูปที่ 4.64



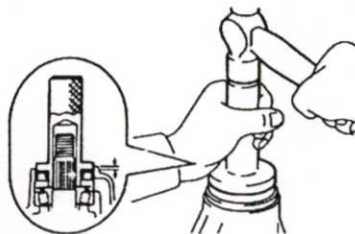
รูปที่ 4.64 การเปลี่ยนแหวนรองที่เฟืองขับเมื่อตรวจสอบรอยสัมผัสของฟันเฟืองไม่ถูกต้อง

22. ประกอบปลอกกรองตัวใหม่และลูกปืนตัวหน้าเข้ากับเพลลา ดังแสดงในรูปที่ 4.65



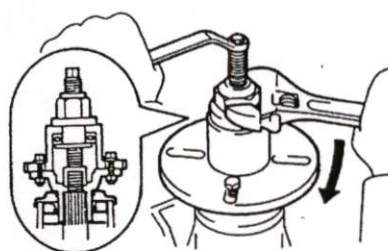
รูปที่ 4.65 ประกอบปลอกกรองและลูกปืนตัวใหม่

23. ประกอบแผ่นกั้นน้ำมันและซีลตัวใหม่ ดังแสดงในรูปที่ 4.66



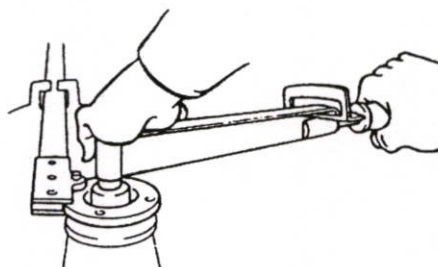
รูปที่ 4.66 ประกอบแผ่นกั้นน้ำมันและซีลตัวใหม่

24. ประกอบหน้าแปลนเฟืองท้าย ดังแสดงในรูปที่ 4.67



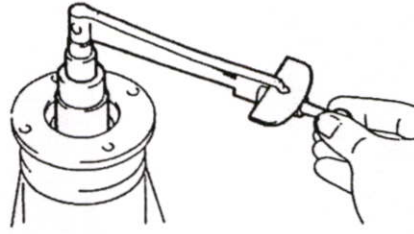
รูปที่ 4.67 ใช้ประแจประกอบหน้าแปลนเฟืองท้าย

25. ใช้เครื่องมือยึดหน้าแปลนและขันนอตยึด ด้วยค่าแรงกดขัน 2,000 กิโลกรัม – เซนติเมตร หรือ 145 ฟุต – ปอนด์ ดังแสดงในรูปที่ 4.68



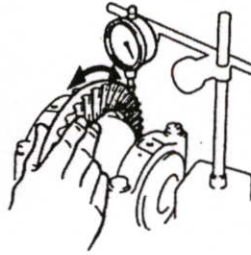
รูปที่ 4.68 ใช้เครื่องมือยึดหน้าแปลนและขันนอตยึด

26. ใช้ประแจแรงบิดวัดพีรีโกลรวม ดังแสดงในรูปที่ 4.69



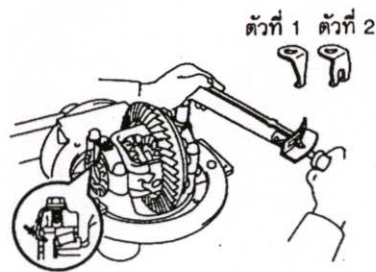
รูปที่ 4.69 ใช้ไดอัลเกจวัดระยะแบ็กแลชของเฟืองบายศรี ดังแสดงในรูปที่ 4.70

27. ใช้ไดอัลเกจวัดระยะแบ็กแลชของเฟืองบายศรี ดังแสดงในรูปที่ 4.70



รูปที่ 4.70 ใช้ไดอัลเกจวัดระยะแบ็กแลชของเฟืองท้าย

28. เลือกตัวล๊อคเบอร์ 1 หรือ 2 ให้เหมาะกับการล๊อคคอนอตปรับตั้ง และประกอบตัวล๊อคลงบนฝาประกบกับลูกปืนข้าง ดังแสดงในรูปที่ 4.71



รูปที่ 4.71 ประกอบตัวล๊อคคอนอตปรับตั้งที่ฝาประกบกับลูกปืนข้าง

บทที่ 5

โครงสร้างและการคำนวณ

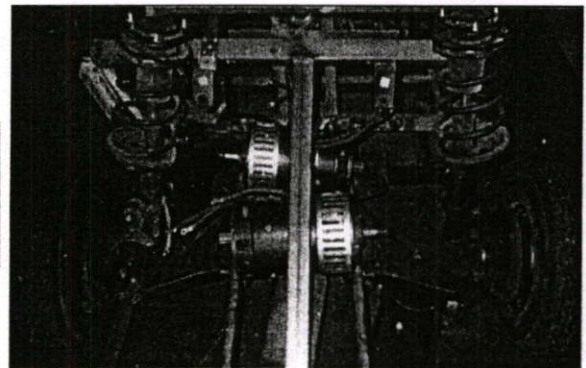
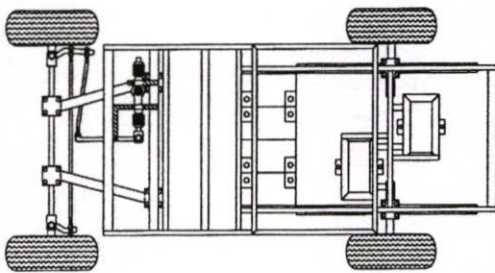
ในบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดต่างๆ ของการสร้างรถไฟฟ้าขับเคลื่อนสี่ล้อ การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน รวมไปถึงการหาพิกัดกำลังของมอเตอร์ ที่เหมาะสมเพื่อจะได้นำไปติดตั้งกับตัวโครงสร้างของรถไฟฟ้าขับเคลื่อนสี่ล้อที่สร้างขึ้น

5.1 ลักษณะโครงสร้าง

ในการออกแบบสร้างรถไฟฟ้าขับเคลื่อนสี่ล้อ ได้ทำการออกแบบให้มีลักษณะโครงสร้างที่ใกล้เคียงกับรถกอล์ฟที่มีใช้งานอยู่ทั่วไป แต่อะไหล่และอุปกรณ์ประกอบต่างๆ จะใช้วัสดุที่สามารถจัดซื้อได้ภายในประเทศ ซึ่งจะนำมาประยุกต์และดัดแปลงให้เหมาะสมกับตัวโครงรถที่สร้างขึ้น รายละเอียดลักษณะโครงสร้างของรถ มีดังต่อไปนี้

5.1.1 แชสซีส์ (chassis)

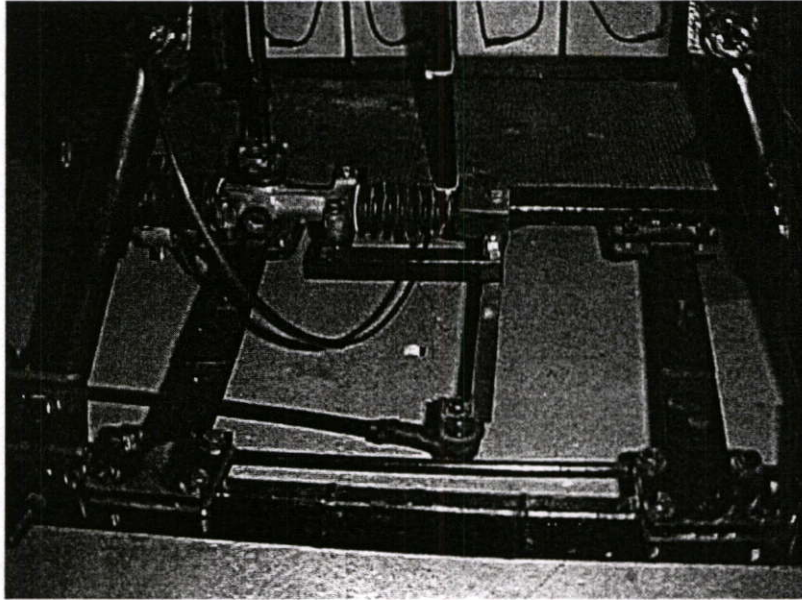
แชสซีส์ เป็นส่วนประกอบหลักที่สำคัญของรถกอล์ฟ เพราะเป็นส่วนที่ทำหน้าที่รองรับน้ำหนักทั้งหมด รวมไปถึงแรงกระแทก จากตัวรถกับพื้นถนน จึงจำเป็นจะต้องใช้เหล็กที่มีความหนาและแข็งแรงเพื่อทำให้เกิดความมั่นคงในการขับขี่ รูปร่าง และรายละเอียดของโครงรถแสดงดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 โครงสร้างของรถไฟฟ้าขับเคลื่อนสี่ล้อที่สร้างขึ้น (ก) ด้านบน (ข) ด้านหน้า

5.1.2 ระบบบังคับเลี้ยว

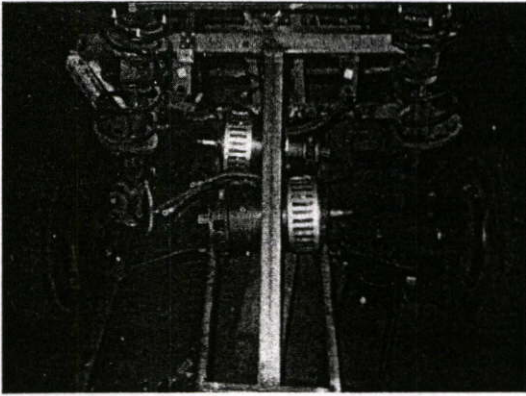
ชุดบังคับเลี้ยวหน้า ทำหน้าที่ บังคับทิศทางของรถให้ไปในทิศทางที่ต้องการ หลักการทำงานคือ อาศัยแรงส่งกำลังจากการหมุนพวงมาลัยมาที่ตัวแรค (Rack) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ช่วยผ่อนแรงในการบังคับเลี้ยว และเป็นตัวที่ไปกระทำให้คันชักเลื่อนไปในแนวระนาบ บังคับทิศทางของล้อหน้าทั้งสองข้างให้ไปซ้ายและขวาได้ตามต้องการ ลักษณะการทำงานของชุดบังคับเลี้ยวแสดงดังรูปที่ 5.2



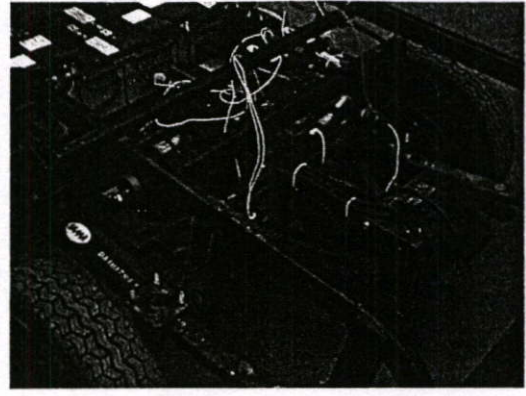
รูปที่ 5.2 ชุดบังคับเลี้ยวหน้า

5.1.3 ระบบกันสะเทือน

ระบบกันสะเทือนเป็นส่วนที่ช่วยดูดซับแรงจากการกระแทกและรองรับน้ำหนักของตัวรถ เพื่อทำให้เกิดความนุ่มนวลในการขับขี่ในรถไฟฟ้าขับเคลื่อนสี่ล้อนี้ ส่วนช่วงหน้าจะใช้ระบบกันสะเทือนแบบโช้คอัพคู่ โดยจะถูกเชื่อมต่อกันระหว่างตัวโครงรถกับคานหน้า ส่วนระบบกันสะเทือนของช่วงหลัง จะใช้แบบโช้คอัพและแหนบเช่นเดียวกัน แต่แหนบหลังเป็นแหนบ 4 แผ่น เพราะจะต้องรองรับน้ำหนักของมอเตอร์ทั้ง 2 ตัว แบตเตอรี่อีก 4 ลูก (จะกล่าวรายละเอียดในบทที่ 6) เสริมด้วยโช้คอัพเพื่อลดแรงกระแทกของตัวรถกับพื้นถนนเวลาขับขี่ โครงสร้างของระบบกันสะเทือนแสดงดังรูปที่ 5.3



(ก)



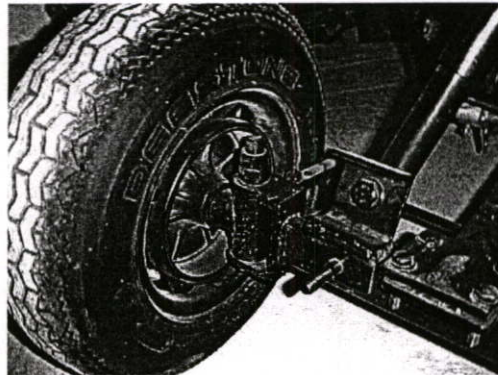
(ข)

รูปที่ 5.3 (ก) ระบบกันสะเทือนหน้า

(ข) ระบบกันสะเทือนหลัง

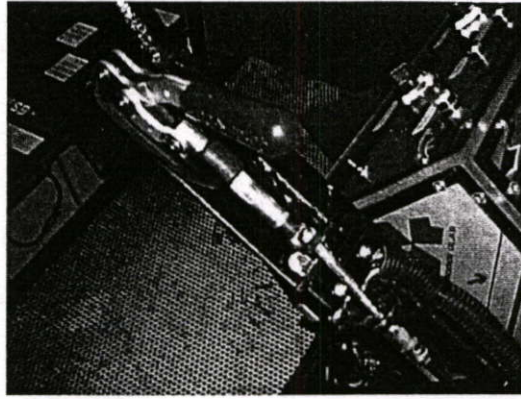
5.1.4 ระบบเบรก

ระบบเบรกของรถไฟฟ้าคันนี้เป็นแบบคัมพ์เบรก (Dump Break) ธรรมดาเนื่องจากรถกอล์ฟไม่จำเป็นต้องใช้ความเร็วสูงในการขับขี่ จึงไม่จำเป็นที่จะต้องใช้ระบบเบรกแบบจาน (Disk Break) การทำงานของระบบเบรกแบบนี้ จะอาศัยแรงทางกลจากการเหยียบแป้นเบรก ไปบังคับให้น้ำมันไปดันผ้าเบรก ให้ไปอัดกับผิวคัมพ์ล้อ ซึ่งเมื่อคลายเท้าจากการเหยียบเบรก ผ้าเบรกก็จะกลับคืนสู่สภาพปกติด้วยแรงสปริงที่ติดอยู่กับ คันเบรก ลักษณะของคัมพ์เบรก แสดงดังรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 ระบบเบรกล้อหน้า

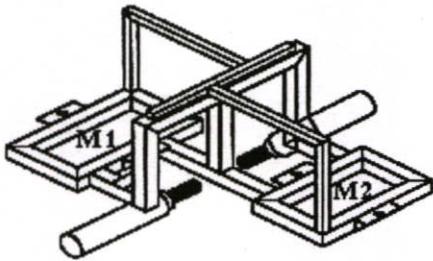
ในส่วน of ระบบเบรกได้มีการเพิ่มเติมเบรกมือเข้าไป เพื่อป้องกันรถไหลเวลาจอด ในทางลาดเอียงทั้งนี้ ได้มีระบบป้องกัน เมื่อลืมนปลดเบรกมือเวลาขับขี่ คือ มีการติดตั้งตัวลิมิตสวิตช์ (limit switch) ไว้สำหรับตัดวงจรควบคุมของชุดควบคุมออก ถ้าไม่ปลดเบรกมือก่อนก็ไม่สามารถขับเคลื่อนรถออกไปได้ โดยมีลักษณะดังรูปที่ 5.5



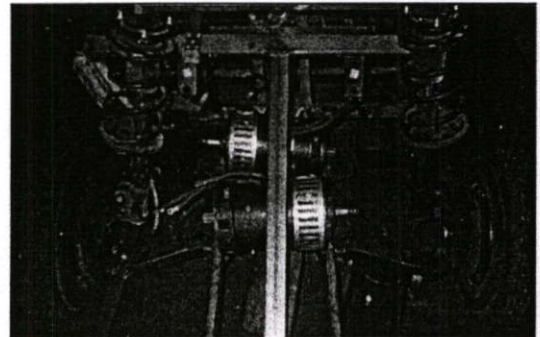
รูปที่ 5.5 เบริคมือ

5.1.5 ระบบขับเคลื่อน

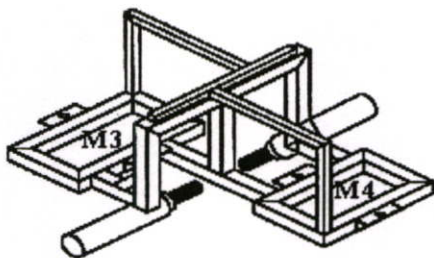
ระบบขับเคลื่อนของรถไฟฟ้าขับเคลื่อนสี่ล้อ อาศัยหลักการมอเตอร์กระแสตรงแบบอนุกรม 4 ตัว ขนาดตัวละ 1000 W. (คำนวณได้จากหัวข้อ 5.2.2) มาแทนชุดดิฟเฟอเรนเชียลเกียร์ โดยนำมอเตอร์ทั้ง 2 ตัวมาต่ออนุกรมกันทางไฟฟ้า แต่แยกอิสระกันทางกล โดยให้มอเตอร์ แต่ละตัวขับเคลื่อนล้อหลังตัวละข้าง ใช้โซ่เป็นตัวส่งกำลังมาขับเคลื่อนเพลาลัง โดยใช้อัตราทด 1 : 3.4 (อธิบายได้จาก 5.2.3) เพื่อให้ได้แรงบิดและความเร็วที่เหมาะสมในการส่งกำลัง โดยได้แสดงตำแหน่งในการวางมอเตอร์ทั้ง 2 ตัวดังรูปที่ 5.6



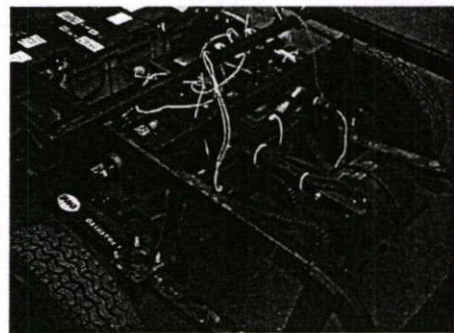
(ก)



(ข)



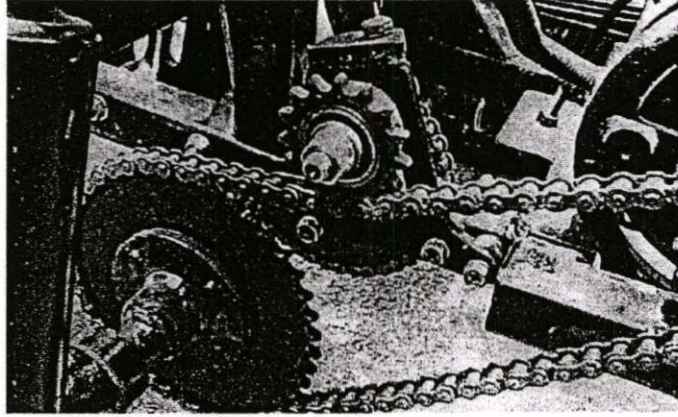
(ค)



(ง)

รูปที่ 5.6 (ก) ชุดสำหรับวางมอเตอร์ล้อหน้า (ข) ระบบขับเคลื่อนหน้า
(ค) ชุดสำหรับวางมอเตอร์ล้อหลัง (ง) ระบบขับเคลื่อนหลัง

นอกจากนี้ยังได้ทำการติดตั้งชุดเฟืองสำหรับกดโซ่ ไม่ให้หย่อนเวลาจับขี่ และช่วยให้เกิดความสะดวกในการปรับตั้งโซ่ให้ตึง เวลาที่โซ่หย่อน เพื่อให้การส่งกำลังเป็นไปได้อย่างสมบูรณ์ และมีประสิทธิภาพสูงสุด



รูปที่ 5.7 ชุดเฟืองปรับตั้งโซ่

5.2 การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและพิกัดกำลังของมอเตอร์

5.2.1 การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน

การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของรถไฟฟ้าขับเคลื่อนสี่ล้อในการคำนวณใช้ข้อมูลจากรถที่นำเข้ามาจำหน่ายภายในประเทศ [2]

จากสมการหาค่ากำลังงานของมอเตอร์

$$\text{จาก} \quad P_m = \mu \cdot \frac{wv}{102} \cdot \frac{100}{\eta} \quad \text{kW} \quad (5-1)$$

โดยที่

w คือ น้ำหนักรถ + โหลด = 900 Kg (รถเปล่า 250 kg + โหลด 650 kg)

v คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร็ว $v = 13.334 \text{ m/s}$ (หรือ 48 km/hr)

μ คือ ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างยางรถกับพื้นผิวหญ้า (ton/kg)

P_m คือ ค่าพิกัดกำลังของมอเตอร์ (kW) = 4 kW โดยได้จากการเลือกมอเตอร์ที่มีขายตามท้องตลาด

η คือ ประสิทธิภาพของระบบส่งกำลัง (ส่งกำลังด้วยเฟืองโซ่ $\eta = 90\%$)

$$\text{แทนค่าสมการ(5-1)} \quad 4 = \mu \cdot \frac{[(900)(13.334)]}{102} \cdot \frac{100}{90} \quad \text{kW}$$

$$4 = \mu \cdot 130.59$$

$$\mu = 0.046$$

จากค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างยางรถกับพื้นผิวหยาบที่ได้จะนำค่านี้ไปใช้ในการคำนวณหาพิคต์กำลังของมอเตอร์ที่จะใช้กับรถที่จะทำการออกแบบ สังเกตว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างยางรถกับพื้นผิวของรถทั่ว ๆ ไปมีค่าระหว่าง 0.04 – 0.06 [4] และรถที่เราคำนวณได้ค่าใกล้เคียง (สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างยางรถกับพื้นหยาบจะมีค่าน้อยกว่าสัมประสิทธิ์แรงระหว่างยางรถกับพื้นถนนธรรมดา) ทั้งนี้เพราะโดยทั่วไปแล้วทางสนามกอล์ฟจะมีถนนไว้สำหรับรถกอล์ฟโดยเฉพาะจะไม่อนุญาตให้วิ่งบนพื้นที่เป็นหญ้าเด็ดขาด ดังนั้นการออกแบบจึงคิดค่าสูงสุดเอาไว้คือ ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างยางรถกับพื้นผิวดนธรรมดา ($\mu = 0.06$)

5.2.2 การคำนวณหาพิคต์กำลังของมอเตอร์ที่ใช้กับรถในงานวิจัย

จากสมการที่(5-1)

$$P_m = \mu \cdot \frac{wv}{102} \cdot \frac{100}{\eta} \quad \text{kw}$$

w คือ น้ำหนักรถ + น้ำหนักโหลด = 900 kg

v คือ 48 km/h (13.334 m/s)

η คือ 90 % (ใช้ใช้ในการขับเคลื่อนมีประสิทธิภาพประมาณ 90%)

แทนค่า

$$P_m = \mu \cdot \frac{[(900)(13.334)]}{102} \cdot \frac{100}{90} \quad \text{kw}$$

$$P_m = 4.156 \quad \text{kw}$$

แทนค่าจากสมการ $P = \frac{P_m}{\eta} \cdot 100$ (5-2)

$$P = \frac{4.156}{90} \cdot 100 \quad \text{kw}$$

$$P = 4.51 \quad \text{kw}$$

แม้ว่าการคำนวณกำลังมอเตอร์ = 4.51 kW จะมากกว่ามอเตอร์ที่เลือกใช้งานตั้งแต่แรกแต่ในงานวิจัยนี้ต้องการให้ความเร็วรอบมอเตอร์ไม่สูงมาก จึงคิดว่ามอเตอร์ขนาด 4 kW เพียงพอจึงทำการออกแบบ โดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรม เลือกใช้มอเตอร์ ขนาด 1 kW 4 ตัว พิกัดรวม 4 kW

5.2.3 การทศรอบของมอเตอร์โดยใช้เฟืองทด

ที่รอบพิกัดของมอเตอร์มีค่าประมาณ 1500 rpm เมื่อเทียบกับรัศมีวงของล้อรถ (25 ซม.) จะมีเส้นรอบวงเท่ากับ 0.94 เมตร จะได้ความเร็ว 84.82 km/h จะต้องทดรอบ ประมาณ 1:3.4 จึงจะได้ความเร็วรอบ 48 km/h เมื่อกำหนดให้กำลังที่จ่ายมีค่าคงที่ (P) เมื่อความเร็วรอบลดลงจะได้ความสัมพันธ์กำลังมอเตอร์กับความเร็วมอเตอร์ ดังสมการ (5-3)

$$P = T_{out} \cdot \omega \quad \text{kw} \quad (5-3)$$

โดยที่

T_{out} คือ แรงบิดส่งออก (N-m)

ω คือ ความเร็วรอบ (rad/s)

ถ้าความเร็วรอบลดลง 3.4 เท่าจะได้แรงบิดเพิ่มขึ้นที่ปลายเพลลา 3.4 เท่าด้วย เมื่อให้กำลังที่จ่ายมีค่าคงที่ทำให้รถคันนี้สามารถออกตัวได้อย่างราบเรียบและความเร็วที่ได้มีค่าเหมาะสม

ในส่วนของ การส่งกำลังจากมอเตอร์ไปยังปลายเพลลา เลือกใช้โซ่ในการขับเคลื่อนเพราะมีประสิทธิภาพสูงกว่าการส่งกำลังแบบอื่น ๆ (90%-95%) และยังมี ความยืดหยุ่นมากกว่าการซ่อมบำรุงก็ทำได้ง่ายกว่าด้วย

บทที่ 6

แบตเตอรี่ (Battery)

แบตเตอรี่เป็นแหล่งจ่ายพลังงานให้แก่มอเตอร์และระบบควบคุมจึงถือได้ว่าแบตเตอรี่เป็นส่วนประกอบที่สำคัญอีกส่วนในรถไฟฟ้า และแบตเตอรี่ยังเป็นตัวบอกลถึงประสิทธิภาพในการใช้งานและอายุในการใช้งานในแต่ละรอบของการอัดประจุของรถไฟฟ้า

6.1 ทฤษฎีเบื้องต้นของแบตเตอรี่

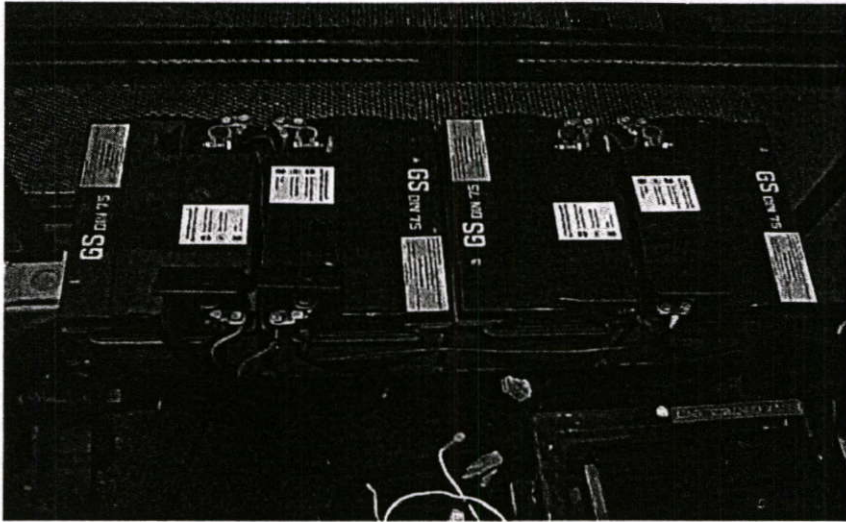
6.1.1 หลักการทำงานของแบตเตอรี่ [13,14] และภาคผนวก ก

แบตเตอรี่ประกอบด้วยเซลล์หลายเซลล์ต่ออนุกรมกันในแต่ละเซลล์ประกอบด้วยแผ่นธาตุอยู่ 2 แผ่นคือ แผ่นบวกและแผ่นลบ ซึ่งอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) เมื่อแบตเตอรี่คายประจุองค์ประกอบทางเคมีของทั้งสามส่วนจะเปลี่ยนแปลง และจะกลับมาเหมือนเดิมเมื่อมีการอัดประจุ ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของแบตเตอรี่ โดยในงานวิจัยนี้ใช้แบตเตอรี่ชนิด ตะกั่ว- กรด(Lead – acid)

6.1.2 ส่วนประกอบของแบตเตอรี่ชนิด ตะกั่ว-กรด

ส่วนประกอบที่สำคัญประกอบด้วย

1. แผ่นธาตุบวก (Positive plate)
2. แผ่นธาตุลบ (Negative Plate)
3. สารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte)
4. กรดกำมะถันชนิดเจือจาง (Sulfuric acid dill)
5. แผ่นกั้น (Separator)
6. แผ่นใยแก้ว (Strap)
7. เปลือกหม้อ (Container)
8. ฝาหม้อ (Cover)
9. ช่องดูพลังงาน (Battery indicator)



รูปที่ 6.1 แบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด

6.1.3 ขนาดความจุของแบตเตอรี่ (Battery Capacity)

ขนาดความจุจะกำหนดเป็น แอมแปร์-ชั่วโมง หรือ A-h ซึ่งหมายถึงปริมาณไฟฟ้าที่แบตเตอรี่สามารถจ่ายออกมาได้ภายใต้อุณหภูมิที่กำหนด ด้วยค่ากระแสและแรงดันสุดท้ายที่กำหนด

ขนาดความจุของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดจะระบุอัตราการจ่ายไฟต่อ 20 ชั่วโมงเป็นมาตรฐานของ มอก. [8] และภาคผนวก ก

ขนาดความจุของการจ่ายไฟ (Discharge Capacity) หรือ C หาได้จากสมการ

$$C = \int_0^t I(t) dt \quad (6-1)$$

เมื่อ t คือ เวลาตั้งแต่เริ่มจ่ายไฟจนถึงแรงดันสุดท้ายที่กำหนด

ดังนั้น

$$C = I \cdot t \quad (6-2)$$

อัตราการคายประจุของแบตเตอรี่กำหนดที่อุณหภูมิมาตรฐาน 25 องศาเซลเซียส

6.1.4 แรงดันแบตเตอรี่

แรงดันแบตเตอรี่เป็นค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วของแบตเตอรี่ ขณะไร้อโหลดแรงดันไฟฟ้าจะสัมพันธ์กับการเกิดประจุของแบตเตอรี่ แต่ขณะมีโหลดจะสัมพันธ์กับกระแสไหล การเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันของแบตเตอรี่จะมีผลกระทบต่อควบคุมความเร็วของรถไฟฟ้า

จุดสิ้นสุดการใช้งานของแบตเตอรี่ถูกกำหนดด้วยค่าแรงดันสุดท้าย (Final Voltage) โดยแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดค่าจะอยู่ประมาณ 1.8-1.9 โวลต์ต่อเซลล์

6.1.5 ความต้านทานภายในของแบตเตอรี่

ความต้านทานภายในของแบตเตอรี่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วขณะมีโหลดทำให้เกิดการสูญเสียจากกำลังสองของกระแสคูณกับความต้านทานภายในและเกิดความร้อนขึ้นในแบตเตอรี่โดยความต้านทานภายในของแบตเตอรี่อาจเกิดขึ้นจากปรากฏการณ์ทางเคมีภายในของแบตเตอรี่ขณะถ่ายเทประจุไฟฟ้า เช่น ปรากฏการณ์โพราไรเซชัน (Polarisation)

6.1.6 อุณหภูมิของแบตเตอรี่

อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของแบตเตอรี่จะทำให้ประสิทธิภาพการใช้งานและความจุของแบตเตอรี่สูงขึ้น แต่จะทำให้อายุของแบตเตอรี่ลดลง เนื่องจากปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้น โดยพิจารณาจากรูปที่ 1 และ รูปที่ 2 (ภาคผนวก ก)

6.1.7 การอัดประจุไฟฟ้าแบตเตอรี่

วิธีอัดประจุไฟฟ้าแบตเตอรี่

1. อัดประจุด้วยกระแสคงที่ (Constant current charging)
2. อัดประจุด้วยแรงดันคงที่โดยจำกัดกระแส (Constant voltage and current limitation charging)
3. อัดประจุด้วยกระแสไม่คงที่ (Tapered current charging)
4. อัดประจุด้วยกระแสเป็นช่วง ๆ (Intermittent current charging)

อัตรากระแสในการอัดประจุแบตเตอรี่ แบ่งได้ 2 แบบคือ

1. อัดประจุปกติ (Float charge) อัดประจุกระแสต่ำประมาณ 0.1CA-0.25CA ใช้เวลาในการอัด ประจุนาน
2. อัดประจุนแรง (Equalizing charge) อัดประจุด้วยกระแสสูงใช้ในการกระตุ้นแบตเตอรี่ที่ทิ้งไว้ ไม่ได้อัดประจุนาน ๆ หรือใช้หมดย่างรวดเร็ว

6.1.8 การคายประจุและการทำงานของแบตเตอรี่

ขณะใช้กำลังไฟฟ้ามมากขึ้น พลังงานสะสมในแบตเตอรี่จะค่อย ๆ ลดลงเนื่องจาก

- การลดลงของประจุในแบตเตอรี่ตามขนาดกระแสที่จ่ายออก
- การลดลงของระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว

ลักษณะการใช้งานของแบตเตอรี่ในงานวิจัยนี้จะใช้แบบหมดแล้วประจุใหม่ (Cycle use)

6.2 แบตเตอรี่ที่ใช้ในงานวิทยานิพนธ์

6.2.1 การหาขนาดแบตเตอรี่

ขนาดความจุของแบตเตอรี่ชุดที่สองจากการทดสอบมอเตอร์ในห้องทดลองวัดขนาดกระแสไฟฟ้าขาเข้ามอเตอร์ได้ 50 แอมแปร์และออกแบบให้แบตเตอรี่จ่ายกระแสต่อเนื่องที่พิกัดในเวลา 1 ชั่วโมงจะให้ความจุของแบตเตอรี่ จากสมการ(6-2)

$$\begin{aligned} C &= I \cdot t \\ &= 50(1) \\ &= 50 \text{ A-h} \end{aligned}$$

แต่ขณะนำมอเตอร์มาใช้งานจริงโดยการขับโหลดไฟฟ้ามอเตอร์จะขับโหลดสูงกว่าตอนทดสอบเป็นผลให้มอเตอร์ดึงกระแสสูงขึ้นจึงทำการเผื่อขนาดความจุของแบตเตอรี่อีก 50% ของ 50A-h ให้ความจุของแบตเตอรี่ที่ใช้

$$\begin{aligned} C &= (50)(0.5)+50 \\ &= 75 \text{ A-h} \end{aligned}$$

เนื่องจากในงานวิจัยนี้ใช้มอเตอร์ 4 ตัว ขนาดพิกัดแรงดันตัวละ 24 โวลต์ ต่ออนุกรมกันทางไฟฟ้าเพื่อให้ได้แรงดัน 48 V จากการคำนวณ ความจุแบตเตอรี่จะได้ แบตเตอรี่ขนาด 75 A-h, 12 โวลต์ จำนวน 4 ลูกต่ออนุกรมกันทางไฟฟ้าในการจ่ายพลังงานรายละเอียดของแบตเตอรี่กำหนดไว้ในตารางที่ 2 ภาคผนวก ก

6.2.2 ขั้นตอนการอัดประจุ

ขั้นตอนการอัดประจุตามข้อกำหนดของผู้ผลิต

1. คลายเกลียวปลั๊กทำความสะอาดสิ่งสกปรกที่ขั้วและรูระบายอากาศ
2. เติมกรดเจือจางในแต่ละช่อง กรดจะมีความถ่วงจำเพาะตามตารางที่ 1 ภาคผนวก ก ให้ระดับน้ำสูงกว่าขอบบนแผ่นกั้น 10-15 มม. อุณหภูมิต้องไม่สูงกว่า 25 องศาเซลเซียส
3. ต่อขั้วบวกของแบตเตอรี่เข้ากับขั้วบวกของเครื่องอัด และต่อขั้วลบของแบตเตอรี่เข้ากับขั้วลบของเครื่องวัด
4. ระหว่างอัดอุณหภูมิของกรดต้องไม่เพิ่มขึ้นกว่าที่กำหนดในตารางที่ 1 ถ้าอุณหภูมิสูงต้องลด กระแสที่อัด
5. แบตเตอรี่อัดประจุเต็มแล้วทุกๆ ช่องจะมีฟองอากาศผุดขึ้น วัดโวลต์และความถ่วงจำเพาะครั้งที่โดยวัด 3 ครั้ง ห่างกัน 30 นาที
6. เมื่ออัดประจุเต็มแล้วความถ่วงจำเพาะของกรดต้องเป็นตารางที่ 1
7. หลังจากอัดประจุเรียบร้อยแล้วทิ้งไว้ประมาณ 1-2 ชั่วโมง จึงปรับระดับน้ำกรดให้ได้ตามที่กำหนด
8. ขันเกลียวปลั๊กเข้าที่เดิมและตรวจดูอีกครั้ง

6.2.3 ข้อควรระวังของแบตเตอรี่

แก๊สจากแบตเตอรี่อาจทำให้ระเบิดได้อย่างจุดไฟหรือทำให้เกิดประกายไฟใกล้แบตเตอรี่ และขณะอัดประจุให้แบตเตอรี่การระบายอากาศต้องเพียงพอกรดกำมะถันที่บรรจุอยู่ในแบตเตอรี่ ระวังอย่าให้เข้าตาถูกผิวหนังหรือเสื้อผ้า

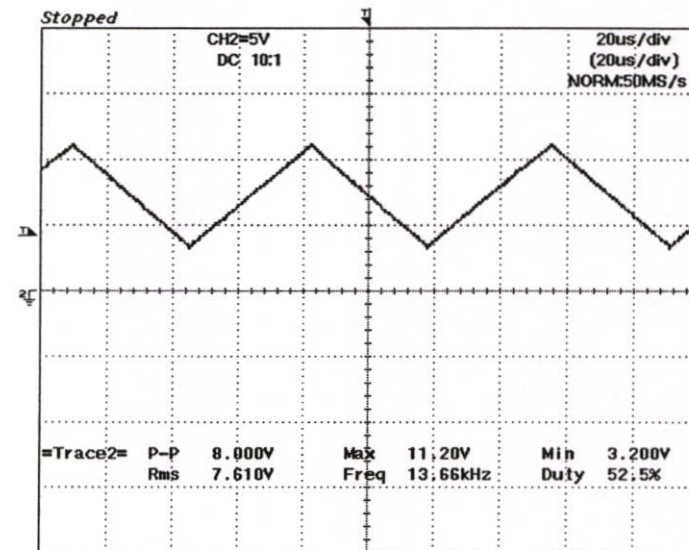
บทที่ 7

ผลการทดลอง

ในบทนี้เป็นการเก็บผลการทดลองในส่วนต่างๆของวิชานีพนธ์ เช่น การทดสอบชุดควบคุมความเร็วมอเตอร์ การทดสอบสมรรถนะเกี่ยวกับDIFFERENTIAL การทดสอบหาสมรรถนะกับพื้นเอียงโดยตัวรถเอียงขึ้นทำมุมกับพื้น 15° การทดสอบหาสมรรถนะกับพื้นเอียง โดยตัวรถเอียงขึ้นทำมุมกับพื้น 30° เปรียบเทียบเวลาในการใช้งานแบตเตอรี่ที่สภาวะต่างๆ กันทดสอบสมรรถนะรวมของระบบเทียบกับ 2 ล้อ นอกจากนั้นยังเป็นการทดสอบสมรรถนะเทียบกับ 4 ล้อในระบบไฟฟ้าปัจจุบันด้วย

7.1 การทดสอบชุดควบคุมความเร็วของมอเตอร์

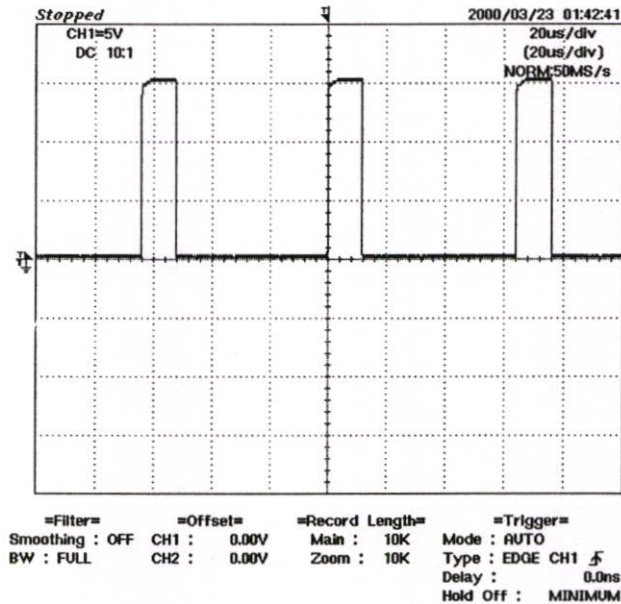
จากรูปที่ 7.1 วงจรออสซิลเลตที่ผลิตสัญญาณสามเหลี่ยมซึ่งได้จากเอาต์พุต v_{02} (รูปที่ 3.1) จะสังเกตว่าสัญญาณที่ได้ลอยจากระดับกราวด์เล็กน้อยโดยมีระดับแรงดันขอด 22 V



=Filter= Smoothing : OFF CH1 : 0.0V Main : 10K Mode : AUTO
BW : FULL CH2 : 0.00V Zoom : 250 Type : EDGE CH1 \uparrow
Delay : 0.0ns
Hold Off : MINIMUM

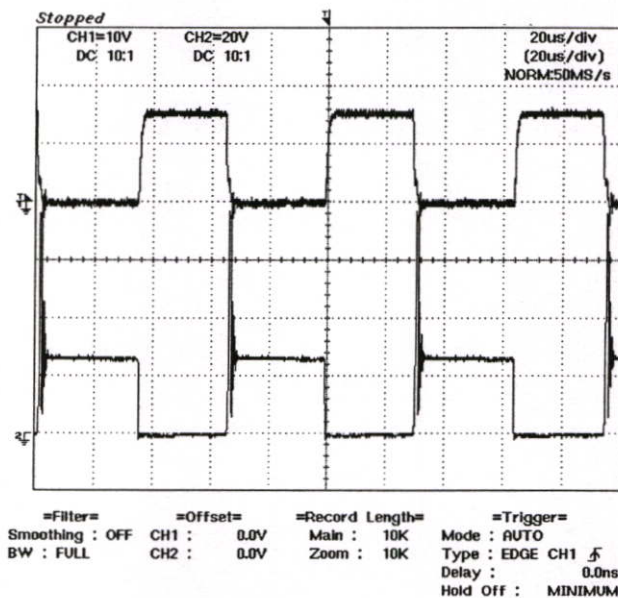
รูปที่ 7.1 แสดงสัญญาณจากวงจรออสซิลเลต

จากรูปที่ 7.2 แสดงสัญญาณขั้วเกต (G-S) จะเห็นว่าสัญญาณที่ได้เป็น PWM มีควิตซ์ไซเคิล 15 %



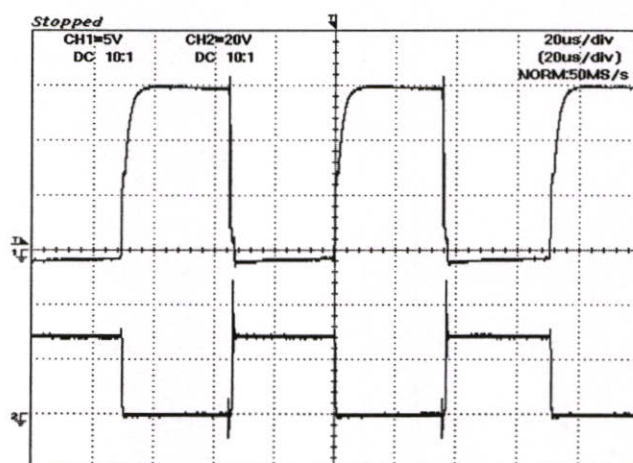
รูปที่ 7.2 แสดงสัญญาณขั้วเกต

จากรูปที่ 7.3 แสดงสัญญาณขั้วเกต(G-S)โดยมีควิตซ์ไซเคิล 50% และแรงดันคั่นคร่อมมอสเฟต(D-S) จะเห็นว่าเมื่อมีสัญญาณขั้วนำ 15 V แรงดันคั่นคร่อมมอสเฟตจะมีค่าแทบจะเป็นศูนย์ (ทางปฏิบัติ) แต่เมื่อไม่มีสัญญาณขั้วเกตแรงดันคั่นคร่อมมอสเฟตจะมีแรงดัน 24 V ไร่ก็ตามจะมีแรงดันสไปค์สูงมากประมาณ 76 V ในขณะที่มอสเฟตเริ่มต้นหยุดนำกระแส



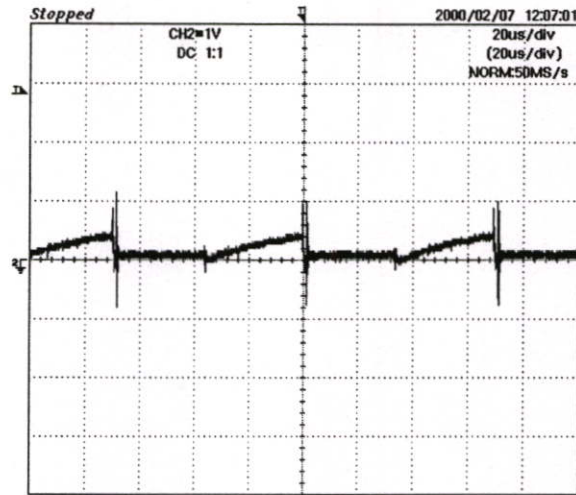
รูปที่ 7.3 สัญญาณขั้วเกต (G-S) (CH.1) และแรงดันคั่นคร่อมมอสเฟต(D-S) (CH.2)

จากรูปที่ 7.3 จะเห็นว่ามีความดันสไปค์คร่อมมอสเฟตสูงมากเมื่อยังไม่ได้ต่อคาปาซิเตอร์ฟิลเตอร์ (capacitor filter) และเมื่อต่อคาปาซิเตอร์เข้าไปจะทำให้แรงดันสไปค์ลดลงอย่างมากและจะสังเกตเห็นว่าสัญญาณที่มีลักษณะเป็นยอดแหลม ได้มีขนาดลดลงอย่างมากเหลือเพียง 45 V เท่านั้น ทำให้สามารถลดขนาดแรงดันสไปค์ลงคิดเป็น 40.79 % จากเดิมที่ไม่ได้ต่อคาปาซิเตอร์ฟิลเตอร์ ซึ่งผลที่ได้จะทำให้มอสเฟตมีความปลอดภัยในการใช้งาน และแรงดันไม่เกินพิสัยของมอสเฟตที่จะทำให้มอสเฟตเสียหาย แสดงดังรูปที่ 7.3



รูปที่ 7.4 แสดงแรงดันคร่อมทรานซิสเตอร์เมื่อต่อคาปาซิเตอร์

ในรูปที่ 7.5 จะเป็นลักษณะรูปคลื่นของแรงดันคร่อมมอสเฟต (D-S) ขณะมอสเฟตนำกระแส ในช่วงที่ไม่มีสัญญาณเกิด วงจร disable (ในรูปที่ 3.5) จะดึงแรงดันคร่อมมอสเฟตลงประมาณระดับกราวด์เพื่อไม่ให้วงจรเปรียบเทียบกระแสเห็นในจุดนี้ วงจร disable จะให้วงจรเปรียบเทียบกระแสให้พิจารณาช่วงมีสัญญาณเกิด เมื่อวงจรเปรียบเทียบกระแสตรวจจับได้ว่ากระแสเกินก็จะสั่งให้รีเลย์ทำงานและดึงขาบวกของ PWM คอมพาราเตอร์ลงกราวด์ ซึ่งมีลักษณะเช่นเดียวกับการป้องกันอุณหภูมิ เพื่อที่จะให้วงจรเปรียบเทียบกระแส (current comparator) ทำงานไม่ผิดพลาด และ ควรต้องมีฟิลเตอร์ (Low - pass filter) เล็กน้อยเพื่อกรองความถี่สูงออก



รูปที่ 7.5 แสดงลักษณะรูปคลื่นคร่อมเครื่อง-ซอร์สขณะมอเตอร์เฟดน้ำกระแส

7.2 การทดสอบสมรรถนะเกี่ยวกับ DIFFERENTIAL

โดยให้มอเตอร์ M1 ขับล้อซ้ายหน้า และมอเตอร์ M2 ขับล้อขวาหน้า มอเตอร์ M3 ขับล้อซ้ายหลัง และมอเตอร์ M 4 ขับล้อขวาหลัง ขณะเลี้ยวซ้ายล้อขวาและล้อซ้ายจะหมุนไม่เท่ากัน

ตารางที่ 7.1 การทดสอบสมรรถนะเกี่ยวกับ DIFFERENTIAL

ความถี่ในวงจร BUCK CONVERTER %D	V _t (V)	N (rpm)	I _a (A)	T _{out} (N.m)	P _{in} (W)	P _{out} (W)	v (m/s)	%η
50	48	2148	32.6	2.67	782.4	573.51	1.41	73
60	48	1883	42	5.05	1209.6	950.91	2.69	78
70	48	1845	44	6.61	1478.4	1219.54	3.04	82

หมายเหตุ ละเอียดผลของการสูญเสียกำลังงานไฟฟ้าในส่วนของวงจร Buck converter

โดยที่ N คือ ความเร็วรอบของมอเตอร์

I_a คือ กระแสอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์

T_{out} คือ แรงบิดของมอเตอร์ที่จ่ายออก

P_{in} คือ กำลังงานของมอเตอร์ที่ป้อนเข้า

P_{out} คือ กำลังงานของมอเตอร์ที่จ่ายออก

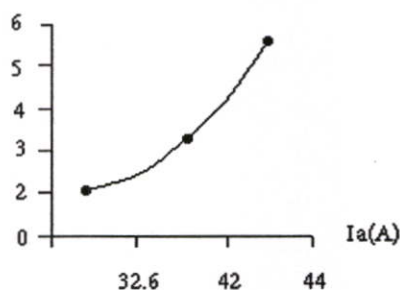
v คือ ความเร็วรอบเฉลี่ยของมอเตอร์ต่อวินาที

%η คือ ประสิทธิภาพกำลังงานของมอเตอร์ที่ป้อนเข้าและจ่ายออก

จากตารางที่ 7.1 สามารถแสดงเป็นกราฟดังในรูปที่ 7.6 (ก และ ข) ระหว่างแรงบิด (N.m) กับ กระแสอินพุตและความเร็วรอบกับกระแสอินพุต ที่มาจากแบตเตอรี่ตามลำดับ

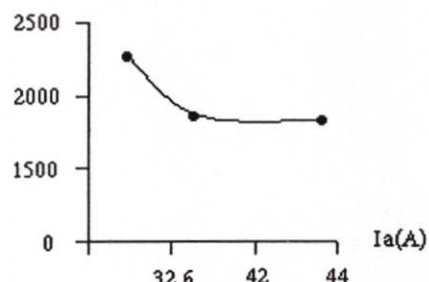
T_{out} (N.m)

Torque (N.m)



(ก)

N (rpm)



(ข)

รูปที่ 7.6 แสดงคุณสมบัติของมอเตอร์

(ก) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและกระแส

(ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและกระแส

ผลที่ได้จากกราฟรูปที่ 7.6 จะเห็นว่า T_{out} (N.m) จะแปรตามกระแส I_a ยกกำลังสอง ส่วนความเร็วรอบจะแปรผกผันกับกระแส I_a จะสอดคล้องกับทฤษฎีในบทที่ 2

7.3 การทดสอบหาสมรรถนะกับพื้นเอียง 15°

ผลการทดสอบหาสมรรถนะกับพื้นเอียง 15° โดยการทดสอบจริง โดยใช้เครื่องทดสอบรถ (Chassis Dynamometer) ทำการยกล้อหน้าทั้ง 2 ข้างขึ้น โดยตัวรถเอียงทำมุมกับพื้นประมาณ 15°

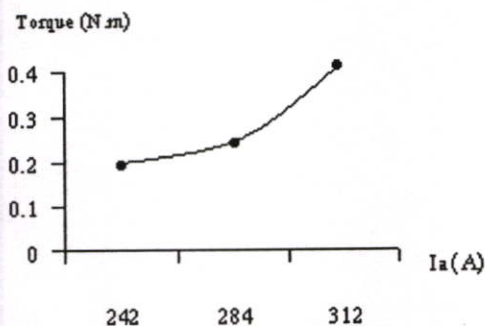
ตารางที่ 7.2 การทดสอบหาสมรรถนะกับพื้นเอียง 15°

ความถี่ในวงจร BUCK CONVERTER %D	V_t (V)	N (rpm)	I_a (A)	T_{out} (N.m)	P_{in} (W)	P_{out} (W)	v (m/s)	% η
50	48	2480	38.2	2.65	916.8	657.2	1.86	71
60	48	2220	42.4	5.12	1451.52	1136.64	3.22	78
70	48	2155	44.4	5.58	1491.84	1202.49	3.4	80

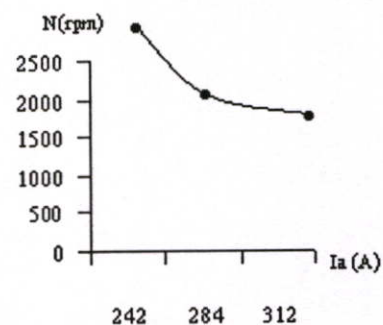
หมายเหตุ ละเอียดผลของการสูญเสียกำลังงานไฟฟ้าในส่วนของวงจร Buck converter

- โดยที่
- N คือ ความเร็วรอบของมอเตอร์
 - I_a คือ กระแสอาร์มเจอร์ของมอเตอร์
 - T_{out} คือ แรงบิดของมอเตอร์ที่จ่ายออก
 - P_{in} คือ กำลังงานของมอเตอร์ที่ป้อนเข้า
 - P_{out} คือ กำลังงานของมอเตอร์ที่จ่ายออก
 - v คือ ความเร็วรอบเฉลี่ยของมอเตอร์ต่อวินาที
 - $\% \eta$ คือ ประสิทธิภาพกำลังงานของมอเตอร์ที่ป้อนเข้าและจ่ายออก

จากตารางที่ 7.2 สามารถแสดงเป็นกราฟดังรูปที่ 7.7 (ก และ ข) ระหว่างแรงบิด (N-m) กับ กระแสอินพุตและความเร็วรอบกับกระแสอินพุต ที่มาจากแบตเตอรี่ตามลำดับ



(ก)



(ข)

รูปที่ 7.7 แสดงคุณสมบัติของมอเตอร์

- (ก) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและกระแส
- (ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและกระแส

ผลที่ได้จากกราฟรูปที่ 7.7 จะเห็นว่า T_{out} (N.m) จะแปรตามกระแส I_a ยกกำลังสอง ส่วน ความเร็วรอบจะแปรผกผันกับกระแส I_a จะสอดคล้องกับทฤษฎีในบทที่ 2

7.4 การทดสอบหาสมรรถนะกับพื้นเอียง 30°

ทดสอบโดยการทดสอบจริงโดยใช้เครื่องทดสอบรถ (Chassis Dynamometer) ทำการยกล้อหน้าทั้ง 2 ข้างขึ้น โดยตัวรถเอียงทำมุมกับพื้นประมาณ 30°

ตารางที่ 7.3 ทดสอบหาสมรรถนะกับพื้นเอียง 30°

ความถี่ในวงจร BUCK CONVERTER %D	Vt (V)	N (rpm)	I _a (A)	T _{out} (N.m)	P _{in} (W)	P _{out} (W)	v (m/s)	%η
50	48	2085	42.5	3.10	1020	646.35	1.83	63
60	48	1935	44.8	4.55	1290.24	880.42	2.49	68
70	48	1880	45.1	5.68	1515.36	1067.84	3.02	70

หมายเหตุ ละเอียดผลของการสูญเสียกำลังงานไฟฟ้าในส่วนของวงจร Buck converter

โดยที่ N คือ ความเร็วรอบของมอเตอร์

I_a คือ กระแสอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์

T_{out} คือ แรงบิดของมอเตอร์ที่จ่ายออก

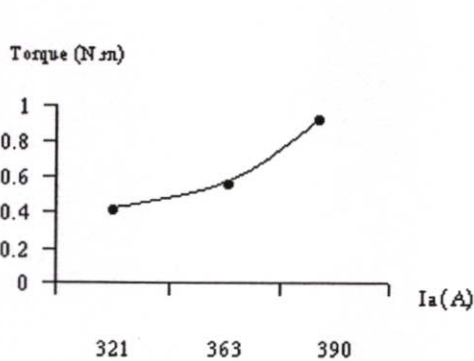
P_{in} คือ กำลังงานของมอเตอร์ที่ป้อนเข้า

P_{out} คือ กำลังงานของมอเตอร์ที่จ่ายออก

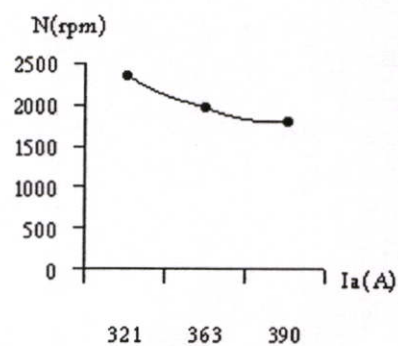
v คือ ความเร็วรอบเฉลี่ยของมอเตอร์ต่อวินาที

%η คือ ประสิทธิภาพกำลังงานของมอเตอร์ที่ป้อนเข้าและจ่ายออก

จากตารางที่ 7.3 สามารถแสดงเป็นกราฟดังในรูปที่ 7.8 (ก และ ข) ระหว่างแรงบิด (N-m) กับ กระแสอินพุตและความเร็วรอบกับกระแสอินพุต ที่มาจากแบตเตอรี่ตามลำดับ



(ก)



(ข)

รูปที่ 7.8 แสดงคุณสมบัติของมอเตอร์

(ก) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและกระแส

(ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและกระแส

ผลที่ได้จากกราฟรูปที่ 7.8 จะเห็นว่า T_{out} (N.m) จะแปรตามกระแส I_a ยกกำลังสอง ส่วนความเร็วรอบจะแปรผกผันกับกระแส I_a จะสอดคล้องกับทฤษฎีในบทที่ 2

7.5 การเปรียบเทียบเวลาในการใช้งานแบตเตอรี่ที่สภาวะใช้งานต่างๆกัน

จากค่าในตารางที่ 7.4 ทำการเลือกแบตเตอรี่ขนาด 75 Ah มาเป็นใช้ในการทดลองเพราะเมื่อพิจารณาถึงความเหมาะสมในด้านน้ำหนักรวมของแบตเตอรี่ ระยะเวลาที่รถสามารถวิ่งได้อีกทั้งยังเป็นรถต้นแบบสำหรับการพัฒนาต่อไปในอนาคต

ตารางที่ 7.4 เปรียบเทียบเวลาในการใช้งานแบตเตอรี่ที่สภาวะใช้งานต่างๆกัน

พิกัดแบตเตอรี่ (Ah)	ปริมาณ Discharge	50%	60%	70%	80%	90%	100%
	การ Discharge (A)	25.2	30.3	35.4	40.43	45.4	50.54
60	ระยะเวลาใช้งาน (นาที)	105	90	50	40	30	22
65	ระยะเวลาใช้งาน (นาที)	120	100	75	50	40	35
75	ระยะเวลาใช้งาน (นาที)	135	110	90	60	45	40
100	ระยะเวลาใช้งาน (นาที)	180	160	140	105	90	60

7.6 การทดสอบสมรรถนะรวมของระบบเทียบกับ 2 ล้อ

จากการทดสอบระบบขับเคลื่อน 2 ล้อโดยใช้วิธีถอดโซ่มอเตอร์ด้านล้อหน้าออกและทดสอบวิ่งทางตรงบนท้องถนนเทียบกับระบบขับเคลื่อน 4 ล้อ

ตารางที่ 7.5 ทดสอบสมรรถนะรวมของระบบ 4 ล้อเทียบกับ 2 ล้อ

ระบบการขับเคลื่อน	V_t (V)	N (rpm)	I_a (A)	T_{out} (N.m)	P_{in} (W)	P_{out} (W)	v (m/s)	% η
ขับเคลื่อน 2 ล้อ	48	1475	22	1.04	205	153.4	0.43	74
ขับเคลื่อน 4 ล้อ	48	1520	46	1.66	302	252.32	0.71	83

หมายเหตุ ละเอียดผลของการสูญเสียกำลังงานไฟฟ้าในส่วนของวงจร Buck converter

- โดยที่
- N คือ ความเร็วรอบของมอเตอร์
 - I_a คือ กระแสอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์
 - T_{out} คือ แรงบิดของมอเตอร์ที่จ่ายออก
 - P_{in} คือ กำลังงานของมอเตอร์ที่ป้อนเข้า
 - P_{out} คือ กำลังงานของมอเตอร์ที่จ่ายออก
 - V คือ ความเร็วรอบเฉลี่ยของมอเตอร์ต่อวินาที
 - $\% \eta$ คือ ประสิทธิภาพกำลังงานของมอเตอร์ที่ป้อนเข้าและจ่ายออก

จากตารางที่ 7.5 จะเห็นว่าการขับเคลื่อน 2 ล้อ จะให้กระแส I_a น้อยกว่าระบบการขับเคลื่อน 4 ล้อ เกินกว่า 2 เท่า อันเนื่องมาจากความเร็วการขับเคลื่อน 2 ล้อจะน้อยกว่าความเร็วซิงโครนัสมอเตอร์ แต่ขณะเดียวกันการขับเคลื่อน 4 ล้อ ให้ความเร็วสูงกว่าความเร็วซิงโครนัส

จากตารางที่ 7.6 จะเห็นว่าระบบโครงสร้าง ระบบส่งกำลัง ความเร็วสูงสุด มอเตอร์ที่ใช้ของรถไฟฟ้าทั่วไปจะมีขนาดที่ใหญ่เกินพิกัด อุปกรณ์ที่ใช้มีความยุ่งยากกว่ารถไฟฟ้าเคลื่อนที่ 2 ล้อ ซึ่งในระบบขับเคลื่อน 2 ล้อ จะมีการพัฒนาเป็นระบบขับเคลื่อน 4 ล้อ เพื่อที่จะได้ความเร็วเพิ่มขึ้น การออกแบบจะเน้นวัสดุที่ต่ำกว่าระบบขับเคลื่อน 2 ล้อ

ตารางที่ 7.6 การเปรียบเทียบคุณลักษณะเฉพาะ (Specification) ของรถไฟฟ้าทั่วไปกับรถไฟฟ้าขับเคลื่อน 2 ล้อ

Specifications	รถไฟฟ้าทั่วไป	รถไฟฟ้าขับเคลื่อน 2 ล้อ
ความยาว	2.4 เมตร	2.4 เมตร
ความกว้าง	1.11 เมตร	0.95 เมตร
ความสูง	1.24 เมตร	0.8 เมตร
ฐานล้อ	1.63 เมตร	1.1 เมตร
น้ำหนักกรอปเปล่า(ไม่มีแบตเตอรี่)	250 กิโลกรัม	400 กิโลกรัม
ความสูงจากพื้นถึงใต้ท้อง	0.1 เมตร	0.15 เมตร
รัศมีวงเลี้ยว	3 เมตร	2.5 เมตร
ตัวถัง	แบบ PMMA/ABS	-
ระบบไฟฟ้า	6 โวลต์ X 6 EA 36 โวลต์ (220 AH)	12 โวลต์ X 4, 48 โวลต์ (75 AH)
ระบบส่งกำลัง	เกียร์ตรงแบบเพลาคู่	โซ่และเฟือง อัตราทด 1:3.4
ช่วงล่างหน้า	โช้คอัพ และ คอลล์สปริง	โช้คอัพและแหนบ
ช่วงล่างหลัง	โช้คอัพ และ คอลล์สปริง	โช้คอัพและแหนบ
ระบบพวงมาลัย	ลูกบิดและตัวหนอน	แร็ค(RACK)
เบรก	ดรัมเบรกแบบสายบนล้อคู่หลัง	ดรัมเบรกแบบน้ำมันบนล้อคู่หลัง
โครงสร้างตัวถัง	ท่อเหล็กทนแรงดึงสูงพิเศษ	เหล็กกล่องทนแรงดึงสูง
แบบที่นั่ง	2 ที่นั่ง, โฟมหล่อหุ้มโพลียูรีเทน	2 ที่นั่ง, โฟมน้ำท่วมหนึ่ง
ยาง	18 X 8.5-8, 4 ชั้น	145 X 10C X 76M, 4 ชั้น
ความเร็วสูงสุด	24 กิโลเมตร/ชั่วโมง	25 กิโลเมตร/ชั่วโมง
มอเตอร์	มอเตอร์ไฟฟ้า 2.2 กิโลวัตต์/3 แรงม้า, DC 36 โวลต์ที่ 1,500 รอบ/นาที	มอเตอร์ไฟฟ้า 2X1 กิโลวัตต์/2.5 แรงม้า DC 48 โวลต์, 1500 รอบ/นาที
ชุดชาร์จแบตเตอรี่	อัดโนมิตี/OUT PUT 36 โวลต์, 21 แอมป์ DC/IN PUT 220 โวลต์ 50/60 เฮิร์ต AC.	อัดโนมิตี/OUT PUT 48 โวลต์, 12 แอมป์ DC/IN PUT 220 โวลต์ 50 เฮิร์ต AC.

จากการทดสอบวงจรจริงของรถไฟฟ้าจะเห็นว่ารถไฟฟ้าจะเห็นวาร์ตไฟฟ้าขับเคลื่อน 4 ล้อที่ได้สร้างขึ้นจะมีความเร็วและการออกตัวราบเรียบกว่ารถไฟฟ้าขับเคลื่อน 2 ล้อแต่ขณะเลี้ยวโค้งท้ายรถจะไม่ปีดเหมือนกันทั้ง 2 แบบ ในการขับเคลื่อน 2 ล้อความเร็วจะน้อยกว่าขับเคลื่อน 4 ล้อ เนื่องจากการต่อมอเตอร์เพิ่มอีก 2 ตัว ขณะที่เวลาทดสอบใช้งาน 1 ชั่วโมง รถไฟฟ้าขับเคลื่อน 4 ล้อที่สร้างขึ้นจะมีการต่อมอเตอร์เพิ่มอีก 2 ตัว ซึ่งแสดงให้เห็นตารางที่ 7.7 จึงเห็นสมควรนำไปใช้งานเพื่อลดเงินตราในการล้งนำเข้าจากต่างประเทศ

ตารางที่ 7.7 การเปรียบเทียบคุณลักษณะเฉพาะ (Specification) ของรถไฟฟ้าขับเคลื่อน 2 ล้อ กับรถไฟฟ้าขับเคลื่อน 4 ล้อ

Specifications	รถไฟฟ้าขับเคลื่อน 2 ล้อ	รถไฟฟ้าขับเคลื่อน 4 ล้อ
ความยาว	2.4 เมตร	2.4 เมตร
ความกว้าง	0.95 เมตร	0.95 เมตร
ความสูง	0.8 เมตร	0.8 เมตร
ฐานล้อ	1.1 เมตร	1.1 เมตร
น้ำหนักบรรทุก (ไม่มีแบตเตอรี่)	400 กิโลกรัม	900 กิโลกรัม
ความสูงจากพื้นถึงใต้ท้อง	0.15 เมตร	0.1 เมตร
รัศมีวงเลี้ยว	2.5 เมตร	2.5 เมตร
ระบบไฟฟ้า	12V × 4, 48V (75AH)	12V × 8, 48V (75AH)
ระบบส่งกำลัง	โซ่และเฟืองอัตราทด 1:3:4	โซ่และเฟืองอัตราทด 1:3:4
ช่วงล่างหน้า	โซ่ค้ำ	คอสส์สปริง
ช่วงล่างหลัง	โซ่ค้ำและแหนบ	โซ่ค้ำและแหนบ
ระบบพวงมาลัย	แร็ค (RACK)	แร็ค (RACK)
เบรก	ক্রিমব্রকแบบน้ำมันบนล้อคู่หลัง	ক্রিমব্রকแบบน้ำมันบนล้อคู่หลัง
โครงสร้าง	เหล็กกล่องทนแรงดึงสูง	เหล็กกล่องทนแรงดึงสูง
แบบที่นั่ง	2 ที่นั่ง, พองน้ำหุ้มหนัง	2 ที่นั่งพองน้ำหุ้มหนัง
ยาง	145 × 10C × 76M, 4ชั้น	145 × 10C × 76M, 4ชั้น
ความเร็วสูงสุด	25 กิโลเมตร / ชั่วโมง	60 กิโลเมตร / ชั่วโมง
มอเตอร์	มอเตอร์ไฟฟ้า 2×1กิโลวัตต์, DC 48 โวลต์, 1,500รอบ / นาที	มอเตอร์ไฟฟ้า 4×1กิโลวัตต์, DC 48 โวลต์, 1,500รอบ/นาที
ชุดชาร์จแบตเตอรี่	อัตร โนมตี/OUTPUT 48 โวลต์, 12 แอมป์ DC/INPUT 220 โวลต์ 50 ฮอร์ท AC	อัตร โนมตี/OUTPUT 48 โวลต์, 21 แอมป์ DC/INPUT 220 โวลต์ 50 ฮอร์ท AC

บทที่ 8

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

8.1 บทนำ

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของรถไฟฟ้าคันแบบที่ได้จัดสร้างขึ้นนั้นจากผลการทดลองในบทที่ 6 นั้นจะแยกออกเป็นส่วนๆ เพื่อบอกถึงประสิทธิภาพเทียบกับการออกแบบและความเหมาะสมกับการใช้งานเพื่อใช้ในสนามกอล์ฟ และสามารถนำข้อมูลที่ได้ไปเป็นแนวทางการออกแบบรถไฟฟ้าคันต่อไปให้มีประสิทธิภาพที่เหมาะสมกับการใช้งาน และลักษณะงานที่ใช้รถเพื่อการบรรทุกขนส่ง ดังนั้นในบทนี้จะเป็นการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของรถในแง่ของการใช้งานในแบบต่างๆ และสรุปผลที่ได้ถึงความเหมาะสมกับการใช้งานที่แบบต่างๆ

จากการขับเคลื่อนรถไฟฟ้าจริงที่สร้างขึ้น โดยอาศัยหลักการของคิฟเฟอเรนเชียลมอเตอร์ที่นำมาแทนคิฟเฟอเรนเชียลเกียร์ สามารถทดแทนกันได้จริง ขณะทำการเลี้ยวความเร็วของล้อทั้งสองข้างไม่เท่ากัน ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีกล่าวมาแล้ว ไม่มีอาการท้ายปิดเวลาเลี้ยวโค้งขณะที่ความเร็วรถวิ่งประมาณ 60 กม./ชั่วโมง และสามารถออกตัวได้อย่างราบเรียบ นุ่มนวลกว่ารถไฟฟ้าทั่วไป

8.2 ประสิทธิภาพของการขับเคลื่อนของรถไฟฟ้าด้วยเครื่อง Chassis Dynamometer

จากการทดสอบในบทที่ 7 ซึ่งเป็นการทดสอบแบ่งเป็นการทดสอบเป็นสองส่วนหลักๆคือ ประสิทธิภาพในการขับเคลื่อนและประสิทธิภาพการใช้พลังงานของตัวรถ ซึ่งในส่วนนี้จะกล่าวถึงการขับเคลื่อนจากข้อกำหนดของรถไฟฟ้า ที่กำหนดค่าเริ่มต้นของรถไฟฟ้าไว้เพื่อนำไปออกแบบระบบขับเคลื่อน ซึ่งผลการทดสอบที่เป็นการทดสอบด้วยเครื่อง Chassis Dynamometer เป็นการจำลองสภาวะการวิ่งของรถและวัดค่ากำลังงานที่ได้จากล้อออกมา ซึ่งกำหนดค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่างที่กระทำของรถ ความเร็วของรถที่วัดได้ด้วยเครื่อง Chassis Dynamometer ซึ่งความเร็วที่สามารถทำได้สูงสุดที่ความถี่ 5kHz เท่ากับ 60 กม./ชม.

8.3 การวิเคราะห์ลักษณะและความเหมาะสมในการขับขี่

ในแง่ของการขับเคลื่อนให้มีลักษณะคล้ายคลึงกับรถยนต์ประเภทอื่นที่ใช้เครื่องยนต์เป็นต้นกำลังนั้นทำได้ค่อนข้างยาก เนื่องจากรถไฟฟ้าคันแบบนั้นไม่ได้ใช้ระบบส่งกำลังผ่านเกียร์และคลัทซ์ แต่เป็นการส่งผ่านกำลังมอเตอร์โดยตรง จึงทำให้ช่วงการออกตัวและหยุดรถเกิดการกระตุกเล็กน้อย ส่วนการขับขี่ในเรื่องของอัตราเร่งและความเร็วจะมีค่าไม่สูงมากนัก เพราะความเร็วที่เหมาะสมไม่ควรเกิน 60 กม./ชม. และอัตราเร่งก็ไม่จำเป็นต้องมีค่ามากๆ ดังนั้นความเร็วที่รถทำได้ ถือว่าเป็นความเร็วที่เหมาะสม

8.4 การวิเคราะห์การใช้พลังงานของรถไฟฟ้าที่เหมาะสม

8.4.1 การวิเคราะห์การสิ้นเปลืองพลังงานต่อน้ำหนักบรรทุก

การสิ้นเปลืองพลังงานในการขับเคลื่อนไฟฟ้านั้นก็คือพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายออกมาจากแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงก็คือแบตเตอรี่ เปรียบเทียบกับเครื่องยนต์ก็คือน้ำมันเชื้อเพลิงนั่นเอง ดังนั้นลักษณะของการสิ้นเปลืองพลังงานของรถก็จะขึ้นอยู่กับความเร็วที่ใช้, น้ำหนักบรรทุก ลักษณะถนนที่วิ่งและลักษณะการขับขี่ ดังจากการทดสอบในหัวข้อที่ 7.4 ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ก็จะเปลี่ยนแปลงไปตามค่าตัวแปรข้างต้นที่กล่าวมาแล้ว ดังนั้นการสิ้นเปลืองพลังงานของรถไฟฟ้าจะเห็นได้จากผลกำลังงานไฟฟ้าอินพุท และจะเห็นว่าค่ากำลังงานและพลังงานที่ใช้จะเพิ่มขึ้นตามขนาดน้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มขึ้นและเปลี่ยนแปลงตามค่าความถี่ใช้งานที่เพิ่มขึ้น

8.4.2 การวิเคราะห์การใช้พลังงานต่อเนื่องวงรอบการประจุแบตเตอรี่

ในการใช้งานโดยทั่วไปของรถไฟฟ้าจะต้องบอกถึงสมรรถนะของรถในเรื่องความเร็วอัตราเร่งรวมถึงอัตราสิ้นเปลืองพลังงานซึ่งจากข้อมูลในหัวข้อที่ 7.4 ถ้าเงื่อนไขในการใช้งานรถปกติ น้ำหนักบรรทุกที่พิกัดและใช้งานจนพลังงานที่ความถี่พิกัดการใช้งานถ้าวิ่งที่ความเร็วเฉลี่ย 60 กม./ชม. วิ่งได้นานต่อเนื่อง 1 ชั่วโมง จะเห็นได้ว่าถ้าลดความถี่ก็จะสามารถวิ่งได้นานขึ้นไป เนื่องจากที่ความถี่ต่ำกว่าจะสิ้นเปลืองพลังงานน้อยกว่าจากผลการทดสอบก่อนหน้านี้แต่ละระยะทางที่ได้จะใกล้เคียงกันเนื่องจากความเร็วที่ได้ก็จะลดลงเช่นกัน

ปัญหาที่เกิดขึ้นและแนวทางแก้ไข

1. มอเตอร์ที่ใช้ในการขับเคลื่อนที่แรงดันค่าหาได้ยากมากแนะนำว่าควรจะใช้ มอเตอร์ขนาด 48 V
2. การติดตั้งชุดควบคุมความเร็วมอเตอร์ ต้องวางในตำแหน่งที่เหมาะสม เพื่อป้องกันผลกระทบจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้น
3. ชุดขับเคลื่อนหลัง โดยต้องวางมอเตอร์ทั้งด้านซ้ายและขวาจำเป็นต้องมีความแข็งแรงในการรับแรงกระแทกลดและเพลาลังต้องรับน้ำหนักมากขึ้นด้วยจึงต้องมีการเชื่อมชุดรองรับมอเตอร์และเพลาลังให้แข็งแรงยิ่งขึ้น
4. แบตเตอรี่ที่ออกแบบไว้ สามารถใช้งานได้เพียง 1 ชั่วโมง ถ้าต้องการให้ใช้งานได้นานขึ้นควรเพิ่มขนาดความจุของแบตเตอรี่

แนวทางการดำเนินงานต่อไป

ควรมีการจัดทำในส่วนของตัวถังภายนอกให้มีลักษณะ เบา แข็งแรง และอาจจะต้องเพิ่มอุปกรณ์บางอย่างตามความเหมาะสมกับการใช้งาน เช่น หลังคา แตร ชุดควบคุมหน้า

ในส่วนของชุดควบคุมความเร็วของมอเตอร์ ควรจะเพิ่มวงจรในส่วนที่แสดงสภาวะระดับแรงดันของแบตเตอรี่ หรือมีการเตือนก่อนที่แบตเตอรี่จะหมด

บรรณานุกรม

- [1] พิชิต ถ้ายอง , เครื่องจักรกลไฟฟ้า1, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ,2537.
- [2] พีรศักดิ์ วรสุนทรโรสถ, เทคนิคการซ่อมแซม เลือกระเบทและติดตั้งมอเตอร์เหนี่ยวนำ, บริษัทซีเอ็ด ยูเคชั่น จำกัด (มหาชน), 2521.
- [3] D.S. Bimbhra, **Electrical Machinery** ,Khanna Publishers, 1996.
- [4] ABB **User's Manual for type ACS-400 Frequency converters from 2.2 to 37 kW.**
- [5] C.A. Martins, A.S. Carvalho, **Technological Trends in dc Motor electrical drives** ,
Proceeding of the IEEE Power Technology Conference ,PPT 2001, Porto,Portugal,
September 10-13,2001
- [6] D.W.Hart , **Introduction to Power Electronics** ,Prentice-Hall International,Inc,1997.
- [7] N.Mohan T. , M.Undeland , william P.Robbins ,**Power Electronics:Converters
Application and Design** ,second edition,Jonh Wiley & Sons.Inc., 1995.
- [8] <http://Silverstone.fortunecity.com/zagato/330/index.htm>.,1999,P-P.38-45.
- [9] วิโรจน์ อิศวรงค์ , ชัชวาลย์ เต็มฤทธิวงศ์, กรชูลี ไชยสิทธิ์, **การใช้งานออพแอมป์และ
อินเวอเตอร์**, บริษัท ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด (มหาชน) , 2521.
- [10] สุวัฒน์ ดัน , **สวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลาย**, ฝ่ายวิจัยและพัฒนา บริษัทเอนเทลไทย จำกัด,2538.
- [11] มงคล อิศวโกวิทกรณ์ , วัตสัน กิรภัทรพงศ์ , **การลดสัญญาณรบกวน,พีลิกส์เซ็นเตอร์
การพิมพ์**, 2535.
- [12] ประสานพงษ์ หาเรือนชีพ , **ทฤษฎีและปฏิบัติส่งกำลังรถยนต์** , บริษัท ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด
(มหาชน) 2542.
- [13] T R Crompton, **Battery Reference Book** ,International Editions , London , Butterworth
Co. (Publishers) Ltd.,1990.
- [14] S. Jantarnag , **Rechargeable Batteries Applications Handbook** , USA.,Butterworth-
Heinemann,1998.

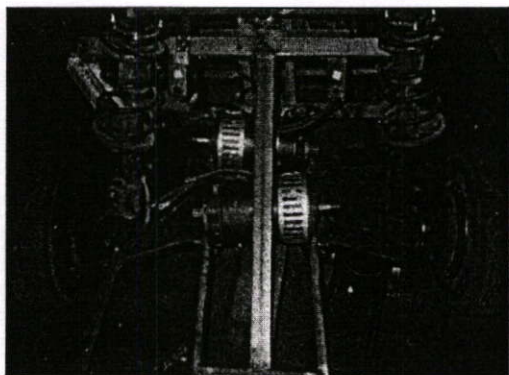
ภาคผนวก ก

คู่มือการใช้งานและการซ่อมบำรุง

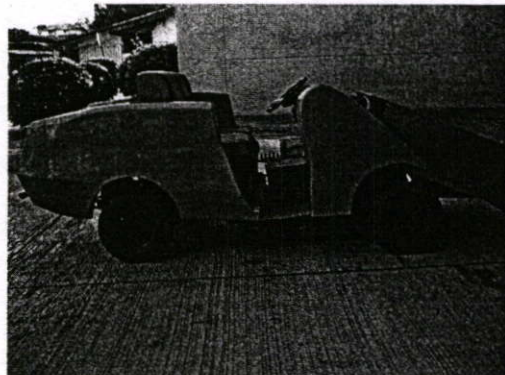
คู่มือการใช้งานและการซ่อมบำรุง

คู่มือการใช้งานและการซ่อมบำรุงรถไฟฟ้าขับเคลื่อนสี่ล้อเพื่อที่จะทำให้ทราบขั้นตอนต่าง ๆ ในการใช้งานรวมถึงการซ่อมบำรุงรถได้อย่างถูกต้อง

1. รูปลักษณ์ภายนอกของรถไฟฟ้าขับเคลื่อนสี่ล้อ



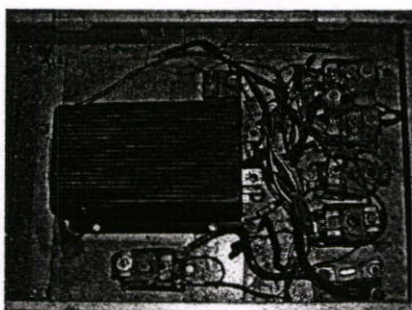
(ก)



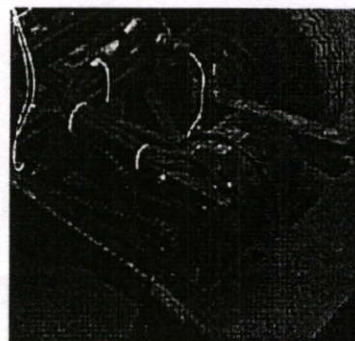
(ข)

รูปที่ ก.1 รูปภายนอกของรถไฟฟ้าที่จัดทำขึ้น

(ก) ด้านหน้า (ข) ด้านข้าง



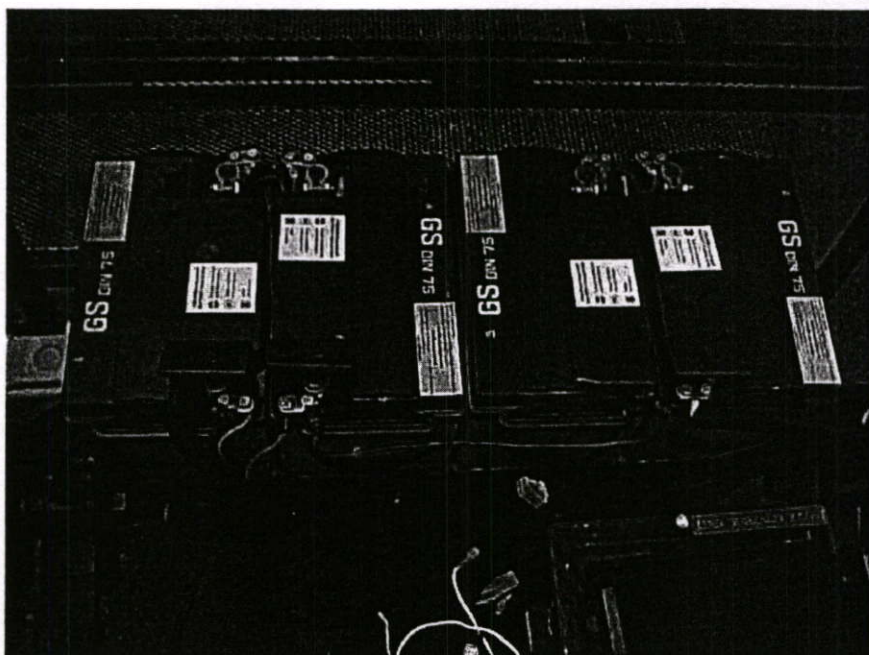
(ก)



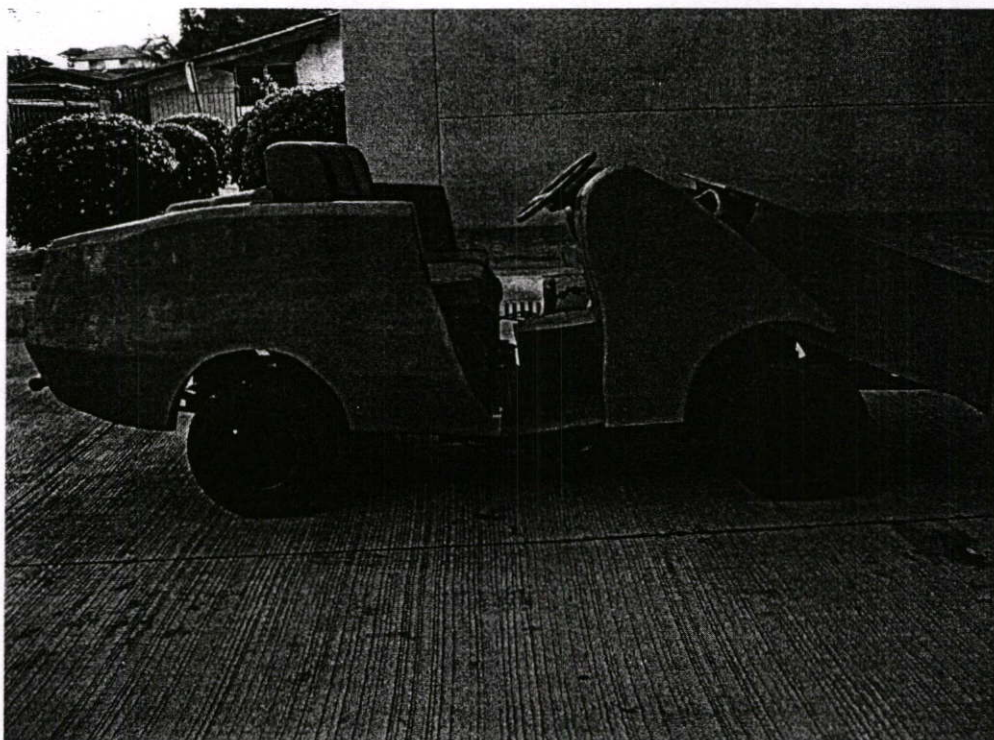
(ข)

รูปที่ 2 ชุดขับเคลื่อน

(ก) ชุดควบคุม (ข) มอเตอร์ที่ใช้



รูปที่ ก.3 แสดงการวางตำแหน่งและการต่อแบตเตอรี่

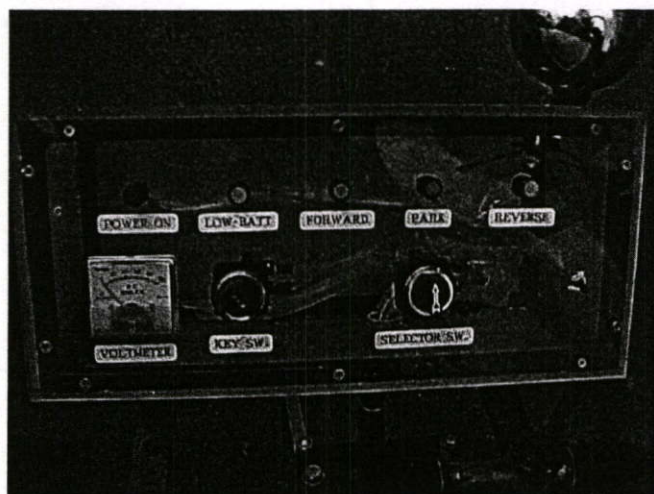


รูปที่ ก.4 รถไฟฟ้าขณะบรรทุกสองที่นั่ง

2. ขั้นตอนการใช้งาน

รายละเอียดต่าง ๆ ที่ใช้ในการควบคุมมีดังต่อไปนี้

2.1 แผงหน้าปัทม์ควบคุมการทำงาน

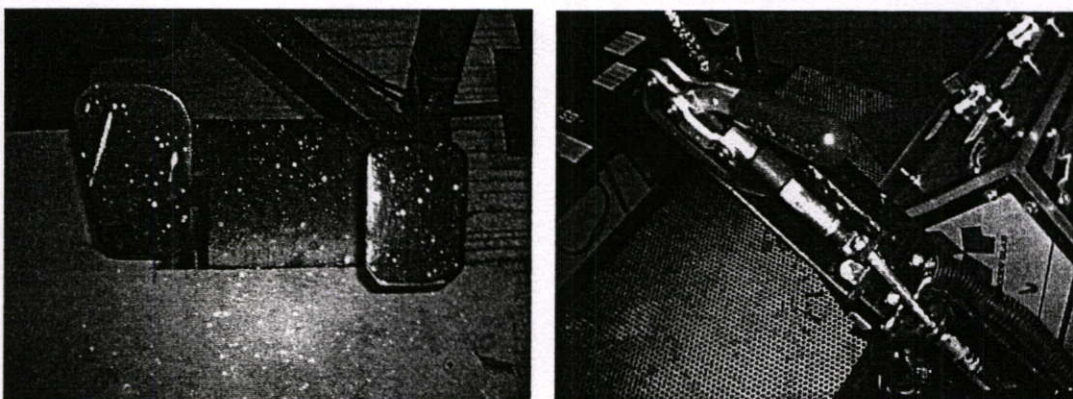


รูปที่ ก.5 แผงหน้าปัทม์ควบคุมการทำงาน

จากรูปประกอบไปด้วย

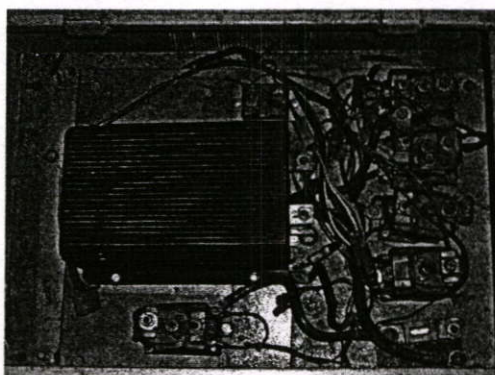
1. หลอดสีแดง แสดงสถานะ พร้อมทำงาน
2. หลอดสีเหลือง แสดงสถานะผิดปกติของระบบควบคุม
3. หลอดสีเขียว แสดงสถานะเดินหน้า
4. หลอดสีส้ม แสดงสถานะจอดโดยคิงเบรกมือ
5. หลอดสีขาว แสดงสถานะถอยหลัง
6. โวลท์มิเตอร์ แสดงระดับแรงดันของแบตเตอรี่ที่จ่ายให้กับมอเตอร์
7. สวิตช์กุญแจ
8. สวิตช์เลือกทิศทางเดินหน้า – ถอยหลัง
9. สวิตช์ไฟฟ้า

2.2 คั่นแรงและเบรก



รูปที่ ก.6 (ก) คั่นแรงและเบรกเท้า (ข) เบรกมือ

2.3 ชุดควบคุมความเร็วมอเตอร์

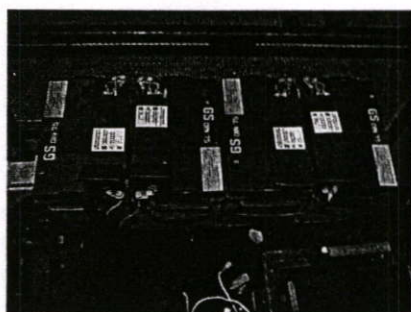


รูปที่ ก.7 ชุดควบคุมความเร็วมอเตอร์

2.4 เริ่มการใช้งาน

เมื่อต้องการขับเคลื่อนรถไฟฟ้าให้เคลื่อนที่ไปตามต้องการนั้น ตำแหน่งของสวิตช์กุญแจต้องอยู่ในสภาวะออน และสวิตช์เลือกทิศทางอยู่ในตำแหน่งเดินหน้าหรือถอยหลัง ปลดเบรกมือและเบรกเท้าต้องอยู่ในสภาวะปกติ ถ้าไม่มีปัญหาอะไรเกิดขึ้น เมื่อเหยียบคั่นแรงแล้วรถจะเริ่มเคลื่อนที่ตามต้องการ

2.5 แบตเตอรี่ และชุดชาร์จแบตเตอรี่



(ก)



(ข)

รูปที่ 8.8 (ก) แบตเตอรี่ (ข) ชุดชาร์จแบตเตอรี่

ในกรณีแบตเตอรี่หมดหรือมีแรงดันต่ำจนไม่สามารถขับเคลื่อนต่อไปได้ควรมีการชาร์จแบตเตอรี่ตามความเหมาะสม สถานที่ชาร์จควรจะแห้ง สะอาด ปราศจากฝุ่น และอยู่ห่างจากวัตถุไวไฟ ควรมีการระบายความร้อนให้กับแบตเตอรี่ด้วยเพื่อยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่

ขั้นตอนการชาร์จแบตเตอรี่

1. ปิดสวิทช์กุญแจและใส่เบรกมือ
2. เปิดฝาจุของแบตเตอรี่ออกพร้อมทั้งตรวจสอบระดับน้ำกลั่น
3. เสียบปลั๊กสำหรับชาร์จแบตเตอรี่
4. เปิดสวิทช์ที่ตัวชาร์จ พร้อมกับปรับสวิทช์ไปที่ตำแหน่ง Equalizing
5. เมื่อแบตเตอรี่เต็มจะมีเสียงเตือนจากชุดชาร์จ
6. ถอดปลั๊กออก นำรถไปใช้งานได้ตามปกติ

ตารางการตรวจเช็คและการซ่อมบำรุง

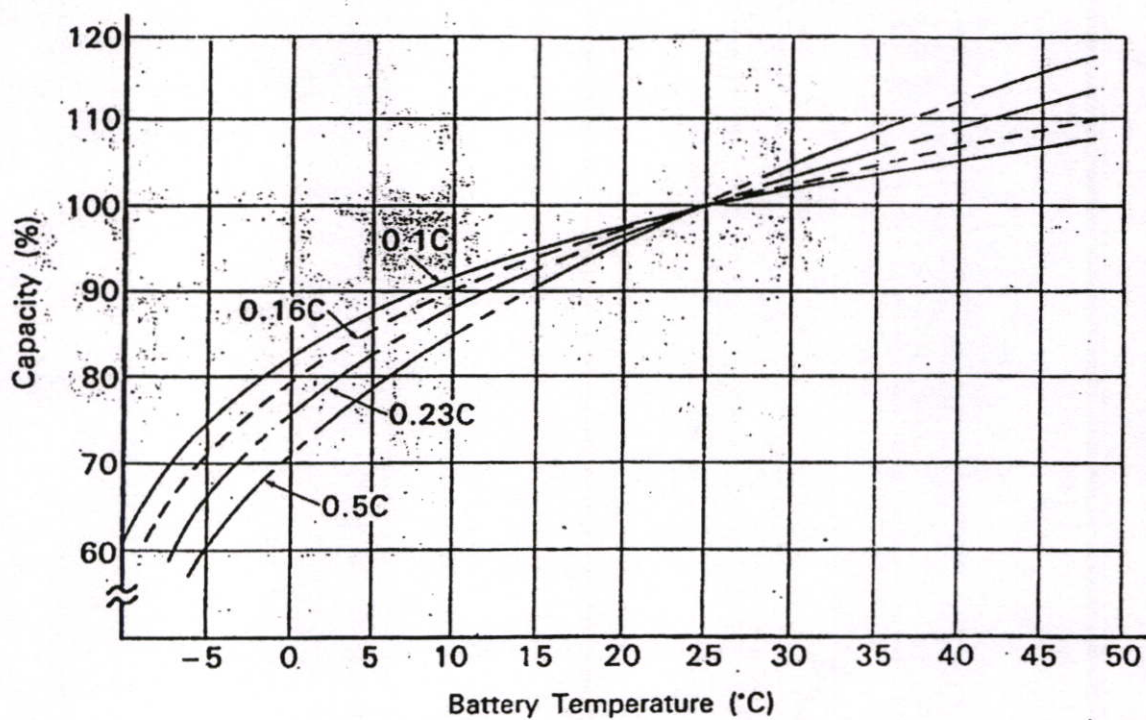
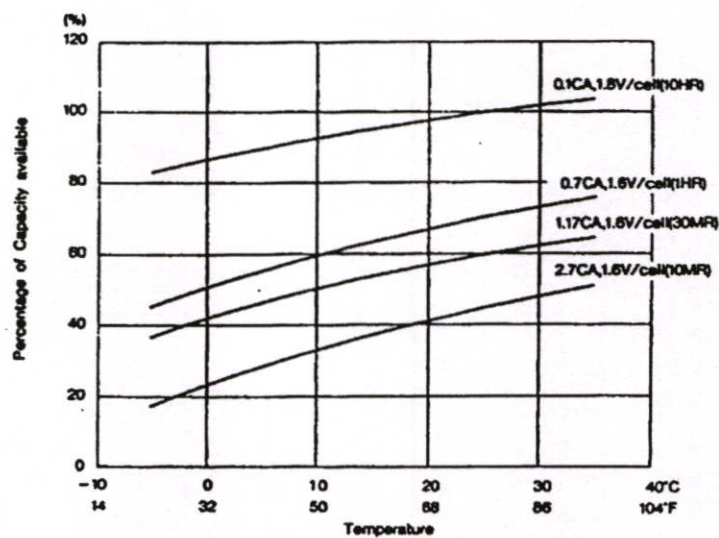
	ทุกวัน	ทุก สัปดาห์	ทุกเดือน	อื่นๆ	หมายเหตุ
แบตเตอรี่					
1. ชาร์จ	0				
2. ตรวจสอบ		0			ตรวจสอบระดับน้ำกลั่น
3. ทดสอบ				ทุกปี	ทดสอบการคิซชาร์จ
4. ทำความสะอาด					ตามความเหมาะสม
คันเร่ง					
1. ตรวจสอบ			0		สายไฟและตัวต้านทานปรับค่าได้
เบรก					
1. ตรวจสอบ	0				ระดับน้ำมันของปั้มเบรก
2. ปรับตั้ง				ทุก 6 เดือน	สายเบรคมือและเบรคเท้า
ชุดเลี้ยว					
1. ตรวจสอบ	0				ระยะเลี้ยว
2. หล่อลื่น				ทุก 6 เดือน	
3. ปรับตั้ง				ทุกปี	
มอเตอร์					
1. ตรวจสอบ			0		สายไฟ จุดต่อ และแปรงถ่าน
แผงควบคุมหน้า					
1. ตรวจสอบ			0	ทุก 6 เดือน	เงื่อนไขการทำงานของคอนแทค
ชุดควบคุมความเร็ว					
1. ตรวจสอบ			0		สัญญาณเกิดของมอสเฟต

รายละเอียดของแบตเตอรี่ตามข้อกำหนดของผู้ผลิตบริษัท GS แบตเตอรี่

	เขตอากาศร้อน
ความถ่วงจำเพาะของกรดที่จะเติม ในช่องแบตเตอรี่ใหม่	1.240 – 1.260 (30 °c) 1.247 – 1.267 (20 °c)
ความถ่วงจำเพาะของกรดหลังอัด ไฟแล้ว	1.240 – 1.260 (30 °c) 1.247 – 1.267 (20 °c)
อุณหภูมิสูงสุดของกรดขณะอัดไฟ	50 °c

แบบ	แรงดัน (โวลต์)	ความจุ (A.h)	จำนวน แผ่นต่อ ช่อง	อัตรา อัด กระแส (A.h)	ขนาดภายนอก (มม.)				น้ำหนัก (กก.)	ปริมาณ กรด (ล.)
					ยาว	กว้าง	สูง	สูงถึง ขั้ว		
575-17 (DIN75)	12	75	15	5	304	177	189	189	13.8	3.9

กราฟแสดงความสัมพันธ์ขนาดความจุและอุณหภูมิของแบตเตอรี่



ภาคผนวก ข

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์และเผยแพร่

วารสารวิศวกรรมลาดกระบังตีพิมพ์ในปีที่ 23 ฉบับที่ 1 เดือนมีนาคม 2549 เลขที่อ้างอิง 1099

รถไฟฟ้าขับเคลื่อนสี่ล้อ

A Four Wheel Drived Electric Car

โสภณ สวัสดิ์นาวิน

ประภษา ไพรสุวรรณา

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้นำเสนอถึงหลักการทำงานของรถไฟฟ้าขับเคลื่อนสี่ล้อ โดยใช้มอเตอร์กระแสตรงสี่ตัวเป็นตัวขับเคลื่อน ซึ่งรถไฟฟ้าขับเคลื่อนสี่ล้อนี้จะประกอบไปด้วยส่วนหลักสองส่วนคือชุดวงจรขับเคลื่อนกับชุดคิฟเฟอเรนเชียลมอเตอร์ส่วนที่หนึ่งใช้หลักการของวงจร บั๊กคอนเวอร์เตอร์ เป็นตัวควบคุมความเร็วของมอเตอร์ ส่วนที่สองใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรม (DC.SERIES MOTOR) 4 ตัว แยกอิสระทางกลแต่ต่ออนุกรมกันทางไฟฟ้า เพื่อใช้ทดแทนชุดคิฟเฟอเรนเชียล เกียร์ของรถยนต์ที่ใช้กันอยู่ทั่วไป และไม่มีอาการทำยปิดเวลาเลี้ยวโค้งและสามารถออกตัวได้อย่างราบเรียบนุ่มนวลกว่ารถไฟฟ้าทั่วไป

Abstract

This paper presents the principles of a four wheel drived electric car and consists of two parts. First is an electronic drive circuit. Second is a differential motor. The electronic drive circuit as the principles of Buck converter to control speed this motor, and the differential motor consists of four DC motors divide in machnical. But in serial connection for replacing the differential gear that use in car. There is no swinging, while it can turn and run smoother than the general electric car.

1. บทนำ

ในปัจจุบันคนทั่วไปเริ่มให้ความสนใจต่อการหาพลังงานทดแทนน้ำมันที่ราคาแพงและมีปริมาณที่ลดลงเรื่อยๆ จึงหันมาให้ความสนใจกับรถไฟฟ้ามากขึ้น รถไฟฟ้าขับเคลื่อนสี่ล้อจัดเป็นรถไฟฟ้าขนาดเล็ก ที่มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายในสนามกอล์ฟหรือนำมาใช้แทนรถไถนาและเป็นรถไฟฟ้าประเภทเดียวที่มีการใช้งานมากที่สุดในประเทศแต่อุปกรณ์ต่างๆที่ใช้จำเป็นต้องนำเข้ามาจากต่างประเทศและมีราคาสูงมาก รวมไปถึงค่าบำรุงรักษาต่างๆด้วย

ด้วยเหตุผลดังกล่าว จึงได้มีแนวคิดที่จะสร้างรถไฟฟ้าขับเคลื่อนสี่ล้อ โดยใช้อะไหล่และอุปกรณ์ทั้งหมดที่มีภายในประเทศ เพื่อเป็นการประหยัดต้นทุนที่จำเป็นต้องนำเข้ามาจากต่างประเทศ โดยใช้การขับเคลื่อนด้วย

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อลดปัญหาทางด้านมลพิษและเสียงรบกวน โดยได้ทำการออกแบบรถให้มีขนาดที่ใกล้เคียงกับรถที่นำมาจากต่างประเทศ เพื่อให้สามารถใช้งานได้เหมาะสมกับการใช้งานจริงๆ ไม่ว่าจะเป็นส่วนของมอเตอร์ แบตเตอรี่ที่ใช้เก็บพลังงานและวงจรควบคุมความเร็วของรถ หากสิ่งเหล่านี้ได้รับการพัฒนาต่อไป รถไฟฟ้าที่ผลิตโดยคนไทยจะได้รับความนิยมและใช้งานกันอย่างแพร่หลายแน่นอน และสามารถนำรถไปดัดแปลงกับการใช้งานประเภทอื่นๆ ทำให้มีการใช้งานที่กว้างขวางขึ้น

ในบทความนี้จึงได้คิดค้นและออกแบบรถไฟฟ้าขับเคลื่อนสี่ล้อขึ้น โดยเฉพาะในส่วนขับเคลื่อนใช้มอเตอร์กระแสตรงแบบอนุกรมสี่ตัว ต่ออนุกรมกันทาง

ไฟฟ้าแต่ละแยกอิสระกันทางกล เพื่อทำงานแทนชุดคิฟเฟอเรนเชียลเกียร์ป้องกันทำยปิดเวลาเข้าโค้ง ซึ่งเป็นแนวความคิดใหม่ในส่วนของชุดควบคุมความเร็ว จะใช้วงจรดิจิทัคิซิคอนเวอร์เตอร์ (DC - DC Converter) แบบบักคอนเวอร์เตอร์ (Buck converter) ในการควบคุมและพยายามออกแบบให้มีขนาดเล็กสามารถนำไปใช้งานได้จริง

จากการออกแบบสร้างรถไฟฟ้าขับเคลื่อนสี่ล้อขึ้นมาซึ่งรถไฟฟ้าขับเคลื่อนสี่ล้อที่บทความนี้มีจำนวน 2 ที่นั่งสามารถนำไปใช้แทนรถไดนาได้หรือชัก ลากจูงซึ่งรถไดนาที่ใช้ ณ.ปัจจุบันนี้ใช้น้ำมันและมีขนาดใหญ่สิ้นเปลืองน้ำมัน และมีเสียงดังรบกวน

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 สมการหลักของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง

สมการหลักของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง ไม่ว่าจะ เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า หรือมอเตอร์ไฟฟ้าจะมีสมการหลักอยู่ 2 สมการ คือ

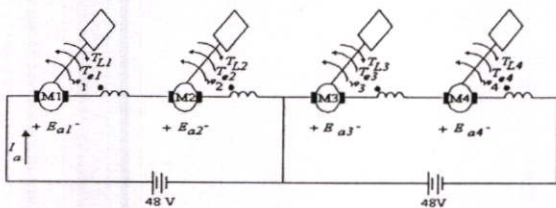
$$E_a = K_a \cdot \Phi_p \cdot \omega \quad (1) \text{ และ}$$

$$T_e = K_a \cdot \Phi_p \cdot I_a \quad (2)$$

เนื่องจาก E_a เปลี่ยนแปลงน้อยมากเพราะว่า ค่าความต้านทานของขดลวดมีค่าน้อยมาก ดังนั้น ความเร็ว ω แปรผกผันกับกระแสอาร์เมเจอร์ ส่วนแรงบิดแปรผันตามกระแสอาร์เมเจอร์ยกกำลังสอง

2.2 ผลของการนำมอเตอร์มาต่ออนุกรมทางไฟฟ้า

จุดเด่นของบทความนี้ก็คือ ใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรมมาต่ออนุกรมทางไฟฟ้า เพื่อใช้แทนชุด คิฟเฟอเรนเชียลเกียร์ (differential gear) จุดค้อยของมอเตอร์ไฟฟ้าแบบอนุกรมนั้นก็คือมีเรกิวเลชั่นของความเร็ว (speed regulations) ไม่นั่นคือความเร็วรอบของมอเตอร์เปลี่ยนแปลงอย่างมาก

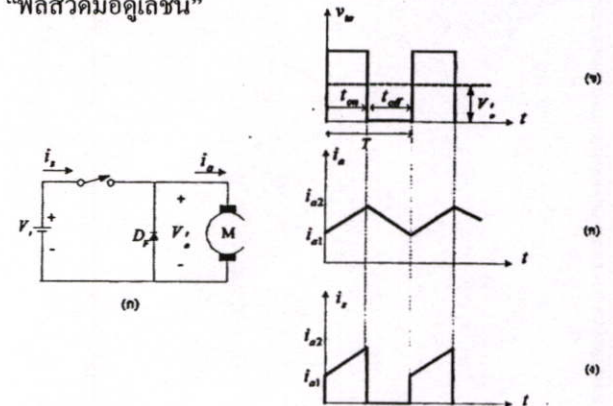


รูปที่ 1 การนำมอเตอร์มาต่ออนุกรมกันทางไฟฟ้า

ในบทความนี้เราจะใช้มอเตอร์ 4 ตัวแยกขับเคลื่อนซ้ายและขวา ซึ่งทำหน้าที่แทนชุดคิฟเฟอเรนเชียลเกียร์ จากรูปที่ 1 ถ้าสมมุติให้มอเตอร์ M1 ขับล้อหน้าซ้ายและมอเตอร์ M2 ขับล้อหน้าขวา M3 ขับล้อซ้ายหลัง M4 ขับล้อขวาหลังถ้าให้ซ้ายมอเตอร์ M1, M3 จะรับภาระลดลงทำให้ความเร็ว ω_1 ลดลงและ E_{a1} ลดลงด้วยดังนั้น E_{a2} ของมอเตอร์ M2, M4 จะเพิ่มขึ้นมีผลให้ความเร็ว ω_2 เพิ่มขึ้นด้วยนั่นคือ ขณะเลี้ยวซ้ายและล้อขวาหมุนไม่เท่ากันทำให้เวลาเลี้ยวทำยรถจึงไม่ปิดแต่เวลาวิ่งทางตรงความเร็วของมอเตอร์ทั้งสองจะมีค่าเท่ากัน ทั้งนี้ อิมพีแดนซ์ (Impedance) ของมอเตอร์ทั้งสองต้องมีค่าเท่ากันหรือใกล้เคียงกัน แนวความคิดนี้จะใช้งานได้ดีหรือไม่มันต้องเก็บผลจากการทดลองวิ่งจริง

2.3 หลักการเบื้องต้นการควบคุมความเร็วของมอเตอร์แบบชอปเปอร์

การควบคุมความเร็วแบบชอปเปอร์ (Chopper) มีหลายชนิดส่วนชนิดที่นำมาใช้ในบทความนี้เป็นแบบบักคอนเวอร์เตอร์ ในรูปที่ 2 สวิตซ์จะถูกควบคุมให้ตัดและต่อแรงดันไฟฟ้า เป็นช่วง ๆ ทำให้ได้แรงดันเฉลี่ยที่ร้อมมอเตอร์ (V_m) เปลี่ยนแปลงตามต้องการซึ่งขนาดของแรงดัน V_m ขึ้นอยู่กับช่วงเวลานำกระแส (turn on time; t_{on}) และช่วงเวลาหยุดนำกระแส (turn off time; t_{off}) วิธีการหนึ่งที่จะควบคุมแรงดัน V_m ที่มีความถี่ในการสวิตซ์คงที่และเปลี่ยนแปลงช่วงเวลานำกระแสวิธีการนี้เรียกว่า “พัลส์วิดมอดูเลชั่น”



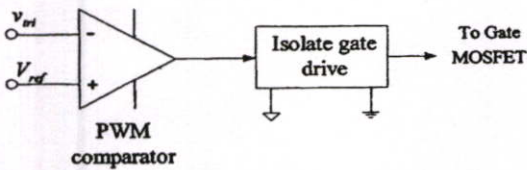
รูปที่ 2 หลักการของบักคอนเวอร์เตอร์

ก) วงจรบักคอนเวอร์เตอร์พื้นฐาน

ข) ถึง ง) ลักษณะรูปคลื่น

2.4 วงจรขับ

สำหรับการใช้งานมอสเฟต เป็นสวิตช์ความถี่สูงนั้น วงจรขับจะต้องมีความสามารถในการรับและจ่ายกระแสได้ ถึงแม้ว่ามอสเฟตต้องการกระแสไฟฟ้เพียงเล็กน้อย แต่ในการนำมอสเฟตมาต่อขนานกันหลายๆ ตัวนั้น วงจรขับจะต้องมีความสามารถจ่ายกระแสได้เพียงพอด้วยเพื่อไม่ให้ขณะทำงานเกิดการรบกวนระหว่างวงจรกำลัง และวงจรควบคุมจะต้องทำการแยกกราวด์ของวงจรขับแยกกับส่วนของการสร้างสัญญาณ PWM ออกจากกัน ในปัจจุบันนี้มีไอซีขับเกตมอสเฟตสำเร็จรูปที่มีการแยกกราวด์ในชิป (chip) เดียวกัน



รูปที่ 3 การแยกกราวด์ระหว่างวงจรกำลังกับวงจรควบคุม

2.5 วงจรควบคุมความเร็วของมอเตอร์

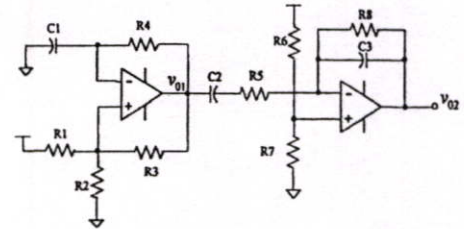
รายละเอียดต่าง ๆ ของวงจรควบคุมความเร็วของมอเตอร์ส่วนประกอบหลักๆ ของวงจรควบคุมความเร็วมีอยู่ 2 ส่วน คือ ภาควงจรควบคุมสัญญาณขับเคลื่อนและภาควงจรกำลัง (power circuit)

2.5.1 ภาควงจรควบคุมสัญญาณขับ

ในส่วนนี้จะแบ่งออกเป็นส่วนตัวย่อย ๆ คือ วงจรออสซิลเลเตอร์ ซึ่งเป็นวงจรกำเนิดสัญญาณสามเหลี่ยม, PWM คอมพาราเตอร์ ภาคปรับอัตราเร่ง และก็จะมึวงจรป้องกันต่างๆ คือ ป้องกันกระแสเกินและอุณหภูมิเกิน ซึ่งแต่ละส่วนมีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

2.5.1.1 วงจรออสซิลเลเตอร์

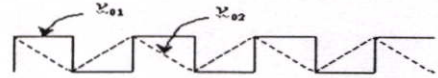
การที่จะสร้างสัญญาณ PWM จะต้องมึสัญญาณพาหนะ (carrier signal) ในที่นี้คือสัญญาณสามเหลี่ยม และสัญญาณอ้างอิง (reference signal) มาทำการเปรียบเทียบ เพื่อให้ได้สัญญาณ PWM ตามต้องการ



รูปที่ 4 วงจรออสซิลเลเตอร์

จากรูปที่ 4 ส่วนที่ 1 จะเป็นวงจรสร้างพัลส์สี่เหลี่ยมซีกบวกให้ควิตีไซเคิลเท่ากับ 50% แล้ว ความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตของ v_{01} จะหาได้จาก

$$f = \frac{1}{1.39 \cdot R_4 \cdot C_1}$$



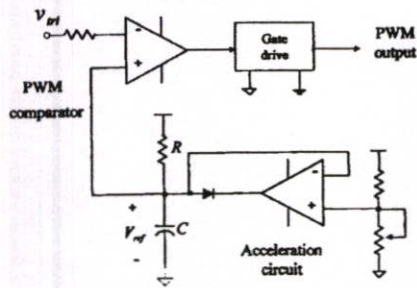
รูปที่ 5 แสดงเอาต์พุตของสัญญาณ V_{01} และ V_{02}

จากนั้น นำสัญญาณพัลส์ที่ได้มาเข้าวงจรอินทิเกรเตอร์ในส่วนที่ 2 จะได้สัญญาณเอาต์พุต v_{02} เป็นสัญญาณสามเหลี่ยม ตามต้องการความถี่ที่ได้นั้นเป็นความถี่ในการสวิตซ์ (Switching) ของมอสเฟตด้วย ความถี่ที่ใช้ในทางปฏิบัติอยู่ในช่วง 15-20 kHz ถ้าความถี่สูงเกิน จะทำให้เกิดกำลังสูญเสียจากการสวิตซ์สูง ถ้าต่ำไปจะทำให้มอเตอร์ร้อน จึงควรเลือกความถี่ที่เหมาะสมเพื่อที่จะได้สัญญาณสามเหลี่ยมมีรูปลักษณะไม่เพี้ยน ควรเลือกค่า $R_5 \cdot C_3$ $R_4 \cdot C_1$ และควรให้สัญญาณสามเหลี่ยม มีลักษณะลอยขึ้นจากระดับกราวด์พอสมควรเพื่อให้สะดวกต่อการทำวงจรป้องกันต่างๆ ซึ่งกำหนดได้จาก R6 และ R7

2.5.1.2 การคอมพาราเตอร์ และปรับอัตราเร่ง

ในส่วนนี้จะเป็นการนำเอาสัญญาณสามเหลี่ยมมาเปรียบเทียบกับสัญญาณอ้างอิงที่ได้ จากวงจรปรับอัตราเร่งทำให้ได้สัญญาณ PWM เพื่อที่จะนำไปขับเกตของมอสเฟตดังรูปที่ 6 ในส่วนวงจรปรับอัตราเร่งนั้นจะปรับแรงดันคิตซีหรือแรงดันอ้างอิงจากตัวต้านทานปรับค่าได้ (คั้นเร่ง) และจะมีบัฟเฟอร์(buffer)เพื่อป้องกันผลของโหลด (loading effect) R และ C ที่ใส่เข้าไปเพื่อจะให้มึเวลาหน่วย (time delay) แรงดันอ้างอิงไม่ให้เปลี่ยนแปลงใน

ทันทีทันใดเต็มที่จะเหมือนกับว่าทำการสตาร์ทมอเตอร์ที่ พิกัดแรงดันทำให้เกิดกระแสสูงเกิน (over current) อาจ ทำให้อุปกรณ์ต่างๆ ในวงจรควบคุมเสียหายได้

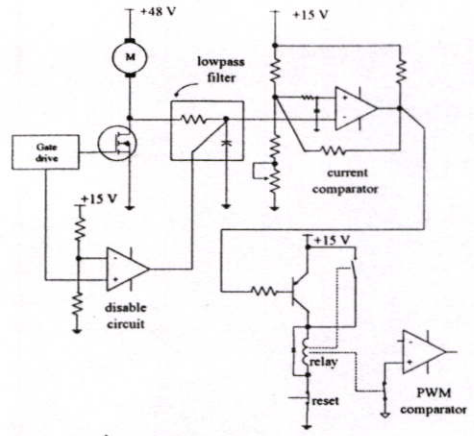


รูปที่ 6 การคอมพาราเตอร์และปรับอัตราเร่ง

2.5.1.3 วงจรป้องกันกระแสเกิน

เนื่องจากนำมอสเฟตมาขนานกันหลายตัวเพื่อ ช่วยจ่ายกระแส สาเหตุที่ให้นำมอสเฟตมาขนานกันก็เพื่อ เหตุผลทางเศรษฐศาสตร์ เพราะว่าถ้าใช้มอสเฟตแบบ โมดูล (modules) จะมีราคาแพงมากในการที่จะนำตัว ด้านทานค่าต่ำๆ มาต่ออนุกรมกับมอสเฟต แล้วนำแรงดัน ที่ตกคร่อมตัวด้านทานไปตรวจสอบกระแสเกินนั้น จะ ต้องทำทุกตัวที่ขนานกันอยู่ เพราะในช่วงแรกมอสเฟต อาจนำกระแสไม่พร้อมกัน ตัวที่นำกระแสก่อนอาจเสีย หายได้ วิธีนี้จึงไม่เหมาะสม ทำให้ขนาดของชุดควบคุม มีขนาดใหญ่ และสูญเสียกำลังไฟฟ้าที่ตัวด้านทานโดย เปล่าประโยชน์

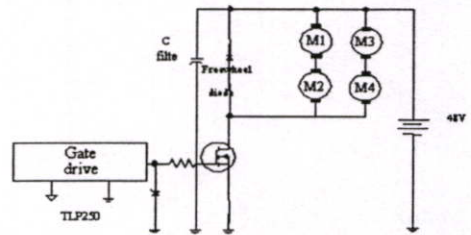
มอสเฟตขณะนำกระแส นั้นจะมีแรงดันค่าน้อย ๆ ตก คร่อมตัวมอสเฟตอยู่ ดังนั้น เราจะนำแรงดันนี้ไปใช้งาน ینگกระแสไหลผ่านมอสเฟตมาก แรงดันตกคร่อมก็ยิ่ง มากขณะมอสเฟตหยุดนำกระแสแรงดันตกคร่อม ตัวมัน จะมีค่าสูงเท่า กับแหล่งจ่าย วงจรเปรียบเทียบกระแสจะ เข้าใจว่าเป็นภาวะเกิดกระแสเกิน ดังนั้นจึงต้องมีวงจรที่ ไม่ให้พิจารณาในส่วนนี้ (disable circuit) การทำงานนั้น จะพิจารณาในช่วงมีสัญญาณเกิดเท่านั้น (มอสเฟตนำ กระแส) เมื่อวงจรเปรียบเทียบกระแสตรวจจับได้ว่าเกิด กระแสเกิน ก็จะสั่งให้รีเลย์ทำงานและดึงขาบวกของ PWM คอมพาราเตอร์ลงกราวด์ ซึ่งมีลักษณะเช่นเดียวกับการป้องกันอุณหภูมิ เพื่อที่จะให้วงจรเปรียบเทียบกระแส (current comparator) ทำงานไม่ผิดพลาดควรรีต้องมี ฟิลเตอร์ (filter) เล็กน้อยเพื่อกรองความถี่สูงออก



รูปที่ 7 การป้องกันกระแสเกิน

2.5.2 ภาควงจรถักล้าง

จากรูปที่ 8 มอสเฟตถูกต่อขนานกัน และติดตั้ง อยู่บนแผ่นระบายความร้อนเดียวกัน เพื่อที่จะให้จ่าย กระแสได้เฉลี่ยแล้วเท่ากัน ในกรณีจะขนานกันก็ตัวนั้น ต้องคำนึงถึงพิกัดของกระแสของมอเตอร์เป็นหลัก ขณะ มอส เฟตนำกระแส กระแสไหลผ่านมอสเฟต และ ขณะที่มีมอส เฟตหยุดนำกระแสกระแสของมอเตอร์ไหล ได้อย่างต่อเนื่องโดยผ่านไดโอด



รูปที่ 8 วงจรถักล้าง

ดังนั้น ไดโอดต้องเป็นชนิดฟาสต์รีคัฟเวอรั้ ตัวเก็บประจุถูกต่อคร่อมแบตเตอรี่โดยตรง เพื่อลด กระแสริบเปิล (ripple current) ของแบตเตอรี่เนื่องจาก ถ้ากระแสมีริบเปิลสูง จะทำให้อายุการใช้งานของ แบตเตอรี่สั้นลง และต้องต่อตัวเก็บประจุให้ใกล้มอส เฟตมากที่สุดตัวเก็บประจุที่ใช้ควรต่อขนานกันหลาย ๆ ตัว เพื่อเพิ่มอัตราทานกระแสริบเปิลของตัวเก็บประจุ



รูปที่ 9 การติดตั้งมอสเฟต

2.6 การคำนวณหาพิคกำลังของมอเตอร์

$$F = \mu . mg$$

$$P = \mu . mg . V$$

$$P_m = \mu . \frac{WV}{102} \text{ kW โดยที่}$$

W คือ น้ำหนักกรด + น้ำหนักโหลด = 600 kg

P_m คือ ค่ากำลังของมอเตอร์ (kW)

μ คือ ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างยางรถกับพื้นผิวหยาบ

η คือ ประสิทธิภาพ ของระบบส่งกำลัง (ใช้โซ่ในการขับเคลื่อน มีประสิทธิภาพประมาณ 90%)

V คือ อัตราความเร็วที่ 48 Km/h จะได้

$$V = 13.334 \text{ m/s}$$

ที่รอบพิคมอเตอร์มีค่าประมาณ 1500 rpm เมื่อเทียบกับรัศมีวงล้อของกรด (25 ซม.) แล้วรคันนี้มีเส้นรอบวงเท่ากับ 0.94 เมตร จะต้องทรอบประมาณ 1:3.4 จึงจะ ได้ความเร็วรอบ 48 km/h

$$\text{แทนค่า } P_m = (0.0467289) \left[\frac{(600)(13.334)}{102} \right] \frac{100}{90} \text{ kW}$$

$$P_m = 4.065 \text{ kW}$$

$$P = \frac{4.065}{90} . 100 \text{ kW}$$

$$P = 4.216 \text{ kW}$$

มอเตอร์ที่ใช้เป็น มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรม ขนาด 1kW 4 ตัวพิครวม 4 kWสามารถนำมาใช้งานได้

2.7 การหาขนาดของแบตเตอรี่

ขนาดความจุของแบตเตอรี่จากการทดสอบมอเตอร์ในห้องทดลองวัดขนาดกระแสไฟฟ้าเข้ามอเตอร์ได้ 50 แอมแปร์และออกแบบให้แบตเตอรี่จ่ายกระแสต่อเนื่องที่พิคในเวลา 1 ชั่วโมงจะได้ความจุของแบตเตอรี่

$$C = I . t$$

$$= 50(1)$$

$$= 50 \text{ A-h}$$

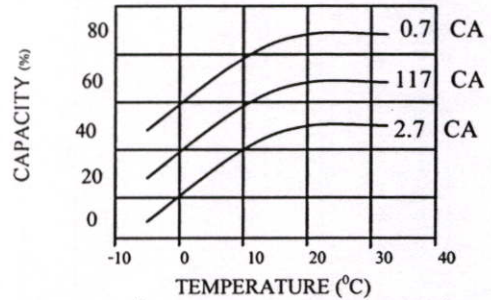
แต่ขณะนำมอเตอร์มาใช้งานจริงโดยการขับล้อรถไฟฟ้ามอเตอร์จะขับ โหลดสูงกว่า เมื่อทดสอบเป็นผลให้มอเตอร์ดึงกระแสสูงขึ้น จึงทำการเผื่อขนาดความจุ

ของแบตเตอรี่อีก 50% ตามกราฟการคายประจุของแบตเตอรี่

$$C = (50)(0.5)+50$$

$$= 75 \text{ A-h}$$

ในบทความนี้ใช้มอเตอร์ 4 ตัวขนาดพิคแรงดันตัวละ 24 โวลท์ ต่ออนุกรมกันทางไฟฟ้าจึงใช้แบตเตอรี่ขนาด 75 A-h , 12โวลท์ จำนวน 8 ลูก ต่ออนุกรมกันทางไฟฟ้าในการจ่ายพลังงาน



รูปที่ 10 การคายประจุของแบตเตอรี่

3.ผลการทดลอง

3.1 การทดสอบสมรรถนะเกี่ยวกับ DIFFERENTIAL

ระยะทดสอบ	N (rpm)	I _a (A)	T _{out} (N.m)
1.5 k Ω	1025	250	1.95
3 k Ω	1135	215	1.76
5 k Ω	1280	180	1.56

ตารางที่ 1 ทดสอบสมรรถนะเกี่ยวกับ DIFFERENTIAL

3.2ทดสอบหาสมรรถนะกับพื้นเอียง 15°

ระยะทดสอบ	N(rpm)	I _a (A)	T _{out} (N.m)
1.5 k Ω	2155	312	1.85
3 k Ω	2297	284	1.74
5 k Ω	2480	242	1.61

ตารางที่ 2 ทดสอบสมรรถนะกับพื้นเอียง 15°

3.3 ทดสอบหาสมรรถนะกับพื้นเอียง 30°

ระยะทดสอบ	N(rpm)	I _a (A)	T _{out} (N.m)
1.5 k Ω	1802	390	2.21
3 k Ω	1945	363	2.05
5 k Ω	2085	321	1.99

ตารางที่3 ทดสอบหาสมรรถนะกับพื้นเอียง 30°

3.4 เปรียบเทียบการทดสอบการใช้พลังงานไฟฟ้าต่อ1ชม

รตไฟฟ้า	1 5 นาท	3 0 นาท	4 5 นาท	6 0 นาท	ความเร็ว สูงสุด (กม/ชม)
ขับเคลื่อน 2 ล้อ	6 กม	12 กม	19 กม	25 กม	25 กม
ขับเคลื่อน 4 ล้อ	14 กม	28 กม	42 กม	56 กม	56 กม

ตารางที่ 4 เปรียบเทียบการทดสอบการใช้พลังงานไฟฟ้าต่อ1ชม.

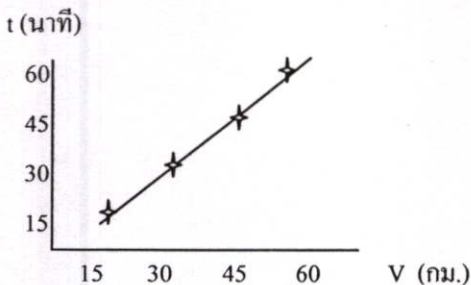
3.5 ทดสอบสมรรถนะรวมของระบบเทียบกับ 2 ล้อ

ระยะทดสอบ	N(rpm)	I_a (A)	T_{out} (N.m)
ขับเคลื่อน2ล้อ	1475	88	1.35
ขับเคลื่อน4 ล้อ	1520	190	2.63

ตารางที่ 5 ทดสอบสมรรถนะรวมของระบบเทียบกับ2ล้อ

4. บทสรุปและวิจารณ์

จากการขับเคลื่อนรตไฟฟ้าจริงที่สร้างขึ้นโดยอาศัยหลักการดิฟเฟอเรนเชียลเกียร์ สามารถแทนกันได้จริง ขณะทำการเลี้ยวความเร็วของล้อทั้งสองข้างไม่เท่ากัน ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีที่กล่าวมาแล้ว ไม่มีอาการท้ายปิดเวลาเลี้ยวโค้งและขณะที่ความเร็วรตวิ่ง 45 กม./ชม. สามารถออกตัวได้อย่างราบเรียบ นุ่มนวลกว่ารตไฟฟ้าทั่วไป



รูปที่11 กราฟเปรียบเทียบระหว่างความเร็วและเวลา

ปัญหาที่เกิดขึ้นและแนวทางแก้ไข

1. มอเตอร์ที่ใช้ในการขับเคลื่อนไม่เหมือนกันทุกประการและมอเตอร์ที่กัดเคียวกันที่แรงดันต่ำหาได้ยาก แม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมาก

2. การติดตั้งชุดควบคุมความเร็วมอเตอร์ ต้องวางในตำแหน่งที่เหมาะสม เพื่อป้องกันผลกระทบจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้น

3. ชุดขับเคลื่อนหลังมอเตอร์ จำเป็นต้องแยกเป็นสองส่วนและในส่วนของมอเตอร์จำเป็นต้องติดตั้งบนเพลาลังด้วย ทำให้มีความแข็งแรงในการรับแรงกระทำตลอดและเพลาลังต้องรับน้ำหนักมากขึ้นด้วยจึงต้องมีการเชื่อมชุดรองรับมอเตอร์และเพลาลังให้แข็งแรงยิ่งขึ้น

4. แบตเตอรี่ที่ออกแบบไว้ สามารถใช้งานได้เพียง 1 ชั่วโมง ถ้าต้องการให้ใช้งานได้นานขึ้น ควรเพิ่มขนาดความจุของแบตเตอรี่

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] พิษิต ถ้ายอง, “เครื่องจักรกลไฟฟ้า,” คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2537
- [2] สุวัฒน์ คั่น, “สวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลาย,” ฝ่ายวิจัยและพัฒนา บริษัทเอนเทคไทย จำกัด, 2538
- [3] มงคล เชนคินทร์ ,ชาติรี ศรีไพพรรณ, “อิเล็กทรอนิกส์”, คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2521
- [4] มงคล อัสวโกวิทกรม, วัดสัน กิรภัทรพงศ์, “การลดสัญญาณรบกวน,” ฟิสิกส์เซ็นเตอร์ การพิมพ์, 2535
- [5] วิโรจน์ อัสวรังสี, ชัชวาลย์ เต็มฤทธิวงศ์, กรชูลิ ไชยสถิตย์, “การใช้งานออปแอมป์และลิเนียร์ไอซี”, บริษัท ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด (มหาชน), 2521
- [6] พิรศักดิ์ วรสุนทรโรสด “เทคนิคการซ่อมแซมเลือกประเภทและติดตั้งมอเตอร์เหนี่ยวนำ”, บริษัท ซีเอ็ด ยูเคชั่น จำกัด (มหาชน), 2521
- [7] D.S.Bimbhra,” Electrical Machinery,” Khanna Publishers, 1996
- [8] Sergio Franco, “Design with Operational Amplifiers And Analog Integrated Circuit,” Mc Graw-Hill Book Company.

ประวัติผู้เขียน

นายโสภณ สวัสดิ์นาวิน เกิดเมื่อวันที่ 15 พฤศจิกายน พ.ศ.2511 ที่จังหวัดสมุทรปราการ สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต ในปีการศึกษา 2540 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2543 โดยปัจจุบันได้ทำงานในตำแหน่งผู้จัดการแผนกวิศวกรรม บริษัท เค.เอ็ม.อินเตอร์แล็บ จำกัด ภายใต้ผลิตภัณฑ์เครื่องสำอาง CUTE PRESS ORIENTAL PRINCESS