

**สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง**

ปีการศึกษา 2553

การศึกษาและประยุกต์ใช้งานมอเตอร์แบบฮับ  
The Study and Application of Hub Motor



T119554



เลขหมู่.....**119554**  
เลขทะเบียน.....  
วัน,เดือน,ปี.....**8 S.A. 2554**

b.....  
i.....

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ร.อ.ดร. วีระเชษฐ์ ชันเงิน

รศ.ดร. ชัยวุฒิ ฉัตรอุทัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2553

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

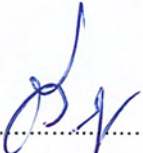
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

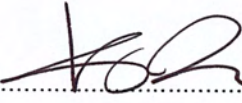
เรื่อง การศึกษาและประยุกต์ใช้งานมอเตอร์แบบฮับ

ผู้จัดทำ



1. นาย สรวุฒิ วิชาชัยเฉลิมกุล
2. นาย สิทธิพงษ์ แก้วพวง
3. นาย สิริชัย ศิริสรชัย
4. นาย สุขุม บุตรสวัสดิ์

  
.....อาจารย์ที่ปรึกษา  
(รศ.ร.อ.ดร.วีระเชษฐ์ ชันเงิน)

  
.....อาจารย์ที่ปรึกษา  
(รศ.ดร.ชัยวุฒิ ฉัตรอุทัย)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การศึกษาและประยุกต์ใช้งานมอเตอร์แบบฮับ

นาย สรุฑฒิ ธิวัชชัยเฉลิมกุล

นาย สิทธิพงษ์ แก้วพวง

นาย สิริชัย ศิริศรชัย

นาย สุขุม บุตรสวัสดิ์

รศ.ร.ดร.วีระเชษฐ ชันเงิน อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร.ชัยวุฒิ ฉัตรอุทัย อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2553

### บทคัดย่อ

จุดประสงค์ของโครงการนี้คือ นำเสนอหลักการทำงานของมอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่าน และการประยุกต์ใช้งานสำหรับจักรยานไฟฟ้า มอเตอร์แบบฮับพิกัดแรงดัน 36 โวลต์ 350 วัตต์ โดยทำการทดสอบประสิทธิภาพของมอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่าน เปรียบเทียบกับชนิดมีแปรงถ่านที่ความเร็วรอบเดียวกัน มอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่านจะใช้พลังงานน้อยกว่ามอเตอร์แบบฮับชนิดมีแปรงถ่าน 15.5 % ประสิทธิภาพของมอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่านมีค่า 76.7% ที่ขนาดกำลังด้านออก 141.2 วัตต์ จักรยานไฟฟ้าที่นำมอเตอร์แบบฮับมาประยุกต์ใช้ มีค่าความเร็วใช้งานสูงสุด 35 กม./ชม. ในการประจุไฟหนึ่งครั้งสามารถวิ่งได้ระยะทางสูงสุด 33.35 กม. เมื่อเปรียบเทียบความเร็วที่ 10 กม./ชม. และ 30 กม./ชม. ที่ระยะทาง 1 กม. จะใช้พลังงานเป็น 7.1 Wh และ 14.1 Wh ตามลำดับ ซึ่งความเร็วเพิ่มขึ้น 3 เท่าจะใช้พลังงานสูงขึ้น 2 เท่า และทำการเปรียบเทียบการใช้พลังงานที่มวลรวมคนขับที่ 87 กก. และ 138 กก. ที่ระยะทาง 1 กม. ด้วยความเร็ว 30 กม./ชม. จะใช้พลังงานเป็น 14.1 และ 19 Wh ตามลำดับ ซึ่งมวลเพิ่มขึ้น 58.55 % จะใช้พลังงานสูงขึ้น 1.35 เท่า ซึ่งเป็นการยืนยันว่ามวลที่เพิ่มขึ้นของผู้ขับที่มีผลต่อการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นของจักรยานไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## The Study and Application of Hub Motor

Sorrawut Thawatchaichalermkul

Sittipong Kaewphaung

Sirichai Sirisornchai

Sukhum Butrsawas

Assoc.Prof.Dr. Werachet Khan-Ngern Advisor

Assoc.Prof.Dr. Chaiwut Chat-Uthai Advisor

2550

### Abstract

This paper presents the principle of dc brushless hub motor (BLDC) and its application which is used for an electric bicycle at rated 36 V 350 W. The comparison of hub motor efficiency between BLDC and brush hub motor shows that BLDC consumes the energy 15.5 % less than of that brush hub motor. The efficiency of BLDC is 76.7 % at 141.2 W output power. BLDC electric bicycle can perform maximum speed at 35 km/hr which driving range at 33.35 km per charge. The comparison of energy between speed of 10 km/hr and 30 km/hr at 1 km driving range shows that the energy consumptions are 7.1 Wh and 14.1 Wh respectively which 3 times speed increasing results 2 times energy consumption. The comparison of energy between weight of electric bicycle plus driver 87 kg and 138 kg at 1 km driving range and speed of 30 km/hr shows that the energy consumptions are 14.1 Wh and 19 Wh respectively which 58.55 % weight increasing results 1.35 times energy consumption. It is confirmed that the total weight increasing affects the increased energy consumption.

## กิตติกรรมประกาศ

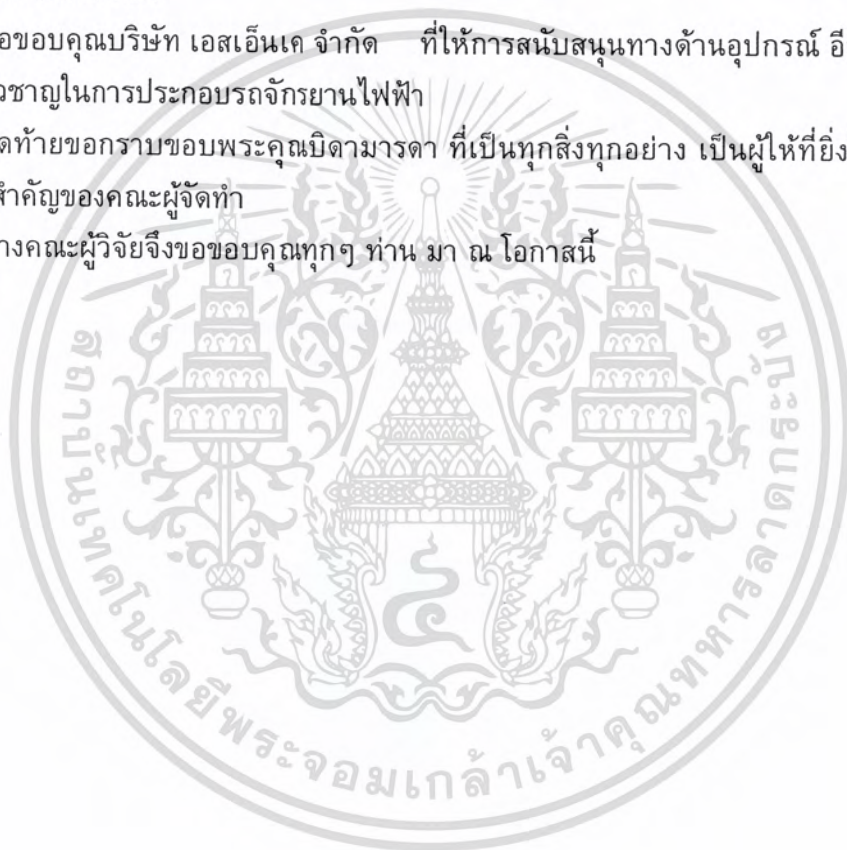
ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาของท่าน รศ. รอ.ดร.วีระเชษฐ์ ชันเงิน และ รศ.ดร.ชัชวุฒิ ฉัตรอุทัย ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาและอาจารย์ผู้ควบคุม ปริญญานิพนธ์ ทางคณะผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งในความกรุณาจากท่าน จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ อาจารย์และเจ้าหน้าที่ของภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าที่ให้ความรู้และความช่วยเหลือด้วยดีตลอดมา

ขอขอบคุณบริษัท เอสเอ็นเค จำกัด ที่ให้การสนับสนุนทางด้านอุปกรณ์ อีกทั้งคำแนะนำจากผู้เชี่ยวชาญในการประกอบรถจักรยานไฟฟ้า

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา ที่เป็นทุกสิ่งทุกอย่าง เป็นผู้ให้ที่ยิ่งใหญ่ และเป็นกำลังใจที่สำคัญของคณะผู้จัดทำ

ทางคณะผู้วิจัยจึงขอขอบคุณทุกๆ ท่าน มา ณ โอกาสนี้



## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ .....	I
ABSTRACT .....	II
กิตติกรรมประกาศ .....	III
สารบัญ .....	IV
สารบัญภาพ .....	VIII
สารบัญตาราง .....	XI
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2 วัตถุประสงค์และจุดมุ่งหมายของโครงการ .....	2
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ .....	2
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน .....	3
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการ .....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง .....	4
2.1 ทฤษฎีและหลักการพื้นฐานของมอเตอร์แบบฮับ .....	4
2.1.1 ชนิดของมอเตอร์แบบฮับ .....	5
2.1.2 โครงสร้างของมอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่าน .....	6
2.1.3 หลักการทำงานของมอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่าน .....	7
2.1.4 สรุปข้อดีข้อเสียของมอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่าน .....	11
2.1.5 ข้อจำกัดของมอเตอร์แบบฮับ .....	12
2.2 แบตเตอรี่ .....	12
2.2.1 เซลแบบตะกั่ว-กรด .....	13
2.2.2 การประจุกลับเข้าไปใหม่ .....	15
2.3 หลักการของอินเวอร์เตอร์ .....	17
2.3.1 แนวคิดพื้นฐานของสวิตช์โหมดอินเวอร์เตอร์ .....	17
2.3.2 การสวิตช์แบบพีดีบีเบิ้ลยูเอ็ม .....	19
2.4 อินเวอร์เตอร์เฟสเดียว .....	24
2.4.1 การสวิตช์แรงดันไฟฟ้าแบบไบโพลาร์ .....	25
2.4.2 การสวิตช์แรงดันไฟฟ้าแบบยูนิโพลาร์ .....	26

## สารบัญ(ต่อ)

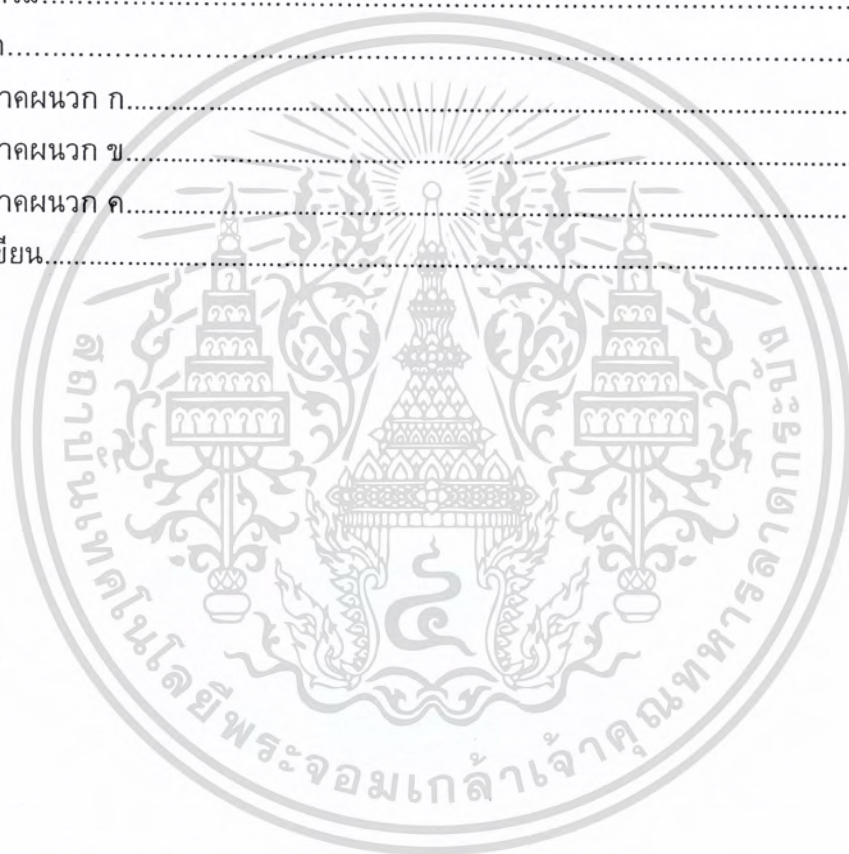
	หน้า
2.4.3 ค่าระลอกคลื่นของแรงดันไฟฟ้าด้านออกของอินเวอร์เตอร์เฟสเดียว.....	28
2.5 อินเวอร์เตอร์สามเฟส.....	29
2.5.1 อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าสามเฟสแบบพีดับเบิลยูเอ็ม.....	30
2.5.2 อินเวอร์เตอร์สามเฟสเมื่อทำงานในย่านมอดูเลชันเชิงเส้น ( $m_a \leq 1$ ) .....	31
2.5.3 อินเวอร์เตอร์สามเฟสเมื่อทำงานในย่านโอเวอร์มอดูเลชัน ( $m_a > 1$ ).....	32
2.5.4 อินเวอร์เตอร์สามเฟสเมื่อทำงานในย่านรูปคลื่นสี่เหลี่ยม.....	33
บทที่ 3 การทดสอบมอเตอร์แบบฮับ.....	34
3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือวัดทางไฟฟ้า.....	35
3.2 การทดสอบมอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่านแบบไม่มีภาระทางกล.....	35
3.2.1 จุดประสงค์การทดสอบ.....	35
3.2.2 วิธีการทดสอบ.....	35
3.2.3 ผลการทดสอบ.....	36
3.2.4 สรุปและวิจารณ์ผลที่ได้รับจากการทดสอบ.....	39
3.3 การทดสอบมอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่านแบบมีภาระทางกล.....	41
3.3.1 จุดประสงค์การทดสอบ.....	41
3.3.2 วิธีการทดสอบ.....	41
3.3.3 ผลการทดสอบ.....	42
3.3.4 สรุปและวิจารณ์ผลที่ได้รับจากการทดสอบ.....	45
3.4 การทดสอบมอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่านหลังขึ้นซีลล์.....	47
3.4.1 จุดประสงค์การทดสอบ.....	47
3.4.2 วิธีการทดสอบ.....	47
3.4.3 ผลการทดสอบ.....	48
3.4.4 สรุปและวิจารณ์ผลที่ได้รับจากการทดสอบ.....	50
3.5 การทดสอบเปรียบเทียบระหว่างมอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่าน กับมอเตอร์ แบบฮับชนิดมีแปรงถ่าน.....	51
3.5.1 จุดประสงค์การทดสอบ.....	51
3.5.2 วิธีการทดสอบ.....	52
3.5.2.1 การทดสอบมอเตอร์แบบฮับแบบไม่มีภาระทางกล.....	52
3.5.2.2 การทดสอบมอเตอร์แบบฮับแบบมีภาระทางกล.....	52

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.5.3 ผลการทดสอบ.....	53
3.5.3.1 ผลการทดสอบมอเตอร์แบบฮับแบบไม่มีภาระทางกล.....	53
3.5.3.2 ผลการทดสอบมอเตอร์แบบฮับแบบมีภาระทางกล.....	57
3.5.4 สรุปและวิจารณ์ผลที่ได้รับจากการทดสอบ.....	59
3.6 สรุปผลการทดสอบ.....	62
บทที่ 4 การทดสอบจกัรยานไฟฟ้า.....	63
4.1 ส่วนประกอบของรถจักรยานไฟฟ้า.....	63
4.2 การทดสอบรถจักรยานไฟฟ้าครั้งที่หนึ่ง.....	64
4.2.1 จุดประสงค์การทดสอบ.....	64
4.2.2 การทดสอบเปรียบเทียบพลังงานไฟฟ้าที่ใช้เมื่อจักรยานไฟฟ้ามี ความเร็วต่างกัน คือ 10, 20, 30 กม./ชม. และความเร็วสูงสุด.....	65
4.2.3 การทดสอบเปรียบเทียบพลังงานไฟฟ้าที่ใช้เมื่อผู้ขับขี่มีมวล ต่างกันคือ 55, 67 และ 106 กก.....	69
4.2.4 การทดสอบเปรียบเทียบช่วงเวลากการเร่งความเร็วจากหยุดนิ่งถึง ความเร็วสูงสุด.....	70
4.2.5 สรุปผลการทดสอบรถจักรยานไฟฟ้าครั้งที่หนึ่ง.....	71
4.3 การทดสอบรถจักรยานไฟฟ้าแบบใช้งานจริง.....	71
4.3.1 เส้นทางการทดสอบ.....	71
4.3.2 ผลการทดสอบ.....	72
4.3.2 สรุปผลการทดสอบ.....	74
4.4 การทดสอบรถจักรยานไฟฟ้าครั้งที่สอง.....	74
4.4.1 จุดประสงค์การทดสอบ.....	74
4.4.2 การศึกษาการตอบสนองต่อช่วงเวลากการเร่งความเร็วจาก 0 ถึง 30 กม./ชม.ภายใต้เงื่อนไขการเร่งความเร็วด้วยอัตราเร่งสูงสุด.....	75
4.4.3 การศึกษาการตอบสนองต่อช่วงเวลากการเร่งความเร็วจาก 0 ถึง 30 กม./ชม.ภายใต้เงื่อนไขช่วงเวลาเร่งความเร็วเท่ากันที่ 25 วินาที.....	79
4.4.4 การประจุไฟฟ้าครั้งหนึ่ง รถจักรยานไฟฟ้าวิ่งได้ระยะทางเท่าไร.....	82
4.4.5 สรุปผลการทดสอบรถจักรยานไฟฟ้าครั้งที่สอง.....	84

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	86
5.1 บทสรุป.....	86
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	87
5.3 สิ่งที่ควรดำเนินงานต่อ.....	87
บรรณานุกรม.....	88
ภาคผนวก.....	89
ภาคผนวก ก.....	90
ภาคผนวก ข.....	102
ภาคผนวก ค.....	113
ประวัติผู้เขียน.....	123



## สารบัญญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 มอเตอร์แบบฮับชนิดมีแปรงถ่าน (Brush DC Hub motor).....	5
2.2 มอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่าน (Brushless DC Hub motor).....	5
2.3 โครงสร้างของมอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่าน (Brushless DC Hub motor).....	6
2.4 อุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก (Latching Hall Effect).....	7
2.5 ลำดับการทำงานของมอเตอร์แบบฮับในสเต็ปที่หนึ่ง.....	8
2.6 ลำดับการทำงานของมอเตอร์แบบฮับในสเต็ปที่สอง.....	9
2.7 ลำดับการทำงานของมอเตอร์แบบฮับในสเต็ปที่สาม.....	9
2.8 ลำดับการทำงานของมอเตอร์แบบฮับในสเต็ปที่สี่.....	10
2.9 ลำดับการทำงานของมอเตอร์แบบฮับในสเต็ปที่ห้า.....	10
2.10 ลำดับการทำงานของมอเตอร์แบบฮับในสเต็ปที่หก.....	11
2.11 แสดงโครงสร้างของเซลล์แบบตะกั่ว-กรด แผ่นอาโนดและคาโทดจะวางสลับกันเพื่อ เพิ่มพื้นที่ผิวระหว่างกัน.....	13
2.12 ไอออนบวกของตะกั่วจะออกมา อาโนดเข้าไปในอิเล็กโทรไลต์ อิเล็กตรอนจะมี อิสระที่จะเข้าไปวงจรที่นำมาต่อภายนอก ซึ่งจะทำให้เกิดกระแสไหลจากคาโทด ไปยังอาโนด.....	14
2.13 โครงสร้างของแบตเตอรี่แบบตะกั่ว-กรดที่มีการปิดผนึก ซึ่งแบตเตอรี่ชนิดนี้สามารถ จะใช้ที่ใดก็ได้โดยจะไม่ปล่อยอิเล็กโทรไลต์ออกมา.....	15
2.14 การประจุแบตเตอรี่แบบตะกั่ว – กรด โดยใช้แหล่งจ่ายไฟที่มีแรงดันคงที่ ขนาด 1.1 ถึง 1.25 เท่าของแรงดันปกติของแบตเตอรี่.....	16
2.15 สวิตช์โหมตอินเวอร์เตอร์เฟสเดียว.....	18
2.16 สวิตช์โหมตอินเวอร์เตอร์เฟสเดียวที่หนึ่งกิ่ง.....	19
2.17 การสร้างสัญญาณสวิตชิงแบบพีดับเบิลยูเอ็ม.....	21
2.18 พีดับเบิลยูเอ็มแบบไซน์ (sinusoidal pulse width modulation: SPWM).....	22
2.19 รูปคลื่นพีดับเบิลยูเอ็มแบบโอเวอร์มอดูเลชัน.....	23
2.20 สเปกตรารูปคลื่นพีดับเบิลยูเอ็มแบบโอเวอร์มอดูเลชัน เมื่อ $m_a = 2.5$ , $m_f = 15$ .....	24
2.21 การควบคุมค่าแรงดันทางด้านออกของอินเวอร์เตอร์พีดับเบิลยูเอ็มโดยการปรับค่า .....	24

### VIII

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
2.22 อินเวอร์เตอร์เฟสเดียวแบบฮาร์ฟบริดจ์และแบบฟูลบริดจ์.....	25
2.23 การสวิตชิงแรงดันแบบไบโพลาร์.....	26
2.24 การสวิตชิงแรงดันไฟฟ้าแบบยูนิโพลาร์.....	28
2.25 ค่าแรงดันระลอกคลื่นแรงดันและกระแสไฟฟ้าด้านออกของอินเวอร์เตอร์เฟสเดียว (ก) การสวิตชิงแบบรูปคลื่นสี่เหลี่ยม (ข) การสวิตชิงแบบไบโพลาร์.....	29
2.26 วงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟส.....	29
2.27 รูปคลื่นและฮาร์โมนิกสเปคตร้าของอินเวอร์เตอร์สามเฟส.....	31
2.28 ความสัมพันธ์ระหว่าง $V_{LL}/V_d$ กับ $m_a$ ในอินเวอร์เตอร์สามเฟส.....	32
2.29 ความสัมพันธ์ระหว่าง $V_{LL}/V_d$ กับ $m_a$ ในอินเวอร์เตอร์สามเฟส.....	33
3.1 มอเตอร์แบบอับที่นำมาทดสอบ.....	34
3.2 วงจรการทดสอบ.....	35
3.3 วงจรการวัดรูปคลื่นสัญญาณแรงดัน.....	36
3.4 วงจรการวัดรูปคลื่นสัญญาณกระแส.....	36
3.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับแรงดันแบตเตอรี่.....	38
3.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับกระแสไฟฟ้าจากแบตเตอรี่.....	39
3.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับกำลังไฟฟ้า.....	39
3.8 รูปคลื่นแรงดันที่ได้จากออสซิลอโคป.....	40
3.9 รูปคลื่นกระแสที่ได้จากออสซิลอโคป.....	40
3.10 วงจรการทดสอบมอเตอร์แบบอับแบบมีภาระทางกล.....	41
3.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างทอร์กเอาต์พุตกับแรงดันแบตเตอรี่.....	44
3.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างทอร์กเอาต์พุตกับกระแสจากแบตเตอรี่.....	44
3.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างทอร์กเอาต์พุตกับกำลังไฟฟ้า(P1,P2) และกำลัง ทางกล(P3).....	45
3.14 กราฟแสดงย่านที่เหมาะสมกับการใช้งาน.....	46
3.15 รูปคลื่นแรงดันที่ได้จากออสซิลอโคป.....	46
3.16 มอเตอร์แบบอับหลังขึ้นซี่ล้อ.....	47
3.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับแรงดันแบตเตอรี่.....	49
3.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับกระแสจากแบตเตอรี่.....	49
3.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับกำลังไฟฟ้า.....	50

## สารบัญญภาพ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.20	มอเตอร์แบบฮับชนิดมีแปรงถ่านพิกัด 48 โวลต์.....53
3.21	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับแรงดันแบตเตอรี่ของวงล้อ มอเตอร์แบบฮับชนิดมีแปรงถ่านพิกัด 48 โวลต์.....56
3.22	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับกระแสจากแบตเตอรี่ของวงล้อ มอเตอร์แบบฮับชนิดมีแปรงถ่านพิกัด 48 โวลต์.....56
3.23	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับกำลังไฟฟ้าขาเข้าของวงล้อ มอเตอร์แบบฮับชนิดมีแปรงถ่านพิกัด 48 โวลต์.....57
3.24	รูปคลื่นแรงดันของมอเตอร์แบบฮับชนิดมีแปรงถ่านขณะมีความเร็วรอบเต็มพิกัด.....61
3.25	รูปคลื่นแรงดันของมอเตอร์แบบฮับชนิดมีแปรงถ่านขณะมีความเร็วรอบครึ่งพิกัด.....61
3.26	รูปคลื่นกระแสของมอเตอร์แบบฮับชนิดมีแปรงถ่านขณะมีความเร็วรอบเต็มพิกัด.....62
4.1	ส่วนประกอบต่างๆ ของรถจักรยานไฟฟ้า.....63
4.2	แผนภูมิแท่งเปรียบเทียบพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ต่อระยะทาง 1 กม.....69
4.3	เส้นทางการทดสอบรถจักรยานไฟฟ้าแบบใช้งานจริง.....72
4.4	กราฟความสัมพันธ์ของการเร่งความเร็วด้วยอัตราเร่งสูงสุด ระหว่างเวลากับ ความเร็ว.....78
4.5	กราฟความสัมพันธ์ของการเร่งความเร็วด้วยอัตราเร่งสูงสุด ระหว่างเวลากับ พลังงาน.....78
4.6	กราฟความสัมพันธ์ของเวลากับความเร็วซึ่งมีช่วงเวลาเร่งความเร็วเท่ากันที่ 25 วินาที.....79
4.7	กราฟความสัมพันธ์ของเวลากับพลังงานซึ่งมีช่วงเวลาเร่งความเร็วเท่ากันที่ 25 วินาที.....82
4.8	ความเร็วสูงสุดของรถจักรยานไฟฟ้า 35 กม./ชม.....85

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่าง Brush กับ Brushless Hub Motor.....6
2.2	เงื่อนไขการสวิตชิง แรงดันเฟสและแรงดันไฟฟ้าด้านนอกของอินเวอร์เตอร์แบบ ยูนิโพลาร์.....27
3.1	ผลการทดสอบมอเตอร์แบบฮับแบบไม่มีภาระทางกล.....37
3.2	ผลการทดสอบมอเตอร์แบบฮับแบบมีภาระทางกล.....43
3.3	ผลการทดสอบมอเตอร์แบบฮับหลังขึ้นซี่ล้อ.....48
3.4	ผลการทดสอบมอเตอร์แบบฮับหลังขึ้นซี่ล้อเปรียบเทียบกับก่อนขึ้นซี่ล้อ.....51
3.5	ผลการทดสอบวงล้อมอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่านพิกัด 36 โวลต์ แบบไม่มี ภาระทางกล.....54
3.6	ผลการทดสอบวงล้อมอเตอร์แบบฮับชนิดมีแปรงถ่านพิกัด 48 โวลต์ แบบไม่มี ภาระทางกล.....55
3.7	ผลการทดสอบวงล้อมอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่านพิกัด 36 โวลต์ โดยใช้วิธี การกำจัดสเบรค.....57
3.8	ผลการทดสอบวงล้อมอเตอร์แบบฮับชนิดมีแปรงถ่านพิกัด 48 โวลต์ โดยใช้วิธี การกำจัดสเบรค.....58
3.9	ผลการทดสอบวงล้อมอเตอร์แบบฮับชนิดมีแปรงถ่านพิกัด 48 โวลต์ ที่ความเร็ว เต็มพิกัด โดยใช้วิธีการกำจัดสเบรค.....58
3.10	ผลการทดสอบวงล้อมอเตอร์แบบฮับชนิดมีแปรงถ่านพิกัด 48 โวลต์ โดยใช้โรเลอร์ เป็นภาระทางกล.....59
3.11	ข้อมูลต่างๆ ของมอเตอร์แบบฮับทั้งสองแบบที่ความเร็วรอบใกล้เคียงกัน.....60
4.1	ผู้ทดสอบคนที่ 1 น้ำหนักรวมจักรยาน 87 กก. ทดสอบที่ความเร็ว 10 กม./ชม.....65
4.2	ผู้ทดสอบคนที่ 1 น้ำหนักรวมจักรยาน 87 กก. ทดสอบที่ความเร็ว 20 กม./ชม.....65
4.3	ผู้ทดสอบคนที่ 1 น้ำหนักรวมจักรยาน 87 กก. ทดสอบที่ความเร็ว 30 กม./ชม.....66
4.4	ผู้ทดสอบคนที่ 1 น้ำหนักรวมจักรยาน 87 กก. ทดสอบที่ความเร็วสูงสุด.....66
4.5	ผู้ทดสอบคนที่ 2 น้ำหนักรวมจักรยาน 99 กก. ทดสอบที่ความเร็ว 10 กม./ชม.....66
4.6	ผู้ทดสอบคนที่ 2 น้ำหนักรวมจักรยาน 99 กก. ทดสอบที่ความเร็ว 20 กม./ชม.....67
4.7	ผู้ทดสอบคนที่ 2 น้ำหนักรวมจักรยาน 99 กก. ทดสอบที่ความเร็ว 30 กม./ชม.....67
4.8	ผู้ทดสอบคนที่ 2 น้ำหนักรวมจักรยาน 99 กก. ทดสอบที่ความเร็วสูงสุด.....67

## สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.9	ผู้ทดสอบคนที่ 3 น้ำหนักรวมจักรยาน 138 กก. ทดสอบที่ความเร็ว 10 กม./ชม.....68
4.10	ผู้ทดสอบคนที่ 3 น้ำหนักรวมจักรยาน 138 กก. ทดสอบที่ความเร็ว 20 กม./ชม.....68
4.11	ผู้ทดสอบคนที่ 3 น้ำหนักรวมจักรยาน 138 กก. ทดสอบที่ความเร็วสูงสุด.....68
4.12	ผลการทดสอบเปรียบเทียบพลังงานไฟฟ้าที่ใช้เมื่อผู้ขับขี่มีน้ำหนักต่างกัน.....69
4.13	ผลการทดสอบเปรียบเทียบช่วงเวลาการเร่งความเร็วจากหยุดนิ่งถึงความเร็วสูงสุด .....70
4.14	ข้อมูลการทดสอบรถจักรยานไฟฟ้าแบบใช้งานจริง.....72
4.15	ผลการเร่งความเร็วด้วยอัตราเร่งสูงสุด เมื่อน้ำหนักผู้ทดสอบรวมรถ 87 กก.....75
4.16	ผลการเร่งความเร็วด้วยอัตราเร่งสูงสุด เมื่อน้ำหนักผู้ทดสอบรวมรถ 99 กก.....76
4.17	ผลการเร่งความเร็วด้วยอัตราเร่งสูงสุด เมื่อน้ำหนักผู้ทดสอบรวมรถ 138 กก.....77
4.18	ผลการเร่งความเร็วด้วยช่วงเวลาเร่ง 25 วินาที น้ำหนักผู้ทดสอบรวมรถ 87 กก.....80
4.19	ผลการเร่งความเร็วด้วยช่วงเวลาเร่ง 25 วินาที น้ำหนักผู้ทดสอบรวมรถ 99 กก.....81
4.20	ข้อมูลการทดสอบจักรยานไฟฟ้าจนแบตเตอรี่หมด.....83
4.21	ระยะทางที่ขับขี่ได้จากการทดสอบจักรยานไฟฟ้าจนแบตเตอรี่หมด.....83

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ในสภาวะการณ์ปัจจุบันความต้องการใช้ยานพาหนะมีมากขึ้นทุกปีตามจำนวนประชากรที่เพิ่มมากขึ้นทุกขณะ การใช้รถยนต์สันดาปภายในมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลาย และเป็นหลักในระบบคมนาคมขนส่ง เพราะรถยนต์และรถจักรยานยนต์สันดาปภายในช่วยเพิ่มความสะดวกสบายและความรวดเร็วในการเดินทาง ส่วนใหญ่พลังงานที่ใช้ในรถยนต์สันดาปภายในจะเป็นพลังงานที่ได้มาจากเชื้อเพลิงฟอสซิลในการขับเคลื่อน และเป็นต้นกำลังในการทำงานของระบบต่างๆภายในยานพาหนะสันดาปภายใน โดยเฉพาะน้ำมันที่มีความสำคัญมากกับยานพาหนะทุกประเภท แต่ในทางกลับกัน รถที่ใช้เครื่องยนต์สันดาปภายในนั้น ก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศมากมาย ซึ่งปล่อยออกมาทางท่อไอเสีย ไม่ว่าจะเป็นรูปของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เขม่าควัน ฝุ่นละอองและสารพิษต่างๆ อันเป็นผลทำให้เกิดสภาวะโลกร้อน นอกจากนี้ยังทำให้เกิดมลภาวะทางเสียง มีเสียงดังรบกวน

การใช้ยานพาหนะเพิ่มมากขึ้นทุกวัน แต่ปริมาณน้ำมันดิบสำรองและแหล่งเชื้อเพลิงฟอสซิลที่นับวันจะมีปริมาณลดลงอย่างต่อเนื่องและกำลังจะหมดไปภายในอีกไม่กี่ปีข้างหน้า อีกทั้งไม่สามารถหามาเพิ่มจำนวนได้ เพราะเชื้อเพลิงฟอสซิลต้องใช้เวลาอันนานมากที่จะเกิดเป็นเชื้อเพลิงในชั้นใต้ดิน มีผลทำให้ประเทศในกลุ่มโอเปค ลดปริมาณการผลิตน้ำมันลง ทำให้ราคาเชื้อเพลิงสูงขึ้น ส่งผลกระทบต่อประเทศที่กำลังพัฒนาอย่างประเทศไทย ทำให้ราคาค่าขนส่งและต้นทุนต่างๆ ในชีวิตประจำวันสูงขึ้น ทำให้ค่าครองชีพสูงตามไปด้วย แม้รัฐบาลจะมีการออกมาตรการมาหลายอย่างเพื่อลดผลกระทบดังกล่าว ก็เพียงแต่มาตรการที่ออกมาเพื่อเป็นการแก้ปัญหาในระยะสั้นๆเท่านั้นไม่สามารถที่จะแก้ปัญหาในระยะยาวได้

จากความก้าวหน้าของเทคโนโลยีทางด้านเพาเวอร์อิเล็กทรอนิกส์ที่พัฒนาไปไกล ประกอบกับการเล็งเห็นถึงความสำคัญของการอนุรักษ์และพัฒนาสิ่งแวดล้อม ทำใหยานพาหนะที่ใช้ไฟฟ้าที่จะเป็นพลังงานที่สำคัญในอนาคต เป็นหนทางใหม่แทนการใช้รถยนต์และรถจักรยานยนต์สันดาปภายในซึ่งถือได้ว่าเป็นรถต้นแบบที่ไม่ใช้พลังงานจากน้ำมันไร้มลภาวะและจะเป็นแนวทางในการออกแบบรถยนต์รุ่นใหม่ๆอีกต่อไป โดยยานพาหนะที่ใช้ไฟฟ้าสามารถให้ประสิทธิภาพการทำงานสูงกว่า และไม่ก่อให้เกิดปัญหามลพิษที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

มอเตอร์แบบฮับถูกออกแบบมาเพื่อใช้กับรถจักรยานไฟฟ้าและรถมอเตอร์ไซด์ไฟฟ้า มอเตอร์แบบฮับจะถูกวางอยู่ที่ตำแหน่งแกนล้อ ทำหน้าที่ขับเคลื่อนโดยตรง ทำให้ลดพื้นที่ในการใช้งานให้น้อยลง เนื่องจากไม่มีระบบเฟืองเกียร์ จึงทำให้มีขนาดเล็ก มีน้ำหนักเบา สะดวกในการใช้งาน ไม่มีความสูญเสียที่ระบบเฟืองเกียร์ มีเสถียรภาพในการทำงาน เมื่อเปรียบเทียบกับมอเตอร์ชนิดอื่น ๆ มอเตอร์แบบฮับมีข้อดีและความน่าเชื่อถือมากกว่า ทำให้มีผู้คนเริ่มให้ความสนใจ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สนใจเพิ่มมากขึ้น และใช้งานอย่างแพร่หลาย ในโครงการนี้จึงขอเสนอการศึกษาและประยุกต์ใช้งานมอเตอร์แบบฮับ(hub motor) เพื่อทำความเข้าใจหลักการทำงานและสามารถใช้งานมอเตอร์แบบฮับได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยทำการทดสอบสมรรถนะของมอเตอร์แบบฮับและจักรยานไฟฟ้าที่สร้างขึ้นในกรณีต่างๆ

## 1.2 วัตถุประสงค์และจุดมุ่งหมายของโครงการ

1.2.1 ศึกษาและทดสอบสมรรถนะมอเตอร์แบบฮับ

1.2.2 เพื่อสร้างรถจักรยานไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพสูงและสามารถนำมอเตอร์แบบฮับมาดัดแปลงใช้กับพาหนะชนิดอื่นๆ

1.2.3 เพื่อศึกษาการใช้พลังงานที่ความเร็วต่างกัน ภายใต้กรอบอ้างอิงเดียวกัน

1.2.4 เพื่อศึกษาการใช้พลังงานที่น้ำหนักผู้ขับขี่รวมรถจักรยานไฟฟ้าต่างกัน ภายใต้กรอบอ้างอิงเดียวกัน

1.2.5 เพื่อเป็นการรณรงค์ให้ลดใช้พลังงานน้ำมันซึ่งประเทศไทยไม่สามารถผลิตได้เอง และต้องนำเข้ามาเป็นจำนวนหลายล้านบาร์เรลต่อปีทำให้ประเทศไทยต้องเสียดุลการค้าทางด้านการมาเป็นเวลานานแล้ว

1.2.6 เพื่อเป็นต้นแบบยานพาหนะที่ช่วยในการอนุรักษ์ธรรมชาติ ไม่ทำลายสิ่งแวดล้อม เพราะไม่มีการเผาไหม้ที่ทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide) ซึ่งเป็นมลพิษทางอากาศที่ทำให้เกิดสภาวะโลกร้อนในปัจจุบัน

1.2.7 เพื่อเป็นการรณรงค์ให้ใช้ยานพาหนะที่ไม่มีเสียงรบกวน ที่ทำให้เกิดการรบกวนบุคคลรอบข้าง

## 1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ

1.3.1 ศึกษาหลักการการทำงานของมอเตอร์แบบฮับ

1.3.2 ออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาสมรรถนะของมอเตอร์แบบฮับกระแสตรงชนิดไม่มีแปรงถ่าน

1.3.3 ออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาสมรรถนะของมอเตอร์แบบฮับกระแสตรงชนิดมีแปรงถ่าน

1.3.4 เปรียบเทียบสมรรถนะความเหมาะสม ตลอดจนข้อดีข้อเสียระหว่างมอเตอร์แบบฮับกระแสตรงชนิดไม่มีแปรงถ่าน กับมอเตอร์แบบฮับกระแสตรงชนิดมีแปรงถ่าน

1.3.5 นำมอเตอร์แบบฮับ ไปใช้เป็นส่วนประกอบของรถจักรยานไฟฟ้าที่สามารถใช้งานได้จริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3.6 ทดสอบสมรรถนะของรถจักรยานไฟฟ้า ที่สร้างขึ้นจากมอเตอร์แบบฮับกระแสตรง ชนิดไม่มีแปรงถ่าน

1.3.7 เก็บผลการทดลองเพื่อนำเสนอผลการศึกษาและจัดทำปฏิญานินพนธ์

#### 1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

1.4.1 ศึกษาและค้นคว้าข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับโครงการงาน

1.4.2 ศึกษาหลักการการทำงานของมอเตอร์แบบฮับ

1.4.3 ออกแบบและสร้างแท่นทดสอบไว้ทำการทดสอบมอเตอร์แบบฮับ

1.4.4 ทดสอบสมรรถนะของมอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่าน โดยไม่มีภาระทางกล

1.4.5 ทดสอบสมรรถนะของมอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่าน โดยรับภาระทางกล

1.4.6 นำมอเตอร์แบบฮับ ไปขึ้นซี่ล้อเป็นวงล้อจักรยานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 26 นิ้ว

1.4.7 ทำการทดสอบมอเตอร์ที่ขึ้นซี่ล้อแบบไม่มีภาระทางกล

1.4.8 เปรียบเทียบสมรรถนะของมอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่าน (Brushless DC Hub motor) กับ ชนิดมีแปรงถ่าน (Brush DC Hub motor) โดยทำการทดสอบสมรรถนะของมอเตอร์แบบฮับทั้ง 2 ชนิด

1.4.9 สร้างรถจักรยานไฟฟ้าโดยใช้มอเตอร์แบบฮับเป็นส่วนประกอบ

1.4.10 ทำการทดสอบสมรรถนะรถจักรยานไฟฟ้าที่สร้างขึ้น

1.4.11 สรุปผลการทดลอง

1.4.12 นำเสนอผลการศึกษาและจัดทำปฏิญานินพนธ์

#### 1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการงาน

1.5.1 มีความรู้ความเข้าใจในระบบการทำงานของมอเตอร์แบบฮับ

1.5.2 มีความรู้ความเข้าใจในระบบการทำงานของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส

1.5.3 สามารถคิดค้นวิธีการทดสอบประสิทธิภาพของมอเตอร์แบบฮับ และนำไปประยุกต์ใช้กับมอเตอร์ชนิดอื่นได้

1.5.4 สามารถวิเคราะห์การใช้พลังงานในรถจักรยานไฟฟ้าที่สภาวะการขับขี่ที่ต่างกันได้

1.5.5 มีความรู้ความสามารถในการใช้อุปกรณ์เครื่องมือวัดต่างๆ

## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ทฤษฎีและหลักการพื้นฐานของมอเตอร์แบบฮับ

มอเตอร์แบบฮับ (Hub motor) เป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดหนึ่ง ต่างไปจากมอเตอร์ธรรมดาที่เห็นได้ชัดคือ ส่วนที่หมุนหรือโรเตอร์จะอยู่รอบนอก โดยที่ส่วนโรเตอร์นี้จะมีแม่เหล็กถาวรแรงสูง (Rare earth) ส่วนขดลวดอาร์มาเจอร์จะอยู่ด้านในโดยถูกยึดติดอยู่กับแกนล้อ มอเตอร์แบบฮับถูกออกแบบมาเพื่อใช้กับรถจักรยานไฟฟ้าและรถมอเตอร์ไซด์ไฟฟ้า มอเตอร์แบบฮับจะถูกวางอยู่ที่ตำแหน่งแกนล้อ ทำหน้าที่ขับเคลื่อนโดยตรง ทำให้ลดพื้นที่ในการใช้งานให้น้อยลง เนื่องจากไม่มีระบบเฟืองเกียร์ จึงทำให้มีขนาดเล็ก มีน้ำหนักเบา สะดวกในการใช้งาน ไม่มีความสูญเสียที่ระบบเฟืองเกียร์ มีเสถียรภาพในการทำงาน เมื่อเปรียบเทียบกับมอเตอร์ชนิดอื่นๆ มอเตอร์แบบฮับมีข้อดีและความน่าเชื่อถือมากกว่า ทำให้มีผู้คนเริ่มให้ความสนใจเพิ่มมากขึ้น และใช้งานอย่างแพร่หลาย อีกทั้งยังเกี่ยวเนื่องมาจากสถานการณ์ปัจจุบัน การใช้รถยนต์สันดาปภายในมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลาย และเป็นหลักในระบบคมนาคมขนส่ง เพราะรถยนต์และรถจักรยานยนต์สันดาปภายในช่วยเพิ่มความสะดวกสบายและความรวดเร็วในการเดินทาง แต่ในทางกลับกัน ก็ก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศมากมาย ซึ่งปล่อยออกมาทางท่อไอเสีย ไม่ว่าจะในรูปแบบของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เขม่าควัน ฝุ่นละอองและสารพิษต่างๆ อันเป็นผลทำให้เกิดสภาวะโลกร้อน นอกจากนี้ยังทำให้เกิดมลภาวะทางเสียง ที่สำคัญยังมีปัญหาเรื่องแหล่งเชื้อเพลิงฟอสซิล ที่นับวันจะมีปริมาณลดลงอย่างต่อเนื่อง มีผลทำให้ราคาเชื้อเพลิงสูงขึ้นจากความก้าวหน้าของเทคโนโลยีทางด้านเพาเวอร์อิเล็กทรอนิกส์ ประกอบกับการเล็งเห็นถึงความสำคัญของการอนุรักษ์และพัฒนาสิ่งแวดล้อม ทำให้ยานพาหนะที่ใช้ไฟฟ้าเป็นหนทางใหม่แทนการใช้รถยนต์และรถจักรยานยนต์สันดาปภายใน โดยยานพาหนะที่ใช้ไฟฟ้าสามารถให้ประสิทธิภาพการทำงานสูงกว่า และไม่ก่อให้เกิดปัญหามลพิษที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม มอเตอร์แบบฮับจึงได้เกิดขึ้นและถูกพัฒนามาอย่างต่อเนื่อง

#### ประวัติความเป็นมา

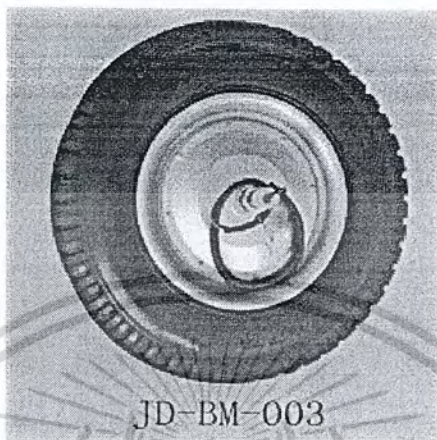
แนวคิดเริ่มแรกของมอเตอร์แบบฮับเกิดขึ้นในปี ค.ศ.1884 เมื่อ Wellington Adams ได้นำมอเตอร์ไฟฟ้าไปขับเคลื่อนในล้อรถโดยตรง อย่างไรก็ตามมอเตอร์ไฟฟ้ายังต้องเชื่อมกับระบบเฟืองเกียร์ ของเครื่องยนต์อยู่ ต่อมาในปีค.ศ.1890 Albert Parcellle ได้พัฒนาให้เป็นมอเตอร์แบบฮับครั้งแรก และตั้งชื่อว่า Electro-Motor Traction Wheel ในปีเดียวกัน Edward Parkhurst ได้สร้าง มอเตอร์แบบฮับที่มีทอร์กสูงแต่มีความเร็วรอบต่ำโดยได้รวมมอเตอร์กับล้อเข้าด้วยกันแต่ไม่มีชุดเฟืองเกียร์ ซึ่งถือว่าเป็นครั้งแรกที่มอเตอร์แบบฮับซึ่งมีประสิทธิภาพ ถูกสร้างและใช้งานอย่างจริงจัง มอเตอร์แบบฮับยังคงถูกพัฒนามาตลอดจนปัจจุบันทำให้ได้มอเตอร์ที่มีประสิทธิภาพสูงและเหมาะแก่การใช้งานตามต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.1 ชนิดของมอเตอร์แบบฮับ

มอเตอร์แบบฮับสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดด้วยกัน คือ

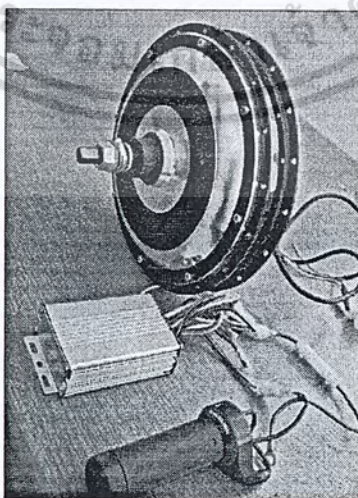
1. มอเตอร์แบบฮับชนิดมีแปรงถ่าน (Brush DC Hub motor)



รูปที่ 2.1 มอเตอร์แบบฮับชนิดมีแปรงถ่าน (Brush DC Hub motor)

มอเตอร์แบบฮับชนิดมีแปรงถ่าน (Brush DC Hub motor) เป็นมอเตอร์แบบฮับชนิดที่มีแปรงถ่านและซีคอมมิวเตเตอร์เหมือน DC มอเตอร์ทั่วไป จะสังเกตเห็นว่ามีสายไฟออกจากตัวมอเตอร์เพียงสองเส้น คือ ไฟบวก(เส้นสีแดง) กับไฟลบ(เส้นสีดำ) มีความซับซ้อนในชุดคอนโทรลน้อย ราคาไม่แพงนัก แต่จะมีการเสียดสีกันระหว่างแปรงถ่านกับซีคอมมิวเตเตอร์ ทำให้เกิดประกายไฟ เกิดการสึกกร่อนของซีคอมมิวเตเตอร์ เกิดความสูญเสียในรูปความร้อนทำให้ประสิทธิภาพลดลง

2. มอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่าน (Brushless DC Hub motor)



รูปที่ 2.2 มอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่าน (Brushless DC Hub motor)

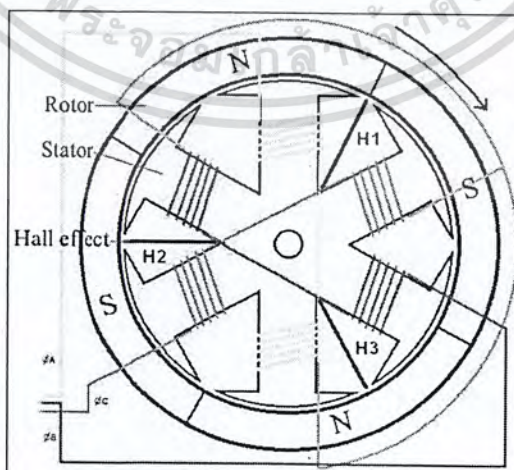
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่าน (Brushless DC Hub motor) เป็นมอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่านและซีคอมมิวเตเตอร์ จะสังเกตเห็นว่ามีสายไฟออกจากตัวมอเตอร์สองชุดด้วยกันคือ ชุดของขดลวดอาร์มาเจอร์สามเฟส จะมีสามเส้นด้วยกัน คือ เหลือง เขียวและน้ำเงิน กับอีกชุดเป็นของชุดตรวจจับสนามแม่เหล็ก(Hall effect sensor) มีด้วยกันห้าสายคือ ไฟจ่ายตัวตรวจจับสองสาย กับไฟที่ส่งผลการตรวจจับอีกสามสาย เนื่องจากมอเตอร์แบบฮับชนิดนี้ไม่มีแปรงถ่านและซีคอมมิวเตเตอร์ จึงไม่เกิดความสูญเสียจากการเสียดสี ลดสัญญาณรบกวนEMI ลดการสั่นสะเทือน ไม่ก่อให้เกิดความร้อน มีโครงสร้างที่มิดชิด สามารถป้องกันสิ่งสกปรกจากภายนอก ทำให้อายุการใช้งานยาวนานขึ้น อีกทั้งยังมีความน่าเชื่อถือสูง มอเตอร์ชนิดนี้จึงมีประสิทธิภาพที่สูงกว่าและเป็นที่ยอมรับนำมาใช้ทำรถจักรยานไฟฟ้ามากที่สุด แต่มีข้อเสียคือ มีความยุ่งยากซับซ้อนที่ชุดคอนโทรลและราคาแพง มีทอร์กขณะออกตัวต่ำ ทำให้มีการออกตัวช้าไม่กระชาก

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่าง Brush กับ Brushless Hub Motor

ข้อเปรียบเทียบ	Brush Hub Motor	Brushless Hub Motor
ขนาดและน้ำหนัก	มากกว่า	น้อยกว่า
ประสิทธิภาพ	น้อยกว่า	มากกว่า
ราคา	ถูกกว่า	แพงกว่า
อายุการใช้งาน	น้อยกว่า	นานกว่า
สายไฟที่ออกจากมอเตอร์	2 สาย	8 สาย

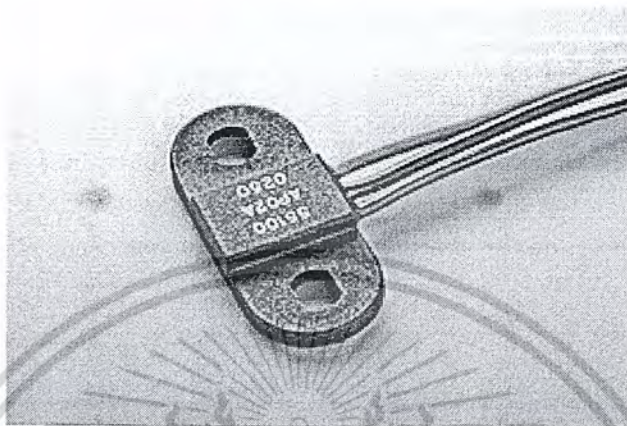
### 2.1.2 โครงสร้างของมอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่าน



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของมอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่าน (Brushless DC Hub motor)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างของมอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่าน (Brushless DC Hub motor) โดยหลักๆ ประกอบไปด้วยสามส่วนด้วยกัน คือ ส่วนโรเตอร์ซึ่งบริเวณนี้จะมีแม่เหล็กถาวรแรงสูง (rare earth) อยู่โดยรอบ ส่วนสเตเตอร์และส่วนของตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กที่ติดอยู่กับส่วนสเตเตอร์



รูปที่ 2.4 อุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก (Latching Hall Effect)

### 2.1.3 หลักการทำงานของมอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่าน

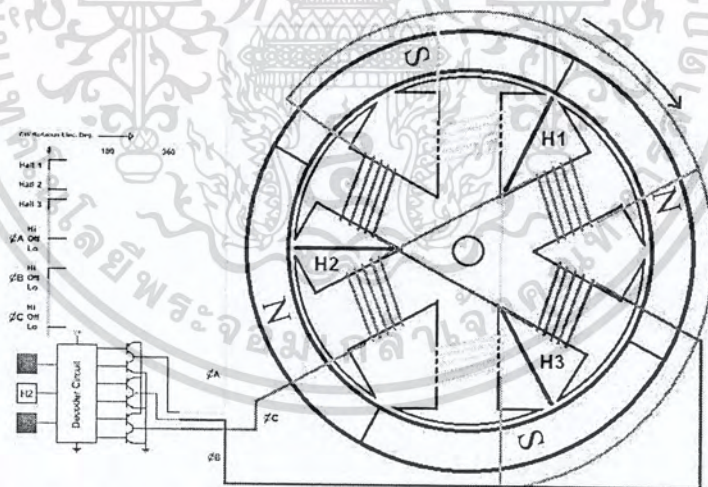
หลักการทำงานของมอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่าน (Brushless DC Hub motor) มีหลักการทำงานที่เหมือนกับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำทั่วไป โดยจะมีสนามแม่เหล็กหมุนสองสนามหมุนตามกันไป และจะกระทำมุมต่อกันเป็นมุมเดล ปัจจัยที่ทำให้มอเตอร์ชนิดนี้ทำงานหรือหมุนได้นั้น นอกจากขดลวด 3 เฟส ที่สเตเตอร์ และแท่งแม่เหล็กถาวรที่โรเตอร์แล้ว ยังมีอุปกรณ์ที่สำคัญ ซึ่งทำหน้าที่แทนแปรงถ่าน และคอมมิวเตเตอร์ คือ อุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กอีก 3 ชุด ซึ่งเรียกว่า LATCHING HALL EFFECT SENSOR ติดตั้งเป็นส่วนหนึ่งของสเตเตอร์ โดยจะคอยตรวจจับสนามแม่เหล็กชั่วคราวที่โรเตอร์ ที่หมุนผ่านตัวมันจากนั้นจึงส่งสัญญาณการเปลี่ยนแปลงนี้ (SENSOR PHASING หรือ CODE) ไปยังกล่องควบคุมมอเตอร์ เพื่อทำการแปลงสัญญาณ (DECODE) และส่ง OUTPUT VOLTAGE ไปยังขดลวดสเตเตอร์แต่ละเฟส เพื่อให้เกิดการดูดและผลักกันระหว่างสนามแม่เหล็กในขดลวดสเตเตอร์ และสนามแม่เหล็กถาวรของโรเตอร์ มอเตอร์ชนิดนี้ใน 1 รอบ จะต้องทำงาน 6 ครั้ง หรือ 6 สเต็ป ดังนั้น SENSOR PHASING หรือ CODE จึงต้องมีสัญญาณความแตกต่างกันถึง 6 ชนิด จึงจะถือว่าทำงานครบ 1 รอบ และจะหมุนเวียนซ้ำกันเช่นนี้ตลอดไป

ตารางที่ 2.2 ลำดับการทำงานของมอเตอร์แบบฮับ

State	Hall - 1	Hall - 2	Hall - 3	Phase - A	Phase - B	Phase - C
1	1	0	1	0	+Vdc	-Vdc
2	1	0	0	-Vdc	+Vdc	0
3	1	1	0	-Vdc	0	+Vdc
4	0	1	0	0	-Vdc	+Vdc
5	0	1	1	+Vdc	-Vdc	0
6	0	0	1	+Vdc	0	-Vdc

จากตารางที่ 2.2 ลำดับการทำงานของมอเตอร์แบบฮับ จะเห็นว่า LATCHING HALL EFFECT SENSOR ทั้ง 3 ตัวทำหน้าที่เหมือนคอมมิวเตเตอร์ โดยส่งสัญญาณเพื่อให้กล่องควบคุมทำการตัดต่อและสลับขั้วบวกขั้วลบของแรงดัน ที่เข้าขดลวดสเตเตอร์แต่ละเฟส และทำให้มอเตอร์เกิดการหมุนไปตามการควบคุมดังกล่าวได้

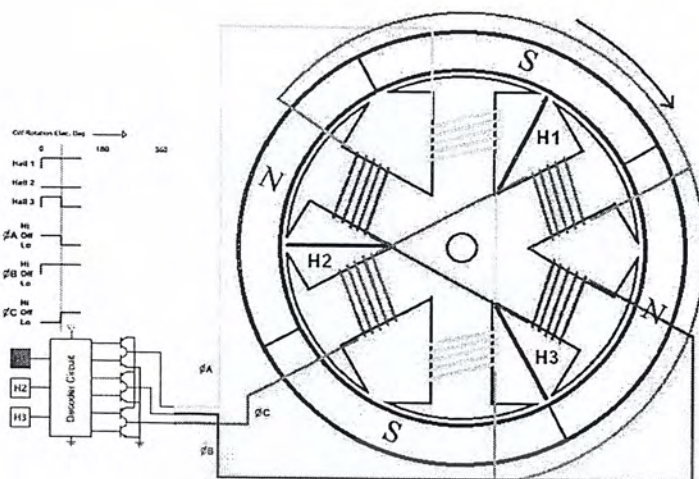
การทำงานในสเต็ปที่หนึ่ง Hall-1 และ Hall-3 จะตรวจเจอขั้วแม่เหล็ก จากนั้นจะส่งผลการตรวจจับไปยังส่วนคอลโทรลเลอร์ ทำการประมวลผลจ่ายไฟ +Vdc ให้กับ Phase - B และจ่ายไฟ -Vdc ให้กับ Phase - C



รูปที่ 2.5 ลำดับการทำงานของมอเตอร์แบบฮับในสเต็ปที่หนึ่ง

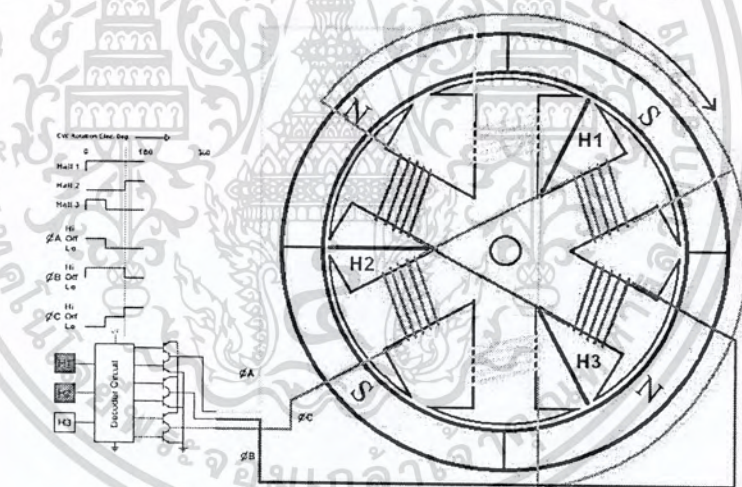
การทำงานในสเต็ปที่สอง Hall-1 จะตรวจเจอขั้วแม่เหล็ก จากนั้นจะส่งผลการตรวจจับไปยังส่วนคอลโทรลเลอร์ ทำการประมวลผลจ่ายไฟ -Vdc ให้กับ Phase - A และจ่ายไฟ +Vdc ให้กับ Phase - B

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 ลำดับการทำงานของมอเตอร์แบบฮับในสเต็ปที่สอง

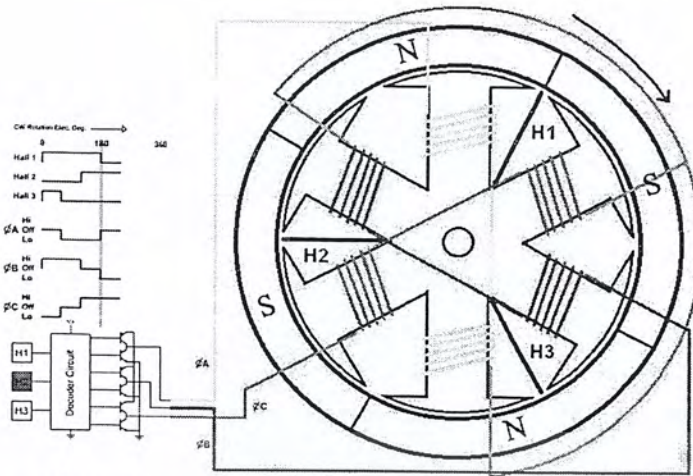
การทำงานของสเต็ปที่สาม Hall-1 และ Hall-2 จะตรวจเจอขั้วแม่เหล็ก จากนั้นจะส่งผลการตรวจไปยังส่วนคอลโทรลเลอร์ ทำการประมวลผลจ่ายไฟ  $-V_{dc}$  ให้กับ Phase – A และจ่ายไฟ  $+V_{dc}$  ให้กับ Phase – C



รูปที่ 2.7 ลำดับการทำงานของมอเตอร์แบบฮับในสเต็ปที่สาม

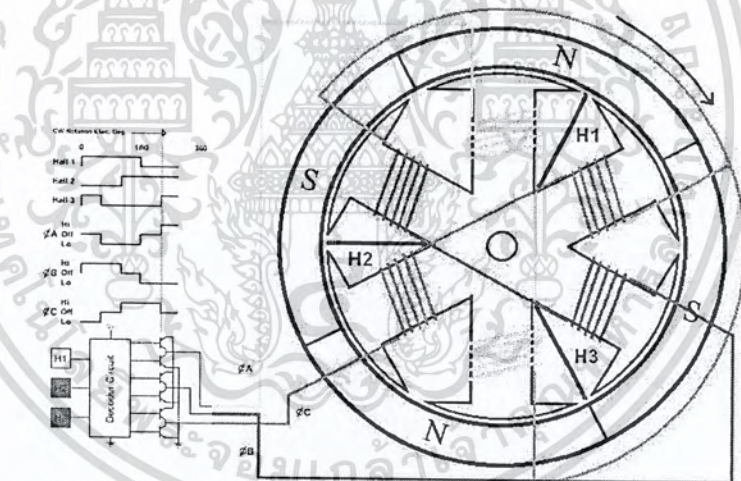
การทำงานของสเต็ปที่สี่ Hall-2 จะตรวจเจอขั้วแม่เหล็ก จากนั้นจะส่งผลการตรวจไปยังส่วนคอลโทรลเลอร์ ทำการประมวลผลจ่ายไฟ  $-V_{dc}$  ให้กับ Phase – B และจ่ายไฟ  $+V_{dc}$  ให้กับ Phase – C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



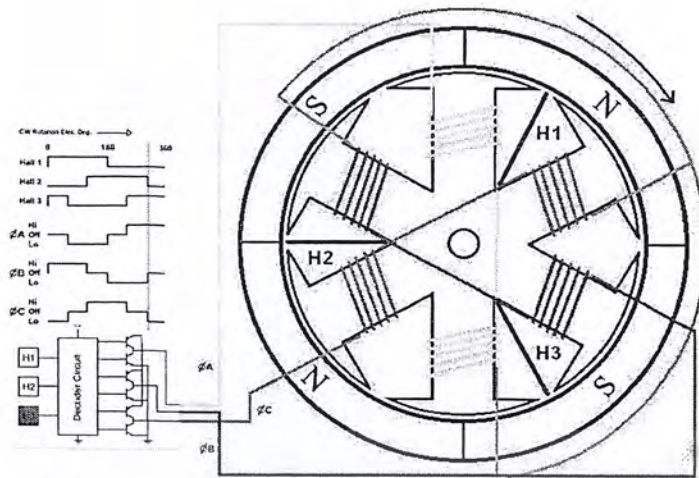
รูปที่ 2.8 ลำดับการทำงานของมอเตอร์แบบฮับในสเต็ปที่สี่

การทำงานในสเต็ปที่ห้า Hall-2 และ Hall-3 จะตรวจเจอขั้วแม่เหล็ก จากนั้นจะส่งผลการตรวจจับไปยังส่วนคอลโทรลเลอร์ ทำการประมวลผลจ่ายไฟ +Vdc ให้กับ Phase - A และจ่ายไฟ -Vdc ให้กับ Phase - B



รูปที่ 2.9 ลำดับการทำงานของมอเตอร์แบบฮับในสเต็ปที่ห้า

การทำงานในสเต็ปที่หก Hall-3 จะตรวจเจอขั้วแม่เหล็ก จากนั้นจะส่งผลการตรวจจับไปยังส่วนคอลโทรลเลอร์ ทำการประมวลผลจ่ายไฟ +Vdc ให้กับ Phase - A และจ่ายไฟ -Vdc ให้กับ Phase - C



รูปที่ 2.10 ลำดับการทำงานของมอเตอร์แบบฮับในสเต็ปที่หก

### 2.1.4 สรุปข้อดีข้อเสียของมอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่าน

#### 1. ประสิทธิภาพ

มอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่าน (Brushless DC Hub motor) สามารถลดความสูญเสียที่เกิดจากการเสียดสีกันระหว่างแปรงถ่านกับซี่คอมมิวเตเตอร์ ซึ่งผลจากการเสียดสีกันระหว่างแปรงถ่านกับซี่คอมมิวเตเตอร์ ยังทำให้เกิดความร้อน เกิดประกายไฟ และยังก่อให้เกิดคลื่นรบกวนสนามแม่เหล็กอีกด้วย

#### 2. ปราศจากมลพิษ

เนื่องจากมอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่าน (Brushless DC Hub motor) รับไฟฟ้ากระแสตรงจากแบตเตอรี่ และไม่ใช้เครื่องยนต์สันดาปภายใน เมื่อนำไปประกอบเป็นยานพาหนะไฟฟ้า จึงไม่เกิดมลพิษอีกทั้งยังช่วยลดสภาวะโลกร้อนได้อีกด้วย

#### 3. สะดวกในการใช้งาน

มอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่าน (Brushless DC Hub motor) เป็นมอเตอร์แบบฮับที่สามารถขับเคลื่อนได้โดยตรงไม่ต้องมีระบบเฟืองเกียร์ มีรูปร่างกะทัดรัด ทำให้ประหยัดพื้นที่ใช้งาน ใช้งานได้สะดวกสบาย

#### 4. ประหยัดค่าใช้จ่ายทางด้านพลังงาน

เนื่องจากการประจุแบตเตอรี่จนเต็มในแต่ละครั้ง 36V 9Ah ใช้พลังงานไฟฟ้าไปเพียงแค่หนึ่งในสามยูนิต ซึ่งคิดเป็นจำนวนเงินออกมาแล้วไม่ถึงหนึ่งบาท แต่สามารถวิ่งได้ระยะทางถึง 33.35 กิโลเมตร โดยจะประหยัดมากเมื่อเทียบกับยานพาหนะที่ใช้เครื่องยนต์สันดาปภายใน

#### 5. มีเสถียรภาพในการทำงาน

มอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่าน (Brushless DC Hub motor) เป็นมอเตอร์ที่มีประสิทธิภาพสูงในขณะความเร็วคงที่ ทำให้การใช้งานประหยัดพลังงานและมีเสถียรภาพในการใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 6. มีความน่าเชื่อถือสูง

เนื่องจากมอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่าน (Brushless DC Hub motor) เป็นมอเตอร์ที่มีประสิทธิภาพสูง ปราศจากมลพิษ สะดวกสบายในการใช้งาน อีกทั้งยังมีเสถียรภาพในการทำงานที่ดี ประหยัดค่าใช้จ่ายทางด้านพลังงาน ทำให้มอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่าน (Brushless DC Hub motor) มีความน่าเชื่อถือสูง นิยมนำมาใช้ประกอบเป็นยานพาหนะไฟฟ้ากันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน

### 2.1.5 ข้อจำกัดของมอเตอร์แบบฮับ

แหล่งจ่ายไฟหรือแบตเตอรี่ ข้อจำกัดของยานพาหนะที่ใช้มอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่าน (Brushless DC Hub motor) ที่สำคัญคือแหล่งจ่ายพลังงานให้กับตัวมอเตอร์หรือแบตเตอรี่ ซึ่งในปัจจุบันเทคโนโลยีทางด้านแบตเตอรี่ยังมีราคาแพง สามารถจ่ายพลังงานที่แรงดันคงที่ได้ไม่มากนัก อีกทั้งยังมีปัญหาทางด้านความร้อนหนักมาก ค่าความจุพลังงานน้อย ทำให้อายุการใช้งานของมอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่าน (Brushless DC Hub motor) สามารถวิ่งได้ในระยะทางไม่ไกลนักต่อการประจุแบตเตอรี่หนึ่งครั้ง และมีสตาร์ทติ่งทอรั๊กต่ำ

## 2.2 แบตเตอรี่

แบตเตอรี่ (Battery) เป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าชนิดหนึ่ง ที่สามารถเกิดพลังงานไฟฟ้าในตัวเอง เนื่องจากปฏิกิริยาเคมี ที่บรรจุอยู่ในตัวแบตเตอรี่นั้นๆ พลังงานไฟฟ้าที่ได้จากแบตเตอรี่เป็นไฟฟ้ากระแสตรง มีหลายชนิด ดังนี้

ชนิดคาร์บอน-สังกะสี ใช้กันมาตั้งแต่ปี พ.ศ.2443 ให้กระแสไฟฟ้าโดยปฏิกิริยาเคมีซึ่งมีสังกะสีเป็นขั้วลบ ส่วนขั้วบวกเป็นผลผสมของแมงกานีสไดออกไซด์กับวัสดุอื่นๆ เป็นถ่านไฟฉายที่มีอายุการใช้งานสั้น และให้กระแสไฟฟ้าน้อย มักจะเสื่อมสภาพได้โดยง่ายระหว่างรอการจำหน่าย

แบตเตอรี่ชนิดอัลคาไลน์ ถูกพัฒนาเพื่อใช้กับงานที่ต้องการกระแสไฟฟ้าสูงที่เป็นถ่านไฟฉายธรรมดา ไม่อาจนำมาใช้ได้ เมื่อต้องจ่ายกระแสไฟฟ้าสูง ถ่านไฟฉายชนิดนี้จะมีอายุการใช้งานเป็น 10 เท่าของถ่านไฟฉายธรรมดา

แบตเตอรี่ชนิดปรอทออกไซด์ ให้ระดับพลังงาน สูงกว่าแบตเตอรี่แบบคาร์บอน-สังกะสี และแบตเตอรี่แบบอัลคาไลด์ นอกจากนี้ร้อยละ 80-90 ของสารต่างๆ ที่บรรจุในแบตเตอรี่ชนิดนี้จะทำปฏิกิริยาให้พลังงานไฟฟ้าได้ตลอดอายุขัยของแบตเตอรี่

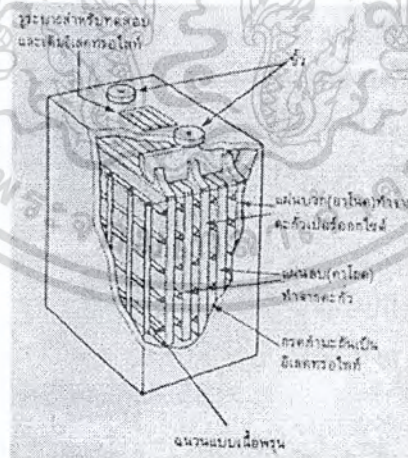
แบตเตอรี่ชนิดเงินออกไซด์ มีคุณสมบัติเหมือนแบตเตอรี่ชนิดปรอทออกไซด์ แต่ทำงานในอุณหภูมิต่ำได้ดีกว่า และให้ค่าความต่างศักย์สูงถึง 1.5 โวลต์ (ปรอทออกไซด์ให้ 1.35 โวลต์) เนื่องจากมีราคาค่อนข้างแพงจึงมีผลผลิตเป็นแบบเม็ดกระดุมเท่านั้น

แบตเตอรี่ชนิดลิเทียม ในทางทฤษฎี ชาติลิเทียมมีระดับพลังงานสูงที่สุด เมื่อเทียบกับโลหะอื่นๆ ดังนั้นแบตเตอรี่ที่ใช้กระแสไฟฟ้า โดยปฏิกิริยาเคมีระหว่างขั้วคาโทดที่เป็นลิเทียมกับคาโทดอะไรก็ตามจะเป็นแบตเตอรี่ที่มีอายุการใช้งานนานที่สุด

แบตเตอรี่ชนิดอัดไฟซ้ำได้ (ชนิดนิเกิล-แคดเมียม) ผลิตออกมาเหมือนถ่านไฟฉายทั่วไป แต่สามารถอัดไฟใหม่ได้สูงถึง 500 ครั้ง

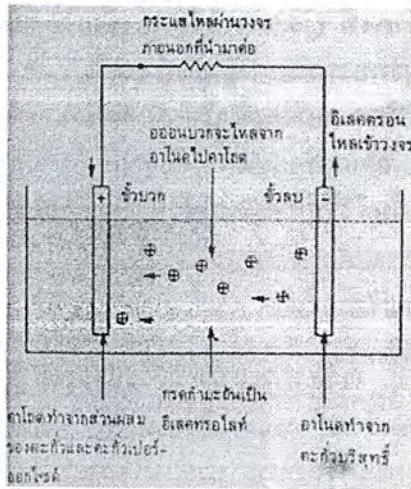
### 2.2.1 เซลแบบตะกั่ว-กรด

เซลล์แบบทุติยภูมิชนิดหนึ่งที่เป็นที่นิยมใช้กันมากก็คือ เซลล์แบบตะกั่วกรด ซึ่งใช้กันทั่วไป ตัวอย่างเซลล์ชนิดนี้แสดงในรูปที่ 2.11 ซึ่งเราจะเห็นมันประกอบด้วยแผ่นคาโทดและแผ่นแอโนด วางสลับกันจมอยู่ในอิเล็กโทรไลต์ที่ทำจากสารละลายกรดกำมะถัน แผ่นเพลทจะวางสลับกัน เพื่อจะได้มีพื้นที่ผิวสัมผัสกับอิเล็กโทรไลต์ได้มาก ในขณะที่รักษาปริมาตรให้น้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ สารที่มีพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างแผ่นอิเล็กโทรดและอิเล็กโทรไลต์มากเท่าไร ปฏิกิริยาเคมีก็จะเกิดขึ้นมากเท่านั้น นอกจากนี้ค่าความต้านทานภายในเซลล์จะยิ่งมีค่าน้อยลงด้วย ดังนั้นในการค้นคว้าจึงมุ่งทางด้านเพิ่มที่ผิวสัมผัส วิธีที่นิยมใช้กันก็คือใช้แผ่นเพลทบางๆ คั่นด้วยฉนวนแบบมีรูพรุน อิเล็กโทรดเป็นแอโนดจะสร้างขึ้นมาจากตะกั่วบริสุทธิ์ ในขณะที่คาโทดจะสร้างจากส่วนผสมของตะกั่วและตะกั่วเปอร์ออกไซด์ ในขณะที่เซลล์คายประจุให้กระแสไฟฟ้าวอกมานั้น อะตอมของตะกั่วจากแผ่นแอโนดจะแตกตัวเป็นไอออนที่มีประจุบวกเข้าไปอยู่ในอิเล็กโทรไลต์และทิ้งอิเล็กตรอนให้ไหลเข้าสู่ขั้วจอร์ที่นำมาต่อภายนอก ดังแสดงในรูปที่ 2.12



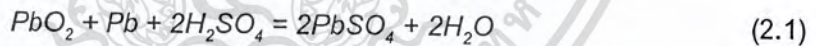
รูปที่ 2.11 แสดงโครงสร้างของเซลล์แบบตะกั่ว-กรด แผ่นแอโนดและคาโทดจะวางสลับกัน เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวระหว่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 ไอออนบวกของตะกั่วจะออกมา อาโนดเข้าไปในอิเล็กโทรไลต์ อิเล็กตรอนจะมีอิสระที่จะเข้าไปวงจรที่นำมาต่อภายนอก ซึ่งจะทำให้เกิดกระแสไหลจากคาโทดไปยังอาโนด

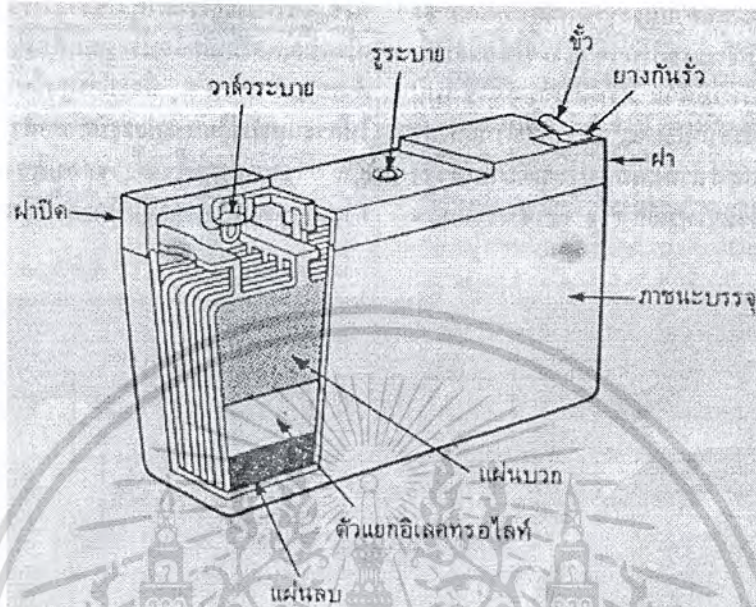
ที่คาโทด ตะกั่วเปอร์ออกไซด์จะแตกตัวเป็นไอออนของตะกั่ว ซึ่งมีประจุบวกสูง และเป็นไอออนที่มีประจุลบสูง ไอออนของตะกั่วที่มีประจุบวกสูงจะดึงเอาอิเล็กตรอนจากวงจรที่ต่ออยู่ภายนอก เพื่อรวมตัวกลายเป็นไอออนตะกั่วที่มีประจุบวก ซึ่งเป็นชนิดเดียวกับอาโนดทำให้เกิดกระแสไหลจากคาโทดผ่านไปยังวงจรภายนอก ไอออนของตะกั่วจากแผ่นอิเล็กโทรดทั้งสองจะทำปฏิกิริยากับกรดกำมะถันซึ่งเป็นอิเล็กโทรไลต์ กลายเป็นตะกั่วซัลเฟต(Lead sulphate) (ซึ่งจะเห็นเป็นตะกอนสีขาวเกาะอยู่ที่อิเล็กโทรดทั้งสอง) และก๊าซไฮโดรเจน (ซึ่งจะรวมกับไอออนของออกซิเจนจากคาโทดกลายเป็นน้ำ) เราสามารถจะเขียนสูตรสำหรับปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นได้ดังนี้



ซึ่งแสดงโดยลูกศร 2 ทิศทาง ว่าเป็นปฏิกิริยาที่ผันกลับได้ ดังนั้นจึงสามารถที่จะประจุเซลล์ใหม่โดยการต่อวงจร ซึ่งจะขับอิเล็กตรอนให้ไหลจากคาโทดไปสู่อาโนด ดังจะเห็นวงจรต่อไป สูตรทางเคมีแสดงให้เห็นว่าสารละลายอิเล็กโทรไลต์ จะเจือจางลงโดยโมเลกุลของน้ำที่เกิดขึ้น ซึ่งเป็นขณะเดียวกับที่เซลล์คายประจุ ทำให้เราสามารถใช้เป็นวิธีการหาสถานะการประจุและคายประจุของเซลล์ได้โดยการวัดความถ่วงจำเพาะ (specific gravity) ของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งจะบอกว่าเซลล์ใกล้จะถึงสถานะคายประจุหมดหรือยัง เพื่อจะได้ประจุไฟฟ้ากลับเข้าไปใหม่ โดยค่าความถ่วงจำเพาะของเซลล์ที่ประจุมาเต็มที่จะมีค่าประมาณ 1.25 และค่าความถ่วงจำเพาะของเซลล์ที่คายประจุหมดจะมีค่าระบุไว้ ประมาณ 1.2 เราใช้ไฮโดรมิเตอร์ในการวัดแรงดันของเซลล์โดยปกติจะมีค่าเท่ากับ 2 โวลต์ เซลล์แบบตะกั่วกรด นี้มีโครงสร้างแบบที่กล่าวมาเป็นระยะเวลาอันยาวนานแล้ว การปรับปรุงให้เซลล์มีอายุการใช้งานนานขึ้น โดยที่แบตเตอรี่ที่มีการผลึกอย่างดี และมีอิเล็กโทรไลต์เป็นของแข็งได้ถูกผลิตขึ้นมาแล้ว ซึ่งไม่ต้องมีการบำรุงรักษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เลย จึงสามารถนำไปใช้ที่ใดก็ได้ นับว่ามีประโยชน์ในการใช้แทนหรือใช้อย่างปกติแทนเซลล์แบบปฐมภูมิในเครื่องมือวัดแบบกระเป่าหิ้ว เนื่องจากมันสามารถประจุไฟใหม่ได้ โครงสร้างของเซลล์แบบนี้ในแบตเตอรี่ขนาด 6 โวลต์ แสดงไว้ในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 โครงสร้างของแบตเตอรี่แบบตะกั่ว - กรดที่มีการปิดผนึก ซึ่งแบตเตอรี่ชนิดนี้สามารถจะใช้ที่ใดก็ได้โดยจะไม่ปล่อยอิเล็กโทรไลต์ออกมา

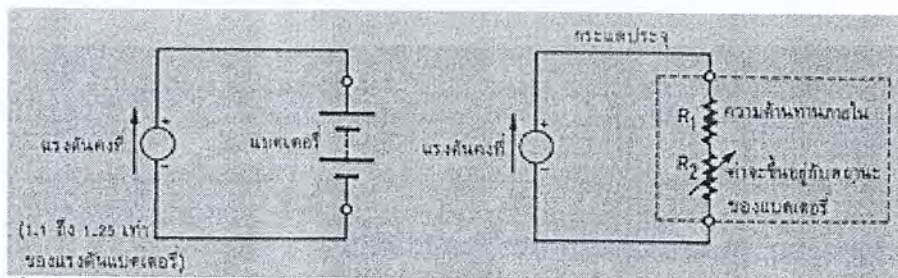
### 2.2.2 การประจุกลับเข้าไปใหม่

การประจุเซลล์แบบตะกั่ว - กรดนั้น สามารถทำได้อย่างง่าย ๆ โดยการป้อนกระแสกลับทาง เข้าไปในแบตเตอรี่ เพื่อบังคับให้ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้น เกิดจากทางขวามือไปทางซ้ายมือ ซึ่งจะเปลี่ยนตะกั่วซัลเฟตให้ กลับเป็นตะกั่วและกรดกำมะถันตามเดิม วิธีการที่ง่ายที่สุดใน การป้อนกระแสกลับทางก็โดยการต่อขั้วคาโทด (ขั้วบวก) และขั้วอโนด (ขั้วลบ) เข้ากับขั้วบวก และขั้วลบของแหล่งจ่ายไฟฟ้าภายนอก แรงดันของแหล่งจ่ายไฟภายนอกนี้ จะอยู่ในช่วง 1.1 ถึง 1.25 เท่าของแรงดันของเซลล์โดยปกติ ดังนั้นเซลล์แบบนี้เซลล์เดียว ซึ่งมีแรงดันปกติ 2 โวลต์ สามารถที่จะประจุเข้าไปด้วยแรงดันระหว่าง 2.2 โวลต์ถึง 2.5 โวลต์ ตัวอย่างที่เห็นได้ง่าย ๆ ก็คือแบตเตอรี่รถยนต์ (ซึ่งแรงดันปกติเท่ากับ 12 โวลต์เนื่องจากประกอบด้วย เซลล์ 6 เซลล์อนุกรมกัน) จะถูกประจุโดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหรือไดนาโมและผ่านชุดรักษาแรงดัน แรงดันให้เป็นไฟตรงมีค่าแรงดันคงที่ที่ 14 โวลต์ เป็นที่เห็นได้ชัดว่า กระแสที่ป้อนเข้าไปเมื่อ ประจุไฟใหม่นั้นขึ้นอยู่กับแรงดันที่ป้อนเข้าไป นอกจากนั้นยังขึ้นอยู่กับสถานะของเซลล์ว่าคาย ประจุหมดเต็มที่หรือไม่ ถ้าแรงดันที่ป้อนเข้าประจุไฟมีค่าสูงและเซลล์คายประจุหมดเต็มที่แล้ว จะ ทำให้กระแสที่ไหลเข้าประจุเซลล์จะมีค่ามากตามไปด้วย หรือถ้าเซลล์ถูกใช้แบบเป็นวงรอบ(cyclic)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คือ จากสถานะประจุเต็มไปสู่สถานะหมดประจุเต็มที่แล้วจึงค่อยประจุใหม่อีกครั้ง จะใช้กระแสในการประจุมากตามไปด้วย แต่ถ้าเซลล์ถูกใช้งานพร้อมกับประจุไฟเข้าตลอดเวลา เช่นในแบตเตอรี่รถยนต์แล้ว กระแสที่ใช้ในการประจุก็น่าจะมีค่าต่ำ ซึ่งก็เป็นเหตุผลที่ว่าทำไมแบตเตอรี่รถยนต์ขนาด 12 โวลต์ จึงใช้แรงดันในการประจุเพียง 14 โวลต์ ซึ่งประมาณ 1.17 เท่า ของแรงดันปกติของแบตเตอรี่

วงจรที่ใช้ในการประจุแบตเตอรี่แบบตะกั่ว – กรดนี้ แสดงในรูปที่ 2.14 ซึ่งแสดงให้เห็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่มีแรงดันคงที่อยู่กับแบตเตอรี่ วงจรสมมูลย์ของรูปที่ 2.14 แสดงให้เห็นในรูปที่ 2.14 ซึ่งเราจะเห็นว่าแบตเตอรี่จะถูกพิจารณาว่าประกอบด้วยตัวต้านทาน 2 ตัว โดยตัวต้านทาน  $R_1$  จะเป็นค่าความต้านทานภายในของแบตเตอรี่เอง จะมีอยู่ในแบตเตอรี่เสมอไม่ว่าแบตเตอรี่นั้นกำลังประจุหรือคายประจุอยู่ ส่วนตัวต้านทาน  $R_2$  นั้นจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปขึ้นอยู่กับสถานการณ์หมดประจุของแบตเตอรี่ เมื่อแบตเตอรี่คายประจุหมดเต็มที่ ค่าความต้านทานตัวนี้จะมีค่าสูง อย่างไรก็ตามเมื่อแบตเตอรี่ใกล้หมด หรือประจุจนเต็มที่แล้ว ค่าความต้านทาน  $R_2$  นี้จะมีค่าสูงขึ้น ทำให้กระแสที่ใช้ในการประจุมีค่าลดลง เราสามารถที่จะตรวจสอบสถานการณ์ประจุของแบตเตอรี่ได้ โดยการสังเกตค่าของกระแสที่ใช้ในการประจุ ซึ่งจะใช้ได้ก็ต่อเมื่อแรงดันที่ใช้ในการประจุมีค่าคงที่ (โดยการใช้แหล่งจ่ายไฟที่มีการรักษาระดับแรงดันออกให้คงที่) แบตเตอรี่รถยนต์โดยทั่วไป ตัวอัดประจุให้แก่แบตเตอรี่จะจ่ายแรงดันออกมาไม่คงที่ ดังนั้นจึงไม่สามารถใช้วิธีการดูกระแสในการบอกสถานการณ์ประจุของแบตเตอรี่ได้อย่างถูกต้อง เราสามารถที่จะใช้วิธีประจุอย่างรวดเร็วแก่แบตเตอรี่ชนิดนี้ได้ โดยใช้แรงดันคงที่ขนาด 1.25 เท่าของแรงดันปกติของแบตเตอรี่ โดยคอยสังเกตระดับกระแสที่ประจุไว้ และการประจุจะสิ้นสุดเมื่อระดับกระแสที่ประจุตกลงมาถึงค่ากระแสสุดท้ายในการประจุ ซึ่งจะบ่งบอกโดยผู้ผลิตแบตเตอรี่ชนิดนั้น ภายใต้เงื่อนไขการประจุจะเต็ม (จากตอนที่แบตเตอรี่หมดประจุเต็มที่จนถึงประจุโดยสมบูรณ์) ภายในเวลา 5 ชั่วโมง ถ้าเราไม่สามารถรักษาระดับแรงดันในการประจุได้คงที่อยู่ได้ ก็ไม่สมควรที่จะใช้วิธีประจุอย่างรวดเร็ว ทั้งนี้เนื่องจากจะทำความเสียหายแก่เซลล์จนไม่สามารถแก้ไขได้ ในกรณีนี้จึงควรใช้แรงดันในการประจุน้อยลงเป็นประมาณ 1.1 ถึง 1.2 เท่าของแรงดันปกติของแบตเตอรี่จึงจะดีที่สุด โดยใช้เวลาในการประจุเกินกว่า 20 ชั่วโมงขึ้นไป



รูปที่ 2.14 การประจุแบตเตอรี่แบบ ตะกั่ว – กรด โดยใช้แหล่งจ่ายไฟที่มีแรงดันคงที่ขนาด 1.1 ถึง 1.25 เท่าของแรงดันปกติของแบตเตอรี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3 หลักการของอินเวอร์เตอร์

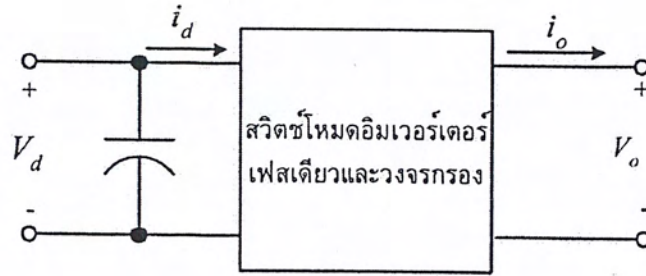
ต้นกำลังทางไฟฟ้าในภาคอุตสาหกรรม จะนิยมใช้แหล่งจ่ายเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ เช่น อุตสาหกรรมการผลิต ซึ่งโดยส่วนใหญ่จะใช้ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเป็นหลัก ในยุคปัจจุบันการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าให้มีสมรรถนะสูง สามารถใช้อินเวอร์เตอร์ในการควบคุมความเร็วรอบและแรงบิดได้ตามต้องการ มีประสิทธิภาพสูง มีสภาวะการทำงานที่ไม่ก่อให้เกิดปัญหาการบกพร่องระบบไฟฟ้าข้างเคียงอินเวอร์เตอร์จึงมีบทบาทในภาคอุตสาหกรรมมากขึ้น

อินเวอร์เตอร์ ที่ทำการแปลงผันกำลังไฟฟ้าจากไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับ จะสามารถแบ่งออกได้เป็นสองกลุ่มคือ อินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน (Voltage Source Inverter: VSI) กับอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายกระแส (Current Source Inverter: CSI)

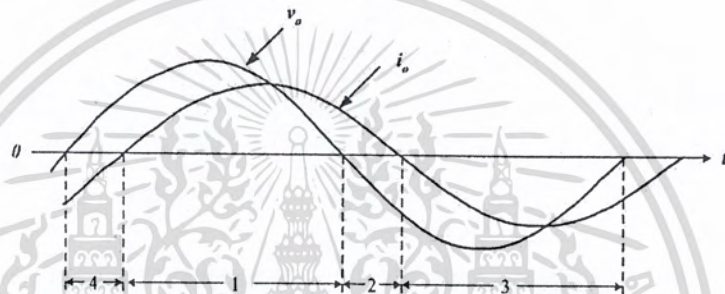
อินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน มักจะเหมาะสำหรับงานที่ต้องการกำลังไฟฟ้าไม่สูงมากนัก แต่อินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายกระแสจะเหมาะสำหรับงานที่ต้องการกำลังไฟฟ้าสูง อินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันอาจแบ่งเป็นสองประเภทที่นิยมนำมาใช้งานคือ อินเวอร์เตอร์แบบพีดับเบิลยูเอ็ม (PulseWidth-Modulation Inverter: PWM inverter) ส่วนอีกประเภทที่นิยมคืออินเวอร์เตอร์แบบรูปคลื่นสี่เหลี่ยม (Square-wave inverter) ซึ่งมีโครงสร้างไม่ซับซ้อน แต่มีข้อเสียคือขนาดของฮาร์โมนิกอันดับต่างๆ จะมีค่าสูง

#### 2.3.1 แนวคิดพื้นฐานของสวิตช์โหมดอินเวอร์เตอร์

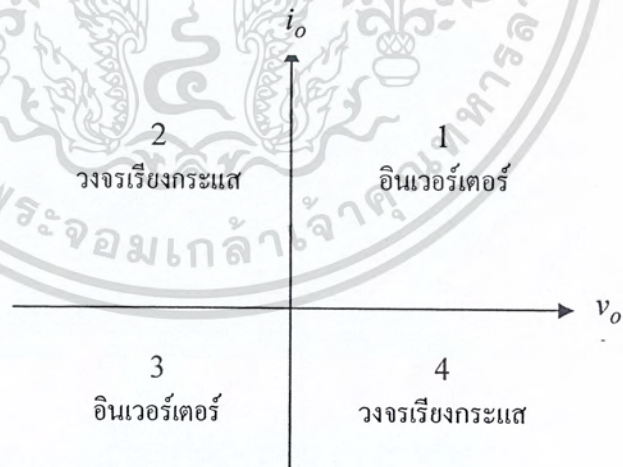
การแปลงผันกำลังไฟฟ้าจากแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับในรูปที่ 2.15 (ก) สมมติว่าแรงดันไฟฟ้าด้านออก ( $v_o$ ) และกระแสไฟฟ้าด้านออก ( $i_o$ ) ผ่านวงจรกรองความถี่สูงออกไป เหลือเฉพาะความถี่ต่ำ ดังนั้นแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ได้จะเป็นรูปไซน์ กรณีที่แสดงในรูปที่ 2.15 (ก) โหลดจะมีค่าความต้านทานและความเหนี่ยวนำ ดังนั้นกระแสไฟฟ้าจะล่าหลังแรงดันไฟฟ้า สำหรับในรูปที่ 2.15 (ข) กำลังไฟฟ้าด้านออก ( $p_o$ ) จะพิจารณาเป็นผลคูณของแรงดันและกระแสไฟฟ้าด้านออกดังนี้



(ก) แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าด้านเข้าและด้านออก



(ข) รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าด้านเข้าและด้านออก



(ค) รูปโหมตการทำงานใน 4 จุดภาค

รูปที่ 2.15 (ก)-(ค) สวิตช์โหมตอินเวอร์เตอร์เฟสเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โหมดที่ 1 โหมดอินเวอร์เตอร์

$v_o$  เป็นบวก  $i_o$  เป็นบวก  $p_o$  เป็นบวก คือกำลังไฟฟ้าจะถูกส่งจากด้านไฟฟ้ากระแสตรง ( $V_d$ ) ไปด้านไฟฟ้ากระแสสลับ ( $V_o$ )

โหมดที่ 2 โหมดเรียงกระแส

$v_o$  เป็นลบ  $i_o$  เป็นบวก  $p_o$  เป็นลบ คือกำลังไฟฟ้าจะถูกส่งจากด้านไฟฟ้ากระแสสลับ ( $V_o$ ) ไปด้านไฟฟ้ากระแสตรง ( $V_d$ )

โหมดที่ 3 โหมดอินเวอร์เตอร์

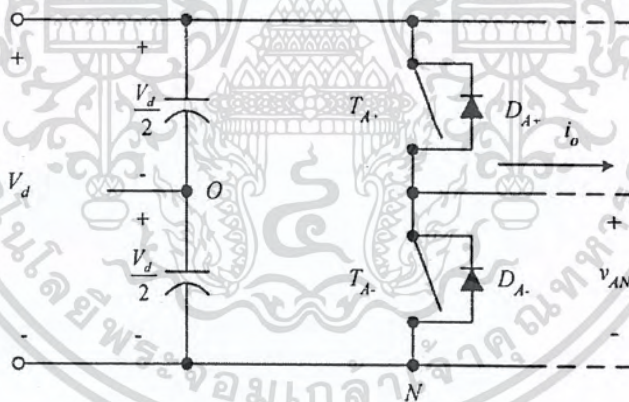
$v_o$  เป็นลบ  $i_o$  เป็นลบ  $p_o$  เป็นบวก คือกำลังไฟฟ้าจะถูกส่งจากด้านไฟฟ้ากระแสตรง ( $V_d$ ) ไปด้านไฟฟ้ากระแสสลับ ( $V_o$ )

โหมดที่ 4 โหมดเรียงกระแส

$v_o$  เป็นบวก  $i_o$  เป็นลบ  $p_o$  เป็นลบ คือกำลังไฟฟ้าจะถูกส่งจากด้านไฟฟ้ากระแสสลับ ( $V_o$ ) ไปด้านไฟฟ้ากระแสตรง ( $V_d$ )

สรุปรูปแบบในการทำงานดังแสดงในรูปที่ 2.15 (ค)

เพื่อความเข้าใจการทำงานของอินเวอร์เตอร์ ในรูปที่ 2.16 จะแสดงเพียงกึ่งหนึ่งของวงจรอินเวอร์เตอร์ คือกึ่ง A หรือ เฟส A ที่สมมติให้แรงดันไฟฟ้าด้านเข้ามีค่าคงที่และกำหนดให้การสวิตช์ทำงานเป็นแบบพีดับเบิลยูเอ็ม



รูปที่ 2.16 สวิตช์โหมดอินเวอร์เตอร์เฟสเดียวที่หนึ่งกึ่ง

### 2.3.2 การสวิตช์แบบพีดับเบิลยูเอ็ม

ในวงจรอินเวอร์เตอร์ ต้องการสร้างแรงดันไฟฟ้าด้านออกเป็นรูปไซน์ที่สามารถปรับขนาดและความถี่ตามต้องการได้ โดยใช้สัญญาณควบคุมรูปไซน์ (Sinusoidal control signal) ตามความถี่ที่ต้องการนำมาเปรียบเทียบกับรูปคลื่นสามเหลี่ยม (triangular waveform) ดังรูปที่ 2.17 (ก) ความถี่ของการสวิตช์ ( $f_s$ ) จะเท่ากับความถี่รูปคลื่นสามเหลี่ยม

คำย่อและความหมายที่สำคัญของการสวิตช์แบบพีดับเบิลยูเอ็ม มีดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$V_{control}$	สัญญาณควบคุมรูปไซน์ที่ต้องการนำมาสร้างแรงดันไฟฟ้าและความถี่ทางด้านออก
$V_{tri}$	สัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยมที่เป็นตัวกำหนดความถี่สวิตชิง
$f_1$	ความถี่หลักมูลทางด้านออกของอินเวอร์เตอร์
$f_s$	ความถี่ของการสวิตชิงของอินเวอร์เตอร์
$m_a$	อัตราการมอดูเลตด้านแอมพลิจูด
$m_f$	อัตราการมอดูเลตด้านความถี่

ค่า  $m_a$  จะนิยามจากสมการที่ (2.2)

$$m_a = \frac{\hat{V}_{control}}{\hat{V}_{tri}} \quad (2.2)$$

เมื่อ  $\hat{V}_{control}$  คือ ค่ายอดของสัญญาณควบคุมไซน์

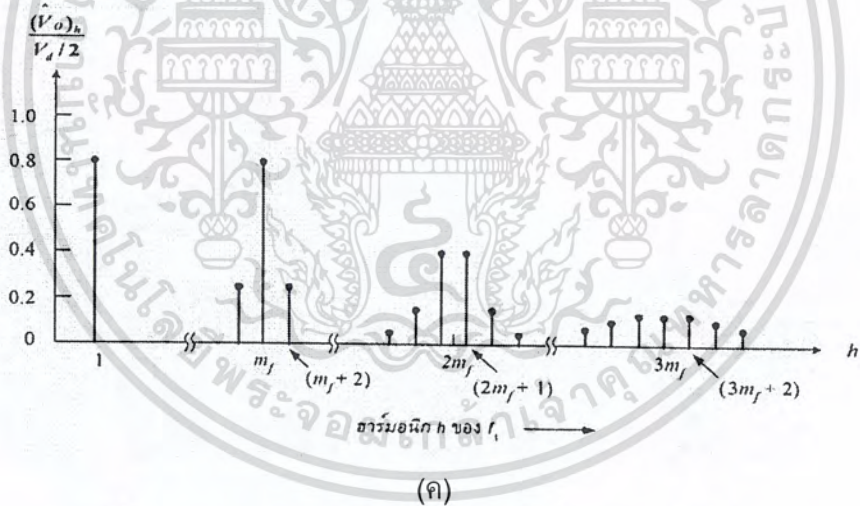
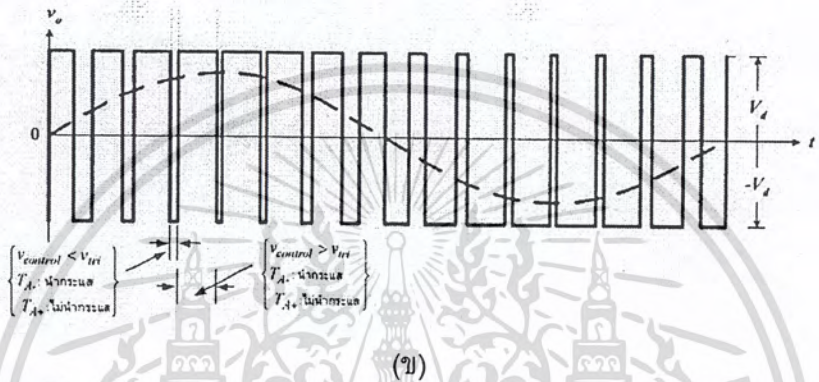
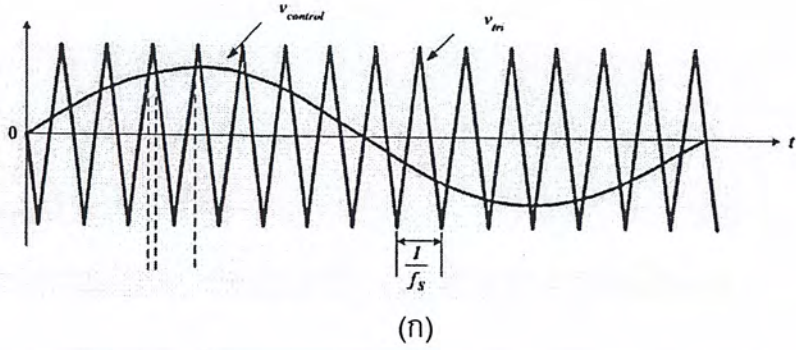
$\hat{V}_{tri}$  คือ ค่ายอดสัญญาณรูปสามเหลี่ยม

ถ้าค่า  $0 \leq m_a \leq 1$  จะเป็นช่วงการมอดูเลตเชิงเส้น ซึ่งหมายถึงองค์ประกอบหลักมูลของแรงดันไฟฟ้าด้านออก (fundamental-frequency component of output voltage) โดยจะแปรผันเชิงเส้นกับค่า  $m_a$

ในกรณี  $m_a > 1$  จะเป็นช่วงการควบคุมแบบโอเวอร์มอดูเลต ซึ่งผลของแรงดันไฟฟ้าด้านออกจะมีองค์ประกอบฮาร์โมนิกสูงกว่าช่วงการมอดูเลตเชิงเส้นสำหรับเงื่อนไขของการสร้างสัญญาณสวิตชิงแบบพีดับเบิลยูเอ็ม คือ

$$V_{control} > V_{tri}, \quad T_{A+} \text{ จะนำกระแส} \quad V_{Ao} = \frac{1}{2} V_d \quad (2.3)$$

$$V_{control} < V_{tri}, \quad T_{A-} \text{ จะนำกระแส} \quad V_{Ao} = -\frac{1}{2} V_d \quad (2.4)$$



รูปที่ 2.17 (ก)-(ค) การสร้างสัญญาณสวิตชิงแบบพีดับเบิลยูเอ็ม

การทำงานของสวิตช์  $T_{A+}$  และ  $T_{A-}$  จะขึ้นอยู่กับผลการเปรียบเทียบของ  $v_{control}$  กับ  $v_{tri}$  โดยจะมีเงื่อนไขดังสมการที่ 2.3 และ 2.4 และจะไม่ขึ้นกับทิศทางของกระแส รูปที่ 2.17 แสดงตัวอย่างเมื่อกำหนดเงื่อนไขที่  $m_a = 0.8$  และ  $m_f = 15$

ฮาร์มอนิกสเปกตรัม (Harmonic spectrum) ของ  $v_{Ao}$  โดยเขียนกราฟเทียบกับค่าแกนตั้ง  $(\hat{V}_{Ao})_h / (V_d/2)$  แสดงในรูปที่ 2.17 (ค) จะมีส่วนสามส่วนคือ

1. ค่ายอดของแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่หลักมูล  $(\hat{V}_{Ao})_1 = m_a(V_d/2)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่สามารถนำออกเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\hat{v}_{A0} = \frac{v_{control}}{\hat{v}_{tri}} \cdot \frac{v_d}{2}, \quad v_{control} \leq \hat{v}_{tri} \quad (2.5)$$

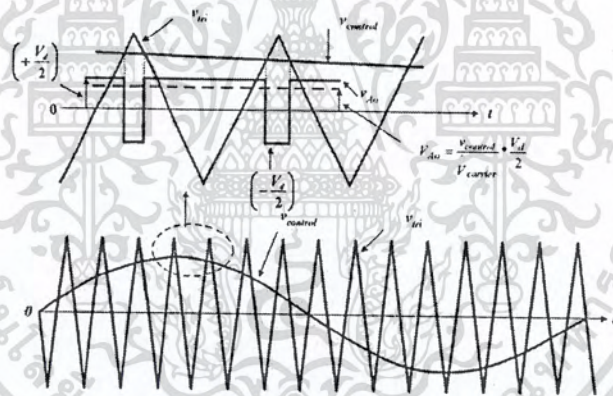
$$v_{control} = \hat{v}_{control} \sin \omega_t t, \quad v_{control} \leq \hat{v}_{tri} \quad (2.6)$$

$$(v_{A0})_1 = \left[ \frac{\hat{v}_{control}}{\hat{v}_{tri}} \cdot \frac{v_d}{2} \right] \sin(\omega_1 t), \quad m_a \leq 1.0 \quad (2.7)$$

$$(v_{A0})_1 = m_a \cdot \left( \frac{v_d}{2} \right) \sin \omega_1 t, \quad m_a \leq 1.0 \quad (2.8)$$

$$(\hat{v}_{A0})_1 = m_a \cdot \left( \frac{v_d}{2} \right), \quad m_a \leq 1.0 \quad (2.9)$$

สมการที่ 2.9 พิจารณาประกอบจากรูปที่ 2.18 แสดงให้เห็นว่าแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่หลักมูลจะแปรผันเป็นเชิงเส้นกับค่า  $m_a$  ซึ่ง  $m_a$  จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1



รูปที่ 2.18 พีดับเบิลยูเอ็มแบบไซน์ (sinusoidal pulse width modulation: SPWM)

2. ค่าไซด์แบนด์ฮาร์โมนิก (sideband harmonic) จะเกิดขึ้นรอบๆ  $1mf$ ,  $2mf$ ,  $3mf$ , ... ดังแสดงในสมการที่ (2.11) หรือ (2.12)

$$f_h = (jm_f \pm k)f_1 \quad (2.10)$$

$$h = j(m_f) \pm k \quad (2.11)$$

เมื่อ  $h = 1$  คือความถี่หลักมูล (fundamental frequency)

ถ้าค่า  $j$  เป็นเลขคู่ ค่าฮาร์โมนิกจะเท่ากับค่า  $k$  ที่เป็นเลขคู่

ถ้าค่า  $j$  เป็นเลขคี่ ค่าฮาร์โมนิกจะเท่ากับค่า  $k$  ที่เป็นเลขคี่

3. ค่า  $m_f$  ฮาร์โมนิกควรจะเป็นเลขคี่ เพราะถ้ากำหนดให้ค่า  $m_f$  เป็นเลขคี่จะทำให้เกิด

การสมมาตรเลขคี่ ซึ่งแสดงได้จากสมการ  $f(-t) = -f(t)$  ผลที่ได้คือจะมีเพียงฮาร์โมนิกเลขคี่ค่า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

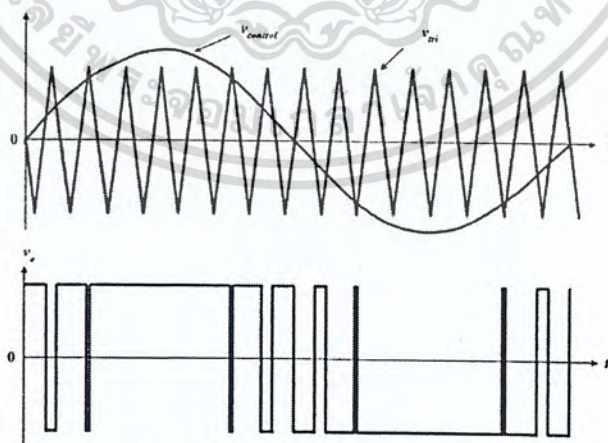
เท่านั้นที่ยังปรากฏอยู่ใน  $v_{Ao}$  ส่วนฮาร์โมนิกเลขคู่จะหักล้างกัน โดยที่ช่วง  $m_f > 21$  จะถือว่า  $m_f$  มีค่ามากโดยที่ขนาดของฮาร์โมนิกย่อย (sub-harmonics) จะมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับค่า  $m_f$

สำหรับกรณีโอเวอร์มอดูเลชัน ( $ma > 1$ ) จะเกิดขึ้นเมื่อ  $\hat{V}_{control} > \hat{V}_{tri}$  โดยค่ารูปคลื่นพีดับเบิลยูเอ็ม จะมีช่วงที่เป็นบวกหรือลบกว้างกว่าหนึ่งคาบการสวิตซ์ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.19 โอเวอร์มอดูเลชันมีข้อดีคือ ขนาดแรงดันไฟฟ้าของความถี่หลักมูล จะมีค่าสูงกว่าในกรณี  $ma \leq 1$  แต่การเพิ่มขึ้นของแรงดันไฟฟ้าจะไม่เป็นเชิงเส้นจนถึงค่าคงที่ค่าหนึ่ง และช่วงแรงดันยอดทางด้านออกของความถี่หลักมูลจะมีค่าอยู่ระหว่าง  $V_d/2$  ถึง  $4V_d/2\pi$  เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

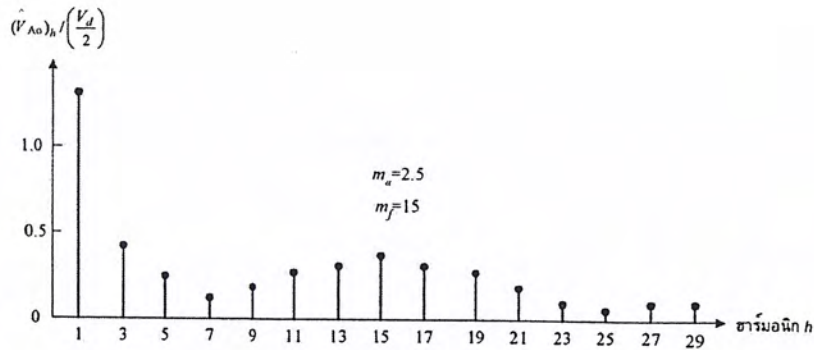
$$\frac{V_d}{2} < (\hat{V}_{Ao})_1 < \frac{4}{\pi} \frac{V_d}{2} \quad (2.12)$$

จากสมการที่ (2.12) ค่า  $(\hat{V}_{Ao})_1$  จะอยู่ระหว่างค่าที่ทำงานในโหมดเชิงเส้นและโหมดรูปคลื่นสี่เหลี่ยม กรณีโหมดสี่เหลี่ยมจะเกิดจากการที่  $m_a \gg 1$  และต้องมีค่ามากพอ ในการที่จะบอกว่ามากพอเท่าใดจะขึ้นอยู่กับค่า  $m_f$  ด้วยหากค่า  $m_f$  มีค่ามาก  $m_a$  ก็จะต้องมีค่ามากไปด้วยที่จะทำให้  $v_{control}$  ไม่ตัดยอดของปลายสามเหลี่ยมของสัญญาณอ้างอิงเลย

อย่างไรก็ตามข้อเสียของกรณีโอเวอร์มอดูเลชันก็คือทำให้เกิดฮาร์โมนิกอันดับต่ำๆ ที่อยู่ใกล้กับฮาร์โมนิกอันดับที่หนึ่งหรือความถี่หลักมูล เช่นฮาร์โมนิกอันดับที่ 3, 5, 7 เป็นต้น เช่นในรูปที่ 2.20 ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดผลเสียมากหากนำไปใช้งาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งการนำไปขับมอเตอร์เหนี่ยวนำ เพราะฮาร์โมนิกอันดับที่ 3, 5, 7 จะทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียและทำให้เกิดหลายความเร็วในเวลาเดียวกันทำให้มอเตอร์ไฟฟ้าหมุนไม่สม่ำเสมอ



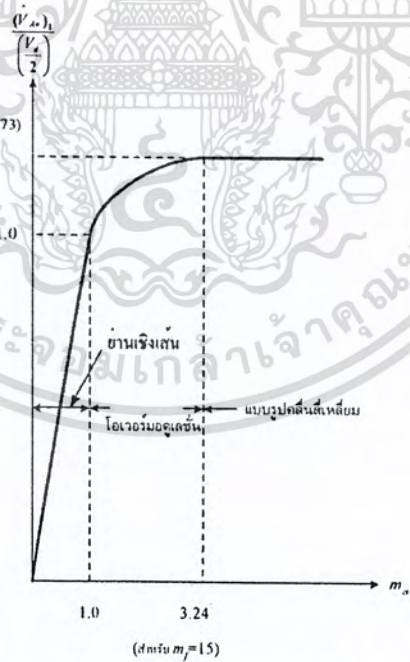
รูปที่ 2.19 รูปคลื่นพีดับเบิลยูเอ็มแบบโอเวอร์มอดูเลชัน



รูปที่ 2.20 สเปกตรารของรูปคลื่นพีดับเบิลยูเอ็มแบบโอเวอร์มอดูเลชัน เมื่อ  $m_a = 2.5$ ,  $m_f = 15$

การเปรียบเทียบสัญญาณสองสัญญาณในเงื่อนไขหาก  $v_{control} > v_{tri}$  จะได้สัญญาณพัลส์เป็นบวกในทำนองเดียวกันหาก  $v_{control} < v_{tri}$  จะได้พัลส์เป็นลบ กรณีโอเวอร์มอดูเลชันในรูปที่ 2.19 ไซเคิลบวกของ  $v_{control}$  จะมีช่วงยอดที่  $v_{control}$  มากกว่า  $v_{tri}$  จนถือว่าจะได้พัลส์บวกเป็นระยะเวลาหนึ่งเสมือนว่าไม่มีการสวิตซิ่ง เช่นเดียวกับการเกิดขึ้นที่ครึ่งไซเคิลลบของ  $v_{control}$  ช่วง peak ล่างจะทำให้ค่าพัลส์เป็นลบหรือศูนย์เป็นช่วงขณะที่ไม่มีการสวิตซิ่ง

ผลเสียที่จะเกิดเช่นในรูปที่ 2.20 คือเกิดฮาร์มอนิกที่ใกล้ๆ กับความถี่หลักมูลหรือฮาร์มอนิกอันดับหนึ่งและเกิดฮาร์มอนิกรอบๆความถี่  $f_s$



รูปที่ 2.21 การควบคุมค่าแรงดันทางต้านออกของอินเวอร์เตอร์พีดับเบิลยูเอ็มโดยการปรับค่า

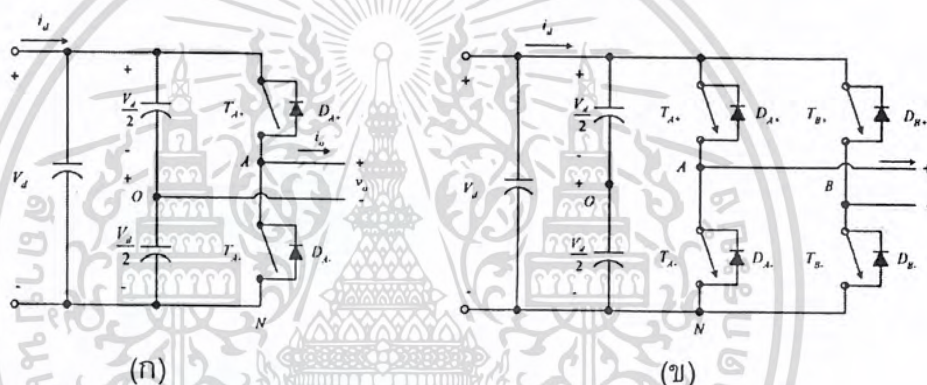
2.4 อินเวอร์เตอร์เฟสเดียว

อินเวอร์เตอร์เฟสเดียวจะแบ่งออกเป็นสองชนิด คือ แบบฮาล์ฟบริดจ์ (half-bridge) และแบบฟูลบริดจ์ (full-bridge) ในแบบฮาล์ฟบริดจ์ จะมีตัวเก็บประจุสองตัวต่อลำดับกันอยู่ระหว่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และสงวนสิทธิ์ในเนื้อหาการใช้งานโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและหากกำหนดให้ค่าตัวเก็บประจุสองตัวมีค่าเท่ากัน จะทำให้แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุแต่ละตัวมีค่าเท่ากันคือ  $V_d/2$  จุดกึ่งกลางแรงดันไฟฟ้า (จุด O ในรูปที่ 2.22 (ก)) จะมีค่าคงที่เมื่อเทียบกับบัสลบ (N) ดังแสดงในรูป 2.22 (ก) ส่วนวงจรอินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์เฟสเดียวจะประกอบไปด้วยสองกึ่ง คือ กิ่ง A และ กิ่ง B ในรูปที่ 2.22 (ข) โดยแบบฟูลบริดจ์จะมีกำลังไฟฟ้าสูงกว่าแบบฮาล์ฟบริดจ์ สองเท่า จึงเหมาะสมที่จะเลือกใช้เมื่อต้องการกำลังไฟฟ้าโหลดสูงขึ้น

เงื่อนไขสำคัญสำหรับอินเวอร์เตอร์เฟสเดียวแบบฮาล์ฟบริดจ์และแบบฟูลบริดจ์ คือการทำงานของสวิตช์  $T_{A+}$  และ  $T_{A-}$  ต้องไม่ทำงานพร้อมกันในทุกช่วงเวลา มิฉะนั้นแล้วจะเกิดการลัดวงจรระหว่างบัสบวกกับบัสลบ ในอุดมคติเวลาการสวิตช์ของ  $T_{A+}$  และ  $T_{A-}$  จะตรงข้ามกัน แต่ในทางปฏิบัติจะต้องการช่วงเวลาที่ยกเว้นที่สวิตช์ทั้งคู่จากนำกระแสเป็นไม่นำกระแส หรือจากไม่นำกระแสเป็นนำกระแส



รูปที่ 2.22 อินเวอร์เตอร์เฟสเดียวแบบฮาล์ฟบริดจ์และแบบฟูลบริดจ์

#### 2.4.1 การสวิตช์แรงดันไฟฟ้าแบบไบโพลาร์

การสวิตช์แรงดันไฟฟ้าแบบไบโพลาร์ (Bipolar voltage switching) คือการควบคุมให้สวิตช์แบบบริดจ์ทำงานพร้อมกันเป็นคู่เช่นในรูปที่ 2.22 (ข) การทำงานของสวิตช์  $T_{A+}$  และ  $T_{B-}$  จะถูกควบคุมให้ทำงานพร้อมกันในแต่ละช่วงเวลา อีกคู่หนึ่งคือการทำงานของสวิตช์  $T_{A-}$  และ  $T_{B+}$  ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าด้านออกของกิ่ง A จะเท่ากับ

$$V_{Ao} = \frac{1}{2} V_d \quad \text{เมื่อ } V_{\text{control}} > V_{\text{tri}}, \text{ สวิตช์ } T_{A+} \text{ และ } T_{B-} \text{ จะนำกระแส} \quad (2.13)$$

$$V_{Ao} = -\frac{1}{2} V_d \quad \text{เมื่อ } V_{\text{control}} > V_{\text{tri}}, \text{ สวิตช์ } T_{A-} \text{ และ } T_{B+} \text{ จะนำกระแส} \quad (2.14)$$

เมื่อคิดจากหนึ่งกิ่งของอินเวอร์เตอร์แบบบริดจ์ แรงดันไฟฟ้าด้านออกของกิ่ง B จะเท่ากับค่าลบของแรงดันไฟฟ้าด้านออกของกิ่ง A คือ  $v_{Bo} = -v_{Ao}$  ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าด้านออกของอินเวอร์เตอร์หรือแรงดันไฟฟ้าระหว่างกิ่ง A กับกิ่ง B คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

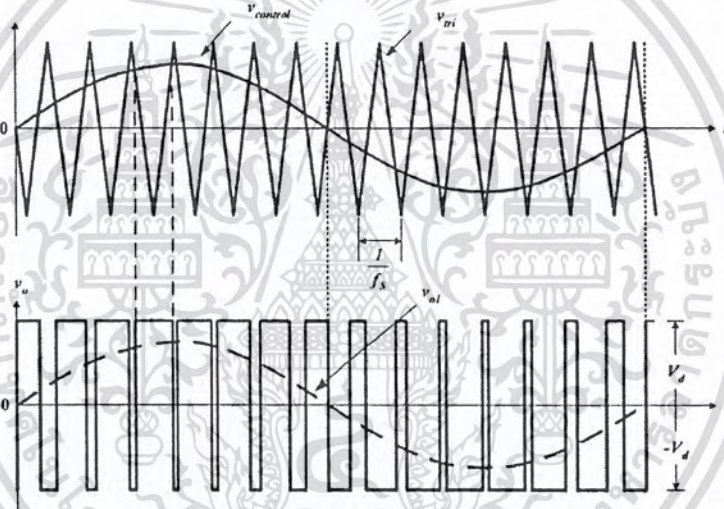
$$V_o = V_{Ao} - V_{Bo} = 2V_{Ao}$$

$$\hat{V}_{o1} = m_a V_d \quad \text{เมื่อ } m_a \leq 1.0 \quad (2.15)$$

$$V_d < \hat{V}_{o1} < \frac{4}{\pi} V_d \quad \text{เมื่อ } m_a > 1.0 \quad (2.16)$$

หรืออาจจะสรุปได้ว่าแรงดันไฟฟ้ายอดด้านนอกจะเท่ากับสมการที่ (2.15) เมื่อ  $m_a$  อยู่ในเชิงเส้น และแรงดันไฟฟ้ายอดด้านนอกจะเท่ากับสมการที่ (2.16) เมื่อ  $m_a$  อยู่ในช่วงโอเวอร์มอดูเลชัน

โดยที่แรงดันไฟฟ้าด้านนอกจะสวิตช์อยู่ระหว่าง  $+V_d$  กับ  $-V_d$  ดังแสดงในรูปที่ 2.23 ส่วนไซด์แบนฮาร์โมนิกจะเกิดขึ้นรอบๆ  $m_f$ ,  $2m_f$ ,  $3m_f$ , ... เช่นหากความถี่สวิตช์ซึ่งเท่า 20 kHz ไซด์แบนฮาร์โมนิกก็จะเกิดขึ้นที่ 20 kHz, 40 kHz และ 60 kHz เป็นต้น ดังเช่นที่ได้อธิบายในสมการที่ (2.11)



รูปที่ 2.23 การสวิตช์แรงดันแบบไบโพลาร์

สิ่งที่ระบุว่าเป็นการสวิตช์แบบไบโพลาร์ คือ

1. มีการสวิตช์ของแรงดันระหว่างสาย  $v_o$  ระหว่างขั้วบัสบวกกับบัสลบ
2. ความถี่ของพัลส์ที่ไหลจะเท่ากับความถี่ของ  $v_{tri}$
3. จะเกิดความถี่จากสเปคตราคือ เริ่มต้นที่รอบๆ  $f_s$  และจำนวนเท่าของ  $f_s$

#### 2.4.2 การสวิตช์แรงดันไฟฟ้าแบบยูนิโพลาร์

ข้อแตกต่างระหว่างการสวิตช์แรงดันไฟฟ้าแบบไบโพลาร์กับแบบยูนิโพลาร์ (Unipolar voltage switching) ก็คือในแบบยูนิโพลาร์การควบคุมการสวิตช์ในกึ่ง A กับกึ่ง B จะแยกสัญญาณควบคุมออกจากกัน คือการสวิตช์ในกึ่ง A ถูกควบคุมจากสัญญาณ  $V_{control}$  เทียบกับสัญญาณรูปสามเหลี่ยม ( $V_{tri}$ ) ขณะที่สวิตช์ในกึ่ง B จะถูกควบคุมจากสัญญาณ  $-V_{control}$  เทียบกับสัญญาณรูปสามเหลี่ยม ( $V_{tri}$ ) การสวิตช์จะมีเงื่อนไขดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $v_{\text{control}} > v_{\text{tri}}$  : สวิตช์  $T_{A+}$  จะนำกระแส  $v_{AN} = V_d$

เมื่อ  $v_{\text{control}} < v_{\text{tri}}$  : สวิตช์  $T_{A-}$  จะนำกระแส  $v_{AN} = 0$

เมื่อ  $-(v_{\text{control}}) > v_{\text{tri}}$  : สวิตช์  $T_{B+}$  จะนำกระแส  $v_{BN} = V_d$

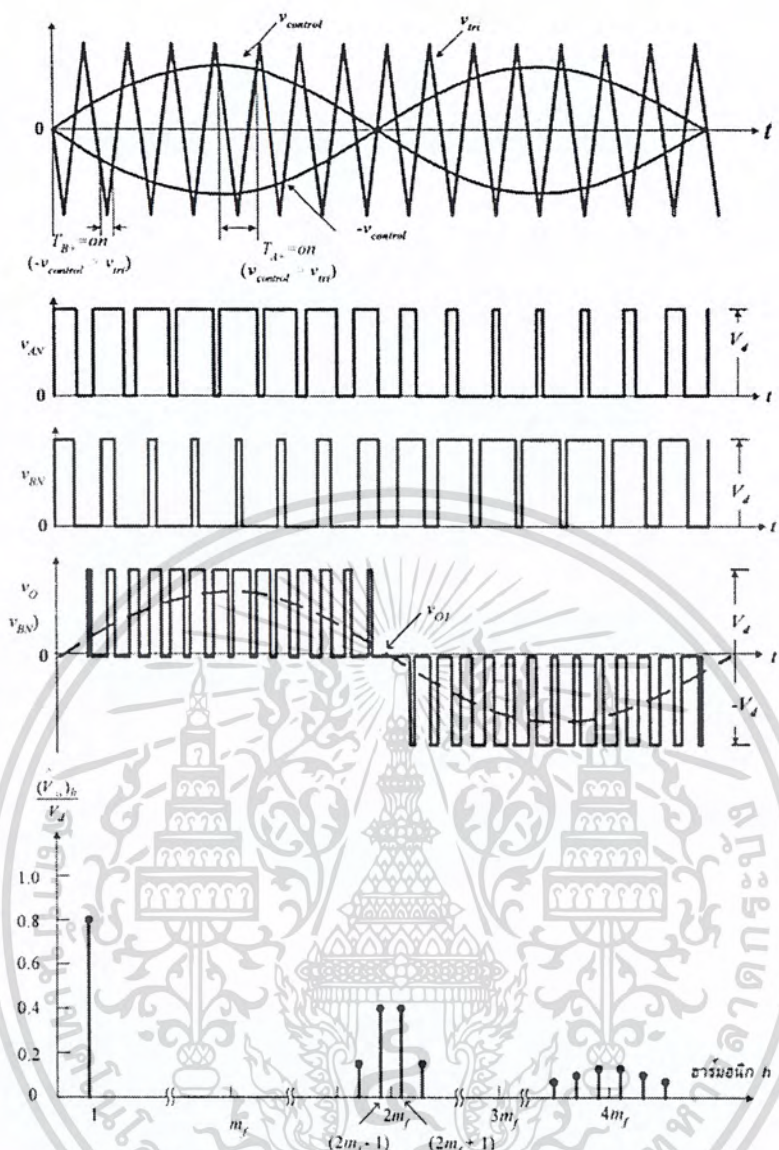
เมื่อ  $-(v_{\text{control}}) < v_{\text{tri}}$  : สวิตช์  $T_{B-}$  จะนำกระแส  $v_{BN} = 0$

ตารางที่ 2.2 เงื่อนไขการสวิตช์ แรงดันเฟสและแรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์แบบยูนิโพลาร์

เงื่อนไข	สวิตช์นำกระแส	สวิตช์นำกระแส	$V_{AN}$	$V_{BN}$	$V_0$
1	$T_{A+}$	$T_{B+}$	$V_d$	0	$V_d$
2	$T_{A-}$	$T_{B-}$	0	$V_d$	$-V_d$
3	$T_{A+}$	$T_{B+}$	$V_d$	$V_d$	0
4	$T_{A-}$	$T_{B-}$	0	0	0

จากตารางที่ 2.2 การเปลี่ยนสถานะของแรงดันระหว่างสาย ( $V_0$  หรือ  $V_{ab}$ ) จะกลายเป็นการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันอยู่ระหว่างศูนย์ไปยังบวกหรือศูนย์ไปยังลบ จึงทำให้ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันจากการสวิตช์สูง เช่น กรณีไบโพลาร์

จุดเด่นของยูนิโพลาร์ คือการเกิดจากความถี่ด้านออกจะมีความถี่เป็นสองเท่าของความถี่สวิตช์ของแต่ละเฟส เช่นความถี่สวิตช์ของอุปกรณ์เป็น 10 KHz อาจเป็นการทำงานแบบยูนิโพลาร์ ค่าแรงดันออกจะประกอบไปด้วยสัญญาณที่ดับเบิ้ลยูเอ็ม ที่มีความถี่หลักมูลและความถี่ฮาร์มอนิกที่ 2 เท่าของแบบไบโพลาร์ที่ 20 KHz สอดคล้องกับสเปคตร้าของรูปที่ 2.24 โดยเกิดความถี่ขึ้นรอบข้าง ผลของความถี่ที่โหลตเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าทำให้การออกแบบวงจรองความถี่ เล็ก ง่ายประหยัด



รูปที่ 2.24 การสวิตชิงแรงดันไฟฟ้าแบบยูนิโพลาร์

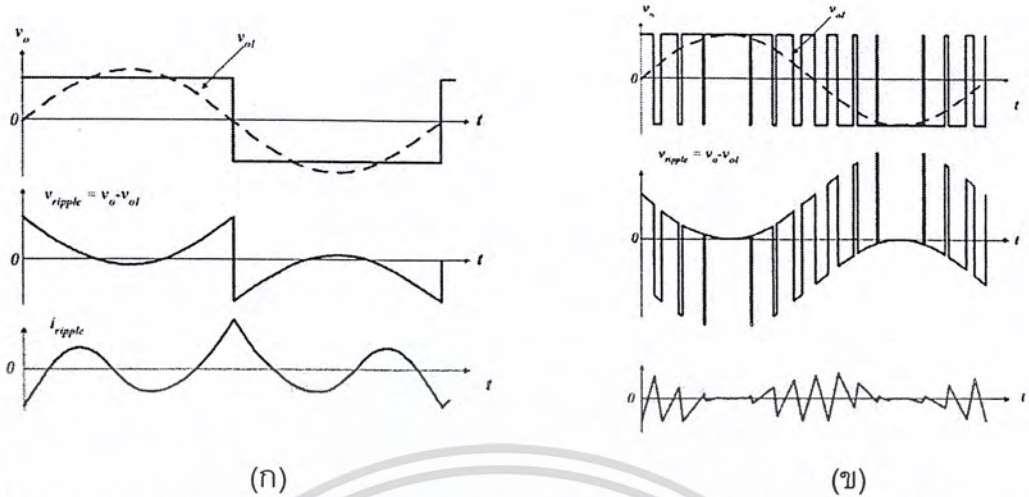
เงื่อนไขในการสร้างแรงดันเฟสและแรงดันไฟฟ้าด้านออกตกคร่อมโหลด ( $v_o$ ) แสดงในตารางที่ 2.2

### 2.4.3 ค่าระลอกคลื่นของแรงดันไฟฟ้าด้านออกของอินเวอร์เตอร์เฟสเดียว

รูปที่ 2.25 แสดงถึงตัวอย่างค่าแรงดันระลอกคลื่นแรงดันและกระแสไฟฟ้าด้านออกของอินเวอร์เตอร์ที่มีการสวิตชิงแบบรูปคลื่นสี่เหลี่ยมกับแบบไบโพลาร์ โดยนิยามของค่าระลอกคลื่นของแรงดันไฟฟ้าคือแรงดันไฟฟ้าด้านออกลบด้วยแรงดันไฟฟ้าด้านออกความถี่หลักมูล

เช่นในรูปที่ 2.25 จะสังเกตเห็นได้ว่า ค่าระลอกคลื่นของกระแสไฟฟ้าด้านออกของการสวิตชิงแบบรูปคลื่นสี่เหลี่ยมจะมีค่ามากกว่าแบบไบโพลาร์ ซึ่งความต้องการในการออกแบบหรือประยุกต์ใช้งานต้องการค่าระลอกคลื่นน้อยที่สุด

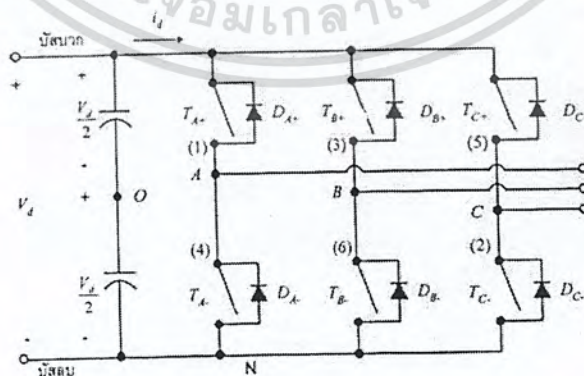
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.25 ค่าแรงดันระลอกคลื่นแรงดันและกระแสไฟฟ้าด้านออกของอินเวอร์เตอร์เฟสเดียว  
 (ก) การสวิตชิงแบบรูปคลื่นสี่เหลี่ยม (ข) การสวิตชิงแบบไบโพลาร์

2.5 อินเวอร์เตอร์สามเฟส

การแปลงผันกำลังไฟฟ้าจากแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับให้กับโหลดสามเฟสนิยมแปลงผันกำลังไฟฟ้า ผ่านอินเวอร์เตอร์สามเฟสซึ่งเหมาะกับงานที่ต้องการกำลังไฟฟ้าสูง เพราะถ้าหากจะใช้อินเวอร์เตอร์เฟสเดียวแบบฟูลบริดจ์จำนวนสามชุดก็ได้ แต่ต้องใช้สวิตช์จำนวนถึง 12 ตัวนอกจากนั้นยังต้องอาศัยวงจรควบคุมที่ทำให้แต่ละเฟสต่างกัน 120 องศาของความถี่หลักมูลจึงไม่เหมาะที่จะใช้อินเวอร์เตอร์เฟสเดียวแบบฟูลบริดจ์จำนวนสามตัวจึงมีการพัฒนาอินเวอร์เตอร์สามเฟสขึ้นมาใช้ที่ควบคุมแรงดันไฟฟ้าด้านออกได้ทั้งขนาดและความถี่เช่นในรูปที่ 2.26 จะเห็นได้ว่ามีจำนวนสวิตช์และไดโอดจำนวนอย่างละ 6 ตัว และประกอบไปด้วยสามกิ่งหรือสามเฟส



รูปที่ 2.26 วงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

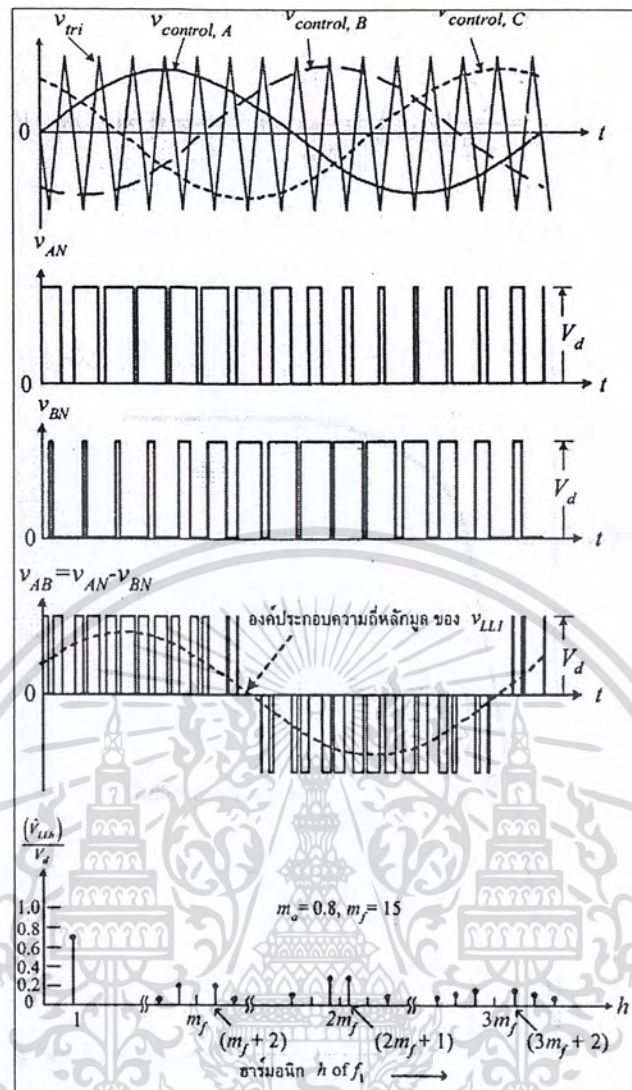
### 2.5.1 อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าสามเฟสแบบพีดับเบิลยูเอ็ม

อินเวอร์เตอร์สามเฟสจะคล้ายกับอินเวอร์เตอร์เฟสเดียวคือ ต้องการแรงดันไฟฟ้าด้านออกที่ควบคุมได้ทั้งขนาดและความถี่ เพื่อให้จะได้แรงดันไฟฟ้าด้านออกที่สมดุลและมีเฟสต่างกัน 120 องศาของความถี่หลักมูล จึงต้องใช้รูปคลื่นสามเหลี่ยมเปรียบเทียบกับแรงดันควบคุมรูปไซน์สามรูปคลื่นที่เฟสต่างกัน 120 องศา ดังแสดงในรูป 2.27 (ก) ที่มีค่า  $m_f = 15$  ค่าแรงดันเฟส  $v_{an}$ ,  $v_{bn}$  จะวัดเทียบกับบัสลบที่เป็นบัสอ้างอิงส่วนค่าแรงดันไลน์  $v_{ab}$  ค่าที่เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจะถูกหักล้างไป ดังที่แสดงในรูปที่ 2.27 (ข) เป็นการสวิตชิงแบบพีดับเบิลยูเอ็ม

ในอินเวอร์เตอร์สามเฟสจะพิจารณาฮาร์โมนิกเน้นเฉพาะค่าแรงดันไฟฟ้าระหว่างสาย (line-to-line voltage) เริ่มจากฮาร์โมนิกของแรงดันเฟส ( $v_{an}$ ) ดังแสดงในรูปที่ 2.27 ซึ่งจะมีค่าฮาร์โมนิกเลขคี่เกิดขึ้นที่ค่าไซน์แบนด์ของ  $m_f$  และที่จำนวนเท่าของ  $m_f$  โดยค่าแรงดันเฟส  $v_{an}$ ,  $v_{bn}$  จะมีค่าเฟสต่างกัน 120 องศา ดังนั้นเฟสจะเท่ากันหรือความต่างเฟสเป็นศูนย์ทุกๆ 3  $m_f$  ทำให้แรงดันไฟฟ้าจะไม่มีฮาร์โมนิกลำดับที่สามหารลงตัวที่เป็นเลขคี่ เช่น ฮาร์โมนิกที่ 3,9,15,21 เป็นต้น นอกจากนี้สำหรับในกรณีแรงดันเฟสที่มีโหลดสมดุล ค่าแรงดันระหว่างสายจะไม่มีฮาร์โมนิกเลขคู่ เช่นฮาร์โมนิกลำดับที่ 2,4,6,8 เป็นต้น

สามารถสรุปประเด็นสำคัญของอินเวอร์เตอร์สามเฟสได้ดังนี้

1. ที่ค่า  $m_f \leq 21$  หากต้องการกำจัดฮาร์โมนิกเลขคู่จะต้องใช้การสวิตชิงแบบพีดับเบิลยูเอ็มที่ซิงโครไนส์ (หมายถึง  $m_f$  ต้องเป็นจำนวนเต็มและความถี่หลักมูลจะเริ่มและจบคาบ พร้อมกับการสวิตชิงของรูปคลื่นสามเหลี่ยมดูในรูปที่ 2.27 (ก)) และ  $m_f$  ต้องเป็นจำนวนเลขคี่
2. ที่ค่า  $m_f \geq 21$  ฮาร์โมนิกย่อยที่เกิดขึ้นจากการสวิตชิงแบบพีดับเบิลยูเอ็มที่ไม่ซิงโครไนส์ ( $m_f$  ต้องไม่เป็นจำนวนเต็ม) จะมีค่าน้อย แต่ต้องตระหนักว่าควรหลีกเลี่ยงการสวิตชิงแบบพีดับเบิลยูเอ็มที่ไม่ซิงโครไนส์ เพราะจะทำให้เกิดฮาร์โมนิกย่อยที่ใกล้ความถี่หลักมูล
3. ที่ค่า  $m_a > 1$  หากไม่พิจารณาค่าของ  $m_f$  จะมีผลเช่นเดียวกับกรณีที่ 1



รูปที่ 2.27 รูปคลื่นและฮาร์โมนิกสเปกตร้าของอินเวอร์เตอร์สามเฟส

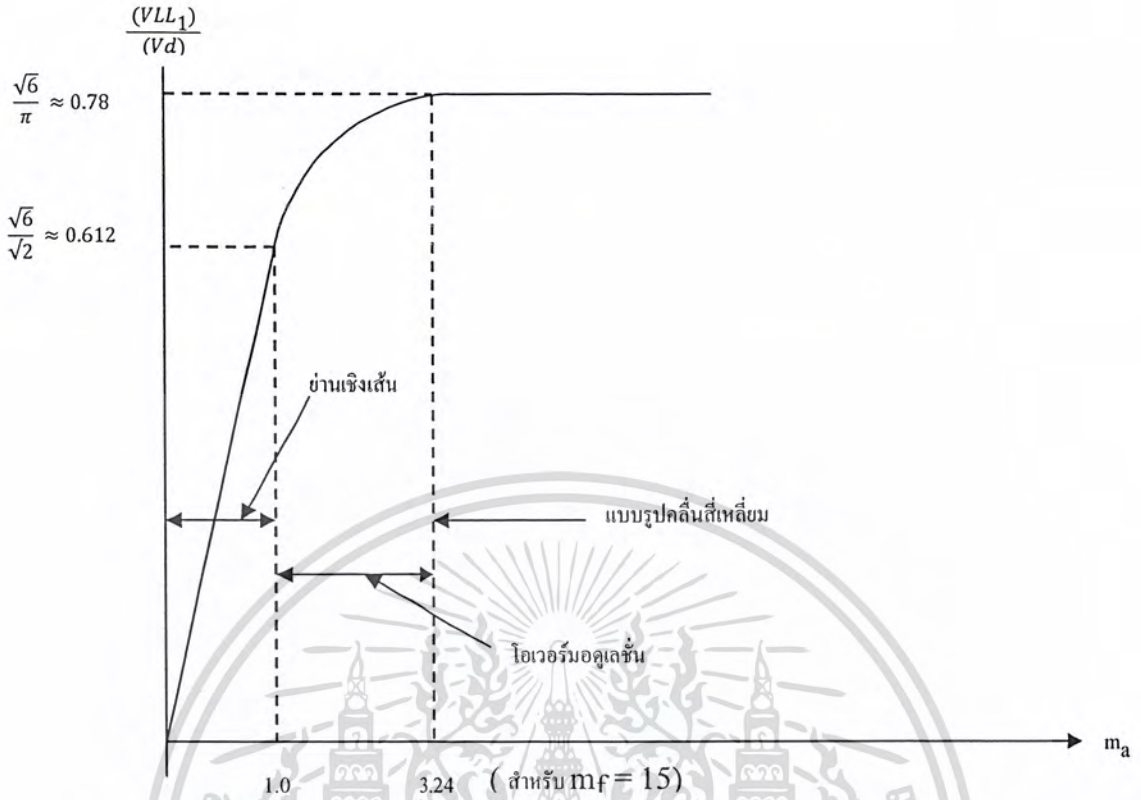
2.5.2 อินเวอร์เตอร์สามเฟสเมื่อทำงานในย่านมอดูเลชันเชิงเส้น ( $m_a \leq 1$ )

ในย่าน  $m_a \leq 1$  ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่หลักมูลในหนึ่งกิ่งหรือหนึ่งเฟส จะเท่ากับสมการที่ 8.17 ส่วนค่ารากของกำลังสองเฉลี่ยของแรงดันไฟฟ้าระหว่างสายของความถี่หลักมูลในสมการที่ 8.18 จะมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับค่า  $m_a$  แสดงในรูปที่ 2.17 ข้อสังเกตค่าแกนตั้งจะแตกต่างจากอินเวอร์เตอร์เฟสเดียว คือ จะเป็นอัตราส่วนแรงดันไฟฟ้าระหว่างสายที่ความถี่หลักมูลหารกับค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ( $V_{LL1}/V_d$ )

$$(V_{AN})_1 = m_a \cdot \frac{V_d}{2} \quad \text{เมื่อ } m_a \leq 1.0 \quad (2.17)$$

$$V_{LL1} = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} (V_{AN})_1 = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \cdot m_a \cdot \frac{V_d}{2} = 0.612 \cdot m_a \cdot V_d \quad (2.18)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.28 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $V_{LL1}/V_d$  กับ  $m_a$  ในอินเวอร์เตอร์สามเฟส

ความหมายของการทำงานในย่านมอดูเลชัน เช่นในรูปที่ 2.17 หากมีแหล่งจ่ายแรงดันเชื่อมโยงมีค่า 3.11 V เมื่อปรับ  $m_a = 0.5$  จะได้แรงดันระหว่างสายของระบบไฟเฟสเดียว คือ  $0.612 \times 0.5 \times 311 = 95.17$  V หมายถึงแรงดันที่ความถี่หลักมูล = 95.17 V เมื่อปรับ  $m_a = 1$  จะได้แรงดันที่ความถี่หลักมูลเท่ากับ 190.33 V นั่นคือเมื่อปรับ  $m_a$  จาก 0.5 เป็น 1 หรือจำนวน 2 เท่า แรงดันก็เพิ่มขึ้น 2 เท่าเช่นกัน

### 2.5.3 อินเวอร์เตอร์สามเฟสเมื่อทำงานในย่านโอเวอร์มอดูเลชัน ( $m_a > 1$ )

ในย่าน  $m_a > 1$  อธิบายการทำงานเช่นเดียวกับในอินเวอร์เตอร์เฟสเดียว อัตราส่วนแรงดันไฟฟ้าระหว่างสายที่ความถี่หลักมูลหารกับค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ( $V_{LL}/V_d$ ) จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.612 ถึง 0.78 แสดงในรูปที่ 2.18 สำหรับการทำงานในโหมดโอเวอร์มอดูเลชันมีข้อดีคือขนาดแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่หลักมูล จะมีค่าสูงกว่าในย่านเชิงเส้น ( $m_a \leq 1$ ) แต่การเพิ่มขึ้นของแรงดันไฟฟ้าจะไม่เป็นเชิงเส้นจนถึงค่าคงที่ค่าหนึ่ง ดังแสดงในรูปที่ 2.18 ข้อเสียของการทำงานในย่านโอเวอร์มอดูเลชันคือ ทำให้เกิดฮาร์โมนิกอันดับต่ำๆ ที่อยู่ใกล้ฮาร์โมนิกอันดับที่หนึ่ง

## 2.5.4 อินเวอร์เตอร์สามเฟสเมื่อทำงานในย่านรูปคลื่นสี่เหลี่ยม

อินเวอร์เตอร์สามเฟสที่ทำงานในย่านรูปคลื่นสี่เหลี่ยม จะเหมาะสำหรับใช้กับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่สามารถปรับระดับแรงดันไฟฟ้าระหว่างสายเพื่อใช้ในการปรับค่าระดับแรงดันไฟฟ้าด้านออก รูปที่ 2.29(ข) แสดงรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่มีช่วงเวลานำกระแส 180 องศา ในทำนองเดียวกับกรณีเฟสเดียวจะสามารถหาค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของแรงดันไฟฟ้าด้านออกที่ความถี่หลักมูลที่ทำงานในย่านรูปคลื่นสี่เหลี่ยมจะหาได้จากสมการที่ 2.19

$$V_{LL1} = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} (\hat{V}_{AN})_1 = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \frac{V_d}{2} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} \cdot V_d = 0.78 V_d \quad (2.19)$$

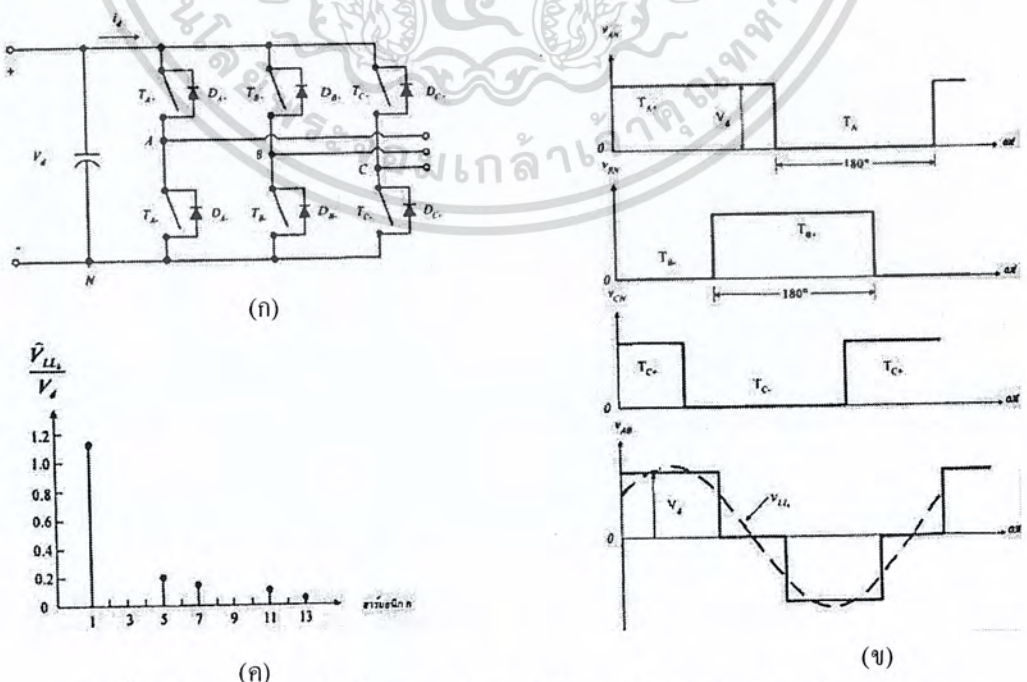
รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าระหว่างสายที่ทำงานในย่านรูปคลื่นสี่เหลี่ยมจะไม่ขึ้นกับโหลด และจะมีฮาร์โมนิกประกอบไปด้วย

$$V_{LLh} = \frac{0.78}{h} \cdot V_d \quad (2.20)$$

เมื่อ

$$h = 6n \pm 1, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

ฮาร์โมนิกที่เกิดขึ้นในอินเวอร์เตอร์สามเฟสกรณีแรงดันไฟฟ้าด้านออกและโหลดสมดุล จะเกิดที่ลำดับ  $h = 5, 7, 11, 13, \dots$  ดังแสดงในรูปที่ 2.29 (ค) ดังนั้นฮาร์โมนิกที่มีขนาดมากที่สุดและอยู่ใกล้ความถี่หลักมูลมากที่สุดคือฮาร์โมนิกลำดับที่ 5



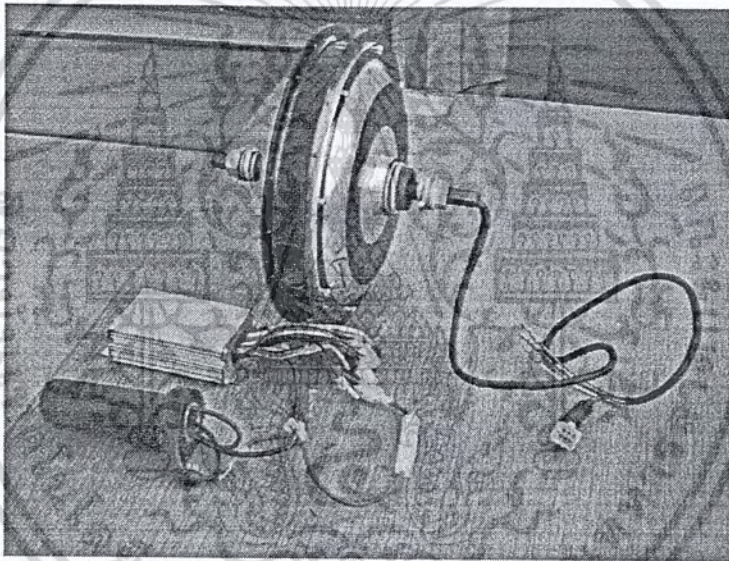
รูปที่ 2.29 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $V_{LL1}/V_d$  กับ  $m_a$  ในอินเวอร์เตอร์สามเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการเข้าถึงที่อาจมีข้อจำกัด เมื่อผู้ดูแลระบบได้เพิ่มข้อจำกัดหรือข้อห้ามในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

#### การทดสอบมอเตอร์แบบฮับ

ในบทนี้จะกล่าวถึงอุปกรณ์และเครื่องมือวัดทางไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบ การทดสอบมอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่าน 4 รูปแบบ คือ การทดสอบมอเตอร์แบบฮับแบบไม่มีภาระทางกล การทดสอบมอเตอร์แบบฮับแบบมีภาระทางกล การทดสอบมอเตอร์แบบฮับหลังจากการขึ้นซี่ล้อ และการทดสอบแบบเปรียบเทียบระหว่างมอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่านกับมอเตอร์แบบฮับชนิดมีแปรงถ่าน มีการนำเสนอตารางข้อมูลแรงดันไฟฟ้า กระแส กำลังไฟฟ้า และความเร็วรอบของมอเตอร์ดุมล้อ ที่ได้จากการทดสอบ วิเคราะห์ผลที่ได้ในรูปแบบกราฟแสดงความสัมพันธ์ รวมไปถึงสรุปผลที่ได้จากการทดลองแต่ละรูปแบบ



รูปที่ 3.1 มอเตอร์แบบฮับที่นำมาทดสอบ

มอเตอร์แบบฮับที่นำมาทดสอบ มีข้อมูลจำเพาะดังนี้

- เป็นมอเตอร์ชนิดไม่มีแปรงถ่าน
- ชนิด 3 เฟส 120 องศาทางไฟฟ้า
- ชนิด 46 ขั้วแม่เหล็ก
- พิกัดแรงดันไฟฟ้า 36 โวลต์
- พิกัดกำลังเอาต์พุต 350 วัตต์
- มวลเฉพาะมอเตอร์แบบฮับ 5.8 กิโลกรัม
- เส้นผ่านศูนย์กลาง 24.3 เซนติเมตร
- ราคามอเตอร์แบบฮับ 4,500 บาท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือวัดทางไฟฟ้า

เครื่องมือวัดทางไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบประกอบด้วย เครื่องวัดกำลังไฟฟ้า 1 เฟส และ 3 เฟส เครื่องวัดแรงดันและกระแสไฟฟ้า มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. ดิจิตอลออสซิลอโคป รุ่น DL1520 8 bit 200 Ms/s 150 MHz YOKOGAWA ใช้ในการวัดรูปคลื่นสัญญาณ
2. Doc Wattson DC Power Analyzer ใช้ในการวัดค่าแรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้า ในส่วนของไฟฟ้ากระแสตรงด้านแบตเตอรี่
3. วัดดีมิเตอร์ 3 เฟส ใช้วัดกำลังไฟฟ้า 3 เฟส ที่ตำแหน่งก่อนเข้ามอเตอร์แบบฮับ
4. มัลติมิเตอร์แบบดิจิตอลแคลมป์ รุ่น 2343 ของ YOKOGAWA ใช้ในการวัดกระแสไฟฟ้าในส่วนของไฟฟ้ากระแสสลับ ก่อนเข้ามอเตอร์คัมลัด
5. Tachometer ใช้วัดความเร็วรอบของมอเตอร์ด้วยวิธีการสะท้อนของแสง
6. แบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด ขนาด 12 โวลต์ 21 Ah 3 ก้อนมาต่ออนุกรมกัน เป็นแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 36 โวลต์

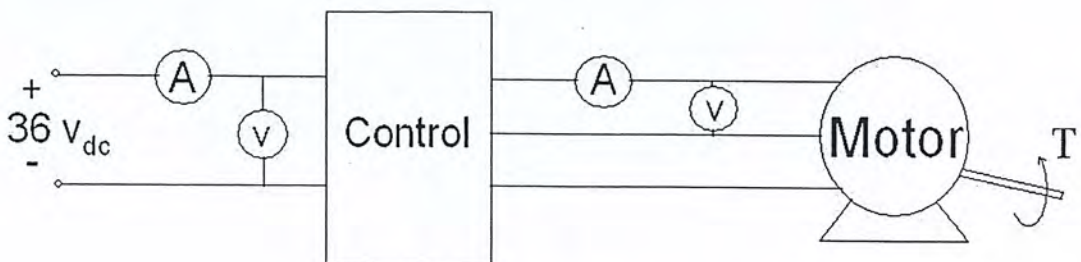
### 3.2 การทดสอบมอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่านแบบไม่มีภาระทางกล

#### 3.2.1 จุดประสงค์การทดสอบ

- เพื่อศึกษาสมรรถนะของมอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่านที่สภาวะไม่มีภาระทางกล
- เปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าจากแบตเตอรี่เข้าสู่ชุดคอนโทรล กับกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์แบบฮับ
- เพื่อศึกษารูปคลื่นสัญญาณของแรงดันและกระแสที่จ่ายเข้าสู่ชุดคอนโทรลและเข้าตัวมอเตอร์แบบฮับ

#### 3.2.2 วิธีการทดสอบ

วงจรการทดสอบประกอบด้วย แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 36 โวลต์ ต่อเข้ากับชุดคอนโทรล ซึ่งจะทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส จ่ายให้กับมอเตอร์แบบฮับ ต่อเครื่องมือวัดแรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้าทั้งด้านไฟฟ้ากระแสตรงและไฟฟ้ากระแสสลับ



รูปที่ 3.2 วงจรการทดสอบ

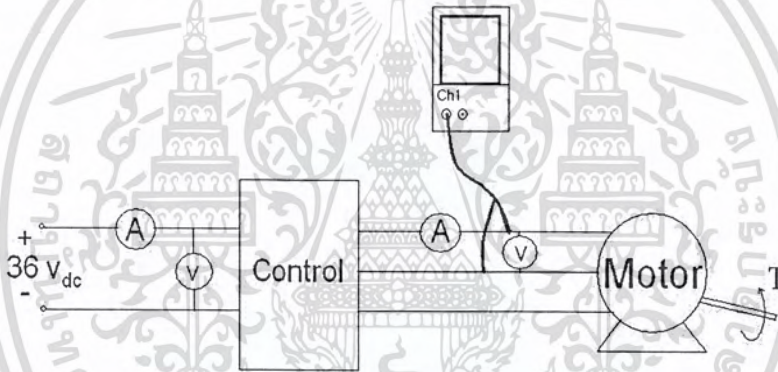
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการทดสอบโดยให้มอเตอร์แบบฮับหมุนได้อย่างอิสระ เพิ่มความเร็วรอบของมอเตอร์แบบฮับเป็นลำดับทีละ 10 rpm โดยเริ่มจากหยุดหนึ่ง บันทึกค่าแรงดัน กระแส กำลังไฟฟ้า และความเร็วรอบของมอเตอร์แบบฮับแล้วเพิ่มความเร็วรอบขึ้นเรื่อยๆ บันทึกข้อมูลที่ความเร็วรอบต่างๆ จนถึงความเร็วรอบสูงสุด

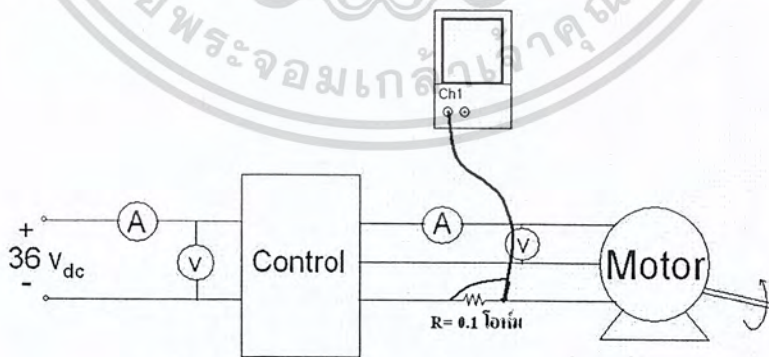
วัดรูปคลื่นสัญญาณแรงดัน โดยต่อสายโพรบวัดคร่อมระหว่างสายไฟ 2 เฟส ที่เข้ามอเตอร์แบบฮับ และวัดรูปคลื่นสัญญาณกระแส โดยใช้วิธีการต่อความต้านทานขนาดเล็กๆ อนุกรมเข้ากับสายไฟเข้ามอเตอร์แบบฮับ 1 เส้น แล้วใช้สายโพรบทำการจับรูปคลื่นสัญญาณแรงดันที่ตกคร่อมความต้านทาน แล้วคำนวณขนาดกระแสไฟฟ้าจากสมการ

$$I = V/R \quad (3.1)$$

ในการทดสอบนี้ใช้ค่าความต้านทานขนาด 0.1 โอห์ม



รูปที่ 3.3 วงจรการวัดรูปคลื่นสัญญาณแรงดัน



รูปที่ 3.4 วงจรการวัดรูปคลื่นสัญญาณกระแส

### 3.2.3 ผลการทดสอบ

จากการทดสอบมอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่านแบบไม่มีภาระทางกล ได้ผลการทดสอบดังนี้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 ผลการทดสอบมอเตอร์แบบอับแบบไม่มีภาระทางกล

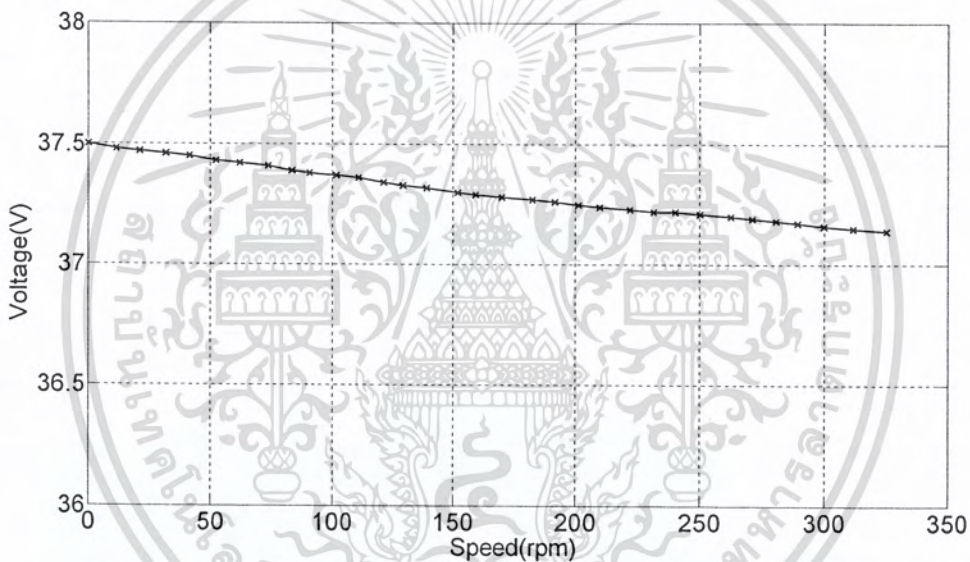
แรงดันแบตเตอรี่ (V)	กระแสไฟฟ้าจาก แบตเตอรี่ (A)	แรงดันไลน์ AC (V)	กระแสไลน์ AC (A)	ความเร็วรอบ (rpm)
37.50	0.040	0	0	0
37.48	0.075	6.68	0.02	11.9
37.47	0.090	7.99	0.05	21.2
37.46	0.105	9.27	0.07	31.8
37.45	0.125	10.28	0.09	41.2
37.43	0.145	11.32	0.12	52.1
37.42	0.165	12.18	0.14	62.1
37.41	0.185	13.12	0.17	73.1
37.39	0.205	13.89	0.19	83.0
37.38	0.225	14.21	0.21	90.2
37.37	0.250	15.45	0.24	101.6
37.36	0.265	15.93	0.26	111.1
37.34	0.290	16.69	0.29	121.5
37.33	0.305	17.16	0.31	129.3
37.32	0.325	17.78	0.33	139.0
37.30	0.350	18.64	0.36	152.1
37.29	0.370	19.06	0.38	159.3
37.28	0.395	19.71	0.41	169.8
37.27	0.425	20.48	0.43	182.5
37.26	0.450	21.06	0.45	191.5
37.25	0.470	21.58	0.48	201.2
37.24	0.490	22.05	0.5	209.8
37.23	0.520	22.75	0.52	222.0
37.22	0.545	23.27	0.55	231.7
37.22	0.570	23.72	0.57	240.3
37.21	0.595	24.22	0.59	250.1
37.20	0.625	24.84	0.61	262.4
37.19	0.650	25.27	0.63	271.1
37.18	0.680	25.86	0.65	280.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1(ต่อ) ผลการทดสอบมอเตอร์แบบฮับแบบไม่มีภาระทางกล

แรงดันแบตเตอรี่ (V)	กระแสไฟฟ้าจาก แบตเตอรี่ (A)	แรงดันไลน์ AC (V)	กระแสไลน์ AC (A)	ความเร็วรอบ (rpm)
37.17	0.705	26.16	0.68	289.2
37.16	0.735	26.74	0.7	299.8
37.15	0.765	27.19	0.72	311.8
37.14	0.795	27.83	0.75	325.6

นำข้อมูลที่ได้มาพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้



รูปที่ 3.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับแรงดันแบตเตอรี่

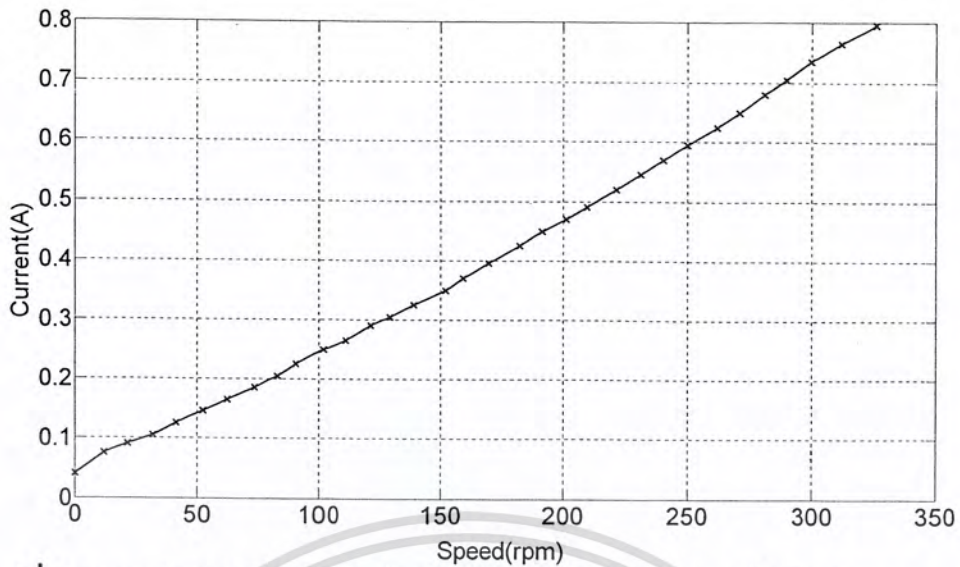
คำนวณค่า %Voltage regulation จากสูตร

$$\%Voltage\ regulation = \frac{V(No\ load) - V(Load)}{V(Load)} \times 100\% \quad (3.2)$$

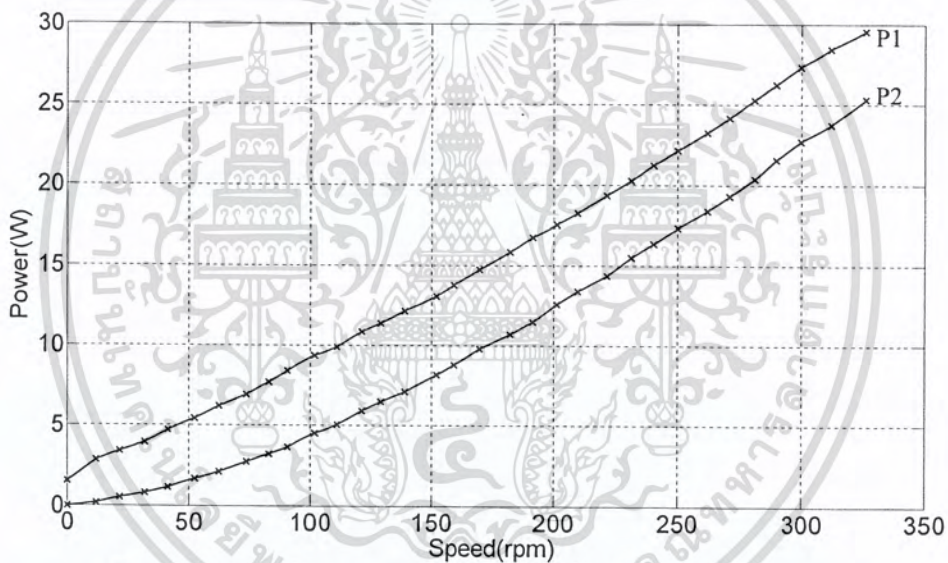
$$\%Voltage\ regulation = \frac{37.50 - 37.14}{37.14} \times 100\%$$

$$= 0.97\%$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับกระแสไฟฟ้าจากแบตเตอรี่



รูปที่ 3.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับกำลังไฟฟ้า

### 3.2.4 สรุปและวิจารณ์ผลที่ได้รับจากการทดสอบ

จากการทดสอบมอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่านแบบไม่มีภาระทางกล ขณะมอเตอร์แบบฮับหยุดนิ่งคือไม่มีการจ่ายกำลังด้านเอาต์พุต ชุดคอนโทรลมีการดึงกระแสเพียงประมาณ 0.04 แอมแปร์ เข้าสู่ชุดคอนโทรล ซึ่งถือเป็นความสูญเสียของระบบ

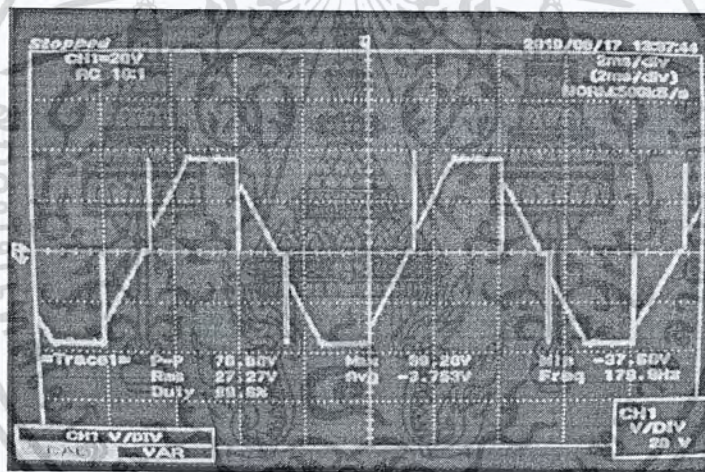
แบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดที่ใช้ พิกัด 36 โวลต์ แต่ใช้งานจริง วัดค่าเมื่อมอเตอร์แบบฮับหยุดนิ่งได้ 37.50 โวลต์ แล้วมีค่าลดลงเรื่อยๆ เมื่อเพิ่มความเร็วรอบมอเตอร์แบบฮับ เนื่องจากเมื่อเพิ่มความเร็วรอบ มอเตอร์แบบฮับจะดึงกระแสเพิ่มมากขึ้น เกิดแรงดันตกคร่อมความต้านทานภายในของแบตเตอรี่ ทำให้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ออกจากแบตเตอรี่มีค่าลดลงเล็กน้อย และมีค่า 37.14 โวลต์ ที่ความเร็วรอบสูงสุด มีค่า  $\%Voltage\ regulation = 0.97\%$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

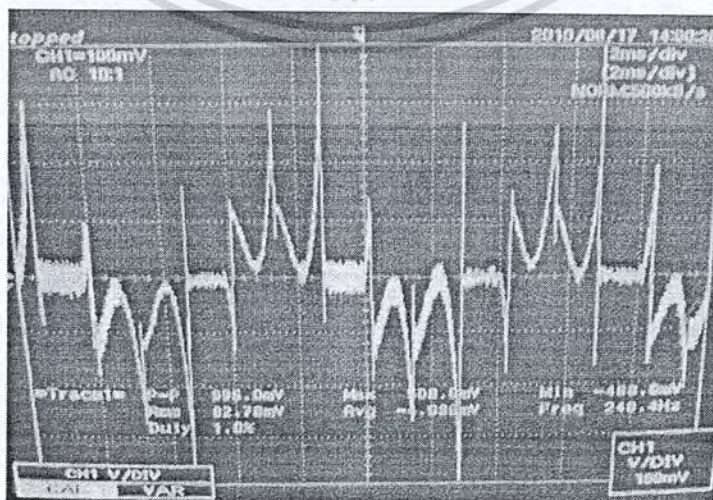
เมื่อเพิ่มความเร็วยรอบ มอเตอร์แบบฮับจะมีการดึงกระแสไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นเป็นเชิงเส้น ดังแสดงในรูปที่ 3.6 แสดงว่าการเพิ่มความเร็วยรอบ มอเตอร์แบบฮับจะมีการดึงกำลังไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น ค่าความสูญเสียที่ชุดคอนโทรล คำนวณได้จากกำลังไฟฟ้าที่จ่ายจากแบตเตอรี่ ลบด้วย กำลังไฟฟ้าที่เข้ามอเตอร์แบบฮับ ซึ่งจากรูปที่ 3.7 ค่าความสูญเสียที่ชุดคอนโทรล จะมีค่า 1.5 วัตต์ เมื่อมอเตอร์แบบฮับหยุดนิ่ง และเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเพิ่มความเร็วยรอบมอเตอร์แบบฮับขึ้นไปเรื่อยๆ มอเตอร์แบบฮับมีความเร็วยรอบสูงสุด 325.6 rpm

การหาลำโพงไฟฟ้า 3 เฟส ที่ชุดคอนโทรลจ่ายเข้ามอเตอร์แบบฮับ ทำได้โดยการใช้วัตต์ มิเตอร์ 3 เฟส วัดค่า ทำการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่ได้กับค่าแรงดันไลน์และกระแสไลน์ จะได้ ความสัมพันธ์ของค่า power factor มีค่าประมาณ 0.7 lagging

ขณะบิดคันเร่งเพิ่มความเร็วยรอบของมอเตอร์แบบฮับ กระแสไฟฟ้าจากแบตเตอรี่จะเกิด กระแสกระชากหลายเท่าตัว อาจสูงถึง 16 แอมแปร์ กระแสกระชากนี้จะแปรผันตามการบิด โดย ถ้าเพิ่มความเร็วยรอบอย่างช้าๆ กระแสกระชากจะมีขนาดน้อยๆ ถ้าเพิ่มความเร็วยรอบอย่าง ทันทีทันใด กระแสกระชากจะมีค่ามาก



รูปที่ 3.8 รูปคลื่นแรงดันที่ได้จากออสซิลอสโคป



รูปที่ 3.9 รูปคลื่นกระแสที่ได้จากออสซิลอสโคป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เฉพาะในโครงการวิจัยเท่านั้นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปคลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเข้ามอเตอร์แบบฮับที่ได้จากออสซิลโลสโคป มีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมู เกือบจะเป็น Square wave เนื่องจากการสวิตชิงแบบโอเวอร์มอดดูเลชั่น ของสัญญาณ Pulse-Width Modulation (PWM) ในการแปลงแรงดันไฟฟ้าจาก DC เป็น AC ดังรูปที่ 3.8 มีความถี่ของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าประมาณ 175 Hz

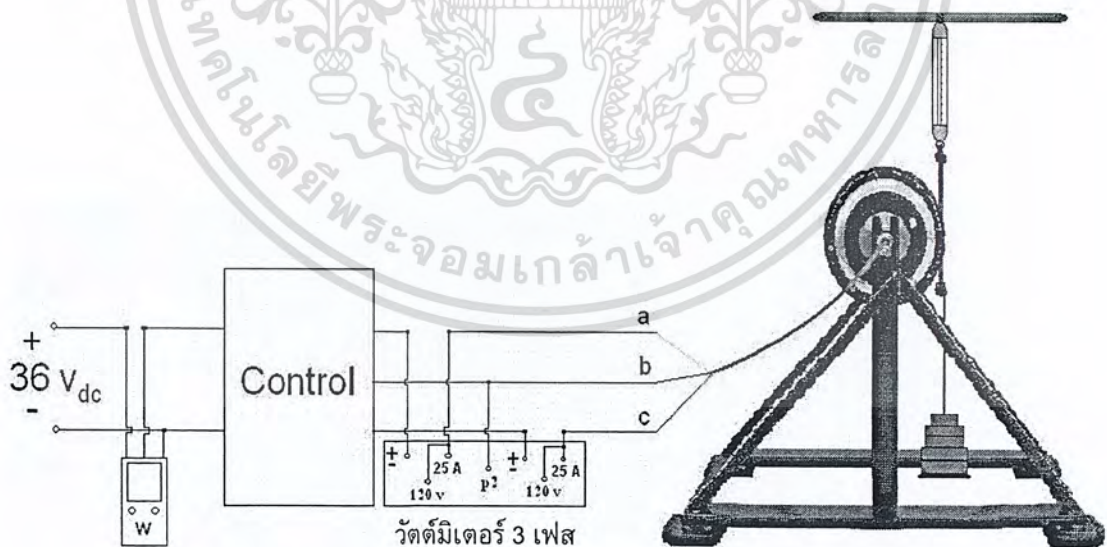
รูปคลื่นสัญญาณกระแสไฟฟ้าเข้ามอเตอร์แบบฮับที่ได้จากออสซิลโลสโคป ใช้วิธีการต่อความต้านทานขนาดเล็กน้อยๆ อนุกรมเข้ากับสายไฟเข้ามอเตอร์แบบฮับ 1 เส้น แล้วใช้สายโพรบทำการจับรูปคลื่นสัญญาณแรงดันที่ตกคร่อมความต้านทาน แล้วคำนวณขนาดกระแสไฟฟ้าจากสมการที่ 3.1 ในการทดสอบนี้ใช้ค่าความต้านทานขนาด 0.1 โอห์ม จากรูปที่ 3.9 ค่าแรงดันที่อ่านได้จากออสซิลโลสโคปเท่ากับ 82.78 มิลลิโวลต์ ค่าขนาดกระแสไฟฟ้าจากสมการ 3.1 จะได้ค่ากระแสไฟฟ้าจริงเท่ากับ 827.8 มิลลิแอมแปร์

### 3.3 การทดสอบมอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่านแบบมีภาระทางกล

#### 3.3.1 จุดประสงค์การทดสอบ

- เพื่อศึกษาสมรรถนะของมอเตอร์แบบฮับที่สภาวะมีภาระทางกล
- เปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ กับกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์และกำลังเอาต์พุตที่ได้จากมอเตอร์แบบฮับ

#### 3.3.2 วิธีการทดสอบ



รูปที่ 3.10 วงจรการทดสอบมอเตอร์แบบฮับแบบมีภาระทางกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การมอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่านแบบมีภาระทางกล ทดสอบโดยใช้เชือกพันรอบมอเตอร์แบบฮับ ปลายเชือกด้านบนผูกติดกับตาชั่งสปริงซึ่งเกี่ยวยึดไว้กับคานด้านบน ปลายเชือกด้านล่างถ่วงด้วยมวล ทำการจ่ายกำลังไฟฟ้า ให้มอเตอร์แบบฮับหมุนด้วยความเร็วรอบสูงสุด จะเกิดแรงเสียดทานกระทำระหว่างมอเตอร์แบบฮับกับเชือก ทำให้เกิดแรงจุดดึงมวลขึ้นบนที่ค่าแรงดัน กระแส กำลังไฟฟ้า ค่าที่อ่านได้จากตาชั่งสปริง และความเร็วรอบของมอเตอร์แบบฮับ เพิ่มขนาดของมวลทีละ 0.25 กิโลกรัม บันทึกข้อมูลที่ได้จากเครื่องมือวัด ที่ขนาดของมวลต่างๆ

### 3.3.3 ผลการทดสอบ

จากการทดสอบมอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่านแบบมีภาระทางกล ทำการเพิ่มขนาดของมวลจนถึง 6 กิโลกรัม เมื่อทำการเพิ่มขนาดของมวลต่อไป จะเกิดความไม่เสถียรภาพของระบบ ค่าที่อ่านได้จากตาชั่งสปริงจะสั่นแบบตั้งขึ้นลงจึงหยุดทำการทดสอบ ผลการทดสอบจึงได้ที่เครื่องพิกัดกำลัง

สมการที่ใช้ในการคำนวณ

$$T = 9.8(W_1 - W_2)r \quad (3.3)$$

$$\omega = 2\pi N_r / 60 \quad (3.4)$$

$$P_3 = T\omega \quad (3.5)$$

เมื่อ

$$W_1 = \text{มวลของตุ้มน้ำหนัก (kg)}$$

$$W_2 = \text{มวลที่อ่านจากตาชั่งสปริง (kg)}$$

$$r = \text{ระยะจากจุดศูนย์กลางมอเตอร์ถึงตำแหน่งเชือก (m)}$$

$$N_r = \text{ความเร็วมอเตอร์ (rpm)}$$

โดย

$$r = 0.118 \text{ m}$$

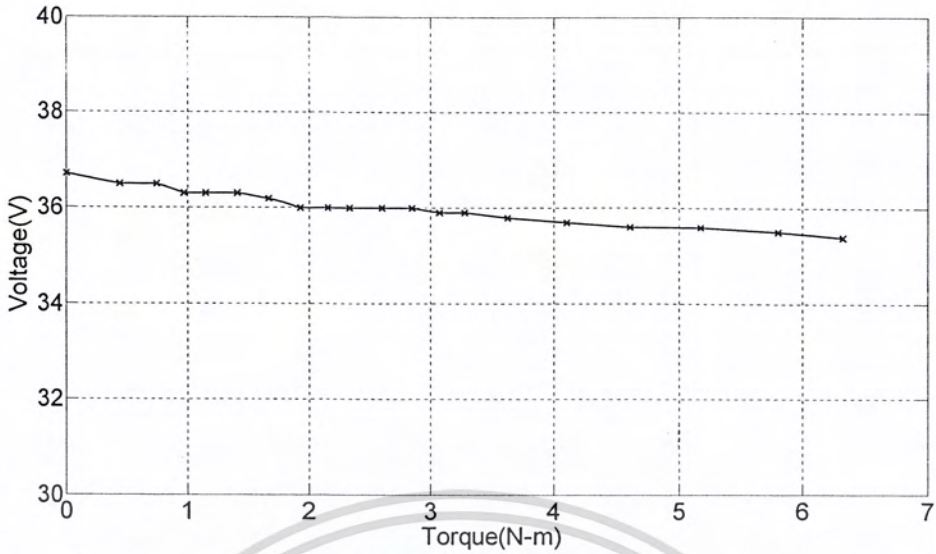
$$\text{เชือกและจานหนัก } 0.38 \text{ kg}$$

การทดสอบจะบันทึกค่าน้ำหนักของมวล( $W_1$ ) น้ำหนักที่อ่านจากตาชั่งสปริง( $W_2$ ) ความเร็วรอบของมอเตอร์ กำลังไฟฟ้าอินพุต( $P_1$ ) กำลังไฟฟ้าที่ออกจากชุดคอนโทรล( $P_2$ ) และคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุต( $P_3$ ) ได้จากสมการ 3.3 ถึงสมการ 3.5 ผลการทดสอบแสดงอยู่ในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ผลการทดสอบมอเตอร์แบบฮับแบบมีภาระทางกล

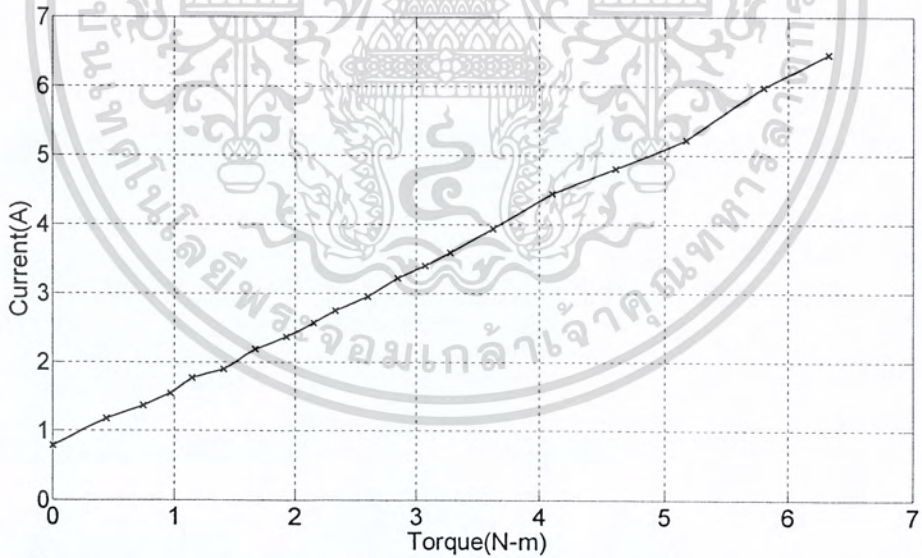
$W_1$ (kg)	$W_2$ (kg)	ความเร็วรอบ (rpm)	P1 (W)	P2 (W)	P3 (W)
0	0	308.0	40.1	36	14.5
0.25	0	304.7	47.5	41	23.61
0.5	0.06	303.1	53.9	49	30.79
0.75	0.16	299.5	62.4	58	35.75
1	0.20	296.4	68.9	63	43.15
1.25	0.22	293.6	77.1	70	51.05
1.5	0.24	292.6	83.0	76	59.14
1.75	0.30	290.9	90.6	84	65.49
2	0.40	289.5	97.1	89	70.65
2.25	0.42	287.0	104.5	95	78.13
2.5	0.46	282.7	113.2	102	84.36
2.75	0.52	281.7	119.4	109	90.57
3	0.60	277.1	127.4	115	94.90
3.5	0.80	272.3	139.1	123	103.53
4	0.90	268.4	156.7	137	115.25
4.5	0.95	264.7	169.0	149	128.06
5	0.98	260.2	184.0	163	141.14
5.5	0.95	250.2	209.4	177	151.96
6	1.00	246.9	225.4	192	163.69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



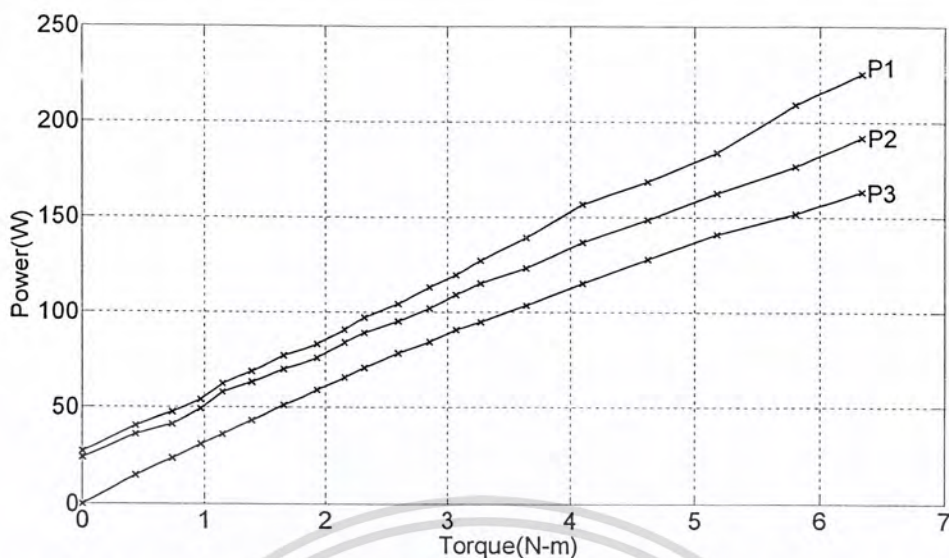
รูปที่ 3.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างทอร์กเอาต์พุตกับแรงดันแบตเตอรี่

$$\begin{aligned} \% \text{Voltage regulation} &= \frac{36.7 - 35.4}{35.4} \times 100\% \\ &= 3.67\% \end{aligned}$$



รูปที่ 3.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างทอร์กเอาต์พุตกับกระแสจากแบตเตอรี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



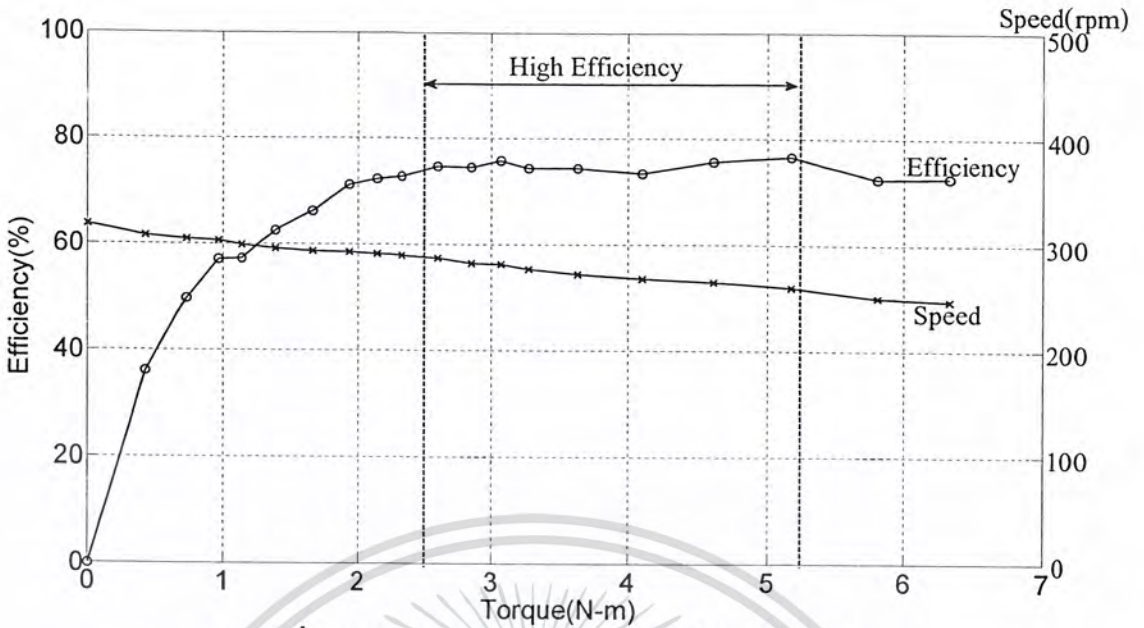
รูปที่ 3.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างทอร์กเอาต์พุตกับกำลังไฟฟ้า(P1,P2) และกำลังทางกล(P3)

### 3.3.4 สรุปและวิจารณ์ผลที่ได้รับจากการทดสอบ

จากการทดสอบมอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่านแบบมีภาระทางกล เมื่อเพิ่มขนาดของมวลที่ถ่วงมอเตอร์แบบฮับ จะเป็นการเพิ่มแรงที่กระทำกับมอเตอร์แบบฮับ เป็นการเพิ่มขนาดของภาระทางกลตามสมการที่ 3.3 – 3.5 มอเตอร์แบบฮับมีการดึงกระแสไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นเป็นเชิงเส้นแปรผันตามขนาดของภาระทางกล ดังแสดงในรูปที่ 3.12 แสดงว่าการเพิ่มขนาดของมวลที่ถ่วงมอเตอร์แบบฮับ มอเตอร์แบบฮับจะมีการดึงกำลังไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น ความเร็วรอบสูงสุดลดลงเมื่อโหลดเพิ่มขึ้น

กำลังไฟฟ้าที่จ่ายเข้าจะเกิดความสูญเสีย 2 แห่ง คือความสูญเสียที่ชุดคอนโทรล และความสูญเสียที่มอเตอร์แบบฮับ ค่าความสูญเสียที่ชุดคอนโทรล คำนวณได้จากกำลังไฟฟ้าที่จ่ายจากแบตเตอรี่(P1) ลบด้วยกำลังไฟฟ้าที่เข้ามอเตอร์แบบฮับ(P2) ความสูญเสียที่มอเตอร์แบบฮับ คำนวณได้จากกำลังไฟฟ้าที่เข้ามอเตอร์แบบฮับ(P2) ลบด้วยกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตที่ได้จากมอเตอร์แบบฮับ(P3) ประสิทธิภาพสูงสุดทั้งระบบของมอเตอร์แบบฮับ(P3/P1)ที่ได้จากการทดสอบคือ 76.7% ที่ขนาดภาระทางกล 141.2 วัตต์ ดังรูปที่ 3.14

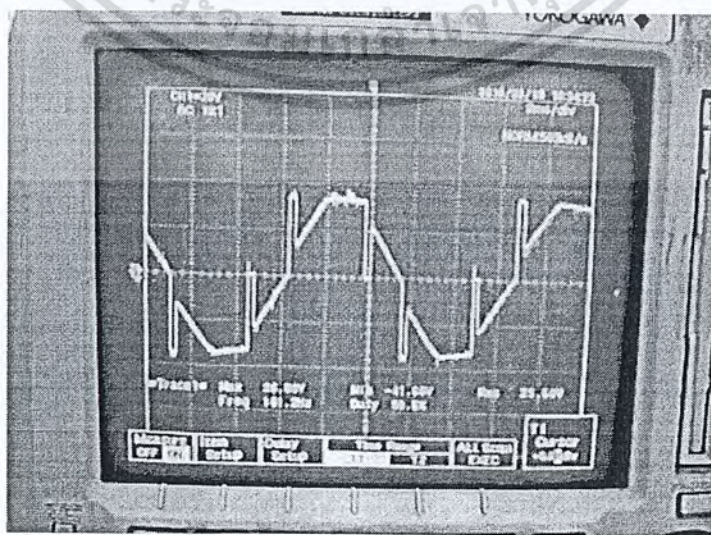
จากรูปที่ 3.14 จะเห็นว่า ที่ช่วงทอร์กเอาต์พุตตั้งแต่ 2.5 นิวตัน-เมตร ถึง 5.2 นิวตัน-เมตร เป็นช่วงที่มอเตอร์แบบฮับมีประสิทธิภาพสูง ลากเส้นในแนวตั้งไปชนเส้นกราฟของความเร็วยุติ ได้ช่วงของความเร็วยุติตั้งแต่ 288 rpm ถึง 260 rpm คำนวณว่านำมอเตอร์แบบฮับไปสว่างล้อขนาด 26 นิ้ว จะได้ย่านความเร็วที่เหมาะสมในการใช้งาน อยู่ที่ 32 กม./ชม. ถึง 35 กม./ชม.



รูปที่ 3.14 กราฟแสดงย่านที่เหมาะสมกับการใช้งาน

การทดสอบมอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่านแบบมีภาระทางกลนี้ เป็นการทดสอบแบบครึ่งพิกัดกำลัง คือ ทำการทดสอบที่ขนาดภาระทางกลตั้งแต่ 0 วัตต์ ถึง 163.7 วัตต์ ขณะที่พิกัดกำลังของมอเตอร์คือ 350 วัตต์ ทั้งนี้เนื่องจาก เกิดความไม่มีเสถียรภาพของระบบเมื่อทำการทดสอบที่ขนาดภาระทางกลสูงๆ ค่าที่อ่านได้จากตาชั่งสปริงจะสั่นแบบเคลื่อนที่ขึ้นลง จึงหยุดทำการทดสอบที่ขนาดของมวลถ่วงมอเตอร์แบบฮับ 6 กิโลกรัม

รูปคลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากออสซิลโลสโคป มีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมูเกือบจะเป็น Square wave คล้ายกับหัวข้อ 3.2 การทดสอบมอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่านแบบไม่มีภาระทางกล แต่จะมีความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นสัญญาณแรงดันไปจากเดิมเล็กน้อย ดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 รูปคลื่นแรงดันที่ได้จากออสซิลโลสโคป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานในโครงการวิจัยเท่านั้น เมื่อผู้รู้เห็นนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปคลื่นสัญญาณกระแสไฟฟ้าที่ได้จากออสซิลอสโคป คล้ายกับการทดสอบมอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่านแบบไม่มีภาระทางกล แต่จะมีค่ายอดเปลี่ยนแปลงตามขนาดของภาระทางกล

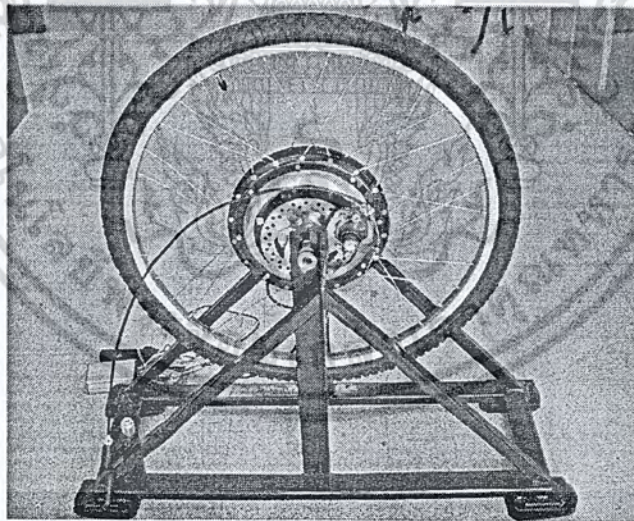
### 3.4 การทดสอบมอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่านหลังขึ้นซี่ล้อ

#### 3.4.1 จุดประสงค์การทดสอบ

- เพื่อศึกษาสมรรถนะของมอเตอร์แบบฮับหลังขึ้นซี่ล้อ ที่สภาวะไม่มีภาระทางกล
- เปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ของมอเตอร์แบบฮับหลังระหว่างก่อนขึ้นซี่ล้อ และหลังขึ้นซี่ล้อ

#### 3.4.2 วิธีการทดสอบ

หลังเสร็จจากการทดสอบมอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่านแบบมีภาระทางกล ได้นำมอเตอร์แบบฮับไปขึ้นซี่ล้อพร้อมทั้งติดตั้งเบรกและเกียร์ 6 สปีด ขั้นตอนที่ยุ่งยากและใช้เวลานาน คือการปรับสมดุลของซี่ล้อ น้ำหนักมอเตอร์แบบฮับหลังขึ้นซี่ล้อรวมดีสเบรกและเกียร์ 6 สปีด คือ 8.2 กิโลกรัม น้ำหนักเฉพาะมอเตอร์แบบฮับ 5.8 กิโลกรัม วงล้อมีน้ำหนักเพิ่มขึ้น 2.4 กิโลกรัม เส้นผ่านศูนย์กลางวงล้อ 26 นิ้ว วัดจากขอบยางทั้งสองด้าน



รูปที่ 3.16 มอเตอร์แบบฮับหลังขึ้นซี่ล้อ

การทดสอบมอเตอร์แบบฮับหลังขึ้นซี่ล้อ จะทำการทดสอบเหมือนกับหัวข้อ 3.2 การทดสอบมอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่านแบบไม่มีภาระทางกล โดยให้มอเตอร์แบบฮับหมุนได้อย่างอิสระ เพิ่มความเร็วรอบของมอเตอร์แบบฮับเป็นลำดับที่ละ 10 rpm โดยเริ่มจากหยุดหนึ่งบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า และความเร็วรอบของมอเตอร์แบบฮับ แล้วเพิ่มความเร็วยกขึ้นเรื่อยๆ บันทึกข้อมูลที่ความเร็วรอบต่างๆ จนถึงความเร็วรอบสูงสุด เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

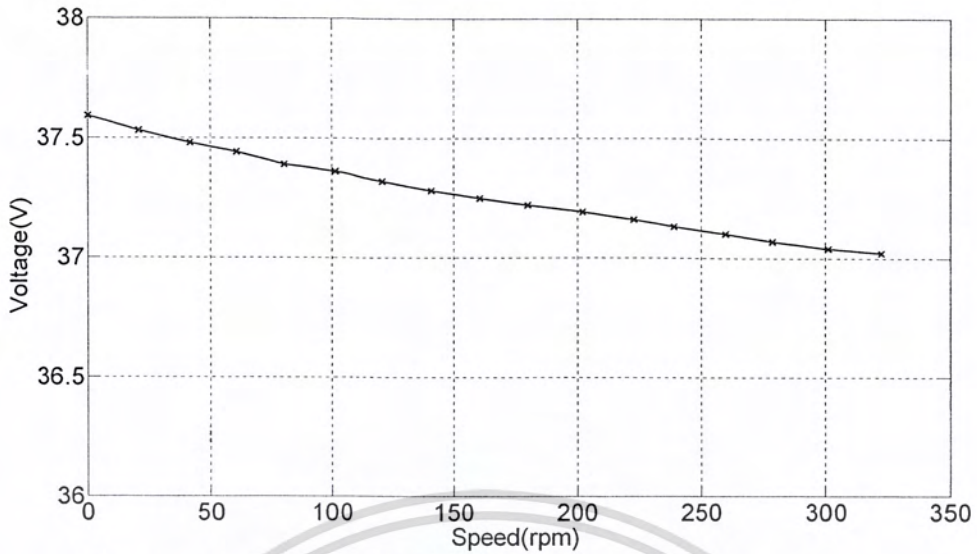
### 3.4.3 ผลการทดสอบ

จากการทดสอบมอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่านหลังขึ้นซี่ล้อแบบไม่มีภาระทางกล ได้ผลการทดสอบดังนี้

ตารางที่ 3.3 ผลการทดสอบมอเตอร์แบบฮับหลังขึ้นซี่ล้อ

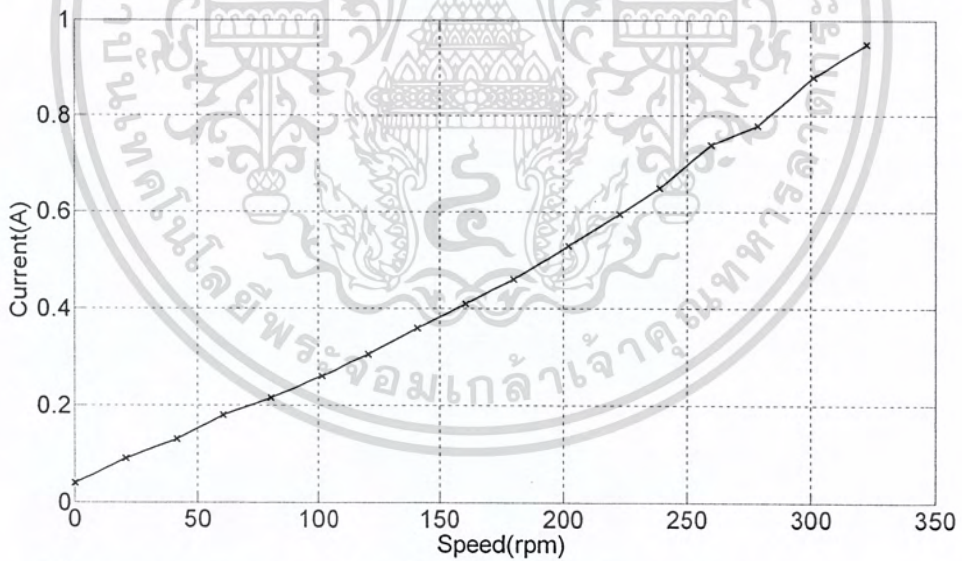
แรงดัน แบตเตอรี่ (V)	กระแสไฟฟ้าจาก แบตเตอรี่ (A)	แรงดันไลน์ AC (V)	กระแสไลน์ AC (A)	ความเร็วรอบ (rpm)
37.59	0.04	0	0	0
37.53	0.09	1.5	0.34	20.5
37.48	0.13	3.5	0.38	41.7
37.44	0.18	5.5	0.45	60.5
37.39	0.215	7.5	0.49	80.6
37.36	0.26	9.0	0.52	101.1
37.32	0.305	10.5	0.55	121.2
37.28	0.36	12.3	0.58	141.1
37.25	0.41	14.0	0.61	160.8
37.22	0.46	15.5	0.65	179.8
37.19	0.53	17.3	0.69	202.0
37.16	0.595	19.0	0.74	222.9
37.13	0.65	20.5	0.76	238.7
37.10	0.74	22.0	0.80	259.7
37.07	0.78	24.0	0.84	278.2
37.04	0.88	25.5	0.88	300.9
37.02	0.95	27.5	0.92	322.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



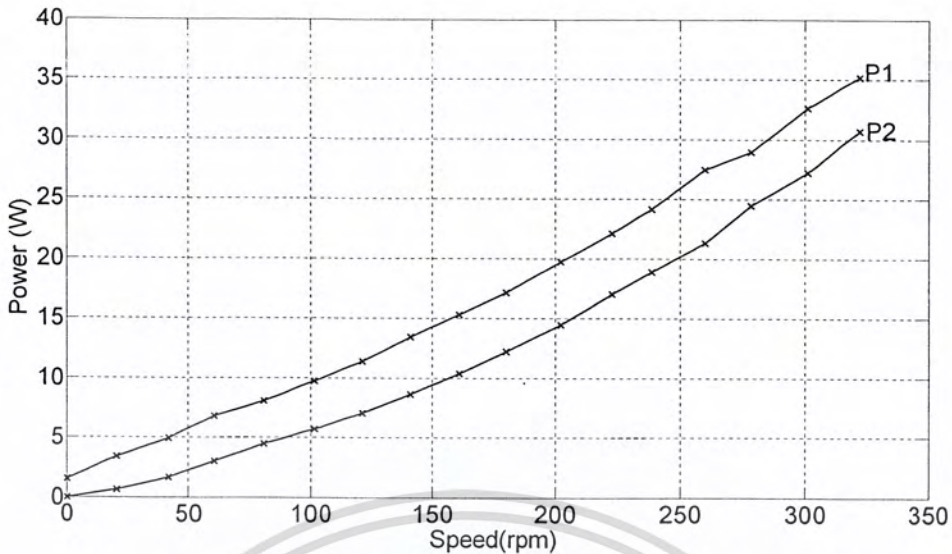
รูปที่ 3.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับแรงดันแบตเตอรี่

$$\begin{aligned} \% \text{Voltage regulation} &= \frac{37.59 - 37.02}{37.02} \times 100\% \\ &= 1.54\% \end{aligned}$$



รูปที่ 3.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับกระแสจากแบตเตอรี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับกำลังไฟฟ้า

สมการคำนวณความเร็ว

$$\begin{aligned}
 L &= 2\pi r & (3.6) \\
 &= 2\pi (13)(2.54 \times 10^{-2}) \\
 &= 2.0747 \text{ m}
 \end{aligned}$$

วงล้อหมุน 1 รอบ ได้ระยะทาง 2.0747 เมตร

คำนวณความเร็วในหน่วย กม./ชม. จากสูตร

$$\begin{aligned}
 v &= \text{rpm} \times L \times 60 / 1000 \\
 v &= \text{rpm} \times 2.0747 \times 60 / 1000 \\
 v &= \text{rpm} \times 0.1245 & (3.7)
 \end{aligned}$$

### 3.4.4 สรุปและวิจารณ์ผลที่ได้รับจากการทดสอบ

จากการทดสอบมอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่านหลังขึ้นซี่ล้อแบบไม่มีภาระทางกล ผลที่ได้รับจากการทดสอบคล้ายกับการทดสอบในหัวข้อ 3.2 การทดสอบมอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่านแบบไม่มีภาระทางกล คือ ขณะมอเตอร์แบบฮับหยุดนิ่งคือไม่มีการจ่ายกำลังด้านเอาต์พุต ชุดมีการดึงกระแสเพียงเล็กน้อย ประมาณ 0.04 แอมแปร์ เข้าสู่คอนโทรล ซึ่งถือเป็นความสูญเสียของระบบ

เมื่อเพิ่มความเร็วรอบ มอเตอร์แบบฮับจะมีการดึงกระแสไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นเป็นเชิงเส้น ดังแสดงในรูปที่ 3.18 แสดงว่าการเพิ่มความเร็วรอบ มอเตอร์แบบฮับจะมีการดึงกำลังไฟฟ้าเพิ่ม เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนักผู้จัดทำเนื้อหาไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์โดยไม่ผ่านการพิจารณาจากผู้เกี่ยวข้อง หรือมีการนำเนื้อหาไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากผู้จัดทำเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มากขึ้น ค่าความสูญเสียที่ชุดคอนโทรล คำนวณได้จากกำลังไฟฟ้าที่จ่ายจากแบตเตอรี่ ลบด้วย กำลังไฟฟ้าที่เข้ามอเตอร์แบบฮับ ซึ่งจากรูปที่ 3.19 ค่าความสูญเสียที่ชุดคอนโทรล จะมีค่า 1.5 วัตต์ เมื่อมอเตอร์ดุมล้อยหยุดนิ่ง และเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเพิ่มความเร็วรอบมอเตอร์แบบฮับขึ้นไปเรื่อยๆ

มอเตอร์แบบฮับที่ขึ้นซี่ล้อแล้วมีความเร็วรอบสูงสุด 322.4 rpm คำนวณเป็นความเร็วในหน่วย กม./ชม. ตามสมการที่ 3.7 ได้เท่ากับ 40.14 กม./ชม. ซึ่งเป็นความเร็วสูงสุดที่ไม่มีการรับภาระทางกล ถ้ามีการเพิ่มภาระทางกล ความเร็วของมอเตอร์แบบฮับจะลดลงตามขนาดของภาระทางกล ดังอธิบายในหัวข้อ 3.3

ตารางที่ 3.4 ผลการทดสอบมอเตอร์แบบฮับหลังขึ้นซี่ล้อเปรียบเทียบกับก่อนขึ้นซี่ล้อ

มอเตอร์แบบฮับ	ความเร็วสูงสุด (rpm)	แรงดัน DC (V)	กระแส DC (A)	P1 (W)	แรงดัน AC (V)	กระแส AC (A)	P2 (W)
ก่อนขึ้นซี่ล้อ	325.6	37.14	0.795	29.53	27.8	0.80	26.96
หลังขึ้นซี่ล้อ	322.4	37.02	0.920	34.06	27.5	0.95	31.67

ที่ความเร็วรอบสูงสุด มอเตอร์แบบฮับที่ขึ้นซี่ล้อแล้ว มีการดึงกระแสไฟฟ้าสูงกว่ามอเตอร์แบบฮับก่อนขึ้นซี่ล้อ คือ มอเตอร์แบบฮับก่อนขึ้นซี่ล้อ ดึงกระแสไฟฟ้า 0.795 แอมป์ มอเตอร์แบบฮับที่ขึ้นซี่ล้อแล้ว ดึงกระแสไฟฟ้า 0.920 แอมป์ ทั้งนี้เนื่องจากผลของมวลและโมเมนต์ความเฉื่อยของมอเตอร์แบบฮับที่เพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้มอเตอร์แบบฮับที่ขึ้นซี่ล้อแล้วมีการดึงกระแสไฟฟ้าสูงกว่ามอเตอร์แบบฮับก่อนขึ้นซี่ล้อ

รูปคลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากออสซิลโลสโคป มีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมูเกือบจะเป็น Square wave เหมือนกับการทดสอบมอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่านก่อนขึ้นซี่ล้อแบบไม่มีภาระทางกล

### 3.5 การทดสอบเปรียบเทียบระหว่างมอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่าน กับมอเตอร์แบบฮับชนิดมีแปรงถ่าน

#### 3.5.1 จุดประสงค์การทดสอบ

- ศึกษาโครงสร้างการทำงานของมอเตอร์แบบฮับชนิดมีแปรงถ่าน
- เปรียบเทียบการดึงพลังงานเมื่อมอเตอร์แบบฮับมีความเร็วรอบใกล้เคียงกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5.2 วิธีการทดสอบ

มอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่านเป็นมอเตอร์แบบฮับที่ได้ทำการศึกษามาตั้งแต่ต้นปี การศึกษา มีพิกัดแรงดันไฟฟ้า 36 โวลต์ ส่วนมอเตอร์แบบฮับชนิดมีแปรงถ่านเป็นมอเตอร์แบบฮับที่ได้รับมาใหม่ในภาคเรียนที่ 2 มีพิกัดแรงดันไฟฟ้า 48 โวลต์ มอเตอร์แบบฮับทั้งสองที่นำมาทดสอบได้ทำการขึ้นซี่ล้อเป็นวงล้อแล้วทั้งคู่ มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากันที่ 26 นิ้ว โดยวัดจากขอบยางทั้งสองด้าน

#### 3.5.2.1 การทดสอบมอเตอร์แบบฮับแบบไม่มีภาระทางกล

การทดสอบมอเตอร์แบบฮับแบบไม่มีภาระทางกล จะทำการทดสอบเหมือนกับหัวข้อ 3.2 โดยเริ่มจากการทดสอบมอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่าน ให้มอเตอร์แบบฮับหมุนได้อย่างอิสระ เพิ่มความเร็วรอบของมอเตอร์แบบฮับเป็นลำดับขั้น โดยเริ่มจากหยุดนิ่ง บันทึกค่าแรงดัน กระแส กำลังไฟฟ้า และความเร็วรอบของมอเตอร์แบบฮับ แล้วเพิ่มความเร็วรอบขึ้นเรื่อยๆ บันทึกข้อมูลที่ความเร็วรอบต่างๆ จนถึงความเร็วรอบสูงสุด จากนั้นเปลี่ยนมอเตอร์แบบฮับที่ทำการทดสอบ เป็นมอเตอร์แบบฮับชนิดมีแปรงถ่าน ทำการทดสอบมอเตอร์แบบฮับแบบไม่มีภาระทางกลซ้ำ เริ่มจากหยุดนิ่ง จนถึงความเร็วรอบสูงสุด

#### 3.5.2.2 การทดสอบมอเตอร์แบบฮับแบบมีภาระทางกล

การทดสอบมอเตอร์แบบฮับแบบมีภาระทางกล เนื่องจากมอเตอร์แบบฮับได้ทำการขึ้นซี่ล้อเรียบร้อยแล้ว ไม่สามารถทดสอบโดยใช้เชือกพันรอบตัวมอเตอร์แบบฮับโดยตรง เหมือนกับการทดสอบในหัวข้อ 3.3 ได้ จึงทำการทดสอบมอเตอร์แบบฮับโดยใช้วิธีการกำดิสเบรคและการใช้โรเลอร์เป็นภาระทางกลแทน

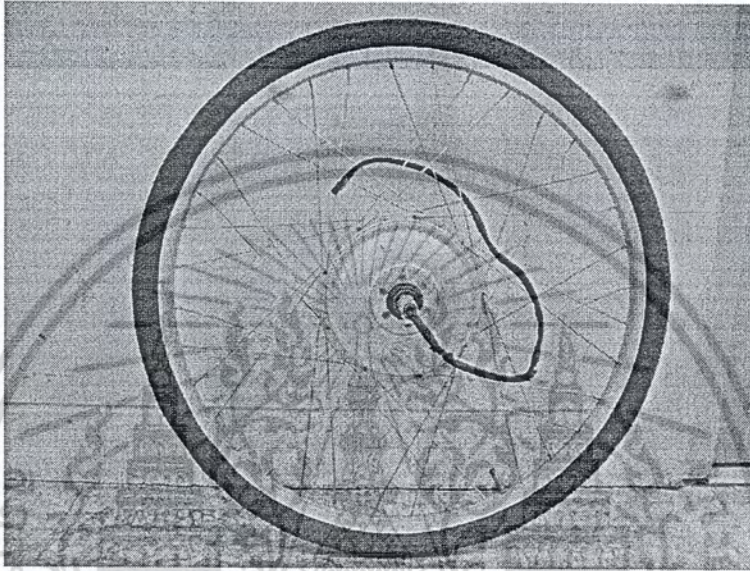
การทดสอบมอเตอร์แบบฮับโดยใช้วิธีการกำดิสเบรค เริ่มการทดสอบจากมอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่าน โดยให้มอเตอร์แบบฮับหมุนด้วยความเร็วรอบสูงสุด บันทึกค่าแรงดัน กระแส กำลังไฟฟ้า และความเร็วรอบของมอเตอร์แบบฮับ จากนั้นเพิ่มภาระทางกลโดยการกำดิสเบรคด้วยแรงน้อยๆ มอเตอร์แบบฮับจะหมุนด้วยความเร็วรอบช้าลงเนื่องจากเกิดความฝืดจากความเสียดทานระหว่างผ้าเบรคกับจานเบรค บันทึกค่าแรงดัน กระแส กำลังไฟฟ้า และความเร็วรอบของมอเตอร์แบบฮับ แล้วทำการทดลองต่อโดยเพิ่มแรงที่กำดิสเบรคขึ้นทีละน้อย จากนั้นเปลี่ยนมอเตอร์แบบฮับที่ทำการทดสอบ เป็นมอเตอร์แบบฮับชนิดมีแปรงถ่าน ทำการทดสอบมอเตอร์แบบฮับแบบมีภาระทางกลซ้ำ

การทดสอบมอเตอร์แบบฮับโดยใช้โรเลอร์ ทำการทดสอบเฉพาะมอเตอร์แบบฮับชนิดมีแปรงถ่าน โดยใช้มอเตอร์แบบฮับที่ยังไม่ได้ขึ้นซี่ล้อมาเป็นโรเลอร์ มอเตอร์แบบฮับที่นำมาเป็นโรเลอร์นี้จะเป็นเจนเนอเรเตอร์สร้างกำลังไฟฟ้าจ่ายให้กับหลอดเผาไส้ บิดคันเร่งเพิ่มความเร็วรอบมอเตอร์แบบฮับที่ทำการทดสอบ บันทึกค่าแรงดัน กระแส กำลังไฟฟ้า และความเร็วรอบของมอเตอร์แบบฮับ จากนั้นเพิ่มภาระทางกลโดยการกดโรเลอร์ด้วยแรงมากขึ้น สังเกตพฤติกรรมและการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น จากนั้นเปลี่ยนวิธีการทดสอบเป็นการให้มอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบฮับที่ทำการทดสอบหมุนด้วยความเร็วรอบต่างๆกันสังเกตพฤติกรรมและการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น

ข้อควรระวัง ในการทดสอบมอเตอร์แบบฮับแบบมีภาระทางกล คือจะต้องคอยระวังไม่ให้กระแสไฟฟ้าที่ออกจากแบตเตอรี่มีค่าสูงเกินไป อันจะทำให้เกิดอันตรายต่อวงจรภายในชุดคอนโทรลได้ โดยในการทดสอบนี้ จะควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ออกจากแบตเตอรี่ไม่ให้มีค่าสูงเกิน 10 แอมแปร์



รูปที่ 3.20 มอเตอร์แบบฮับชนิดมีแปรงถ่านพิกัด 48 โวลต์

### 3.5.3 ผลการทดสอบ

จากการทดสอบมอเตอร์แบบฮับที่ขึ้นชื่อแล้ว เปรียบเทียบระหว่างชนิดไม่มีแปรงถ่านกับชนิดมีแปรงถ่าน ได้ผลการทดสอบดังนี้

#### 3.5.3.1 ผลการทดสอบมอเตอร์แบบฮับแบบไม่มีภาระทางกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.5 ผลการทดสอบวงล่อมอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปลงถ่านพิกัด 36 โวลต์ แบบไม่มี  
ภาระทางกล

แรงดันแบตเตอรี่ (V)	กระแสจากแบตเตอรี่ (A)	กำลังไฟฟ้าอินพุต (W)	ความเร็วรอบ (rpm)
37.51	0.03	1.1	0
37.45	0.11	4.1	40.1
37.42	0.15	5.6	59.5
37.38	0.20	7.4	81.6
37.32	0.24	8.9	100.3
37.28	0.28	10.3	121.8
37.24	0.33	12.2	141.0
37.20	0.36	13.7	159.6
37.17	0.43	15.9	180.3
37.13	0.48	17.8	201.5
37.10	0.53	19.6	219.9
37.06	0.61	22.2	241.5
37.04	0.66	24.4	258.6
37.00	0.73	27.0	280.4
36.97	0.81	29.9	302.6
36.96	0.89	32.9	324.3

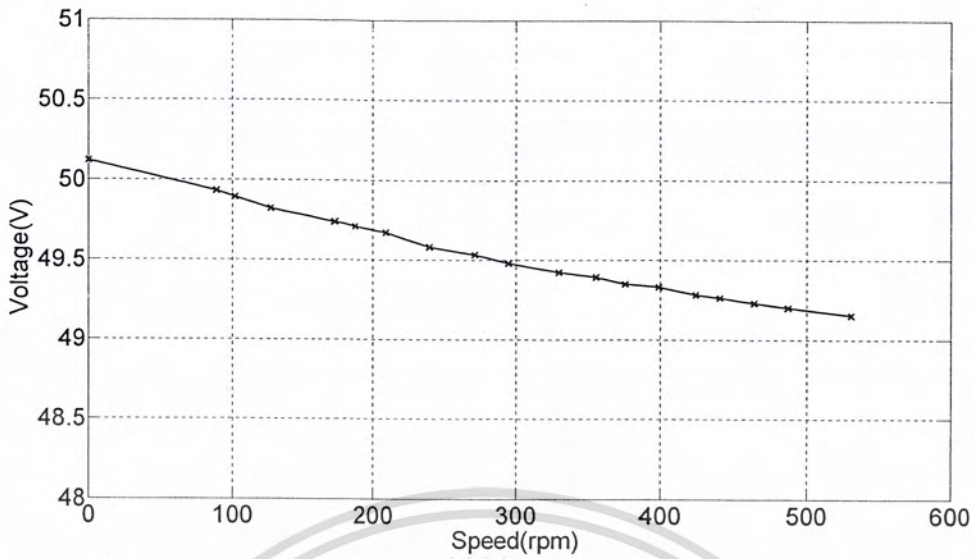
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.6 ผลการทดสอบวงล่อมอเตอร์แบบฮับชนิดมีแปรงถ่านพิกัด 48 โวลต์ แบบไม่มี  
ภาระทางกล

แรงดันแบตเตอรี่ (V)	กระแสจากแบตเตอรี่ (A)	กำลังไฟฟ้าอินพุต (W)	ความเร็วรอบ (rpm)
50.12	0	0	0
49.93	0.17	8.4	89.1
49.89	0.20	9.9	102.0
49.82	0.26	12.9	126.5
49.74	0.34	16.9	172.3
49.71	0.39	19.4	186.7
49.67	0.45	22.3	209.6
49.58	0.53	26.2	240.3
49.53	0.61	30.2	271.2
49.48	0.69	34.1	294.7
49.42	0.77	38.0	329.8
49.39	0.83	40.9	355.6
49.35	0.90	44.4	376.2
49.33	0.96	47.3	399.0
49.28	1.02	50.2	424.6
49.26	1.09	53.6	441.0
49.23	1.15	56.6	464.6
49.20	1.20	59.0	487.6
49.15	1.33	65.2	531.4

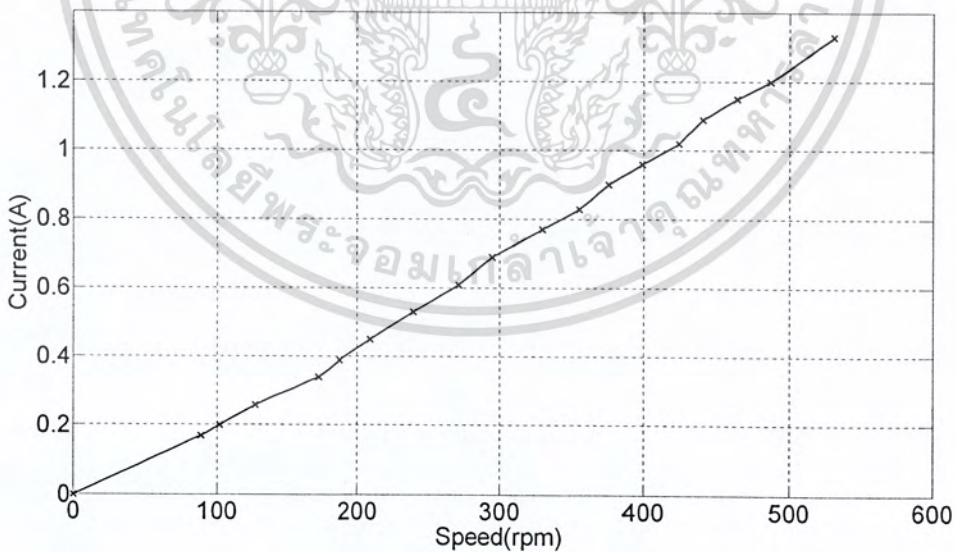
นำข้อมูลวงล่อมอเตอร์แบบฮับชนิดมีแปรงถ่านพิกัด 48 โวลต์ที่ได้มาพล็อตกราฟแสดง  
ความสัมพันธ์ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



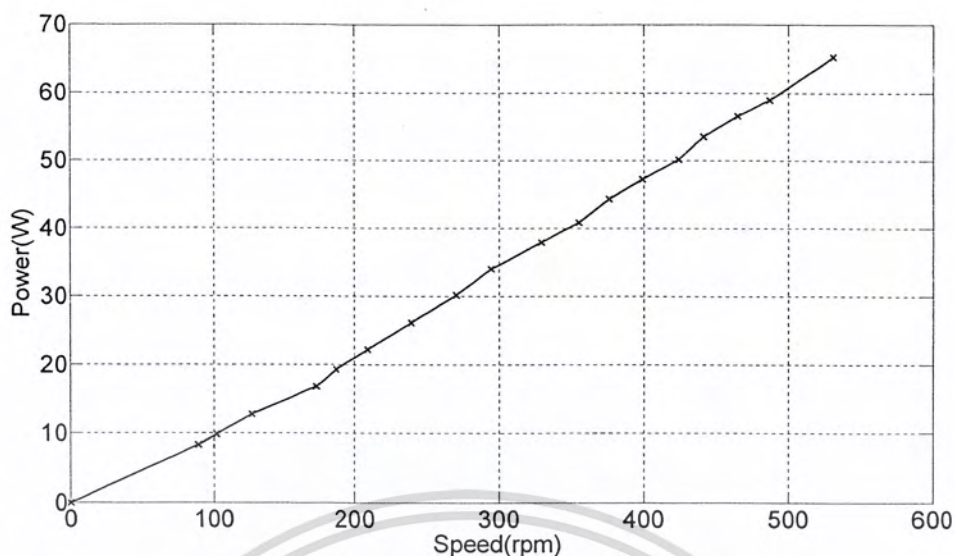
รูปที่ 3.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับแรงดันแบตเตอรี่  
ของวงล้อมอเตอร์แบบฮับชนิดมีแปรงถ่านฟีกัด 48 โวลต์

$$\begin{aligned} \% \text{Voltage regulation} &= \frac{50.12 - 49.15}{49.15} \times 100\% \\ &= 1.97\% \end{aligned}$$



รูปที่ 3.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับกระแสจากแบตเตอรี่  
ของวงล้อมอเตอร์แบบฮับชนิดมีแปรงถ่านฟีกัด 48 โวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับกำลังไฟฟ้าขาเข้าของวงล้อมอเตอร์แบบฮับชนิดมีแปรงถ่านพิกัด 48 โวลต์

### 3.5.3.2 ผลการทดสอบมอเตอร์แบบฮับแบบมีภาระทางกล

การทดสอบมอเตอร์แบบฮับแบบมีภาระทางกล แบ่งเป็น 2 วิธี คือ ใช้วิธีการกำดิสเบรคและการใช้โรเลอร์ เป็นภาระทางกล

ตารางที่ 3.7 ผลการทดสอบวงล้อมอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่านพิกัด 36 โวลต์ โดยใช้วิธีการกำดิสเบรค

แรงดันแบตเตอรี่ (V)	กระแสจากแบตเตอรี่ (A)	กำลังไฟฟ้าอินพุต (W)	ความเร็วรอบ (rpm)
36.83	0.90	33.2	323.3
36.69	1.38	50.6	318.5
36.49	2.09	76.2	312.0
36.38	2.45	89.1	309.5
36.26	3.00	108.8	303.0
36.12	3.58	129.3	299.5
36.06	4.01	144.6	295.4
35.81	4.82	175.0	286.7
35.65	5.69	202.4	280.7
35.59	6.40	228.1	277.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.8 ผลการทดสอบวงล้อมอเตอร์แบบฮับชนิดมีแปรงถ่านพิกัด 48 โวลต์ โดยใช้วิธีการกำจัดสเปรค

แรงดันแบตเตอรี่ (V)	กระแสจากแบตเตอรี่ (A)	กำลังไฟฟ้าอินพุต (W)	ความเร็วรอบ (rpm)
49.27	0.81	39.9	325.1
48.93	1.49	73.0	214.2
48.74	2.04	99.3	100.9

การทดสอบวงล้อมอเตอร์แบบฮับชนิดมีแปรงถ่านพิกัด 48 โวลต์ โดยให้วงล้อหมุนด้วยความเร็วรอบที่ใกล้เคียงกับความเร็วรอบสูงสุดของวงล้อมอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่านพิกัด 36 โวลต์ จากตารางที่ 3.8 จะเห็นว่า มอเตอร์หมุนด้วยความเร็วไม่เต็มพิกัด ถ้าเพิ่มภาระทางกล ความเร็วรอบของมอเตอร์จะลดลงอย่างมาก จึงทำการทดสอบวงล้อมอเตอร์แบบฮับชนิดมีแปรงถ่านพิกัด 48 โวลต์ ที่ความเร็วเต็มพิกัด ได้ข้อมูลดังตารางที่ 3.9

ตารางที่ 3.9 ผลการทดสอบวงล้อมอเตอร์แบบฮับชนิดมีแปรงถ่านพิกัด 48 โวลต์ ที่ความเร็วเต็มพิกัด โดยใช้วิธีการกำจัดสเปรค

แรงดันแบตเตอรี่ (V)	กระแสจากแบตเตอรี่ (A)	กำลังไฟฟ้าอินพุต (W)	ความเร็วรอบ (rpm)
48.92	1.45	70.9	527.5
48.68	2.22	108.0	520.0
48.44	3.00	145.3	513.5
48.14	3.93	189.5	503.7
47.88	5.05	241.7	497.2
47.66	5.95	285.0	489.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.10 ผลการทดสอบวงล้อมอเตอร์แบบฮับชนิดมีแปรงถ่านพิกัด 48 โวลต์ โดยใช้โรเลอร์เป็นภาระทางกล

วงล้อมอเตอร์แบบฮับชนิดมีแปรงถ่าน				มอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่าน ที่ใช้เป็นโรเลอร์		
แรงดัน แบตเตอรี่ (V)	กระแสจาก แบตเตอรี่ (A)	กำลังไฟฟ้า อินพุต (W)	ความเร็ว รอบ (rpm)	แรงดัน ไฟฟ้า (V)	กระแส ไฟฟ้า (A)	กำลังไฟฟ้า เอาต์พุต (W)
47.76	3.07	146.6	175.0	34.0	0.31	10.5
47.64	3.31	157.7	191.8	38.3	0.32	12.5
47.46	4.04	190.3	224.6	44.4	0.35	15.5
47.34	4.48	212.5	247.3	49.6	0.37	18.5
47.22	4.72	221.6	267.1	52.3	0.39	21.0
47.09	4.52	247.2	299.4	59.1	0.41	24.3
46.90	6.05	283.6	340.8	65.2	0.44	30.0
46.44	8.14	378.0	459.5	86.0	0.51	46.0

### 3.5.4 สรุปและวิจารณ์ผลที่ได้รับจากการทดสอบ

จากการทดสอบแบบไม่มีภาระทางกลเปรียบเทียบระหว่างมอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่านกับมอเตอร์แบบฮับชนิดมีแปรงถ่าน ผลที่ได้รับจากการทดสอบ คือ ขณะมอเตอร์แบบฮับชนิดหนึ่งคือไม่มีการจ่ายกำลังด้านเอาต์พุต มอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่านมีการดึงกระแสน้อยๆ เข้าสู่คอนโทรล ซึ่งถือเป็นความสูญเสียของระบบ ส่วนมอเตอร์แบบฮับชนิดมีแปรงถ่านจะยังไม่มีการดึงกระแสไฟฟ้าเข้าสู่คอนโทรล

เมื่อเพิ่มความเร็วรอบ มอเตอร์แบบฮับจะมีการดึงกระแสไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นเป็นเชิงเส้น แสดงว่าการเพิ่มความเร็วยิ่งขึ้น มอเตอร์แบบฮับจะมีการดึงกำลังไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น ค่าความสูญเสียที่คอนโทรล คำนวณได้จากกำลังไฟฟ้าที่จ่ายจากแบตเตอรี่ ลบด้วยกำลังไฟฟ้าที่เข้ามอเตอร์แบบฮับ

เนื่องจากมอเตอร์แบบฮับทั้งสองแบบที่นำมาทดสอบมีพิกัดแรงดันไฟฟ้าต่างกัน จึงมีความเร็วรอบสูงสุดต่างกัน จากข้อมูลในตารางที่ 3.5 มอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่าน มีความเร็วรอบสูงสุด 324.3 rpm มอเตอร์แบบฮับชนิดมีแปรงถ่าน มีความเร็วรอบสูงสุด 531.4 rpm ดังนั้นจึงเปรียบเทียบมอเตอร์แบบฮับทั้งสองแบบที่ความเร็วรอบใกล้เคียงกัน โดยเปรียบเทียบจากความเร็วรอบของมอเตอร์แบบฮับชนิดมีแปรงถ่าน ที่ใกล้เคียงกับความเร็วรอบสูงสุดของมอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่าน ดังข้อมูลที่แสดงในตารางที่ 3.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.11 ข้อมูลต่างๆ ของมอเตอร์แบบฮับทั้งสองแบบที่ความเร็วรอบใกล้เคียงกัน

ข้อเปรียบเทียบ	มอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่าน	มอเตอร์แบบฮับชนิดมีแปรงถ่าน
ความเร็วรอบ(rpm)	324.3	329.8
แรงดันไฟฟ้าอินพุต(โวลต์)	36.96	49.42
กระแสไฟฟ้าอินพุต(แอมแปร์)	0.89	0.77
กำลังไฟฟ้าอินพุต(วัตต์)	<b>32.9</b>	<b>38.0</b>

จากตารางที่ 3.11 จะเห็นว่า มอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่านมีค่าความสูญเสียรวม น้อยกว่ามอเตอร์แบบฮับชนิดมีแปรงถ่าน คำนวณได้จากสูตร

$$\begin{aligned} \%Advantage &= (P_{in,BR} - P_{in,BL}) / P_{in,BL} \times 100\% && \dots\dots\dots(3.8) \\ \%Advantage &= (38.0 - 32.9) / 32.9 \times 100\% \\ &= 15.50\% \end{aligned}$$

มอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่านมีค่าความสูญเสียรวม น้อยกว่ามอเตอร์แบบฮับชนิดมีแปรงถ่าน 15.50% ที่สภาวะไม่มีภาระทางกล

จากการทดสอบแบบมีภาระทางกลเปรียบเทียบระหว่างมอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่านกับมอเตอร์แบบฮับชนิดมีแปรงถ่าน ผลที่ได้รับจากการทดสอบ สรุปได้ดังนี้

การทดสอบมอเตอร์แบบฮับโดยใช้วิธีการกำดิสเบรค เมื่อเพิ่มแรงกำดิสเบรค จะเป็นการเพิ่มแรงที่กระทำกับมอเตอร์แบบฮับ เป็นการเพิ่มขนาดของภาระทางกล มอเตอร์แบบฮับมีการดึงกระแสไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นเป็นเชิงเส้นแปรผันตามขนาดของภาระทางกล ความเร็วรอบสูงสุดลดลงเมื่อขนาดของภาระทางกลเพิ่มขึ้น

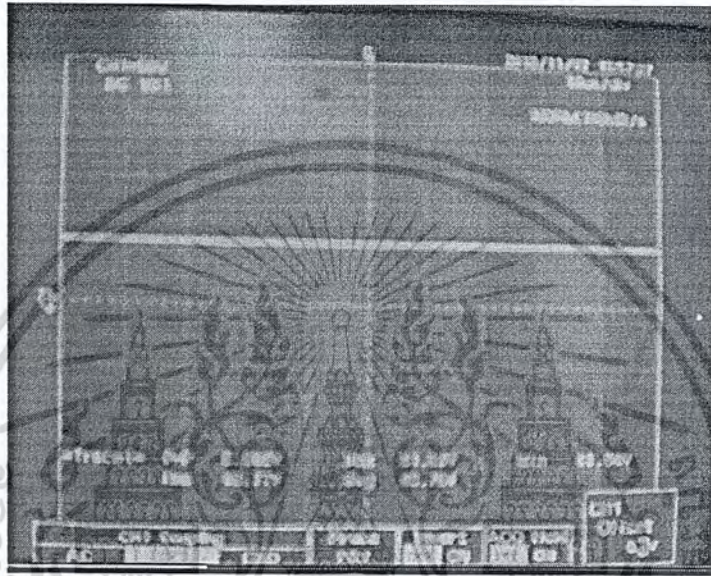
เมื่อบิดคันเร่งให้มอเตอร์แบบฮับหมุนด้วยความเร็วรอบที่ต่ำกว่าความเร็วรอบสูงสุด การเพิ่มโหลดโดยกำดิสเบรคจะทำให้ความเร็วรอบของมอเตอร์แบบฮับลดลงอย่างมาก ข้อมูลแสดงในตารางที่ 3.8

การทดสอบมอเตอร์แบบฮับโดยใช้โรเลอร์เป็นภาระทางกล เมื่อวงล้อมอเตอร์แบบฮับหมุนที่ความเร็วรอบเต็มพิกัด การเพิ่มแรงกดโรเลอร์ ค่าต่างๆ ที่ทำการวัดได้มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ทั้งนี้เพราะภาระทางกลที่เกิดจากความฝืดความเสียดทานมีค่าคงที่คือเกือบจะไม่มีเปลี่ยนแปลง สรุปได้ว่าการใช้โรเลอร์เป็นภาระทางกล ไม่สามารถปรับขนาดของภาระทางกลได้

การให้มอเตอร์แบบฮับที่ทำการทดสอบหมุนด้วยความเร็วรอบต่างๆกัน สังเกตพฤติกรรมและการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น สรุปได้ว่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากการใช้มอเตอร์แบบฮับเป็นโรเลอร์ จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อโรเลอร์มีความเร็วรอบมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

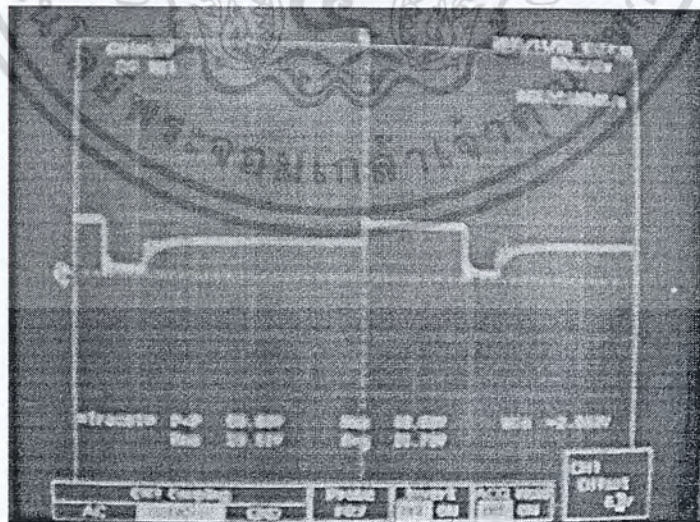
รูปคลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเข้ามอเตอร์แบบอับชนิดมีแปรงถ่านที่ได้จากออสซิลอสโคป มีลักษณะเป็นเส้นตรงที่ความเร็วรอบเต็มพิกัด เนื่องจากเป็นมอเตอร์แบบอับชนิดมีแปรงถ่าน แรงดันไฟฟ้าที่เข้ามอเตอร์จึงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ดังรูปที่ 3.24 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันของมอเตอร์ในช่วงที่มีความเร็วรอบไม่เต็มพิกัด รูปคลื่นจะมีลักษณะเหมือนถูกตัดไปทำให้พื้นที่ใต้กราฟลดน้อยลง ค่าเฉลี่ยของแรงดันจะมีค่าลดลง ดังรูปที่ 3.25 และมีค่าเท่ากับ 0 เมื่อมอเตอร์แบบอับหยุดนิ่ง



รูปที่ 3.24 รูปคลื่นแรงดันของมอเตอร์แบบอับชนิดมีแปรงถ่านขณะมีความเร็วรอบเต็มพิกัด

$$V_{RMS} = 48.71 \text{ โวลต์}$$

$$V_{MAX} = 54.06 \text{ โวลต์}$$



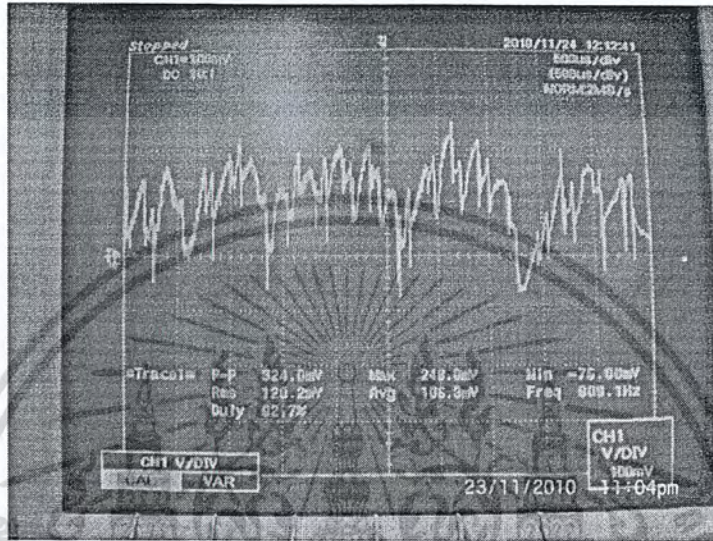
รูปที่ 3.25 รูปคลื่นแรงดันของมอเตอร์แบบอับชนิดมีแปรงถ่านขณะมีความเร็วรอบครึ่งพิกัด

$$V_{RMS} = 29.68 \text{ โวลต์}$$

$$V_{MAX} = 48.86 \text{ โวลต์}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปคลื่นสัญญาณกระแสไฟฟ้าเข้ามอเตอร์แบบฮับชนิดมีแปรงถ่านที่ได้จากออสซิลอสโคป ใช้วิธีการต่อความต้านทานขนาดเล็กน้อยๆ อนุกรมเข้ากับสายไฟเข้ามอเตอร์แบบฮับ 1 เส้น แล้วใช้สายโพรบทำการจับรูปคลื่นสัญญาณแรงดันที่ตกคร่อมความต้านทาน แล้วคำนวณขนาดกระแสไฟฟ้าจากสมการที่ 3.1 รูปคลื่นสัญญาณกระแสที่ได้มีลักษณะดังรูปที่ 3.26 คำนวณกระแสไฟฟ้าอ่านจากค่าเฉลี่ยได้เท่ากับ 1.06 แอมแปร์



รูปที่ 3.26 รูปคลื่นกระแสของมอเตอร์แบบฮับชนิดมีแปรงถ่านขณะมีความเร็วรอบเต็มพิกัด

### 3.6 สรุปผลการทดสอบ

จากการทดสอบสมรรถนะของมอเตอร์แบบฮับ สรุปได้ว่าประสิทธิภาพของมอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่าน เปรียบเทียบกับชนิดมีแปรงถ่านที่ความเร็วรอบเดียวกัน มอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่านจะใช้พลังงานน้อยกว่ามอเตอร์แบบฮับชนิดมีแปรงถ่าน 15.5% ประสิทธิภาพของมอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่านมีค่า 76.7% ที่ขนาดกำลังด้านออก 141.2 วัตต์

## บทที่ 4

### การทดสอบจักรยานไฟฟ้า

ในบทนี้อธิบายถึงส่วนประกอบต่างๆ ของรถจักรยานไฟฟ้า การทดสอบรถจักรยานไฟฟ้าครั้งที่หนึ่งซึ่งมีเนื้อหาการทดสอบคือ การศึกษาสมรรถนะของจักรยานไฟฟ้าที่ใช้มอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่านเป็นส่วนประกอบ เปรียบเทียบพลังงานไฟฟ้าที่ใช้เมื่อขับขี่จักรยานไฟฟ้าด้วยความเร็วต่างกัน คือ 10, 20, 30 กม./ชม. และความเร็วสูงสุด เปรียบเทียบพลังงานไฟฟ้าที่ใช้เมื่อผู้ขับขี่มีมวลต่างกัน คือ 55, 67 และ 106 กก. จักรยานไฟฟ้าหนัก 32 กก. มวลผู้ขับขี่รวมรถจักรยาน 87, 99 และ 138 กก. ตามลำดับ และศึกษาช่วงเวลาการเร่งความเร็วจากหยุดนิ่งถึงความเร็วสูงสุด

นอกจากนี้ยังกล่าวถึงการทดสอบแบบใช้งานจริงรอบเขตลาดกระบังโดยมีระยะทางทดสอบ 18.57 กม. การทดสอบรถจักรยานไฟฟ้าครั้งที่สองซึ่งมีเนื้อหาการทดสอบคือ ศึกษาการตอบสนองต่อช่วงเวลาการเร่งความเร็วจาก 0 ถึง 30 กม./ชม. ภายใต้เงื่อนไขการเร่งความเร็วด้วยอัตราเร่งสูงสุด ศึกษาการตอบสนองต่อช่วงเวลาการเร่งความเร็วจาก 0 ถึง 30 กม./ชม. ภายใต้เงื่อนไขช่วงเวลาเร่งความเร็วเท่ากันที่ 25 วินาที การประจุไฟฟ้าครั้งหนึ่ง รถจักรยานไฟฟ้าวิ่งได้ระยะทางเท่าไร เมื่อขับขี่จักรยานไฟฟ้าด้วยความเร็วคงที่ คือ 10, 20 และ 30 กม./ชม. โดยผู้ขับขี่ 3 คนที่มีมวลต่างกัน คือ 55, 67 และ 106 กก.

#### 4.1 ส่วนประกอบของรถจักรยานไฟฟ้า



รูปที่ 4.1 ส่วนประกอบต่างๆ ของรถจักรยานไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังการทดสอบวงล่อมอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่าน ได้ทำการสร้างจักรยานไฟฟ้า จากตัวรถจักรยานเก่าโดยติดตั้งวงล่อมอเตอร์แบบฮับไว้ที่ตำแหน่งล้อหลัง ติดตั้งแบตเตอรี่และชุดคอนโทรลและอุปกรณ์ต่างๆ เข้ากับตัวรถจักรยานไฟฟ้า โดยมีรายละเอียดของส่วนประกอบต่างๆ ดังนี้

1. วงล่อมอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่าน ติดตั้งไว้ที่ตำแหน่งล้อหลัง
2. ที่บิดคันเร่ง ติดตั้งไว้ที่ตำแหน่งแฮนด์ฝั่งขวา
3. กล่องเหล็ก ติดตั้งไว้ที่ตำแหน่งเบาะหลัง ภายในบรรจุแบตเตอรี่ขนาด 36 โวลต์ 9 Ah จำนวน 3 ก้อน และชุดคอนโทรล มีเบาะหนังหุ้มกล่องเหล็กอีกชั้นหนึ่งทำให้สามารถนั่งซ้อนท้ายจักรยานไฟฟ้าได้อีก 1 คน
4. เครื่องมือวัดทางไฟฟ้า Doc Wattson DC Power Analyzer ใช้ในการวัดค่าแรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้าในส่วนของไฟฟ้ากระแสตรงด้านแบตเตอรี่ ติดตั้งไว้ที่ตำแหน่งข้างแฮนด์ฝั่งซ้าย
5. อุปกรณ์วัดความเร็วของจักรยานไฟฟ้า ติดอยู่กับล้อหน้า ทำการวัดความเร็วโดยการนับรอบที่ผ่านหน้าสัมผัส กำหนดด้วยขนาดวงล้อ 26 นิ้ว แล้วแสดงผลออกหน้าจอ ดิจิตอลที่ติดตั้งไว้ที่ตำแหน่งข้างแฮนด์ฝั่งขวา
6. มวลรถจักรยานไฟฟ้า 32 กก.

วงจรไฟฟ้าของรถจักรยานเริ่มต้นจากแบตเตอรี่ ผ่านเครื่องมือวัดทางไฟฟ้า Doc Wattson DC Power Analyzer ผ่านกุญแจที่ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ตัดตอน แล้วจึงเข้าสู่ชุดคอนโทรลซึ่งทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส จ่ายให้กับขดลวด 3 เฟส ของมอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่าน

## 4.2 การทดสอบรถจักรยานไฟฟ้าครั้งที่หนึ่ง

### 4.2.1 จุดประสงค์การทดสอบ

- เพื่อศึกษาสมรรถนะของจักรยานไฟฟ้าที่ใช้มอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่านเป็นส่วนประกอบ
- เปรียบเทียบพลังงานไฟฟ้าที่ใช้เมื่อขับขี่จักรยานไฟฟ้าด้วยความเร็วต่างกัน คือ 10, 20, 30 กม./ชม. และความเร็วสูงสุด
- เปรียบเทียบพลังงานไฟฟ้าที่ใช้เมื่อผู้ขับขี่มีมวลต่างกัน คือ 55, 67 และ 106 กก. จักรยานไฟฟ้าหนัก 32 กก. น้ำหนักผู้ขับขี่รวมรถจักรยาน 87, 99 และ 138 กก. ตามลำดับ
- ศึกษาช่วงเวลาการเร่งความเร็วจากหยุดนิ่งถึงความเร็วสูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.2 การทดสอบเปรียบเทียบพลังงานไฟฟ้าที่ใช้เมื่อจักรยานไฟฟ้ามีความเร็วต่างกัน คือ 10, 20, 30 กม./ชม. และความเร็วสูงสุด

เงื่อนไขการทดสอบ จะทดสอบที่ระยะทาง 1 กม. การทดสอบเริ่มจากรถจักรยานไฟฟ้าจอดหยุดนิ่ง แล้วเร่งความเร็วด้วยอัตราเร่งสูงสุดที่สามารถจะกระทำได้ คือบิดคันเร่งสุด จนถึงความเร็วที่ทดสอบ แล้วรักษาความเร็วให้อยู่ในย่านความเร็วคงที่ ช่วงที่รถจักรยานไฟฟ้ามีความเร็วคงที่ สังเกตค่ากระแสไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ เมื่อขับขี่รถจักรยานไฟฟ้าได้ระยะทาง 1 กม. พอดี จึงปล่อยคันเร่งแล้วกำเบรคจนรถจักรยานไฟฟ้าจอดหยุดนิ่ง จดบันทึกค่าพลังงานที่ใช้และความเร็วเฉลี่ยของการขับขี่ ทำการทดสอบซ้ำอีก 3 ครั้ง แล้วทำการคำนวณหาค่าเฉลี่ย ทำการทดสอบทุกความเร็ว คือ 10, 20, 30 กม./ชม. และความเร็วสูงสุด มีผู้ทดสอบ 3 คน ที่มีมวลต่างกัน คือ 55, 67 และ 106 กก. จักรยานไฟฟ้าหนัก 32 กก. มวลผู้ขับขี่รวมรถจักรยาน 87, 99 และ 138 กก. ตามลำดับ มีผลการทดสอบที่ได้ตั้งข้อมูลในตารางที่ 4.1 ถึง ตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.1 ผู้ทดสอบคนที่ 1 มวลรวมจักรยาน 87 กก. ทดสอบที่ความเร็ว 10 กม./ชม.

ครั้งที่	Energy (Wh)	กระแสที่ความเร็วทดสอบ (A)	ความเร็วเฉลี่ย (km/hr)
1	6.9	2.0	10.1
2	7.2	2.0	9.9
3	7.2	1.9	10.3
เฉลี่ย	7.1	2.0	10.1

ตารางที่ 4.2 ผู้ทดสอบคนที่ 1 มวลรวมจักรยาน 87 กก. ทดสอบที่ความเร็ว 20 กม./ชม.

ครั้งที่	Energy (Wh)	กระแสที่ความเร็วทดสอบ (A)	ความเร็วเฉลี่ย (กม./ชม.)
1	11.4	4.2	19.6
2	10.1	4.7	19.0
3	10.9	4.6	19.2
เฉลี่ย	10.8	4.5	19.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ผู้ทดสอบคนที่ 1 มวลรวมจักรยาน 87 กก. ทดสอบที่ความเร็ว 30 กม./ชม.

ครั้งที่	Energy (Wh)	กระแสที่ความเร็วทดสอบ (A)	ความเร็วเฉลี่ย (กม./ชม.)
1	14.4	8.5	29.3
2	14.2	8.0	29.3
3	13.6	8.0	29.7
เฉลี่ย	14.1	8.2	29.4

ตารางที่ 4.4 ผู้ทดสอบคนที่ 1 มวลรวมจักรยาน 87 กก. ทดสอบที่ความเร็วสูงสุด

ครั้งที่	Energy (Wh)	กระแสที่ความเร็วทดสอบ (A)	ความเร็วสูงสุด (กม./ชม.)
1	14.4	8.0	32.0
2	14.6	8.2	31.3
3	15.0	8.0	31.1
เฉลี่ย	14.7	8.1	31.5

ตารางที่ 4.5 ผู้ทดสอบคนที่ 2 มวลรวมจักรยาน 99 กก. ทดสอบที่ความเร็ว 10 กม./ชม.

ครั้งที่	Energy (Wh)	กระแสที่ความเร็วทดสอบ (A)	ความเร็วเฉลี่ย (กม./ชม.)
1	7.7	2.0	9.9
2	7.8	2.0	10.5
3	7.4	1.8	10.4
เฉลี่ย	7.6	1.9	10.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 ผู้ทดสอบคนที่ 2 มวลรวมจักรยาน 99 กก. ทดสอบที่ความเร็ว 20 กม./ชม.

ครั้งที่	Energy (Wh)	กระแสที่ความเร็วทดสอบ (A)	ความเร็วเฉลี่ย (กม./ชม.)
1	11.2	4.0	19.6
2	11.4	4.3	19.6
3	11.4	4.0	20.1
เฉลี่ย	11.3	4.1	19.8

ตารางที่ 4.7 ผู้ทดสอบคนที่ 2 มวลรวมจักรยาน 99 กก. ทดสอบที่ความเร็ว 30 กม./ชม.

ครั้งที่	Energy (Wh)	กระแสที่ความเร็วทดสอบ (A)	ความเร็วเฉลี่ย (กม./ชม.)
1	14.6	8.0	30.2
2	15.1	8.2	30.8
3	14.3	8.0	29.4
เฉลี่ย	14.7	8.1	30.1

ตารางที่ 4.8 ผู้ทดสอบคนที่ 2 มวลรวมจักรยาน 99 กก. ทดสอบที่ความเร็วสูงสุด

ครั้งที่	Energy (Wh)	กระแสที่ความเร็วทดสอบ (A)	ความเร็วเฉลี่ย (กม./ชม.)
1	15.2	8.2	31.3
2	15.6	8.5	30.9
3	15.4	8.5	31.9
เฉลี่ย	15.4	8.4	31.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 ผู้ทดสอบคนที่ 3 มวลรวมจักรยาน 138 กก. ทดสอบที่ความเร็ว 10 กม./ชม.

ครั้งที่	Energy (Wh)	กระแสที่ความเร็วทดสอบ (A)	ความเร็วเฉลี่ย (กม./ชม.)
1	10.3	3.0	9.9
2	10.3	2.9	9.5
3	10.0	2.7	9.9
เฉลี่ย	10.2	2.9	9.8

ตารางที่ 4.10 ผู้ทดสอบคนที่ 3 มวลรวมจักรยาน 138 กก. ทดสอบที่ความเร็ว 20กม./ชม.

ครั้งที่	Energy (Wh)	กระแสที่ความเร็วทดสอบ (A)	ความเร็วเฉลี่ย (กม./ชม.)
1	16.0	7.0	19.0
2	14.6	6.7	19.5
3	13.6	6.2	19.0
เฉลี่ย	14.7	6.6	19.2

ตารางที่ 4.11 ผู้ทดสอบคนที่ 3 มวลรวมจักรยาน 138 กก. ทดสอบที่ความเร็วสูงสุด

ครั้งที่	Energy (Wh)	กระแสที่ความเร็วทดสอบ (A)	ความเร็วเฉลี่ย (กม./ชม.)
1	19.4	13.5	26.8
2	18.8	12.5	27.2
3	18.8	12.7	27.2
เฉลี่ย	19.0	12.9	27.1

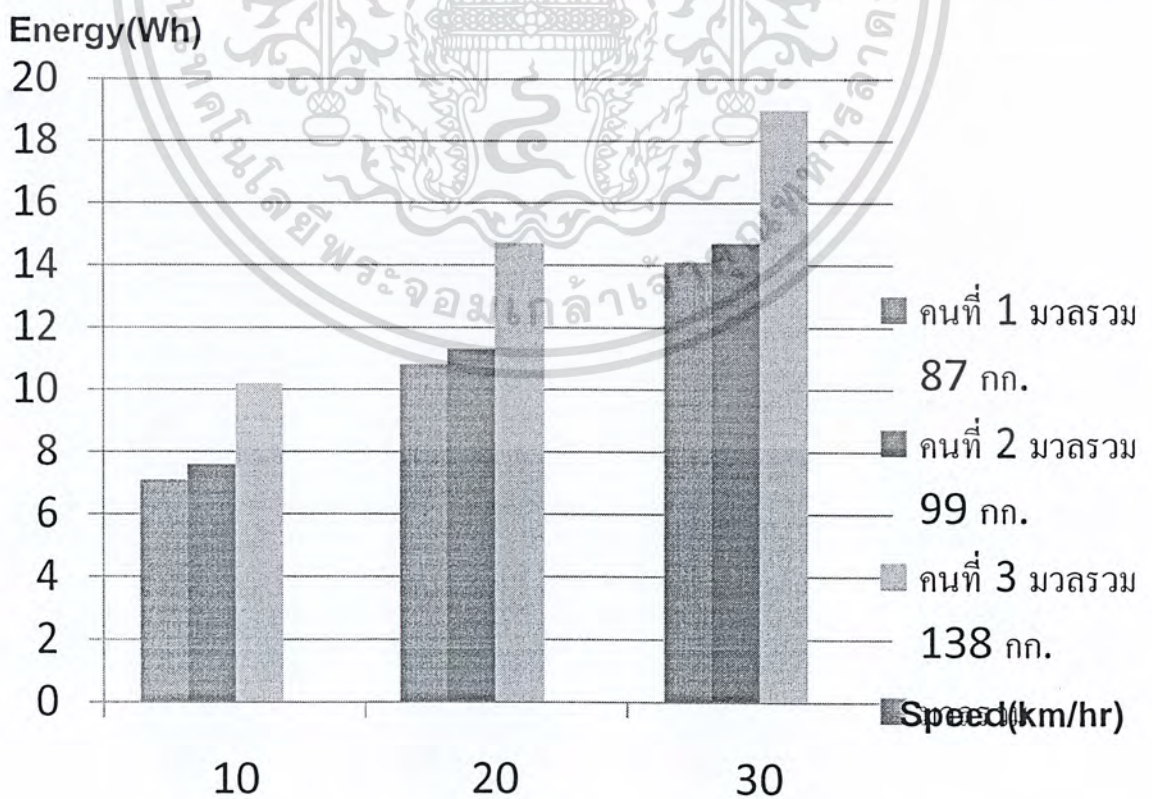
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.3 การทดสอบเปรียบเทียบพลังงานไฟฟ้าที่ใช้เมื่อผู้ขับขี่มีมวลต่างกัน คือ 55, 67 และ 106 กก.

การทดสอบเปรียบเทียบพลังงานไฟฟ้าที่ใช้เมื่อผู้ขับขี่มีมวลต่างกัน คือ 55, 67 และ 106 กก. จักรยานไฟฟ้าหนัก 32 กก. น้ำหนักผู้ขับขี่รวมรถจักรยาน 87, 99 และ 138 กก. ตามลำดับ โดยนำข้อมูลการทดสอบมาจากหัวข้อ 4.2.2 การทดสอบเปรียบเทียบพลังงานไฟฟ้าที่ใช้เมื่อจักรยานไฟฟ้ามีความเร็วต่างกัน เฉพาะค่าความเร็วที่ 10, 20, 30 กม./ชม. สำหรับผู้ทดสอบคนที่ 3 ที่มีมวลรวมจักรยานไฟฟ้า 138 กก. ประมาณว่าผลทดสอบที่ความเร็วสูงสุดเป็นผลการทดสอบที่ความเร็ว 30 กม./ชม. นำผลการทดสอบทั้งหมดมาเขียนใหม่ให้อยู่ในตารางเดียวกัน ดังนี้

ตารางที่ 4.12 ผลการทดสอบเปรียบเทียบพลังงานไฟฟ้าที่ใช้เมื่อผู้ขับขี่มีมวลต่างกัน

ความเร็วทดสอบ (km/hr)	พลังงานที่ใช้ต่อระยะทาง 1 km		
	คนที่ 1 มวลรวม จักรยานไฟฟ้า 55 kg	คนที่ 2 มวลรวม จักรยานไฟฟ้า 99 kg	คนที่ 3 มวลรวม จักรยานไฟฟ้า 138 kg
10	7.1 Wh	7.6 Wh	10.2 Wh
20	10.8 Wh	11.3 Wh	14.7 Wh
30	14.1 Wh	14.7 Wh	19 Wh



รูปที่ 4.2 แผนภูมิแท่งเปรียบเทียบพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ต่อระยะทาง 1 กม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ผู้ใดเห็นประโยชน์หรือข้อบกพร่องในการใช้งาน  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.4 การทดสอบเปรียบเทียบช่วงเวลาการเร่งความเร็วจากหยุดนิ่งถึงความเร็วสูงสุด

การทดสอบเปรียบเทียบช่วงเวลาการเร่งความเร็วจากหยุดนิ่งถึงความเร็วสูงสุด มีผู้ทดสอบ 3 คน มวลผู้ขับที่รวมรถจักรยาน 87, 99 และ 138 กก. การทดสอบเริ่มจากรถจักรยานหยุดนิ่ง เพิ่มความเร็วด้วยอัตราเร่งสูงสุดคือบิดคันเร่งสุด จนรถจักรยานมีความเร็วถึงความเร็วสูงสุด บันทึกค่าเวลาที่ใช้เร่งความเร็วจากหยุดนิ่งถึงความเร็วสูงสุด ทำการทดสอบซ้ำอีก 2 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ย จากนั้นเปลี่ยนผู้ทดสอบจนครบทั้ง 3 คน ผลการทดสอบที่ได้แสดงดังข้อมูลในตาราง 4.13

ตารางที่ 4.13 ผลการทดสอบเปรียบเทียบช่วงเวลาการเร่งความเร็วจากหยุดนิ่งถึงความเร็วสูงสุด

ผู้ทดสอบ	ครั้งที่	เวลาเร่ง (วินาที)	ความเร็วสูงสุด (กม./ชม.)
คนที่ 1 มวลรวม รถจักรยาน 87 กก.	1	17	32.0
	2	16	31.3
	3	16	31.1
	เฉลี่ย	16	31.5
คนที่ 2 มวลรวม รถจักรยาน 99 กก.	1	18	31.4
	2	17	31.5
	3	18	31.2
	เฉลี่ย	18	31.4
คนที่ 3 มวลรวม รถจักรยาน 138 กก.	1	26	27.0
	2	28	26.8
	3	27	27.3
	เฉลี่ย	27	27.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.5 สรุปผลการทดสอบรถจักรยานไฟฟ้าครั้งที่หนึ่ง

การทดสอบรถจักรยานไฟฟ้าครั้งที่หนึ่ง เปรียบเทียบพลังงานไฟฟ้าที่ใช้เมื่อขับขี่จักรยานไฟฟ้าด้วยความเร็วต่างกัน คือ 10, 20, 30 กม./ชม. และความเร็วสูงสุด แสดงให้เห็นว่าความเร็วทดสอบมีผลต่อการใช้พลังงานไฟฟ้าของรถจักรยานไฟฟ้าคือ เมื่อเพิ่มความเร็วทดสอบ รถจักรยานไฟฟ้าจะมีการดึงพลังงานไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น มวลผู้ทดสอบรวมรถจักรยานไฟฟ้า 87 กก. ที่ระยะทางทดสอบ 1 กม. เมื่อเปรียบเทียบความเร็วที่ 10 กม./ชม. และ 30 กม./ชม. จะใช้พลังงานเป็น 7.1 Wh และ 14.1 Wh ตามลำดับ ซึ่งความเร็วเพิ่มขึ้น 3 เท่าจะใช้พลังงานสูงขึ้น 2 เท่า

เปรียบเทียบพลังงานไฟฟ้าที่ใช้เมื่อผู้ขับขี่มีมวลต่างกัน คือ 55, 67 และ 106 กก. จักรยานไฟฟ้าหนัก 32 กก. มวลผู้ขับขี่รวมรถจักรยาน 87, 99 และ 138 กก. ตามลำดับ สรุปได้ว่ามวลผู้ทดสอบรวมรถจักรยานไฟฟ้า มีผลต่อการใช้พลังงานไฟฟ้าของรถจักรยานไฟฟ้า คือ มวลรวมคนขับเพิ่มขึ้น รถจักรยานไฟฟ้าจะมีการดึงพลังงานไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น มวลรวมคนขับที่ 87 กก. และ 138 กก. ที่ระยะทาง 1 กม. ขับขี่ด้วยความเร็ว 30 กม./ชม. จะใช้พลังงานเป็น 14.1 Wh และ 19 Wh ตามลำดับ ซึ่งมวลเพิ่มขึ้น 58.62% จะใช้พลังงานสูงขึ้น 1.35 เท่า ซึ่งเป็นการยืนยันว่ามวลที่เพิ่มขึ้นของผู้ขับขี่มีผลต่อการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นของจักรยานไฟฟ้า

การศึกษาช่วงเวลากการเร่งความเร็วจากหยุดนิ่งถึงความเร็วสูงสุด มีเงื่อนไขคือการใช้ผู้ทดสอบ 3 คน ที่มีมวลต่างกัน มวลผู้ขับขี่มีผลกับการเร่งความเร็วจากหยุดนิ่งถึงความเร็วสูงสุดคือ มวลผู้ขับขี่มากจะใช้เวลาเร่งมากตามไปด้วย มวลผู้ขับขี่รวมรถจักรยานไฟฟ้าที่ 87 กก. และ 138 กก. ใช้เวลาเร่งความเร็วจากหยุดนิ่งถึงความเร็วสูงสุด จะใช้เวลา 16 วินาที และ 27 วินาทีตามลำดับ ซึ่งมวลเพิ่มขึ้น 58.62% จะใช้เวลาเร่งความเร็วจากหยุดนิ่งถึงความเร็วสูงสุดเพิ่มขึ้น 1.69 เท่า

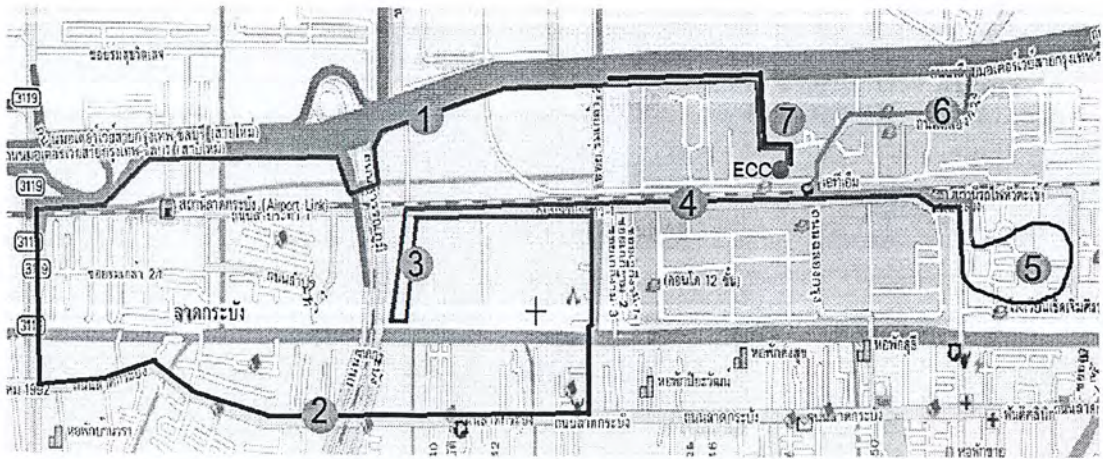
### 4.3 การทดสอบรถจักรยานไฟฟ้าแบบใช้งานจริง

#### 4.3.1 เส้นทางทดสอบ

เส้นทางทดสอบเริ่มต้นจากหน้าตึก ECC และสิ้นสุดที่หน้าตึก ECC แบ่งเส้นทางทดสอบออกเป็น 7 ช่วง ดังรูปที่ 4.3

- |                               |                            |
|-------------------------------|----------------------------|
| 1. จากหน้าตึก ECC             | ถึง Airport link ลาดกระบัง |
| 2. จาก Airport link ลาดกระบัง | ถึงวัดปลูกศรัทธา           |
| 3. จากวัดปลูกศรัทธา           | ถึง RNP place              |
| 4. จาก RNP place              | ถึง รร.พรตพิทยพยัต         |
| 5. วนใน รร.พรตพิทยพยัต        |                            |
| 6. จาก รร.พรตพิทยพยัต         | ถึง คลองสี่                |
| 7. จากคลองสี่                 | ถึง ตึก ECC                |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 เส้นทางทดสอบรถจักรยานไฟฟ้าแบบใช้งานจริง

#### 4.3.2 ผลการทดสอบ

หลังจากขับขึ้นแต่ละช่วง จะหยุดรถเพื่อทำการบันทึกค่าระยะทาง พลังงานที่ใช้(Wh) ปริมาณกระแส(Ah) และความเร็วเฉลี่ย โดยมีข้อมูลการทดสอบดังนี้

ตารางที่ 4.14 ข้อมูลการทดสอบรถจักรยานไฟฟ้าแบบใช้งานจริง

เส้นทางทดสอบ	ระยะทาง (km)	พลังงานที่ใช้ (Wh)	ปริมาณกระแส (Ah)	ความเร็วเฉลี่ย (km/hr)	พลังงานต่อ 1 กม. (Wh)
ช่วงที่ 1	3.92	34.1	0.959	29.3	8.70
ช่วงที่ 2	3.47	40.7	1.174	23.1	11.73
ช่วงที่ 3	2.90	29.5	0.847	12.4	10.17
ช่วงที่ 4	2.63	30.9	0.922	18.5	11.75
ช่วงที่ 5	1.23	9.1	0.264	11.2	7.40
ช่วงที่ 6	3.37	29.8	0.931	25.2	8.84
ช่วงที่ 7	1.05	9.0	0.280	13.0	8.57
รวม	18.57	183.1	5.377	เฉลี่ย = 21.12	เฉลี่ย = 9.86

ทดสอบเมื่อวันที่ 22 มกราคม 2554 มวลผู้ทดสอบรวมรถจักรยานไฟฟ้า 87 กก. เอกสารแรงดันแบตเตอรี่ก่อนทดสอบ 39.50 โวลต์ แรงดันแบตเตอรี่หลังทดสอบ 35.89 โวลต์ ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} \text{ระยะทางรวม} &= 3.92 + 3.47 + 2.90 + 2.63 + 1.23 + 3.37 \\ &+ 1.05 \\ &= 18.57 \text{ กม.} \end{aligned}$$

ค่าเฉลี่ยพลังงาน

$$\begin{aligned} &= \left( 8.70 \times \left( \frac{3.92}{18.57} \right) \right) + \left( 11.73 \times \left( \frac{3.47}{18.57} \right) \right) \\ &+ \left( 10.17 \times \left( \frac{2.90}{18.57} \right) \right) + \left( 11.75 \times \left( \frac{2.63}{18.57} \right) \right) \\ &+ \left( 7.40 \times \left( \frac{1.23}{18.57} \right) \right) + \left( 8.84 \times \left( \frac{3.37}{18.57} \right) \right) \\ &+ \left( 8.57 \times \left( \frac{1.05}{18.57} \right) \right) \\ &= 9.86 \text{ Wh} \end{aligned}$$

ค่าความเร็วเฉลี่ย

$$\begin{aligned} &= \left( 29.3 \times \left( \frac{3.92}{18.57} \right) \right) + \left( 23.1 \times \left( \frac{3.47}{18.57} \right) \right) \\ &+ \left( 12.4 \times \left( \frac{2.90}{18.57} \right) \right) + \left( 18.5 \times \left( \frac{2.63}{18.57} \right) \right) \\ &+ \left( 11.2 \times \left( \frac{1.23}{18.57} \right) \right) + \left( 25.2 \times \left( \frac{3.37}{18.57} \right) \right) \\ &+ \left( 13.0 \times \left( \frac{1.05}{18.57} \right) \right) \end{aligned}$$

$$= 21.12 \text{ km/hr}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3.2 สรุปผลการทดสอบ

การทดสอบรถจักรยานไฟฟ้าแบบใช้งานจริงนี้ มีเงื่อนไขทดสอบไม่คงที่ คือความเร็วในการขับขี่ไม่คงที่ มีการเบรคและจำนวนครั้งการเบรคต่างกัน สถานที่ทดสอบต่างกันไปทั้ง 7 ช่วงทดสอบจากข้อมูลทดสอบสรุปได้ว่า ความเร็วเฉลี่ยของการใช้งานจริงครั้งนี้อยู่ที่ 18.96 กม./ชม. ซึ่งความเร็วใช้งานจะไม่ใกล้เคียงความเร็วสูงสุดของจักรยานไฟฟ้า แต่จะขึ้นอยู่กับเหตุการณ์และสภาพแวดล้อม

แบตเตอรี่ที่ใช้ชนิดตะกั่วกรด มีขนาด 36 โวลต์ 9 Ah คิดเป็นพลังงานไฟฟ้า 324 Wh แต่การทดสอบนี้ใช้พลังงานเพียง 183.1 Wh ปริมาณกระแสที่ใช้จริง 5.377 Ah แรงดันแบตเตอรี่หลังทดสอบตกลงจาก 39.50 โวลต์ เหลือ 35.89 โวลต์ ซึ่งถือว่าแบตเตอรี่อ่อนแล้ว ไม่สามารถใช้งานต่อที่ความเร็วสูงได้ เพราะช่วงเร่งความเร็วมีกระแสสูง แรงดันแบตเตอรี่จะตกลงมาก ถ้าต่ำกว่าค่า under voltage protection ที่ 31 โวลต์ ชุดคอนโทรลจะทำการตัดไฟที่วงจรกำลังที่จ่ายเข้ามอเตอร์แบบฮับ ทำให้ไม่สามารถเร่งความเร็วได้

เส้นทางช่วงที่ 1 ทางขนานเลียบบมอเตอร์เวย์ มีลักษณะเป็นทางตรงพื้นผิวเรียบ จึงขี่ได้ด้วยความเร็วสูง อีกทั้งทิศทางการขึ้นเนินตามกระแสลม ทำให้พลังงานที่ใช้ต่อระยะทาง 1 กม. มีค่าต่ำ(8.7 Wh) เมื่อเทียบกับผลการทดสอบก่อนหน้านี้ที่ว่าการขี่ด้วยความเร็วสูงจะใช้พลังงานมาก(14.7 Wh)

จักรยานไฟฟ้าที่ทดสอบมีทอร์คขณะออกตัวต่ำ ไม่สามารถขึ้นสะพานที่มีความลาดชันสูง เช่น สะพานหน้าวัดปลูกศรัทธาและสะพานข้ามคลองหน้าซอยเก็กงามได้

เส้นทางช่วงที่ 3 พื้นผิวขรุขระมีผลทำให้ พลังงานที่ใช้ต่อระยะทาง 1 กม. มีค่าสูง(10.17 Wh) เมื่อเปรียบเทียบกับความเร็วเฉลี่ยเพียง 12.4 กม./ชม.

## 4.4 การทดสอบรถจักรยานไฟฟ้าครั้งที่สอง

### 4.4.1 จุดประสงค์การทดสอบ

- ศึกษาการตอบสนองต่อช่วงเวลการเร่งความเร็วจาก 0 ถึง 30 กม./ชม.ภายใต้เงื่อนไขการเร่งความเร็วด้วยอัตราเร่งสูงสุด

- ศึกษาการตอบสนองต่อช่วงเวลการเร่งความเร็วจาก 0 ถึง 30 กม./ชม.ภายใต้เงื่อนไขช่วงเวลาเร่งความเร็วเท่ากันที่ 25 วินาที

- การประจุไฟฟ้าครั้งหนึ่ง รถจักรยานไฟฟ้าวิ่งได้ระยะทางเท่าไร เมื่อขับขี่จักรยานไฟฟ้าด้วยความเร็วคงที่ คือ 10, 20 และ 30 กม./ชม. โดยผู้ขับขี่ 3 คนที่มวลต่างกัน คือ 55, 67 และ 106 กก.

#### 4.4.2 การศึกษาการตอบสนองต่อช่วงเวลาการเร่งความเร็วจาก 0 ถึง 30 กม./ชม. ภายใต้เงื่อนไขการเร่งความเร็วด้วยอัตราเร่งสูงสุด

การทดสอบจะเริ่มจากรถจักรยานไฟฟ้าหยุดนิ่ง บิดคันเร่งสุดเพื่อเพิ่มความเร็วด้วยอัตราเร่งสูงสุด ในการทดสอบหัวข้อนี้ ผู้ทดสอบจะใช้กล้องถ่ายวิดีโอการตอบสนองต่อช่วงเวลาการเร่งความเร็วของ Doc Wattson DC Power Analyzer และจอแสดงผลของอุปกรณ์วัดความเร็ว ซึ่งใน การทดสอบนี้ จอแสดงผลของอุปกรณ์วัดความเร็วจะถูกย้ายตำแหน่งมาติดตั้งอยู่ข้างขวาของ Doc Wattson DC Power Analyzer ทำการทดสอบจนครบทั้ง 3 คน จากนั้นนำวิดีโอการทดสอบมาดูข้อมูลการตอบสนองต่อช่วงเวลาการเร่งความเร็วจาก 0 ถึง 30 กม./ชม. บันทึกค่าความเร็ว และกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในแต่ละวินาที มีข้อมูลการทดสอบดังตารางที่ 4.15 ถึง ตารางที่ 4.17

ตารางที่ 4.15 ผลการเร่งความเร็วด้วยอัตราเร่งสูงสุด เมื่อมวลผู้ทดสอบรวมรถ 87 กก.

เวลา (วินาที)	ความเร็ว (km/hr)	กำลังไฟฟ้า (W)	พลังงาน (J)	พลังงาน (Wh)
1	0	285.0	285.0	0.079
2	0	587.6	872.6	0.242
3	0	583.4	1,456.0	0.404
4	10	588.3	2,044.3	0.568
5	12.5	554.6	2,598.9	0.722
6	12.5	550.9	3,149.8	0.875
7	18.2	591.6	3,741.4	1.039
8	21.6	587.2	4,328.6	1.202
9	24.0	587.9	4,916.5	1.366
10	25.9	588.8	5,505.3	1.529
11	27.4	560.3	6,065.6	1.685
12	28.8	503.4	6,569.0	1.825
13	29.9	471.3	7,040.3	1.956
14	30.6	455.5	7,495.8	2.082

ตารางที่ 4.16 ผลการเร่งความเร็วด้วยอัตราเร่งสูงสุด เมื่อมวลผู้ทดสอบรวมรถ 99 กก.

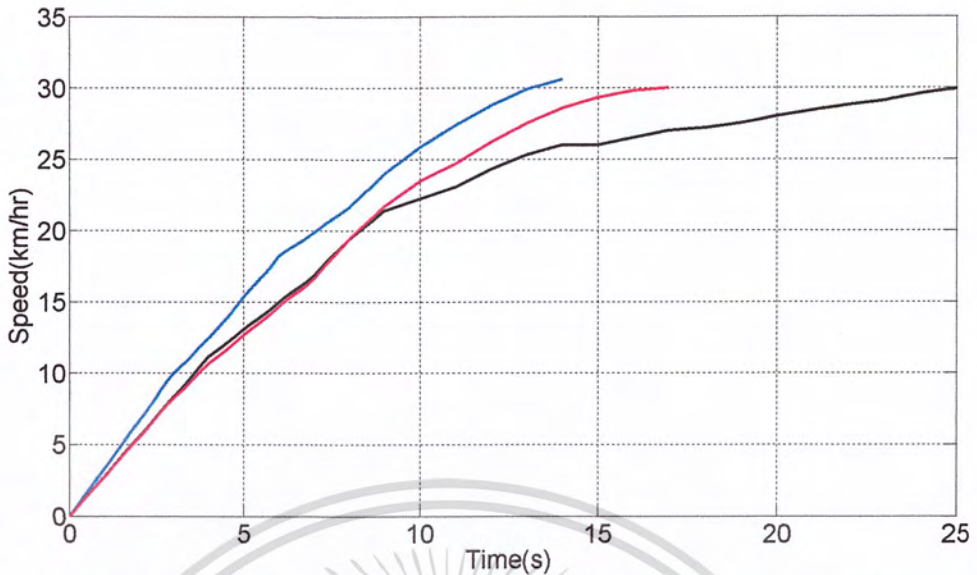
เวลา (วินาที)	ความเร็ว (km/hr)	กำลังไฟฟ้า (W)	พลังงาน (J)	พลังงาน (Wh)
1	0	376.7	376.7	0.105
2	0	450.7	827.4	0.230
3	0	581.7	1,409.1	0.391
4	8.3	580.8	1,989.9	0.553
5	10.7	580.6	2,570.5	0.714
6	10.7	560.8	3,131.3	0.870
7	16.7	552.6	3,683.9	1.023
8	19.4	578.6	4,262.5	1.184
9	21.7	585.8	4,848.3	1.347
10	23.5	585.1	5,433.4	1.509
11	24.7	584.7	6,018.1	1.672
12	26.2	585.4	6,603.5	1.834
13	27.5	563.6	7,167.1	1.991
14	28.6	521.6	7,688.7	2.136
15	29.3	536.6	8,225.3	2.285
16	29.8	484.1	8,709.4	2.419
17	30	482.8	9,192.2	2.553

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.17 ผลการเร่งความเร็วด้วยอัตราเร่งสูงสุด เมื่อมวลผู้ทดสอบรวมรถ 138 กก.

เวลา (วินาที)	ความเร็ว (km/hr)	กำลังไฟฟ้า (W)	พลังงาน (J)	พลังงาน (Wh)
1	0	560.0	560.0	0.156
2	0	565.1	1,125.1	0.313
3	0	561.0	1,686.1	0.468
4	11.2	559.8	2,245.9	0.624
5	13.1	559.5	2,805.4	0.779
6	13.1	548.4	3,353.8	0.932
7	16.9	537.1	3,890.9	1.081
8	19.4	527.9	4,418.8	1.227
9	21.4	565.9	4,984.7	1.385
10	21.4	566.7	5,551.4	1.542
11	23.1	567.6	6,119.0	1.700
12	24.3	566.9	6,685.9	1.857
13	25.3	565.0	7,250.9	2.014
14	26.0	561.2	7,812.1	2.170
15	26.0	551.9	8,364.0	2.323
16	26.5	540.5	8,904.5	2.473
17	27.0	543.0	9,447.5	2.624
18	27.2	521.4	9,968.9	2.769
19	27.5	504.8	10,473.7	2.909
20	28.0	493.1	10,966.8	3.046
21	28.4	469.5	11,436.3	3.177
22	28.8	457.7	11,894.0	3.304
23	29.1	443.0	12,337.0	3.427
24	29.6	428.9	12,765.9	3.546
25	29.9	423.1	13,189.0	3.664

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ของการเร่งความเร็วด้วยอัตราเร่งสูงสุดระหว่างเวลา กับความเร็ว

หมายเหตุ :

สีน้ำเงิน

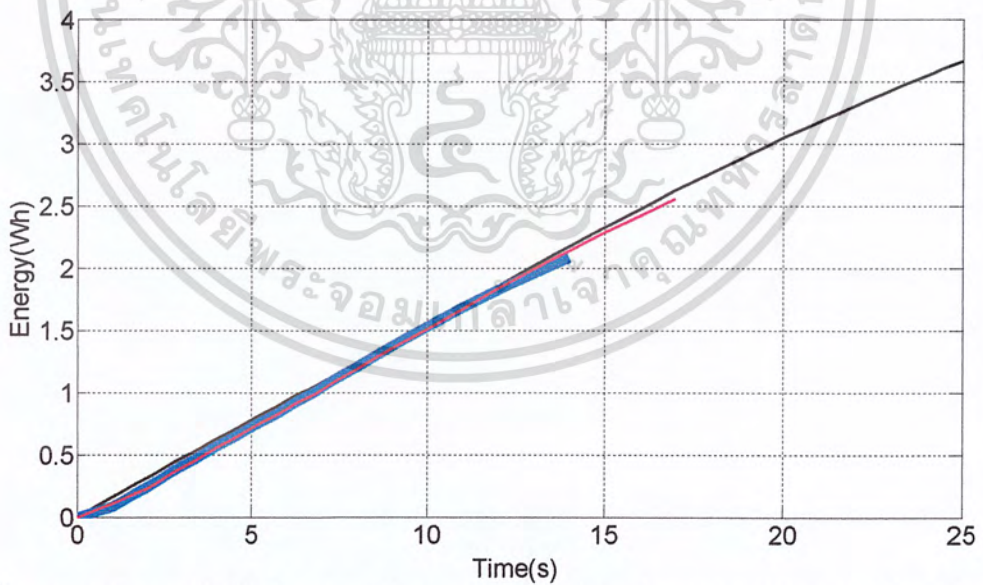
มวลผู้ทดสอบคนที่ 1 รวมจักรยาน 87 กก.

สีแดง

มวลผู้ทดสอบคนที่ 2 รวมจักรยาน 99 กก.

สีดำ

มวลผู้ทดสอบคนที่ 3 รวมจักรยาน 138 กก.



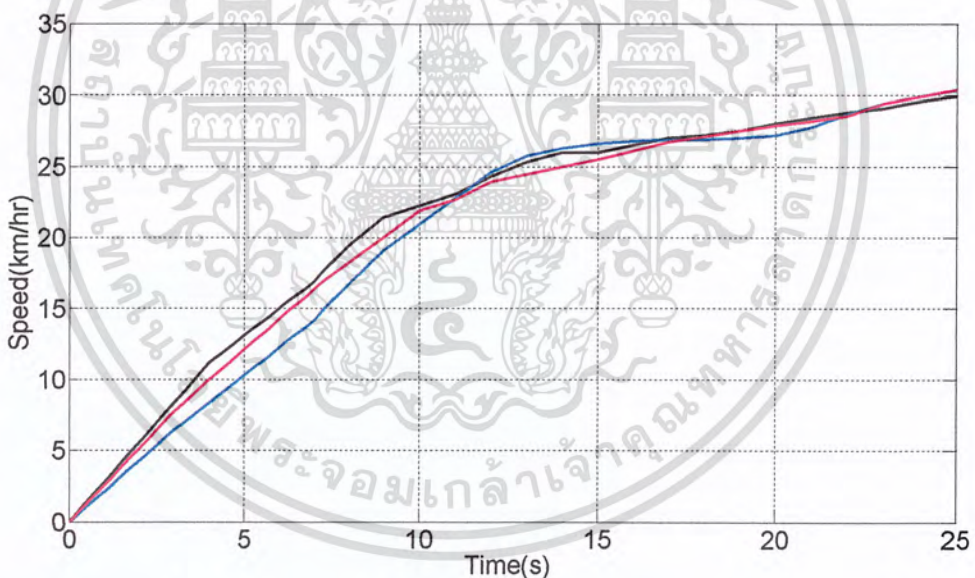
รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ของการเร่งความเร็วด้วยอัตราเร่งสูงสุดระหว่างเวลา กับพลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4.3 การศึกษาการตอบสนองต่อช่วงเวลาการเร่งความเร็วจาก 0 ถึง 30 กม./ชม. ภายใต้เงื่อนไขช่วงเวลาเร่งความเร็วเท่ากันที่ 25 วินาที

การทดสอบจะอ้างอิงจากผลการทดสอบในหัวข้อ 4.4.2 โดยใช้ข้อมูลเดิมของผู้ทดสอบที่มีมวลรวมรถจักรยานไฟฟ้า 138 กก. เร่งความเร็วด้วยอัตราเร่งสูงสุดใช้เวลา 25 วินาที ให้ผู้ทดสอบอีก 2 คน เล็งการเร่งความเร็วให้มีลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับเวลาใกล้เคียงกัน ผู้ทดสอบจะใช้กล้องถ่ายวิดีโอการตอบสนองต่อช่วงเวลาการเร่งความเร็วของ Doc Wattson DC Power Analyzer และแสดงผลของอุปกรณ์วัดความเร็ว เช่นเดียวกับกับการทดสอบหัวข้อ 4.4.2 จากนั้นนำวิดีโอการทดสอบมาดูข้อมูลการตอบสนองต่อช่วงเวลาการเร่งความเร็วจาก 0 ถึง 30 กม./ชม. บันทึกค่าความเร็ว และกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในแต่ละวินาที มีข้อมูลการทดสอบดังตารางที่ 4.18 และ ตารางที่ 4.19 ส่วนผู้ทดสอบคนที่ 3 ที่มีมวลรวมรถจักรยานไฟฟ้า 138 กก. จะใช้ข้อมูลเดิมจากตารางที่ 4.17

ข้อมูลจากการทดสอบของผู้ทดสอบทั้ง 3 คน นำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง เวลา กับความเร็วได้ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ของเวลา กับความเร็วซึ่งมีช่วงเวลาเร่งความเร็วเท่ากันที่ 25 วินาที

หมายเหตุ : **สีน้ำเงิน** มวลผู้ทดสอบคนที่ 1 รวมจักรยาน 87 กก.  
**สีแดง** มวลผู้ทดสอบคนที่ 2 รวมจักรยาน 99 กก.  
**สีดำ** มวลผู้ทดสอบคนที่ 3 รวมจักรยาน 138 กก.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.18 ผลการเร่งความเร็วด้วยช่วงเวลาเร่ง 25 วินาที มวลผู้ทดสอบรวมรถ 87 กก.

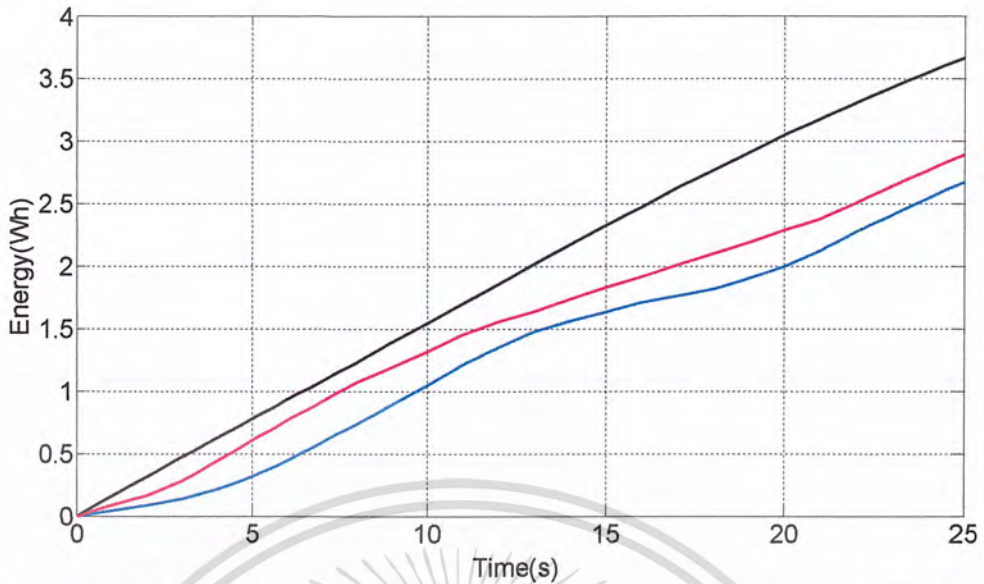
เวลา (วินาที)	ความเร็ว (km/hr)	กำลังไฟฟ้า (W)	พลังงาน (J)	พลังงาน (Wh)
1	0	0	0	0
2	0	146.5	146.5	0.041
3	0	165.3	311.8	0.087
4	6.4	193.1	504.9	0.140
5	8.4	270.4	775.3	0.215
6	8.4	355.7	1,131.0	0.314
7	8.4	478.7	1,609.7	0.447
8	14.2	525.2	2,134.9	0.593
9	16.7	500.2	2,635.1	0.732
10	19.1	550.8	3,185.9	0.885
11	19.1	587.9	3,773.8	1.048
12	22.8	590.0	4,363.8	1.212
13	24.6	485.7	4,849.5	1.347
14	25.8	470.7	5,320.2	1.478
15	26.3	298.1	5,618.3	1.561
16	26.6	252.4	5,870.7	1.631
17	26.8	270.6	6,141.3	1.706
18	26.9	184.8	6,326.1	1.757
19	26.9	216.4	6,542.5	1.817
20	27.0	296.6	6,839.1	1.900
21	27.2	351.3	7,190.4	1.997
22	27.8	450.0	7,640.4	2.122
23	28.7	529.2	8,169.6	2.269
24	29.4	492.8	8,662.4	2.406
25	29.9	485.2	9,147.6	2.541

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.19 ผลการเร่งความเร็วด้วยช่วงเวลาเร่ง 25 วินาที มวลผู้ทดสอบรวมรถ 99 กก.

เวลา (วินาที)	ความเร็ว (km/hr)	กำลังไฟฟ้า (W)	พลังงาน (J)	พลังงาน (Wh)
1	0	305.2	305.2	0.085
2	0	275.2	580.4	0.161
3	7.7	431.6	1,012.0	0.281
4	10.0	576.9	1,588.9	0.441
5	10.0	583.4	2,172.3	0.603
6	10.0	581.3	2,753.6	0.765
7	16.4	550.6	3,304.2	0.918
8	16.4	545.5	3,849.7	1.069
9	20.0	422.3	4,272.0	1.187
10	21.9	478.8	4,750.8	1.320
11	22.7	481.3	5,232.1	1.453
12	23.9	371.1	5,603.2	1.556
13	23.9	286.9	5,890.1	1.636
14	25.0	351.9	6,242.0	1.734
15	25.5	343.7	6,585.7	1.829
16	26.1	314.0	6,899.7	1.917
17	26.7	334.6	7,234.3	2.010
18	27.1	318.9	7,553.2	2.098
19	27.5	335.2	7,888.4	2.191
20	27.9	331.3	8,219.7	2.283
21	28.2	318.9	8,538.6	2.372
22	28.6	467.9	9,006.5	2.502
23	29.4	496.6	9,503.1	2.640
24	29.4	462.1	9,965.2	2.768
25	30.4	428.1	10,393.3	2.887

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ของเวลากับพลังงานซึ่งมีช่วงเวลาเร่งความเร็วเท่ากันที่ 25 วินาที

หมายเหตุ : สีน้ำเงิน มวลผู้ทดสอบคนที่ 1 รวมจักรยาน 87 กก.  
 สีแดง มวลผู้ทดสอบคนที่ 2 รวมจักรยาน 99 กก.  
 สีดำ มวลผู้ทดสอบคนที่ 3 รวมจักรยาน 138 กก.

#### 4.4.4 การประจุไฟฟ้าครั้งหนึ่ง รถจักรยานไฟฟ้าวิ่งได้ระยะทางเท่าไร

หัวข้อนี้เป็นการทดสอบจนแบตเตอรี่หมด เมื่อขับขี่จักรยานไฟฟ้าด้วยความเร็วคงที่ คือ 10, 20 และ 30 กม./ชม. โดยผู้ขับขี่ 3 คนที่มวลต่างกัน คือ 55, 67 และ 106 กก. จักรยานไฟฟ้าหนัก 32 กก. มวลผู้ขับขี่รวมรถจักรยาน 87, 99 และ 138 กก. ตามลำดับ

การทดสอบที่ความเร็วคงที่ 10 กม./ชม. จะใช้เวลาในการทดสอบนานมาก มีวิธีลดช่วงเวลาที่ใช้ทำการทดสอบโดยจะทดสอบที่ความเร็วคงที่ 30 กม./ชม. ก่อน การทดสอบจะไม่สามารถขับขี่จักรยานไฟฟ้าได้เมื่อแรงดันไฟฟ้าที่แบตเตอรี่ มีค่าต่ำกว่าค่า **under voltage protection** ที่ 31 โวลต์ แบตเตอรี่ที่ใช้ กับจักรยานไฟฟ้าคันนี้เป็นชนิดตะกั่วกรด จะเกิดแรงดันไฟฟ้าตกลงเมื่อจ่ายกระแสเพิ่มมากขึ้น การทดสอบที่ความเร็วคงที่ 30 กม./ชม. มอเตอร์แบบฮับจะมีการดึงกระแสสูงกว่าการทดสอบที่ความเร็วคงที่ 10 กม./ชม. เมื่อทดสอบที่ความเร็วคงที่ 30 กม./ชม. จนถึงระดับ **under voltage protection** ที่ 31 โวลต์ จดค่าพลังงานที่ใช้แล้วทำการรีเซ็ตเครื่องมือวัดทางไฟฟ้า Doc Wattson DC Power Analyzer และรีเซ็ตอุปกรณ์วัดความเร็ว นำรถจักรยานไฟฟ้าไปทดสอบต่อที่ความเร็วคงที่ 10 กม./ชม. จะทำให้การทดสอบที่ความเร็วคงที่ 10 กม./ชม. ใช้เวลาทดสอบลดน้อยลงมาก เมื่อทดสอบที่ความเร็วคงที่ 10 กม./ชม. จนถึงระดับ **under voltage protection** ที่ 31 โวลต์ บันทึกค่าพลังงานที่ใช้แล้วนำไปบวกกับค่าเดิม คือพลังงานที่ใช้ทดสอบที่ความเร็วคงที่ 30 กม./ชม. จะได้พลังงานรวมทั้งหมดของการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทดสอบที่ความเร็วคงที่ 10 กม./ชม. จากนั้นจึงนำแบตเตอรี่ไปประจุไฟให้เต็มแล้วจึงทดสอบที่ความเร็วคงที่ 20 กม./ชม. ทำการทดสอบจนครบทั้ง 3 คน ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบมีดังนี้

ตารางที่ 4.20 ข้อมูลการทดสอบจักรยานไฟฟ้าจนแบตเตอรี่หมด

มวลผู้ทดสอบรวม รถจักรยานไฟฟ้า (กก.)	ความเร็วทดสอบ (กม./ชม.)	ระยะทางที่ได้ (กม.)	พลังงานที่ใช้ (Wh)	พลังงานที่ใช้ต่อระยะทาง 1 กม. (Wh)	ราคาค่าไฟต่อระยะทาง 1 กม. (สตางค์)
87	10	49.41	267.3	5.41	1.68
	20	33.35	225.8	6.77	2.11
	30	21.25	199.5	9.39	2.92
99	10	42.25	253.9	6.01	1.87
	20	28.74	219.0	7.62	2.37
	30	18.51	195.5	10.56	3.28
138	10	29.49	223.5	7.58	2.36
	20	19.31	189.4	9.81	3.05
	30	11.57	159.6	13.80	4.29

หมายเหตุ : คำนวณราคาค่าไฟฟ้าต่อระยะทาง 1กม. จากค่าไฟฟ้าปัจจุบัน 1 หน่วย (1kWh) ราคา 3.11 บาท

ตารางที่ 4.21 ระยะทางที่ขับขี่ได้จากการทดสอบจักรยานไฟฟ้าจนแบตเตอรี่หมด

มวลผู้ทดสอบรวม รถจักรยานไฟฟ้า (กก.)	ความเร็วทดสอบคงที่		
	10 กม./ชม.	20 กม./ชม.	30 กม./ชม.
87	49.41 กม.	33.35 กม.	21.25 กม.
99	42.25 กม.	28.74 กม.	18.51 กม.
138	29.49 กม.	19.31 กม.	11.57 กม.

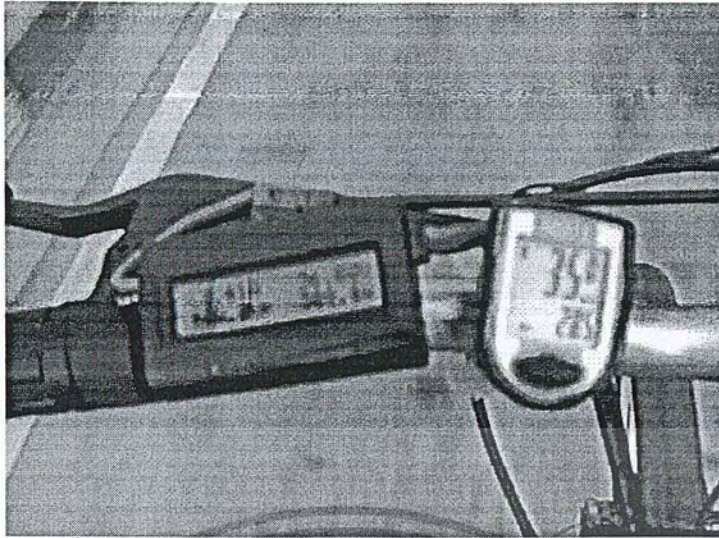
เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้แก้ไขหรือขึ้นต้นการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4.5 สรุปผลการทดสอบรถจักรยานไฟฟ้าครั้งที่สอง

การทดสอบรถจักรยานไฟฟ้าครั้งที่สอง ศึกษาการตอบสนองต่อช่วงเวลาการเร่งความเร็วจาก 0 ถึง 30 กม./ชม. ภายใต้เงื่อนไขการเร่งความเร็วด้วยอัตราเร่งสูงสุด มวลผู้ทดสอบรวมรถจักรยานไฟฟ้ามีผลต่อระยะเวลาการเร่งความเร็ว มวลผู้ทดสอบรวมรถจักรยานไฟฟ้า 87 กก.และ 138 กก. เพิ่มขึ้น 58.62% จะใช้เวลาเร่งความเร็วเพิ่มขึ้น 1.78 เท่า จาก 14 วินาที เป็น 25 วินาที กราฟความสัมพันธ์ของการเร่งความเร็วด้วยอัตราเร่งสูงสุดระหว่างเวลา กับพลังงานของผู้ทดสอบทั้ง 3 คน มีลักษณะเป็นเส้นตรงอยู่ในแนวเดียวกัน เนื่องมาจากชุดคอนโทรลมีการลิมิตกระแสจากแบตเตอรี่ไม่ให้มีค่าเกิน 16.5 แอมแปร์ ช่วงเร่งความเร็วของผู้ทดสอบทั้ง 3 คน กระแสจากแบตเตอรี่จึงมีค่าใกล้เคียงกันประมาณ 16.5 แอมแปร์ แต่มวลผู้ทดสอบรวมรถน้อย จะใช้เวลาการเร่งความเร็วน้อย ทำให้ใช้พลังงานในการเร่งความเร็วน้อยกว่า

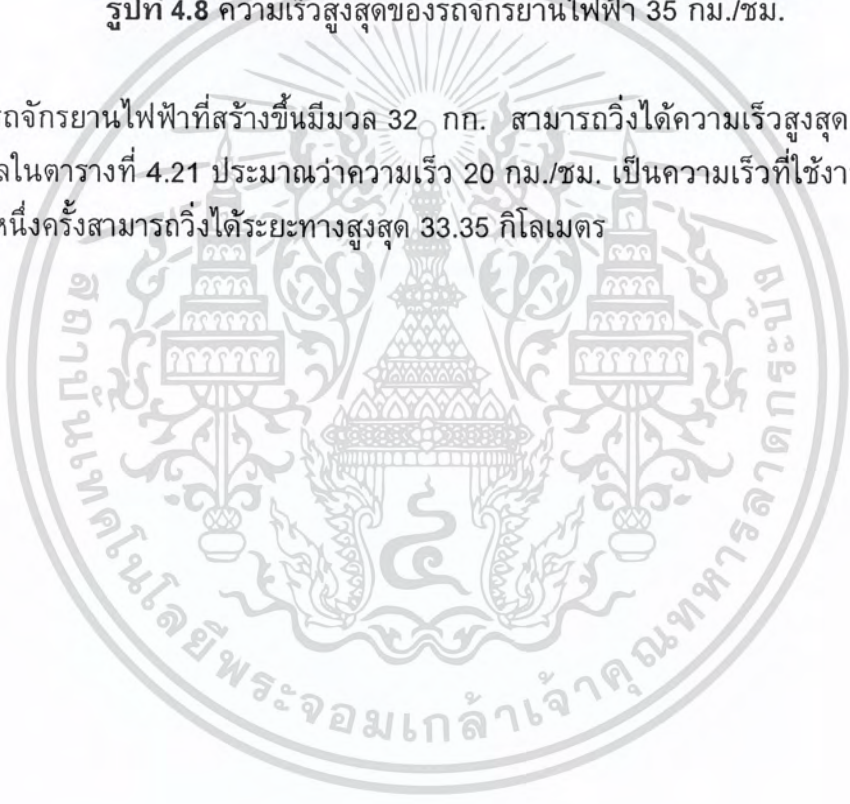
ศึกษาการตอบสนองต่อช่วงเวลาการเร่งความเร็วจาก 0 ถึง 30 กม./ชม.ภายใต้เงื่อนไขช่วงเวลาเร่งความเร็วเท่ากันที่ 25 วินาที กราฟความสัมพันธ์ของเวลากับความเร็วซึ่งมีช่วงเวลาเร่งความเร็วเท่ากันที่ 25 วินาที ของผู้ทดสอบทั้ง 3 คน มีลักษณะใกล้เคียงกัน ประมาณว่าใช้อัตราเร่งเดียวกัน พลังงานที่ใช้ในการเร่งความเร็วต่างกันคือ มวลรวมมากจะใช้พลังงานมากตามไปด้วย มวลผู้ทดสอบรวมรถจักรยานไฟฟ้า 87 กก.และ 138 กก. มวลเพิ่มขึ้น 58.62% จะใช้พลังงานในการเร่งความเร็วเพิ่มขึ้น 1.39 เท่า จาก 2.63 Wh เป็น 3.66 Wh

การประจุไฟฟ้าครั้งหนึ่ง ระยะทางที่รถจักรยานไฟฟ้าวิ่งได้ ขึ้นอยู่กับสองปัจจัยคือ มวลผู้ขับขี่รวมรถจักรยานและความเร็วที่ขับขี่ มวลรวมมากจะทำให้ระยะทางที่ได้น้อยลง ที่ความเร็วคงที่ 20 กม./ชม. มวลรวมเพิ่มขึ้น 58.62% จาก 87 กก. เป็น 138 กก. ระยะทางที่ขับขี่ได้จะลดลง 42.10% จาก 33.35 กม. เหลือ 19.31 กม. ความเร็วที่ขับขี่มากก็ทำให้ระยะทางที่ได้น้อยลงเช่นกัน มวลผู้ทดสอบรวมรถจักรยานไฟฟ้า 87 กก. เพิ่มความเร็วทดสอบขึ้น 3 เท่า จาก 10 กม./ชม. เป็น 30 กม./ชม. ระยะทางที่ขับขี่ได้ลดลง 56.99% จาก 49.41 กม. เหลือ 21.25 กม. และเมื่อเปรียบเทียบกับความเร็ว 20 กม./ชม. ประมาณว่าเป็นความเร็วที่ใช้งานจริง มวลรถจักรยานไฟฟ้ารวมคนขับขี่ที่ 87 กก. ใช้พลังงาน 6.77 Wh ต่อระยะทาง 1 กม. ปัจจุบันพลังงานไฟฟ้า 1 หน่วย ราคา 3.11 บาท คิดเป็นราคาค่าไฟฟ้า 2.11 สตางค์ต่อระยะทาง 1 กม. นับเป็นยานพาหนะที่คุ้มค่าในสภาวะการณ์ปัจจุบันที่น้ำมันเชื้อเพลิงมีราคาสูง



รูปที่ 4.8 ความเร็วสูงสุดของรถจักรยานไฟฟ้า 35 กม./ชม.

รถจักรยานไฟฟ้าที่สร้างขึ้นมีมวล 32 กก. สามารถวิ่งได้ความเร็วสูงสุด 35 กม./ชม. จากข้อมูลในตารางที่ 4.21 ประมาณว่าความเร็ว 20 กม./ชม. เป็นความเร็วที่ใช้งานจริง ในการประจุไฟหนึ่งครั้งสามารถวิ่งได้ระยะทางสูงสุด 33.35 กิโลเมตร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### บทสรุปและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 บทสรุป

การดำเนินงานศึกษาและสร้างรถจักรยานไฟฟ้าจากมอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่าน (Brushless DC Hub motor) ได้มีการดำเนินงานตามวัตถุประสงค์ที่กำหนดวางไว้ โดยส่วนที่ได้ดำเนินงานไปแล้ว คือ

1. ส่วนของการศึกษาข้อมูลมอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่าน โดยได้ทำการศึกษาดังแต่ทฤษฎีและหลักการพื้นฐาน ประวัติความเป็นมา ชนิดของมอเตอร์แบบฮับ ลักษณะทางโครงสร้าง หลักการทำงาน รูปแบบการทำงาน ข้อดีข้อเสีย และทำการเปรียบเทียบข้อมูลกับมอเตอร์ชนิดอื่นๆ

2. ส่วนของการทดสอบมอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่าน ได้ทำการทดสอบทั้งแบบไม่มีภาระทางกลและแบบมีภาระทางกล มอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่านพิกัดแรงดัน 36 โวลต์ 350 วัตต์ 46 ชั่วโมง ทำการทดสอบเปรียบเทียบประสิทธิภาพของมอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่าน กับมอเตอร์แบบฮับชนิดมีแปรงถ่านที่ความเร็วรอบเดียวกัน ที่สภาวะไม่มีภาระทางกล มอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่านจะมีการดึงพลังงานน้อยกว่ามอเตอร์แบบฮับชนิดมีแปรงถ่าน 15.50% ประสิทธิภาพของมอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่านอยู่ที่ 76.7% ที่ขนาดกำลังด้านออก 141.2 วัตต์ การเพิ่มขนาดของภาระทางกลจะทำให้ความเร็วรอบของมอเตอร์แบบฮับลดลง

3. การสร้างรถจักรยานไฟฟ้าจากมอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่าน ได้ทำการสร้างรถจักรยานไฟฟ้าขึ้นมาโดยมีมอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่านเป็นส่วนประกอบ รถจักรยานไฟฟ้าที่สร้างขึ้นมีมวลรวม 32 กก. สามารถวิ่งได้ความเร็วสูงสุด 35 กม./ชม. ในการประจุไฟหนึ่งครั้งสามารถวิ่งได้ระยะทางสูงสุด 33.35 กิโลเมตร

4. การทดสอบรถจักรยานไฟฟ้าครั้งที่หนึ่ง เมื่อเปรียบเทียบความเร็วที่ 10 กม./ชม. และ 30 กม./ชม. ที่ระยะทาง 1 กม. มวลผู้ทดสอบรวมรถจักรยานไฟฟ้า 87 กก. จะใช้พลังงานเป็น 7.1 Wh และ 14.1 Wh ตามลำดับ ซึ่งความเร็วเพิ่มขึ้น 3 เท่า จะใช้พลังงานเพิ่มขึ้น 2 เท่า ทำการเปรียบเทียบการใช้พลังงานที่มวลรวมคนขับที่ 87 กก. และ 138 กก. ที่ระยะทาง 1 กม. ด้วยความเร็วทดสอบ 30 กม./ชม. จะใช้พลังงานเป็น 14.1 และ 19.0 Wh ตามลำดับ ซึ่งมวลเพิ่มขึ้น 58.62 % จะใช้พลังงานสูงขึ้น 1.35 เท่า ซึ่งเป็นการยืนยันว่ามวลที่เพิ่มขึ้นของผู้ขับขี่มีผลต่อการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นของจักรยานไฟฟ้า และเมื่อเปรียบเทียบที่ความเร็ว 20 กม./ชม. ประเมินว่าเป็นความเร็วที่ใช้งานจริง มวลรถจักรยานรวมคนขับที่ 87 กก. ใช้พลังงาน 6.77 Wh ต่อระยะทาง 1 กม. ปัจจุบันพลังงานไฟฟ้า 1 หน่วย ราคา 3.11 บาท คิดเป็นราคาค่าไฟฟ้า 2.11 สตางค์ต่อระยะทาง 1 กม. นับเป็นยานพาหนะที่คุ้มค่าในสภาวะการณปัจจุบันที่น้ำมันเชื้อเพลิงมีราคาสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เขียนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. การทดสอบรถจักรยานไฟฟ้าครั้งที่สอง การประจุไฟฟ้าครั้งหนึ่ง ระยะทางที่รถจักรยานไฟฟ้าวิ่งได้ ขึ้นอยู่กับสองปัจจัยคือ มวลผู้ขับขี่รวมรถจักรยานและความเร็วที่ขับขี่ มวลรวมมากจะทำให้ระยะทางที่ได้น้อยลง ที่ความเร็วคงที่ 20 กม./ชม. มวลรวมเพิ่มขึ้น 58.62% จาก 87 กก. เป็น 138 กก. ระยะทางที่ขับขี่ได้จะลดลง 42.10% จาก 33.35 กม. เหลือ 19.31 กม. ความเร็วที่ขับขี่มากก็จะทำให้ระยะทางที่ได้น้อยลงเช่นกัน มวลผู้ทดสอบรวมรถจักรยานไฟฟ้า 87 กก. เพิ่มความเร็วทดสอบขึ้น 3 เท่า จาก 10 กม./ชม. เป็น 30 กม./ชม. ระยะทางที่ขับขี่ได้ลดลง 56.99% จาก 49.41 กม. เหลือ 21.25 กม. และเมื่อเปรียบเทียบกับความเร็ว 20 กม./ชม. ประมาณว่าเป็นความเร็วที่ใช้งานจริง มวลรถจักรยานไฟฟ้ารวมคนขับขี่ 87 กก. ใช้พลังงาน 6.77 Wh ต่อระยะทาง 1 กม. ปัจจุบันพลังงานไฟฟ้า 1 หน่วย ราคา 3.11 บาท คิดเป็นราคาค่าไฟฟ้า 2.11 สตางค์ต่อระยะทาง 1 กม. นับเป็นยานพาหนะที่คุ้มค่าในสภาวะการณ์ปัจจุบันที่น้ำมันเชื้อเพลิงมีราคาสูง

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

ในการทดสอบมอเตอร์แบบฮับควรมีแหล่งจ่ายที่มีระดับแรงดันคงที่ เพราะแบตเตอรี่ที่ใช้ทดสอบเป็นชนิดตะกั่วกรด เมื่อมอเตอร์แบบฮับดึงกระแสเพิ่มขึ้น แรงดันไฟฟ้าจากแบตเตอรี่จะตกลง จึงควรเลือกใช้แบตเตอรี่ชนิด ลิเทียมที่มีค่าแรงดันค่อนข้างคงที่เมื่อจ่ายกระแสสูง

เมื่อมีการเพิ่มภาระทางกลในการทดสอบแบบมีภาระทางกลของมอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่าน ควรออกแบบการทดสอบให้รัดกุมและปลอดภัยเพราะอาจเกิดอันตรายจากมวลที่อาจจะเหวี่ยงใส่ผู้ทดสอบได้ อีกทั้งยังต้องทำการทดสอบให้ได้ใกล้เคียงกับพิกัดของตัวมอเตอร์ แต่ก็ต้องระมัดระวังอย่าให้เกิดการลัดวงจรเกิดขึ้น ซึ่งจะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าที่สูงมาก เป็นอันตรายแก่ตัวมอเตอร์เองและชุดคอลโทรลมอเตอร์อีกด้วย

ในการศึกษาการทำงานของวงจรคอลโทรลมอเตอร์แบบฮับ ชนิดไม่มีแปรงถ่าน ควรจะมีการศึกษาทฤษฎีและลายวงจรให้มีความเข้าใจดีในระดับหนึ่ง ก่อนทำการแกะวงจรคอลโทรลเพื่อศึกษาจากของจริงหรือวัสดุสัญญาณรูปคลื่น เพื่อป้องกันการลัดวงจร เพราะตัวคอลโทรลอ่อนต่อการถูกรบกวนมาก

## 5.3 สิ่งที่ต้องดำเนินการต่อ

1. การทดสอบรถจักรยานไฟฟ้าที่ใช้มอเตอร์แบบฮับในทางที่ลาดชันโดยหาองศาของความลาดชันที่ทำให้รถไม่สามารถเคลื่อนที่ได้จากจุดหยุดนิ่ง
2. ทดสอบหาความแตกต่างของพลังงานโดยให้มวลรวมกับรถและความเร็วต่างกันที่ระยะทางเท่ากัน
3. ทำการทดสอบมอเตอร์แบบฮับแบบเพิ่มภาระทางกลจนใกล้เคียงกับพิกัดกำลังของมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

- [1] วีระเชษฐ์ ชันเงิน และ วุฒิพล ธาราธีรเศรษฐ์, อิเล็กทรอนิกส์กำลัง, พิมพ์ครั้งที่ 3, กรุงเทพฯ, สำนักพิมพ์ วี เจ พรินติ้ง, พ.ศ.2548.
- [2] C.Chat-Uthai, **Electrical Machines**, Electrical Machines Research Laboratory Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, June, 2009.
- [3] Y. Chen, Z. Lu and D. Zhang, **Study on Steering Control Strategy of Electric Vehicles Driven by Hub-Motors**, The Sixth International Symposium on Neural Networks (ISNN 2009), May 26-29, 2009, Wuhan, China, pp. 1069-1077.
- [4] Y. Chen and Z. Lu, **Study on Control of a Two Hub-Motor Electric Vehicle**, Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Information and Automation, June 20 - 23, Harbin, China.
- [5] C.C. Chan, **An overview of electric vehicle technology**, Proceedings of IEEE, 81, 1993.
- [6] T. R. Kuphaldt, **Lessons In Electric Circuits, Volume II – AC**, Sixth Edition, July, 2007.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก.

## ฮอลล์ เอฟเฟค เซ็นเซอร์

ปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall Effect) เป็นอุปกรณ์ทรานดิวเซอร์อีกชนิดหนึ่ง ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มของเซนเซอร์วัดตำแหน่ง (Proximity Sensor) ที่มีขนาดเล็กและสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้ อย่างหลากหลาย เช่นใช้สำหรับวัดตำแหน่ง ระยะทาง ความเร็วในการเคลื่อนที่ ความเร็วรอบ (rpm) หรือการวัดการกระจัดเชิงมุมของเพลลาซึ่งแรงดันไฟฟ้าทางด้านเอาร์ทพุตที่ได้จากปรากฏการณ์ฮอลล์จะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อมีการเบี่ยงเบนของกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ไหลผ่านอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่เรียกว่า "Hall Generator" ดังแสดงทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าในรูปที่ 1 ทั้งนี้การเบี่ยงเบนของกระแสไฟฟ้านั้นจะขึ้นอยู่กับสนามแม่เหล็กที่ตั้งอยู่ทั้งสองด้านของHall Generator ดังรูปที่ 2 เป็นตัวนำกระแสไฟฟ้า(Current Carrying Conductor)ที่ไหลผ่านHall Generator ผลที่เกิดขึ้นจากสนามแม่เหล็กที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าจะมีขนาดสัดส่วนของผลคูณระหว่างความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กกับกระแสไฟฟ้า แรงที่กระทำกับประจุพาหะเป็นตามสมการ

$$F = QVB\cos\theta \quad (1)$$

รูปลักษณะโครงสร้างทางกายภาพของปรากฏการณ์ฮอลล์

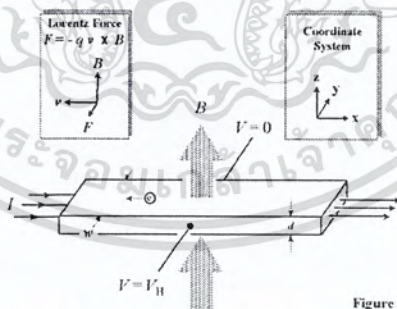
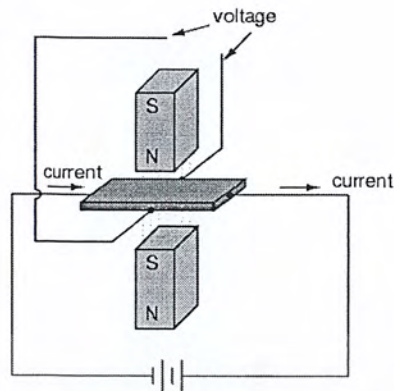


Figure 1

รูปที่ 1 ทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าผ่าน Hall Generator

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2 การเกิดแรงดันไฟฟ้าจากปรากฏการณ์ฮอลล์

จากสมการ 1 จะเห็นได้ว่าแรงที่กระทำกับประจุพาหะขึ้นอยู่กับมุมของสนามแม่เหล็กที่กระทำกับหัววัดฮอลล์ ดังนั้นแรงดันฮอลล์ก็จะขึ้นอยู่กับสมการ

$$V_{H1} = K \sin \theta \quad (2)$$

และ

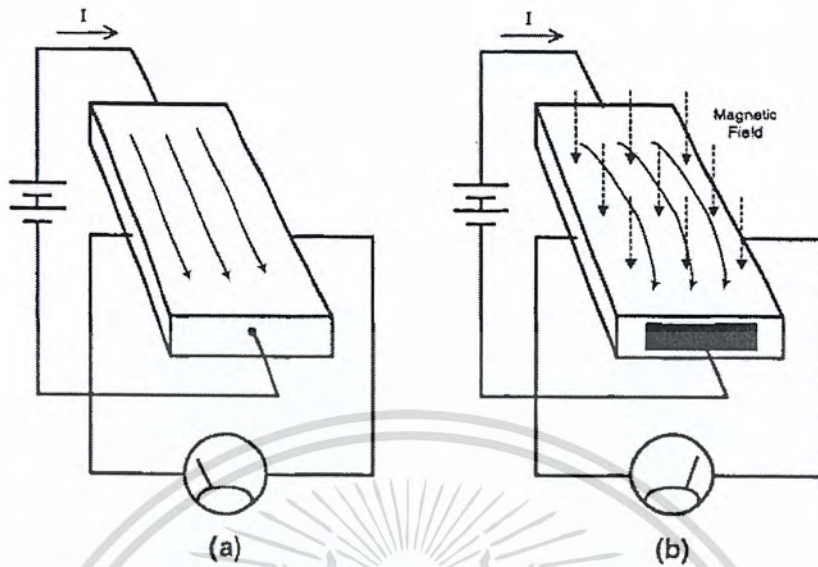
$$V_{H2} = K \cos \theta \quad (3)$$

ซึ่งจากสมการ 2 และ สมการ 3 นี้ จะเปลี่ยนแปลงตามทิศสนามแม่เหล็กที่กระทำกับหัววัดฮอลล์ จากสมการ  $\sin$  และ  $\cos$  ในสมการที่ 2 และ 3 มีความสัมพันธ์ทางตรีโกณมิติตามสมการ

$$\sin^2 \theta + \cos^2 \theta = 1 \quad (4)$$

ถ้าผลของการวัดค่าแรงดันจากหัววัดฮอลล์สองตัวที่วางตั้งฉากกันเป็นไปตามสมการที่ 4 แล้วก็สามารถที่จะนำเทคนิคการวัดแบบ 2 แกนนี้ ไปวัดกับสนามแม่เหล็กที่ไม่ขึ้นกับทิศทางได้

หลักการของปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall effect) ดังแสดงในรูปที่ 3 นำแผ่นโลหะบางๆ ที่มีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้า เช่น ทองแดง ต่อเข้ากับแบตเตอรี่หรือแหล่งจ่ายไฟฟ้าเพื่อให้กระแสวิ่งผ่านแผ่นโลหะนั้น จากนั้นวัดค่าแรงดันโดยวัดจากตำแหน่งด้านข้างของแผ่นโลหะ ดังรูปที่ 3(a) สามารถอธิบายได้ว่า เมื่อมีกระแสไฟฟ้า (I) ที่เกิดจากแหล่งจ่าย ไหลผ่านวัสดุตัวนำไฟฟ้า แล้วนำโวลต์มิเตอร์มาวัดที่แต่ละด้านของวัสดุตัวนำ จะพบว่าโวลต์มิเตอร์วัดได้ค่าเท่ากับ 0 V



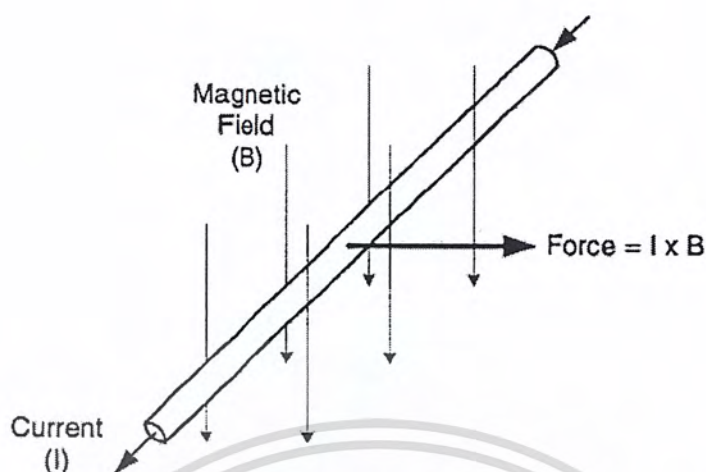
รูปที่ 3 ทิศทางการไหลของกระแสผ่านหัววัดฮอลล์

เมื่อนำแผ่นตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้าผ่านไปวางไว้ในบริเวณที่มีสนามแม่เหล็ก ดังแสดงในรูปที่ 3b ประจุพาหะในตัวนำสามารถเบนไปจากแนวทางเดิมได้ และการเบนนี้มีผลทำให้เกิดสนามไฟฟ้าในตัวนำในทิศตั้งฉากกับทั้งกระแสไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ซึ่งทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าถ้ามกลับทิศของสนามแม่เหล็ก ขั้วของแรงดันไฟฟ้าก็จะกลับกันด้วย ปรากฏการณ์นี้ถูกเรียกว่า Hall effect ถูกค้นพบโดย Edwin Hall

ปรากฏการณ์ (Hall Effect) ถูกค้นพบในปี 1879 เกิดภายใต้สถานะคงตัว ซึ่งหมายความว่าแรงดันไฟฟ้าได้ตกคร่อมแผ่นตัวนำซึ่งกระแสไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กไม่ขึ้นกับเวลา ความต่างศักย์ถูกแสดงโดยกลไกของการเหนี่ยวนำ และการเหนี่ยวนำนี้เป็นที่รู้จักกันดี ในศตวรรษที่ 19<sup>th</sup> จากการสังเกตพบว่า ความต่างศักย์ที่ได้จากการวัดที่ตกคร่อมแผ่นตัวนำนี้ เมื่อมีสนามแม่เหล็กพุ่งเข้า หรือเมื่อสนามแม่เหล็กมีทิศพุ่งออกทำให้เกิดความต่างศักย์เกิดขึ้นโดยมีทิศทางที่ต่างกัน พฤติกรรมต่อเนื่องของ hall effect ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในความเป็นจริงได้

ภายใต้เงื่อนไขส่วนใหญ่ ความต่างศักย์ที่เกิดจากปรากฏการณ์ฮอลล์ในโลหะมีขนาดเล็กมากและยากที่จะวัดค่าได้ซึ่งไม่ใช่สิ่งที่ถูกค้นพบโดยบังเอิญ จากการสังเกตของ Andre A. Ampere ในปี 1820 ซึ่งค้นพบว่า ลวดตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้าผ่านได้ เมื่อวางที่สนามแม่เหล็ก ดังแสดงในรูปที่ 4 คำถามของ Hall คือ ลวดดังกล่าวมีกระแสไหลผ่านหรือไม่ก็กระแสในลวดซึ่ง มีเหตุผลว่าถ้าแรงมีผลกับกระแส กระแสไฟฟ้าอยู่ส่วนใดส่วนหนึ่งของลวด เข็มของมิเตอร์จะเบน เพิ่มกำลังทำให้การเบนของกระแสมีค่าน้อยมาก แต่เราสามารถทำการวัดค่า ความต่างศักย์ที่ตกคร่อมลวดตัวนำได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4 แสดงทิศทางของสนามแม่เหล็กกระแสไฟฟ้าและแรง

กระแสไฟฟ้าไหลผ่านลวดตัวนำ ในสนามแม่เหล็กเบนไปอยู่ส่วนใดส่วนหนึ่ง ดังแสดงในรูปที่ 3b ระดับการเบนได้สูงเกินปกติ

#### คุณสมบัติพื้นฐานของปรากฏการณ์ฮอลล์

ในปัจจุบันเราสามารถวัดสนามแม่เหล็กได้ โดยใช้ตัวรับรู้ฮอลล์ (Linear Hall sensor) ซึ่งทำงานโดยอาศัยหลักการของปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall Effect) ในหัวข้อก่อนหน้านี้ได้อธิบายถึงเรื่อง ปรากฏการณ์ฮอลล์ ในเชิงคุณภาพ แต่ในหัวข้อนี้จะอธิบายเกี่ยวกับตัวแปรค่าต่างๆ และทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้าเบื้องต้น

เพื่อเข้าใจปรากฏการณ์ฮอลล์ จำเป็นที่จะต้องรู้หลักการเคลื่อนที่ของประจุ เช่นการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในการตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก แรงที่กระทำต่ออิเล็กตรอนโดยสนามแม่เหล็กไฟฟ้านั้นสามารถอธิบายได้ด้วยสมการ

$$F = q_0 E + q_0 v \times B \quad (5)$$

$F$  คือผลรวมของแรง  $E$  คือสนามไฟฟ้า  $v$  คือความเร็วของประจุ  $B$  คือค่าสนามแม่เหล็ก และ  $q_0$  คือค่าของประจุอิเล็กตรอน ความสัมพันธ์นี้เรียกว่า แรงลอเรนซ์ (Lorentz) โดยจากสมการแสดงให้เห็นว่าแรงที่ได้นั้นเกิดจาก 2 แหล่ง คือ การตอบสนองของประจุที่อยู่ในสนามไฟฟ้า และการเคลื่อนที่เมื่อประจุอยู่ในสนามแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีของสนามไฟฟ้า ประจุถูกกระทำกับแรงในทิศทางของสนาม โดยประจุบวกจะเคลื่อนที่ในทิศทางเดียวกันกับสนามไฟฟ้าทำให้เกิดกระแสไหลขึ้น ส่วนประจุลบจะเคลื่อนที่ในทิศทางตรงกันข้าม ทำให้เกิดแรงดันค่าหนึ่งขึ้นระหว่างสองจุด

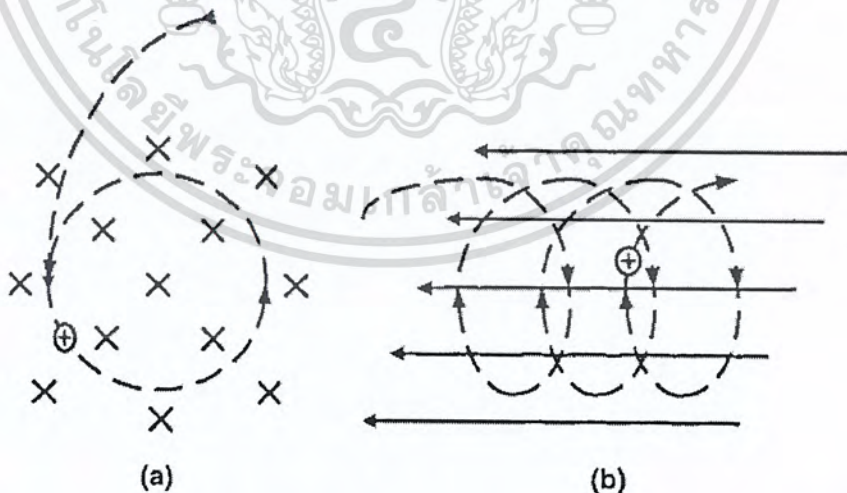
ในกรณีของสนามแม่เหล็ก ประจุจะไม่ถูกกระทำโดยแรงใดเลยถ้าไม่มีการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก เมื่อสนามแม่เหล็กมีการเปลี่ยนไปจะเกิดแรงที่มากระทำกับประจุทำให้เกิดการเปลี่ยนทิศทางในการเคลื่อนที่ โดยที่หากเป็นประจุที่ต่างกัน การเคลื่อนที่ก็จะมีการตรงข้ามกันด้วย สัญลักษณ์ของตัวแปรทั้งหมดมีความสำคัญ กรณีอย่างเช่น เมื่อความเร็วตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก แรงตั้งฉากกับความเร็วจึงสนามแม่เหล็ก สามารถอธิบายความสัมพันธ์ แรงแต่ละแกน(x,y,z) สัมพันธ์กับความเร็วและสนามแม่เหล็ก ที่เป็นองค์ประกอบ ในแกนต่างๆ โดย

$$F_x = q_0(v_y B_z - v_z B_y) \quad (6)$$

$$F_y = q_0(v_z B_x - v_x B_z) \quad (7)$$

$$F_z = q_0(v_x B_y - v_y B_x) \quad (8)$$

แรงจากการเคลื่อนที่ของประจุ ในสนามแม่เหล็กเป็นเหตุให้ประจุเคลื่อนที่แบบเส้นโค้ง ดังแสดงในรูปที่ 5 ซึ่งขึ้นอยู่กับความเร็วประจุในสนามแม่เหล็ก ซึ่งการเคลื่อนที่นี้สามารถเป็นได้ทั้งแบบวงกลม

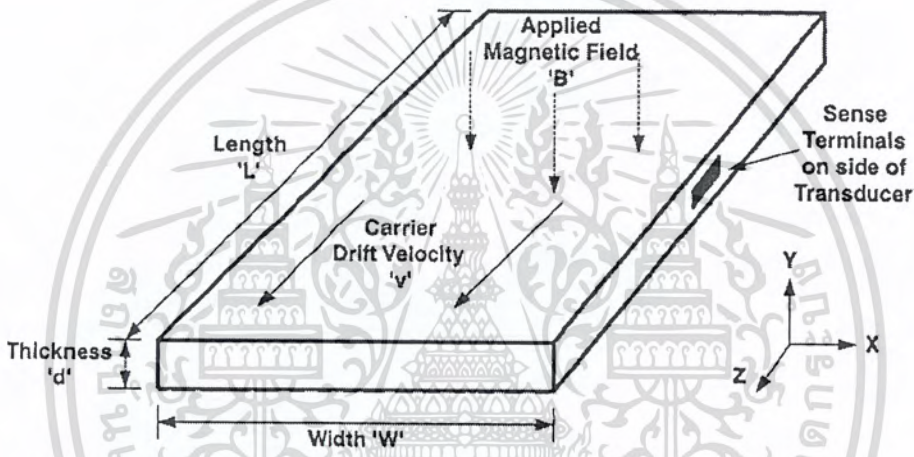


รูปที่ 5 สนามแม่เหล็กเป็นสาเหตุให้อนุภาคประจุเคลื่อนแบบวงกลม (a) หรือ แบบเป็นเกลียว (b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีของตัวนำประจุเคลื่อนที่ผ่านหัววัดฮอลล์ ความเร็วตัวนำประจุอยู่ในทิศใดทิศหนึ่งตามความยาวของอุปกรณ์ ดังแสดงในรูปที่ 6 และ ความไวของประจุพาหะ ที่ถูกเชื่อมด้วยมัมตั้งฉากตลอดความยาว โดย ความเร็วตัวนำประจุ ในแกน x ( $v_y=0, v_z=0$ ) และ ความไว (sensing) ของประจุซึ่งไม่สมดุลในแกน z สามารถที่จะรวมสามสมการข้างบนเป็นสมการเดียวเพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณ:  $F_z = q_0 v_x B_y$

ซึ่งอ้างอิงได้ว่าฮอลล์ทรานสดิวเซอร์ (Hall transducer) จะไวกับส่วน y ของสนามแม่เหล็กเท่านั้น และไม่ไวกับส่วนอื่นบนแกนสองแกนที่เหลืออยู่ ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 Hall Effect transducer ได้แสดงขอบเขตวิถีการเคลื่อนที่และมุมที่อ้างอิง

$$q_0 E_H + q_0 v \times B = 0 \tag{9}$$

โดยที่  $E_H$  คือสนามไฟฟ้าฮอลล์ที่อยู่ระหว่างตัวแปลงสัญญาณ เราสามารถหา  $E_H$  ได้จากสมการ

$$E_H = -v \times B \tag{10}$$

ซึ่งหมายความว่า สนามไฟฟ้าฮอลล์นั้นเป็นฟังก์ชันของความเร็วประจุพาหะ กับความเข้มสนามแม่เหล็ก สำหรับแผ่นหัววัดที่มีความกว้างของหน้าสัมผัส w ระหว่างหน้าสัมผัสสนามไฟฟ้าฮอลล์จะเป็นผลรวมของความกว้างทั้งหมด จึงสามารถเขียนสมการสำหรับแรงดันฮอลล์ได้ดังนี้

$$V_H = -wvB \quad (11)$$

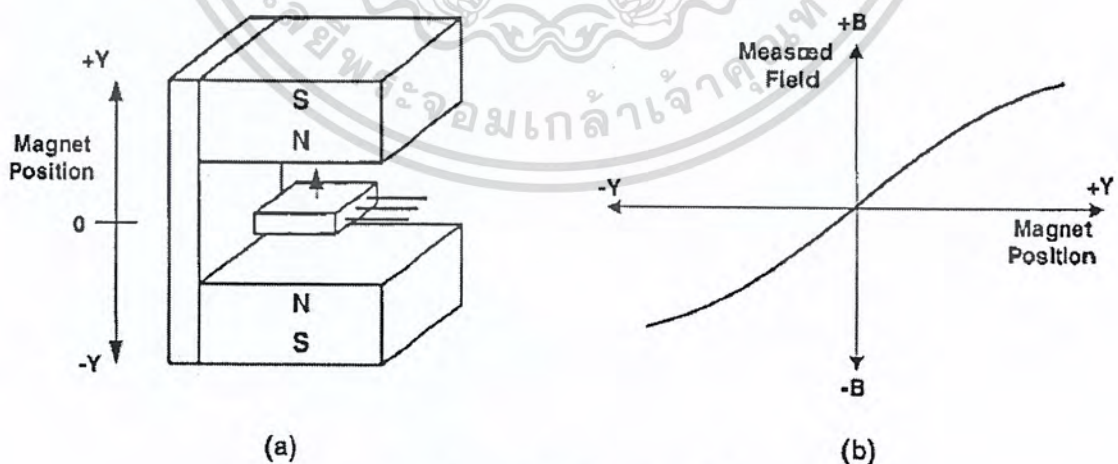
แรงดันฮอลล์ เป็นฟังก์ชันเชิงเส้นของ :

- ความเร็วตัวนำประจุในส่วนของแผ่นหัววัด
- สนามแม่เหล็กในมุมที่ตั้งฉาก
- ระยะห่างระหว่างขั้ว

### เซนเซอร์วัดตำแหน่งเชิงเส้น

เซนเซอร์วัดตำแหน่งที่เป็นเชิงเส้น สามารถจะบอกว่าตำแหน่งนั้นมีหรือไม่มีสนามแม่เหล็ก เพื่อที่จะไปวัดระยะทางที่ต่อเนื่องกันได้ ในการวัดสนามแม่เหล็กนี้มีปัจจัยที่สำคัญสองสิ่ง คือ หัววัดฮอลล์ที่ให้เอาต์พุตเป็นเชิงเส้นและสนามแม่เหล็กต้องมีความเป็นเชิงเส้น ทำให้สามารถวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของค่าแรงดันฮอลล์กับสนามแม่เหล็กที่เป็นเชิงเส้นดังสมการ  $Y = mX + C$  ทำให้ทราบค่าความไว (sensitivity) ของการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่กระทำ คือค่าความชัน (m) ของกราฟ ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานในการวัดค่าสนามแม่เหล็กในเชิงปฏิบัติได้จริง

ตำแหน่งเซนเซอร์แบบต่อเนื่องสามารถนำมาวิเคราะห์และอธิบายถึงคุณสมบัติต่างๆของ เซนเซอร์วัดตำแหน่ง ซึ่งสามารถนำใช้แทนที่เซนเซอร์ในเชิงดิจิทัลด้วยอุปกรณ์ที่มีเอาต์พุตเป็นเชิงเส้น ในขณะที่การเตรียมการเช่นนี้อาจจะนำไปใช้ประโยชน์เพื่อการใช้แบบเฉพาะ เอาต์พุตที่ได้จะสำคัญต่อความไม่เป็นเชิงเส้น โดยคำนึงถึงเรื่องตำแหน่ง ความไวของสนองระหว่างหัววัดฮอลล์กับสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 7 การเลื่อนหัววัดฮอลล์ในแกน Y

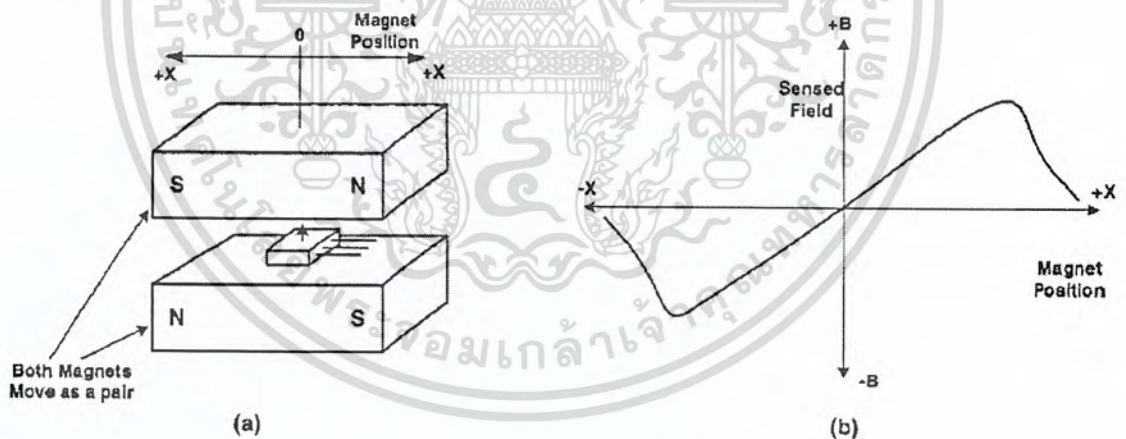
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างภายนอกของแม่เหล็กมีหลายแบบซึ่งความหนาแน่นของการไหลของประจุพาหะส่งผลต่อเอาต์พุตถึงความเป็นเชิงเส้น สามารถเปรียบเทียบค่าความเข้มสนามแม่เหล็กของแม่เหล็กสองตัวที่วางขนานกันดังรูปที่ 7

จากรูปแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องในแกน Y ระหว่างสองแม่เหล็กที่ต่างกันจากด้านลบต่ำที่สุดที่ขั้วด้านหนึ่ง ไปถึงกึ่งกลางระหว่างขั้ว และเพิ่มขึ้นจนถึงด้านบวกสูงที่สุดของขั้วแม่เหล็กอีกด้าน โกลัจุดกึ่งกลางของความชันกราฟจะไม่เปลี่ยนแปลง คือจะมีค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่หักล้างกันหมด จึงทำให้มีค่าเป็นศูนย์

คุณสมบัติหนึ่งของการวางตำแหน่งแม่เหล็กในลักษณะนี้ ช่วยให้สามารถเลือกแม่เหล็กที่นำมาใช้ได้หลากหลาย ถ้าการวัดขนาดของหน้าขั้วถูกเปรียบเทียบอย่างมากระหว่างขั้วที่แยกจากกัน หัววัดฮอลล์จะไม่ตอบสนองโดยเปรียบเทียบกับสิ่งอื่นถึงการเปลี่ยนตำแหน่งเซนเซอร์ในการควบคุมยกเว้นแกน Y

ถึงแม้ว่าการจัดการอันนี้ จัดเตรียมการได้สัดส่วนของความหนาแน่นในการไหลของประจุพาหะด้วยจุดฟลักซ์ที่ไม่มีค่าตรงกลาง ซึ่งไม่ได้ยอมรับถึงความเปลี่ยนแปลงจากการเคลื่อนที่มากเกินไป เมื่ออันหนึ่งไม่สามารถการันตีได้ว่าแม่เหล็กจะหยุดเคลื่อนไหวก่อนที่จะชนกับตัวเซนเซอร์เค้าโครงรูปร่างของแม่เหล็กในรูปที่ 8 แสดงลักษณะการของแม่เหล็ก



รูปที่ 8 การเลื่อนหัววัดฮอลล์ในแกน X

ข้อดีของการจัดเรียงในแบบนี้คือเซนเซอร์จะไม่ชนที่ตรงได้แม่เหล็กตอนที่เคลื่อนตัวด้วยเพราะว่าการเลือกแม่เหล็กที่เหมาะสมและเกี่ยวกับเรื่องเรขาคณิต และได้เตรียมการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์เป็นเชิงเส้นในการตอบสนองการเคลื่อนไหว อันดับแรก ข้อเสียเปรียบหรือข้ออุปสรรคก็คือ เซนเซอร์จะเคลื่อนตัวออกจากช่องว่างที่อยู่ในทิศทางของการเคลื่อนไหว ขนาด

ของฟลักซ์เริ่มต่ำลง ซึ่งสาเหตุคือการอ่านตำแหน่งผิด ด้วยเหตุผลนี้ยังคงจำเป็นที่จะต้องพิจารณาผลกระทบของการเคลื่อนที่มากเกินไปจากทัศนคติการกระทำของระบบ

นอกจากปัญหาเบื้องต้นแล้ว ยังมีอีกปัญหาที่อาจจะเกิดขึ้น อย่างแรกคือ ความยาวต่างกันมาก ซึ่งการวัดขนาดสามารถทำได้โดยจะเปรียบเทียบถึงขนาดของแม่เหล็กยกเว้นถ้าต้องการใช้แม่เหล็กขนาดใหญ่ก็จะลดปัญหาที่เกิดขึ้น

อย่างที่สองคือตัวเลือกของวัตถุแม่เหล็ก ขณะที่แม่เหล็กบางชนิด เช่น NdFeB หรือ SmCo ตัวเลือกมักจะมีเหตุผลในเรื่องของไบนารีที่ใกล้ชิดกับระบบค้นหาเพราะมีพื้นที่ความหนาแน่นสูง อาจจะไม่ให้ผลตามต้องการในระบบตำแหน่ง

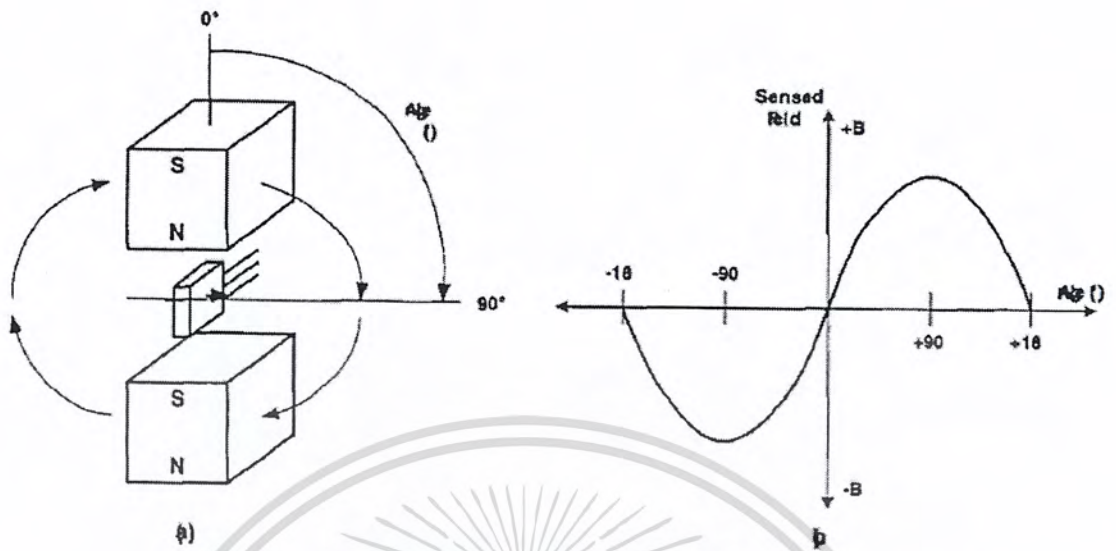
ในขณะที่เรามีคำอธิบายความต้องการของแม่เหล็กถึงความเป็นเชิงเส้นที่สามารถหาได้ เราไม่สนใจผลที่ออกมา เช่น การชดเชยและเรื่องระยะเวลา เรื่องระยะเวลาที่ผิดพลาดจะเป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงสภาวะในแม่เหล็ก ตรวจจับที่ผลของระบบ(แม่เหล็กและเซนเซอร์)ยังเป็นเชิงเส้น อย่างไรก็ตาม การชดเชยและระยะเวลาสามารถถูกคำนวณและตัดออกจากระบบเซนเซอร์ในการดำเนินการสัญญาณที่ตามมา

### เซนเซอร์วัดตำแหน่งเชิงมุม

บางครั้งเราต้องการรู้มุมที่แย้งกับตำแหน่งเชิงเส้นของวัตถุ ในขณะที่มีความเป็นไปได้ในกลไกเชื่อมต่อซึ่งแปลงการเคลื่อนหมุนรอบเข้าไปในการเคลื่อนที่เชิงเส้น มีทางที่จะวัดค่าการเคลื่อนหมุนรอบได้โดยตรงอีกด้วย รูปที่ 9 แสดงถึงหนึ่งในวิธีที่ง่ายที่สุดที่หมุนพื้นที่เดียวกันรอบหัววัดฮอลล์

ถ้า หัววัดฮอลล์ อยู่ในตำแหน่งเดียวกันกับจุดศูนย์กลางของการหมุน มันจะถูกแสดงออกมาที่พื้นที่เดียวกัน แต่ในตำแหน่งที่ต่างกัน เพราะหัววัดฮอลล์เป็นการตอบรับให้ส่วนประกอบของพื้นที่ในแกนเดียวเท่านั้น ผลลัพธ์ในการตอบรับนี้คือ รูปแบบ  $v_o = K \sin \theta$  ในขณะที่ไม่เป็นเชิงเส้น ฟังก์ชันนี้อยู่ในช่วง 90 องศาของการหมุน นั้นหมายความว่า เป็นไปได้ที่จะอธิบายมุมจากเซนเซอร์ที่ใช้อ่านในช่วงของฟังก์ชัน  $\sin^{-1}$

ค่าที่เพิ่มและค่าชดเชยในการปรับเปลี่ยนคือการคำนวณจุดวิกฤตซึ่งถูกแสดงบนเครื่องแปลงสัญญาณก่อนที่จะผ่านการตรวจแก้  $\sin^{-1}$  (รูปที่ 10) ค่าชดเชยต้องปรับเปลี่ยนเมื่ออยู่ที่ตำแหน่ง 0 องศา ฟลักซ์สุทธิที่จุดนี้ ถูกเห็นโดยเซนเซอร์ ค่าที่ใกล้ศูนย์ สมมติถึงความไม่สมส่วนกันในตำแหน่งแม่เหล็กหรือตำแหน่งของ ข้อผิดพลาดของค่าที่เพิ่มจะรวมเข้ากับความแปรปรวนของฟลักซ์ในแม่เหล็ก และค่าที่เพิ่มขึ้นของเครื่องแปลงสัญญาณ



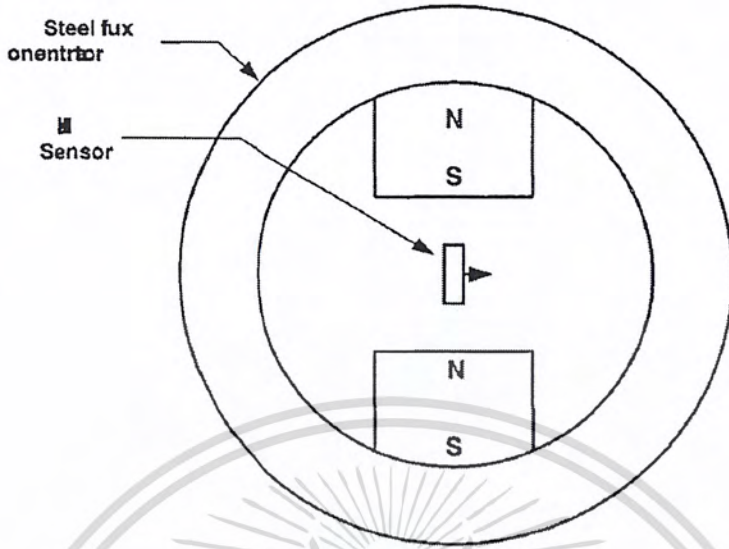
รูปที่ 9 โครงสร้างของเซนเซอร์วัดตำแหน่งเชิงมุมและการตอบสนอง



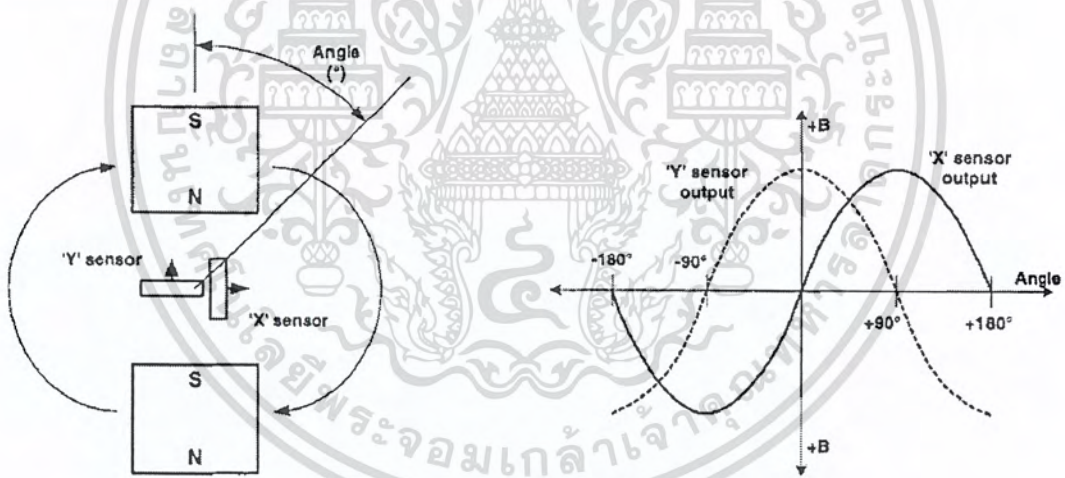
รูปที่ 10 สัญญาณที่เข้าสู่เซนเซอร์วัดตำแหน่งเชิงมุม

ถ้าช่วงมุมสัมผัสที่เล็กกว่าที่ต้องการ อาจจะเป็นไปได้ที่จะไม่เป็นเชิงเส้น ของการตอบรับ สัญญาณการตอบรับในช่วง 30 องศา อยู่ใกล้ความเป็นเชิงเส้น ที่เป็นประโยชน์ในหลายๆงาน โดยปราศจากการแก้ไข  $\sin^{-1}$  ในกรณีนี้เป็นที่น่าพอใจในการใช้ระดับที่สูงขึ้นของ ฟลักซ์ ในวงจรมแม่เหล็กที่เพิ่มความไวขึ้น

การเพิ่มของฟลักซ์ (รูปที่ 11) ถูกใช้ปรับปรุงให้มีประโยชน์ในตำแหน่งการหมุนรอบวงจรมแม่เหล็ก โดยเส้นทางที่ ฟลักซ์ไหลผ่านวงจรมแม่เหล็ก หัววัดได้ลดฟลักซ์ที่สามารถหนีเข้าไปในสภาพแวดล้อมภายนอกจำนวนมากและอาจเป็นสิ่งกีดขวางกับอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับแม่เหล็กอื่นๆได้ โดยกลไกสลับเปลี่ยนเดียวกัน หัววัดยังลดข้อผิดพลาดในการวัดที่เป็นเหตุโดยสนามแม่เหล็กภายนอก โดยพื้นที่สนามทั้งหมดที่ลดลง ต้องผ่านวงจรมแม่เหล็ก หัววัดยินยอมสำหรับการใช้วัตถุแม่เหล็กได้เล็กน้อยหรือวัตถุแม่เหล็กคุณภาพต่ำกว่า



รูปที่ 11 หัววัดเซนเซอร์



รูปที่ 12 เซนเซอร์สำหรับใช้งานในช่วง 360 องศา

ถ้าการวัดมุมต้องการมากกว่า 90 องศา ของการหมุนรอบ การแก้ปัญหาอย่างหนึ่งคือการใช้หัววัดฮอลล์วางในตำแหน่งตั้งฉากซึ่งกันและกัน แสดงในรูปที่ 12 ในองค์ประกอบนี้ เราใส่ค่าผลลัพธ์ว่าเป็นค่าค่าฟังก์ชันสัดส่วนของไซน์และโคไซน์ โดยดูที่ลักษณะขั้วที่เกี่ยวข้องข้องกัน และสัญญาณของสองผลลัพธ์ มุมที่ถูกกำหนดในช่วง 360 องศา ทั้งหมด

ในขณะที่เราหามุมโดยเอาผลลัพธ์ของแต่ละเซนเซอร์แยกออกจากกัน แก่  $\sin^{-1}$  และ  $\cos^{-1}$  และ กำหนดคอดแดนซ์ ของขั้นตอนโดยการพิจารณาสัญลักษณ์ของแต่ละผลลัพธ์ สำหรับแสดงฟังก์ชันนี้ มุม( $\theta$ )สามารถหาได้โดยการพิจารณาฟังก์ชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\theta = \tan^{-1}(B_y/B_x) \quad (12)$$

หามุมจากฟังก์ชันอัตราส่วนของผลลัพท์ไซน์เซอร์สองตัวหลายๆตำแหน่ง อันดับแรกเราต้องอัตราขยายของตัวแปลงสัญญาณทั้งสองตัว ถ้าวางจรมแม่เหล็กหาตัวแปลงสัญญาณกับฟลักซ์เพียงพอทำการวัดที่ถูกต้องโดยปราศจากการหมุน ผลรวมที่ถูกต้องของฟลักซ์โดยแม่เหล็กมีความสำคัญลดลงสำหรับเหตุผลเดียวกันนี้ ค่าสัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิของแม่เหล็กไม่มีความสำคัญ ค่าสัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิของตัวแปลงสัญญาณสองตัวของความไว ค่าสัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิของตัวแปลงสัญญาณ แทบจะมีความสำคัญลดลง อย่างไรก็ตามตัวแปลงสัญญาณได้ทดแทนข้อผิดพลาดเป็นการพิจารณาและต้องทำให้เล็กลงที่สุด

อย่างไรก็ตามค่าที่ใช้ไปเป็นโลจิกที่ซับซ้อนมากกว่าในการหามุมจากการวัดแต่ละเซ็นเซอร์ สมการที่ 17 หามุมเดียวในช่วง +90 องศาถึง -90 องศา ( $B_x > 0$ ) ค่าของการเปลี่ยนแปลงถูกนำมาใช้ในหามุมของควอดแดนต์อื่นๆ นอกจากนี้ อัตราส่วน  $B_y/B_x$  มีค่ามากใกล้ +90 องศา หรือ -90 องศา ใช้  $\tan^{-1}$  ของจำนวนเลขที่กลับกัน เมื่อ  $|B_y| > |B_x|$

อธิบายการวัด แกน  $B_x$  และ  $B_y$  จากหลักการ

1. Is  $B_x > 0$ ?
2. Is  $B_y > 0$ ?
3. Is  $|b_y| > |B_x|$ ?

จากหลักการ 3 ข้อเราเลือกสมการที่เหมาะสมสำหรับหามุม (วัดตามเข็มนาฬิกาจาก + Y ดังแสดงใน รูปภาพที่ 12)

ตารางที่ 1 สูตรสำหรับการหามุม 360 องศา

Range (°)	$ B_x  >  B_y $	$B_x > 0$	$B_y > 0$	Formula for $\theta$ (°)
0-45	No	Yes	Yes	$\theta = \tan^{-1}(B_y/B_x)$
45-90	Yes	Yes	Yes	$\theta = 90^\circ - \tan^{-1}(B_y/B_x)$
90-135	Yes	Yes	No	$\theta = 90^\circ - \tan^{-1}(B_y/B_x)$
135-180	No	Yes	No	$\theta = 180^\circ + \tan^{-1}(B_y/B_x)$
180-225	No	No	No	$\theta = 180^\circ + \tan^{-1}(B_y/B_x)$
225-270	Yes	No	No	$\theta = 270^\circ - \tan^{-1}(B_y/B_x)$
270-315	Yes	No	Yes	$\theta = 270^\circ - \tan^{-1}(B_y/B_x)$
315-260	No	No	Yes	$\theta = 360^\circ + \tan^{-1}(B_y/B_x)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข.

**"Watt's Up" & "Doc Wattson"****Watt Meter and Power Analyzer User's Manual****1. INTRODUCTION**

Thank you for purchasing the Watt's Up or Doc Wattson power analyzer. We are confident you will find it to be an indispensable addition to the tools you use to make your hobby more enjoyable.

While emphasizing RC modeling applications, this manual applies to the myriad applications to which the Watt's Up or Doc Wattson meters can be applied. While the Watt's Up model will be referred to, the Doc Wattson is the same with the exception of some of the parameter ranges covered.

Your Watt's Up watt meter and power analyzer is an easy-to-use precision instrument for measuring and calculating the electrical parameters the hobbyist of electronic devices needs to get the most from their projects.

**1.1 What it Does**

Watt's Up measures current, voltage and time and from those measurements calculates peak current (Amps), peak power (Watts), minimum voltage (Volts), power (Watts), energy (Watt-hours) and charge (Amp-hours) values for you, in real-time, for the circuit in which you connect it.

**1.2 Benefits**

With the advent of electric power for models the hobbyist can now investigate and tune the performance of their model in ways not possible with the traditional internal combustion engines. With Watt's Up it is now easy to determine things like:

- Flight time
- Current through an ESC and motor
- ESC, BEC and motor efficiencies
- Charge put into and removed from a battery and the performance of battery chargers
- Battery health
- Presence of peak currents that can damage components
- Presence of voltage sags that cause components to operate out of

เอกสาร specification ที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Why power is lost during acrobatics or extreme conditions
- Effect of gearing and propeller size and shape on power consumption and battery currents
- Effects of modifications, age and damage on many electrical system Components

Clever RC hobbyists will, no doubt, discover new applications to further improve electric model performance.

With Watt's Up you can stop wondering what's going on with your electric model and get answers that allow you to apply science to your hobby. The precise measurements you collect will help you fine tune your model to get all the performance that you paid for.

We know you are anxious to start using your Watt's Up and ask that you review this manual first to get the most out of its capabilities and inform you of relevant safety issues.

## 2. FEATURES AND SPECIFICATIONS

### 2.1 Features

- Measures energy (Wh), charge (Ah), power (W), current (A) and voltage (V)
- Connector to use an optional receiver battery for measurement down to 0 V
- Accurate & precise – 0.01 A current and 0.01 V voltage resolutions
- Measures peak Amps, peak Watts (except for Doc Wattson) and voltage minimum (sag)
- Rugged – handles 50 A continuous and 100 A peak at 60 V
- 14 ga., super fine stranded, high temperature, silicone rubber insulated wire
- Small & light with a tough plastic case available in several colors
- Acts like a wire so doesn't affect model's performance. Precision Alu-Chrom current sensing resistor, with only 0.001 Ohms resistance and circuitry that draws only 7 mA
- Uses DSP to increase ADC resolution and differential measurement amplifiers to increase noise immunity
- Factory calibration stores constants in EEPROM to compensate for component tolerances
- Powerful, 8 MIPS micro-controller
- Made in USA to ISO 9001:2000 quality standards

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- One-year warranty and complete user manual

## 2.2 Specifications Tables

**Table 1** Electrical Measurement Ranges

Parameter	Range	Resolution	Notes
Voltage	0* - 60 V	0.01 V	*0 V min. w/ auxiliary power. E.g. a receiver battery. Else 4.0V.
Current	0 – 100 A peak	0.01 A	50 A continuous
Power	0 - 6554 W	0.1 W	
Charge	0 - 65 Ah	0.001 Ah	0 – 6554 Ah for Doc Wattson. 0.1Ah resolution
Energy	0 - 6554 Wh	0.1 Wh	0 – 655 Kwh for Doc Wattson. 0.01KWh resolution

**Table 2** Miscellaneous Specifications

Parameter	Value	Notes
Measurement Update Period	400 mS	650 mS for Doc Wattson
Signal Sampling Rate	???? samples/s	
Data Queue Sequence time	2 seconds	
In Circuit Resistance	0.001 Ohms	
Operation Current	7 mA	
Auxiliary Power Voltage	4.0 V - 60 V	e.g. from a receiver battery
Dimensions	2.8" L x 1.7" W x 0.83" D	
Weight	2.3 oz.	1.7 oz. without case
Display Screen	16 character x 2 row STN LCD	
Nominal Operating Conditions	0° - 50° C ambient temperature, non condensing humidity	Maximum temperature must be reduced at maximum current rating

### 3. SAFETY PRECAUTIONS

**CAUTION:** High power electrical systems pose dangers independent of devices like the Watt's Up and it is the user's responsibility to be familiar with these dangers and take any necessary action to ensure safe use. Shorting a rechargeable battery or a Watt's Up connected to a rechargeable battery or battery charger can supply huge currents and have serious consequences including explosions, causing fire, damage to equipment and personal injury. Please carefully read the entire SAFTY PRECAUTIONS section to ensure safe product use.

#### 3.1 Safe Operation Limitations

The Watt's Up is designed to be safe to use when operated within the parameter limits it was designed for. Typical applications are well within these limits, but it is the user's responsibility to be familiar with the Watt's Up specifications and ensure the unit is operated within its limits.

**Table 3** Safe Operating Limits (Do Not Exceed)

Parameter	Operating Range	Notes
Voltage	0 V - 60 V	
Current	0 - 100 A intermittent 50 A continuous	Assumes device's wires are in free air and attached to connections at or below temperature of 35° C (95° F) with adequate air flow. 100 A operation time depends on ambient temperature and wiring temperature.
Nominal Operating Conditions	0° - 50° C ambient air temperature, non condensing humidity	Maximum temperature must be reduced at maximum current rating

**CAUTION:** Exceeding these limits may permanently damage the Watt's Up and may cause personal injury and may cause fire.

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของบริษัทฯ ห้ามเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 Electrical Connections and Wiring

There are risks associated with the potentially high currents measured by the Watt's Up. These include, but are not limited to, fire, burns and personal injury. The user must be familiar with the relevant methods, procedures and connection components before using or making any connection to the. It is suggested that any connectors and wires chosen for use be appropriately sized and rated for the intended application and attached in the manner recommended by their respective manufacturers.

CAUTION: Poor connections and reckless wire handling in electrical systems may have serious consequences including personal injury, fire and property damage. Intermittent and loose connections can cause component damage!

### 3.3 Powering Up

Verify there are no exposed wires or connectors at risk for a short circuit before connecting a battery or power source to the Watt's Up. The Red "SOURCE" and "LOAD" leads of the Watt's Up are connected to each other and the Black leads are essentially so. This means the "other" side is electrically "hot" when a battery or other power source is connected to either side.

CAUTION: Shorting a rechargeable battery or a Watt's Up connected to a rechargeable battery or battery charger can supply huge currents and have serious consequences including explosions, causing fire, damage to equipment and personal injury.

### 3.4 Limits of Connected Equipment

The Watt's Up may have measurement capabilities, operating ratings and electrical signal handling abilities that exceed those of equipment to which it is connected. This means the Watt's Up may be able to make measurements on a connected component despite that component being operated outside of its safe operating ratings.

CAUTION: It is the user's responsibility to consider the limitations of any equipment connected to the Watt's Up and not to exceed them since the Watt's Up provides no protection for those components. Examples of possible hazards include, without limitation: charging or discharging batteries outside their voltage and current ratings, application of excessive voltage or currents to electronic speed controls (ESC) and motors, application of currents that cause dangerous heating or voltages that present a shock hazard. Other hazards may exist.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4. BASICS OF ELECTRICITY

Understanding the basics of electricity will help you get the most out of your Watt's Up and electric model. With these concepts you can intelligently compare electrical components and conduct experiments to maximize their performance in your electric modeling hobby.

If you are new to electrical propulsion systems you may want to read through this a few times. Experts can skip it.

We use the water and plumbing analogies to teach electrical concepts because people often already have good intuition about water systems.

### 4.1 Charge

It all starts with charge. Charge is the basic unit of electric energy. Using the water analogy, charge is the “amount of water”.

Charge (electrons actually) is what gets stored in a rechargeable battery by a battery charger. Like water gets “stored” in an aquarium by water pump a battery charger stores charge in a battery.

Asking how much charge is in a battery is like asking how much water is in an aquarium.

A physicist will tell you that charge is measured in units of Coulombs (C) like water can be measured in units of gallons. It turns out that Amp-hours (Ah) is also a unit of charge and is more familiar to RC hobbyists. We'll show why later when we discuss current.

$$\text{Charge} = \text{Current} \times \text{Time}.$$

Charge can be measured in Amp-Hours by:

$$\text{Amp-hours} = \text{Average Amps} \times \text{hours of duration}$$

### 4.2 Current

Current is measured as an amount of something flowing per unit of time. With electricity, the “something” flowing in a wire is charge, which is measured in “Coulombs”. A Coulomb per second of electric charge current has a special name. It is called an Ampere (abbreviated Amps or just A). A gallon per second of water flow

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

doesn't have a special name. It's just a gal/s. So 20 Amperes or Amps flowing into a motor means it has a current of 20 Coulombs of charge flowing per second.

Now we can explain why Amp-Hours is a measure of charge.

An hour is  $60 \times 60 = 3600$  seconds. So an Amp-hour (meaning Amps times hours) = Ampere  $\times$  Hour

And substituting the definition of an Ampere and of an hour this becomes = (Coulomb/Second)  $\times$  3600 Seconds which leaves 3600 Coulombs.

Coulombs are charge so there we are -- an Amp-hour (or Ah) is 3600 Coulombs of charge.

It is common in RC modeling to discuss charge in units of mAh. The m is an abbreviation for the Greek "milli" which means "thousandth" of something. So 1 mAh is 1/1000 of an Ah. Conversely, 2 Ah is the same as 2000 mAh.

Here are some examples showing the important relationships between current, time and charge.

#### 1) Charging.

If you pump 1 gal/h of water into an aquarium for five hours it will contain 1 gal/h  $\times$  5 h = 5 gallons. Similarly a battery charging at 1500 mA for one hour will contain 1.5 Amp  $\times$  one hour = 1.5 Ah of charge. Since we learned above that there are 3600 Coulombs per Ah, the physicist would say the battery contains 1.5 Ah  $\times$  3600 C/Ah = 5400 Coulombs of charge. Amp-hr versus C. They are different ways of saying the same thing.

#### 2) Discharging

If you know a battery and an aquarium are both "full" you just read their "capacity" (volume) specification to find the stored "charge." The aquarium says 20 gallons and the battery says 2000 mAh. The aquarium would take 4 hours to empty at a "current" of 5 gal/h and the battery would take 1 hour to empty at a current of 2000 mA.

### 4.3 Voltage

Something forces current to flow in a wire. That something is called voltage and is measured in Volts (abbreviated V). The pressure your hand feels pushing water out of a pipe is the force analogous to voltage. You can't get a current without a voltage. The two are related by the concept of resistance.

#### 4.4 Resistance

Resistance is measured in Ohms (abbreviated with the Greek symbol Omega  $\Omega$ ). It is the property that limits the current, which flows in a wire for a given voltage applied across the wire.

The very important “Ohm’s Law” summarizes this relationship.

$$\text{Amps} = \text{Volts} \div \text{Ohms}$$

It says the amount of current depends on the voltage applied divided by the amount of resistance. Push harder for a given amount of resistance and you get more flow. Reducing the diameter of a water pipe increases its resistance and therefore reduces the water flowing from it for a given pressure (voltage). Similarly doubling the resistance of a wire halves the current flowing through it for a given voltage across it.

A useful thing to remember is that 1 Volt divided by 1 Ohm = 1 Amp. It says that One Amp of current will flow in wire having a resistance of one Ohm if one Volt of voltage is applied across it. So given relatively fixed battery voltages, you need low resistance wires to allow high currents. Resistance is a general term for a rather complex phenomenon. There are different kinds of resistance. For our purposes we will mean Direct Current or DC resistance. Alternating Current or AC resistance is beyond the scope of this tutorial and is not widely discussed in RC electrical systems.

Here’s an example problem using resistance.

How much voltage drop is there to a motor drawing 50 Amps if the motor is one foot from the battery? Assume 14 Ga. wire has a resistance of approximately 0.0025 Ohms per foot. So we have two feet of wire total with 50 Amps flowing through them. Ohms law tells us that to get 50 Amps through a wire of  $2 \times 0.0025$  Ohms requires: Volts = Amps  $\times$  Ohms, =  $50 \times (2 \times 0.0025) = 0.25$  V.

So those wires use up 0.25 V in battery voltage. Our motor would receive 7.15 Volts from a 7.4 Volt battery. Apparently, this motor consumes exactly 50 Amps at exactly 7.15 V.

#### 4.5 Power

Power is measured in units of Watts. A key concept: Power is the rate at which work is done or energy is expended and not the amount of work done. Or:

$$\text{Power} = \text{energy} \div \text{time}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The power being delivered or used (in Watts) is measured by the current (in Amps) multiplied by the voltage (in Volts) of the system being measured. I.E.

$$\text{Watts} = \text{Amps} \times \text{Volts}$$

A battery has a fixed energy capacity or amount of work it can do. The rate at which it does that work or dumps that energy is its power output and that power output can be varied by the time over which the work is done.

For example, the work or energy a battery and motor do to roll an electric car up a 30 foot hill is the same whether it takes a minute or an hour to do so. The power, however, is 60 times greater in the second case!

Using the water analogy, you might fill a 10,000-gallon water tank (representing a fixed amount of work/energy to be done) in two days with a small electric water pump. It would take a pump attached to a “very powerful” V8 gas engine with a supercharger to fill it in five minutes. Both need the same energy, but require very different powers. The difference is the time the effort takes.

#### 4.6 Work/Energy

From a physics point of view, work and energy describe the same thing. The word chosen at a particular time depends on the point of view being emphasized by an author. Hopefully, this will become clear as you read on. People often, incorrectly, mix the concepts of power and energy/work as though they are the same. They are different, but related by time. Understanding the difference is very important toward an understanding of propulsion system performance. Voltage does work to move charge. The battery charger worked to push charge against the battery’s voltage into the battery. That work is stored as charge in the battery. Discharging the battery does work on whatever is using the charge.

This work or energy is measured in Watt-hours by measuring the power (in Watts) expended over some time duration (in hours).

$$\text{Watt-hours} = \text{Watts (averaged)} \times \text{hours}$$

This is how much work the electricity has done. The energy stored in a battery depends on the product of charge and voltage. I.E.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{Energy (Wh)} = \text{voltage (V)} \times \text{charge (Ah)}$$

So while a 7.4 V and 14.8 V battery pack may both have the same charge of 2000 mAh, the 14.8 V pack has twice the energy and capacity to do work.

#### 4.7 Conservation of Energy

This is a very important physics concept that will help you evaluate electric model power systems. Simply stated, conservation of energy means that energy isn't ever lost; rather it has gone someplace "else." Energy has many forms, Heat, Kinetic, Potential and Chemical being the most relevant to RC. Two examples will help.

1) If you discharge a battery pack into light bulbs the energy stored in the battery's chemistry was converted to heat in the battery's chemical reaction the wiring and the light bulb filaments.

2) In an electric motor powered plane, energy from the battery converts to heat energy in wires, connectors, the electronic components in the Electronic Speed Control, the wires in the motor armature, the brushes, the motor bearings and lubricant and the air the prop and plane fly through AND to potential energy that has been stored by the height the plane's mass is above the ground AND to kinetic energy stored in the speed of the plane's mass.

If you measured all the heat generated and other stored energies, it would equal that previously stored in the battery. That's the conservation.

Inefficiency in a process like this means some energy went someplace you didn't want it to like the wires, bearings, ESC and brushes. You wanted it all delivered to the prop. In battery charging, energy from the charger is delivered as a current into a battery where it is converted to a charge stored in the battery's chemistry. In a perfect rechargeable battery no energy would go anyplace else. In reality it does, like to heat, so battery charging is not 100 % efficient.

What you can learn from all of this is that your options for an electric powered model's capabilities must consider all the places energy will be used. Learning some basic things about potential and kinetic energy as well as Newton's second Law of motion in a simple physics text book will give you powerful tools to evaluate an electric model capabilities.

#### 4.8 About Units

Small amounts of current and voltage are usually measured in milliamps or millivolts where "milli" is a Greek abbreviation meaning "one thousandth of." For

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

example, 10 mA means ten – one thousandths of one Amp, which is written as 0.01 Amps. 1000 mA is another way to write 1 A. Similarly, 0.001 V is one thousandth of one volt. Milli is a widely used prefix. E.g. 3000 mAh is another way to write a charge of 3 Ah.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## 28-Pin SDIP and SOIC

MCLR	1	28	AVDD
EMUD3/AN0/VREF+/CN2/RB0	2	27	AVSS
EMUC3/AN1/VREF-/CN3/RB1	3	26	PWM1L/RE0
AN2/SS1/LVDIN/CN4/RB2	4	25	PWM1H/RE1
AN3/INDX/CN5/RB3	5	24	PWM2L/RE2
AN4/QEA/IC7/CN6/RB4	6	23	PWM2H/RE3
AN5/QEB/IC8/CN7/RB5	7	22	PWM3L/RE4
VSS	8	21	PWM3H/RE5
OSC1/CLKI	9	20	VDD
OSC2/CLKO/RC15	10	19	VSS
EMUD1/SOSCI/T2CK/U1ATX/CN1/RC13	11	18	PGC/EMUC/U1RX/SDI1/SDA/RF2
EMUC1/SOSCO/T1CK/U1ARX/CN0/RC14	12	17	PGD/EMUD/U1TX/SDO1/SCL/RF3
VDD	13	16	FLTA/INT0/SCK1/OCFA/RE8
EMUD2/OC2/IC2/INT2/RD1	14	15	EMUC2/OC1/IC1/INT1/RD0

ภาพที่ 2 การจัดขาใช้งานของไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC30F2010

## 1. คุณสมบัติของชิพ

- มี 84 คำสั่งมาตรฐาน สามารถรองรับรูปแบบการอ้างแอดเดรสได้อย่างอิสระ
- ชุดคำสั่งมีขนาด 24 บิต สามารถประมวลผลข้อมูลได้ 16 บิต
- มีหน่วยความจำโปรแกรมแบบแฟลช ความจุ 12 กิโลไบต์ ลบและเขียนใหม่ได้ไม่น้อยกว่า 100,000 ครั้ง สามารถป้องกันการอ่านได้
- สามารถโปรแกรมหน่วยความจำโปรแกรมได้ด้วยตัวเอง โดยใช้กระบวนการทางซอฟต์แวร์
- มีหน่วยความจำข้อมูลอีพรอม 1 กิโลไบต์ ลบและเขียนใหม่ได้ไม่น้อยกว่า 1,000,000 ครั้ง
- มีหน่วยความจำข้อมูลแรม 512 ไบต์
- รีจิสเตอร์ W จัดในรูปของอะเรย์ มีขนาด 16 บิต จำนวน 16 ตัว
- ความเร็วในการทำงานสูงถึง 30 ล้านคำสั่งต่อวินาที
- ความถี่สัญญาณนาฬิกาจากภายนอก ตั้งแต่ย่านไฟตรงจนถึง 40 MHz
- ความถี่สัญญาณนาฬิกาในกรณีใช้งานร่วมกับวงจรเฟสล็อกภายใน ตั้งแต่ 4 MHz ถึง 10 MHz เลือกได้ 3 ระดับ คือ 4, 8 หรือ 16 เท่า
- รองรับแหล่งกำเนิดสัญญาณอินเทอร์รัปต์ได้สูงสุด 62 แหล่ง รวมทั้งการอินเทอร์รัปต์จากภายนอก 3 แหล่ง
- สามารถกำหนดระดับความสำคัญในการตอบสนองอินเทอร์รัปต์ได้ 8 ระดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- มีอินเทอร์พิร์ตเวกเตอร์ 48 ตำแหน่ง
- มีวงจรตรวจจับแรงดันไฟเลี้ยงต่ำกว่ากำหนดแบบโปรแกรมได้
- มีเพาเวอร์-อนรีเซต, เพาเวอร์-อัปเดตไทมเมอร์ และออสซิลเลเตอร์สตาร์ท-อัปเดตไทมเมอร์
- มีวอตช์ด็อกไทมเมอร์แบบโปรแกรมได้
- มีวงจรตรวจสอบการทำงานของวงจรถ้าเกิดสัญญาณนาฬิกา หากผิดพลาดจะเข้าสู่โหมดสัญญาณนาฬิกา RC พลังงานต่ำทันที
- รองรับการโปรแกรมในวงจรแบบอนุกรม (ICSP : In-Circuit Serial Programming)
- สามารถเลือกโหมดการใช้พลังงานได้
- ย่านไฟเลี้ยง 2.5 ถึง 5.5V กระแสไฟฟ้า 2.6 ถึง 44mA ที่ไฟเลี้ยง +5V ขึ้นอยู่กับการกำหนดความเร็วในการทำงาน

## 2. คุณสมบัติด้านการประมวลผลสัญญาณดิจิทัล

- มีแอดคิวิตยูมัลเตอร์ขนาด 40 บิต 2 ตัว รองรับการประมวลผลทางคณิตศาสตร์ได้เป็นอย่างดี
- มีหน่วยประมวลผลด้านการคูณและการหารเลข 17 บิตในรูปของฮาร์ดแวร์ จึงทำให้สามารถทำการคูณและการหารเลขได้อย่างรวดเร็ว
- ทำการคูณเลข 16 บิตได้ภายในสัญญาณนาฬิกาเพียง 1 ไซเคิล
- มีตัวเลื่อนข้อมูลบาร์เรล 40 สเตจ ช่วยให้ประมวลผลข้อมูลที่จำนวนบิตมากๆ ทำได้รวดเร็ว
- มีวงจรเฟตช์ข้อมูลคู่ จึงทำให้สามารถประมวลผลข้อมูลได้อย่างรวดเร็ว

## 3. คุณสมบัติของโมดูลฟังก์ชันพิเศษ

- สามารถจ่ายกระแสออกทางขาพอร์ตได้ 25 mA ทั้งแบบกระแสซิงก์และซอร์ส
- ไทมเมอร์/เคาน์เตอร์ 16 บิต 3 ตัว สามารถต่อใช้งานร่วมกันเป็นไทมเมอร์/เคาน์เตอร์ 32 บิตได้
- มีโมดูลตรวจจับสัญญาณดิจิทัลขนาด 16 บิต 4 ชุด
- มีโมดูลเปรียบเทียบข้อมูลและกำเนิดสัญญาณ PWM ความละเอียด 16 บิต 2 ชุด  
-ในการเปรียบเทียบข้อมูลสามารถเลือกการทำงานได้ 2 โหมด
- มีส่วนเชื่อมต่ออุปกรณ์อนุกรมแบบSPI

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- มีส่วนเชื่อมต่ออุปกรณ์ผ่านระบบบัส I2C ทั้งแบบ 7 และ 10 บิต กำหนดเป็นมาสเตอร์หรือสลาฟได้
- มีโมดูลสื่อสารข้อมูลอนุกรม UART พร้อมบัฟเฟอร์แบบ FIFO
- มีโมดูลสร้างสัญญาณ PWM สำหรับควบคุมมอเตอร์ 6 ช่อง
  - เลือกรูปแบบเอาต์พุตได้ทั้งแบบคอมพลีเมนต์และแบบอิสระ
  - มีโหมดปรับตำแหน่งการหมุนทั้งแบบปรับขอบสัญญาณและแบบกึ่งกลาง
  - มีส่วนกำเนิดดิวิตีไซเคิล 4 ชุด
  - กำหนดฐานเวลาได้ 4 โหมด
  - สามารถเลือกขั้วของสัญญาณทางเอาต์พุตได้
  - มีสัญญาณกระตุ้นเพื่อให้ทำงานสัมพันธ์กับวงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอลภายในไมโครคอนโทรลเลอร์
  - สามารถควบคุมสัญญาณเอาต์พุตได้
- มีโมดูลเชื่อมต่อตัวเข้ารหัสแบบควอดราเจอร์
  - มีอินพุต Phase A, Phase B และรับสัญญาณพัลส์เพื่อกำหนดตำแหน่ง
  - มีตัวนับตำแหน่งขนาด 16 บิต นับได้ทั้งขึ้นและลง
  - แสดงสถานะของทิศทางการนับได้
  - กำหนดโหมดของการวัดตำแหน่งได้ 2 โหมดคือ x2 และ x4
  - มีวงจรกรองสัญญาณรบกวนแบบดิจิตอลจากอินพุตแบบโปรแกรมได้
  - สำหรับกำหนดให้ทำงานเป็นไทเมอร์/เคาท์เตอร์ขนาด 16 บิตได้
  - กำเนิดสัญญาณอินเตอร์รัปต์จากตำแหน่งที่นับเกิน (rollover) หรือนับขาด (underflow)
- มีวงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล ความละเอียด 10 บิต 6 ช่อง
  - อัตราการสุ่มและแปลงสัญญาณ 500 กิโลแซมเปิลต่อวินาที
  - สามารถแปลงสัญญาณเมื่อไมโครคอนโทรลเลอร์ทำงานในโหมดสลิปและโอเดิลได้

#### 4. สถาปัตยกรรมโดยสรุปของ dsPIC30F2010

##### 4.1 หน่วยประมวลผลกลาง

หน่วยประมวลผลของ dsPIC30F2010 ใช้คำสั่งที่ความยาว 1 เวิร์ด ขนาด 24 บิต โดยมีโปรแกรมเคาน์เตอร์ขนาด 23 บิต (จริงๆ แล้วโดยโครงสร้างมี 24 บิต แต่ไม่สนใจบิต MSB ซึ่งก็คือบิต 23 และบิต LSB หรือบิต 0 กำหนดเป็น "0" จึงทำให้สามารถติดต่อกับหน่วยความจำโปรแกรมได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูงสุด 4 เมกะเวิร์ด) เพื่อแอตแอดเดรสของหน่วยความจำโปรแกรมที่เข้าไปประมวลผล dsPIC30F2010 มีความจุของหน่วยความจำโปรแกรม 12 กิโลไบต์ เมื่อคำสั่งมีความยาว 24 บิต จึงบรรจุคำสั่งได้จริง 4 กิโลเวิร์ด

รีจิสเตอร์หลักที่ใช้ในการทำงานคือ รีจิสเตอร์ W (Working register) สำหรับใน dsPIC จะแตกต่างจากไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC อย่างมากโดยรีจิสเตอร์ W ได้รับการจัดโครงสร้างเป็นอาเรย์ขนาด 16 บิต จึงทำให้สามารถรองรับทั้งข้อมูล, ค่าแอดเดรส หรือค่าของรีจิสเตอร์ใดๆ ที่ต้องนำมาประมวลผลโดยใน dsPIC มีรีจิสเตอร์ W ให้ใช้งานถึง 16 ตัว ส่วนใหญ่ใช้ในการประมวลผลหลัก ส่วนอีกตัวหนึ่งก็คือ รีจิสเตอร์ W15 จะใช้ทำงานร่วมกับตัวชี้สแต็กในการทำงานของโปรแกรมย่อยและบริการอินเตอร์รัปต์

ด้านการตอบสนองอินเตอร์รัปต์นั้น dsPIC30F2010 มีการจัดสรรพื้นที่เก็บค่าอินเตอร์รัปต์เวกเตอร์ไว้มากถึง 54 ตำแหน่ง และยังสามารถกำหนดระดับความสำคัญได้อีก 8 ระดับ อีกด้วย

#### 4.2 หน่วยความจำ

dsPIC30F2010 มีหน่วยความจำโปรแกรม 4 กิโลเวิร์ด แอดเดรสอยู่ในช่วง 0x000100 ถึง 0x001FFE สามารถโปรแกรมหรือเขียนข้อมูลลงไปได้ 2 วิธี คือ

1. โดยการใช้การโปรแกรมในวงจรแบบอนุกรมหรือ ICSP ผ่านทางขา PGD และ PGC (ขาที่ 17 และ 18) แล้วป้อนสัญญาณพัลส์แรงดันสูงสำหรับโปรแกรมผ่านเข้ามาทางขา MCLR
2. โปรแกรมตัวเองในขณะที่ทำงานหรือ RTSP (Run Time Self-Programming)

ส่วนหน่วยความจำข้อมูลแรมนั้น dsPIC30F2010 ได้จัดสรรเป็น 2 ส่วนคือ หน่วยความจำข้อมูลแรม X และ Y แต่ละส่วนมีขนาด 16 บิต ความจุ 256 ไบต์ รวมเป็น 512 ไบต์ โดยในแต่ละส่วนจะมีตัวกำหนดแอดเดรสแยกออกจากกัน เรียกว่า AGU (Address Generation Unit)

ในขณะที่หน่วยความจำข้อมูลอ็ีพรอม dsPIC30F2010 จัดสรรไว้ที่แอดเดรส 0x7FFC00 ถึง 0x7FFFFE มีความจุ 1 กิโลไบต์

#### 4.3 ส่วนประมวลผลสัญญาณดิจิตอล (DSP Engine)

นับเป็นส่วนประกอบที่สำคัญอย่างยิ่งของ dsPIC เนื่องจาก dsPIC ได้รับการออกแบบมาให้ทำงานในด้านารประมวลผลสัญญาณดิจิตอลเป็นหลัก ดังนั้นจึงต้องมีการเพิ่มความสามารถในหน่วยคำนวณทางคณิตศาสตร์และลอจิกอย่างมาก โดยในส่วนประมวลผลสัญญาณดิจิตอลมีหน่วยจัดการคูณเลขขนาด 17x17 บิตความเร็วสูง, หน่วยประมวลผลทางคณิตศาสตร์และลอจิกหรือ ALU ขนาด 40 บิต อีก 2 ตัว และตัวเลื่อนข้อมูล 2 ทิศทางแบบบาเรล (barrel shifter) ขนาด 40 บิต จึงทำให้สามารถจัดการข้อมูลขนาด 16 บิต ได้เสร็จสิ้นภายในสัญญาณนาฬิกาเพียงไซเคิลเดียว

#### 4.4 โมดูลฟังก์ชันพิเศษ

dsPIC30F2010 ได้รวมเอาโมดูลสำหรับทำงานเฉพาะทางไว้อย่างมากมาย ไม่ว่าจะเป็นโมดูลแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นดิจิตอล ความละเอียด 10 บิต, โมดูลเชื่อมต่ออุปกรณ์อนุกรมหรือ

SPI, โมดูลสื่อสารข้อมูลบนระบบบัส I2C, โมดูลสื่อสารข้อมูลผ่านพอร์ตอนุกรมหรือ UART, ไทเมอร์ ขนาด 16 บิตถึง 3 ตัว และที่เป็นพิเศษอีก 2 โมดูลคือ โมดูลสร้างสัญญาณ PWM เพื่อการควบคุม มอเตอร์และโมดูลเข้ารหัสแบบควอดราเจอร์ โดยสามารถใช้งานร่วมกันเพื่อสร้างระบบควบคุม มอเตอร์แบบปิดประสิทธิภาพสูง

#### 4.5 พอร์ตอินพุตเอาต์พุต

dsPIC30F2010 มีพอร์ตให้ใช้งานมากถึง 5 พอร์ต รวม 40 ขา ดังนี้

พอร์ต B มี 9 ขา คือ RB0-RB8

พอร์ต C มี 2 ขา คือ RC13-RC14

พอร์ต D มี 3 ขา คือ RD0-RD3

พอร์ต E มี 7 ขา คือ RE0-RE5,RE8

พอร์ต F มี 7 ขา คือ RF0-RF6

### 5. โครงสร้างทางโปรแกรมที่ควรทราบ

ในภาพที่ 3 แสดงโครงสร้างทางโปรแกรมหรือ Programmer's model ของ dsPIC ที่ นักพัฒนาต้องทราบ ซึ่งประกอบไปด้วย

- (ก) รีจิสเตอร์ W ขนาด 16 บิตมากถึง 16 ตัว โดยตัวที่ใช้งานเป็นหลักคือ W0 ส่วนตัวที่ถูก นำไปใช้ในส่วนประมวลผลสัญญาณดิจิทัลมี 10 ตัว คือ W4-W13 ส่วน W14 ถูก นำไปใช้ร่วมเป็นตัวชี้เฟรม และ W15 ถูกนำไปใช้ร่วมเป็นตัวชี้สแต็ก
- (ข) แอควิวมูลเตอร์ 40 บิต จำนวน 2 ตัว ใช้ในงานประมวลผลสัญญาณดิจิทัลเป็นหลัก
- (ค) โปรแกรมเคาน์เตอร์ ขนาด 24 บิต นำมาใช้ในการแจ้งแอดเดรส 24 บิต โดยไม่สนใจ บิต MSB และบิต LSB ต้องเป็น "0"
- (ง) รีจิสเตอร์หลัก อันประกอบไปด้วย

STATUS ซึ่งใช้แสดงสถานการณ์ทำงาน มีขนาด 16 บิต

CORCON ใช้ควบคุมการทำงานของหน่วยประมวลผลกลาง มีขนาด 16 บิต

TBLPAG เป็นรีจิสเตอร์กำหนดเพจของตารางข้อมูลในหน่วยความจำโปรแกรมมี ขนาด 8 บิต

PAVPAG เป็นรีจิสเตอร์แสดงแอดเดรสของพื้นที่โปรแกรม มีขนาด 8 บิต

RCOUNT เป็นรีจิสเตอร์เก็บค่าตัวนับจำนวนรอบของลูปที่ทำซ้ำ

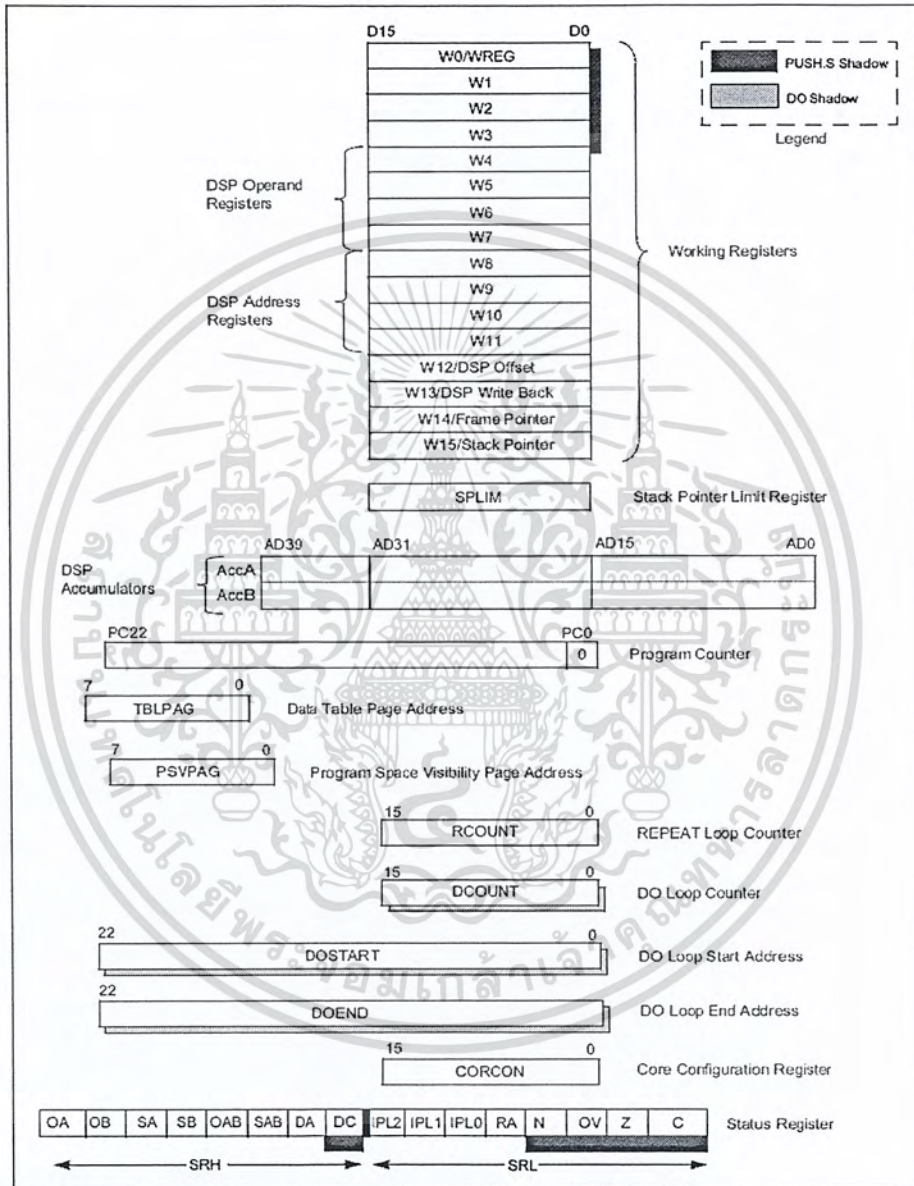
DCOUNT เป็นรีจิสเตอร์เก็บค่าตัวนับจำนวนรอบของลูปที่ทำงาน

DOSTART เป็นรีจิสเตอร์กำหนดแอดเดรสเริ่มต้นทำงานของโปรแกรมลูป

DOEND เป็นรีจิสเตอร์กำหนดแอดเดรสปลายทางที่ต้องการทำโปรแกรมลูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับรีจิสเตอร์ DCOUNT, DOSTART และ DOEND เป็นรีจิสเตอร์เงา (shadow register) หมายความว่า เป็นรีจิสเตอร์ที่ถูกสร้างขึ้นชั่วคราวเพื่อเก็บค่าก่อนที่จะมีการถ่ายทอออกไปทำงาน จึงไม่สามารถเข้าถึงรีจิสเตอร์เหล่านี้ได้โดยตรง



ภาพที่ 3 โครงสร้างทางโปรแกรม (Program's model)ของไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC

### 5.1 สแต็กพอยน์เตอร์และเฟรมพอยน์เตอร์ทางซอฟต์แวร์

ใน dsPIC ได้บรรจุสแต็กทางซอฟต์แวร์ขึ้นมา โดยใช้รีจิสเตอร์ W15 เป็นตัวชี้ตำแหน่งของสแต็กหรือสแต็กพอยน์เตอร์ (software stack pointer) ซึ่งค่าของ W15 จะเปลี่ยนแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตโนมัติตามการกระโดดไปทำงานหรือออกจากโปรแกรมย่อย อย่างไรก็ตาม ก็ยังสามารถใช้งาน W15 เหมือนกับรีจิสเตอร์ W ตัวหนึ่งได้ด้วย แต่ถ้าไม่จำเป็นจริงๆ แนะนำให้ส่งวนรีจิสเตอร์ W15 นี้ไว้เพื่อทำหน้าที่เป็นตัวชี้สแต็กหรือสแต็กพอยน์เตอร์จะเหมาะสมกว่า

W15 จะมีค่าเท่ากับ 0x0800 หลังจากการรีเซต ผู้พัฒนาสามารถกำหนดค่าใหม่ได้ตามต้องการภายในขอบเขตของหน่วยความจำข้อมูล

นอกจากนั้นใน dsPIC ยังมีตัวชี้กรอบหรือขอบเขตของสแต็กหรือเรียกว่า เฟรมพอยน์เตอร์ (software frame pointer) ด้วย โดยใช้รีจิสเตอร์ W14 ทำหน้าที่นี้ โดยการกำหนดค่าของ W14 สามารถกระทำผ่านคำสั่ง LNK และ ULNK (คำสั่งภาษาแอสเซมบลี) เช่นเดียวกันก็ยังสามารถใช้งาน W14 นี้ไว้เพื่อทำหน้าที่เป็นเฟรมพอยน์เตอร์จะเหมาะสมกว่า

## 5.2 รีจิสเตอร์ STATUS

ใน dsPIC รีจิสเตอร์ตัวนี้มีความสำคัญมาก เพราะใช้ในการแสดงสถานะการทำงานของ ซีพียู โดยรีจิสเตอร์ STATUS(SR) มีขนาด 16 บิต แบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ SRH (บิต 8 ถึง 15) และ SRL(บิต 0 ถึง 7)

โดยใน SRH บรรจุกฎสถานะการนับวงและลบค่าของข้อมูลในส่วนประมวลผลสัญญาณดิจิทัลเป็นหลักที่ 6 บิตบน ส่วนบิต DA ใช้แสดงสถานะการทำงานของกระบวนกรวนทำงานหรือทำลูป (DO loop active) สุดท้ายเป็นบิตเฟล็กแสดงการทดข้ามหลักหรือ Digit Carry (DC)

ส่วน SRL บรรจุกฎสถานะการทำงานของหน่วยประมวลผลทางคณิตศาสตร์และลอจิกหรือ ALU โดยแสดงในรูปของแฟล็ก (flag) ที่บิต C (เกิดการทด), Z(ค่าเป็นศูนย์), OV (ค่าเกิน), N (เกิดค่าลบ) นอกจากนี้ยังเก็บค่าของการจัดลำดับความสำคัญของการตอบสนองอินเทอร์รัปต์ไว้ที่บิต IPL0-IPL2 สุดท้ายมีบิตแสดงสถานะการทำงานของกระบวนกรวน REPEAT ซึ่งแสดงที่บิต RA

## 5.3 CORCON รีจิสเตอร์ควบคุมการทำงานของหน่วยประมวลผลกลาง

เป็นรีจิสเตอร์ขนาด 16 บิตที่บรรจุบิตที่ควบคุมการทำงานของหน่วยประมวลผลสัญญาณดิจิทัลและส่วนทำงานโปรแกรมลูปทางฮาร์ดแวร์ นอกจากนี้ยังบรรจุบิตข้อมูลที่ทำงานร่วมกับการอินเทอร์รัปต์

## 5.4 รีจิสเตอร์ควบคุมเพิ่มเติมที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของหน่วยประมวลผลกลางของ dsPIC

ประกอบด้วย

(1) MODCON (Modulo Control Register) : เป็นรีจิสเตอร์ที่ใช้เอ็นเอเบิลและกำหนดการเข้าถึงหน่วยความจำข้อมูลแบบโมดูล (modulo)

(2) XMODSRT และ XMODEND (X Modulo Start Address Register และ X Modulo End Address Register) : เป็นรีจิสเตอร์ใช้เก็บค่าแอดเดรสตั้งต้น (XMODSRT) และปลายทาง (XMODEND) ของหน่วยความจำข้อมูล Y ที่ใช้การเข้าถึงแบบโมดูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(3) YMODSRT และ YMODEND (Y Modulo Start Address Register และ Y Modulo End Address Register) : เป็นรีจิสเตอร์ที่ใช้เก็บค่าแอดเดรสตั้งต้น (YMODSRT) และปลายทาง (YMODEND) ของหน่วยความจำข้อมูล Y ที่ใช้การเข้าถึงแบบโมดูล

(4) XBREV (X Modulo Bit-Reverse Register) : เป็นรีจิสเตอร์ที่ใช้กำหนดขนาดของ บัฟเฟอร์หรือหน่วยความจำข้อมูลชั่วคราวเพื่อใช้ในการเข้าถึงหน่วยความจำข้อมูลแบบกลับบิต

(5) DISICNT (Disable Interrupts Count Register) : เป็นรีจิสเตอร์ที่ถูกใช้ในการทำงานของคำสั่ง DISI เพื่อติสเอเบิลการอินเตอร์รัปต์ที่มีระดับความสำคัญในระดับ 1 ถึง 6

## 6. JX-dsPIC40

40-pin dsPIC microcontroller Project board

บอร์ดพัฒนาโครงการสำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC รุ่น 40 ขา

### 6.1 คุณสมบัติทางเทคนิค

- ใช้ได้กับไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC ตัวถึง DIP 40 ขา บนบอร์ดใช้เบอร์ dsPIC30F2010
- ทำการโปรแกรมและดีบั๊กได้ด้วย ICDX-30 หรือ ICD2 ของ Microchip (จัดซื้อแยก)
- เลือกโหมดการโปรแกรมและรันด้วยสวิตช์กดเพียงตัวเดียว พร้อมไฟแสดงสถานะ
- มีจุดต่อขาพอร์ตสำหรับทดลองและใช้งาน 5 พอร์ตคือ
 

RB0-RB8 9 ขา	RC13-RC14 2 ขา	RD0-RD3 4 ขา
RE0-RE5, RE8 7 ขา	RF0-RF6 7 ขา	
- มีภาคจ่ายไฟ +5V 800 mA บนบอร์ด มีสวิตช์ RESET สำหรับรีเซ็ตการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์
- จุดต่อโมดูล LCD โดยต่อขา D4-D7 กับพอร์ต RD0-RD3, ขา RS ต่อกับพอร์ต RF และขา E ต่อกับพอร์ต RF1
- วงจรเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ผ่านพอร์ตอนุกรม RS-232 จำนวน 2 ชุด
  - UART1 ต่อกับพอร์ต RC13และRC14 เลือกด้วยจัมป์เปอร์
  - UART2 ต่อกับพอร์ต RF4และRF5 เลือกด้วยจัมป์เปอร์
- LED แสดงผลพร้อมตัวต้านทานจำกัดกระแส ทำงานที่ลอจิก "1" 4 ช่อง - ลำโพง เปียโซ
- สวิตช์กดติดปลายนิ้ว 4 ช่อง พร้อมตัวต้านทานพูลอัป
- เทอร์มินอลบล็อก 4 ช่องสำหรับต่อกับโมดูล QEI (Quadrature Encoder Input)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- วงจรจ่ายแรงดัน 0-5V สำหรับทดลอง A/D ผ่านตัวต้านทานปรับค่าได้
- พื้นที่สำหรับสร้างวงจรหรือ Proto area 3X2.5 นิ้ว จุดบัดกรี 170 จุด สามารถติดตั้งแผงต่อวงจรขนาดกลางได้
- ใช้ไฟเลี้ยงจากภายนอกผ่านแจ๊คอะแดปเตอร์หรือเทอร์มินอลบล็อก +9V ถึง +16V

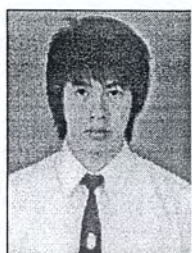
## 6.2 ICDX-30

บอร์ดดีบั๊กเกอร์และโปรแกรมในวงจรสำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC และ dsPIC มีคุณสมบัติทางเทคนิคมีดังนี้

- เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ทางพอร์ตอนุกรม RS-232
- ดีบั๊กเพื่อตรวจสอบการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC แบบเฟลช และ dsPIC ได้
- ใช้เป็นเครื่องโปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC แบบเฟลช และ dsPIC ได้
- ใช้งานร่วมกับ MPLAB IDE V6.2 ขึ้นไป
- มีฟังก์ชันทั้งหมดที่ต้องใช้ในการดีบั๊ก ไม่ว่าจะเป็นการกำหนดจุดหยุดการตรวจสอบหรือ break point การรันโปรแกรมแบบ Single step หรือแบบเต็ม พร้อมทั้งแสดงผลการทำงานด้วย
- สามารถอัปเดตเพื่อเพิ่มเบอร์ของไมโครคอนโทรลเลอร์ได้ด้วยตนเองผ่านทางคอมพิวเตอร์
- มี LED แสดงผลการทำงาน POWER (แสดงการจ่ายไฟเลี้ยง) BUSY (แจ้งความพร้อมในการทำงาน) และ ERROR (แจ้งสถานะความผิดพลาด)
- สามารถอ่านและเขียนข้อมูลในหน่วยความจำข้อมูลอีอีพรอมภายในไมโครคอนโทรลเลอร์ได้
- สามารถโปรแกรมบิตกำหนดการทำงานทางฮาร์ดแวร์หรือ configuration bit ได้
- ใช้ไฟเลี้ยงจากภายนอก +9 ถึง +16V
- ใช้แจ๊คแบบโมดูลาร์ 6 ขา (modular jack) สำหรับต่อสายสัญญาณเพื่อติดต่อกับบอร์ดเป้าหมาย (target board) โดยมีการจัดขาตรงกับแจ๊ค ICD ของ ICD2 ของ Microchip
- ใช้งานได้กับไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC แบบเฟลช (อนุกรม PIC12F/16F/18F) และ dsPIC ทุกเบอร์ที่รองรับการดีบั๊กในวงจรและการโปรแกรมแบบ ICSP และสามารถเพิ่มเติมได้ในอนาคต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน



นายสรวุฒิ Wachchayachetumkul

เกิดวันที่ 8 กันยายน 2531 ภูมิลำเนาอยู่ จ.ประจวบคีรีขันธ์

ศึกษาในระดับมัธยมศึกษาที่โรงเรียนสารสิทธิ์พิทยาลัย

ศึกษาในระดับปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

โดยสนใจงานวิจัย อิเล็กทรอนิกส์กำลัง



นายสิทธิพงษ์ แก้วพวง

เกิดวันที่ 2 สิงหาคม 2531 ภูมิลำเนาอยู่ จ.ศรีสะเกษ

ศึกษาในระดับมัธยมศึกษาที่โรงเรียนกันทรารมณี

ศึกษาในระดับปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

โดยสนใจงานวิจัย อิเล็กทรอนิกส์กำลัง



นายสิริชัย ศิริชัย

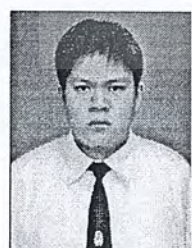
เกิดวันที่ 9 กรกฎาคม 2531 ภูมิลำเนาอยู่ จ.กรุงเทพฯ

ศึกษาในระดับมัธยมศึกษาที่โรงเรียนพรตพิทยพยัต

ศึกษาในระดับปริญญาตรีภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

โดยสนใจงานวิจัย อิเล็กทรอนิกส์กำลัง



นายสุขุม บุตรสวัสดิ์

เกิดวันที่ 27 ธันวาคม 2531 ภูมิลำเนาอยู่ จ.กรุงเทพฯ

ศึกษาในระดับมัธยมศึกษาที่โรงเรียนเตรียมอุดมศึกษาพัฒนาการ

ศึกษาในระดับปริญญาตรีภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

โดยสนใจงานวิจัย อิเล็กทรอนิกส์กำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้