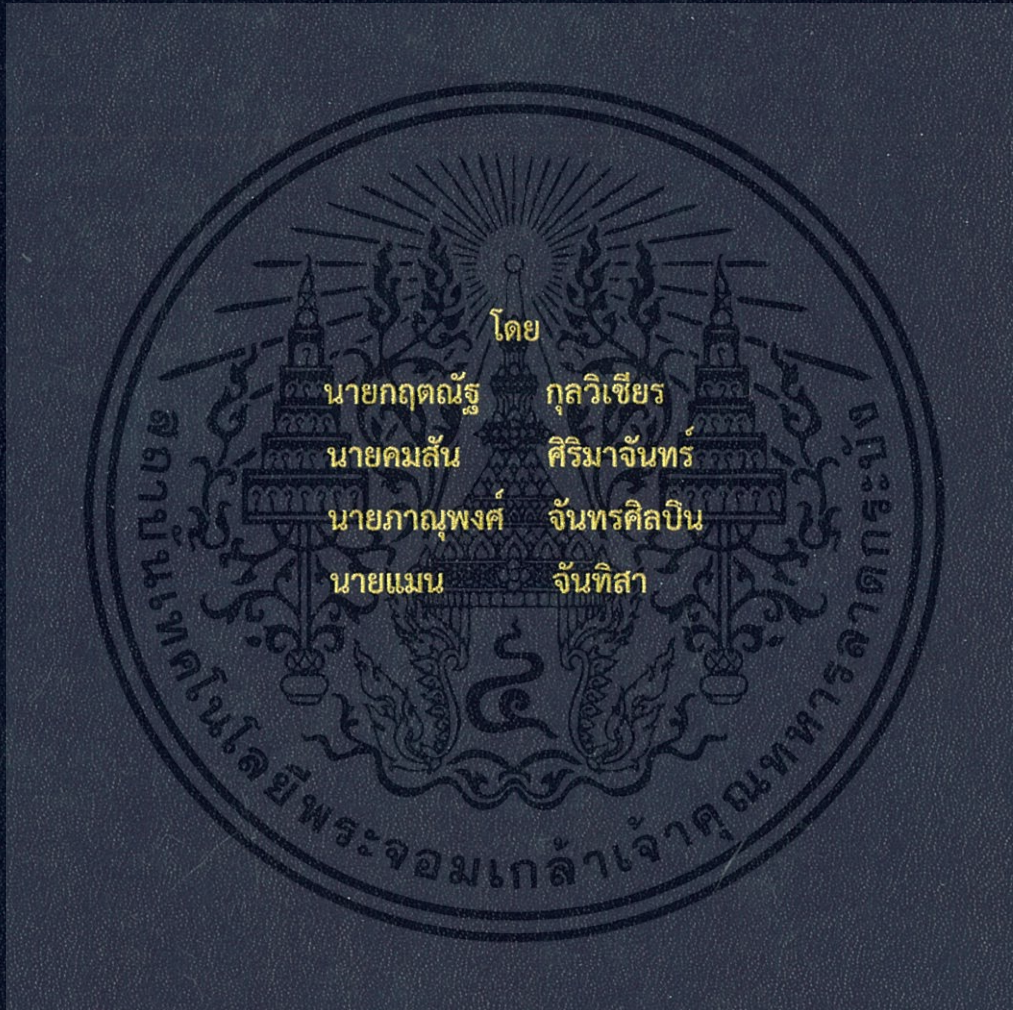


การทดสอบสมรรถนะทางไฟฟ้าสำหรับรถจักรยานไฟฟ้า
ELECTRIC PERFORMANCE TEST FOR ELECTRIC BICYCLE



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

การทดสอบสมรรถนะทางไฟฟ้าสำหรับรถจักรยานไฟฟ้า
ELECTRIC PERFORMANCE TEST FOR ELECTRIC BICYCLE



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ELECTRIC PERFORMANCE TEST FOR ELECTRIC BICYCLE



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

2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2559

การทดสอบสมรรถนะทางไฟฟ้าสำหรับรถจักรยานไฟฟ้า

ELECTRIC PERFORMANCE TEST FOR ELECTRIC BICYCLE



อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ. พิชิต

ลำยอง

ดร. เปี่ยมภูมิ

สฤกพฤกษ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2559

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การทดสอบสมรรถนะทางไฟฟ้าสำหรับรถจักรยานไฟฟ้า


ผู้จัดทำ

1. นายกฤตณัฐ กุลวิเชียร รหัสประจำตัว 56010019
2. นายคมสัน ศิริมาจันทร์ รหัสประจำตัว 56010129
3. นายภาณุพงศ์ จันทรศิลป์ รหัสประจำตัว 56010925
4. นายแมน จันทิสา รหัสประจำตัว 56010984



อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์ พิชิต ลำยอง)

 อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(ดร. เปี่ยมภูมิ สฤกพฤกษ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบสมรรถนะทางไฟฟ้าสำหรับรถจักรยานไฟฟ้า

นายกฤตณัฐ	กุลวิเชียร	
นายคมสัน	ศิริมาจันทร์	
นายภาณุพงศ์	จันทร์ศิลป์	
นายแมน	จันทิสา	
รศ. พิชิต	ลำยอง	อาจารย์ที่ปรึกษา
ดร. เปี่ยมภูมิ	สฤกพฤกษ์	อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
ปีการศึกษา	2559	

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์เรื่อง การทดสอบสมรรถนะทางไฟฟ้าของจักรยานไฟฟ้า เป็นการนำเสนอการทดสอบอุปกรณ์ทางไฟฟ้าของจักรยาน 2 ส่วน ได้แก่ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านที่มีพิกัด 1,000 W จำนวน 2 เครื่อง และแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนพิกัด 48V 12Ah จำนวน 2 ชุด โดยที่ในการทดสอบจะใช้จักรยาน 2 รูปแบบคือ จักรยานทั่วไปแบบสองล้อ และจักรยานแบบสามล้อสำหรับบรรทุกของ ในการทดสอบวัดค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของจักรยานไฟฟ้านั้นได้ทำการเก็บข้อมูลต่าง ๆ ของมอเตอร์ 2 สถานการณ์ที่ต่างกัน ได้แก่ ขณะใช้งาน ณ เส้นทางทดสอบ และบนแท่นทดสอบ โดยผลการทดสอบได้ว่า ที่ความเร็ว 20 km/h ภาระทางกล 300 kg กำลังไฟฟ้าของมอเตอร์ที่ใช้มีค่า 313.13 W ในส่วนของแบตเตอรี่ ได้ทดสอบเรื่องการคายประจุของแบตเตอรี่ โดยหาช่วงเวลา end of discharge ของแบตเตอรี่ได้เป็นช่วงแรงดันเหลือ 80% ของแรงดันเริ่มต้น ซึ่งช่วงเวลานั้นแบตเตอรี่จะทำการคายประจุอย่างรวดเร็ว และหมดไปในที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ELECTRIC PERFORMANCE TEST FOR ELECTRIC BICYCLE

Mr.Krittanat	Kulvicien	
Mr.Komsan	Sirimachan	
Mr.Panupong	Chandrasilpin	
Mr.Man	Juntisa	
Assoc.Prof.Pichit	Lumyong	Advisor
Dr.Piampoom	Sarikprueck	Co-advisor

Abstract

This project presents electric performance test for electric bicycle including 1,000W Brushless DC motor and 48V 12Ah Li-on Battery. Two types of electric bicycle consisting of general 2-wheels electric bicycle and carriage electric tricycle are tested. The motor is tested for obtaining electrical parameters by riding electric bicycle's motor in an actual condition and the testing stand. The result shows that at 20 km/h, 300 kg mechanical load electrical power of motor is 313.13 W. In addition, the discharge capacity is tested to evaluate the performance of battery. End of discharge of the battery is 80% of initial voltage and the battery voltage will drop quickly at this point.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการทดสอบสมรรถนะทางไฟฟ้าของรถจักรยานไฟฟ้า ประสบความสำเร็จได้ด้วยความกรุณาและความช่วยเหลืออย่างสูงจาก รองศาสตราจารย์พิชิต ล้ายอง อาจารย์ที่ปรึกษา และ ดร.เปี่ยมภูมิ สฤกพฤกษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ได้กรุณาให้คำชี้แนะและให้คำปรึกษา และยังช่วยตรวจสอบ แก้ไขข้อบกพร่องของโครงการ คณะผู้จัดทำโครงการขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา พี่พชร กลิ่นวิจิต พี่ชาญปกรณ์ ณ นิโรจน์ และเพื่อนนักศึกษา ตลอดจนผู้ที่เกี่ยวข้องทุกท่านที่ไม่ได้กล่าวนามไว้ ณ ที่นี้ ที่ได้ให้กำลังใจและมีส่วนช่วยเหลือให้โครงการนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ท้ายที่สุดคณะผู้จัดทำโครงการหวังว่าโครงการจะเป็นประโยชน์กับผู้สนใจไม่มากนักน้อย

คณะผู้จัดทำ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
Abstract	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VI
สารบัญตาราง	VIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	2
1.3 ขอบเขตของโครงการ	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานและแผนการดำเนินงาน	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการทำโครงการ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 บทนำ	4
2.2 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน (BLDC)	4
2.2.1 ประวัติความเป็นมาของ BLDC	5
2.2.2 ส่วนประกอบพื้นฐานของ BLDC	6
2.2.3 Differential Equation	12
2.3 ชุดขับเคลื่อน BLDC (BLDC Drive)	18
2.3.1 การปรับความเร็วรอบมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน	18
2.3.2 การควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์	19
2.4 แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน	20
2.4.1 คุณสมบัติของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน	21
2.4.2 ประเภทและโครงสร้างของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน	21
2.4.3 ทฤษฎีและหลักการชาร์จแบตเตอรี่	23
2.4.4 กระบวนการชาร์จและดิสชาร์จไฟฟ้าในแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน	25
2.4.5 การชาร์จแบตเตอรี่	26
2.4.6 State of Charge (SOC) และ The depth of discharge (DOD)	27
2.4.7 ค่าคุณลักษณะของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนและการทดสอบ	28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5 จักรยาน	32
2.5.1 ประวัติความเป็นมาของจักรยาน	32
2.5.2 การปรับจักรยานให้เข้ากับผู้ใช้เบื้องต้น	33
บทที่ 3 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน	34
3.1 การทดสอบมอเตอร์	34
3.2 การทดสอบแบตเตอรี่	38
บทที่ 4 ผลการทดลอง	40
4.1 มอเตอร์ไฟฟ้า	40
4.2 แบตเตอรี่	54
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	72
5.1 สรุปผลการดำเนินงาน	72
5.2 ปัญหาและแนวทางแก้ไข	73
5.3 แนวทางการพัฒนา	73
บรรณานุกรม	74
ภาคผนวก	75
ภาคผนวก ก บทความทางวิชาการ	76
ประวัติผู้เขียน	81

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า	
2.1	ภายในของมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน	4
2.2	Hall effect	7
2.3	โครงสร้างของ Hall element	7
2.4	ขนาดของ Hall element	8
2.5	วงจรสมมูลของ Hall element	8
2.6	output waveforms ของ Hall element	9
2.7	การใช้งาน Hall element ใน BLDC	9
2.8	Torque generation, revolution และ switching	10
2.9	Hall IC	11
2.10	ความไวในการตรวจจับของ (a) linear type และ (b) switching type	11
2.11	Outer-rotor brushless DC motor	12
2.12	แบบจำลองโครงสร้างภายในมอเตอร์ BLDC	12
2.13	ฟลักซ์แม่เหล็กถาวรในขดลวดเฟส A	13
2.14	วงจรสมมูลของมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน	16
2.15	การควบคุมการทำงานของ Brushless DC Motor	18
2.16	ตำแหน่งต่างๆในการหมุนของโรเตอร์	19
2.17	ภาพตัดขวางของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนทรงกระบอก	22
2.18	โครงสร้าง wound prismatic cell	22
2.19	โครงสร้าง flat-plate prismatic cells 7 Ah (เคสเป็นขั้วลบ) และ 40 Ah (เคสเป็นกลาง)	23
2.20	ทิศทางของกระแสที่ไหลขณะทำการชาร์จ	23
2.21	วงจรที่มีความต้านทาน R_s ต่ออยู่เพื่อจำกัดกระแส	24
2.22	กระบวนการทางไฟฟ้าเคมีของแบตเตอรี่ Li ion	25
2.23	การประจุแบตเตอรี่	27
2.24	การคายประจุของแบตเตอรี่ LiCoO_2 18650-Type C ที่กระแสคงที่ต่างๆ	28
2.25	ความจุของแบตเตอรี่ 18650-Type C/ LiMn_2O_4	29
2.26	การคายประจุของ 17500-type cylindrical C/ LiCoO_2	29
2.27	การคายประจุเนื่องจากอุณหภูมิ	30
2.28	รูปการคายประจุจากไฟฟ้าเคมี	31
3.1	วงจรการทดสอบมอเตอร์	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
3.2	วงจรถอดสอบมอเตอร์	36
3.3	วงจรวัดค่าพารามิเตอร์บนแท่นทดสอบ	37
3.4	วงจรถอดสอบเบตเตอร์รี	38
4.1	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างภาระทางกลกับกำลังไฟฟ้าที่ค่าความเร็วต่างๆ ของจักรยานไฟฟ้าประเภทสองล้อ ณ เส้นทางทดสอบ	43
4.2	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างภาระทางกลกับกำลังไฟฟ้าที่ค่าความเร็วต่างๆ ของจักรยานไฟฟ้าประเภทสามล้อ ณ เส้นทางทดสอบ	46
4.3	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างภาระทางกลกับกำลังไฟฟ้าที่ค่าความเร็วต่างๆ ของจักรยานไฟฟ้าประเภทสองล้อ บนแท่นทดสอบ	51
4.4	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าขาเข้ากับค่าประสิทธิภาพที่ค่าความเร็วต่างๆ ของจักรยานไฟฟ้าประเภทสองล้อ	52
4.5	Power flow ของระบบ	53
4.6	กระแสกับแรงดันที่เวลาต่างๆ ในการคายประจุที่ 1C ของเบตเตอร์รีชุดที่ 1	55
4.7	กระแสกับแรงดันที่เวลาต่างๆ ในการคายประจุที่ 1C ของเบตเตอร์รีชุดที่ 2	57
4.8	กระแสกับแรงดันที่เวลาต่างๆ ในการคายประจุที่ 0.5C ของเบตเตอร์รีชุดที่ 1	59
4.9	กระแสกับแรงดันที่เวลาต่างๆ ในการคายประจุที่ 0.5C ของเบตเตอร์รีชุดที่ 2	61
4.10	กระแสกับแรงดันที่เวลาต่างๆ ในการคายประจุที่ 0.2C ของเบตเตอร์รีชุดที่ 1	63
4.11	กระแสกับแรงดันที่เวลาต่างๆ ในการคายประจุที่ 0.2C ของเบตเตอร์รีชุดที่ 2	65
4.12	กระแสกับแรงดันที่เวลาต่างๆ ในการคายประจุที่ 0.1C ของเบตเตอร์รีชุดที่ 1	67
4.13	กระแสกับแรงดันที่เวลาต่างๆ ในการคายประจุที่ 0.1C ของเบตเตอร์รีชุดที่ 2	69

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ข้อดีและข้อเสียของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน	21
4.1 ค่าที่ได้จากการทดสอบสมรรถนะของจักรยานไฟฟ้าประเภทสองล้อ ณ ความเร็ว 5 km/h ที่ค่าภาระทางกลต่างๆ	40
4.2 ค่าที่ได้จากการทดสอบสมรรถนะของจักรยานไฟฟ้าประเภทสองล้อ ณ ความเร็ว 10 km/h ที่ค่าภาระทางกลต่างๆ	41
4.3 ค่าที่ได้จากการทดสอบสมรรถนะของจักรยานไฟฟ้าประเภทสองล้อ ณ ความเร็ว 15 km/h ที่ค่าภาระทางกลต่างๆ	41
4.4 ค่าที่ได้จากการทดสอบสมรรถนะของจักรยานไฟฟ้าประเภทสองล้อ ณ ความเร็ว 20 km/h ที่ค่าภาระทางกลต่างๆ	42
4.5 ค่าที่ได้จากการทดสอบสมรรถนะของจักรยานไฟฟ้าประเภทสามล้อ ณ ความเร็ว 5 km/h ที่ค่าภาระทางกลต่างๆ	44
4.6 ค่าที่ได้จากการทดสอบสมรรถนะของจักรยานไฟฟ้าประเภทสามล้อ ณ ความเร็ว 10 km/h ที่ค่าภาระทางกลต่างๆ	44
4.7 ค่าที่ได้จากการทดสอบสมรรถนะของจักรยานไฟฟ้าประเภทสามล้อ ณ ความเร็ว 15 km/h ที่ค่าภาระทางกลต่างๆ	45
4.8 ค่าที่ได้จากการทดสอบสมรรถนะของจักรยานไฟฟ้าประเภทสามล้อ ณ ความเร็ว 20 km/h ที่ค่าภาระทางกลต่างๆ	45
4.9 ค่าที่ได้จากการทดสอบสมรรถนะของจักรยานไฟฟ้าประเภทสองล้อ ณ ความเร็ว 5 km/h ที่ค่าภาระทางกลต่างๆบนแท่นทดสอบ	47
4.10 ค่าที่ได้จากการทดสอบสมรรถนะของจักรยานไฟฟ้าประเภทสองล้อ ณ ความเร็ว 10 km/h ที่ค่าภาระทางกลต่างๆบนแท่นทดสอบ	48
4.11 ค่าที่ได้จากการทดสอบสมรรถนะของจักรยานไฟฟ้าประเภทสองล้อ ณ ความเร็ว 15 km/h ที่ค่าภาระทางกลต่างๆบนแท่นทดสอบ	49
4.12 ค่าที่ได้จากการทดสอบสมรรถนะของจักรยานไฟฟ้าประเภทสองล้อ ณ ความเร็ว 20 km/h ที่ค่าภาระทางกลต่างๆบนแท่นทดสอบ	50
4.13 ค่ากระแสและแรงดันของแบตเตอรี่ 1 ขณะคายประจุที่ 1C	54
4.14 ค่ากระแสและแรงดันของแบตเตอรี่ 2 ขณะคายประจุที่ 1C	56
4.15 ค่ากระแสและแรงดันของแบตเตอรี่ 1 ขณะคายประจุที่ 0.5C	58
4.16 ค่ากระแสและแรงดันของแบตเตอรี่ 2 ขณะคายประจุที่ 0.5C	60
4.17 ค่ากระแสและแรงดันของแบตเตอรี่ 1 ขณะคายประจุที่ 0.2C	62

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.18 ค่ากระแสและแรงดันของแบตเตอรี่ 2 ระยะเวลาประจุที่ 0.2C	64
4.19 ค่ากระแสและแรงดันของแบตเตอรี่ 1 ระยะเวลาประจุที่ 0.1C	66
4.20 ค่ากระแสและแรงดันของแบตเตอรี่ 2 ระยะเวลาประจุที่ 0.1C	68
4.21 พลังงานจากการคายประจุของแบตเตอรี่	70
4.22 เวลาโดยประมาณสำหรับการใช้งานจักรยานไฟฟ้าอย่างต่อเนื่อง ที่ความเร็วและภาระทางกลต่างๆ	71



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มา

ในปัจจุบันมนุษย์มีพาหนะที่ใช้ในการเดินทางมากขึ้น พาหนะยานยนต์ต่างๆได้รับการพัฒนาอย่างแพร่หลายมากขึ้น ซึ่งพาหนะในยุคแรกนั้นเริ่มจากเครื่องจักรไอน้ำ แล้วพัฒนามาใช้น้ำมันเป็นเชื้อเพลิง และปัจจุบันได้มีการพัฒนาเป็นการใช้พลังงานไฟฟ้าในการขับเคลื่อน แต่ส่วนใหญ่ยังคงใช้น้ำมันเป็นเชื้อเพลิงในการขับเคลื่อน ซึ่งส่งผลให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม เช่น มลพิษทางอากาศ เนื่องจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่ไม่สมบูรณ์ของเครื่องยนต์ อีกทั้งเชื้อเพลิงจำพวกน้ำมันมีจำนวนลดลงและราคาสูงขึ้น จากปัญหาที่กล่าวมาข้างต้น ทำให้มีการตื่นตัวในการพัฒนาและการศึกษาเกี่ยวกับยานยนต์ไฟฟ้ามากขึ้นในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา สำหรับประเทศไทยนั้นได้มีการนำพาหนะที่ใช้พลังงานไฟฟ้ามาใช้ประโยชน์ในด้านการขนส่งทางรางเป็นหลัก อันได้แก่ รถไฟฟ้าใต้ดิน (MRT) หรือ รถไฟฟ้าบีทีเอส (BTS) และรถไฟฟ้า Airport Rail Link เป็นวิธีหนึ่งช่วยลดมลพิษทางอากาศในเขตชุมชนเมือง การพัฒนารถยนต์ไฟฟ้า (EV) ของบริษัท Tesla , Nissan , BMW และ Apple ซึ่งเป็นอีกทางเลือกหนึ่งสำหรับการใช้พลังงานสะอาด อีกทั้งยังเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม แต่ด้วยราคาของรถยนต์ไฟฟ้า (EV) ที่ยังสูงอยู่และประกอบกับการให้บริการสำหรับรถยนต์ไฟฟ้ายังอยู่ในวงแคบส่งผลทำให้ไม่เป็นที่นิยมสำหรับประเทศไทย แต่พาหนะที่ได้รับความนิยมทั้งในอดีตจนถึงปัจจุบัน และมีการใช้งานอย่างแพร่หลาย นั่นคือจักรยานและปัจจุบันได้ถูกพัฒนาเป็นจักรยานไฟฟ้า

จักรยานเป็นพาหนะที่ใช้กำลังของคนในการขับเคลื่อนเพื่อให้เกิดการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าสามารถใช้เดินทางไปตามที่ต่างๆได้สะดวกและรวดเร็ว อีกทั้งยังเป็นพาหนะที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม เป็นพลังงานสะอาด ไม่ก่อให้เกิดมลภาวะกับสิ่งแวดล้อม ไม่เกิดเสียงดัง ไม่ใช่เชื้อเพลิง ไม่มีของเสียที่เกิดจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ ซึ่งปัจจุบันได้มีการพัฒนาเป็นจักรยานไฟฟ้า โดยมีการติดตั้งมอเตอร์ไฟฟ้าและแบตเตอรี่เพิ่มเข้าไปจากเดิม เพื่อให้ผู้ใช้งานจักรยานใช้งานได้หลากหลายและสะดวกสบายมากขึ้น ทั้งยังช่วยผ่อนแรงในการปั่นของคนอีกด้วย คณะผู้จัดทำจึงได้ทำการศึกษาค้นคว้าข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับจักรยานไฟฟ้า ศึกษาหลักการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าของจักรยานไฟฟ้า ศึกษาการใช้พลังงาน การชาร์จประจุและการคายประจุของแบตเตอรี่ที่ใช้กับจักรยานไฟฟ้า เพื่อให้ใช้งานได้ตามระยะเวลาที่เหมาะสม ซึ่งคณะผู้จัดทำก็หวังว่าการศึกษาของเรานั้นจะช่วยให้ผู้ที่สนใจในปรัชญา นิพนธ์เล่มนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- 1) เพื่อศึกษาองค์ประกอบต่าง ๆ ที่สำคัญของจักรยานไฟฟ้า
- 2) เพื่อศึกษาโครงสร้างและการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้า
- 3) เพื่อศึกษาการคายประจุของแบตเตอรี่ในรถจักรยานไฟฟ้า

1.3 ขอบเขตของโครงการ

- 1) ทราบถึงองค์ประกอบที่สำคัญของจักรยานไฟฟ้าว่าแต่ละส่วนมีความสำคัญและประโยชน์อย่างไร
- 2) ทราบถึงโครงสร้างและหลักการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าและตัวขับเคลื่อนสำหรับจักรยานไฟฟ้าว่าทำงานอย่างไรและมีประสิทธิภาพการทำงานในแต่ละรูปแบบอย่างไร
- 3) ทราบถึงวิธีการอัตราการคายประจุของแบตเตอรี่ในรถจักรยานไฟฟ้าที่เหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานและแผนการดำเนินงาน

วิธีการดำเนินการ	ปีการศึกษา 2559									
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	
ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับมอเตอร์ไฟฟ้า และแบตเตอรี่สำหรับจักรยานไฟฟ้า	←→									
ออกแบบการทดสอบแบตเตอรี่ ศึกษาการประจุและการคายประจุของแบตเตอรี่สำหรับจักรยานไฟฟ้า		←→								
ออกแบบการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าสำหรับจักรยานไฟฟ้า			←→							
ทดสอบการประจุและการคายประจุของแบตเตอรี่สำหรับจักรยานไฟฟ้า					←→					
ทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าสำหรับจักรยานไฟฟ้า						←→				
เก็บข้อมูล เรียบเรียง และสรุปผลการทดสอบ และนำเสนอ								←→		

1.5 ประโยชน์ที่จะได้รับจากการทำโครงการ

- 1) เมื่อทราบถึงโครงสร้างและหลักการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าและชุดขับเคลื่อน จะสามารถดูแลและทำการบำรุงรักษาจักรยานไฟฟ้าได้อย่างถูกต้อง
- 2) เมื่อทราบอัตราการคายประจุของแบตเตอรี่สำหรับจักรยานไฟฟ้าที่เหมาะสม จะสามารถใช้งานแบตเตอรี่ได้ถูกต้อง ช่วยให้แบตเตอรี่มีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

บทนี้จะนำเสนอทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับจักษยานไฟฟ้า ซึ่งประกอบไปด้วย มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน (BLDC) , แบตเตอรี่ และการปรับตั้งของจักษยานไฟฟ้า

2.2 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน (BLDC)

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงทั่วไปมีการใช้งานอย่างแพร่หลายเนื่องจาก มีโครงสร้างที่ง่ายไม่ซับซ้อน ใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่สามารถหาได้ทั่วไป แต่มีข้อเสียที่ใหญ่มากคือจำเป็นต้องมีคอมมิวเตเตอร์และแปรงถ่าน ซึ่งเป็นชิ้นส่วนที่ต้องมีการซ่อมแซมบ่อย เมื่อการทำงานของคอมมิวเตเตอร์และแปรงถ่านถูกแทนด้วยวงจรสวิตซ์ไฟฟ้า ทำให้ค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงมอเตอร์ลดลงซึ่งเป็นข้อดีที่โดดเด่นกว่ามอเตอร์กระแสตรงชนิดอื่นๆ มอเตอร์ดังกล่าวถูกเรียกชื่อว่า มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน (Brushless DC motor หรือ BLDC)



รูปที่ 2.1 ภายในของมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1 ประวัติความเป็นมาของ BLDC

มอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน (BLDC) ถูกพัฒนาโดยรากฐานมาจากมอเตอร์กระแสตรงธรรมดา นับแต่ไมเคิลฟาราเดย์ค้นพบปรากฏการณ์เหนี่ยวนำโดยแม่เหล็กไฟฟ้าในปี 1831 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเครื่องแรกก็ถือกำเนิดขึ้นในทศวรรษที่ 1840 แต่เนื่องจากข้อจำกัดทางเทคโนโลยี เช่นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง วัสดุที่ใช้ผลิตแม่เหล็กถาวร ทำให้การออกแบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านประสบความสำเร็จในช่วงเวลาศตวรรษต่อมา ปี 1915 นักวิทยาศาสตร์ชาวอเมริกัน Irving Langmuir ประดิษฐ์ Mercury Rectifier ใช้ควบคุม Grid Electrode และประดิษฐ์ DC/AC converter ในปี 1930 นักวิชาการบางกลุ่มเริ่มพัฒนา BLDC โดยใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ อย่างไรก็ตามอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังในช่วงนั้นกำลังอยู่ในช่วงต้นของการพัฒนา นักวิชาการจึงยังไม่สามารถค้นพบอุปกรณ์ที่เหมาะสมแทนแปรงถ่านได้ ทำให้มอเตอร์ที่ได้เป็นมอเตอร์ที่ความน่าเชื่อถือต่ำ ประสิทธิภาพไม่สูง และใช้งานได้แคในห้องทดลองเท่านั้น ในปี 1955 Harrison และ Rye ประสบความสำเร็จในการใช้วงจรทรานซิสเตอร์แทนอุปกรณ์ทางกลในการแลกเปลี่ยนพลังงาน เป็นจุดเริ่มต้นของ BLDC อย่างไรก็ตามก็ยังมีปัญหาที่เกิดขึ้นคือ เมื่อโรเตอร์ไม่หมุนขดลวดไม่สามารถผลิตสัญญาณเพื่อให้ทรานซิสเตอร์ทำงานได้ ทำให้มอเตอร์แบบไร้แปรงถ่านนี้ไม่มีแรงบิดเริ่มต้น นอกจากนี้วิธีนี้ยังใช้พลังงานปริมาณมาก นักวิจัยจึงเริ่มคิดค้นเครื่องผลิตแรงเหวี่ยงหรือติดแม่เหล็กเพื่อให้มอเตอร์เริ่มหมุน แต่วิธีนี้เป็นวิธีที่ซับซ้อนมากเพียงเพื่อให้ได้สัญญาณกระตุ้นเริ่มต้น ในทศวรรษที่ 1970 มอเตอร์ไฟฟ้าแบบไร้แปรงถ่านได้ถูกพัฒนาโดยการนำ Hall element กับไดโอดตรวจจับสัญญาณแม่เหล็กมาใช้ควบคุมมอเตอร์ BLDC ในช่วงเวลานั้นอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ก็มีการพัฒนาเป็นอย่างมาก มีการพัฒนาสารกึ่งตัวนำคุณภาพสูง และการค้นพบสารแม่เหล็กอย่าง Samarium cobalt กับ NdFeB ทำให้การใช้ BLDC มอเตอร์ถูกเริ่มนำไปใช้อย่างแพร่หลาย

ในปี 1978 เยอรมนีได้เปิดตัว MAC brushless DC motor และอุปกรณ์ควบคุม ทำให้มีการนำ BLDC ก้าวไปสู่การนำไปประยุกต์ใช้อย่างแท้จริง จากนั้นก็มีการวิจัยใช้สัญญาณรูปแบบต่างๆในการควบคุม ทั้ง Trapezoid wave , Square Wave และ sinewave มอเตอร์ไร้แปรงถ่านที่ใช้ sinewave ในการควบคุมถูกเรียกว่า Permanent magnet synchronus machine (PMSM) นอกจากนี้ก็มีการพัฒนา IGBT ซึ่งได้นำมาช่วยสำหรับการโอนถ่ายพลังงานของ BLDC ที่ความถี่สูงด้วย

ในช่วงปลายของทศวรรษที่ 1990 เทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง microprocessor ถูกพัฒนาเป็น microcontroller unit (MCU), Digital signal processer (DSP) และอื่นๆ ในการเขียนโปรแกรมควบคุมทำให้การประยุกต์ใช้งานมอเตอร์ BLDC สำหรับงานที่ซับซ้อนมีความกว้างขวางมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 ส่วนประกอบพื้นฐานของ BLDC

2.2.2.1 Stator Core

โครงสร้างสเตเตอร์ของมอเตอร์ BLDC นั้นเหมือนกับซิงโครนัสมอเตอร์หรือมอเตอร์เหนี่ยวนำทั่วไป ขดลวดเฟสเดียวหรือหลายเฟสจะถูกพันอย่างสมมาตรในแกนเหล็ก และต่อกันแบบ Y หรือ Δ (ส่วนใหญ่จะต่อแบบ Y) มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงทั่วไปขดลวดอามาเจอร์จะอยู่ที่โรเตอร์ แต่สำหรับ BLDC ขดลวดจะอยู่ที่สเตเตอร์ ทำให้มีความร้อนเกิดขึ้นน้อยกว่า

2.2.2.2 Permanent Magnet Rotor

โรเตอร์ของ BLDC ประกอบด้วยแม่เหล็กถาวรฝังอยู่ที่ผิวหรือในแกนเหล็ก ในปัจจุบันแม่เหล็กถาวรมักใช้วัสดุหายากเป็นวัตถุดิบ เช่น NdFeB โดยแม่เหล็กถาวรนี้มีหน้าที่สร้างสนามแม่เหล็กที่เพียงพอในช่องว่างอากาศ (air gap) ซึ่งไม่ต่างจากมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงทั่วไป แต่สำหรับ BLDC แม่เหล็กถาวรจะอยู่ที่โรเตอร์ ไม่ใช่สเตเตอร์เหมือนมอเตอร์กระแสตรงทั่วไป

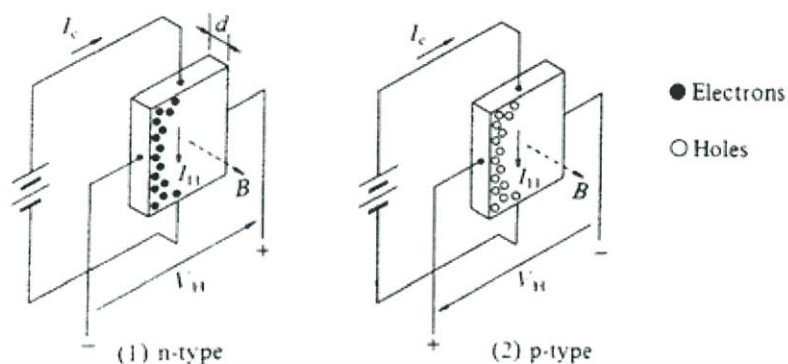
2.2.2.3 Hall elements

เซนเซอร์บอกตำแหน่งจะถูกติดตั้งอยู่ในมอเตอร์เพื่อจับตำแหน่งของโรเตอร์และเปลี่ยนเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าและส่งต่อไปยังสวิตช์ เซนเซอร์บอกตำแหน่งโดยทั่วไปมีหลายแบบ ในปัจจุบัน BLDC ใช้ Hall sensor หรือเซนเซอร์แม่เหล็กในการระบุตำแหน่งของโรเตอร์ [2]

ในรูปที่ 2-2 เมื่อมีกระแส I_c ไหลลงไปในสารกึ่งตัวนำ pellet ซึ่งมีสนามแม่เหล็กตั้งฉากกับพื้นผิว pellet แรงเคลื่อนสนามแม่เหล็กไฟฟ้าหรือ EMF_V_H ถูกสร้างขึ้นใน pellet โดยตั้งฉากกับกระแสและสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำ B แรงแม่เหล็กไฟฟ้ากระทำต่อการชาร์จของอนุภาค (อิเล็กตรอน) ตามกฎมือซ้ายของเฟรมมิ่ง อนุภาคที่มีประจุจะเบนไปทางซ้ายมือของสารกึ่งตัวนำ pellet กระแสไฟฟ้าของแรงเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้นอยู่กับประเภทของสารกึ่งตัวนำ ว่าเป็น N-type หรือ P-type ขนาดของแรงเคลื่อนสนามแม่เหล็กไฟฟ้า V_H หรือเรียกกันว่า Hall voltage จะหาได้ตามสมการดังต่อไปนี้

$$V_H = \frac{1}{d} B I_c R_H \quad (2.1)$$

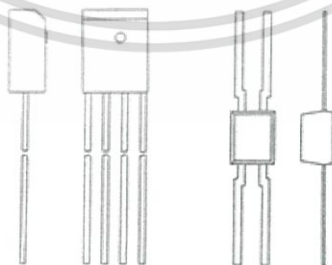
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 Hall effect

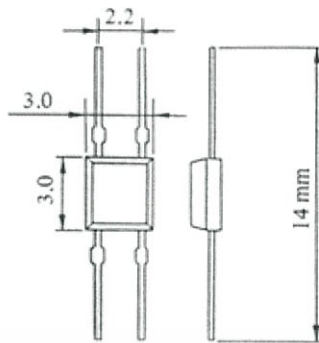
- โดยที่ R_H คือ ค่าคงที่ของ Hall ($m^3 C^{-1}$)
 I_c คือ กระแส (A)
 B คือ ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (T)
 d คือ ความหนาของสารกึ่งตัวนำ pellet (m)

ปรากฏการณ์ครั้งนี้ถูกค้นพบโดย E. H. Hall ในปี 1878 จากการทดสอบโดยใช้ metal segment ซึ่งเรียกว่า “Hall effect” โดย Hall effect มีความแข็งแกร่งในสารประกอบโลหะที่เฉพาเจาะจง หรือ สารกึ่งตัวนำ อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำใช้สำหรับตรวจจับสนามแม่เหล็กซึ่งเรียกว่า Hall elements หรือ Hall generators ในมอเตอร์ไม่มีแปรงถ่านสมัยใหม่ชนิด N-type InSb (indium-antimony) ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวาง เช่นเดียวกับ GaAs (gallium-arsenide) ในรูปที่ 2-3 แสดงให้เห็นถึงองค์ประกอบทั่วไปตามห้องตลาดของ Hall elements และรูปที่ 2-4 แสดงให้เห็นถึงขนาดของ Hall elements.



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของ Hall element

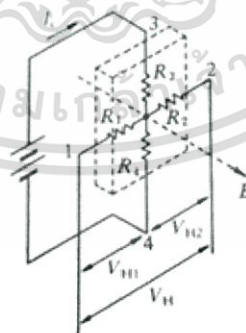
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 ขนาดของ Hall element

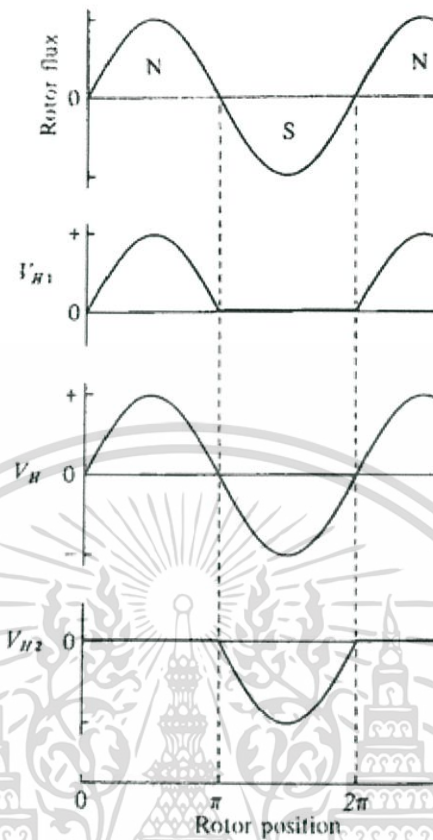
1) หลักการของการตรวจจับตำแหน่งโดยใช้ Hall elements

รูปที่ 2-5 แสดงให้เห็นถึงวงจรของ Hall element ซึ่งแสดงเป็นเครือข่าย 4 เทอมินอล เมื่อกระแส I_c ซึ่งเราเรียกว่ากระแสคอนโทรล หรือ กระแสไบอัส ไหลจากเทอมินอลที่ 3 ไปเทอมินอลที่ 4 ใน Hall element ที่สัมผัสกับสนามแม่เหล็กซึ่งเป็นแนวตั้งฉากกับ element plane แรงดันไฟฟ้า V_H จะถูกสร้างขึ้นผ่านเทอมินอลที่ 1 และ เทอมินอลที่ 2 เมื่อเทอมินอลที่ 4 เป็นจุดอ้างอิง ค่าที่เทอมินอลที่ 1 และ เทอมินอลที่ 2 คือ $V_H/2$ และ $-V_H/2$ เมื่อ $R_1 = R_2$ และ $R_3 = R_4$ นอกจากนี้การกลับขั้วของกระแสไฟยังทำให้พลั๊กกลับทิศด้วย ดังรูปที่ 2-6 ซึ่งได้แสดงความสัมพันธ์ เมื่อ Hall element วางใกล้ๆกับมอเตอร์แม่เหล็กถาวร Hall element สามารถตรวจจับตำแหน่งของขั้วและความหนาแน่นของพลั๊กได้อย่างถูกต้อง หากกำหนดให้แรงดันขาออกคือ V_{H1} และ V_{H2}



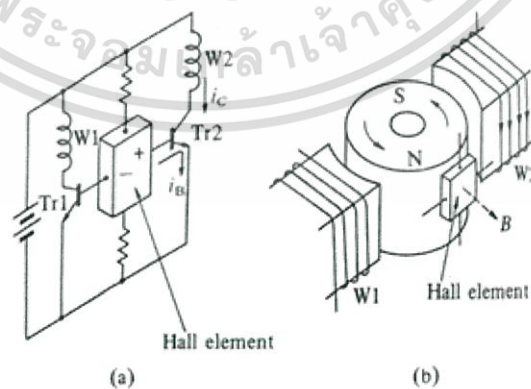
รูปที่ 2.5 วงจรสมมูลของ Hall element

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 output waveforms ของ Hall element

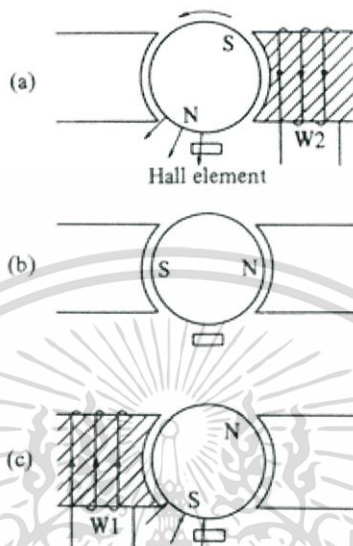
2) วิธีการตรวจจับตำแหน่ง



รูปที่ 2.7 การใช้งาน Hall element ใน BLDC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

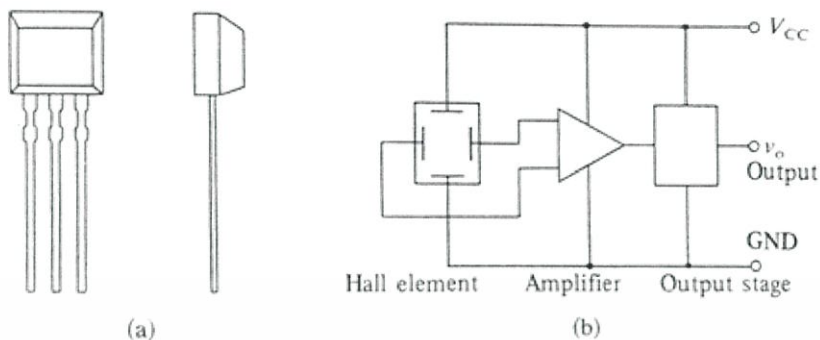
จากรูป 2-7 ได้แสดงให้เห็นถึงมอเตอร์แบบไร้แปรงถ่านอย่างง่าย โดยมี Hall element 1 ที่สัญญาณขาออกจาก Hall element ทำงาน 2 ทรานซิสเตอร์ Tr1 และ Tr2 เพื่อควบคุมกระแสในขดลวดสเตเตอร์ W1 และ W2 จากรูปที่ 2-8 แสดงสถานะของโรเตอร์ขณะหมุน ซึ่งมีการอธิบายดังนี้



รูปที่ 2.8 Torque generation, revolution และ switching

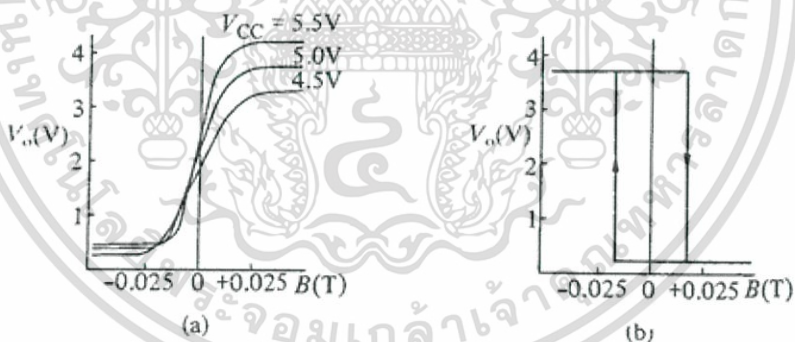
- (a) Hall element ตรวจจับขั้วบวกของโรเตอร์และขดลวด W2 รับพลังงานเพื่อผลิตขั้วลบซึ่งขับเคลื่อนโรเตอร์ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา
- (b) เนื่องจากไม่มีสนามแม่เหล็กถูกนำไปใช้กับ Hall element ทรานซิสเตอร์ทั้งคู่จะทำการเปิดวงจร ไม่มีกระแสไหลใน W1 และ W2 โรเตอร์ยังคงหมุนเนื่องจากความเฉื่อย
- (c) Hall element ตรวจจับขั้วลบของโรเตอร์ และขดลวด W1 รับพลังงานเพื่อผลิตขั้วลบซึ่งดึงขั้วบวกของโรเตอร์และยังคงหมุนในทิศทวนเข็มนาฬิกา

3) Hall ICs



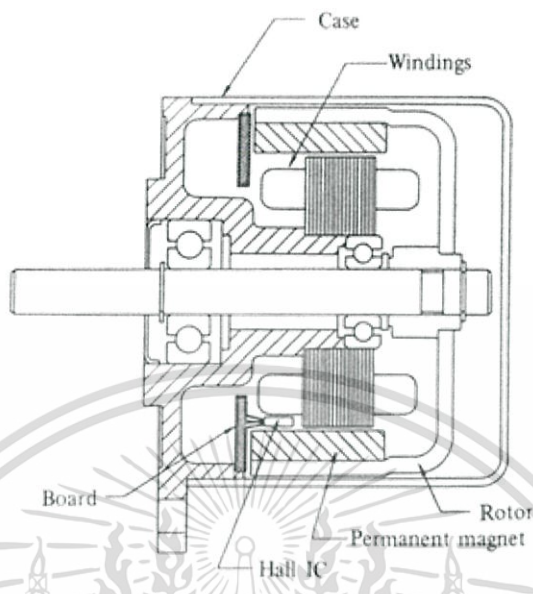
รูปที่ 2.9 Hall IC

Hall element ต้องมาพร้อมกับทรานซิสเตอร์ 1 ตัวหรือมากกว่านั้น เพื่อที่จะขยายสัญญาณขาออกของ Hall element แต่เมื่อนำวงจรรีเลย์ทรอนิกส์มาจัดวางบนชิพเดียวกัน จะเรียกอุปกรณ์นั้นว่า Hall IC ลักษณะทั่วไปของ Hall IC และ block diagram ของฟังก์ชันแสดงดังรูปที่ 2-9 สัญญาณขาออกจาก Hall element จะถูกขยาย สัญญาณขาออกจาก Hall IC ถูกใช้ในการขับเคลื่อนทรานซิสเตอร์เพื่อควบคุมกระแสขดลวด Hall IC มี 2 ชนิด คือ linear type และ switching type รูปที่ 2-10 แสดงถึงความไวในการตรวจจับของทั้ง Hall IC 2 ชนิด



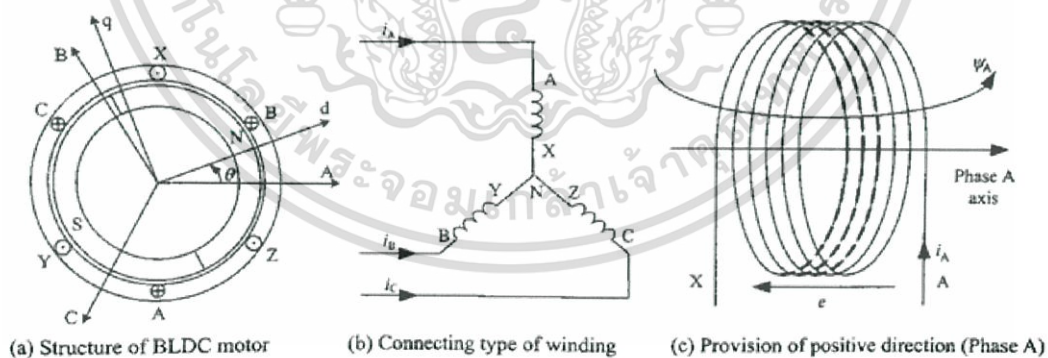
รูปที่ 2.10 ความไวในการตรวจจับของ (a) linear type และ (b) switching type

รูปที่ 2-11 คือตัวอย่างของ Outer-rotor brushless DC motor ที่ใช้ Hall IC 3 ตัว ขดลวดสเตเตอร์เป็นชนิด 3 เฟส Hall IC ถูกติดตั้งในมอเตอร์นี้เพื่อตรวจจับฟลักซ์จาก โรเตอร์ และลำดับที่เปลี่ยนไป



รูปที่ 2.11 Outer-rotor brushless DC motor

2.2.3 Differential Equation



รูปที่ 2.12 แบบจำลองโครงสร้างภายในมอเตอร์ BLDC

รูปที่ 2-12 แสดงโครงสร้างและวงจรรภายในทั่วไปของมอเตอร์ BLDC พิจารณาทิศทางกระแสของกระแสตามรูปที่ 2-12 แรงดันคร่อมเฟสของแต่ละขดลวดเมื่อรวมแรงดันตกจากตัวต้านทานและ induced EMF เขียนได้ดังสมการ (2.2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$u_x = R_x i_x + e_{\psi x} \quad (2.2)$$

เมื่อ u_x คือ แรงดันคร่อมเฟส (x แทนเฟส A,B หรือ C)

i_x คือ กระแสเฟส

$e_{\psi x}$ คือ induced EMF ของเฟส

R_x คือ ความต้านทานของขดลวดในเฟส

จากกฎของฟาราเดย์ induced EMF สามารถเขียนได้ดังสมการ (2.3)

$$e_{\psi x} = \frac{d\psi_x}{dt} \quad (2.3)$$

เมื่อคิดเฉพาะเฟส A ฟลักซ์ (ψ) ของขดลวดสามารถเขียนได้ดังสมการ

$$\psi_A = L_A I_A + M_{AB} i_B + M_{AC} i_C + \psi_{pm}(\theta) \quad (2.4)$$

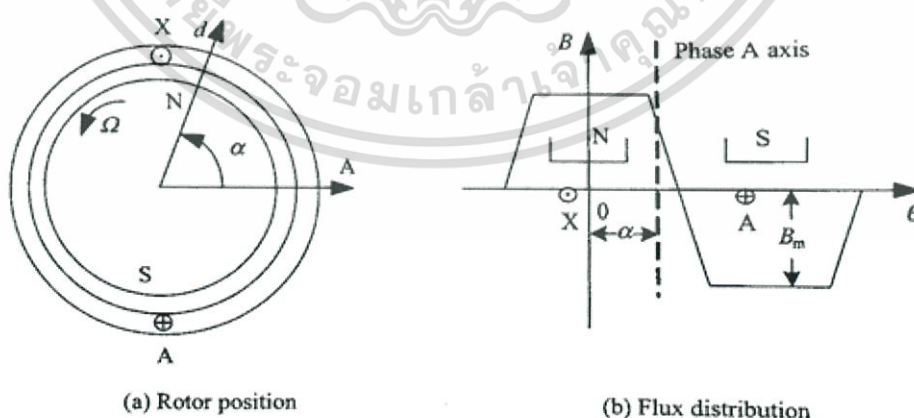
เมื่อ $\psi_{pm}(\theta)$ คือ Permanent flux linkage ของเฟส A

θ คือ มุมของโรเตอร์เทียบแกน A

L_A คือ self-inductance ของเฟส A

M_{AB} คือ Mutual inductance ของขดลวด A กระทำโดยขดลวด B

M_{AC} คือ Mutual inductance ของขดลวด A กระทำโดยขดลวด C



รูปที่ 2.13 ฟลักซ์แม่เหล็กถาวรในขดลวดเฟส A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2-13 เมื่อโรเตอร์หมุนในทิศทางเข็มนาฬิกา ปริมาณฟลักซ์จะเปลี่ยนแปลงตามตำแหน่งของโรเตอร์ เมื่อโรเตอร์หมุนไปที่ตำแหน่ง α ฟลักซ์แม่เหล็กของเฟส A จะมีค่าดังนี้

$$\psi_{pm}(\alpha) = N\varphi_{pm}(\alpha) \quad (2.5)$$

$$\varphi_{pm}(\alpha) = \int_{-\frac{\pi}{2}+\alpha}^{\frac{\pi}{2}+\alpha} B(\theta) S d\theta \quad (2.6)$$

เมื่อ $\varphi_{pm}(\alpha)$ คือ ฟลักซ์ของเฟส A เมื่อโรเตอร์อยู่ที่ตำแหน่ง \square

$B(\theta)$ คือ ความหนาแน่นฟลักซ์ในช่องว่างอากาศ

N คือ จำนวนรอบขดลวด

แทนค่าสมการ (2.3) – (2.6) ในสมการ (2.1) จะได้

$$\begin{aligned} u_A &= Ri_A + \frac{d}{dt} (L_A i_A + M_{AB} i_B + M_{AC} i_C + \psi_{pm}) \\ &= Ri_A + \frac{d}{dt} (L_A i_A + M_{AB} i_B + M_{AC} i_C) + \frac{d}{dt} \left[NS \int_{\frac{\pi}{2}+\theta}^{\frac{\pi}{2}+\alpha} B(x) dx \right] \\ &= Ri_A + \frac{d}{dt} (L_A i_A + M_{AB} i_B + M_{AC} i_C) + e_A \end{aligned} \quad (2.7)$$

เมื่อ e_A คือ back-EMF ของเฟส A

จากความเหนี่ยวนำแปรผันตรงกับจำนวนรอบกำลังสอง

$$L_A = N^2 \Lambda_A \quad (2.8)$$

$$M_{AB} = N^2 \Lambda_{AB} \quad (2.9)$$

เมื่อ Λ_A คือ ความซึมซาบของ self-inductance ในเฟส A

Λ_{AB} คือ ความซึมซาบของ mutual inductance ระหว่างเฟส A กับเฟส B

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีที่ขดลวดที่สเตเตอร์พันแบบสมมาตร self-inductance จะมีค่าเท่ากับ mutual inductance แทนค่าลงในสมการ (2.7) จะได้

$$u_A = Ri_A + L \frac{di_A}{dt} + M \frac{di_B}{dt} + M \frac{di_C}{dt} + e_A$$

$$e_A = \frac{d}{dt} \left[NS \int_{-\frac{\pi}{2}+\theta}^{\frac{\pi}{2}+\theta} B(x) dx \right] \quad (2.10)$$

$$= NS \left[B\left(\frac{\pi}{2} + \theta\right) - B\left(-\frac{\pi}{2} + \theta\right) \right] \frac{d\theta}{dt} \quad (2.11)$$

$$= NS\omega \left[B\left(\frac{\pi}{2} + \theta\right) - B\left(-\frac{\pi}{2} + \theta\right) \right]$$

เมื่อ ω คือ ความเร็วรอบของมอเตอร์

จากค่า $B\left(\frac{\pi}{2} + \theta\right)$ ในรูปที่ 2-13 (b)

$$e_A = NS\omega \left[B\left(\frac{\pi}{2} + \theta\right) - B\left(\frac{\pi}{2} + \theta + \pi - 2\pi\right) \right] \quad (2.12)$$

$$= 2NS\omega B\left(\frac{\pi}{2} + \theta\right)$$

กรณีที่ $\theta = \frac{\pi}{2}$, back emf ของเฟส A จะสามารถหาได้จาก

$$e_A = 2NS\omega N_m f_A(\theta) = \omega \psi_m f_A(\theta) \quad (2.13)$$

เมื่อ $f_A(\theta)$ คือ ฟังก์ชันของรูปคลื่น back-emf ของเฟส A

จากรูปที่ 2.10 (b) กระแสของทั้งสามเฟสมีความสัมพันธ์กันดังนี้

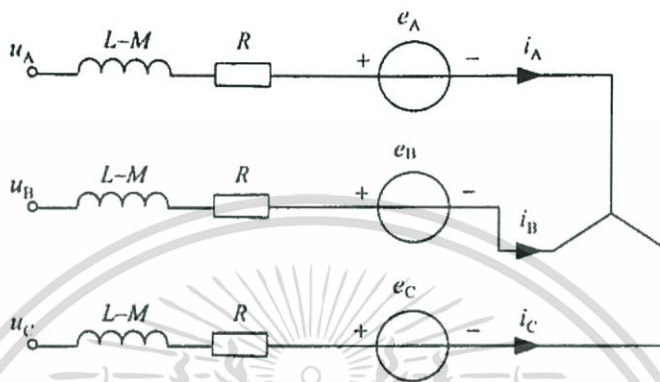
$$i_A + i_B + i_C = 0 \quad (2.14)$$

และจากสมการ (2.10) จัดรูปใหม่ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$u_A = Ri_A + (L - M)\frac{di_A}{dt} + e_A \tag{2.15}$$

เมื่อแทนค่านี้ในเฟส B และ C จะได้วงจรสมมูลของ BLDC ดังรูปที่ 2-14



รูปที่ 2.14 วงจรสมมูลของมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน

การคำนวณกำลังและแรงบิดของ BLDC สามารถคำนวณได้จากกฎอนุรักษ์พลังงาน เมื่อมอเตอร์ทำงาน พลังงานจะถูกถ่ายโอนจากกำลังทางไฟฟ้าไปเป็นกำลังทางกล โดยกำลังทางไฟฟ้าสามารถแสดงได้ดังสมการ (2.16)

$$P_e = e_A i_A + e_B i_B + e_C i_C \tag{2.16}$$

เมื่อไม่คิดการสูญเสียทางกล กำลังทางไฟฟ้าจะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานจลน์ทั้งหมด ดังสมการ (2.17)

$$P_e = T_e \omega \tag{2.17}$$

เมื่อ T_e คือ แรงบิดจากแม่เหล็กไฟฟ้า

จากสมการ (2.16) และ (2.17)

$$T_e = \frac{e_A i_A + e_B i_B + e_C i_C}{\omega} \tag{2.18}$$

แทนที่สมการ (2.13) ใน (2.18)

$$T_e = p[\psi_m f_A(\theta) i_A + \psi_m f_B(\theta) i_B + \psi_m f_C(\theta) i_C] \tag{2.19}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ p คือ จำนวนขั้วของมอเตอร์

ในช่วงที่ BLDC หมุนไปถึง 120° ขดลวดสองขดที่มีกระแสที่แอมพลิจูดเท่ากันจะมีองค์ประกอบที่ถูกหักล้าง ดังนั้น สมการ (2.19) จะถูกลดรูปให้เหลืออย่างง่ายคือ

$$T_e = 2p\psi_m i_A = K_T i \quad (2.20)$$

เมื่อ K_T คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงบิด

i คือ กระแสเฟสที่สภาวะคงที่

โมเดลทางคณิตศาสตร์ที่สมบูรณ์ของระบบไฟฟ้าเชิงกล สมการการเคลื่อนที่จะเป็นดังสมการ (2.20)

$$T_e - T_L = J \frac{d\omega}{dt} + B_v \omega \quad (2.21)$$

เมื่อ T_L คือ แรงบิดของโหลด

J คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์

B_v คือ สัมประสิทธิ์แรงหนืด

สามารถหาค่าประสิทธิภาพได้จากสมการที่ (2.22)

$$P_e = \eta P_{mech}$$

$$\text{หรือ } IV = \eta T_e \omega \quad (2.22)$$

เมื่อ η คือ ค่าประสิทธิภาพของการทำงาน

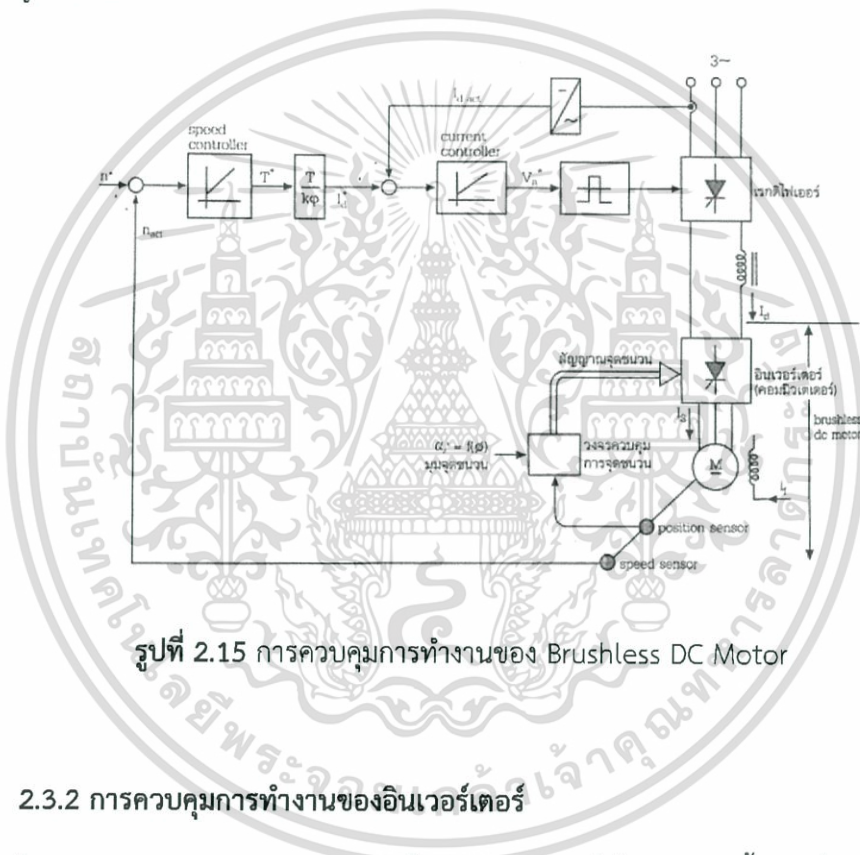
2.3 ชุดขับเคลื่อน BLDC (BLDC Drive)

2.3.1 การปรับความเร็วรอบมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน

ในกรณีของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อต้องการปรับความเร็วรอบสามารถทำได้โดยปรับแรงดันที่จ่ายให้อาร์เมเจอร์ ซึ่งจะทำให้กระแสที่ไหลเข้าอาร์เมเจอร์เพิ่มขึ้นและเป็นการไปเพิ่มแรงบิดมอเตอร์ให้มากกว่าแรงบิดที่โหลดต้องการ มอเตอร์ก็จะหมุนเร็วขึ้นจนเมื่อถึงความเร็วรอบที่ต้องการแล้วกระแสก็จะลดลงเท่าเดิม เนื่องจาก back EMF เพิ่มขึ้นตามความเร็ว เช่นเดียวกัน เมื่อต้องการปรับความเร็วรอบของมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน (BLDC) เราก็ทำได้ด้วยการปรับค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงของวงจรเชื่อมโยงกระแสตรง เมื่อแรงดันเพิ่มขึ้น กระแส I_d ก็มากขึ้น ซึ่งหมายถึงกระแส I_s ก็มากขึ้นตาม การที่ I_s มากขึ้น ก็จะทำให้เกิดแรงดันระหว่างสนามแม่เหล็กหมุนบนเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สเตเตอร์กับสนามแม่เหล็กของโรเตอร์มากขึ้น แรงบิดก็จะมากขึ้น ทำให้แรงบิดของมอเตอร์มากกว่าแรงบิดที่โหลดต้องการ เกิดเป็นแรงบิดล้นเร่งมอเตอร์ให้หมุนเร็วขึ้นจนกระทั่งความเร็วที่ต้องการมอเตอร์ก็จะมาหมุนที่สภาวะสมดุลใหม่ ส่วน I_d และ I_q ก็จะลดค่าลงเท่าเดิมเนื่องจาก back EMF ที่เพิ่มขึ้น (เมื่อโหลดทางกลเท่าเดิม) [6]

เมื่อนำ BLDC มาทำงานร่วมกับอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายกระแสและทำงานใน load commutation อินเวอร์เตอร์และ BLDC ดังกล่าวจะมีพฤติกรรมเทียบได้กับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงทั่วไป วงจรควบคุมที่ใช้กับ BLDC จึงเป็นวงจรควบคุมที่มีลักษณะเดียวกับ DC Drive ทุกประการ ดังแสดงในรูปที่ 2-15

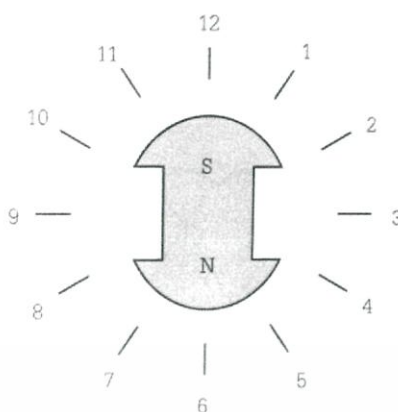


รูปที่ 2.15 การควบคุมการทำงานของ Brushless DC Motor

2.3.2 การควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์

ในการควบคุมการหมุนของมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านนั้นจำเป็นต้องทราบตำแหน่งของโรเตอร์จึงจะสามารถควบคุมการหมุนได้อย่างถูกต้อง ซึ่งสามารถอธิบายให้เห็นภาพชัดเจนมากขึ้นดังรูปที่ 2-16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 ตำแหน่งต่างๆในการหมุนของโรเตอร์

จากรูปที่ 2-16 สมมติ ณ ขณะใดขณะหนึ่งตำแหน่งของโรเตอร์เป็นดังรูป สมมติว่าต้องการให้มอเตอร์หมุนขวา มอเตอร์จะเริ่มหมุนหรือหมุนต่อไปได้ก็ต่อเมื่อสนามแม่เหล็กบนสเตเตอร์จะต้องมีตำแหน่งขั้วเหนืออยู่ระหว่าง 1-5 มอเตอร์จึงจะหมุนขวาตามต้องการ ดังนั้นในวงจรควบคุมจึงต้องมีตัวตรวจจับตำแหน่งขั้วแม่เหล็ก (position sensor) หรือ Hall sensor เป็นตัวบอกกับอินเวอร์เตอร์ว่าขณะนั้นขั้วแม่เหล็กของโรเตอร์อยู่ตรงไหน และอินเวอร์เตอร์จะต้องเปิดวงจรอย่างไร ขั้วแม่เหล็กของสนามแม่เหล็กหมุนจึงจะอยู่ในตำแหน่งที่ต้องการ จากรูปที่ 2-15 จะเห็น position sensor ทำหน้าที่ตรวจจับตำแหน่งของขั้วแม่เหล็กที่เวลาใดๆอยู่ เพื่อให้วงจรควบคุมการจุดชนวนทราบว่าต้องจุดชนวนให้ไทรสเตอร์ตัวไหนทำงาน ดังนั้นจะเห็นว่า การควบคุมในส่วนของอินเวอร์เตอร์นี้จะปฏิบัติตามตำแหน่งของโรเตอร์ ตำแหน่งของ position sensor จึงมีความสำคัญมาก หากผู้ใช้ถอดออกมาและประกอบกลับเข้าไปไม่อยู่ในตำแหน่งเดิม ก็จะมีผลต่อการควบคุมและขนาดกระแสที่ไหลเข้ามอเตอร์

2.4 แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน

หลังจากที่บริษัท Sony เปิดตัวแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนก็ได้รับความสนใจอย่างมากเพราะคุณสมบัติที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ของยานพาหนะได้ แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนรุ่นแรกที่ใช้แนวคิด the rocking chair โดยในโครงสร้างเดิมของวัสดุคาร์บอนที่ใช้ในขั้วลบและสารประกอบลิเทียมเช่น LiCoO_2 จะถูกนำไปใช้กับขั้วบวก ลิเทียมไอออนจะแยกไฟฟ้าเคมีจาก LiCoO_2 ในระหว่างชาร์จของเซลล์ในอิเล็กโทรไลต์และมีการเจือปนคาร์บอนขั้วลบในรูปแบบลิเทียมอัลลอยด์คาร์บอน ในระหว่างการดิสชาร์จลิเทียมไอออนที่สกัดจากอัลลอยด์ผสมจะกลับเข้ามาใน LiCoO_2 อิเล็กตรอนจะสกัดพร้อมกันจากขั้วหนึ่งและฉีดเข้าไปในขั้วไฟฟ้าอื่นๆ ทำการจัดเก็บและการส่งมอบพลังงานไฟฟ้าในระหว่างที่วัสดุที่ออกซิไดซ์หรือถูกทำให้ลดลงในขั้วไฟฟ้าบวกและลบ ลิเทียมไอออนรับส่งระหว่างขั้วไฟฟ้าบวกและลบ จึงเรียกว่า ลิเทียมไอออนแบตเตอรี่

การพัฒนาของอุตสาหกรรมและวิทยาศาสตร์ทำให้แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนเป็นที่ต้องการมากขึ้น ตลาดสนใจในความสามารถประสิทธิภาพ และความปลอดภัยที่มีการขับเคลื่อนการเจริญเติบโตเพื่อตอบสนองความต้องการของตลาดประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนได้เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องโดยแบตเตอรี่สามารถนำไปใช้ในช่วงที่มีความหลากหลายมากขึ้น แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนมี Self-discharge rate ที่ต่ำ (2-8% ต่อเดือน) life cycle ยาวนาน (มากกว่า 1000 cycle) และช่วงอุณหภูมิที่กว้างของการดำเนินงาน (ชาร์จ 20-60 องศา ดิสชาร์จ 40-65 องศา) มีความหลากหลายของขนาดและรูปร่าง เซลล์เดี่ยวมักจะดำเนินการในช่วง 2.5-4.2 V ประมาณสามเท่าของ NiCd หรือ NiMH และทำให้ใช้เซลล์น้อยลงสำหรับแบตเตอรี่เพื่อที่จะจ่ายแรงดันไฟฟ้า แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนที่มีอยู่ในขณะนี้เก็บไฟได้ประมาณ 100 mAh - 2.5 Ah ในแบบพกพา และ 200Ah ในแบบตั้งอยู่กับที่ และแบตเตอรี่มีความสามารถในอัตราที่สูง Discharge ที่ 5C (continuous) หรือ 25C (pulse) ข้อเสียของแบตเตอรี่คือจะแบตเตอรี่เสื่อมเมื่อดิสชาร์จต่ำกว่า 2V และอาจมีการรั่วไหลเมื่อ overcharge เนื่องจากไม่มีอุปกรณ์ป้องกันการ overcharge ข้อเสียอีกอย่างของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนคือจะเกิดการสูญเสียอย่างถาวรที่อุณหภูมิสูง (65 องศาเซลเซียส)

แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนยังคงเป้าหมายของการวิจัยอย่างเข้มข้นโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อนที่จะปรับปรุงคุณสมบัติและลักษณะของแบตเตอรี่ และยังคงคาดว่าในความก้าวหน้าเทคโนโลยีลิเทียมไอออนในทางเลือกที่แรงดันต่ำที่ Li ยอมรับสารประกอบขั้วบวกโดยมีวัตถุประสงค์ของการปรับปรุงลักษณะความปลอดภัยและความจุที่สูงขึ้นการแทนที่ของโคบอลต์ด้วยนิกเกิลหรือแมงกานีสในโครงสร้างแคโทดโดยมีจุดประสงค์ในการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและความจุที่สูงขึ้นการแทนที่ของอิเล็กโทรไลต์ในปัจจุบันที่มีความเสถียรสูงมีวัตถุประสงค์ของการปรับปรุงการออกแบบของแบตเตอรี่และความน่าเชื่อถือ

2.4.1 คุณสมบัติของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน

แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน (Li-ion Battery) เป็นแบตเตอรี่ชนิดประจุไฟฟ้าใหม่ได้ (เซลล์ทุติยภูมิ) ซึ่งนิยมใช้ทั่วไปในทางอิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากมีคุณสมบัติ มีความหนาแน่นของพลังงานสูง ไม่เกิด Memory Effect และมีการคายประจุที่ต่ำเมื่อไม่มีการใช้งาน นอกจากนี้ในทางอิเล็กทรอนิกส์แล้ว แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนยังถูกใช้งานในทางการทหาร รถยนต์พลังงานงานไฟฟ้า และทางด้านการบิน และอวกาศอีกด้วย โดยข้อดีและข้อเสียของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนสามารถสรุปได้ดังแสดงในตาราง 2-1

ตาราง 2.1 ข้อดีและข้อเสียของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน

ข้อดี	ข้อเสีย
<ul style="list-style-type: none"> - ความหนาแน่นของพลังงานและกำลังไฟฟ้าสูง - มีน้ำหนักเบา - อายุการใช้งานยาวนาน และวงจรรอบการใช้งานนานกว่าแบตเตอรี่ชนิดอื่น - มีอัตราการคายประจุตัวเองต่ำ (Low Self-Discharge) เมื่อเทียบกับแบตเตอรี่ชนิดอื่นๆ เช่น ต่ำกว่า NiCd มากถึงครึ่ง - ไม่มี Memory Effect 	<ul style="list-style-type: none"> - ต้องใช้วงจรป้องกันแรงดันและกระแสให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัย - มีการเสื่อมอายุตามเวลาแม้ว่าจะไม่มีการใช้งาน โดยแบตเตอรี่ลิเทียมมีอายุการใช้งานประมาณ 2-3 ปี - อัตราการจ่ายกระแสไม่สูงมาก ไม่เหมาะกับงานที่ใช้โหลดหนักๆ

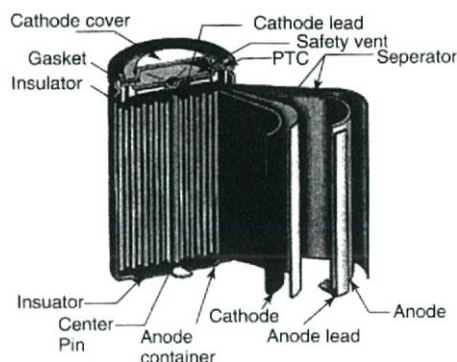
2.4.2 ประเภทและโครงสร้างของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน

ได้รับการพัฒนาในเซลล์ขนาดเล็ก 4 Ah ในขณะที่การกำหนดโครงสร้างกับการสร้าง flat-plate ร่วมกันมากขึ้นในการออกแบบเซลล์ขนาดใหญ่

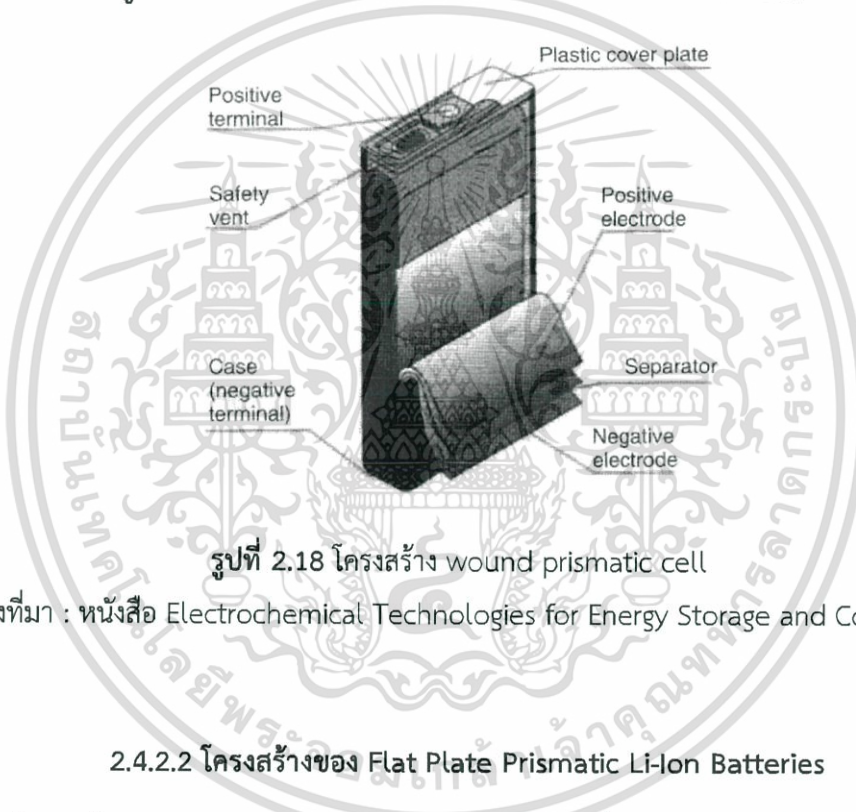
2.4.2.1 โครงสร้างของ Wound Li-Ion Cells

โครงสร้าง cylindrical wound Li ion cell แสดงในรูปที่ 2-17 การสร้าง wound prismatic cells คล้ายกับรูนทรงกระบอกยกเว้นแต่ตัวจับแบบแบนถูกนำมาใช้แทนของตัวจับทรงกระบอก แผนภาพวงจรของ wound prismatic cell จะแสดงในรูปที่ 2-18 โดยปกติแท็บเดียวในตอนท้ายใช้ในการเชื่อมต่อกับ current collectors กรณีที่นิยมใช้เป็นขั้วลบเป็นเหล็กมักจะ Ni เคลือบ เมื่อใช้เป็นขั้วบวก โดยปกติจะใช้อลูมิเนียม ส่วนใหญ่เซลล์ส่วนหัวมีการรวมเอาอุปกรณ์ตัดการเชื่อมต่อ ทำงานได้โดยความดันหรืออุณหภูมิเช่นอุปกรณ์ PTC และเพิ่มความปลอดภัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 ภาพตัดขวางของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนทรงกระบอก



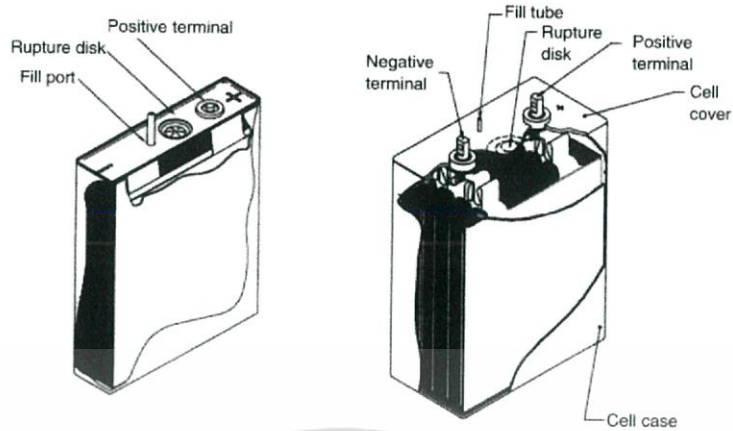
รูปที่ 2.18 โครงสร้าง wound prismatic cell

แหล่งที่มา : หนังสือ Electrochemical Technologies for Energy Storage and Conversion

2.4.2.2 โครงสร้างของ Flat Plate Prismatic Li-Ion Batteries

โครงสร้าง flat-plate prismatic cells แสดงดังในรูปที่ 2-19 เหมือนกับใน wound cell รูปพรรณของ polyethylene (PE) หรือ polypropylene (PPE) ใช้แยกขั้วไฟฟ้าบวกและลบ โดยปกติแต่ละแผ่นในเซลล์มีแท็บและแท็บมีรวมเชื่อมติดกับขั้วของตน กรณีที่เซลล์เป็นเหล็กชุบนิเกิลหรือสแตนเลส 304L cover มักจะประกอบด้วยหนึ่งหรือสองขั้วและ rupture disk ขั้วอาจจะเป็นแก้วกับโลหะสำหรับต้นทุนต่ำประเภทการบีบอัดการใช้งานซิลิโคนนำมาใช้หรือขั้วอาจรวมอุปกรณ์ที่คล้ายกับที่พบในส่วนหัวของผลิตภัณฑ์ทรงกระบอกเพื่อให้ความดันอุณหภูมิและ overcurrent เกินในองค์ประกอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.19 โครงสร้าง flat-plate prismatic cells 7 Ah(เคสเป็นขั้วลบ) และ 40 Ah(เคสเป็นกลาง)
แหล่งที่มา : หนังสือ Electrochemical Technologies for Energy Storage and Conversion

2.4.3 ทฤษฎีและหลักการชาร์จแบตเตอรี่

เครื่องชาร์จแบตเตอรี่เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งจะจ่ายระดับแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าระดับแรงดันของแบตเตอรี่ในขณะที่มีการคายประจุ ในการชาร์จแบตเตอรี่จะให้ขั้วบวกของเครื่องชาร์จต่อเข้ากับขั้วบวกของแบตเตอรี่ และขั้วลบของเครื่องชาร์จ ต่อเข้ากับขั้วลบของแบตเตอรี่โดยที่กระแสที่ทำการชาร์จจะมีทิศทางตรงกันข้ามกับกระแสที่แบตเตอรี่ดังรูปที่ 2-20



รูปที่ 2.20 ทิศทางของกระแสที่ไหลขณะทำการชาร์จ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- กำหนดให้ E คือ แรงดันที่ทำการชาร์จ
- E_c คือ แรงดันที่ขั้วของแบตเตอรี่
- R_i คือ ความต้านทานภายในแบตเตอรี่

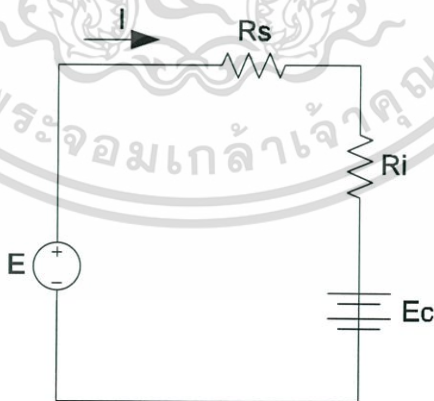
จะได้สมการ
$$E = E_c + IR_i \tag{2.23}$$

$$I = \frac{E - E_c}{R_i} \tag{2.24}$$

เมื่อแรงดันที่แบตเตอรี่มีค่าเท่ากับแรงดันที่ชาร์จ จะไม่มีกระแสไหลในวงจร ถ้าแรงดันที่แบตเตอรี่มีค่าต่ำกว่าแรงดันที่ชาร์จจะทำให้มีกระแสไหล เพื่อเข้าไปชาร์จแบตเตอรี่ แต่ถ้าแรงดันที่แบตเตอรี่สูงกว่าแรงดันที่ชาร์จ จะทำให้กระแสไหลย้อนกลับจากแบตเตอรี่ ค่าความต้านทานภายในของแบตเตอรี่ส่วนมากจะมีค่าน้อย โดยจะมีค่าเปลี่ยนแปลงในขณะที่มีการชาร์จแบตเตอรี่ ซึ่งถ้าหากกระแสในการชาร์จมีปริมาณมากกว่าที่แบตเตอรี่ทนได้ อาจจะทำให้เกิดความเสียหายต่อแบตเตอรี่ได้ จึงมีวิธีแก้โดยการต่อตัวต้านทานแบบอนุกรมเข้าไป ทำให้ปริมาณของกระแสที่ไหลผ่านมีค่าต่ำลง ดังรูปที่ 2-21 จะได้สมการหาค่าความต้านทานจำกัดกระแส

$$I = \frac{E - E_c}{R_i + R_s} \tag{2.25}$$

$$R_s = \frac{E - E_c}{I} - R_i \tag{2.26}$$



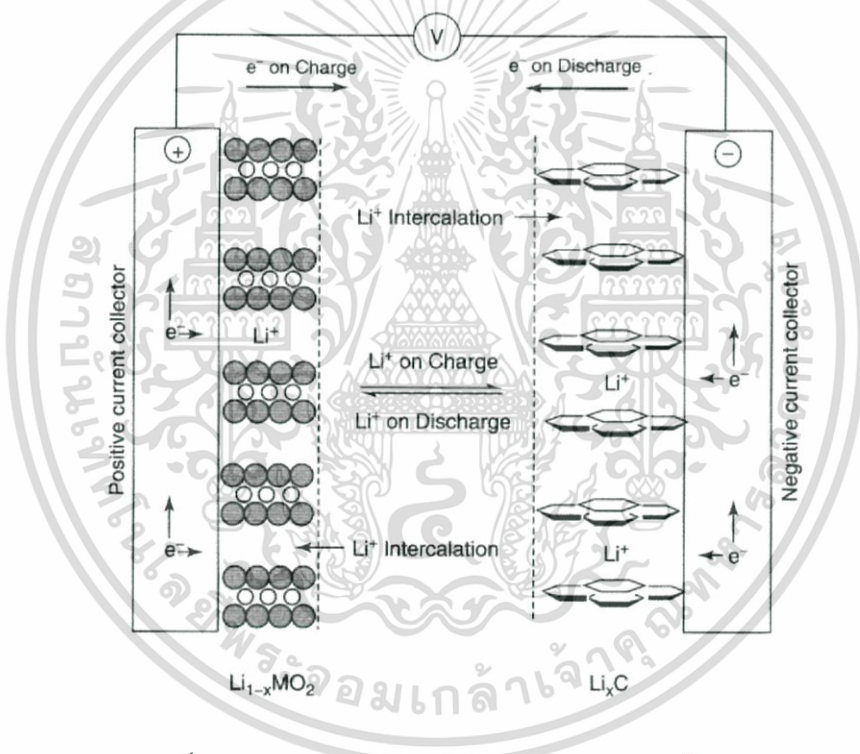
รูปที่ 2.21 วงจรที่มีความต้านทาน R_s ต่ออยู่เพื่อจำกัดกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.4 กระบวนการชาร์จและดิสชาร์จไฟฟ้าในแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน

ระหว่างการชาร์จแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน Li^+ จะนำกระแสไหลจากขั้วลบไปขั้วบวก nonabatte carry electrolyte และ separator ระหว่างการชาร์จไฟแหล่งจ่ายไฟภายนอกไฟฟ้า (วงจรการชาร์จ) ใช้แรงดันไฟฟ้าที่สูง (แต่ของขั้วเดียวกัน) กว่าที่ผลิตจากแบตเตอรี่ ไปบังคับกระแสให้ไหลผ่านในทิศทางตรงกันข้าม แล้วย้ายจากขั้วบวกไปยังขั้วลบที่กลายเป็นฝั่งที่อยู่ในวัสดุอิเล็กโทรดที่มีรูพรุนในกระบวนการที่เรียกว่า Intercalation เมื่อแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนดิสชาร์จ แมทที่เรียลบวกจะลดลงและแมทที่เรียลเชิงลบจะออกซิไดซ์

ซึ่งจะตรงข้ามกับการชาร์จ สมการต่อไปนี้จะใช้ค่าสัมประสิทธิ์ของ x กระบวนการคิดป้อนในแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน จะมีภาพประกอบเพิ่มเติมกราฟในรูปที่ 2-22



รูปที่ 2.22 กระบวนการทางไฟฟ้าเคมีของแบตเตอรี่ Li ion

แหล่งที่มา : หนังสือ Electrochemical Technologies for Energy Storage and Conversion

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.5 การชาร์จแบตเตอรี่

วิธีการชาร์จแบตเตอรี่นั้น สามารถแบ่งได้เป็น 4 วิธี ดังนี้

2.4.5.1 การชาร์จแบบกระแสคงที่ (Constant current charging)

เป็นการชาร์จที่มีประสิทธิภาพมาก ถ้ากระแสที่ชาร์จในแบตเตอรี่มีค่าสูงขึ้น จะทำให้เวลาในการชาร์จน้อยลง แต่ถ้าหากกระแสในการชาร์จสูงเกินไป จะทำให้เกิดผลเสียต่อแบตเตอรี่ คือ ความร้อนที่เกิดขึ้นภายในเซลล์แบตเตอรี่จะสูงขึ้นตามปริมาณของกระแสที่ทำการชาร์จ และทำให้ Active material ของเซลล์เกิดการคอง เกิดรอยร้าว และอาจเกิดการระเบิดได้

2.4.5.2 การชาร์จแบบแรงดันคงที่ (Constant voltage charging)

เวลาที่ใช้ในการชาร์จจะน้อยกว่าการชาร์จแบบกระแสคงที่ ส่วนระยะเวลาในการชาร์จจะเร็วหรือช้าแค่ไหน จะขึ้นอยู่กับความสามารถของเครื่องจ่ายกระแสว่าจ่ายกระแสออกมาอย่างวงจรแบตเตอรี่ได้มากน้อยเพียงใด การชาร์จแบบแรงดันคงที่สามารทำให้เครื่องชาร์จเป็นตัวกำเนิดแรงดันขึ้นมาแล้วป้อนเข้าแบตเตอรี่ แต่การกำเนิดแรงดันอาจมีแรงดันไม่คงที่ตลอดเวลา จึงจำเป็นต้องมีตัวควบคุมแรงดันให้คงที่ เรียกว่า Voltage regulator หรือ วงจรรักษาระดับแรงดัน

2.4.5.3 การชาร์จโดยวิธีการเปลี่ยนระดับกระแส (Tapped current charging)

เป็นวิธีชาร์จที่ไม่ซับซ้อน และมีราคาถูก วงจรชาร์จประกอบด้วยหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง วงจรเรียงกระแส และค่าความต้านทานที่เหมาะสมกับการจำกัดกระแส กระแสที่ใช้ชาร์จนั้นจะมีการกระเพื่อม ซึ่งทำให้แรงดันแบตเตอรี่เปลี่ยนไปด้วย แต่สามารถลดผลได้โดยใช้หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

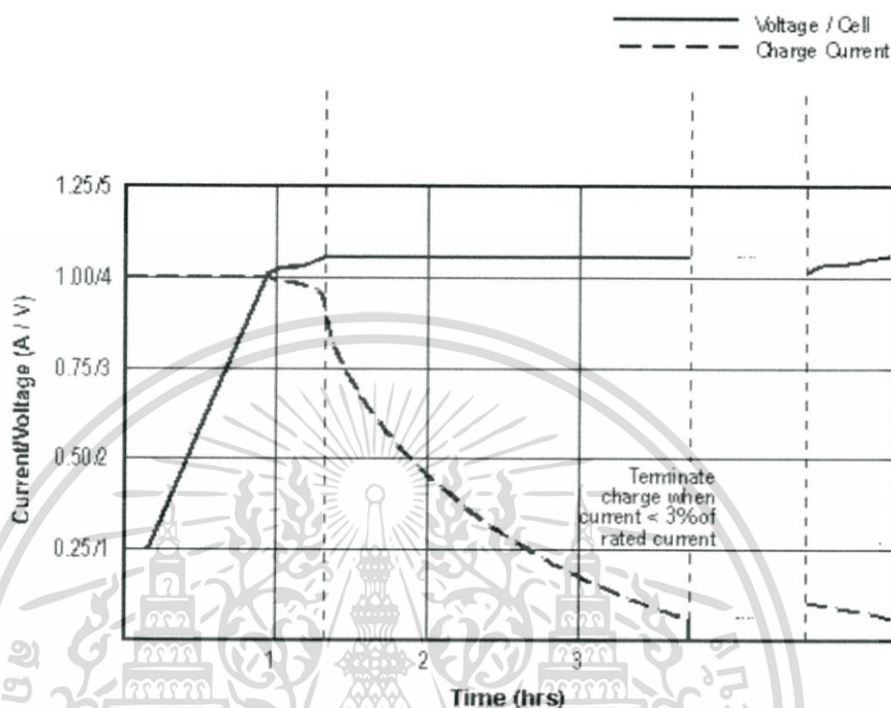
2.4.5.4 การชาร์จด้วยกระแสคงที่และแรงดันคงที่ (Constant current - voltage)

เกิดจากการรวมกันของ 3 วิธี คือการรวมของ Constant current charging, Constant voltage charging และ Occasional topping charging กระบวนการของการชาร์จจะแบ่งเป็น 3 ระยะได้แก่

ระยะที่ 1: การชาร์จด้วยกระแสเต็ม (current limit) จนเซลล์แบตเตอรี่ได้ความต่างศักย์ที่กำหนดไว้ (เกือบเต็ม) ระยะนี้เหมือนเป็นการชาร์จในอัตราเร่ง

ระยะที่ 2 : การชาร์จต่อให้เซลล์แบตเตอรี่แต่ละเซลล์ถึงระดับความต่างศักย์สูงสุด (maximum voltage limit) คล้ายๆกับการค่อยๆเติมประจุ ในระยะนี้กระแสของเครื่องชาร์จที่เข้า cell จะลดลง (ตามรูป เส้นประ) และจะตัดการชาร์จเมื่อกระแสต่ำกว่า 3% ของอัตรากระแสเฉลี่ย

ระยะที่ 3 : การชาร์จแบบเติมเต็มเป็นครั้งๆ (occasional topping charge) เป็นการเติมประจุเป็นครั้งคราว ประมาณ 1 ครั้งทุก 500 ช



รูปที่ 2.23 การประจุแบตเตอรี่

แหล่งที่มา : batteryuniversity.com

2.4.6 State of Charge (SOC) และ The depth of discharge (DOD)

State of charge (SOC) คือเปอร์เซ็นต์ของพลังงานทั้งหมดที่ยังคงสามารถคายประจุ โดยที่ 100% หรือ 1.0 หมายถึงแบตเตอรี่เต็ม และ 0% หรือ 0.0 หมายถึงแบตเตอรี่หมด

แรงดันเมื่อชาร์จแบตเตอรี่เต็ม นั้น จะมีค่า 2.12 ถึง 2.15 volts per cell สำหรับแบตเตอรี่ 2 volt หรือ 12.7 volts สำหรับแบตเตอรี่ 12 volt ที่แบตเตอรี่ 50% จะมีค่า 2.03 volts per cell และที่ 0% จะมีค่า 1.75 volts per cell หรือต่ำกว่านั้น

The depth of discharge (DOD) หรือที่ตรงข้ามกับ SOC คือเปอร์เซ็นต์ของแบตเตอรี่ที่ทำการคายประจุไปแล้ว โดยที่ 100% หมายถึงแบตเตอรี่หมด และ 0% หมายถึงแบตเตอรี่เต็ม การคายประจุที่อย่างน้อย 80% DOD จะใช้เป็นอ้างอิงของการ deep discharge

Discharge cycle ตามที่เข้าใจกันคือการคายประจุออกจากแบตเตอรี่ทั้งหมดแล้วทำการชาร์จแบตเตอรี่ให้เต็มใหม่ แต่ไม่ได้เป็นเช่นนั้นเสมอไป แบตเตอรี่มักจะไม่ได้ทำการคายประจุออกทั้งหมดทุกครั้ง และส่วนใหญ่ใช้เพียง 80 เปอร์เซ็นต์ของการดีสชาร์จเท่านั้น ซึ่งหมายความว่าทำการ

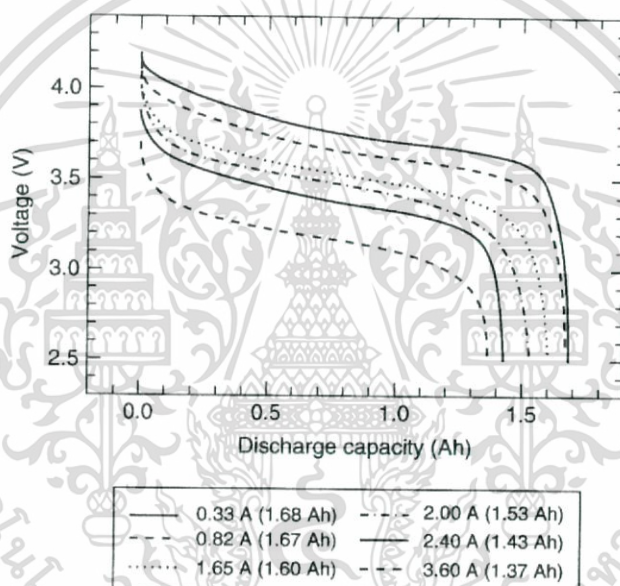
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดิสชาร์จเพียง 80 เปอร์เซ็นต์ของพลังงานที่มีอยู่ และเหลือสำรองไว้ 20 เปอร์เซ็นต์ วัฏจักรของแบตเตอรี่แบบนี้จะทำให้แบตเตอรี่มีอายุการใช้งานยืนยาวกว่าการดิสชาร์จโดยปล่อยประจุทั้งหมด

2.4.7 ค่าคุณลักษณะของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนและการทดสอบ

2.4.7.1 Discharge Rate Capability

อัตราการเก็บความจุของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนจะขึ้นอยู่กับเมททีเรียลไฟฟ้าและการออกแบบของพวกเขาจะแตกต่างกันตามลักษณะการใช้งาน เส้นโค้งดิสชาร์จแบตเตอรี่ 1 C / LiCoO₂ ดิสชาร์จในอัตรา 0.33-3.6A ที่ 21 °C ดังเช่นแสดงในรูปที่ 2-26 ในอัตราที่ต่ำ (C/2) แบตเตอรี่จะให้ 1.67 Ah และที่ 1.65 A. (อัตรา 1C) 1.60



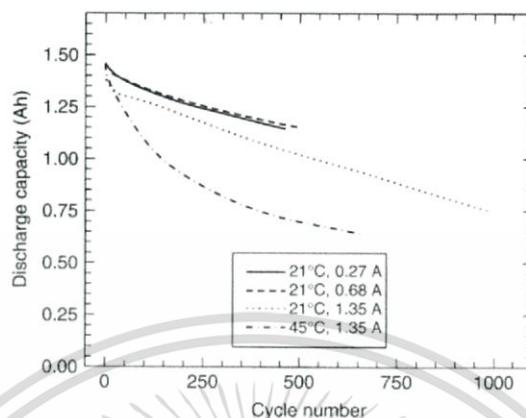
รูปที่ 2.24 การคายประจุของแบตเตอรี่ LiCoO₂ 18650-Type C ที่กระแสต่าง ๆ
แหล่งที่มา : หนังสือ Electrochemical Technologies for Energy Storage and Conversion

2.4.7.2 Cycle Life

ลักษณะที่พึงประสงค์ของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนคือ cycle life ที่ยาวนานและความสามารถในการใช้งานอย่างต่อเนื่องในอุณหภูมิสูง ใช้ผลิตภัณฑ์ 18650 ประเภท C / LiMn₂O₄ แบตเตอรี่เป็นตัวอย่าง ความจุของแบตเตอรี่ประเภท 18650 C / LiMn₂O₄ cycle ที่ 21 หรือ 45C ที่อัตรา 1.05 หรือ 0.2C จะแสดงในรูปที่ 2-27 ที่ 21 °C และ IC rate หลังจาก 75 cycles Fade rate เป็นเชิงเส้นที่ 0.42% ต่อ cycle และที่อัตรา 0.50 ที่ 0.32% ต่อ cycle หลังจาก 500 cycles ที่ IC rate แบตเตอรี่จะส่ง 1.01 Ah หรือ 70% ของความจุเริ่มต้น สำหรับการเปรียบเทียบเซลล์กรณีใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตรา 0.5C ที่ 21 C ส่ง 1.16 Ah หลังจากรอบ 800หรือ 80% ของความจุเริ่มต้นของมัน fade rates จะสูงขึ้น สังเกตจากที่ 45 องศาเซลเซียส

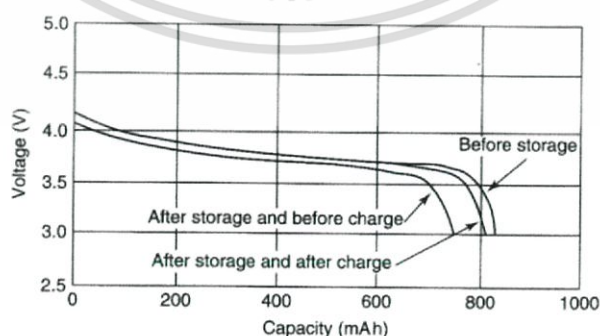


รูปที่ 2.25 ความจุของแบตเตอรี่ 18650-Type C/LiMn₂O₄

แหล่งที่มา : หนังสือ Electrochemical Technologies for Energy Storage and Conversion

1) Storage Performance

เนื่องจากประสิทธิภาพในการจัดเก็บของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนมีความสัมพันธ์กับการผลิตวัสดุและกระบวนการการผลิตไฟฟ้าสิ่งที่ใช้ในการดูลักษณะการประสิทธิภาพการจัดเก็บแบตเตอรี่มี 2 อย่างคือ Self-discharge rate และ capacity recovery after storage การเก็บประจุของแบตเตอรี่อาจถูกกำหนดโดยการดิสชาร์จก่อนเก็บประจุ หลังจากเก็บประจุในสถานะชาร์จ , ดิสชาร์จเป็นตัวกำหนดการดิสชาร์จด้วยตัวมันเองและหลังจากการชาร์จและดิสชาร์จ เป็นตัวกำหนด capacity recovery ผลกระทบเหล่านี้จะถูกแสดงโดยเส้นโค้งดิสชาร์จในรูปที่ 2-28 แสดงแรงดันไฟฟ้า ซึ่งจะลดลงเล็กน้อย (0.1 V) ที่ 20 องศาในขณะที่ self-discharge 10% เกิดขึ้นในช่วงหกเดือนหลังจากที่แบตเตอรี่ถูกชาร์จ 97% ของกำลังการผลิตเดิมที่ถูก



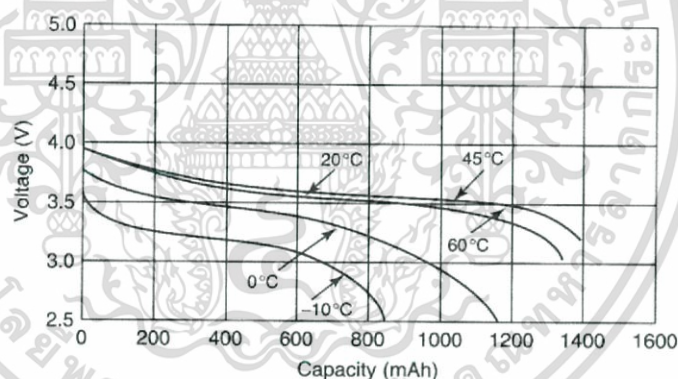
รูปที่ 2.26 การคายประจุของ 17500-type cylindrical C/LiCoC₂

แหล่งที่มา : หนังสือ Electrochemical Technologies for Energy Storage and Conversion

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) ผลกระทบของอุณหภูมิ

ในการปฏิบัติงานเป็นที่รู้กันดีว่าอุณหภูมิมากอาจมีผลต่อแบตเตอรี่ จึงทำการปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์ Li ที่อุณหภูมิตั้งแต่การตรวจสอบใหญ่ครั้งสุดท้ายในปี 1994 วัสดุอิเล็กทรอนิกส์ของเหลวทำปฏิกิริยากับขั้วบวกและขั้วลบและวิธีการปรับปรุงความเสถียรในช่วงอุณหภูมิที่กว้าง ต้องการตัวทำละลายความหนืดต่ำเกือบตลอดเวลาแต่ตัวทำละลายเช่นเอสเทอร์และอีเทอร์ถูกจัดประเภทเป็นตัวทำละลายในเชิงรุก และพวกมันพร้อมที่จะทำปฏิกิริยากับวัสดุขั้วบวก หรือวัสดุไฟฟ้าแรงสูงแคโทด วิธีการหนึ่งที่เสนอโดยชุมชนวิทยาศาสตร์เกี่ยวกับการแก้ปัญหาอิเล็กทรอนิกส์คือการแทนที่ด้วยอิเล็กทรอนิกส์เสถียรภาพมากขึ้น นี่คือนวัตกรรมของ Wound prismatic batteries ที่อุณหภูมิสูงและต่ำการดิสชาร์จประจุของ wound prismatic batteries ถูกระบุด้วยเส้นโค้งปล่อยแสดงในรูปที่ 2-29 เป็น 1.4 Ah ขณะดิสชาร์จที่ 0.945 A (0.7C) และ 45 และ 60 องศาเซลเซียสแบตเตอรี่สูง 1.4 Ah; ที่ 20 องศาเซลเซียส, 1.34 Ah; ที่ 0 องศาเซลเซียส, 1.16 Ah. และ -10 องศาเซลเซียส, 0.85 Ah แรงดันไฟฟ้าโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 20 องศาเซลเซียสเป็น 3.56 V; ที่ 0 ° CC, 3.43 V และที่ -10 องศาเซลเซียส, 3.2 V



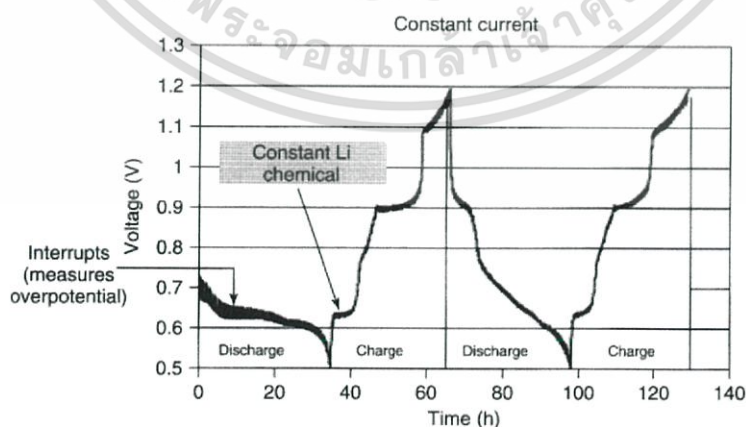
รูปที่ 2.27 การคายประจุเนื่องจากอุณหภูมิ

แหล่งที่มา : หนังสือ Electrochemical Technologies for Energy Storage and Conversion

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.7.3 การทดสอบและการประเมินผล

ส่วนประกอบของลิเทียมแบตเตอรี่ได้แสดงให้เห็นไปแล้ว ลิเทียมแบตเตอรี่เป็นแบตเตอรี่ทันสมัยดังนั้นจึงเป็นสิ่งที่จำเป็นต้องรู้วิธีการทดสอบและการประเมินผลสำหรับแบตเตอรี่ Li วิธีการมาตรฐานในการทดสอบความสามารถของวัสดุเป็นแบบชาร์จไฟซ้ำไฟฟ้าไอออน Li คือการ electrochemically cycle ระหว่างการชาร์จและดิสชาร์จ รวมไปถึงการหาความจุของแบตเตอรี่และอายุการใช้งาน อายุการใช้งานของแบตเตอรี่ขึ้นอยู่กับความมั่นคงของความสัมพันธ์ของแรงดัน/กระแส/ความจุ เป็นฟังก์ชันในรูปของจำนวนรอบ (รูปที่ 2-30) การทดสอบดังกล่าวสามารถดำเนินการได้หลายวิธีเช่นโดยการใช้วิธี flooded and button cells การทดสอบด้วยวิธี button cells เป็นมาตรฐานมากขึ้นและใช้ในห้องปฏิบัติการส่วนใหญ่ขั้นตอนการทดสอบมีดังนี้: ชั้นแรกวัสดุที่ใช้ใช้งานมีการผสมกับสารยึดเกาะ (เช่น 10% PVDF) และมีจำนวนของคาร์บอนน้อย (10%) ทำให้เกิดลามิเนต จากนั้นลามิเนตเคลือบลงบนพอลิโพรพิลีน: ทองแดงทำให้นำไฟฟ้า หลังจากการอบแห้งเป็นตัวทำละลายในเตาอบก็จะเอาออกมาเจาะเป็นรูวงกลมและถ่วงน้ำหนักที่จะได้รับการใช้งานวัสดุที่ใช้ในเซลล์ ประกอบเซลล์ที่ดำเนินการแล้วยกเล็กห้องแห้งโดยใช้ลิเทียมพอลิเมอร์เป็นอิเล็กโทรไลต์ที่แคโทดตัวอย่างของวัสดุของเหลว M 1 LiPF₆ ในอัตราส่วน 1: 1 ของ EC / DEC พลังงานเป็นไปได้อย่างสูงสุดในเซลล์ไฟฟ้าเคมีจะถูกกำหนดโดยการวัดแรงดันไฟฟ้าวงจร การขั้นตอนการทดสอบจะเริ่มต้นด้วยการดิสชาร์จ (หรือชาร์จเซลล์ในกระแสที่อยู่ระหว่างแรงดันไฟฟ้าสูงสุดและต่ำสุด) และเมื่อมันมาถึงแรงดันต่ำสุดที่มันจะได้รับการชาร์จอัตโนมัติ และดำเนินการต่อเนื่อง อัตราของการดิสชาร์จชาร์จสามารถควบคุมโดยการจ่ายกระแสที่แตกต่างกัน จากนั้นซอฟต์แวร์จะช่วยให้พล็อตระหว่างแรงดันและเวลาที่แสดงในรูปที่ 2-30 พล็อตแรงดันไฟฟ้าเมื่อเทียบกับเวลาสำหรับการชาร์จ-ดิสชาร์จ ความจุของเซลล์ที่ผ่านการทดสอบนั้นจะสามารถคำนวณได้สำหรับแต่ละรอบโดยการวัดพื้นที่ใต้เส้นโค้งและหารด้วยน้ำหนักของวัสดุที่ใช้งานเพื่อให้ได้ความจุในหน่วยmAh/gram



รูปที่ 2.28 รูปการคายประจุจากไฟฟ้าเคมี

แหล่งที่มา : หนังสือ Electrochemical Technologies for Energy Storage and Conversion

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 จักรยาน

2.5.1 ประวัติความเป็นมาของจักรยาน

ชาวจีนได้ประดิษฐ์ยานพาหนะทางบกที่มีลักษณะคล้ายรถจักรยานขึ้นเมื่อก่อนคริสต์ศักราช 2300 ปีแต่ไม่มีรายละเอียดเกี่ยวกับลักษณะรูปร่าง ในปี ค.ศ. 1790 ชาวฝรั่งเศสชื่อ Count Mede de Sivrac ได้ประดิษฐ์ยานพาหนะคล้ายรถจักรยาน ประกอบด้วยล้อ 2 ล้อ เชื่อมกันด้วยไม้ ทำเป็นรูป คล้ายหลังม้า และเคลื่อนที่ไปข้างหน้าด้วยการไต่ด้วยเท้า ต่อมาในระหว่างปี ค.ศ. 1816 - 1818 Baron Karl Friedrich von drais de Sauerbrun ชาวเยอรมันได้ปรับปรุงด้วยการเพิ่มอุปกรณ์สำหรับบังคับทิศทางและมีที่นั่งที่มีสปริง และถือว่าเป็นรถจักรยานคันแรกของโลก

ในปี ค.ศ. 1821 นักประดิษฐ์ชาวอังกฤษ ชื่อ นาย Louis Gompertz ได้ปรับปรุงโดยใส่เกียร์ และสลักที่ล้อหน้า แต่ยังคงใช้เท้าไต่ไปบนพื้นซึ่งต่อมา Kirkpatrick MacMillan ช่างทำเกือกม้าชาวสก็อต ได้พัฒนาโดยเลิกการใช้เท้าไต่ไปบนพื้นดิน และใส่ก้านบันไดที่ล้อหน้าผู้ขี่จะปั่นลูกบันไดและบังคับตัวรถโดยเท้าไม่ต้องแตะพื้นดิน ทำให้มีรูปร่างคล้ายรถจักรยานมากขึ้น ในปี ค.ศ. 1860 สองพี่น้อง Pirrel และ Ernest Michaux ชาวฝรั่งเศส ได้ประดิษฐ์รถจักรยานที่มีล้อหน้าและล้อหลังเกือบเท่ากัน และใช้กำลังขับเคลื่อนโดยการติดตั้งก้านบันไดที่ดุมล้อหน้า เรียกว่า Velocipede ในปี ค.ศ. 1880 Humber และคณะได้ผลิตรถจักรยานตัวถังเป็นรูปขนมเปียกปูน ซึ่งเป็นแบบอย่างของจักรยานสมัยปัจจุบันนี้

ในปัจจุบันจักรยานได้มีการพัฒนาขึ้นมา ทั้งรูปแบบ และ วัสดุที่ทำนำมาใช้ผลิตเฟรม และ ส่วนประกอบแล้วแต่จุดประสงค์ว่าจะนำไปใช้ทางด้านไหนวันที่ 22 กันยายน และทุกวันอาทิตย์ตลอดเดือนกันยายนเป็นวันปลอดรถ (Car Free Day) มีการรณรงค์ ให้ประชาชน ลดการใช้รถยนต์ส่วนบุคคล หันมาใช้รถจักรยาน เพื่อลดมลภาวะ และรักษาสิ่งแวดล้อมโลก

2.5.2 การปรับจักรยานให้เข้ากับผู้ใช้ขี่เบื้องต้น

สำหรับการขี่จักรยานการปรับจักรยานให้เข้ากับผู้ใช้ขี่ก็เป็นอีกเรื่องที่สำคัญ การปรับตั้งจักรยานเพื่อให้ตำแหน่งต่างๆของร่างกายเข้ากันกับจักรยานอย่างเหมาะสมเพื่อที่เราจะได้ปั่นอย่างสนุก ผ่อนคลาย ไม่ปวดหลัง อีกทั้งยังให้เราปั่นจักรยานอย่างมีประสิทธิภาพ

2.5.2.1 ความสูงของอาน

การปรับอานจักรยาน ให้ถอดรองเท้า คร่อมจักรยาน ยึดขาให้ตรงในแนวท่อนตั้งของจักรยาน บันไดกับส้นเท้าจะต้องพอดีกัน อย่าสืมเข่าห้ำมงอ ถ้าหากขาอึกก็ปรับเบาให้สูงขึ้น ถ้าหากส้นเท้าไม่ถึงบันไดก็ปรับอานให้ต่ำลงมาเมื่อได้ตั้งนั้นแล้วเวลาเราใส่รองเท้าขาเราจะงอพอดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2.2 ตำแหน่งอาน

ให้เราขึ้นไปนั่งบนอานให้ดี วางเท้าปกติสำหรับการปั่น และให้ถีบบันไดให้ขาบันไดชนานกับพื้น ตำแหน่งที่เหมาะสมคือปลายเข้าของเราจะต้องตรงกับแกนกลางของบันไดในแนวตั้ง ปลายเข้าจะตั้งตรงลงมาที่แกนบันไดซึ่งถือเป็นตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดหากไม่ตรงให้ทำการคลายน็อตที่ยึดอานกับหลักอานแล้วค่อยๆ ใช้มือจับที่อานเลื่อนเข้าเลือกออกจนกว่าจะได้ตำแหน่งที่ถูกต้อง

2.5.2.3 ความสูงของแฮนด์

ระดับความสูงของแฮนด์จักรยานขึ้นอยู่กับความชอบของแต่ละคน และขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของสภาพการปั่น เช่นหากปั่นสบายๆ เพื่อความผ่อนคลาย อาจจะปรับให้สูงหน่อยเพื่อให้หลังตรงในขณะที่ปั่น แต่หากต้องการความเร็วก็ให้ปรับระดับแฮนด์ให้ต่ำเพื่อให้ร่างกายเราก็มต่ำเพื่อลู่อลม ในเบื้องต้นให้เริ่มต้นจากตำแหน่งความสูงของแฮนด์เท่ากับความสูงของอาน จากนั้นเราลองปั่นไปสักระยะเพื่อหาความสูงที่เหมาะสมกับเราซึ่งเป็นตำแหน่งที่ไม่ทำให้เราอึดอัด ปวดเมื่อย

2.5.2.4 มุมตำแหน่งก้านเบรกมือ

ให้ทำการวางนิ้วมือ (นิ้วชี้และนิ้วกลาง) ไว้บนก้านเบรกแล้วลองบีบก้านเบรก ให้สังเกตว่าในขณะที่เราบีบก้านเบรก มือของเราจะต้องอยู่ในแนวเดียวกับแขน ข้อมือจะต้องไม่หักขึ้นหรือลง เมื่อได้ตำแหน่งที่เหมาะสม

บทที่ 3

ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

การทดสอบสมรรถนะของจักรยานไฟฟ้า แบ่งออกเป็น 2 ส่วนตามโครงสร้างของจักรยานไฟฟ้า ได้แก่ การทดสอบมอเตอร์ และการทดสอบแบตเตอรี่

3.1 การทดสอบมอเตอร์

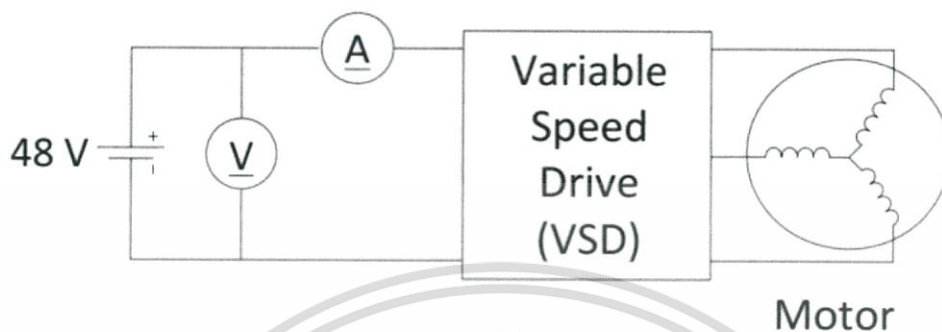
3.1.1 อุปกรณ์

1) ชุด BLDC Motor	2 ชุด
2) โวลต์มิเตอร์	2 เครื่อง
3) แอมมิเตอร์	2 เครื่อง
3) ตัวต้านทานปรับค่าได้	1 เครื่อง
4) แท่นทดสอบมอเตอร์	1 ชุด
5) แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน 48V 12Ahr	2 ชุด
6) ไมล์วัดความเร็วจักรยาน	1 เครื่อง
7) น้ำหนักถ่วง	50-300 kg

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 วิธีการทดสอบ

ตอนที่ 1 การทดสอบกำลังไฟฟ้าของจักรยานไฟฟ้าประเภทสองล้อ ณ เส้นทางทดสอบ

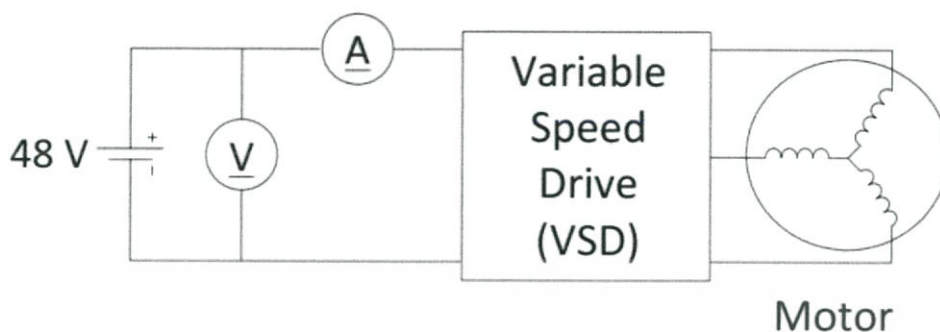


รูปที่ 3.1 วงจรการทดสอบมอเตอร์

1. ติดตั้งอุปกรณ์ดังรูปวงจร 3-1
2. ทำการทดสอบโหลดเริ่มต้น 60 kg ที่ความเร็ว 5km/h, 10km/h, 15km/h และ 20km/h ตามลำดับ
3. สังเกตและบันทึกผลค่าแรงดันไฟฟ้าจากโวลต์มิเตอร์ ค่ากระแสไฟฟ้าจากแอมป์มิเตอร์ และความเร็วรอบที่ความเร็วต่างๆ
4. ทำการทดลองแบบเดิม โดยการเพิ่มโหลดที่มากขึ้นคือ 65kg, 70kg, 75kg, 80kg, 90kg, 95kg และ 100kg ตามลำดับ
5. สังเกตและบันทึกผลค่าแรงดันไฟฟ้าจากโวลต์มิเตอร์ ค่ากระแสไฟฟ้าจากแอมป์มิเตอร์ และความเร็วรอบที่ความเร็วต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตอนที่ 2 การทดสอบกำลังไฟฟ้าของจักรยานไฟฟ้าประเภทสามล้อ ณ เส้นทางทดสอบ

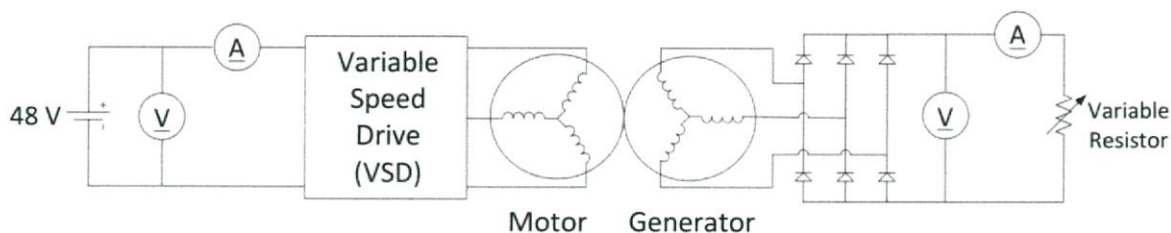


รูปที่ 3.2 วงจรการทดสอบมอเตอร์

1. ติดตั้งอุปกรณ์ดังรูปวงจร 3-2
2. ทำการทดสอบโหลดเริ่มต้น 100 kg ที่ความเร็ว 5km/h, 10km/h, 15km/h และ 20km/h ตามลำดับ
3. สังเกตและบันทึกผลค่าแรงดันไฟฟ้าจากโวลต์มิเตอร์ ค่ากระแสไฟฟ้าจากแอมป์มิเตอร์ และความเร็วรอบที่ความเร็วต่างๆ
4. ทำการทดลองแบบเดิม โดยการเพิ่มโหลดที่มากขึ้นคือ 150kg, 200kg, 250kg และ 300kg ตามลำดับ
5. สังเกตและบันทึกผลค่าแรงดันไฟฟ้าจากโวลต์มิเตอร์ ค่ากระแสไฟฟ้าจากแอมป์มิเตอร์ และความเร็วรอบที่ความเร็วต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตอนที่ 3 การทดสอบกำลังไฟฟ้าของจักรยานทั่วไปบนแท่นทดสอบ



รูปที่ 3.3 วงจรวัดค่าพารามิเตอร์บนแท่นทดสอบ

1. ติดตั้งอุปกรณ์ดังรูปวงจร 3-3
2. ทำการทดสอบ โดยการปรับค่าความต้านทานคงที่ 100 โอห์ม
3. ทำการทดสอบโหลดเริ่มต้น 60 kg ที่ความเร็ว 5km/h, 10km/h, 15km/h และ 20km/h ตามลำดับ
4. สังเกตและบันทึกผลค่าแรงดันไฟฟ้าขาเข้าแรงดันไฟฟ้าขาออกจากโวลต์มิเตอร์ ค่ากระแสไฟฟ้าขาเข้ากระแสไฟฟ้าขาออกจากแอมป์มิเตอร์ และความเร็วรอบที่ความเร็วต่างๆ
5. ทำการทดลองแบบเดิม โดยการเพิ่มโหลดที่มากขึ้นคือ 65kg, 70kg, 75kg, 80kg, 90kg, 95kg และ 100kg ตามลำดับ
6. สังเกตและบันทึกผลค่าแรงดันไฟฟ้าขาเข้าแรงดันไฟฟ้าขาออกจากโวลต์มิเตอร์ ค่ากระแสไฟฟ้าขาเข้ากระแสไฟฟ้าขาออกจากแอมป์มิเตอร์ และความเร็วรอบที่ความเร็วต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การทดสอบแบตเตอรี่

3.2.1 อุปกรณ์

1) แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน 48 V 12 Ah	2 ชุด
2) ความต้านทานปรับค่าได้	1 ตัว
3) โวลต์มิเตอร์	1 เครื่อง
4) แอมป์มิเตอร์	1 เครื่อง
5) นาฬิกาจับเวลา	1 เรือน

3.2.2 วิธีการทดสอบ



1. ติดตั้งอุปกรณ์ตามรูปวงจร 3-4
2. ทำการทดลองการคายประจุที่ 0.1C โดยการปรับค่าความต้านทานไว้ที่ 40 โอห์ม
3. เปิดสวิตช์แบตเตอรี่เพื่อเริ่มคายประจุและจับเวลา
4. ควบคุมให้ค่ากระแสไฟฟ้ามีค่า 1.2 A โดยการปรับที่ความต้านทานปรับค่าได้
5. สังเกต บันทึกผลค่าแรงดันไฟฟ้าจากโวลต์มิเตอร์ และค่ากระแสไฟฟ้าจากแอมป์มิเตอร์ ในทุกๆ 2 นาที
6. ใช้วงจรเดิมในการทดลองการคายประจุที่ 0.2C , 0.5C และ 1C
7. ที่การคายประจุ 0.2C จะควบคุมค่าความต้านทานไว้ที่ 20 โอห์ม เพื่อให้กระแสคงที่ที่ 2.4 A
8. ที่การคายประจุ 0.5C จะควบคุมค่าความต้านทานไว้ที่ 8 โอห์ม เพื่อให้กระแสคงที่ที่ 6 A
9. ที่การคายประจุ 1C จะควบคุมค่าความต้านทานไว้ที่ 4 โอห์ม เพื่อให้กระแสคงที่ที่ 12 A
10. สังเกต บันทึกผลค่าแรงดันไฟฟ้าจากโวลต์มิเตอร์ และค่ากระแสไฟฟ้าจากแอมป์มิเตอร์ใน ทุกๆ 2 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

11. เปลี่ยนแบตเตอรี่อีกชุดมาทดลอง และทดลองตามเดิม
12. หาค่าพลังงานของแบตเตอรี่ โดยคำนวณจากพื้นที่ใต้กราฟของค่ากำลังไฟฟ้ากับเวลา
13. ประมาณค่าเวลาสำหรับการใช้งานจักรยานไฟฟ้าอย่างต่อเนื่อง โดยการนำค่าพลังงานการคายประจรรวมไปเทียบกับค่ากำลังไฟฟ้าขาเข้าของแบตเตอรี่ ที่ความเร็ว 5 km/h – 20 km/h และภาระทางกล 60 – 100 kg



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลอง

ผลการทดสอบสมรรถนะของจักรยานไฟฟ้า สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน ได้แก่ มอเตอร์ไฟฟ้าและแบตเตอรี่

4.1 มอเตอร์ไฟฟ้า

การทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้า จะเป็นการทดสอบสมรรถนะทางไฟฟ้าของมอเตอร์ BLDC ในจักรยานไฟฟ้าที่ค่าความเร็วและภาระทางกลต่างๆ โดยจะแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ตอน ได้แก่ การทดสอบจักรยานไฟฟ้าทั่วไปบนพื้นราบ , การทดสอบจักรยานไฟฟ้าสามล้อ (บรรทุกภาระทางกลเยอะ) บนพื้นราบ , และการทดสอบจักรยานไฟฟ้าทั่วไปบนแท่นทดสอบ

ตอนที่ 1 การทดสอบจักรยานไฟฟ้าประเภทสองล้อ ณ เส้นทางทดสอบ

- ที่ 5 km/h

ตารางที่ 4.1 ค่าที่ได้จากการทดสอบสมรรถนะของจักรยานไฟฟ้าประเภทสองล้อ ณ ความเร็ว 5 km/h ที่ค่าภาระทางกลต่าง ๆ

Load (kg)	Speed (km/h)	V_{in} (V)	I_{in} (A)	P_{in} (W)
60	5.3	54.10	0.67	36.25
65	5.4	54.30	0.72	39.10
70	5.4	54.20	0.75	40.65
75	5.2	54.20	0.90	48.78
80	5.3	53.60	0.93	49.85
85	5.5	53.50	0.96	51.36
90	5.2	53.50	0.99	52.97
95	5.2	53.40	1.00	53.40
100	5.2	53.20	1.15	61.18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ที่ 10 km/h

ตารางที่ 4.2 ค่าที่ได้จากการทดสอบสมรรถนะของจักรยานไฟฟ้าประเภทสองล้อ ณ ความเร็ว 10 km/h ที่ค่าภาระทางกลต่างๆ

Load (kg)	Speed (km/h)	V_{in} (V)	I_{in} (A)	P_{in} (W)
60	9.6	54.00	0.96	51.84
65	10.5	54.30	1.07	58.10
70	10.2	54.20	1.24	67.21
75	9.8	53.90	1.37	73.84
80	9.8	53.70	1.45	77.87
85	10.5	53.30	1.51	80.48
90	10.3	53.15	1.58	83.98
95	10.5	53.10	1.65	87.62
100	10	53.00	1.70	90.10

- ที่ 15 km/h

ตารางที่ 4.3 ค่าที่ได้จากการทดสอบสมรรถนะของจักรยานไฟฟ้าประเภทสองล้อ ณ ความเร็ว 15 km/h ที่ค่าภาระทางกลต่างๆ

Load (kg)	Speed (km/h)	V_{in} (V)	I_{in} (A)	P_{in} (W)
60	15.5	53.90	1.44	77.62
65	14.3	54.30	1.68	91.22
70	15.2	54.10	1.85	100.09
75	14.7	53.60	1.96	105.06
80	15.1	53.30	2.11	112.46
85	15	53.00	2.20	116.60
90	15.2	52.90	2.27	120.08
95	14.9	52.90	2.37	125.37
100	15.1	52.70	2.52	132.80

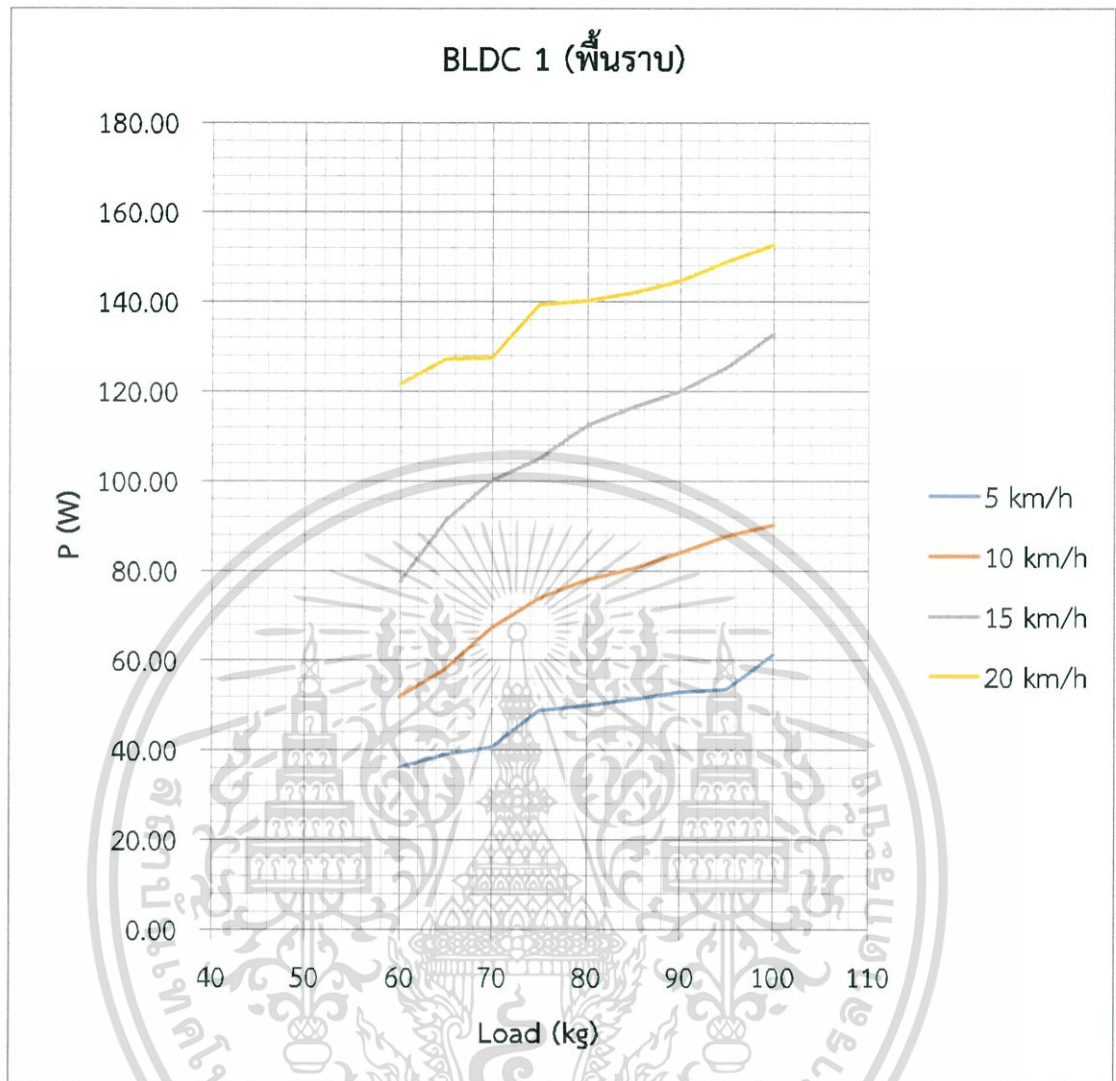
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ที่ 20 km/h

ตารางที่ 4.4 ค่าที่ได้จากการทดสอบสมรรถนะของจักรยานไฟฟ้าประเภทสองล้อ ณ ความเร็ว 20 km/h ที่ค่าภาระทางกลต่างๆ

Load (kg)	Speed (km/h)	V_{in} (V)	I_{in} (A)	P_{in} (W)
60	20.8	53.80	2.26	121.59
65	20.2	53.90	2.36	127.20
70	20	53.10	2.40	127.44
75	20.2	53.60	2.60	139.36
80	19.3	53.50	2.62	140.17
85	19.7	52.60	2.70	142.02
90	20.2	52.60	2.75	144.65
95	20.1	52.60	2.83	148.86
100	20.3	52.60	2.90	152.54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างภาระทางกลกับกำลังไฟฟ้าที่ค่าความเร็วต่างๆของจอร์ยานไฟฟ้า ประเภทสองล้อ ณ เส้นทางทดสอบ

จากรูปที่ 4-1 พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างค่าภาระทางกลกับกำลังไฟฟ้าเป็นแบบเพิ่มขึ้นอย่างเชิงเส้น โดยค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามภาระทางกลของมอเตอร์ นอกจากนี้ค่ากำลังไฟฟ้ายังขึ้นอยู่กับค่าความเร็วของมอเตอร์ โดยเมื่อมอเตอร์ขับเคลื่อนด้วยความเร็วสูงขึ้น ที่ภาระทางกลเดียวกันกำลังไฟฟ้าที่ใช้จะมีค่ามากขึ้น

ตอนที่ 2 การทดสอบจักรยานไฟฟ้าประเภทสามล้อ ณ เส้นทางทดสอบ

- ที่ 5 km/h

ตารางที่ 4.5 ค่าที่ได้จากการทดสอบสมรรถนะของจักรยานไฟฟ้าประเภทสามล้อ ณ ความเร็ว 5 km/h ที่ค่าภาระทางกลต่างๆ

Load (kg)	Speed (km/h)	V_{in} (V)	I_{in} (A)	P_{in} (W)
100	5.2	53.3	0.72	38.376
150	5.2	52.9	0.92	48.668
200	5.2	53.9	1.4	75.46
250	4.9	51.7	1.75	90.475
300	5.2	51.2	1.95	99.84

- ที่ 10 km/h

ตารางที่ 4.6 ค่าที่ได้จากการทดสอบสมรรถนะของจักรยานไฟฟ้าประเภทสามล้อ ณ ความเร็ว 10 km/h ที่ค่าภาระทางกลต่างๆ

Load (kg)	Speed (km/h)	V_{in} (V)	I_{in} (A)	P_{in} (W)
100	10	53	1.55	82.15
150	10.3	52.8	2.11	111.408
200	10.2	52.1	2.4	125.04
250	10.7	51.5	2.72	140.08
300	10.3	50.9	3.06	155.754

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ที่ 15 km/h

ตารางที่ 4.7 ค่าที่ได้จากการทดสอบสมรรถนะของจักรยานไฟฟ้าประเภทสามล้อ ณ ความเร็ว 15 km/h ที่ค่าภาระทางกลต่างๆ

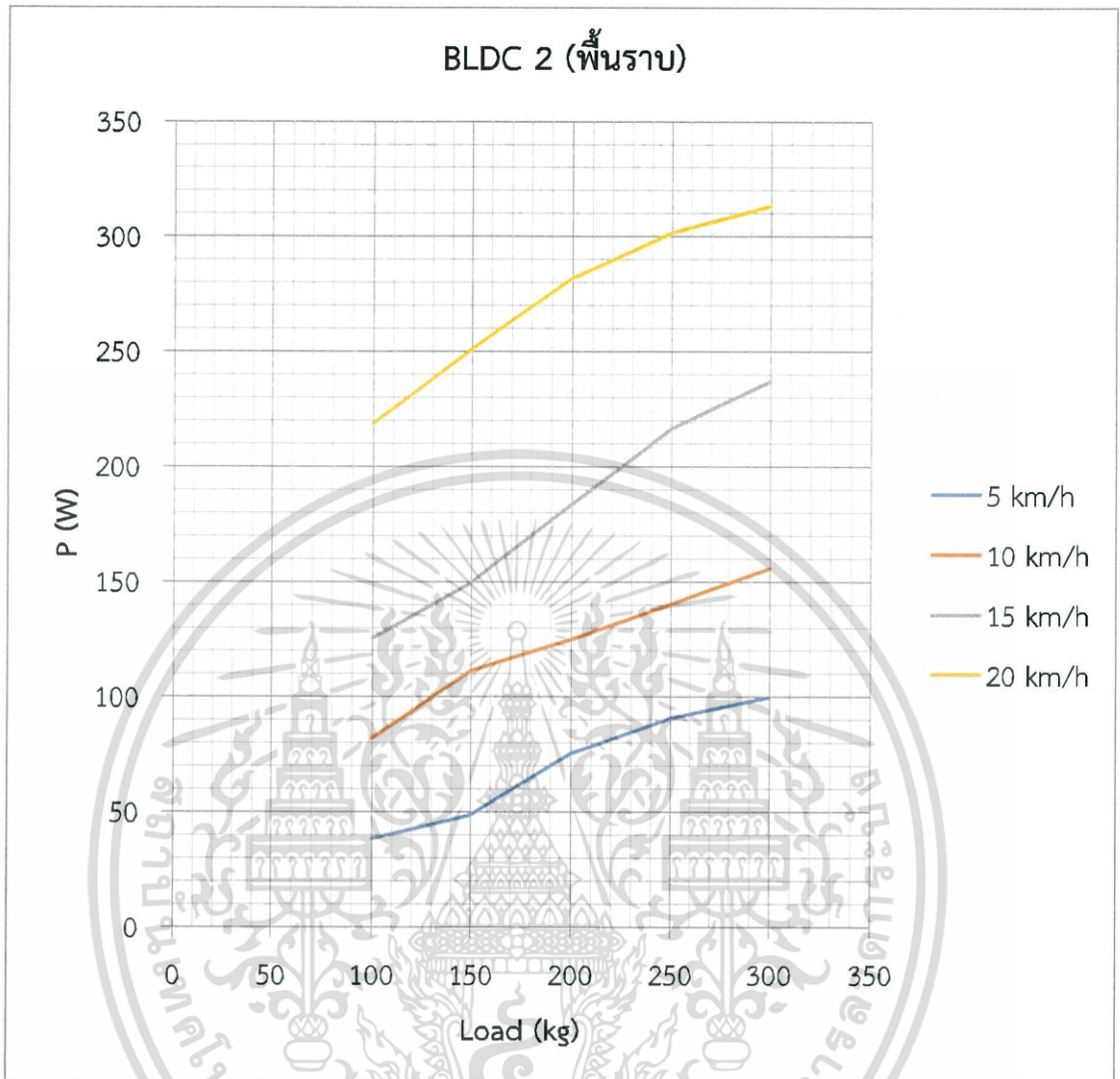
Load (kg)	Speed (km/h)	V_{in} (V)	I_{in} (A)	P_{in} (W)
100	14.8	52.5	2.39	125.475
150	15.3	52.5	2.85	149.625
200	14.6	51.6	3.56	183.696
250	14.7	51	4.24	216.24
300	14.6	50.4	4.7	236.88

- ที่ 20 km/h

ตารางที่ 4.8 ค่าที่ได้จากการทดสอบสมรรถนะของจักรยานไฟฟ้าประเภทสามล้อ ณ ความเร็ว 20 km/h ที่ค่าภาระทางกลต่างๆ

Load (kg)	Speed (km/h)	V_{in} (V)	I_{in} (A)	P_{in} (W)
100	20.2	51.8	4.22	218.596
150	20.2	51.2	4.9	250.88
200	20	48.6	5.8	281.88
250	19.4	46.5	6.48	301.32
300	20	47.3	6.62	313.126

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างภาระทางกลกับกำลังไฟฟ้าที่ค่าความเร็วต่างๆของจักรยานไฟฟ้าประเภทสามล้อ ณ เส้นทางทดสอบ

จากรูปที่ 4-2 ที่ความเร็วเดียวกัน เมื่อเพิ่มภาระทางกลให้แก่มอเตอร์ กำลังไฟฟ้าที่ใช้จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามขนาดภาระทางกลโดยมีแนวโน้มความสัมพันธ์แบบเส้นตรงเช่นเดียวกับตอนที่ 1 แม้ว่าภาระทางกลจะเพิ่มขึ้นถึง 300 kg ก็ตาม

ตอนที่ 3 การทดสอบจักรยานไฟฟ้าประเภทสองล้อบนแท่นทดสอบ

- ที่ 5 km/h

ตารางที่ 4.9 ค่าที่ได้จากการทดสอบสมรรถนะของจักรยานไฟฟ้าประเภทสองล้อ ณ ความเร็ว 5 km/h ที่ค่าภาระทางกลต่างๆบนแท่นทดสอบ

Load (kg)	Speed (km/h)	V _{in} (V)	I _{in} (A)	P _{in} (W)	V _{out} (V)	I _{out} (I)	P _{out} (W)	Eff (%)
0	5.2	52.60	0.50	26.30	6.25	0.10	0.63	2.38
60	4.9	52.50	0.65	34.13	6.50	0.10	0.65	1.90
65	5.4	52.30	0.70	36.61	7.00	0.10	0.70	1.91
70	5	52.13	0.73	38.05	6.75	0.10	0.68	1.77
75	4.9	52.02	0.75	39.02	7.50	0.10	0.75	1.92
80	5.2	51.91	0.80	41.53	7.00	0.10	0.70	1.69
85	4.9	51.82	0.83	43.01	6.25	0.10	0.63	1.45
90	5.1	51.71	0.85	43.95	6.75	0.10	0.68	1.54
95	5.3	51.66	0.87	44.94	7.00	0.10	0.70	1.56
100	4.9	51.51	0.90	46.36	7.00	0.10	0.70	1.51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ที่ 10 km/h

ตารางที่ 4.10 ค่าที่ได้จากการทดสอบสมรรถนะของจักรยานไฟฟ้าประเภทสองล้อ ณ ความเร็ว 10 km/h ที่ค่าภาระทางกลต่างๆบนแท่นทดสอบ

Load (kg)	Speed (km/h)	V _{in} (V)	I _{in} (A)	P _{in} (W)	V _{out} (V)	I _{out} (I)	P _{out} (W)	Eff (%)
0	10.2	52.56	1.00	52.56	16.25	0.18	2.84	5.41
60	10.2	51.32	1.25	64.15	15.50	0.18	2.71	4.23
65	10	52.09	1.30	67.72	15.50	0.18	2.71	4.01
70	10.2	51.92	1.35	70.09	15.75	0.18	2.76	3.93
75	10.1	51.82	1.40	72.55	15.50	0.18	2.71	3.74
80	10	51.69	1.45	74.95	16.00	0.18	2.80	3.74
85	10.3	51.59	1.50	77.39	16.00	0.18	2.80	3.62
90	10.1	51.52	1.50	77.28	15.50	0.18	2.71	3.51
95	10.1	51.41	1.60	82.26	15.50	0.18	2.71	3.30
100	10.1	51.24	1.75	89.67	15.50	0.18	2.71	3.02

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ที่ 15 km/h

ตารางที่ 4.11 ค่าที่ได้จากการทดสอบสมรรถนะของจักรยานไฟฟ้าประเภทสองล้อ ณ ความเร็ว 15 km/h ที่ค่าภาระทางกลต่างๆบนแท่นทดสอบ

Load (kg)	Speed (km/h)	V _{in} (V)	I _{in} (A)	P _{in} (W)	V _{out} (V)	I _{out} (I)	P _{out} (W)	Eff (%)
0	15.3	52.35	1.55	81.14	25.00	0.25	6.25	7.70
60	15	52.09	1.88	97.67	24.00	0.25	6.00	6.14
65	15.3	51.80	2.05	106.19	25.00	0.25	6.25	5.89
70	15.1	51.70	2.05	105.99	24.75	0.25	6.19	5.84
75	14.9	51.56	2.10	108.28	24.00	0.25	6.00	5.54
80	14.9	51.46	2.15	110.64	24.00	0.25	6.00	5.42
85	15.1	51.35	2.25	115.54	24.50	0.25	6.13	5.30
90	15.1	51.27	2.30	117.92	24.25	0.25	6.06	5.14
95	14.9	51.14	2.45	125.29	24.00	0.25	6.00	4.79
100	15	51.08	2.50	127.70	24.00	0.25	6.00	4.70

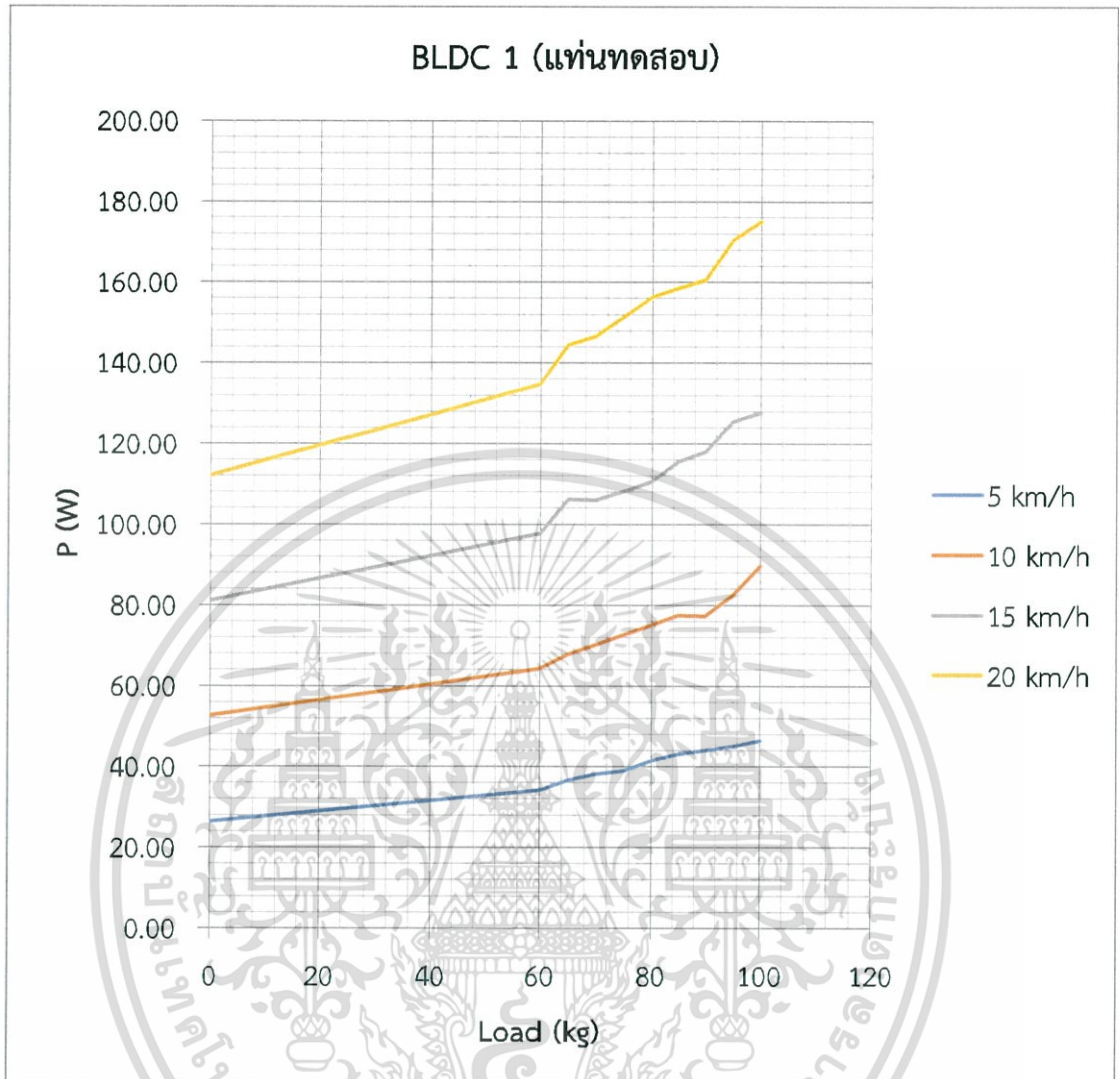
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ที่ 20 km/h

ตารางที่ 4.12 ค่าที่ได้จากการทดสอบสมรรถนะของจักรยานไฟฟ้าประเภทสองล้อ ณ ความเร็ว 20 km/h ที่ค่าภาระทางกลต่างๆบนแท่นทดสอบ

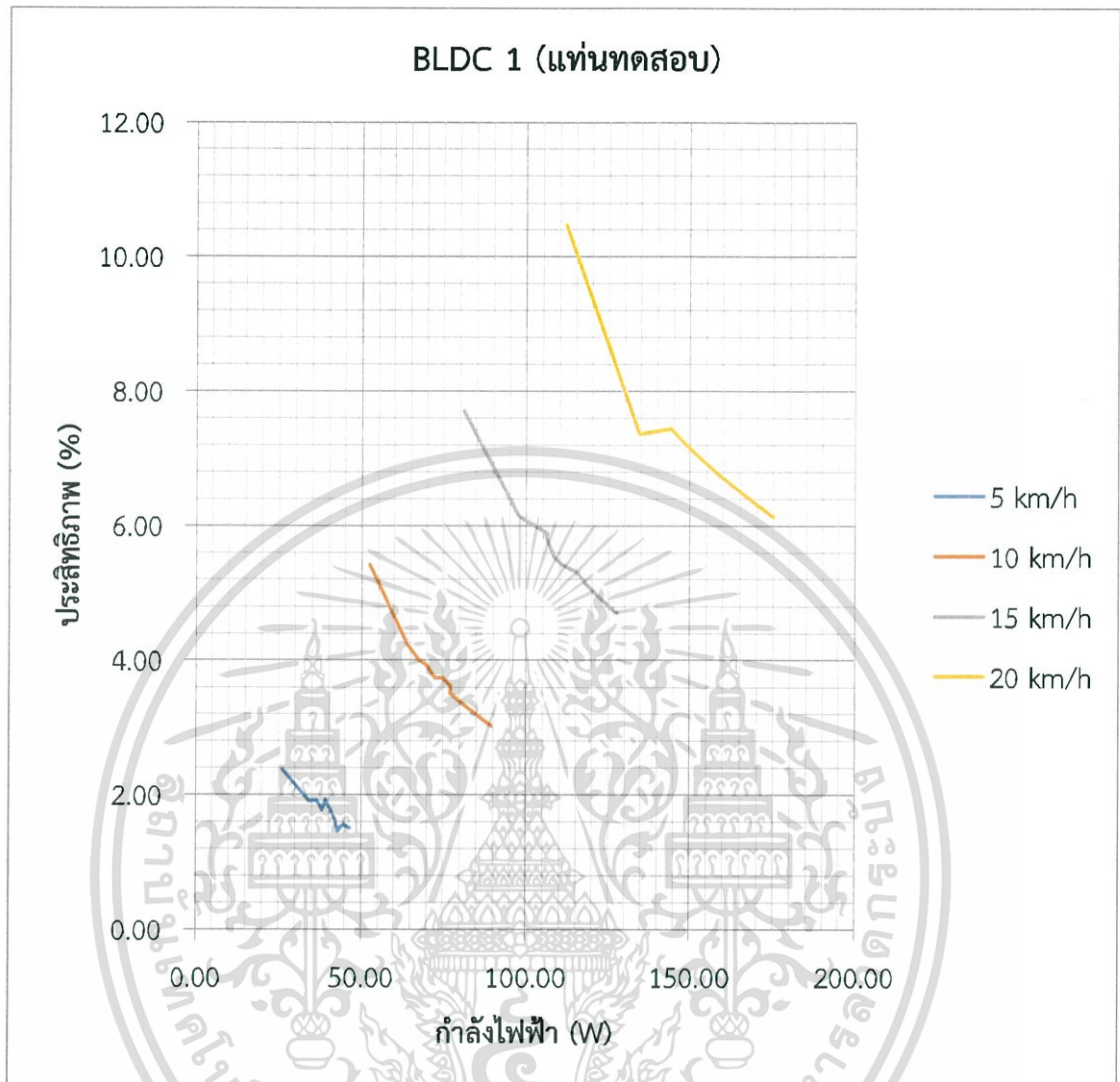
Load (kg)	Speed (km/h)	V _{in} (V)	I _{in} (A)	P _{in} (W)	V _{out} (V)	I _{out} (I)	P _{out} (W)	Eff (%)
0	20	52.08	2.15	111.97	33.50	0.35	11.73	10.47
60	19.9	51.75	2.60	134.55	33.00	0.30	9.90	7.36
65	20	51.52	2.80	144.26	33.00	0.33	10.73	7.43
70	20	51.42	2.85	146.55	33.00	0.33	10.73	7.32
75	20	51.32	2.95	151.39	33.00	0.33	10.73	7.08
80	20	51.19	3.05	156.13	33.00	0.33	10.73	6.87
85	20	51.09	3.10	158.38	33.00	0.33	10.73	6.77
90	20.1	50.99	3.15	160.62	33.00	0.33	10.73	6.68
95	20	50.88	3.35	170.45	33.00	0.33	10.73	6.29
100	20	50.71	3.45	174.95	33.00	0.33	10.73	6.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



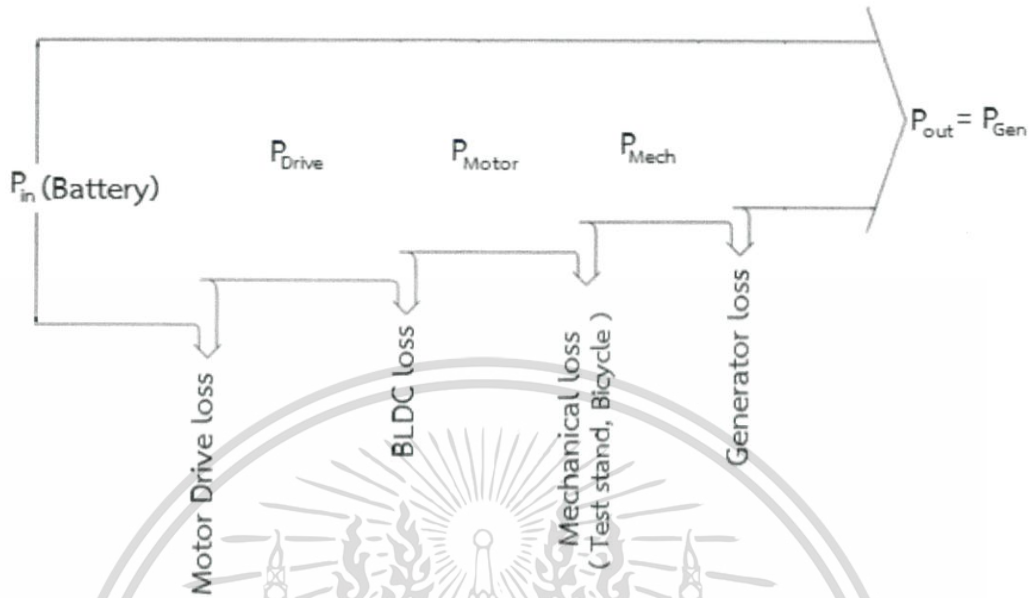
รูปที่ 4-3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างภาระทางกลกับกำลังไฟฟ้าที่ค่าความเร็วต่างๆของจักรยานไฟฟ้าประเภทสองล้อ บนแท่นทดสอบ

จากรูปที่ 4-3 เมื่อเพิ่มภาระทางกลให้แก่มอเตอร์ที่ความเร็วเดียวกันค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้จะเพิ่มขึ้นแบบเส้นตรงเช่นเดียวกับตอนที่ 1 แต่ค่ากำลังไฟฟ้าขาเข้าของมอเตอร์จะไม่เท่ากับตอนที่ 1 เนื่องจากระบบของตอนนี้เป็นการทดสอบบนแท่นทดสอบ



รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าขาเข้ากับค่าประสิทธิภาพที่ค่าความเร็วต่างๆ ของจกัรยานไฟฟ้าประเภทสองล้อ

จากรูปที่ 4-4 ค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้าที่ความเร็วเดียวกัน เมื่อเพิ่มภาระทางกลหรือทำให้กำลังไฟฟ้าขาเข้ามีค่ามากขึ้น ค่าประสิทธิภาพจะลดลง แต่เมื่อเพิ่มความเร็ว ค่าประสิทธิภาพจะเพิ่มขึ้น จากผลการทดลอง ค่าประสิทธิภาพสูงสุดมีค่าเพียง 10.47 % สำหรับการทดสอบที่ 20 km/h กำลังไฟฟ้าขาเข้า 111.97 W เนื่องจากค่าพิกัดกำลังไฟฟ้าของมอเตอร์คือ 1000 W แต่กำลังไฟฟ้าที่ใช้มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับค่าพิกัดของมอเตอร์ จึงทำให้ค่าประสิทธิภาพมีค่าต่ำ



รูปที่ 4.5 Power flow ของระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 แบตเตอรี่

การทดสอบแบตเตอรี่ จะเป็นการทดสอบการคายประจุที่ Capacity Rate ต่างๆ ของ แบตเตอรี่ค่าพิกัด 48 V 12 Ah เหมือนกัน 2 ชุด โดยจะแบ่งออกเป็น 4 ตอน ได้แก่ การคายประจุที่ 1C , 0.5C, 0.2C และ 0.1C

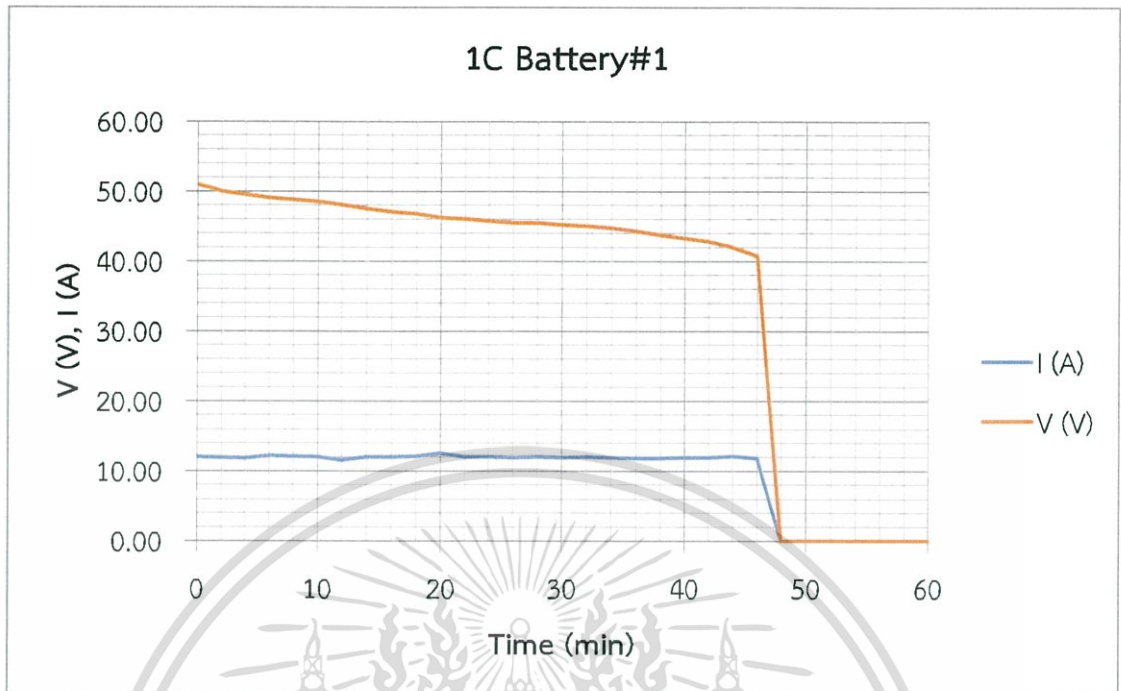
ตอนที่ 1 ทดสอบการคายประจุที่ 1C

- แบตเตอรี่ชุดที่ 1

ตารางที่ 4.13 ค่ากระแสและแรงดันของแบตเตอรี่ 1 ขณะคายประจุที่ 1C

Time (min)	I (A)	V (V)	Time (min)	I (A)	V (V)
0	12.00	51.00	32	12.00	45.00
2	11.90	50.00	34	11.90	44.75
4	11.80	49.50	36	11.80	44.25
6	12.20	49.00	38	11.85	43.75
8	12.05	48.75	40	11.90	43.25
10	12.00	48.50	42	11.90	42.75
12	11.50	48.00	44	12.05	42.00
14	12.00	47.50	46	11.80	40.75
16	11.95	47.00	48	0.00	0.00
18	12.10	46.75	50	0.00	0.00
20	12.50	46.25	52	0.00	0.00
22	11.95	46.00	54	0.00	0.00
24	12.00	45.75	56	0.00	0.00
26	11.90	45.50	58	0.00	0.00
28	12.00	45.50	60	0.00	0.00
30	11.90	45.25	62	0.00	0.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 กระแสกับแรงดันที่เวลาต่างๆ ในการคายประจุที่ 1C ของแบตเตอรี่ชุดที่ 1

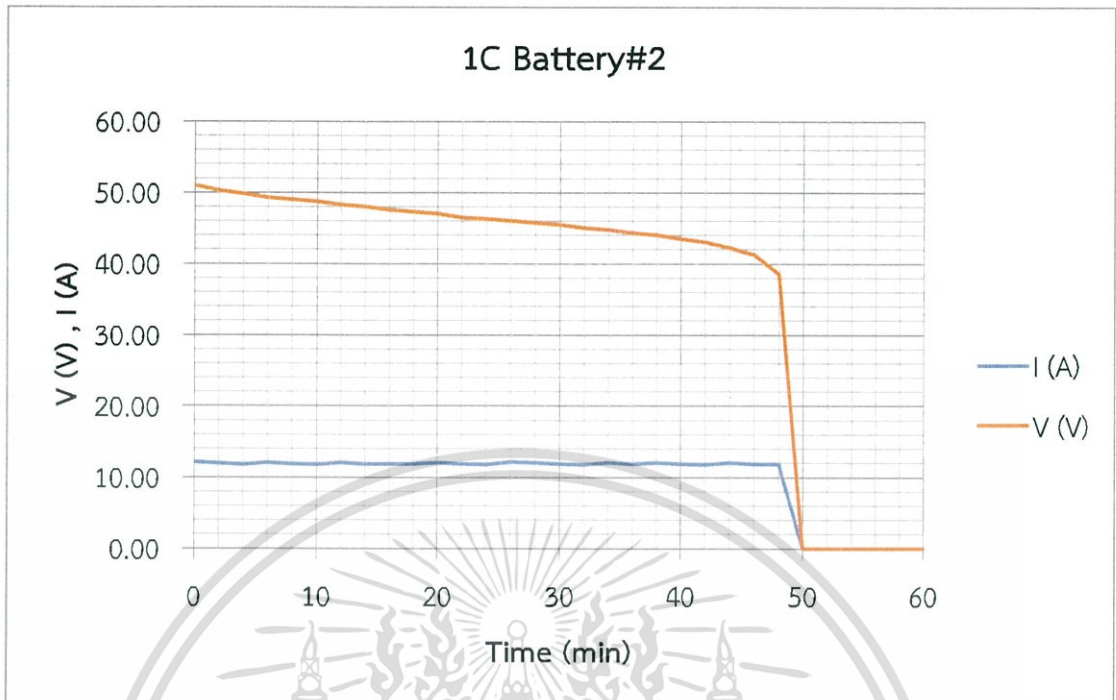
การทดสอบแบตเตอรี่ชุดที่ 1 ที่ 1C ค่าแรงดันจะลดลงอย่างเชิงเส้นจากนาทีที่ 0 - 44 และจ่ายแรงดันลดลงอย่างรวดเร็ว (deep discharge) ในช่วงนาทีที่ 44 - 48 จากนั้นแบตเตอรี่จะหยุดจ่ายกระแสและแรงดันที่นาทีที่ 48

- แบตเตอรี่ชุดที่ 2

ตารางที่ 4.14 ค่ากระแสและแรงดันของแบตเตอรี่ 2 ขณะคายประจุที่ 1C

Time (min)	I (A)	V (V)	Time (min)	I (A)	V (V)
0	12.10	51.00	32	11.80	45.00
2	11.95	50.25	34	12.00	44.75
4	11.80	49.75	36	11.90	44.25
6	12.00	49.25	38	12.00	44.00
8	11.90	49.00	40	11.90	43.50
10	11.80	48.75	42	11.80	43.00
12	12.00	48.25	44	12.00	42.25
14	11.90	48.00	46	11.90	41.25
16	11.90	47.50	48	11.90	38.50
18	11.90	47.25	50	0.00	0.00
20	12.00	47.00	52	0.00	0.00
22	11.90	46.50	54	0.00	0.00
24	11.80	46.25	56	0.00	0.00
26	12.10	46.00	58	0.00	0.00
28	12.00	45.75	60	0.00	0.00
30	11.90	45.50	62	0.00	0.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 กระแสกับแรงดันที่เวลาต่างๆ ในการคายประจุที่ 1C ของแบตเตอรี่ชุดที่ 2

การทดสอบแบตเตอรี่ชุดที่ 2 ที่ 1C ค่าแรงดันจะลดลงอย่างเชิงเส้นจากนาทีที่ 0 – 44 และจ่ายแรงดันลดลงอย่างรวดเร็ว (deep discharge) ในช่วงนาทีที่ 44 - 46 จากนั้นแบตเตอรี่จะหยุดจ่ายกระแสและแรงดันที่นาทีที่ 46

เมื่อเปรียบเทียบการคายประจุที่ 1C ของทั้งสองชุดพบว่า ช่วง depth discharge และช่วงหยุดจ่ายแรงดันของแบตเตอรี่ทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกัน โดยจะเริ่ม depth discharge ที่นาทีที่ 44 (80% ของแรงดันเริ่มต้น) และหยุดการทำงานช่วงนาทีที่ 46-48 (80% ของเวลา 1 ชั่วโมง)

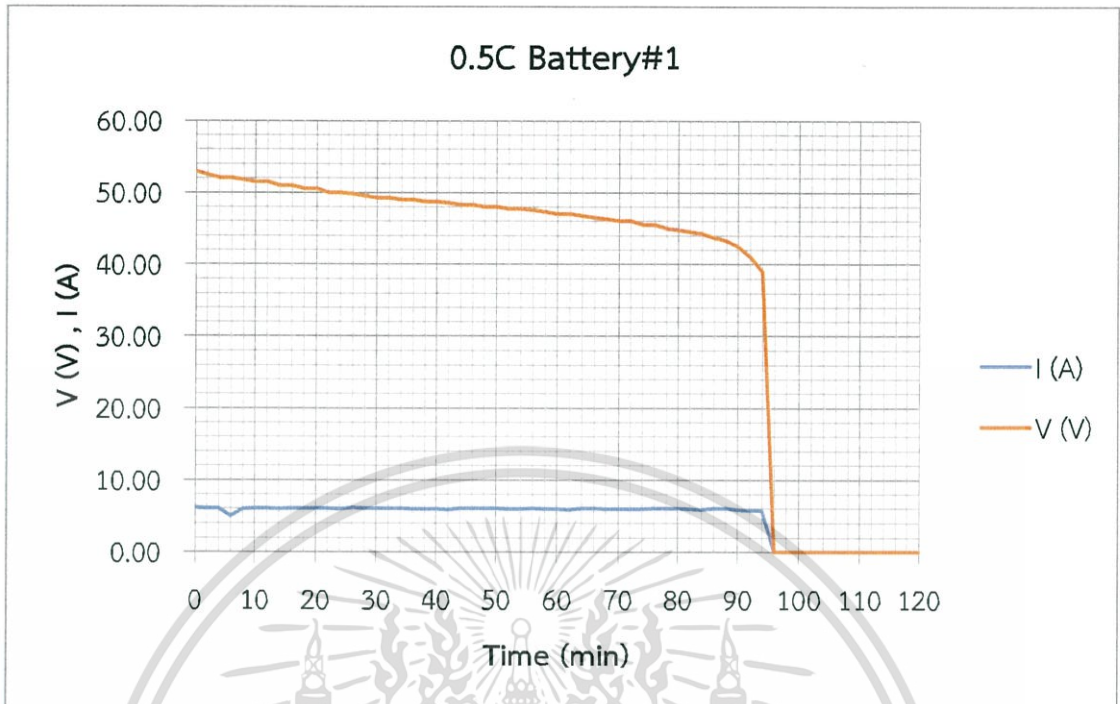
ตอนที่ 2 ทดสอบการคายประจุที่ 0.5C

- แบตเตอรี่ชุดที่ 1

ตารางที่ 4.15 ค่ากระแสและแรงดันของแบตเตอรี่ 1 ขณะคายประจุที่ 0.5C

Time (min)	I (A)	V (V)	Time (min)	I (A)	V (V)	Time (min)	I (A)	V (V)
0	6.10	52.90	50	6.00	48.00	100	0.00	0.00
2	6.05	52.50	52	5.95	47.75	102	0.00	0.00
4	6.00	52.00	54	5.95	47.75	104	0.00	0.00
6	5.00	52.00	56	6.00	47.50	106	0.00	0.00
8	5.95	51.75	58	5.95	47.25	108	0.00	0.00
10	6.05	51.50	60	5.95	47.00	110	0.00	0.00
12	6.00	51.50	62	5.90	47.00	112	0.00	0.00
14	5.95	51.00	64	6.00	46.75	114	0.00	0.00
16	6.05	51.00	66	6.00	46.50	116	0.00	0.00
18	6.05	50.50	68	5.95	46.25	118	0.00	0.00
20	6.00	50.50	70	5.95	46.00	120	0.00	0.00
22	6.00	50.00	72	5.95	46.00			
24	5.95	50.00	74	5.95	45.50			
26	6.10	49.75	76	6.05	45.50			
28	6.05	49.50	78	6.05	45.00			
30	6.00	49.25	80	6.00	44.75			
32	6.00	49.25	82	5.95	44.50			
34	6.00	49.00	84	5.90	44.25			
36	5.95	49.00	86	6.05	43.75			
38	5.95	48.75	88	6.00	43.25			
40	5.95	48.75	90	5.90	42.50			
42	5.90	48.50	92	5.75	41.00			
44	6.05	48.25	94	5.75	39.00			
46	6.00	48.25	96	0.00	0.00			
48	6.00	48.00	98	0.00	0.00			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 กระแสกับแรงดันที่เวลาต่างๆ ในการคายประจุที่ 0.5C ของแบตเตอรี่ชุดที่ 1

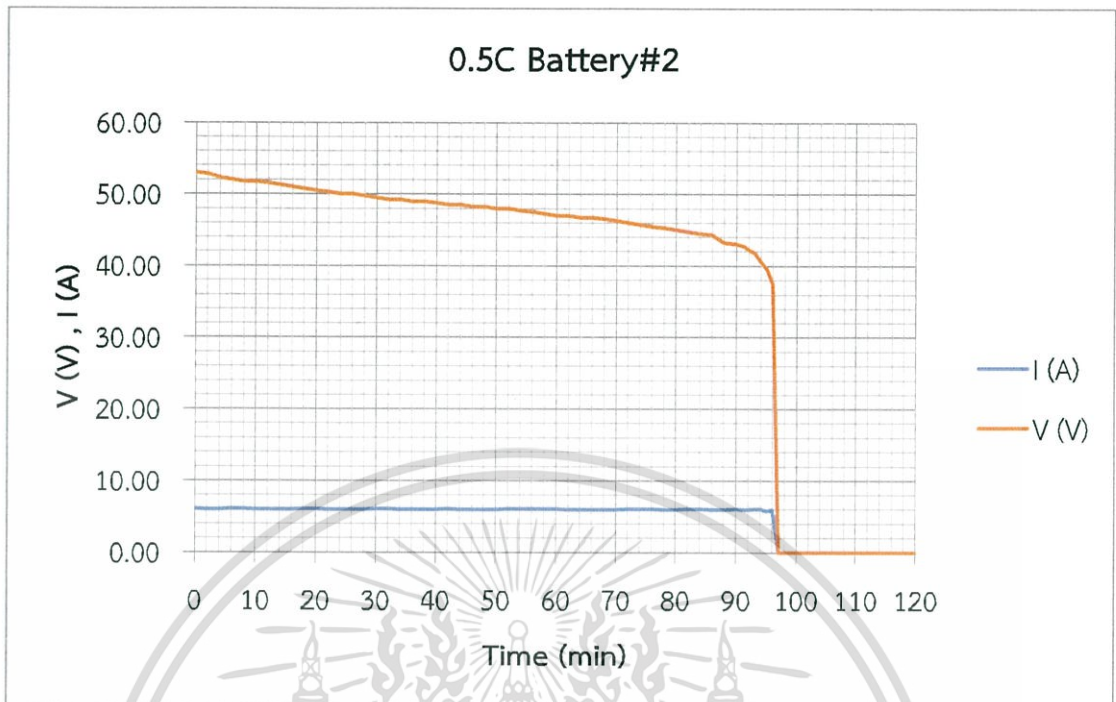
การทดสอบแบตเตอรี่ชุดที่ 1 ที่ 0.5C ค่าแรงดันจะลดลงอย่างเชิงเส้นจากนาทีที่ 0 - 86 และจ่ายแรงดันลดลงอย่างรวดเร็ว (deep discharge) ในช่วงนาทีที่ 86 - 94 จากนั้นแบตเตอรี่จะหยุดจ่ายกระแสและแรงดันที่นาทีที่ 94

- แบตเตอรี่ชุดที่ 2

ตารางที่ 4.16 ค่ากระแสและแรงดันของแบตเตอรี่ 2 ขณะคายประจุที่ 0.5C

Time (min)	I (A)	V (V)	Time (min)	I (A)	V (V)	Time (min)	I (A)	V (V)
0	6.00	53.00	50	5.93	48.00	95	5.80	39.50
2	5.98	52.75	52	6.10	48.00	96	5.90	37.50
4	5.95	52.25	54	6.08	47.75	97	0.00	0.00
6	6.03	52.00	56	6.05	47.50	98	0.00	0.00
8	6.00	51.75	58	6.03	47.25	99	0.00	0.00
10	5.98	51.75	60	6.00	47.00	100	0.00	0.00
12	5.95	51.50	62	5.98	47.00	102	0.00	0.00
14	5.93	51.25	64	5.95	46.75	104	0.00	0.00
16	5.90	51.00	66	5.95	46.75	106	0.00	0.00
18	6.00	50.75	68	5.93	46.50	108	0.00	0.00
20	6.00	50.50	70	5.90	46.25	110	0.00	0.00
22	5.98	50.25	72	6.08	46.00	112	0.00	0.00
24	5.95	50.00	74	6.03	45.75	114	0.00	0.00
26	5.93	50.00	76	6.00	45.50	116	0.00	0.00
28	5.90	49.75	78	5.98	45.25	118	0.00	0.00
30	6.03	49.50	80	5.95	45.00	120	0.00	0.00
32	6.00	49.25	82	6.03	44.75			
34	5.98	49.25	84	6.00	44.50			
36	5.98	49.00	86	5.98	44.25			
38	5.95	49.00	88	5.93	43.25			
40	5.93	48.75	90	6.00	43.00			
42	6.00	48.50	91	5.98	42.75			
44	5.98	48.50	92	5.93	42.25			
46	5.95	48.25	93	6.00	41.75			
48	5.95	48.25	94	6.00	40.50			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 กระแสกับแรงดันที่เวลาต่างๆ ในการคายประจุที่ 0.5C ของแบตเตอรี่ชุดที่ 2

การทดสอบแบตเตอรี่ชุดที่ 2 ที่ 0.5C ค่าแรงดันจะลดลงอย่างเชิงเส้นจากนาทีที่ 0 - 88 และจ่ายแรงดันลดลงอย่างรวดเร็ว (deep discharge) ในช่วงนาทีที่ 88 - 96 จากนั้นแบตเตอรี่จะหยุดจ่ายกระแสและแรงดันที่นาทีที่ 96

เมื่อเปรียบเทียบการคายประจุที่ 0.5C ของทั้งสองชุดพบว่า ช่วง depth discharge และช่วงหยุดจ่ายแรงดันของแบตเตอรี่ทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกัน โดยจะเริ่ม depth discharge ที่นาทีที่ 88 (80% ของแรงดันเริ่มต้น) และหยุดการทำงานช่วงนาทีที่ 94-96 (80% ของเวลา 1 ชั่วโมง)

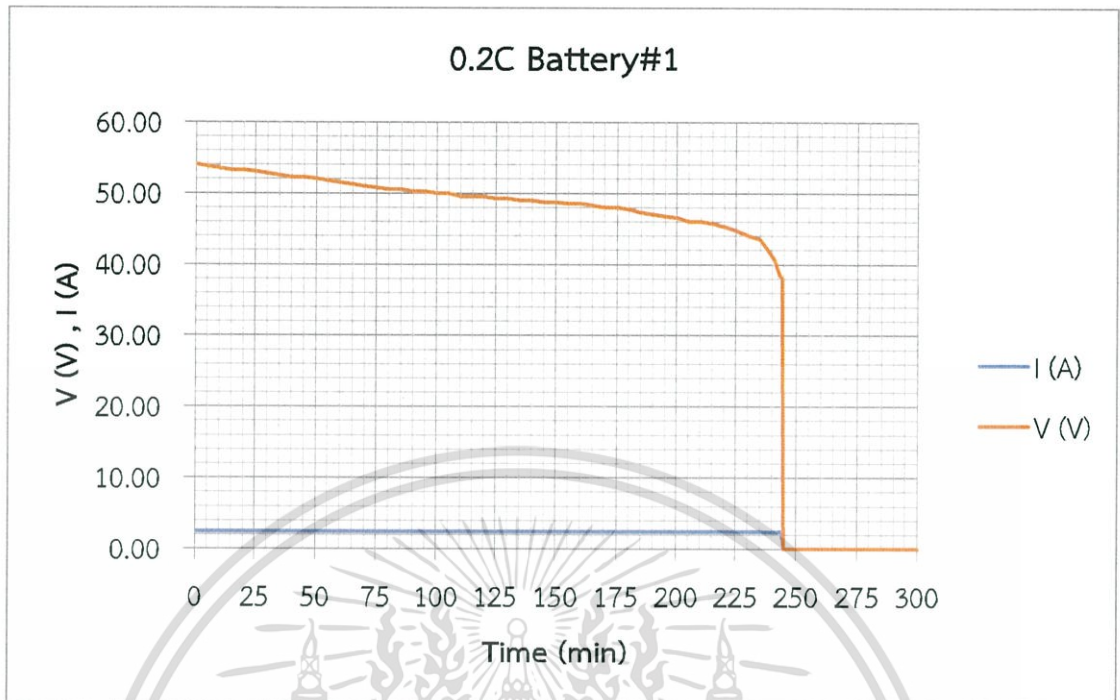
ตอนที่ 3 ทดสอบการคายประจุที่ 0.2C

- แบตเตอรี่ชุดที่ 1

ตารางที่ 4.17 ค่ากระแสและแรงดันของแบตเตอรี่ 1 ขณะคายประจุที่ 0.2C

Time (min)	I (A)	V (V)	Time (min)	I (A)	V (V)	Time (min)	I (A)	V (V)
0	2.42	54.00	125	2.40	49.25	242	2.36	39.50
5	2.40	53.75	130	2.40	49.25	243	2.39	38.50
10	2.39	53.50	135	2.39	49.00	244	2.39	38.00
15	2.39	53.25	140	2.38	49.00	245	0.00	0.00
20	2.38	53.25	145	2.40	48.75	250	0.00	0.00
25	2.38	53.00	150	2.38	48.75	255	0.00	0.00
30	2.38	52.75	155	2.41	48.50	260	0.00	0.00
35	2.40	52.50	160	2.40	48.50	265	0.00	0.00
40	2.40	52.25	165	2.40	48.25	275	0.00	0.00
45	2.39	52.25	170	2.39	48.00	280	0.00	0.00
50	2.39	52.00	175	2.38	48.00	285	0.00	0.00
55	2.40	51.75	180	2.38	47.75	290	0.00	0.00
60	2.39	51.50	185	2.38	47.25	295	0.00	0.00
65	2.39	51.25	190	2.41	47.00	300	0.00	0.00
70	2.40	51.00	195	2.40	46.75			
75	2.39	50.75	200	2.39	46.50			
80	2.39	50.50	205	2.37	46.00			
85	2.39	50.50	210	2.38	46.00			
90	2.39	50.25	215	2.40	45.75			
95	2.38	50.25	220	2.39	45.25			
100	2.38	50.00	225	2.38	44.75			
105	2.40	50.00	230	2.38	44.00			
110	2.39	49.50	235	2.37	43.50			
115	2.39	49.50	240	2.35	41.00			
120	2.38	49.50	241	2.40	40.50			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 กระแสกับแรงดันที่เวลาต่างๆ ในการคายประจุที่ 0.2C ของแบตเตอรี่ชุดที่ 1

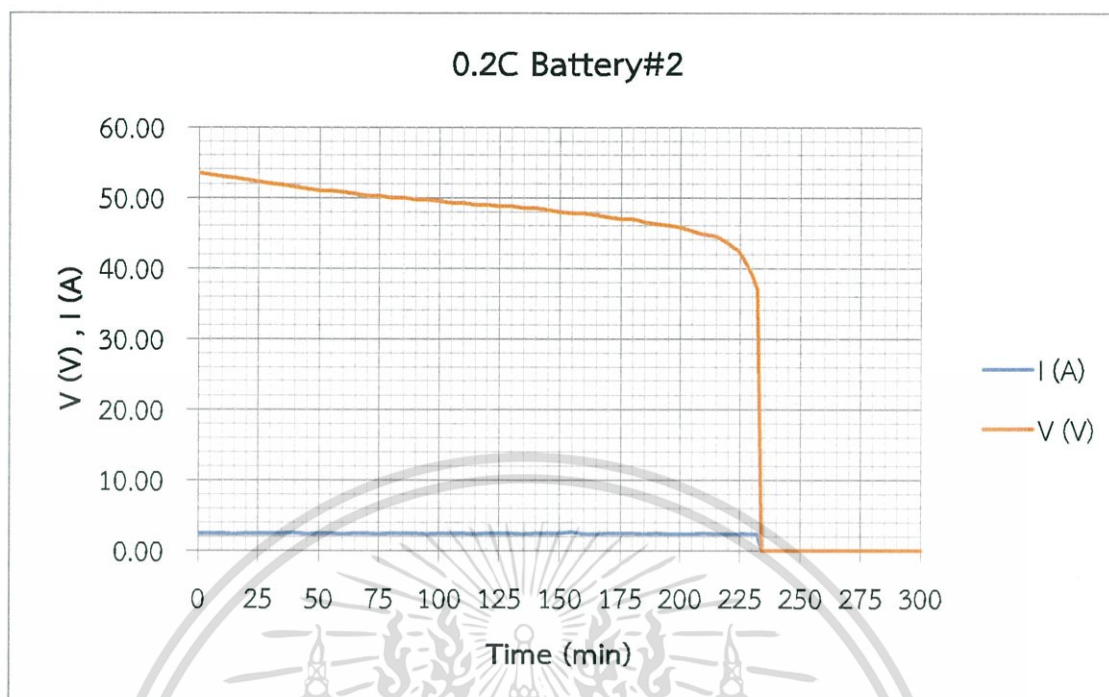
การทดสอบแบตเตอรี่ชุดที่ 1 ที่ 0.2C ค่าแรงดันจะลดลงอย่างเชิงเส้นจากนาทีที่ 0 - 235 และจ่ายแรงดันลดลงอย่างรวดเร็ว (deep discharge) ในช่วงนาทีที่ 235 - 244 จากนั้นแบตเตอรี่จะหยุดจ่ายกระแสและแรงดันที่นาทีที่ 244

- แบตเตอรี่ 2

ตารางที่ 4.18 ค่ากระแสและแรงดันของแบตเตอรี่ 2 ขณะคายประจุที่ 0.2C

Time (min)	I (A)	V (V)	Time (min)	I (A)	V (V)	Time (min)	I (A)	V (V)
0	2.41	53.50	125	2.40	48.75	232	2.32	37.00
5	2.39	53.25	130	2.39	48.75	234	0.00	0.00
10	2.39	53.00	135	2.38	48.50	236	0.00	0.00
15	2.38	52.75	140	2.40	48.50	238	0.00	0.00
20	2.40	52.50	145	2.40	48.25	240	0.00	0.00
25	2.39	52.25	150	2.40	48.00	245	0.00	0.00
30	2.40	52.00	155	2.59	47.75	250	0.00	0.00
35	2.40	51.75	160	2.38	47.75	255	0.00	0.00
40	2.49	51.50	165	2.38	47.50	260	0.00	0.00
45	2.38	51.25	170	2.41	47.25	265	0.00	0.00
50	2.40	51.00	175	2.40	47.00	270	0.00	0.00
55	2.39	51.00	180	2.39	47.00	275	0.00	0.00
60	2.38	50.75	185	2.38	46.50	280	0.00	0.00
65	2.40	50.50	190	2.40	46.25	285	0.00	0.00
70	2.39	50.25	195	2.38	46.00	290	0.00	0.00
75	2.38	50.25	200	2.38	45.75	295	0.00	0.00
80	2.40	50.00	205	2.38	45.25	300	0.00	0.00
85	2.40	50.00	210	2.40	44.75			
90	2.39	49.75	215	2.38	44.50			
95	2.38	49.75	220	2.36	43.50			
100	2.40	49.50	222	2.38	43.00			
105	2.39	49.25	224	2.38	42.50			
110	2.39	49.25	226	2.40	41.50			
115	2.38	49.00	228	2.32	40.25			
120	2.40	49.00	230	2.32	39.00			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 กระแสกับแรงดันที่เวลาต่างๆ ในการคายประจุที่ 0.2C ของแบตเตอรี่ชุดที่ 2

การทดสอบแบตเตอรี่ชุดที่ 2 ที่ 0.2C ค่าแรงดันจะลดลงอย่างเชิงเส้นจากนาทีที่ 0 - 222 และจ่ายแรงดันลดลงอย่างรวดเร็ว (deep discharge) ในช่วงนาทีที่ 222 - 232 จากนั้นแบตเตอรี่จะหยุดจ่ายกระแสและแรงดันที่นาทีที่ 232

เมื่อเปรียบเทียบการคายประจุที่ 0.2C ของทั้งสองชุดพบว่า ช่วง depth discharge และช่วงหยุดจ่ายแรงดันของแบตเตอรี่ทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกัน โดยจะเริ่ม depth discharge ที่ประมาณช่วงนาทีที่ 222 - 235 (80% ของแรงดันเริ่มต้น) และหยุดการทำงานที่ประมาณช่วงนาทีที่ 232 - 244 (80% ของเวลา 1 ชั่วโมง)

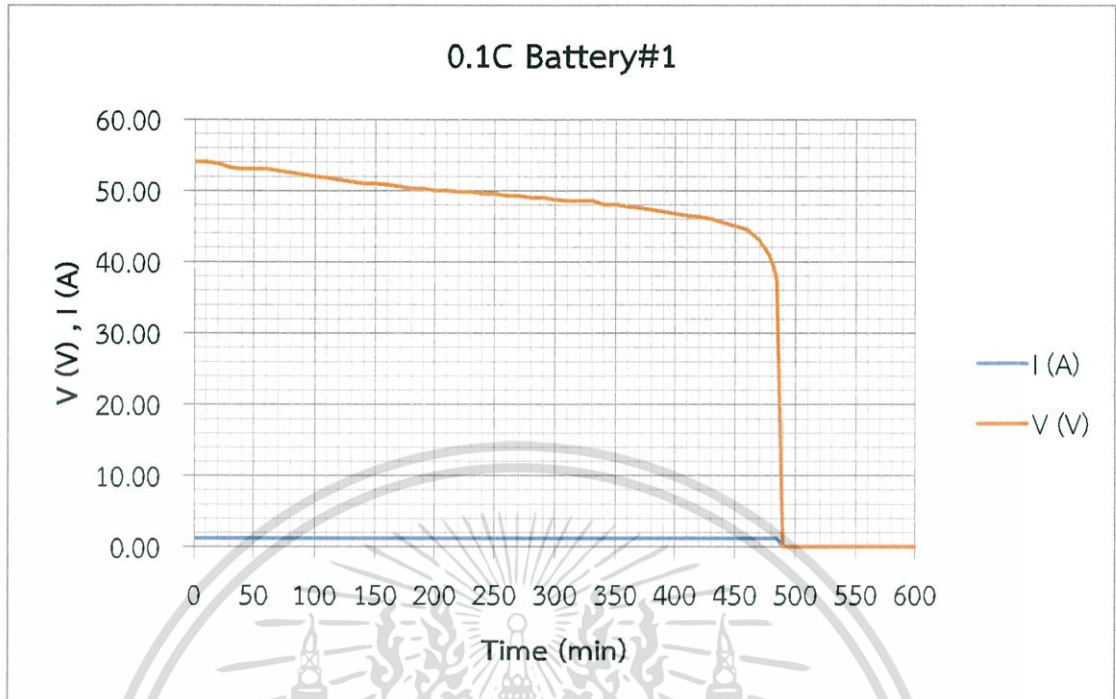
ตอนที่ 4 ทดสอบการคายประจุที่ 0.1C

- แบตเตอรี่ชุดที่ 1

ตารางที่ 4.19 ค่ากระแสและแรงดันของแบตเตอรี่ 1 ขณะคายประจุที่ 0.1C

Time (min)	I (A)	V (V)	Time (min)	I (A)	V (V)	Time (min)	I (A)	V (V)
0	1.22	54.00	250	1.20	49.50	476	1.18	41.50
10	1.21	54.00	260	1.20	49.25	478	1.20	41.00
20	1.21	53.75	270	1.19	49.25	480	1.18	40.00
30	1.21	53.25	280	1.19	49.00	481	1.20	39.50
40	1.21	53.00	290	1.18	49.00	482	1.19	39.00
50	1.20	53.00	300	1.18	48.75	483	1.20	38.50
60	1.20	53.00	310	1.20	48.50	484	1.18	38.00
70	1.19	52.75	320	1.20	48.50	485	1.20	37.00
80	1.19	52.50	330	1.19	48.50	490	0.00	0.00
90	1.20	52.25	340	1.19	48.00	500	0.00	0.00
100	1.19	52.00	350	1.19	48.00	510	0.00	0.00
110	1.18	51.75	360	1.18	47.75	520	0.00	0.00
120	1.20	51.50	370	1.20	47.50	530	0.00	0.00
130	1.19	51.25	380	1.19	47.25	540	0.00	0.00
140	1.19	51.00	390	1.18	47.00	550	0.00	0.00
150	1.19	51.00	400	1.20	46.75	560	0.00	0.00
160	1.21	50.75	410	1.19	46.50	570	0.00	0.00
170	1.21	50.50	420	1.18	46.25	580	0.00	0.00
180	1.20	50.25	430	1.20	46.00	590	0.00	0.00
190	1.20	50.25	440	1.20	45.50	600	0.00	0.00
200	1.20	50.00	450	1.19	45.00			
210	1.20	50.00	460	1.18	44.50			
220	1.19	49.75	470	1.18	43.00			
230	1.19	49.75	472	1.19	42.50			
240	1.20	49.50	474	1.19	42.00			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 กระแสกับแรงดันที่เวลาต่างๆ ในการคายประจุที่ 0.1C ของแบตเตอรี่ชุดที่ 1

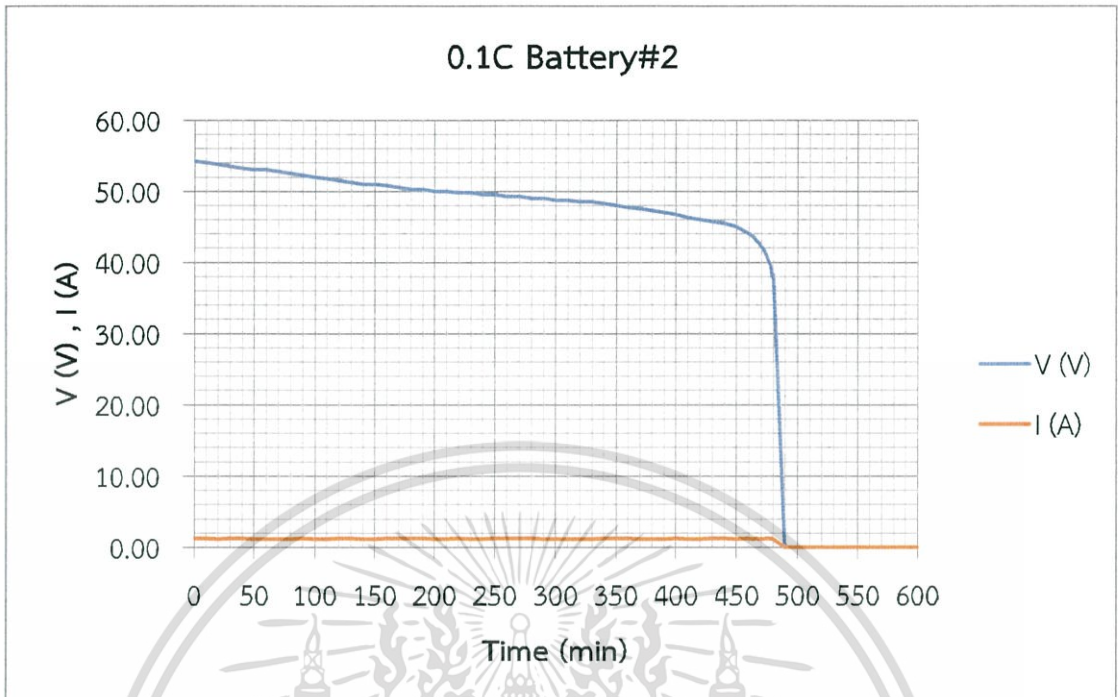
การทดสอบแบตเตอรี่ชุดที่ 1 ที่ 0.1C ค่าแรงดันจะลดลงอย่างเชิงเส้นจากนาที่ที่ 0 - 470 และจ่ายแรงดันลดลงอย่างรวดเร็ว (deep discharge) ในช่วงนาที่ที่ 470 - 485 จากนั้นแบตเตอรี่จะหยุดจ่ายกระแสและแรงดันที่นาที่ที่ 485

- แบตเตอรี่ชุดที่ 2

ตารางที่ 4.20 ค่ากระแสและแรงดันของแบตเตอรี่ 2 ขณะคายประจุที่ 0.1C

Time (min)	I (A)	V (V)	Time (min)	I (A)	V (V)	Time (min)	I (A)	V (V)
0	1.20	54.25	250	1.22	49.50	468	1.19	42.75
10	1.20	54.00	260	1.21	49.25	470	1.18	42.25
20	1.19	53.75	270	1.20	49.25	472	1.18	41.75
30	1.20	53.50	280	1.20	49.00	474	1.22	41.00
40	1.20	53.25	290	1.19	49.00	476	1.20	40.25
50	1.19	53.00	300	1.19	48.75	478	1.18	39.50
60	1.19	53.00	310	1.19	48.75	479	1.20	38.00
70	1.18	52.75	320	1.19	48.50	480	1.18	38.25
80	1.18	52.50	330	1.18	48.50	490	0.00	0.00
90	1.20	52.25	340	1.20	48.25	500	0.00	0.00
100	1.19	52.00	350	1.20	48.00	510	0.00	0.00
110	1.18	51.75	360	1.20	47.75	520	0.00	0.00
120	1.20	51.50	370	1.19	47.50	530	0.00	0.00
130	1.20	51.25	380	1.18	47.25	540	0.00	0.00
140	1.19	51.00	390	1.18	47.00	550	0.00	0.00
150	1.19	51.00	400	1.20	46.75	560	0.00	0.00
160	1.21	50.75	410	1.19	46.25	570	0.00	0.00
170	1.20	50.50	420	1.18	46.00	580	0.00	0.00
180	1.20	50.25	430	1.21	45.75	590	0.00	0.00
190	1.20	50.25	440	1.20	45.50	600	0.00	0.00
200	1.19	50.00	450	1.19	45.00			
210	1.19	50.00	460	1.20	44.00			
220	1.20	49.75	462	1.19	43.75			
230	1.19	49.75	464	1.18	43.50			
240	1.18	49.50	466	1.20	43.00			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 กระแสกับแรงดันที่เวลาต่างๆ ในการคายประจุที่ 0.1C ของแบตเตอรี่ชุดที่ 2

การทดสอบแบตเตอรี่ชุดที่ 2 ที่ 0.1C ค่าแรงดันจะลดลงอย่างเชิงเส้นจากนาฬิกาที่ 0 - 464 และจ่ายแรงดันลดลงอย่างรวดเร็ว (deep discharge) ในช่วงนาฬิกาที่ 464 - 480 จากนั้นแบตเตอรี่จะหยุดจ่ายกระแสและแรงดันที่นาฬิกาที่ 480

เมื่อเปรียบเทียบการคายประจุที่ 0.1C ของทั้งสองชุดพบว่า ช่วง depth discharge และช่วงหยุดจ่ายแรงดันของแบตเตอรี่ทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกัน โดยจะเริ่ม depth discharge ที่ประมาณช่วงนาฬิกาที่ 464 - 470 (80% ของแรงดันเริ่มต้น) และหยุดการทำงานประมาณช่วงนาฬิกาที่ 480 - 485 (80% ของเวลา 10 ชั่วโมง)

จากผลการทดลองการคายประจุแบตเตอรี่พบว่าแบตเตอรี่จะมีช่วง depth discharge ที่ช่วง 80% ของแรงดันเริ่มต้นเท่ากัน และจะหยุดการทำงานที่ 80% ของเวลา end of discharge ของการคำนวณ capacity rate เนื่องจากค่า volt per cell ตามมาตรฐานของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนที่ SOC 0% หรือแบตเตอรี่ตัดการทำงานหรือหยุดจ่ายแรงดันคือ 1.75 V หรือต่ำกว่าสำหรับแบตเตอรี่ 2 V ซึ่งแบตเตอรี่ที่นำมาใช้ทดสอบมีค่าพิกัดแรงดันที่ 48 V จึงมีค่า SOC 0% ที่ 42 V หรือต่ำกว่า

ตอนที่ 5 การหาพลังงานจากการคายประจุของแบตเตอรี่

การหาพลังงานของแบตเตอรี่สามารถหาได้จากพื้นที่ใต้กราฟของค่ากำลังไฟฟ้ากับเวลา โดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel ในการคำนวณค่าจากตารางที่ 4-13 ถึง 4-20 ได้ผลดังตารางที่ 4-21

ตารางที่ 4.21 พลังงานจากการคายประจุของแบตเตอรี่

Capacity Rate	พลังงานของแบตเตอรี่ (J)	
	ชุดที่ 1	ชุดที่ 2
1C	1551345	1612436
0.5C	1622593	1433773
0.2C	1540117	1630043
0.1C	1714691	1645035

หาค่าเฉลี่ยพลังงานการคายประจุของแบตเตอรี่ที่ Capacity Rate ต่างๆ

$$\begin{aligned}
 \text{พลังงานเฉลี่ย} &= (1551345+1612436+1622593+1433773+ \\
 &\quad 1540117+1630043+1714691+1645035)/8 \\
 &= 1593754 \text{ J} \\
 &\approx 1.6 \text{ MJ}
 \end{aligned}$$

ดังนั้น แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน 48 V , 12 Ah มีค่าพลังงานการคายประจุของแบตเตอรี่เฉลี่ยที่ค่า 1.6 MJ

ตอนที่ 6 การประมาณค่าเวลาในการใช้งานจักรยานไฟฟ้า

เมื่อหาพลังงานเฉลี่ยการคายประจุของแบตเตอรี่ได้แล้ว เราสามารถประมาณเวลาในการใช้งานอย่างต่อเนื่องที่ภาระทางกลและความเร็วต่างๆ ได้โดยการนำค่าพลังงานการคายประจุรวมไปเทียบกับค่ากำลังไฟฟ้าขาเข้าของแบตเตอรี่จากตารางที่ 4-1 ถึง 4-4 ได้ค่าเวลาในหน่วยชั่วโมงดังตารางที่ 4-22

ตารางที่ 4.22 เวลาโดยประมาณสำหรับการใช้งานจักรยานไฟฟ้าอย่างต่อเนื่องที่ความเร็วและภาระทางกลต่างๆ

Load (kg)	5 km/h		10 km/h		15 km/h		20 km/h	
	P (W)	Time (h)	P (W)	Time (h)	P (W)	Time (h)	P (W)	Time (h)
60	36.25	12.26	51.84	8.57	77.62	5.73	121.59	3.66
65	39.1	11.37	58.10	7.65	91.22	4.87	127.20	3.49
70	40.65	10.93	67.21	6.61	100.09	4.44	127.44	3.49
75	48.78	9.11	73.84	6.02	105.06	4.23	139.36	3.19
80	49.85	8.92	77.87	5.71	112.46	3.95	140.17	3.17
85	51.36	8.65	80.48	5.52	116.60	3.81	142.02	3.13
90	52.97	8.39	83.98	5.29	120.08	3.70	144.65	3.07
95	53.4	8.32	87.62	5.07	125.37	3.55	148.86	2.99
100	61.18	7.26	90.10	4.93	132.80	3.35	152.54	2.91

สำหรับจักรยานไฟฟ้ามอเตอร์พิกัด 1000 W แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน 48V 12Ah เมื่อใช้งานในช่วงความเร็ว 5 km/h – 20 km/h และภาระทางกล 60 – 100 kg จะสามารถประมาณช่วงเวลาใช้งานได้ 3 – 12 ชั่วโมง

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการดำเนินงาน

โครงการนี้นำเสนอวิธีการทดสอบสมรรถนะของมอเตอร์จักรยานไฟฟ้าและแบตเตอรี่ จากผลการทดสอบสมรรถนะของจักรยานไฟฟ้าจำนวน 2 ตัวอย่างโดยที่มอเตอร์ของจักรยานมีพิกัด 1000 W แบตเตอรี่ 48 V 12 Ah และ 1000 W แบตเตอรี่ 48 V 12 Ah ในการทดสอบสมรรถนะได้ใช้วิธีการเพิ่มภาระทางกลของมอเตอร์ และการเพิ่มความเร็วของจักรยานไฟฟ้า พบว่ามีการเพิ่มภาระทางกลเพิ่มขึ้นมอเตอร์จะใช้กำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเป็นแบบเชิงเส้น และเมื่อมีการเพิ่มความเร็วของจักรยานไฟฟ้า มอเตอร์ของจักรยานก็จะมีการใช้กำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นด้วย แต่เมื่อนำไปทดสอบค่าประสิทธิภาพทางกำลังของมอเตอร์ไฟฟ้าเทียบกำลังที่แบตเตอรี่ใช้งาน พบว่าในการใช้งานขนส่งสิ่งของที่เป็นภาระทางกลตั้งแต่ 0 kg ไปจนถึง 100 kg และ ความเร็วในการใช้งาน 5-20 km/h นั้นค่าประสิทธิภาพการทำงานของมอเตอร์มีค่าอยู่ที่ช่วง 1.5% - 10.47% หรืออาจกล่าวได้ว่ามีพลังงานที่สูญเสียไปให้องค์ประกอบที่ไม่ใช่การขับเคลื่อนมอเตอร์สูงถึง 89.53% - 98.5% ซึ่งในส่วนนี้เป็นเพราะพิกัดการใช้งานสูงสุดของมอเตอร์อยู่ที่ 1000 W แต่ค่าการใช้กำลังไฟฟ้าในการทดสอบกับภาระทางกล 300 kg ที่ความเร็ว 20 km/h นั้นมีค่าเพียง 313.13 W หรืออาจกล่าวได้ว่ามอเตอร์ไฟฟ้า 1000 W นั้นมีค่าพิกัดสูงเกินไปสำหรับการใช้งานจักรยานไฟฟ้า นอกจากนี้ค่าประสิทธิภาพที่น้อยยังมีผลมาจากความสูญเสียกำลังจากแท่นทดสอบด้วย

ในส่วนของแบตเตอรี่ โครงการนี้ใช้แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนพิกัด 48 V 12 Ah และ การทดสอบสมรรถนะการคายประจุพบว่าค่าแรงดันสูงสุดของการใช้งานคือ 54.0 V (เนื่องจากค่าแรงดันต่อเซลล์ของแบตเตอรี่คือ 2.25 V) นำแบตเตอรี่มาทำการคายประจุที่ 1C , 0.5C , 0.2C และ 0.1C โดยควบคุมให้กระแสคงที่ ได้ว่าค่าแรงดันของแบตเตอรี่ลดลงแบบเชิงเส้น และเริ่มลดลงอย่างรวดเร็วที่ 43.5 V หรือประมาณ 80% ของแรงดันสูงสุด จนกระทั่งเหลือค่าแรงดันประมาณ 37.0 V และตัดการทำงานในที่สุด

5.2 ปัญหาและแนวทางแก้ไข

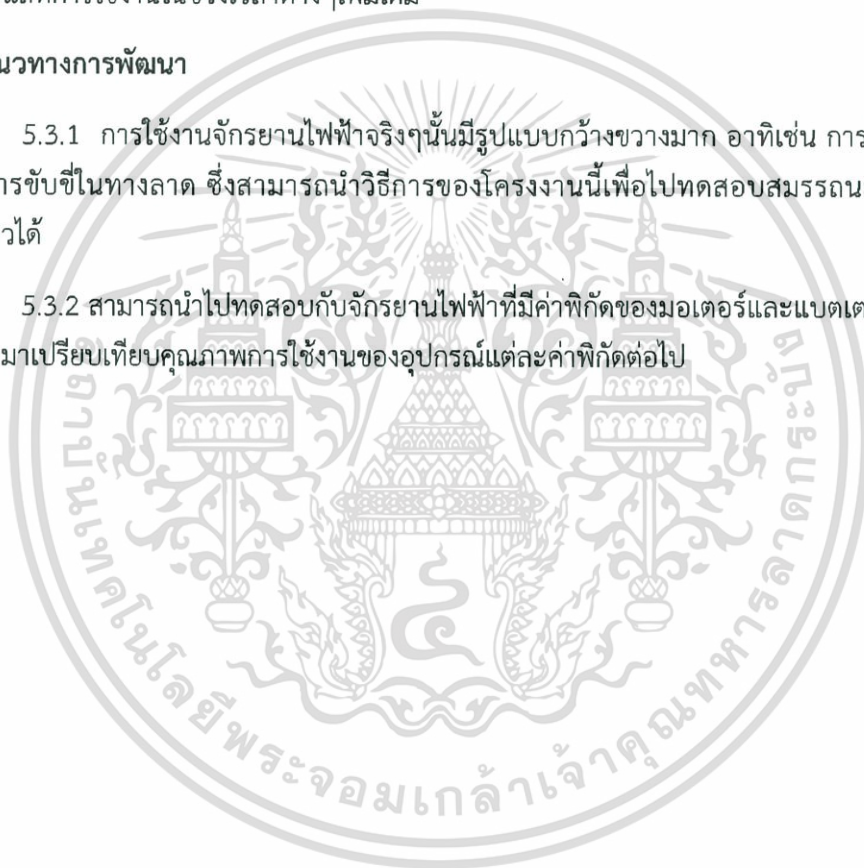
5.2.1 การควบคุมความเร็วของจักรยานไฟฟ้านั้นโดยทั่วไปเป็นแบบ manual หรือใช้มือควบคุม แต่สำหรับการทดสอบสมรรถนะนั้นควรดัดแปลงการควบคุมความเร็วโดยใช้อุปกรณ์ควบคุมความเร็วเป็นแบบ auto ก่อน เพื่อควบคุมความเร็วให้คงที่และง่ายต่อการวัดค่าพารามิเตอร์อื่นๆ

5.2.2 การวัดกระแสสำหรับจักรยานไฟฟ้าที่ใช้งานจริงมีค่าไม่คงที่ ซึ่งอุปกรณ์การวัดในโครงการนี้ใช้อุปกรณ์วัดกระแสแบบมาตรฐานทั่วไป ซึ่งหากต้องการค่ากระแสที่ถูกต้องและค่าคงที่ควรใช้อุปกรณ์ที่มีค่า sensitivity สูงกว่านี้ หรืออาจเปลี่ยนเป็น microcontroller เพื่อบันทึกค่ากระแสที่การใช้งานในช่วงเวลาต่างๆเพิ่มเติม

5.3 แนวทางการพัฒนา

5.3.1 การใช้งานจักรยานไฟฟ้าจริงนั้นมีรูปแบบกว้างขวางมาก อาทิเช่น การขับขี่ทางชันหรือการขับขี่ในทางลาด ซึ่งสามารถนำวิธีการของโครงการนี้เพื่อไปทดสอบสมรรถนะการใช้งานดังกล่าวได้

5.3.2 สามารถนำไปทดสอบกับจักรยานไฟฟ้าที่มีค่าพิกัดของมอเตอร์และแบตเตอรี่ที่ค่าอื่นๆ เพื่อนำมาเปรียบเทียบคุณภาพการใช้งานของอุปกรณ์แต่ละค่าพิกัดต่อไป



บรรณานุกรม

1. Ru-Shi Liu, Lei Zhang et al. “Electrochemical Technologies for Energy Storage and Conversion”.Weinheim:WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA,2012
2. T. Kenjo, and S.Nagamori.“Permanent-Magnet and Brushless DC Motors”.Northern Ireland:The Universities Press (Belfast) Ltd.,1985
3. Chang-liang Xia.“PERMANENT MAGNET BRUSHLESS DC MOTOR DRIVES AND CONTROLS”.Singapore:Markono Print Media Pte Ltd.,2012
4. รศ.พิชิต ถ้ายอง. “เครื่องจักรกลไฟฟ้า” .คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2010
5. Isidor Buchmann ๒๕๕๙ BATTERY UNIVERSITY แหล่งที่ http://batteryuniversity.com/learn/article/discharge_methods. ๒๖ พฤศจิกายน ๒๕๕๙
6. ประวัติจักรยาน แหล่งที่มา <http://kittinart.yolasite.com>. ๒๖ พฤศจิกายน ๒๕๕๙
7. Folding Bike Lovers ๒๕๕๙ การปรับตั้งจักรยานให้เหมาะกับการปั่นของเรา แหล่งที่มา <http://foldingbikelovers.tumblr.com/post/64091775539/การปรับตั้งจักรยานให้เหมาะกับการปั่นของเรา>. ๒๖ พฤศจิกายน ๒๕๕๙

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบสมรรถนะทางไฟฟ้าสำหรับรถจักรยานไฟฟ้า

Electric Performance Test for Electric Bicycle

กฤตชัย ภู่วิเชียร, คมสัน สิริมาจันทร์, ภาณุพงศ์ จันทระศิลป์, แมน จันทิส

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

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

บทคัดย่อ

ปริญญาานิพนธ์เรื่อง การทดสอบสมรรถนะทางไฟฟ้าของจักรยานไฟฟ้า เป็นการนำเสนอการทดสอบอุปกรณ์ทางไฟฟ้าของจักรยาน 2 ส่วน ได้แก่ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านที่มีพิกัด 1,000 W จำนวน 2 เครื่อง และแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนพิกัด 48V 12Ah จำนวน 2 ชุด โดยที่ในการทดสอบจะใช้จักรยาน 2 รูปแบบคือ จักรยานทั่วไปแบบสองล้อ และจักรยานแบบสามล้อสำหรับบรรทุกของ ในการทดสอบวัดค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของจักรยานไฟฟ้านั้นได้ทำการเก็บข้อมูลต่าง ๆ ของมอเตอร์ 2 สถานการณ์ที่ต่างกัน ได้แก่ ขณะใช้งาน ณ เส้นทางทดสอบ และบนแท่นทดสอบ โดยผลการทดสอบได้ว่า ที่ความเร็ว 20 km/h ภาระทางกล 300 kg กำลังไฟฟ้าของมอเตอร์ที่ใช้มีค่า 313.13 W ในส่วนของแบตเตอรี่ ได้ทดสอบเรื่องการคายประจุของแบตเตอรี่ โดยหาช่วงเวลา end of discharge ของแบตเตอรี่ ได้เป็นช่วงแรงดันเหลือ 80% ของแรงดันเริ่มต้น ซึ่งช่วงเวลานั้นแบตเตอรี่จะทำการคายประจุอย่างรวดเร็วและหมดไปในที่สุด

Abstract

This project presents electric performance test for electric bicycle including 1,000W Brushless DC motor and 48V 12Ah Li-on Battery. Two types of electric bicycle consisting of general 2-wheels electric bicycle and carriage electric tricycle are tested. The motor is tested for obtaining electrical parameters by riding electric bicycle's motor in an actual condition and the testing stand. The result shows that at 20 km/h, 300 kg mechanical load electrical power of motor is 313.13 W. In addition, the discharge capacity is tested to evaluate the performance of battery. End of discharge of the battery is 80% of initial voltage and the battery voltage will drop quickly at this point.

1. บทนำ

ในปัจจุบันมนุษย์มีพาหนะที่ใช้ในการเดินทางมากขึ้นพาหนะยานยนต์ต่างๆ ได้รับการพัฒนาอย่างแพร่หลายมากขึ้น ได้มีการใช้น้ำมันเป็นเชื้อเพลิง และปัจจุบันได้มีการพัฒนาเป็นการใช้พลังงานไฟฟ้าในการขับเคลื่อน จักรยานเป็นพาหนะที่ใช้กำลัง

ของคนในการขับเคลื่อน อีกทั้งยังเป็นพาหนะที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม เป็นพลังงานสะอาด ไม่ก่อให้เกิดมลภาวะกับสิ่งแวดล้อมปัจจุบันได้มีการพัฒนาเป็นจักรยานไฟฟ้าโดยมีการติดตั้งมอเตอร์ไฟฟ้าและแบตเตอรี่เพิ่มเข้าไปเพื่อให้ผู้ใช้งานจักรยานใช้งานได้หลากหลายและสะดวกสบายมากขึ้นคณะผู้จัดทำจึงได้ทำการศึกษาค้นคว้าข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับจักรยานไฟฟ้าหลักการการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าศึกษาการใช้พลังงาน และการคายประจุของแบตเตอรี่ที่ใช้กับจักรยานไฟฟ้าเพื่อการนำไปประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์ในชีวิตประจำวัน

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน (BLDC) [1]

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงทั่วไป มีโครงสร้างที่ง่ายไม่ซับซ้อน ใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่สามารถหาได้ทั่วไป แต่มีข้อเสียที่ใหญ่ก็คือจำเป็นต้องมีคอมมิวเตเตอร์และแปรงถ่าน ซึ่งเป็นชิ้นส่วนที่ต้องมีการซ่อมแซมบ่อย เมื่อการทำงานของคอมมิวเตเตอร์และแปรงถ่านถูกแทนด้วยวงจรสวิตซ์ไฟฟ้า ทำให้ค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงมอเตอร์ลดลงซึ่งเป็นข้อดีที่โดดเด่นกว่ามอเตอร์กระแสตรงชนิดอื่นๆ



รูปที่ 1 ภายในมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน

2.2 ส่วนประกอบพื้นฐานของ BLDC

ส่วนประกอบพื้นฐานแบ่งออกเป็น 3 ประเภทใหญ่ๆ

คือ 1. Stator Core

โครงสร้างสเตเตอร์ของมอเตอร์ BLDC นั้นเหมือนกับจิงโครมันสเตเตอร์หรือมอเตอร์เหนี่ยวนำทั่วไป ขดลวดเฟสเดียวหรือหลายเฟสจะถูกพันอย่างสมมาตรในแกนเหล็ก และต่อกันแบบ Y หรือ Δ (ส่วนใหญ่จะต่อแบบ Y) มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงทั่วไปขดลวดขดลวดจะอยู่ที่โรเตอร์ แต่สำหรับ BLDC ขดลวดจะอยู่ที่สเตเตอร์ ทำให้มีความร้อนเกิดขึ้นน้อยกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. Permanent Magnet Rotor

โรเตอร์ของ BLDC ประกอบด้วยแม่เหล็กถาวรฝังอยู่ที่ผิวหรือในแกนเหล็ก ในปัจจุบันแม่เหล็กถาวรมักใช้วัสดุหายากเป็นวัสดุคิบ เช่น NdFeB โดยแม่เหล็กถาวรนี้มีหน้าที่สร้างสนามแม่เหล็กที่เพียงพอ ในช่วงว่างอากาศ (air gap) ซึ่งไม่ต่างจากมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงทั่วไป แต่สำหรับ BLDC แม่เหล็กถาวรจะอยู่ที่โรเตอร์ ไม่ใช่สเตเตอร์เหมือนมอเตอร์กระแสตรงทั่วไป

3. Hall elements

เซนเซอร์บอกตำแหน่งจะถูกติดตั้งอยู่ในมอเตอร์เพื่อจับตำแหน่งของโรเตอร์และเปลี่ยนเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าและส่งต่อไปยังสวิตช์ เซนเซอร์บอกตำแหน่งโดยทั่วไปมีหลายแบบ ในปัจจุบัน BLDC ใช้ Hall sensor หรือเซนเซอร์แม่เหล็กในการระบุตำแหน่งของโรเตอร์

3. แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน [2]

แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน (Li-ion Battery) เป็นแบตเตอรี่ชนิดประจุไฟฟ้าใหม่ได้ (เซลล์ทุติยภูมิ) ซึ่งนิยมใช้ทั่วไปในทางอิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากมีคุณสมบัติ มีความหนาแน่นของพลังงานสูง ไม่เกิด Memory Effect และมีการคายประจุที่ต่ำเมื่อไม่มีการใช้งาน

3.1 กระบวนการชาร์จและดิสชาร์จไฟฟ้าแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน

ระหว่างการชาร์จแบตเตอรี่ลิเทียม ไอออน Li^+ จะนำกระแสไหลจากขั้วลบไปขั้วบวก nonabatte carry electrolyte และ separator ระหว่างการชาร์จไฟแหล่งจ่ายไฟภายนอกไฟฟ้า (วงจรการชาร์จ) ใช้แรงดันไฟฟ้าที่สูง (แต่ของขั้วเดียวกัน) กว่าที่ผลิตจากแบตเตอรี่ ไปบังคับกระแสให้ไหลผ่านในทิศทางตรงกันข้าม แล้วย้ายจากขั้วบวก ไปยังขั้วลบที่กลายเป็นฝั่งที่อยู่ในวัสดุอิเล็กโทรดที่มีรูพรุนในกระบวนการที่เรียกว่า Intercalation เมื่อแบตเตอรี่ลิเทียม ไอออนดิสชาร์จ แมทที่เรียลบวกจะลดลง และเมทที่เรียลเชิงลบจะออกซิไดซ์

3.2 State of Charge (SOC) และ The depth of discharge (DOD)

SOC คือเปอร์เซ็นต์ของพลังงานทั้งหมดที่ยังคงสามารถคายประจุโดยที่ 100% หรือ 1.0 หมายถึงแบตเตอรี่เต็ม และ 0% หรือ 0.0 หมายถึงแบตเตอรี่หมด

DOD คือเปอร์เซ็นต์ของแบตเตอรี่ที่ทำการคายประจุไปแล้ว โดยที่ 100% หมายถึงแบตเตอรี่หมด และ 0% หมายถึงแบตเตอรี่เต็ม การคายประจุที่อย่างน้อย 80% DOD จะใช้เป็นอ้างอิงของการ deep discharge

Discharge cycle ตามที่เข้าใจกันคือการคายประจุออกจากแบตเตอรี่ทั้งหมดแล้วทำการชาร์จแบตเตอรี่ให้เต็มใหม่ แต่ไม่ได้เป็นเช่นนั้นเสมอไป แบตเตอรี่มักจะไม่ได้ทำการคายประจุออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทั้งหมดทุกครั้ง และส่วนใหญ่ใช้เพียง 80 เปอร์เซ็นต์ของการดิสชาร์จเท่านั้น ซึ่งหมายความว่าทำการดิสชาร์จเพียง 80 เปอร์เซ็นต์ของพลังงานที่มีอยู่ และเหลือสำรองไว้ 20 เปอร์เซ็นต์ วัฏจักรของแบตเตอรี่แบบนี้จะทำให้แบตเตอรี่มีอายุการใช้งานยืนยาวกว่าการดิสชาร์จโดยปล่อยประจุทั้งหมด

3. การออกแบบการทดสอบ

3.1 การทดสอบกำลังไฟฟ้าของจักรยานไฟฟ้าประเภทสองล้อ ณ เส้นทางทดสอบ

ซึ่งจะทำการทดสอบที่โหลดต่างๆ สังกัดและบันทึกผลค่าแรงดันไฟฟ้าจากโวลต์มิเตอร์ ค่ากระแสไฟฟ้าจากแอมป์มิเตอร์ และความเร็วรอบที่ความเร็วต่างๆ

3.2 การทดสอบกำลังไฟฟ้าของจักรยานไฟฟ้าประเภทสามล้อ ณ เส้นทางทดสอบ

ซึ่งจะทำการทดสอบที่โหลดต่างๆ สังกัดและบันทึกผลค่าแรงดันไฟฟ้าจากโวลต์มิเตอร์ ค่ากระแสไฟฟ้าจากแอมป์มิเตอร์ และความเร็วรอบที่ความเร็วต่างๆ

3.3 การทดสอบกำลังไฟฟ้าของจักรยานทั่วไปบนแท่นทดสอบ

ซึ่งจะทำการทดสอบที่โหลดต่างๆ สังกัดและบันทึกผลค่าแรงดันไฟฟ้าขาเข้า แรงดันไฟฟ้าขาออกจากโวลต์มิเตอร์ ค่ากระแสไฟฟ้าขาเข้ากระแสไฟฟ้าออกจากแอมป์มิเตอร์ และความเร็วรอบที่ความเร็วต่างๆ

3.4 การทดสอบแบตเตอรี่

ซึ่งจะทำการทดสอบการคายประจุของแบตเตอรี่ที่ค่า capacity rate ต่างๆ จับเวลาการคายประจุ สังกัดและบันทึกผลค่าแรงดันไฟฟ้าจากโวลต์มิเตอร์ และค่ากระแสไฟฟ้าจากแอมป์มิเตอร์

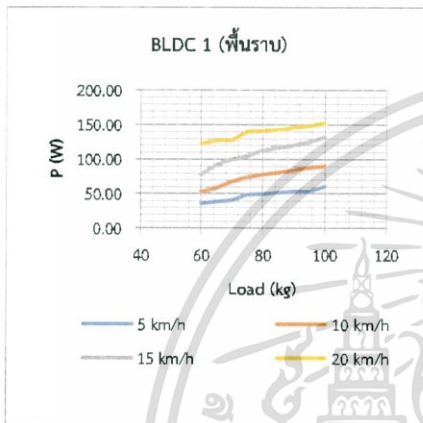
3.5 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- ชุด BLDC Motor
- แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน 48V 12Ahr
- ตัวต้านทานปรับค่าได้
- แท่นทดสอบมอเตอร์
- ไมล์วัดความเร็วจักรยาน
- โวลต์มิเตอร์
- แอมมิเตอร์
- น้ำหนักถ่วง
- นาฬิกาจับเวลา

4. การทดสอบและผลการทดสอบ

การทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้า จะเป็นการทดสอบสมรรถนะทางไฟฟ้าของมอเตอร์ BLDC ในจักรยานไฟฟ้าที่ค่าความเร็วและภาระทางกลต่างๆ โดยจะแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ตอน ได้แก่การทดสอบจักรยานไฟฟ้าประเภทสองล้อ ณ เส้นทางทดสอบ การทดสอบจักรยานไฟฟ้าประเภทสามล้อ ณ เส้นทางทดสอบ และการทดสอบจักรยานไฟฟ้าประเภทสองล้อบนแท่นทดสอบ

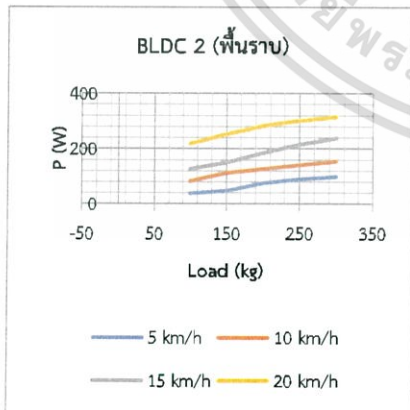
4.1 การทดสอบจักรยานไฟฟ้าประเภทสองล้อ ณ เส้นทางทดสอบ



รูปที่ 2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างภาระทางกลกับกำลังไฟฟ้าที่ค่าความเร็วต่างๆของจักรยานไฟฟ้าประเภทสองล้อ ณ เส้นทางทดสอบ

พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างค่าภาระทางกลกับกำลังไฟฟ้าเป็นแบบเพิ่มขึ้นอย่างเชิงเส้น โดยค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามภาระทางกลของมอเตอร์ นอกจากนี้ค่ากำลังไฟฟ้ายังขึ้นอยู่กับค่าความเร็วของมอเตอร์ โดยเมื่อมอเตอร์ขับเคลื่อนด้วยความเร็วสูงขึ้น ที่ภาระทางกลเดียวกันกำลังไฟฟ้าที่ใช้จะมีค่ามากขึ้น

4.2 การทดสอบจักรยานไฟฟ้าประเภทสามล้อ ณ เส้นทางทดสอบ

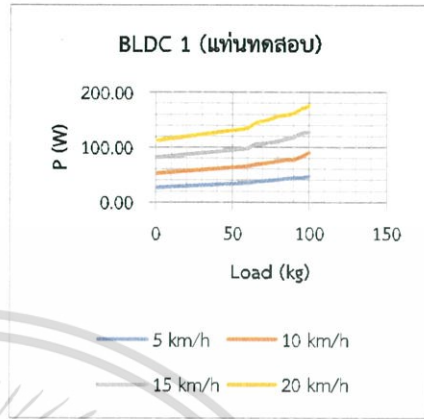


รูปที่ 3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างภาระทางกลกับกำลังไฟฟ้าที่ค่าความเร็วต่างๆของจักรยานไฟฟ้าประเภทสามล้อ ณ เส้นทางทดสอบ

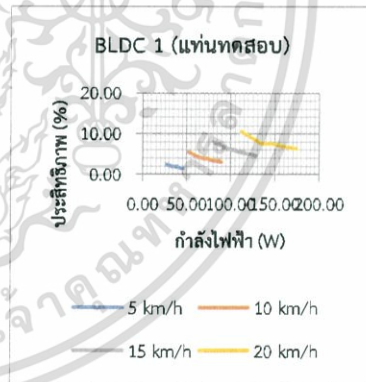
พบว่า ที่ความเร็วเดียวกัน เมื่อเพิ่มภาระทางกลให้แก่มอเตอร์ กำลังไฟฟ้าที่ใช้จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามขนาดภาระทางกล โดยมีแนวโน้มความสัมพันธ์แบบเส้นตรงเช่นเดียวกับตอนที่ 1 แม้ว่าภาระ

ทางกลจะเพิ่มขึ้นถึง 300 kg ก็ตาม

4.3 การทดสอบจักรยานไฟฟ้าประเภทสองล้อบนแท่นทดสอบ



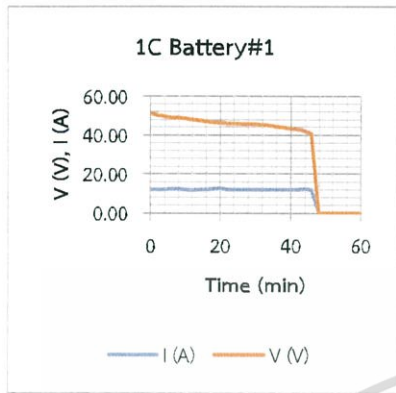
รูปที่ 4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างภาระทางกลกับกำลังไฟฟ้าที่ค่าความเร็วต่างๆของจักรยานไฟฟ้าประเภทสองล้อ บนแท่นทดสอบ พบว่าเมื่อเพิ่มภาระทางกลให้แก่มอเตอร์ที่ความเร็วเดียวกันค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้จะเพิ่มขึ้นแบบเส้นตรงเช่นเดียวกับตอนที่ 1 แต่ค่ากำลังไฟฟ้าขาเข้าของมอเตอร์จะไม่เท่ากับตอนที่ 1 เนื่องจากระบบของตอนนี้เป็นการทดสอบบนแท่นทดสอบ



รูปที่ 5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าขาเข้ากับค่าประสิทธิภาพที่ค่าความเร็วต่างๆ ของจักรยานไฟฟ้าประเภทสองล้อ พบว่าค่าประสิทธิภาพสูงสุดมีค่าเพียง 10.47 % สำหรับการทดสอบที่ 20 km/h กำลังไฟฟ้าขาเข้า 111.97 W เนื่องจากค่าพิกัดกำลังไฟฟ้าของมอเตอร์คือ 1000 W แต่กำลังไฟฟ้าที่ใช้มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับค่าพิกัดของมอเตอร์ จึงทำให้ค่าประสิทธิภาพมีค่าต่ำ

4.4 การทดสอบแบตเตอรี่

ทดสอบการคายประจุที่ 1C



รูปที่ 6 กระแสกับแรงดันที่เวลาต่างๆ ในการคายประจุที่ 1C ของแบตเตอรี่ก้อนที่ 1

การทดสอบแบตเตอรี่ก้อนที่ 1 ที่ 1C ค่าแรงดันจะลดลงอย่างเชิงเส้นจากนาที่ที่ 0 - 44 และจ่ายแรงดันลดลงอย่างรวดเร็ว (deep discharge) ในช่วงนาที่ที่ 44 - 48 จากนั้นแบตเตอรี่จะหยุดจ่ายกระแสและแรงดันที่นาที่ที่ 48

การทดลองการคายประจุแบตเตอรี่พบว่าแบตเตอรี่จะมีช่วง depth discharge ที่ช่วง 80% ของแรงดันเริ่มค้นเท่ากัน และจะหยุดการทำงานที่ 80% ของเวลา end of discharge ของ การคำนวณ capacity rate เนื่องจากค่า volt per cell ตามมาตรฐานของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนที่ SOC 0% หรือแบตเตอรี่จัดการทำงานหรือหยุดจ่ายแรงดันคือ 1.75 V หรือต่ำกว่าสำหรับแบตเตอรี่ 2 V ซึ่งแบตเตอรี่ที่นำมาใช้ทดสอบมีค่าเกิดแรงดันที่ 48 V จึงมีค่า SOC 0% ที่ 42 V หรือต่ำกว่า

5. สรุปผลการทดสอบ

โครงการนี้นำเสนอวิธีการทดสอบสมรรถนะของมอเตอร์จักรยานไฟฟ้าและแบตเตอรี่ จากผลการทดสอบสมรรถนะของจักรยานไฟฟ้าจำนวน 2 คันอย่าง โดยที่มอเตอร์ของจักรยานมีพิกัด 1000 W แบตเตอรี่ 48 V 12 Ah และ 1000 W แบตเตอรี่ 48 V 12 Ah ในการทดสอบสมรรถนะได้ใช้วิธีการเพิ่มภาระทางกลของมอเตอร์ และการเพิ่มความเร็วของจักรยานไฟฟ้า พบว่ามีการเพิ่มภาระทางกลเพิ่มขึ้นมอเตอร์จะใช้กำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเป็นแบบเชิงเส้น และเมื่อมีการเพิ่มความเร็วของจักรยานไฟฟ้า มอเตอร์ของจักรยานก็จะมีการใช้กำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นด้วย แต่เมื่อนำไปทดสอบค่าประสิทธิภาพทางกำลังของมอเตอร์ไฟฟ้าเทียบกำลังที่แบตเตอรี่ใช้งาน พบว่าในการใช้งานขนส่งสิ่งของที่เป็นภาระทางกลตั้งแต่ 0 kg ไปจนถึง 100 kg และ ความเร็วในการใช้งาน 5-20 km/h นั้นค่าประสิทธิภาพการทำงานของมอเตอร์มีค่าอยู่ที่ช่วง 1.5% - 10.47% หรืออาจกล่าวได้ว่ามีพลังงานที่สูญเสียไปให้องค์ประกอบที่ไม่ใช่การขับเคลื่อนมอเตอร์สูงถึง 89.53%

98.5% ซึ่งในส่วนนี้เป็นเพราะพิกัดการใช้งานสูงสุดของมอเตอร์อยู่ที่ 1000 W แต่ค่าการใช้กำลังไฟฟ้าในการทดสอบกับภาระทางกล 300 kg ที่ความเร็ว 20 km/h นั้นมีค่าเพียง 313.13 W หรืออาจกล่าวได้ว่ามอเตอร์ไฟฟ้า 1000 W นั้นมีค่าพิกัดสูงเกินไปสำหรับการใช้งานจักรยานไฟฟ้า นอกจากนี้ค่าประสิทธิภาพที่น้อยยังมีผลมาจากความสูญเสียกำลังจากหลายส่วน



รูปที่ 7 Power flow ของระบบ

ในส่วนของแบตเตอรี่ โครงการนี้ใช้แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนพิกัด 48 V 12 Ah และการทดสอบสมรรถนะการคายประจุพบว่าค่าแรงดันสูงสุดของการใช้งานคือ 54.0 V (เนื่องจากค่าแรงดันต่อเซลล์ของแบตเตอรี่คือ 2.25 V) นำแบตเตอรี่มาทำการคายประจุที่ 1C, 0.5C, 0.2C และ 0.1C โดยควบคุมให้กระแสคงที่ ได้ว่าค่าแรงดันของแบตเตอรี่ลดลงแบบเชิงเส้น และเริ่มลดลงอย่างรวดเร็วที่ 43.5 V หรือประมาณ 80% ของแรงดันสูงสุด จนกระทั่งเหลือค่าแรงดันประมาณ 37.0 V และยุติการทำงานในที่สุด

เอกสารอ้างอิง

[1] T. Kenjo, and S.Nagamori. "Permanent-Magnet and Brushless DC Motors".Northern Ireland:The Universities Press (Belfast) Ltd.,1985
 [2] Ru-Shi Liu, Lei Zhang et al. "Electrochemical Technologies for Energy Storage and Conversion".Weinheim:WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA,2012

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน



นายกฤตดิษฐ์ กุลวิเชียร
เกิดวันที่ 26 ธันวาคม พ.ศ. 2537
ที่อยู่ 8/133 หมู่ 2 ซอย 9 หมู่บ้านชื่อตรงสะพานใหม่
แขวงคลองถนน เขตสายไหม กรุงเทพมหานคร 10220
จบมัธยมศึกษาที่ โรงเรียนฤทธิยะวรรณาลัย
โทรศัพท์ 081-922-6937
E-mail sai_hoinwo@hotmail.com



นายคมสัน ศิริมาจันทร์
เกิดวันที่ 6 เมษายน พ.ศ. 2538
ที่อยู่ 47 ซอยสังคมสงเคราะห์ 6 แขวงลาดพร้าว
เขตลาดพร้าว กรุงเทพมหานคร 10230
จบมัธยมศึกษาที่ โรงเรียนบดินทรเดชา (สิงห์ สิงหเสนี)
โทรศัพท์ 089-481-1004
E-mail p-non_0.0@hotmail.com



นายภาณุพงศ์ จันทรศิลป์
เกิดวันที่ 16 มีนาคม พ.ศ. 2538
ที่อยู่ 751 ซอยศูนย์บันเทิงการค้า แยกปี่แลนด์ ถนนนวมินทร์
แขวงคลองจั่น เขตบางกะปิ กรุงเทพมหานคร 10240
จบมัธยมศึกษาที่ โรงเรียนบดินทรเดชา (สิงห์ สิงหเสนี)
โทรศัพท์ 082-069-8320
E-mail JuBiDuZ@hotmail.com



นายแมน จันทิสา
เกิดวันที่ 26 เมษายน พ.ศ. 2538
ที่อยู่ 98 หมู่ 15 ต.สำนักตะคร้อ อ.เทพารักษ์
จ.นครราชสีมา 30210
จบมัธยมศึกษาที่ โรงเรียนชำนาญสามัคคีวิทยา
โทรศัพท์ 090-984-3367
E-mail mj.narao03@gmail.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้