



โครงการวิศวกรรมไฟฟ้า การทดสอบแบตเตอรี่สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า
The Battery Pack Testing For Electric Vehicles

จัดทำโดย
นายณัฐนนท์ กาญจนประภาส
นายณัฐนันท์ อุบลวัจ

อาจารย์ที่ปรึกษา
ดร.วสันต์ ตันเจริญ

ภาควิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
พ.ศ. 2565

โครงการวิศวกรรมไฟฟ้า

การทดสอบแบตเตอรี่สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า
The Battery Pack Testing For Electric Vehicles

จัดทำโดย

นายณัฐนันท์ กาญจนประภาส

นายณัฐนันท์ อุบลวัจ

อาจารย์ที่ปรึกษา

ดร.วสันต์ ตันเจริญ

ภาควิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พ.ศ. 2565

ใบรับรองโครงการวิศวกรรม
ภาควิศวกรรมไฟฟ้า การทดสอบแบตเตอรี่สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า
The Battery Pack Testing For Electric Vehicles

นาย ฐิฐนนท์ กาญจนประภาส 6230304287
นาย ฐิฐนนท์ อุบลวัจ 6230304295

ได้พิจารณาเห็นชอบ

อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ_____

(อาจารย์ ดร.วสันต์ ตันเจริญ)

กรรมการ_____

(อาจารย์ ดร.ชัยฤกษ์ จักรพัฒน์จิต)

กรรมการ_____

(ผศ.ดร.อุเทน สุปัติ)

อนุมัติให้โครงการนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา

วันที่_____ เดือน_____ พ.ศ._____

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การทดสอบแบตเตอรี่สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า
โดย	นายณัฐนันท์ กาญจนประภาส นายณัฐนันท์ อุบลวัจ
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ ดร.วสันต์ ตันเจริญ
ปีการศึกษา	2565

บทคัดย่อ

เนื้อหาบทคัดย่อ

คำสำคัญ: พิมพ์คำสำคัญ, พิมพ์คำสำคัญ, พิมพ์คำสำคัญ

กิตติกรรมประกาศ

เนื้อหา กิตติกรรมประกาศ

ชื่อผู้เขียน ชื่อสกุล

สารบัญ

สารบัญตาราง

สารบัญภาพ

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ปัจจุบันนี้ปัญหาภาวะโลกร้อนนั้นเป็นปัญหาใหญ่ที่ทั้งโลกกำลังให้ความสำคัญและพยายามที่จะช่วยกันแก้ไขปัญหานี้เพราะด้วยปัญหาภาวะโลกร้อนนี้ส่งผลกระทบมากในหลายๆด้าน ไม่ว่าจะเป็นระบบนิเวศที่เปลี่ยนแปลง ภูมิอากาศระดับน้ำทะเลที่กำลังเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งปรากฏการณ์ทั้งหลายเกิดจากภาวะโลกร้อนขึ้นที่มีมูลเหตุมาจากการปล่อยก๊าซพิษต่างๆ จากโรงงานอุตสาหกรรม จากควันท่อไอเสียของยานยนต์ การเผาขยะ ทำให้แสงอาทิตย์ส่องทะลุผ่านชั้นบรรยากาศมาสู่พื้นโลกได้มากขึ้น ซึ่งนั่นเป็นที่รู้จักกันโดยเรียกว่า สภาวะเรือนกระจก ? ทั้งนี้เราจึงพยายามแก้ปัญหาด้วยการใช้พลังงานทดแทนเพื่อลดมลภาวะเช่น พลังงานไฟฟ้า พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานจากชีวมวล และวิธีการนำพลังงานทดแทนเหล่านี้ไปใช้ได้ถูกประยุกต์ให้ใช้ได้ทุกๆส่วนของชีวิตเรามากขึ้นเช่น การใช้พลังงานแสงอาทิตย์มาผลิตไฟฟ้าเพื่อใช้ในบ้านและยานยนต์ไฟฟ้าเป็นต้น ซึ่งยานยนต์ไฟฟ้าในขณะนี้กำลังได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก?? แต่ก็มีปัญหาในด้านประสิทธิภาพที่ต้องได้รับการพัฒนาต่อไปและส่วนประกอบที่สำคัญมากสำหรับยานยนต์ ไฟฟ้าที่ต้องพัฒนาเป็นอันดับต้นๆนั้นก็คือส่วนที่ใช้ในการกักเก็บพลังงานไฟฟ้าเพื่อให้ยานยนต์ ไฟฟ้านั้นเอาพลังงานไฟฟ้าไปใช้ในการขับเคลื่อนส่วนประกอบต่างๆต่อไปก็คือแบตเตอรี่ ซึ่งแบตเตอรี่นั้นมีปัจจัยหลายอย่างมากที่จะต้องนำมาพิจารณาเช่น อุณหภูมิ ขนาด น้ำหนัก พลังงานที่กักเก็บได้ การชาร์จ การดิสชาร์จ เป็นต้น และปัจจัยเหล่านี้ส่งผลกระทบกับยานยนต์ไฟฟ้าโดยตรงซึ่งแบตเตอรี่ที่ได้รับความนิยมมากในขณะนี้คือ ลิเทียมไอออน(Lithium-Ion Battery) เนื่องจากให้พลังงานที่สูงและยังสามารถเก็บพลังงานได้มากด้วยเช่นกัน มีอายุการใช้งานที่นาน ขนาดเล็ก น้ำหนักเบา มีความเสถียรซึ่งเหมาะกับการนำไปใช้สำหรับยานยนต์ไฟฟ้าอย่างมากเมื่อเทียบกับแบตเตอรี่ชนิดอื่นๆเช่น แบตเตอรี่ลิเทียมโพลิเมอร์(Li-Po) และแบตเตอรี่ตะกั่วกรด(Lead-Acid) ?? และแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนนั้นมีหลายประเภทตามส่วนประกอบทางเคมีภายในตัวแบตเตอรี่ยกตัวอย่างเช่น Lithium Cobalt Oxide ($LiCoO_2$), Lithium Nickel Oxide($LiNiO_2$), Lithium Iron Phosphate($LiFePO_4$) และ Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide($Li(Ni_xMn_yCo_{1-x-y})O_2$) ซึ่งในส่วนประกอบเหล่านี้จะทำให้ได้ข้อดีและข้อเสียที่ต่างกัน??

แบตเตอรี่ที่นำไปใช้สำหรับยานยนต์ นั้นจำเป็นจะต้องได้รับมาตรฐานที่เชื่อถือได้เพื่อความปลอดภัยของทั้งผู้ขับขี่และผู้โดยสารดังนั้นผู้ผลิตจึงจำเป็นต้องทำการทดสอบแบตเตอรี่ก่อนที่จะนำมาใช้กับยานยนต์ ไฟฟ้าตามมาตรฐานสากลที่ได้รับการยอมรับยกตัวอย่างเช่น IEC, ISO, UN ECE R100 เป็นต้นโดยแต่ละมาตรฐานนั้นก็จะมีวิธีการทดสอบและเกณฑ์ที่แตกต่างกันออกไปเช่นการทดสอบ

ความทนต่ออุณหภูมิมาตรฐาน UN 38.3:2015 นั้นจะทดสอบแบตเตอรี่จะเก็บแบตเตอรี่ที่อุณหภูมิ $75 \pm 2^{\circ}\text{C}$ อย่างน้อย 6 ชั่วโมง(12 ชั่วโมงสำหรับแบตเตอรี่ขนาดใหญ่) และจากนั้นก็นำไปเก็บที่อุณหภูมิ $-40 \pm 2^{\circ}\text{C}$ โดยให้เวลาพักแบตเตอรี่มากที่สุด 30 นาทีและทำซ้ำจนครบ 10 cycle ส่วน IEC 62133-2:2017 นั้นนำแบตเตอรี่อยู่ในอุณหภูมิ $70 \pm 2^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 7 ชั่วโมงโดยที่ตัวถังของแบตเตอรี่ต้องไม่รบกวนผลของการป้องกันภายในของส่วนประกอบต่างๆของแบตเตอรี่?? ซึ่งจะได้เห็นได้ชัดถึงความแตกต่างของวิธีการทดสอบและความยากง่ายของการทดสอบ ในประเทศไทยเองก็จะมีมาตรฐานในการทดสอบแบตเตอรี่เช่นกันคือ มอก. ซึ่งมอก.เป็นคำย่อมาจาก ”มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม” หมายถึงกำหนดทางวิชาการที่สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม(สมอ.)ได้กำหนดขึ้นเพื่อเป็นแนวทางแก่ผู้ผลิตในการผลิตสินค้าให้มีคุณภาพในระดับที่เหมาะสมกับการใช้งานมากที่สุดโดยจัดทำออกมาเป็นเอกสารและจัดพิมพ์เป็นหนังสือ ภายในมอก.แต่ละเล่มประกอบด้วยเนื้อหาที่เกี่ยวข้องกับการผลิตผลิตภัณฑ์นั้นๆ เช่น เกณฑ์ทางเทคนิค คุณสมบัติที่สำคัญ ประสิทธิภาพของภาชนะบรรจุภัณฑ์ คุณภาพของวัสดุนำมาผลิตและวิธีการทดสอบ เป็นต้น โครงการวิศวกรรมไฟฟ้านี้ได้นำเสนอการทดสอบแบตเตอรี่โดยอ้างอิงมาตรฐานสากลและมาตรฐานในประเทศไทยเพื่อสำหรับนำไปประยุกต์ใช้และพัฒนายานยนต์ไฟฟ้าต่อไป โดยโครงการนี้จะเลือกใช้แบตเตอรี่ชนิด Lithium nickel manganese cobalt oxide (NMC) และเครื่องทดสอบแบตเตอรี่ Chroma Model 17020 ในการทดสอบ

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- เพื่อศึกษาแนวทางในการทดสอบแบตเตอรี่
- เพื่อทดสอบแบตเตอรี่ชนิด Lithium nickel manganese cobalt oxide (NMC)
- เพื่อนำแนวทางในการทดสอบแบตเตอรี่นี้ไปประยุกต์ใช้ในยานยนต์ไฟฟ้า

1.3 ขอบเขตการทำงาน

ทดสอบการชาร์จดิสชาร์จของแบตเตอรี่ NMC โดยใช้เครื่องทดสอบแบตเตอรี่ Chroma Model 17020 ในการทดสอบแบตเตอรี่

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- ได้รับความรู้และความเข้าใจเกี่ยวกับคุณสมบัติต่างๆของแบตเตอรี่ชนิด NMC
- ได้ทักษะการใช้งานเครื่องทดสอบแบตเตอรี่ Chroma Model 17020
- ได้รับความรู้เกี่ยวกับการทดสอบแบตเตอรี่ตามมาตรฐานที่ได้รับการยอมรับ
- ได้นำความข้อมูลจากการทดสอบที่ได้นี้ไปประยุกต์ใช้กับยานยนต์ไฟฟ้า

บทที่ 2

ทฤษฎีและบทความที่เกี่ยวข้อง

เนื่องจากการแบตเตอรี่นั้นมียุคประกอบและปัจจัยต่างๆที่ต้องทำการพิจารณาเพื่อนำไปพัฒนายานยนต์ไฟฟ้าต่อไปดังนั้นการเข้าใจส่วนประกอบ ปัจจัยต่างๆที่ส่งผลกระทบต่อแบตเตอรี่ คุณสมบัติของแบตเตอรี่ มีความสำคัญอย่างยิ่งเพื่อที่จะเข้าใจสิ่งเหล่านี้จึงมีการค้นคว้าวิจัยหาข้อมูลมากมาย ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงได้ทำการรวบรวมข้อมูล ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องงานวิจัยต่างๆที่ใช้อ้างอิงสำหรับโครงการนี้แล้วคือ

2.1 แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน

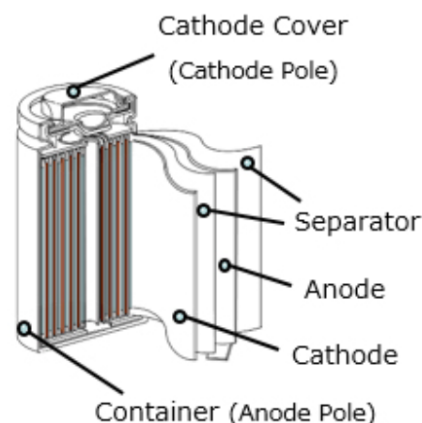
คำนิยามของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนนั้นไม่ได้มีการบัญญัติขึ้นอย่างเป็นทางการแต่โดยทั่วไปแล้วแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนสามารถนิยามได้ว่าเป็นระบบกักเก็บพลังงานซึ่งอาศัยปฏิกิริยาในจากขั้วทางไฟฟ้าทั้งสองโดยที่มีลิเทียมไอออน(Li+)ทำหน้าที่เป็นตัวนำประจุ ซึ่งจากนิยามของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนข้างต้นนี้ไม่ได้หมายถึงแบตเตอรี่เพียงชนิดเดียวยกตัวอย่างเช่น แบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด หรือแบตเตอรี่นิกเกิลแคดเมียมที่หมายถึงแบตเตอรี่ชนิดอื่นๆโดยสรุปจากคุณสมบัติทางเคมีของเซลล์แบตเตอรี่

แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนนั้นมีหลายคุณสมบัติทางเคมีโดยความแตกต่างนี้ขึ้นอยู่กับวัสดุส่วนประกอบของเซลล์แบตเตอรี่ซึ่งความแตกต่างของส่วนประกอบทำให้ได้แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนหลากหลายชนิดและแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนนั้นยังมี หลายรูปแบบหรือรูปร่างในขณะที่หลักการทำงานนั้นยังคงตามนิยามที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นซึ่งหลักการทำงานความแตกต่างทางรูปร่างและชนิดนี้จะอธิบายในหัวข้อถัดไป

2.1.1 โครงสร้างและส่วนประกอบ

หัวข้อนี้จะอธิบายถึงโครงสร้าง ส่วนประกอบหลัก และวัสดุที่นำมาเป็นส่วนประกอบหลักอย่างคร่าวๆของเซลล์แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน

จากรูปที่ 1 เซลล์แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบทรงกระบอกนั้นจะประกอบไปด้วย ขั้วบวก(แคโทด) ขั้วลบ(แอโนด) ตัวรับกระแสขั้วลบ ตัวรับกระแสขั้วบวก อิเล็กโทรไลต์และฉนวนระหว่างขั้วทั้งสองโดยทั่วไปแล้วขั้วบวกนั้นทำจากสารประกอบลิเทียมไอออนเช่น LiCoO_2 , LiNiO_2 , LiMn_2O_4 , LiFePO_4 และ $\text{LiNi}_{1-x}\text{Co}_x\text{Mn}_{1-2x}\text{O}_2$ ส่วนขั้วลบโดยทั่วไปทำจาก $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$, Li_xC_6 , TiS_2 และ V_2O_5 อิเล็ก



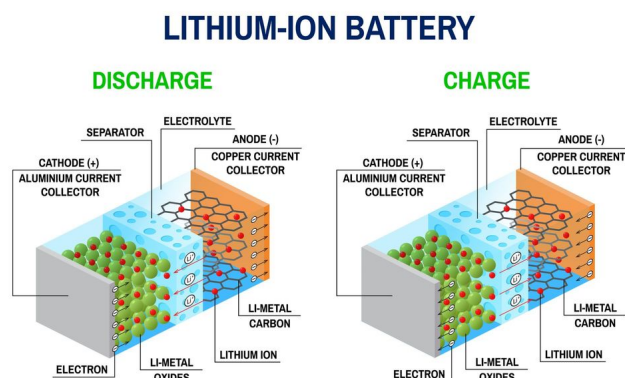
ภาพที่ 2.1 โครงสร้างของเซลล์แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบทรงกระบอก

โพลีเอทิลีนใช้เกลือลิเทียมเช่น LiPF_6 , LiBF_4 , LiClO_4 , และ LiAsF_6 ซึ่งละลายในสารละลายอินทรีย์เช่น ethylene carbonate (EC), propylene carbonate (PC), dimethyl carbonate (DMC) และ chlorine methyl carbonate (ClMC) สอดคล้องกันระหว่างขั้วทั้งสองเช่น polyethylene (PE) และ polypropylene (PP) จะเห็นได้ว่ามีวัสดุหลายอย่างมากที่สามารถนำมาใช้เป็น ขั้วบวกของแบตเตอรี่ ขั้วลบของแบตเตอรี่ อิเล็กโทรไลต์ และฉนวนที่กั้นระหว่างขั้วทั้งสองซึ่งข้อจำกัดทางเทคโนโลยีของวัสดุต่าง ๆ นั้นคือจะต้องสามารถทำงานตามแนวทางดังนี้

- อิเล็กโทรไลต์นั้นจะต้องสามารถส่งผ่านลิเทียมไอออนได้มากที่สุดเท่าที่สามารถส่งผ่านได้ภายใต้เงื่อนไขคือแบตเตอรี่นั้นจะต้องสามารถทำงานในสภาพแวดล้อมทั่วไปได้เช่นสามารถทำงานได้ในช่วงอุณหภูมิ -30°C เพื่อที่ยานยนต์นั้นสามารถจอดได้ในกรณีที่จอดในช่วงเวลาที่อุณหภูมินั้นเย็นจัดจนถึงอุณหภูมิ $+60^\circ\text{C}$ ในกรณีที่อุณหภูมิของแบตเตอรี่นั้นสูงขึ้นเนื่องจากเป็นผลมาจากสภาพแวดล้อมภายนอกและเป็นผลมาจากการชาร์จ
- ในทำนองเดียวกันฉนวนที่กั้นระหว่างขั้วทั้งสองนั้นจะต้องสามารถส่งผ่านลิเทียมไอออนได้มากที่สุดเท่าที่จะสามารถทำได้ภายใต้เงื่อนไขเดียวกันกับอิเล็กโทรไลต์และจะต้องมีความสามารถทนความร้อนสูงแบบฉนวน
- ความเข้ากันได้ของวัสดุของขั้วของแบตเตอรี่นั้นจะต้องสามารถทำให้แบตเตอรี่มีความจุมากที่สุดเท่าที่จะสามารถเป็นไปได้โดยข้อสรุปของวัสดุต่างๆและปฏิกิริยาทางเคมีไฟฟ้านั้นเป็นไปตามรูปที่ 2 และแรงดันของเซลล์แบตเตอรี่นั้นขึ้นอยู่กับความแตกต่างระหว่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้เข้ามาทำเป็นขั้วของแบตเตอรี่ซึ่งแรงดันนั้นอาจจะถูกเปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากการสูญเสียภายในเซลล์แบตเตอรี่อย่างเช่น การสูญเสีย IR losses เนื่องจากความสามารถในการส่งผ่านลิเทียมไอออนที่ไม่ดีในอิเล็กโทรไลต์ยกตัวอย่างเช่นถ้า LiFePO_4 นั้นถูกใช้เข้ามาเป็นขั้วบวกและ $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ เป็นขั้วลบของแบตเตอรี่จะทำให้ได้แรงดันเปิดวงจรปกติ นั่นคือ $V_{oc} = V^+ - V^- = 1.95 \text{ V}$

โดย V^+ นั้นแทนศักย์ไฟฟ้าทางขั้วบวกของแบตเตอรี่ส่วน V^- แทนศักย์ไฟฟ้าทางขั้วลบของแบตเตอรี่

2.1.2 หลักการทำงานของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน



ภาพที่ 2.2 ส่วนประกอบและการทำงานของเซลล์แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน

จากรูปที่ 2 เป็นการดำเนินงานของเซลล์แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนในสภาวะการทำงานทั้งสองสภาวะดังนี้

- เมื่อเซลล์แบตเตอรี่อยู่ในสภาวะดิสชาร์จหรือทำงานเป็นแหล่งจ่ายพลังงาน อิเล็กตรอนจะเคลื่อนย้ายจากขั้วแอโนดผ่านตัวรับกระแสทั้งสองด้านและไหลไปยังขั้วแคโทดในขณะเดียวกัน Li^+ เคลื่อนย้ายจากขั้วแอโนดผ่านอิเล็กโทรไลต์และฉนวนไปยังขั้วแคโทด
- ในทางกลับกันเมื่อเซลล์แบตเตอรี่อยู่ในสภาวะการชาร์จ อิเล็กตรอนจะเคลื่อนย้ายจากขั้วแคโทดผ่านแหล่งจ่ายและตัวรับกระแสไปยังขั้วแอโนดในขณะเดียวกัน Li^+ เคลื่อนย้ายจากขั้วแคโทดผ่านอิเล็กโทรไลต์และฉนวนไปยังขั้วแอโนด

ซึ่งเพื่อความคงความเป็นกลางทางไฟฟ้าการเคลื่อนย้ายของอิเล็กตรอนและ Li^+ นั้นจึงเกิดขึ้นพร้อมกันและเนื่องจากการเคลื่อนย้ายของอิเล็กตรอนก็มีผลทำให้เกิดกระแสไฟฟ้า

ยกตัวอย่างเช่น พิจารณาแบตเตอรี่ลิเทียมแมงกานีสออกไซด์ (Lithium Manganese Oxide, LMO) เมื่อแบตเตอรี่อยู่ในสภาวะการชาร์จ Li^+ เคลื่อนย้ายออกจาก $LiMn_2O_4$ ที่เป็นสารประกอบของขั้วแคโทดผ่านอิเล็กโทรไลต์และฉนวนไปสะสมอยู่ที่ชั้นคาร์บอนของกราฟไฟท์ที่เป็นขั้วแอโนดในทางตรงกันข้ามเมื่ออยู่ในสภาวะการดิสชาร์จ Li^+ ที่สะสมอยู่ที่ชั้นคาร์บอนของกราฟไฟท์จากการชาร์จเคลื่อน

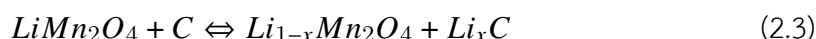
ย้ายผ่านอิเล็กโทรไลต์และฉนวนไปยัง LiMn_2O_4 ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้เป็นดังนี้
ปฏิกิริยาทางขั้วแอโนด



ปฏิกิริยาทางขั้วแคโทด



ปฏิกิริยาทั้งระบบ



2.1.3 ลักษณะของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน

เซลล์แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนมีรูปลักษณะภายนอกที่นิยมในท้องตลาดอยู่ 3 ลักษณะดังนี้
ทรงกระบอก ทรงกล่อง และแบบแผ่น ซึ่งภายในจะมีลักษณะเป็นแบบพันรอบหรือแบบชั้นนั้นจะขึ้น
อยู่กับลักษณะภายนอก

ตัวถังภายนอกของเซลล์แบตเตอรี่นั้นทำจากโลหะเช่น สแตนเลสหรืออลูมิเนียมสำหรับเซลล์แบบทรง
กระบอกและทรงกล่อง อลูมิเนียมแผ่นสำหรับเซลล์แบบแผ่น ตัวถังของเซลล์แบตเตอรี่มีหน้าที่ที่สำคัญ
มากกว่าเป็นเพียงแค่ภาชนะบรรจุส่วนประกอบภายใน ซึ่งหน้าที่ที่สำคัญมากอย่างแรกนั้นคือป้องกัน
ส่วนประกอบภายในจากความชื้นและแก๊สออกซิเจนจากภายนอกซึ่งกัดกร่อนหรือทำให้ขั้วของเซลล์
นั้นเป็นสนิมและทำหน้าที่เป็นฉนวนระหว่างขั้วบวกและขั้วลบระหว่างเซลล์แบตเตอรี่ หน้าที่ที่สำคัญ
อีกอย่างหนึ่งของตัวถังนั้นคือลดความดันจากภายในของเซลล์แบตเตอรี่ในขณะที่เซลล์ทำงานผิดปกติ
จนอาจทำให้เกิดรูปร่างขึ้นเพื่อให้ยังคงพื้นที่สำหรับเซลล์แบตเตอรี่ในโมดูลแบตเตอรี่แต่สำหรับตัวถัง
แบบแผ่นนั้นไม่สามารถทำได้

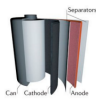
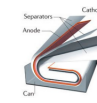
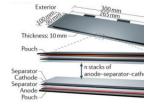
ดังตารางที่ 1 เป็นการสรุปโดยสังเขปของเซลล์แบตเตอรี่ทั้ง 3 ลักษณะทั้งนี้เซลล์แบตเตอรี่แต่ละแบบ
นั้นมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันแล้วแต่การนำไปประยุกต์ใช้

2.1.4 คุณลักษณะของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน

ในหัวข้อนี้จะสรุปคำศัพท์หรือคุณลักษณะต่างๆที่ใช้ในการระบุ เปรียบเทียบ และจำแนก
แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนซึ่งเป็นพื้นฐานสำคัญดังนี้

- C rate และ E rate กระแสดีสชาร์จบ่อยครั้งจะแสดงอยู่ใน C-rate ซึ่ง C-rate คืออัตรากา
รดีสชาร์จต่อความจุสูงสุดของแบตเตอรี่เช่น 1C หมายถึงกระแสดีสชาร์จนี้จะดีสชาร์จแบตเตอรี่

Table 1. Cell designs and Relative Strengths and Weaknesses. Figures adapted from [84] with permission.

Shape	Cylindrical	Prismatic	Pouch
Diagram			
Electrode Arrangement	Wound	Wound	Stacked
Mechanical Strength	++	+	—
Heat Management	—	+	+
Specific Energy	+	+	++
Energy Density	+	++	+

ภาพที่ 2.3 ส่วนประกอบและการทำงานของเซลล์แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน

หมดภายใน 1 ชั่วโมงสำหรับแบตเตอรี่ 100Ah กระแสดีสชาร์จจะเท่ากับ 100A ที่ 5C นั้นกระแสดีสชาร์จจะอยู่ที่ 500A และที่ C/2 กระแสดีสชาร์จจะอยู่ที่ 50A ในทำนองเดียวกัน E-rate คืออัตราพลังงานไฟฟ้าดีสชาร์จ 1E หมายถึงพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการดีสชาร์จหมดภายใน 1 ชั่วโมง

- State of Charge (SOC) หมายถึงการแสดงความสถานะความจุของแบตเตอรี่เทียบกับความจุสูงสุดของแบตเตอรี่เป็นเปอร์เซ็นต์
- Depth of Discharge (DOD) หมายถึงเปอร์เซ็นต์ความจุของแบตเตอรี่ที่ถูกดีสชาร์จไปเทียบกับความจุสูงสุดของแบตเตอรี่
- แรงดันที่ขั้ว (Terminal Voltage) หมายถึงแรงดันระหว่างขั้วของแบตเตอรี่ในขณะต่อโหลดซึ่งแรงดันนั้นขึ้นอยู่กับ SOC และกระแสชาร์จหรือดีสชาร์จ
- แรงดันเปิดวงจร (Open-circuit Voltage, OCV) หมายถึงแรงดันระหว่างขั้วของแบตเตอรี่ในขณะที่ไม่มีการต่อโหลดซึ่งขึ้นอยู่กับ SOC เช่นกัน
- แรงดันปกติ (Nominal Voltage) หมายถึงการรายงานแรงดันของแบตเตอรี่หรือแรงดันอ้างอิงของแบตเตอรี่
- แรงดันตัด (Cut-off Voltage) หมายถึงแรงดันต่ำที่สุดที่แบตเตอรี่สามารถจ่ายได้หรือหมายถึงแรงดันที่แสดงถึงสถานะของแบตเตอรี่ที่หมดแล้ว State of Charge (SOC) หมายถึงการแสดงความสถานะความจุของแบตเตอรี่เทียบกับความจุสูงสุดของแบตเตอรี่เป็นเปอร์เซ็นต์
- ความจุหรือความจุปกติ (Capacity or Nominal Capacity, Ah) หมายถึงความจุคูลอมบิกเมตริกหรือก็คือแอมแปร์ชั่วโมงทั้งหมดที่แบตเตอรี่สามารถดีสชาร์จได้จาก 100%SOC จนถึงแรงดันตัด
- พลังงานหรือพลังงานปกติ (Energy or Nominal Energy, Wh) หมายถึงความจุพลังงานของแบตเตอรี่หรือก็คือวัตต์ทั้งหมดที่แบตเตอรี่สามารถดีสชาร์จได้จาก 100%SOC จนถึงแรงดันตัด

- ไลฟ์ไซเคิล (Cycle Life) หมายถึงจำนวนรอบในการดิสชาร์จของแบตเตอรี่ที่สามารถดิสชาร์จได้ก่อนที่จะเสื่อมสภาพตามเกณฑ์อย่างไรก็ตามสภาพการทำงานของแบตเตอรี่นั้นมีปัจจัยหลายอย่างนอกจากจำนวนรอบการดิสชาร์จเช่น ความชื้นและอุณหภูมิ
- พลังงานจำเพาะ (Specific Energy, Wh/kg) หมายถึงพลังงานปกติต่อมวลของแบตเตอรี่บางครั้งอาจจะหมายถึงความหนาแน่นพลังงานโดยน้ำหนักของแบตเตอรี่
- กำลังไฟฟ้าจำเพาะ (Specific Power, W/kg) หมายถึงกำลังไฟฟ้าสูงสุดต่อมวลของแบตเตอรี่
- ความหนาแน่นพลังงาน (Energy Density, Wh/L) หมายถึงพลังงานปกติต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรบางครั้งอาจจะหมายถึงความหนาแน่นพลังงานโดยปริมาตร
- ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า (Power Density, W/L) หมายถึงกำลังไฟฟ้าสูงสุดต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของแบตเตอรี่
- กระแสดิสชาร์จต่อเนื่องสูงสุด (Maximum Continuous Discharge Current) หมายถึงกระแสดิสชาร์จสูงสุดที่แบตเตอรี่สามารถดิสชาร์จได้อย่างต่อเนื่องข้อจำกัดนี้จะถูกกำหนดโดยโรงงานแบตเตอรี่เพื่อป้องกันอัตราการดิสชาร์จที่มากเกินไปซึ่งอาจจะทำให้แบตเตอรี่เสียหายหรือลดความจุลงได้
- กระแสพัลส์สูงสุดใน 30 วินาที (Maximum 30-sec Discharge Pulse Current) หมายถึงกระแสดิสชาร์จสูงสุดฉับพลันโดยดิสชาร์จเป็นเวลา 30 วินาที
- แรงดันชาร์จ (Charge Voltage) หมายถึงแรงดันของแบตเตอรี่เมื่อแบตเตอรี่ชาร์จเต็มแล้ว
- แรงดันลอยตัว (Float Voltage) หมายถึงแรงดันคงที่ที่แบตเตอรี่ชาร์จจนเต็มแล้วก่อนที่จะเกิดการดิสชาร์จเองภายใน

2.1.5 แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนชนิดต่างๆ

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึง สรุปรูปข้อแตกต่าง ของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแต่ละชนิดแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนในปัจจุบันนั้นเป็นที่นิยมนักอยู่ในตลาดทั้งสิ้น 6 ชนิดซึ่งแต่ละชนิดนั้นโดยทั่วไปแล้วจะจำแนกตามวัสดุที่นำมาใช้เป็นขั้วบวกของแบตเตอรี่ยกเว้นแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนชนิดลิเทียมไททาเนต(Lithium Titanate, LTO) ที่ใช้วัสดุที่นำมาเป็นขั้วลบคือ $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ มาทำการจำแนก ซึ่งแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนทั้ง 6 ชนิดที่ได้อ้างถึงมีด้วยกันดังนี้

แบตเตอรี่ลิเทียมโคบอลต์ออกไซด์ (Lithium Cobalt Oxide Battery)

แบตเตอรี่ลิเทียมโคบอลต์ออกไซด์ถูกพัฒนาขึ้นครั้งแรกโดยบริษัท Sony ในปี 1991 แบตเตอรี่ลิเทียมโคบอลต์ออกไซด์ถูกใช้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ส่วนตัวเป็นส่วนใหญ่เช่น แลปท็อป กล้องถ่ายรูป ฯลฯ เป็นต้นเนื่องจากมีความหนาแน่นของพลังงานสูง อายุการใช้งานนาน และผลิตง่าย แต่แบตเตอรี่ลิเทียมโคบอลต์ออกไซด์นั้นมีปฏิกิริยาสูงดังนั้นจึงทำให้ไม่เสถียรทางความร้อนและต้องการการวัด ตรวจสอบ แสดงผลตลอดช่วงเวลาทำงานเพื่อความปลอดภัยและเนื่องจากโคบอลต์นั้นเป็นวัสดุที่หาได้ยากทำให้แบตเตอรี่ลิเทียมโคบอลต์ออกไซด์มีราคาแพงและด้วยปัญหาด้านความร้อน แบตเตอรี่ลิเทียมโคบอลต์ออกไซด์จึงไม่ค่อยเหมาะกับการนำไปใช้ในยานยนต์ไฟฟ้า อย่างไรก็ตามแบตเตอรี่ลิเทียมโคบอลต์ออกไซด์นั้นได้ถูกนำไปใช้กับยานยนต์ไฟฟ้าอย่าง Tesla Roadster และ Smart Fortwo Electric drive(ED)

แบตเตอรี่ลิเทียมแมงกานีสออกไซด์ (Lithium Manganese Oxide Battery, LMO)

แบตเตอรี่ลิเทียมแมงกานีสออกไซด์ได้ถูกนำเสนอขึ้นเป็นครั้งแรกในช่วงต้นทศวรรษ 1980 และใช้เวลากว่า 15 ปีกว่าจะนำมาจำหน่ายในท้องตลาด ด้วยสถาปัตยกรรมโครงสร้างทางด้านเคมีช่วยเพิ่มการเคลื่อนย้ายของไอออน(Li+)ในอิเล็กโทรดเป็นผลทำให้ลดความต้านทานภายในของแบตเตอรี่และช่วยให้ทนกระแสไฟฟ้าได้มากขึ้นนั้นหมายความว่าสามารถเพิ่มความเร็วในการชาร์จหรือเพิ่มกระแสไฟฟ้าในการชาร์จและสามารถใช้กระแสดีสชาร์จที่สูงได้ ซึ่งข้อดีทางเคมีนี้ทำให้แบตเตอรี่ลิเทียมแมงกานีสออกไซด์นั้นมีเสถียรภาพทางความร้อนมากกว่าแบตเตอรี่ลิเทียมโคบอลต์ออกไซด์แต่มีข้อเสีย นั่นคือมีความจุและอายุการใช้งานสั้นกว่าโดยประมาณ 33% ส่วนมากแบตเตอรี่ลิเทียมแมงกานีสออกไซด์นั้นถูกผสมเข้ากับแบตเตอรี่ลิเทียมแมงกานีสโคบอลต์ออกไซด์เพื่อเพิ่มพลังงานจำเพาะและอายุการใช้งานซึ่งแบตเตอรี่โดยการผสมนี้ในอดีตเคยถูกใช้ในยานยนต์ไฟฟ้าหลายรุ่นเช่น Nissan Leaf, Chevy volt, BMW i3

แบตเตอรี่ลิเทียมฟอสเฟต (Lithium Iron Phosphate, LFP)

ในปี 1996 กลุ่มนักวิจัยในมหาวิทยาลัยเท็กซัสออสติน(The University of Texas at Austin) ค้นพบว่าฟอสเฟตนั้นสามารถนำมาใช้เป็นอิเล็กโทรดของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนได้ ฟอสเฟตนั้นช่วยให้มีความเสถียรต่อการชาร์จเกิน(Over charge)และช่วยเพิ่มความทนทานต่อความร้อน แบตเตอรี่ลิเทียมฟอสเฟตมีความสามารถทางเคมีไฟฟ้าที่ดีเช่น มีความต้านทานต่ำ เป็นต้น มีช่วงอุณหภูมิการทำงานที่กว้างคือ $+60^{\circ}\text{C}$ ถึง -30°C และเกิดปฏิกิริยาคายความร้อนสูง(Thermal runaway)ได้ยาก แต่มีการดีสชาร์จเองสูงมากกว่าแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนชนิดอื่นๆทำให้มีปัญหาทางด้านสมดุลของอายุแบตเตอรี่ซึ่งสามารถใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มาช่วยควบคุมปัญหานี้ได้เช่น BMS แต่ก็ทำให้ราคาของ

แบตเตอรี่นั้นสูงขึ้น

ด้วยประสิทธิภาพอัตราส่วนกำลังไฟฟ้าต่อน้ำหนักและความปลอดภัยสูงนั้นทำให้แบตเตอรี่ลิเทียมฟอสเฟตนิยมใช้มากในรถบ้าน มีการร่วมมือกันระหว่างบริษัทในประเทศเยอรมันได้แก่ ElektroFahrzeuge Stuttgart และ WOF ได้ทำรถบ้านที่ใช้ระบบไฟฟ้าทั้งหมดเจ้าแรกส่งออกสู่ตลาดซึ่งในระบบไฟฟ้านี้ก็นำแบตเตอรี่ลิเทียมมาใช้ด้วยเช่นกัน

แบตเตอรี่ลิเทียมนิเกิลแมงกานีสโคบอลต์ออกไซด์

(Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide Battery, NMC)

แบตเตอรี่นิเกิลแมงกานีสโคบอลต์ออกไซด์สามารถออกแบบให้มีพลังงานจำเพาะสูงหรือกำลังไฟฟ้าได้ซึ่งเป็นผลดีมาจากการผสมกันระหว่างโลหะ 2 ชนิดคือนิกเกิลและแมงกานีส นิกเกิลนั้นทำให้พลังงานจำเพาะสูงแต่มีความเสถียรต่ำส่วนแมงกานีสนั้นทำให้ความต้านทานภายในต่ำแต่มีข้อเสียคือทำให้พลังงานจำเพาะต่ำซึ่งอัตราส่วนของผสมโลหะต่างๆของแบตเตอรี่ลิเทียมนิเกิลแมงกานีสโคบอลต์ออกไซด์นั้นขึ้นอยู่กับแต่ละโรงงานผลิตซึ่งมีดังนี้ NMC111(ความจุ 154 Ahkg-1 ที่ 0.1C) NMC442 NMC622 และในปัจจุบัน NMC811(ความจุ >185 Ahkg-1 ที่ 0.1C) การผสมกันระหว่างแมงกานีสและนิเกิลช่วยเสริมข้อดีของกันและกันทำให้แบตเตอรี่ลิเทียมนิเกิลแมงกานีสโคบอลต์ออกไซด์เป็นแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนที่ประสบความสำเร็จมากที่สุดและเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้กับยานยนต์ไฟฟ้าซึ่งปัจจุบันแบตเตอรี่ชนิดนี้เป็นที่ต้องการอย่างมากเนื่องจากพลังงานจำเพาะสูงและคุณลักษณะทางความร้อนที่ดีจากที่กล่าวมาแบตเตอรี่ลิเทียมนิเกิลแมงกานีสโคบอลต์ออกไซด์ ถูกนำไปใช้กับยานยนต์ไฟฟ้าหลายรุ่นด้วยกันเช่น Nissan Leaf, Chevy Volt, BMW i3

แบตเตอรี่นิเกิลโคบอลต์อลูมิเนียมออกไซด์

(Nickel Cobalt Aluminum Oxide Battery, NCA)

แบตเตอรี่นิเกิลโคบอลต์อลูมิเนียมออกไซด์เกิดขึ้นช่วงปี 1999 แบตเตอรี่ลิเทียมโคบอลต์อลูมิเนียมออกไซด์มีความคล้ายคลึงกับแบตเตอรี่นิเกิลแมงกานีสโคบอลต์ออกไซด์โดยให้พลังงานจำเพาะและกำลังไฟฟ้าจำเพาะที่สูงและมีอายุการใช้งานที่ยาวนานแต่ไม่ค่อยมีความปลอดภัยเท่ากับแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนชนิดอื่นๆ สำหรับการประยุกต์ใช้ในยานยนต์ไฟฟ้านั้นต้องการการตรวจจับและแสดงผลอยู่ตลอดเวลาเพื่อความปลอดภัย มีต้นทุนการผลิตสูงและไม่เหมาะกับการนำไปใช้กับงานประเภทอื่นๆ

อย่างไรก็ตาม Tesla เป็นบริษัทเดียวที่ใช้แบตเตอรี่ชนิดนี้และอ้างว่าแบตเตอรี่นิเกิลโคบอลต์อลูมิเนียมออกไซด์ของ Tesla นั้นใช้โคบอลต์ในการผลิตน้อยกว่า NMC811 ซึ่งใช้โคบอลต์เพียง 15% ซึ่งแบตเตอรี่นิเกิลโคบอลต์อลูมิเนียมออกไซด์ถูกนำไปใช้ใน Tesla Model 3 และ Model S ช่วงแรกๆในปี 2012

แบตเตอรี่ลิเทียมไททาเนต (Lithium Titanate, LTO)

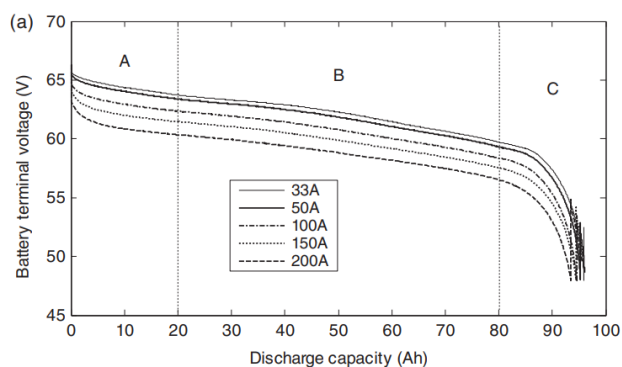
การใช้ลิเทียมไททาเนตในแบตเตอรี่นั้นเกิดขึ้นในปี 1980 ลิเทียมไททาเนตถูกแทนที่กราไฟท์ในการนำมาใช้เป็นอิเล็กโทรดของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนและทำให้อยู่ในโครงสร้างเฉพาะทางเคมีโดยอิเล็กโทรดขั้วตรงข้ามอาจจะใช้ลิเทียมแมงกานีสออกไซด์ก็ได้ ลิเทียมไททาเนตที่ถูกทำให้อยู่ในโครงสร้างเฉพาะทางเคมีนี้ได้รับการยอมรับว่าเป็นวัสดุที่มีประโยชน์มากเนื่องจากกระบวนการเกิดปฏิกิริยาลิเธียน(Lithiation)หรือการส่งผ่านไอออน Li^+ ลิเทียมไททาเนตนั้นจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรเป็นผลทำให้มีอายุการใช้งานที่นานขึ้นมากคู่กับความปลอดภัยจากการดิสชาร์จและชาร์จที่เสียมกราวๆ 1.55V vs Li/Li^+ ลิเทียมไททาเนตนั้นนำไฟฟ้าได้ไม่ค่อยดีและค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของไอออน Li^+ น้อยทำให้ไม่เหมาะกับการใช้งานที่กำลังไฟฟ้าสูงแต่อย่างไรก็ตามปัญหานี้สามารถช่วยได้โดยลดระยะทางการเคลื่อนย้ายของไอออน Li^+ ในโครงสร้างของแบตเตอรี่เพื่อส่งผ่านไอออนได้ดีขึ้นเพิ่มการนำไฟฟ้าได้โดยการโด๊ป(Doping) เคลือบผิว(Surface Coating) ผสม(Forming)กับวัสดุที่นำไฟฟ้าได้ดีอย่างคาร์บอน

แบตเตอรี่ลิเทียมไททาเนตถูกใช้กับยานยนต์ไฟฟ้าเฉพาะในประเทศญี่ปุ่นอย่าง Mitsubishi i-MiEV, Honda และระบบรถบัสดำเนินการ(Tosa) และเนื่องจากมีความปลอดภัยสูงแบตเตอรี่ลิเทียมไททาเนตจึงถูกนำไปใช้ในอุปกรณ์การแพทย์ด้วย

ตารางที่ 2: เปรียบเทียบสมบัติของแบตเตอรี่แต่ละประเภท (ดัดแปลงจากเอกสารอ้างอิง [4, 5, 6])

วัสดุขั้วบวก	หน่วย	LCO หรือ NCA	NMC	LMO		LFP
วัสดุขั้วลบ		แกรไฟต์	แกรไฟต์	แกรไฟต์	LTO	แกรไฟต์
ออกแบบโดยเน้น		ความจุพลังงาน	ความจุพลังงานหรือกำลังไฟฟ้า	กำลังไฟฟ้า	จำนวนรอบในการใช้งาน	กำลังไฟฟ้า
ช่วงแรงดันในการใช้งาน (Operating voltage range)	V	2.5-4.2	2.5-4.2	2.5-4.2	1.5-2.8	2.0-3.6
แรงดันเฉลี่ย (Nominal cell voltage)	V	3.6-3.7	3.6-3.7	3.7-3.8	2.3	3.3
ความจุพลังงานต่อน้ำหนัก	Wh/kg	175-240 (cylindrical) 130-450 (pouch)	100-240	100-150	70	60-110
ความจุพลังงานต่อปริมาตร	Wh/L	400-640 (cylindrical) 250-450 (pouch)	250-640	250-350	120	125-250
อัตราการคายประจุอย่างต่อเนื่อง (Continuous discharge rate)	C^2	2-3	2-3 สำหรับแบตเตอรี่ความจุพลังงานสูง >30 สำหรับแบตเตอรี่กำลังไฟฟ้าสูง	>30	10	10-125
อายุการใช้งาน ¹	รอบ	500+	500+	500+	4000+	1000+
ช่วงอุณหภูมิที่สามารถอัดประจุได้	$^{\circ}\text{C}$	0-45	0-45	0-45	-20-45	0-45
ช่วงอุณหภูมิที่สามารถคายประจุได้	$^{\circ}\text{C}$	-20-60	-20-60	-30-60	-30-60	-30-60
ความปลอดภัย	1-4 (4 = ปลอดภัยที่สุด)	2	3	3	4	4
ราคา	1-4 (4 = ราคาต่ำที่สุด)	3 (LCO) 2 (NCA)	3	3	1	3

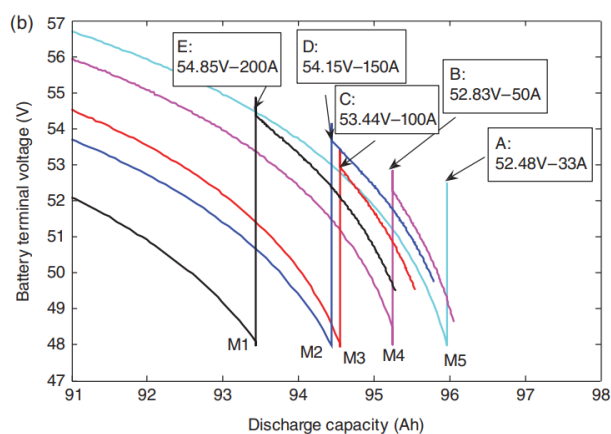
ภาพที่ 2.4 ส่วนประกอบและการทำงานของเซลล์แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน



ภาพที่ 2.5 ส่วนประกอบและการทำงานของเซลล์แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน

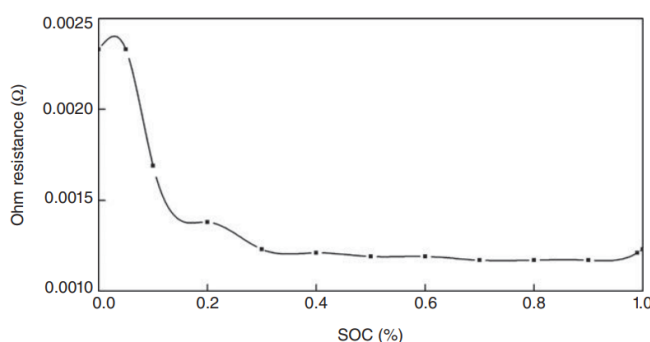
2.2 ประสิทธิภาพอัตราการคายประจุของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน

ในหัวข้อนี้และหัวข้อถัดไป 2.3 จะใช้โมดูลแบตเตอรี่ความจุ 100Ah ที่ประกอบไปด้วย เซลล์แบตเตอรี่ลิเทียมแมงกานีสออกไซด์ 16 เซลล์ในการทดสอบซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับความจุของโมดูลแบตเตอรี่ภายใต้กระแสคายประจุที่ต่างกัน ณ อุณหภูมิห้องดังรูปที่ 3 ส่วนรูปที่ 4 คือ รูปขยายบางส่วนของรูปที่ 3 ที่จุด M1, M2, M3, M4 และ M5 โมดูลแบตเตอรี่มีความจุที่ 93.43Ah, 94.43Ah, 94.55Ah, 95.24Ah และ 95.96 Ah ตามลำดับซึ่งคายประจุด้วยกระแสไฟฟ้าขนาด 200A(2C), 150A(1.5C), 100A(1C), 50A(0.5C) และ 33A(1/3C) ตามลำดับและแรงดันเปิดวงจรหลังจากที่ทำการคายประจุที่ทิ้งไว้เป็นเวลา 1 ชั่วโมงคือ 54.85V, 54.15V, 53.44V, 52.83V และ 52.48V ตามลำดับ



ภาพที่ 2.6 ส่วนประกอบและการทำงานของเซลล์แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน

ซึ่งจะเห็นได้ว่าแรงดันเปิดวงจรของโมดูลแบตเตอรี่เพิ่มขึ้นเมื่อกระแสชาร์จเพิ่มขึ้นและการชาร์จด้วยกระแส 200A ทำให้ความจุของโมดูลแบตเตอรี่นั้นลดลงเพียง 2.6% เมื่อเทียบกับการชาร์จด้วยกระแส 33A โดยการทดลองนี้แสดงให้เห็นถึงความสามารถในอัตราการชาร์จที่ดีของโมดูลแบตเตอรี่ลิเทียมแมงกานีสออกไซด์เนื่องจากสามารถชาร์จที่กระแสน้ำขนาดใหญ่ได้ในขณะที่ความจุและแรงดันเพิ่มขึ้นแต่ในทางตรงกันข้ามอุณหภูมิของโมดูลแบตเตอรี่ เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อชาร์จด้วยกระแสน้ำขนาดใหญ่จากรูปที่ 3 จะเห็นได้ว่าแรงดันของโมดูลแบตเตอรี่จะคงที่มากที่สุดเมื่อ SOC อยู่ในช่วง 20%-80%(บริเวณ B) เนื่องจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีในเซลล์แบตเตอรี่นั้นทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุดและเนื่องจากความต้านทานภายในและความต้านทานที่ขั้วของเซลล์แบตเตอรี่เพิ่มขึ้นทำให้ประสิทธิภาพการชาร์จนั้นลดลงมากในช่วง SOC 0% - 20% (บริเวณ A) และช่วง 80% - 100% (บริเวณ C) และแรงดันของโมดูลแบตเตอรี่ลดลงอย่างมากเมื่อทำการชาร์จจนหมดดังนั้นการชาร์จแบตเตอรี่จนหมดหรือใกล้หมดนั้นทำให้ประสิทธิภาพการชาร์จลดลงและส่งผลกระทบต่ออายุการใช้งานของแบตเตอรี่ด้วยและเพื่อประสิทธิภาพในการใช้งานสูงสุดและเพื่อเพิ่ม อายุการใช้งานของแบตเตอรี่จึงควรจะใช้งานแบตเตอรี่ช่วงที่มีประสิทธิภาพการชาร์จมากที่สุด

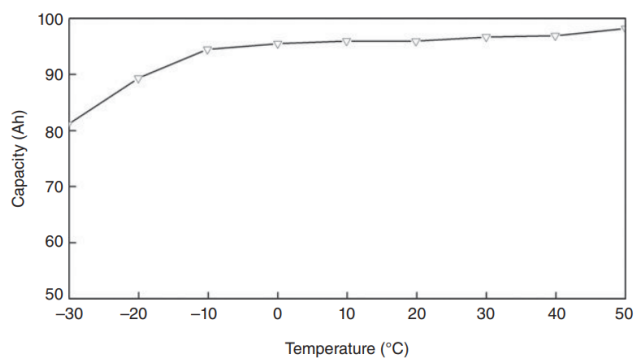


ภาพที่ 2.7 ส่วนประกอบและการทำงานของเซลล์แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน

2.2.1 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อความจุของแบตเตอรี่

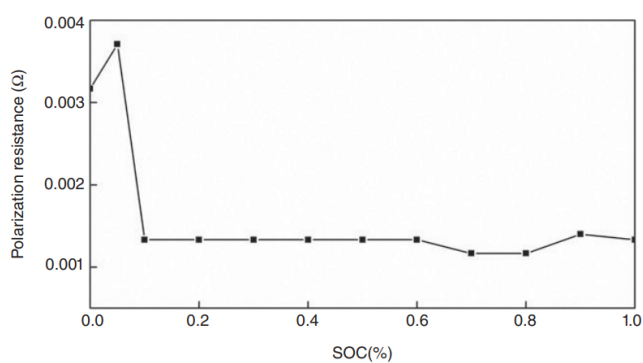
โมดูลแบตเตอรี่ลิเทียมแมงกานีสออกไซด์ถูกใช้ทดสอบที่กระแสชาร์จคงที่ 1/3C ณ อุณหภูมิตั้งแต่ -30°C ถึง 50°C โดยเพิ่มขึ้นทีละ 10°C กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความจุแสดงดังรูปที่ 6 ซึ่งจะเห็นได้ว่าความจุของโมดูลแบตเตอรี่ลดลง 20% ณ อุณหภูมิ -30°C เมื่อเทียบกับอุณหภูมิทำงานปกติเนื่องจากอุณหภูมิต่ำส่งผลต่อขั้วของเซลล์แบตเตอรี่และลดอัตราการทำปฏิกิริยา

กริยาภายในเซลล์แบตเตอรี่และจะเห็นได้ว่าความจุของโมดูลแบตเตอรี่ค่อยๆเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเร่งปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีภายในเซลล์แบตเตอรี่ซึ่งถ้าหาก



ภาพที่ 2.8 ส่วนประกอบและการทำงานของเซลล์แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน

อุณหภูมิสูงมากจนเกินไปก็จะส่งผลเสียทำให้อายุการใช้งานของแบตเตอรี่นั้นสั้นลงและจะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความจุไม่เป็นเชิงเส้นดังนั้นเพื่อที่จะเพิ่มความแม่นยำในการประมาณค่า SOC มีความสำคัญอย่างมากที่จะต้องนำผลกระทบจากอุณหภูมิมาทำการพิจารณาด้วย



ภาพที่ 2.9 ส่วนประกอบและการทำงานของเซลล์แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน

2.3 วงจรสมมูลของแบตเตอรี่

วงจรสมมูลสามารถใช้ในการจำลองคุณลักษณะต่างๆของแบตเตอรี่ระหว่างเงื่อนไขการทำงานต่างๆได้ซึ่งวงจรสมมูลของแบตเตอรี่ประกอบไปด้วยอุปกรณ์ทางไฟฟ้าต่างๆเช่น ตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง และอื่นๆ วงจรสมมูลนี้ถูกนำไปใช้ทั่วไปในการจำลองต้นแบบยานยนต์ไฟฟ้าและระบบการจัดการแบตเตอรี่ซึ่งในหัวข้อนี้จะยกตัวอย่างรูปแบบวงจรสมมูลที่เคยมีการใช้งานจริงอยู่ 4 วงจรคือ วงจรสมมูล Rint(Rint Model) วงจรสมมูลเทวินิน(Thevenin model) วงจรสมมูลRC(RC model) และวงจรสมมูลPNGV(PNGV model)ซึ่งแต่ละวงจรสมมูลมีความแตกต่างกันคือวงจรสมมูลเทวินินนั่นก็คือวงจรสมมูลRint ที่มีวงจรตัวต้านทานและตัวเก็บประจุขนานกันต่ออนุกรมเพิ่มเข้าไปเพื่อแทนคุณลักษณะที่เปลี่ยนแปลงของแบตเตอรี่ วงจรสมมูลPNGVนั่นก็คือวงจรสมมูลเทวินินที่เพิ่มตัวเก็บประจุ C_{pb} อนุกรมเข้าไปแทนแรงดันเปิดวงจรเทียบกับกระแสโหลดและสุดท้ายวงจรสมมูลRC นั้นมีความแตกต่างมากที่สุดเนื่องจากไม่มีแหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรงอยู่ในวงจรเลย

วงจรสมมูลRint (Rint model)

วงจรสมมูล Rint ถูกออกแบบโดยห้องปฏิบัติการแห่งชาติไดาโฮ(The Idaho National Laboratory) ซึ่งประกอบไปด้วย

- แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงอุดมคติ U_{ocv} แทนแรงดันเปิดวงจรของแบตเตอรี่
- ตัวต้านทาน R แทนความต้านทานภายในของแบตเตอรี่

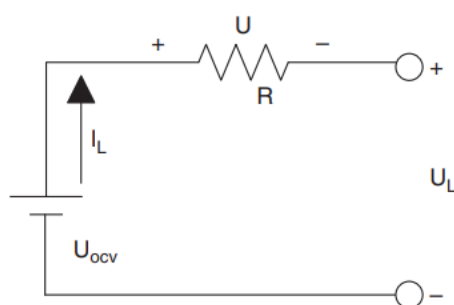


Figure 2.13 Circuit structure of Rint model.

ภาพที่ 2.10 ส่วนประกอบและการทำงานของเซลล์แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน

ซึ่งแรงดันเปิดวงจรนั้นเป็นฟังก์ชันของ SOC และอุณหภูมิและค่าความต้านทานภายในนั้นเปลี่ยนแปลงเมื่อทำการชาร์จภายใต้ SOC ที่เท่ากัน

วงจรสมมูลเทวินิน (Thevenin model)

วงจรสมมูลเทวินินเป็นวงจรสมมูลที่นิยมใช้กันมากที่สุดประกอบไปด้วย

- แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงอุดมคติ U_{OCV} แทนแรงดันเปิดวงจรของแบตเตอรี่
- ความต้านทาน Rohm แทนความต้านทานภายในของแบตเตอรี่
- R_p และ C_p ที่ขนานกันแทน Overpotential ของแบตเตอรี่

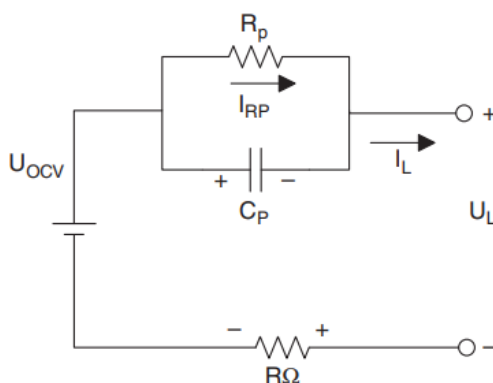


Figure 2.14 Circuit structure of Thevenin model.

ภาพที่ 2.11 ส่วนประกอบและการทำงานของเซลล์แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน

วงจรสมมูล RC (RC model)

วงจรสมมูล RC มีตัวเก็บประจุ 2 ตัวและตัวต้านทาน 3 ตัวซึ่งถูกออกแบบโดยบริษัทผลิตแบตเตอรี่ SAFT ประกอบไปด้วย

- ตัวเก็บประจุ C_b แทนความจุในการเก็บพลังงาน(มีค่าขนาดใหญ่)
- ตัวเก็บประจุ C_c แทนผลกระทบจากพื้นผิวของอิเล็กโทรด
- ตัวต้านทาน R_e แทนความต้านทานคัทออฟ(Cut-off resistance)
- ตัวต้านทาน R_c แทนความต้านทานของตัวเก็บประจุ(Capacitive resistance)

โดยวงจรสมมูลนี้ชั่วแคโทดของแบตเตอรี่มีศักย์ไฟฟ้าเป็นศูนย์

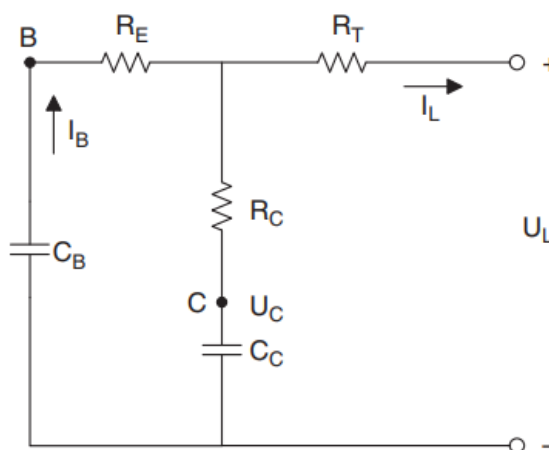


Figure 2.15 Circuit structure of RC model.

ภาพที่ 2.12 ส่วนประกอบและการทำงานของเซลล์แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน

วงจรสมมูลPNGV (PNGV model)

วงจรสมมูล PNGV เป็นวงจรสมมูลมาตรฐานที่ใช้ใน PNGV Battery Test Manual ในปี 2001 และใช้ใน Freedom CAR Battery Test Manual ในปี 2003 วงจรสมมูลนี้ประกอบไปด้วย

- แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงอุดมคติ แทนแรงดันเปิดวงจรของแบตเตอรี่
- ตัวต้านทาน R_{po} แทนความต้านทานภายในของแบตเตอรี่
- ตัวต้านทาน R_{pp} แทนความต้านทานที่ชั่วของแบตเตอรี่
- ตัวเก็บประจุ C_{pp} แทนความจุของชั่วแบตเตอรี่
- ตัวเก็บประจุ C_{pb} แทนแรงดันเปลี่ยนแปลงสะสมเทียบกับเวลาขณะต่อโหลด

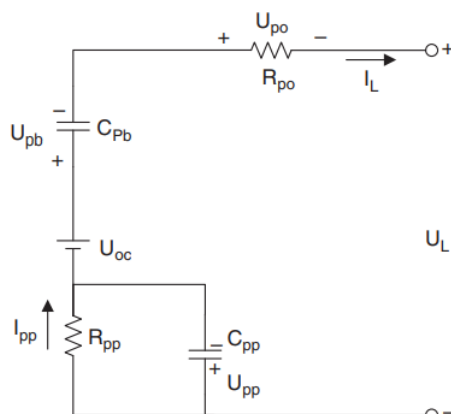


Figure 2.16 Circuit structure of PNGV model.

ภาพที่ 2.13 ส่วนประกอบและการทำงานของเซลล์แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน

2.4 ระบบการจัดการแบตเตอรี่(BMS)

ระบบการจัดการแบตเตอรี่คือระบบอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการจัดการแบตเตอรี่ปฏิกิริยา เช่น ปกป้องแบตเตอรี่จากปัจจัยต่างๆที่ทำให้แบตเตอรี่ทำงานในช่วงการทำงานที่ไม่ปลอดภัยหรือการทำงานที่อาจเกิดความเสียหายต่อแบตเตอรี่ วัดและควบคุมสภาพของแบตเตอรี่ คำนวณข้อมูลพหุติภูมิรายงานข้อมูลนั้นเป็นต้น สำหรับยานยนต์ไฟฟ้าระบบการจัดการแบตเตอรี่มีความสำคัญอย่างมากกับความปลอดภัย เพิ่มประสิทธิภาพระบบของยานยนต์ไฟฟ้า และลดค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมซึ่งระบบการจัดการแบตเตอรี่นั้นต้องสามารถตรวจจับสภาพของแบตเตอรี่และค้นหาสาเหตุของความบกพร่องได้อย่างทันทีและส่งข้อไปยังหน่วยควบคุมยานยนต์(Vehicle Control Unit, VCU)หรือส่งข้อมูลไปยังอุปกรณ์ควบคุมการชาร์จ(Charger)เพื่อให้หน่วยควบคุมยานยนต์หรืออุปกรณ์ควบคุมการชาร์จจะสามารถเลือกวิธีที่จะต้องตอบสนองและประยุกต์ใช้งานแบตเตอรี่ได้อย่างปลอดภัยและมีประสิทธิภาพมากที่สุด

2.4.1 การทำงานของระบบการจัดการแบตเตอรี่

การทำงานของระบบการจัดการแบตเตอรี่นั้นสามารถทำได้หลายอย่างมากโดยระบบการจัดการแบตเตอรี่นั้นขึ้นอยู่กับกรอบแบบให้สามารถทำงานได้ตามที่ต้องการดังนั้นระบบการจัดการแบตเตอรี่แต่ละระบบจึงมีการทำงานที่แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับนำไปประยุกต์ใช้ในงานต่างๆ ขนาด ต้นทุนในการผลิตและอื่นๆ โดยในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการทำงานที่ระบบการจัดการแบตเตอรี่ส่วนมากสามารถทำได้ดังนี้

การตรวจจับหรือการวัดของระบบการจัดการแบตเตอรี่

ระบบการจัดการแบตเตอรี่จะตรวจจับหรือทำการวัดค่าต่างๆดังเช่น

- แรงดัน เช่น แรงดันรวมของแบตเตอรี่ แรงดันในแต่ละเซลล์ของแบตเตอรี่
- อุณหภูมิ เช่น อุณหภูมิเฉลี่ย อุณหภูมิก่อนระบายความร้อน อุณหภูมิหลังระบายความร้อน อุณหภูมิของแต่ละเซลล์แบตเตอรี่
- กระแสไฟฟ้า เช่น กระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าและออกจากแบตเตอรี่

การป้องกันของระบบการจัดการแบตเตอรี่

ระบบการจัดการแบตเตอรี่สามารถหลีกเลี่ยงหรือป้องกันปัจจัยต่างๆที่ทำให้ส่งผลเสียต่อแบตเตอรี่ได้ดังเช่น

- กระแสไฟฟ้าเกินจากการชาร์จและดิสชาร์จ
- แรงดันไฟฟ้าเกินระหว่างการชาร์จและดิสชาร์จ
- อุณหภูมิที่สูงเกินไปและต่ำเกินไป
- กระแสไฟฟ้าวัดไหล
- การสลับขั้วกรณีที่มีการต่อวงจรผิดและการลัดวงจร
- การปรับสมดุลแบตเตอรี่ของระบบการจัดการแบตเตอรี่

การคำนวณต่างๆของระบบการจัดการแบตเตอรี่

ระบบการจัดการแบตเตอรี่สามารถคำนวณค่าต่างๆได้ดังเช่น

- แรงดัน เช่น แรงดันต่ำสุดและสูงสุดของเซลล์แบตเตอรี่
- State of charge(SOC)
- Depth of discharge(DOD)
- State of health(SOH)
- State of power(SOP)
- อิมพีแดนซ์ภายในเซลล์แบตเตอรี่
- จำนวนครั้งการชาร์จและดิสชาร์จ

การติดต่อสื่อสารของระบบการจัดการแบตเตอรี่

ระบบการจัดการแบตเตอรี่ขนาดเล็กอาจจะไม่มีการติดต่อส่งข้อมูลให้กับอุปกรณ์ภายนอกหรืออุปกรณ์ภายในระบบแต่ระบบการจัดการแบตเตอรี่หลายระบบที่มีขนาดใหญ่และมีความซับซ้อนมากขึ้นเช่น ระบบการจัดการแบตเตอรี่ของยานยนต์ไฟฟ้า นั้นหน่วยประมวลผลของระบบการจัดการแบตเตอรี่สามารถติดต่อส่งข้อมูลให้กับอุปกรณ์ภายนอกหรือสามารถส่งข้อมูลภายในระบบหรืออาจจะติดต่อส่งข้อมูล ได้ทั้งอุปกรณ์ภายในและภายนอกระบบ สำหรับการส่งข้อมูลให้กับอุปกรณ์ภายนอกระบบดังเช่น

- การสื่อสารแบบอนุกรม(Serial communications)
- CAN bus communications โดยส่วนมากการส่งข้อมูลด้วยวิธีนี้ใช้กับยานยนต์
- การสื่อสารแบบไร้สาย(Wireless communications)

สำหรับการส่งข้อมูลกันภายในระบบดังเช่น

- Isolated serial communications
- Wireless serial communications

บทที่ 3

การทดสอบแบตเตอรี่ตามมาตรฐาน

แบตเตอรี่เป็นส่วนประกอบที่มีความสำคัญมากสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าเนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่กักเก็บและให้พลังงานไฟฟ้ากับยานยนต์ไฟฟ้าเพื่อความปลอดภัยของผู้ที่ใช้งานยานยนต์ไฟฟ้ามาตรฐานต่างๆจึงถูกกำหนดขึ้นเพื่อใช้กับทุกส่วนประกอบของยานยนต์ไฟฟ้ารวมถึงแบตเตอรี่ด้วยเช่นกันซึ่งการทดสอบแบตเตอรี่ที่ทางคณะผู้จัดทำได้ทำการทดสอบนั้นจะทดสอบตามมาตรฐาน UN ECE Regulation 136 ทั้งหมด 3 หัวข้อดังนี้

3.0.1 การทดสอบการป้องกันการลัดวงจรภายนอกของแบตเตอรี่

ในหัวข้อนี้จะเป็นการทดสอบการป้องกันการลัดวงจรภายนอกแบตเตอรี่ของแบตเตอรี่โดยจุดประสงค์ของการทดสอบนี้เพื่อทดสอบความสามารถการป้องกันการลัดวงจรของแบตเตอรี่โดยถ้าแบตเตอรี่มีอุปกรณ์ป้องกันการลัดวงจรอยู่ภายในดังนั้นอุปกรณ์ป้องกันการลัดวงจรนี้ต้องขัดจังหวะหรือจำกัดกระแสลัดวงจรเพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นจากการลัดวงจรของแบตเตอรี่

เงื่อนไขทั่วไปในขั้นตอนการทดสอบ

- ระหว่างการทดสอบแบตเตอรี่ต้องทำงานอยู่ในอุณหภูมิ $20\pm 10^{\circ}\text{C}$ หรือสูงกว่า
- ก่อนการทดสอบแบตเตอรี่ต้องมีระดับ SOC มากกว่า 50% ของช่วง SOC ที่แบตเตอรี่อยู่ในสภาวะการทำงานปกติ
- เมื่อเริ่มทำการทดสอบอุปกรณ์ป้องกันทุกอย่างที่ส่งผลต่อการทำงานของแบตเตอรี่ซึ่งให้ผลลัพธ์ตามจุดประสงค์ของการทดสอบจะต้องทำงาน

ขั้นตอนการทดสอบการลัดวงจร

- ขั้นแรกสวิตช์ตัวนำต่างๆที่ใช้สำหรับการชาร์จและดิสชาร์จต้องปิดวงจรเพื่อจำลองถึงการใช้งานแบตเตอรี่ขณะขับขี่ยานยนต์ไฟฟ้าและการชาร์จแบตเตอรี่ภายนอกยานยนต์ไฟฟ้าถ้าหากขั้นตอนนี้ไม่สำเร็จให้ทำขั้นตอนนี้อีกครั้งจนกว่าจะสำเร็จ
- ขั้วบวกและขั้วลบของแบตเตอรี่จะต้องทำการเชื่อมต่อถึงกันและกันเพื่อให้เกิดการลัดวงจรโดยอุปกรณ์การเชื่อมต่อนี้จะต้องมีความต้านทานไม่เกิน 5 มิลลิโอห์ม

- การลัดวงจรจะถูกดำเนินไปอย่างต่อเนื่องจนกว่าจะถูกขัดจังหวะจากการทำงานของแบตเตอรี่ หรือมีการจำกัดกระแสลัดวงจร หรือต้องมีการวัดอุณหภูมิที่ตัวแบตเตอรี่เป็นเวลาอย่างน้อย 1 ชั่วโมงโดยตลอดระยะเวลาที่ทำการวัดอุณหภูมิต้องมีการเปลี่ยนแปลงไม่เกิน 4°C
- การทดสอบจะยุติลงหลังจากการสังเกตการแบตเตอรี่ที่อุณหภูมิตามเงื่อนไขข้างต้นตามสภาพแวดล้อมที่ใช้ในการทดสอบ

3.0.2 การทดสอบการป้องกันการชาร์จเกินของแบตเตอรี่

สำหรับหัวข้อการทดสอบนี้จะเป็นการทดสอบการป้องกันการชาร์จไฟฟ้าเกินขีดจำกัดของแบตเตอรี่เพื่อเป็นการทดสอบประสิทธิภาพการป้องกันการชาร์จเกินขีดจำกัดของแบตเตอรี่

เงื่อนไขทั่วไปในขั้นตอนการทดสอบ

- ระหว่างการทดสอบแบตเตอรี่ต้องทำงานอยู่ในอุณหภูมิ $20\pm 10^{\circ}\text{C}$ หรือสูงกว่า
- เมื่อเริ่มทำการทดสอบอุปกรณ์ป้องกันทุกอย่างที่ส่งผลต่อการทำงานของแบตเตอรี่ซึ่งให้ผลลัพธ์ตามจุดประสงค์ของการทดสอบจะต้องทำงาน

ขั้นตอนการทดสอบการชาร์จ

- ขั้นแรกสวิตช์ตัวนำต่างๆที่ใช้สำหรับการชาร์จต้องปิดวงจร
- อุปกรณ์ควบคุมจำกัดการชาร์จของอุปกรณ์วัดหรืออุปกรณ์ทดสอบแบตเตอรี่ต้องถูกปิดการใช้งาน
- แบตเตอรี่ต้องถูกชาร์จด้วยอัตรากระแสอย่างน้อย $1/3\text{ C}$ แต่ต้องไม่เกินกระแสสูงสุดในช่วงการทำงานปกติตามที่ผู้ผลิตแบตเตอรี่ได้กำหนดไว้
- การชาร์จจะถูกดำเนินไปอย่างต่อเนื่องจนกว่าการชาร์จจะถูกขัดจังหวะจากการทำงานของแบตเตอรี่หรือการชาร์จถึงขีดจำกัด เมื่อการขัดจังหวะโดยการทำงานของแบตเตอรี่นั้นไม่ทำงานหรือตัวแบตเตอรี่ไม่มีการทำงานในส่วนของการขัดจังหวะนี้การชาร์จจะถูกดำเนินต่อไปเรื่อยๆจนกว่าจะชาร์จถึง 2 เท่าของความจุปกติ
- การทดสอบจะยุติลงหลังจากการสังเกตการแบตเตอรี่ที่อุณหภูมิตามเงื่อนไขข้างต้นตามสภาพแวดล้อมที่ใช้ในการทดสอบ

3.0.3 การทดสอบการป้องกันการดิสชาร์จเกินของแบตเตอรี่

ในการทดสอบการป้องกันการดิสชาร์จเกินโดยวัตถุประสงค์ของการทดสอบนี้เพื่อทดสอบความสามารถในการป้องกันการดิสชาร์จเกินของแบตเตอรี่โดยถ้าแบตเตอรี่มีอุปกรณ์ป้องกันการชาร์จเกินอยู่ภายในดังนั้นอุปกรณ์ป้องกันการชาร์จเกิน นี้ต้องขัดจังหวะหรือจำกัดกระแสการดิสชาร์จเพื่อป้องกันความเสียหายต่างๆเนื่องจากค่า SOC ที่ต่ำเกินกว่าที่ผู้ผลิตแบตเตอรี่ได้กำหนดเอาไว้

เงื่อนไขทั่วไปในขั้นตอนการทดสอบ

- ระหว่างการทดสอบแบตเตอรี่ต้องทำงานอยู่ในอุณหภูมิ $20 \pm 10^{\circ}\text{C}$ หรือสูงกว่า
- เมื่อเริ่มทำการทดสอบอุปกรณ์ป้องกันทุกอย่างที่ส่งผลต่อการทำงานของแบตเตอรี่ซึ่งให้ผลลัพธ์ตามจุดประสงค์ของการทดสอบจะต้องทำงาน

ขั้นตอนการทดสอบการดิสชาร์จ

- ขั้นแรกสวิตช์ตัวนำต่างๆที่ใช้สำหรับการดิสชาร์จต้องปิดวงจร
- อุปกรณ์ควบคุมจำกัดการชาร์จของอุปกรณ์วัดหรืออุปกรณ์ทดสอบแบตเตอรี่ต้องถูกปิดการใช้งาน
- แบตเตอรี่ต้องถูกดิสชาร์จด้วยอัตรากระแสอย่างน้อย $1/3\text{ C}$ แต่ต้องไม่เกินกระแสสูงสุดในช่วงการทำงานปกติตามที่ผู้ผลิตแบตเตอรี่ได้กำหนดไว้
- การดิสชาร์จจะถูกดำเนินไปอย่างต่อเนื่องจนกว่าการดิสชาร์จจะถูกขัดจังหวะจากการทำงานของแบตเตอรี่หรือการดิสชาร์จถึงขีดจำกัด เมื่อการขัดจังหวะโดยการทำงานของแบตเตอรี่นั้นไม่ทำงานหรือตัวแบตเตอรี่ไม่มีการทำงานในส่วนของการขัดจังหวะนี้การดิสชาร์จจะถูกดำเนินต่อไปเรื่อยๆจนกว่าแบตเตอรี่จะถูกดิสชาร์จจนถึง 25% ของระดับแรงดันปกติ
- หลังหยุดการดิสชาร์จแล้วแบตเตอรี่จะต้องนำไปชาร์จใหม่ด้วยอัตรากระแสปกติตามที่ผู้ผลิตได้กำหนดไว้ถ้าหากไม่ได้มีการกำหนดจะต้องทำการชาร์จด้วยอัตรากระแส $1/3\text{ C}$
- การทดสอบจะยุติลงหลังจากการสังเกตการแบตเตอรี่ที่อุณหภูมิตามเงื่อนไขข้างต้นตามสภาพแวดล้อมที่ใช้ในการทดสอบ

โดยทั้ง 3 หัวข้อของการทดสอบตามมาตรฐาน UN ECE Regulation 136 นั้นเงื่อนไขที่จะผ่านการทดสอบแบตเตอรี่มีดังนี้

1. ในระหว่างการทดสอบแบตเตอรี่จะต้องไม่มีอิเล็กโทรไลต์รั่วไหลออกจากแบตเตอรี่ โดยการสังเกตการรั่วไหลของอิเล็กโทรไลต์ให้สังเกตโดยรอบของแบตเตอรี่เพียงเท่านั้นโดยไม่ต้องแยกชิ้นส่วนใดๆของแบตเตอรี่ออก
2. ในระหว่างการทดสอบแบตเตอรี่จะต้องไม่เกิดการแตกหักหรือฉีกขาด
3. ในระหว่างการทดสอบแบตเตอรี่จะต้องไม่เกิดเพลิงไหม้
4. ในระหว่างการทดสอบแบตเตอรี่จะต้องไม่เกิดการระเบิด

3.1 อุปกรณ์สำหรับทดสอบแบตเตอรี่

ในการทดสอบแบตเตอรี่สำหรับโครงการนี้อุปกรณ์หลักที่จะใช้ในการทดสอบในหัวข้อต่างๆคือเครื่องทดสอบแบตเตอรี่ Chroma Model 17020 โดยใช้งานเครื่องทดสอบแบตเตอรี่ในการทดสอบแบตเตอรี่ในแต่ละหัวข้อมีดังนี้

3.1.1 การใช้เครื่องทดสอบแบตเตอรี่ Chroma Model 17020 การทดสอบการป้องกันการลัดวงจรภายนอกของแบตเตอรี่

บทที่ 4

RESULTS AND DISCUSSION

บทที่ 5

CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS

รายการอ้างอิง

หนังสือและบทความในหนังสือ

First Author, Second Author, and Third Author...

First Author, Second Author, and Third Author...

บทความวารสาร

Jones, Baker, and Williams...

James and Tony...

Jones, Robin, and Smith...

วิทยานิพนธ์

Jones, Baker, and Williams...

Jones, Robin, and Smith...

Jones, Baker, and Williams...

Jones, Robin, and Smith...

Jones, Baker, and Williams...

Jones, Robin, and Smith...

ภาคผนวก

appendix text