

วงจรสมมูลของแบตเตอรี่ลิเทียมไอรอนฟอสเฟต

Equivalent circuit for Li Iron Phosphate Battery



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## Equivalent circuit for Li Iron Phosphate Battery



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

2020

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ปีการศึกษา 2563

วงจรสมมูลของแบตเตอรี่ลิเทียมไอรอนฟอสเฟต

Equivalent circuit for Li Iron Phosphate Battery



อาจารย์ที่ปรึกษา

ดร.สมภาพ ผลไม้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ปริญญาบัตรปีการศึกษา 2563


ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง วจจรสมมูลของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนฟอสเฟต

ผู้จัดทำ



  
..... อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
(ดร. สมภพ ผลไม้)  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## วงจรมุมูลของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนฟอสเฟต

นาย พริษฐ์ ใจสุดา

ดร. สมภพ ผลไม้ อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2563

### บทคัดย่อ

ปริญญาโทฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างวงจรมุมูลของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนฟอสเฟต การศึกษาวงจรมุมูลของแบตเตอรี่ จะช่วยให้สามารถวางแผนการใช้งานแบตเตอรี่ให้มีประสิทธิภาพ โดยในขั้นต้นจะทำการทดสอบการอัดประจุและคายประจุของแบตเตอรี่เพื่อหาคุณลักษณะเฉพาะของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนฟอสเฟต ซึ่งก็คือความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเปิดวงจรและสถานะประจุ จากนั้นหาพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่ด้วยเครื่องวัดค่าความต้านทานภายใน นำไปใช้งานด้วยการจำลองกระแสที่ใช้ในยานยนต์ไฟฟ้า นำโมเดลทางคณิตศาสตร์มาใช้อ้างอิงในการคำนวณหาค่าที่แท้จริงของพารามิเตอร์และเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้จากอัลกอริทึมต่าง ๆ ที่นำมาใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## Equivalent circuit for Li – Iron Phosphate

Mr. Parid Jaisuda

Dr. Sompob Polmai Advisor

### ABSTRACT

This thesis aims to establish an equivalent circuit for lithium iron phosphate batteries. Studying the battery's equivalent circuit will improve planning usability of the battery efficiency. Initially, the battery charge and discharge tests were performed to determine the characteristics of lithium ion phosphate batteries which is the relationship between the open circuit voltage and the state of charge. Then find the battery parameters with an internal impedance meter then apply it by simulating the current used in electric vehicles. The mathematical model was used as reference for calculating the true value of the parameter and compare the results of the experiments obtained from the different algorithms used.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาจาก ดร.สมภพ ผลไม้ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงงาน ที่ได้ให้คำแนะนำแนวคิดในการทำโครงงาน และให้ความช่วยเหลือในการแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น รวมทั้งให้การสนับสนุนในด้านงบประมาณ อุปกรณ์และสถานที่ในการทำปริญญานิพนธ์ และแรงกระตุ้นเพื่อให้ปริญญานิพนธ์นี้เสร็จสมบูรณ์ คณะผู้จัดทำจึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ผู้จัดทำขอขอบพระคุณอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่าน ที่ได้สั่งสอนและมอบความรู้ให้แก่คณะผู้จัดทำ รวมทั้งบุคลากรประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าที่ให้การสนับสนุนในด้านอุปกรณ์ และคำแนะนำในการใช้เครื่องมือ และขอบคุณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณเพื่อน ๆ ร่วมภาควิชาทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือ และเป็นกำลังใจในการทำปริญญานิพนธ์ตลอดมา



คณะผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## สารบัญ

บทคัดย่อ.....	I
ABSTRACT.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญรูปภาพ.....	VI
สารบัญตาราง.....	VIII
บทที่ 1.....	1
1.1 ความเป็นมาและที่มาของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	1
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ.....	1
1.4 แผนการดำเนินโครงการ.....	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	3
บทที่ 2.....	4
2.1 หลักการพื้นฐานของแบตเตอรี่.....	4
2.2 แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน (Advanced Li-ion battery).....	5
2.3 แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนฟอสเฟต (Advanced Li-ion phosphate battery).....	7
2.4 ระบบจัดการแบตเตอรี่ (Battery Management System).....	8
2.5 สถานะประจุ (State of Charge - SoC).....	9
2.6 Internal Resistance Measurement.....	13
2.7 Warburg Impedance.....	15
2.8 วงจรสมมูลของแบตเตอรี่ (Equivalence Circuit Model).....	17
บทที่ 3.....	19
3.1 การหาเส้นโค้งเปิดวงจร (OCV Curve).....	20
3.2 การวัดค่าความต้านทานภายใน.....	22
3.3 การหาค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นสำหรับ System Identification.....	24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 4.....	28
บทที่ 5.....	36
5.1 สรุปผลการดำเนินงาน.....	36
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	37
บรรณานุกรม .....	38
ประวัติผู้เขียน .....	40
ภาคผนวก.....	41



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 2.1 องค์ประกอบพื้นฐานและหลักการทำงานของแบตเตอรี่	4
รูปที่ 2.2 กลไกการอัดประจุ (ซ้าย) และกลไกการคายประจุ (ขวา) ของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน	5
รูปที่ 2.3 โครงสร้างภายในของแบตเตอรี่	7
รูปที่ 2.4 สถานะประจุและสถานะสุขภาพ	8
รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ทั่วไประหว่าง SoC และ OCV (เส้นสีม่วง)	11
รูปที่ 2.6 1st Order Battery Equivalent Circuit	13
รูปที่ 2.7 DC Pulse Measurement	13
รูปที่ 2.8 Battery Impedance Meter BT4560	14
รูปที่ 2.9 Cole-Cole plot for a lithium-ion battery	15
รูปที่ 2.10 Randle Circuit	15
รูปที่ 2.11 Modified Randle Circuit	16
รูปที่ 2.12 Foster's Circuit	16
รูปที่ 2.13 Battery Equivalent Circuit Model	17
รูปที่ 2.14 3rd Order Battery Equivalent Circuit Model	17
รูปที่ 3.1 DC Electric Load DL3021 และ DC Electric Power Supply DP811	20
รูปที่ 3.2 การหาแรงดันเปิดวงจร (OCV) จากแรงดันระหว่างขั้วเทียบกับสถานะประจุ	21
รูปที่ 3.3 กราฟแรงดันระหว่างขั้ว (สีน้ำเงิน), OCV (สีแดง) เทียบกับ SoC ของแบตเตอรี่ความจุ 20 Ah	21
รูปที่ 3.4 กราฟแรงดันระหว่างขั้ว (สีน้ำเงิน), OCV (สีแดง) เทียบกับ SoC ของแบตเตอรี่ความจุ 80 Ah	22
รูปที่ 3.5 Battery impedance meter โมเดล BT4560	22

รูปที่ 3.6 Cole – Cole plot ค่าความต้านทานภายในของ Cell Model A ที่ความถี่ต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับใช้ในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

รูปที่ 3.7 Cole – Cole plot ค่าความต้านทานภายในของ Cell Model B ที่ความถี่ต่าง ๆ	23
รูปที่ 3.8 Battery Equivalent Circuit, (a) Modified Randle Circuit, Impedance ในรูปของ Foster’s Circuit (b) Warburg Impedance ในรูปของ Foster’s Circuit	24
รูปที่ 3.9 EV Reference Applications Model	26
รูปที่ 3.10 รูปแบบของกระแสที่เกิดจากการจำลองการขับรถตาม Driving cycle	26
รูปที่ 3.11 รูปแบบของกระแสของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนที่ใช้ โปรไฟล์กระแสการจำลองการขับรถตาม Driving cycle ในการอัดและคายประจุ	27
รูปที่ 4.1 Non-linear Battery Equivalent Circuit Model	29
รูปที่ 4.2 Linear Battery Equivalent Circuit Model	30
รูปที่ 4.3 กราฟแรงดันระหว่างขั้วเมื่อเทียบกับเวลา model A	30
รูปที่ 4.4 กราฟแรงดันระหว่างขั้วเมื่อเทียบกับเวลา model B	31
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง State – space model (สี่เทา) กับ battery model A	32
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Grey - box model (สี่เทา) กับ battery model A	33
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง State – space model (สี่เทา) กับ battery model B	34
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Grey - box model (สี่เทา) กับ battery model B	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational **VII**e only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1	มาตรฐาน BCI สำหรับการประเมิน SoC ของแบตเตอรี่	10
ตารางที่ 3.1	ค่าพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่ที่ใช้ในการทดลอง	19
ตารางที่ 4.1	ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของวงจรสมมูลแบตเตอรี่ที่ SoC 50% โดยเทียบจาก State – space model	28
ตารางที่ 4.2	ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของวงจรสมมูลแบตเตอรี่ที่ SoC 50% โดยเทียบจาก Grey- box model	28



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational VIIIe only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและที่มาของโครงการ

ในปัจจุบันทั่วโลกได้ประสบปัญหาที่สำคัญปัญหาหนึ่งนั่นคือ ปัญหามลพิษทางอากาศ สาเหตุสำคัญนั้นเกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ เช่น อุตสาหกรรม การผลิตไฟฟ้า การเกษตร ส่วนครัวเรือน และการคมนาคม จากการรายงานของ Environmental Protection Agency (EPA) ในปี 2019 ที่ว่า “แหล่งปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่มากที่สุดในสหรัฐอเมริกา คือ การคมนาคม” [1] ดังนั้นการคมนาคมจึง เป็นเป้าหมายที่สำคัญในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก การคมนาคมส่วนใหญ่ที่เกี่ยวเนื่องกับ รถยนต์หรือยานยนต์น้ำมันที่มีการใช้น้ำมันชนิดต่าง ๆ เช่น น้ำมันเบนซิน และน้ำมันดีเซล เพื่อนำมาเป็น เชื้อเพลิง ซึ่งเชื้อเพลิงเหล่านี้ล้วนก่อให้เกิดการเผาไหม้ซึ่งเป็นสาเหตุของก๊าซเรือนกระจก ทำให้ในปัจจุบัน รัฐบาลประเทศต่าง ๆ ได้ร่วมมือกันเพื่อสนับสนุนให้ยานยนต์ไฟฟ้าเป็นยานยนต์หลักแทนยานยนต์น้ำมัน ดังนั้นยานยนต์ไฟฟ้าจึงช่วยลด ปัญหามลพิษทางอากาศได้ และแบตเตอรี่ที่เป็นส่วนสำคัญภายในยานยนต์ไฟฟ้านี้ส่วนมากจะเลือกใช้ “แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนฟอสเฟต”

แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนเป็นแบตเตอรี่ที่มีน้ำหนักเบา มีอัตราการคายประจุต่ำ และสามารถให้พลังงานได้สูง [2] แต่แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนฟอสเฟตนั้นเสียหายได้ง่ายหากใช้งานได้ไม่ถูกวิธี ดังนั้น แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนฟอสเฟตจึงต้องมีระบบจัดการที่ดี จากวงจรสมมูลของแบตเตอรี่ที่มีประสิทธิภาพ แบตเตอรี่จึงจะใช้งานได้เต็มประสิทธิภาพ มีอายุการใช้งานที่ยาวนานและมีความปลอดภัยระหว่างการใช้งาน

#### 1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาและวิเคราะห์รูปแบบของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการประมาณสถานะของแบตเตอรี่
2. เพื่อเป็นแนวทางในการวิจัยและพัฒนาการประมาณสถานะของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนฟอสเฟตต่อไป

#### 1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ

1. ศึกษาและวิเคราะห์รูปแบบของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแบตเตอรี่
2. สร้างวงจรสมมูลของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนฟอสเฟต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## 1.4 แผนการดำเนินงาน

การดำเนินงาน	ปีการศึกษา 2563 ภาคเรียนที่ 2				
	มกราคม	กุมภาพันธ์	มีนาคม	เมษายน	พฤษภาคม
1.ศึกษาข้อมูล งานวิจัยและทฤษฎีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง					
2.ศึกษาโปรแกรมและจัดเตรียมอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง					
3.ออกแบบวงจรจำลองฮาร์ดและค้ายประยุกต์ในโปรแกรม MATHLAB					
4.ทดสอบฮาร์ดและค้ายประยุกต์แบบเตอรี					
5.ทดสอบวัดค่าพารามิเตอร์ของแบบเตอรี					
6.สรุป วิเคราะห์ผลการทดสอบ					
7.จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์					

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### 1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. สามารถวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการประมาณสถานะของแบตเตอรี่ได้
2. สามารถหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแบตเตอรี่ได้
3. สามารถสร้างวงจรประมาณสถานะของแบตเตอรี่ได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

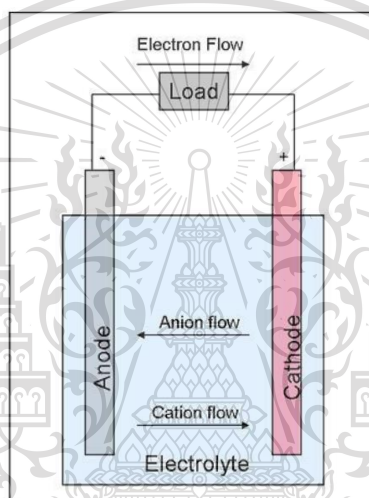
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## บทที่ 2

### หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 หลักการพื้นฐานของแบตเตอรี่

แบตเตอรี่ (Battery) คือ อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่จัดเก็บพลังงานเพื่อไว้ใช้ต่อไป ถือเป็นอุปกรณ์ที่สามารถแปลงพลังงานเคมีให้เป็นไฟฟ้าได้โดยตรงด้วยการใช้เซลล์กัลวานิก (Galvanic cell) ที่ประกอบด้วยขั้วบวกและขั้วลบ พร้อมกับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte solution) แบตเตอรี่อาจประกอบด้วยเซลล์กัลวานิกเพียง 1 เซลล์หรือมากกว่าก็ได้ ดังรูปที่ 2.1 [2]



รูปที่ 2.1 องค์ประกอบพื้นฐานและหลักการทำงานของแบตเตอรี่

การเก็บสะสมพลังงานไฟฟ้าในแบตเตอรี่แบบต่าง ๆ จะมีเกณฑ์การกำหนดทางเลือก การเก็บสะสมที่สำคัญ คือ ขนาดความจุ (กิโลวัตต์ชั่วโมง) ความหนาแน่นการเก็บสะสม (Storage Density) (กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อปริมาตร) นอกจากนี้ ยังมีปัจจัยอื่นที่ต้องคำนึงถึงด้วย ได้แก่ ประสิทธิภาพ (เนื่องจากการสูญเสียระหว่างการประจุ การเก็บสะสม และการคายประจุ เพราะ แบตเตอรี่เป็นอุปกรณ์สำหรับจัดเก็บไฟฟ้าที่สามารถประจุไฟฟ้าเข้าไปใหม่ (Recharge) ได้หลายครั้ง และประสิทธิภาพจะไม่เต็ม 100% จะอยู่ที่ประมาณ 80 % สำหรับแบตเตอรี่ทั่วไป แต่สำหรับ แบตเตอรี่ลิเธียมไอออนจะมีประสิทธิภาพสูงถึง 99%[3] เพราะมีการสูญเสียพลังงานบางส่วนไปใน รูปความร้อนและปฏิกิริยาเคมีจากการประจุ/คายประจุ[4] ความหนาแน่นเชิงพลังงาน ความหนาแน่นเชิงกำลังไฟฟ้า อายุการใช้งานและต้นทุน เป็นต้น ซึ่งแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนมีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

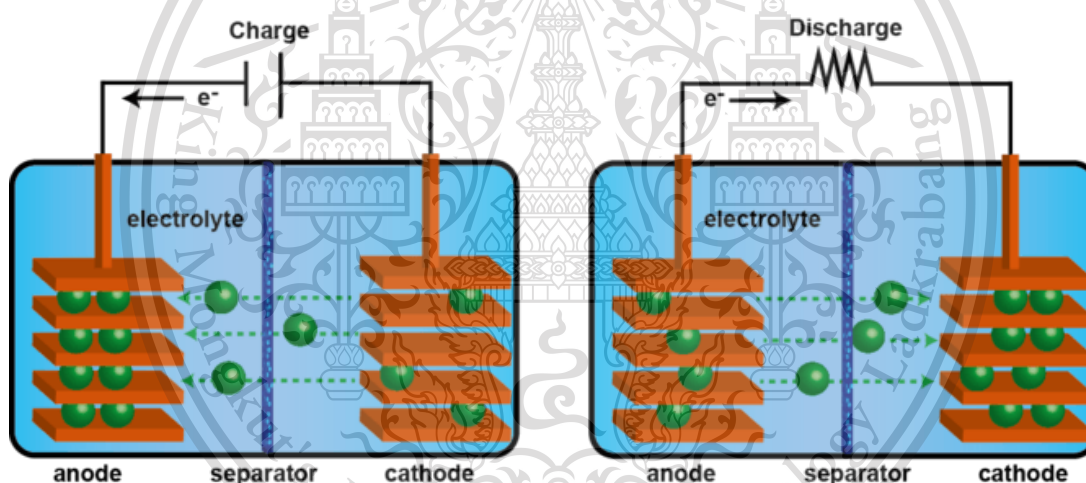
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## 2.2 แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน (Advanced Li-ion battery)

แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนมีลิเทียมเป็นองค์ประกอบในการผลิตที่สำคัญและได้รับความนิยมในปัจจุบัน เทคโนโลยีการผลิตแบตเตอรี่ด้วยลิเทียมมีจุดเริ่มต้นจากการวิจัยในช่วงปีค.ศ. 1970 ขณะนั้นเป็นชนิดใช้ครั้งเดียวทิ้ง (Primary Cell) คุณสมบัติที่ดีของลิเทียมคือ เป็นโลหะที่เบา ให้ แรงดันไฟฟ้าสูง และยังมี ความหนาแน่นเชิง กำลังไฟฟ้า (Power Density) สูงที่สุดเมื่อเทียบกับ แบตเตอรี่ชนิดอื่นที่น้ำหนักเท่ากัน ปัญหาของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมในระยะแรกคือเรื่องความปลอดภัย ในระหว่างอัดประจุไฟมีแนวโน้มที่จะเกิดความร้อนทำให้ระเบิดได้ง่าย งานวิจัยใน ระยะต่อมาจึงได้มีการทดลองเปลี่ยนจากการใช้ลิเทียมในรูปแบบของโลหะ (Lithium Metal) มาเป็น รูป ของไอออน (Lithium Ion) ซึ่งมีความปลอดภัยสูงกว่ามากถึงแม้จะให้พลังงานที่น้อยกว่า แบตเตอรี่ชนิดลิเทียม ไอออนแบบประจุไฟใหม่ได้ (Secondary Cell) ออกสู่ตลาดใน เชิงพาณิชย์เป็นครั้งแรกในปี 1991 โดยบริษัท Sony Corporation จากนั้นก็ได้มีการผลิตลิเทียม ไอออนแบตเตอรี่เพื่อตอบสนองอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ หลากหลายประเภท เป็นกลุ่มแบตเตอรี่ที่มีความนิยมในการใช้งานสูงที่สุด



รูปที่ 2.2 กลไกการอัดประจุ (ซ้าย) และกลไกการคายประจุ (ขวา) ของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน

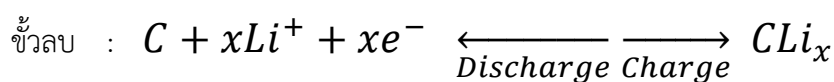
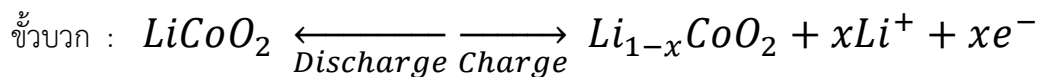
2.2.1 ส่วนประกอบ แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนมีส่วนประกอบหลักคือ ขั้วแอโนด ขั้ว แคโทด สารละลายอิเล็กโทรไลต์ และเยื่อเลือกผ่าน (Separator) โดยส่วนใหญ่แบตเตอรี่ลิเทียม ไอออนที่ใช้จะมีขั้วบวกทำมาจากลิเทียมเมทัลออกไซด์ (Lithium Metal Oxide) และขั้วลบทำมาจาก คาร์บอนหรือกราฟไฟต์ ส่วนสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้คือเกลือลิเทียมในสารละลายออร์แกนิก มีแผ่นกั้นเป็นวัสดุพอร์ซันทำจากโพลีพรอพิลีน หรือโพลีเอทิลีน โดยส่วนประกอบแบตเตอรี่แสดงดังรูป 2.2 [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.2.2 หลักการทำงาน ในระหว่างการอัดประจุ ลิเทียมไอออนจะเคลื่อนที่จากขั้วบวกผ่านอิเล็กโทรไลต์ไปยังขั้วลบ และเกาะติดกับขั้วคาร์บอน และในระหว่างการจ่ายไฟ ลิเทียมไอออนจะเคลื่อนที่กลับไปยังขั้วลิเทียม โคบอลต์ออกไซด์ โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นขั้วทั้งสองแสดงได้ดัง สมการเคมีด้านล่าง



2.2.3 คุณสมบัติแบตเตอรี่ชนิดนี้ได้รับความนิยมในการนำมาใช้กักเก็บพลังงาน โดยเฉพาะในอุปกรณ์เคลื่อนที่ขนาดพกพาทุกประเภท เนื่องจากมีคุณสมบัติเด่น ดังนี้

- มีความสามารถในการจุพลังงานได้อย่างดีในขนาดเล็กและมีน้ำหนักเบา
- มีอายุการใช้งานยาวนาน
- อัตราการคายประจุด้วยตัวเอง (Self-discharge) ต่ำ (0.03 – 0.1% ต่อวัน)
- ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาต่ำ

แต่อย่างไรก็ตาม แบตเตอรี่ลิเทียมก็มีข้อจำกัด คือ

- มีการเสื่อมอายุตามเวลาแม้ไม่มีการใช้งาน
- เสียหายได้ง่ายหากใช้งานไม่ถูกวิธี จึงจำเป็นต้องมีวงจรป้องกันประกอบอยู่ใน แบตเตอรี่ เพื่อให้แบตเตอรี่ทำงานอยู่ในช่วงที่ปลอดภัย โดยวงจรป้องกันจะจำกัด แรงดันสูงสุดของเซลล์ขณะอัดประจุ ป้องกันไม่ให้เกิดการใช้งานที่แรงดันต่ำเกินไป และป้องกันการลัดวงจร แรงดันที่ต่ำหรือสูงเกินไปและกระแสที่สูงผิดปกติ เช่น การ ลัดวงจร ทำให้เซลล์ลิเทียมสูญเสียความจุ หรือเสียหายถาวร
- อุณหภูมิมีผลต่ออายุการใช้งาน โดยอุณหภูมิสูงทำให้แบตเตอรี่เสื่อมได้ง่าย จึงต้องมี การวัดอุณหภูมิเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการใช้งานที่อุณหภูมิสูงหรือต่ำผิดปกติ แต่ถ้าต้อง เก็บแบตเตอรี่เป็นเวลานาน การเก็บในที่เย็นจะชะลอการเสื่อมของแบตเตอรี่ทุก ชนิดลงได้ โดยอุณหภูมิ การเก็บรักษาแบตเตอรี่ลิเทียมที่ดีอยู่ที่ 15 องศาเซลเซียส และควรมีไฟประจุอยู่ในแบตเตอรี่ 40 %

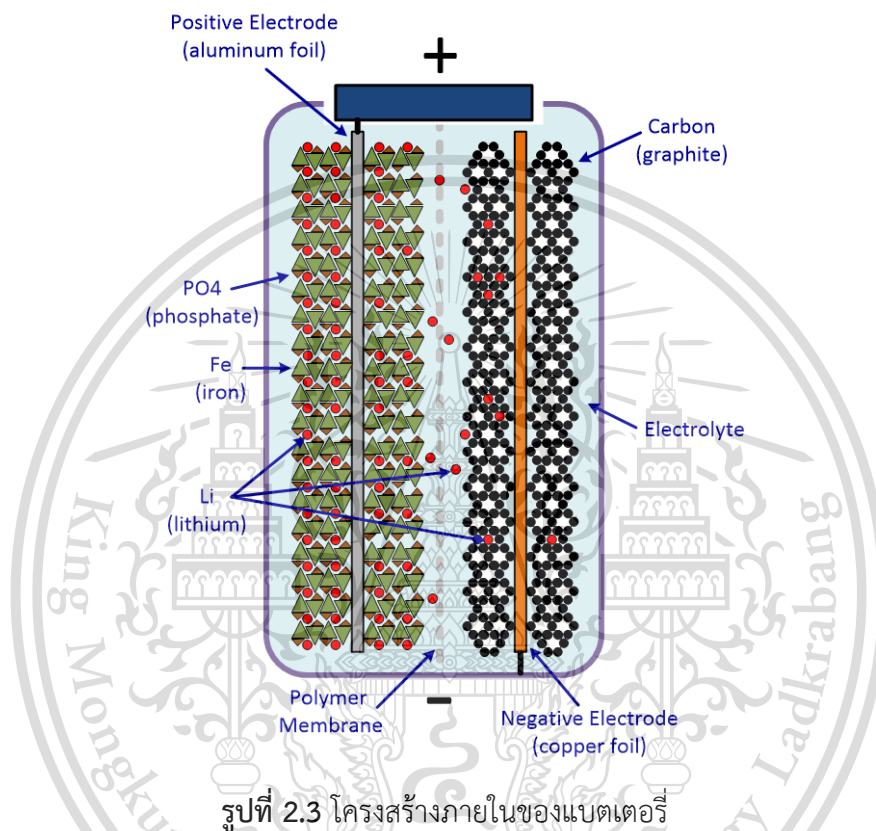
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

- ราคาค่อนข้างสูง จึงไม่นิยมผลิตเพื่อสำรองพลังงานขนาดใหญ่ แต่ก็ยังได้รับความสนใจในการนำมาเก็บพลังงานที่ใช้กับรถยนต์ไฟฟ้า ซึ่งต้องมีการพัฒนาด้านวัสดุ และเน้นที่การลดต้นทุนในการผลิต[4]

### 2.3 แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนฟอสเฟต (Advanced Li-ion phosphate battery)



แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนฟอสเฟต คิดค้นโดย John Goodenough's มหาวิทยาลัย Texas เมื่อปี 1996 และได้พัฒนาเป็นสินค้าออกสู่การตลาดในปี 2004 ลิเทียมไอออนฟอสเฟตมีโครงสร้างทางเคมี เหมือนกับแบตเตอรี่ลิเทียมทั่วไป แต่เปลี่ยนวัสดุที่ใช้จาก Cobalt Dioxide ( $\text{LiCoO}_2$ ) มาเป็นโลหะที่อึดและทนต่อความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมี ซึ่ง  $\text{LiFePO}_4$  สามารถให้พลังงานที่สูงกว่า ไม่เป็นพิษ มีอายุการใช้งานที่มากกว่าแบตเตอรี่รุ่นเก่า ลิเทียมไอออนฟอสเฟตสามารถประจุไฟได้ในแบบแรงดันคงที่ หมายความว่าผู้ใช้งานสามารถประจุไฟใหม่ด้วยอะแดปเตอร์ไฟตรง เหมือนกับแบตเตอรี่ประเภทตะกั่วกรด และใช้ระยะเวลาในการประจุไฟใหม่น้อยกว่าแบตเตอรี่แบบเก่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

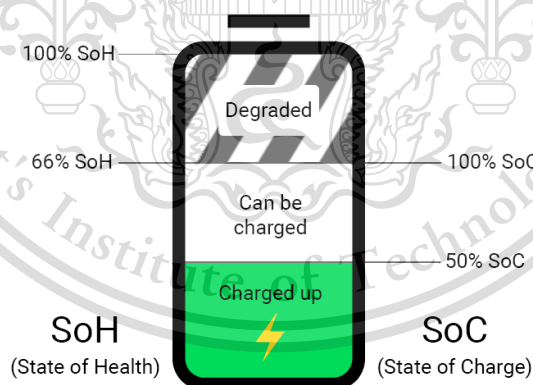
แบตเตอรี่ LiFePO4 จะมีจุดเด่นในเรื่องความปลอดภัย เนื่องจากแบตเตอรี่ประเภทนี้จะไม่ระเบิด อันเป็นผลจากคุณสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ และความเสถียรของตัววัสดุซึ่งทำให้มีความร้อนเกิดขึ้นต่ำกว่าลิเทียมชนิดอื่นมาก ด้วยคุณสมบัติด้านความปลอดภัยข้อนี้ แบตเตอรี่ชนิดนี้จึงถูกนำไปใช้งานในยานยนต์ไฟฟ้า และเริ่มมีความนิยมเพิ่มมากขึ้นในงานอื่นตามมา

นอกจากความปลอดภัยแล้ว LiFePO4 ยังมีความโดดเด่น ในเรื่องอื่นด้วย เช่น

- เรื่องของความแรงในการจ่ายไฟ โดยสามารถจ่ายไฟได้สูงกว่าแบตเตอรี่ลิเทียมทั่วไปถึง 10 เท่า
- มีอายุการใช้งานที่ยาวนานถึง 2000 รอบ ในขณะที่แบตเตอรี่ลิเทียมทั่วไปใช้งานได้เพียง 300-500 รอบเท่านั้น

อุปกรณ์หลักๆ ที่คนนิยมใช้แบตเตอรี่กลุ่มนี้ จะเน้นไปในงานที่ต้องการความปลอดภัยสูง และสามารถจ่ายไฟได้แรง ชาร์จไว ต้องการความทนทาน สามารถทำได้ทุกขนาด ทุกแรงดัน ตามความต้องการของลูกค้า ตั้งแต่ขนาดเล็กๆ เช่น ใช้ในอุปกรณ์พกพาขนาดเล็ก หรืออุปกรณ์ไร้สายต่าง ๆ สว่าน เครื่องมือวัด เครื่องมือแพทย์ โดรน สกูเตอร์ไฟฟ้า Robot ไปถึงระดับแบตเตอรี่สำหรับรถยนต์ไฟฟ้า ระบบสำรองไฟโซล่าเซลล์ ระบบจ่ายไฟสำรองไฟขนาดใหญ่สำหรับเครื่องจักร อาคาร โรงงาน ระบบสื่อสาร[6]

## 2.4 ระบบจัดการแบตเตอรี่ (Battery Management System)



รูปที่ 2.4 สถานะประจุและสถานะสุขภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ระบบการจัดการแบตเตอรี่ (Battery Management System) หรือ BMS ได้รับ การสร้างขึ้นด้วยวัตถุประสงค์คือ

1. เพื่อให้แบตเตอรี่มีความปลอดภัยและมีระยะเวลาใช้งานที่ยาวนาน
2. แสดงฟังก์ชันของสถานะในรูปแบบของสถานะประจุ (State of Charge - SoC) และสถานะ สุขภาพ (State of Health - SoH) แสดงดังรูป 2.3
3. แจ้งเตือนอันตรายและทำงานโดยทันทีเช่นอุณหภูมิสูง เซลล์ที่ไม่สมดุล หรือการเทียบศูนย์ (Calibration)
4. แสดงจุดสิ้นสุดของอายุการใช้งานเมื่อความจุพิกัดลดลงต่ำกว่าขีดจำกัดที่ผู้ใช้งานต้องการ ไม่ใช่ทุกระบบ การจัดการแบตเตอรี่จะมีคุณสมบัติเหล่านี้ ฟังก์ชันพื้นฐานส่วนมากคือ การป้องกันแบตเตอรี่และระบบ แสดงสถานะประจุ

## 2.5 สถานะประจุ (State of Charge - SoC)

สถานะประจุ (State of Charge - SoC) คืออัตราส่วนระหว่างระดับความจุคงเหลือ (Remaining Capacity -  $Q(t)$ ) ต่อค่าความจุพิกัด (Rated Capacity -  $Q_n$ ) ของแบตเตอรี่ ความจุพิกัดสามารถทราบได้จาก ผู้ผลิตแบตเตอรี่และจะแสดงถึงจำนวนประจุสูงสุดที่สามารถเก็บไว้ในแบตเตอรี่ สถานะประจุมิหน่วยเป็น เปอร์เซ็นต์โดย 0% หมายถึง แบตเตอรี่ที่ไม่เหลือความจุและ 100% หมายถึงแบตเตอรี่ที่มีความจุเต็มพิกัด สามารถ วัตในอีกรูปแบบคือปริมาณการคายประจุ (Depth of Discharge - DoD) ซึ่งมีค่าผกผันกับสถานะประจุ 0% หมายถึงแบตเตอรี่ที่มีความจุเต็ม พิกัด และ 100% หมายถึงแบตเตอรี่ไม่มีความจุเหลือ ในรถยนต์ไฟฟ้า (Electric Vehicle - EV) รถยนต์ไฮบริด (Hybrid) หรือ รถพลังไฟฟ้าปลั๊กอินไฮบริด (PHEV) สถานะประจุเปรียบเสมือน มาตรวัดปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิง[7]

$$SoC(t) = \frac{Q(t)}{Q_n} \quad (2.1)$$

สถานะประจุไม่สามารถวัดได้โดยตรง แต่สามารถประมาณจากตัวแปรจากการวัด โดยตรง (Direct Measurement Variables) ได้สองรูปแบบ คือแบบขณะไม่ใช้งาน (Offline) และ แบบขณะใช้งาน (Online) โดย ขณะไม่ใช้งานแบตเตอรี่จะต้องทดสอบอัดและคายประจุในอัตราคงที่ เช่น Coulomb-counting วิธีนี้ให้การ ประมาณค่า SoC ของแบตเตอรี่ที่แม่นยำ แต่ใช้เวลาการ ทดสอบนาน มีค่าใช้จ่ายสูง และรบกวนประสิทธิภาพของ แบตเตอรี่ ซึ่งในขณะที่ทำการทดสอบจะไม่ สามารถนำแบตเตอรี่ไปใช้งานอื่นได้ ดังนั้นนักวิจัยจึงหาวิธีการประมาณ สถานะประจุแบบขณะใช้งาน ซึ่งมีวิธีการประมาณโดยทั่วไป 5 วิธี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### 2.5.1 วิธีการทางเคมี (Chemical Method)

วิธีการนี้ใช้ได้กับแบตเตอรี่ที่สามารถเข้าถึงสารละลายอิเล็กโทรไลต์ได้เช่น แบตเตอรี่ตะกั่วกรดแบบเปลือย (Non-sealed Lead Acid Batteries) ค่าความถ่วงจำเพาะหรือค่า ความเป็นกรดต่างของอิเล็กโทรไลต์สามารถบ่งบอกสถานะประจุของแบตเตอรี่ได้ ไฮโดรมิเตอร์ (Hydrometers) ได้รับการนำมาใช้ในการคำนวณค่าความถ่วงจำเพาะ ของแบตเตอรี่ เพื่อหาค่าความถ่วงจำเพาะจำเป็นต้องวัดปริมาตรของอิเล็กโทรไลต์และชั่งน้ำหนัก จากนั้นค่าความถ่วงจำเพาะจะสามารถหาได้จาก มวลของอิเล็กโทรไลต์(กรัม) หารด้วยปริมาตรของอิเล็กโทรไลต์ (มิลลิลิตร) เพื่อจะหาค่าสถานะประจุจากความถ่วงจำเพาะ และเทียบกับตาราง เปรียบเทียบระหว่างค่าของความถ่วงจำเพาะกับสถานะประจุ ตัวอย่างตารางแสดงในตารางที่ 2.1[8]

ตารางที่ 2.1 มาตรฐาน BCI สำหรับการประเมิน SoC ของแบตเตอรี่

ค่า SoC	ค่าความถ่วงจำเพาะเฉลี่ย	แรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจร (OCV)			
		2V	6V	8V	12V
100%	1.265	2.10	6.32	8.43	12.65
75%	1.225	2.08	6.22	8.30	12.45
50%	1.190	2.04	6.12	8.16	12.24
25%	1.155	2.01	6.03	8.04	12.06
0%	1.120	1.98	5.95	7.72	11.89

### 2.5.2 วิธีการแรงดันเปิดวงจร (Open Circuit Voltage Method - OCV Method)

วิธีแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร จะแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่เป็นค่าสถานะประจุ โดยใช้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (Open Circuit Voltage - OCV) กับค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ อย่างไรก็ตามแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรได้รับผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญมาก ขึ้นจากกระแสแบตเตอรี่และอุณหภูมิ ความคลาดเคลื่อนที่ขีดที่สูงสุดคือการรบกวนแบตเตอรี่จากการอัด และคายประจุซึ่งทำให้ค่าสถานะประจุที่ได้ไม่มีความถูกต้อง เพื่อให้อ่านค่าได้แม่นยำแบตเตอรี่จะต้อง พักสถานะในสภาวะเปิดวงจรเป็นเวลาอย่างน้อย 4 ชั่วโมง วิธีการนี้จึงไม่สามารถใช้กับแบตเตอรี่ที่ใช้ งานอยู่ได้[7] โดยในแบตเตอรี่ตะกั่วกรด สถานะประจุกับแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรมีความสัมพันธ์เชิงเส้น แสดงดังสมการที่ (2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

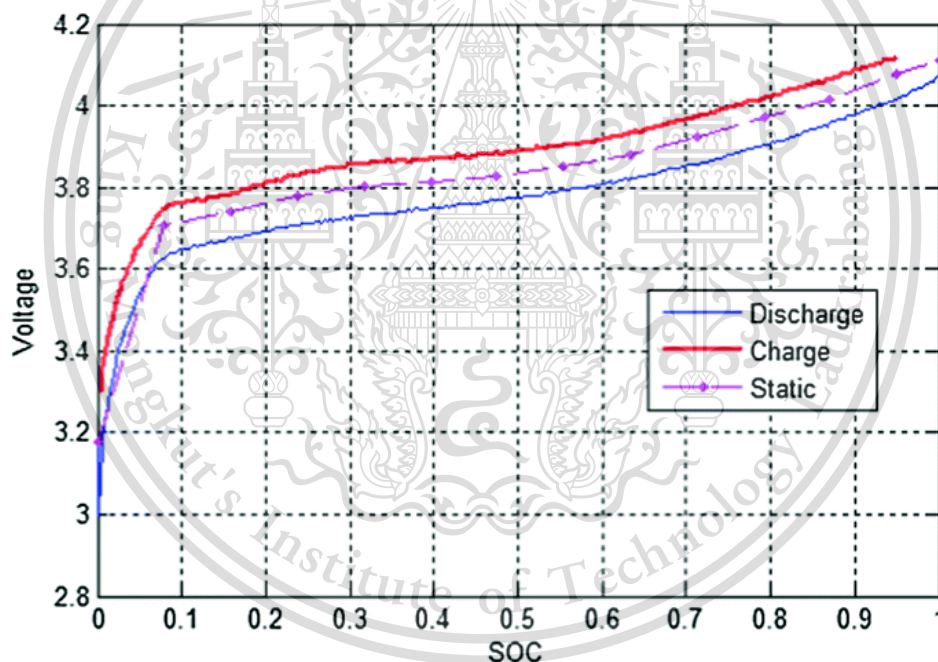
$$VOC(t) = a_1 \times SoC(t) + a_0 \quad (2.2)$$

โดยที่  $SoC(t)$  คือ ค่า  $SoC$  ของแบตเตอรี่ที่เวลา  $t$

$a_0$  คือ แรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว (Terminal Voltage) ของแบตเตอรี่เมื่อ  $SoC$  มีค่า 0%

$a_1$  คือ ค่าคงที่ซึ่งได้จากการรู้ค่าของ  $a_0$  และ  $V_{OC}(t)$  ที่  $SoC$  มีค่า 100%

วิธีแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรนี้ขึ้นอยู่กับ  $OCV$  ของแบตเตอรี่ที่แปรผันตรงกับ  $SoC$  เมื่อ ตัดการเชื่อมต่อจากโหลดเป็นเวลานานกว่าสองชั่วโมง แต่สำหรับแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนความสัมพันธ์ ระหว่าง  $OCV$  และ  $SoC$  ไม่เป็นเชิงเส้น ความสัมพันธ์ทั่วไปของแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนระหว่าง  $OCV$  และ  $SoC$  แสดงดังรูปที่ 2.5 การหาความสัมพันธ์ระหว่าง  $OCV$  และ  $SoC$  นั้นทำได้โดยการใช้กระแสพัลส์กับแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนและพักแบตเตอรี่จนเข้าสู่จุดสมดุล



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ทั่วไประหว่าง  $SoC$  และ  $OCV$  (เส้นสีม่วง)

ความสัมพันธ์ระหว่าง  $OCV$  และ  $SoC$  ในแต่ละแบตเตอรี่จะมีความแตกต่างกัน จึงต้องมีการหาความสัมพันธ์  $OCV - SoC$  เพื่อการประมาณ  $SoC$  ได้อย่างแม่นยำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### 2.5.3 วิธีการรวมกระแส (Current Integration Method)

วิธีการรวมกระแสเรียกอีกชื่อว่า Coulomb Counting เป็นวิธีประมาณค่า SoC โดยแสดงเป็นอัตราส่วนระหว่างความจุคงเหลือได้กับค่าความจุพิกัด โดยความจุคงเหลือในแบตเตอรี่ สามารถคำนวณได้โดยการวัดอัตราการไหลของกระแสไฟฟ้าทั้งอัดและคายประจุและทำการหา ปริพันธ์เทียบกับเวลา [7] สมการทั่วไปที่ใช้ในการคำนวณ SoC [9] แสดงดังสมการที่ (3)

$$SoC = SoC_0 + \frac{\int_{t_0}^{t_0+\tau} I_{batt} \Delta \tau}{Q_{rated}} \times 100 \quad (2.3)$$

โดยที่  $SoC_0$  คือ ค่าเริ่มต้นของค่า SoC

$I_{batt}$  คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านแบตเตอรี่

$Q_{rated}$  คือ ค่าความจุปกติของแบตเตอรี่

วิธีการนี้มีความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการหาปริพันธ์ของกระแสมีการรวมค่าความผิดพลาดเข้าไปด้วยค่าที่ได้จึงมีความแม่นยำไม่เพียงพอ ดังนั้นการหาปริมาณ SoC ด้วยวิธีนี้ต้องทำการปรับเทียบเป็นประจำ เช่น ต้องรีเซ็ตค่าให้ SoC เป็น 100% เมื่อแบตเตอรี่ทำการอัดประจุเต็ม แล้ว วิธีการนี้จึงไม่เป็นที่นิยมในการใช้ประมาณค่า SoC

### 2.5.4 ตัวกรองคาลมาน (Kalman Filter)

เพื่อทำการกำจัดข้อบกพร่องของวิธีแรงดันและวิธีการรวมกระแส จึงใช้ตัวกรองคาลมาน แบตเตอรี่สามารถสร้างแบบจำลองทางไฟฟ้าได้ซึ่งตัวกรองคาลมานจะใช้ในการประมาณแรงดัน ส่วนเกินเนื่องจากกระแสไฟฟ้า เมื่อใช้ร่วมกับวิธีการรวมกระแส จะสามารถทำการประเมิน SoC ได้ อย่างแม่นยำ จุดเด่นของการใช้ตัวกรองคาลมานคือสามารถปรับความน่าเชื่อถือของแรงดันไฟฟ้าของ แบตเตอรี่ได้แบบเรียลไทม์

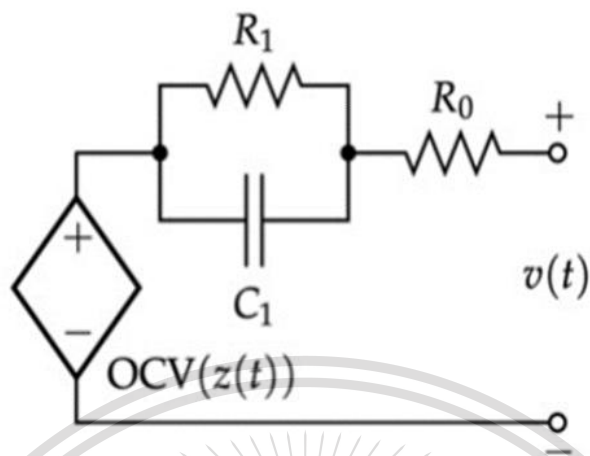
2.4.5 วิธีการใช้ความดัน (Pressure Method) วิธีการนี้สามารถใช้ได้กับแบตเตอรี่นิกเกิลเมทัลไฮไดรด์ (NiMH) บางรุ่นซึ่งมีความดันภายในเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่ออัดประจุแบตเตอรี่ โดยทั่วไปสวิตช์ความดันจะระบุว่าแบตเตอรี่อัดประจุเต็มแล้วหรือไม่ วิธีนี้สามารถปรับปรุงให้แม่นยำขึ้นโดยคำนึงถึงกฎของ Peukert ซึ่งเป็นฟังก์ชันของอัตราการอัดและคายประจุหรือกระแส [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## 2.6 Internal Resistance Measurement



รูปที่ 2.6 1st Order Battery Equivalent Circuit

จากวงจรสมมูลของแบตเตอรี่อันดับหนึ่งโดยแสดงดังรูปที่ 2.8 ในการหาค่าความต้านทานภายในเริ่มต้นของแบตเตอรี่ สามารถหาได้จาก 2 วิธีดังนี้

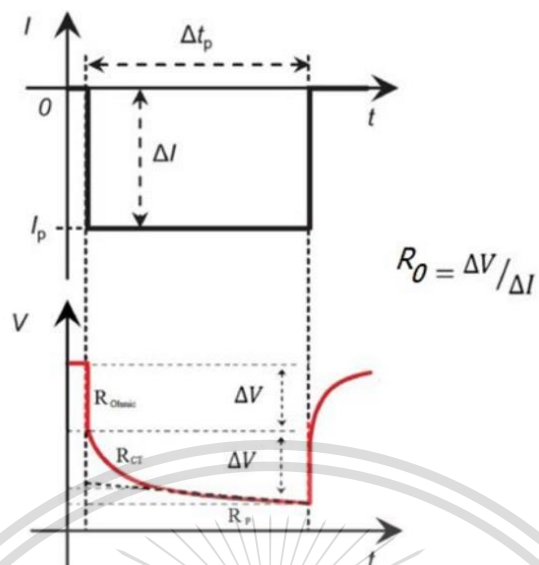
### 2.6.1 DC Measurement

การหาค่าความต้านทานภายในเริ่มต้นของแบตเตอรี่ โดยใช้วิธีการวัดแบบดีซีสามารถทำได้โดยการสร้างพัลส์ของกระแส โดยขนาดความกว้างของพัลส์มีขนาดเล็ก เพื่อใช้ในการอัดประจุและคายประจุของแบตเตอรี่ ซึ่งจะทำให้การคายประจุของแบตเตอรี่ พักแบตเตอรี่ หลังจากนั้นอัดประจุของแบตเตอรี่ ในการอัดประจุของแบตเตอรี่มีผลของ Coulomb Efficiency เข้ามาเกี่ยวข้อง สามารถหาค่าความต้านทานภายในของแบตเตอรี่ดังแสดงในรูปที่ 2.7 [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

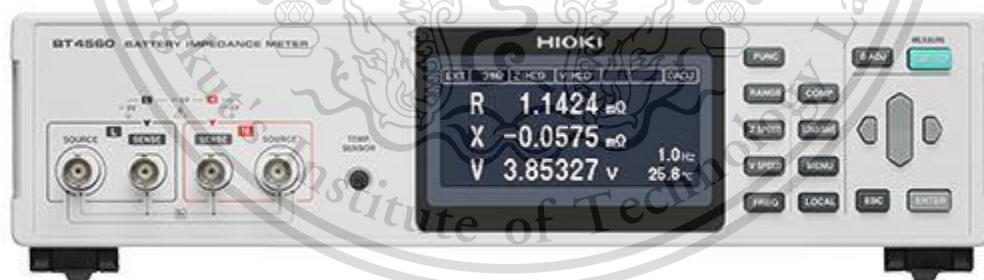
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.7 DC Pulse Measurement

## 2.6.2 AC Measurement

การหาค่าความต้านทานภายในเริ่มต้นของแบตเตอรี่ โดยใช้วิธีการวัดแบบเอซี สามารถทำได้โดยการใช้เครื่อง Battery Impedance Meter BT4560 ซึ่งสามารถวัดค่าความต้านทานภายในของแบตเตอรี่ทั้งในย่านความถี่ต่ำและความถี่สูงระหว่าง 0.1-1000 Hz [10]



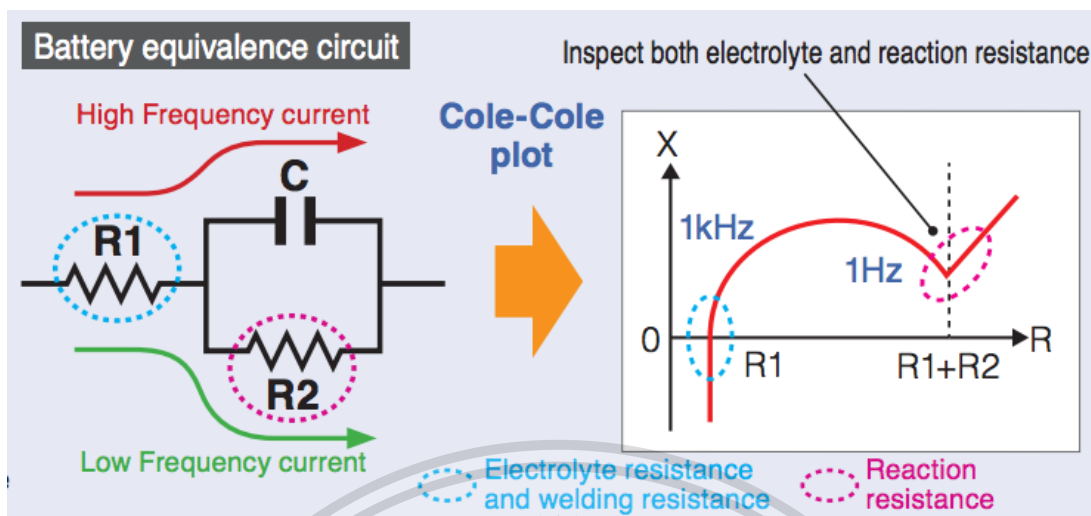
รูปที่ 2.8 Battery Impedance Meter BT4560

Battery Impedance Meter ในการวัดค่าความต้านทานภายในของแบตเตอรี่ ซึ่งแสดงในรูปแบบของ Cole-Cole plot โดยในย่านความถี่ต่ำค่าความต้านทานที่วัดได้คือความต้านทานภายใน แบตเตอรี่ ส่วนในย่านความถี่สูงค่าความต้านทานที่วัดได้คือ Electrolyte Resistance เนื่องจากที่ความถี่สูงตัวเก็บประจุแสดงพฤติกรรมลัดวงจร ดังแสดงในรูปที่ 2.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

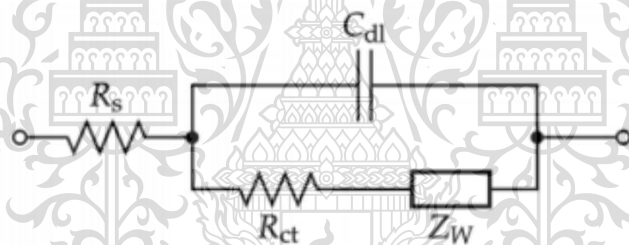
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.9 Cole-Cole plot for a lithium-ion battery

## 2.7 Warburg Impedance



รูปที่ 2.10 Randle Circuit

โดยที่  $R_s$  คือ ความต้านทานอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte Resistance)

$R_{ct}$  คือ ความต้านทานที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของประจุ (Charge Transfer Resistance)

$C_{dl}$  คือ ความเก็บประจุของชั้นดับเบิลเลเยอร์ (Double-layer Capacitance)

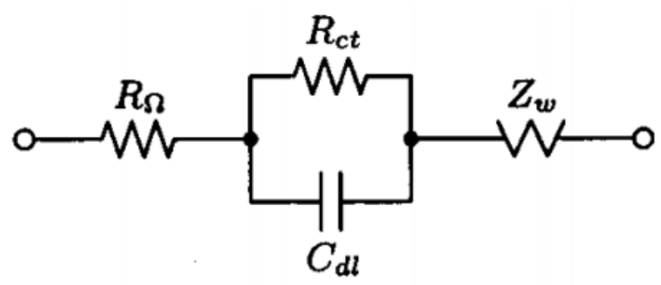
$Z_w$  คือ ความต้านทานของการแพร่ (Warburg Impedance or Diffusion Resistance)

เนื่องจาก Warburg Impedance มีค่าคงที่ของเวลามากกว่า Double-layer Capacitance เป็นเวลามากดังนั้นจึงสามารถแยก Warburg Impedance ออกมาข้างนอกได้ดังแสดงใน รูปที่ 2.11 [11]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

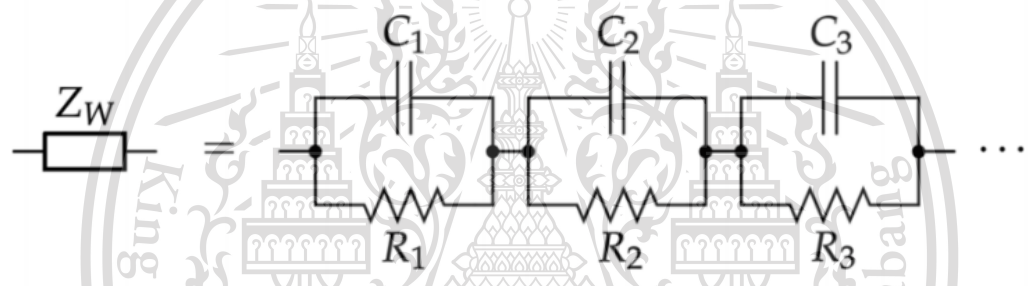
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.11 Modified Randle Circuit

เนื่องจากสมการอนุพันธ์ปกติไม่สามารถดำเนินการแทน Warburg Impedance ได้ ดังนั้นจึงใช้ multiple resistor-capacitor network ที่มีการต่ออนุกรมอธิบายแทนซึ่งเรียกว่า Foster's Circuit



รูปที่ 2.12 Foster's Circuit

ค่าพารามิเตอร์ภายใน Foster's Circuit สามารถหาได้จากสมการที่ 2.4

$$Z_w(s) = \frac{R_d}{\sqrt{\tau_d s}} \tanh \sqrt{\tau_d s} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{8R_d}{1 + \frac{4\tau_d s}{(2n-1)^2 \pi^2}} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{R_n}{1 + sC_n R_n} \quad (2.4)$$

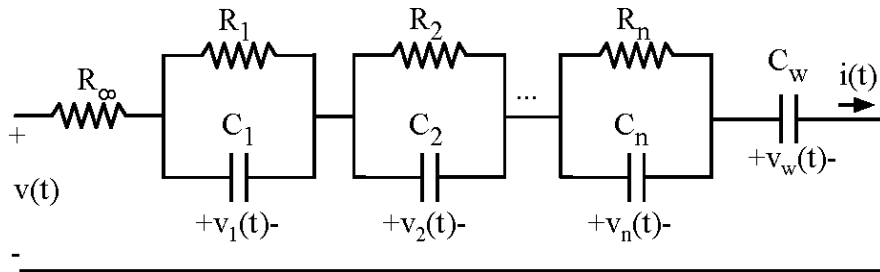
จากสมการที่ 2.4 สามารถหาค่าความต้านทานและค่าความเก็บประจุภายใน Foster's Circuit ดังสมการที่ 2.5 และ 2.6

$$R_n = \frac{8R_d}{(2n-1)^2 \pi^2} \quad (2.5)$$

$$C_n = \frac{\tau_d}{2R_d} = \frac{C_d}{2} \quad (2.6)$$

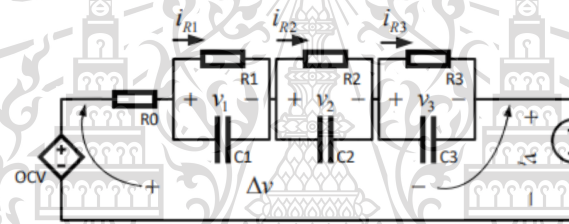
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจาก Double-layer Capacitance ที่เกิดขึ้นระหว่างขั้วอิเล็กโทรดกับสารละลาย อิเล็กโทรไลต์ส่งผลกระทบท่อวงจรน้อยมากจึงสามารถละเว้นได้ ทำให้วงจรสมมูลของแบตเตอรี่สามารถ แสดงดังรูปที่ 2.13 [11]



รูปที่ 2.13 Battery Equivalent Circuit Model

2.8 วงจรสมมูลของแบตเตอรี่ (Equivalence Circuit Model)



รูปที่ 2.14 3rd Order Battery Equivalent Circuit Model

จากวงจรสมมูลของแบตเตอรี่ดังแสดงในรูปที่ 2.14 State-space model สามารถ แสดง State variables ได้ทั้งในรูปแบบของกระแสและแรงดัน รูปแบบของกระแส State variables คือกระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทานใน Foster’s equivalent [11]

$$\left[ \frac{di_R}{dt} \right] = \begin{bmatrix} -\frac{1}{R_1 C_1} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{R_2 C_2} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{R_3 C_3} \end{bmatrix} [i_R] + \begin{bmatrix} \frac{1}{R_1 C_1} \\ \frac{1}{R_2 C_2} \\ \frac{1}{R_3 C_3} \end{bmatrix} i \tag{2.7}$$

$$v_t = OCV(SoC) - R_0 i - R_1 i_{R1} - R_2 i_{R2} - R_3 i_{R3} \tag{2.8}$$

$$\dot{i}_R = A i_R + B i \tag{2.9}$$

$$v_t = OCV(SoC) + C i_R + D i \tag{2.10}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

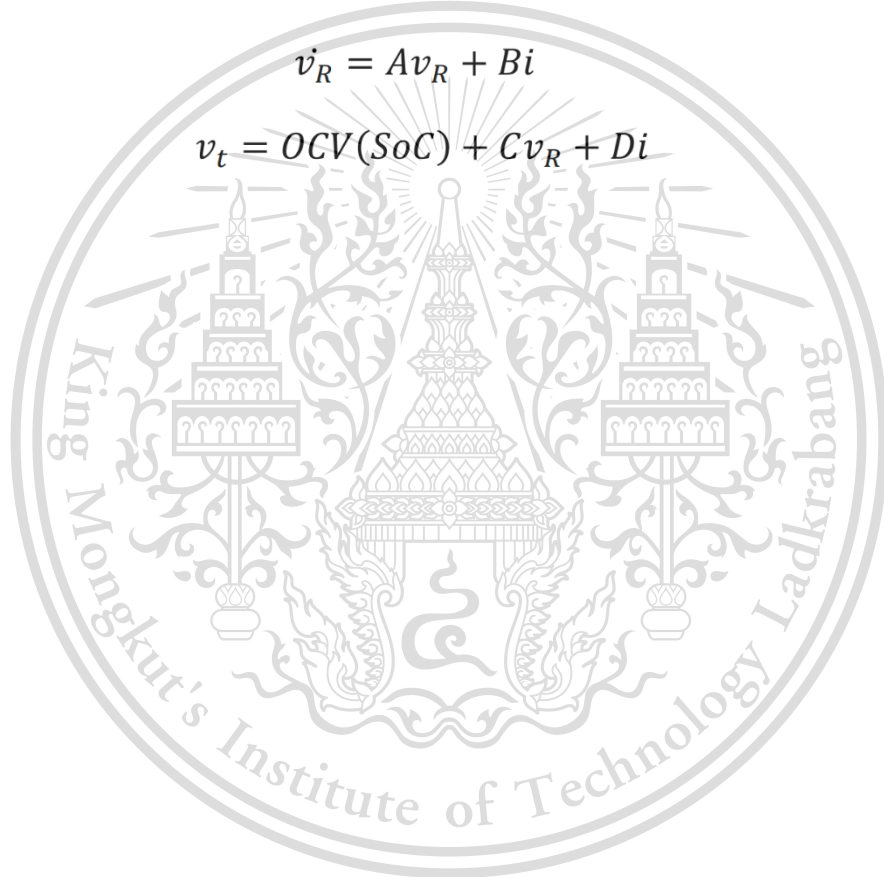
รูปแบบของแรงดัน State variables คือแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทานใน Foster's equivalent [11]

$$\left[ \frac{dv_R}{dt} \right] = \begin{bmatrix} -\frac{1}{R_1 C_1} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{R_2 C_2} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{R_3 C_3} \end{bmatrix} [v_R] + \begin{bmatrix} \frac{1}{C_1} \\ \frac{1}{C_2} \\ \frac{1}{C_3} \end{bmatrix} i \quad (2.11)$$

$$v_t = OCV(SoC) - R_0 i - v_{R1} - v_{R2} - v_{R3} \quad (2.12)$$

$$\dot{v}_R = Av_R + Bi \quad (2.13)$$

$$v_t = OCV(SoC) + Cv_R + Di \quad (2.14)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### บทที่ 3

#### การออกแบบและสร้างวงจรสมมูลของแบตเตอรี่

ในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบและสร้างวงจรประมาณค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ ตัวกรองคาบมานั้นต้องการค่าเริ่มต้นคือ เส้นโค้งเปิดวงจรและค่าพารามิเตอร์ของวงจร

ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่ที่ใช้ในการทดลอง

Type	Cell Model A	Cell Model B
Voltage	3.2V	3.2V
Capacity	20Ah	80Ah
Standard charging current	1C(20A)	1C(40A)
Batteries resistance	4-5 milli ohm	2 milli ohm
Standard charging	3.65 +/- 0.05V	3.65 +/- 0.05V
Discharge cut-off voltage	2V	2.5V
Working voltage	2V - 3.6V	2V - 3.6V
Maximum discharge current	5C	6C
Discharge current	3C	2C
Lifecycle	Over 2000 Cycles	Over 2000 Cycles
Size	27x70x134mm	35x130x165mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### 3.1 การหาเส้นโค้งเปิดวงจร (OCV Curve)

เริ่มจากการอัดและคายประจุของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน ซึ่งแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนนั้น อยู่ในตู้ควบคุม อุณหภูมิที่อุณหภูมิคงที่ 25 องศาเซลเซียส โดยใช้ DC Electronic Load DP3021 ทำหน้าที่คายประจุ และ DC Electronic Power Supply DL811 ทำหน้าที่อัดประจุของแบตเตอรี่ โดยทำการอัดและคายประจุด้วยกระแส คงที่ (Constant Current) ในอัตราการอัดและคายประจุ C/20 และทำ การบันทึกค่ากระแสแรงดันระหว่างชั่วโมง และเวลาในแต่ละวินาที ดังนี้

สำหรับ Cell Model A

- ช่วงเวลา 0 – 2 ชั่วโมง (0 - 7200 วินาที) พักแบตเตอรี่โดยไม่มีการจ่ายกระแส
- ช่วงเวลา 2 – 32 ชั่วโมง (0 - 108000 วินาที) ทำการคายประจุแบตเตอรี่ด้วยกระแส คงที่ 1.000 A
- ช่วงเวลา 32 – 34 ชั่วโมง (0 - 7200 วินาที) พักแบตเตอรี่โดยไม่มีการจ่ายกระแส
- ช่วงเวลา 34 – 64 ชั่วโมง (0 - 108000 วินาที) ทำการอัดประจุแบตเตอรี่ด้วยกระแส คงที่ 1.000 A

สำหรับ Cell Model B

- ช่วงเวลา 0 – 2 ชั่วโมง (0 - 7200 วินาที) พักแบตเตอรี่โดยไม่มีการจ่ายกระแส
- ช่วงเวลา 2 – 32 ชั่วโมง (0 - 108000 วินาที) ทำการคายประจุแบตเตอรี่ด้วยกระแส คงที่ 4.000 A
- ช่วงเวลา 32 – 34 ชั่วโมง (0 - 7200 วินาที) พักแบตเตอรี่โดยไม่มีการจ่ายกระแส
- ช่วงเวลา 34 – 64 ชั่วโมง (0 - 108000 วินาที) ทำการอัดประจุแบตเตอรี่ด้วยกระแส คงที่ 4.000 A



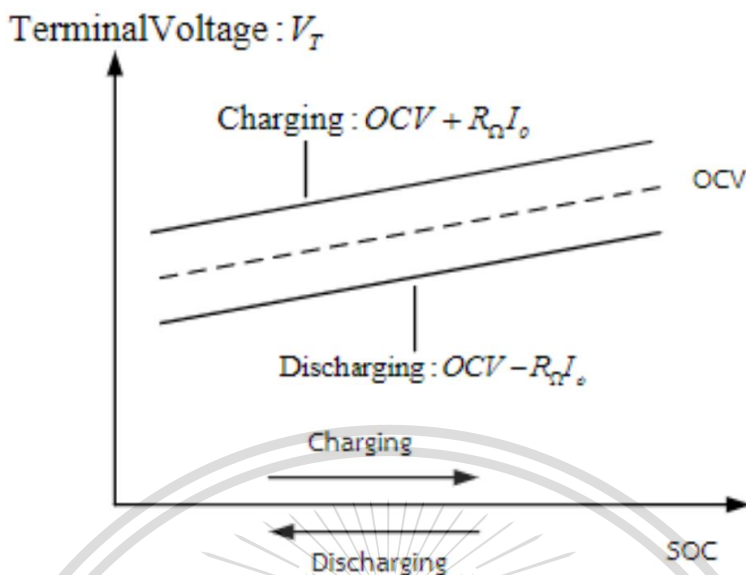
รูปที่ 3.1 DC Electric Load DL3021 และ DC Electric Power Supply DP811

จากการวัดค่าแรงดันระหว่างชั่วโมงเทียบกับสถานะประจุ สามารถหาค่าแรงดันไฟฟ้า เปิดวงจร (Open Circuit Voltage - OCV) จากค่าเฉลี่ยของแรงดันระหว่างชั่วโมงระหว่างการอัดและ คายประจุดังรูปที่ 3.3

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

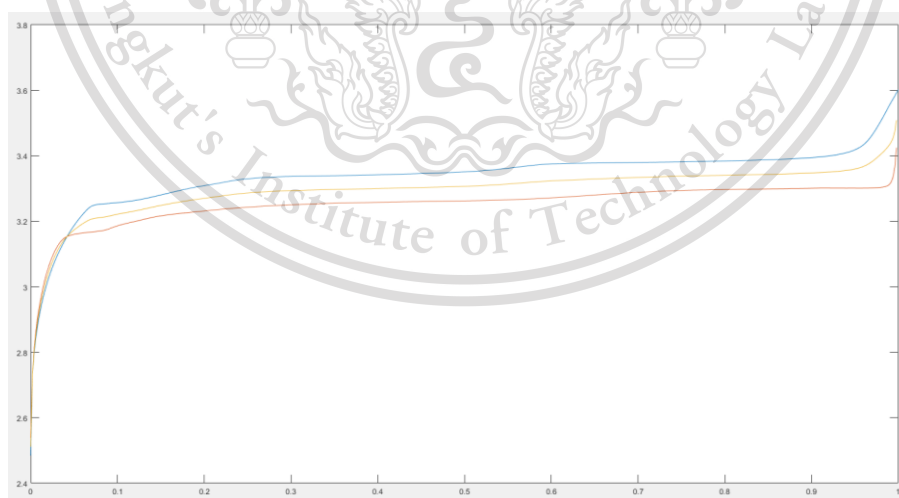
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.2 การหาแรงดันเปิดวงจร (OCV) จากแรงดันระหว่างขั้วเทียบกับสถานะประจุ

เมื่อนำกราฟความสัมพันธ์ของแรงดันระหว่างขั้วและค่าสถานะประจุจากการอัดและคายประจุจากการทดลอง มาคำนวณเพื่อประมาณค่าของ OCV ของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน โดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel และ MATHLAB ทำการหาค่า OCV ที่ SoC ต่าง ๆ ได้ดังรูปที่ 3.3 และ 3.4 เส้นสีน้ำเงินคือกราฟที่ได้จากการจำลองอัดและคายประจุด้วยโปรแกรม SIMULINK ส่วนเส้นสีแดงคือเส้นที่ได้จากการประมาณค่า OCV ด้วยโปรแกรม Excel

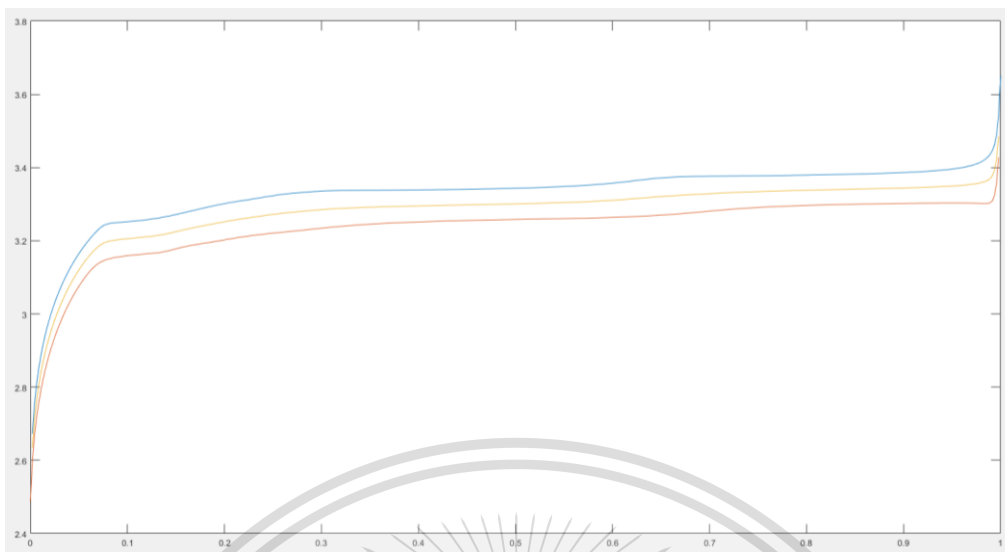


รูปที่ 3.3 กราฟแรงดันระหว่างขั้ว (สีน้ำเงิน), OCV (สีแดง) เทียบกับ SoC ของแบตเตอรี่ความจุ 20 Ah

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

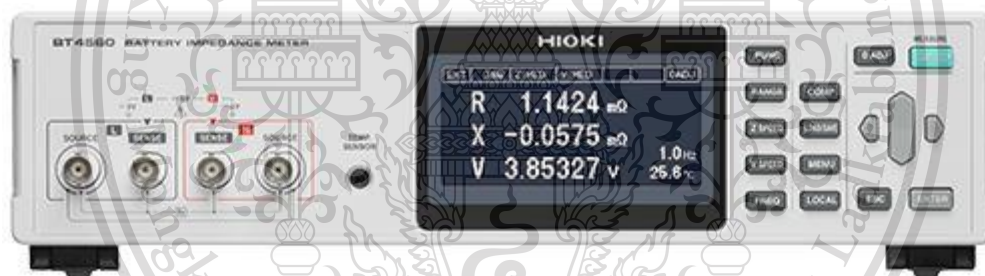
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.4 กราฟแรงดันระหว่างขั้ว (สีน้ำเงิน), OCV (สีแดง) เทียบกับ SoC ของแบตเตอรี่ความจุ 80 Ah

### 3.2 การวัดค่าความต้านทานภายใน



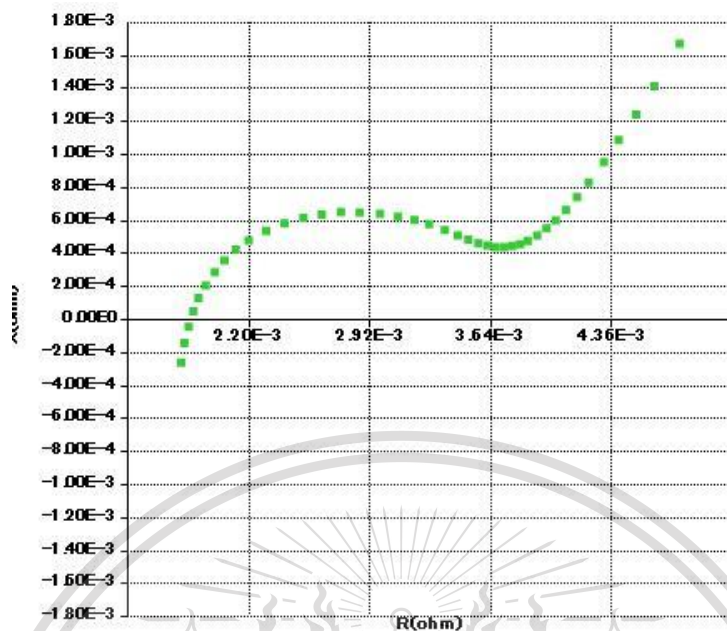
รูปที่ 3.5 Battery impedance meter โมเดล BT4560

สามารถหาค่าความต้านทานภายในพื้นฐานได้จากการใช้เครื่อง Battery impedance meter โมเดล BT4560 ดังรูปที่ 3.6 และ 3.7 โดยการใช้การปล่อยคลื่นความถี่ตั้งแต่ 1000 – 0.1 Hz จะได้ดังนี้

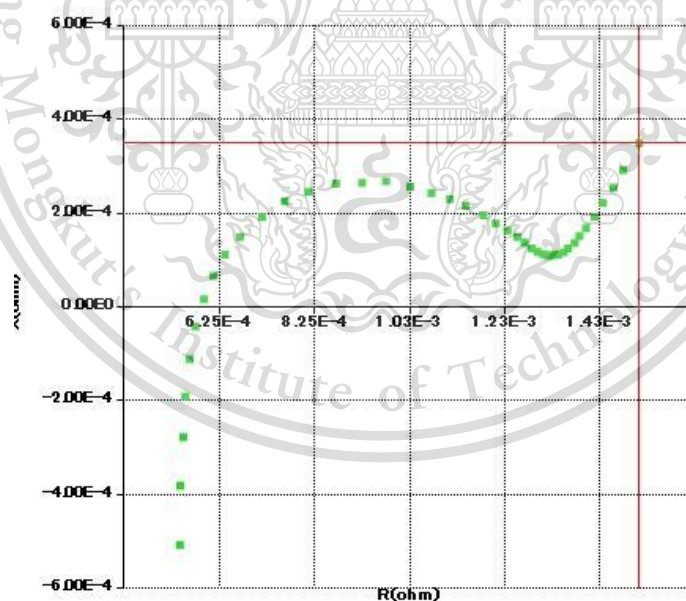
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.6 Cole – Cole plot ค่าความต้านทานภายในของ Cell Model A ที่ความถี่ต่าง ๆ



รูปที่ 3.7 Cole – Cole plot ค่าความต้านทานภายในของ Cell Model B ที่ความถี่ต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

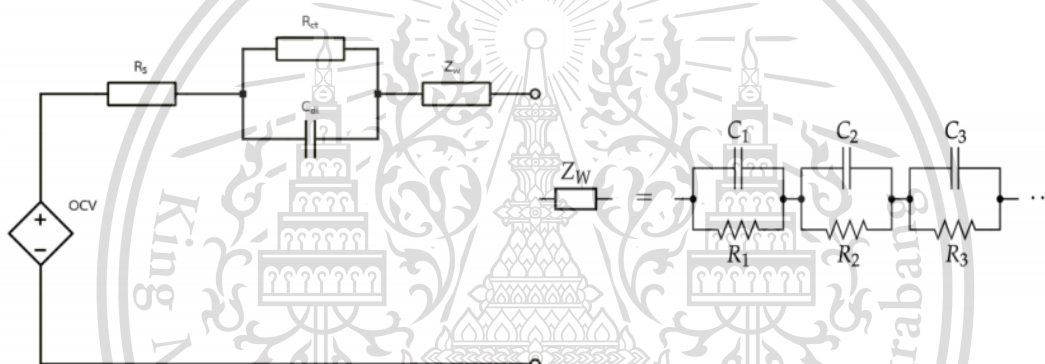
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จากกราฟ Cole – Cole plot จะสามารถหาค่า  $R_1$ ,  $R_2$  ของแบตเตอรี่ของทั้งสองโมเดลได้ กรณี Cell Model A (20 Ah) จะได้ค่า  $R_1 = 1.7731 \text{ m}\Omega$ ,  $R_2 = 2.265 \text{ m}\Omega$  และในกรณี Cell Model B (80 Ah) จะได้ค่า  $R_1 = 0.55 \text{ m}\Omega$ ,  $R_2 = 0.69 \text{ m}\Omega$  ส่วนค่า Warburg Impedance ไม่สามารถหาได้โดยตรงจากเครื่องมือวัดนี้ จะใช้ System Identification ในหัวข้อถัดไปในการประมาณค่า

### 3.3 การหาค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นสำหรับ System Identification

จากวงจรสมมูลของแบตเตอรี่ ทำการหาค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของแบตเตอรี่  $R_0$ ,  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ ,  $C_1$ ,  $C_2$  และ  $C_3$  ซึ่ง  $R_0$  สามารถหาค่าพารามิเตอร์จาก Battery Impedance Meter BT4560 ซึ่งได้ค่าพารามิเตอร์  $R_0$  เท่ากับ  $1.7731 \text{ m}\Omega$  และ  $0.55 \text{ m}\Omega$  ของ Cell Model A (20 Ah) และ Cell Model B (80 Ah) ตามลำดับ ส่วนพารามิเตอร์ภายใน Foster's Circuit สามารถหาได้จาก Warburg ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 Battery Equivalent Circuit, (a) Modified Randle Circuit, Impedance ในรูปของ Foster's Circuit (b) Warburg Impedance ในรูปของ Foster's Circuit

โดยทั่วไปสำหรับแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน  $C_{dl}$  ซึ่งเป็น Double-layer Capacitance ที่เกิดขึ้นระหว่างขั้วอิเล็กโทรดกับสารละลายอิเล็กโทรไลต์มีค่าน้อยมาก จึงไม่ต้องนำมาคิด ซึ่ง Warburg Impedance สามารถแสดงในรูปสมการที่ 3.1

$$Z_w(s) = \frac{R_d}{\sqrt{\tau_d s}} \tanh \sqrt{\tau_d s} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\frac{8R_d}{(2n-1)^2 \pi^2}}{1 + \frac{4\tau_d s}{(2n-1)^2 \pi^2}} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{R_n}{1 + s C_n R_n} \quad (3.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จากสมการของ Warburg Impedance สามารถหาค่าความต้านทานและค่าความเก็บ ประจุภายใน Foster's Circuit ดังสมการที่ 3.2 และ 3.3 ตามลำดับ

$$R_n = \frac{8R_d}{(2n-1)^2\pi^2} \quad (3.2)$$

$$C_n = \frac{\tau_d}{2R_d} = \frac{C_d}{2} \quad (3.3)$$

จากสมการข้างต้นสามารถแทนได้ด้วย Foster's Equivalent Circuit ดังรูป 3.9 (b) โดยค่าพารามิเตอร์  $R_d$  และ  $\tau_d$  สามารถหาค่า Impedance ที่วัดได้จาก Battery Impedance Meter ในย่านความถี่ต่ำ (ความถี่ต่ำกว่า 1 Hz) จากนั้นใช้ MATLAB Curve Fitting Tool โดยใช้ฟังก์ชัน cftool ในการประมาณค่า ซึ่งสมการที่ใช้ในการประมาณค่าคือสมการดังต่อไปนี้

$$Re[Z_w(\sqrt{2\tau_d\omega})] = R_d \frac{\sin(\sqrt{2\tau_d\omega}) + \sin h(\sqrt{2\tau_d\omega})}{\sqrt{2\tau_d\omega}(\cos(\sqrt{2\tau_d\omega}) + \cos h(\sqrt{2\tau_d\omega}))} \quad (3.4)$$

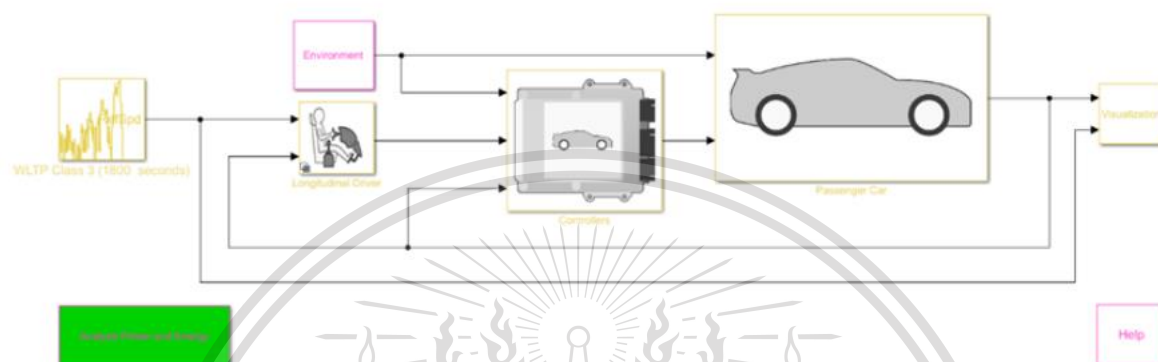
$$Im[Z_w(\sqrt{2\tau_d\omega})] = R_d \frac{\sin(\sqrt{2\tau_d\omega}) - \sin h(\sqrt{2\tau_d\omega})}{\sqrt{2\tau_d\omega}(\cos(\sqrt{2\tau_d\omega}) + \cos h(\sqrt{2\tau_d\omega}))} \quad (3.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

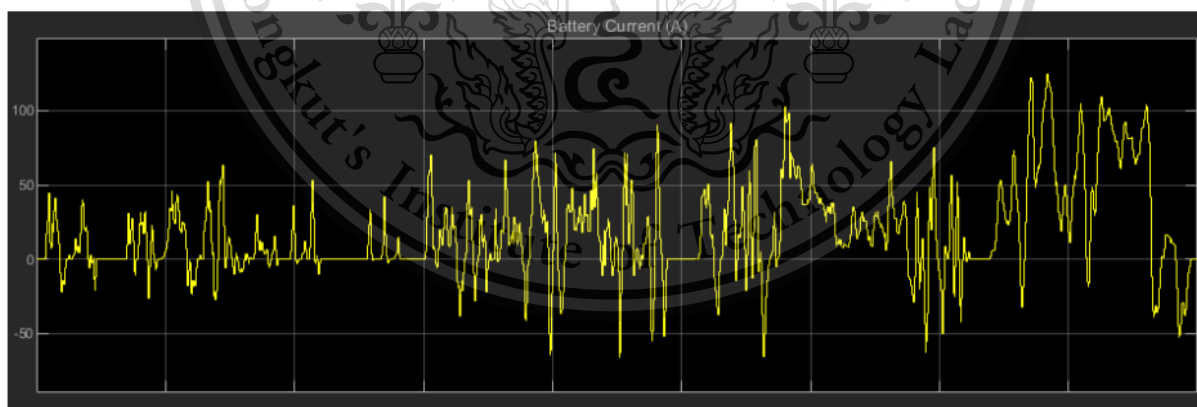
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

การประมาณพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่ที่ใช้ ใน EV Car ซึ่งใช้การ จำลองการทดสอบรถยนต์ในห้องทดสอบรถยนต์โดยใช้ EV Reference Applications Model และ เลือกใช้ Driving Cycle Source เป็น WLTP3 Class3



รูปที่ 3.9 EV Reference Applications Model

นำรูปแบบกระแสที่เกิดจากการจำลองการขับรถตาม Driving cycle ของ WLT3P นำไปเป็นโปรไฟล์กระแสที่ใช้ในการทดสอบแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนฟอสเฟต และนำกระแสที่ได้ไปใช้ในการสร้าง สมการอินพุตสำหรับ Grey – box model และ State – Space model



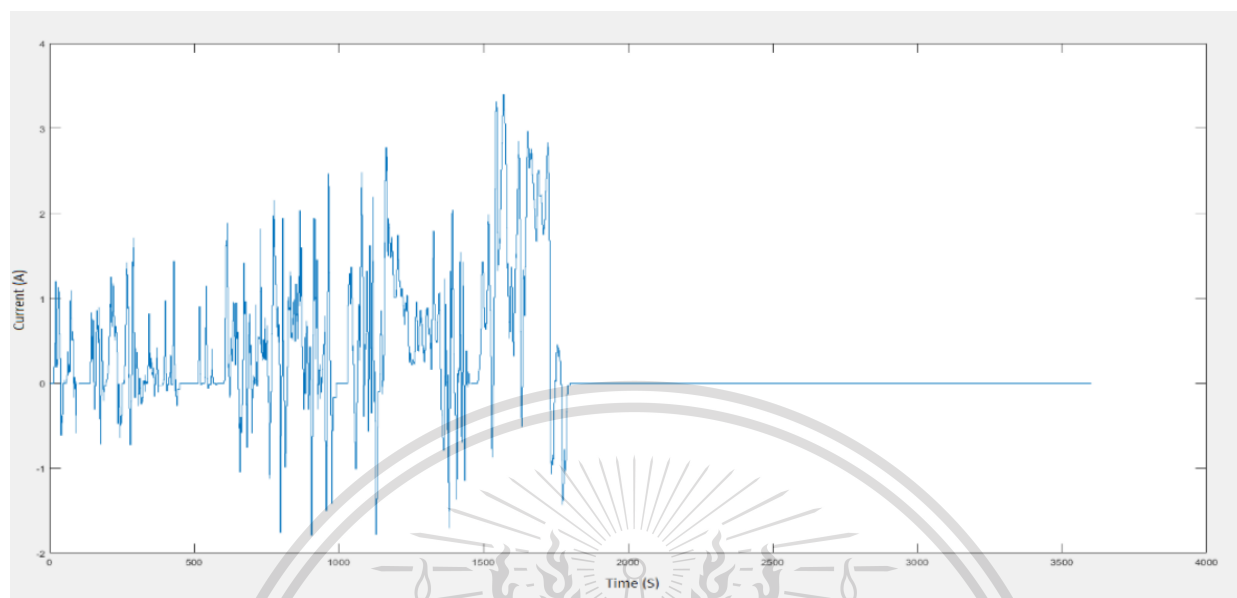
รูปที่ 3.10 รูปแบบของกระแสที่เกิดจากการจำลองการขับรถตาม Driving cycle

ทำการปรับอัตราส่วนกระแสที่เกิดจากการจำลองการขับรถตาม Driving cycle ให้กระแส สามารถอัดและคาย-ประจุให้กับแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนฟอสเฟตได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.11 รูปแบบของกระแสของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนที่ใช้ โปรีไฟล์กระแสการจำลองการขับรถตาม Driving cycle ในการอัดและคายประจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## บทที่ 4

## การทดลองและผลการทดลอง

จาก MATLAB Curve Fitting tool จะได้ค่าพารามิเตอร์  $R_d$  เท่ากับ 0.01643 และ  $\tau_d$  เท่ากับ 45 จากนั้นนำไปหาค่าพารามิเตอร์เริ่มต้น  $R_1, R_2, R_3, C_1, C_2$  และ  $C_3$  ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของวงจรสมมูล แบตเตอรี่มีค่าดังต่อไปนี้

**ตารางที่ 4.1** ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของวงจรสมมูลแบตเตอรี่ที่ SoC 50% โดยเทียบจาก State – space model

ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของวงจรสมมูลแบตเตอรี่ที่ SoC 50%			
R0	2.000 mΩ	C1	100,000 F
R1	30.000 mΩ	C2	100,000 F
R2	3.333 mΩ	C3	100,000 F
R3	1.200 mΩ	C4	100,000 F
R4	0.612 mΩ		

**ตารางที่ 4.2** ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของวงจรสมมูลแบตเตอรี่ที่ SoC 50% โดยเทียบจาก Grey- box model

ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของวงจรสมมูลแบตเตอรี่ที่ SoC 50%			
R0	2.000 mΩ	C1	100,000 F
R1	30.000 mΩ		

เนื่องจากค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นที่คำนวณได้มีความคลาดเคลื่อน จึงใช้ MATLAB System- Identification Tool เพื่อให้ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นมีความถูกต้องมากขึ้น System Identification ซึ่งอยู่ในรูปแบบ State-space model ถูกนำมาใช้ใน Battery Equivalent- Circuit Model ดังสมการที่ 4.1 และ 4.2ตามลำดับ

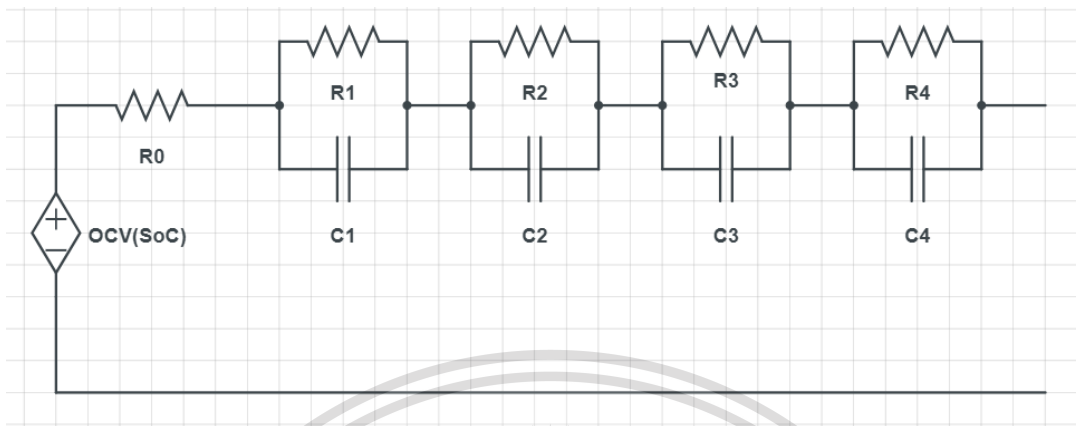
$$\frac{dx(t)}{dt} = Ax(t) + Bu(t) + Ke(t) \quad (4.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) + e(t) \quad (4.2)$$



รูปที่ 4.1 Non-linear Battery Equivalent Circuit Model

จากรูปที่ 4.1 เมื่อ State variables คือกระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทานใน Foster's Circuit และอินพุตคือกระแสไฟฟ้า สามารถเขียนสมการกระแสและแรงดันได้ดังสมการที่ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ

$$\frac{di_R}{dt} = \begin{bmatrix} \frac{1}{R_1 C_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{R_2 C_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{R_3 C_3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{R_4 C_4} \end{bmatrix} [i_R] + \begin{bmatrix} \frac{1}{R_1 C_1} \\ \frac{1}{R_2 C_2} \\ 1 \\ \frac{1}{R_3 C_3} \end{bmatrix} i \quad (4.3)$$

$$v_t = OCV(SoC) - R_0 i - R_1 i_{R1} - R_2 i_{R2} - R_3 i_{R3} - R_4 i_{R4} \quad (4.4)$$

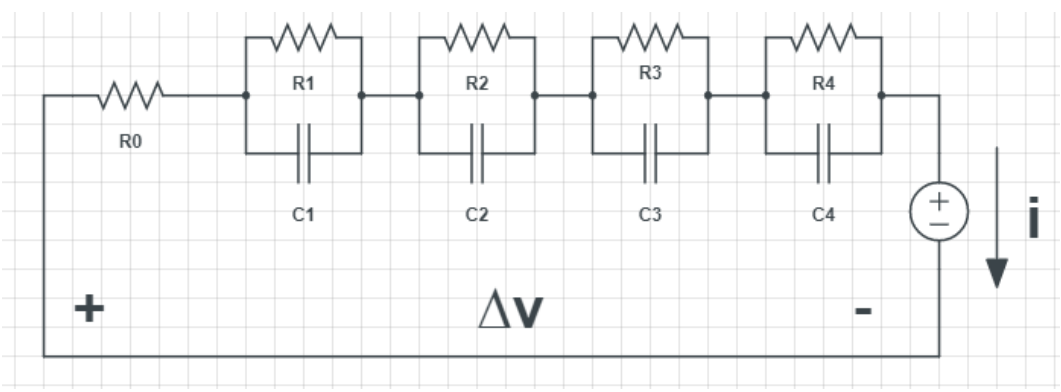
เนื่องจากพจน์ของ OCV (SoC) เป็นค่าคงที่ที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา ทำให้สมการแรงดัน ระหว่างขั้วเป็น Non-linear Equation จึงทำการย้ายพจน์ OCV (SoC) ไปอยู่กับแรงดันระหว่างขั้วดัง สมการที่ 4.5

$$\Delta v = OCV(SoC) - v_t = R_0 i + R_1 i_{R1} + R_2 i_{R2} + R_3 i_{R3} + R_4 i_{R4} \quad (4.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

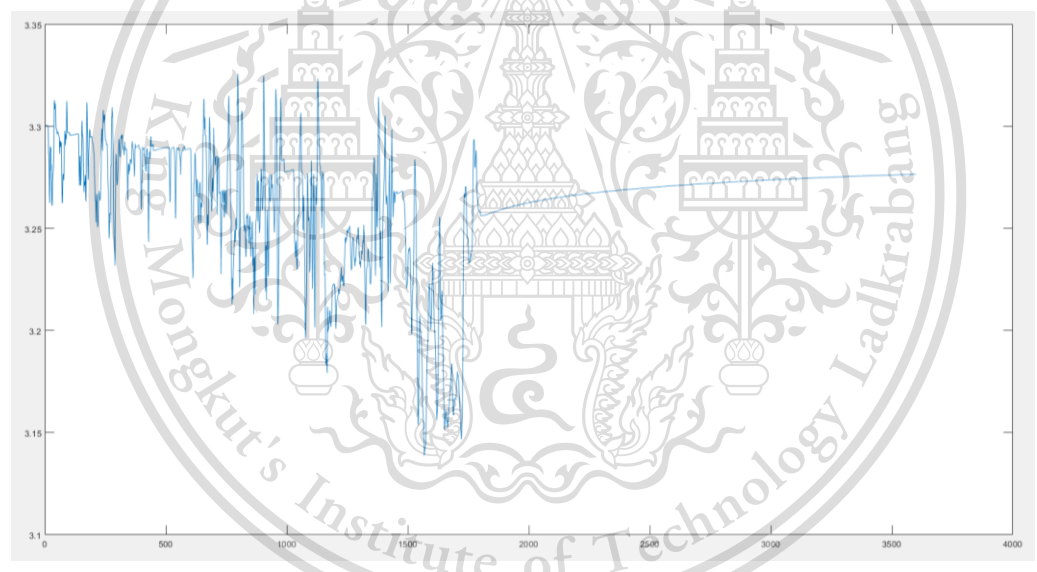
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.2 Linear Battery Equivalent Circuit Model

จากวงจรการประมาณสถานะแบตเตอรี่แบบเรียลไทม์ทำการทดลอง โดยการป้อนโปรไฟล์กระแสอินพุตที่เกิดจากการจำลองการขับขี่ตาม Driving cycle ของ WTL P3 ที่ SoC 50 จากนั้นทำการวัดค่าแรงดันระหว่างขั้วและกระแสไฟฟ้าของแบตเตอรี่

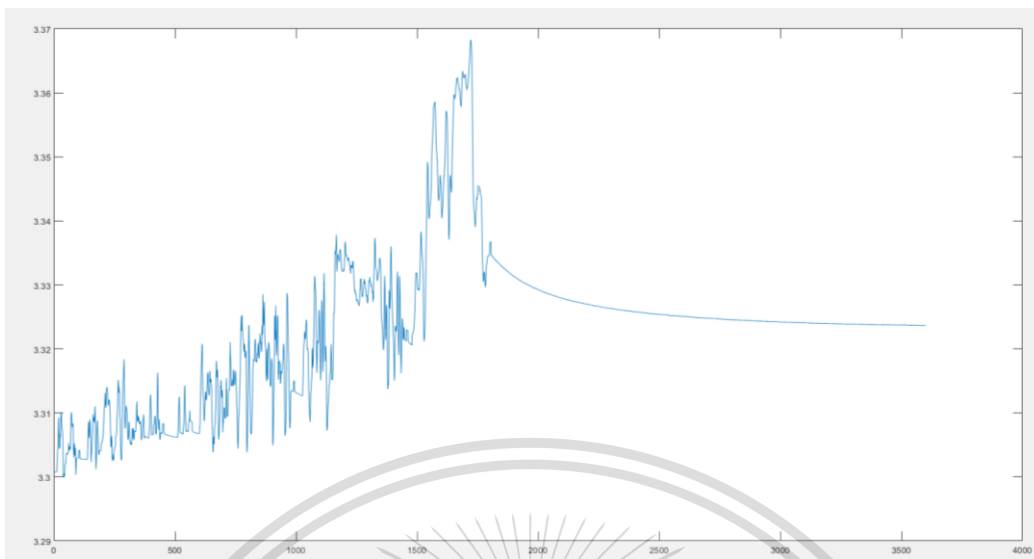


รูปที่ 4.3 กราฟแรงดันระหว่างขั้วเมื่อเทียบกับเวลา model A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.4 กราฟแรงดันระหว่างชั่วโมงเทียบกับเวลา model B

จากการทดลองเมื่อทำการวัดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าทำการประมาณสถานะแบตเตอรี่โดยอ้างอิงการตอบสนองของแบตเตอรี่จาก State – space model โดยเลือกใช้วงจรสมมูลแบบ 4<sup>th</sup> order และ Grey – box model จะได้ค่าความต้านทานภายในและค่าความถูกต้องดังนี้

สำหรับ battery model A การประมาณค่าความต้านทานภายในโดยใช้ State - space model จะผลดังนี้ (ค่าความถูกต้องอยู่ที่ 67.14%)

$$r_0 = 6.26288 \text{ m}\Omega \quad c_1 = 68,236.9 \text{ F}$$

$$r_1 = 30.002 \text{ m}\Omega \quad c_2 = 52,819.7 \text{ F}$$

$$r_2 = 9.00105 \text{ m}\Omega \quad c_3 = 1,467.27 \text{ F}$$

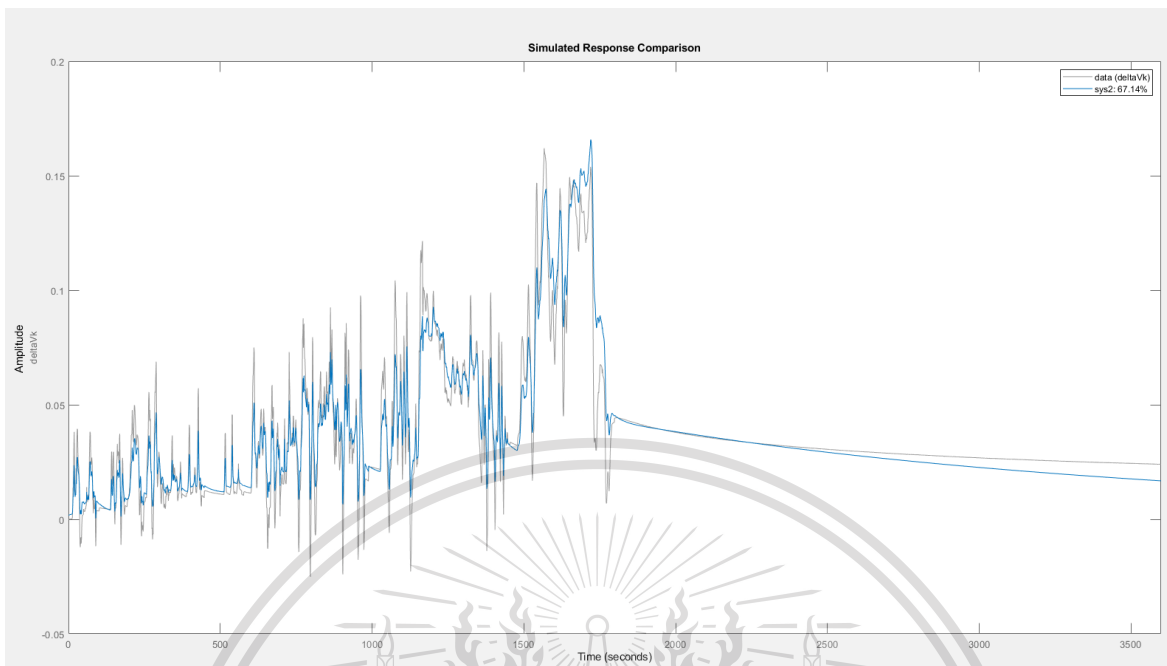
$$r_3 = 33.7371 \text{ m}\Omega \quad c_4 = 1,206.41 \text{ F}$$

$$r_4 = 38.9653 \text{ m}\Omega$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง State – space model (สีเทา) กับ battery model A

สำหรับ battery model A การประมาณค่าความต้านทานภายในโดยใช้ Grey - box model จะผลดังนี้ (ค่าความถูกต้องอยู่ที่ 74.66%)

$$r_0 = 15.7548 \text{ m}\Omega \quad c_1 = 100,000 \text{ F}$$

$$r_1 = 142.877 \text{ m}\Omega \quad c_2 = 100,000 \text{ F}$$

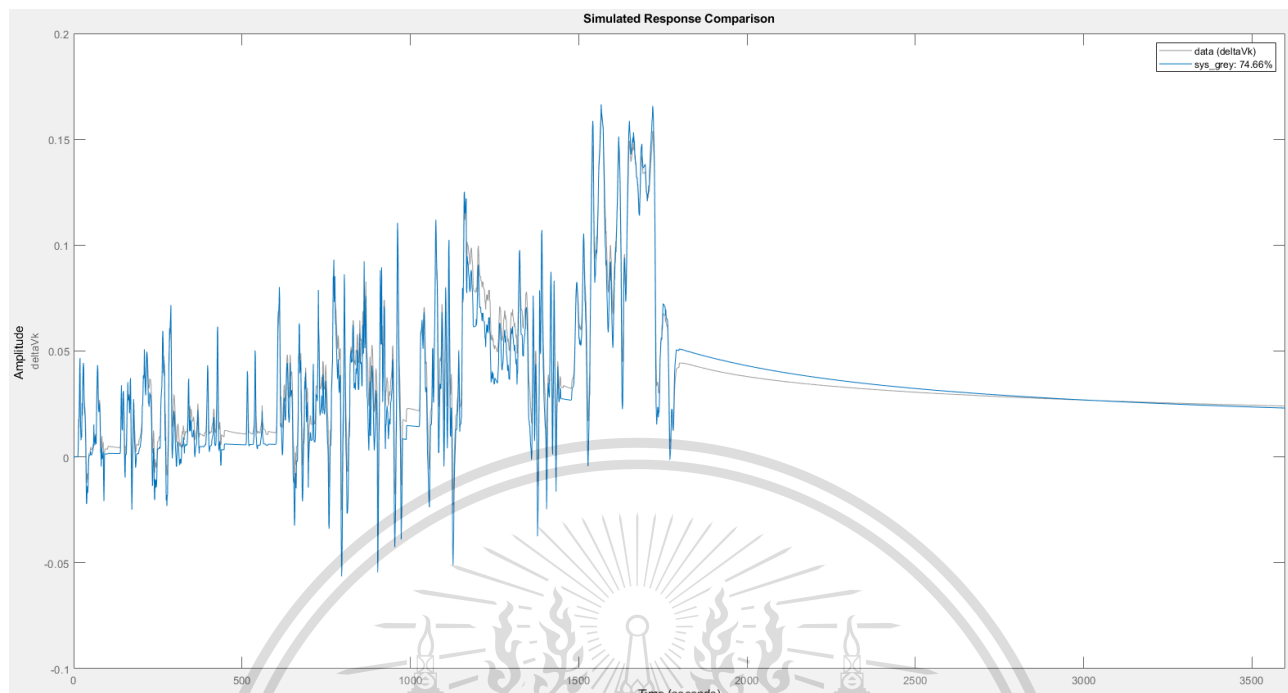
$$r_2 = 15.8753 \text{ m}\Omega \quad c_3 = 100,000 \text{ F}$$

$$r_3 = 5.7151 \text{ m}\Omega$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Grey - box model (สีเทา) กับ battery model A

สำหรับ battery model B การประมาณค่าความต้านทานภายในโดยใช้ State - space model จะผลดังนี้ (ค่าความถูกต้องอยู่ที่ 90.68%)

$$r_0 = 2.50835 \text{ m}\Omega \quad c_1 = 1,200,830 \text{ F}$$

$$r_1 = 29.9996 \text{ m}\Omega \quad c_2 = 27789.1 \text{ F}$$

$$r_2 = 9.09576 \text{ m}\Omega \quad c_3 = 3148.93 \text{ F}$$

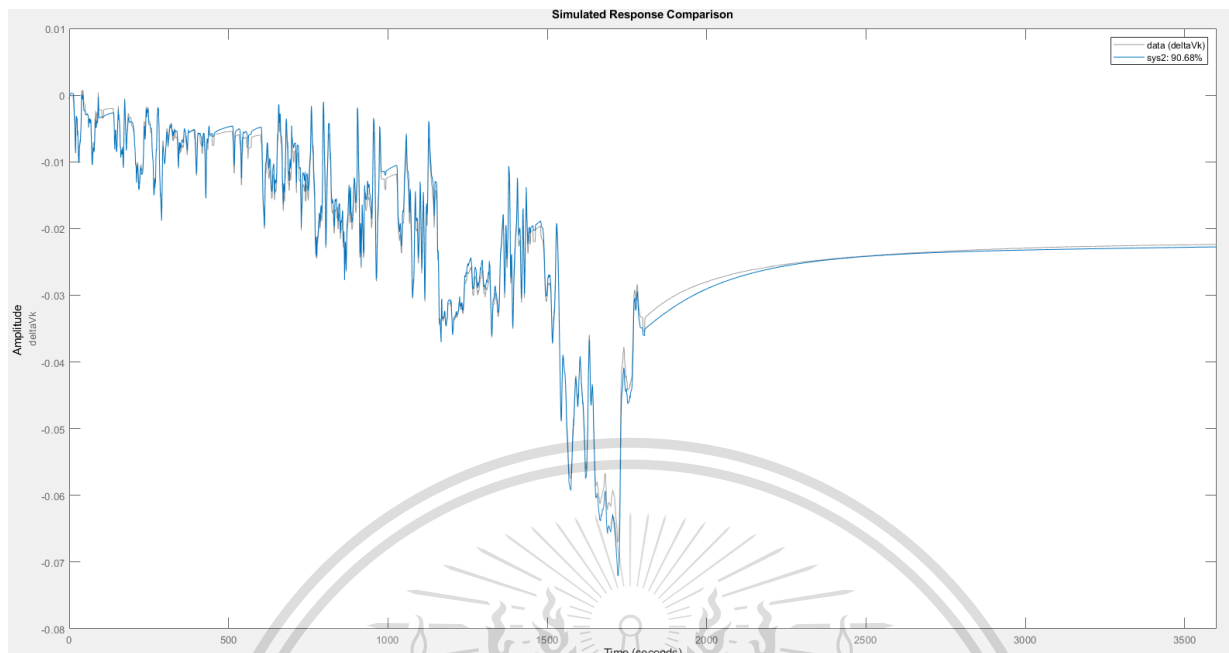
$$r_3 = 9.17017 \text{ m}\Omega \quad c_4 = 1050.65 \text{ F}$$

$$r_4 = 4.39373 \text{ m}\Omega$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง State – space model (สีเทา) กับ battery model B

สำหรับ battery model A การประมาณค่าความต้านทานภายในโดยใช้ Grey - box model จะผลดังนี้ (ค่าความถูกต้องอยู่ที่ 73.32%)

$$r0 = 3.54129 \text{ m}\Omega \quad c1 = 121246 \text{ F}$$

$$r1 = 95.3715 \text{ m}\Omega \quad c2 = 121246 \text{ F}$$

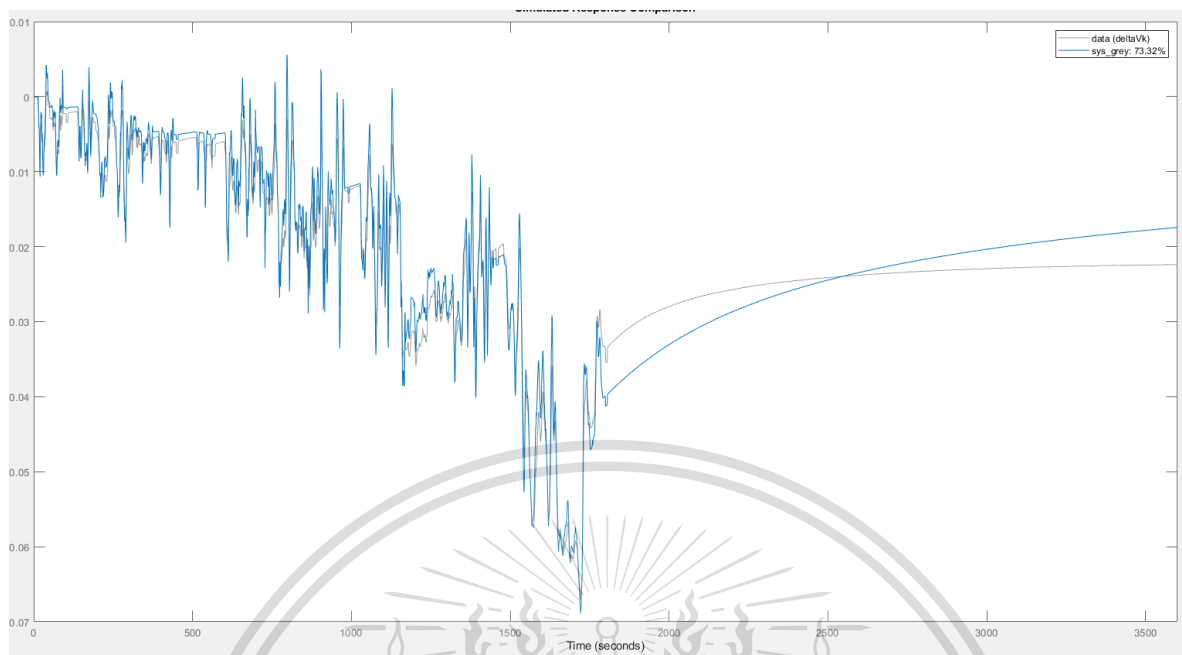
$$r2 = 10.5968 \text{ m}\Omega \quad c3 = 121246 \text{ F}$$

$$r3 = 3.81486 \text{ m}\Omega$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Grey - box model (สีเทา) กับ battery model B



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## บทที่ 5

### สรุปผลการดำเนินงาน

#### 5.1 สรุปผลการดำเนินงาน

ปริญญาโทฉบับนี้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาหาแบบจำลองโมเดลแบตเตอรี่ของ แบตเตอรี่ลิเธียมไอออน ฟอสเฟต โดยในปัจจุบันแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนฟอสเฟตมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลาย และมีประสิทธิภาพมาก ในการใช้งานแบตเตอรี่ แต่การใช้งานแบตเตอรี่ในทางปฏิบัตินั้นเป็นไปได้ยากที่จะบ่งบอกถึงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่มีอยู่ภายในแบตเตอรี่ จึงต้องใช้แบบจำลองโมเดลแบตเตอรี่ เพื่อการใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากเหตุผลดังกล่าว โครงการนี้จึงจัดทำโมเดลทางคณิตศาสตร์ของแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนฟอสเฟต การสร้างโมเดล ของแบตเตอรี่ จะใช้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเปิดวงจรกับสถานะประจุตั้งที่ได้นำเสนอไปในวงจรสมมูลการอัด และคายประจุของแบตเตอรี่ และทำการหาความต้านทานภายในจากเครื่องวัดอิมพีแดนซ์ จากนั้นศึกษาการ ตอบสนองของแบตเตอรี่อ้างอิงจากโมเดลต่าง ๆ และวิธีการทางคณิตศาสตร์ เพื่อให้ได้ผลการทดลองที่มีความ ใกล้เคียงและแม่นยำที่สุด

ถ้าดูจากผลของการหาค่าพารามิเตอร์ วิธีของ State space model จะให้เอาต์พุตที่ใกล้เคียงกับค่าที่วัด ได้จากการทดลองมากกว่า แต่ค่าพารามิเตอร์ไม่มีความสัมพันธ์กันตามวงจรสมมูล ส่วนของ Grey – box model จะให้ผลลัพธ์ที่ด้อยกว่า แต่ค่าพารามิเตอร์ถูกควบคุมให้มีความสัมพันธ์กันตามวงจรสมมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. การทดลองในโครงการนี้เป็นทดลองที่อุณหภูมิคงที่ที่อุณหภูมิห้องเพียงอย่างเดียวเท่านั้น ซึ่งทำให้การหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเปิดวงจรกับค่าสถานะประจุจะมีความแม่นยำหาก อุณหภูมิมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิห้อง ซึ่งหากต้องการให้การประมาณค่าสถานะประจุมีความแม่นยำมากขึ้นจะต้องทำการทดสอบที่อุณหภูมิหลาย ๆ ค่า
2. การทดลองหาค่าคุณลักษณะของแบตเตอรี่ในแต่ละครั้งใช้เวลาในการทดลองนาน และเมื่อเกิดเหตุฉุกเฉิน เช่น ไฟดับหรือไฟตก ต้องทำการทดลองใหม่
3. เนื่องด้วยสถานการณ์การแพร่ระบาดของเชื้อไวรัสโควิด-19 ทำให้การทดลองบางอย่าง ล้าช้า และไม่สามารถปรับปรุงวงจรประมาณสถานะให้ดีขึ้นได้
4. จำเป็นต้องเลือกค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นที่เหมาะสมเพื่อที่การประมาณสถานะแบตเตอรี่มี ความใกล้เคียงมากยิ่งขึ้น
5. แรงดันเปิดวงจรและสถานะประจุเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ ดังนั้นต้องมีการควบคุม อุณหภูมิให้คงที่ เพื่อให้ค่าแรงดันเปิดวงจรและสถานะประจุมีความแม่นยำ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### บรรณานุกรม

[1] Environmental Protection Agency (EPA), Sources of Greenhouse Gas Emissions [ออนไลน์]. สืบค้นจาก <https://www.epa.gov/ghgemissions/sources-greenhouse-gas-emissions>, 2019.

[2] เส้นทางสู่พลังงานสีเขียว[ออนไลน์]. สืบค้นจาก <http://www.leonics.co.th/html/th/aboutpower/greenway14.php>

[3] Comparing the Battery with Other Power Sources [ออนไลน์]. สืบค้นจาก [https://batteryuniversity.com/learn/article/comparing\\_the\\_battery\\_with\\_other\\_power\\_sources](https://batteryuniversity.com/learn/article/comparing_the_battery_with_other_power_sources)

[4] I.Hadjipaschalis, A. Poullikkas and V. Efthimiou, “Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications,” Renewable and Sustainable Energy, 2009, pp. 1513-1522.

[5] Graphene doubles the energy density of lithium-ion batteries[ออนไลน์]. สืบค้นจาก <http://www.idtechex.com/en/research-article/graphene-doubles-the-energy-density-of-lithium-ion-batteries/8013>

[6] รู้จักกับลิเธียมไอออนฟอสเฟต (LiFePO<sub>4</sub>) | INVENTOR.IN.TH[ออนไลน์]. สืบค้นจาก <https://www.inventor.in.th/home/แบตเตอรี่พันธุ์ใหม่-lifepo4>

[7] Gregory L. Plett, Battery Management Systems Equivalent-Circuit Methods, 2nd Ed., Boston, Artech House, 2015.

[8] How to Measure State-of-charge[ออนไลน์]. สืบค้นจาก [https://batteryuniversity.com/learn/article/how\\_to\\_measure\\_state\\_of\\_charge](https://batteryuniversity.com/learn/article/how_to_measure_state_of_charge)

[9] Ines Baccouche, “Implementation of an Improved Coulomb-Counting Algorithm Based on a Piecewise SOC-OCV Relationship for SOC Estimation of Li-Ion Battery,” International Journal of renewable energy research, Vol. 8, No.1, 2018, pp. 1-6.

[10] AC Measurement[ออนไลน์]. สืบค้นจาก [https://www.hioki.com/en/products/detail/?product\\_key=5664](https://www.hioki.com/en/products/detail/?product_key=5664)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

[11] Gregory L. Plett, Battery Management Systems Battery Equivalent-Circuit Methods, Boston, Artech House, 2015.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## ประวัติผู้เขียน



นาย พิรัชฐ์ ใจสุดา      เกิดวันที่ 30 กรกฎาคม 2540

ที่อยู่ 160 หมู่ 3 ต.ดอนมูล อ.สูงเม่น จังหวัดแพร่ 54130

Email : 59010918@kmitl.ac.th



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## วงจรมมูลของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนฟอสเฟต

### Equivalent circuit for Li Iron Phosphate Battery

ปรัชญ์ ใจสุตา

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 1 ซอย ฉลองกรุง 1  
ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์ 02-329-8000 ต่อ 3925

#### บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างวงจรมมูลของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนฟอสเฟต การศึกษาวงจรมมูลของแบตเตอรี่ จะช่วยให้สามารถวางแผนการใช้งานแบตเตอรี่ให้มีประสิทธิภาพ โดยในขั้นต้นจะทำการทดสอบการอัดประจุและคายประจุของแบตเตอรี่เพื่อหาคุณลักษณะเฉพาะของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนฟอสเฟต ซึ่งก็คือความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเปิดวงจรและสถานะประจุ จากนั้นหาพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่ด้วยเครื่องวัดค่าความต้านทานภายใน นำไปใช้งานด้วยการจำลองกระแสที่ใช้ในยานยนต์ไฟฟ้า นำโมเดลทางคณิตศาสตร์มาใช้อ้างอิงในการคำนวณหาค่าที่แท้จริงของพารามิเตอร์และเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้จากอัลกอริทึมต่าง ๆ ที่นำมาใช้

#### ABSTRACT

This thesis aims to establish an equivalent circuit for lithium iron phosphate batteries. Studying the battery's equivalent circuit will improve planning usability of the battery efficiency. Initially, the battery charge and discharge tests were performed to determine the characteristics of lithium ion phosphate batteries which is the relationship between the open circuit voltage and the state of charge. Then find the battery parameters with an internal impedance meter then apply it by simulating the current used in electric vehicles. The mathematical model was used as reference for calculating the true value of the parameter and compare the results of the experiments obtained from the different algorithms used.

#### 1. บทนำ

แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนเป็นแบตเตอรี่ที่มีน้ำหนักเบา มีอัตราการคายประจุต่ำ และสามารถให้พลังงานได้สูง แต่แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนฟอสเฟตนั้นเสียหายได้ง่ายหากใช้งานได้ไม่ถูกวิธี ดังนั้นแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนฟอสเฟตจึงต้องมีระบบจัดการที่ดี จากวงจรมมูลของแบตเตอรี่ที่มีประสิทธิภาพ แบตเตอรี่จึงจะใช้งานได้เต็มประสิทธิภาพ มีอายุการใช้งานที่ยาวนานและมีความปลอดภัยระหว่างการใช้งาน

#### 2. หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

##### 2.1 ระบบจัดการแบตเตอรี่ (Battery Management System)

ระบบการจัดการแบตเตอรี่ (Battery Management System) หรือ BMS ได้รับ การสร้างขึ้นด้วยวัตถุประสงค์คือ

1. เพื่อให้แบตเตอรี่มีความปลอดภัยและมีระยะเวลาใช้งานที่ยาวนาน
2. แสดงฟังก์ชันของสถานะในรูปแบบของสถานะประจุ (State of Charge - SoC) และสถานะ สุขภาพ (State of Health - SoH)
3. แจ้งเตือนอันตรายและทำงานโดยทันทีเช่นอุณหภูมิสูง เซลล์ที่ไม่สมดุล หรือการเทียบศูนย์ (Calibration)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

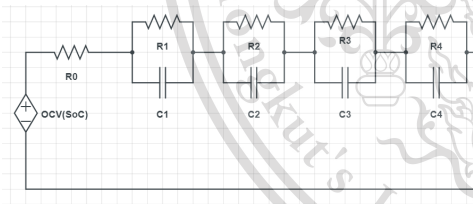
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4. แสดงจุดสิ้นสุดของอายุการใช้งานเมื่อความจุพิกัดลดลงต่ำกว่าขีดจำกัดที่ผู้ใช้งานต้องการ ไม่ใช่ทุกระบบการจัดการแบตเตอรี่จะมีคุณสมบัติเหล่านี้ ฟังก์ชันพื้นฐานส่วนมากคือ การป้องกันแบตเตอรี่และระบบแสดงสถานะประจุ

2.2 สถานะประจุ (State of Charge)

สถานะประจุ (State of Charge - SoC) คืออัตราส่วนระหว่างระดับความจุคงเหลือ (Remaining Capacity - Q(t)) ต่อค่าความจุพิกัด (Rated Capacity - Q<sub>n</sub>) ของแบตเตอรี่ดังสมการที่ (1) ความจุพิกัดสามารถทราบได้จากผู้ผลิตแบตเตอรี่และจะแสดงถึงจำนวนประจุสูงสุดที่สามารถเก็บไว้ในแบตเตอรี่ สถานะประจุมิหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์โดย 0% หมายถึง แบตเตอรี่ที่ไม่เหลือความจุและ 100% หมายถึงแบตเตอรี่ที่มีความจุเต็มพิกัด สามารถวัดในอีกรูปแบบคือ ปริมาณการคายประจุ (Depth of Discharge - DoD) ซึ่งมีค่าผกผันกับสถานะประจุ 0% หมายถึงแบตเตอรี่ที่มีความจุเต็ม พิกัด และ 100% หมายถึงแบตเตอรี่ไม่มีความจุเหลือ ในรถยนต์ไฟฟ้า (Electric Vehicle - EV) รถยนต์ไฮบริด (Hybrid) หรือ รถพลังไฟฟ้าปลั๊กอินไฮบริด (PHEV) สถานะประจุเปรียบเสมือนมาตรวัดปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิง[1]

2.3 วงจรสมมูลของแบตเตอรี่ (Equivalence Circuit Model)



รูปที่ 1 4th Order Battery Equivalent Circuit Model

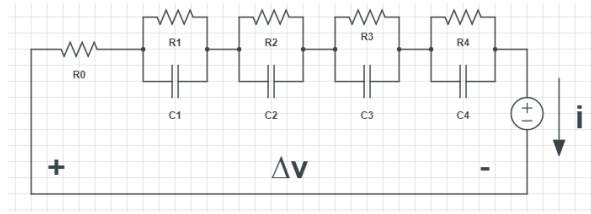
จากวงจรสมมูลของแบตเตอรี่ดังแสดงในรูปที่ 2.14 State-space model สามารถ แสดง State variables ได้ทั้งในรูปแบบของกระแสและแรงดัน รูปแบบของกระแส State variables คือกระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทานใน Foster's equivalent[2]

$$\frac{di_R}{dt} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{R_1 C_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{R_2 C_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{R_3 C_3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{R_4 C_4} \end{bmatrix} [i_R] + \begin{bmatrix} \frac{1}{R_1 C_1} \\ \frac{1}{R_2 C_2} \\ \frac{1}{R_3 C_3} \\ \frac{1}{R_4 C_4} \end{bmatrix} i \quad (1)$$

$$v_t = OCV(SoC) - R_0 i - R_1 i_{R1} - R_2 i_{R2} - R_3 i_{R3} - R_4 i_{R4} \quad (2)$$

$$\Delta v = OCV(SoC) - v_t = R_0 i + R_1 i_{R1} + R_2 i_{R2} + R_3 i_{R3} + R_4 i_{R4}$$

$$+ R_4 i_{R4} \quad (3)$$

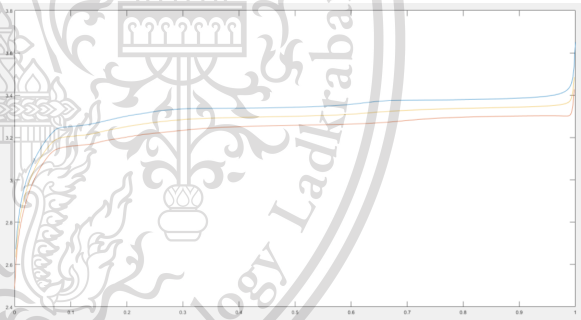


รูปที่ 2 Linear Battery Equivalent Circuit Model

3. การออกแบบ และสร้างวงจรประมาณสถานะแบตเตอรี่

3.1 การหาเส้นโค้งแรงดันเปิดวงจร (OCV Curve)

ทำการทดลองอัดและคายประจุด้วยกระแสคงที่ที่มีอัตราการอัดและคายประจุเท่ากับ C/30 เพื่อเก็บค่าแรงดันระหว่างช่วงการอัดและคายประจุเท่ากับ C/30 เพื่อเก็บค่าแรงดันระหว่างช่วงการประมาณสถานะประจุ ด้วยวิธีการรวมกระแสและพล็อตค่าแรงดันระหว่างช่วงพักเทียบกับสถานะประจุ เพื่อหาค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร โดยในรูปที่ 3 เป็นกราฟแสดงแรงดันไฟฟ้า เปิดวงจร (OCV) โดยใช้โปรแกรม MATLAB



รูปที่ 3 กราฟแรงดันเปิดวงจร (OCV)

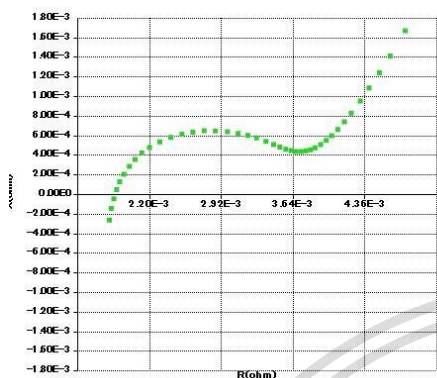
3.2 การวัดค่าความต้านทานภายใน



รูปที่ 4 Battery impedance meter โมเดล BT4560

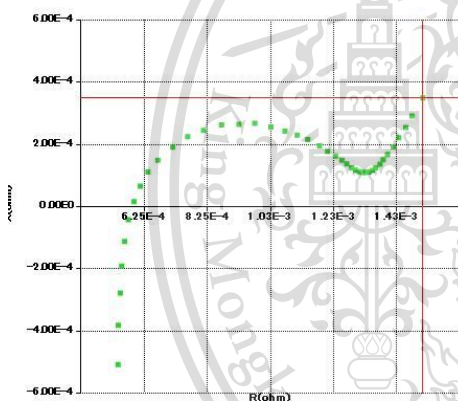
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่าก็ตาม  $\Delta v = OCV(SoC) - v_t = R_0 i + R_1 i_{R1} + R_2 i_{R2} + R_3 i_{R3} + R_4 i_{R4}$  และต้องอ้างอิงถึงเว็บไซต์นี้ทุกครั้งหากนำไปใช้

สามารถหาค่าความต้านทานภายในพื้นฐานได้จากการใช้เครื่อง Battery impedance meter โมเดล BT4560 ดังรูปที่ 5 และ 6 โดยใช้การปล่อยคลื่นความถี่ตั้งแต่ 1000 – 0.1 Hz จะได้นี้



รูปที่ 5 Cole – Cole plot ค่าความต้านทานภายในของ Cell Model

A ที่ความถี่ต่าง ๆ



รูปที่ 6 Cole – Cole plot ค่าความต้านทานภายในของ Cell Model

B ที่ความถี่ต่าง ๆ

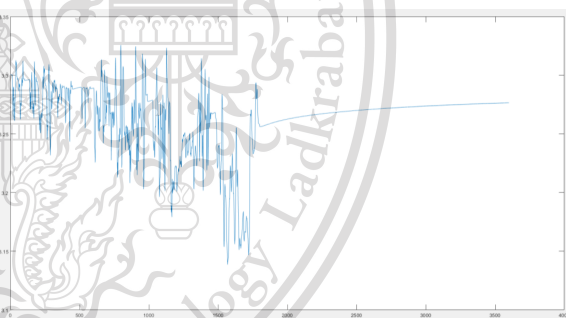
ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของวงจรสมมูลแบตเตอรี่ที่ SoC 50% โดยเทียบจาก State – space model

ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของวงจรสมมูลแบตเตอรี่ที่ SoC 50%			
R0	2.000 mΩ	C1	100,000 F
R1	30.000 mΩ	C2	100,000 F
R2	3.333 mΩ	C3	100,000 F
R3	1.200 mΩ	C4	100,000 F
R4	0.612 mΩ		

ตารางที่ 2 ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของวงจรสมมูลแบตเตอรี่ที่ SoC 50% โดยเทียบจาก Grey- box model

ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของวงจรสมมูลแบตเตอรี่ที่ SoC 50%			
R0	2.000 mΩ	C1	100,000 F
R1	30.000 mΩ		

จากวงจรการประมาณสถานะแบตเตอรี่แบบเรียลไทม์ทำการทดลอง โดยการป้อนโปรไฟล์กระแสอินพุตที่เกิดจากการจำลองการขับขี่ตาม Driving cycle ของ WTLP3 ที่ SoC 50 จากนั้นทำการวัดค่าแรงดันระหว่างขั้วและกระแสไฟฟ้าของแบตเตอรี่



รูปที่ 7 กราฟแรงดันระหว่างขั้วเมื่อเทียบกับเวลา model A

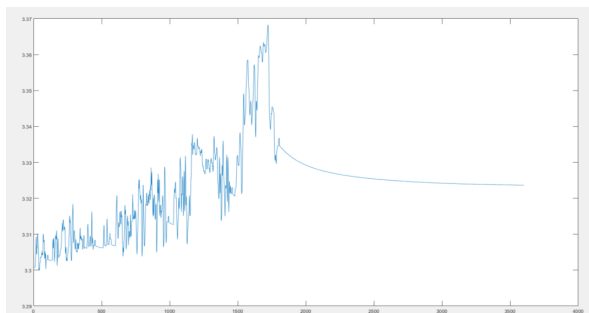
#### 4. การทดลองและผลการทดลอง

จาก MATLAB Curve Fitting tool จะได้ค่าพารามิเตอร์ Rd เท่ากับ 0.01643 และ Td เท่ากับ 45 จากนั้นนำไปหาค่าพารามิเตอร์เริ่มต้น R1, R2, R3, C1, C2 และ C3 ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของวงจรสมมูลแบตเตอรี่มีค่าดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

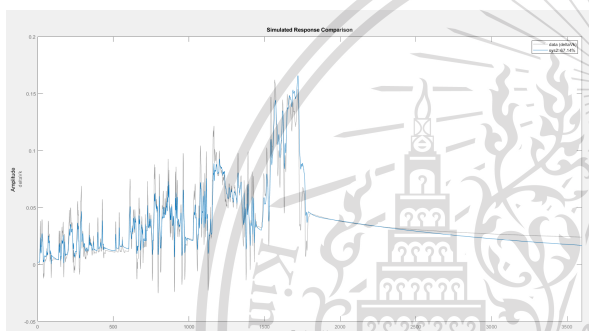
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



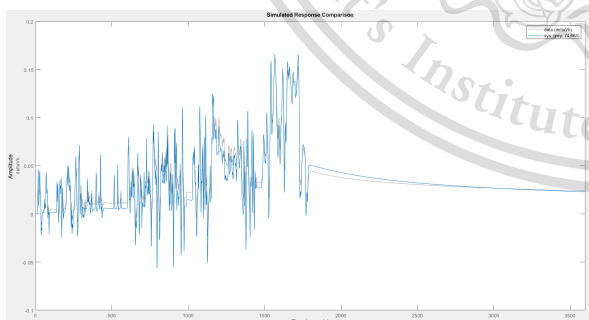
รูปที่ 8 กราฟแรงดันระหว่างชั่วโมงเทียบกับเวลา model B

สำหรับ battery model A การประมาณค่าความต้านทานภายในโดยใช้ State - space model จะผลดังนี้ (ค่าความถูกต้องอยู่ที่ 67.14%)



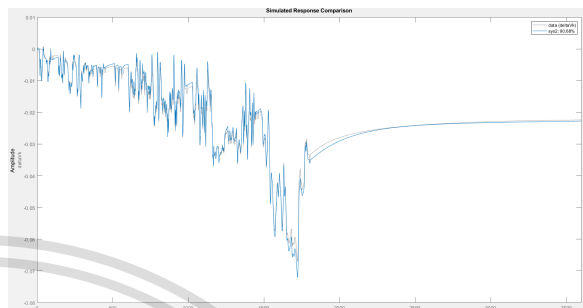
รูปที่ 9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง State - space model (สีเทา) กับ battery model A

สำหรับ battery model A การประมาณค่าความต้านทานภายในโดยใช้ Grey - box model จะผลดังนี้ (ค่าความถูกต้องอยู่ที่ 74.66%)



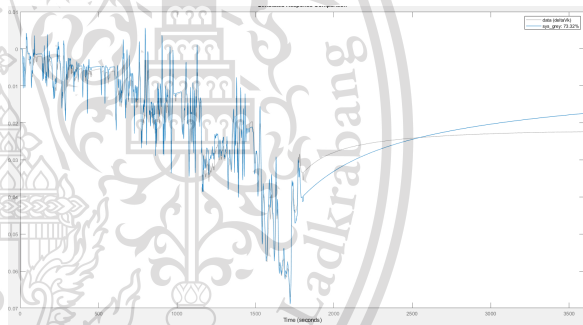
รูปที่ 10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Grey - box model (สีเทา) กับ battery model A

สำหรับ battery model B การประมาณค่าความต้านทานภายในโดยใช้ State - space model จะผลดังนี้ (ค่าความถูกต้องอยู่ที่ 90.68%)



รูปที่ 11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง State - space model (สีเทา) กับ battery model B

สำหรับ battery model A การประมาณค่าความต้านทานภายในโดยใช้ Grey - box model จะผลดังนี้ (ค่าความถูกต้องอยู่ที่ 73.32%)



รูปที่ 12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Grey - box model (สีเทา) กับ battery model B

## 5.สรุปผลการดำเนินงาน

ถ้าดูจากผลของการหาค่าพารามิเตอร์ วิธีของ State space model จะให้เอาต์พุตที่ใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จากการทดลองมากกว่า แต่ค่าพารามิเตอร์ไม่มีความสัมพันธ์กันตามวงจรสมมูล ส่วนของ Grey - box model จะให้ผลลัพธ์ที่ด้อยกว่า แต่ค่าพารามิเตอร์ถูกควบคุมให้มีความสัมพันธ์กันตามวงจรสมมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## กิติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาจาก ดร.สมภพ ผลไม้ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ที่ได้ให้คำแนะนำแนวคิดในการทำโครงการ และให้ความช่วยเหลือในการแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น รวมทั้งให้การสนับสนุนในด้านงบประมาณ อุปกรณ์และสถานที่ในการทำปริญญานิพนธ์ และแรงกระตุ้นเพื่อให้ปริญญานิพนธ์นี้ เสร็จสมบูรณ์ คณะผู้จัดทำจึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

## เอกสารอ้างอิง

[1] Gregory L. Plett, Battery Management Systems Equivalent-Circuit Methods, 2nd Ed., Boston, Artech House, 2015.

[2] Gregory L. Plett, Battery Management Systems Battery Equivalent-Circuit Methods, Boston, Artech House, 2015.

## ประวัติผู้เขียน



นาย พริษฐ์ ใจสุดา เกิดวันที่ 30 กรกฎาคม 2540  
ที่อยู่ 160 หมู่ 3 ต.ดอนมูล อ.สูงเม่น จังหวัด  
แพร่ 54130  
Email : 59010918@kmitl.ac.th

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.