



การประมาณค่าสถานะประจุแบบออนไลน์ของแบตเตอรี่ลิเธียมไอออน
สำหรับเซนเซอร์โหนดในระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย
**Online State of Charge Estimation of a Lithium-Ion Battery
for Sensor Nodes in Wireless Sensor Networks**

จิววัฒน์ นายแสงเจริญ

Jirawat Chaysaengcharoen

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Master of Engineering in Electrical Engineering
Prince of Songkla University**

2557

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์



การประมาณค่าสถานะประจุแบบออนไลน์ของแบตเตอรี่ลิเธียมไอออน
สำหรับเซนเซอร์โหนดในระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย
**Online State of Charge Estimation of a Lithium-Ion Battery
for Sensor Nodes in Wireless Sensor Networks**

จิววัฒน์ ฉายแสงเจริญ

Jirawat Chaysaengcharoen

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Master of Engineering in Electrical Engineering
Prince of Songkla University**

2557

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ การประมาณค่าสถานะประจุแบบออนไลน์ของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน
 สำหรับเซนเซอร์โหนดในระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย

ผู้เขียน นายจิรวัดน์ ฉายแสงเจริญ

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....ประธานกรรมการ
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษมาลย์ เฉลิมยานนท์) (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐฐา จินดาเพ็ชร)

.....กรรมการ
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษมาลย์ เฉลิมยานนท์)

.....กรรมการ
 (ดร.สุรัสวดี กุลบุญ ก่อเกื้อ)

.....กรรมการ
 (ดร.วฤทธิ์ วิชกุล)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
 ส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา
 วิศวกรรมไฟฟ้า

.....
 (รองศาสตราจารย์ ดร.ธีระพล ศรีชนะ)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ.....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กุสุมาลย์ เฉลิมยานนท์)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ลงชื่อ.....

(นายจิรวัดน์ นายแสงเจริญ)

นักศึกษา

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และ
ไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ.....

(นายจิรวุฒิ นายแสงเจริญ)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์	การประมาณค่าสถานะประจุแบบออนไลน์ของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนสำหรับเซนเซอร์โหนดในระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย
ผู้เขียน	นายจิรวัดน์ ฉายแสงเจริญ
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา	2556

บทคัดย่อ

แหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าของระบบเครือข่ายเซนเซอร์แบบไร้สายโดยส่วนใหญ่มาจากแบตเตอรี่เป็นหลักและปัจจุบันแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนซึ่งเป็นแบตเตอรี่ชนิดที่ชาร์จได้เป็นที่นิยมใช้กันมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจาก มีขนาดเล็ก อายุการใช้งานยาวนาน ราคาต่ำ อัตราส่วนของพลังงานและกำลังไฟฟ้าสูงกว่าเมื่อเทียบกับแบตเตอรี่ชนิดอื่น ๆ อย่างไรก็ตาม ข้อเสียของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนคือ มีแรงดันเกือบคงที่ในระหว่างการใช้งาน ทำให้ไม่สามารถบ่งบอกปริมาณของพลังงานไฟฟ้าที่เหลืออยู่ได้ ดังนั้นหากระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายขนาดใหญ่ มีเซนเซอร์โหนดจำนวนมาก ปัญหาเรื่องการไม่สามารถบ่งบอกปริมาณพลังงานไฟฟ้าในแบตเตอรี่ อาจส่งผลกระทบต่อการทำงานของระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายโดยรวมได้

งานวิจัยชิ้นนี้ได้นำเสนอวิธีการประมาณค่าสถานะประจุแบบออนไลน์ของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนเพื่อการประยุกต์ใช้ในระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย การหาสถานะของประจุใช้การทดสอบด้วยกระแสดิซชาร์จแบบพัลส์เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสถานะประจุและแรงดันขณะเปิดวงจร โดยการออกแบบและสร้างวงจรตรวจวัดค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่เพื่อให้แบตเตอรี่จ่ายกระแสได้คงที่ทุกค่าแรงดันที่เปลี่ยนแปลงด้วยวงจรดิ้งกระแสคงที่ ผลตอบสนองของแรงดันในแต่ละช่วงสามารถนำไปใช้ประมาณค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลองวงจรสมมูลแบตเตอรี่ได้ การประมาณค่าสถานะประจุแบบออนไลน์จะใช้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันชั่วขณะที่แบตเตอรี่จ่ายกระแสกับแรงดันขณะเปิดวงจรจากแบบจำลองวงจรสมมูลของแบตเตอรี่และใช้วิธีการประมาณค่าสถานะประจุจากความสัมพันธ์ระหว่างค่าสถานะประจุกับแรงดันขณะเปิดวงจรด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยผลการประมาณค่าประจุแบบออนไลน์มีความแม่นยำสูง และสามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อให้เซนเซอร์โหนดสามารถประมวลผลปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่เหลืออยู่ในโหนดได้ อีกทั้งใช้เป็นข้อมูลในการเลือกเส้นทางส่งข้อมูลไปยังหน่วยประมวลผลกลางของระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายได้

คำสำคัญ : การประมาณแบบออนไลน์, ค่าสถานะประจุ, แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน

Thesis Title	Online State of Charge Estimation of a Lithium-Ion Battery for Sensor Nodes in Wireless Sensor Networks
Author	Mr. Jirawat Chaysaengcharoen
Major Program	Electrical Engineering
Academic Year	2013

ABSTRACT

Main energy sources in wireless sensor network are mainly batteries. The rechargeable lithium-ion battery have been more popular, because it is small, long lifespan, low cost with higher power ratios compared to other battery types. However, the disadvantages of this battery is that its terminal voltage remains constant during operation. Therefore, it is impossible to estimate the energy level remaining in the battery. This limitation of the battery may affect to the performance of a wireless sensor network system with large numbers of sensor.

This research proposes the method for online state of charge estimation of lithium-ion battery for a sensor node in wireless sensor networks. The pulse current discharge test are used to determine the relationship between status of charge and the open circuit voltage. A circuit is designed and built to draw constant discharge current from the battery for any terminal voltage value. The pulse voltage responses in any discharging period can be used to estimate the parameters in the equivalent circuit model of the battery. The online estimation of state of charge is to measure the operating terminal voltage of the battery and evaluate the open circuit voltage from the equivalent circuit model of the battery. Finally, the state of charge can be estimated by using the analysis of the microcontroller. The estimation results are very precision and it can be applied to the sensor nodes in order to estimates the remaining energy of a node and to the route packets towards a central node called the sink node.

Keywords: Online estimation, State of Charge, lithium-ion battery.

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กุสุมาลย์ เถลิมนานนท์ ที่ได้กรุณาให้การสนับสนุนทุก ๆ ด้านในการทำวิทยานิพนธ์นี้เป็นอย่างดี ทั้งการแนะนำให้คำปรึกษาในด้านต่าง ๆ อุปกรณ์ในการทำวิทยานิพนธ์ รวมทั้งเป็นกำลังใจในการแก้ปัญหาและอุปสรรคต่าง ๆ ในการทำวิทยานิพนธ์นี้ให้เป็นไปในแนวทางที่ถูกต้องสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อนุวัตร ประเสริฐสิทธิ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาและความรู้ในด้านการออกแบบวงจร พร้อมทั้งแนวทางในการแก้ปัญหาในการทำวิทยานิพนธ์นี้เป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณ ดร.วฤทธิ วิชกุล ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาและความรู้ในการทำวิทยานิพนธ์นี้เป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่ได้กรุณาให้คำแนะนำและความคิดเห็นในการแก้ไขปรับปรุงวิทยานิพนธ์นี้

ขอขอบพระคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้การสนับสนุนอุปกรณ์ และสถานที่ในการทำวิทยานิพนธ์นี้

ขอขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ ที่ให้การสนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัยเพื่อวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ และบุคลากรของภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่าน รวมทั้งพี่ ๆ เพื่อน ๆ ทุกท่านที่ให้คำแนะนำ และให้กำลังใจที่ดีเสมอมา

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา ผู้ให้โอกาสทางการศึกษา การสนับสนุนในทุก ๆ ด้านและให้กำลังใจที่ดีเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

จิรวัดน์ ฉายแสงเจริญ

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(8)
รายการตาราง	(11)
รายการภาพประกอบ	(12)
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของหัวข้อวิจัย	1
1.2 การตรวจเอกสาร	4
1.3 วัตถุประสงค์ของโครงการ	9
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	9
1.5 ขอบเขตของการวิจัย	9
1.6 วิธีการวิจัย	10
1.7 แผนการดำเนินงาน	12
2. ทฤษฎีและหลักการ	13
2.1 เซนเซอร์โหนด	13
2.2 แหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าเซนเซอร์โหนด	14
2.2.1 แหล่งจ่ายที่มีพลังงานไฟฟ้าจำกัด	15
2.2.2 แหล่งจ่ายที่มีกำลังไฟฟ้าจำกัด	17
2.3 แบตเตอรี่ลิเธียมไอออน	18
2.4 แบบจำลองวงจรสมมูลของแบตเตอรี่	19
2.4.1 แบบจำลองเทวินิน	19
2.4.2 การปรับปรุงแบบจำลองเทวินิน	20
2.5 สถานะประจุแบตเตอรี่	21
2.5.1 การประมาณปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่เหลืออยู่ในแบตเตอรี่	21
2.6 การทดสอบด้วยกระแส	23
2.6.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสถานะประจุกับแรงดันขณะเปิดวงจรของแบตเตอรี่	23
2.6.2 การหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่	25

สารบัญ (ต่อ)

สารบัญ	หน้า
3. การออกแบบวงจร	27
3.1 การออกแบบวงจรตรวจวัดค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่	27
3.1.1 การตรวจวัดสัญญาณ	28
3.1.2 การส่งและรับสัญญาณ	31
3.1.3 การประมวลผลสัญญาณ	32
3.1.4 การออกแบบวงจรดึงกระแสดีซาร์จคงที่	34
3.2 การออกแบบการจำลองผลตอบสนองแรงดันของแบตเตอรี่	35
3.2.1 การจำลองแรงดันของแบตเตอรี่	35
3.2.2 การจำลองวงจรดึงกระแสดีซาร์จคงที่	36
3.3 การประมาณค่าสถานะประจุแบบออนไลน์	37
3.4 วงจรตรวจวัดค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่	40
4. ผลการทดลอง	41
4.1 การทดลองหากราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสถานะประจุกับแรงดันขณะเปิดวงจร	41
4.1.1 การทดลองหากราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสถานะประจุกับแรงดันขณะเปิดวงจรของแบตเตอรี่เมื่อดีซาร์จแบตเตอรี่ด้วยกระแสดีซาร์จคงที่ต่างกัน	41
4.1.2 การทดลองหากราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสถานะประจุกับแรงดันขณะเปิดวงจรของแบตเตอรี่เมื่อดีซาร์จแบตเตอรี่ด้วยกระแสดีซาร์จคงที่ขนาด 1.02 A	42
4.2 การหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองวงจรสมมูลของแบตเตอรี่	45
4.2.1 แบตเตอรี่ก้อนที่ 1 (Test#1)	45
4.2.2 แบตเตอรี่ก้อนที่ 2 (Test#2)	49
4.2.3 แบตเตอรี่ก้อนที่ 3 (Test#3)	52
4.2.4 แบตเตอรี่ก้อนที่ 4 (Test#4)	56
4.2.5 แบตเตอรี่ก้อนที่ 5 (Test#5)	59
4.3 การจำลองผลตอบสนองแรงดันของแบตเตอรี่	63

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
สารบัญ	
4.3.1 แบตเตอรี่ก้อนที่ 1 (Test#1)	63
4.3.2 แบตเตอรี่ก้อนที่ 2 (Test#2)	66
4.3.3 แบตเตอรี่ก้อนที่ 3 (Test#3)	69
4.3.4 แบตเตอรี่ก้อนที่ 4 (Test#4)	72
4.3.5 แบตเตอรี่ก้อนที่ 5 (Test#5)	75
4.4 การทดลองการประมาณค่าสถานะประจุแบบออนไลน์	80
5. บทสรุป	85
5.1 บทสรุป	85
5.2 ปัญหาและแนวทางแก้ไข	86
5.3 แนวทางการพัฒนาต่อไป	86
บรรณานุกรม	87
ภาคผนวก	90
ภาคผนวก ก ผลการทดลอง	91
ภาคผนวก ข โปรแกรม PIC16F877	108
ภาคผนวก ค การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน	116
ประวัติผู้เขียน	121

รายการตาราง

		หน้า
ตาราง		
2-1	ข้อดีและข้อเสียของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน	18
2-2	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสถานะประจุกับเวลาการคายประจุของแบตเตอรี่	25
4-1	ค่าพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่ก้อนที่ 1 จากการคำนวณ	49
4-2	ค่าพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่ก้อนที่ 2 จากการคำนวณ	52
4-3	ค่าพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่ก้อนที่ 3 จากการคำนวณ	56
4-4	ค่าพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่ก้อนที่ 4 จากการคำนวณ	59
4-5	ค่าพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่ก้อนที่ 5 จากการคำนวณ	63
4-6	ผลการทดลองการประมาณค่าสถานะประจุแบบออนไลน์ของแบตเตอรี่ก้อนที่ 3	81
4-7	ผลการทดลองการประมาณค่าสถานะประจุแบบออนไลน์ของแบตเตอรี่ก้อนที่ 1	82
4-8	ผลการทดลองการประมาณค่าสถานะประจุแบบออนไลน์ของแบตเตอรี่ก้อนที่ 2	82
4-9	ผลการทดลองการประมาณค่าสถานะประจุแบบออนไลน์ของแบตเตอรี่ก้อนที่ 4	83
4-10	ผลการทดลองการประมาณค่าสถานะประจุแบบออนไลน์ของแบตเตอรี่ก้อนที่ 5	83

รายการภาพประกอบ

		หน้า
	ภาพประกอบ	
1-1	ระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย	2
1-2	แบบจำลองของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน	4
1-3	การดิสชาร์จด้วยกระแสคงที่	4
1-4	ผลตอบสนองแรงดันของแบตเตอรี่ขณะที่ดิสชาร์จแบตเตอรี่ด้วยกระแสคงที่	5
1-5	แบบจำลองเทวินินของแบตเตอรี่	6
1-6	แผนผังของวิธีที่นำเสนอ	7
1-7	แบบจำลองวงจรสมมูลของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน	8
1-8	แบบจำลองวงจรสมมูลของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน	8
1-9	ระบบการประมาณค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่	10
1-10	ระเบียบวิธีวิจัย	11
2-1	ระดับชั้นของระบบในเซนเซอร์โหนด	13
2-2	สถาปัตยกรรมของเซนเซอร์โหนด	14
2-3	แบตเตอรี่ขนาด AA	16
2-4	แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน	16
2-5	แบบจำลองเทวินินของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน	20
2-6	การปรับปรุงแบบจำลองเทวินินของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน	20
2-7	ความสัมพันธ์ระหว่างสถานะประจุกับแรงดันขณะเปิดวงจร	22
2-8	กระแสดิสชาร์จแบบพัลส์	23
2-9	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสถานะประจุกับแรงดันขณะเปิดวงจร	24
2-10	การดิสชาร์จของตัวเก็บประจุ	26
3-1	วงจรตรวจวัดค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่	27
3-2	อุปกรณ์ตรวจวัดสัญญาณแรงดัน	28
3-3	อุปกรณ์ตรวจวัดสัญญาณกระแส	28
3-4	ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอินพุตกับแรงดันเอาต์พุตของไอซีตรวจวัดสัญญาณกระแสเบอร์ ACS712	29
3-5	วงจรขยายผลต่างสัญญาณแรงดัน	30
3-6	วงจรตรวจวัดสัญญาณกระแส	31

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

	หน้า
ภาพประกอบ	
3-7 โปรแกรม Hyper Terminal	32
3-8 แผนผังการทำงานของวงจรตรวจวัดค่าสถานะประจุ	33
3-9 วงจรดึงกระแสคิซาร์จคงที่	34
3-10 การจำลองผลตอบสนองแรงดันของแบตเตอรี่	35
3-11 ผลการจำลองแหล่งจ่ายแรงดัน	36
3-12 ผลตอบสนองแรงดันของแบตเตอรี่	37
3-13 แผนผังการประมาณค่าสถานะประจุแบบออนไลน์	38
3-14 ผลการประมาณค่าสถานะประจุแบบออนไลน์	39
3-15 วงจรตรวจวัดค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ (ฮาร์ดแวร์)	40
3-16 แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนที่ใช้ในการทดลอง	40
4-1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขณะเปิดวงจรกับสถานะประจุ ของแบตเตอรี่ที่กระแสคิซาร์จคงที่ขนาด 1.02 A และ 0.5 A	42
4-2 ผลการทดลองหากราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขณะเปิดวงจร กับสถานะประจุของแบตเตอรี่ที่กระแสคิซาร์จคงที่ขนาด 1.02 A	43
4-3 วงจรสมมูลของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน	45
4-4 ผลตอบสนองแรงดันของแบตเตอรี่ก้อนที่ 1 (ค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ ลดลงจาก 100% เหลือ 95%)	46
4-5 ผลตอบสนองแรงดันของแบตเตอรี่ก้อนที่ 1 (ค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ ลดลงจาก 95% เหลือ 90%)	47
4-6 ผลตอบสนองแรงดันของแบตเตอรี่ก้อนที่ 1 (ค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ ลดลงจาก 90% เหลือ 85%)	48
4-7 ผลตอบสนองแรงดันของแบตเตอรี่ก้อนที่ 2 (ค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ ลดลงจาก 100% เหลือ 95%)	49
4-8 ผลตอบสนองแรงดันของแบตเตอรี่ก้อนที่ 2 (ค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ ลดลงจาก 95% เหลือ 90%)	50

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

	หน้า
ภาพประกอบ	
4-9 ผลตอบสนองแรงดันของแบตเตอรี่ก้อนที่ 2 (ค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ลดลงจาก 90% เหลือ 85%)	51
4-10 ผลตอบสนองแรงดันของแบตเตอรี่ก้อนที่ 3 (ค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ลดลงจาก 100% เหลือ 95%)	53
4-11 ผลตอบสนองแรงดันของแบตเตอรี่ก้อนที่ 3 (ค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ลดลงจาก 95% เหลือ 90%)	54
4-12 ผลตอบสนองแรงดันของแบตเตอรี่ก้อนที่ 3 (ค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ลดลงจาก 90% เหลือ 85%)	55
4-13 ผลตอบสนองแรงดันของแบตเตอรี่ก้อนที่ 4 (ค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ลดลงจาก 100% เหลือ 95%)	56
4-14 ผลตอบสนองแรงดันของแบตเตอรี่ก้อนที่ 4 (ค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ลดลงจาก 95% เหลือ 90%)	57
4-15 ผลตอบสนองแรงดันของแบตเตอรี่ก้อนที่ 4 (ค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ลดลงจาก 90% เหลือ 85%)	58
4-16 ผลตอบสนองแรงดันของแบตเตอรี่ก้อนที่ 5 (ค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ลดลงจาก 100% เหลือ 95%)	60
4-17 ผลตอบสนองแรงดันของแบตเตอรี่ก้อนที่ 5 (ค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ลดลงจาก 95% เหลือ 90%)	61
4-18 ผลตอบสนองแรงดันของแบตเตอรี่ก้อนที่ 5 (ค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ลดลงจาก 90% เหลือ 85%)	62
4-19 ผลการจำลองผลตอบสนองแรงดันของแบตเตอรี่ก้อนที่ 1 (ค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ลดลงจาก 100% เหลือ 95%)	64
4-20 ผลการจำลองผลตอบสนองแรงดันของแบตเตอรี่ก้อนที่ 1 (ค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ลดลงจาก 95% เหลือ 90%)	65
4-21 ผลการจำลองผลตอบสนองแรงดันของแบตเตอรี่ก้อนที่ 1 (ค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ลดลงจาก 90% เหลือ 85%)	66

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

	หน้า
ภาพประกอบ	
4-22 ผลการจำลองผลตอบสนองแรงดันของแบตเตอรี่ก้อนที่ 2 (ค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ลดลงจาก 100% เหลือ 95%)	67
4-23 ผลการจำลองผลตอบสนองแรงดันของแบตเตอรี่ก้อนที่ 2 (ค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ลดลงจาก 95% เหลือ 90%)	68
4-24 ผลการจำลองผลตอบสนองแรงดันของแบตเตอรี่ก้อนที่ 2 (ค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ลดลงจาก 90% เหลือ 85%)	69
4-25 ผลการจำลองผลตอบสนองแรงดันของแบตเตอรี่ก้อนที่ 3 (ค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ลดลงจาก 100% เหลือ 95%)	70
4-26 ผลการจำลองผลตอบสนองแรงดันของแบตเตอรี่ก้อนที่ 3 (ค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ลดลงจาก 95% เหลือ 90%)	71
4-27 ผลการจำลองผลตอบสนองแรงดันของแบตเตอรี่ก้อนที่ 3 (ค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ลดลงจาก 90% เหลือ 85%)	72
4-28 ผลการจำลองผลตอบสนองแรงดันของแบตเตอรี่ก้อนที่ 4 (ค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ลดลงจาก 100% เหลือ 95%)	73
4-29 ผลการจำลองผลตอบสนองแรงดันของแบตเตอรี่ก้อนที่ 4 (ค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ลดลงจาก 95% เหลือ 90%)	74
4-30 ผลการจำลองผลตอบสนองแรงดันของแบตเตอรี่ก้อนที่ 4 (ค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ลดลงจาก 90% เหลือ 85%)	75
4-31 ผลการจำลองผลตอบสนองแรงดันของแบตเตอรี่ก้อนที่ 5 (ค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ลดลงจาก 100% เหลือ 95%)	76
4-32 ผลการจำลองผลตอบสนองแรงดันของแบตเตอรี่ก้อนที่ 5 (ค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ลดลงจาก 95% เหลือ 90%)	77
4-33 ผลการจำลองผลตอบสนองแรงดันของแบตเตอรี่ก้อนที่ 5 (ค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ลดลงจาก 90% เหลือ 85%)	78
4-34 ตัวต้านทาน R_d ของแบตเตอรี่ทั้ง 5 ก้อน	79

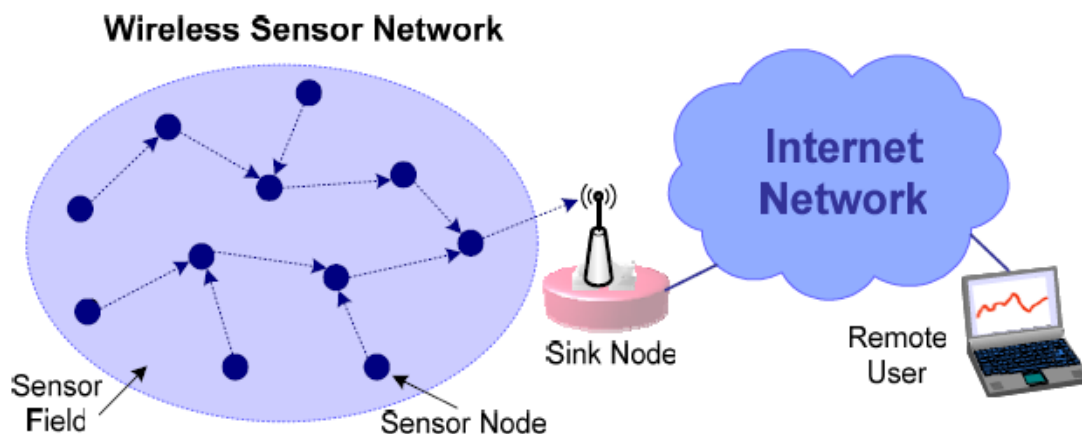
บทที่ 1

บทนำ

1.1. ความสำคัญและที่มาของหัวข้อวิจัย

ในปัจจุบันโลกของเราอยู่ในยุคสังคมไอทีหรือการปฏิวัติคลื่นลูกที่สาม ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงของสังคมอย่างรวดเร็ว เมื่อเทียบกับยุคยุคเกษตรกรรมหรือการปฏิวัติคลื่นลูกที่หนึ่ง และยุคอุตสาหกรรมหรือการปฏิวัติคลื่นลูกที่หนึ่งสอง โดยเฉพาะผลจากการพัฒนาเทคโนโลยีของการสื่อสารด้านอินเทอร์เน็ตและการสื่อสารไร้แบบสาย ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการใช้ชีวิตของมนุษย์เป็นอย่างมาก [1] ในอนาคตมีการคาดการณ์ไว้ว่า อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และเครื่องใช้ไฟฟ้าทุกชนิดจะมีอุปกรณ์สื่อสารไร้แบบสายฝังตัวอยู่ ทำให้ส่งข้อมูลติดต่อกันได้ตลอดเวลา และก่อให้เกิดเป็นระบบเครือข่ายสื่อสารรับส่งข้อมูลแบบไร้สาย

ในปัจจุบันมีการนำเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายมาประยุกต์ใช้กับงานประเภทต่าง ๆ เช่น ระบบเตือนภัยพิบัติทางธรรมชาติเพื่อการพยากรณ์และเตือนภัยให้สามารถป้องกันและลดความเสียหายต่อชีวิตและทรัพย์สิน ระบบขนส่งจราจรอัจฉริยะเพื่อช่วยเพิ่มความปลอดภัย ลดการติดขัดและเพิ่มประสิทธิภาพการขนส่งจราจร ระบบเฝ้าตรวจสอบและควบคุมโรงงานอุตสาหกรรมเพื่อช่วยลดความสูญเสียและเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตในโรงงาน การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตทางการเกษตร และการประยุกต์ทางการแพทย์ เป็นต้น ดังนั้นระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายจึงเกี่ยวข้องกับการตรวจวัดของเซนเซอร์ที่กระจายอยู่ในตำแหน่งต่าง ๆ เซนเซอร์ในเครือข่ายอาจเป็นชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดกันก็ได้ขึ้นอยู่กับชนิดของข้อมูลที่สื่อสารกันและประเภทของการใช้งาน ในระบบเครือข่ายเซนเซอร์แบบไร้สายจะเรียกเซนเซอร์เหล่านี้ว่า “เซนเซอร์โหนด” (Sensor Node) และเป็นองค์ประกอบหลักของระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย เซนเซอร์โหนดแต่ละตัวมีส่วนประกอบหลักคือ เซนเซอร์ หน่วยประมวลผล อุปกรณ์สื่อสารไร้สาย และแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า อีกทั้งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้พลังงานไฟฟ้าต่ำ ระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายจะเชื่อมโยงกลุ่มของเซนเซอร์โหนดเข้าด้วยกัน ด้วยเทคโนโลยีสื่อสารไร้สายเพื่อสื่อสารข้อมูลจากเซนเซอร์หลากหลายชนิดในระบบเครือข่ายไปยังหน่วยประมวลผลกลาง (Sink Node) ดังแสดงในภาพประกอบที่ 1-1



ภาพประกอบ 1-1 ระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย [2]

การสื่อสารข้อมูลจากเซนเซอร์โหนดไปยังหน่วยประมวลผลกลางจะต้องมีการจัดเส้นทางในการส่งข้อมูลของระบบเครือข่ายเซนเซอร์แบบไร้สายด้วยโพรโตคอลจัดเส้นทาง (Routing Protocol) [3] ซึ่งนิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยโพรโตคอลจัดเส้นทางนี้ใช้ข้อมูลของปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่เหลืออยู่ในโหนดเพื่อที่จะเลือกเส้นทางในการส่งข้อมูลไปยังหน่วยประมวลผลกลาง เพราะฉะนั้นข้อมูลเกี่ยวกับปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่เหลืออยู่ในโหนดจึงมีความสำคัญเป็นอย่างมากเพื่อที่จะยืดอายุการทำงานของระบบเครือข่ายไร้สาย

แหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าของระบบเครือข่ายเซนเซอร์แบบไร้สายจะมาจากแบตเตอรี่เป็นหลัก โดยในปัจจุบันมีการใช้แบตเตอรี่ทั้งชนิดที่ชาร์จได้ เช่น อัลคาไลน์ (Alkaline) และชนิดที่ชาร์จไม่ได้ เช่น นิกเกิล-แคดเมียม (Nickel-Cadmium: NiCd) นิกเกิล-ซิงค์ (Nickel-Zinc NiZn) นิกเกิล-เมทัลไฮไดรด์ (Nickel-Metal Hydride: NiMH) และลิเทียมไอออน โดยในปัจจุบันแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนเป็นที่นิยมใช้มากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากแบตเตอรี่ชนิดนี้มีข้อดีคือ ขนาดเล็ก อายุการใช้งานยาวนาน ราคาต่ำ อัตราส่วนของพลังงาน และกำลังสูงกว่าเมื่อเทียบกับแบตเตอรี่ชนิดอื่น ๆ [3] อย่างไรก็ตาม ข้อเสียของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนคือ จะมีแรงดันเกือบคงที่ในระหว่างการใช้งาน จึงทำให้ไม่สามารถบ่งบอกปริมาณของพลังงานไฟฟ้าที่เหลืออยู่ได้เหมือนกับแบตเตอรี่ชนิดอัลคาไลน์ซึ่งมีระดับแรงดันแปรผันตรงกับพลังงานที่เหลืออยู่ ดังนั้นหากระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายขนาดใหญ่ มีเซนเซอร์โหนดจำนวนมาก ปัญหาเรื่องการไม่สามารถบ่งบอกปริมาณพลังงานไฟฟ้าในแบตเตอรี่ อาจส่งผลกระทบต่อการทำงานของระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายโดยรวมได้ ดังที่กล่าวข้างต้น

ปัจจุบันการประมาณปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่เหลืออยู่ในแบตเตอรี่สามารถประมาณได้จากการหา *ค่าสถานะประจุ* (State-of-Charge, SOC) [4] ของแบตเตอรี่ โดยค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่คือ จำนวนประจุหรือพลังงานที่เหลืออยู่ภายในแบตเตอรี่ (Q) ซึ่งแสดงในรูป

ของเปอร์เซ็นต์ต่อพิกัดความจุของแบตเตอรี่ (Rated Capacity: C_R) ดังสมการที่ (1.1) และ (1.2) เมื่อแบตเตอรี่เต็มค่าสถานะประจุจะมีค่าเท่ากับ 100% และเมื่อแบตเตอรี่หมดสถานะประจุจะมีค่าเท่ากับ 0% ดังนั้นค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่จึงมีความสำคัญมาก

$$SOC = \frac{Q}{C_R} \times 100\% \quad (1.1)$$

โดยที่

$$Q = \int_{t_0}^{t_0+t} i_{bat}(\tau) d\tau \quad (1.2)$$

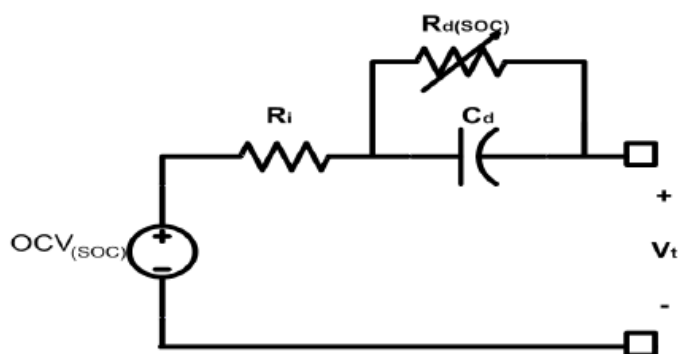
การประมาณค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่สามารถประมาณได้หลายวิธี [5] เช่น วิธีการประมาณค่าสถานะประจุจากการหาปริพันธ์กระแส ค่าสถานะประจุสามารถประมาณได้จากการหาปริพันธ์ของพลังงานทางด้านอินพุตและเอาต์พุตของแบตเตอรี่ แต่ข้อเสียของวิธีนี้คือ ค่าความผิดพลาดจะเพิ่มขึ้นจากการปริพันธ์ วิธีการประมาณค่าสถานะประจุจากแรงดันขณะเปิดวงจร โดยที่แรงดันขณะเปิดวงจรคือ แรงดันขั้วของแบตเตอรี่ขณะที่แบตเตอรี่ไม่ได้จ่ายกระแสหรือขณะเปิดวงจร ซึ่งแรงดันขณะเปิดวงจรจะมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นกับค่าสถานะประจุ ดังนั้นถ้าทราบค่าแรงดันขณะเปิดวงจรของแบตเตอรี่ก็สามารถประมาณค่าสถานะประจุได้ อย่างไรก็ตามข้อเสียของวิธีนี้คือ ไม่สามารถนำมาใช้ได้ขณะที่แบตเตอรี่จ่ายกระแส และวิธีการใช้วงจรสมมูลของแบตเตอรี่ ค่าสถานะประจุสามารถประมาณได้จากวงจรสมมูลของแบตเตอรี่ แต่ข้อเสียของวิธีนี้คือการหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลของแบตเตอรี่

ดังนั้นจึงมีแนวคิดในการศึกษาการทำงานและคุณสมบัติของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนสำหรับเซนเซอร์โหนดในระบบเครือข่ายไร้สาย ตลอดจนศึกษาแบบจำลองวงจรสมมูลของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียม ไอออนที่เหมาะสมเพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่เหลืออยู่ในแบตเตอรี่ และศึกษาวิธีการประมาณค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ ในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการประมาณค่าสถานะประจุจากแรงดันขณะเปิดวงจรและการประมาณค่าสถานะประจุจากวงจรสมมูลของแบตเตอรี่ ซึ่งจะนำจุดเด่นของแต่ละวิธีมาประยุกต์ใช้ด้วยกันเพื่อนำมาใช้ประมาณค่าสถานะประจุแบบออนไลน์ นอกจากนี้ได้มีการออกแบบและสร้างวงจรตรวจวัดค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่เพื่อนำมาใช้ในการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสถานะประจุกับแรงดันขณะเปิดวงจรและหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลของแบตเตอรี่ อีกทั้งได้ออกแบบและสร้างอัลกอริทึมในการประมาณค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนแบบออนไลน์ เพื่อให้เซนเซอร์โหนดสามารถประมวลผลปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่เหลืออยู่ในโหนด ทำให้โปรโตคอลจัดเส้นทางสามารถ

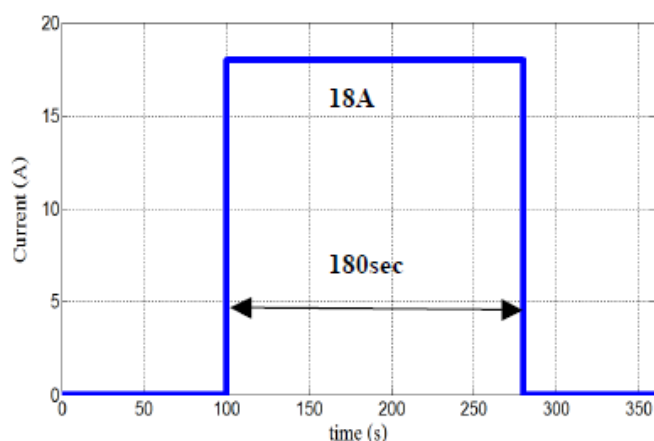
ใช้ข้อมูลของปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่เหลืออยู่ในโหนดเพื่อที่จะเลือกเส้นทางในการส่งข้อมูลไปยังหน่วยประมวลผลกลาง อีกทั้งยังทำให้ระบบเครือข่ายไร้สายมีอายุการใช้งานยาวนานมากยิ่งขึ้น ซึ่งในงานวิจัยใช้แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนขนาด 3.7 V 1020 mAh

1.2. การตรวจเอกสาร

1.2.1 Modeling of Lithium Ion Battery with Nonlinear Transfer Resistance [6]
งานวิจัยชิ้นนี้เขียนโดย Low Wen Yao และ Aziz, J. A. ได้นำเสนอแบบจำลองของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนโดยใช้แบบจำลองวงจรสมมูลทางไฟฟ้าด้วยตัวต้านทานถ่ายโอนที่ไม่เป็นเชิงเส้น ($R_{d(SOC)}$) ดังแสดงในภาพประกอบที่ 1-2 ค่าของตัวต้านทาน $R_{d(SOC)}$ จะเปลี่ยนแปลงตามค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ แหล่งจ่ายแรงดัน $OCV_{(SOC)}$ คือ แรงดันขณะเปิดวงจรที่เปลี่ยนแปลงตามค่าสถานะประจุ ตัวต้านทาน R_i คือ ตัวต้านทานภายในของแบตเตอรี่ ส่วนตัวต้านทาน $R_{d(SOC)}$ และตัวเก็บประจุ C_d ที่ต่อขนานกันใช้อธิบายผลตอบสนองชั่วคราวของผลตอบสนองแรงดันของแบตเตอรี่เมื่อดีสชาร์จแบตเตอรี่ด้วยกระแสคงที่

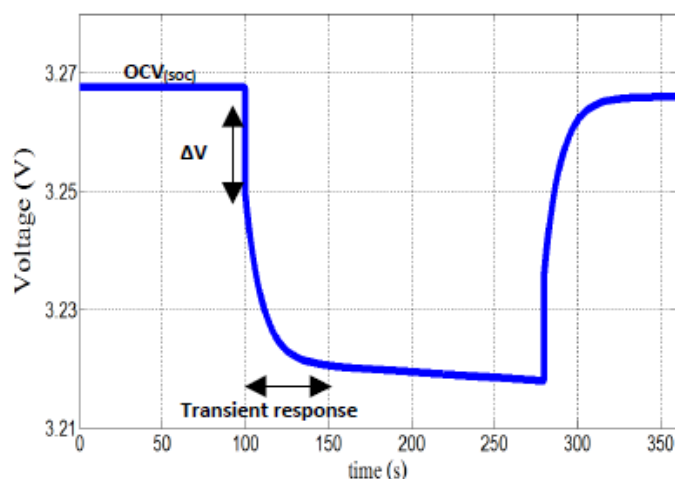


ภาพประกอบ 1-2 แบบจำลองของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน [6]



ภาพประกอบ 1-3 การดีสชาร์จด้วยกระแสคงที่ [6]

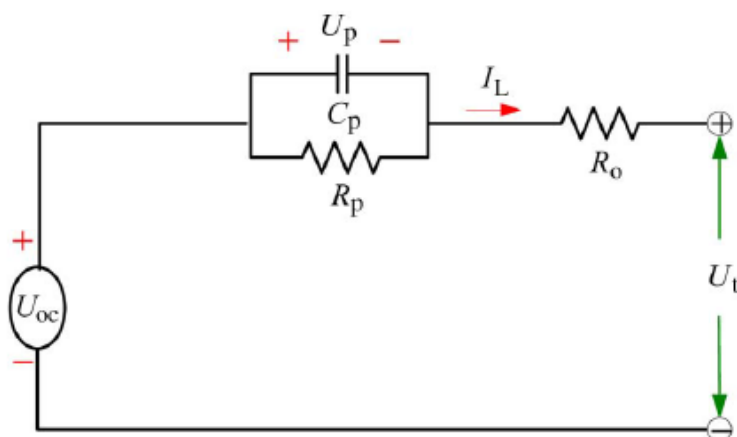
งานวิจัยชิ้นนี้ได้นำเสนอวิธีการหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองวงจรสมมูลของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนจากการทดสอบกระแสด้วยกระแสดิชาร์จคงที่แบบพัลส์ ดังแสดงในภาพประกอบที่ 1-3 สามารถทำได้โดยให้แบตเตอรี่จ่ายกระแสพิกัดคงที่ สำหรับค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองวงจรสมมูลสามารถหาได้จากผลตอบสนองแรงดันของแบตเตอรี่ขณะที่ดิชาร์จแบตเตอรี่ด้วยกระแสคงที่ ดังแสดงในภาพประกอบที่ 1-4



ภาพประกอบ 1-4 ผลตอบสนองแรงดันของแบตเตอรี่ขณะที่ดิชาร์จแบตเตอรี่ด้วยกระแสคงที่ [6]

นอกจากนั้นได้ทำการเปรียบเทียบผลตอบสนองแรงดันของแบตเตอรี่จากแบบจำลองที่ได้นำเสนอ (ตัวต้านทาน $R_{d(SOC)}$ เปลี่ยนแปลงตามค่าสถานะประจุ) แบบจำลองแบบดั้งเดิม (ตัวต้านทาน $R_{d(SOC)}$ มีค่าคงที่) แบบจำลองจากโปรแกรม MATLAB พบว่าผลตอบสนองแรงดันจากแบบจำลองที่ได้นำเสนอมีความแม่นยำมากกว่าเมื่อเทียบกับแบบจำลองแบบดั้งเดิม ซึ่งเกือบจะเท่ากับแบบจำลองจากโปรแกรม MATLAB

1.2.2 Evaluation on State of Charge Estimation of Batteries With Adaptive Extended Kalman Filter by Experiment Approach [7] งานวิจัยชิ้นนี้เขียนโดย Rui Xiong, Hongwen He, Fengchun Sun, และ Kai Zhao ได้นำเสนอแบบจำลองวงจรสมมูลที่เรียกว่าแบบจำลองเทวินิน ดังแสดงในภาพประกอบที่ 1-5 ในการประมาณค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่จะใช้หลักการพื้นฐานของการปริภูมิสแตต (State-Space) มาเขียนเป็นสมการทางไฟฟ้าของแบบจำลองเทวินิน ดังแสดงในสมการที่ (1.3) และ (1.4) ตามลำดับ



ภาพประกอบ 1-5 แบบจำลองเทวินินของแบตเตอรี่ [7]

$$\dot{U}_p = -\frac{1}{C_p} U_p + \frac{1}{C_p} I_L \quad (1.3)$$

$$U_t = U_{oc} - U_p - I_L R_o \quad (1.4)$$

โดยที่

U_t คือ แรงดันขั้วของแบตเตอรี่

U_{oc} คือ แรงดันแรงดันขณะเปิดวงจร

I_L คือ กระแสโหลด

R_o คือ ตัวต้านทานแบบโอห์มมิก (Ohmic resistance)

R_p และ C_p ใช้ในการอธิบายผลตอบสนองแรงดันชั่วคราวในระหว่างการชาร์จและ

ดิสชาร์จ

U_p คือ แรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ C_p

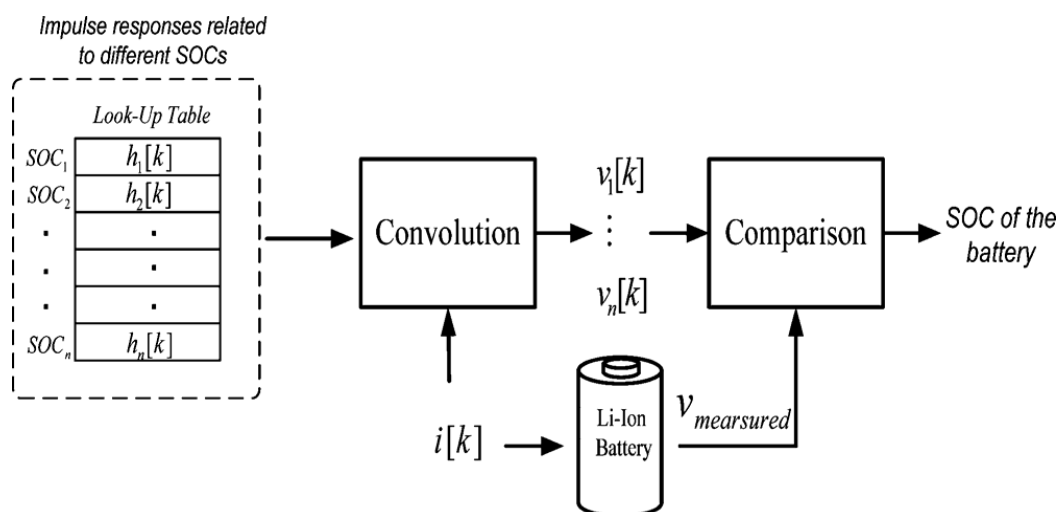
นอกจากนี้งานวิจัยชิ้นนี้ได้นำเสนอการประมาณค่าสถานะประจุด้วย Adaptive Extended Kalman Filter (AEKF) ซึ่งเป็นเทคนิคการคำนวณทางคณิตศาสตร์ โดยใช้วิธีการประมาณค่าสถานะประจุด้วยวิธีการนับจำนวนประจุและวิธีการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าสถานะประจุกับแรงดันขณะเปิดวงจรในตาราง ในการทดสอบแบตเตอรี่จะทดสอบด้วยวิธี Hybrid Pulse Power Characteristic (HPPC) อีกทั้งในการทดสอบด้วยวิธีนี้สามารถนำมาใช้หาคุณลักษณะของแบตเตอรี่และหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองวงจรสมมูลได้อีกด้วย

1.2.3 Online Estimation of State of Charge in Li-Ion Batteries Using Impulse Response Concept [8] งานวิจัยชิ้นนี้เขียนโดย Amir Hossein Ranjbar, Anahita Banaei, Amir Khoobroo, และ Babak Fahimi ได้นำเสนอวิธีในการทำนายค่าแรงดันขั้วแบบออนไลน์ของ

แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนด้วยเทคนิคของผลตอบสนองแบบอิมพัลส์ ซึ่งแรงดันขั้วของแบตเตอรี่สามารถทำนายได้ดังนี้ คำนวณหาผลตอบสนองแบบอิมพัลส์ที่เปลี่ยนแปลงตามค่าสถานะประจุแล้วเก็บไว้ในตาราง หลังจากนั้นวัดค่ากระแสอินพุตของแบตเตอรี่แล้วนำมาคูณโวลูชันกับผลตอบสนองแบบอิมพัลส์ที่เก็บไว้ในตาราง ดังแสดงในสมการที่ (1.5)

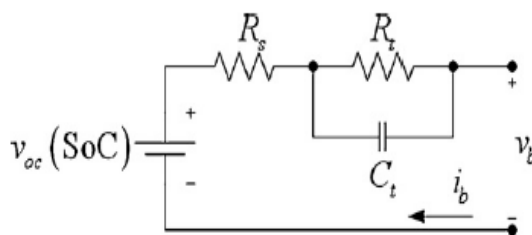
$$v_i[k] = i[k] * h_i[k] \Rightarrow v_i[k] = \sum_{j=1}^N i[j] * h_i[k-j] \quad (1.5)$$

จากสมการที่ (1.5) สามารถทำนายแรงดันขั้วได้ ค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่สามารถหาได้จากการเปรียบเทียบแรงดันขั้วที่วัดได้ของแบตเตอรี่กับแรงดันขั้วที่ใช้เทคนิคของผลตอบสนองแบบอิมพัลส์จากตาราง วิธีที่งานวิจัยชิ้นนี้นำเสนอมีแผนผังการทำงาน ดังแสดงในภาพประกอบที่ 1-6



ภาพประกอบ 1-6 แผนผังของวิธีที่นำเสนอ [8]

1.2.4 Online estimation of internal resistance and open-circuit voltage of lithium-ion batteries in electric vehicles [9] งานวิจัยชิ้นนี้เขียนโดย Yi-Hsien Chiang, Wu-Yang Sean และ Jia-Cheng Ke ได้นำเสนอวิธีการประมาณค่าตัวต้านทานภายในของแบตเตอรี่และแรงดันขณะเปิดวงจรแบบออนไลน์โดยอาศัยพื้นฐานจากแบบจำลองวงจรสมมูลของแบตเตอรี่ ดังแสดงในภาพประกอบที่ 1-7 ประกอบด้วยตัวต้านทานแบบโอห์มมิก R_s ตัวต้านทานและตัวเก็บประจุที่ต่อขนานกัน ($R_p // C_p$) แหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรง $v_{oc(SOC)}$ เป็นแรงดันขณะเปิดวงจรที่มีความสัมพันธ์กับค่าสถานะประจุที่เปลี่ยนแปลง แรงดันขั้วของแบตเตอรี่ v_b และกระแสที่แบตเตอรี่จ่ายออกไป i_b



ภาพประกอบ 1-7 แบบจำลองวงจรสมมูลของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน [9]

ในการประมาณค่าตัวต้านทานภายในของแบตเตอรี่และแรงดันขณะเปิดวงจรแบบออนไลน์จะใช้เทคนิคของวิธีอัลกอริทึมแบบปรับตัวได้ (Adaptive Algorithm) โดยอาศัยพื้นฐานจากแบบจำลองวงจรสมมูลมาเขียนสมการให้อยู่ในรูปแบบของการปริภูมิสแตต (State-Space) ดังแสดงในสมการที่ (1.6) และ (1.7) ตามลำดับ

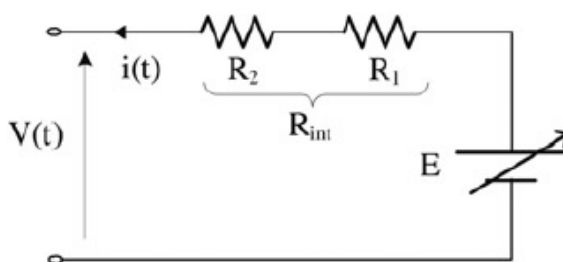
$$\dot{v}_c = -\frac{1}{C_t R_t} v_c + \frac{1}{C_t} i_b \quad (1.6)$$

$$v_b = v_{oc(SOC)} - R_s i_b - v_c \quad (1.7)$$

โดยที่

v_c คือ แรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทานและตัวเก็บประจุที่ต่อขนานกัน ($R_t // C_t$)

1.2.5 Modeling of lithium-ion battery for online energy management systems [10] งานวิจัยชิ้นนี้เขียนโดย S.X. Chen, H.B. Gooi, N. Xia และ M.Q. Wang ได้นำเสนอแบบจำลองวงจรสมมูลของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนแบบใหม่สำหรับระบบการจัดการพลังงานแบบออนไลน์ ดังแสดงในภาพประกอบที่ 1-8 ประกอบด้วยแรงดันเข้าสู่สถานะอยู่ตัว E ซึ่งมีความสัมพันธ์เป็นฟังก์ชันกับค่าสถานะประจุและตัวต้านทานภายในสมมูล R_{int} โดยจะมีตัวต้านทาน R_1 และ R_2 ต่ออนุกรมกัน ตัวต้านทาน R_1 เป็นตัวต้านทานภายในขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการคายประจุ เช่น กระแส อุณหภูมิ ตัวต้านทาน R_2 เป็นตัวต้านทานขึ้นอยู่กับเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ



ภาพประกอบ 1-8 แบบจำลองวงจรสมมูลของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน [10]

1.3. วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.3.1. เพื่อศึกษาการทำงานและคุณสมบัติของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนสำหรับ เซนเซอร์โหนดในระบบเครือข่ายไร้สาย

1.3.2. เพื่อศึกษาและหาวิธีการประมาณค่าสถานะประจุแบบออนไลน์ของ แบตเตอรี่สำหรับเซนเซอร์โหนดในระบบเครือข่ายไร้สาย

1.3.3. เพื่อออกแบบและสร้างอัลกอริทึมในการประมาณอายุการใช้งานของ แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนสำหรับเซนเซอร์โหนด

1.4. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1. สามารถประมาณอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนสำหรับ เซนเซอร์โหนดในระบบเครือข่ายไร้สาย

1.4.2. ทำให้เซนเซอร์โหนดสามารถอ่านค่าและแสดงปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ เหลืออยู่ในแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนได้

1.4.3. ทำให้เซนเซอร์โหนดสามารถตัดสินใจในการเลือกเส้นทางเพื่อทำการรับส่ง ข้อมูลไปยังหน่วยประมวลผลกลางได้

1.5. ขอบเขตของการวิจัย

1.5.1. ออกแบบและสร้างวงจรเพื่อทดลองหาค่ากราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า สถานะประจุกับแรงดันขณะเปิดวงจรของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนเพื่อหาสมการแสดงความสัมพันธ์

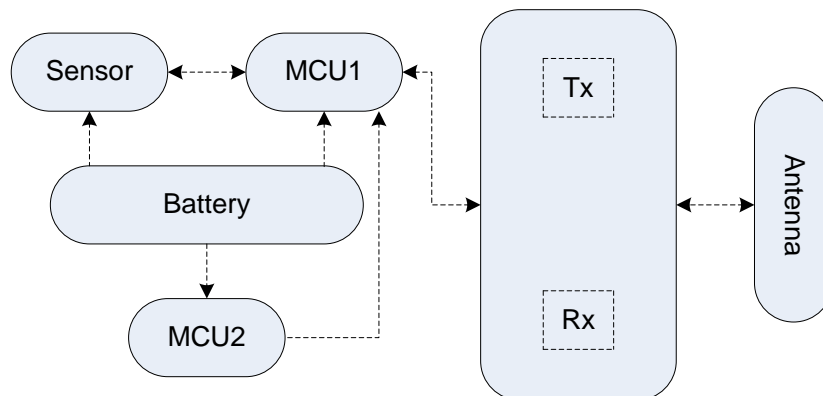
1.5.2. หาวิธีการประมาณค่าสถานะประจุแบบออนไลน์ของแบตเตอรี่สำหรับ เซนเซอร์โหนดในระบบเครือข่ายไร้สาย

1.5.3. ออกแบบและสร้างอัลกอริทึมในการคำนวณหาอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ ชนิดลิเทียมไอออนที่วัดได้ทั้งในขณะที่แบตเตอรี่ทำการอัดและคายประจุ

1.5.4. ทดสอบอัลกอริทึมในการคำนวณหาอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน

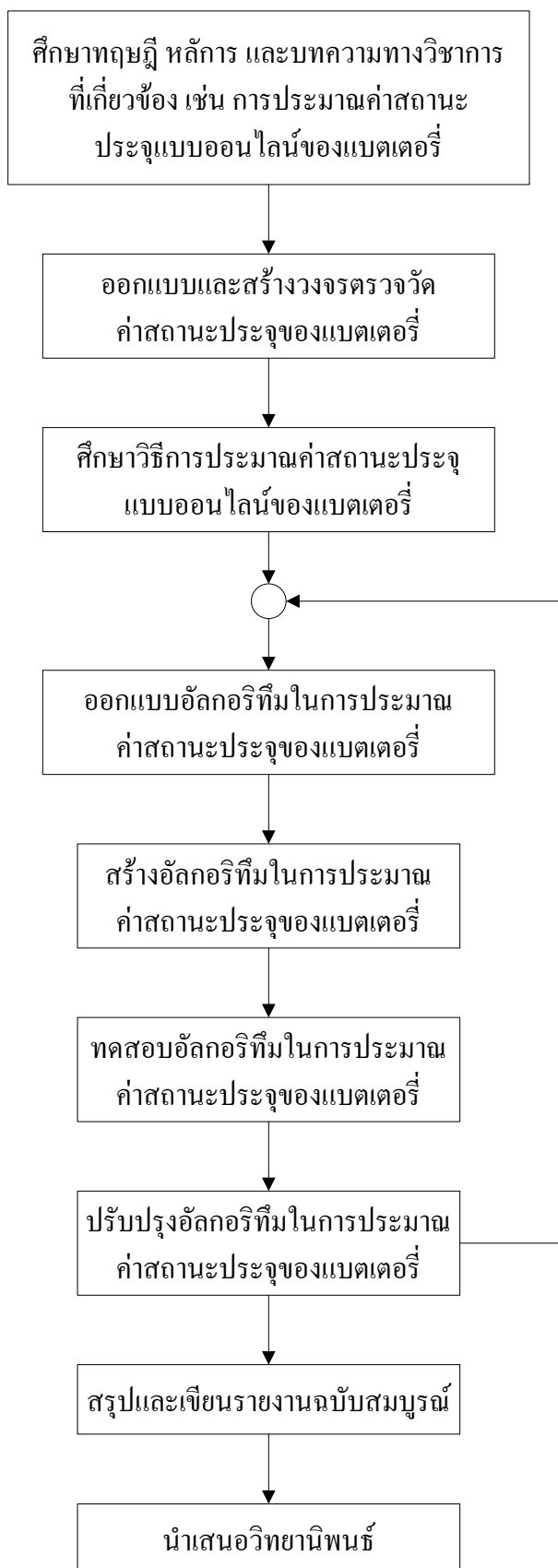
1.6. วิธีการวิจัย (Methodology)

ระเบียบวิธีการวิจัยเริ่มจากปัญหาความต้องการปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่เหลืออยู่ในโหนดเพื่อที่จะเลือกเส้นทางในการส่งข้อมูลไปยังหน่วยประมวลผลกลาง ดังนั้นจึงออกแบบระบบการประมาณค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ ดังแสดงในภาพประกอบที่ 1-9



ภาพประกอบ 1-9 ระบบการประมาณค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่

จากภาพประกอบที่ 1-9 ไมโครคอนโทรลเลอร์ตัวที่ 2 (MCU2) จะทำหน้าที่เป็นตัวประมวลผลการประมาณค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ ซึ่งจะส่งข้อมูลปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่เหลืออยู่ในโหนดออกไปเมื่อมีการร้องขอจากไมโครคอนโทรลเลอร์ตัวที่ 1 (MCU1) ที่ทำหน้าที่เป็นตัวประมวลผลหลักของเซนเซอร์โหนด ระบบการประมาณค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่แบบออนไลน์จะมีระเบียบวิธีวิจัย ดังแสดงในภาพประกอบที่ 1-10



ภาพประกอบ 1-10 ระเบียบวิธีวิจัย

1.7. แผนการดำเนินงาน

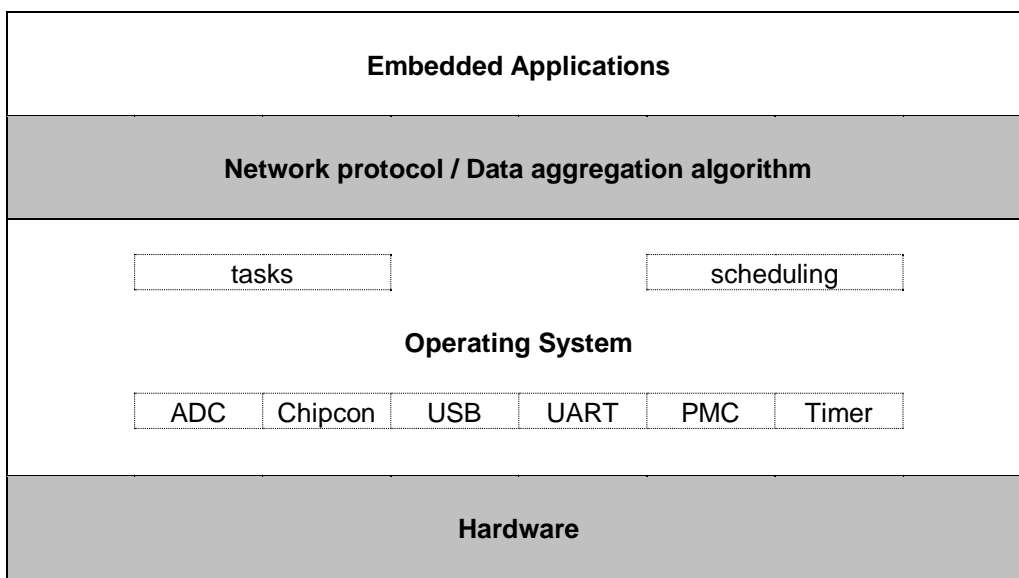
กิจกรรม/ขั้นตอนการดำเนินงาน	เดือน																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1. ศึกษาทฤษฎีและบทความทางวิชาการที่เกี่ยวข้อง	■	■	■	■														
2. ศึกษาการทำงานและคุณสมบัติของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน		■	■	■	■													
3. ศึกษาวิธีการประมาณอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน			■	■	■	■												
4. ศึกษาแบบจำลองของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน				■	■	■	■											
5. ออกแบบและสร้างวงจรตรวจวัดค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน							■	■	■	■	■							
6. ศึกษาอัลกอริทึมในการประมาณค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน											■	■	■	■				
7. ออกแบบและสร้างอัลกอริทึมในการประมาณค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน												■	■	■	■			
8. ปรับปรุงและพัฒนาอัลกอริทึมในการประมาณค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน															■	■	■	■
9. จัดทำวิทยานิพนธ์																■	■	■

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

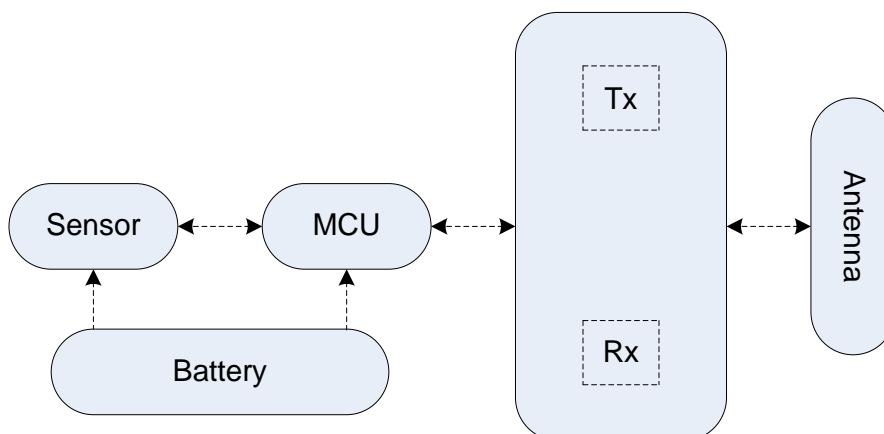
2.1. เซนเซอร์โหนด

เซนเซอร์โหนดเป็นส่วนหนึ่งของระบบสมองกลฝังตัว (Embedded System) ที่สามารถแบ่งการทำงานออกเป็นระดับชั้นได้ ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2-1 โดยประกอบด้วยส่วนของฮาร์ดแวร์ (Hardware) ถัดขึ้นมาเป็นชั้นของระบบปฏิบัติการ (Operating System) ซึ่งมีส่วนของการจัดการกับฮาร์ดแวร์และส่วนของการจัดการ (Scheduling) กับงาน (Task) โดยจะมีซอฟต์แวร์ระดับเล็กทำงานอยู่บนระบบปฏิบัติการอีกชั้นหนึ่ง เช่น ADC, Chipcon, USB, UART, PMC, และ Timer ทั้งนี้การสร้างเซนเซอร์โหนดให้เป็นระบบสมองกลฝังตัวแบบนี้ ทำให้สามารถเพิ่มส่วนของการติดต่อสื่อสารที่เป็นมาตรฐานได้ง่ายยิ่งขึ้น โดยที่ผู้ใช้และผู้พัฒนาระดับบนสามารถเชื่อมต่อกับระบบได้สะดวกมากยิ่งขึ้น [1]



ภาพประกอบ 2-1 ระดับชั้นของระบบในเซนเซอร์โหนด

ส่วนฮาร์ดแวร์ของเซนเซอร์โหนด แสดงในภาพประกอบที่ 2-2 ประกอบด้วย ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller, MCU) ทำหน้าที่ประมวลผล (Processing Unit) ส่วนสื่อสารผ่านทางคลื่นวิทยุ (Radio Frequency) ทำหน้าที่ในการรับและส่งข้อมูล (Transmitter and Receiver) ส่วนตรวจข้อมูล (Sensor) ทำหน้าที่เป็นเซนเซอร์ในการตรวจวัดข้อมูลต่าง ๆ และแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า (Battery) ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายพลังงาน โดยจะใช้แบตเตอรี่เป็นหลัก



ภาพประกอบ 2-2 สถาปัตยกรรมของเซนเซอร์โหนด

ส่วนไมโครคอนโทรลเลอร์จะเน้นการออกแบบเพื่อให้ได้ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ประหยัดพลังงาน โดยเน้นให้มีโหมดการทำงานได้หลายโหมด เนื่องจากเวลาส่วนใหญ่ของการทำงานในระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายนี้เป็นช่วง Idle ดังนั้นในการออกแบบให้เซนเซอร์โหนดมีโหมดการทำงานที่เหมาะสมจะทำให้ประหยัดพลังงานได้มากขึ้น แต่เทคโนโลยีที่จะต้องเข้ามาเกี่ยวข้องคือ การออกแบบให้ไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถตื่นขึ้นมาทำงานได้ตามปกติ (Wake up time) ให้เร็วที่สุด [1]

เทคโนโลยีที่สำคัญในการออกแบบเซนเซอร์โหนดคือ การระมัดระวังการใช้พลังงาน (Power Aware) เทคโนโลยีและเทคนิคต่าง ๆ ที่ได้นำเสนอมาเพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์นี้ ได้แก่ การทำให้มีโหมดการทำงานที่หลากหลายในช่วงการทำงานปกติ (Active Mode) จะเป็นช่วงระยะเวลาหนึ่งเท่านั้น ในขณะที่ช่วงเวลาอื่น ๆ ให้ทำงานในโหมด Sleep วิธีการออกแบบเพื่อลดการใช้พลังงานสามารถใช้เทคโนโลยีของการทำ Dynamic Voltage Scaling (DVS) เพื่อปรับแต่งแรงดันให้สอดคล้องกับความต้องการของระบบ ทั้งนี้มีส่วนเชื่อมโยงเข้ากับเทคนิคของการสร้าง DC-DC Regulator ส่วนในระดับซอฟต์แวร์นั้นสามารถช่วยประหยัดพลังงานได้โดยออกแบบให้ใช้งานฮาร์ดแวร์อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด นอกจากนี้ยังสามารถออกแบบระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายให้มีการใช้พลังงานต่ำที่สุด เป็นต้น [1]

2.2. แหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าเซนเซอร์โหนด

โดยทั่วไปแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าของเซนเซอร์โหนดสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทคือ แหล่งจ่ายที่มีพลังงานไฟฟ้าจำกัด (Fixed Energy Source) ได้แก่ แบตเตอรี่ทั้งชนิดที่ชาร์จไม่ได้ (Primary Battery) และชนิดที่ชาร์จได้ (Secondary Battery) อัลตราคาปาซิเตอร์

(Ultracapacitor) เซลล์เชื้อเพลิงขนาดเล็ก (Micro Fuel Cell) เครื่องจักรความร้อนขนาดเล็ก (Micro Heat Engine) เป็นต้น แหล่งจ่ายพลังงานเหล่านี้มีพลังงานในตัวจำกัด เพราะมีปัจจัยตั้งต้นของพลังงานที่จำกัดดังนี้ แบตเตอรี่มีสารตั้งต้นของปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีในปริมาณที่จำกัด อัลตราคาปาซิเตอร์มีปริมาณประจุไฟฟ้าจำกัด ส่วนเซลล์เชื้อเพลิงและเครื่องจักรความร้อนขนาดเล็กมีปริมาณสารตั้งต้นที่เป็นเชื้อเพลิงในปริมาณจำกัดเช่นกัน ดังนั้นอายุการใช้งานของอุปกรณ์เหล่านี้จึงแปรผกผันกับกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยที่จ่ายออกไปให้แก่โหลด หากต้องจ่ายกำลังไฟฟ้าออกไปมาก พลังงานสะสมในตัวจะหมดไปอย่างรวดเร็ว ทำให้อายุการทำงานของเซนเซอร์โหนดจึงกำหนดโดยอายุการใช้งานของพลังงานดังกล่าว ส่วนแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าของเซนเซอร์โหนดอีกประเภทหนึ่งคือแหล่งจ่ายที่มีกำลังไฟฟ้าจำกัด (Fixed Power Source) ได้แก่ เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Cell) เปียโซอิเล็กทริกเจนเนอเรเตอร์ (Piezoelectric Generator) เป็นต้น เซลล์แสงอาทิตย์และเปียโซอิเล็กทริกเจนเนอเรเตอร์เป็นแหล่งจ่ายที่ไม่มีพลังงานไฟฟ้าหรือสารเชื้อเพลิงเก็บไว้ในตัวเอง แต่จะทำหน้าที่เป็นตัวแปลงพลังงานในรูปแบบอื่นให้เป็นพลังงานไฟฟ้า ดังนั้นเมื่อตัวแปลงพลังงานได้รับพลังงาน ตัวแปลงพลังงานก็สามารถให้พลังงานไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่อง จึงทำให้แหล่งจ่ายพลังงานประเภทนี้ทำงานได้โดยไม่มีข้อจำกัดอายุการใช้งาน

2.2.1 แหล่งจ่ายที่มีพลังงานไฟฟ้าจำกัด

การให้พลังงานไฟฟ้าแก่เซนเซอร์โหนดโดยติดตั้งอุปกรณ์เก็บพลังงานไฟฟ้าไว้ที่ตัวของโหนด เป็นวิธีการให้พลังงานไฟฟ้าแก่เซนเซอร์โหนดที่นิยมใช้กันมากที่สุด เนื่องจากมีความสะดวกและไม่ยุ่งยากซับซ้อน แหล่งสะสมพลังงานที่เหมาะสมกับการใช้งานในระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายนั้นต้องมีขนาดเล็กและสามารถให้พลังงานไฟฟ้าได้ยาวนาน แหล่งสะสมพลังงานที่นิยมใช้ในปัจจุบันคือ แบตเตอรี่

แบตเตอรี่เป็นแหล่งเก็บพลังงานที่มีใช้กันมานาน โดยพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ได้จากปฏิกิริยาทางเคมีในระบบปิด ความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้า (Power Density) ที่แบตเตอรี่สามารถจ่ายได้ ถูกกำหนดด้วยพื้นที่ของอิเล็กโทรด ในขณะที่ความจุของพลังงานไฟฟ้า (Energy Capacity) ถูกกำหนดด้วยปริมาตรของอิเล็กโทรด ส่วนปฏิกิริยาทางเคมีจะส่งผลต่อแรงดัน จีตจำกัดของความหนาแน่นกระแส (Current Density Limitation) และอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ (Life Time) แบตเตอรี่สามารถแบ่งตามลักษณะการใช้งานได้เป็นสองประเภทคือ

➤ **แบตเตอรี่แบบปฐมภูมิ (Primary Battery)** เป็นแบตเตอรี่ที่ไม่สามารถประจุกระแสไฟฟ้าซ้ำได้ เมื่อใช้งานหมดแล้วต้องทิ้ง เช่น Zinc-Carbon, Zinc-Mercury Oxide, Alkaline, Manganese Dioxide, Zinc Chloride, Zinc-Air, Magnesium-Organic Electrolyte, Lithium-Mercury, Lithium-Iodine และ Lithium-Sulphur Dioxide เป็นต้น

➤ แบตเตอรี่แบบทุติยภูมิ (Secondary Battery) เป็นแบตเตอรี่ที่สามารถประจุกระแสไฟฟ้าซ้ำได้ เช่น Lead-Acid, Nickel-Cadmium, Silver-Zinc, Silver-Cadmium, Nickel-Zinc, Cadmium-Air, Zinc-Air, Lithium-Ion และ Lithium-Ion-Polymer เป็นต้น

แบตเตอรี่ถือว่าเป็นแหล่งพลังงานหลักของเซนเซอร์โหนด ในเซนเซอร์โหนดหลายชนิดใช้แบตเตอรี่ขนาด AA เป็นแหล่งพลังงาน ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2-3 โดยอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งานและสิ่งแวดล้อม



ภาพประกอบ 2-3 แบตเตอรี่ขนาด AA [11]

แต่แบตเตอรี่ขนาด AA เป็นแบตเตอรี่ที่ไม่สามารถประจุกระแสไฟฟ้าซ้ำได้ เมื่อใช้งานหมดแล้วต้องทิ้ง ในปัจจุบันเซนเซอร์โหนดสำหรับงานบางประเภทจะมีขนาดเล็กลง ดังนั้นแบตเตอรี่จึงต้องพัฒนาให้มีขนาดเล็กลงด้วยและต้องมีความจุของพลังงานสูง จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่า เซนเซอร์โหนดนิยมใช้แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนเป็นแหล่งพลังงานมากขึ้น ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2-4



ภาพประกอบ 2-4 แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน [12]

เนื่องจากแบตเตอรี่ชนิดลิเทียม ไอออนเป็นแหล่งจ่ายพลังงานแบบทุติยภูมิ ในการใช้งานจึงต้องมีแหล่งพลังงานเพื่อประจุพลังงานให้แก่แบตเตอรี่ชนิดนี้ ในทางปฏิบัติอาจใช้อุปกรณ์แปลงพลังงานจากสิ่งแวดล้อมเป็นพลังงานไฟฟ้า เช่น เซลล์แสงอาทิตย์ เป็นแหล่งพลังงานเพื่อประจุพลังงานให้กับแบตเตอรี่ทุติยภูมิ ดังนั้นจึงต้องมีวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังคั่นระหว่างแหล่งพลังงานกับแบตเตอรี่ทุติยภูมิทำหน้าที่ควบคุมรูปแบบการประจุพลังงาน การเพิ่มวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังไว้ในภาคแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของเซนเซอร์โหนด ทำให้การใช้กำลังไฟฟ้าของเซนเซอร์โหนดสูงขึ้น

2.2.2 แหล่งจ่ายที่มีกำลังไฟฟ้าจำกัด

แหล่งกำเนิดพลังงานในรูปแบบต่าง ๆ ในสภาพแวดล้อมที่สามารถเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ เพื่อใช้ในการทำงานของเซนเซอร์โหนด การผลิตพลังงานไฟฟ้าด้วยวิธีนี้เป็นการเก็บเกี่ยวพลังงานส่วนเกินที่มีอยู่ในธรรมชาติเรียกว่า “Energy Harvesting” หรือ “Power Scavenging” ซึ่งเป็นพลังงานทางเลือกหนึ่งที่สามารถยืดอายุการใช้งานของเซนเซอร์โหนดให้สามารถทำงานได้ยาวนานขึ้น โดยทั่วไปแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าหลักของเซนเซอร์โหนดได้จากแบตเตอรี่ ซึ่งสามารถจ่ายพลังงานไฟฟ้าได้โดยไม่มีข้อจำกัดในเรื่องของเวลาและปริมาณที่พลังงานไฟฟ้าในแบตเตอรี่ยังมีอยู่พอ จึงทำให้การใช้งานเซนเซอร์โหนดมีความสะดวก แต่การผลิตไฟฟ้าด้วยวิธี Energy Harvesting มีความแตกต่างจากการใช้งานแบตเตอรี่คือ พลังงานในรูปแบบต่าง ๆ ที่มีอยู่ในสภาพแวดล้อม มีข้อจำกัดในเรื่องของอัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงาน จะส่งผลกระทบต่อตรงต่อกำลังไฟฟ้าที่เซนเซอร์โหนดสามารถดึงไปใช้งานได้ในแต่ละช่วงเวลา นอกจากนี้มีความเป็นไปได้ที่เซนเซอร์โหนดในบางตำแหน่งต้องใช้เทคนิคการแปลงพลังงานที่แตกต่างจากเซนเซอร์โหนดในตำแหน่งอื่น ๆ และในบางเวลาเซนเซอร์โหนดอาจไม่สามารถแปลงพลังงานไฟฟ้าได้เลย การผลิตพลังงานไฟฟ้าด้วยวิธีนี้จึงขึ้นกับตำแหน่งที่อยู่ของเซนเซอร์โหนดและรูปแบบของพลังงานในตำแหน่งนั้น ดังนั้นไม่มีวิธิตีของการแปลงพลังงานไฟฟ้าที่สามารถใช้ได้ทุกสถานะ นอกจากข้อจำกัดต่าง ๆ เหล่านี้จะส่งผลกระทบต่อเทคนิคการจัดการพลังงานของเซนเซอร์โหนดและระบบเครือข่ายไร้สายอีกด้วย

เซนเซอร์โหนดที่ติดตั้งในสภาพแวดล้อมทั่ว ๆ ไปจะมีการเปลี่ยนรูปพลังงานในรูปแบบต่าง ๆ โดยทั่วไปสามารถแบ่งออกได้เป็นสี่ประเภทคือ

- พลังงานแสง ได้แก่ พลังงานจากแสงอาทิตย์ พลังงานจากแสงของหลอดไฟ
- พลังงานจลน์ ได้แก่ พลังงานจากการสั่นสะเทือน พลังงานจากลมหรือการไหลของอากาศ พลังงานจากการเปลี่ยนแปลงความดัน และพลังงานจากการเคลื่อนไหวของร่างกาย
- พลังงานความร้อน ได้แก่ พลังงานจากความแตกต่างของอุณหภูมิ

2.3. แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน

ลิเทียมเป็นวัสดุองค์ประกอบการผลิตแบตเตอรี่ที่ได้รับความนิยมในปัจจุบัน [13], [14] และ [15] เทคโนโลยีการผลิตแบตเตอรี่ด้วยลิเทียมมีจุดเริ่มต้นจากวิจัยในช่วงปี ค.ศ. 1970 ขณะนั้นเป็นแบตเตอรี่ชนิดใช้ครั้งเดียวแล้วทิ้ง ลิเทียมมีคุณสมบัติที่เด่นคือ เป็นโลหะที่เบา ให้แรงดันไฟฟ้าสูง และยังมีความหนาแน่นของพลังงานสูงและกำลังไฟฟ้าสูงในน้ำหนักที่เท่ากัน ปัญหาของโลหะลิเทียม (Lithium Metal) ในระยะแรกคือ เรื่องของความปลอดภัยกล่าวคือ ในระหว่างชาร์จไฟมีแนวโน้มที่จะเกิดความไม่เสถียรทำให้ระเบิดได้ง่าย งานวิจัยในระยะต่อมาจึงได้มีการทดลองเปลี่ยนจากการใช้ลิเทียมในรูปของโลหะมาเป็นรูปของไอออน ซึ่งมีความปลอดภัยมากกว่ามาก ถึงแม้จะให้พลังงานที่น้อยกว่า แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนแบบชาร์จกระแสไฟฟ้าซ้ำได้ ออกสู่ตลาดในเชิงพาณิชย์เป็นครั้งแรกในปี 1991 โดยบริษัท Sony Corporation จากนั้นก็ได้มีการผลิตแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนออกมามากมาย เพื่อตอบสนองอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์หลากหลายประเภท และเป็นกลุ่มแบตเตอรี่ที่มีความนิยมในการใช้งานสูงที่สุด โดยข้อดีและข้อเสียของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนสามารถสรุปได้ ดังแสดงในตารางที่ 2-1

ตาราง 2-1 ข้อดีและข้อเสียของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน

ข้อดี	ข้อเสีย
<ul style="list-style-type: none"> ❖ ความหนาแน่นของพลังงานและกำลังไฟฟ้าสูง ❖ มีน้ำหนักเบา ❖ อายุการใช้งานและวงจรการใช้งานนานกว่าชนิดอื่น ❖ มีอัตราการคายประจุตัวเองต่ำ (Low Self-Discharge) เมื่อเปรียบเทียบกับแบตเตอรี่ชนิดอื่น ๆ เช่น ต่ำกว่า NiCd และ NiMH ถึงกว่าครึ่ง ❖ การบำรุงรักษาง่าย ไม่ต้องกระตุ้นก่อนการใช้งาน 	<ul style="list-style-type: none"> ❖ ต้องใช้วงจรป้องกันแรงดันและกระแสให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัย ❖ มีการเสื่อมอายุตามเวลาแม้ว่าจะไม่มีการใช้งาน แบตเตอรี่ลิเทียมมีอายุการใช้งานประมาณ 2-3 ปี (อายุอาจนานกว่านี้หากชาร์จไว้บางส่วน และเก็บในที่เย็น) ❖ อัตราการจ่ายกระแส (Load Current) ไม่สูงมาก ไม่เหมาะกับงานที่ใช้โหลดหนัก ๆ ❖ ราคาสูงเมื่อเทียบกับ NiCd และ NiMH

ในกลุ่มของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนสามารถแบ่งประเภทของแบตเตอรี่ได้หลายกลุ่ม ขึ้นอยู่กับลักษณะขององค์ประกอบทางเคมีที่นำไปใช้ในการทำให้เกิดพลังงานไฟฟ้า ทำให้เกิดประสิทธิภาพ รูปร่าง น้ำหนัก ฯลฯ ตามต้องการ เช่น ลิเทียมไอออนโพลิเมอร์ (Li-ion Polymer) ลิเทียมไอออนฟอสเฟต (Lithium iron Phosphate -LiFePO₄) เป็นต้น

ในปัจจุบันและอนาคตแนวโน้มเทคโนโลยีของแบตเตอรี่จะเน้นการคิดค้นแบตเตอรี่ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น เนื่องจากปัจจัยที่มีผลต่อการพัฒนาขึ้นอยู่กับเทคโนโลยีที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม เช่น ขนาด รูปร่าง น้ำหนัก เป็นต้น ซึ่งแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนมีความสำคัญต่อการผลิตอุปกรณ์ไฟฟ้า สินค้าอิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถเคลื่อนย้ายได้มากขึ้น โดยมีการพัฒนาส่วนประกอบต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องและเปลี่ยนแปลงตามความเหมาะสม อีกทั้งยังมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นตามลำดับ แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนจะมีบทบาทสำคัญในการผลิตสินค้าที่เป็นกลุ่มที่ใช้เทคโนโลยีระดับสูง ซึ่งหมายถึงราคาสูงไปด้วย ในขณะที่กลุ่มเทคโนโลยีระดับล่างจะยังคงใช้แบตเตอรี่ชนิดอื่น ๆ อย่างไรก็ตามนอกจากการพัฒนาในเรื่องของเทคโนโลยีการผลิตแบตเตอรี่แล้ว ยังมีการให้ความสำคัญขององค์ประกอบอื่น ๆ ที่จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการใช้งานให้มากขึ้นเช่นกัน

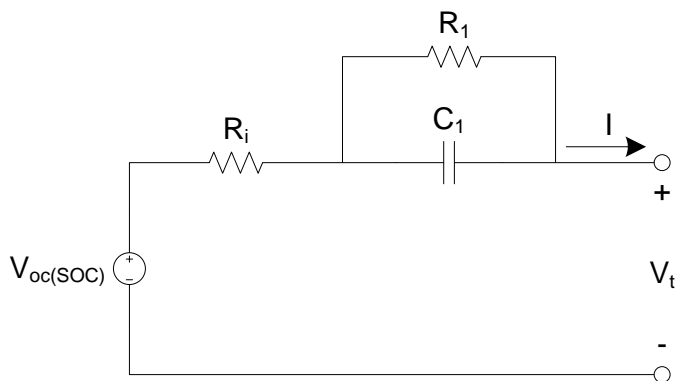
แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนมีการป้องกันที่สูงเพื่อให้เกิดความปลอดภัยในการใช้งาน ซึ่งจะมีวงจรป้องกันประกอบอยู่ภายในแบตเตอรี่ ซึ่งมีวงจรตรวจจับแรงดันและกระแสโดยใช้ Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor (MOSFET) กำลังสูงแต่มีขนาดเล็กทำหน้าที่เป็นสวิตช์ ทำหน้าที่ตัดวงจรออกเมื่อแรงดันของแบตเตอรี่สูงเกินประมาณ 4.3 V และทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้แรงดันของแบตเตอรี่ต่ำเกินประมาณ 2.5 V วงจรควบคุมจะตัดวงจรออกทำให้แบตเตอรี่ไม่สามารถจ่ายกระแสได้อีก การเก็บแบตเตอรี่ไว้เป็นเวลานานจะทำให้เซลล์ลิเทียมไอออนเสียหายถาวร

2.4. แบบจำลองวงจรสมมูลของแบตเตอรี่

จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่า แบบจำลองวงจรสมมูลของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน (Equivalent Circuit Model) สามารถแบ่งได้ 2 รูปแบบคือ

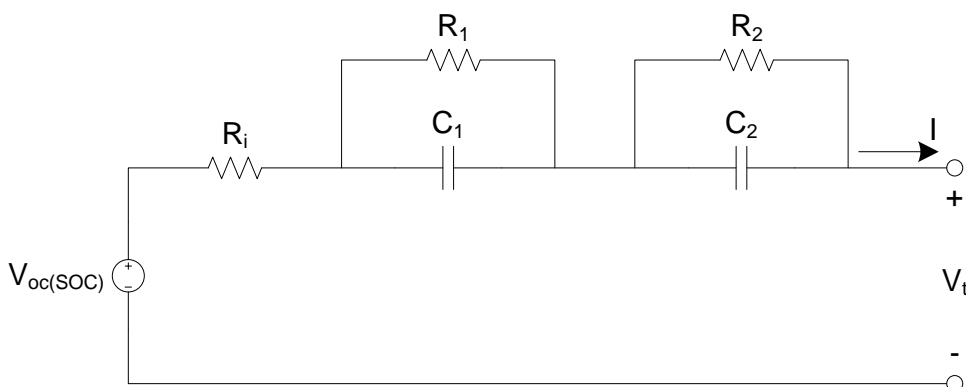
2.4.1 แบบจำลองเทวินิน (Thevenin Model) แบบจำลองวงจรสมมูลเทวินินเป็นแบบจำลองพื้นฐานที่นิยมใช้กันทั่วไป [5], [6], [7], [8], [9], [17], [19], [20], [23] และ [25] ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2-5 ประกอบด้วยแหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรง $V_{oc(SOC)}$ เป็นแรงดันขณะเปิดวงจรที่มีความสัมพันธ์กับค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ที่เปลี่ยนไป ตัวต้านทาน R_t เป็นตัวต้านทานภายในขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการคิซซาร์จ ตัวต้านทาน R_p และตัวเก็บประจุ C_p ที่ต่อขนานกันใช้ในการ

อธิบายผลตอบสนองชั่วคราวของผลตอบสนองแรงดันในระหว่างการชาร์จและดิสชาร์จ แรงดันชั่วของแบตเตอรี่ V_t และกระแสของแบตเตอรี่ที่จ่ายออกไป I



ภาพประกอบ 2-5 แบบจำลองเทวินินของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน

2.4.2 การปรับปรุงแบบจำลองเทวินิน (Improved Thevenin Model) [16], [18], [21], [22] และ [24] เป็นการนำเอาแบบจำลองเทวินินมาปรับปรุงโดยเพิ่มตัวต้านทาน R_2 และตัวเก็บประจุ C_2 ที่ต่อขนานกันลงไปในรูปแบบจำลองเทวินิน ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2-6 โดยแบบจำลองนี้เหมาะกับแบตเตอรี่ที่มีการเปลี่ยนแปลงของกระแสโหลดแบบเป็นระดับ ตัวต้านทาน R_2 และตัวเก็บประจุ C_2 ที่ต่อขนานกันใช้ในการอธิบายผลตอบสนองแรงดันที่มีค่าคงที่เวลาสั้น สำหรับตัวต้านทาน R_1 และตัวเก็บประจุ C_1 ที่ต่อขนานกันใช้ในการอธิบายผลตอบสนองแรงดันที่มีค่าคงที่เวลายาว ข้อดีของการปรับปรุงแบบจำลองเทวินินคือ เพิ่มความแม่นยำมากยิ่งขึ้น แต่ในทางเดียวกันข้อเสียของการปรับปรุงแบบจำลองเทวินินคือ เพิ่มความซับซ้อนในการคำนวณ (อนุพันธ์อันดับสอง) มากขึ้นด้วยเช่นกัน



ภาพประกอบ 2-6 การปรับปรุงแบบจำลองเทวินินของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน

2.5. สถานะประจุแบตเตอรี่

2.5.1 การประมาณปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่เหลืออยู่ในแบตเตอรี่

ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่เหลืออยู่ในแบตเตอรี่สามารถประมาณได้จากการหาสถานะประจุ (State-of-Charge, SOC) [4] ของแบตเตอรี่ โดยค่าสถานะประจุคือ จำนวนประจุหรือพลังงานที่เหลืออยู่ภายในแบตเตอรี่ (Q) ซึ่งแสดงในรูปของเปอร์เซ็นต์ต่อพิถักความจุของแบตเตอรี่ (C_R) ดังสมการที่ (2.1)

$$SOC = \frac{Q}{C_R} \times 100\% \quad (2.1)$$

เมื่อแบตเตอรี่เต็มค่าสถานะประจุจะมีค่าเท่ากับ 100% และเมื่อแบตเตอรี่หมดสถานะประจุจะมีค่าเท่ากับ 0% ดังนั้นค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่จึงมีความสำคัญมาก ในระหว่างการชาร์จและดิสชาร์จของแบตเตอรี่ ช่วงเวลาระหว่าง t_α และ t_β ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2-7 ทำให้พลังงานที่เหลืออยู่ภายในแบตเตอรี่เปลี่ยนแปลงจาก Q_α เป็น Q_β ดังสมการที่ (2.2)

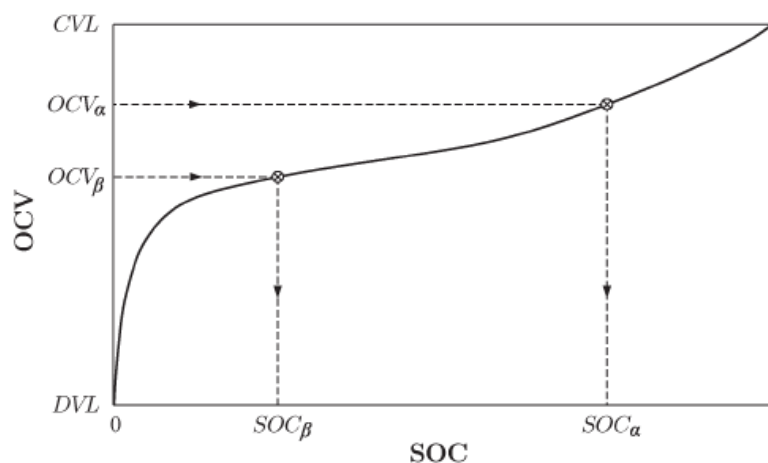
$$Q_\beta = Q_\alpha - \Delta Q_{\alpha,\beta} = Q_\alpha - \int_{t_\alpha}^{t_\beta} I_{batt}(t) dt \quad (2.2)$$

โดยที่กระแสของแบตเตอรี่ I_{batt} มีค่าเป็นบวกระหว่างการดิสชาร์จแบตเตอรี่ ในทางเดียวกันถ้าพลังงานที่เหลืออยู่ในแบตเตอรี่เปลี่ยนแปลงจาก Q_α เป็น Q_β แล้วทำให้ค่าสถานะประจุเปลี่ยนแปลงจาก $SOC_\alpha = SOC(t_\alpha)$ เป็น $SOC_\beta = SOC(t_\beta)$ ด้วย เมื่อนำสมการที่ (2.2) แทนลงในสมการที่ (2.1) ที่เวลา t_α และ t_β ดังนั้นความจุทั้งหมดของแบตเตอรี่สามารถหาได้ดังนี้

$$\begin{aligned} C = C_{\alpha,\beta} &= \frac{Q_\alpha - Q_\beta}{SOC_\alpha - SOC_\beta} \\ &= \frac{\int_{t_\alpha}^{t_\beta} I_{batt}(t) dt}{SOC(t_\alpha) - SOC(t_\beta)} \end{aligned} \quad (2.3)$$

จากสมการที่ (2.3) การประมาณค่าความจุทั้งหมดของแบตเตอรี่จากการดิสชาร์จแบตเตอรี่ไม่จำเป็นต้องดิสชาร์จแบตเตอรี่ให้หมด โดยค่าสถานะประจุทั้งสองค่าคือ SOC_α และ SOC_β และ

กระแสระหว่างการดิซชาร์จของสถานะประจุที่เวลา t_α และ t_β เพียงพอที่สามารถนำมาใช้ประมาณค่าความจุของแบตเตอรี่ได้



ภาพประกอบ 2-7 ความสัมพันธ์ระหว่างสถานะประจุกับแรงดันขณะเปิดวงจร [4]

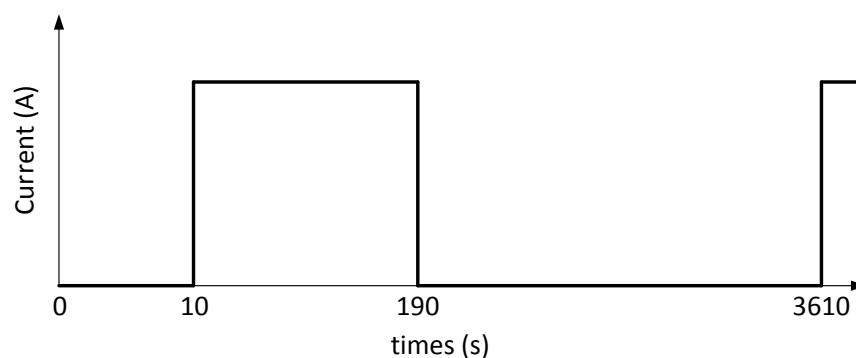
แรงดันขณะเปิดวงจร (OCV) มีความสัมพันธ์เป็นฟังก์ชันกับค่าสถานะประจุ และเมื่อค่าสถานะประจุเปลี่ยนแปลงจาก SOC_α เป็น SOC_β ทำให้แรงดันขณะเปิดวงจรเปลี่ยนแปลงจาก $OCV_\alpha = OCV(t_\alpha)$ เป็น $OCV_\beta = OCV(t_\beta)$ ด้วย แรงดันขณะเปิดวงจรมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นกับสถานะประจุ ดังนั้นสถานะประจุของแบตเตอรี่สามารถประมาณได้จากการใช้ข้อมูลในตาราง ซึ่งได้จากการตรวจวัดค่าแรงดันขณะเปิดวงจร ความสัมพันธ์เชิงเส้นของการตรวจวัดค่าสถานะประจุกับแรงดันขณะเปิดวงจรสามารถเขียนกราฟเพื่อหาค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ได้ ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2-7 เพราะฉะนั้นจากสมการที่ (2.3) สามารถเขียนได้เป็น

$$C_{\alpha,\beta} = \frac{\int_{t_\alpha}^{t_\beta} I_{batt}(t) dt}{SOC(OCV(t_\alpha)) - SOC(OCV(t_\beta))} \quad (2.4)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสถานะประจุกับแรงดันขณะเปิดวงจรสามารถหาได้จาก การชาร์จหรือดิซชาร์จแบตเตอรี่หรือเรียกว่า การทดสอบด้วยกระแส ซึ่งจะอธิบายรายละเอียดในหัวข้อถัดไป

2.6. การทดสอบด้วยกระแส

การทดสอบด้วยกระแส (Current Tests) [6] สามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด ตามลักษณะของกระแสที่ใช้ในการทดสอบคือ การทดสอบด้วยกระแสชนิด Hybrid Pulse Power Characterization (HPPC) และการทดสอบด้วยกระแสคิซาร์จแบบพัลส์ (Pulse Current Discharge) การทดสอบด้วยกระแสสามารถนำมาใช้ในการหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ ในการทดสอบด้วยกระแสชนิด HPPC แบตเตอรี่จะอยู่ในสภาวะชาร์จและคิซาร์จ ในทางตรงกันข้ามการทดสอบด้วยกระแสคิซาร์จแบบพัลส์หรือเรียกว่า “พัลส์กระแส” แบตเตอรี่จะอยู่ในสภาวะคิซาร์จเท่านั้น โดยการคิซาร์จเป็นพัลส์ของกระแสคงที่ ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2-8



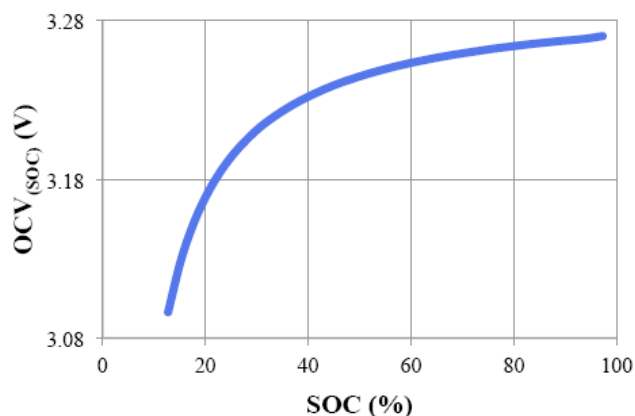
ภาพประกอบ 2-8 กระแสคิซาร์จแบบพัลส์

การทดสอบด้วยกระแสทั้ง 2 ชนิด แบตเตอรี่ใช้เวลาในการพักระหว่างการชาร์จและคิซาร์จประมาณ 1 ชั่วโมงก่อนที่จะทำการชาร์จและคิซาร์จรอบต่อไป เพื่อให้ระดับแรงดันของแบตเตอรี่เข้าสู่สภาวะอยู่ตัว เมื่อแรงดันเข้าสู่สภาวะอยู่ตัว (แรงดันขณะเปิดวงจร) สามารถนำไปเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสถานะประจุกับแรงดันขณะเปิดวงจรของแบตเตอรี่ได้ ในทางเดียวกันการทดสอบด้วยกระแสสามารถนำมาใช้หาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ได้อีกด้วย

2.6.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสถานะประจุกับแรงดันขณะเปิดวงจรของแบตเตอรี่

การหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสถานะประจุกับแรงดันขณะเปิดวงจรของแบตเตอรี่ ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2-9 ซึ่งสามารถหาได้จากการทดสอบด้วยกระแสคงที่ด้วยการคิซาร์จแบตเตอรี่ด้วยกระแสคงที่ ทำให้สถานะประจุของแบตเตอรี่ลดลงด้วยเช่นกัน ตัวอย่างเช่น ถ้าทำการคิซาร์จแบตเตอรี่ด้วยเวลา 180 วินาทีจำนวนหนึ่งครั้ง ทำให้ค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ลดลง 5% หลังจากการคิซาร์จแบตเตอรี่แล้ว เพื่อให้แรงดันแบตเตอรี่เข้าสู่สภาวะอยู่ตัว

ต้องใช้เวลาประมาณ 3420 วินาทีก่อนที่จะทำการดิสชาร์จแบตเตอรี่รอบต่อไป แรงดันในสภาวะอยู่ตัวนี้สามารถนำไปใช้เป็นค่าแรงดันขณะเปิดวงจรได้



ภาพประกอบ 2-9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสถานะประจุกับแรงดันขณะเปิดวงจร [6]

ค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่กับเวลาที่ใช้ในการดิสชาร์จแบตเตอรี่ ดังแสดงในตารางที่ 2-2 วิธีการหาความสัมพันธ์ดังกล่าวหาได้จากตัวอย่าง เช่น แบตเตอรี่ขนาด 1020 mAh แสดงว่าถ้าทำการดิสชาร์จแบตเตอรี่ด้วยกระแสคงที่ขนาด 1.02 A ในเวลา 60 นาที แบตเตอรี่ก็จะหมด ดังนั้นถ้าดิสชาร์จแบตเตอรี่ครั้งละ 3 นาที ก็จะทำให้สถานะประจุลดลงครั้งละ 5% ตามลำดับ

ตาราง 2-2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสถานะประจุกับเวลาการดิสชาร์จของแบตเตอรี่

เวลา (นาที)	สถานะประจุ (%)	เวลา (นาที)	สถานะประจุ (%)
3	95	33	45
6	90	36	40
9	85	39	35
12	80	42	30
15	75	45	25
18	70	48	20
21	65	51	15
24	60	54	10
27	55	57	5
30	50	60	0

การดิสชาร์จแบตเตอรี่ด้วยกระแสคงที่ควรจะดิสชาร์จแบตเตอรี่ในช่วงของค่าสถานะประจุจาก 100% ให้ลดลงเหลือ 10% เท่านั้น ไม่ควรที่จะดิสชาร์จแบตเตอรี่จนหมดหรือค่าสถานะประจุเท่ากับ 0% เนื่องจากการดิสชาร์จแบตเตอรี่จนหมด ทำให้แบตเตอรี่เสื่อมสภาพเร็วมากยิ่งขึ้น

2.6.2 การหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้แบบจำลองวงจรสมมูลของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนด้วยแบบจำลองวงจรสมมูลเทวินิน ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2-5 ซึ่งเป็นแบบจำลองวงจรสมมูลทางไฟฟ้าที่นิยมใช้กันทั่วไปประกอบด้วย แรงดันขณะเปิดวงจร $V_{oc(SOC)}$ ตัวต้านทานอนุกรม R_i ทำหน้าเป็นตัวต้านทานภายใน ตัวต้านทาน R_i และตัวเก็บประจุ C_i ต่อขนานกันทำหน้าที่เป็นผลตอบสนองแรงดันชั่วของแบตเตอรี่ V_i

ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองวงจรสมมูลเทวินินสามารถหาได้จากผลตอบสนองแรงดันของแบตเตอรี่ [5], [6] และ [16] ซึ่งได้จากการทดสอบด้วยกระแสดิสชาร์จคงที่แบบพัลส์ ดังแสดงในภาพประกอบที่ 1-4 จากผลตอบสนองแรงดันของแบตเตอรี่เมื่อดิสชาร์จด้วยกระแสคงที่สามารถนำมาหาค่าพารามิเตอร์ได้ดังนี้

- *ตัวต้านทานภายใน R_i* สามารถหาได้จากแรงดันที่ลดลงอย่างทันทีทันใด (ΔV) เมื่อเริ่มต้นการดิสชาร์จด้วยกระแสคงที่ นอกจากนี้แล้วมีแรงดันที่เพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใดเมื่อสิ้นสุดการดิสชาร์จด้วยกระแสคงที่ จากภาพประกอบที่ 1-4 สามารถคำนวณหาค่าตัวต้านทานภายใน R_i ได้ดังสมการที่ (2.5)

$$R_i = \frac{\Delta V}{I} \quad (2.5)$$

การหาค่าตัวต้านทาน R_i และตัวเก็บประจุ C_i ที่ต่อขนานกันสามารถหาได้จากผลตอบสนองแรงดันของแบตเตอรี่ โดยที่ตัวเก็บประจุ C_i หาได้จากช่วงของผลตอบสนองชั่วคราวหลังจากนั้นเมื่อเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวแล้วสามารถใช้ในการหาค่าตัวต้านทาน R_i

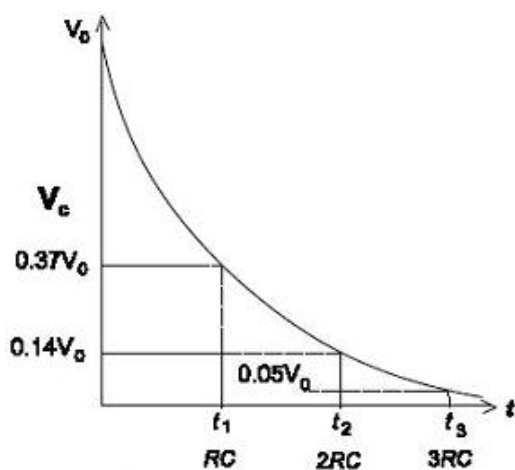
- *ค่าตัวเก็บประจุ C_i* สามารถหาได้จากการดิสชาร์จของตัวเก็บประจุ [23] เมื่อตัวเก็บประจุได้รับการชาร์จจนเต็มอย่างสมบูรณ์ โดยตัวเก็บประจุจะดิสชาร์จจนถึงช่วงเวลา t_i แรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุจะลดลง 37% ของแรงดันเอาต์พุต V_o ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2-10 ดังนั้นการหาค่าตัวเก็บประจุ C_i สามารถคำนวณได้จากค่าเวลาที่ช่วงเวลา $t_i = RC$ ได้ดังสมการที่ (2.6) และ (2.7) ตามลำดับ ค่าคงที่เวลาคือจุดแบ่งระหว่างช่วงของผลตอบสนองชั่วคราวกับช่วงที่เข้าสู่สภาวะอยู่ตัว

$$\tau = R_1 C_1 = 0.37 \times V_o \quad (2.6)$$

$$C_1 = \frac{\tau}{R_1} \quad (2.7)$$

- ตัวต้านทาน R_1 สามารถหาได้จากแรงดันที่ลดลงของผลตอบสนองแรงดันในช่วงที่สถานะอยู่ตัว โดยนำแรงดันที่ลดลงหารด้วยกระแสที่คงที่ ดังสมการที่ (2.8)

$$R_1 = \frac{\Delta V_s}{I} \quad (2.8)$$



n	$t = nRC$	$V_c = V_0 e^{-n}$
1	RC	$0.368V_0$
2	$2RC$	$0.135V_0$
3	$3RC$	$0.050V_0$
4	$4RC$	$0.018V_0$

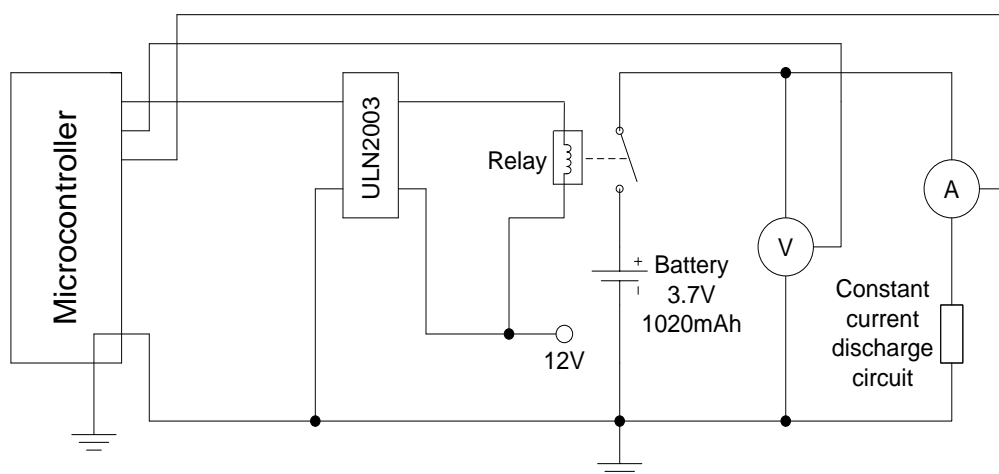
ภาพประกอบ 2-10 การดิซชาร์จของตัวเก็บประจุ [26]

บทที่ 3

การออกแบบวงจร

3.1. การออกแบบวงจรตรวจวัดค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่

การวัดค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนด้วยการทดสอบด้วยกระแส นั้น จะต้องทำการออกแบบวงจรเพื่อให้แบตเตอรี่สามารถจ่ายกระแสได้คงที่ ซึ่งควบคุมและเก็บข้อมูลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ดังแสดงในภาพประกอบที่ 3.1 วงจรนี้สามารถแบ่งออกเป็น 4 ส่วนได้แก่ ส่วนการตรวจวัดสัญญาณ ส่วนการส่งและรับสัญญาณ ส่วนการประมวลผลสัญญาณ และการออกแบบวงจรดึงกระแสจาร์จคงที่ (Constant Current Discharge Circuit) ในส่วนแรกคือการตรวจวัดสัญญาณประกอบด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดสัญญาณ เช่น สัญญาณแรงดันและกระแส ถัดมาคือ ส่วนของการส่งและรับสัญญาณจะทำการส่งและรับสัญญาณผ่านทาง RS232 ในส่วนของการประมวลผลจะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ทำหน้าที่ในการประมวลผล และส่วนสุดท้ายคือ การออกแบบวงจรดึงกระแสจาร์จคงที่ เนื่องจากขณะทำการดิสชาร์จกระแสแบตเตอรี่ แรงดันแบตเตอรี่จะมีค่าลดลงเรื่อย ๆ จึงไม่สามารถใช้โหลดแบบพาสซีฟในการคุมกระแสดิสชาร์จให้คงที่



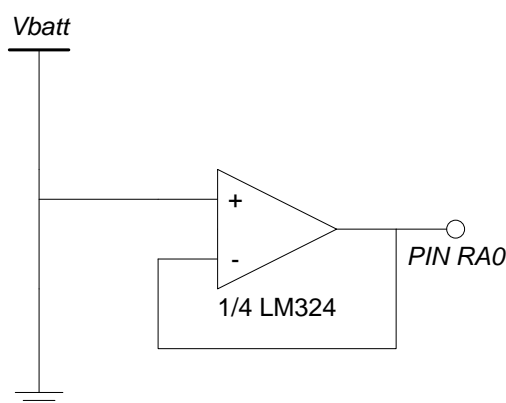
ภาพประกอบ 3-1 วงจรตรวจวัดค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่

ข้อมูลจากวงจรตรวจวัดค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่สามารถนำมาใช้ในการเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสถานะประจุกับแรงดันขณะเปิดวงจรของแบตเตอรี่เพื่อใช้ในการประมาณค่าสถานะประจุ นอกจากนั้นแล้วผลตอบสนองแรงดันขณะแบตเตอรี่คายประจุ ก็สามารถนำไปใช้หาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองวงจรสมมูลของแบตเตอรี่ได้

3.1.1 การตรวจวัดสัญญาณ

การตรวจวัดสัญญาณของวงจรตรวจวัดค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่จะทำการตรวจวัดสัญญาณแรงดันและกระแส โดยใช้อุปกรณ์ตรวจวัดสัญญาณแรงดัน (Voltage Sensor) และอุปกรณ์ตรวจวัดสัญญาณกระแส (Current Sensor) ซึ่งได้ทำการออกแบบไว้ดังนี้

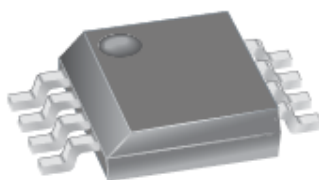
- **อุปกรณ์ตรวจวัดสัญญาณแรงดัน** การออกแบบอุปกรณ์ตรวจวัดสัญญาณแรงดันสามารถออกแบบโดยนำสัญญาณแรงดันจากแบตเตอรี่ ต่อผ่านไปยังวงจรบัฟเฟอร์ (Buffer) เพื่อทำการรักษาระดับสัญญาณแรงดันให้คงที่ก่อนส่งผ่านไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ ดังแสดงในภาพประกอบที่ 3-2



ภาพประกอบ 3-2 อุปกรณ์ตรวจวัดสัญญาณแรงดัน

สัญญาณแรงดันที่ได้จากการตรวจวัดนี้จะนำไปใช้เป็นค่าแรงดันขณะเปิดวงจร ซึ่งใช้ในการประมาณค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่และนำไปใช้ในการเขียนกราฟผลตอบแทนแรงดันเพื่อนำไปใช้หาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองวงจรสมมูลของแบตเตอรี่

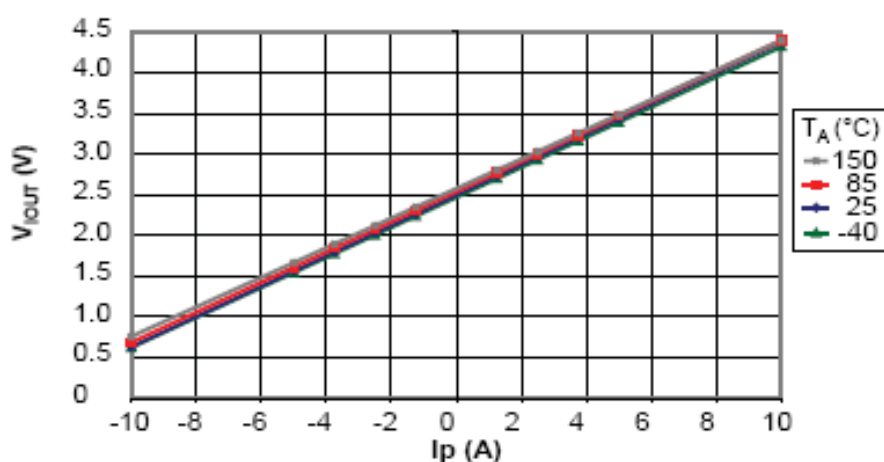
- **อุปกรณ์ตรวจวัดสัญญาณกระแส** การออกแบบอุปกรณ์ตรวจวัดสัญญาณกระแสสามารถออกแบบโดยเลือกใช้ไอซีตรวจวัดสัญญาณกระแสเบอร์ ACS712 ส่งผ่านไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ ดังแสดงในภาพประกอบที่ 3-3 เพื่อนำไปใช้ในการตรวจสอบค่ากระแสของแบตเตอรี่ขณะทำการดิสชาร์จ



ภาพประกอบ 3-3 อุปกรณ์ตรวจวัดสัญญาณกระแส [25]

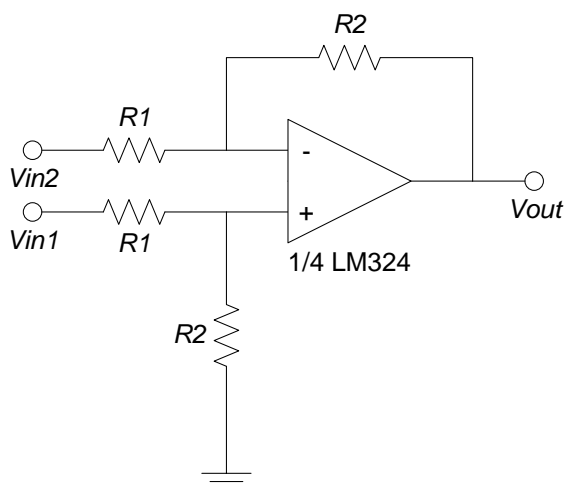
สัญญาณกระแสที่ได้นอกจากใช้ในการตรวจสอบค่ากระแสของแบตเตอรี่ขณะทำการคิสร่างแล้วยังสามารถนำไปใช้ในการประมาณค่าสถานะประจุแบบออนไลน์ได้อีกด้วย

ไอซีตรวจวัดสัญญาณกระแสเบอร์ ACS712 ใช้ไฟเลี้ยงเดี่ยวขนาด 5 V ซึ่งสามารถนำแรงดัน 5 V จากไฟเลี้ยงของไมโครคอนโทรลเลอร์มาใช้ได้ทันที จากภาพประกอบที่ 3-1 พบว่าแบตเตอรี่มีพิกัดกระแส 1020 mAh ดังนั้นทำการเลือกพิกัดของไอซีตรวจวัดสัญญาณกระแสที่ 5 A ซึ่งจากข้อมูลที่ผู้ผลิตให้มา ค่าสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จะมีขนาด 185 mV ต่อสัญญาณอินพุต 1 A จากคุณลักษณะของไอซีตรวจวัดสัญญาณกระแสพบว่า เมื่อสัญญาณอินพุตมีขนาดกระแสเท่ากับ 0 A จะได้สัญญาณแรงดันเอาต์พุตเท่ากับ 2.5 V แสดงว่าเมื่อสัญญาณอินพุตซึ่งเป็นแบตเตอรี่มีค่าขนาดพิกัดกระแสเท่ากับ 1.02 A จะได้สัญญาณแรงดันเอาต์พุตเท่ากับ $2.5 + (1.02 \times 0.185) = 2.6887V$ ดังแสดงในภาพประกอบที่ 3-4 ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอินพุตกับแรงดันเอาต์พุตของไอซีตรวจวัดสัญญาณกระแสเบอร์ ACS712 ขนาดพิกัดกระแส 5 A



ภาพประกอบ 3-4 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอินพุตกับแรงดันเอาต์พุตของไอซีตรวจวัดสัญญาณกระแสเบอร์ ACS712 [25]

ไอซีตรวจวัดสัญญาณกระแสจะส่งสัญญาณแรงดันเอาต์พุตในช่วง 2.5-2.6887 V ทำให้มีช่วงในการส่งสัญญาณแรงดันเอาต์พุตเพียง 0.1887 เท่านั้น เมื่อช่วงในการส่งสัญญาณแรงดันเอาต์พุตมีค่าน้อย จะส่งผลกระทบต่อค่าความถูกต้องของสัญญาณแรงดันเอาต์พุตที่ลดลงตามไปด้วย ดังนั้นจึงได้ทำการออกแบบให้มีการขยายช่วงในการส่งสัญญาณแรงดันเอาต์พุตให้มากขึ้น โดยใช้วงจรขยายผลต่างสัญญาณแรงดัน (Difference Amplifier) ดังแสดงในภาพประกอบที่ 3-5 ประกอบด้วยแรงดันอินพุต V_{in1} และ V_{in2} ตัวต้านทาน $R1$ จำนวนสองตัว ตัวต้านทาน $R2$ จำนวนสองตัว และออปแอมป์



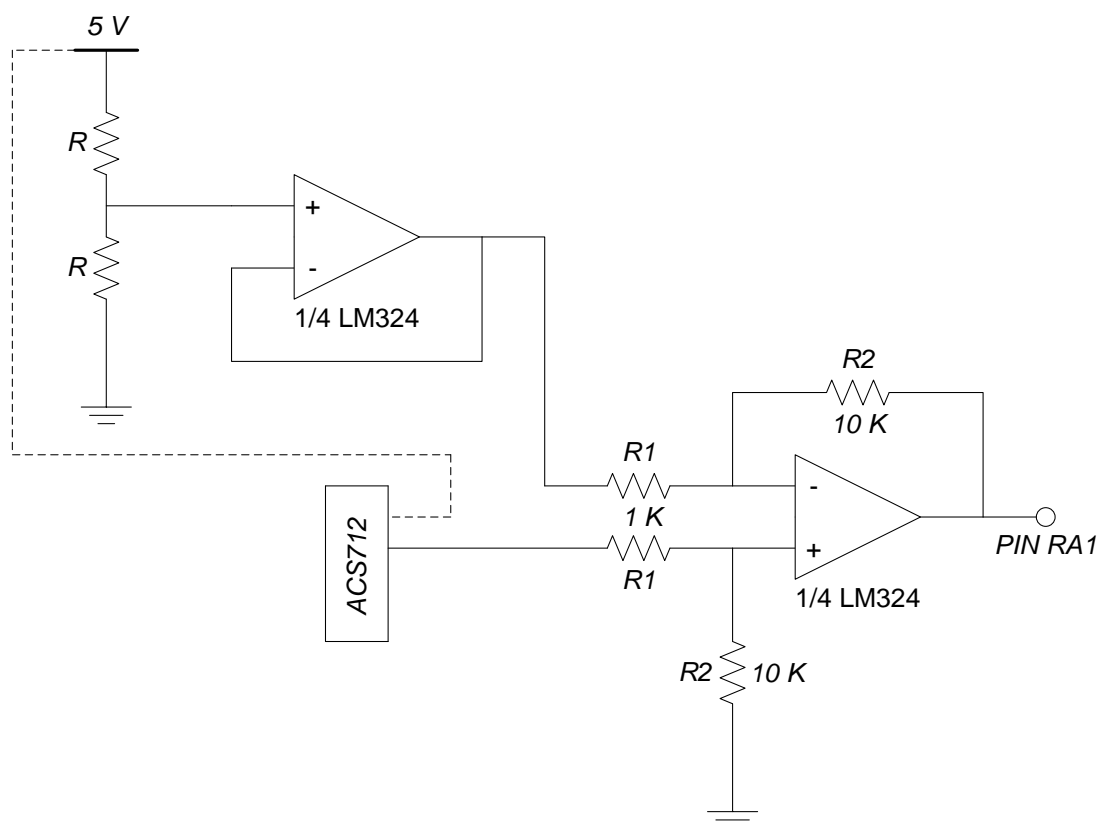
ภาพประกอบ 3-5 วงจรขยายผลต่างสัญญาณแรงดัน

จากภาพประกอบ 3-5 ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณแรงดันอินพุต V_{in1} , V_{in2} และสัญญาณแรงดันเอาต์พุต V_{out} สามารถหาได้ดังสมการ

$$V_{out} = \frac{R2}{R1} (V_{in1} - V_{in2}) \quad (3.1)$$

จากวงจรขยายผลต่างสัญญาณแรงดันสามารถออกแบบให้มีอัตราขยาย (Gain) เท่ากับ 10 เท่า โดยการเลือกใช้ตัวต้านทาน $R1 = 1k\Omega$ และ $R2 = 10k\Omega$ ดังนั้นอัตราขยายเท่ากับ $\frac{R2}{R1} = \frac{10k\Omega}{1k\Omega} = 10$ ในการนำวงจรขยายผลต่างสัญญาณแรงดันมาขยายสัญญาณแรงดันเอาต์พุตของไอซีทราวจิวัดสัญญาณกระแสสามารถออกแบบได้โดยนำสัญญาณแรงดันเอาต์พุตของไอซีทราวจิวัดสัญญาณกระแสต่อกับสัญญาณแรงดัน V_{in1} ของวงจรขยายผลต่างสัญญาณแรงดัน ส่วนสัญญาณแรงดัน V_{in2} ของวงจรขยายผลต่างสัญญาณแรงดันจะกำหนดให้มียค่าแรงดันเท่ากับ 2.5 V สาเหตุที่กำหนดให้แรงดัน V_{in2} มีค่าเท่ากับ 2.5 V เพราะเมื่อสัญญาณอินพุตของไอซีทราวจิวัดสัญญาณกระแสมีขนาดกระแสเท่ากับ 0 A จะได้สัญญาณแรงดันเอาต์พุตเท่ากับ 2.5 V การทำให้สัญญาณแรงดัน V_{in2} มีค่าเท่ากับ 2.5 V นั้นสามารถทำได้โดยนำไฟเลี้ยงของไมโครคอนโทรลเลอร์ขนาดแรงดันเท่ากับ 5 V มาทำการแบ่งแรงดันโดยใช้หลักการแบ่งแรงดันของตัวต้านทานที่มีขนาดเท่ากันสองตัวมาต่ออนุกรมกัน เพื่อทำหน้าที่ในการลดระดับแรงดันลงครึ่งหนึ่งกล่าวคือ ลดระดับแรงดันจาก 5 V ให้เหลือ 2.5 V จากนั้นเมื่อได้สัญญาณแรงดัน 2.5 V แล้วจะต่อผ่านไปยังวงจรบัฟเฟอร์เพื่อรักษาระดับสัญญาณแรงดันให้คงที่ เมื่อนำสัญญาณแรงดันทั้งสองมาลบกันคือ สัญญาณแรงดัน $V_{in1} - V_{in2}$ จะมียค่าเท่ากับ 0 V เมื่อผ่านวงจรขยายผลต่างสัญญาณแรงดันแล้วทำให้สัญญาณแรงดัน

เอาต์พุตมีค่าเท่ากับ 0 V ด้วยเช่นกัน ดังนั้นจึงเป็นค่าสัญญาณแรงดันเอาต์พุตต่ำที่สุด ส่วนค่าค่าสัญญาณแรงดันเอาต์พุตสูงสุดของวงจรขยายผลต่างสัญญาณแรงดันคือ 2.6887 V ที่พิกัดขนาดกระแสเท่ากับ 1.02 A ซึ่งสามารถขยายช่วงสัญญาณแรงดันเอาต์พุตของไอซีตรวจวัดสัญญาณกระแสจากแรงดัน 2.5-2.6887 V เป็นช่วงแรงดัน 0-2.6887 V การออกแบบวงจรตรวจวัดสัญญาณกระแสที่ได้กล่าวมาในข้างต้นมีส่วนประกอบทั้งหมด ดังแสดงในภาพประกอบที่ 3.6 ซึ่งเป็นการขยายช่วงสัญญาณแรงดันเอาต์พุตของไอซีตรวจวัดสัญญาณกระแส

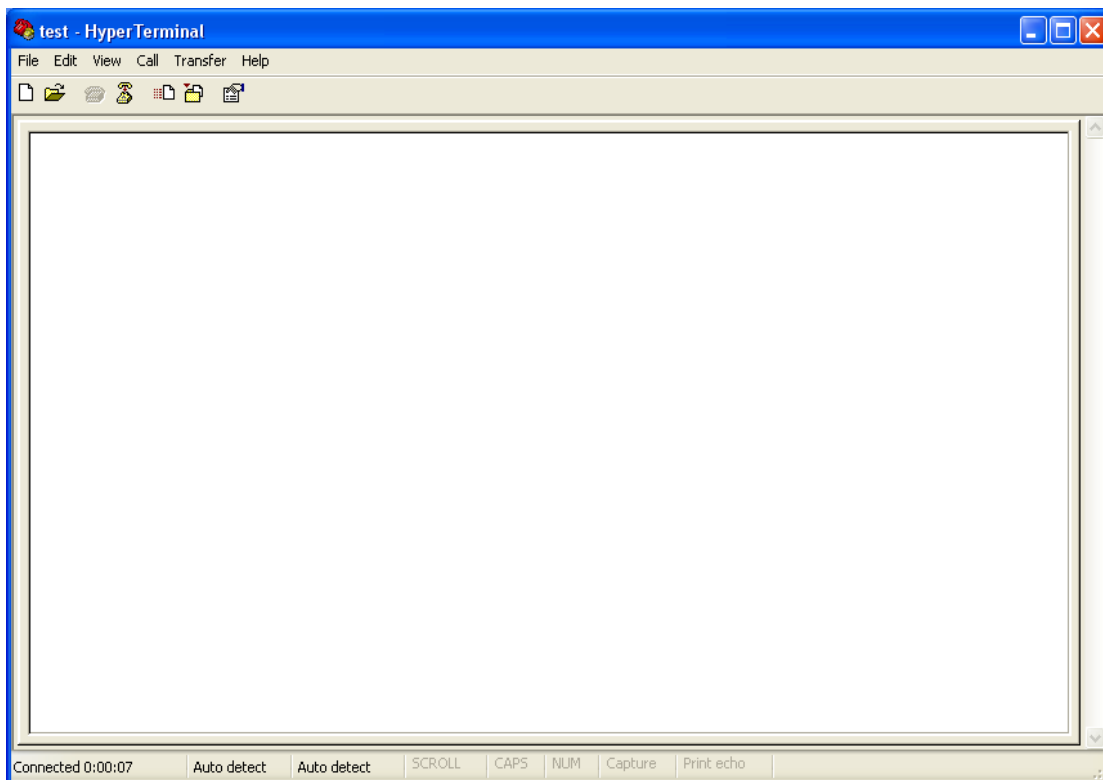


ภาพประกอบ 3-6 วงจรตรวจวัดสัญญาณกระแส

3.1.2 การส่งและรับสัญญาณ

การส่งและรับสัญญาณแรงดันและกระแสจากอุปกรณ์ตรวจวัดสัญญาณแรงดันและกระแส จะทำการส่งและรับสัญญาณข้อมูลผ่านทาง RS-232 (Recommended Standard-232) ซึ่งทำหน้าที่ในการเชื่อมต่อข้อมูลแบบอนุกรมระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์กับคอมพิวเตอร์ โดยจะแสดงผลข้อมูลผ่านทางโปรแกรม Hyper Terminal ดังแสดงในภาพประกอบที่ 3.7

การส่งและรับสัญญาณข้อมูลผ่านทางโปรแกรม Hyper Terminal จะใช้อัตราการส่งข้อมูล (Baud rate) หรือความเร็วของการส่งและรับข้อมูลที่ 9600 บิตต่อวินาที

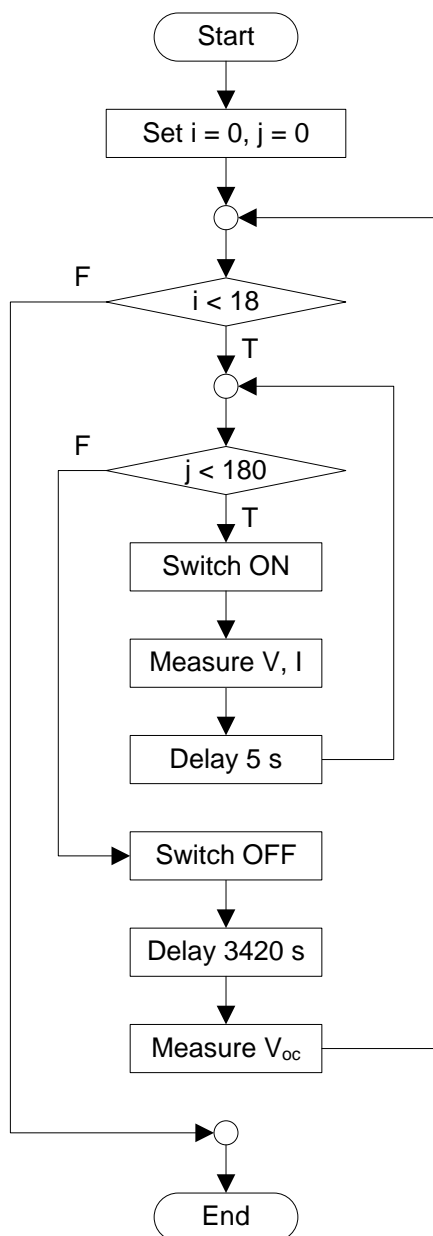


ภาพประกอบ 3-7 โปรแกรม Hyper Terminal

3.1.3 การประมวลผลสัญญาณ

การประมวลผลสัญญาณสามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ สัญญาณแรงดันและสัญญาณกระแส ซึ่งได้จากอุปกรณ์ตรวจวัดสัญญาณแรงดันและกระแสตามลำดับนั้น โดยจะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC16F877 ทำหน้าที่ในการประมวลผลสัญญาณทั้งสองชนิดแบบอัตโนมัติ เนื่องจากการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสถานะประจุกับแรงดันขณะเปิดวงจรของแบตเตอรี่ใช้เวลาทั้งหมดประมาณ 18 ชั่วโมง นอกจากไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำหน้าที่ในการประมวลผลสัญญาณแรงดันและกระแสแล้ว ยังทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมการทำงานของสวิตช์ในการเปิดและปิดการทำงานของวงจรอีกด้วย

- การประมวลผลสัญญาณแรงดันและกระแส การประมวลผลสัญญาณข้อมูลแรงดันและกระแสของไมโครคอนโทรลเลอร์นั้นจะมีแผนผัง (Flowchart) การทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ ดังแสดงในภาพประกอบที่ 3-8 โดยเงื่อนไขในการตรวจวัดสัญญาณแรงดันและกระแสประกอบด้วยเวลาในการคิซซาร์จแบตเตอรี่ (j) ซึ่งใช้เวลา 180 วินาทีต่อหนึ่งรอบ เพื่อนำไปใช้ในการหาผลตอบสนองแรงดันของแบตเตอรี่และจำนวนรอบ (i) ในการวัดค่าแรงดันขณะเปิดวงจร กำหนดค่าสูงสุดเท่ากับ 18 รอบเพื่อให้แบตเตอรี่มีค่าสถานะประจุเหลือ 10%

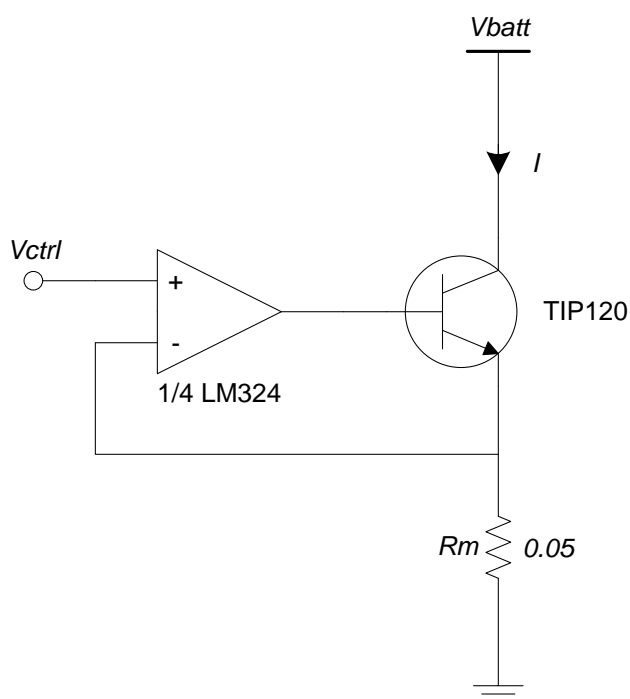


ภาพประกอบ 3-8 แผนผังการทำงานของวงจรวัดค่าสถานะประจุ

- การควบคุมการทำงานของสวิตช์ การควบคุมการทำงานของสวิตช์จะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นตัวควบคุมการเปิดและปิดของสวิตช์ โดยใช้รีเลย์ทำหน้าที่เป็นเปิดและปิดหน้าสัมผัสเสมือนเป็นสวิตช์ในการควบคุมให้แบตเตอรี่จ่ายกระแส ไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำการส่งสัญญาณลอจิกควบคุมผ่านไอซีเบอร์ ULN2003 เพื่อทำหน้าที่ขยายกระแส เนื่องจากรีเลย์มีพิกัดแรงดัน 12 V ดังแสดงในภาพประกอบที่ 3-1 ซึ่งเป็นวงจรตรวจวัดค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ที่ได้ทำการออกแบบไว้

3.1.4 การออกแบบวงจรดึงกระแสดีสชาร์จคงที่

การทดสอบด้วยกระแสดึงการดีสชาร์จคงที่ การทำให้แบตเตอรี่จ่ายกระแสได้คงที่เมื่อแรงดันมีการเปลี่ยนแปลง สามารถออกแบบวงจรดึงกระแสดีสชาร์จคงที่ ดังแสดงในภาพประกอบที่ 3-9 ประกอบด้วยตัวต้านทานวัดค่า R_m แรงดันควบคุม V_{ctrl} ทรานซิสเตอร์เบอร์ TIP120 และออปแอมป์ โดยใช้ออปแอมป์จากไอซีเบอร์ LM324



ภาพประกอบ 3-9 วงจรดึงกระแสดีสชาร์จคงที่

จากภาพประกอบที่ 3-9 เลือกใช้ตัวต้านทานวัดค่า R_m มีค่าเท่ากับ 0.05 Ω สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสดีสชาร์จ I และสัญญาณแรงดันควบคุม V_{ctrl} ดังนี้

$$V_m = I \times R_m = V_{ctrl} \quad (3.2)$$

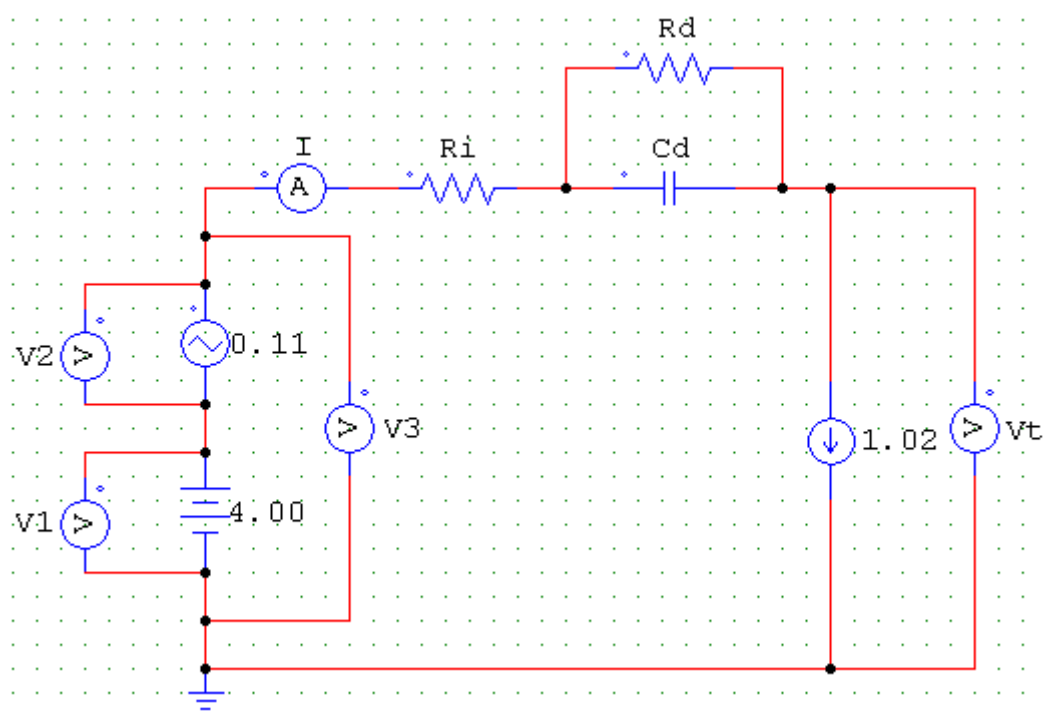
$$I = \frac{V_{ctrl}}{R_m} \quad (3.3)$$

จากสมการที่ (3.2) เมื่อกระแสดีสชาร์จที่ขนาด 1.02 A สามารถคำนวณหาค่าแรงดันควบคุม V_{ctrl} ได้จาก

$$V_{ctrl} = 1.02 \times 0.05 = 0.051 \quad (3.4)$$

3.2. การออกแบบการจำลองผลตอบสนองแรงดันของแบตเตอรี่

การออกแบบการจำลองผลตอบสนองแรงดันของแบตเตอรี่สามารถออกแบบโดยใช้โปรแกรม PSIM ในการจำลองผลตอบสนองแรงดัน ดังแสดงในภาพประกอบที่ 3-10 ซึ่งเป็นแบบจำลองวงจรสมมูลของแบตเตอรี่ที่ใช้ในงานวิจัยชิ้นนี้ การจำลองผลตอบสนองแรงดันของแบตเตอรี่ V_t จะทำการแทนค่าพารามิเตอร์ (ตัวต้านทาน R_s , ตัวต้านทาน R_d และตัวเก็บประจุ C_d) ที่คำนวณได้จากกราฟผลตอบสนองแรงดันของแบตเตอรี่ซึ่งได้จากการทดลองลงในแบบจำลองวงจรสมมูล เพื่อดูว่าผลตอบสนองแรงดันของแบตเตอรี่ที่ได้จากการทดลองมีความใกล้เคียงกับผลตอบสนองแรงดันของแบตเตอรี่ที่ได้จากการจำลองมากน้อยเพียงใด ในการจำลองผลตอบสนองแรงดันของแบตเตอรี่ใช้เวลา 180 วินาที เนื่องจากกำหนดให้แบตเตอรี่จ่ายกระแสรอบละ 180 วินาที การจำลองส่วนประกอบต่าง ๆ ของแบบจำลองวงจรสมมูลของแบตเตอรี่สามารถจำลองได้ดังนี้

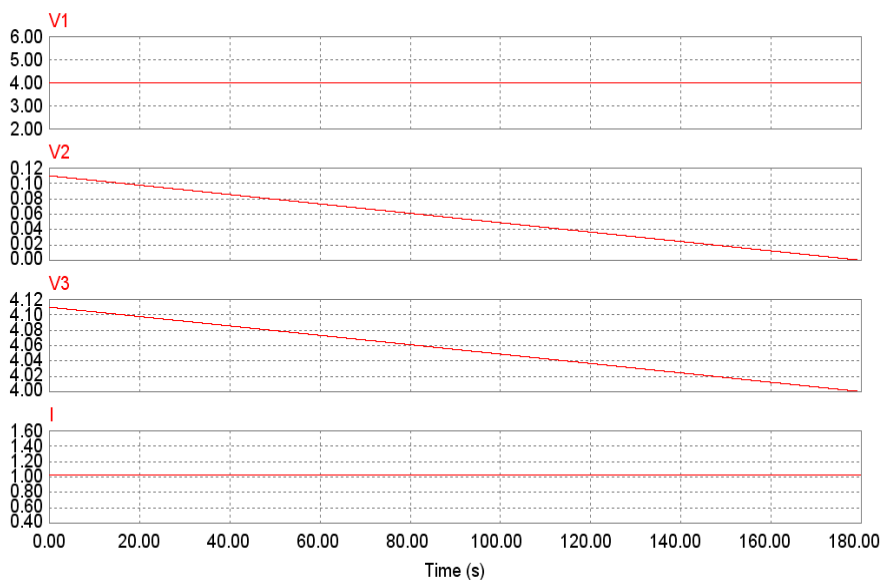


ภาพประกอบ 3-10 การจำลองผลตอบสนองแรงดันของแบตเตอรี่

3.2.1 การจำลองแรงดันของแบตเตอรี่

เนื่องจากขณะทำการดีสชาร์จกระแสแบตเตอรี่ แรงดันของแบตเตอรี่จะมีค่าลดลงเรื่อย ๆ ดังนั้นจึงออกแบบแหล่งจ่ายแรงดันของแบตเตอรี่ให้มีค่าแรงดันลดลง ดังแสดงในภาพประกอบที่ 3-10 ซึ่งสามารถออกแบบได้โดยให้แหล่งจ่ายแรงดันสามารถจ่ายแรงดันที่มีค่า

ลดลงด้วยเช่นกัน โดยใช้แหล่งจ่ายแรงดันแบบเส้นตรง V_1 ร่วมกับแหล่งจ่ายแรงดันที่มีค่าความชันลดลง V_2 จะได้เป็นแหล่งจ่ายแรงดัน V_3 ที่มีค่าแรงดันค่อย ๆ ลดลง



ภาพประกอบ 3-11 ผลการจำลองแหล่งจ่ายแรงดัน

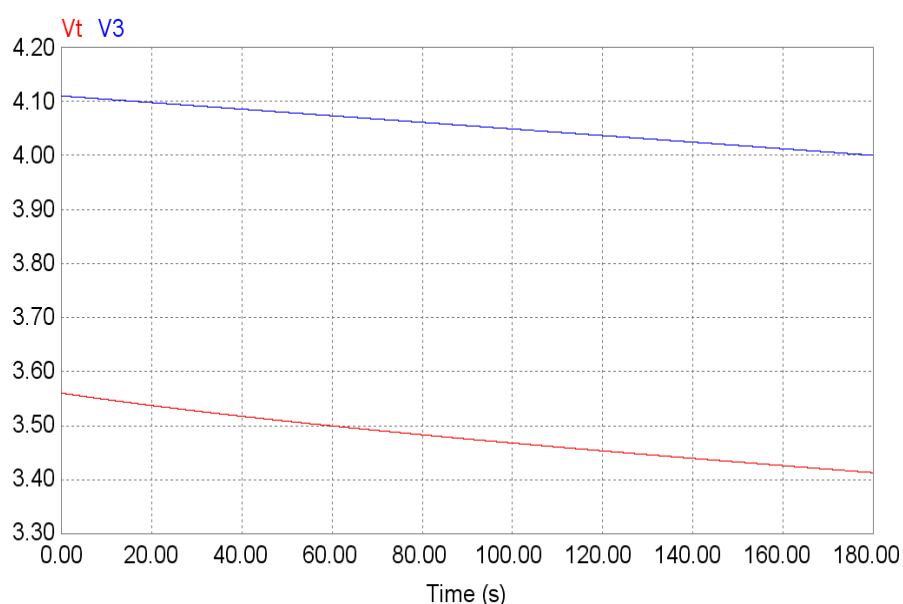
ตัวอย่างเช่น ถ้าต้องการทำให้แบตเตอรี่ที่มีค่าแรงดันขณะเปิดวงจรจาก 4.11 V ให้ลดลงเหลือ 4.00 V ในเวลา 180 วินาที สามารถทำได้โดยใช้แหล่งจ่ายแรงดัน $V_1 = 4.00$ V ร่วมกับแหล่งจ่ายแรงดัน V_2 ที่มีค่าแรงดันจาก 0.11 V ลดลงเหลือ 0 V จะได้แหล่งจ่ายแรงดัน V_3 ที่มีค่าแรงดัน 4.11 V ลดลงเหลือ 4.00 V ดังแสดงในภาพประกอบที่ 3-11 ค่าแรงดันขณะเปิดวงจรที่มีค่าลดลงนี้สามารถหาได้จากค่าแรงดันขณะเปิดวงจรก่อนเริ่มทำการดิสชาร์จแบตเตอรี่และหลังจากการดิสชาร์จแบตเตอรี่อย่างทันทีทันใด

3.2.2 การจำลองวงจรดึงกระแสดิสชาร์จคงที่

การจำลองวงจรดึงกระแสดิสชาร์จคงที่ (ภาพประกอบ 3-9) สามารถออกแบบการจำลองได้โดยใช้แหล่งจ่ายกระแสคงที่ ดังแสดงในภาพประกอบที่ 3-10 เนื่องจากต้องการให้แบตเตอรี่จ่ายกระแสดิสชาร์จคงที่ขนาด 1.02 A (ภาพประกอบ 3-11)

ผลการจำลองผลตอบแทนแรงดัน V_1 ของแบตเตอรี่ เมื่อแทนค่าพารามิเตอร์ที่จากรคำนวณได้จากผลตอบแทนแรงดันของแบตเตอรี่ขณะทำการดิสชาร์จแบตเตอรี่ลงในแบบจำลองวงจรสมมูล ดังแสดงในภาพประกอบที่ 3-12 โดยแทนค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการจำลองผลตอบแทนแรงดันดังนี้

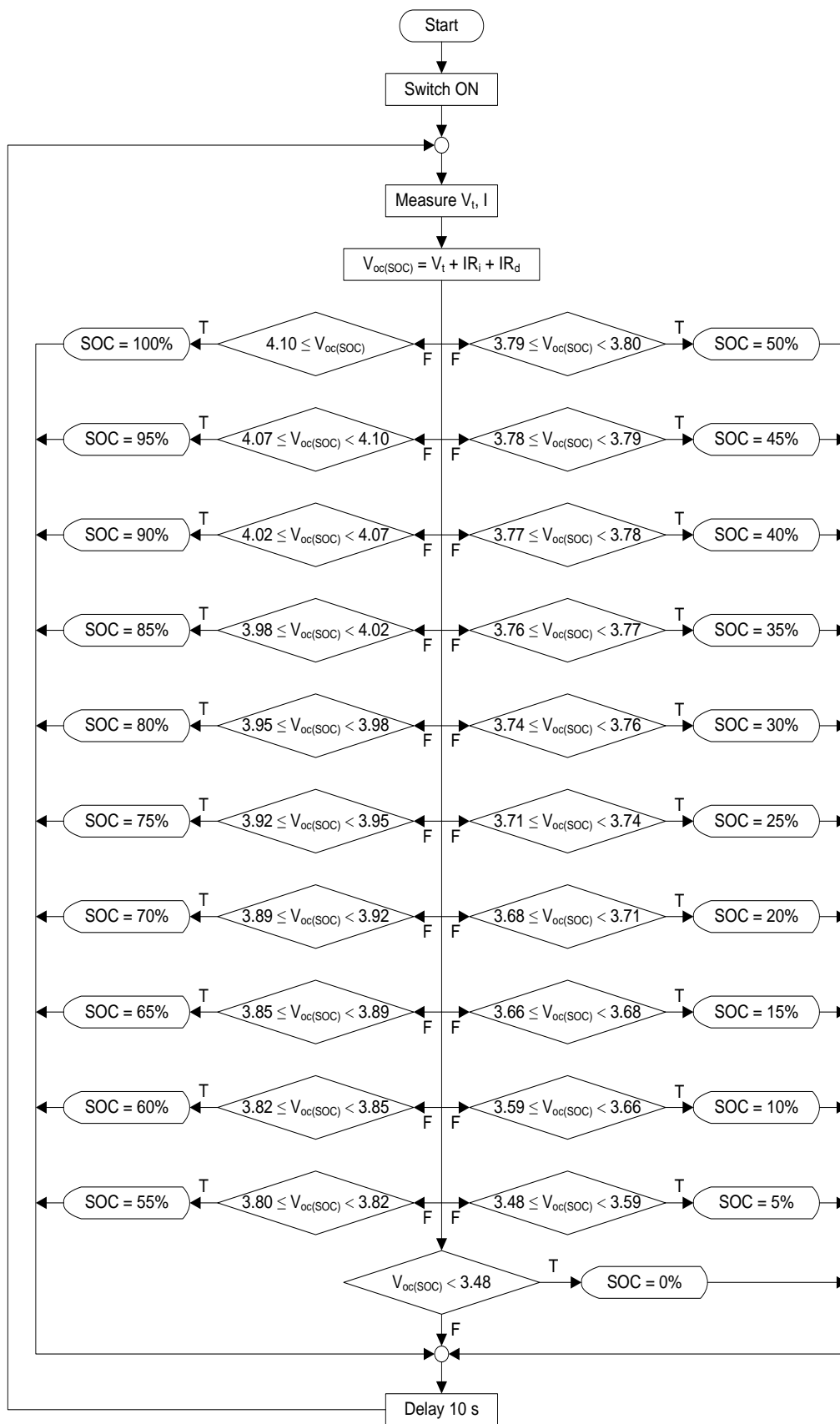
แรงดัน V_1	= 4.00 V
แรงดัน V_2	= 0.11 V
ตัวต้านทาน R_i	= 0.539 Ω
ตัวต้านทาน R_d	= 0.039 Ω
ตัวเก็บประจุ C_d	= 1666.67 F
กระแสแบตเตอรี่ I	= 1.02 A



ภาพประกอบ 3-12 ผลตอบสนองแรงดันของแบตเตอรี่

3.3. การประมาณค่าสถานะประจุแบบออนไลน์

จากหัวข้อที่ 3.1 การออกแบบวงจรตรวจวัดค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ เมื่อทำการทดลองวงจรตรวจวัดค่าสถานะประจุจะได้ผลการทดลองคือ กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสถานะประจุกับแรงดันขณะเปิดวงจรของแบตเตอรี่เพื่อใช้ในการประมาณค่าสถานะประจุ และผลตอบสนองแรงดันขณะแบตเตอรี่คายประจุเพื่อใช้ในการหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองวงจรสมมูลของแบตเตอรี่ การประมาณค่าสถานะประจุแบบออนไลน์ในงานวิจัยชิ้นนี้จะอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขั้ว (ขณะแบตเตอรี่จ่ายกระแส) กับแรงดันขณะเปิดวงจรจากแบบจำลองวงจรสมมูลและอาศัยการประมาณค่าสถานะประจุจากความสัมพันธ์ระหว่างค่าสถานะประจุกับแรงดันขณะเปิดวงจรมาใช้ในการประมาณแบบออนไลน์ โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC16F877 ทำหน้าที่ประมวลผล ซึ่งมีแผนผังการทำงาน ดังแสดงในภาพประกอบที่ 3-13



ภาพประกอบ 3-13 แผนผังการประมาณค่าสถานะประจุแบบออนไลน์

จากภาพประกอบ 3-13 การประมาณค่าสถานะประจุแบบออนไลน์ จะประมาณขณะที่แบตเตอรี่จ่ายกระแส และจะพิจารณาในช่วงแบตเตอรี่เข้าสู่สภาวะอยู่ตัวแล้ว ซึ่งมีวิธีการประมาณดังนี้

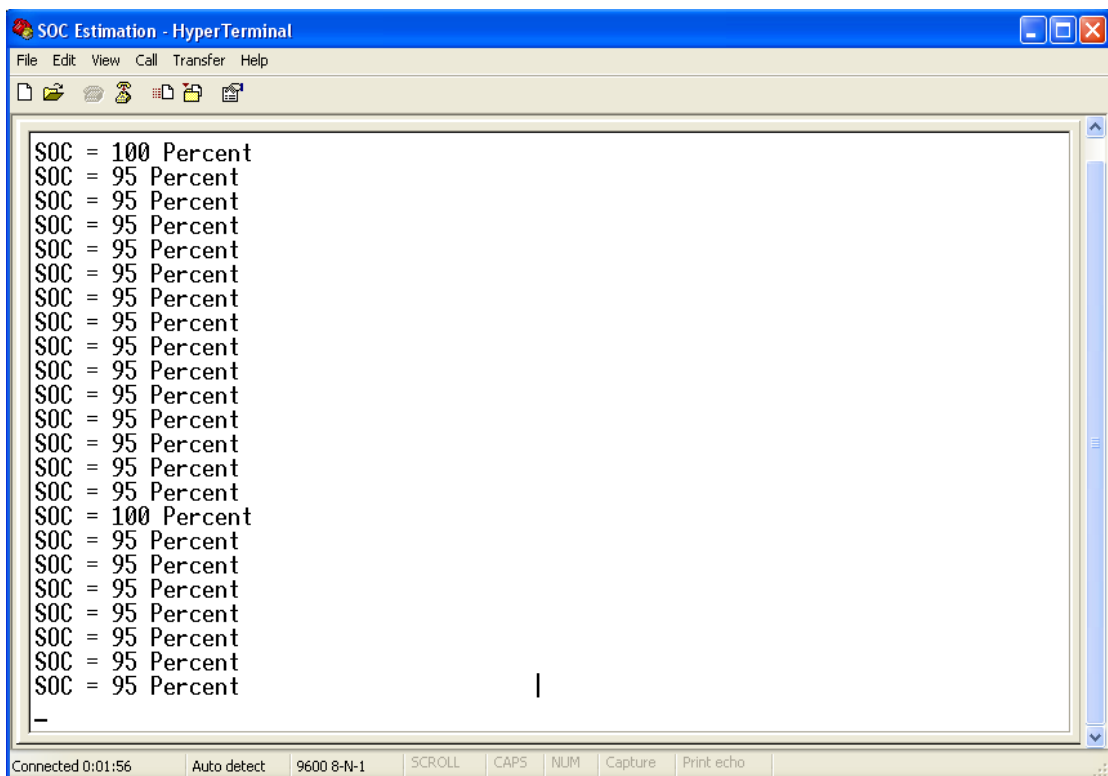
3.3.1 วัดค่าแรงดันขั้วของแบตเตอรี่ V_t และกระแส I

3.3.2 แทนค่าแรงดันขั้วและกระแสลงในแบบจำลองวงจรสมมูลของแบตเตอรี่ (ภาพประกอบที่ 3-10) เพื่อคำนวณแรงดันขณะเปิดวงจรของแบตเตอรี่ ดังสมการที่ (3.5)

$$V_{oc} = V_t + IR_i + IR_d \quad (3.5)$$

3.3.3 เมื่อได้แรงดันขณะเปิดวงจรแล้ว สามารถหาค่าสถานะประจุได้จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าสถานะประจุกับแรงดันขณะเปิดวงจร

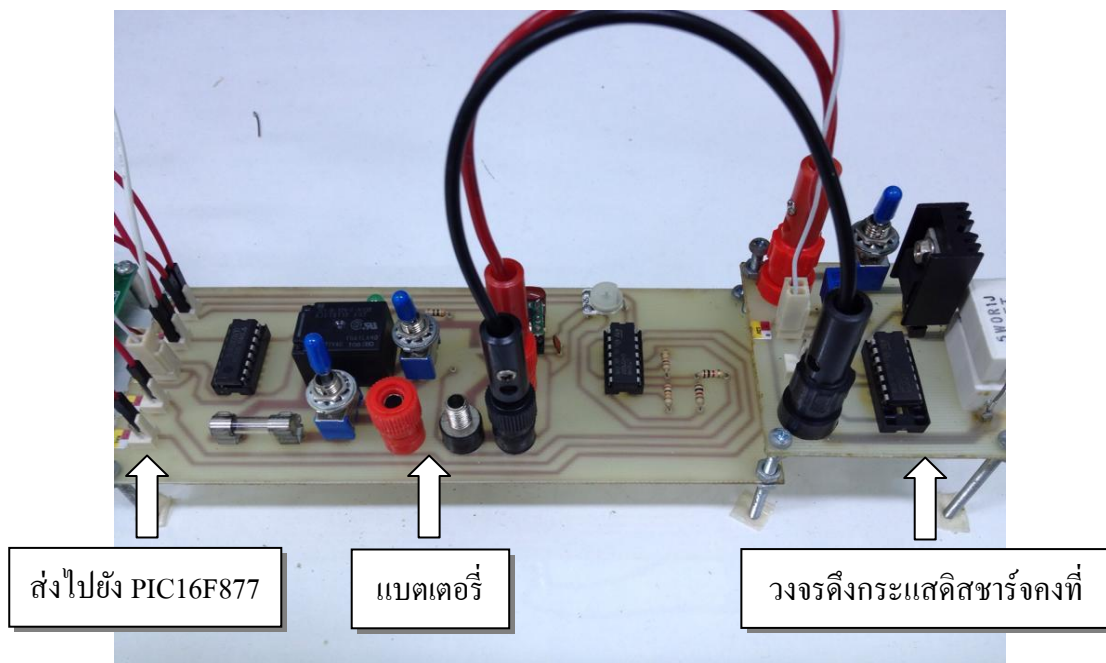
3.3.4 แสดงผลค่าสถานะประจุแบบออนไลน์ ดังแสดงในภาพประกอบ 3-14



ภาพประกอบ 3-14 ผลการประมาณค่าสถานะประจุแบบออนไลน์

3.4. วงจรตรวจวัดค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่

จากวงจรตรวจวัดค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ (ภาพประกอบ 3-1) สามารถนำมาสร้างวงจรชาร์ตแวร์ได้ ดังแสดงในภาพประกอบที่ 3-15 โดยใช้แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนยี่ห้อ NOKIA BL-5C 1020mAh 3.7V 3.8Wh ดังแสดงในภาพประกอบที่ 3-16



ภาพประกอบ 3-15 วงจรตรวจวัดค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ (ชาร์ตแวร์)



ภาพประกอบ 3-16 แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนที่ใช้ในการทดลอง

บทที่ 4

ผลการทดลอง

จากวงจรตรวจวัดค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ (ภาพประกอบ 3-1) สามารถแบ่งการทดลองออกเป็น 2 การทดลองคือ (1) การทดลองหากราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสถานะประจุกับแรงดันขณะเปิดวงจรของแบตเตอรี่ โดยในการทดลองจะใช้แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนขนาด 3.7 V 1020 mAh จำนวน 5 ก้อน และ (2) การหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองวงจรสมมูลของแบตเตอรี่ (ภาพประกอบ 2-5) ซึ่งคำนวณได้จากผลตอบสนองแรงดันของแบตเตอรี่ขณะที่แบตเตอรี่จ่ายกระแส อย่างไรก็ตามในการทดลองได้มีการจำลองผลตอบสนองแรงดันของแบตเตอรี่โดยใช้โปรแกรม PSIM ในการจำลอง (ภาพประกอบ 3-10) ซึ่งจะเปรียบเทียบผลการจำลองผลตอบสนองแรงดันจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากคำนวณกับค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการเฉลี่ยเพื่อตัดสินใจในการเลือกใช้ค่าพารามิเตอร์ในการประมาณค่าสถานะประจุแบบออนไลน์ นอกจากนี้แล้วได้ทำการทดลองประมาณค่าสถานะประจุแบบออนไลน์อีกด้วย

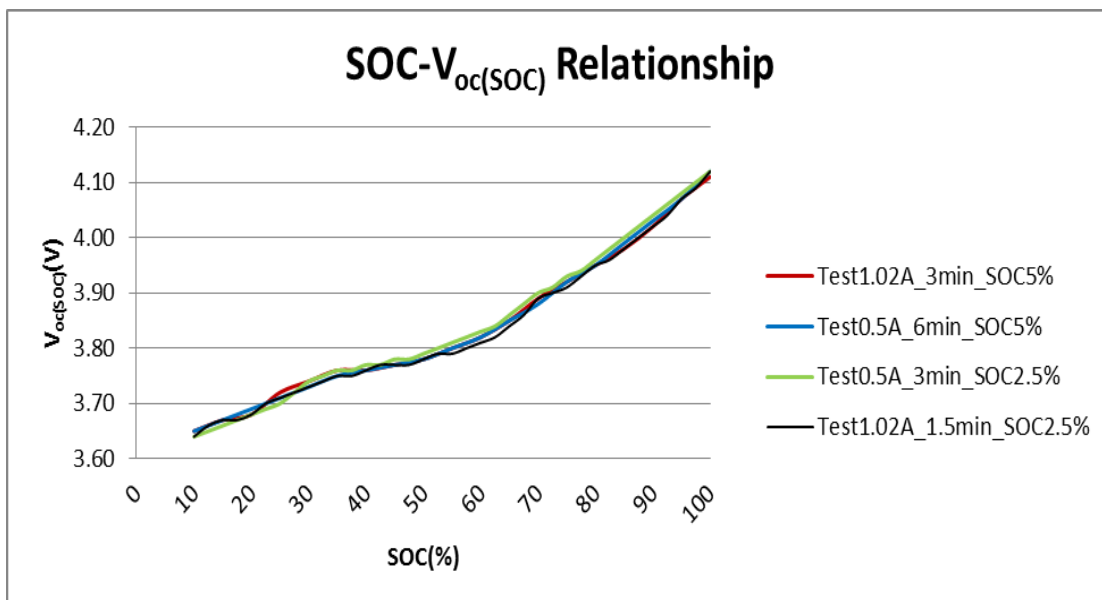
4.1. การทดลองหากราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสถานะประจุกับแรงดันขณะเปิดวงจร

ในการทดลองหากราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสถานะประจุกับแรงดันขณะเปิดวงจรของแบตเตอรี่สามารถหาได้จากการดิสชาร์จแบตเตอรี่ด้วยกระแสดิชาร์จคงที่ จากนั้นทิ้งไว้เวลาประมาณ 3420 วินาทีเพื่อให้แรงดันของแบตเตอรี่เข้าสู่สภาวะอยู่ตัว เมื่อแรงดันเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวแล้วทำการวัดแรงดันก่อนการดิสชาร์จรอบต่อไปซึ่งจะได้แรงดันขณะเปิดวงจรของค่าสถานะประจุที่ลดลงตามลำดับ ในงานวิจัยชิ้นนี้จะทำการทดลองจนค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่เหลืออยู่ประมาณ 10% ในงานวิจัยชิ้นนี้ได้ใช้แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนขนาด 3.7 V 1020 mAh

4.1.1 การทดลองหากราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสถานะประจุกับแรงดันขณะเปิดวงจรของแบตเตอรี่เมื่อดิสชาร์จแบตเตอรี่ด้วยกระแสดิชาร์จคงที่ต่างกัน

ในการทดลองหากราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสถานะประจุกับแรงดันขณะเปิดวงจรจะกำหนดให้แบตเตอรี่ดิสชาร์จด้วยกระแสต่างกันดังนี้ (1) ดิสชาร์จด้วยกระแสคงที่ขนาด 1.02 A เป็นเวลา 180 วินาที ทำให้ค่าสถานะประจุลดลงรอบละ 5% (2) ดิสชาร์จด้วยกระแสคงที่ขนาด 0.5 A เป็นเวลา 360 วินาที ก็จะทำให้ค่าสถานะประจุลดลงรอบละ 5% (3) ดิสชาร์จด้วยกระแสคงที่ขนาด 0.5 A เป็นเวลา 180 วินาที ทำให้ค่าสถานะประจุลดลงรอบละ 2.5% (4) ดิสชาร์จด้วยกระแสคงที่ขนาด 1.02 A เป็นเวลา 90 วินาที ก็จะทำให้ค่าสถานะประจุลดลงรอบละ 2.5% สาเหตุที่ต้องดิสชาร์จแบตเตอรี่ด้วยกระแสดิชาร์จคงที่ต่างกัน เพื่อที่จะดูว่าเส้นกราฟแสดง

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสถานะประจุกับแรงดันขณะเปิดวงจรเมื่อคายประจุด้วยกระแสต่างกันนั้นมีความใกล้เคียงกันหรือไม่ ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4-1



ภาพประกอบ 4-1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขณะเปิดวงจรกับสถานะประจุของแบตเตอรี่ที่กระแสดิสชาร์จคงที่ขนาด 1.02 A และ 0.5 A

จากภาพประกอบ 4-1 พบว่าเส้นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสถานะประจุกับแรงดันขณะเปิดวงจรของแบตเตอรี่เมื่อคายประจุด้วยกระแสที่ต่างกัน โดยให้แบตเตอรี่จ่ายกระแสดิสชาร์จคงที่ขนาด 1.02 A และ 0.5 A นั้นมีลักษณะใกล้เคียงกัน ดังนั้นไม่ว่าแบตเตอรี่จะคายประจุด้วยกระแสที่ขนาดแตกต่างกัน กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสถานะประจุกับแรงดันขณะเปิดวงจรของแบตเตอรี่จะมีความใกล้เคียงกัน

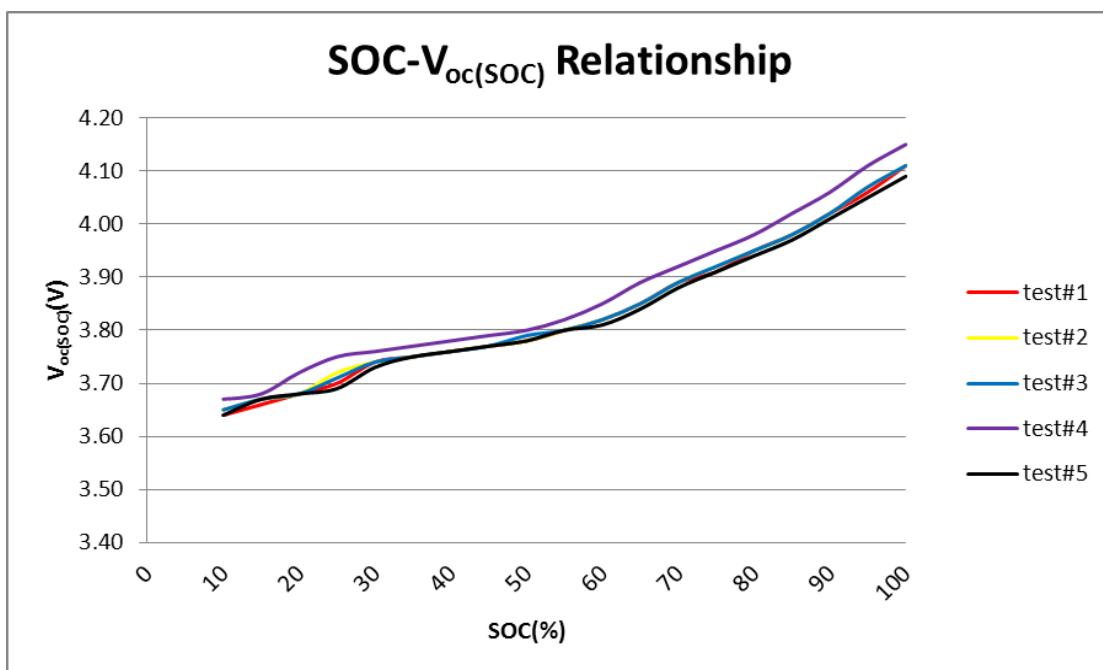
4.1.2 การทดลองหากราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสถานะประจุกับแรงดันขณะเปิดวงจรของแบตเตอรี่เมื่อคายประจุด้วยกระแสที่ขนาด 1.02 A

ในการทดลองหากราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสถานะประจุกับแรงดันขณะเปิดวงจรเมื่อให้แบตเตอรี่คายประจุด้วยกระแส 1.02 A ซึ่งได้ทำการทดลองกับแบตเตอรี่ชนิดเดียวกันจำนวน 5 ก้อน เพื่อทดลองว่ากราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสถานะประจุกับแรงดันขณะเปิดวงจรของแบตเตอรี่ทั้ง 5 ก้อนนั้นจะได้กราฟเป็นเส้นเดียวกันหรือไม่ โดยกำหนดให้

- แบตเตอรี่ก้อนที่ 1 = การทดลองครั้งที่ 1 (Test#1)
- แบตเตอรี่ก้อนที่ 2 = การทดลองครั้งที่ 2 (Test#2)
- แบตเตอรี่ก้อนที่ 3 = การทดลองครั้งที่ 3 (Test#3)

- แบตเตอรี่ก้อนที่ 4 = การทดลองครั้งที่ 4 (Test#4)
- แบตเตอรี่ก้อนที่ 5 = การทดลองครั้งที่ 5 (Test#5)

ผลการทดลองหากราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสถานะประจุกับแรงดันขณะเปิดวงจรของแบตเตอรี่เมื่อคิซาร์จด้วยกระแสคงที่ขนาด 1.02 A ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4-2



ภาพประกอบ 4-2 ผลการทดลองหากราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขณะเปิดวงจรกับสถานะประจุของแบตเตอรี่ที่กระแสคิซาร์จคงที่ขนาด 1.02 A

จากภาพประกอบที่ 4-2 พบว่าเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสถานะประจุกับแรงดันขณะเปิดวงจรจากการทดลองครั้งที่ 1 (Test#1) การทดลองครั้งที่ 2 (Test#2) การทดลองครั้งที่ 3 (Test#3) และการทดลองครั้งที่ 4 (Test#4) มีลักษณะใกล้เคียงกัน ส่วนการทดลองครั้งที่ 5 (Test#5) เส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสถานะประจุกับแรงดันขณะเปิดวงจรจะยกระดับขึ้นมาเนื่องจากแรงดันของแบตเตอรี่ (แรงดันขณะเปิดวงจร) ก่อนเริ่มทำการทดลองจะมีค่าสูงกว่า แต่อย่างไรก็ตามแนวโน้มของเส้นกราฟจากการทดลองทั้ง 5 ครั้ง มีลักษณะไปในทิศทางเดียวกัน ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างค่าสถานะประจุกับแรงดันขณะเปิดวงจรที่ได้จากการทดลองนี้สามารถนำไปใช้ในการประมาณค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ได้

ในการประมาณค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่สามารถนำเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสถานะประจุกับแรงดันขณะเปิดวงจรเขียนเป็นสมการ โพลีโนเมียลเพื่อที่จะแสดง

ความสัมพันธ์ของค่าสถานะประจุกับแรงดันขณะเปิดวงจร โดยสมการของเส้นกราฟจากการทดลองทั้ง 5 ครั้งเป็นได้ดังนี้

➤ การทดลองครั้งที่ 1 (Test#1)

$$V_{oc} = (-7 \times 10^{-6})SOC^4 + 0.0004SOC^3 - 0.0074SOC^2 + 0.0689SOC + 3.4831 \quad (5.1)$$

➤ การทดลองครั้งที่ 2 (Test#2)

$$V_{oc} = (-8 \times 10^{-6})SOC^4 + 0.0005SOC^3 - 0.0083SOC^2 + 0.072SOC + 3.4902 \quad (5.2)$$

➤ การทดลองครั้งที่ 3 (Test#3)

$$V_{oc} = (-6 \times 10^{-6})SOC^4 + 0.0004SOC^3 - 0.0066SOC^2 + 0.0616SOC + 3.5095 \quad (5.3)$$

➤ การทดลองครั้งที่ 4 (Test#4)

$$V_{oc} = (-1 \times 10^{-5})SOC^4 + 0.0006SOC^3 - 0.011SOC^2 + 0.089SOC + 3.4781 \quad (5.4)$$

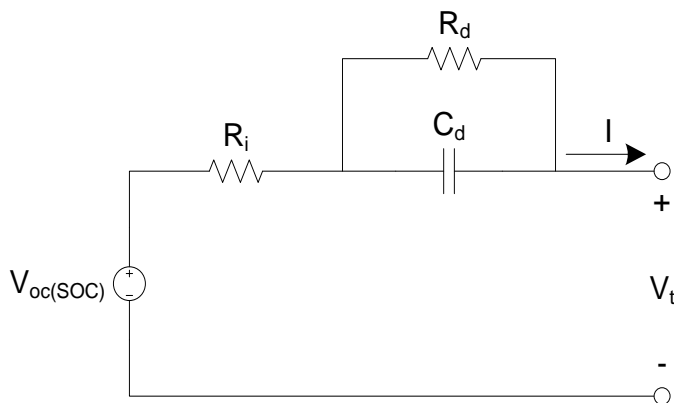
➤ การทดลองครั้งที่ 5 (Test#5)

$$V_{oc} = (-6 \times 10^{-6})SOC^4 + 0.0004SOC^3 - 0.0067SOC^2 + 0.0627SOC + 3.4996 \quad (5.5)$$

สมการที่ (5.1)-(5.5) สามารถนำไปใช้ในการประมาณค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ในรูปของเปอร์เซ็นต์ได้ อย่างไรก็ตามการประมาณค่าสถานะประจุจากการทดลองนี้ยังไม่สามารถนำไปใช้ในการประมาณแบบออนไลน์ได้ (ขณะที่แบตเตอรี่จ่ายกระแส) ทั้งนี้เนื่องจากไม่สามารถวัดแรงดันขณะเปิดวงจรได้โดยตรง ดังนั้นการประมาณค่าสถานะประจุแบบออนไลน์จึงต้องทราบค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลของแบตเตอรี่ด้วย ดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 2.5.2 เมื่อทราบค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลแล้ว สามารถนำมาเขียนสมการแรงดัน เพื่อที่จะหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขั้วที่วัดได้ขณะแบตเตอรี่จ่ายกระแสกับแรงดันขณะเปิดวงจรของแบตเตอรี่ได้และเมื่อทราบค่าแรงดันขณะเปิดวงจรขณะที่แบตเตอรี่จ่ายกระแสก็สามารถประมาณค่าสถานะประจุได้ การหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลของแบตเตอรี่จากการทดลองจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

4.2. การหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองวงจรสมมูลของแบตเตอรี่

การหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองวงจรสมมูลของแบตเตอรี่ในภาพประกอบที่ 4-3 สามารถหาได้จากผลตอบสนองแรงดันของแบตเตอรี่ ซึ่งค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลประกอบด้วยตัวต้านทาน R_i ตัวต้านทาน R_d และตัวเก็บประจุ C_d

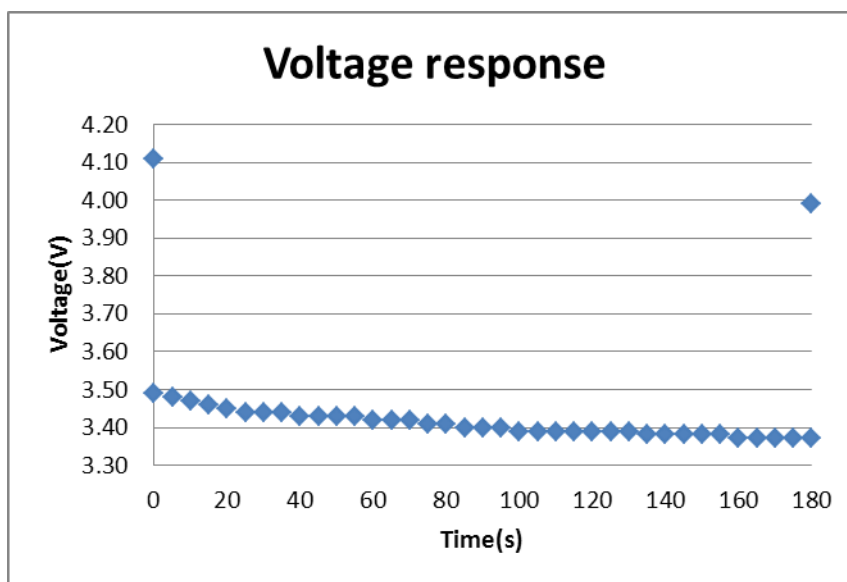


ภาพประกอบ 4-3 วงจรสมมูลของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน

กราฟผลตอบสนองแรงดันของแบตเตอรี่หาได้จากวงจรตรวจวัดค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ โดยให้แบตเตอรี่จ่ายกระแสคงที่ 1.02 A เป็นเวลา 180 วินาที ไมโครคอนโทรลเลอร์ทำหน้าที่ตรวจวัดสัญญาณแรงดันของแบตเตอรี่ขณะจ่ายกระแสทุก ๆ 5 วินาที เพื่อนำไปใช้เขียนกราฟผลตอบสนองแรงดันของแบตเตอรี่ได้ ซึ่งในการทดลองแบตเตอรี่หนึ่งก้อนสามารถเขียนกราฟผลตอบสนองแรงดันได้ทั้งหมด 18 กราฟ เพราะฉะนั้นแบตเตอรี่หนึ่งก้อนสามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองวงจรสมมูลได้ 18 ชุดเช่นกัน ในงานวิจัยชิ้นนี้ใช้แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนจำนวน 5 ก้อน ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว จากกราฟผลตอบสนองแรงดันของแบตเตอรี่สามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ได้ดังนี้

4.2.1 แบตเตอรี่ก้อนที่ 1 (Test#1)

- การดิสชาร์จครั้งที่ 1 (ค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ลดลงจาก 100% เหลือ 95%)
 ในระหว่างการดิสชาร์จครั้งที่ 1 สามารถเขียนกราฟผลตอบสนองแรงดันของแบตเตอรี่ก้อนที่ 1 ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4-4



ภาพประกอบ 4-4 ผลตอบสนองแรงดันของแบตเตอรี่ก้อนที่ 1
(ค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ลดลงจาก 100% เหลือ 95%)

จากภาพประกอบที่ 4-4 สามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของแบบจำลองวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ได้ดังนี้

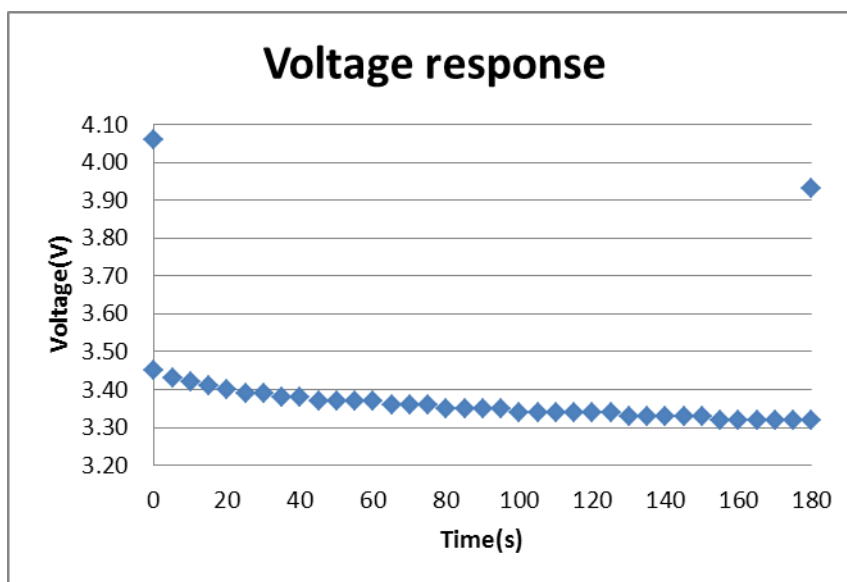
$$R_i = \frac{\Delta V}{I} = \frac{4.11 - 3.49}{1.02} = 0.607 \Omega$$

$$\tau = R_d C_d = 0.37 \times V_o = (0.37 \times 0.12) + 3.37 = 3.42 V \rightarrow 60 S$$

$$R_d = \frac{\Delta V}{I} = \frac{3.42 - 3.37}{1.02} = 0.049 \Omega$$

$$C_d = \frac{\tau}{R_d} = \frac{60}{0.049} = 1224.49 F$$

- การดิสชาร์จครั้งที่ 2 (ค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ลดลงจาก 95% เหลือ 90%) ในระหว่างการดิสชาร์จครั้งที่ 2 สามารถเขียนกราฟผลตอบสนองแรงดันของแบตเตอรี่ก้อนที่ 1 ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4-5



ภาพประกอบ 4-5 ผลตอบสนองแรงดันของแบตเตอรี่ก้อนที่ 1
(ค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ลดลงจาก 95% เหลือ 90%)

จากภาพประกอบที่ 4-5 สามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของแบบจำลองวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ได้ดังนี้

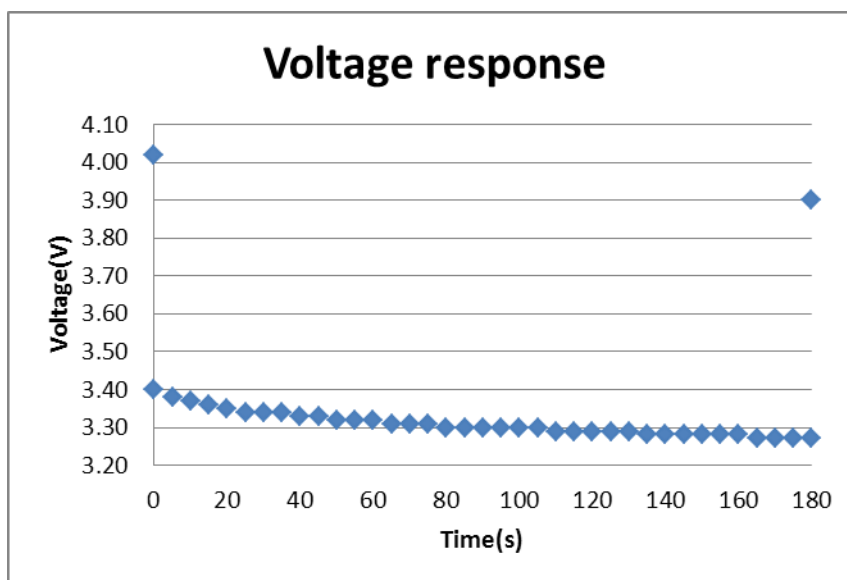
$$R_i = \frac{\Delta V}{I} = \frac{4.06 - 3.45}{1.02} = 0.598 \Omega$$

$$\tau = R_d C_d = 0.37 \times V_o = (0.37 \times 0.13) + 3.32 = 3.37V \rightarrow 45S$$

$$R_d = \frac{\Delta V}{I} = \frac{3.37 - 3.32}{1.02} = 0.049 \Omega$$

$$C_d = \frac{\tau}{R_d} = \frac{45}{0.049} = 918.37F$$

- การดิสชาร์จครั้งที่ 3 (ค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ลดลงจาก 90% เหลือ 85%) ในระหว่างการดิสชาร์จครั้งที่ 3 สามารถเขียนกราฟผลตอบสนองแรงดันของแบตเตอรี่ก้อนที่ 1 ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4-6



ภาพประกอบ 4-6 ผลตอบสนองแรงดันของแบตเตอรี่ก้อนที่ 1
(ค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ลดลงจาก 90% เหลือ 85%)

จากภาพประกอบที่ 4-6 สามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของแบบจำลองวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ได้ดังนี้

$$R_i = \frac{\Delta V}{I} = \frac{4.02 - 3.40}{1.02} = 0.607 \Omega$$

$$\tau = R_d C_d = 0.37 \times V_o = (0.37 \times 0.13) + 3.27 = 3.32V \rightarrow 50S$$

$$R_d = \frac{\Delta V}{I} = \frac{3.32 - 3.27}{1.02} = 0.049 \Omega$$

$$C_d = \frac{\tau}{R_d} = \frac{50}{0.049} = 1020.41F$$

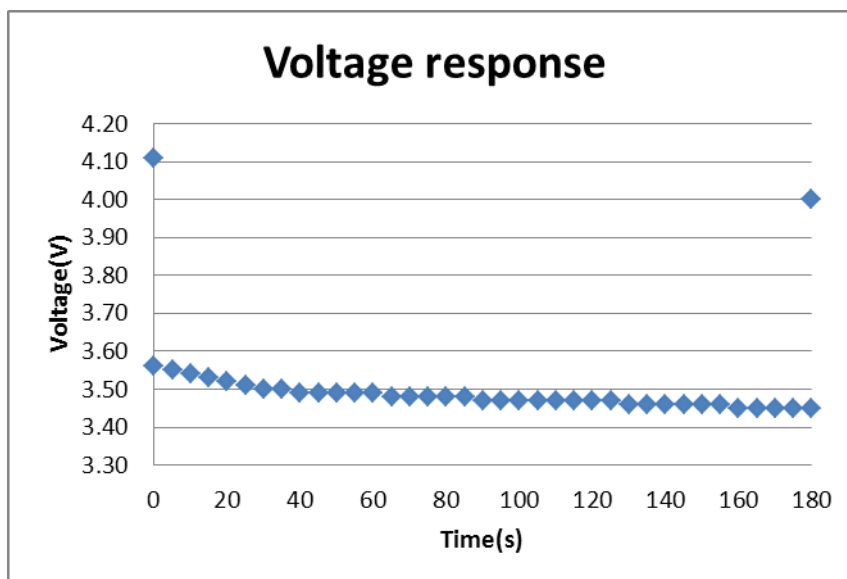
เมื่อทำการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแบบจำลองวงจรสมมูลจากการดิสชาร์จของแบตเตอรี่ก้อนที่ 1 จนครบ 18 รอบ (การดิสชาร์จครั้งที่ 1 จนถึงการดิสชาร์จครั้งที่ 18) จะได้ค่าพารามิเตอร์ทั้งหมด 18 ชุดเช่นกัน นำค่าพารามิเตอร์ทั้งหมด (ตัวต้านทาน R_i ตัวต้านทาน R_d และตัวเก็บประจุ C_d) มาหาค่าเฉลี่ย จะได้ค่าพารามิเตอร์สำหรับการประมาณค่าสถานะประจุค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแบตเตอรี่ก้อนที่ 1 สามารถนำมาหาค่าเฉลี่ยได้ ดังแสดงในตารางที่ 4-1

ตาราง 4-1 ค่าพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่ก้อนที่ 1 จากการคำนวณ

SOC (%)	R_i (Ω)	R_d (Ω)	C_d (F)	SOC (%)	R_i (Ω)	R_d (Ω)	C_d (F)
100%-95%	0.607	0.049	1224.49	55%-50%	0.617	0.039	897.44
95%-90%	0.598	0.049	918.37	50%-45%	0.607	0.039	769.23
90%-85%	0.607	0.049	1020.41	45%-40%	0.607	0.039	897.44
85%-80%	0.598	0.049	714.28	40%-35%	0.617	0.039	1025.64
80%-75%	0.607	0.049	1224.48	35%-30%	0.617	0.039	1153.85
75%-70%	0.598	0.049	714.28	30%-25%	0.627	0.039	1282.05
70%-65%	0.607	0.049	714.28	25%-20%	0.627	0.039	641.02
65%-60%	0.617	0.049	816.33	20%-15%	0.637	0.039	1428.57
60%-55%	0.607	0.039	641.02	15%-10%	0.637	0.039	859.87
				ค่าเฉลี่ย	0.613	0.043	941.28

4.2.2 แบตเตอรี่ก้อนที่ 2 (Test#2)

- การดิสชาร์จครั้งที่ 1 (ค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ลดลงจาก 100% เหลือ 95%)
 ในระหว่างการดิสชาร์จครั้งที่ 1 สามารถเขียนกราฟผลตอบสนองแรงดันของ
 แบตเตอรี่ก้อนที่ 2 ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4-7



ภาพประกอบ 4-7 ผลตอบสนองแรงดันของแบตเตอรี่ก้อนที่ 2
 (ค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ลดลงจาก 100% เหลือ 95%)

จากภาพประกอบที่ 4-7 สามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของแบบจำลอง วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ได้ดังนี้

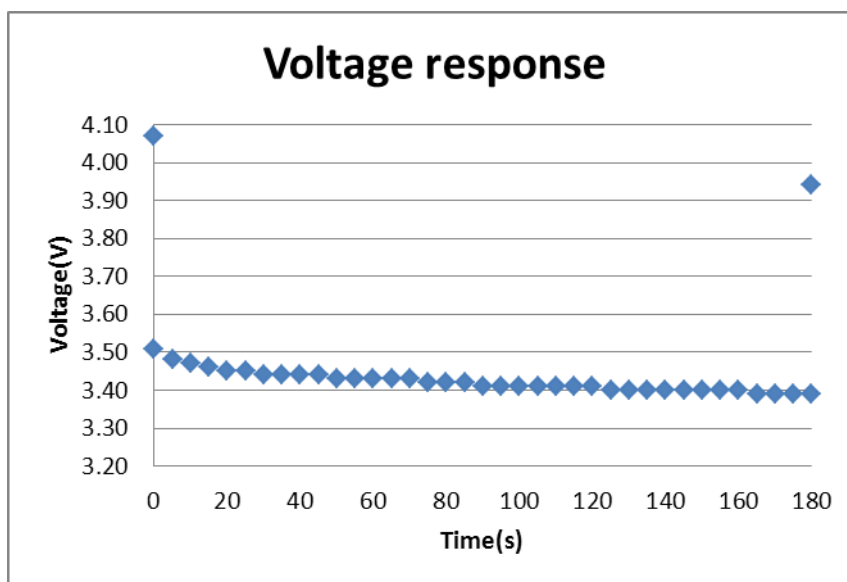
$$R_i = \frac{\Delta V}{I} = \frac{4.11 - 3.56}{1.02} = 0.539 \Omega$$

$$\tau = R_d C_d = 0.37 \times V_o = (0.37 \times 0.11) + 3.45 = 3.49V \rightarrow 40S$$

$$R_d = \frac{\Delta V}{I} = \frac{3.49 - 3.45}{1.02} = 0.039 \Omega$$

$$C_d = \frac{\tau}{R_d} = \frac{40}{0.039} = 1025.64F$$

- การดิสชาร์จครั้งที่ 2 (ค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ลดลงจาก 95% เหลือ 90%) ในระหว่างการดิสชาร์จครั้งที่ 2 สามารถเขียนกราฟผลตอบสนองแรงดันของแบตเตอรี่ก่อนที่ 2 ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4-8



ภาพประกอบ 4-8 ผลตอบสนองแรงดันของแบตเตอรี่ก่อนที่ 2 (ค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ลดลงจาก 95% เหลือ 90%)

จากภาพประกอบที่ 4-8 สามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของแบบจำลอง วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ได้ดังนี้

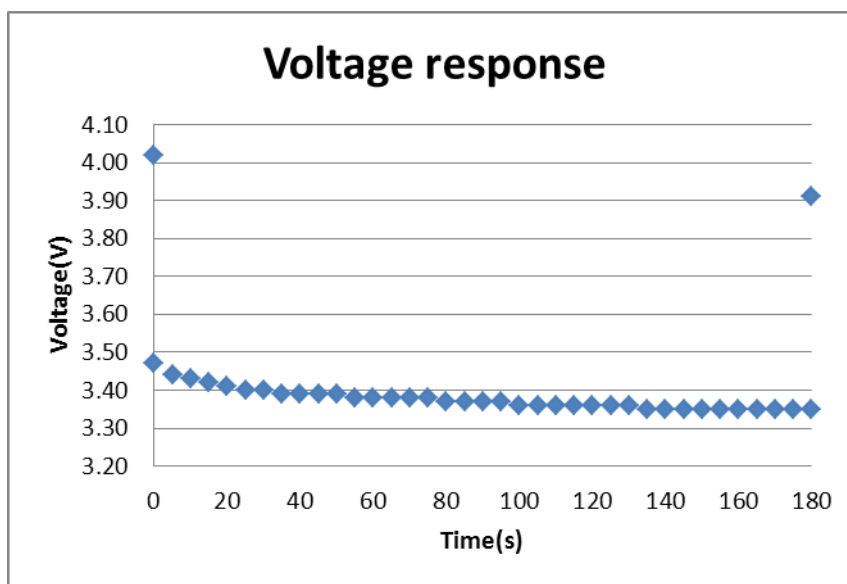
$$R_i = \frac{\Delta V}{I} = \frac{4.07 - 3.51}{1.02} = 0.549\Omega$$

$$\tau = R_d C_d = 0.37 \times V_o = (0.37 \times 0.12) + 3.39 = 3.43V \rightarrow 50S$$

$$R_d = \frac{\Delta V}{I} = \frac{3.43 - 3.39}{1.02} = 0.039\Omega$$

$$C_d = \frac{\tau}{R_d} = \frac{50}{0.039} = 1218.05F$$

- การดิสชาร์จครั้งที่ 3 (ค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ลดลงจาก 90% เหลือ 85%) ในระหว่างการดิสชาร์จครั้งที่ 3 สามารถเขียนกราฟผลตอบแทนแรงดันของแบตเตอรี่ก่อนที่ 2 ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4-9



ภาพประกอบ 4-9 ผลตอบแทนแรงดันของแบตเตอรี่ก่อนที่ 2 (ค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ลดลงจาก 90% เหลือ 85%)

จากภาพประกอบที่ 4-9 สามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของแบบจำลองวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ได้ดังนี้

$$R_i = \frac{\Delta V}{I} = \frac{4.02 - 3.47}{1.02} = 0.539\Omega$$

$$\tau = R_d C_d = 0.37 \times V_o = (0.37 \times 0.13) + 3.34 = 3.39V \rightarrow 35S$$

$$R_d = \frac{\Delta V}{I} = \frac{3.39 - 3.35}{1.02} = 0.039 \Omega$$

$$C_d = \frac{\tau}{R_d} = \frac{35}{0.039} = 897.44 F$$

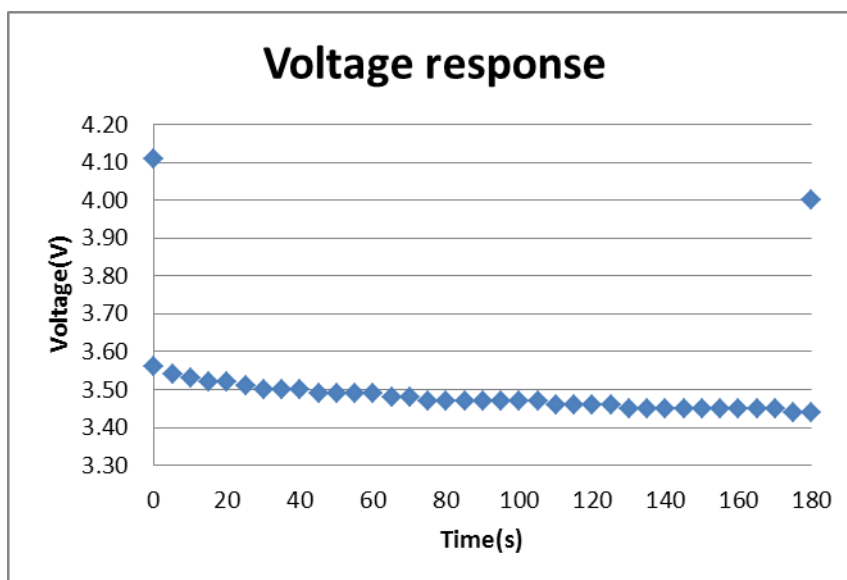
เมื่อทำการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแบบจำลองวงจรสมมูลจากการ
 คณิตศาสตร์ของแบตเตอรี่ก้อนที่ 2 จนครบ 18 รอบ จะได้ค่าพารามิเตอร์ทั้งหมด 18 ชุดเช่นเดียวกัน
 ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแบตเตอรี่ก้อนที่ 2 สามารถนำมาหาค่าเฉลี่ยได้ ดังแสดงในตารางที่
 4-2

ตาราง 4-2 ค่าพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่ก้อนที่ 2 จากการคำนวณ

SOC (%)	$R_i (\Omega)$	$R_d (\Omega)$	$C_d (F)$	SOC (%)	$R_i (\Omega)$	$R_d (\Omega)$	$C_d (F)$
100%-95%	0.539	0.039	1025.64	55%-50%	0.529	0.029	1206.90
95%-90%	0.549	0.039	1282.05	50%-45%	0.519	0.029	1379.31
90%-85%	0.539	0.039	897.44	45%-40%	0.519	0.029	1724.14
85%-80%	0.539	0.039	1122.45	40%-35%	0.519	0.029	1379.31
80%-75%	0.529	0.039	795.92	35%-30%	0.539	0.029	1379.31
75%-70%	0.539	0.039	897.44	30%-25%	0.529	0.029	1206.90
70%-65%	0.539	0.039	641.02	25%-20%	0.529	0.029	1551.72
65%-60%	0.529	0.039	769.23	20%-15%	0.539	0.029	1379.31
60%-55%	0.529	0.029	1379.31	15%-10%	0.529	0.029	1147.96
			ค่าเฉลี่ย		0.532	0.033	1176.12

4.2.3 แบตเตอรี่ก้อนที่ 3 (Test#3)

- การคิซซาร์จครั้งที่ 1 (ค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ลดลงจาก 100% เหลือ 95%)
 ในระหว่างการคิซซาร์จครั้งที่ 1 สามารถเขียนกราฟผลตอบแทนแรงดันของ
 แบตเตอรี่ก้อนที่ 3 ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4-10



ภาพประกอบ 4-10 ผลตอบสนองแรงดันของแบตเตอรี่ก้อนที่ 3
(ค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ลดลงจาก 100% เหลือ 95%)

จากภาพประกอบที่ 4-10 สามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของแบบจำลองวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ได้ดังนี้

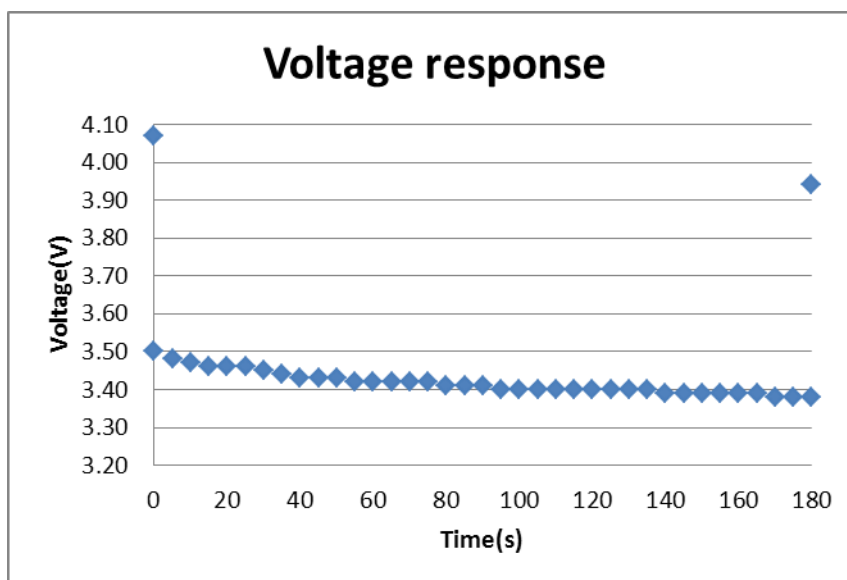
$$R_i = \frac{\Delta V}{I} = \frac{4.11 - 3.56}{1.02} = 0.539 \Omega$$

$$\tau = R_d C_d = 0.37 \times V_o = (0.37 \times 0.12) + 3.44 = 3.48 \text{V} \rightarrow 65 \text{S}$$

$$R_d = \frac{\Delta V}{I} = \frac{3.48 - 3.44}{1.02} = 0.039 \Omega$$

$$C_d = \frac{\tau}{R_d} = \frac{65}{0.039} = 1666.67 \text{F}$$

- การดิสชาร์จครั้งที่ 2 (ค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ลดลงจาก 95% เหลือ 90%) ในระหว่างการดิสชาร์จครั้งที่ 2 สามารถเขียนกราฟผลตอบสนองแรงดันของแบตเตอรี่ก้อนที่ 3 ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4-11



ภาพประกอบ 4-11 ผลตอบสนองแรงดันของแบตเตอรี่ก้อนที่ 3
(ค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ลดลงจาก 95% เหลือ 90%)

จากภาพประกอบที่ 4-11 สามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของแบบจำลองวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ได้ดังนี้

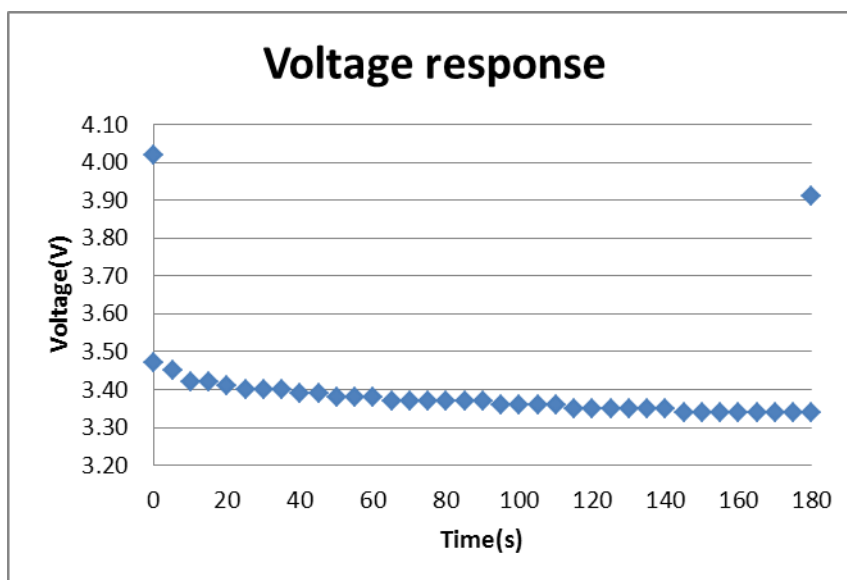
$$R_i = \frac{\Delta V}{I} = \frac{4.07 - 3.50}{1.02} = 0.559 \Omega$$

$$\tau = R_d C_d = 0.37 \times V_o = (0.37 \times 0.12) + 3.38 = 3.42V \rightarrow 55S$$

$$R_d = \frac{\Delta V}{I} = \frac{3.42 - 3.38}{1.02} = 0.039 \Omega$$

$$C_d = \frac{\tau}{R_d} = \frac{55}{0.039} = 1410.26F$$

- การดิสชาร์จครั้งที่ 3 (ค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ลดลงจาก 90% เหลือ 85%) ในระหว่างการดิสชาร์จครั้งที่ 3 สามารถเขียนกราฟผลตอบสนองแรงดันของแบตเตอรี่ก้อนที่ 3 ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4-12



ภาพประกอบ 4-12 ผลตอบสนองแรงดันของแบตเตอรี่ก้อนที่ 3
(ค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ลดลงจาก 90% เหลือ 85%)

จากภาพประกอบที่ 4-12 สามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของแบบจำลองวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ได้ดังนี้

$$R_i = \frac{\Delta V}{I} = \frac{4.02 - 3.47}{1.02} = 0.539 \Omega$$

$$\tau = R_d C_d = 0.37 \times V_o = (0.37 \times 0.13) + 3.34 = 3.38 V \rightarrow 40 S$$

$$R_d = \frac{\Delta V}{I} = \frac{3.38 - 3.34}{1.02} = 0.039 \Omega$$

$$C_d = \frac{\tau}{R_d} = \frac{40}{0.039} = 1025.64 F$$

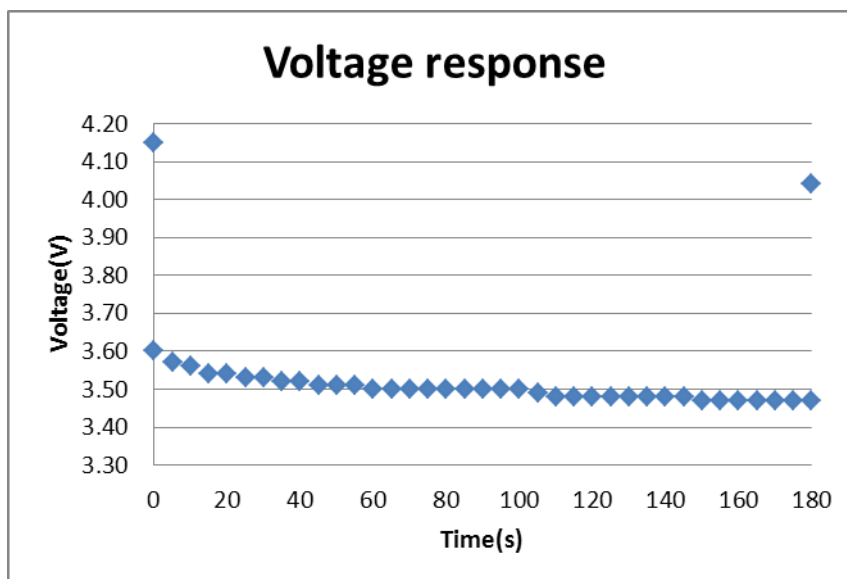
เมื่อทำการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแบบจำลองวงจรสมมูลจากการดิซชาร์จของแบตเตอรี่ก้อนที่ 3 จนครบ 18 รอบ จะได้ค่าพารามิเตอร์ทั้งหมด 18 ชุดเช่นเดียวกัน ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแบตเตอรี่ก้อนที่ 3 สามารถนำมาหาค่าเฉลี่ยได้ ดังแสดงในตารางที่

ตาราง 4-3 ค่าพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่ก้อนที่ 3 จากการคำนวณ

SOC (%)	R_1 (Ω)	R_d (Ω)	C_d (F)	SOC (%)	R_1 (Ω)	R_d (Ω)	C_d (F)
100%-95%	0.539	0.039	1666.67	55%-50%	0.549	0.029	1034.48
95%-90%	0.559	0.039	1410.26	50%-45%	0.549	0.029	862.07
90%-85%	0.539	0.039	1025.64	45%-40%	0.539	0.029	1206.90
85%-80%	0.539	0.039	897.44	40%-35%	0.539	0.029	1206.90
80%-75%	0.549	0.039	897.44	35%-30%	0.549	0.029	1397.31
75%-70%	0.539	0.039	1025.64	30%-25%	0.549	0.029	1397.31
70%-65%	0.549	0.039	1538.46	25%-20%	0.559	0.029	1206.90
65%-60%	0.539	0.039	1025.64	20%-15%	0.559	0.029	1397.31
60%-55%	0.549	0.029	1034.48	15%-10%	0.559	0.029	1016.95
				ค่าเฉลี่ย	0.547	0.033	1180.43

4.2.4 แบตเตอรี่ก้อนที่ 4 (Test#4)

- การดิสชาร์จครั้งที่ 1 (ค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ลดลงจาก 100% เหลือ 95%)
 ในระหว่างการดิสชาร์จครั้งที่ 1 สามารถเขียนกราฟผลตอบสนองแรงดันของ
 แบตเตอรี่ก้อนที่ 4 ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4-13



ภาพประกอบ 4-13 ผลตอบสนองแรงดันของแบตเตอรี่ก้อนที่ 4
 (ค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ลดลงจาก 100% เหลือ 95%)

จากภาพประกอบที่ 4-13 สามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของแบบจำลองวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ได้ดังนี้

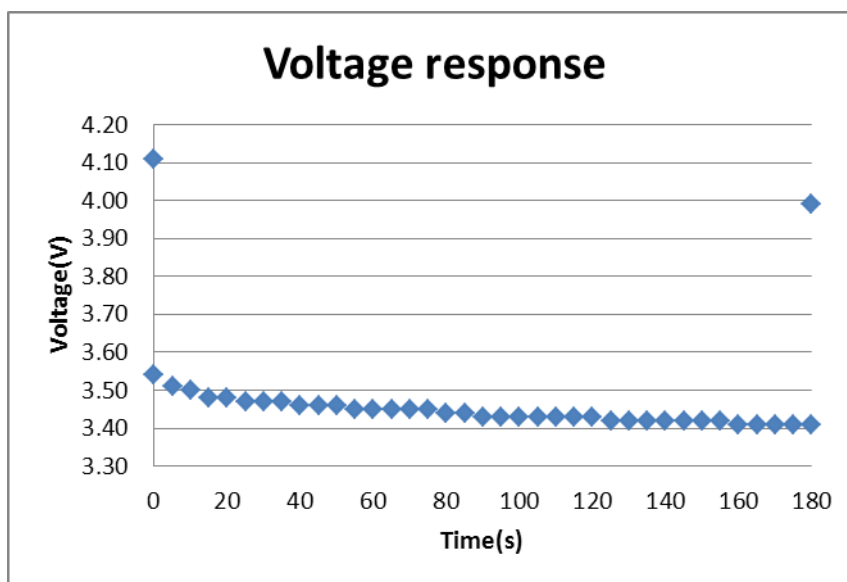
$$R_i = \frac{\Delta V}{I} = \frac{4.15 - 3.60}{1.02} = 0.539 \Omega$$

$$\tau = R_d C_d = 0.37 \times V_o = (0.37 \times 0.13) + 3.47 = 3.52V \rightarrow 35S$$

$$R_d = \frac{\Delta V}{I} = \frac{3.52 - 3.47}{1.02} = 0.049 \Omega$$

$$C_d = \frac{\tau}{R_d} = \frac{35}{0.049} = 714.28F$$

- การดิสชาร์จครั้งที่ 2 (ค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ลดลงจาก 95% เหลือ 90%) ในระหว่างการดิสชาร์จครั้งที่ 2 สามารถเขียนกราฟผลตอบสนองแรงดันของแบตเตอรี่ก่อนที่ 4 ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4-14



ภาพประกอบ 4-14 ผลตอบสนองแรงดันของแบตเตอรี่ก่อนที่ 4
(ค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ลดลงจาก 95% เหลือ 90%)

จากภาพประกอบที่ 4-14 สามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของแบบจำลองวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ได้ดังนี้

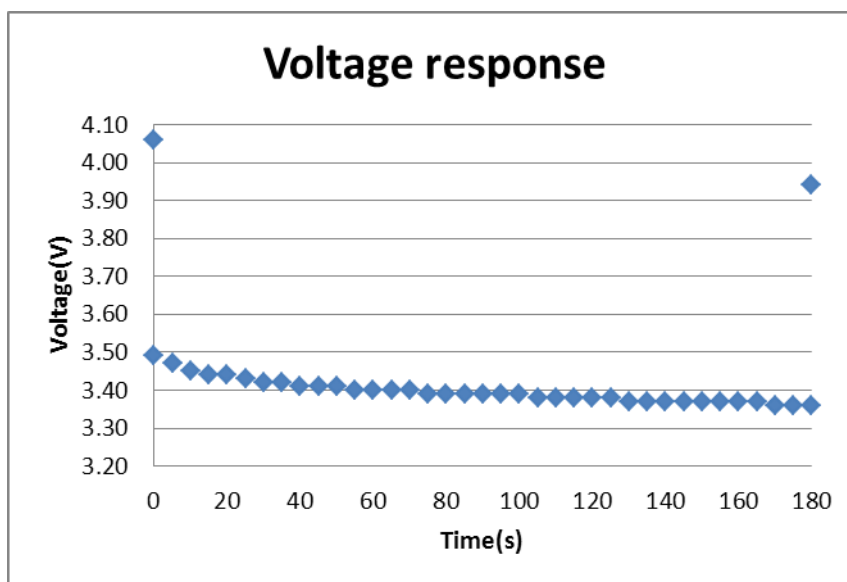
$$R_i = \frac{\Delta V}{I} = \frac{4.11 - 3.54}{1.02} = 0.559 \Omega$$

$$\tau = R_d C_d = 0.37 \times V_o = (0.37 \times 0.13) + 3.41 = 3.46 V \rightarrow 40 S$$

$$R_d = \frac{\Delta V}{I} = \frac{3.46 - 3.41}{1.02} = 0.049 \Omega$$

$$C_d = \frac{\tau}{R_d} = \frac{40}{0.049} = 816.33 F$$

- การดิสชาร์จครั้งที่ 3 (ค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ลดลงจาก 90% เหลือ 85%) ในระหว่างการดิสชาร์จครั้งที่ 3 สามารถเขียนกราฟผลตอบแทนแรงดันของแบตเตอรี่ก่อนที่ 4 ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4-15



ภาพประกอบ 4-15 ผลตอบแทนแรงดันของแบตเตอรี่ก่อนที่ 4 (ค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ลดลงจาก 90% เหลือ 85%)

จากภาพประกอบที่ 4-15 สามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของแบบจำลองวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ได้ดังนี้

$$R_i = \frac{\Delta V}{I} = \frac{4.06 - 3.49}{1.02} = 0.559 \Omega$$

$$\tau = R_d C_d = 0.37 \times V_o = (0.37 \times 0.13) + 3.36 = 3.41 V \rightarrow 40 S$$

$$R_d = \frac{\Delta V}{I} = \frac{3.41 - 3.36}{1.02} = 0.049 \Omega$$

$$C_d = \frac{\tau}{R_d} = \frac{40}{0.049} = 816.33 F$$

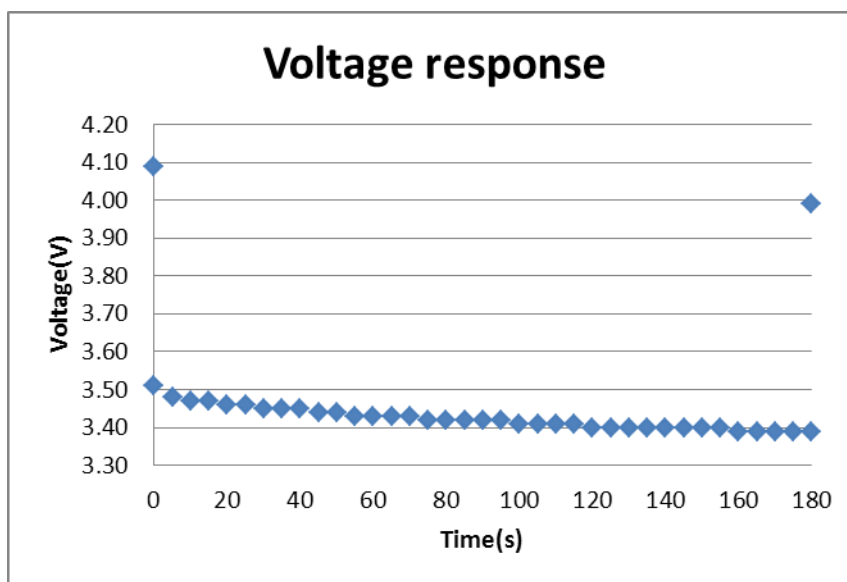
เมื่อทำการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแบบจำลองวงจรสมมูลจากการ
 คณิตศาสตร์ของแบตเตอรี่ก้อนที่ 4 จนครบ 18 รอบ จะได้ค่าพารามิเตอร์ทั้งหมด 18 ชุดเช่นเดียวกัน
 ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแบตเตอรี่ก้อนที่ 4 สามารถนำมาหาค่าเฉลี่ยได้ ดังแสดงในตารางที่
 4-4

ตาราง 4-4 ค่าพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่ก้อนที่ 4 จากการคำนวณ

SOC (%)	$R_i (\Omega)$	$R_d (\Omega)$	$C_d (F)$	SOC (%)	$R_i (\Omega)$	$R_d (\Omega)$	$C_d (F)$
100%-95%	0.539	0.049	714.28	55%-50%	0.529	0.039	897.44
95%-90%	0.559	0.049	816.33	50%-45%	0.529	0.039	1153.85
90%-85%	0.559	0.049	816.33	45%-40%	0.529	0.039	769.23
85%-80%	0.539	0.049	816.33	40%-35%	0.519	0.039	1025.64
80%-75%	0.529	0.049	816.33	35%-30%	0.519	0.039	512.82
75%-70%	0.519	0.049	612.24	30%-25%	0.519	0.039	897.44
70%-65%	0.519	0.049	612.24	25%-20%	0.529	0.039	641.02
65%-60%	0.519	0.049	714.28	20%-15%	0.519	0.039	1282.05
60%-55%	0.529	0.039	1025.64	15%-10%	0.529	0.039	897.44
				ค่าเฉลี่ย	0.530	0.043	834.50

4.2.5 แบตเตอรี่ก้อนที่ 5 (Test#5)

- การคิซซาร์จครั้งที่ 1 (ค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ลดลงจาก 100% เหลือ 95%)
 ในระหว่างการคิซซาร์จครั้งที่ 1 สามารถเขียนกราฟผลตอบแทนแรงดันของ
 แบตเตอรี่ก้อนที่ 5 ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4-16



ภาพประกอบ 4-16 ผลตอบสนองแรงดันของแบตเตอรี่ก้อนที่ 5
(ค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ลดลงจาก 100% เหลือ 95%)

จากภาพประกอบที่ 4-16 สามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของแบบจำลองวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ได้ดังนี้

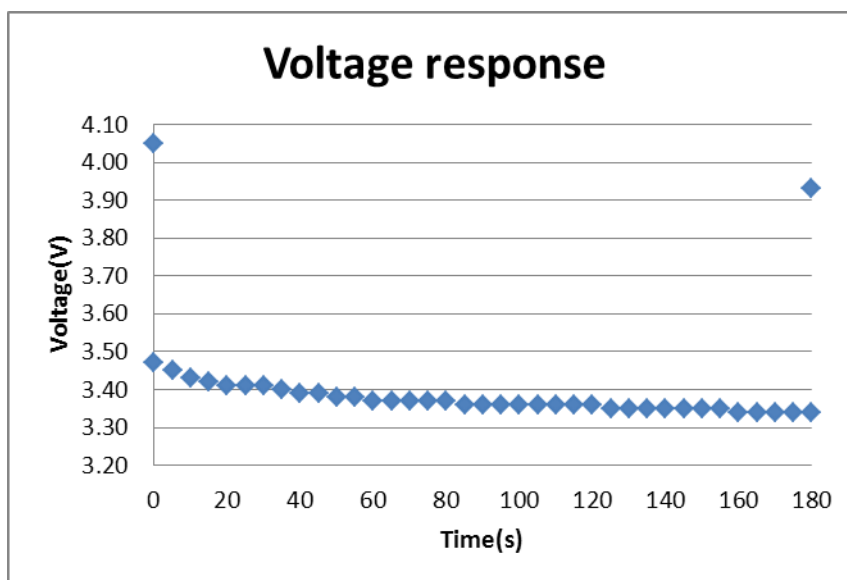
$$R_i = \frac{\Delta V}{I} = \frac{4.09 - 3.51}{1.02} = 0.569 \Omega$$

$$\tau = R_d C_d = 0.37 \times V_o = (0.37 \times 0.12) + 3.39 = 3.44V \rightarrow 45S$$

$$R_d = \frac{\Delta V}{I} = \frac{3.44 - 3.39}{1.02} = 0.049 \Omega$$

$$C_d = \frac{\tau}{R_d} = \frac{45}{0.049} = 918.37F$$

- การดิสชาร์จครั้งที่ 2 (ค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ลดลงจาก 95% เหลือ 90%) ในระหว่างการดิสชาร์จครั้งที่ 2 สามารถเขียนกราฟผลตอบสนองแรงดันของแบตเตอรี่ก้อนที่ 5 ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4-17



ภาพประกอบ 4-17 ผลตอบสนองแรงดันของแบตเตอรี่ก้อนที่ 5
(ค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ลดลงจาก 95% เหลือ 90%)

จากภาพประกอบที่ 4-17 สามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของแบบจำลองวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ได้ดังนี้

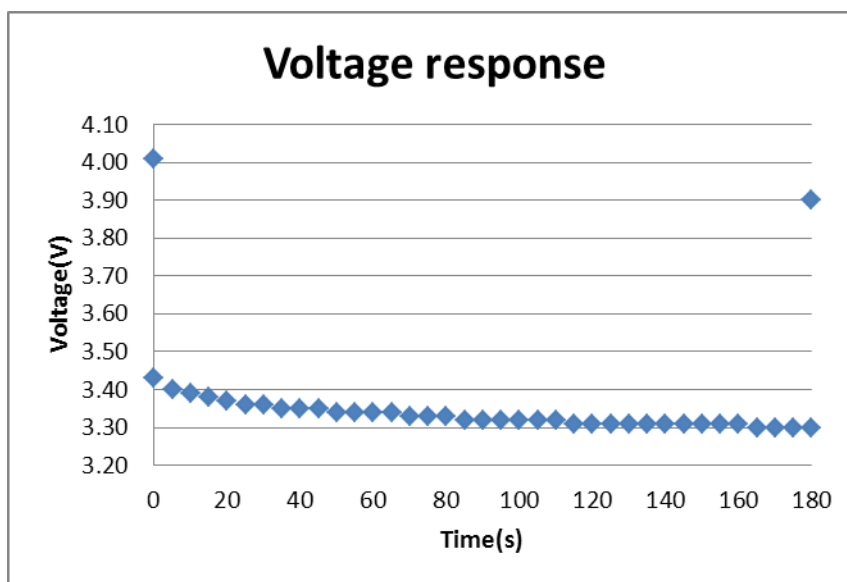
$$R_i = \frac{\Delta V}{I} = \frac{4.05 - 3.47}{1.02} = 0.569 \Omega$$

$$\tau = R_d C_d = 0.37 \times V_o = (0.37 \times 0.13) + 3.34 = 3.39V \rightarrow 40S$$

$$R_d = \frac{\Delta V}{I} = \frac{3.39 - 3.34}{1.02} = 0.049 \Omega$$

$$C_d = \frac{\tau}{R_d} = \frac{40}{0.049} = 816.33F$$

- การดิสชาร์จครั้งที่ 3 (ค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ลดลงจาก 90% เหลือ 85%) ในระหว่างการดิสชาร์จครั้งที่ 3 สามารถเขียนกราฟผลตอบสนองแรงดันของแบตเตอรี่ก้อนที่ 5 ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4-18



ภาพประกอบ 4-18 ผลตอบสนองแรงดันของแบตเตอรี่ก้อนที่ 5
(ค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ลดลงจาก 90% เหลือ 85%)

จากภาพประกอบที่ 4-18 สามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของแบบจำลองวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ได้ดังนี้

$$R_i = \frac{\Delta V}{I} = \frac{4.01 - 3.43}{1.02} = 0.569 \Omega$$

$$\tau = R_d C_d = 0.37 \times V_o = (0.37 \times 0.13) + 3.30 = 3.35V \rightarrow 35S$$

$$R_d = \frac{\Delta V}{I} = \frac{3.35 - 3.30}{1.02} = 0.049 \Omega$$

$$C_d = \frac{\tau}{R_d} = \frac{35}{0.049} = 714.28F$$

เมื่อทำการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแบบจำลองวงจรสมมูลจากการดิซชาร์จของแบตเตอรี่ก้อนที่ 5 จนครบ 18 รอบ จะได้ค่าพารามิเตอร์ทั้งหมด 18 ชุดเช่นเดียวกัน ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแบตเตอรี่ก้อนที่ 5 สามารถนำมาหาค่าเฉลี่ยได้ ดังแสดงในตารางที่

ตาราง 4-5 ค่าพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่ก้อนที่ 5 จากการคำนวณ

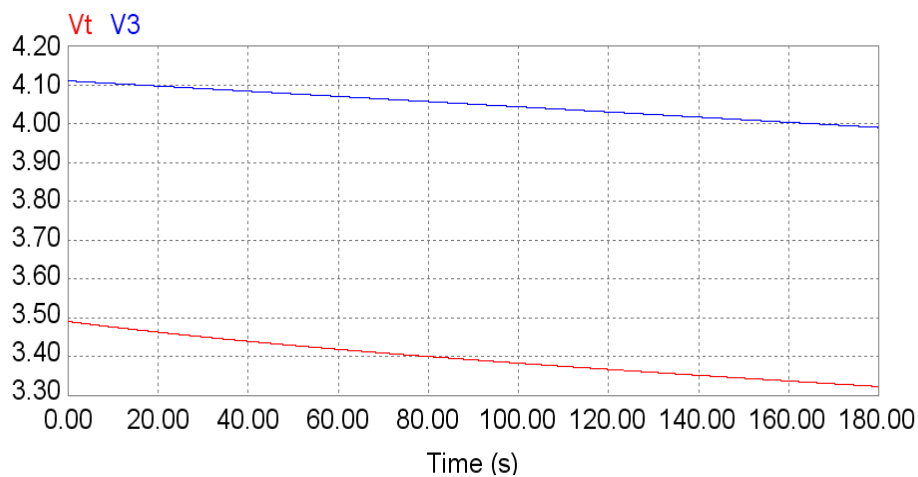
SOC (%)	$R_i (\Omega)$	$R_d (\Omega)$	$C_d (F)$	SOC (%)	$R_i (\Omega)$	$R_d (\Omega)$	$C_d (F)$
100%-95%	0.569	0.049	918.37	55%-50%	0.588	0.039	641.02
95%-90%	0.569	0.049	816.33	50%-45%	0.578	0.039	641.02
90%-85%	0.569	0.049	714.28	45%-40%	0.588	0.039	769.23
85%-80%	0.559	0.049	714.28	40%-35%	0.588	0.039	641.02
80%-75%	0.559	0.049	510.20	35%-30%	0.588	0.039	897.44
75%-70%	0.569	0.049	612.24	30%-25%	0.598	0.039	769.23
70%-65%	0.569	0.049	612.24	25%-20%	0.598	0.039	897.44
65%-60%	0.578	0.049	714.28	20%-15%	0.608	0.039	1153.85
60%-55%	0.578	0.039	512.82	15%-10%	0.598	0.039	897.44
			ค่าเฉลี่ย		0.581	0.043	739.14

4.3. การจำลองผลตอบสนองแรงดันของแบตเตอรี่

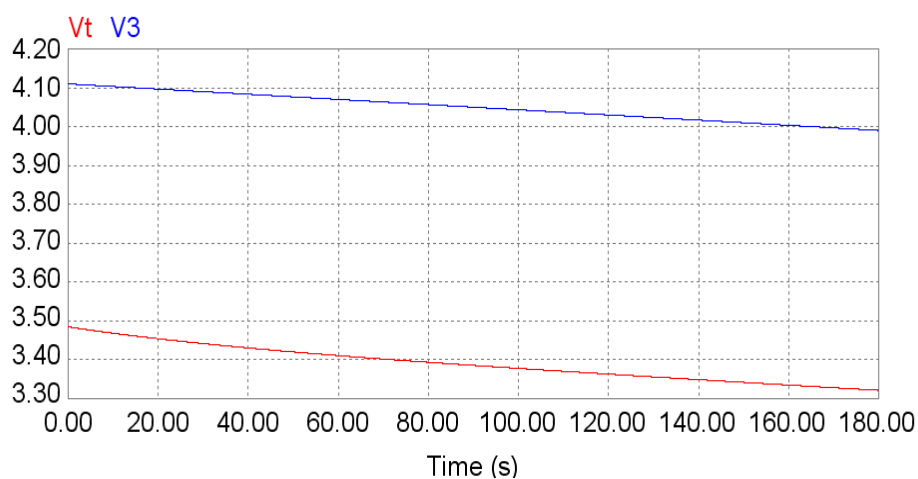
การจำลองผลตอบสนองแรงดันของแบตเตอรี่จะใช้โปรแกรม PSIM ในการจำลอง (ภาพประกอบ 3-10) ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ซึ่งจะเปรียบเทียบผลการจำลองระหว่างผลตอบสนองแรงดันจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณกับค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการเฉลี่ยของแบตเตอรี่ที่ใช้ในการทดลองทั้ง 5 ก้อน (ตาราง 4-1 ถึงตาราง 4-5) และใช้ในการพิจารณาเพื่อเลือกใช้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการประมาณค่าสถานะประจุแบบออนไลน์ต่อไป

4.3.1 แบตเตอรี่ก้อนที่ 1 (Test#1)

- การดิสชาร์จครั้งที่ 1 (ค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ลดลงจาก 100% เหลือ 95%) จากการดิสชาร์จครั้งที่ 1 สามารถจำลองผลตอบสนองแรงดันของแบตเตอรี่ก้อนที่ 1 ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4-19 ซึ่งประกอบด้วยผลตอบสนองแรงดันจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณ (ก) และผลตอบสนองแรงดันจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการเฉลี่ย (ข)



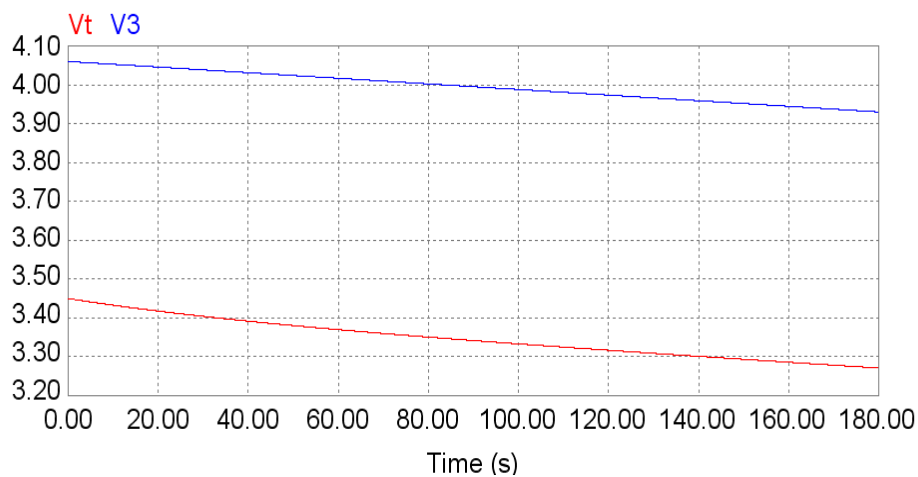
(ก) ค่าพารามิเตอร์จากการคำนวณ



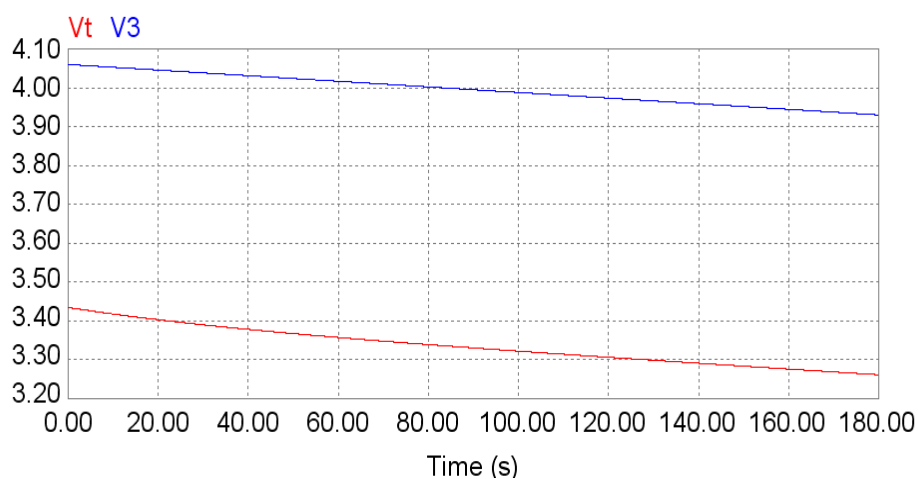
(ข) ค่าพารามิเตอร์จากการเฉลี่ย

ภาพประกอบ 4-19 ผลการจำลองผลตอบแทนแรงดันของแบตเตอรี่ก้อนที่ 1
(ค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ลดลงจาก 100% เหลือ 95%)

- การดิสชาร์จครั้งที่ 2 (ค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ลดลงจาก 95% เหลือ 90%)
จากการดิสชาร์จครั้งที่ 2 สามารถจำลองผลตอบแทนแรงดันของแบตเตอรี่ก้อนที่ 1 ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4-20 ซึ่งประกอบด้วยผลตอบแทนแรงดันจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณ (ก) และผลตอบแทนแรงดันจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการเฉลี่ย (ข)



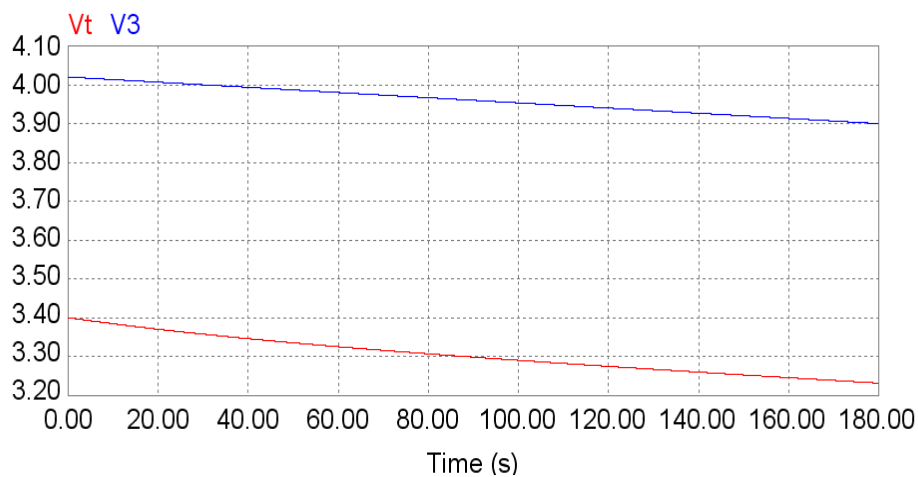
(ก) ค่าพารามิเตอร์จากการคำนวณ



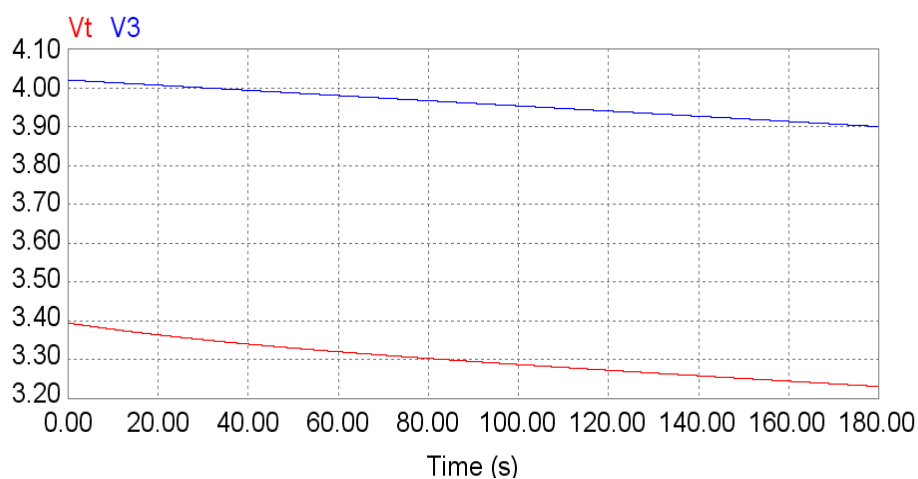
(ข) ค่าพารามิเตอร์จากการเฉลี่ย

ภาพประกอบ 4-20 ผลการจำลองผลตอบแทนแรงดันของแบตเตอรี่ก้อนที่ 1
(ค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ลดลงจาก 95% เหลือ 90%)

- การดิสชาร์จครั้งที่ 3 (ค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ลดลงจาก 90% เหลือ 85%)
จากการดิสชาร์จครั้งที่ 3 สามารถจำลองผลตอบแทนแรงดันของแบตเตอรี่ก้อนที่ 1 ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4-21 ซึ่งประกอบด้วยผลตอบแทนแรงดันจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณ (ก) และผลตอบแทนแรงดันจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการเฉลี่ย (ข)



(ก) ค่าพารามิเตอร์จากการคำนวณ

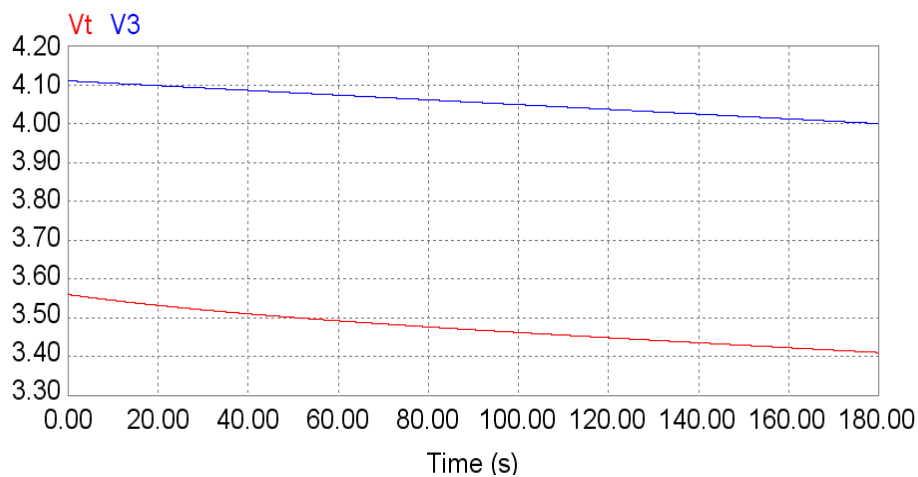


(ข) ค่าพารามิเตอร์จากการเฉลี่ย

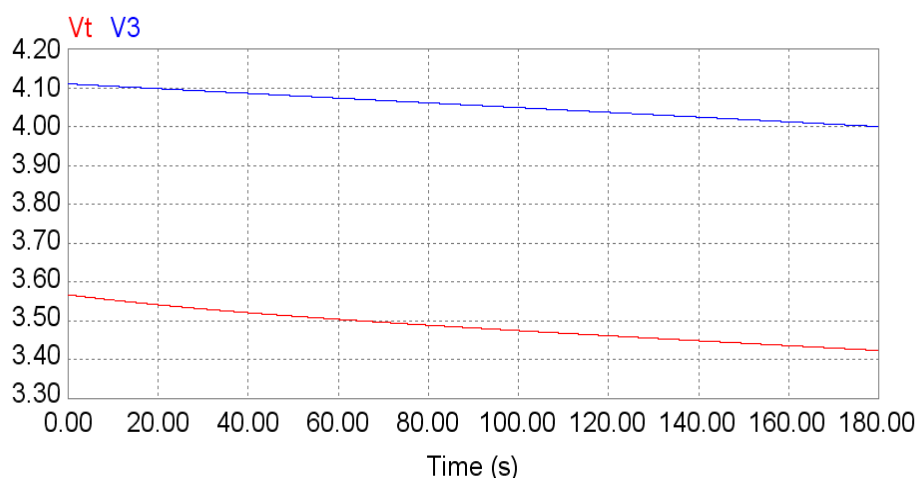
ภาพประกอบ 4-21 ผลการจำลองผลตอบสนองแรงดันของแบตเตอรี่ก้อนที่ 1
(ค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ลดลงจาก 90% เหลือ 85%)

4.3.2 แบตเตอรี่ก้อนที่ 2 (Test#2)

- การดิสชาร์จครั้งที่ 1 (ค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ลดลงจาก 100% เหลือ 95%)
จากการดิสชาร์จครั้งที่ 1 สามารถจำลองผลตอบสนองแรงดันของแบตเตอรี่ก้อนที่ 2 ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4-22 ซึ่งประกอบด้วยผลตอบสนองแรงดันจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณ (ก) และผลตอบสนองแรงดันจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการเฉลี่ย (ข)



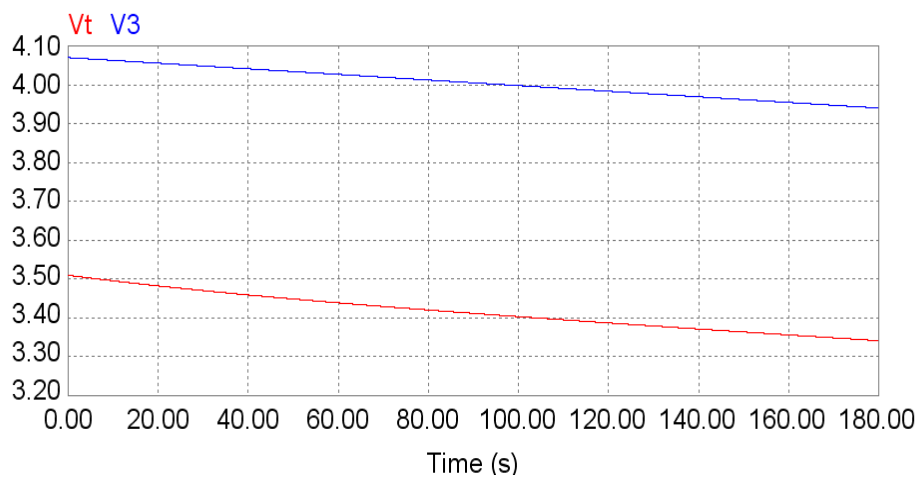
(ก) ค่าพารามิเตอร์จากการคำนวณ



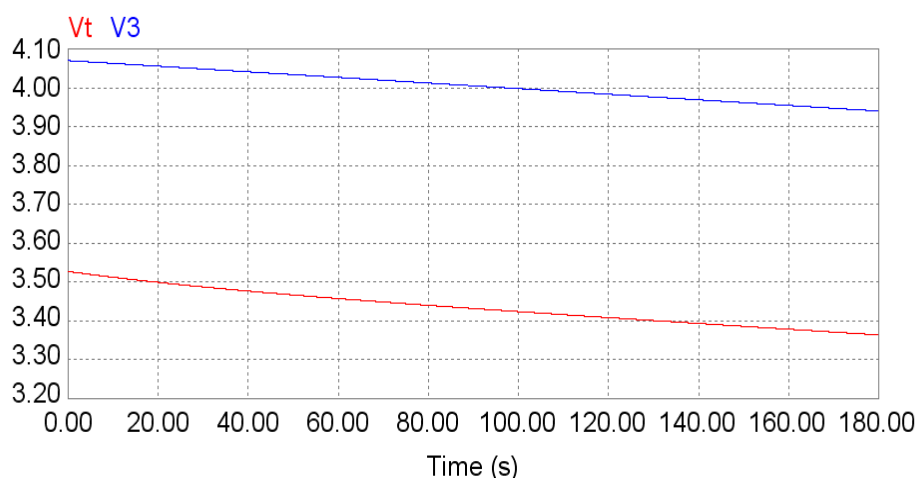
(ข) ค่าพารามิเตอร์จากการเฉลี่ย

ภาพประกอบ 4-22 ผลการจำลองผลตอบแทนแรงดันของแบตเตอรี่ก้อนที่ 2
(ค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ลดลงจาก 100% เหลือ 95%)

- การดิสชาร์จครั้งที่ 2 (ค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ลดลงจาก 95% เหลือ 90%)
จากการดิสชาร์จครั้งที่ 2 สามารถจำลองผลตอบแทนแรงดันของแบตเตอรี่ก้อนที่ 2 ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4-23 ซึ่งประกอบด้วยผลตอบแทนแรงดันจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณ (ก) และผลตอบแทนแรงดันจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการเฉลี่ย (ข)



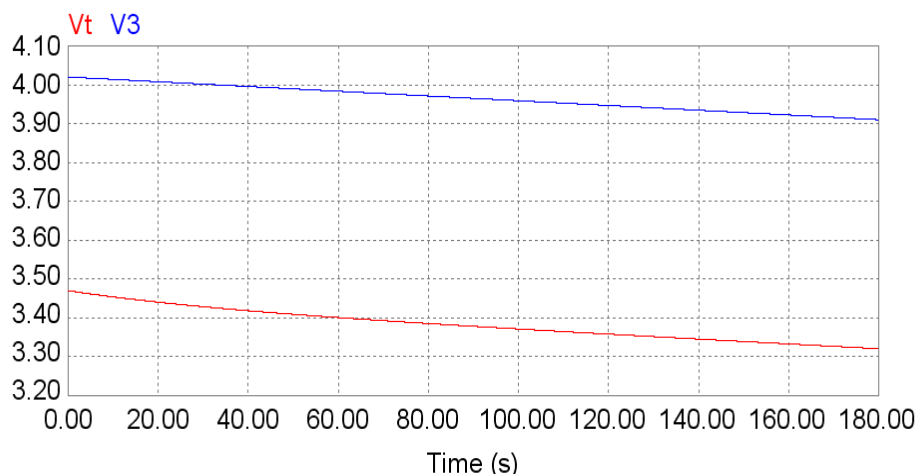
(ก) ค่าพารามิเตอร์จากการคำนวณ



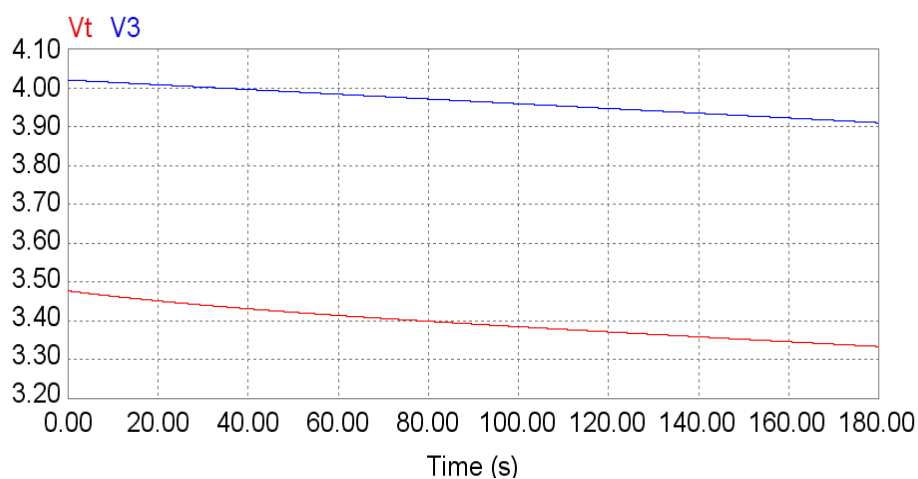
(ข) ค่าพารามิเตอร์จากการเฉลี่ย

ภาพประกอบ 4-23 ผลการจำลองผลตอบแทนแรงดันของแบตเตอรี่ก้อนที่ 2
(ค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ลดลงจาก 95% เหลือ 90%)

- การดิสชาร์จครั้งที่ 3 (ค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ลดลงจาก 90% เหลือ 85%)
จากการดิสชาร์จครั้งที่ 3 สามารถจำลองผลตอบแทนแรงดันของแบตเตอรี่ก้อนที่ 2 ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4-24 ซึ่งประกอบด้วยผลตอบแทนแรงดันจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณ (ก) และผลตอบแทนแรงดันจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการเฉลี่ย (ข)



(ก) ค่าพารามิเตอร์จากการคำนวณ

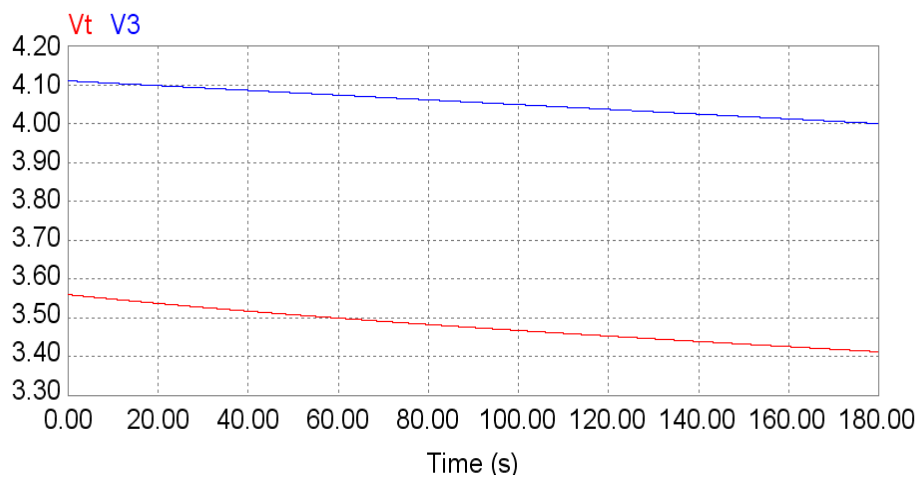


(ข) ค่าพารามิเตอร์จากการเฉลี่ย

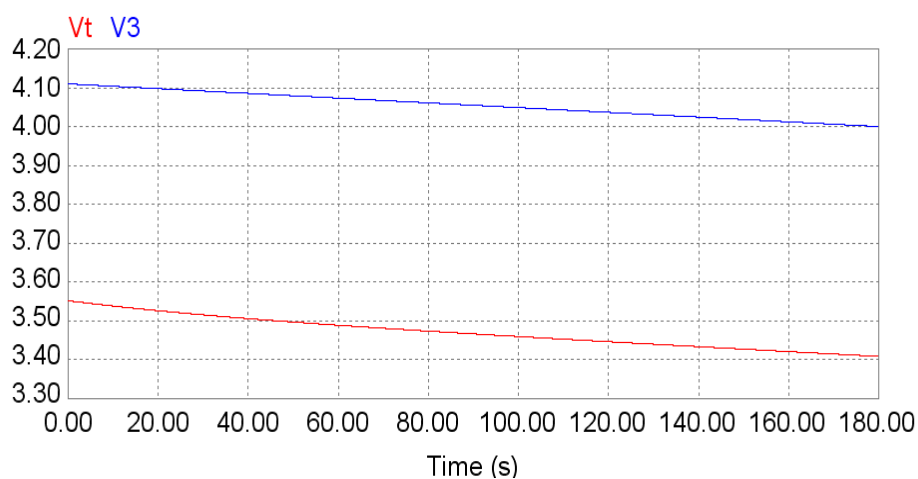
ภาพประกอบ 4-24 ผลการจำลองผลตอบสนองแรงดันของแบตเตอรี่ก้อนที่ 2
(ค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ลดลงจาก 90% เหลือ 85%)

4.3.3 แบตเตอรี่ก้อนที่ 3 (Test#3)

- การดิสชาร์จครั้งที่ 1 (ค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ลดลงจาก 100% เหลือ 95%) จากการดิสชาร์จครั้งที่ 1 สามารถจำลองผลตอบสนองแรงดันของแบตเตอรี่ก้อนที่ 3 ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4-25 ซึ่งประกอบด้วยผลตอบสนองแรงดันจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณ (ก) และผลตอบสนองแรงดันจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการเฉลี่ย (ข)



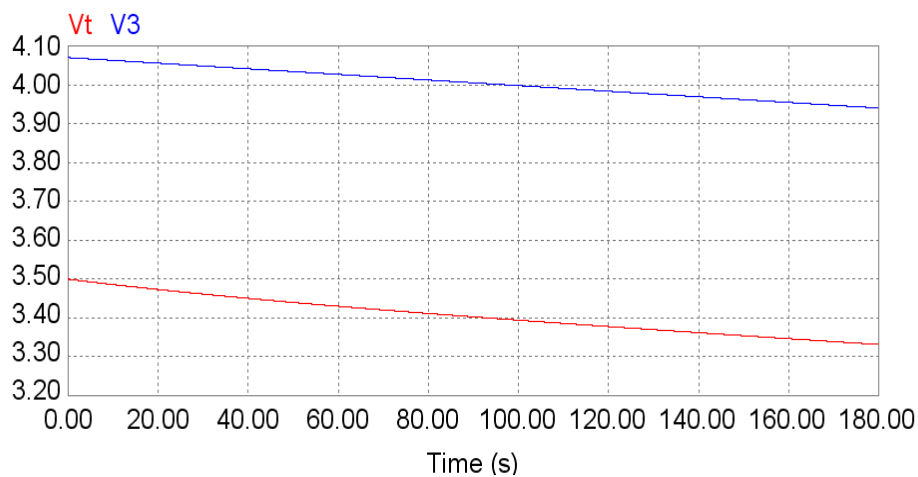
(ก) ค่าพารามิเตอร์จากการคำนวณ



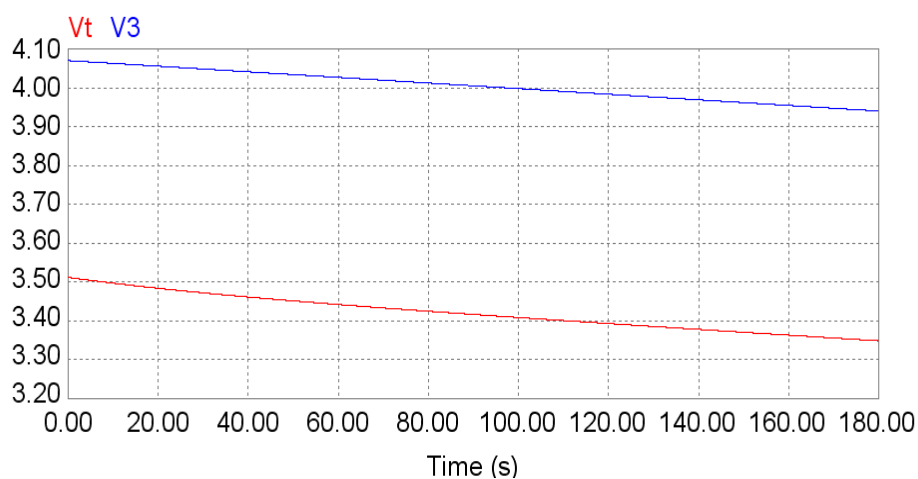
(ข) ค่าพารามิเตอร์จากการเฉลี่ย

ภาพประกอบ 4-25 ผลการจำลองผลตอบสนองแรงดันของแบตเตอรี่ก้อนที่ 3
(ค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ลดลงจาก 100% เหลือ 95%)

- การดิสชาร์จครั้งที่ 2 (ค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ลดลงจาก 95% เหลือ 90%)
จากการดิสชาร์จครั้งที่ 2 สามารถจำลองผลตอบสนองแรงดันของแบตเตอรี่ก้อนที่ 3 ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4-26 ซึ่งประกอบด้วยผลตอบสนองแรงดันจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณ (ก) และผลตอบสนองแรงดันจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการเฉลี่ย (ข)



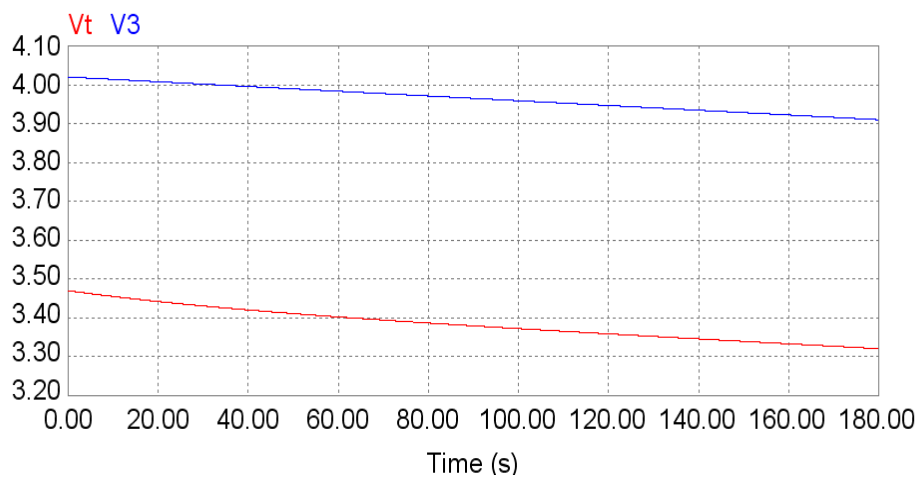
(ก) ค่าพารามิเตอร์จากการคำนวณ



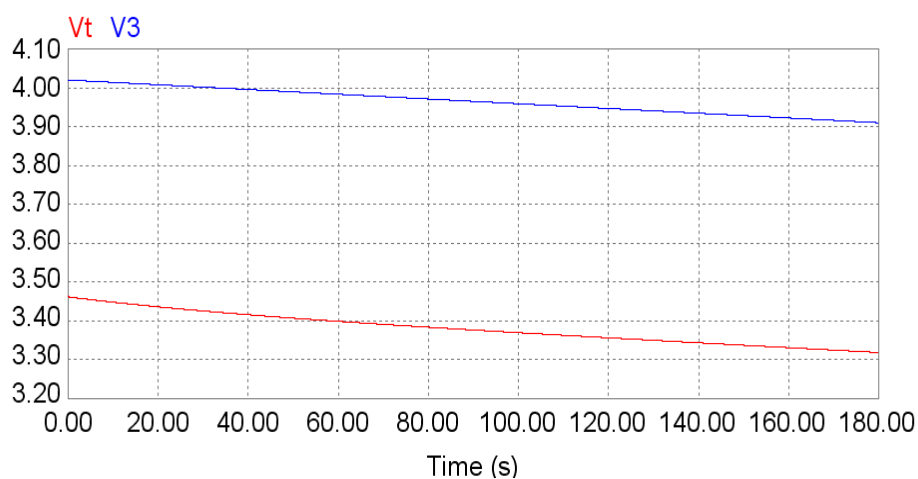
(ข) ค่าพารามิเตอร์จากการเฉลี่ย

ภาพประกอบ 4-26 ผลการจำลองผลตอบแทนแรงดันของแบตเตอรี่ก้อนที่ 3
(ค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ลดลงจาก 95% เหลือ 90%)

- การดิสชาร์จครั้งที่ 3 (ค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ลดลงจาก 90% เหลือ 85%)
จากการดิสชาร์จครั้งที่ 3 สามารถจำลองผลตอบแทนแรงดันของแบตเตอรี่ก้อนที่ 3 ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4-27 ซึ่งประกอบด้วยผลตอบแทนแรงดันจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณ (ก) และผลตอบแทนแรงดันจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการเฉลี่ย (ข)



(ก) ค่าพารามิเตอร์จากการคำนวณ

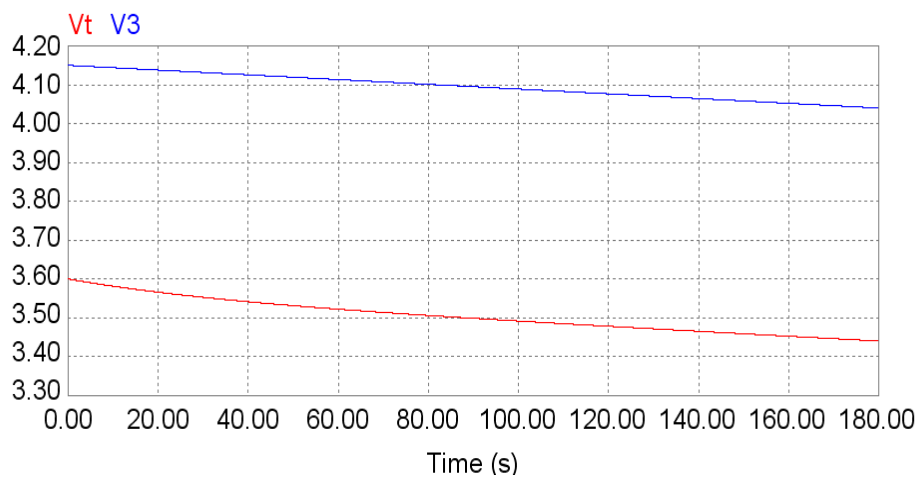


(ข) ค่าพารามิเตอร์จากการเฉลี่ย

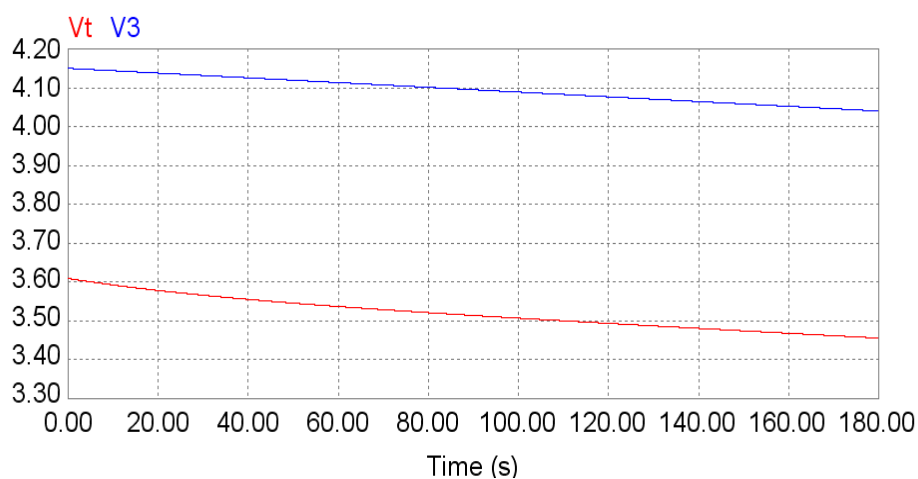
ภาพประกอบ 4-27 ผลการจำลองผลตอบสนองแรงดันของแบตเตอรี่ก้อนที่ 3
(ค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ลดลงจาก 90% เหลือ 85%)

4.3.4 แบตเตอรี่ก้อนที่ 4 (Test#4)

- การดิสชาร์จครั้งที่ 1 (ค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ลดลงจาก 100% เหลือ 95%)
จากการดิสชาร์จครั้งที่ 1 สามารถจำลองผลตอบสนองแรงดันของแบตเตอรี่ก้อนที่ 4 ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4-28 ซึ่งประกอบด้วยผลตอบสนองแรงดันจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณ (ก) และผลตอบสนองแรงดันจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการเฉลี่ย (ข)



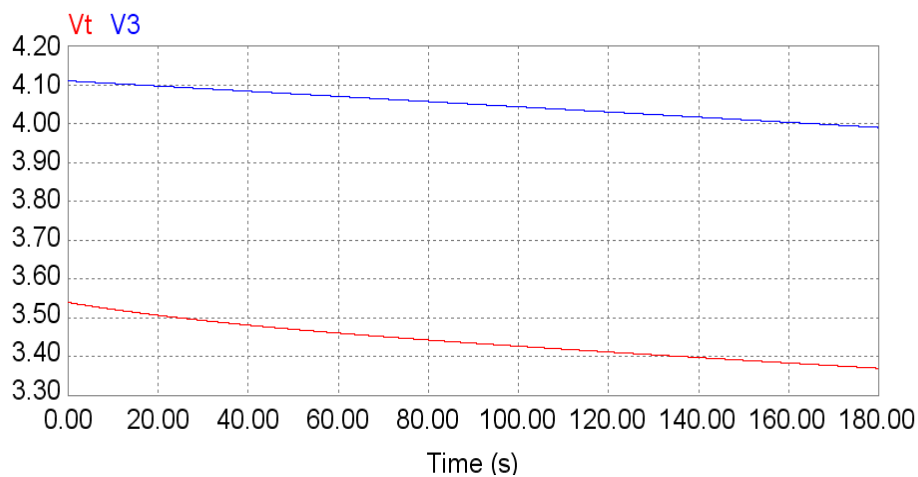
(ก) ค่าพารามิเตอร์จากการคำนวณ



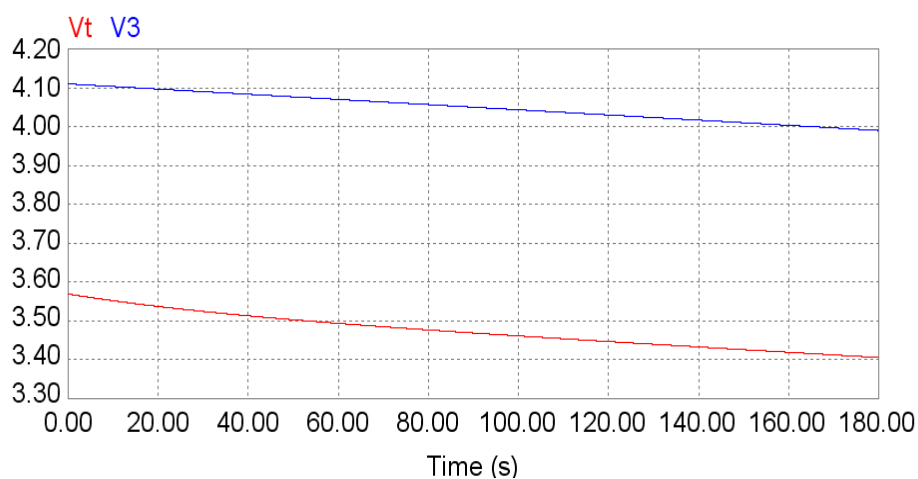
(ข) ค่าพารามิเตอร์จากการเฉลี่ย

ภาพประกอบ 4-28 ผลการจำลองผลตอบแทนแรงดันของแบตเตอรี่ก้อนที่ 4
(ค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ลดลงจาก 100% เหลือ 95%)

- การดิสชาร์จครั้งที่ 2 (ค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ลดลงจาก 95% เหลือ 90%)
จากการดิสชาร์จครั้งที่ 2 สามารถจำลองผลตอบแทนแรงดันของแบตเตอรี่ก้อนที่ 4 ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4-29 ซึ่งประกอบด้วยผลตอบแทนแรงดันจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณ (ก) และผลตอบแทนแรงดันจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการเฉลี่ย (ข)



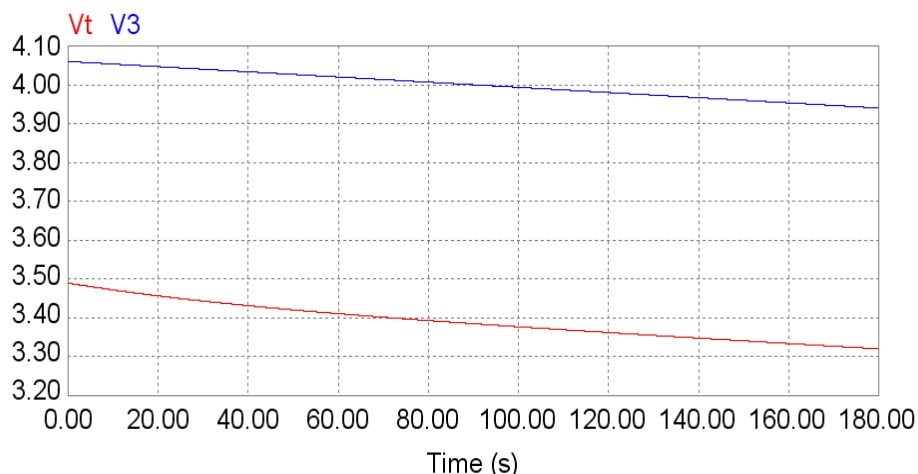
(ก) ค่าพารามิเตอร์จากการคำนวณ



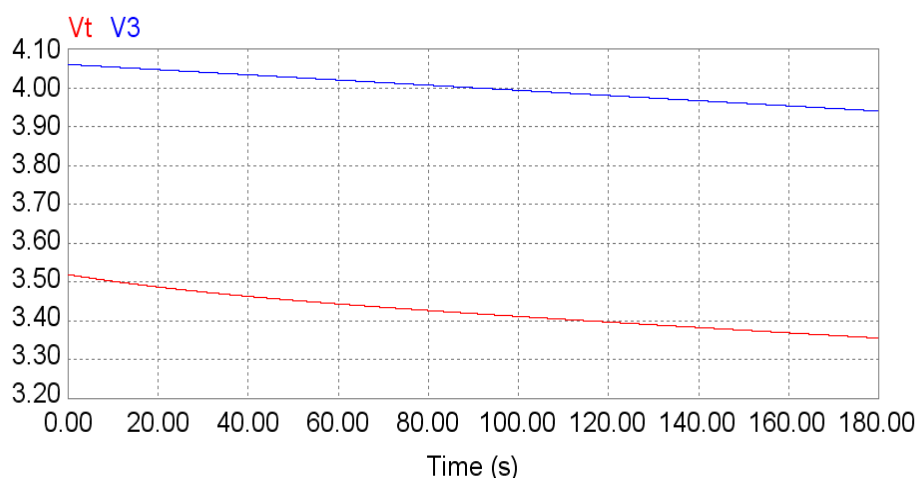
(ข) ค่าพารามิเตอร์จากการเฉลี่ย

ภาพประกอบ 4-29 ผลการจำลองผลตอบแทนแรงดันของแบตเตอรี่ก้อนที่ 4
(ค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ลดลงจาก 95% เหลือ 90%)

- การดิสชาร์จครั้งที่ 3 (ค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ลดลงจาก 90% เหลือ 85%)
จากการดิสชาร์จครั้งที่ 3 สามารถจำลองผลตอบแทนแรงดันของแบตเตอรี่ก้อนที่ 4 ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4-30 ซึ่งประกอบด้วยผลตอบแทนแรงดันจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณ (ก) และผลตอบแทนแรงดันจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการเฉลี่ย (ข)



(ก) ค่าพารามิเตอร์จากการคำนวณ

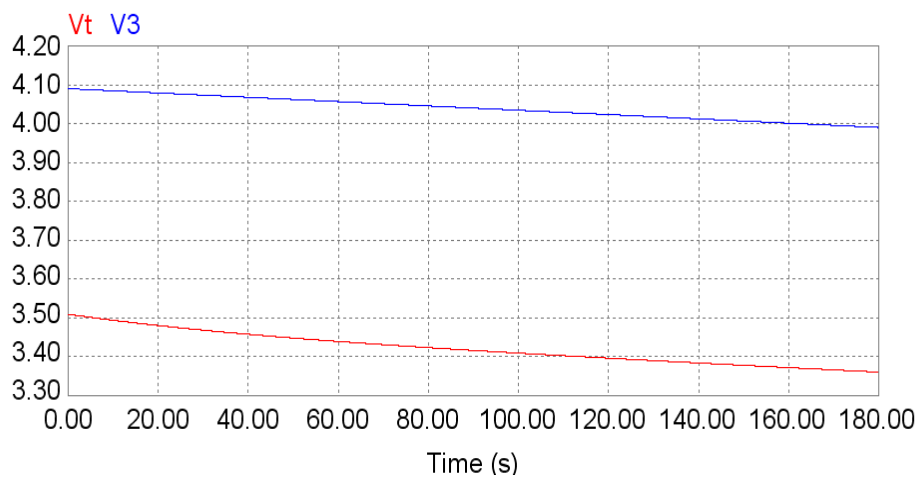


(ข) ค่าพารามิเตอร์จากการเฉลี่ย

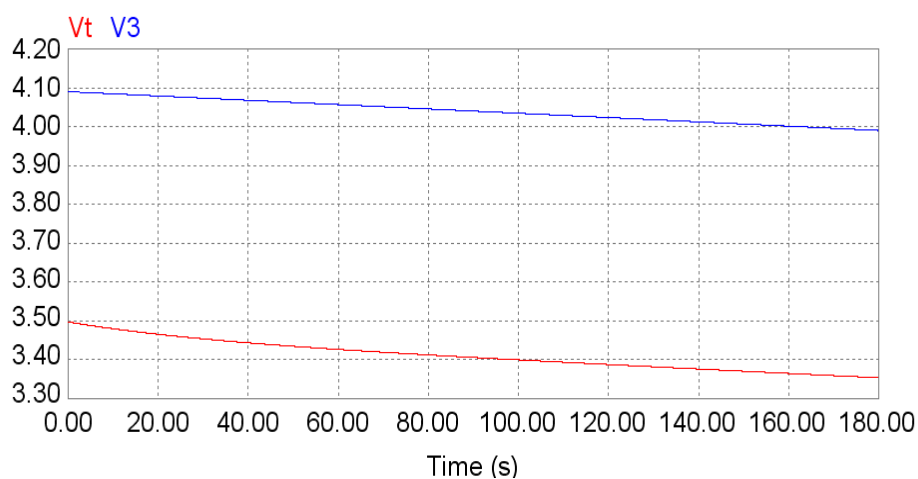
ภาพประกอบ 4-30 ผลการจำลองผลตอบสนองแรงดันของแบตเตอรี่ก้อนที่ 4
(ค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ลดลงจาก 90% เหลือ 85%)

4.3.5 แบตเตอรี่ก้อนที่ 5 (Test#5)

- การดิสชาร์จครั้งที่ 1 (ค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ลดลงจาก 100% เหลือ 95%) จากการดิสชาร์จครั้งที่ 1 สามารถจำลองผลตอบสนองแรงดันของแบตเตอรี่ก้อนที่ 5 ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4-31 ซึ่งประกอบด้วยผลตอบสนองแรงดันจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณ (ก) และผลตอบสนองแรงดันจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการเฉลี่ย (ข)



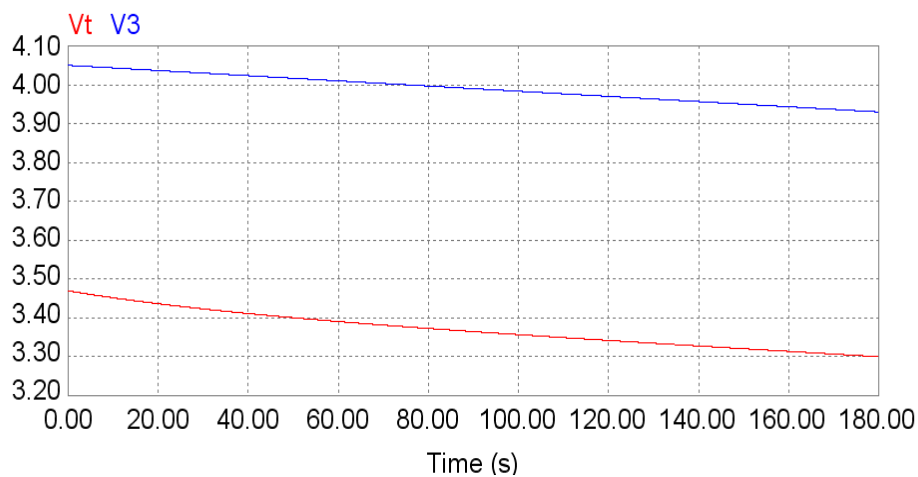
(ก) ค่าพารามิเตอร์จากการคำนวณ



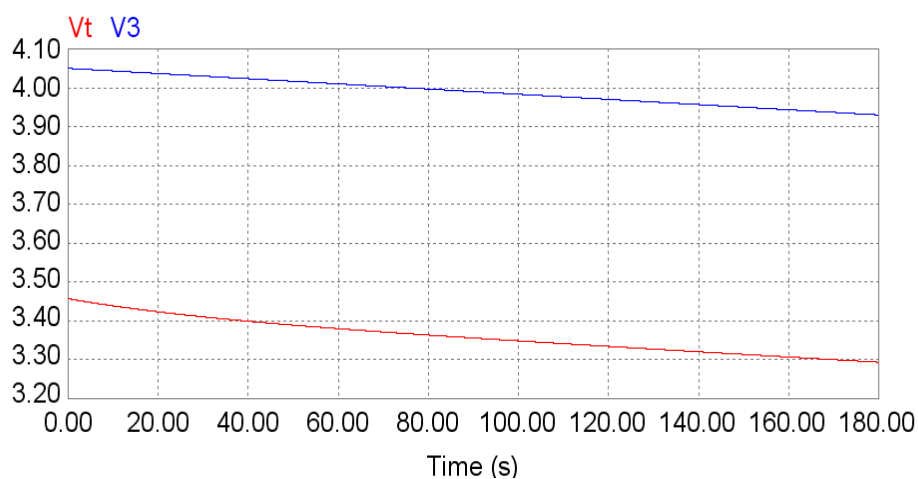
(ข) ค่าพารามิเตอร์จากการเฉลี่ย

ภาพประกอบ 4-31 ผลการจำลองผลตอบแทนแรงดันของแบตเตอรี่ก้อนที่ 5
(ค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ลดลงจาก 100% เหลือ 95%)

- การดิสชาร์จครั้งที่ 2 (ค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ลดลงจาก 95% เหลือ 90%)
จากการดิสชาร์จครั้งที่ 2 สามารถจำลองผลตอบแทนแรงดันของแบตเตอรี่ก้อนที่ 5 ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4-32 ซึ่งประกอบด้วยผลตอบแทนแรงดันจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณ (ก) และผลตอบแทนแรงดันจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการเฉลี่ย (ข)



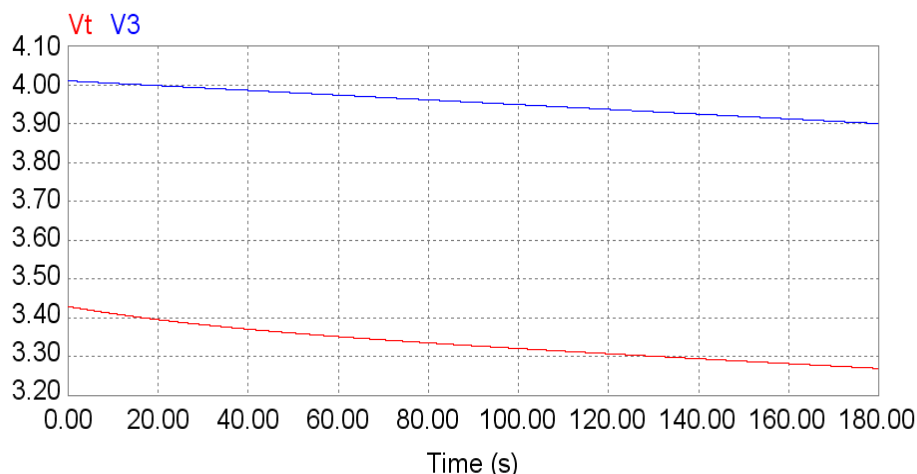
(ก) ค่าพารามิเตอร์จากการคำนวณ



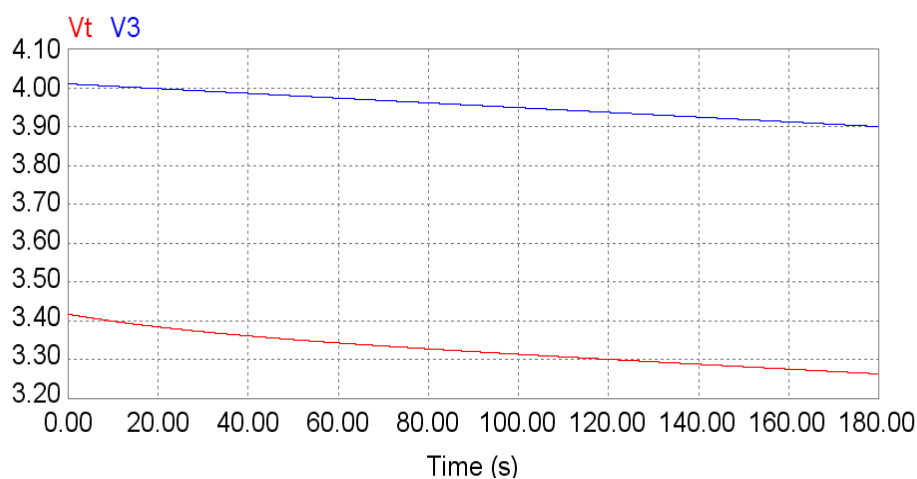
(ข) ค่าพารามิเตอร์จากการเฉลี่ย

ภาพประกอบ 4-32 ผลการจำลองผลตอบแทนแรงดันของแบตเตอรี่ก้อนที่ 5
(ค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ลดลงจาก 95% เหลือ 90%)

- การดิสชาร์จครั้งที่ 3 (ค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ลดลงจาก 90% เหลือ 85%)
จากการดิสชาร์จครั้งที่ 3 สามารถจำลองผลตอบแทนแรงดันของแบตเตอรี่ก้อนที่ 5 ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4-33 ซึ่งประกอบด้วยผลตอบแทนแรงดันจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณ (ก) และผลตอบแทนแรงดันจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการเฉลี่ย (ข)



(ก) ค่าพารามิเตอร์จากการคำนวณ



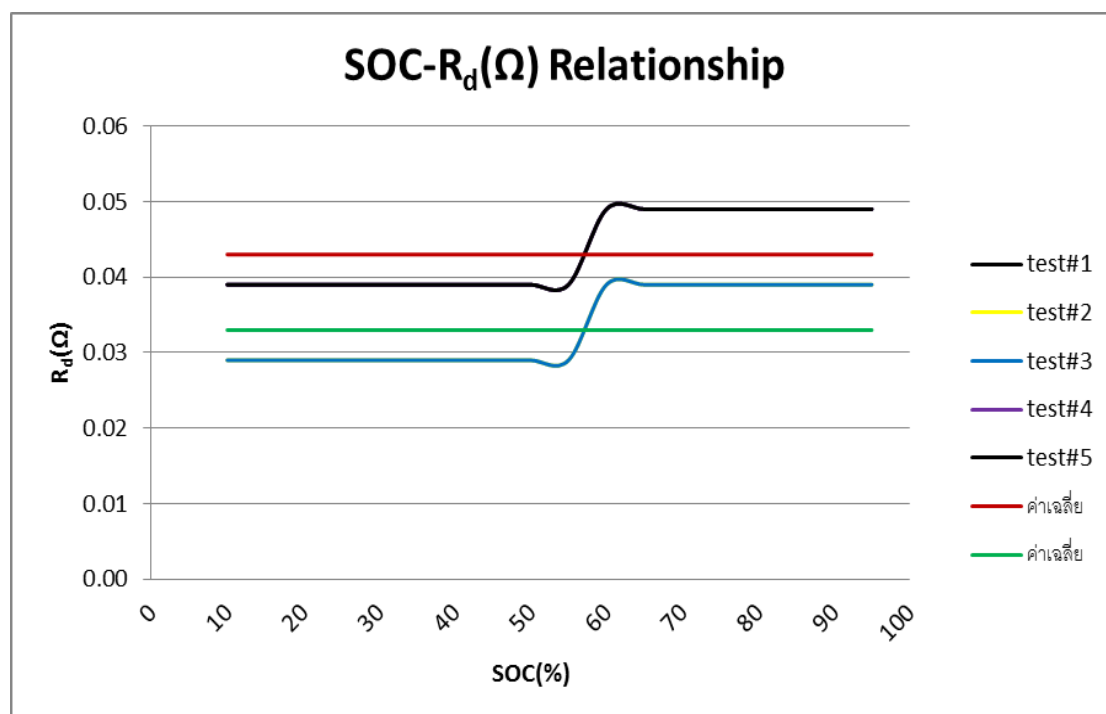
(ข) ค่าพารามิเตอร์จากการเฉลี่ย

ภาพประกอบ 4-33 ผลการจำลองผลตอบแทนแรงดันของแบตเตอรี่ก้อนที่ 5
(ค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ลดลงจาก 90% เหลือ 85%)

จากผลการจำลองผลตอบแทนแรงดันของแบตเตอรี่ทั้ง 5 ก้อน (ภาพประกอบ 4-19 ถึง 4-33) พบว่า ผลตอบแทนแรงดันจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณมีความใกล้เคียงกับค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการเฉลี่ย เนื่องจากค่าพารามิเตอร์จากการคำนวณและจากการเฉลี่ยมีค่าแตกต่างกันไม่มากนัก แต่อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาถึงพารามิเตอร์ที่จะนำไปใช้ในการประมาณค่าสถานะประจุแบบออนไลน์คือ ตัวต้านทาน R_i และตัวต้านทาน R_d พบว่า ค่าของตัวต้านทาน R_i จากการคำนวณจะมีความถูกต้องมากกว่าการเฉลี่ย สังเกตได้จากจุดเริ่มต้นของผลการจำลองผลตอบแทนแรงดัน (เริ่มต้นการดีสชาร์จ) จากการคำนวณจะตรงกับผลตอบแทนแรงดันของแบตเตอรี่ที่ได้จากการทดลองในหัวข้อที่ 4.2 (ภาพประกอบ 4-4 ถึง 4-18) ถึงแม้ว่าตัวต้านทาน R_i จากการคำนวณจะมีความถูกต้องมากกว่าการเฉลี่ย แต่ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ตัวต้านทาน R_i จาก

การเฉลี่ยเพื่อนำไปใช้ในการประมาณค่าสถานะประจุแบบออนไลน์ เพราะจุดเริ่มต้นของผลการจำลองผลตอบสนองแรงดันจากการคำนวณกับการเฉลี่ยมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยมาก จึงไม่ส่งผลกระทบต่อความแม่นยำในการประมาณค่าสถานะประจุแบบออนไลน์ อีกทั้งยังลดความซับซ้อนในการเขียนโปรแกรมประมาณค่าสถานะประจุแบบออนไลน์อีกด้วย ส่วนค่าของตัวต้านทาน R_d จากการเฉลี่ยจะมีความถูกต้องมากกว่าการคำนวณ สังเกตได้จากจุดเริ่มต้นของผลตอบสนองแรงดันเมื่อเข้าสู่สภาวะอยู่ตัว (ค่าคงที่เวลา) จากการเฉลี่ยจะใกล้เคียงกับผลตอบสนองแรงดันของแบตเตอรี่ที่ได้จากการทดลองในหัวข้อที่ 4.2 (ภาพประกอบ 4-4 ถึง 4-18) มากกว่าการคำนวณ ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ค่าของตัวต้านทาน R_d จากการเฉลี่ยเพื่อนำไปใช้ในการประมาณค่าสถานะประจุแบบออนไลน์

เมื่อนำค่าของตัวต้านทาน R_d จากการคำนวณและจากการเฉลี่ยของแบตเตอรี่ทั้ง 5 ก้อนมาเขียนกราฟ ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4-34



ภาพประกอบ 4-34 ตัวต้านทาน R_d ของแบตเตอรี่ทั้ง 5 ก้อน

จากภาพประกอบที่ 4-34 ค่าของตัวต้านทาน R_d จากการคำนวณของแบตเตอรี่ก้อนที่ 1 (Test#1) แบตเตอรี่ก้อนที่ 4 (Test#4) และแบตเตอรี่ก้อนที่ 5 (Test#5) พบว่าเส้นกราฟมีลักษณะเป็นเส้นเดียวกัน ทำให้ค่าของตัวต้านทาน R_d จากการเฉลี่ยของแบตเตอรี่ก้อนที่ 1, 4 และ 5 เท่ากัน ด้วย ส่วนค่าของตัวต้านทาน R_d จากการคำนวณของแบตเตอรี่ก้อนที่ 2 (Test#2) และแบตเตอรี่ก้อน

ที่ 3 (Test#3) ก็มีเส้นกราฟมีลักษณะเป็นเส้นเดียวกัน ทำให้ค่าของตัวต้านทาน R_d จากการเฉลี่ยของแบบเตอรีที่ 2 และ 3 เท่ากันด้วยเช่นกัน ดังนั้นเมื่อเลือกใช้ค่าของตัวต้านทาน R_d จากการเฉลี่ยของแบบเตอรีทั้ง 5 ก่อนในการประมาณค่าสถานะประจุแบบออนไลน์แทบจะไม่ส่งผลกระทบต่อค่าความถูกต้องในการประมาณค่าสถานะประจุเลย เพราะว่าค่าจากการเฉลี่ยแตกต่างกับค่าจากการคำนวณเพียงเล็กน้อยเท่านั้น อีกทั้งในการประมาณค่าสถานะประจุแบบออนไลน์เมื่อนำค่าของตัวต้านทาน R_d จากการเฉลี่ยมาคูณกับกระแสของแบบเตอรี (ขณะจ่ายให้เซนเซอร์โหนด) ซึ่งแบบเตอรีจ่ายกระแสน้อยมาก ดังนั้นเมื่อนำมาคูณกันแล้วก็จะไม่ส่งผลกระทบต่อค่าความถูกต้องด้วยเช่นกัน

4.4. การทดลองการประมาณค่าสถานะประจุแบบออนไลน์

การประมาณค่าสถานะประจุแบบออนไลน์จะใช้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขั้ว (ขณะแบบเตอรีจ่ายกระแส) กับแรงดันขณะเปิดวงจรจากแบบจำลองวงจรสมมูลของแบบเตอรีและใช้การประมาณค่าสถานะประจุจากความสัมพันธ์ระหว่างค่าสถานะประจุกับแรงดันขณะเปิดวงจรจากการทดลองในหัวข้อที่ 4.1 ซึ่งวิธีการประมาณค่าสถานะประจุแบบออนไลน์ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 3.3 การประมาณค่าสถานะประจุแบบออนไลน์ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC16F877 ทำหน้าที่ประมวลผล และใช้แบบเตอรีที่ 3 มาทำการทดลอง ในการทดลองจะเปรียบเทียบระหว่างการประมาณค่าสถานะประจุแบบออนไลน์จากไมโครคอนโทรลเลอร์และการประมาณค่าสถานะประจุจากการคำนวณที่ได้จากการวัดจริงว่ามีค่าตรงกันหรือไม่ โดยจะทำการทดลองขณะแบบเตอรีจ่ายกระแสแตกต่างกันตั้งแต่ 0 ถึง 10 A ดังแสดงในตารางที่ 4-6 จากผลการทดลองพบว่าเมื่อแบบเตอรีจ่ายกระแสในระดับที่แตกต่างกัน ผลการประมาณค่าสถานะประจุแบบออนไลน์จากไมโครคอนโทรลเลอร์จะมีค่าเท่ากับค่าที่คำนวณได้จากการวัดจริง ดังนั้นไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC16F877 ที่ได้ทำการออกแบบไว้สามารถนำไปใช้ในการประมาณค่าสถานะประจุแบบออนไลน์ได้ อย่างไรก็ตามในการประมาณค่าสถานะประจุแบบออนไลน์ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์จะเกิดความผิดพลาดขึ้นบ้างเล็กน้อยในบางครั้ง สาเหตุของความผิดพลาดนั้นเกิดจาก เมื่อไมโครคอนโทรลเลอร์คำนวณค่าแรงดันขณะเปิดวงจรของแบบเตอรีออกมาแล้วค่าแรงดันขณะเปิดวงจรนี้ไปตรงกับแรงดันที่ใช้ในการแบ่งค่าสถานะประจุจากการกำหนดเงื่อนไข ซึ่งอาจจะทำให้เกิดความผิดพลาดในการประมาณค่าสถานะประจุได้ ในทางเดียวกันความผิดพลาดที่ได้กล่าวมาในข้างต้นนี้ จะไม่ส่งผลกระทบต่อความถูกต้องในการประมาณค่าสถานะประจุนัก เนื่องจากจะเกิดความผิดพลาดขึ้นเล็กน้อยเท่านั้น ดังแสดงในภาพประกอบที่ 3-14

ตาราง 4-6 ผลการทดลองการประมาณค่าสถานะประจุแบบออนไลน์ของแบตเตอรี่ก้อนที่ 3

กระแส แบตเตอรี่ I(A)	กระแสจากเซนเซอร์ I(A)	แรงดันขั้ว แบตเตอรี่ V_t (V)	แรงดัน เปิดวงจร V_{oc} (V)	SOC(%)	
				ค่าที่คำนวณ จากการวัดจริง	ค่าที่ประมาณ แบบออนไลน์
0.05	$0.093/1.85 = 0.050$	4.110	4.139	100	100
0.10	$0.186/1.85 = 0.100$	4.076	4.134	100	100
0.20	$0.369/1.85 = 0.199$	3.986	4.102	95	95
0.30	$0.554/1.85 = 0.299$	3.889	4.063	90	90
0.40	$0.741/1.85 = 0.400$	3.778	4.010	85	85
0.50	$0.923/1.85 = 0.498$	3.678	3.968	80	80
0.60	$1.098/1.85 = 0.593$	3.554	3.902	70	70
0.70	$1.292/1.85 = 0.698$	3.474	3.880	65	65
0.80	$1.469/1.85 = 0.794$	3.380	3.844	60	60
0.90	$1.659/1.85 = 0.897$	3.234	3.756	30	30
1.00	$1.848/1.85 = 0.998$	3.129	3.709	20	20

ในการประมาณค่าสถานะประจุแบบออนไลน์สามารถเลือกใช้ค่าพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่ก้อน A ไปใช้ประมาณค่าสถานะประจุกับแบตเตอรี่ก้อน B ได้หรือไม่สามารถออกแบบการทดลองได้ดังนี้

ในการทดลองจะเลือกใช้ค่าพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่ก้อนที่ 3 มาใช้ในการประมาณค่าสถานะประจุของไมโครคอนโทรลเลอร์โดยนำไปใช้ในการประมาณค่าสถานะประจุกับแบตเตอรี่ก้อนที่ 1, 2, 4 และ 5 ซึ่งจะเปรียบเทียบผลการประมาณค่าสถานะประจุระหว่างการประมาณค่าสถานะประจุแบบออนไลน์จากไมโครคอนโทรลเลอร์โดยใช้ค่าพารามิเตอร์จากแบตเตอรี่ก้อนที่ 3 มาทดสอบกับแบตเตอรี่ก้อนที่ 1, 2, 4 และ 5 กับการประมาณค่าสถานะประจุจากการคำนวณที่ได้จากการวัดจริงโดยใช้ค่าพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่ก้อนนั้น ๆ ว่ามีค่าตรงกันหรือไม่ ผลการทดลองการประมาณค่าสถานะประจุแบบออนไลน์ของแบตเตอรี่ก้อนที่ 1, 2, 4 และ 5 จะแสดงดังในตารางที่ 4-7, 4-8, 4-9 และ 4-10 ตามลำดับ

ตาราง 4-7 ผลการทดลองการประมาณค่าสถานะประจุแบบออนไลน์ของแบตเตอรี่ก้อนที่ 1 โดยใช้ค่าพารามิเตอร์จากแบตเตอรี่ก้อนที่ 3

กระแส แบตเตอรี่ I(A)	กระแสจากเซนเซอร์ I(A)	แรงดันขั้ว แบตเตอรี่ $V_L(V)$	แรงดัน เปิดวงจร $V_{oc}(V)$	SOC(%)	
				ค่าที่คำนวณ จากการวัดจริง	ค่าที่ประมาณ แบบออนไลน์
0.05	$0.093/1.85 = 0.050$	4.120	4.153	100	100
0.10	$0.186/1.85 = 0.100$	4.086	4.152	100	100
0.20	$0.369/1.85 = 0.199$	4.006	4.137	100	100
0.30	$0.554/1.85 = 0.299$	3.929	4.125	100	100
0.40	$0.741/1.85 = 0.400$	3.858	4.121	100	95
0.50	$0.923/1.85 = 0.498$	3.782	4.109	100	90
0.60	$1.109/1.85 = 0.599$	3.691	4.084	95	90
0.70	$1.292/1.85 = 0.698$	3.611	4.069	95	85
0.80	$1.469/1.85 = 0.794$	3.545	4.066	90	85
0.90	$1.659/1.85 = 0.897$	3.463	4.051	90	85
1.00	$1.848/1.85 = 0.998$	3.384	4.039	90	80

ตาราง 4-8 ผลการทดลองการประมาณค่าสถานะประจุแบบออนไลน์ของแบตเตอรี่ก้อนที่ 2 โดยใช้ค่าพารามิเตอร์จากแบตเตอรี่ก้อนที่ 3

กระแส แบตเตอรี่ I(A)	กระแสจากเซนเซอร์ I(A)	แรงดันขั้ว แบตเตอรี่ $V_L(V)$	แรงดัน เปิดวงจร $V_{oc}(V)$	SOC(%)	
				ค่าที่คำนวณ จากการวัดจริง	ค่าที่ประมาณ แบบออนไลน์
0.05	$0.093/1.85 = 0.050$	4.089	4.117	100	100
0.10	$0.186/1.85 = 0.100$	4.065	4.122	100	100
0.20	$0.369/1.85 = 0.199$	3.995	4.108	100	100
0.30	$0.554/1.85 = 0.299$	3.921	4.090	95	95
0.40	$0.741/1.85 = 0.400$	3.845	4.071	95	95
0.50	$0.923/1.85 = 0.498$	3.768	4.050	90	90
0.60	$1.109/1.85 = 0.599$	3.682	4.021	90	90
0.70	$1.292/1.85 = 0.698$	3.578	3.973	85	85
0.80	$1.469/1.85 = 0.794$	3.527	3.976	85	85
0.90	$1.659/1.85 = 0.897$	3.456	3.963	80	80
1.00	$1.848/1.85 = 0.998$	3.392	3.956	80	80

ตาราง 4-9 ผลการทดลองการประมาณค่าสถานะประจุแบบออนไลน์ของแบตเตอรี่ก้อนที่ 4 โดยใช้ค่าพารามิเตอร์จากแบตเตอรี่ก้อนที่ 3

กระแส แบตเตอรี่ I(A)	กระแสจากเซนเซอร์ I(A)	แรงดันขั้ว แบตเตอรี่ $V_t(V)$	แรงดัน เปิดวงจร $V_{oc}(V)$	SOC(%)	
				ค่าที่คำนวณ จากการวัดจริง	ค่าที่ประมาณ แบบออนไลน์
0.05	$0.093/1.85 = 0.050$	4.141	4.170	100	100
0.10	$0.186/1.85 = 0.100$	4.108	4.166	100	100
0.20	$0.369/1.85 = 0.199$	4.044	4.158	100	100
0.30	$0.554/1.85 = 0.299$	3.966	4.138	100	100
0.40	$0.741/1.85 = 0.400$	3.869	4.099	95	100
0.50	$0.923/1.85 = 0.498$	3.832	4.118	95	100
0.60	$1.109/1.85 = 0.599$	3.732	4.075	90	95
0.70	$1.292/1.85 = 0.698$	3.638	4.038	90	90
0.80	$1.469/1.85 = 0.794$	3.545	4.000	85	85
0.90	$1.659/1.85 = 0.897$	3.459	3.973	80	85
1.00	$1.848/1.85 = 0.998$	3.332	3.904	70	75

ตาราง 4-10 ผลการทดลองการประมาณค่าสถานะประจุแบบออนไลน์ของแบตเตอรี่ก้อนที่ 5 โดยใช้ค่าพารามิเตอร์จากแบตเตอรี่ก้อนที่ 3

กระแส แบตเตอรี่ I(A)	กระแสจากเซนเซอร์ I(A)	แรงดันขั้ว แบตเตอรี่ $V_t(V)$	แรงดัน เปิดวงจร $V_{oc}(V)$	SOC(%)	
				ค่าที่คำนวณ จากการวัดจริง	ค่าที่ประมาณ แบบออนไลน์
0.05	$0.093/1.85 = 0.050$	4.095	4.126	100	100
0.10	$0.186/1.85 = 0.100$	4.066	4.129	100	100
0.20	$0.369/1.85 = 0.199$	3.997	4.121	100	100
0.30	$0.554/1.85 = 0.299$	3.925	4.112	100	95
0.40	$0.741/1.85 = 0.400$	3.852	4.102	100	95
0.50	$0.923/1.85 = 0.498$	3.785	4.096	95	95
0.60	$1.109/1.85 = 0.599$	3.706	4.080	95	90
0.70	$1.292/1.85 = 0.698$	3.634	4.070	95	90
0.80	$1.469/1.85 = 0.794$	3.552	4.047	90	85
0.90	$1.659/1.85 = 0.897$	3.498	4.058	90	85
1.00	$1.848/1.85 = 0.998$	3.385	4.008	85	80

จากผลการทดลองการประมาณค่าสถานะประจุแบบออนไลน์ของแบตเตอรี่พบว่า แบตเตอรี่ก้อนที่ 1, 4 และ 5 (ตาราง 4-7, 4-9 และ 4-10) การประมาณค่าสถานะประจุแบบออนไลน์จากไมโครคอนโทรลเลอร์กับค่าสถานะประจุที่คำนวณได้จากการวัดจริงจะมีค่าความผิดพลาดเกิดขึ้น เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ตัวต้านทาน R_d มีค่าแตกต่างกัน กล่าวคือแบตเตอรี่ก้อนที่ 1, 4 และ 5 มีค่าต้านทาน R_d เท่ากับ 0.043Ω ในขณะที่แบตเตอรี่ก้อนที่ 3 มีค่าต้านทาน R_d เท่ากับ 0.033Ω อีกทั้งเมื่อกระแสมีค่าสูงขึ้นจะทำให้เกิดความผิดพลาดได้ง่ายยิ่งขึ้น เนื่องจากผลต่างของค่าแรงดันขณะเปิดวงจรระหว่างค่าแรงดันขณะเปิดวงจรที่ได้จากการประมาณแบบออนไลน์ของไมโครคอนโทรลเลอร์กับค่าแรงดันขณะเปิดวงจรที่คำนวณได้จากการวัดจริงจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นแปรผันตรงกับค่ากระแสที่สูงขึ้นตามลำดับ ส่วนแบตเตอรี่ก้อนที่ 2 การประมาณค่าสถานะประจุแบบออนไลน์จากไมโครคอนโทรลเลอร์กับค่าสถานะประจุที่คำนวณได้จากการวัดจริงจะมีค่าตรงกัน เนื่องจากแบตเตอรี่ก้อนที่ 2 มีค่าต้านทาน R_d เท่ากับ 0.033Ω ซึ่งเท่ากับแบตเตอรี่ก้อนที่ 3 ดังนั้นในการประมาณค่าสถานะประจุแบบออนไลน์ควรเลือกใช้ค่าพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่ให้ตรงกันเพื่อที่จะเพิ่มความแม่นยำในการประมาณค่าสถานะประจุ

บทที่ 5

บทสรุป

5.1. บทสรุป

งานวิจัยชิ้นนี้นำเสนอวิธีการประมาณค่าสถานะประจุแบบออนไลน์ของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนสำหรับเซนเซอร์โหนดในระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย เนื่องจากแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนมีแรงดันเกือบคงที่ในระหว่างการใช้งาน จึงทำให้ไม่สามารถบ่งบอกปริมาณของพลังงานไฟฟ้าที่เหลืออยู่ได้ ในการประมาณปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่เหลืออยู่ในแบตเตอรี่สามารถประมาณได้จากการหาค่าสถานะประจุ การประมาณค่าสถานะประจุแบบออนไลน์จะใช้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันชั่วขณะกับแรงดันขณะเปิดวงจรจากแบบจำลองวงจรสมมูลของแบตเตอรี่และใช้การประมาณค่าสถานะประจุจากความสัมพันธ์ระหว่างค่าสถานะประจุกับแรงดันขณะเปิดวงจร นอกจากนี้ได้นำเสนอการออกแบบและสร้างวงจรตรวจวัดค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่โดยให้แบตเตอรี่สามารถจ่ายกระแสได้คงที่ด้วยวงจรดึงกระแสคงที่ ซึ่งวงจรจะควบคุมและเก็บข้อมูลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC16F877 ส่วนประกอบของวงจรประกอบด้วย 4 ส่วนด้วยกัน คือ การตรวจวัดสัญญาณ การส่งและรับสัญญาณ การประมวลผลสัญญาณ และการออกแบบวงจรดึงกระแสจางค์ที่เพื่อนำไปใช้ในการหาคุณลักษณะของแบตเตอรี่ที่นำมาทดสอบ ข้อมูลที่ได้จากวงจรตรวจวัดค่าสถานะประจุประกอบด้วย 2 ส่วนด้วยกันคือ (1) ข้อมูลเพื่อใช้เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสถานะประจุกับแรงดันขณะเปิดวงจรของแบตเตอรี่เพื่อนำไปใช้ในการประมาณค่าสถานะประจุ และ (2) ข้อมูลเพื่อใช้เขียนกราฟผลตอบแทนแรงดันขณะแบตเตอรี่คายประจุเพื่อนำไปใช้ในการหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองวงจรสมมูลของแบตเตอรี่ จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสถานะประจุกับแรงดันขณะเปิดวงจรของแบตเตอรี่สามารถนำเส้นกราฟมาหาสมการโพลีโนเมียลเพื่อที่จะแสดงความสัมพันธ์ของค่าสถานะประจุกับแรงดันขณะเปิดวงจรได้ อย่างไรก็ตามได้มีการจำลองผลตอบแทนแรงดันของแบตเตอรี่เพื่อที่จะเปรียบเทียบผลตอบแทนแรงดันจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากคำนวณกับค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการเฉลี่ย เพื่อตัดสินใจในการเลือกใช้ค่าพารามิเตอร์ในการประมาณค่าสถานะประจุแบบออนไลน์ นอกจากนี้แล้วได้ทดลองประมาณค่าสถานะประจุแบบออนไลน์โดยให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ทำหน้าที่ในการคำนวณค่าสถานะประจุที่เหลืออยู่

วิธีการประมาณค่าสถานะประจุแบบออนไลน์ของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนที่ได้นำเสนอขึ้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับเซนเซอร์โหนดเพื่อให้เซนเซอร์โหนดสามารถประมวลผลปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่เหลืออยู่ในโหนดได้

5.2. ปัญหาและแนวทางแก้ไข

5.2.1 ค่าสถานะประจุที่จากการคำนวณของไมโครคอนโทรลเลอร์อาจจะมีการแสดงผลที่ผิดพลาดอยู่บ้างเล็กน้อย เนื่องจากแรงดันขณะเปิดวงจรที่คำนวณได้ออยู่ในขอบเขตของการกำหนดค่าสถานะประจุ ควรปรับปรุงโดยการแก้ไขโปรแกรมให้ไมโครคอนโทรลเลอร์แสดงผลค่าสถานะประจุที่มีค่าลดลงเท่านั้น

5.2.2 ในการประมาณค่าสถานะประจุนั้นจะต้องนำแบตเตอรี่มาทำการทดสอบเพื่อหาคุณลักษณะของแบตเตอรี่ก้อนนั้นก่อนทุกครั้ง แก้ไขโดยการนำแบตเตอรี่หลาย ๆ ก้อนที่มียี่ห้อเดียวกัน ปัจจัยการผลิตเหมือนกันมาทดสอบ เพื่อให้ได้คุณลักษณะที่มีความถูกต้องมากที่สุด

5.3. แนวทางการพัฒนาต่อไป

5.3.1 จากวงจรตรวจวัดค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่สามารถพัฒนาให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ส่งสัญญาณข้อมูลที่ตรวจวัดได้เข้าโปรแกรม LabVIEW เพื่อเขียนกราฟผลตอบสนองแรงดันแบบออนไลน์และคำนวณค่าพารามิเตอร์ได้

5.3.2 ปรับปรุงโปรแกรมของไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยให้ไมโครคอนโทรลเลอร์คำนวณค่าสถานะประจุจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณเพื่อลดความผิดพลาดในการประมาณค่าสถานะประจุ

5.3.3 การประมาณค่าสถานะประจุแบบออนไลน์ของไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถเพิ่มความแม่นยำได้โดยการเพิ่มความละเอียดของค่าสถานะประจุที่ลดลง เช่น ทำให้ค่าสถานะประจุลดลงครั้งละ 1%

บรรณานุกรม

- [1] วิกลม ชีรภาพจรเดช และคณะ, “การศึกษาเบื้องต้นในเทคโนโลยีและศักยภาพทางการวิจัยและพัฒนาของสถาบันอุดมศึกษาไทยทางด้านเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย,” *รายงานวิจัยและพัฒนาฉบับสมบูรณ์*, 2549.
- [2] C. Alippi, G. Anastasi, M. D. Franceso, and M. Roveri, “Energy Management in Wireless Sensor Networks with Energy-hungry Sensors,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement Magazine*, vol 12, no. 2, April 2009, pp. 16-23.
- [3] J. Rahm, N. Fourty, K. A. Agha, and A. Bossche, “A Recursive Battery Model for Nodes Lifetime Estimation in Wireless Sensor Networks,” *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, 2010, pp. 1-6.
- [4] M. Einhorn, F. V. Conte, C. Kral, and J. Fleig, “A Method for Online Capacity Estimation of Lithium Ion Battery Cells Using the State of Charge and the Transferred Charge,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 48, no. 2, March/April 2012, pp. 736-741.
- [5] H. Miyamoto, M. Morimoto, and K. Morita, “On-line SOC Estimation of Battery for Wireless Tram Car,” *IEEE International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS)*, 2007, pp. 1624-1627.
- [6] L. W. Yao, and J. A. Aziz, “Modeling of Lithium Ion Battery with Nonlinear Transfer Resistance,” *IEEE Applied Power Electronics Colloquium (IAPEC)*, 2011, pp. 104-109.
- [7] R. Xiong, H. He, F. Sun, and K. Zhao, “Evaluation on State of Charge Estimation of Batteries With Adaptive Extended Kalman Filter by Experiment Approach,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 62, no. 1, January 2013, pp. 108-117.
- [8] A. H. Ranjbar, A. Banaei, A. Khoobroo, and B. Fahimi, “Online Estimation of State of Charge in Li-Ion Batteries Using Impulse Response Concept,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 3, no. 1, March 2012, pp. 360-367.
- [9] Y. H. Chiang, W. Y. Sean, and J. C. Ke, “Online Estimation of Internal Resistance and Open-circuit Voltage of Lithium-ion Batteries in Electric Vehicles,” *Journal of Power Sources*, vol. 196, no. 8, April 2011, pp. 3921-3932.

- [10] S. X. Chen, H. B. Gooi, N. Xia, and M. Q. Wang, "Modeling of Lithium-ion Battery for Online Energy Management Systems," *IET Electrical Systems in Transportation*, vol. 2, no. 4, 2012, pp. 202-210.
- [11] "แบตเตอรี่," Available: <http://th.wikipedia.org/wiki/แบตเตอรี่> [Accessed: February 1, 2012].
- [12] "Lithium ion battery Pictures," Available: <http://withfriendship.com/user/pintu/lithium-ion-battery.php> [Accessed: February 1, 2012].
- [13] "Rechargeable battery," Available: http://en.wikipedia.org/wiki/Rechargeable_battery [Accessed: February 1, 2012].
- [14] "Lithium-ion battery," Available: http://en.wikipedia.org/wiki/Lithium-ion_battery [Accessed: February 1, 2012].
- [15] ความรู้ลึก ๆ กับแบตเตอรี่ลิเธียม, Available: <http://www.bloggang.com/mainblog.php?id=nacl&month=01-07-2005&group=2&gblog=21> [Accessed: February 1, 2012].
- [16] M. Gholizadeh, and F. R. Salmasi, "Estimation of State-of-Charge, Unknown Nonlinearities, and State-of-Health of a Lithium-Ion Battery Based on a Comprehensive Unobservable Model," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 61, no. 3, March 2014, pp. 1335-1344.
- [17] H. R. Eichi, B. Balagopal, M. Y. Chow, and T. J. Yeo, "Sensitivity Analysis of Lithium-Ion Battery Model to Battery Parameters," *IEEE Conference on Industrial Electronics Society*, 2013, pp. 6794-6799.
- [18] H. He, R. Xiong, X. Zhang, F. Sun, and J. X. Fan, "State-of-Charge Estimation of the Lithium-Ion Battery Using an Adaptive Extended Kalman Filter Based on an Improved Thevenin Model," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 60, no. 4, May 2011, pp. 1461-1469.
- [19] L. Seongjun, K. Jonghoon, L. Jaemoon, and B. H. Cho, "State-of-Charge and Capacity Estimation of Lithium-ion Battery Using a New Open-circuit Voltage versus State-of-Charge," *Journal of Power Sources*, vol. 185, no. 2, December 2008, pp. 1367-1373.
- [20] G. Lijun, L. Shengyi, and R. A. Dougal, "Dynamic Lithium-Ion Battery Model for System Simulation," *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, vol. 25, no. 3, September 2002, pp. 495-505.

- [21] L. Jianwei, J. Bin, M. Mazzola, and X. Ming, "On-line Battery State of Charge Estimation using Gauss-Hermite Quadrature Filter," *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, 2012, pp. 434-438.
- [22] F. Baronti, G. Fantechi, L. Fanucci, E. Leonardi, R. Roncella, R. Saletti, and S. Saponara, "State-of-Charge Estimation Enhancing of Lithium batteries through a Temperature-Dependent Cell Model," *IEEE International Conference on Applied Electronics (AE)*, 2011, pp. 1-5.
- [23] H. Xiaosong, S. Fengchun, Z. Yuan, and P. Huei, "Online Estimation of an Electric Vehicle Lithium-Ion Battery Using Recursive Least Squares with Forgetting," *IEEE American Control Conference (ACC)*, 2011, pp. 935-940.
- [24] M. Chen, and G. A. Rincon-Mora, "Accurate Electrical Battery Model Capable of Predicting Runtime and I-V Performance," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 21, no. 2, June 2006, pp. 504-511.
- [25] Z. Fei, L. Guangjun, and F. Lijin, "A Battery State of Charge Estimation Method using Sliding Mode Observer," *IEEE Conference on Intelligent Control and Automation*, 2008, pp. 989-994.
- [26] "Capacitor in Series and Parallel and the Time Constant RC", Available: http://www.physicslabs.umb.edu/Physics/sum13/182_Exp7_Sum13.pdf [Accessed: August 16, 2013].
- [27] "ACS712 datasheet" Available: <http://www.alldatasheet.com/view.jsp?Searchword=ACS712> [Accessed: December 1, 2011].

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
ผลการทดลอง

ผลการทดลองแบตเตอรี่ก้อนที่ 1

$$V(\text{SOC100\%}) = 4.11$$

$V_t = 3.49$ 3.48 3.47 3.46 3.46 3.44 3.44 3.44 3.43 3.43 3.41 3.43 3.42 3.42 3.42
3.41 3.41 3.40 3.40 3.40 3.39 3.39 3.39 3.40 3.40 3.39 3.39 3.38 3.39 3.38 3.38 3.38 3.37 3.37
3.37 3.37 3.37 $V_{oc} = 3.99$ 4.04 4.05 4.06 4.06 4.06 4.06 4.06 4.06 4.06 4.06 4.06 4.06 4.06 4.06
4.06 4.06 4.06 4.06 4.06 4.06 4.06 4.06 4.06 4.06 4.06 4.06 4.06 4.06 4.06 4.06 4.06 4.06
4.06 4.06 4.06 4.06 4.06 4.06 4.06 $V(\text{SOC95\%}) = 4.06$

$V_t = 3.45$ 3.43 3.42 3.40 3.40 3.39 3.39 3.38 3.38 3.37 3.37 3.37 3.37 3.35 3.35
3.36 3.35 3.35 3.35 3.35 3.34 3.33 3.34 3.34 3.33 3.34 3.33 3.33 3.33 3.34 3.33 3.32 3.33 3.32
3.32 3.32 3.32 $V_{oc} = 3.93$ 4.00 4.01 4.01 4.01 4.01 4.01 4.01 4.01 4.01 4.01 4.01 4.01 4.02 4.02 4.02
4.02 4.02 4.02 4.02 4.02 4.02 4.02 4.02 4.02 4.02 4.02 4.02 4.02 4.02 4.02 4.02 4.02 4.02
4.02 4.02 4.02 4.02 4.02 4.02 4.02 $V(\text{SOC90\%}) = 4.02$

$V_t = 3.40$ 3.38 3.37 3.37 3.35 3.34 3.34 3.34 3.33 3.33 3.32 3.31 3.32 3.31 3.31
3.31 3.30 3.30 3.31 3.30 3.29 3.30 3.29 3.29 3.29 3.28 3.29 3.28 3.28 3.28 3.28 3.28 3.28 3.27
3.27 3.27 3.27 $V_{oc} = 3.90$ 3.95 3.96 3.97 3.97 3.97 3.98 3.98 3.98 3.98 3.98 3.98 3.98 3.98 3.98
3.98 3.98 3.98 3.98 3.98 3.98 3.98 3.98 3.98 3.98 3.98 3.98 3.98 3.98 3.98 3.98 3.98 3.98
3.98 3.98 3.98 3.98 3.98 3.98 3.98 $V(\text{SOC85\%}) = 3.98$

$V_t = 3.37$ 3.34 3.33 3.32 3.31 3.31 3.30 3.29 3.29 3.29 3.28 3.29 3.28 3.27 3.27
3.27 3.27 3.26 3.27 3.26 3.25 3.26 3.26 3.26 3.25 3.26 3.25 3.26 3.25 3.25 3.25 3.24 3.25 3.24
3.24 3.24 3.24 $V_{oc} = 3.86$ 3.91 3.92 3.93 3.93 3.94 3.94 3.94 3.94 3.94 3.94 3.94 3.94 3.94 3.94
3.94 3.94 3.94 3.94 3.95 3.94 3.94 3.94 3.94 3.95 3.95 3.94 3.94 3.94 3.94 3.95 3.94 3.94 3.95
3.95 3.95 3.95 3.95 3.95 3.95 3.94 $V(\text{SOC80\%}) = 3.95$

$V_t = 3.33$ 3.31 3.29 3.29 3.27 3.27 3.26 3.26 3.25 3.25 3.25 3.25 3.24 3.24 3.24
3.23 3.22 3.22 3.22 3.22 3.22 3.22 3.22 3.21 3.21 3.22 3.21 3.21 3.20 3.21 3.21 3.20 3.21 3.21
3.20 3.20 3.19 $V_{oc} = 3.83$ 3.88 3.89 3.90 3.90 3.90 3.90 3.91 3.91 3.91 3.91 3.91 3.91 3.91 3.91
3.91 3.91 3.91 3.91 3.91 3.91 3.91 3.91 3.91 3.91 3.91 3.91 3.91 3.91 3.91 3.91 3.91 3.91
3.92 3.91 3.92 3.91 3.92 3.92 3.91 $V(\text{SOC75\%}) = 3.91$

$V_t = 3.30\ 3.27\ 3.27\ 3.24\ 3.24\ 3.24\ 3.23\ 3.22\ 3.22\ 3.21\ 3.21\ 3.20\ 3.20\ 3.21\ 3.20$
 $3.20\ 3.20\ 3.19\ 3.19\ 3.19\ 3.19\ 3.18\ 3.19\ 3.17\ 3.18\ 3.18\ 3.18\ 3.17\ 3.18\ 3.17\ 3.17\ 3.18\ 3.16\ 3.17$
 $3.17\ 3.17\ 3.17\ V_{oc} = 3.80\ 3.85\ 3.86\ 3.86\ 3.86\ 3.87\ 3.87\ 3.87\ 3.87\ 3.87\ 3.87\ 3.87\ 3.87\ 3.87\ 3.87\ 3.87$
 $3.88\ 3.88\ 3.88\ 3.88\ 3.88\ 3.88\ 3.88\ 3.88\ 3.88\ 3.88\ 3.88\ 3.88\ 3.88\ 3.88\ 3.88\ 3.88\ 3.88\ 3.89\ 3.89$
 $3.89\ 3.89\ 3.89\ 3.89\ 3.89\ 3.89\ 3.89\ 3.89\ \mathbf{V(SOC70\%)} = \mathbf{3.89}$

$V_t = 3.27\ 3.25\ 3.23\ 3.22\ 3.21\ 3.21\ 3.20\ 3.19\ 3.18\ 3.19\ 3.17\ 3.18\ 3.17\ 3.18\ 3.17$
 $3.17\ 3.17\ 3.17\ 3.16\ 3.16\ 3.15\ 3.16\ 3.15\ 3.16\ 3.16\ 3.16\ 3.15\ 3.15\ 3.14\ 3.14\ 3.14\ 3.14\ 3.14\ 3.14$
 $3.14\ 3.14\ 3.14\ V_{oc} = 3.77\ 3.82\ 3.83\ 3.83\ 3.83\ 3.84\ 3.84\ 3.84\ 3.84\ 3.84\ 3.84\ 3.84\ 3.84\ 3.84\ 3.84\ 3.84$
 $3.84\ 3.84\ 3.84\ 3.84\ 3.84\ 3.84\ 3.84\ 3.84\ 3.84\ 3.84\ 3.84\ 3.84\ 3.84\ 3.84\ 3.84\ 3.84\ 3.84\ 3.84\ 3.84$
 $3.84\ 3.84\ 3.85\ 3.85\ 3.85\ 3.84\ 3.85\ \mathbf{V(SOC65\%)} = \mathbf{3.85}$

$V_t = 3.22\ 3.21\ 3.19\ 3.18\ 3.17\ 3.17\ 3.17\ 3.17\ 3.15\ 3.16\ 3.15\ 3.14\ 3.15\ 3.14\ 3.15$
 $3.15\ 3.14\ 3.13\ 3.13\ 3.14\ 3.13\ 3.13\ 3.13\ 3.13\ 3.12\ 3.13\ 3.12\ 3.12\ 3.12\ 3.12\ 3.13\ 3.13\ 3.12\ 3.12$
 $3.13\ 3.12\ 3.11\ V_{oc} = 3.75\ 3.80\ 3.80\ 3.81\ 3.81\ 3.81\ 3.81\ 3.81\ 3.81\ 3.81\ 3.81\ 3.81\ 3.81\ 3.82\ 3.82\ 3.82$
 $3.82\ 3.82\ 3.82\ 3.82\ 3.82\ 3.82\ 3.82\ 3.82\ 3.82\ 3.82\ 3.82\ 3.82\ 3.82\ 3.82\ 3.82\ 3.82\ 3.82\ 3.82\ 3.82$
 $3.82\ 3.82\ 3.82\ 3.82\ 3.82\ 3.82\ 3.82\ 3.82\ \mathbf{V(SOC60\%)} = \mathbf{3.82}$

$V_t = 3.20\ 3.17\ 3.16\ 3.15\ 3.15\ 3.14\ 3.14\ 3.13\ 3.13\ 3.12\ 3.12\ 3.13\ 3.11\ 3.11\ 3.12$
 $3.12\ 3.12\ 3.11\ 3.10\ 3.11\ 3.10\ 3.11\ 3.11\ 3.10\ 3.10\ 3.10\ 3.11\ 3.11\ 3.10\ 3.10\ 3.10\ 3.10\ 3.10\ 3.10$
 $3.10\ 3.10\ 3.10\ V_{oc} = 3.74\ 3.78\ 3.79\ 3.79\ 3.79\ 3.79\ 3.79\ 3.79\ 3.79\ 3.79\ 3.80\ 3.80\ 3.80\ 3.80\ 3.80\ 3.80$
 $3.80\ 3.80\ 3.80\ 3.80\ 3.80\ 3.80\ 3.80\ 3.80\ 3.80\ 3.80\ 3.80\ 3.80\ 3.80\ 3.80\ 3.80\ 3.80\ 3.80\ 3.80\ 3.80$
 $3.80\ 3.80\ 3.80\ 3.80\ 3.80\ 3.80\ 3.80\ 3.80\ \mathbf{V(SOC55\%)} = \mathbf{3.80}$

$V_t = 3.17\ 3.16\ 3.14\ 3.13\ 3.13\ 3.12\ 3.12\ 3.11\ 3.11\ 3.11\ 3.11\ 3.11\ 3.10\ 3.09\ 3.10$
 $3.10\ 3.10\ 3.09\ 3.08\ 3.08\ 3.09\ 3.09\ 3.09\ 3.09\ 3.08\ 3.08\ 3.07\ 3.08\ 3.08\ 3.08\ 3.07\ 3.08\ 3.08\ 3.07$
 $3.07\ 3.07\ 3.07\ V_{oc} = 3.72\ 3.76\ 3.77\ 3.77\ 3.77\ 3.78\ 3.78\ 3.78\ 3.78\ 3.78\ 3.78\ 3.78\ 3.78\ 3.78\ 3.78$
 $3.78\ 3.78\ 3.78\ 3.78\ 3.78\ 3.79\ 3.78\ 3.78\ 3.78\ 3.78\ 3.78\ 3.78\ 3.78\ 3.78\ 3.78\ 3.78\ 3.78\ 3.78\ 3.78$
 $3.78\ 3.78\ 3.78\ 3.78\ 3.78\ 3.78\ 3.78\ 3.78\ \mathbf{V(SOC50\%)} = \mathbf{3.78}$

$V_t = 3.16\ 3.14\ 3.13\ 3.12\ 3.11\ 3.11\ 3.10\ 3.10\ 3.09\ 3.09\ 3.08\ 3.09\ 3.08\ 3.08\ 3.08$
 $3.07\ 3.08\ 3.07\ 3.07\ 3.07\ 3.07\ 3.06\ 3.07\ 3.08\ 3.07\ 3.07\ 3.06\ 3.06\ 3.07\ 3.07\ 3.06\ 3.06\ 3.07\ 3.06$
 $3.06\ 3.06\ 3.06\ V_{oc} = 3.70\ 3.75\ 3.76\ 3.76\ 3.76\ 3.76\ 3.76\ 3.77\ 3.77\ 3.77\ 3.77\ 3.77\ 3.77\ 3.77\ 3.77$
 $3.77\ 3.77\ 3.77\ 3.77\ 3.77\ 3.77\ 3.77\ 3.77\ 3.77\ 3.77\ 3.77\ 3.77\ 3.77\ 3.77\ 3.77\ 3.77\ 3.77\ 3.77\ 3.77$
 $3.77\ 3.77\ 3.77\ 3.77\ 3.77\ 3.77\ 3.77\ 3.77\ \mathbf{V(SOC45\%)} = \mathbf{3.77}$

$V_t = 3.15$ 3.12 3.11 3.10 3.09 3.10 3.09 3.07 3.07 3.08 3.07 3.07 3.06 3.06 3.06
 3.07 3.07 3.06 3.06 3.06 3.06 3.06 3.06 3.05 3.05 3.05 3.05 3.04 3.06 3.05 3.04 3.05 3.05 3.06
 3.04 3.04 3.04 $V_{oc} = 3.69$ 3.74 3.75 3.75 3.75 3.75 3.76 3.76 3.76 3.76 3.76 3.76 3.76 3.76 3.76 3.76 3.76 3.76 3.76
 3.76 3.76 3.76 3.76 3.76 3.76 3.76 3.76 3.76 3.76 3.76 3.76 3.76 3.76 3.76 3.76 3.76 3.76 3.76
 3.77 3.76 3.76 3.76 3.76 3.76 3.76 3.76 **V(SOC40%) = 3.76**

$V_t = 3.13$ 3.12 3.11 3.10 3.09 3.08 3.08 3.08 3.07 3.07 3.07 3.07 3.07 3.06 3.06
 3.05 3.05 3.06 3.05 3.05 3.04 3.05 3.05 3.04 3.04 3.05 3.04 3.04 3.04 3.04 3.04 3.04 3.04 3.04
 3.04 3.04 3.04 $V_{oc} = 3.68$ 3.73 3.73 3.74 3.74 3.74 3.75 3.75 3.75 3.75 3.75 3.75 3.75 3.75 3.75 3.75 3.75 3.75 3.75
 3.75 3.75 3.75 3.76 3.75 3.75 3.76 3.75 3.76 3.76 3.76 3.76 3.76 3.76 3.76 3.76 3.76 3.76 3.76
 3.76 3.76 3.76 3.76 3.76 3.76 3.76 3.76 **V(SOC35%) = 3.76**

$V_t = 3.13$ 3.11 3.10 3.09 3.09 3.07 3.07 3.07 3.07 3.06 3.06 3.06 3.04 3.04 3.05
 3.05 3.04 3.04 3.04 3.04 3.03 3.04 3.03 3.04 3.03 3.04 3.03 3.02 3.03 3.02 3.02 3.03 3.03 3.02
 3.02 3.01 3.02 $V_{oc} = 3.67$ 3.71 3.72 3.72 3.72 3.72 3.72 3.72 3.73 3.73 3.73 3.73 3.73 3.73 3.73 3.73 3.73 3.73 3.73
 3.73 3.73 3.73 3.73 3.73 3.73 3.73 3.73 3.73 3.73 3.73 3.73 3.74 3.73 3.73 3.74 3.74 3.74 3.74
 3.74 3.74 3.74 3.73 3.74 3.74 3.74 3.74 **V(SOC30%) = 3.74**

$V_t = 3.10$ 3.09 3.08 3.06 3.04 3.05 3.05 3.05 3.03 3.04 3.03 3.04 3.03 3.02 3.02
 3.02 3.02 3.00 3.01 3.01 3.00 3.00 3.00 3.01 3.01 3.00 2.99 3.00 3.00 3.00 3.00 3.00 3.00 2.99
 2.99 2.99 2.99 $V_{oc} = 3.64$ 3.68 3.69 3.69 3.69 3.69 3.69 3.69 3.69 3.69 3.69 3.69 3.69 3.69 3.69 3.69 3.69 3.69 3.69
 3.69 3.69 3.70 3.70 3.70 3.69 3.70 3.70 3.70 3.70 3.70 3.70 3.70 3.70 3.70 3.70 3.70 3.70 3.70
 3.70 3.70 3.70 3.70 3.70 3.70 3.70 3.70 **V(SOC25%) = 3.70**

$V_t = 3.06$ 3.04 3.04 3.02 3.01 3.00 2.99 3.00 3.00 2.99 2.99 2.99 2.98 2.98 2.98
 2.97 2.98 2.98 2.97 2.97 2.97 2.97 2.97 2.97 2.97 2.97 2.97 2.96 2.96 2.96 2.96 2.96 2.96 2.96
 2.96 2.96 2.96 $V_{oc} = 3.61$ 3.66 3.67 3.67 3.67 3.67 3.67 3.67 3.67 3.67 3.67 3.68 3.68 3.68 3.68 3.68 3.68 3.68
 3.68 3.68 3.68 3.68 3.68 3.68 3.68 3.68 3.68 3.68 3.68 3.68 3.68 3.68 3.68 3.68 3.68 3.68 3.68
 3.68 3.68 3.68 3.68 3.68 3.68 3.68 3.68 **V(SOC20%) = 3.68**

$V_t = 3.03$ 3.02 3.01 2.99 2.99 2.98 2.98 2.97 2.97 2.97 2.96 2.96 2.95 2.95 2.94
 2.95 2.95 2.93 2.94 2.94 2.94 2.92 2.93 2.93 2.92 2.93 2.92 2.91 2.91 2.91 2.90 2.91 2.90 2.90
 2.90 2.90 2.90 $V_{oc} = 3.55$ 3.62 3.64 3.64 3.65 3.65 3.65 3.65 3.65 3.65 3.65 3.65 3.65 3.65 3.65 3.65 3.65 3.65 3.65
 3.66 3.66 3.66 3.66 3.66 3.66 3.66 3.66 3.66 3.66 3.66 3.66 3.66 3.66 3.66 3.66 3.66 3.66 3.66
 3.66 3.66 3.66 3.66 3.66 3.66 3.66 3.66 **V(SOC15%) = 3.66**

$V_t = 3.01$ 2.99 2.97 2.96 2.96 2.96 2.96 2.95 2.95 2.95 2.94 2.94 2.93 2.93 2.93
 2.93 2.93 2.92 2.92 2.92 2.92 2.91 2.91 2.90 2.90 2.90 2.90 2.89 2.89 2.89 2.89 2.88 2.88 2.88
 2.88 2.88 2.88 $V_{oc} = 3.53$ 3.60 3.62 3.62 3.63 3.63 3.63 3.36 3.63 3.63 3.63 3.63 3.63 3.63 3.63
 3.64 3.64 3.64 3.64 3.64 3.64 3.64 3.64 3.64 3.64 3.64 3.64 3.64 3.64 3.64 3.64 3.64 3.64
 3.64 3.64 3.64 3.64 3.64 3.64 **V(SOC10%) = 3.64**

ผลการทดลองแบตเตอรี่ก้อนที่ 2

V(SOC100%) = 4.11

$V_t = 3.56$ 3.55 3.54 3.52 3.52 3.51 3.50 3.50 3.49 3.49 3.50 3.48 3.49 3.48 3.49
 3.48 3.48 3.48 3.47 3.47 3.47 3.47 3.47 3.47 3.47 3.47 3.46 3.46 3.47 3.47 3.46 3.46 3.45 3.46
 3.45 3.45 3.45 $V_{oc} = 4.00$ 4.05 4.06 4.06 4.06 4.06 4.06 4.06 4.06 4.06 4.06 4.06 4.06 4.06 4.06
 4.06 4.06 4.06 4.06 4.06 4.06 4.06 4.06 4.06 4.06 4.06 4.06 4.06 4.06 4.06 4.06 4.06 4.06
 4.06 4.06 4.06 4.06 4.06 4.06 **V(SOC95%) = 4.07**

$V_t = 3.51$ 3.47 3.47 3.46 3.45 3.45 3.44 3.45 3.44 3.44 3.43 3.42 3.43 3.43 3.43
 3.42 3.42 3.42 3.41 3.41 3.41 3.40 3.41 3.41 3.41 3.40 3.40 3.40 3.40 3.39 3.39 3.40 3.40 3.39
 3.39 3.39 3.39 $V_{oc} = 3.94$ 4.00 4.01 4.01 4.02 4.02 4.02 4.02 4.02 4.02 4.02 4.02 4.02 4.02 4.02
 4.02 4.02 4.02 4.02 4.02 4.02 4.02 4.02 4.02 4.02 4.02 4.02 4.02 4.02 4.02 4.02 4.02 4.02
 4.02 4.02 4.02 4.02 4.02 4.02 **V(SOC90%) = 4.02**

$V_t = 3.47$ 3.44 3.43 3.42 3.41 3.40 3.40 3.39 3.39 3.39 3.40 3.38 3.37 3.38 3.38
 3.38 3.36 3.37 3.36 3.37 3.36 3.36 3.36 3.36 3.36 3.36 3.36 3.35 3.35 3.35 3.35 3.35 3.35 3.35
 3.35 3.35 3.35 $V_{oc} = 3.91$ 3.96 3.97 3.97 3.97 3.98 3.98 3.98 3.98 3.98 3.98 3.98 3.98 3.98 3.98
 3.98 3.98 3.98 3.98 3.98 3.98 3.98 3.98 3.98 3.98 3.98 3.98 3.98 3.98 3.98 3.98 3.98 3.98
 3.98 3.98 3.98 3.98 3.98 3.98 **V(SOC85%) = 3.98**

$V_t = 3.43$ 3.40 3.39 3.38 3.37 3.36 3.37 3.36 3.35 3.35 3.35 3.34 3.34 3.33 3.34
 3.33 3.33 3.33 3.33 3.32 3.32 3.32 3.31 3.31 3.31 3.31 3.31 3.31 3.31 3.31 3.31 3.31 3.31 3.31
 3.31 3.30 3.30 $V_{oc} = 3.86$ 3.92 3.93 3.93 3.93 3.94 3.94 3.94 3.94 3.94 3.94 3.94 3.95 3.94 3.94
 3.94 3.95 3.94 3.95 3.94 3.95 3.95 3.95 3.95 3.95 3.95 3.95 3.95 3.95 3.95 3.95 3.95 3.95
 3.95 3.95 3.95 3.95 3.95 3.95 **V(SOC80%) = 3.95**

$V_t = 3.41$ 3.36 3.35 3.34 3.34 3.34 3.33 3.32 3.32 3.31 3.32 3.31 3.31 3.30 3.30
 3.30 3.30 3.29 3.29 3.29 3.29 3.29 3.28 3.29 3.29 3.29 3.29 3.29 3.28 3.29 3.29 3.28 3.28 3.28
 3.28 3.28 3.28 $V_{oc} = 3.83$ 3.88 3.89 3.90 3.90 3.90 3.91 3.91 3.91 3.91 3.91 3.91 3.91 3.91 3.91
 3.91 3.91 3.91 3.91 3.91 3.91 3.91 3.91 3.91 3.92 3.91 3.92 3.91 3.91 3.91 3.92 3.92 3.92 3.92
 3.92 3.91 3.92 3.92 3.92 3.92 3.92 **V(SOC75%) = 3.92**

$V_t = 3.37$ 3.34 3.32 3.32 3.31 3.31 3.30 3.29 3.29 3.29 3.28 3.27 3.28 3.28 3.27
 3.27 3.27 3.27 3.26 3.26 3.26 3.27 3.26 3.26 3.26 3.26 3.25 3.25 3.26 3.26 3.25 3.25 3.25 3.25
 3.25 3.25 3.25 $V_{oc} = 3.80$ 3.85 3.86 3.86 3.87 3.87 3.87 3.87 3.87 3.87 3.87 3.87 3.87 3.88 3.88 3.88
 3.88 3.88 3.88 3.88 3.88 3.88 3.88 3.88 3.88 3.89 3.88 3.88 3.89 3.89 3.89 3.89 3.89 3.89 3.89
 3.89 3.89 3.89 3.89 3.89 3.89 3.89 **V(SOC70%) = 3.89**

$V_t = 3.34$ 3.31 3.30 3.29 3.28 3.27 3.26 3.27 3.26 3.27 3.26 3.26 3.26 3.25 3.25
 3.25 3.25 3.25 3.25 3.24 3.25 3.24 3.24 3.24 3.24 3.23 3.24 3.24 3.24 3.23 3.23 3.23 3.23 3.23
 3.23 3.23 3.23 $V_{oc} = 3.78$ 3.83 3.83 3.83 3.84 3.84 3.84 3.84 3.84 3.84 3.84 3.84 3.84 3.84 3.84
 3.84 3.84 3.84 3.84 3.84 3.84 3.84 3.84 3.84 3.84 3.85 3.85 3.85 3.85 3.85 3.85 3.85 3.85 3.85
 3.85 3.84 3.85 3.85 3.85 3.85 3.85 **V(SOC65%) = 3.85**

$V_t = 3.31$ 3.27 3.27 3.26 3.26 3.26 3.25 3.25 3.25 3.24 3.24 3.24 3.24 3.24 3.23
 3.23 3.22 3.23 3.22 3.23 3.22 3.22 3.22 3.22 3.22 3.22 3.21 3.22 3.22 3.21 3.22 3.22 3.22 3.22
 3.21 3.21 3.21 $V_{oc} = 3.76$ 3.80 3.81 3.81 3.81 3.81 3.81 3.81 3.82 3.82 3.82 3.82 3.82 3.82 3.82
 3.82 3.82 3.82 3.82 3.82 3.82 3.82 3.82 3.82 3.82 3.82 3.82 3.82 3.82 3.82 3.82 3.82 3.82
 3.82 3.82 3.82 3.82 3.82 3.82 3.82 **V(SOC60%) = 3.82**

$V_t = 3.28$ 3.27 3.26 3.24 3.24 3.24 3.24 3.24 3.23 3.24 3.23 3.22 3.22 3.22 3.22
 3.23 3.22 3.22 3.21 3.22 3.20 3.21 3.22 3.21 3.20 3.19 3.20 3.21 3.21 3.20 3.20 3.20 3.20 3.19
 3.20 3.20 3.20 $V_{oc} = 3.74$ 3.78 3.79 3.79 3.80 3.80 3.80 3.80 3.80 3.80 3.80 3.80 3.80 3.80 3.80
 3.80 3.80 3.80 3.80 3.80 3.80 3.80 3.80 3.80 3.80 3.80 3.80 3.80 3.80 3.80 3.80 3.80 3.80
 3.80 3.80 3.80 3.80 3.80 3.80 3.80 **V(SOC55%) = 3.80**

$V_t = 3.26$ 3.25 3.24 3.24 3.22 3.22 3.22 3.21 3.22 3.21 3.20 3.20 3.20 3.20 3.19
 3.20 3.21 3.19 3.19 3.19 3.19 3.19 3.20 3.19 3.18 3.19 3.19 3.20 3.17 3.20 3.18 3.19 3.17 3.17
 3.19 3.18 3.18 $V_{oc} = 3.72$ 3.77 3.78 3.78 3.78 3.78 3.78 3.78 3.78 3.78 3.78 3.79 3.79 3.78 3.78 3.78
 3.78 3.78 3.79 3.78 3.78 3.78 3.78 3.78 3.79 3.78 3.79 3.78 3.79 3.79 3.78 3.79 3.79 3.79
 3.78 3.78 3.78 3.78 3.78 3.78 3.78 **V(SOC50%) = 3.78**

$V_t = 3.25$ 3.24 3.23 3.21 3.21 3.21 3.21 3.21 3.19 3.19 3.20 3.19 3.19 3.19 3.20
 3.19 3.17 3.18 3.18 3.18 3.18 3.18 3.17 3.17 3.17 3.16 3.17 3.17 3.17 3.17 3.17 3.17 3.17 3.17
 $V_{oc} = 3.71$ 3.76 3.76 3.76 3.77 3.77 3.77 3.77 3.77 3.77 3.77 3.77 3.77 3.77 3.77 3.77 3.77 3.77
 3.77 3.77 3.77 3.77 3.77 3.77 3.77 3.77 3.77 3.77 3.78 3.77 3.77 3.77 3.77 3.78 3.77 3.77
 3.77 3.77 3.77 3.77 3.77 3.78 3.77 **V(SOC45%) = 3.77**

$V_t = 3.24$ 3.22 3.22 3.19 3.20 3.19 3.20 3.19 3.20 3.20 3.17 3.18 3.18 3.18 3.18
 3.18 3.16 3.16 3.17 3.17 3.16 3.17 3.18 3.17 3.16 3.16 3.16 3.17 3.16 3.15 3.17 3.17 3.17 3.17
 $V_{oc} = 3.70$ 3.74 3.75 3.75 3.76 3.76 3.76 3.76 3.76 3.76 3.76 3.76 3.76 3.76 3.76 3.76 3.76 3.76
 3.76 3.76 3.76 3.76 3.76 3.76 3.76 3.76 3.76 3.76 3.76 3.76 3.76 3.76 3.76 3.76 3.76 3.76
 3.76 3.76 3.77 3.77 3.76 3.76 3.76 **V(SOC40%) = 3.76**

$V_t = 3.23$ 3.22 3.21 3.19 3.18 3.18 3.17 3.18 3.17 3.17 3.18 3.17 3.16 3.16 3.16
 3.16 3.15 3.15 3.16 3.16 3.16 3.16 3.16 3.15 3.16 3.16 3.15 3.15 3.15 3.14 3.15 3.15 3.16 3.15
 $V_{oc} = 3.69$ 3.73 3.74 3.74 3.75 3.75 3.75 3.75 3.75 3.75 3.75 3.75 3.75 3.75 3.75 3.75 3.75 3.75
 3.75 3.76 3.76 3.76 3.76 3.76 3.76 3.76 3.76 3.76 3.76 3.76 3.76 3.76 3.76 3.76 3.76 3.76
 3.76 3.76 3.76 3.76 3.76 3.76 3.76 3.76 **V(SOC35%) = 3.76**

$V_t = 3.21$ 3.18 3.16 3.17 3.16 3.16 3.15 3.16 3.15 3.15 3.14 3.13 3.14 3.14 3.13
 3.13 3.12 3.12 3.13 3.12 3.13 3.12 3.13 3.12 3.12 3.12 3.12 3.12 3.12 3.12 3.12 3.12 3.12 3.12
 $V_{oc} = 3.68$ 3.72 3.73 3.73 3.73 3.73 3.73 3.73 3.74 3.74 3.74 3.74 3.74 3.74 3.74 3.74 3.74 3.74
 3.74 3.74 3.74 3.74 3.74 3.74 3.74 3.74 3.74 3.74 3.74 3.74 3.74 3.74 3.74 3.74 3.74 3.74
 3.74 3.74 3.74 3.74 3.74 3.74 3.75 **V(SOC30%) = 3.74**

$V_t = 3.20$ 3.17 3.16 3.15 3.15 3.15 3.14 3.13 3.14 3.14 3.14 3.12 3.12 3.12 3.12
 3.12 3.12 3.11 3.11 3.10 3.11 3.11 3.11 3.11 3.11 3.11 3.10 3.10 3.10 3.10 3.10 3.10 3.10 3.10
 $V_{oc} = 3.66$ 3.70 3.70 3.71 3.71 3.71 3.71 3.71 3.71 3.71 3.71 3.71 3.71 3.71 3.71 3.71 3.71 3.71
 3.71 3.71 3.71 3.71 3.71 3.71 3.71 3.71 3.71 3.71 3.71 3.71 3.71 3.71 3.71 3.71 3.71 3.71
 3.72 3.72 3.71 3.72 3.72 3.71 3.72 3.72 **V(SOC25%) = 3.72**

$V_t = 3.18$ 3.15 3.14 3.14 3.13 3.12 3.12 3.12 3.12 3.10 3.11 3.10 3.09 3.10 3.10
 3.10 3.09 3.09 3.09 3.09 3.09 3.09 3.09 3.08 3.08 3.08 3.08 3.08 3.08 3.08 3.08 3.08 3.08 3.08
 $V_{oc} = 3.63$ 3.67 3.67 3.68 3.68 3.68 3.68 3.68 3.68 3.68 3.68 3.68 3.68 3.68 3.68 3.68 3.68 3.68
 3.68 3.68 3.68 3.68 3.68 3.68 3.68 3.68 3.68 3.68 3.68 3.68 3.68 3.68 3.68 3.68 3.68 3.68
 3.68 3.68 3.68 3.68 3.68 3.68 3.68 **V(SOC20%) = 3.68**

$V_t = 3.13$ 3.10 3.10 3.09 3.07 3.08 3.07 3.07 3.06 3.07 3.05 3.06 3.05 3.05 3.05
 3.05 3.05 3.05 3.05 3.04 3.05 3.04 3.04 3.04 3.04 3.04 3.04 3.04 3.04 3.03 3.04 3.03 3.03 3.03
 3.03 3.03 3.03 $V_{oc} = 3.59$ 3.65 3.66 3.66 3.66 3.66 3.66 3.66 3.66 3.66 3.67 3.67 3.67 3.67 3.67 3.67
 3.67 3.67 3.67 3.67 3.67 3.67 3.67 3.67 3.67 3.67 3.67 3.67 3.67 3.67 3.67 3.67 3.67 3.67 3.67
 3.67 3.67 3.67 3.67 3.67 3.67 3.67 **V(SOC15%) = 3.67**

$V_t = 3.11$ 3.09 3.07 3.06 3.06 3.06 3.06 3.05 3.05 3.05 3.04 3.04 3.03 3.03 3.03
 3.03 3.03 3.03 3.02 3.02 3.02 3.02 3.01 3.01 3.01 3.01 3.01 3.01 3.01 3.01 3.00 3.00 3.00
 3.00 3.00 3.00 $V_{oc} = 3.55$ 3.62 3.63 3.64 3.64 3.64 3.64 3.64 3.64 3.64 3.64 3.64 3.65 3.65 3.65
 3.65 3.65 3.65 3.65 3.65 3.65 3.65 3.65 3.65 3.65 3.65 3.65 3.65 3.65 3.65 3.65 3.65 3.65 3.65
 3.65 3.65 3.65 3.65 3.65 3.65 3.65 **V(SOC10%) = 3.65**

ผลการทดลองแบตเตอรี่ก้อนที่ 3

V(SOC100%) = 4.11

$V_t = 3.56$ 3.54 3.53 3.52 3.52 3.51 3.50 3.50 3.50 3.49 3.49 3.49 3.49 3.48 3.48
 3.47 3.47 3.47 3.47 3.47 3.47 3.47 3.46 3.46 3.47 3.46 3.45 3.46 3.46 3.45 3.46 3.45 3.45 3.45
 3.45 3.44 3.44 $V_{oc} = 4.00$ 4.05 4.06 4.06 4.06 4.06 4.06 4.06 4.06 4.07 4.06 4.07 4.07 4.06 4.06 4.07
 4.06 4.07 4.06 4.07 4.07 4.07 4.07 4.06 4.07 4.07 4.07 4.07 4.07 4.07 4.07 4.07 4.07 4.07 4.07
 4.07 4.07 4.07 4.07 4.07 4.07 4.07 **V(SOC95%) = 4.07**

$V_t = 3.50$ 3.47 3.47 3.46 3.47 3.46 3.45 3.44 3.43 3.43 3.43 3.42 3.43 3.41 3.42
 3.42 3.41 3.41 3.41 3.40 3.40 3.40 3.39 3.40 3.40 3.40 3.40 3.40 3.39 3.39 3.39 3.38 3.39 3.39
 3.38 3.39 3.38 $V_{oc} = 3.94$ 4.00 4.01 4.02 4.02 4.02 4.02 4.02 4.02 4.02 4.02 4.02 4.02 4.02 4.02
 4.02 4.02 4.02 4.02 4.02 4.02 4.02 4.02 4.02 4.02 4.02 4.02 4.02 4.02 4.02 4.02 4.02 4.02 4.02
 4.02 4.02 4.02 4.02 4.03 4.02 4.02 **V(SOC90%) = 4.02**

$V_t = 3.47$ 3.45 3.42 3.42 3.41 3.40 3.40 3.40 3.39 3.39 3.37 3.38 3.39 3.37 3.37
 3.37 3.37 3.37 3.37 3.36 3.37 3.36 3.36 3.35 3.35 3.35 3.35 3.35 3.35 3.34 3.34 3.34 3.34 3.34
 3.33 3.34 3.34 $V_{oc} = 3.91$ 3.96 3.97 3.98 3.98 3.98 3.98 3.98 3.98 3.98 3.98 3.98 3.98 3.98 3.98
 3.98 3.98 3.98 3.98 3.98 3.98 3.98 3.98 3.98 3.98 3.98 3.98 3.98 3.98 3.98 3.99 3.98 3.98 3.99
 3.98 3.99 3.98 3.99 3.99 3.99 3.99 **V(SOC85%) = 3.98**

$V_t = 3.43$ 3.41 3.39 3.38 3.38 3.37 3.36 3.35 3.35 3.34 3.34 3.34 3.34 3.33 3.33
 3.33 3.32 3.33 3.32 3.32 3.33 3.32 3.32 3.32 3.31 3.31 3.31 3.31 3.30 3.31 3.31 3.30 3.30 3.30
 3.30 3.30 3.30 $V_{oc} = 3.87$ 3.92 3.93 3.94 3.94 3.94 3.94 3.95 3.95 3.95 3.95 3.95 3.95 3.95 3.95
 3.95 3.95 3.95 3.95 3.95 3.95 3.95 3.95 3.95 3.95 3.95 3.95 3.95 3.95 3.95 3.95 3.95 3.95
 3.95 3.95 3.95 3.95 3.95 3.95 3.95 **$V(\text{SOC80\%}) = 3.95$**

$V_t = 3.39$ 3.36 3.36 3.35 3.34 3.34 3.33 3.31 3.32 3.31 3.30 3.31 3.30 3.30 3.30
 3.30 3.29 3.30 3.29 3.29 3.28 3.28 3.28 3.28 3.28 3.28 3.28 3.28 3.28 3.28 3.28 3.28 3.28 3.28
 3.28 3.28 3.28 $V_{oc} = 3.84$ 3.89 3.90 3.90 3.91 3.91 3.91 3.91 3.91 3.91 3.92 3.91 3.92 3.92 3.92
 3.92 3.92 3.92 3.92 3.92 3.92 3.92 3.92 3.92 3.92 3.92 3.92 3.92 3.92 3.92 3.92 3.92 3.92
 3.92 3.92 3.92 3.92 3.92 3.92 3.92 **$V(\text{SOC75\%}) = 3.92$**

$V_t = 3.37$ 3.33 3.33 3.32 3.31 3.30 3.30 3.30 3.29 3.28 3.27 3.28 3.27 3.27 3.27
 3.27 3.26 3.27 3.26 3.26 3.26 3.26 3.26 3.25 3.25 3.25 3.26 3.25 3.26 3.25 3.25 3.24 3.25 3.24
 3.24 3.23 3.24 $V_{oc} = 3.81$ 3.85 3.86 3.87 3.87 3.87 3.87 3.88 3.88 3.88 3.88 3.88 3.88 3.88 3.89
 3.89 3.89 3.89 3.89 3.89 3.89 3.89 3.89 3.89 3.89 3.89 3.89 3.89 3.89 3.89 3.89 3.89 3.89
 3.89 3.89 3.89 3.89 3.89 3.89 3.89 **$V(\text{SOC70\%}) = 3.89$**

$V_t = 3.33$ 3.31 3.30 3.29 3.28 3.28 3.27 3.27 3.26 3.26 3.26 3.26 3.25 3.25 3.25
 3.25 3.25 3.24 3.24 3.24 3.23 3.24 3.24 3.23 3.23 3.24 3.23 3.23 3.23 3.22 3.22 3.22 3.22 3.23
 3.22 3.21 3.21 $V_{oc} = 3.78$ 3.82 3.83 3.84 3.84 3.84 3.84 3.84 3.84 3.85 3.85 3.85 3.85 3.85 3.85
 3.85 3.85 3.85 3.85 3.85 3.85 3.85 3.85 3.85 3.85 3.85 3.85 3.85 3.85 3.85 3.85 3.85 3.85
 3.85 3.85 3.85 3.85 3.85 3.85 3.85 **$V(\text{SOC65\%}) = 3.85$**

$V_t = 3.30$ 3.27 3.26 3.25 3.24 3.24 3.24 3.24 3.23 3.23 3.23 3.22 3.22 3.22 3.22
 3.22 3.22 3.21 3.21 3.20 3.21 3.20 3.20 3.20 3.20 3.21 3.21 3.21 3.20 3.20 3.20 3.20 3.20 3.20
 3.19 3.20 3.19 $V_{oc} = 3.76$ 3.80 3.81 3.81 3.82 3.82 3.82 3.82 3.82 3.82 3.82 3.82 3.82 3.82 3.82
 3.82 3.82 3.82 3.82 3.82 3.82 3.82 3.82 3.82 3.82 3.82 3.82 3.82 3.82 3.82 3.82 3.82 3.82
 3.82 3.82 3.82 3.82 3.82 3.82 3.82 **$V(\text{SOC60\%}) = 3.82$**

$V_t = 3.26$ 3.24 3.23 3.22 3.22 3.22 3.21 3.21 3.20 3.21 3.20 3.19 3.19 3.19 3.19
 3.20 3.19 3.19 3.18 3.19 3.19 3.18 3.18 3.19 3.19 3.19 3.18 3.18 3.18 3.18 3.18 3.17 3.18 3.17
 3.17 3.18 3.18 $V_{oc} = 3.74$ 3.78 3.79 3.79 3.80 3.80 3.80 3.80 3.80 3.80 3.80 3.80 3.80 3.80 3.80
 3.80 3.80 3.80 3.80 3.80 3.80 3.80 3.80 3.80 3.80 3.80 3.80 3.80 3.80 3.80 3.80 3.80 3.80
 3.80 3.80 3.80 3.80 3.80 3.80 3.80 **$V(\text{SOC55\%}) = 3.80$**

$V_t = 3.24 \ 3.23 \ 3.22 \ 3.22 \ 3.20 \ 3.20 \ 3.19 \ 3.19 \ 3.19 \ 3.19 \ 3.19 \ 3.18 \ 3.18 \ 3.18 \ 3.17$
 $3.18 \ 3.17 \ 3.17 \ 3.17 \ 3.17 \ 3.17 \ 3.16 \ 3.17 \ 3.17 \ 3.17 \ 3.17 \ 3.17 \ 3.16 \ 3.16 \ 3.16 \ 3.16 \ 3.16 \ 3.16 \ 3.16$
 $3.16 \ 3.16 \ 3.16 \ V_{oc} = 3.73 \ 3.77 \ 3.77 \ 3.78 \ 3.78 \ 3.78 \ 3.78 \ 3.78 \ 3.78 \ 3.78 \ 3.78 \ 3.78 \ 3.78 \ 3.78 \ 3.78 \ 3.78$
 $3.78 \ 3.78 \ 3.79 \ 3.78 \ 3.78 \ 3.78 \ 3.79 \ 3.78 \ 3.79 \ 3.78 \ 3.78 \ 3.79 \ 3.78 \ 3.78 \ 3.79 \ 3.79 \ 3.78 \ 3.78 \ 3.78$
 $3.79 \ 3.79 \ 3.78 \ 3.79 \ 3.79 \ 3.79 \ 3.79 \ V(\text{SOC50\%}) = 3.79$

$V_t = 3.23 \ 3.21 \ 3.20 \ 3.20 \ 3.19 \ 3.18 \ 3.18 \ 3.17 \ 3.17 \ 3.17 \ 3.17 \ 3.17 \ 3.16 \ 3.16 \ 3.16$
 $3.16 \ 3.16 \ 3.16 \ 3.16 \ 3.16 \ 3.16 \ 3.15 \ 3.15 \ 3.14 \ 3.16 \ 3.15 \ 3.15 \ 3.15 \ 3.15 \ 3.15 \ 3.15 \ 3.14 \ 3.15 \ 3.14$
 $3.14 \ 3.15 \ 3.15 \ V_{oc} = 3.71 \ 3.75 \ 3.76 \ 3.76 \ 3.77 \ 3.77 \ 3.77 \ 3.77 \ 3.77 \ 3.77 \ 3.77 \ 3.77 \ 3.77 \ 3.77 \ 3.77 \ 3.77$
 $3.77 \ 3.77 \ 3.77 \ 3.77 \ 3.77 \ 3.77 \ 3.77 \ 3.77 \ 3.77 \ 3.77 \ 3.77 \ 3.77 \ 3.77 \ 3.77 \ 3.77 \ 3.77 \ 3.77 \ 3.77$
 $3.77 \ 3.77 \ 3.77 \ 3.77 \ 3.77 \ 3.77 \ 3.77 \ V(\text{SOC45\%}) = 3.77$

$V_t = 3.22 \ 3.20 \ 3.19 \ 3.18 \ 3.17 \ 3.17 \ 3.17 \ 3.16 \ 3.15 \ 3.16 \ 3.15 \ 3.15 \ 3.15 \ 3.15 \ 3.15$
 $3.15 \ 3.15 \ 3.15 \ 3.14 \ 3.14 \ 3.14 \ 3.14 \ 3.15 \ 3.13 \ 3.13 \ 3.13 \ 3.14 \ 3.14 \ 3.14 \ 3.14 \ 3.14 \ 3.14 \ 3.14 \ 3.14$
 $3.14 \ 3.14 \ 3.13 \ V_{oc} = 3.70 \ 3.74 \ 3.75 \ 3.75 \ 3.75 \ 3.76 \ 3.76 \ 3.76 \ 3.76 \ 3.76 \ 3.76 \ 3.76 \ 3.76 \ 3.76 \ 3.76 \ 3.76$
 $3.76 \ 3.76 \ 3.76 \ 3.76 \ 3.76 \ 3.76 \ 3.76 \ 3.76 \ 3.76 \ 3.76 \ 3.76 \ 3.76 \ 3.76 \ 3.76 \ 3.76 \ 3.76 \ 3.76 \ 3.76$
 $3.76 \ 3.76 \ 3.76 \ 3.76 \ 3.76 \ 3.76 \ 3.76 \ V(\text{SOC40\%}) = 3.76$

$V_t = 3.21 \ 3.20 \ 3.18 \ 3.17 \ 3.17 \ 3.17 \ 3.15 \ 3.15 \ 3.15 \ 3.15 \ 3.14 \ 3.14 \ 3.14 \ 3.14 \ 3.13$
 $3.13 \ 3.13 \ 3.13 \ 3.13 \ 3.13 \ 3.13 \ 3.13 \ 3.13 \ 3.13 \ 3.13 \ 3.13 \ 3.13 \ 3.12 \ 3.12 \ 3.12 \ 3.13 \ 3.13 \ 3.12 \ 3.12$
 $3.12 \ 3.12 \ 3.12 \ V_{oc} = 3.69 \ 3.73 \ 3.74 \ 3.74 \ 3.74 \ 3.75 \ 3.75 \ 3.75 \ 3.75 \ 3.75 \ 3.75 \ 3.75 \ 3.75 \ 3.75 \ 3.75 \ 3.75$
 $3.75 \ 3.76 \ 3.75 \ 3.75 \ 3.76 \ 3.76 \ 3.76 \ 3.76 \ 3.75 \ 3.76 \ 3.76 \ 3.76 \ 3.76 \ 3.76 \ 3.76 \ 3.76 \ 3.76 \ 3.76 \ 3.76$
 $3.76 \ 3.76 \ 3.76 \ 3.76 \ 3.76 \ 3.76 \ 3.76 \ V(\text{SOC35\%}) = 3.76$

$V_t = 3.20 \ 3.17 \ 3.17 \ 3.16 \ 3.16 \ 3.14 \ 3.15 \ 3.15 \ 3.13 \ 3.13 \ 3.14 \ 3.14 \ 3.13 \ 3.13 \ 3.13$
 $3.12 \ 3.13 \ 3.12 \ 3.12 \ 3.12 \ 3.11 \ 3.12 \ 3.11 \ 3.12 \ 3.11 \ 3.12 \ 3.11 \ 3.11 \ 3.11 \ 3.11 \ 3.11 \ 3.10 \ 3.11 \ 3.11 \ 3.10$
 $3.11 \ 3.09 \ 3.09 \ V_{oc} = 3.68 \ 3.71 \ 3.72 \ 3.73 \ 3.73 \ 3.73 \ 3.73 \ 3.73 \ 3.73 \ 3.73 \ 3.73 \ 3.74 \ 3.74 \ 3.74 \ 3.74$
 $3.74 \ 3.74 \ 3.74 \ 3.74 \ 3.74 \ 3.74 \ 3.74 \ 3.74 \ 3.74 \ 3.74 \ 3.74 \ 3.74 \ 3.74 \ 3.74 \ 3.74 \ 3.74 \ 3.74 \ 3.74$
 $3.74 \ 3.74 \ 3.74 \ 3.74 \ 3.74 \ 3.74 \ 3.74 \ V(\text{SOC30\%}) = 3.74$

$V_t = 3.18 \ 3.16 \ 3.14 \ 3.14 \ 3.14 \ 3.13 \ 3.12 \ 3.13 \ 3.11 \ 3.12 \ 3.11 \ 3.11 \ 3.11 \ 3.11 \ 3.11 \ 3.11$
 $3.10 \ 3.10 \ 3.10 \ 3.09 \ 3.10 \ 3.10 \ 3.09 \ 3.09 \ 3.08 \ 3.08 \ 3.08 \ 3.08 \ 3.09 \ 3.08 \ 3.09 \ 3.08 \ 3.08 \ 3.08 \ 3.08$
 $3.08 \ 3.08 \ 3.08 \ V_{oc} = 3.65 \ 3.69 \ 3.69 \ 3.70 \ 3.70 \ 3.70 \ 3.70 \ 3.70 \ 3.70 \ 3.70 \ 3.70 \ 3.70 \ 3.70 \ 3.70 \ 3.70$
 $3.70 \ 3.70 \ 3.71 \ 3.71 \ 3.71 \ 3.71 \ 3.71 \ 3.71 \ 3.71 \ 3.71 \ 3.71 \ 3.71 \ 3.71 \ 3.71 \ 3.71 \ 3.71 \ 3.71 \ 3.71$
 $3.70 \ 3.71 \ 3.71 \ 3.71 \ 3.71 \ 3.71 \ 3.71 \ V(\text{SOC25\%}) = 3.71$

$V_t = 3.49$ 3.47 3.45 3.44 3.44 3.43 3.42 3.42 3.41 3.42 3.41 3.40 3.40 3.40 3.40
 3.39 3.39 3.39 3.39 3.38 3.39 3.38 3.38 3.38 3.38 3.37 3.38 3.37 3.37 3.37 3.37 3.37 3.37 3.37 3.37
 3.36 3.36 3.36 $V_{oc} = 3.94$ 3.99 4.01 4.01 4.01 4.01 4.01 4.01 4.02 4.02 4.02 4.02 4.02 4.02 4.02 4.02
 4.02 4.02 4.02 4.02 4.02 4.02 4.02 4.02 4.02 4.02 4.02 4.02 4.02 4.02 4.02 4.02 4.02 4.02 4.02
 4.02 4.02 4.02 4.02 4.02 4.02 4.02 **V(SOC85%) = 4.02**

$V_t = 3.47$ 3.43 3.42 3.41 3.40 3.39 3.39 3.39 3.38 3.37 3.37 3.37 3.37 3.36 3.36 3.36
 3.36 3.36 3.36 3.35 3.36 3.35 3.36 3.35 3.35 3.34 3.34 3.34 3.34 3.34 3.34 3.34 3.34 3.34 3.34
 3.33 3.33 3.33 $V_{oc} = 3.90$ 3.95 3.96 3.97 3.97 3.97 3.97 3.98 3.98 3.98 3.98 3.98 3.98 3.98 3.98
 3.98 3.98 3.98 3.98 3.98 3.98 3.98 3.98 3.98 3.98 3.98 3.98 3.98 3.98 3.98 3.98 3.98 3.98 3.98
 3.98 3.98 3.98 3.98 3.98 3.98 3.98 **V(SOC80%) = 3.98**

$V_t = 3.44$ 3.41 3.39 3.39 3.38 3.37 3.36 3.37 3.36 3.36 3.35 3.35 3.35 3.34 3.34
 3.34 3.34 3.34 3.34 3.34 3.33 3.33 3.33 3.33 3.33 3.33 3.32 3.32 3.32 3.33 3.32 3.32 3.31 3.32
 3.31 3.31 3.31 $V_{oc} = 3.87$ 3.91 3.92 3.93 3.93 3.93 3.94 3.94 3.94 3.94 3.94 3.94 3.94 3.94 3.94
 3.94 3.94 3.94 3.95 3.95 3.94 3.95 3.95 3.95 3.95 3.95 3.95 3.95 3.95 3.95 3.95 3.95 3.95 3.95
 3.95 3.95 3.95 3.95 3.95 3.95 3.95 **V(SOC75%) = 3.95**

$V_t = 3.42$ 3.39 3.37 3.36 3.35 3.35 3.34 3.34 3.34 3.34 3.33 3.32 3.32 3.32 3.31
 3.31 3.31 3.31 3.31 3.31 3.31 3.31 3.30 3.30 3.31 3.30 3.30 3.30 3.29 3.30 3.30 3.29 3.29 3.29
 3.29 3.29 3.29 $V_{oc} = 3.84$ 3.89 3.90 3.90 3.90 3.90 3.91 3.91 3.91 3.91 3.91 3.91 3.91 3.91 3.91
 3.91 3.91 3.91 3.91 3.91 3.91 3.91 3.91 3.91 3.91 3.91 3.92 3.92 3.92 3.92 3.91 3.92 3.92
 3.92 3.92 3.92 3.92 3.92 3.92 3.92 **V(SOC70%) = 3.92**

$V_t = 3.39$ 3.36 3.35 3.33 3.32 3.32 3.31 3.30 3.30 3.30 3.30 3.29 3.30 3.29 3.29
 3.28 3.29 3.28 3.28 3.28 3.28 3.28 3.27 3.27 3.27 3.27 3.27 3.27 3.27 3.27 3.26 3.27 3.26 3.27
 3.26 3.26 3.26 $V_{oc} = 3.81$ 3.86 3.86 3.87 3.87 3.87 3.87 3.87 3.87 3.87 3.88 3.88 3.88 3.88 3.88
 3.88 3.88 3.88 3.89 3.89 3.89 3.89 3.89 3.89 3.89 3.89 3.89 3.89 3.89 3.89 3.89 3.89 3.89 3.89
 3.89 3.89 3.89 3.89 3.89 3.89 3.89 **V(SOC65%) = 3.89**

$V_t = 3.36$ 3.32 3.31 3.30 3.29 3.29 3.29 3.28 3.28 3.27 3.27 3.26 3.26 3.26 3.26
 3.26 3.26 3.26 3.26 3.26 3.26 3.26 3.25 3.25 3.25 3.25 3.24 3.25 3.25 3.25 3.25 3.24 3.24 3.24
 3.24 3.24 3.24 $V_{oc} = 3.79$ 3.83 3.83 3.84 3.84 3.84 3.84 3.84 3.84 3.84 3.85 3.85 3.85 3.85 3.85
 3.85 3.85 3.85 3.85 3.85 3.85 3.85 3.85 3.85 3.85 3.85 3.85 3.85 3.85 3.85 3.85 3.85 3.85 3.85
 3.85 3.85 3.85 3.85 3.85 3.85 3.85 **V(SOC60%) = 3.85**

$V_t = 3.23$ 3.20 3.19 3.18 3.18 3.17 3.17 3.16 3.16 3.16 3.16 3.16 3.15 3.15 3.15
 3.15 3.14 3.15 3.14 3.14 3.14 3.14 3.14 3.14 3.14 3.14 3.14 3.13 3.13 3.13 3.13 3.13 3.13 3.13 3.13
 3.12 3.12 3.12 $V_{oc} = 3.68$ 3.71 3.72 3.73 3.73 3.73 3.73 3.73 3.73 3.74 3.74 3.74 3.74 3.74 3.74 3.74
 3.74 3.74 3.74 3.74 3.74 3.74 3.74 3.74 3.74 3.74 3.75 3.74 3.74 3.74 3.75 3.75 3.74
 3.75 3.75 3.75 3.75 3.74 3.74 3.75 **V(SOC25%) = 3.75**

$V_t = 3.21$ 3.19 3.17 3.17 3.16 3.15 3.15 3.15 3.15 3.14 3.14 3.14 3.14 3.13 3.14
 3.13 3.13 3.13 3.13 3.13 3.12 3.12 3.12 3.12 3.12 3.12 3.12 3.11 3.11 3.11 3.11 3.11 3.11 3.11 3.11
 3.11 3.11 3.11 $V_{oc} = 3.66$ 3.69 3.70 3.71 3.71 3.71 3.71 3.71 3.71 3.71 3.71 3.71 3.71 3.71 3.71 3.71
 3.72 3.72 3.72 3.72 3.72 3.72 3.72 3.72 3.72 3.72 3.72 3.72 3.72 3.72 3.72 3.72 3.72 3.72
 3.72 3.72 3.72 3.72 3.72 3.72 3.72 **V(SOC20%) = 3.72**

$V_t = 3.19$ 3.16 3.15 3.14 3.14 3.13 3.13 3.13 3.12 3.12 3.11 3.11 3.11 3.11 3.10
 3.10 3.10 3.10 3.10 3.09 3.09 3.09 3.09 3.09 3.09 3.09 3.09 3.08 3.08 3.08 3.08 3.08 3.08 3.08 3.08
 3.08 3.08 3.07 $V_{oc} = 3.63$ 3.67 3.68 3.68 3.68 3.68 3.68 3.68 3.68 3.68 3.68 3.68 3.68 3.68 3.68
 3.68 3.68 3.68 3.68 3.68 3.68 3.68 3.68 3.68 3.68 3.68 3.68 3.68 3.68 3.68 3.68 3.68 3.68
 3.68 3.68 3.68 3.68 3.68 3.68 3.68 **V(SOC15%) = 3.68**

$V_t = 3.14$ 3.11 3.11 3.10 3.09 3.09 3.09 3.08 3.08 3.07 3.08 3.08 3.07 3.07 3.06
 3.07 3.07 3.07 3.06 3.06 3.06 3.06 3.06 3.06 3.06 3.06 3.06 3.05 3.06 3.05 3.05 3.05 3.05 3.05 3.05
 3.04 3.04 3.04 $V_{oc} = 3.60$ 3.65 3.66 3.66 3.66 3.66 3.66 3.67 3.66 3.67 3.67 3.67 3.67 3.67 3.67
 3.67 3.67 3.67 3.67 3.67 3.67 3.67 3.67 3.67 3.67 3.67 3.67 3.67 3.67 3.67 3.67 3.67 3.67
 3.67 3.67 3.67 3.67 3.67 3.67 3.67 **V(SOC10%) = 3.67**

ผลการทดลองแบตเตอรี่ก้อนที่ 5

V(SOC100%) = 4.09

$V_t = 3.51$ 3.48 3.47 3.47 3.46 3.46 3.45 3.45 3.45 3.44 3.44 3.43 3.43 3.42 3.43
 3.42 3.42 3.42 3.41 3.42 3.41 3.41 3.41 3.41 3.40 3.40 3.40 3.39 3.40 3.40 3.40 3.40 3.39 3.39
 3.39 3.39 3.39 $V_{oc} = 3.99$ 4.04 4.04 4.05 4.05 4.05 4.05 4.05 4.05 4.05 4.05 4.05 4.05 4.05 4.05
 4.05 4.05 4.05 4.05 4.05 4.05 4.05 4.05 4.05 4.05 4.05 4.05 4.05 4.05 4.05 4.05 4.05 4.05
 4.05 4.05 4.05 4.05 4.05 4.05 4.05 **V(SOC95%) = 4.05**

$V_t = 3.47$ 3.45 3.43 3.42 3.41 3.41 3.41 3.40 3.39 3.39 3.38 3.38 3.37 3.37 3.38
 3.37 3.37 3.36 3.36 3.37 3.36 3.36 3.36 3.36 3.36 3.35 3.35 3.35 3.35 3.35 3.35 3.35 3.34 3.34
 3.34 3.34 3.34 $V_{oc} = 3.93$ 3.99 4.00 4.00 4.00 4.01 4.01 4.01 4.01 4.01 4.01 4.01 4.01 4.01 4.01
 4.01 4.01 4.01 4.01 4.01 4.01 4.01 4.01 4.01 4.01 4.01 4.01 4.01 4.01 4.01 4.01 4.01 4.01
 4.01 4.01 4.01 4.01 4.01 4.01 4.01 **V(SOC90%) = 4.01**

$V_t = 3.43$ 3.40 3.39 3.38 3.37 3.36 3.36 3.35 3.35 3.35 3.34 3.34 3.34 3.34 3.33
 3.33 3.33 3.32 3.32 3.32 3.32 3.32 3.32 3.31 3.31 3.31 3.31 3.31 3.31 3.30 3.31 3.31 3.31 3.30
 3.30 3.30 3.30 $V_{oc} = 3.90$ 3.95 3.96 3.96 3.97 3.97 3.97 3.97 3.97 3.97 3.97 3.97 3.97 3.97 3.97
 3.97 3.97 3.97 3.97 3.97 3.97 3.97 3.97 3.97 3.97 3.97 3.97 3.97 3.97 3.97 3.97 3.97 3.97
 3.97 3.97 3.97 3.97 3.97 3.97 3.97 **V(SOC85%) = 3.97**

$V_t = 3.40$ 3.37 3.35 3.34 3.33 3.33 3.32 3.31 3.31 3.31 3.30 3.30 3.30 3.30 3.29
 3.29 3.29 3.29 3.28 3.28 3.28 3.28 3.28 3.28 3.28 3.27 3.27 3.27 3.27 3.27 3.27 3.27 3.27 3.26
 3.26 3.26 3.26 $V_{oc} = 3.86$ 3.91 3.91 3.92 3.93 3.93 3.93 3.93 3.94 3.93 3.94 3.94 3.94 3.94 3.94
 3.94 3.94 3.94 3.94 3.94 3.94 3.94 3.94 3.94 3.94 3.94 3.94 3.94 3.94 3.94 3.94 3.94 3.94
 3.94 3.94 3.94 3.94 3.94 3.94 3.94 **V(SOC80%) = 3.94**

$V_t = 3.37$ 3.33 3.31 3.30 3.29 3.28 3.28 3.28 3.28 3.27 3.27 3.26 3.26 3.26 3.26
 3.26 3.26 3.25 3.25 3.25 3.25 3.25 3.25 3.25 3.25 3.24 3.24 3.24 3.24 3.24 3.24 3.24 3.23 3.24
 3.23 3.23 3.23 $V_{oc} = 3.83$ 3.88 3.89 3.89 3.89 3.90 3.90 3.90 3.90 3.90 3.90 3.91 3.91 3.91 3.91
 3.91 3.91 3.91 3.91 3.91 3.91 3.91 3.91 3.91 3.91 3.91 3.91 3.91 3.91 3.91 3.91 3.91 3.91
 3.91 3.91 3.91 3.91 3.91 3.91 3.91 **V(SOC75%) = 3.91**

$V_t = 3.33$ 3.30 3.29 3.27 3.26 3.26 3.25 3.25 3.25 3.25 3.24 3.24 3.24 3.23 3.23
 3.23 3.22 3.23 3.22 3.22 3.22 3.22 3.22 3.22 3.21 3.22 3.22 3.21 3.21 3.21 3.20 3.20 3.21 3.20
 3.20 3.20 3.20 $V_{oc} = 3.80$ 3.85 3.85 3.86 3.86 3.86 3.86 3.86 3.86 3.87 3.87 3.87 3.87 3.87 3.87
 3.87 3.87 3.87 3.87 3.87 3.87 3.88 3.87 3.87 3.88 3.88 3.88 3.88 3.88 3.88 3.88 3.88 3.88
 3.88 3.88 3.88 3.88 3.88 3.88 3.88 **V(SOC70%) = 3.88**

$V_t = 3.30$ 3.27 3.25 3.25 3.24 3.23 3.22 3.22 3.22 3.21 3.21 3.20 3.20 3.21 3.20
 3.20 3.20 3.20 3.20 3.19 3.19 3.19 3.19 3.19 3.19 3.19 3.19 3.18 3.19 3.18 3.18 3.19 3.18 3.18
 3.18 3.18 3.18 $V_{oc} = 3.78$ 3.82 3.83 3.83 3.83 3.83 3.83 3.83 3.84 3.84 3.84 3.84 3.84 3.84 3.84
 3.84 3.84 3.84 3.84 3.84 3.84 3.84 3.84 3.84 3.84 3.84 3.84 3.84 3.84 3.84 3.84 3.84 3.84
 3.84 3.84 3.84 3.84 3.84 3.84 3.84 **V(SOC65%) = 3.84**

$V_t = 3.25\ 3.22\ 3.21\ 3.20\ 3.19\ 3.19\ 3.19\ 3.17\ 3.18\ 3.17\ 3.17\ 3.17\ 3.17\ 3.17\ 3.17$
 $3.16\ 3.16\ 3.16\ 3.15\ 3.15\ 3.15\ 3.15\ 3.15\ 3.15\ 3.15\ 3.15\ 3.15\ 3.15\ 3.14\ 3.14\ 3.14\ 3.14\ 3.14\ 3.14\ 3.14$
 $3.14\ 3.14\ 3.14\ V_{oc} = 3.76\ 3.80\ 3.80\ 3.81\ 3.81\ 3.81\ 3.81\ 3.81\ 3.81\ 3.81\ 3.81\ 3.81\ 3.81\ 3.81\ 3.81\ 3.81\ 3.81\ 3.81$
 $3.81\ 3.81\ 3.81\ 3.81\ 3.81\ 3.81\ 3.81\ 3.81\ 3.81\ 3.81\ 3.81\ 3.81\ 3.81\ 3.81\ 3.81\ 3.81\ 3.81\ 3.81\ 3.81$
 $3.81\ 3.81\ 3.81\ 3.81\ 3.81\ 3.81\ 3.82\ 3.81\ 3.81\ 3.81$
 $V(\text{SOC60\%}) = 3.81$

$V_t = 3.22\ 3.20\ 3.18\ 3.18\ 3.16\ 3.16\ 3.16\ 3.15\ 3.15\ 3.15\ 3.15\ 3.14\ 3.14\ 3.14\ 3.14$
 $3.14\ 3.14\ 3.14\ 3.14\ 3.14\ 3.14\ 3.13\ 3.13\ 3.13\ 3.13\ 3.13\ 3.13\ 3.13\ 3.12\ 3.13\ 3.13\ 3.13\ 3.13\ 3.12$
 $3.13\ 3.13\ 3.12\ V_{oc} = 3.74\ 3.78\ 3.78\ 3.79\ 3.79\ 3.79\ 3.79\ 3.79\ 3.79\ 3.79\ 3.79\ 3.79\ 3.79\ 3.80\ 3.79\ 3.79\ 3.79\ 3.79$
 $3.79\ 3.79\ 3.79\ 3.79\ 3.79\ 3.80\ 3.79\ 3.79\ 3.79\ 3.80\ 3.79\ 3.80\ 3.79\ 3.79\ 3.79\ 3.79\ 3.79\ 3.80\ 3.79\ 3.79$
 $3.79\ 3.79\ 3.80\ 3.79\ 3.79\ 3.79\ 3.79\ 3.79\ 3.79\ 3.79\ 3.79\ 3.79\ 3.79\ 3.79\ 3.79\ 3.79\ 3.79\ 3.79\ 3.79$
 $V(\text{SOC55\%}) = 3.80$

$V_t = 3.20\ 3.17\ 3.16\ 3.15\ 3.15\ 3.14\ 3.14\ 3.14\ 3.14\ 3.13\ 3.13\ 3.13\ 3.13\ 3.13\ 3.12$
 $3.12\ 3.12\ 3.12\ 3.11\ 3.12\ 3.12\ 3.11\ 3.12\ 3.11\ 3.11\ 3.12\ 3.11\ 3.11\ 3.11\ 3.11\ 3.11\ 3.11\ 3.11\ 3.11\ 3.11$
 $3.11\ 3.11\ 3.11\ V_{oc} = 3.73\ 3.76\ 3.77\ 3.77\ 3.77\ 3.77\ 3.77\ 3.78\ 3.78\ 3.78\ 3.78\ 3.78\ 3.78\ 3.78\ 3.78\ 3.78\ 3.78\ 3.78$
 $3.78\ 3.78\ 3.78\ 3.78\ 3.78\ 3.78\ 3.78\ 3.78\ 3.78\ 3.78\ 3.78\ 3.78\ 3.78\ 3.78\ 3.78\ 3.78\ 3.78\ 3.78\ 3.78$
 $3.78\ 3.78\ 3.78\ 3.78\ 3.78\ 3.78\ 3.78\ 3.78\ 3.78\ 3.78\ 3.78\ 3.78\ 3.78\ 3.78\ 3.78\ 3.78\ 3.78\ 3.78\ 3.78$
 $V(\text{SOC50\%}) = 3.78$

$V_t = 3.19\ 3.16\ 3.15\ 3.14\ 3.14\ 3.13\ 3.13\ 3.12\ 3.12\ 3.12\ 3.11\ 3.11\ 3.11\ 3.11\ 3.11$
 $3.10\ 3.10\ 3.11\ 3.10\ 3.10\ 3.10\ 3.10\ 3.10\ 3.10\ 3.10\ 3.10\ 3.10\ 3.09\ 3.09\ 3.09\ 3.09\ 3.10\ 3.10\ 3.09\ 3.10\ 3.10$
 $3.09\ 3.09\ 3.09\ V_{oc} = 3.71\ 3.75\ 3.76\ 3.76\ 3.76\ 3.76\ 3.76\ 3.77\ 3.76\ 3.77\ 3.77\ 3.77\ 3.77\ 3.77\ 3.77\ 3.77\ 3.77\ 3.77$
 $3.77\ 3.77\ 3.77\ 3.77\ 3.77\ 3.77\ 3.77\ 3.77\ 3.77\ 3.77\ 3.77\ 3.77\ 3.77\ 3.77\ 3.77\ 3.77\ 3.77\ 3.77\ 3.77\ 3.77$
 $3.77\ 3.77\ 3.77\ 3.77\ 3.77\ 3.77\ 3.77\ 3.77\ 3.77\ 3.77\ 3.77\ 3.77\ 3.77\ 3.77\ 3.77\ 3.77\ 3.77\ 3.77\ 3.77$
 $V(\text{SOC45\%}) = 3.77$

$V_t = 3.17\ 3.14\ 3.13\ 3.13\ 3.12\ 3.12\ 3.11\ 3.11\ 3.11\ 3.11\ 3.10\ 3.10\ 3.10\ 3.10\ 3.10$
 $3.09\ 3.09\ 3.09\ 3.09\ 3.09\ 3.09\ 3.09\ 3.09\ 3.09\ 3.08\ 3.09\ 3.08\ 3.08\ 3.09\ 3.08\ 3.08\ 3.08\ 3.08\ 3.08\ 3.08\ 3.08$
 $3.08\ 3.08\ 3.07\ V_{oc} = 3.70\ 3.74\ 3.75\ 3.75\ 3.75\ 3.75\ 3.75\ 3.75\ 3.75\ 3.76\ 3.76\ 3.76\ 3.76\ 3.76\ 3.76\ 3.76\ 3.76$
 $3.76\ 3.76\ 3.76\ 3.76\ 3.76\ 3.76\ 3.76\ 3.76\ 3.76\ 3.76\ 3.76\ 3.76\ 3.76\ 3.76\ 3.76\ 3.76\ 3.76\ 3.76\ 3.76$
 $3.76\ 3.76\ 3.76\ 3.76\ 3.76\ 3.76\ 3.76\ 3.76\ 3.76\ 3.76\ 3.76\ 3.76\ 3.76\ 3.76\ 3.76\ 3.76\ 3.76\ 3.76\ 3.76$
 $V(\text{SOC40\%}) = 3.76$

$V_t = 3.16\ 3.14\ 3.13\ 3.12\ 3.11\ 3.10\ 3.10\ 3.10\ 3.10\ 3.09\ 3.09\ 3.08\ 3.08\ 3.08\ 3.08$
 $3.08\ 3.08\ 3.08\ 3.07\ 3.07\ 3.08\ 3.07\ 3.08\ 3.07\ 3.07\ 3.07\ 3.07\ 3.07\ 3.07\ 3.07\ 3.07\ 3.07\ 3.06\ 3.06\ 3.06$
 $3.06\ 3.06\ 3.06\ V_{oc} = 3.69\ 3.73\ 3.73\ 3.74\ 3.74\ 3.74\ 3.74\ 3.74\ 3.74\ 3.74\ 3.75\ 3.75\ 3.75\ 3.75\ 3.75\ 3.75\ 3.75$
 $3.75\ 3.75\ 3.75\ 3.75\ 3.75\ 3.75\ 3.75\ 3.75\ 3.75\ 3.75\ 3.75\ 3.75\ 3.75\ 3.75\ 3.75\ 3.75\ 3.75\ 3.75\ 3.75$
 $3.75\ 3.75\ 3.75\ 3.75\ 3.75\ 3.75\ 3.75\ 3.75\ 3.75\ 3.75\ 3.75\ 3.75\ 3.75\ 3.75\ 3.75\ 3.75\ 3.75\ 3.75\ 3.75$
 $V(\text{SOC35\%}) = 3.75$

$V_t = 3.15$ 3.12 3.11 3.10 3.10 3.09 3.09 3.08 3.08 3.08 3.08 3.07 3.07 3.07 3.07
 3.07 3.06 3.06 3.06 3.06 3.06 3.06 3.05 3.05 3.05 3.05 3.05 3.05 3.05 3.04 3.05 3.04 3.05
 3.04 3.04 3.04 $V_{oc} = 3.67$ 3.71 3.71 3.72 3.72 3.72 3.72 3.72 3.72 3.73 3.73 3.73 3.73 3.73 3.73
 3.73 3.73 3.73 3.73 3.73 3.73 3.73 3.73 3.73 3.73 3.73 3.73 3.73 3.73 3.73 3.73 3.73 3.73
 3.73 3.73 3.73 3.73 3.73 3.73 3.73 **V(SOC30%) = 3.73**

$V_t = 3.12$ 3.09 3.08 3.08 3.07 3.07 3.05 3.05 3.05 3.04 3.04 3.04 3.04 3.04 3.04
 3.04 3.04 3.03 3.03 3.03 3.03 3.02 3.03 3.02 3.02 3.02 3.01 3.01 3.02 3.01 3.01 3.01 3.01
 3.01 3.01 3.01 $V_{oc} = 3.64$ 3.68 3.68 3.69 3.69 3.69 3.69 3.69 3.69 3.69 3.69 3.69 3.69 3.69 3.69
 3.69 3.69 3.69 3.69 3.69 3.69 3.69 3.69 3.69 3.69 3.69 3.69 3.69 3.69 3.69 3.69 3.69 3.69
 3.69 3.69 3.69 3.69 3.69 3.69 3.69 **V(SOC25%) = 3.69**

$V_t = 3.08$ 3.05 3.04 3.03 3.02 3.02 3.02 3.01 3.01 3.01 3.00 3.01 3.00 3.00 3.00
 3.00 3.00 3.00 2.99 2.99 3.00 2.99 2.99 2.99 2.99 2.99 2.99 2.99 2.98 2.98 2.98 2.98 2.98 2.98
 2.97 2.97 2.97 $V_{oc} = 3.61$ 3.66 3.67 3.67 3.67 3.67 3.67 3.67 3.67 3.67 3.67 3.67 3.67 3.67 3.67
 3.67 3.67 3.67 3.68 3.68 3.67 3.68 3.68 3.68 3.68 3.68 3.67 3.68 3.68 3.68 3.68 3.68 3.68
 3.68 3.68 3.68 3.68 3.68 3.68 3.68 **V(SOC20%) = 3.68**

$V_t = 3.06$ 3.03 3.02 3.01 3.00 2.99 2.99 2.99 2.98 2.97 2.97 2.97 2.96 2.96 2.96
 2.96 2.96 2.96 2.96 2.96 2.96 2.95 2.95 2.95 2.95 2.95 2.95 2.94 2.94 2.94 2.94 2.94 2.94 2.93
 2.93 2.93 2.93 $V_{oc} = 3.58$ 3.63 3.64 3.65 3.65 3.65 3.65 3.65 3.65 3.65 3.65 3.65 3.65 3.65 3.65
 3.66 3.66 3.66 3.66 3.66 3.66 3.66 3.66 3.66 3.66 3.66 3.66 3.66 3.66 3.66 3.66 3.66 3.66
 3.66 3.66 3.66 3.66 3.66 3.66 3.66 **V(SOC15%) = 3.66**

$V_t = 3.04$ 3.02 3.00 2.99 2.98 2.97 2.96 2.96 2.95 2.95 2.95 2.95 2.94 2.94 2.94
 2.94 2.94 2.94 2.94 2.94 2.93 2.93 2.93 2.93 2.93 2.93 2.92 2.92 2.92 2.92 2.92 2.92 2.91 2.91
 2.91 2.91 2.91 $V_{oc} = 3.56$ 3.60 3.62 3.63 3.63 3.63 3.63 3.63 3.36 3.63 3.63 3.63 3.63 3.63 3.63
 3.64 3.64 3.64 3.64 3.64 3.64 3.64 3.64 3.64 3.64 3.64 3.64 3.64 3.64 3.64 3.64 3.64 3.64
 3.64 3.64 3.64 3.64 3.64 3.64 3.64 **V(SOC10%) = 3.64**

ภาคผนวก ข
โปรแกรม PIC16F877

โปรแกรมควบคุมวงจรตรวจวัดค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่

```

#include <16F877.h> // Standard Header file for the PIC16F877 device
#include <math.h>

#define ADC_BITS 10 // ADC = 10 bit

#define CLOCK_SP 1000000 // Clock Speed(Hz)

#define HS // Oscillator mode HS

#define NOLVP, NOWDT // No Low Voltage Program, No Watchdog timer

#define NOPROTECT // Code no protection

#include <delay.h> // Use built-in function: delay_ms()&delay_us()

#include <rs232.h> // Use rs232 module: rs232_send()&rs232_recv()

#include <fast_io.h> // Use fast_io module: fast_io(A)

#define VBE 0.00488758553274682306940371456509 // Vref/1023; Vref = 5 volt

#define LED PIN_B0

void main(void)
{
    int i;
    int j;
    int k;

    int16 value1;
    int16 value2;
    int16 value3;

    float volt;
    float amp;

    setup_adc_ports(AN0_AN1_AN3);
    setup_adc(ADC_CLOCK_INTERNAL);
    delay_ms(5000);
    set_adc_channel(1);
    delay_us(10);
    value1 = read_adc();
    volt = value1;

```

```
printf("V(SOC[0]) = %f ", volt*vbe);
delay_ms(5000);
j=0;
while(j<18)
{
    i=0;
    printf("Vt = [%d]", j+1);
while(i<36)
{
    if(i==0)
    {
        output_high(LED);
        set_adc_channel(1);
        delay_ms(10);
        value1 = read_adc();
        volt = value1;
        printf(" %f", volt*vbe);
        //set_adc_channel(3);
        //delay_ms(10);
        //value2 = read_adc();
        //amp = value2;
        //printf("%f", amp*vbe);
        delay_ms(5000);
        i++;
    }
    set_adc_channel(1);
    delay_ms(10);
    value1 = read_adc();
    volt = value1;
    printf(" %f", volt*vbe);
```

```

        //set_adc_channel(3);
        //delay_ms(10);
        //value2 = read_adc();
        //amp = value2;
        //printf("%f", amp*vbe);
        delay_ms(5000);
        i++;
        if(i==36)
        {
            set_adc_channel(1);
            delay_ms(10);
            value1 = read_adc();
            volt = value1;
            printf(" %f", volt*vbe);
            //set_adc_channel(3);
            //delay_ms(10);
            //value2 = read_adc();
            //amp = value2;
            //printf("%f", amp*vbe);
            delay_ms(5000);
            output_low(LED);
        }
    }
    delay_ms(57000); //delay 57 s
    //Open circuit Voltage
    set_adc_channel(1);
    delay_us(10);
    value3 = read_adc();
    volt = value3;
    printf(" V(SOC[%d]) = %f\n\r", j+1, volt*vbe);

```

```

delay_ms(5000);
j++;
}

```

โปรแกรมการประมาณค่าสถานะประจุแบบออนไลน์

```

#include <16F877.h> // Standard Header file for the PIC16F877 device
#include <math.h>
#define ADC = 10 // ADC = 10 bit
#define CLOCK_SP 1000000 // Clock Speed(Hz)
#fuses HS // Oscillator mode HS
#fuses NOLVP, NOWDT // No Low Voltage Program, No Watchdog timer
#fuses NOPROTECT // Code no protection
#use delay (clock =CLOCK_SP) // Use built-in function: delay_ms()&delay_us()
#use rs232(baud = 9600, xmit = pin_c6, rcv = pin_c7)
#use fast_io(A)
#define vbe 0.00488758553274682306940371456509 // Vref/1023; Vref= 5 volt
#define LED PIN_B0
void main(void)
{
int i;
int16 value1;
int16 value2;
float volt_t;
float volt_open;
float volt_Ri;
float volt_Rd;
float amp;
float amp1;
setup_adc_ports(AN0_AN1_AN3);
setup_adc(ADC_CLOCK_INTERNAL);

```



```
delay_ms(5000);
set_adc_channel(1);
delay_ms(10);
value1 = read_adc();
volt_open = value1;
printf("Volt_open_circuit = %f\n\r", volt_open*vbe);
delay_ms(5000);
i=0;
while(i<10000)
{
    output_high(LED);
    set_adc_channel(1);
    delay_ms(10);
    value1 = read_adc();
    volt_t = value1*vbe;
    set_adc_channel(3);
    delay_ms(10);
    value2 = read_adc();
    amp = (value2*vbe);
    amp1 = amp/1.85;
    volt_Ri = amp1*0.547;
    volt_Rd = amp1*0.033;
    volt_open = (volt_t) + (volt_Ri) + (volt_Rd);
    if(4.10 <= volt_open)
        printf("SOC = 100 Percent \n\r");
    if(4.07 <= volt_open && volt_open < 4.10)
        printf("SOC = 95 Percent \n\r");
    if(4.02 <= volt_open && volt_open < 4.07)
        printf("SOC = 90 Percent \n\r");
    if(3.98 <= volt_open && volt_open < 4.02)
```

```
    printf("SOC = 85 Percent \n\r");
if(3.95 <= volt_open && volt_open < 3.98)
    printf("SOC = 80 Percent \n\r");
if(3.92 <= volt_open && volt_open < 3.95)
    printf("SOC = 75 Percent \n\r");
if(3.89 <= volt_open && volt_open < 3.92)
    printf("SOC = 70 Percent \n\r");
if(3.85 <= volt_open && volt_open < 3.89)
    printf("SOC = 65 Percent \n\r");
if(3.82 <= volt_open && volt_open < 3.85)
    printf("SOC = 60 Percent \n\r");
if(3.80 <= volt_open && volt_open < 3.82)
    printf("SOC = 55 Percent \n\r");
if(3.79 <= volt_open && volt_open < 3.80)
    printf("SOC = 50 Percent \n\r");
if(3.78 <= volt_open && volt_open < 3.79)
    printf("SOC = 45 Percent \n\r");
if(3.77 <= volt_open && volt_open < 3.78)
    printf("SOC = 40 Percent \n\r");
if(3.76 <= volt_open && volt_open < 3.77)
    printf("SOC = 35 Percent \n\r");
if(3.74 <= volt_open && volt_open < 3.76)
    printf("SOC = 30 Percent \n\r");
if(3.71 <= volt_open && volt_open < 3.74)
    printf("SOC = 25 Percent \n\r");
if(3.68 <= volt_open && volt_open < 3.71)
    printf("SOC = 20 Percent \n\r");
if(3.67 <= volt_open && volt_open < 3.68)
    printf("SOC = 15 Percent \n\r");
```

```
if(3.65 <= volt_open && volt_open < 3.67)
    printf("SOC = 10 Percent \n\r");
if(3.60 <= volt_open && volt_open < 3.65)
    printf("SOC = 5 Percent \n\r");
if(volt_open < 3.60)
    printf("SOC = 0 Percent \n\r");
delay_ms(5000);
i++;
}
}
```

ภาคผนวก ก
การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล	นายจิรวัดน์ ฉายแสงเจริญ		
รหัสประจำตัวนักศึกษา	5410120026		
วุฒิการศึกษา			
	วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2553

ทุนการศึกษา (ที่ได้รับในระหว่างการศึกษา)

ทุนอุดหนุนการวิจัยเพื่อวิทยานิพนธ์

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

จิรวัดน์ ฉายแสงเจริญ กุสุมาลย์ เกลิมยานนท์ และ อนุวัตร ประเสริฐสิทธิ์, “การประมาณค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนสำหรับเซนเซอร์โหนดในระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย,” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 36 (EECON-36), เล่ม 1, วันที่ 11-13 ธันวาคม 2556, หน้า 467-470.