

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การใช้งานแบตเตอรี่แบบผสมผสานสำหรับระบบกักเก็บพลังงานในโครงข่ายไฟฟ้า

HYBRID BATTERY FOR GRID SUPPORT FUNCTION



T140865



เลขหมู่.....140865

เลขทะเบียน.....

วัน,เดือน,ปี.....23 ก.พ. 2559

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2557

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

HYBRID BATTERY FOR GRID SUPPORT FUNCTION



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

2014

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2557

การใช้งานแบตเตอรี่แบบผสมผสานสำหรับระบบกักเก็บพลังงานในโครงข่ายไฟฟ้า
HYBRID BATTERY FOR GRID SUPPORT FUNCTION



อาจารย์ที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์ ดร. สุรินทร์ คำฝอย
รองศาสตราจารย์ ประภาส ไพรสวรรณา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การใช้งานแบบเตอร์แบบผสมผสานสำหรับระบบกักเก็บพลังงานในโครงข่ายไฟฟ้า

นายจตุรงค์ ทองแกมแก้ว
นายจตุรัส ศรีกระจิบ
นายจรรพพงษ์ หนูเหลือ
นางสาวชญาณิศ ดันกุล
รศ.ดร. สุรินทร์ คำฝอย อาจารย์ที่ปรึกษา
รศ.ประภาส ไพรสวรรณา อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2557

บทคัดย่อ

แนวคิดของระบบแบบเตอร์แบบผสมผสานที่ถูกนำเสนอในงานวิจัยนี้ หัวใจหลักสำคัญของระบบแบบเตอร์แบบผสมผสานดังกล่าวคือวงจรสมมูลที่แสดงพฤติกรรมของแบบเตอร์ ดังนั้นวงจรสมมูลของแบบเตอร์ตะกั่วกรดและแบบเตอร์ลิเทียมไอออนจึงถูกพัฒนาขึ้นมา โดยวิธีการที่ได้นำเสนอเพื่อหาวงจรสมมูลของแบบเตอร์คือการอัดประจุไฟฟ้าเพื่อวัดกระแส แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วอิมพีแดนซ์ และความต่างเฟสของแบบเตอร์ที่ทำการทดสอบ วงจรสมมูลที่นำเสนอได้จากการทดสอบเพื่อตรวจสอบสนองทั้งเชิงเวลาและเชิงความถี่ ซึ่งได้มีการนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลจำลองโดยใช้โปรแกรม MATLAB / Simulink และ PSIM 9.0 จากผลที่ได้สรุปว่าวงจรสมมูลที่นำเสนอมีความถูกต้องเพียงพอสามารถนำมาใช้ในการออกแบบระบบแบบเตอร์แบบผสมผสานรวมทั้งระบบการตรวจจับและแสดงผลของแบบเตอร์ และระบบการอัดประจุในอนาคตต่อไป

HYBRID BATTERY FOR GRID SUPPORT FUNCTION

Jaturong Tongkamkaew

Jaturat Srikrajib

Jarupong Nooleau

Chayanit Tankul

Assoc.Prof. Dr. Surin Khomfoi Advisor

Assoc.Prof. Prapart Praisuwanna Advisor

Year 2014

ABSTRACT

The concept of hybrid battery system is proposed in this thesis. The key of hybrid battery system is the equivalent circuit represented battery characteristics. Therefore, the equivalent circuit of lead acid and lithium ion batteries are developed. The measurement method and tested circuit for getting battery model are also proposed by using charging current terminal voltage and impedance angle of tested batteries. The proposed equivalent circuit are validated under both time and frequency responses using MATLAB/Simulink and PSIM 9.0. The results show that the proposed equivalent circuit is accurate adequately. The results of this study can be used to design the hybrid battery system including battery monitoring and charger system in the future.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เรื่องการใช้งานแบตเตอรี่แบบผสมผสานสำหรับระบบกักเก็บพลังงานในโครงข่ายไฟฟ้าสามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เกิดจากการดำเนินงานด้วยความมุ่งมั่นวิริยะอุตสาหะ พร้อมทั้งยังได้รับการสนับสนุนในด้านต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นด้านความรู้ทางด้านวิชาการ ด้านเทคนิคการดำเนินงาน ด้านทุนสนับสนุน รวมถึงคำแนะนำต่างๆ ทางคณะผู้จัดทำจึงขอขอบพระคุณในความอนุเคราะห์ที่ให้ความโดยไม่หวังสิ่งตอบแทน

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ประภาช ไพรสวรรณา และรองศาสตราจารย์ ดร.สุรินทร์ คำผอย ผู้ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาของปริญญานิพนธ์นี้ ที่ช่วยประสิทธิ์ประสาทความรู้ทางด้านวิชาการ ดูแลเอาใจใส่ตลอดจนให้คำแนะนำในการดำเนินงาน ทำให้ปริญญานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ คุณภูมิพัฒน์ จำปีทอง ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการให้คำแนะนำ ความช่วยเหลือทางด้านการออกแบบการทดลอง การวิเคราะห์ผลการทดลอง และความช่วยเหลือทางด้านการสั่งซื้ออุปกรณ์ของปริญญานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการ REAL (Renewable Energy Application Laboratory) ที่เป็นทั้งบ้าน เป็นห้องทดลอง เป็นสนามเด็กเล่น เป็นห้องสมุด และที่สำคัญเป็นครอบครัวเดียวกัน

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนการวิจัย จากสำนักนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน ซึ่งเป็นผู้สนับสนุนทุนวิจัยในเรื่องการใช้งานแบตเตอรี่แบบผสมผสานสำหรับระบบกักเก็บพลังงานในโครงข่ายไฟฟ้า เพื่อนำไปเป็นเงินทุนด้านอุปกรณ์เป็นจำนวนเงิน 40,000 บาท

ท้ายสุดนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิตามารดา ที่ได้อุปการะเลี้ยงดูอบรมสั่งสอนตลอดจนให้การสนับสนุนและเติมกำลังใจในการทำปริญญานิพนธ์ครั้งนี้จนสำเร็จได้ด้วยดี คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ คณะผู้จัดทำขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน และหวังเป็นอย่างยิ่งว่าปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์แก่ผู้ที่ได้ทำการศึกษาเพื่อที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในงานวิจัยในด้านต่างๆได้ต่อไป

คณะผู้จัดทำ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูปภาพ	VII
สารบัญตาราง	X
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดโครงการ	3
1.4 วิธีที่ใช้ในโครงการ	4
1.5 แผนการดำเนินโครงการ	4
1.6 ประโยชน์ที่รับจากการวิจัย	6
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	7
2.1 บทนำ	7
2.2 ชนิดของแบตเตอรี่	7
2.2.1 แบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด (Lead-acid)	9
2.2.2 แบตเตอรี่ชนิดลิเทียม-ไอออน (Lithium-ion)	10
2.2.3 แบตเตอรี่ชนิดลิเทียม-ไอออน โพลีเมอร์ (Lithium-ion Polymer)	11
2.2.4 แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนฟอสเฟต (Lithium iron Phosphate)	11
2.3 การอัดประจุและการคายประจุของแบตเตอรี่	12
2.3.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการอัดประจุไฟฟ้า	13
2.3.2 ประเภทของการอัดประจุไฟฟ้า	15
2.4 การหาจรรยาสมมูลและวงจรรยาสมมูลแบบต่างๆของแบตเตอรี่	16
2.4.1 ความเป็นเชิงเส้นของระบบ	18
2.4.2 การแสดงข้อมูล	19
2.5 วงจรรยาสมมูลของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด	21
2.6 วงจรรยาสมมูลของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียม-ไอออน	22
2.6.1 One-RC Branch Equivalent	22
2.6.2 Two-RC Branch Equivalent	23
2.6.3 Finite Warburg Impedance Model	24

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.7 สรุป	25
บทที่ 3 การออกแบบการทดลอง	26
3.1 บทนำ	26
3.2 การออกแบบการทดลองเพื่อวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงเวลา	26
3.3 ข้อมูลแบบเตอร์ที่ใช้ทำการทดลอง	27
3.4 โปรแกรม PLC ของบริษัท Siemens	28
3.5 การออกแบบการทดลองเพื่อวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงความถี่	29
3.6 การออกแบบวงจรที่ในการทดสอบแบบเตอร์เพื่อดูผลตอบสนองเชิงความถี่	30
3.7 การหาค่าอิมพีแดนซ์ภายในแบบเตอร์	31
3.8 สรุป	34
บทที่ 4 ผลการทดลอง	35
4.1 บทนำ	35
4.2 การทดลองหาวงจรสมมูลและค่าพารามิเตอร์ของแบบเตอร์ชนิดลียัมไอออนด้วยการวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงเวลา	35
4.2.1 การทดลองหาวงจรสมมูล	35
4.2.2 การวิเคราะห์พารามิเตอร์	37
4.2.3 การทดลองค่าพารามิเตอร์ภายในแบบเตอร์เมื่อค่ากระแสอัดประจุมีค่าเพิ่มขึ้น	41
4.3 การทดลองหาวงจรสมมูลและค่าพารามิเตอร์ของแบบเตอร์ชนิดลียัมไอออนด้วยการวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงความถี่	43
4.3.1 การทดลองหาวงจรสมมูล	43
4.3.2 การวิเคราะห์และหาค่าพารามิเตอร์ในวงจรมูลจากกรวิเคราะห์ด้วยผลตอบสนองเชิงความถี่	50
4.4 ผลการ Simulation วงจรสมมูลจากโปรแกรม PSIM	52
4.4.1 One-RC Branch Equivalent	52
4.4.2 Two-RC Branch Equivalent	53
4.4.3 Two-RC-L Branch Equivalent	54
4.5 เปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการ Simulation วงจรสมมูลจากโปรแกรม PSIM	55
4.6 สรุป	57

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	58
5.1 สรุปผลการทดลอง	58
5.2 ข้อเสนอแนะ	59
5.3 แนวทางการพัฒนาต่อยอดงานวิจัย	59
เอกสารอ้างอิง	61
ภาคผนวก	63
ภาคผนวก ก เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ	64
ภาคผนวก ข เทคนิควิธีการทดลองทางจรรยาบรรณของแบตเตอรี่	70
ภาคผนวก ค การทดสอบโพลิตความต้านทาน	73
ภาคผนวก ง ตัวเก็บประจุ (Capacitor)	76
ภาคผนวก จ Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS)	80
ภาคผนวก ฉ บทความวิชาการ	98
ประวัติผู้เขียน	103

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 อาคารที่ใช้ไฟฟ้าสุทธิเป็นศูนย์ที่มีระบบสะสมพลังงาน	1
1.2 การนำระบบสำรองพลังงานไฟฟ้าด้วยแบตเตอรี่ไปใช้งานในระบบโครงข่ายไฟฟ้าต่างๆ	2
2.1 ปฏิกริยาไฟฟ้าเคมีระหว่างแอโนดและแคโทด	8
2.2 แบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด	9
2.3 แบตเตอรี่ชนิดลิเทียม-ไอออน	10
2.4 แบตเตอรี่ชนิดลิเทียม-ไอออน โพลีเมอร์	11
2.5 แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอรอนฟอสเฟต	12
2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิภายในแบตเตอรี่และอายุการใช้งานของแบตเตอรี่	14
2.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานภายในแบตเตอรี่และเวลาในการคายประจุไฟฟ้าที่ค่ากระแสแตกต่างกัน	14
2.8 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันและกระแส	16
2.9 กราฟการวิเคราะห์แบบเชิงเส้น	18
2.10 ตัวอย่าง Nyquist Plot ของวงจร RC	19
2.11 Nyquist Plot ของ One-RC Branch Equivalent	20
2.12 Nyquist Plot ของ Two-RC Branch Equivalent Circuit	20
2.13 Nyquist Plot ของ Finite Warburg Impedance Model	20
2.14 วงจรสมมูลของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด	21
2.15 วงจรสมมูลแบบ One-RC Branch Equivalent	22
2.16 วงจรสมมูลแบบ Two-RC Branch Equivalent	23
2.17 วงจรสมมูลแบบ Finite Warburg Impedance Model	24
3.1 การหาวงจรมูลของแบตเตอรี่โดยวิธีการวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงเวลา	26
3.2 Data Sheet ของแบตเตอรี่ TOSHIBA	27
3.3 แบตเตอรี่ TOSHIBA ที่ใช้ในการทดลอง	28
3.4 หน่วยประมวลผล SIMATIC S7-1200 ของบริษัท Siemens	28
3.5 หน้าต่างแสดงโปรแกรม PLC ของบริษัท Siemens	29
3.6 การหาวงจรมูลของแบตเตอรี่โดยวิธีการวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงความถี่	29
3.7 วงจรที่ใช้ในการทดสอบแบตเตอรี่	30
3.8 วงจรทดลองจริงที่ใช้ในการทดสอบแบตเตอรี่	30
3.9 รูปคลื่นสัญญาณที่วัดคร่อมแบตเตอรี่	32
3.10 รูปคลื่นสัญญาณที่วัดคร่อมแบตเตอรี่ (ส่วนที่ตัดผลของแรงดันDCออกแล้ว)	32
3.11 ตัวอย่างรูปคลื่นสัญญาณที่ใช้ในการคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์	33

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 กราฟแรงดันในขณะทำการอัดประจุ	35
4.2 การ curve fitting ฟังก์ชันเอ็กซ์โพเนนเชียล 1 พจน์	36
4.3 การ curve fitting ฟังก์ชันเอ็กซ์โพเนนเชียล 2 พจน์	36
4.4 การเปรียบเทียบระหว่างข้อมูลจากการทดลองและการ Simulation	37
4.5 แรงดันไฟฟ้าที่นำมาคำนวณหาค่าพารามิเตอร์	38
4.6 ทิศทางการไหลของกระแสภายในวงจรสมมูล	38
4.7 การเปรียบเทียบระหว่างค่าความต้านทาน R_0 กับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของแบตเตอรี่	40
4.8 การเปรียบเทียบระหว่างค่าความต้านทาน R_1+R_2 กับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของแบตเตอรี่	40
4.9 การเปรียบเทียบระหว่างค่า R_1+R_2/R_0 กับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของแบตเตอรี่	40
4.10 แรงดันของแบตเตอรี่ที่กระแสการอัดประจุ 1C (40 A)	41
4.11 แรงดันของแบตเตอรี่ที่กระแสการอัดประจุ 2C (80 A)	42
4.12 แรงดันของแบตเตอรี่ที่กระแสการอัดประจุ 3C (120 A)	42
4.13 สัญญาณรูปคลื่นแรงดันคร่อมตัวต้านทาน R_i และสัญญาณรูปคลื่นแรงดันคร่อมแบตเตอรี่ที่ความถี่ 500mHz	44
4.14 สัญญาณรูปคลื่นแรงดันคร่อมตัวต้านทาน R_i และสัญญาณรูปคลื่นแรงดันคร่อมแบตเตอรี่ที่ความถี่ 300Hz	44
4.15 สัญญาณรูปคลื่นแรงดันคร่อมตัวต้านทาน R_i และสัญญาณรูปคลื่นแรงดันคร่อมแบตเตอรี่ที่ความถี่ 1kHz	45
4.16 ความสัมพันธ์ของความต่างเฟสกับความถี่ของแบตเตอรี่ A0293	46
4.17 Nyquist Plot จากการทดลองของแบตเตอรี่ A0293	46
4.18 ความสัมพันธ์ของความต่างเฟสกับความถี่ของแบตเตอรี่ A123 (N0) 0V	47
4.19 Nyquist Plot จากการทดลองของแบตเตอรี่ A123 (N0) 0V	47
4.20 ความสัมพันธ์ของความต่างเฟสกับความถี่ของแบตเตอรี่ A123 (N1) 0V	48
4.21 Nyquist Plot จากการทดลองของแบตเตอรี่ A123 (N1) 0V	48
4.22 ความสัมพันธ์ของความต่างเฟสกับความถี่ของแบตเตอรี่ A123 (N2) 0V	49
4.23 Nyquist Plot จากการทดลองของแบตเตอรี่ A123 (N2) 0V	49
4.24 Nyquist Plot จากผลการทดลองของแบตเตอรี่ A123 (N0) 0V	50
4.25 วงจรสมมูลของแบตเตอรี่ลิเทียม-ไอออน A123 (N0) 0V ที่วิเคราะห์ได้จาก Nyquist Plot ของผลการทดลอง	51
4.26 การอ่านค่าพารามิเตอร์จาก Nyquist Plot ของแบตเตอรี่ A123 (N0) 0V	51
4.27 วงจรสมมูลแบบ One-RC Branch Equivalent ในโปรแกรม PSIM	52

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.28 Nyquist Plot ของวงจรถวาย One-RC Branch Equivalent ในโปรแกรม PSIM	52
4.29 วงจรสมมูลแบบ Two-RC Branch Equivalent ในโปรแกรม PSIM	53
4.30 Nyquist Plot ของวงจรถวาย Two-RC Branch Equivalent ในโปรแกรม PSIM	53
4.31 วงจรสมมูลแบบ Two-RC-L Branch Equivalent ในโปรแกรม PSIM	54
4.32 Nyquist Plot ของวงจรถวาย Two-RC-L Branch Equivalent ในโปรแกรม PSIM	54
4.33 เปรียบเทียบผลการทดลองจริงกับผลการ Simulation วงจรสมมูลแบบ Two-RC-L Branch Equivalent ของแบตเตอรี่ A123 (NO) 0V	55
4.34 วงจรสมมูลที่ได้จากการทดลอง	56
4.35 Nyquist Plot ของอิมพีแดนซ์ในฟังก์ชันของความถี่ (Z_c)	56
4.36 เปรียบเทียบผลการทดลองจริงกับผลการ Simulation วงจรสมมูลแบบ Two-RC-L Branch Equivalent ที่มี Z_c ต่ออนุกรมอยู่ของแบตเตอรี่ A123 (NO) 0V	57
5.1 วงจรสมมูลที่ได้จากการทดลองจริง	58
5.2 ตัวอย่างหน้าต่างโปรแกรมระบบตรวจวัดคุณภาพของแบตเตอรี่	60
ข.1 วงจรทดลองในสภาวะคายประจุ (Discharge test)	71
ข.2 วงจรทดลองในสภาวะอัดประจุ (Charge test)	71
ค.1 วงจรที่ใช้ทดสอบโหลดความต้านทาน	74
ค.2 กราฟความต่างเฟสของกระแสและแรงดันไฟฟ้ากับความถี่	74
ง.1 ตัวเก็บประจุในอุดมคติ	77
ง.2 ความสัมพันธ์ของอิมพีแดนซ์ตัวเก็บประจุในอุดมคติกับความถี่	77
ง.3 วงจรสมมูลของตัวเก็บประจุในทางปฏิบัติ	78
ง.4 ความสัมพันธ์ของอิมพีแดนซ์ตัวเก็บประจุในทางปฏิบัติกับความถี่	78
ง.5 ผลการตอบสนองต่อความถี่ของตัวเก็บประจุชนิดต่างๆ	79
ง.6 ย่านความถี่การใช้งานของตัวเก็บประจุชนิดต่างๆ	79

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แผนการดำเนินงาน	5
4.1 ขนาดแรงดันไฟฟ้ากับค่าพารามิเตอร์ต่างๆในวงจรสมมูล	39
4.2 ค่าพารามิเตอร์ภายในแบตเตอรี่ที่กระแสอัดประจุที่ 1C , 2C และ 3C	43
ข.1 ผลการทดลองอัดประจุและคายประจุ	72

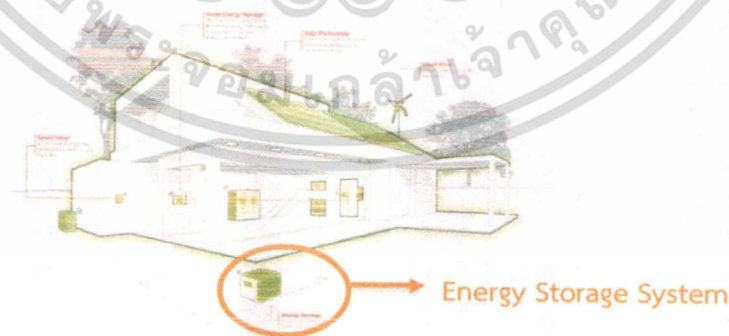


บทที่ 1

บทนำ

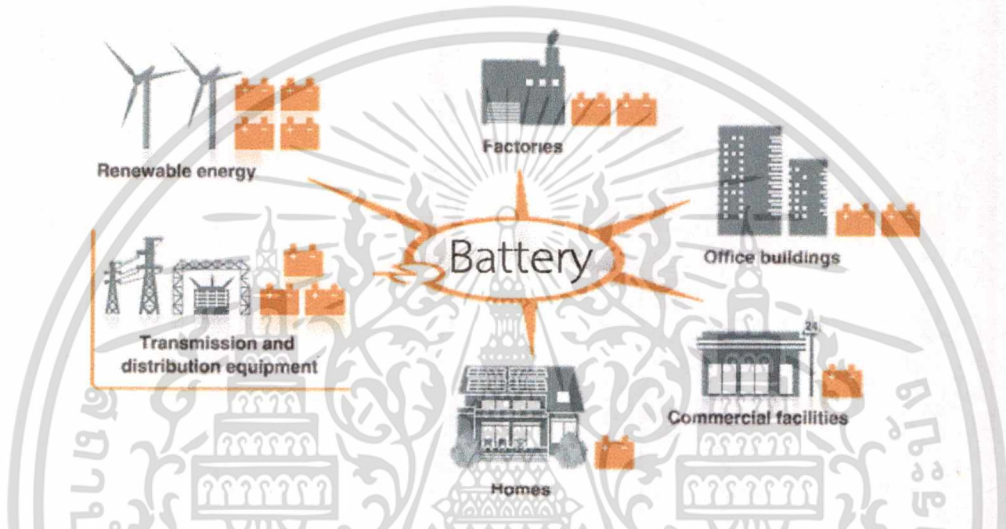
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ปัจจุบันพลังงานเข้ามามีความสำคัญในการดำเนินชีวิตประจำวันของคนทั่วไปและมีส่วนสำคัญในการขับเคลื่อนระบบเศรษฐกิจของประเทศ การขยายตัวของประชากร การเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจและอุตสาหกรรมเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้ความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มปริมาณมากขึ้น และในอนาคตปัญหาของการขาดแคลนพลังงานมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ทางกระทรวงพลังงานจึงได้มีการวางแผนอนุรักษ์พลังงานขึ้นเพื่อรองรับปัญหาการขาดแคลนพลังงานที่กำลังจะเกิดขึ้นในอนาคต จึงเป็นเหตุจำเป็นที่ทำให้ต้องมองหาพลังงานทางเลือกชนิดอื่นที่ไม่ใช่พลังงานที่ผลิตมาจากเชื้อเพลิงฟอสซิล เนื่องจากการผลิตไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงฟอสซิล เช่น น้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ และถ่านหิน เป็นเชื้อเพลิงใช้แล้วหมดไปและยังก่อให้เกิดมลพิษอีกด้วย รวมทั้งราคาที่ปรับตัวสูงขึ้นอยู่ตลอดเวลา ดังนั้นการผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานทดแทนจึงได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในการผลิตไฟฟ้าเพื่อให้เพียงพอต่อความต้องการใช้ไฟฟ้าในระบบ การผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานทดแทนที่เห็นได้ชัดในปัจจุบันคือ พลังงานทดแทนจากแสงอาทิตย์ ยกตัวอย่างอาคารที่ใช้ไฟฟ้าสุทธิเป็นศูนย์ (Net Zero Energy Building) หมายถึงจำนวนของพลังงานที่ใช้เท่ากับปริมาณของพลังงานทดแทนที่สร้างขึ้น โดยอาคารไม่ได้ใช้พลังงานที่ซื้อจากการไฟฟ้า จะใช้พลังงานที่ผลิตมาจากพลังงานแสงอาทิตย์ แต่ข้อจำกัดของการผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์คือไม่สามารถผลิตได้คงที่และเพียงพอต่อความต้องการตลอดเวลาเนื่องจากแสงอาทิตย์มีเฉพาะในตอนกลางวัน และในแต่ละเวลาความเข้มแสงก็มีไม่เท่ากันตลอด เพราะขึ้นกับสภาพอากาศและฤดูกาลที่เปลี่ยนไป ส่งผลให้การผลิตไฟฟ้าแบบนี้จะไม่สามารถควบคุมการผลิตให้ได้ตามความต้องการใช้ไฟฟ้า จึงจำเป็นต้องมีระบบจัดเก็บพลังงานเข้ามาเก็บสะสมพลังงานไฟฟ้าส่วนเกินจากการผลิตได้ในช่วงเวลาที่แสงมากได้พลังงานไฟฟ้ามากแล้วนำมาใช้ในยามจำเป็นที่ผลิตพลังงานไฟฟ้าได้น้อยซึ่งไม่เพียงพอ ดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 อาคารที่ใช้ไฟฟ้าสุทธิเป็นศูนย์ (Net Zero Energy Building) ที่มีระบบสะสมพลังงาน [1]

นอกจากนี้ยังมีการนำไปใช้จ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับผู้ใช้ไฟที่มีความสำคัญสูงในสถานะที่ระบบส่งจ่ายไฟฟ้าเกิดความขัดข้องได้ ซึ่งจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและความน่าเชื่อถือของระบบไฟฟ้า อีกทั้งยังเป็นการป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับอุปกรณ์ที่ต้องการใช้ไฟฟ้าอย่างต่อเนื่อง เช่น ระบบฐานข้อมูลและคอมพิวเตอร์ การนำระบบจัดเก็บพลังงานไฟฟ้าไปใช้งานในสถานที่ที่มีภาระทางไฟฟ้าที่สำคัญ เช่น โรงพยาบาล ท่าอากาศยาน โรงงานอุตสาหกรรมที่ต้องมีการใช้ไฟฟ้าอย่างต่อเนื่อง เพื่อลดความเสียหายต่อกระบวนการผลิต ดังรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.2 การนำระบบสำรองพลังงานไฟฟ้าด้วยแบตเตอรี่ไปใช้งานในระบบโครงข่ายไฟฟ้าต่างๆ [2]

แต่เนื่องจากในปัจจุบันแบตเตอรี่ยังมีราคาสูง การนำมาใช้ในระบบโครงข่ายไฟฟ้าต่างๆจะทำให้มีค่าใช้จ่ายสูง และแน่นอนก็ทำให้ราคาต้นทุนของระบบสูงขึ้นเช่นกัน ส่งผลต่อระยะเวลาคืนทุน ผลกำไรที่จะได้รับและความคุ้มค่าในการลงทุน นอกจากนี้แบตเตอรี่ยังมีอายุการใช้งานจำกัด จึงต้องมีค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาและค่าใช้จ่ายในการเปลี่ยนแบตเตอรี่ใหม่ การศึกษาและพัฒนาเทคโนโลยีการสะสมพลังงานไฟฟ้าเพื่อกักเก็บพลังงานไฟฟ้าส่วนเกินไว้เป็นการตอบสนองความต้องการในการใช้พลังงานที่คุ้มค่าต่อการลงทุนโดยหากสามารถลดราคาของระบบกักเก็บพลังงานลงได้ จะช่วยลดต้นทุนของระบบส่งผลให้มีกำไรเพิ่มขึ้น และทำให้ระบบโครงข่ายไฟฟ้าต่างๆมีระบบสะสมพลังงานที่มีคุณภาพและราคาประหยัด

โครงการนี้ได้นำเสนอถึงการศึกษางานร่วมกันของแบตเตอรี่แบบผสมผสาน (Hybrid Battery) เพื่อหาการทำงานร่วมกันของแบตเตอรี่ที่เหมาะสมที่สุดตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป เพื่อจะสามารถลดราคาของแบตเตอรี่ลงได้ เนื่องจากมีการนำแบตเตอรี่ไปใช้ในระบบเก็บสะสมพลังงานในระบบต่างๆซึ่งเป็นส่วนที่สำคัญและเป็นองค์ประกอบหลัก จึงทำให้ลดต้นทุนการผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์และระบบต่างๆที่มีระบบสะสมพลังงานด้วย นอกจากนี้การศึกษานี้

คุณสมบัติและวงจรสมมูลของแบตเตอรี่เพื่อที่จะนำมาต่อกัน การหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆในวงจรสมมูล นำไปสู่การออกแบบการอัดประจุและการตรวจวัดคุณภาพแบตเตอรี่แบบผสมผสานได้อย่างเหมาะสม ทำให้สามารถตรวจสอบเซลล์ที่เสื่อมสภาพของแบตเตอรี่ได้ และสามารถดำเนินการแก้ไขได้อย่างทันที เพื่อลดความเสียหายที่จะเกิดกับแบตเตอรี่ชุดอื่นๆ ลดความเสียหายต่อระบบสำรองไฟฟ้า และยังช่วยลดมลภาวะและอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมจากการกำจัดขยะอันตรายประเภทแบตเตอรี่ได้

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อศึกษาหาวงจรสมมูลของแบตเตอรี่ (แบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดและแบตเตอรี่ชนิดลิเทียม-ไอออน) และสามารถหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆในวงจรสมมูลได้
2. เพื่อศึกษาความเหมาะสมในการนำแบตเตอรี่ 2 ชนิดมาใช้งานร่วมกัน และสามารถออกแบบเครื่องอัดประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่แบบผสมผสาน
3. เพื่อลดราคาของแบตเตอรี่ที่นำมาใช้ในระบบเก็บสะสมพลังงานโดยมีประสิทธิภาพเทียบเท่าเดิม ซึ่งจะช่วยลดต้นทุนของระบบรวมลงได้
4. เพื่อสามารถออกแบบการตรวจวัดคุณภาพแบตเตอรี่แบบผสมผสานได้
5. เพื่อลดความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับแบตเตอรี่ เนื่องมาจากการเสื่อมสภาพของแบตเตอรี่ชุดใดชุดหนึ่ง และลดการกำจัดและทำลายแบตเตอรี่เพื่อรักษาสภาพแวดล้อม
6. เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในระบบกักเก็บพลังงานในรูปแบบอื่นภายในโครงข่ายไฟฟ้า

1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นการใช้งานร่วมกันของแบตเตอรี่ 2 ชนิดที่มีความเหมาะสมที่สุดเพื่อสามารถลดราคาของแบตเตอรี่ ซึ่งจะส่งผลให้ราคาต้นทุนของระบบรวมลดลงด้วย เนื่องจากการนำแบตเตอรี่ไปใช้ในระบบเก็บสะสมพลังงานของระบบต่างๆ การลดราคาแบตเตอรี่จะช่วยลดค่าใช้จ่ายของระบบรวมได้ และเมื่อนำแบตเตอรี่มาใช้งานร่วมกันแล้วทำให้ยังมีคุณสมบัติเทียบเท่าเดิมโดยการศึกษาคุณสมบัติและวงจรสมมูลของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดและแบตเตอรี่ชนิดลิเทียม-ไอออน การตรวจสอบหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆในวงจรสมมูลได้ นำไปสู่การออกแบบและสร้างเครื่องอัดประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่แบบผสมผสานได้อย่างเหมาะสมและมีประสิทธิภาพสูงสุด รวมทั้งการออกแบบการตรวจวัดคุณภาพแบตเตอรี่โดยสามารถตรวจสอบเซลล์แบตเตอรี่ที่เสื่อมสภาพและทำการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ หากเป็นค่าที่ถูกจัดว่าเป็นแบตเตอรี่ที่เสื่อมสภาพก็สามารถทำการเปลี่ยนแบตเตอรี่ตัวนั้นก่อน เพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นแก่แบตเตอรี่ตัวอื่นๆในชุดนั้นหากมีการใช้งานแบตเตอรี่ตัวที่เสื่อมสภาพร่วมกันต่อไป

1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงการ

1. ศึกษาความรู้เกี่ยวกับคุณสมบัติของแบตเตอรี่ วงจรสมมูลของแบตเตอรี่ที่ใช้ในการทำโครงการและวิธีการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆของวงจรสมมูลของแบตเตอรี่
2. จัดเตรียมเครื่องมือ และอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย ตลอดจนการศึกษาวิธีการใช้งานเครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ
3. ทดลองดึงข้อมูลจากเครื่องตรวจวัดแบตเตอรี่ในผลตอบสนองเชิงเวลาและนำมาประมวลผลในโปรแกรมคอมพิวเตอร์และทำการวิเคราะห์
4. ทดลองหาค่าพารามิเตอร์จากวงจรสมมูลแบตเตอรี่ในผลตอบสนองเชิงเวลาและทำการวิเคราะห์
5. ทดลองเพื่อวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงความถี่และนำมาเปรียบเทียบกับผลการ Simulation แล้วทำการวิเคราะห์
6. ทดลองหาค่าพารามิเตอร์จากวงจรสมมูลแบตเตอรี่ในผลตอบสนองเชิงความถี่และทำการวิเคราะห์
7. เปรียบเทียบและวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงเวลากับผลตอบสนองเชิงความถี่ เพื่อหาวงจรสมมูลของแบตเตอรี่ที่ถูกต้องและแม่นยำ
8. รวบรวมข้อมูลการทดลองและจัดทำรูปเล่มปริญญานิพนธ์

1.5 แผนการดำเนินโครงการ

ทางผู้จัดทำได้ทำการศึกษาค้นคว้าข้อมูล และทำความเข้าใจในทฤษฎี ตลอดจนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องต่างๆทั้งภายในประเทศและต่างประเทศ พร้อมทั้งดำเนินงานในส่วนของการทดสอบและออกแบบ โดยมีระยะเวลาดำเนินการตั้งแต่ สิงหาคม 2557 ถึง พฤษภาคม 2558 รวมเป็นเวลา 10 เดือน โดยมีแผนการดำเนินโครงการดังนี้

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงาน

การดำเนินงาน	ภาคเรียนที่ 1					ภาคเรียนที่ 2				
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
1. ศึกษาข้อมูล คุณสมบัติ และคุณลักษณะของแบตเตอรี่แต่ละชนิด										
2. ศึกษาทางจรรยาบรรณของแบตเตอรี่ และกระบวนการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆจากจรรยาบรรณ										
3. ทดลองดึงข้อมูลจากเครื่องตรวจวัดแบตเตอรี่มาทำการวิเคราะห์										
4. ทำการ Simulation วงจรสมมูลในโปรแกรม PSIM เพื่อนำไปเทียบกับผลจากการทดลองจากเครื่องตรวจวัดแบตเตอรี่										
5. ออกแบบการทดสอบทางจรรยาบรรณของแบตเตอรี่ในเชิงความถี่										
6. ทำการทดลองเพื่อวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงความถี่										
7. เปรียบเทียบผลตอบสนองเชิงความถี่กับผลการ Simulation วงจรสมมูลในโปรแกรม PSIM										
8. บันทึกผลการทดลองและสรุปผลงานวิจัย										
9. จัดทำรูปเล่มปริญาานิพนธ์										

1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1. ได้รู้วงจรสมมูลของแบตเตอรี่ (แบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดและแบตเตอรี่ชนิดลิเทียม-ไอออน) และสามารถหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆของวงจรสมมูลของแบตเตอรี่
2. สามารถนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองไปออกแบบการตรวจวัดคุณภาพแบตเตอรี่แบบผสมผสานโดยสามารถตรวจสอบเซลล์แบตเตอรี่ที่เสื่อมสภาพซึ่งช่วยให้ระบบจัดเก็บพลังงานไฟฟ้ามีประสิทธิภาพมากขึ้น
3. การทำงานร่วมของแบตเตอรี่แบบผสมผสานจะสามารถลดราคาของแบตเตอรี่ลงได้และส่งผลกระทบต่อต้นทุนในระบบรวมที่มีการใช้งานระบบสะสมพลังงาน
4. สามารถนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองไปออกแบบและสร้างเครื่องอัดประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่แบบผสมผสานให้เหมาะสมและมีประสิทธิภาพสูงสุด
5. เพื่อช่วยลดการกำจัดหรือทำลายแบตเตอรี่ ซึ่งจะเป็นการลดมลภาวะและอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม



บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

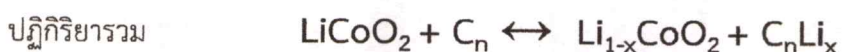
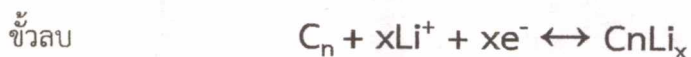
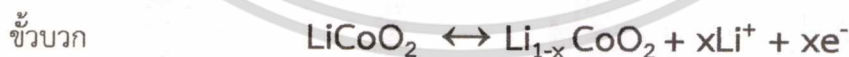
2.1 บทนำ

บทนี้จะเป็นการศึกษาถึงคุณลักษณะและคุณสมบัติของแบตเตอรี่ชนิดต่างๆ เทคนิคการวางจรมูลของแบตเตอรี่โดยจะมุ่งเน้นไปที่แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมเป็นหลัก การวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ภายในวงจรมูลของแบตเตอรี่ชนิดนั้นๆ รวมไปถึงการศึกษาการนำแบตเตอรี่มาใช้งานร่วมกันแบบผสมผสาน (Hybrid Battery) และในขั้นตอนสุดท้ายจะเป็นการศึกษาเทคนิคการบริหารจัดการแบตเตอรี่ (BMS) เพื่อนำผลที่ได้ไปทำการออกแบบเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่ดังกล่าว

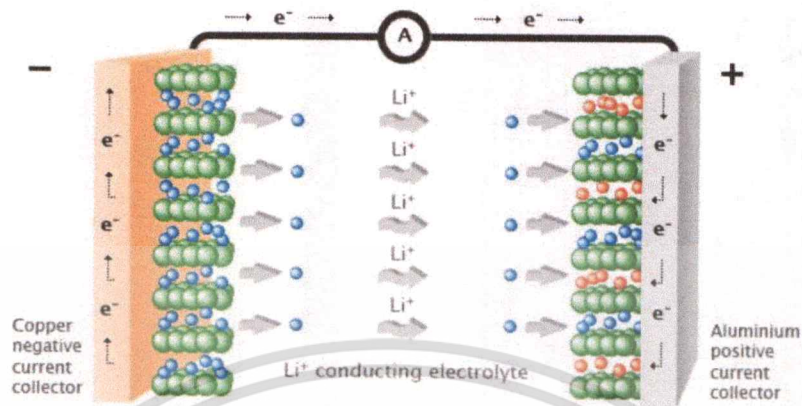
2.2 ชนิดของแบตเตอรี่

แบตเตอรี่ (Battery) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บพลังงานไฟฟ้าเพื่อเอาไว้ใช้งาน เนื่องจากแบตเตอรี่มีขนาดและคุณสมบัติที่หลากหลาย โดยหลักการของแบตเตอรี่จะเก็บรักษาพลังงานในรูปของพลังงานเคมีเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยอาศัยปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี ซึ่งแบตเตอรี่จะเก็บพลังงานไว้ในรูปของพลังงานเคมี ยกตัวอย่างเช่น

แบตเตอรี่ชนิดลิเทียม-ไอออน (Lithium-ion) จะประกอบด้วยแผ่นอิเล็กโทรด (Electrode) ซึ่งจะมี 2 ขั้ว คือ ขั้วบวก จะเรียกว่า แอโนด (Anode) และ ขั้วลบ จะเรียกว่าแคโทด (Cathode) โดยแผ่นอิเล็กโทรดทั้งสองจะอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะเกิดจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีซึ่งจะมีการถ่ายเทอิเล็กตรอนระหว่างแอโนดและแคโทด ดังรูปที่ 2.1 สำหรับแบตเตอรี่ชนิดลิเทียม-ไอออนจะมีใช้อิเล็กโทรดขั้วบวกเป็น LiCoO_2 และอิเล็กโทรดขั้วลบเป็น Li_xC_6 ซึ่งจะมีปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี ดังนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีระหว่างแอโนดและแคโทด [3]

เมื่อนำแบตเตอรี่ไปใช้งานแบตเตอรี่จะคายพลังงานดังกล่าวเพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับโหลด โดยแบตเตอรี่จะทำการเปลี่ยนพลังงานที่เก็บรักษาในรูปพลังงานเคมีไปเป็นพลังงานไฟฟ้า แบตเตอรี่แบ่งได้ 2 ชนิด คือ

1. แบตเตอรี่แบบปฐมภูมิ (Primary Battery) เป็นแบตเตอรี่ที่สามารถใช้งานได้ครั้งเดียว เมื่อจ่ายไฟหมดแล้วไม่สามารถนำมาอัดประจุกลับเข้าไปใช้งานใหม่ได้ เนื่องจากไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงของสารเคมีเมื่อสารเคมีเปลี่ยนแปลงหมด พลังงานไฟฟ้าก็จะหมด แบตเตอรี่เหล่านี้เหมาะสำหรับใช้ในอุปกรณ์ขนาดเล็ก สามารถเคลื่อนย้ายได้สะดวก และใช้ในที่ห่างไกลจากพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับ ตัวอย่างของแบตเตอรี่แบบปฐมภูมิ เช่น แบตเตอรี่ชนิดคาร์บอนสังกะสี แบตเตอรี่ชนิดอัลคาไลน์ แบตเตอรี่ชนิดนิเกิล-แคดเมียม เป็นต้น

2. แบตเตอรี่แบบทุติยภูมิ (Secondary Battery) เป็นแบตเตอรี่ที่สามารถนำกลับมาใช้งานใหม่ได้หลังจากจ่ายไฟหมดแล้ว เนื่องจากสารเคมีที่ใช้ทำแบตเตอรี่ชนิดนี้สามารถทำให้กลับไปอยู่ในสภาพเดิมได้โดยการอัดประจุกลับเข้าไปใหม่ทำให้สามารถใช้งานได้นาน แบตเตอรี่ชนิดนี้มีราคาแพงกว่าแบตเตอรี่ชนิดปฐมภูมิ ตัวอย่างของแบตเตอรี่แบบทุติยภูมิ เช่น แบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด แบตเตอรี่ชนิดลิเทียม-ไอออน แบตเตอรี่ชนิดลิเทียม-ไอออน โพลีเมอร์ เป็นต้น

ในปัจจุบันแบตเตอรี่มีหลายชนิด หลายขนาด ซึ่งจะมีคุณสมบัติของแบตเตอรี่ที่แตกต่างกัน ดังนั้นการเลือกการใช้งานแบตเตอรี่จึงจำเป็นต้องเลือกแบตเตอรี่ที่มีคุณสมบัติให้เหมาะสมกับลักษณะการนำไปใช้งาน การแยกประเภทของแบตเตอรี่สามารถใช้ชนิดของวัสดุที่ใช้ทำแผ่นขั้วบวกและขั้วลบของแบตเตอรี่ ในที่นี้เราจะเลือกศึกษาแบตเตอรี่ชนิดลิเทียม และแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด

2.2.1 แบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด (Lead-acid)

แบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดเป็นแบตเตอรี่แบบอัดประจุได้ที่เก่าที่สุดในบรรดาแบตเตอรี่ด้วยกัน ประดิษฐ์ขึ้นมาโดย แก็สตัน ฟลองด์ (Gaston Plante) นักฟิสิกส์ชาวฝรั่งเศสตั้งแต่ปี พ.ศ. 2402 เป็นแบตเตอรี่แบบอัดประจุได้ชนิดแรกที่ทำออกมาเพื่อการค้าและในปัจจุบันยังมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลาย โดยมักจะทำเป็นแบตเตอรี่ที่มีความจุสูง นิยมใช้กับรถยนต์และยานพาหนะต่างๆ ระบบสำรองไฟฟ้า (UPS) และระบบไฟแสงสว่างฉุกเฉิน (Emergency Light) สำหรับอุณหภูมิตามสมควรในการใช้งานแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดจะอยู่ที่ 25 องศาเซลเซียส อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นทุก 8 องศาเซลเซียส จะทำให้อายุการใช้งานของแบตเตอรี่ลดลงครึ่งหนึ่ง เช่น แบตเตอรี่แบบ VRLA (Valve-Regulated Lead-Acid) จะมีอายุถึง 10 ปี ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสแต่จะลดลงเหลือ 5 ปี ที่อุณหภูมิ 33 องศาเซลเซียส นอกจากนี้อุณหภูมิที่ต่ำจะทำให้แบตเตอรี่เก็บประจุได้น้อยลง ความจุของแบตเตอรี่จะลดลง 50% เมื่ออุณหภูมิต่ำลง 12 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นเหตุผลว่าทำไมตอนเช้ารถยนต์ถึงสตาร์ทติดยาก และข้อดีอีกอย่างของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดคือมีอัตราการคายประจุโดยตัวมันเอง (Self-discharge) น้อยมาก ถ้าเป็นแบตเตอรี่แบบเปียกอัตราการคายประจุประมาณ 40% ต่อปี ส่วนแบตเตอรี่แบบแห้งจะมีอัตราการคายประจุน้อยกว่าแบบเปียก โดยเฉพาะแบตเตอรี่ AGM รุ่นใหม่ๆบางชนิด อัตราการคายประจุด้วยตัวมันเองจะไม่เกิน 2% ต่อเดือน



รูปที่ 2.2 แบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด [3]

2.2.2 แบตเตอรี่ชนิดลิเทียม-ไอออน (Lithium-ion)

แบตเตอรี่ชนิดลิเทียม-ไอออน เป็นแบตเตอรี่ที่มีความหนาแน่นของพลังงานสูง มีน้ำหนักเบา เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ในการใช้งานแบตเตอรี่ชนิดนี้ยังมีความปลอดภัย เนื่องจากแบตเตอรี่ชนิดนี้มีวงจรป้องกัน (protection circuit) ในการจำกัดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าในขณะอัดประจุไฟฟ้าและคายประจุไฟฟ้า โดยวงจรป้องกันจะจำกัดค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดในแต่ละเซลล์ขณะอัดประจุไฟฟ้า ป้องกันไม่ให้แรงดันไฟฟ้ามีค่าต่ำเกินไปขณะคายประจุไฟฟ้า และยังมี การตรวจสอบอุณหภูมิของเซลล์แบตเตอรี่ไม่ให้สูงเกินไป คุณสมบัติของแบตเตอรี่ชนิดนี้คือมีความหนาแน่นของพลังงานสูงเป็นแบตเตอรี่ที่มีการดูแลรักษาต่ำ ไม่มีผลของ memory effect นอกจากนี้ยังมีอัตราการคายประจุด้วยตนเอง (Self-discharge) ต่ำอีกด้วย

ด้านการเก็บรักษาแบตเตอรี่ควรเก็บรักษาในสถานที่ที่มีอุณหภูมิต่ำเพื่อยืดอายุการใช้งาน นอกจากนี้ควรคายประจุออกจากแบตเตอรี่ให้เหลือประมาณ 40% เนื่องจากแบตเตอรี่ชนิดนี้มีปัญหาด้านอายุการใช้งานถึงแม้ว่าจะไม่ได้ใช้งานก็ตาม โดยจะเริ่มเสื่อมสภาพหลังจากการใช้งานไปแล้วประมาณ 1 ปี และแบตเตอรี่จะเริ่มเสื่อมสภาพภายใน 2-3 ปี แบตเตอรี่ชนิดนี้ส่วนใหญ่ใช้กับอุปกรณ์ไฟฟ้า คอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊ก และโทรศัพท์มือถือ เป็นต้น

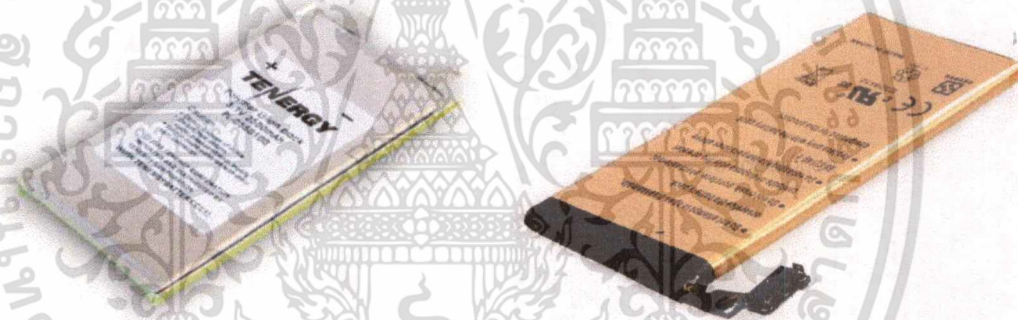
สาเหตุการเสื่อมสภาพของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมนั้นได้แก่ การใช้งานแบตเตอรี่จนถึงจำนวนไซเคิลที่แบตเตอรี่จะเริ่มเสื่อมสภาพเองตามปกติ หรือแบตเตอรี่จะเริ่มเสื่อมสภาพเองเมื่อถึงเวลาที่แบตเตอรี่เสื่อม โดยเวลาที่ว่าเป็นเวลาที่นับตั้งแต่การผลิต ไม่ใช่เวลาในการใช้งาน นอกจากนี้อุณหภูมิของแบตเตอรี่ก็ถือว่าเป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้แบตเตอรี่เสื่อมสภาพ ถ้าแบตเตอรี่อยู่ในสภาพแวดล้อมที่อุณหภูมิสูงก็จะส่งผลให้แบตเตอรี่เสื่อมสภาพเร็วกว่าปกติได้



รูปที่ 2.3 แบตเตอรี่ชนิดลิเทียม-ไอออน

2.2.3 แบตเตอรี่ชนิดลิเทียม-ไอออน โพลีเมอร์ (Lithium-ion Polymer)

แบตเตอรี่ชนิดลิเทียม-ไอออน โพลีเมอร์ เป็นแบตเตอรี่ที่พัฒนามาจากแบตเตอรี่ชนิดลิเทียม-ไอออน เป็นแบตเตอรี่ที่มีความหนาแน่นของพลังงานสูง มีน้ำหนักเบา ไม่มีผลของ memory effect เป็นแบตเตอรี่ที่มีการดูแลรักษาต่ำ นอกจากนี้ยังมีผลของการคายประจุด้วยตนเอง (Self-discharge) ต่ำ แบตเตอรี่ชนิดลิเทียม-ไอออน โพลีเมอร์ มีข้อได้เปรียบจากแบตเตอรี่ชนิดลิเทียม-ไอออน คือมีความจุไฟฟ้ามากกว่าถึง 20% ในขนาดแบตเตอรี่ที่เท่ากัน แบตเตอรี่ชนิดนี้มีจุดเด่นอีกอย่างหนึ่งคือมีข้อจำกัดเรื่องรูปร่างของแบตเตอรี่น้อยมาก จึงทำให้สามารถสร้างแบตเตอรี่ชนิดลิเทียม-ไอออน โพลีเมอร์ให้มีขนาดเล็กและบางได้ รวมทั้งสามารถสร้างให้มีรูปทรงที่ไม่ใช่ทรงกระบอกหรือทรงสี่เหลี่ยมเหมือนแบตเตอรี่แบบเดิมๆ อย่างไรก็ตามต้นทุนการผลิตของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียม-ไอออน โพลีเมอร์ยังจัดว่ามีต้นทุนสูง ดังนั้นความนิยมจึงยังมีไม่มากเท่าแบตเตอรี่ชนิดลิเทียม-ไอออน แบตเตอรี่ชนิดนี้ใช้กับคอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊ก โทรศัพท์มือถือ รีโมทควบคุมรถบังคับ เป็นต้น



รูปที่ 2.4 แบตเตอรี่ชนิดลิเทียม-ไอออน โพลีเมอร์ [4]

2.2.4 แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนฟอสเฟต (Lithium iron Phosphate)

แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนฟอสเฟต (Lithium Iron Phosphate :LiFePO₄) เป็นแบตเตอรี่ตระกูลเดียวกับลิเทียมไอออน ถูกคิดค้นขึ้นเมื่อ ปี พ.ศ. 2534 แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนฟอสเฟตมีข้อดีที่เหนือกว่าลิเทียมไอออนคือ ด้านความปลอดภัย แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนนั้นเมื่อเกิดความผิดปกติขึ้น แบตเตอรี่ก็อาจจะเกิดการระเบิดออกมาได้ ในขณะที่แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนฟอสเฟตมีความเสถียรกว่ามาก จึงปลอดภัยกว่า ข้อดีอีกประการคือแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนฟอสเฟตทนทานกว่าแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน โดยแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนฟอสเฟตมีวงจรอายุสูงถึง 2000 รอบจึงสามารถใช้งานได้ยาวนานกว่า แต่ข้อเสียของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนฟอสเฟตคือมีความจุที่ต่ำกว่าแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน อยู่ประมาณ 40% นั้นหมายความว่า ถ้าแบตเตอรี่มีขนาดเท่ากันแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนฟอสเฟตจะมีประจุไฟน้อยกว่า ด้วยเหตุผลนี้แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนฟอสเฟตจึงไม่ได้รับ

ความสนใจในการนำมาใช้กับอุปกรณ์ไอทีแบบพกพา ข้อเสียอีกประการของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนฟอสเฟต คือ แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยต่อเซลล์อยู่ที่ประมาณ 3.2 โวลต์ต่อเซลล์ ซึ่งต่ำกว่าแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนนั้นคือ 3.7 โวลต์ต่อเซลล์ ทำให้ต้องออกแบบวงจรอัดประจุใหม่ ความยุ่งยากนี้ก็เป็นอีกเหตุผลหนึ่งซึ่งผู้ผลิตอุปกรณ์ไอทีไม่นิยมใช้แบตเตอรี่ชนิดนี้ แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนฟอสเฟตจะได้รับความสนใจในงานอื่นมากกว่า เช่น รถยนต์ไฟฟ้า จักรยานไฟฟ้า และอุปกรณ์ทำงานช่าง



รูปที่ 2.5 แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนฟอสเฟต [4]

2.3 การอัดประจุและการคายประจุของแบตเตอรี่

แบตเตอรี่ทุติยภูมิ ได้แก่ แบตเตอรี่ตะกั่วกรด (Lead-Acid) และแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน (Lithium-ion) สามารถเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับได้หากนำมาอัดประจุไฟฟ้าเข้าไปอีกครั้งหลังจากการใช้งาน ดังนั้นแบตเตอรี่จึงสามารถจ่ายพลังงานได้หลายครั้งตลอดอายุการใช้งาน ความสำคัญของการอัดประจุเข้าสู่แบตเตอรี่ก็คือ การเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับของแบตเตอรี่ทุติยภูมิอย่างมีประสิทธิภาพ โดยไม่ก่อให้เกิดความเสียหายจากการอัดประจุที่เกินกว่าขีดจำกัดของแบตเตอรี่ ในการอัดประจุแบตเตอรี่นั้น พลังงานที่เราอัดประจุเข้าไปจะมากกว่าพลังงานที่เราได้รับออกมาจากแบตเตอรี่ นั้นเป็นเพราะว่าพลังงานในการอัดประจุแบตเตอรี่ส่วนหนึ่งจะสูญหายไปในแบตเตอรี่ เนื่องจากความต้านทานภายในแบตเตอรี่และการเกิดปฏิกิริยาที่ไม่ใช่การเปลี่ยนรูปพลังงานไฟฟ้าไปสู่พลังงานเคมี เช่น การเกิดแก๊สในแบตเตอรี่ตะกั่วกรด (Lead-Acid) ทำให้ประสิทธิภาพของการอัดประจุไม่ถึง 100% ดังนั้นหากจะต้องการใช้แบตเตอรี่อย่างเต็มประสิทธิภาพจึงจำเป็นต้องทำการอัดประจุจนถึงสถานะการอัดประจุที่กระแสไฟฟ้าสูงเกินพิกัด (overcharge) คือสถานะประจุของแบตเตอรี่ที่อัดประจุ (state of charge) ของแบตเตอรี่ใกล้เคียงกับ 100% ไม่สามารถรู้ได้ว่าแบตเตอรี่จะถูกอัดประจุจนเต็มทีเวลาใด การอัดประจุที่สถานะกระแสไฟฟ้าสูงเกินพิกัด (overcharge) นั้นจะทำให้มีความร้อนสูญเสียมากกว่าปกติ รวมไปถึงความดันที่จะเกิดขึ้นจากแก๊สที่ผลิตภายในแบตเตอรี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่ก็สามารถที่จะทำให้ใช้แบตเตอรี่ได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ จึงต้องมีการควบคุมการอัดประจุที่กระแสไฟฟ้าสูงเกินพิกัด (overcharge) เพื่อที่จะป้องกันและควบคุมไม่ให้เกิดความเสียหายขึ้น การอัดประจุด้วยแรงดันไฟฟ้าคงที่ภายใต้ผลของอุณหภูมิและความดันต่างจากการอัดประจุที่กระแสไฟฟ้าคงที่เล็กน้อยก็คือในการอัดประจุแบบแรงดันไฟฟ้าคงที่ กระแสไฟฟ้าอัดประจุจะค่อยๆลดลง เมื่อเข้าสู่สภาวะกระแสไฟฟ้าสูงเกินพิกัด (overcharge) เมื่อกระแสไฟฟ้าลดลงปฏิกิริยาจะลดลงด้วย ทำให้แก๊สที่เกิดขึ้นก็ลดลงและอุณหภูมิก็ต่ำกว่าแบบกระแสไฟฟ้าคงที่

2.3.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการอัดประจุไฟฟ้า

การอัดประจุที่เหมาะสมเป็นกระบวนการอัดประจุที่จะทำให้การอัดประจุเกิดประสิทธิภาพสูงสุด ดังนั้นการพิจารณาหาจุดอัดประจุที่เหมาะสมจึงมีความสำคัญเพื่อที่จะทำให้พลังงานที่อัดประจุไม่สูญเปล่า ปัจจัยที่มีผลต่อการอัดประจุมุ่งนี้

1. วิธีการอัดประจุ (Charging method)

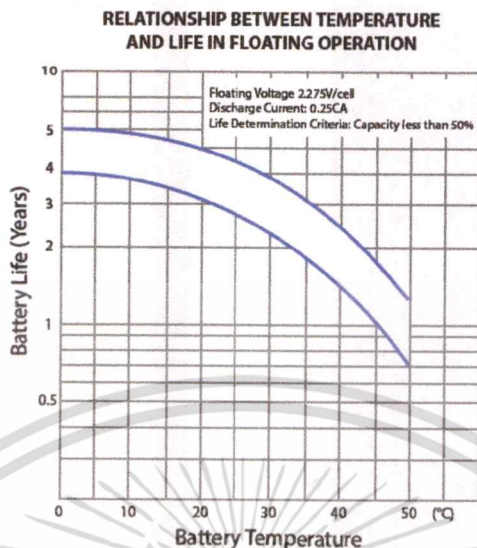
วิธีการอัดประจุนั้นขึ้นกับสภาวะที่แบตเตอรี่ถูกอัดประจุไฟฟ้าด้วยขนาดกระแสไฟฟ้าเท่าใด หากการอัดประจุนั้นใช้ขนาดกระแสไฟฟ้ามาก จะทำให้เวลาในการอัดประจุลดลง แต่อาจทำให้แบตเตอรี่เสื่อมสภาพเร็วขึ้น

2. สถานะการอัดประจุของแบตเตอรี่ (State of charge : SOC)

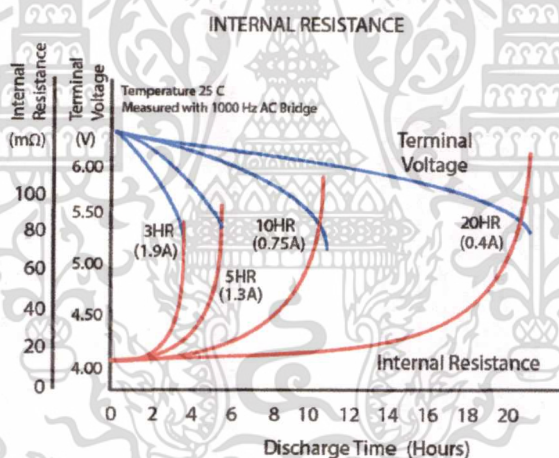
สถานะในการอัดประจุของแบตเตอรี่เป็นตัวบ่งชี้ว่าการอัดประจุนั้นมีความเหมาะสมหรือไม่ในกรณี que แบตเตอรี่ยังเต็มอยู่จะไม่มี ความเหมาะสมในการอัดประจุ เพราะพลังงานในการอัดประจุไม่ได้ถูกใช้ในการเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานเคมี แต่จะเป็นความร้อนสูญเสีย

3. อุณหภูมิ (Temperature)

อุณหภูมิมิผลในการเร่งปฏิกิริยาการอัดประจุให้ดีขึ้น การอัดประจุที่อุณหภูมิสูงจะมีประสิทธิภาพดีกว่าการอัดประจุที่อุณหภูมิต่ำ



รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิภายในแบตเตอรี่และอายุการใช้งานของแบตเตอรี่



รูปที่ 2.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานภายในแบตเตอรี่และเวลาในการคายประจุไฟฟ้าที่ค่ากระแสแตกต่างกัน

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานภายในแบตเตอรี่และเวลาในการคายประจุไฟฟ้าที่ค่ากระแสต่างกัน โดยค่าความต้านทานภายในจะมีค่ามากขึ้นเมื่อเวลาผ่านไปและเมื่อเปรียบเทียบการคายประจุไฟฟ้าที่ค่ากระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น พบว่าค่าความต้านทานจะมีแนวโน้มสูงขึ้นเส้นกราฟสีแดง ดังรูปที่ 2.7

2.3.2 ประเภทของการอัดประจุไฟฟ้า

การอัดประจุแบตเตอรี่หุติยภูมินั้นมีอยู่หลายวิธี หลักการของการอัดประจุก็คือการจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าสู่แบตเตอรี่ในทิศทางที่ตรงกันข้ามกับการคายประจุ การอัดประจุแรงดันไฟฟ้าคงที่นิยมใช้กันทั่วไป แต่ก็ยังมีการอัดประจุแบบกระแสไฟฟ้าคงที่ใช้อยู่ สิ่งที่ต้องนำมาพิจารณาในการเลือกเครื่องอัดประจุก็คือการถูกคายประจุ เวลาในการอัดประจุ อุณหภูมิที่สูงขึ้นและจำนวนเซลล์ของแบตเตอรี่

2.3.2.1 การอัดประจุด้วยแรงดันไฟฟ้าคงที่

การอัดประจุด้วยแรงดันไฟฟ้าคงที่ หมายถึงการอัดประจุไฟฟ้าโดยค่านึงถึงแรงดันไฟฟ้าอย่างเดียว ไม่คำนึงถึงกระแสไฟฟ้าขณะอัดประจุไฟฟ้า ปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่ใช้อัดประจุไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับความต่างศักย์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าเครื่องอัดประจุกับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่ ดังนั้นเมื่อเริ่มต้นอัดประจุไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าจะค่อยๆ เพิ่มสูงขึ้นและจะลดลงเมื่อแบตเตอรี่มีสถานะในการอัดประจุของแบตเตอรี่ (State of charge : SOC) เข้าใกล้ 100% เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่สูงขึ้น เครื่องอัดประจุที่ใช้โดยทั่วไปมีอยู่ 2 แบบก็คือ แบบ fast charge จะอัดประจุที่แรงดันสูง กระแสไฟฟ้าที่อัดประจุจึงสูงตาม เวลาที่ใช้อัดประจุจะเร็วแต่มีความเสี่ยงต่อความเสียหายของแบตเตอรี่ ทำให้อายุการใช้งานลดลง อีกแบบหนึ่งคือการอัดประจุแบบ float charge คือการอัดประจุที่แรงดันไฟฟ้าสูงกว่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่เล็กน้อย กระแสไฟฟ้าอัดประจุจึงไม่สูง แต่ก็ใช้เวลาในการอัดประจุยาวนานกว่าการอัดประจุแบบ float charge นิยมใช้ในการอัดประจุแบบต่อเนื่องเหมาะสำหรับอุปกรณ์ที่ใช้สำรองไฟต่างๆ เช่น UPS ไฟฉุกเฉิน จะเห็นได้ว่ามีข้อดีข้อเสียที่ต่างกัน ดังนั้นจึงมีการประยุกต์ให้การอัดประจุแบบแรงดันไฟฟ้าคงที่นี้ให้เป็นแบบ Dual step charging คือเริ่มแรกจะอัดประจุแบบ fast charge ก่อน เพื่อแก้ไขจุดอ่อนในเรื่องเวลาในการอัดประจุเมื่อเวลาผ่านไป เมื่อสถานะในการอัดประจุของแบตเตอรี่ (State of charge : SOC) เริ่มสูงขึ้นก็ให้เปลี่ยนระดับแรงดันไฟฟ้าเป็นแบบ float เพื่อให้กระแสไฟฟ้าที่สถานะ overcharge ไม่สูงมากเพื่อยืดอายุการใช้งานให้สูงขึ้นการอัดประจุแบบ Dual step Charging จะมีประสิทธิภาพสูง

2.3.2.2 การอัดประจุแบบกระแสไฟฟ้าคงที่

การอัดประจุแบบกระแสไฟฟ้าคงที่นั้นเป็นวิธีอัดประจุที่ควรที่จะนำมาใช้งานมากที่สุดเพราะเป็นวิธีที่คืนพลังงานให้แก่แบตเตอรี่ได้เร็วโดยไม่ส่งผลต่ออายุการใช้งานของแบตเตอรี่ การอัดประจุแบบกระแสไฟฟ้าคงที่จะทำงานได้ดีกับการต่ออนุกรมกันของเซลล์แบตเตอรี่ที่ไม่สมดุลการอัดประจุแบบกระแสไฟฟ้าคงที่นั้นเป็นการอัดประจุที่ทำการรักษาระดับของกระแสไฟฟ้าค่านึงถึงกระแสไฟฟ้าสูงเกินพิกัด (overcharge) หรืออุณหภูมิที่เกิดขึ้น ค่าแรงดันไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเมื่อความจุในแบตเตอรี่สูงขึ้น และจะสูงขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อแบตเตอรี่เข้าสู่สภาวะกระแสไฟฟ้าสูงเกินพิกัด ดังนั้นในการอัดประจรูปแบบกระแสไฟฟ้าคงที่จึงต้องมีการควบคุมการอัดประจุกรณีเกิดกระแสไฟฟ้าสูงเกินพิกัด การเลือกระดับของกระแสไฟฟ้าอัดประจุนั้นเป็นการตัดสินใจที่สำคัญมากเพราะจะส่งผลไปยัง

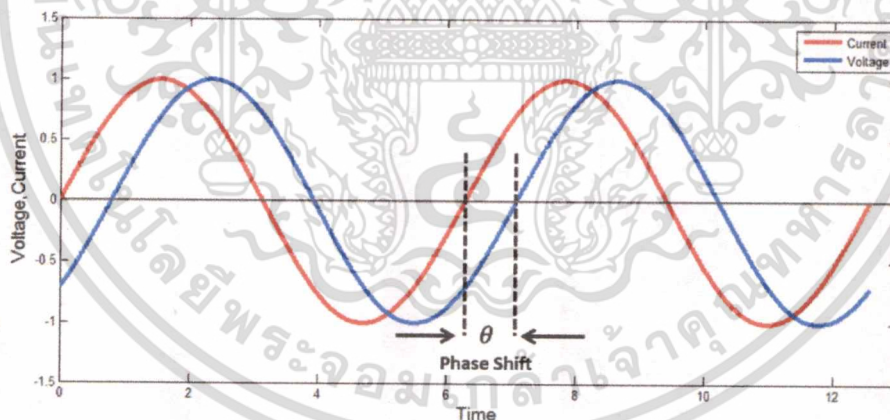
อายุการใช้งานโดยทั่วไป ซึ่งแบตเตอรี่แต่ละชนิดก็จะมีขีดจำกัดของกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้ในการอัดประจุอยู่ โดยทั่วไปทางผู้ผลิตจะต้องบอกกระแสไฟฟ้าในการอัดประจุสูงสุดไว้เพื่อใช้ในการออกแบบหรือเลือกกระแสไฟฟ้าอัดประจุ การใช้งานจริงนั้นก็จะมีทั้งแบบกระแสอัดประจุนั้นเดียวและแบบกระแสไฟฟ้าอัดประจุหลายระดับ ในแบบหลายระดับนั้นเริ่มแรกก็จะอัดประจุที่ระดับสูง (high charge) หรืออัดประจุนั้นระดับกลาง (medium charge) ก่อน เมื่อแบตเตอรี่ใกล้จะเต็ม ก็จะทำให้การเปลี่ยนกระแสไฟฟ้าอัดประจุเป็นแบบอัดประจุนั้นระดับต่ำ (low charge)

2.4 การหาจรรยาบรรณและวงจรรยาบรรณแบบต่างๆของแบตเตอรี่

การหาจรรยาบรรณของลิเทียมแบตเตอรี่จะใช้หลักการ Basic of Electrochemical Impedance Spectroscopy มาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์แบตเตอรี่ โดยทฤษฎีนี้มีส่วนของคณิตศาสตร์ และทฤษฎีพื้นฐานทางไฟฟ้ามาเกี่ยวข้องด้วย โดยมีหัวข้อหลักๆดังนี้

การทำ Electrochemical Impedance ของระบบ (แบตเตอรี่) โดยทั่วไปวัดได้โดยใช้การกระตุ้นด้วยสัญญาณแรงดันไฟฟ้ารูปไซน์ (sine wave) ขนาดเล็กเพื่อดูผลตอบสนองของกระแสไฟฟ้าที่แบตเตอรี่ส่งออกมา

จะได้รูปคลื่นสัญญาณแรงดันและกระแสที่มีมุม Phase shift กัน ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันและกระแส

สัญญาณกระตุ้น (excitation signal) แสดงได้ดังสมการ

$$V_t(t) = V_0 \sin(\omega t) \tag{2.1}$$

$V_t(t)$ คือ แรงดันไฟฟ้าที่ชั่วที่เวลาใดๆ

V_0 คือ ขนาดของสัญญาณแรงดันไฟฟ้า (Amplitude)

ω คือ ความถี่เชิงมุม(rad/s) โดยที่ $\omega = 2\pi f$

ผลตอบสนองของสัญญาณกระแสไฟฟ้า แสดงได้ดังสมการ

$$I_t(t) = I_0 \sin(\omega t + \theta) \tag{2.2}$$

$I_t(t)$ คือ กระแสไฟฟ้าที่เวลาใดๆ

I_0 คือ ขนาดของสัญญาณกระแสไฟฟ้า (Amplitude)

θ คือ มุมเฟส (Phase shift)

หา Impedance จาก Ohm's law

$$Z = \frac{V_t(t)}{I_t(t)} = \frac{V_0 \sin(\omega t)}{I_0 \sin(\omega t + \theta)} = Z_0 \frac{V_0 \sin(\omega t)}{I_0 \sin(\omega t + \theta)} \tag{2.3}$$

หรือสามารถเขียนให้อยู่ในรูปเชิงขั้วได้ดังนี้

จาก Euler's rule $e^{j\theta} = \cos(\theta) + j\sin(\theta)$ 2.4

สามารถเขียนสมการของแรงดัน กระแส และอิมพีแดนซ์ ได้ดังนี้

$$V_t = V_0 e^{j\omega t}$$

$$I_t = I_0 e^{j(\omega t - \theta)}$$

จะได้ว่า $Z(\omega) = \frac{V_t}{I_t} = Z_0 e^{j\theta} = Z_0 \{ \cos(\theta) + j\sin(\theta) \}$
 $= Z' + jZ''$

เมื่อ $(Z_0)^2 = (Z')^2 + (Z'')^2$

$$\tan \theta = \frac{Z'}{Z''}$$

โดยที่ $Z_0(\omega)$ คือ ขนาดของ Impedance ของระบบ

θ คือ มุม Phase shift

ซึ่ง Impedance ของระบบจะเปลี่ยนแปลงตามความถี่ ($\omega = 2\pi f$) ที่เปลี่ยนไป

2.4.1 ความเป็นเชิงเส้นของระบบ

ในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้า(การหา Impedance ของระบบ) การวิเคราะห์ระบบแบบเชิงเส้น(linear)จะง่ายกว่าการวิเคราะห์แบบไม่เป็นเชิงเส้น (non-linear)

ระบบเชิงเส้น(linear) สามารถอธิบายได้ด้วย สมการเชิงอนุพันธ์ของสัญญาณเข้า และสัญญาณออกมีกำลังหนึ่งเท่านั้นและที่สำคัญที่สุดคือ ระบบเป็นไปตามทฤษฎีของการทับซ้อน (Superposition theorem) นั่นคือ

- $y_1(t)$ เป็นสัญญาณออก เนื่องจากสัญญาณเข้า $x_1(t)$
- $y_2(t)$ เป็นสัญญาณออก เนื่องจากสัญญาณเข้า $x_2(t)$
- สัญญาณออกที่เกิดจากสัญญาณ $y_1(t)$ และ $y_2(t)$ รวมกันมีค่าเท่ากับสัญญาณออก เนื่องจากสัญญาณเข้า $x_1(t)+x_2(t)$
- $ay_1(t)$ เป็นสัญญาณออก เนื่องจากสัญญาณเข้า $ax_1(t)$

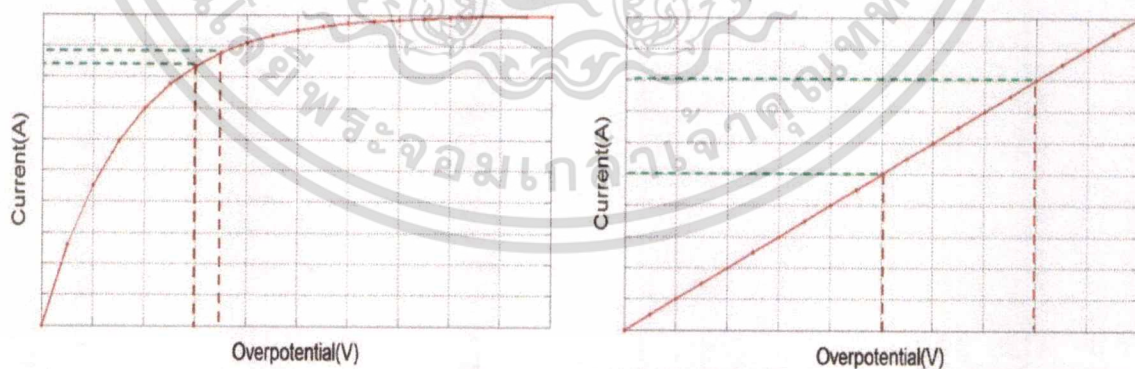
ดังนั้นในการวิเคราะห์หา Impedance ของระบบจึงต้องกระตุ้นด้วยสัญญาณแรงดันไฟฟ้าขนาดเล็กเพื่อที่จะสามารถวิเคราะห์ระบบเป็นแบบระบบเชิงเส้น (linear)

หา Impedance จาก Ohm's law

$$Z = \frac{V_i(t)}{i_i(t)}$$

2.5

ในทางปฏิบัติการใช้ Impedance ด้วยหลักการ Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) จะกระตุ้นด้วยสัญญาณแรงดันไฟฟ้าขนาดเล็ก 1 ถึง 10 mV



รูปที่ 2.9 กราฟการวิเคราะห์แบบเชิงเส้น (linearity)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 การแสดงข้อมูล (Data Presentation)

จากข้างต้น การหา Impedance ของระบบ (แบบเตอรี) สามารถหาได้จาก

$$Z(\omega) = \frac{V_t}{I_t} = Z_0 e^{j\theta} = Z_0 \{ \cos(\theta) + j\sin(\theta) \} \quad 2.6$$

ซึ่งสามารถนำเสนอข้อมูลได้ ดังนี้

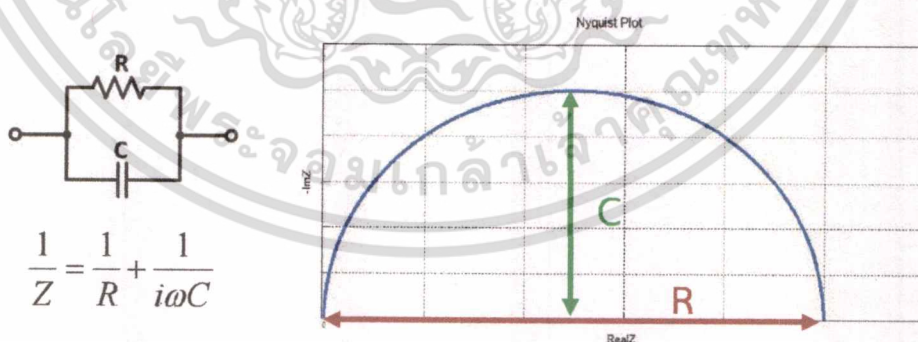
- Nyquist Plot

$$\text{จาก } Z(\omega) = \frac{V_t}{I_t} = Z_0 e^{j\theta} = Z_0 \{ \cos(\theta) + j\sin(\theta) \}$$

เป็นการแสดงข้อมูลของ Impedance ($Z(\omega)$) ของระบบ(แบบเตอรี)ซึ่งจะอยู่ในรูปของส่วนจริงและส่วนจินตภาพ โดยในแกน X จะแสดงค่าส่วนจริง และแกน Y จะแสดงค่าในส่วนจินตภาพของ Impedance ของระบบ

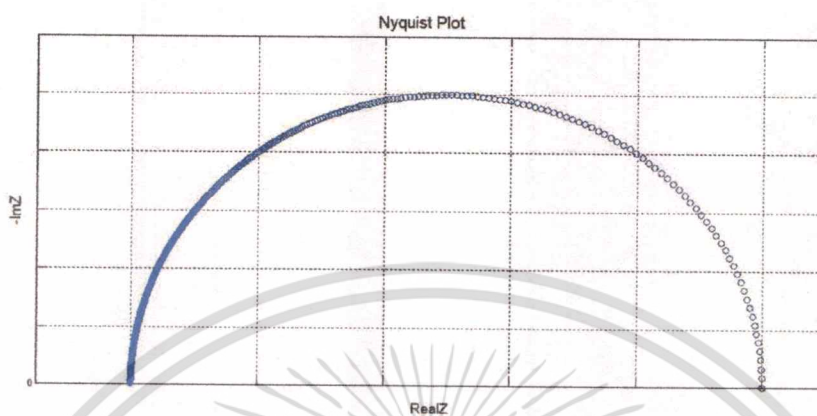
ใน Nyquist Plot แสดงทั้งขนาดและมุมเฟส โดยที่ขนาดของ Impedance แสดงด้วยเวกเตอร์ขนาด $|Z|$ และมุมเฟสแสดง ดังรูป แต่ Nyquist Plot มีหนึ่งข้อบกพร่องที่สำคัญ คือไม่สามารถระบุค่าความถี่ที่ค่า Impedance ที่จุดข้อมูลใดๆ ได้

จากรูปที่ 2.10 เป็นการยกตัวอย่าง Nyquist Plot ของวงจร RC ซึ่งมีลักษณะเป็นรูปครึ่งวงกลม 1 รูป แสดงถึงวงจรนี้มีค่าคงที่เวลา (time constant) ค่าเดียว

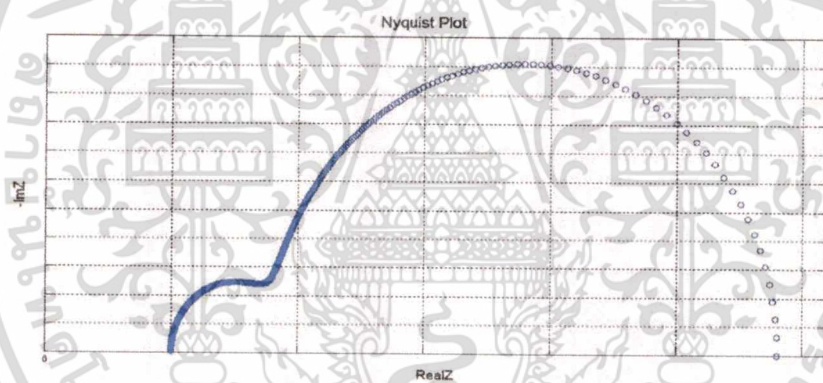


รูปที่ 2.10 ตัวอย่าง Nyquist Plot ของวงจร RC

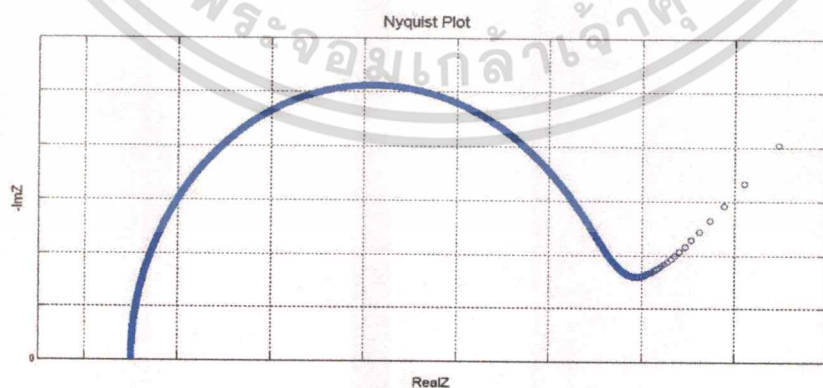
ตัวอย่าง Nyquist Plot ของวงจรสมมูลแบบเตอริชนิดลิเทียมไอออน



รูปที่ 2.11 Nyquist Plot ของ One-RC Branch Equivalent



รูปที่ 2.12 Nyquist Plot ของ Two-RC Branch Equivalent Circuit

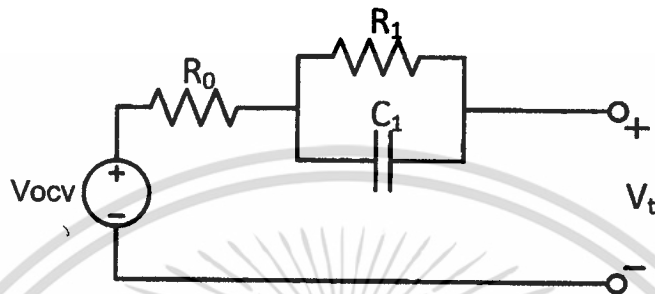


รูปที่ 2.13 Nyquist Plot ของ Finite Warburg Impedance Model

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 วงจรสมมูลของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด (Lead-acid)

วงจรทางไฟฟ้าจากสมการเทวินินได้จำลองรูปแบบภายในแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด โดยมี R และ RC ขนาน ดังรูปที่



รูปที่ 2.14 วงจรสมมูลของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด

สามารถหาค่าความสัมพันธ์ของวงจรได้โดย

$$V_1(k+1) = V_1(k)e^{-\Delta t/\tau_1} + I_k R_1 (1 - e^{-\Delta t/\tau_1}) \quad 2.7$$

$$V_t(k) = V_{ocv} + I_k R_0 + V_1(k) \quad 2.8$$

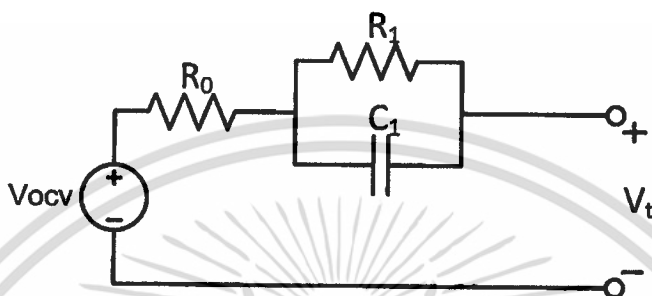
ประกอบด้วย

- V_{ocv} หรือ Open Circuit Voltage ซึ่งเปลี่ยนแปลงตามค่า SOC และ อุณหภูมิ
- R_0 คือ Ohmic Resistance หรือ Electrolyte Resistance เป็น parameter ที่ทำให้เกิด
- แรงดันตกอย่างทันทีทันใด ซึ่งเป็นแรงดันที่ตกคร่อมระหว่าง reference electrode และ working electrode ซึ่ง Ohmic Resistance จะขึ้นอยู่กับสภาพการนำไฟฟ้าของสารละลายอิเล็กโทรไลต์
- R_1 หรือ C_1 เป็นค่าที่แสดงพฤติกรรมในช่วง transient ซึ่งมีค่า time constant ในช่วง short-term โดย R_1 คือ Polarization Resistance หรือ Charge transfer Resistance ซึ่งเกี่ยวข้องกับการถ่ายเทประจุระหว่างอิเล็กโทรดทั้ง 2 ฝั่ง ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งจะสอดคล้องในย่านความถี่ปานกลางและ C_1 คือ Double layer Capacitance ซึ่งคือตัวเก็บประจุที่อยู่ระหว่าง อิเล็กโทรไลต์และอิเล็กโทรด โดยจะขึ้นอยู่กับความต่างศักย์ระหว่างขั้วอิเล็กโทรด, อุณหภูมิ, ความเข้มข้นของไอออนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ชนิดของไอออน และชั้นของออกไซด์ ซึ่งจะสอดคล้องในย่านความถี่ปานกลาง

2.6 วงจรสมมูลของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียม-ไอออน (Li-ion Battery) มีหลายรูปแบบดังนี้

2.6.1 One-RC Branch Equivalent

เป็นวงจรสมมูลอย่างง่ายโดยมอง RC Combination เป็น Lump Impedance ซึ่งมองเป็น RC ขนานกันเพียง loop เดียว

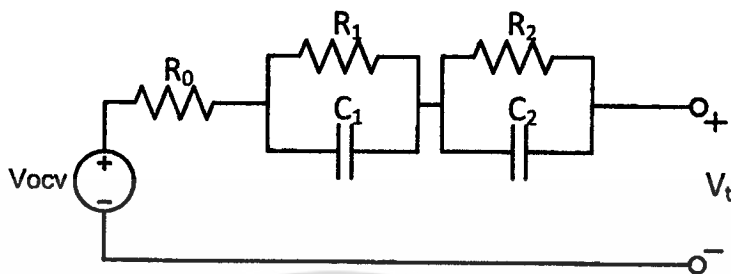


รูปที่ 2.15 วงจรสมมูลแบบ One-RC Branch Equivalent

ประกอบด้วย

- V_{ocv} หรือ Open Circuit Voltage ซึ่งเปลี่ยนแปลงตามค่า SOC และ อุณหภูมิ
- R_0 คือ Ohmic Resistance หรือ Electrolyte Resistance เป็น parameter ที่ทำให้เกิด
- แรงดันตกอย่างทันทีทันใด ซึ่งเป็นแรงดันที่ตกคร่อมระหว่าง reference electrode และ working electrode ซึ่ง Ohmic Resistance จะขึ้นอยู่กับสภาพการนำไฟฟ้าของสารละลายอิเล็กโทรไลต์
- R_1 หรือ C_1 เป็นค่าที่แสดงพฤติกรรมในช่วง transient ซึ่งมีค่า time constant ในช่วง short-term โดย R_1 คือ Polarization Resistance หรือ Charge transfer Resistance ซึ่งเกี่ยวข้องกับการถ่ายเทประจุระหว่างอิเล็กโทรดทั้ง 2 ฝั่ง ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งจะสอดคล้องในย่านความถี่ปานกลางและ C_1 คือ Double layer Capacitance ซึ่งคือตัวเก็บประจุที่อยู่ระหว่าง อิเล็กโทรไลต์และอิเล็กโทรด โดยจะขึ้นอยู่กับความต่างศักย์ระหว่างขั้วอิเล็กโทรด, อุณหภูมิ, ความเข้มข้นของไอออนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ชนิดของไอออน และชั้นของออกไซด์ ซึ่งจะสอดคล้องในย่านความถี่ปานกลาง

2.6.2 Two-RC Branch Equivalent



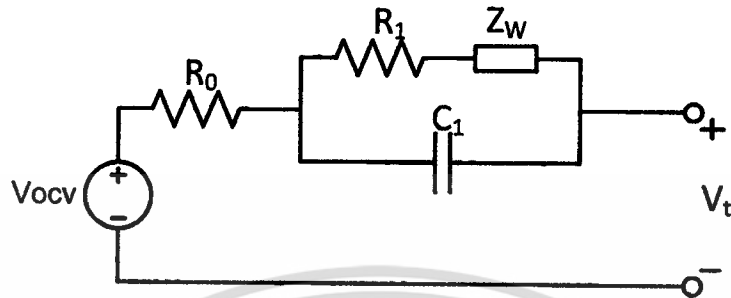
รูปที่ 2.16 วงจรสมมูลแบบ Two-RC Branch Equivalent

ประกอบด้วย

- V_{ocv} หรือ Open Circuit Voltage ซึ่งเปลี่ยนแปลงตามค่า SOC และ อุณหภูมิ
- R_0 คือ Ohmic Resistance หรือ Electrolyte Resistance เป็น parameter ที่ทำให้เกิดแรงดันตกอย่างทันทีทันใด ซึ่งเป็นแรงดันที่ตกคร่อมระหว่าง reference electrode และ working electrode ซึ่ง Ohmic Resistance จะขึ้นอยู่กับสภาพการนำไฟฟ้าของสารละลายอิเล็กโทรไลต์
- R_1 หรือ C_1 เป็นค่าที่แสดงพฤติกรรมของ Double-layer capacitance และ reaction kinetic ในช่วง transient ซึ่งมีค่า time constant ในช่วง short-term
- R_2 หรือ C_2 เป็นค่าที่แสดงพฤติกรรมของ Diffusion process ในช่วง transient ซึ่งมีค่า time constant ในช่วง long-term

โดย R_1, R_2 คือ Polarization Resistance หรือ Charge transfer Resistance ซึ่งเกี่ยวข้องกับการถ่ายเทประจุระหว่างอิเล็กโทรดทั้ง 2 ฝั่ง ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งจะสอดคล้องในย่านความถี่ปานกลาง และ C_1, C_2 คือ Double layer Capacitance ซึ่งคือตัวเก็บประจุที่อยู่ระหว่างอิเล็กโทรไลต์และอิเล็กโทรด โดยจะขึ้นอยู่กับความต่างศักย์ระหว่างขั้วอิเล็กโทรด, อุณหภูมิ, ความเข้มข้นของไอออนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ชนิดของไอออน และชั้นของออกไซด์ ซึ่งจะสอดคล้องในย่านความถี่ปานกลาง

2.6.3 Finite Warburg Impedance Model



รูปที่ 2.17 วงจรสมมูลแบบ Finite Warburg Impedance Model

ประกอบด้วย

- R_0 คือ Ohmic Resistance หรือ Electrolyte Resistance เป็น parameter ที่ทำให้เกิดแรงดันตกอย่างทันทีทันใด ซึ่งเป็นแรงดันที่ตกคร่อมระหว่าง reference electrode และ working electrode ซึ่ง Ohmic Resistance จะขึ้นอยู่กับสภาพการนำไฟฟ้าของสารละลายอิเล็กโทรไลต์
- R_1 คือ Polarization Resistance หรือ Charge transfer Resistance ซึ่งเกี่ยวข้องกับกระบวนการถ่ายเทประจุระหว่างอิเล็กโทรดทั้ง 2 ฝั่ง ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งจะสอดคล้องในย่านความถี่ปานกลาง
- C_1 คือ Double layer Capacitance ซึ่งคือตัวเก็บประจุที่อยู่ระหว่างอิเล็กโทรดและอิเล็กโทรด โดยจะขึ้นอยู่กับความต่างศักย์ระหว่างขั้วอิเล็กโทรด, อุณหภูมิ, ความเข้มข้นของไอออนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์, ชนิดของไอออน และชั้นของออกไซด์ ซึ่งจะสอดคล้องในย่านความถี่ต่ำ
- Z_w คือ Warburg Resistance แสดงถึงการแพร่ของ Li-ion ระหว่างวัสดุที่ใช้งานกับอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งจะสอดคล้องในย่านความถี่ต่ำ

โดยที่
$$Z_w = \frac{A_w}{\sqrt{\omega}} \times (1-j) \tanh(\delta(\sqrt{j\omega/D})) \quad 2.9$$

ซึ่ง $\tanh(\delta(\sqrt{j\omega/D}))$ มีค่าประมาณเท่ากับ 1

ดังนั้น
$$Z_w = \frac{A_w}{\sqrt{\omega}} \times (1-j) \quad \text{โดยที่ } A_w \text{ คือ Warburg constant}$$

2.7 สรุป

จากที่กล่าวมาข้างต้นในบทที่ 2 นี้ จะเป็นการกล่าวถึงคุณสมบัติ ข้อดี ข้อเสีย และการนำไปใช้งานของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียม ชนิดตะกั่วกรด การอัดประจุ การคายประจุ รวมไปถึงปัจจัยที่มีผลต่อแบตเตอรี่ โดยทำการศึกษาการใช้งานแบตเตอรี่แบบผสมผสาน (Hybrid Battery) ซึ่งการที่จะนำแบตเตอรี่มาใช้งานร่วมกันได้นั้น จำเป็นต้องทราบวงจรสมมูลภายในของแบตเตอรี่ และภายในบทนี้ได้กล่าวถึงเทคนิคการหาวงจรสมมูลภายในของแบตเตอรี่ โดยใช้เทคนิคที่เรียกว่า Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็นหลายโมเดลด้วยกัน คือ One-RC Branch Equivalent, Two-RC Branch Equivalent และ Finite Warburg Impedance Model โดยจะทำการทดลองเพื่อหาวงจรสมมูลภายในของแบตเตอรี่ ชนิดลิเทียม ที่มีความใกล้เคียงกับคุณลักษณะของแบตเตอรี่มากที่สุด ซึ่งจะกล่าวถึงในบทต่อไป



บทที่ 3

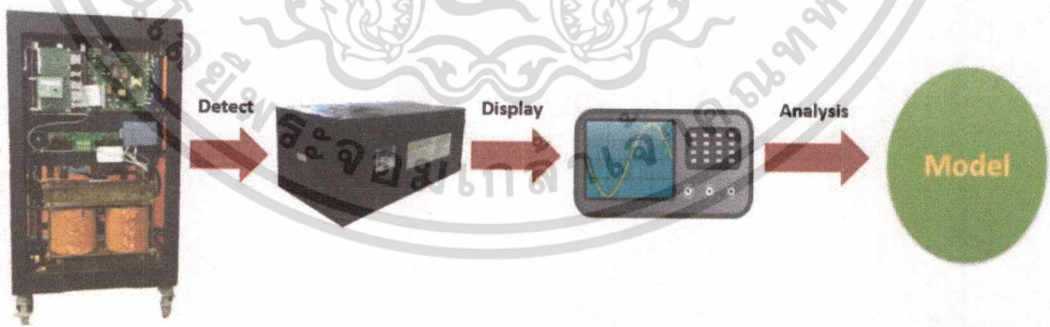
การออกแบบการทดลอง

3.1 บทนำ

ในปัจจุบันนี้มีการใช้งานแบตเตอรี่อย่างแพร่หลายทำให้แบตเตอรี่เข้ามามีบทบาทอย่างมากในระบบโครงข่ายไฟฟ้า แต่เนื่องจากแบตเตอรี่ยังมีราคาค่อนข้างแพงส่งผลให้ราคาต้นทุนของระบบสูงขึ้นด้วยเพราะแบตเตอรี่ได้ถูกนำมาใช้งานในระบบสะสมพลังงานซึ่งเป็นต้นทุนหลักของระบบโครงข่ายไฟฟ้าต่างๆ ดังนั้นการลดราคาแบตเตอรี่จะสามารถลดราคาต้นทุนได้จึงนำไปสู่การใช้งานแบตเตอรี่แบบผสมผสาน (Hybrid Battery) โดยจำเป็นต้องทราบวงจรสมมูลภายในของแบตเตอรี่ ซึ่งในบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงการออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าพารามิเตอร์และหาวงจรมูลของแบตเตอรี่ โดยใช้การวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงเวลา (Time Domain) และการวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงความถี่ (Frequency Domain)

3.2 การออกแบบการทดลองเพื่อวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงเวลา (Time Domain)

ทำการทดลองโดยการอัดและคายประจุแบตเตอรี่แบบพัลส์ชาร์จ (Pulse Charged) ที่พิกัดกระแสต่างๆ เพื่อดูผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของแบตเตอรี่ จากนั้นนำผลการทดลองที่ได้ไปวิเคราะห์หาวงจรมูลและพารามิเตอร์ภายในแบตเตอรี่ และนำผลการทดลองที่ได้มาทำการเปรียบเทียบกับผล Simulation โดยใช้โปรแกรม PSIM



รูปที่ 3.1 การหาวงจรมูลของแบตเตอรี่โดยวิธีการวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงเวลา

3.3 ข้อมูลแบตเตอรี่ที่ใช้ทำการทดลอง

TOSHIBA

Secret | Authorized party only | Rank A

SPC-KMT-E0001

2. Module specifications

2.1. Basic configuration

Table 2.1 The outline of module specifications

Item		Specifications
Name		27.6V-40Ah secondary battery module on vehicle
Model number		AM01202CCA05A
Nominal capacity		40Ah
Nominal voltage		27.6V DC
Nominal energy		1104Wh
Weight		14kg (Approx.)
Storage temperature range (Environmental temperature)		-30 ~ 55 deg C (No condensation)
Operating temperature range (Cell temperature)		-30 ~ 55 deg C (No condensation)
Operating ambient humidity range		15 ~ 85%RH
Dimensions		H : 187.3mm L : 358.5mm W : 122.65mm
Main terminals		M6 Extra Low head Cap Screw (Recess: T20 Hexalobular)
Type name of connector on CMU		SM08B-CPTK-1A-TB (Manufactured by JST)
High voltage system	Operating voltage range	18V ~ 32.4V (Cell: 1.5 ~ 2.7V) (Voltage threshold: 1.3V/3.0V @ cell)
	Absolute maximum rating voltage	48V (12 x 4.0V) or less (The definition of maximum rating voltage is that operating circuit on CMU doesn't become malfunction)
	Consumption current (Not operating cell balancing)	Each cell: 40mA or less (Current doesn't flow through module terminals but through each cell)
	Cell balancing current	83mA (Approx.) (When cell voltage is 2.8V)
	Dark current	270µA or less in each cell (Current doesn't flow through module terminals but through each cell)
Low voltage system	Rated supply voltage	12V
	Operating voltage	8 ~ 16V
	Consumption current	In operating (Including in cell balancing): 17mA or less
	Dark current	0mA
Damp proof		CMU board is applied damp-proof material
Insulated resistance		1Mohm and over (Applied voltage: DC1000V, between high and low voltage terminal)
Dielectric strength voltage		Applied voltage: AC2500V for 1 minute (Between high and low voltage terminal)
Operating altitude range		1,000m or less
Accessories (Specifications are out of TOSHIBA's scope)		Communication cable (Operation check: Packaged 1 pcs per 1 module)

Specifications, technical data of 2P12S module are tentative, not for the final product. These are subject to change without prior notice.

รูปที่ 3.2 Data Sheet ของแบตเตอรี่ TOSHIBA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 แบตเตอรี่ TOSHIBA ที่ใช้ในการทดลอง

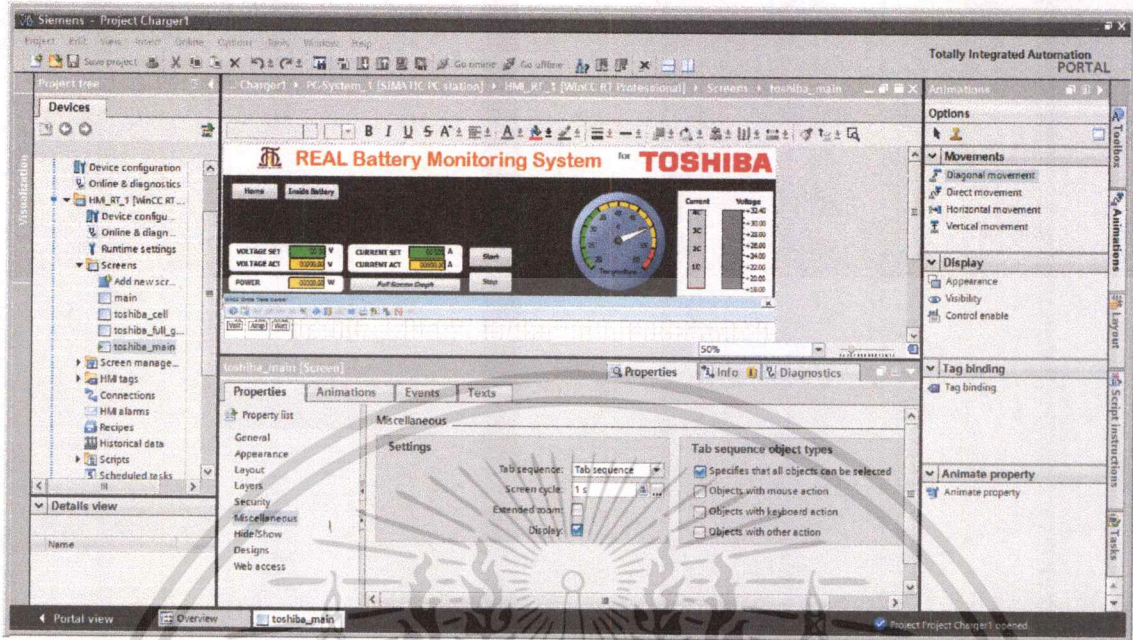
3.4 โปรแกรม PLC ของบริษัท Siemens

หน่วยประมวลผล SIMATIC S7-1200 ของบริษัท Siemens ดังรูปที่ 3.2 เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการนำข้อมูลที่ได้จากไมโครคอนโทรลเลอร์ในรูปแบบการสื่อสารแบบ RS232 มาทำการแบ่งประเภทของข้อมูล เพื่อง่ายต่อการแสดงผลในโปรแกรม PLC

ในการออกแบบหน้าจอแสดงข้อมูลของแบตเตอรี่จะใช้โปรแกรม PLC ของบริษัท Siemens ดังรูปที่ 3.3 ซึ่งข้อมูลดังกล่าวได้แก่ แรงดันต่อเซลล์ภายในแบตเตอรี่ อุณหภูมิภายในแบตเตอรี่ กระแสขณะใช้งานของแบตเตอรี่ ค่าสถานะ SOC (State of Charge) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับเวลา กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับเวลา กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับเวลา



รูปที่ 3.4 หน่วยประมวลผล SIMATIC S7-1200 ของบริษัท Siemens



รูปที่ 3.5 หน้าต่างแสดงโปรแกรม PLC ของบริษัท Siemens

3.5 การออกแบบการทดลองเพื่อวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงความถี่ (Frequency Domain)

ทำการทดลองอัดประจุแบตเตอรี่ด้วยการจ่ายสัญญาณไซน์ โดยจะทำการปรับเปลี่ยนค่าความถี่ต่างๆตั้งแต่ 20mHZ ถึง 1kHz และพิจารณาถึงผลตอบสนองของสัญญาณแรงดันที่ขั้วของแบตเตอรี่และกระแสที่ไหลผ่านแบตเตอรี่เพื่อนำมาหาค่าอิมพีแดนซ์ (Impedance : Z) และค่าความต่างเฟส (Phase shift) สำหรับการนำไปวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ที่อยู่ภายในแบตเตอรี่และวงจรสมมูลของแบตเตอรี่

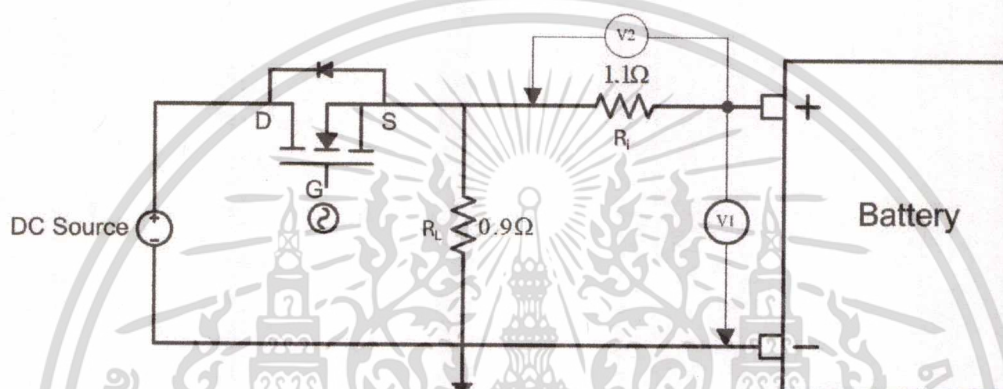


รูปที่ 3.6 การหาจรรยาสมมูลของแบตเตอรี่โดยวิธีการวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงความถี่

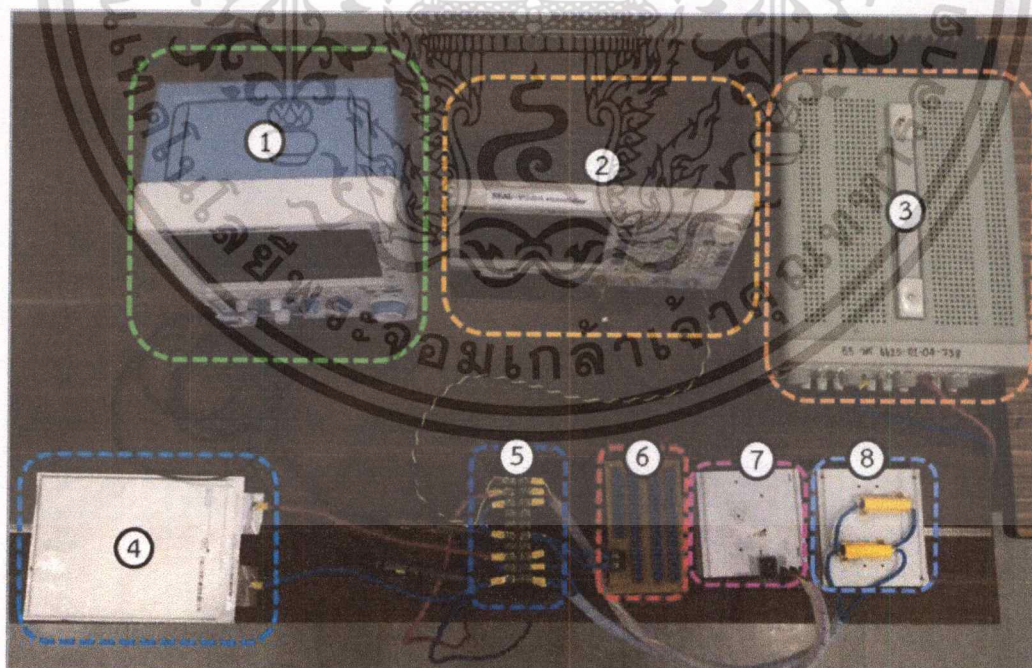
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6 การออกแบบวงจรที่ใช้ในการทดสอบแบตเตอรี่เพื่อตรวจสอบสองเชิงความถี่

วงจรที่ใช้ในการทดสอบแบตเตอรี่เพื่อตรวจสอบสองเชิงความถี่นั้นไม่สามารถใช้แหล่งจ่ายสัญญาณไซน์จ่ายสัญญาณเข้าไปในแบตเตอรี่โดยตรงเนื่องจากภายในแบตเตอรี่นั้นมีแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงอยู่และอีกสาเหตุหนึ่งคือผลของการกระเพื่อมของแรงดันที่ใช้ในการอัดประจุแบตเตอรี่นั้นมีผลต่ออายุการใช้งานของแบตเตอรี่ดังกล่าวด้วยเช่นกัน สามารถออกแบบวงจรการทดลองได้ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 วงจรที่ใช้ในการทดสอบแบตเตอรี่



รูปที่ 3.8 วงจรทดลองจริงที่ใช้ในการทดสอบแบตเตอรี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

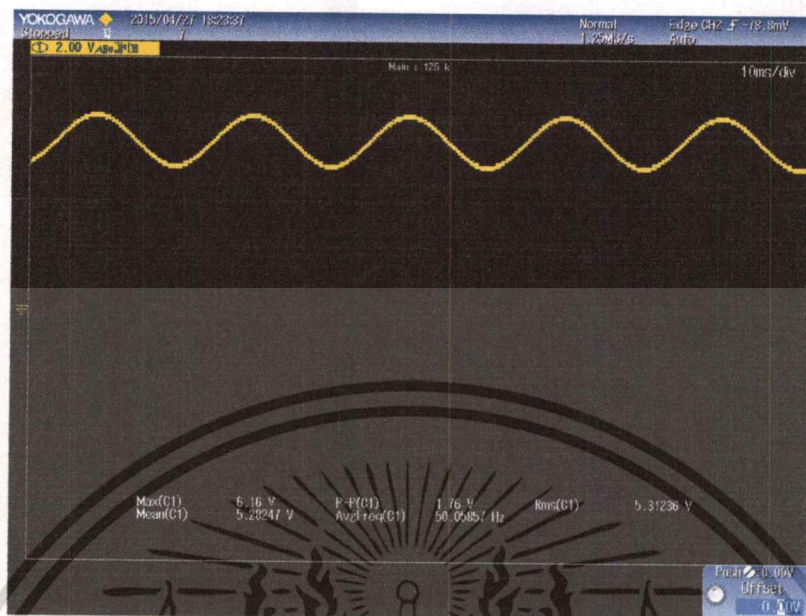
จากรูปที่ 3.8 คือวงจรและอุปกรณ์วัดจริงที่ใช้ในการทดลองโดยประกอบด้วย อุปกรณ์ดังต่อไปนี้

1. ออสซิลโลสโคป
2. ชิกแนลเจนเนอเรเตอร์
3. แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบปรับค่าได้
4. แบตเตอรี่ที่ต้องการทดสอบ
5. คอนเนคเตอร์
6. ตัวต้านทานสำหรับตรวจจ็ับกระแส
7. มอสเฟต
8. ตัวต้านทานสำหรับแบ่งแรงดัน

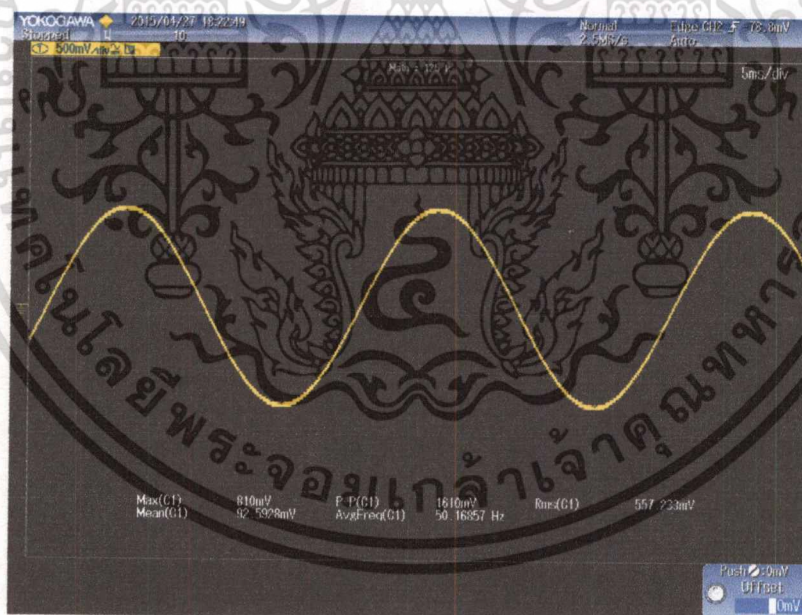
โดยหลักการในการออกแบบนั้นจะใช้มอสเฟตควบคุมการไหลของกระแสให้เป็น สัญญาณไซน์ที่รวมอยู่กับสัญญาณกระแสตรง ส่วนในการตรวจจ็ับกระแส นั้นจะใช้การวัดรูปคลื่น แรงดันคร่อมตัวต้านทาน R_s และวัดสัญญาณรูปคลื่นแรงดันคร่อมแบตเตอรี่ เพื่อนำมาคำนวณหา ค่าความต่างเฟสและค่าอิมพีแดนซ์ภายในของแบตเตอรี่ในแต่ละความถี่

3.7 การหาค่าอิมพีแดนซ์ภายในแบตเตอรี่

การหาค่าอิมพีแดนซ์ภายในแบตเตอรี่นั้นจำเป็นต้องทราบค่าของความต่างเฟส ค่ายอดของสัญญาณแรงดันทั่วไปของแบตเตอรี่ และค่ายอดของสัญญาณแรงดันที่ความต้านทานเพื่อ หาค่ากระแสที่ไหลในวงจร สำหรับนำมาคำนวณหาอิมพีแดนซ์ที่ติดอยู่ในรูปจำนวนเชิงซ้อน $R \pm jX$ และเพื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยวิธี Nyquist Plot โดยจะทำการวัดสัญญาณค่ายอดของสัญญาณ แรงดันทั่วไปของแบตเตอรี่ ที่ตำแหน่ง V_1 ในวงจรรูปที่ 3.7 จะได้สัญญาณดังรูปที่ 3.9 และทำการวัด ค่ายอดของสัญญาณแรงดันที่ความต้านทาน ที่ตำแหน่ง V_2 ในวงจรรูปที่ 3.7 จะได้สัญญาณดัง รูปที่ 3.10



รูปที่ 3.9 รูปคลื่นสัญญาณที่วัดคร่อมแบตเตอรี่



รูปที่ 3.10 รูปคลื่นสัญญาณที่วัดคร่อมแบตเตอรี่ (ส่วนที่ตัดผลของแรงดันDCออกแล้ว)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูตรการคำนวณหาความต่างเฟส $\theta = \frac{\Delta t}{T} \times 360$ 3.1

Δt คือ ค่าส่วนต่างเวลาของขอบขาขึ้นของสัญญาณ

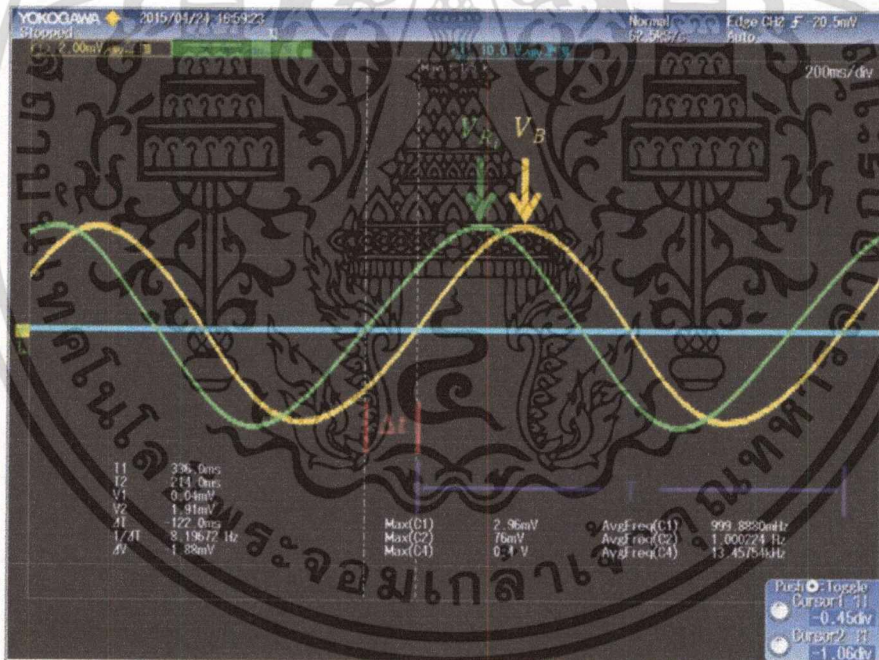
T คือ คาบของสัญญาณที่ความถี่นั้นๆ

สูตรการคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์ $Z = \frac{V_B \times R_i}{V_{R_i}} \times (\cos \theta + j \sin \theta)$ 3.2

V_B คือค่ายอดของสัญญาณแรงดันที่ตกคร่อมแบตเตอรี่

V_{R_i} คือค่ายอดของสัญญาณแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทาน R_i

R_i คือค่าความต้านทานที่ใช้ในการตรวจจับกระแส



รูปที่ 3.11 ตัวอย่างรูปคลื่นสัญญาณที่ใช้ในการคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.8 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงการออกแบบวงจรที่ใช้ในการทดลองเพื่อหาจรรยาบรรณและพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนโดยใช้การวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงเวลา (Time Domain) ทำการอัดและคายประจุแบตเตอรี่แบบพัลส์ชาร์จ (Pulse Charged) ที่พิกัดกระแสต่างๆ เพื่อดูผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของแบตเตอรี่ และการวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงความถี่ (Frequency Domain) ทำการอัดประจุแบตเตอรี่ในช่วงความถี่ตั้งแต่ 20mHz ถึง 1kHz เพื่อดูผลต่างมุมระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้า รวมถึงรายละเอียดของอุปกรณ์และโปรแกรมต่างๆที่ได้นำมาใช้ในการทดลองนี้



บทที่ 4

ผลการทดลอง

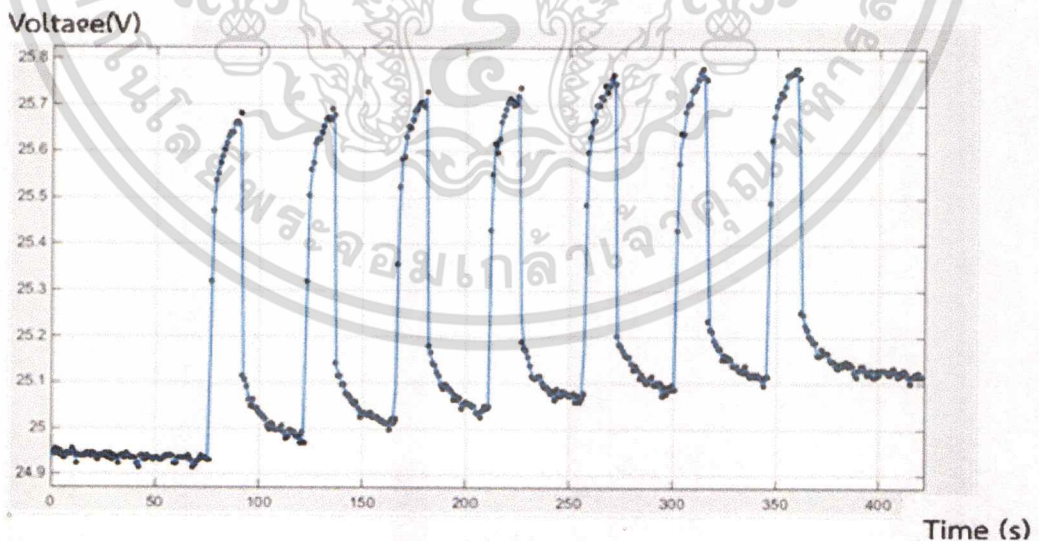
4.1 บทนำ

ในบทนี้จะนำเสนอถึงผลการทดสอบแบตเตอรี่ชนิดลิเทียม-ไอออน ด้วยการวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงเวลา (Time Domain) และการวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงความถี่ (Frequency Domain) เพื่อหาจรรยาบรรณที่ถูกต้องและเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียม-ไอออน นอกจากนี้ยังได้เปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการ Simulation จากโปรแกรม MATLAB และโปรแกรม PSIM

4.2 การทดลองหาจรรยาบรรณและค่าพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนด้วยการวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงเวลา (Time Domain)

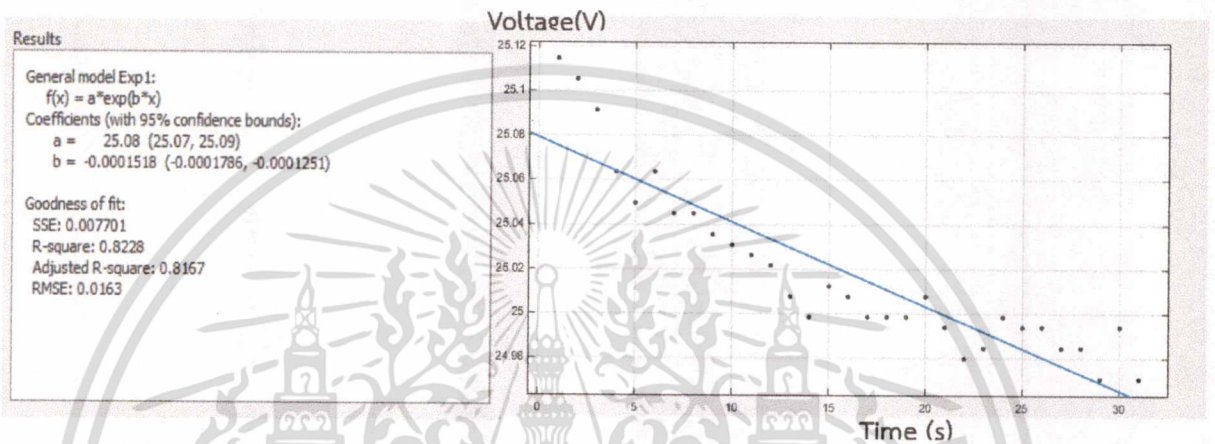
4.2.1 การทดลองหาจรรยาบรรณ

ทำการทดลองด้วยการอัดประจุ (Charge) แบตเตอรี่ที่พิกัดกระแส 1C หรือ 40 แอมแปร์ ที่อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส โดยอัดประจุเป็นพัลส์ อัดประจุแบตเตอรี่ 15 วินาที และพัก 30 วินาที ทำเรื่อยๆแล้ววัดแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากนั้นจึงนำข้อมูลแรงดันดังกล่าวมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับเวลาจะได้กราฟดังรูป 4.1

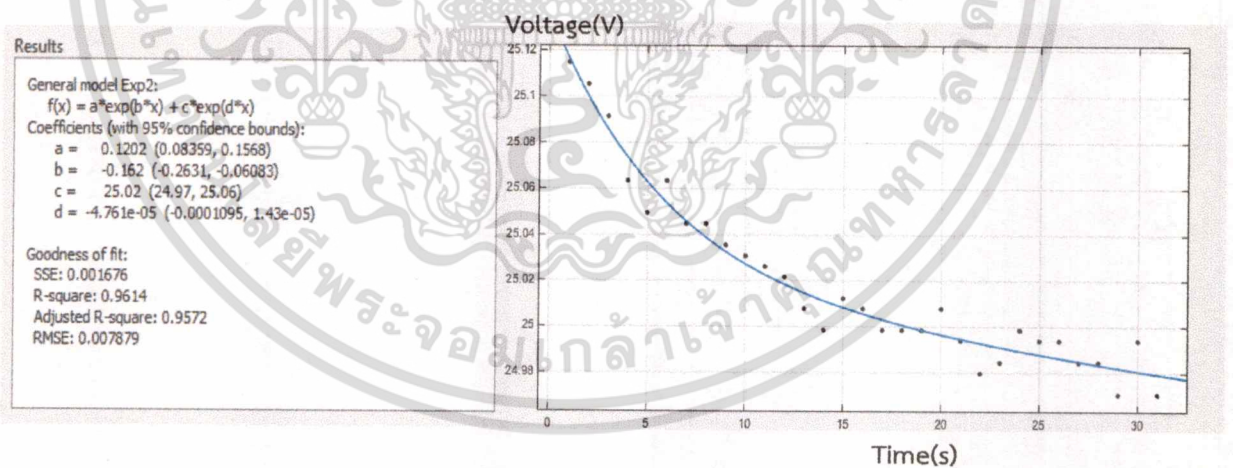


รูปที่ 4.1 กราฟแรงดันในขณะทำการอัดประจุ

หลังจากนั้นจึงนำข้อมูลที่ได้ดังกล่าวมาทำการ curve fitting เป็นฟังก์ชันเอ็กซ์โพเนนเชียลเพื่อให้สามารถหาพารามิเตอร์ภายในต่อไปโดยโปรแกรม MATLAB เพื่อดูสมการที่อธิบายพฤติกรรมของแรงดันที่ชั่วของแบตเตอรี่ โดยในขั้นตอนนี้สามารถ curve fitting ได้ออกมาสองรูปแบบคือแบบที่เป็นฟังก์ชันเอ็กซ์โพเนนเชียล 1 พจน์ และฟังก์ชันเอ็กซ์โพเนนเชียล 2 พจน์



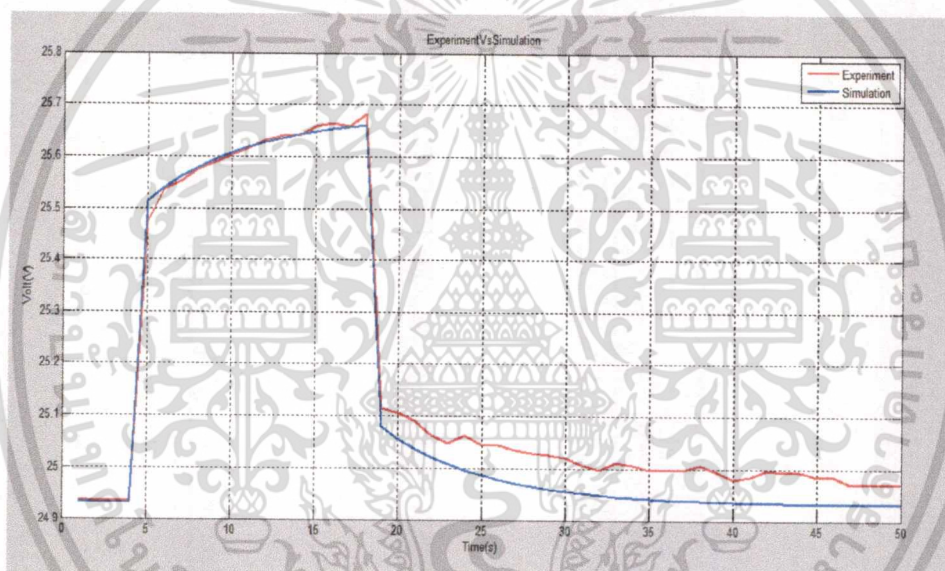
รูปที่ 4.2 การ curve fitting ฟังก์ชันเอ็กซ์โพเนนเชียล 1 พจน์



รูปที่ 4.3 การ curve fitting ฟังก์ชันเอ็กซ์โพเนนเชียล 2 พจน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

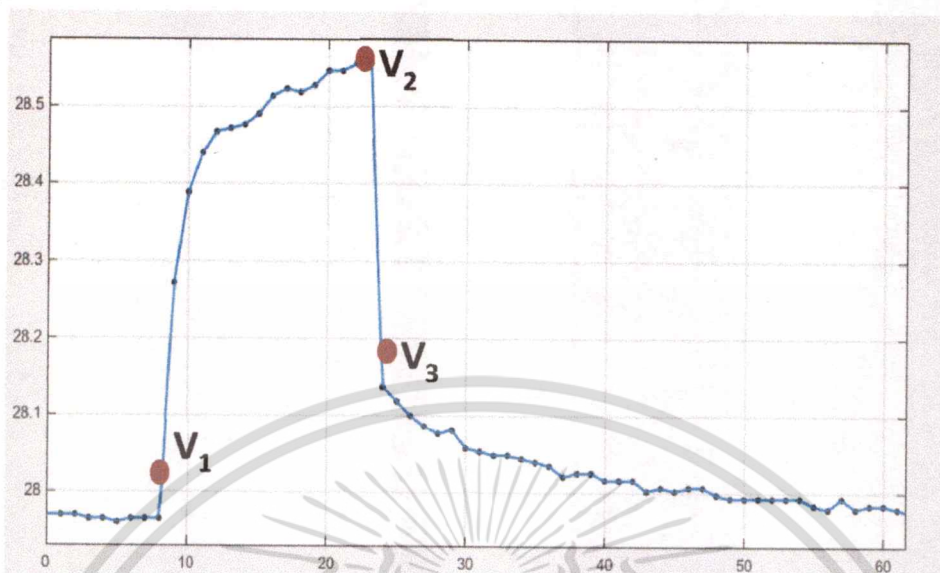
เมื่อทำการเปรียบเทียบค่า R^2 จะพบว่าการทำ curve fitting แบบฟังก์ชันเอ็กซ์โพเนนเชียล 2 พจน์จะให้กราฟที่มีความใกล้เคียงกับค่าข้อมูลจากการทดลองมากกว่า ซึ่งสามารถวิเคราะห์ต่อได้ว่า ฟังก์ชันเอ็กซ์โพเนนเชียล 2 พจน์ จะมีค่าคงที่เวลา(time constant) 2 ค่า หรือกล่าวอีกอย่างหนึ่งคือ วงจรสมมูลจะประกอบด้วย R และ C ขนานกัน 2 ชุด นอกจากนี้ยังมีการ Simulation โดยโปรแกรม PSIM ของวงจรสมมูลที่ประกอบด้วย R และ C ขนานกัน 1 ชุด (เนื่องจากสามารถหาพารามิเตอร์ได้โดยตรงจากข้อมูลการทดลอง) เปรียบเทียบกับข้อมูลจากการทดลองซึ่ง จากรูปที่ 4.4 จะสามารถสังเกตเห็นถึงความแตกต่างระหว่างค่าที่ทดลองจริงกับค่าที่ได้จากการ Simulation ซึ่งทำให้ทราบว่าวงจรสมมูลของแบตเตอรี่ที่ประกอบด้วย R และ C ขนานกัน 1 ชุดไม่สามารถใช้อธิบายพฤติกรรมของแบตเตอรี่ได้



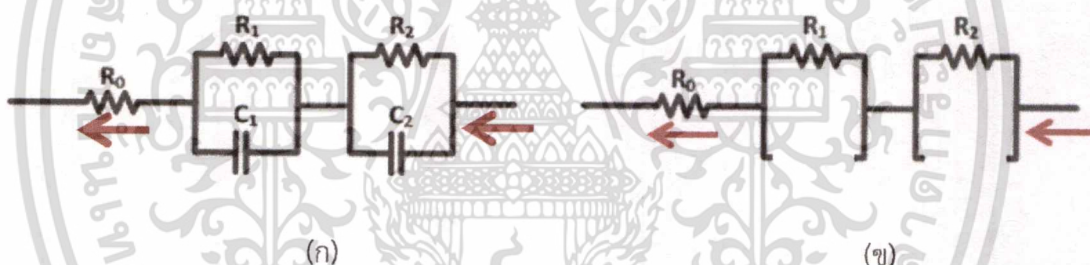
รูปที่ 4.4 การเปรียบเทียบระหว่างข้อมูลจากการทดลองและการ Simulation

4.2.2 การวิเคราะห์หาพารามิเตอร์

จากผลการทดลองดังที่ได้กล่าวมาในข้างต้นสามารถนำข้อมูลที่ได้ดังกล่าวมาใช้ในการหาค่าพารามิเตอร์ในวงจรสมมูลเบื้องต้นได้จากรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 แรงดันไฟฟ้าที่นำมาคำนวณหาค่าพารามิเตอร์



รูปที่ 4.6 ทิศทางการไหลของกระแสภายในวงจรสมมูล

(ก) ในช่วง dynamic (ข) ในช่วง steady state

- R_0 เป็นพารามิเตอร์ที่ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าตกทันทีทันใด ซึ่งสามารถหาได้จาก $R_0 = \frac{V_2 - V_3}{I}$
- $R_1 + R_2 = (R_0 + R_1 + R_2) - R_0$ ซึ่ง $R_0 + R_1 + R_2 = \frac{V_2 - V_1}{I}$ โดยจะมองว่าช่วง V_2 เป็นช่วงที่ C เปิดวงจร

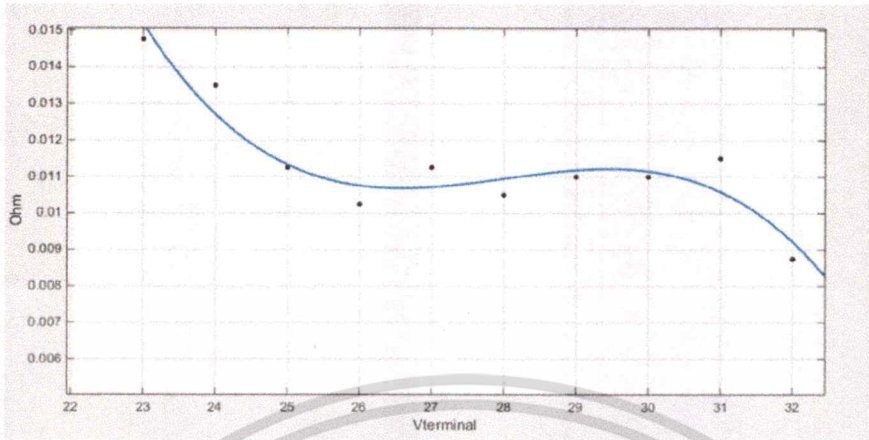
และเมื่อทำการทดลองแบบเดียวกันแต่ทำการปรับเปลี่ยนค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของแบตเตอรี่และนำผลการทดลองที่ได้มาทำการหาค่าพารามิเตอร์เช่นเดียวกันกับตัวอย่างจะได้ค่าของพารามิเตอร์ดังตารางที่ 4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

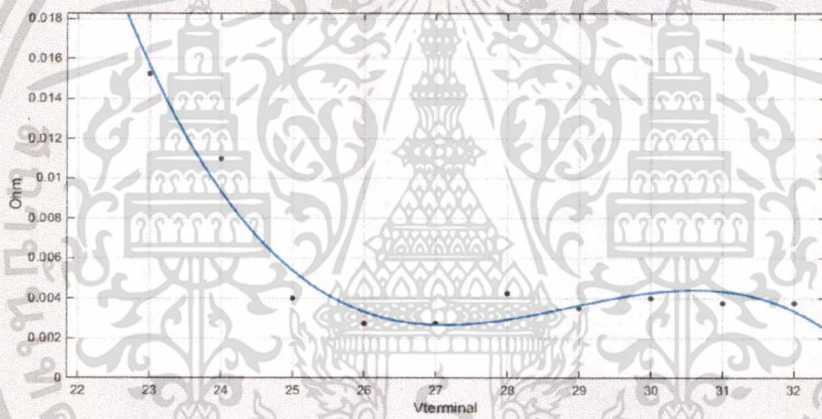
ตารางที่ 4.1 ขนาดแรงดันไฟฟ้ากับค่าพารามิเตอร์ต่างๆในวงจรสมมูล

V	R_0	R_1+R_2	Ratio $(R_1+R_2)/R_0$
23	0.0148	0.0153	1.034
24	0.0135	0.0110	0.815
25	0.0113	0.0040	0.356
26	0.0103	0.0028	0.268
27	0.0113	0.0028	0.244
28	0.0105	0.0043	0.405
29	0.0110	0.0035	0.318
30	0.0110	0.0040	0.364
31	0.0115	0.0035	0.304
32	0.0088	0.0027	0.303

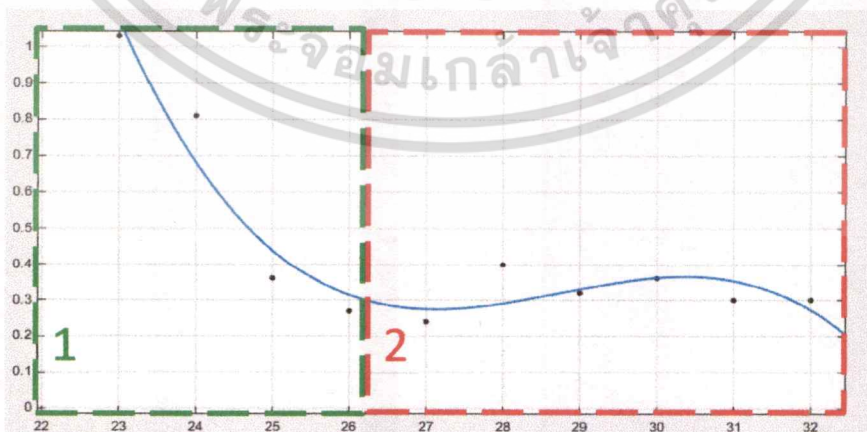
และเมื่อนำค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณได้ดังกล่าวมาทำการเขียนกราฟเพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของแบตเตอรี่กับค่าพารามิเตอร์นั้นๆ จะได้



รูปที่ 4.7 การเปรียบเทียบระหว่างค่าความต้านทาน R_0 กับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของแบตเตอรี่



รูปที่ 4.8 การเปรียบเทียบระหว่างค่าความต้านทาน R_1+R_2 กับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของแบตเตอรี่



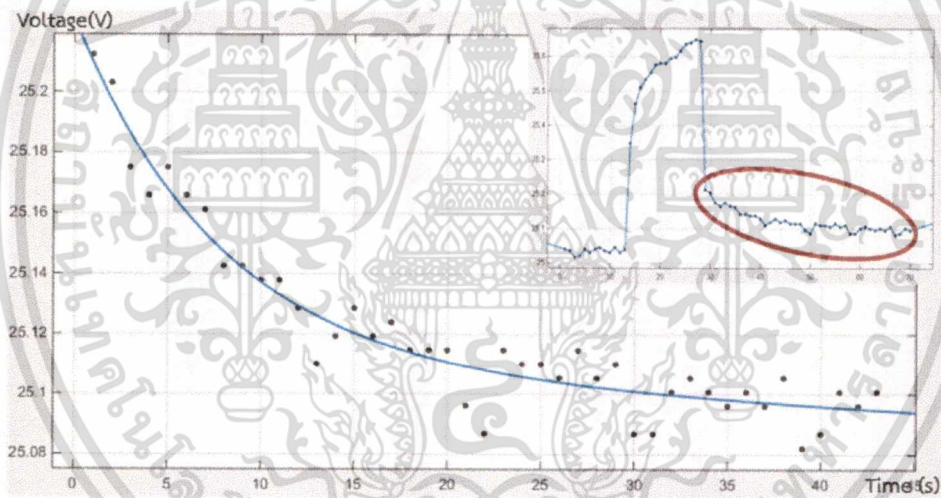
รูปที่ 4.9 การเปรียบเทียบระหว่างค่า R_1+R_2/R_0 กับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของแบตเตอรี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองหาค่าพารามิเตอร์ในแต่ละแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของแบตเตอรี่ข้างต้นจะเห็นว่า เมื่อแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของแบตเตอรี่มีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าพารามิเตอร์ R_0 และ R_1+R_2 จะมีค่าลดลงและเมื่อนำค่า R_1+R_2/R_0 มาพล็อตเปรียบเทียบความสัมพันธ์กับแรงดันที่ขั้วของแบตเตอรี่จะเห็นว่าในช่วงแรกนั้นอัตราส่วนลดลงเรื่อยๆ ส่วนช่วงที่สองนั้นค่าอัตราส่วนนั้นค่อนข้างคงที่อยู่ที่ประมาณ 0.3-0.4 เท่า

4.2.3 การทดลองหาค่าพารามิเตอร์ภายในแบตเตอรี่เมื่อค่ากระแสอัดประจุ (Charge) มีค่าเพิ่มขึ้น

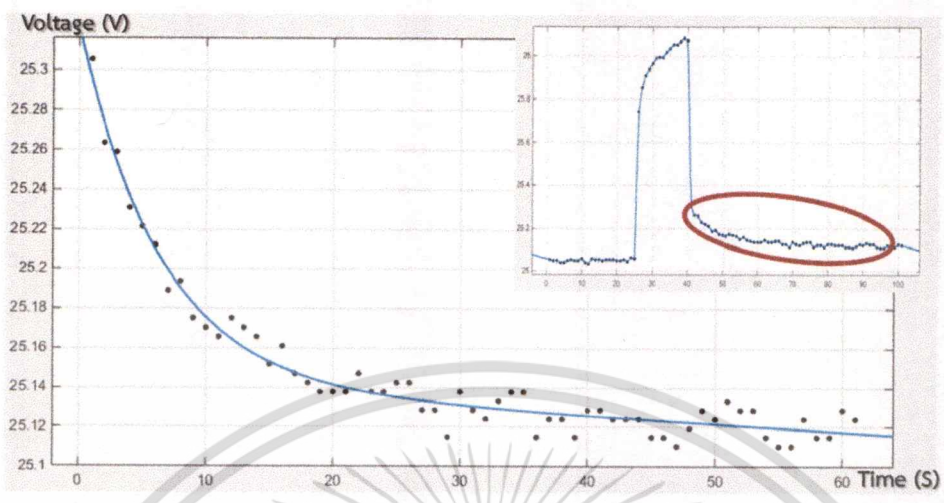
ทำการทดลองโดยการอัดประจุ (Charge) แบตเตอรี่ที่ค่ากระแสต่างๆ คือ 1C(40A), 2C(80A) และ 3C(120A) ที่แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่เท่ากันและนำข้อมูลที่ได้ไปทำการ Curve fitting แบบฟังก์ชันเอ็กซ์โพเนนเชียล 2 พจน์ แล้วทำการหาค่าพารามิเตอร์ภายใน



รูปที่ 4.10 แรงดันของแบตเตอรี่ที่กระแสการอัดประจุ 1C (40 A)

เมื่อทำการ Curve fitting ข้อมูลจากรูปที่ 4.10 จะได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของแบตเตอรี่กับเวลาดังสมการ

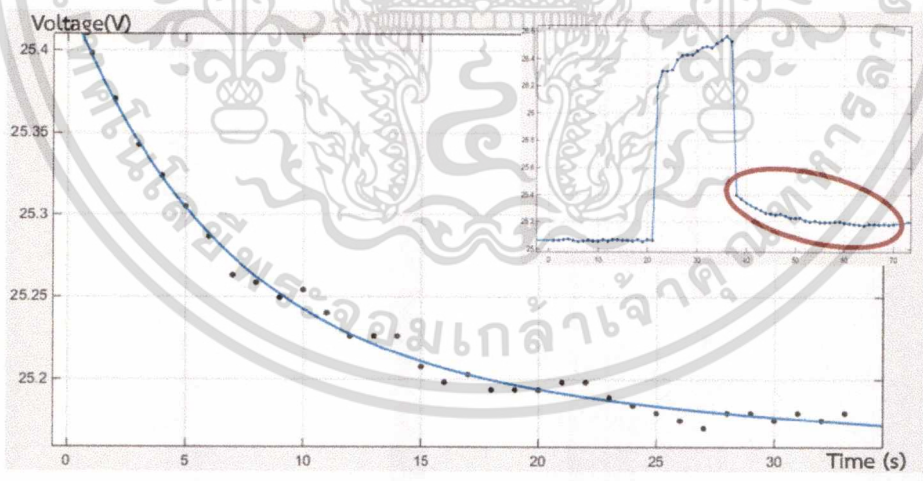
$$V(t) = 0.1286e^{(-0.1452)t} + 25.06e^{-(1.465 \times 10^{-5})t} \quad 4.1$$



รูปที่ 4.11 แรงดันของแบตเตอรี่ที่กระแสการอัดประจุ 2C (80 A)

เมื่อทำการ Curve fitting ข้อมูลจากรูปที่ 4.11 จะได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของแบตเตอรี่กับเวลาดังสมการ

$$V(t) = 0.1819e^{(-0.1479)t} + 25.14e^{-(1.275 \times 10^{-5})t} \quad 4.2$$



รูปที่ 4.12 แรงดันของแบตเตอรี่ที่กระแสการอัดประจุ 3C (120 A)

เมื่อทำการ Curve fitting ข้อมูลจากรูปที่ 4.12 จะได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของแบตเตอรี่กับเวลาดังสมการ

$$V(t) = 0.233e^{(-0.1477)t} + 25.2e^{-(2.988 \times 10^{-5})t} \quad 4.3$$

ตารางที่ 4.2 ค่าพารามิเตอร์ภายในแบตเตอรี่ที่กระแสอัดประจุที่ 1C , 2C และ 3C

Charge	Time constant (S)		R (mΩ)	
	τ_1	τ_2	R_0	R_1+R_2
1C	6.88	80,321	9.75	4.50
2C	6.76	78,431	9.63	2.99
3C	6.77	33,467	9.42	2.83

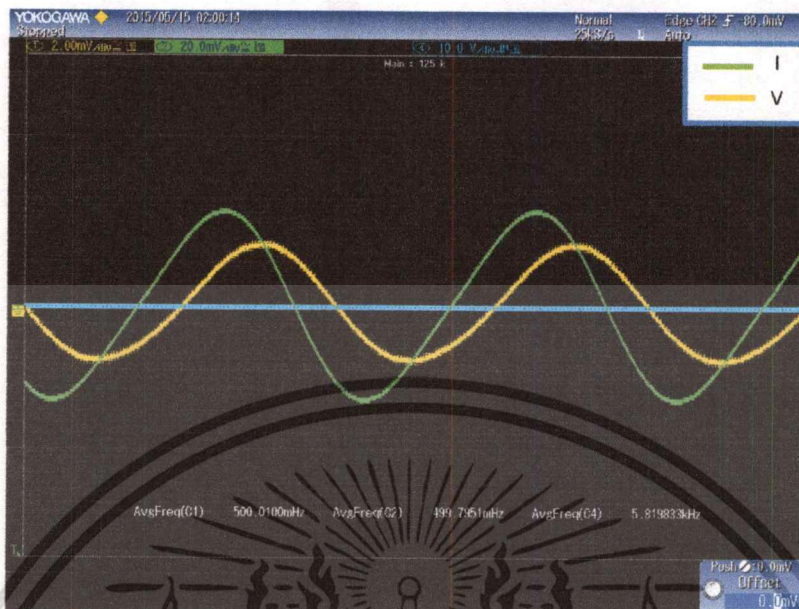
จากผลการทดลองพบว่าที่การอัดประจุที่กระแสต่างๆ ค่าคงที่เวลาหนึ่ง (Time constant: τ_1) จะค่อนข้างคงที่ไม่ได้แปรผันตามกระแสที่เพิ่ม ส่วนค่าคงที่เวลาสอง (Time constant: τ_2) นั้นมีค่าลดลงเมื่อค่ากระแสการอัดประจุเพิ่มขึ้นส่วนค่า R_0 และ R_1+R_2 มีค่าลดลงเมื่อกระแสการอัดประจุเพิ่มขึ้น

4.3 การทดลองหาวงจรมุมและค่าพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนด้วยการวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงความถี่ (Frequency Domain)

4.3.1 การทดลองหาวงจรมุม

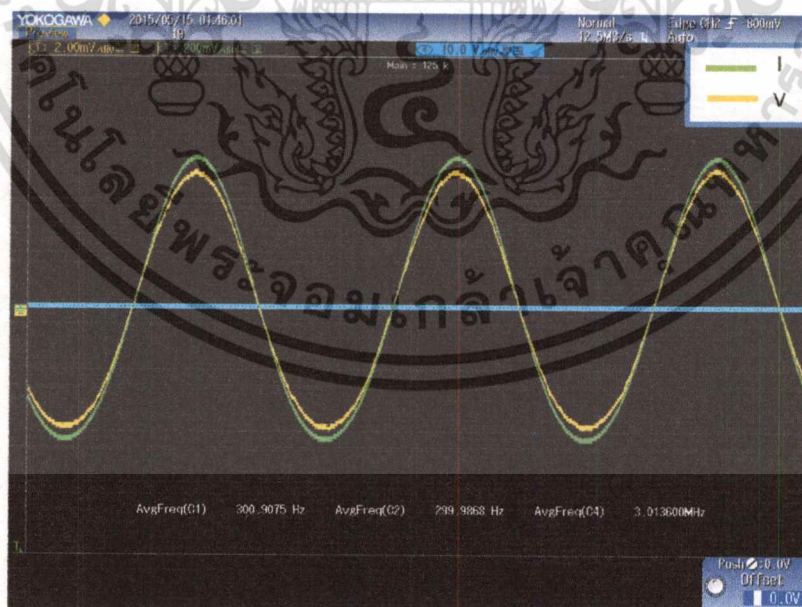
ทำการทดลองอัดประจุแบตเตอรี่ด้วยการจ่ายสัญญาณไซน์ให้กับวงจรดังรูปที่ 3.8 และทำการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ตั้งแต่ 20mHz ถึง 1kHz ไปเรื่อยๆแล้วทำการวัดสัญญาณรูปคลื่นแรงดันคร่อมตัวต้านทาน R_i และวัดสัญญาณรูปคลื่นแรงดันคร่อมแบตเตอรี่ เพื่อนำมาคำนวณหาค่าความต่างเฟสและค่าอิมพีแดนซ์ภายในของแบตเตอรี่ในแต่ละความถี่ที่ได้ทำการวัด จะได้สัญญาณรูปคลื่นแรงดันคร่อมตัวต้านทาน R_i และสัญญาณรูปคลื่นแรงดันคร่อมแบตเตอรี่ที่มีลักษณะเป็นรูปคลื่นไซน์และมีมุมเฟสต่างๆกันในแต่ละความถี่ดังนี้

- กรณีที่สัญญาณรูปคลื่นแรงดันคร่อมตัวต้านทาน R_i มีเฟสนำหน้าสัญญาณรูปคลื่นแรงดันคร่อมแบตเตอรี่



รูปที่ 4.13 สัญญาณรูปคลื่นแรงดันคร่อมตัวต้านทาน R_1 และ สัญญาณรูปคลื่นแรงดันคร่อมแบตเตอรี่ที่ความถี่ 500mHz

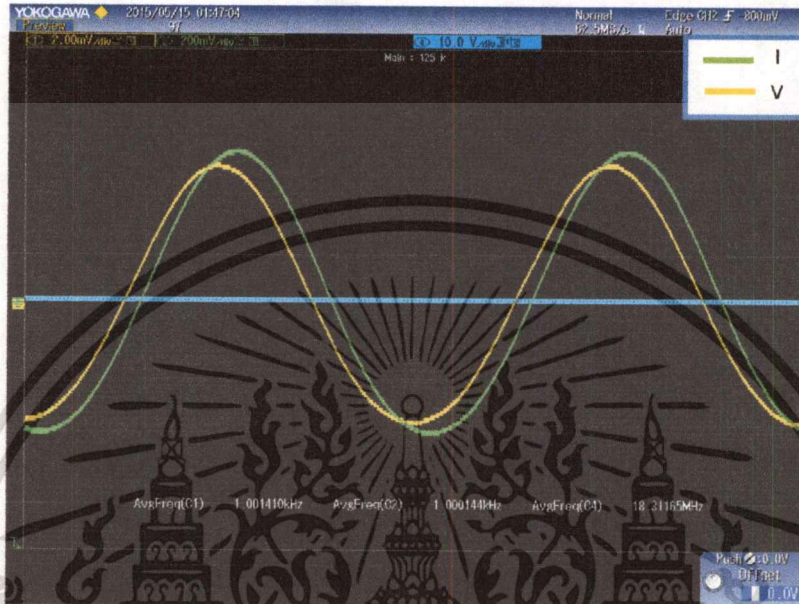
- กรณีที่สัญญาณรูปคลื่นแรงดันคร่อมตัวต้านทาน R_1 มีเฟสตรงกันกับสัญญาณรูปคลื่นแรงดันคร่อมแบตเตอรี่



รูปที่ 4.14 สัญญาณรูปคลื่นแรงดันคร่อมตัวต้านทาน R_1 และ สัญญาณรูปคลื่นแรงดันคร่อมแบตเตอรี่ที่ความถี่ 300Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- กรณีที่สัญญาณรูปคลื่นแรงดันคร่อมตัวต้านทาน R_1 มีเฟสล่าหลังสัญญาณรูปคลื่นแรงดันคร่อมแบตเตอรี่

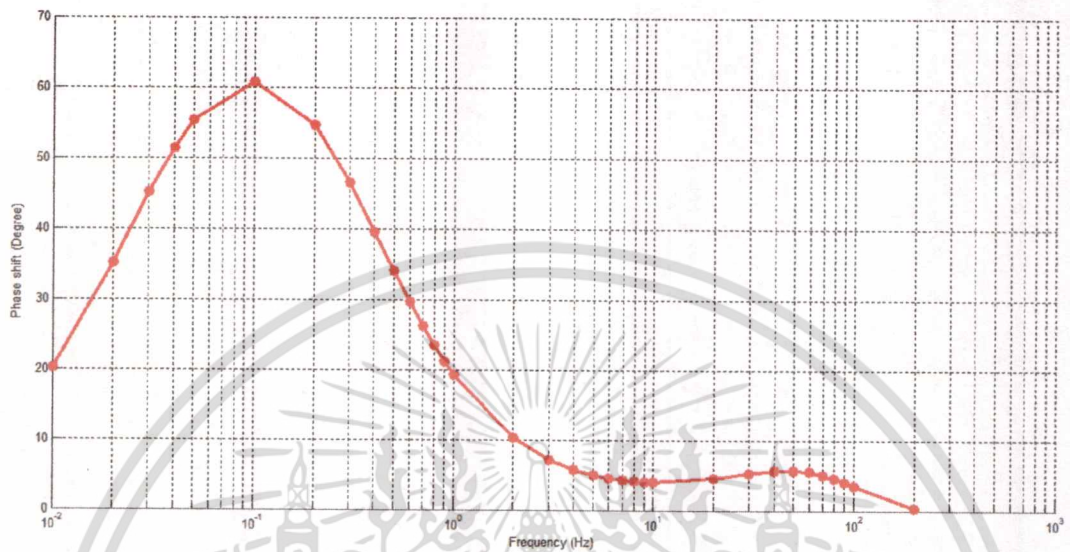


รูปที่ 4.15 สัญญาณรูปคลื่นแรงดันคร่อมตัวต้านทาน R_1 และสัญญาณรูปคลื่นแรงดันคร่อมแบตเตอรี่ที่ความถี่ 1kHz

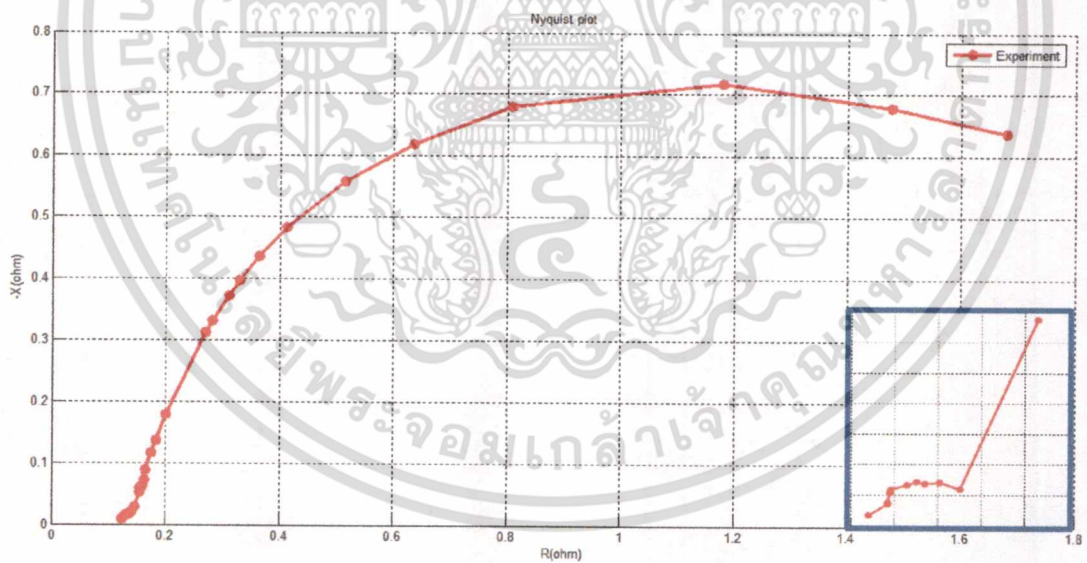
จากรูปสัญญาณที่วัดได้จากการทดลอง สามารถนำมาคำนวณหาค่าความต่างเฟสและค่าอิมพีแดนซ์ภายในของแบตเตอรี่ในแต่ละความถี่ที่ได้ทำการวัดตั้งสมการที่ 3.1 และ 3.2 พบว่าในช่วงความถี่ต่ำจะมีความต่างเฟสสูงโดยอยู่ในกรณีที่สัญญาณกระแสมีเฟสนำหน้าสัญญาณแรงดันและเมื่อความถี่เพิ่มสูงขึ้น ความต่างเฟสจะมีค่าลดลงเรื่อยๆจนมีค่าคงที่ที่ศูนย์ซึ่งเป็นกรณีที่สัญญาณกระแสและสัญญาณแรงดันมีเฟสตรงกัน จนกระทั่งสัญญาณกระแสมีเฟสล่าหลังสัญญาณแรงดัน ความต่างเฟสจะมีค่าลดลงจนติดลบ จากนั้นนำข้อมูลที่ได้ไปเขียนกราฟ Nyquist Plot และได้ทำตามขั้นตอนข้างต้นนี้กับแบตเตอรี่ลิเทียม-ไอออนจำนวน 4 ก้อน ซึ่งจะได้รูปกราฟดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- แบตเตอรี่ลิเทียม-ไอออน A0293



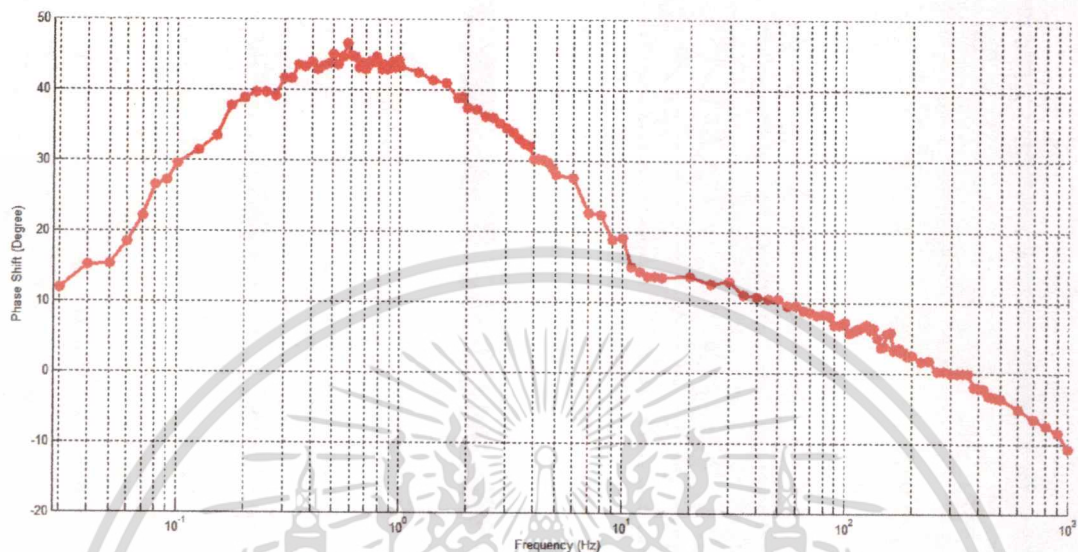
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ของความต่างเฟสกับความถี่ของแบตเตอรี่ A0293



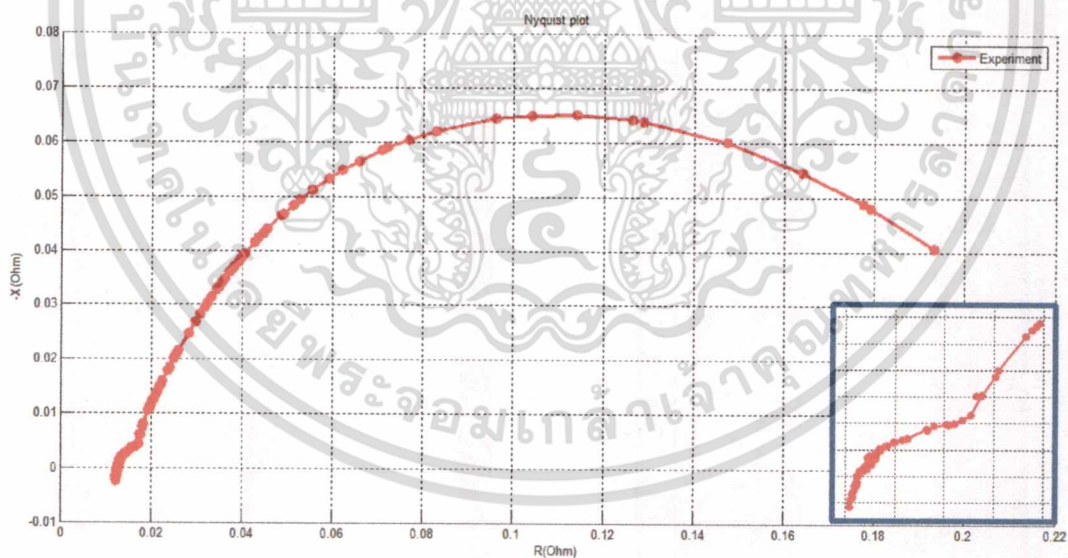
รูปที่ 4.17 Nyquist Plot จากการทดลองของแบตเตอรี่ A0293

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- แบตเตอรี่ลิเทียม-ไอออน A123 (NO) 0V



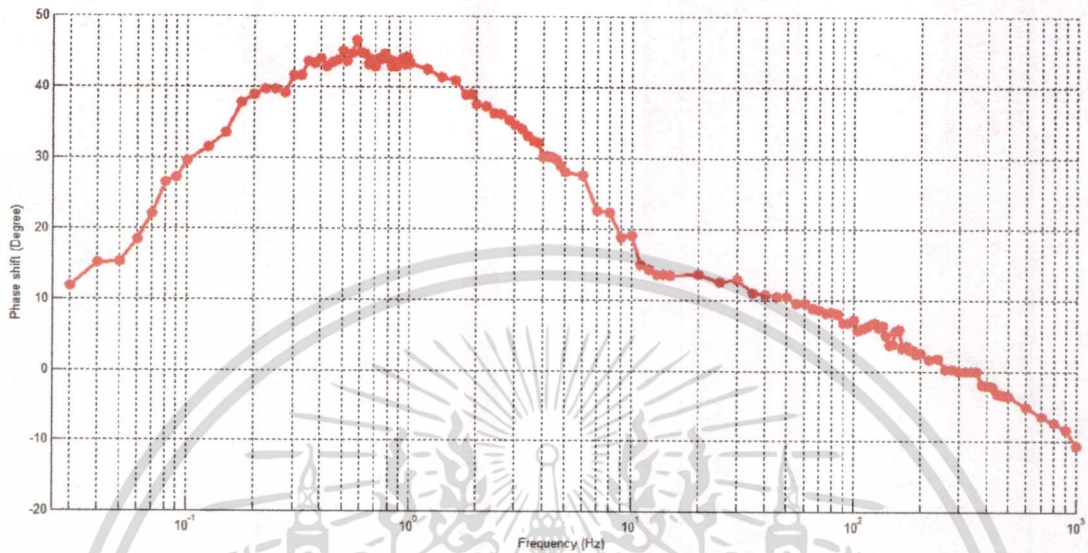
รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ของความต่างเฟสกับความถี่ของแบตเตอรี่ A123 (NO) 0V



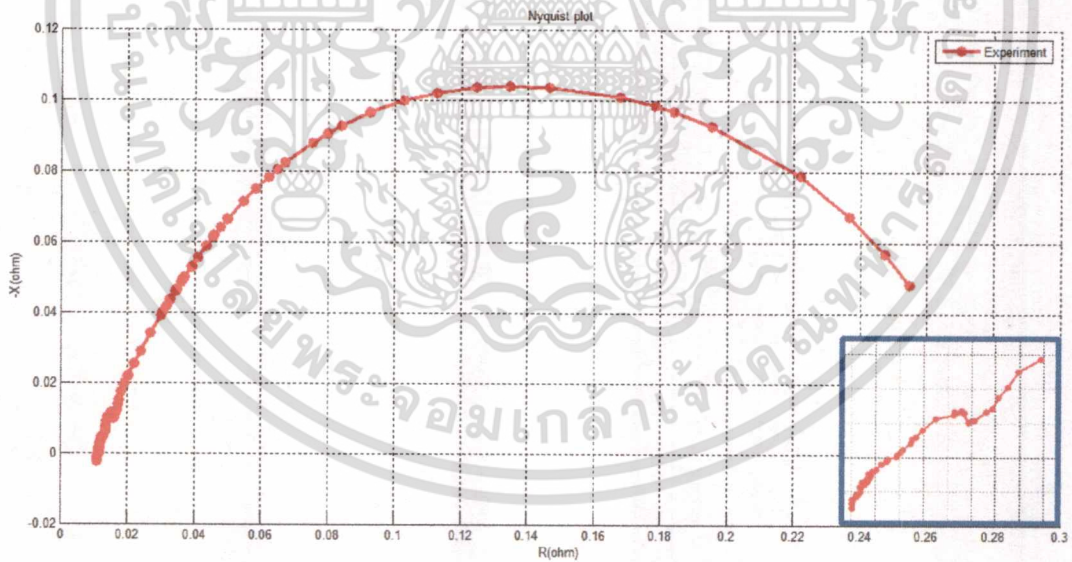
รูปที่ 4.19 Nyquist Plot จากการทดลองของแบตเตอรี่ A123 (NO) 0V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- แบตเตอรี่ลิเทียม-ไอออน A123 (N1) 0V



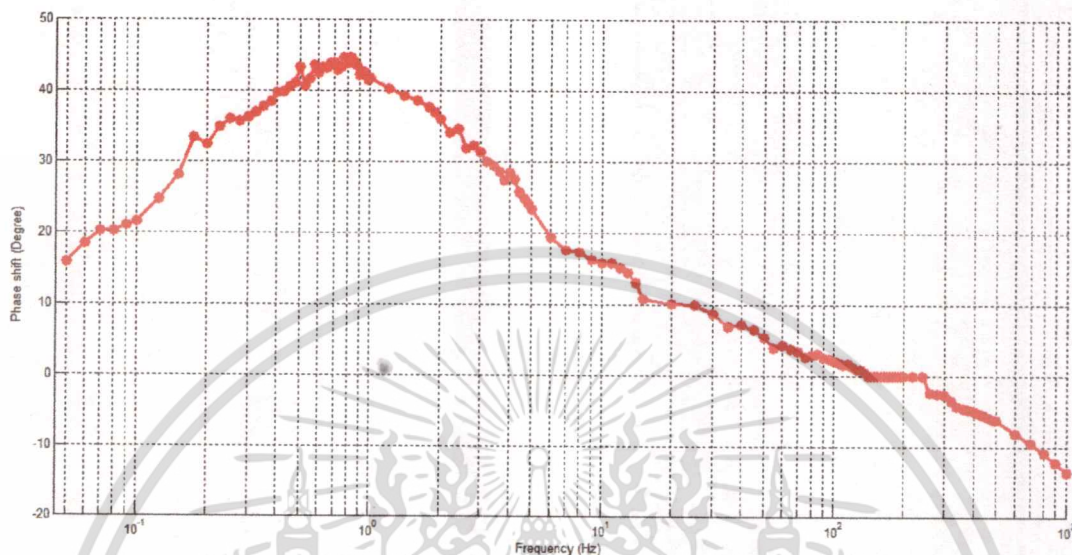
รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ของความต่างเฟสกับความถี่ของแบตเตอรี่ A123 (N1) 0V



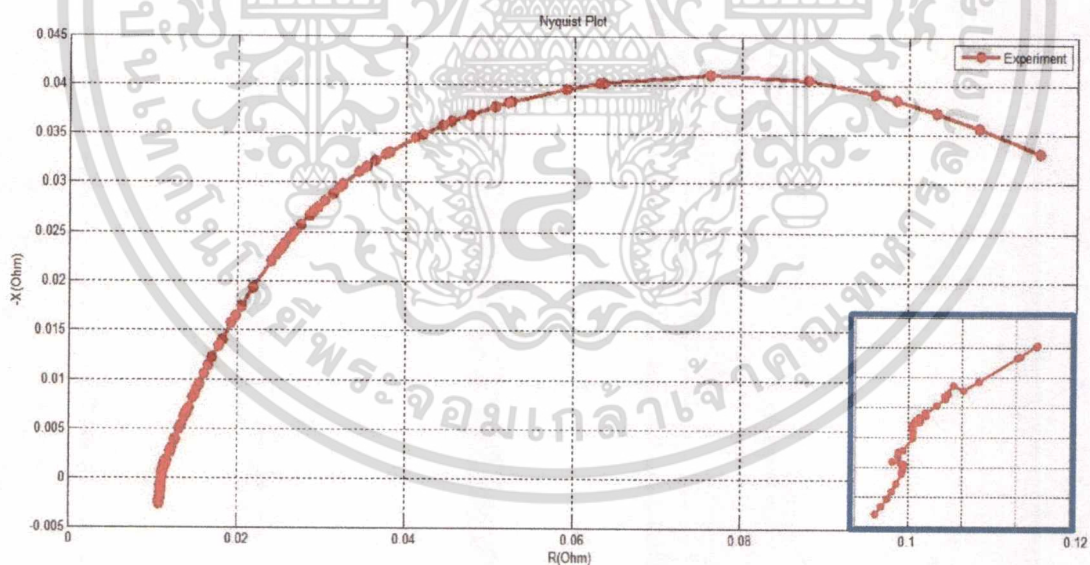
รูปที่ 4.21 Nyquist Plot จากการทดลองของแบตเตอรี่ A123 (N1) 0V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- แบตเตอรี่ชนิด A123 (N2) 0V



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ของความต่างเฟสกับความถี่ของแบตเตอรี่ A123 (N2) 0V

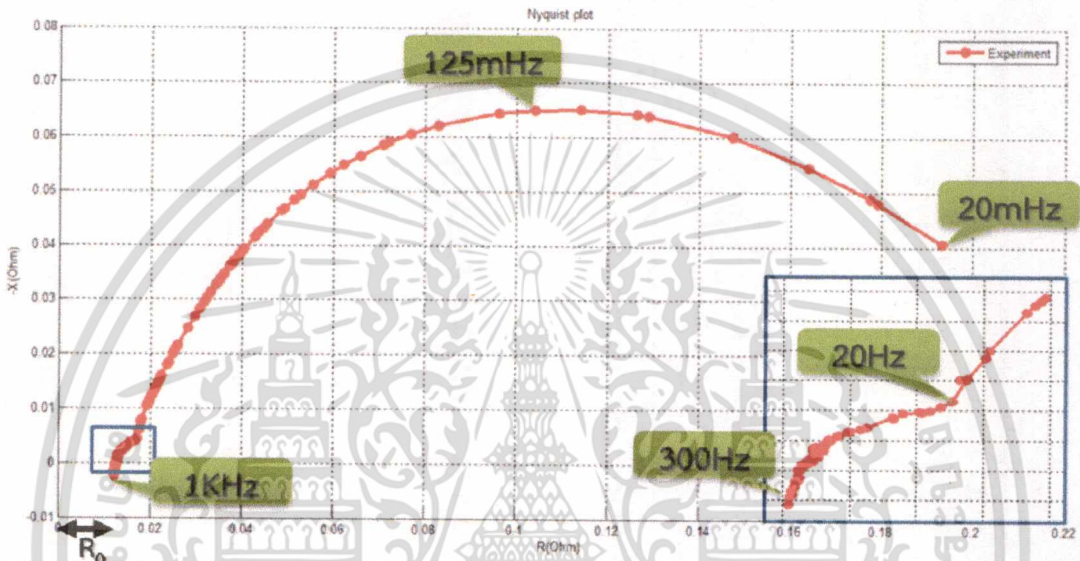


รูปที่ 4.23 Nyquist Plot จากการทดลองของแบตเตอรี่ A123 (N2) 0V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 การวิเคราะห์และหาค่าพารามิเตอร์ในวงจรสมมูลจากการวิเคราะห์ด้วยผลตอบสนองเชิงความถี่

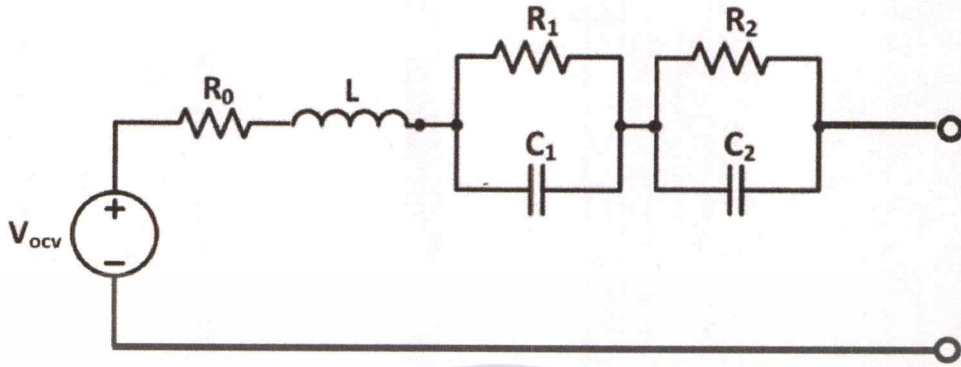
จากผลการทดลองของแบตเตอรี่ A123 (N0) 0V จะได้ Nyquist Plot ดังรูปที่ 4.19 ซึ่งจะนำมาวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่ได้ดังนี้



รูปที่ 4.24 Nyquist Plot จากผลการทดลองของแบตเตอรี่ A123 (N0) 0V

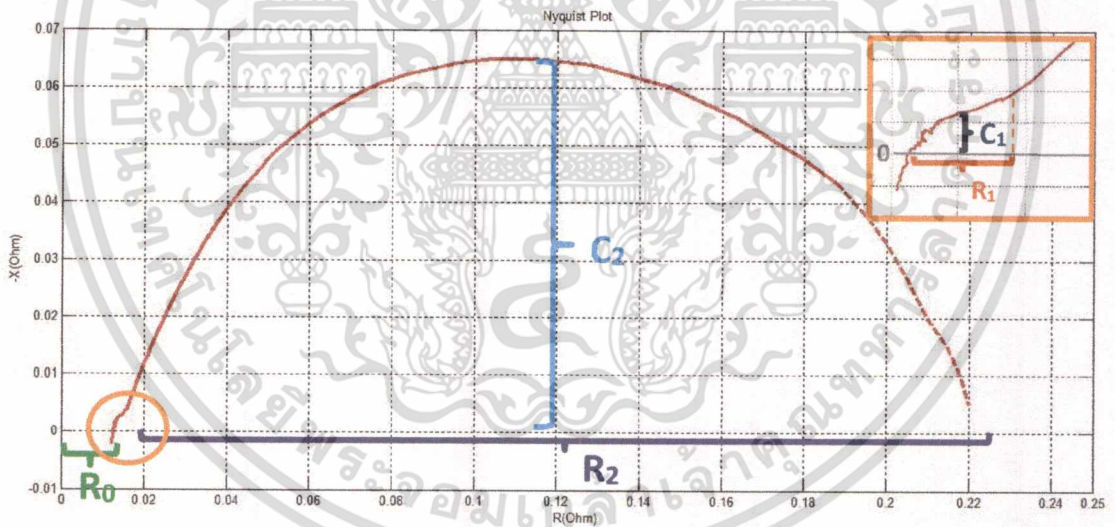
จากหัวข้อที่ 2.4.2 รูปครึ่งวงกลมจะแสดงถึงวงจรที่มีความต้านทาน (R) ต่อขนานกับตัวเก็บประจุ (C) หรือวงจรที่มีค่าคงที่เวลา (Time constant) หนึ่งค่าดังรูปที่ 2.10 จากรูปที่ 4.24 จะพบว่ามีลักษณะเป็นรูปครึ่งวงกลม 2 รูป จึงนำมาวิเคราะห์ได้ดังนี้

- รูปครึ่งวงกลมใหญ่จะเกิดขึ้นในช่วงความถี่ต่ำ 20mHz - 20Hz ซึ่งเป็นผลของ R_2 และ C_2
- รูปครึ่งวงกลมรูปเล็กจะเกิดขึ้นในช่วงความถี่สูง 20Hz - 300Hz ซึ่งเป็นผลของ R_1 และ C_1
- จุดตัดแกน R (จุดที่ $-X = 0$) ที่ความถี่ 300Hz แสดงถึงพารามิเตอร์ R_0
- ในส่วนค่าของแกน $-X$ ที่มีค่าติดลบในช่วงความถี่ 400Hz - 1KHz จะเป็นผลตัวเหนี่ยวนำ (L)
- จากลักษณะที่วิเคราะห์มาเบื้องต้น จะได้วงจรสมมูลของแบตเตอรี่ลิเทียม-ไอออน A123 (N0) 0V มีลักษณะดังรูปที่ 4.25



รูปที่ 4.25 วงจรสมมูลของแบตเตอรี่ลิเทียม-ไอออน A123 (NO) 0V
ที่วิเคราะห์ได้จาก Nyquist Plot ของผลการทดลอง

การหาค่าพารามิเตอร์ในวงจรสมมูลจากการวิเคราะห์ด้วยผลตอบสนองเชิงความถี่
จากกราฟ Nyquist Plot สามารถอ่านค่าจากกราฟได้โดยตรง ดังรูปที่ 4.26



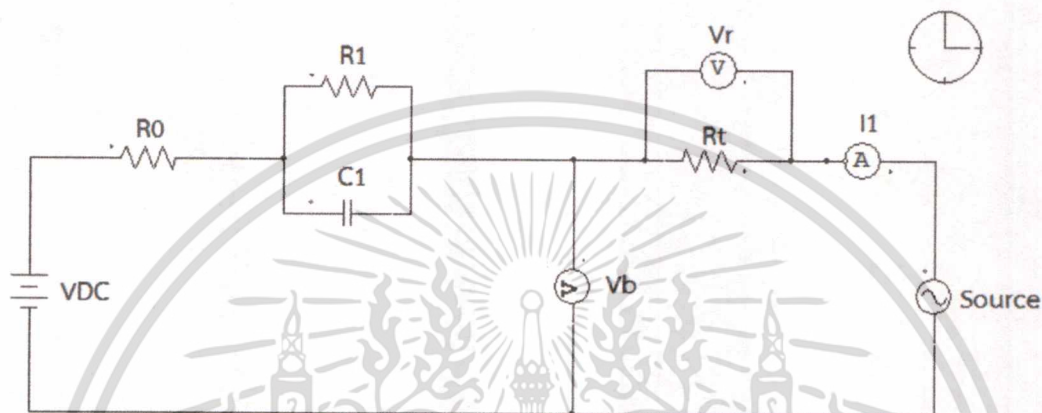
รูปที่ 4.26 การอ่านค่าพารามิเตอร์จาก Nyquist Plot ของแบตเตอรี่ A123 (NO) 0V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 ผลการ Simulation วงจรสมมูลจากโปรแกรม PSIM

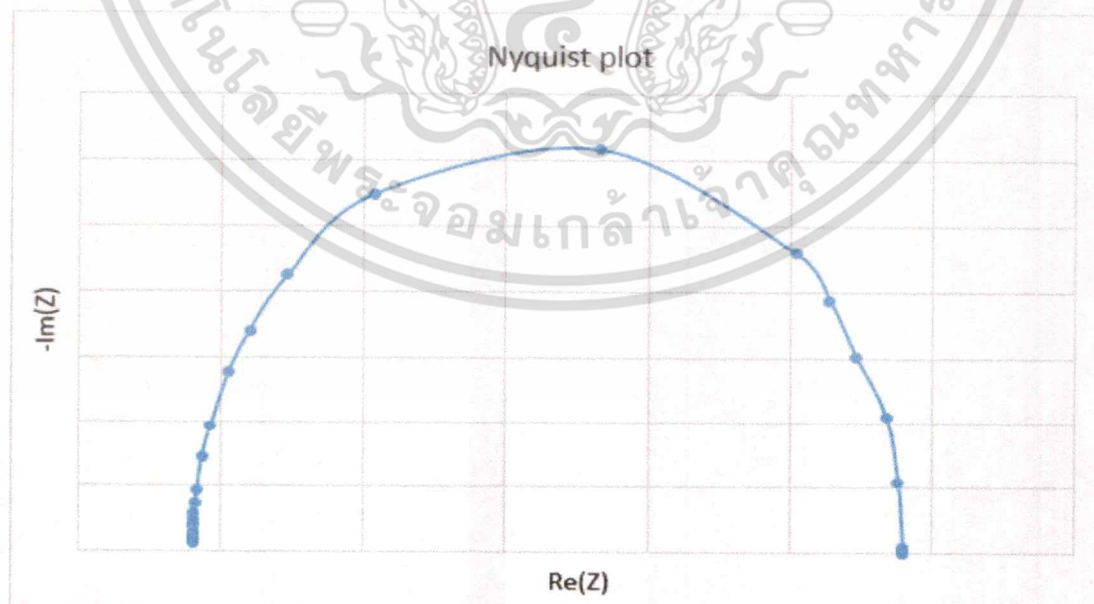
ทำการจำลองวงจรสมมูลของแบตเตอรี่แบบต่างๆ ในโปรแกรม PSIM เพื่อหา Nyquist Plot ของวงจรสมมูลแต่ละแบบ

4.4.1 One-RC Branch Equivalent



รูปที่ 4.27 วงจรสมมูลแบบ One-RC Branch Equivalent ในโปรแกรม PSIM

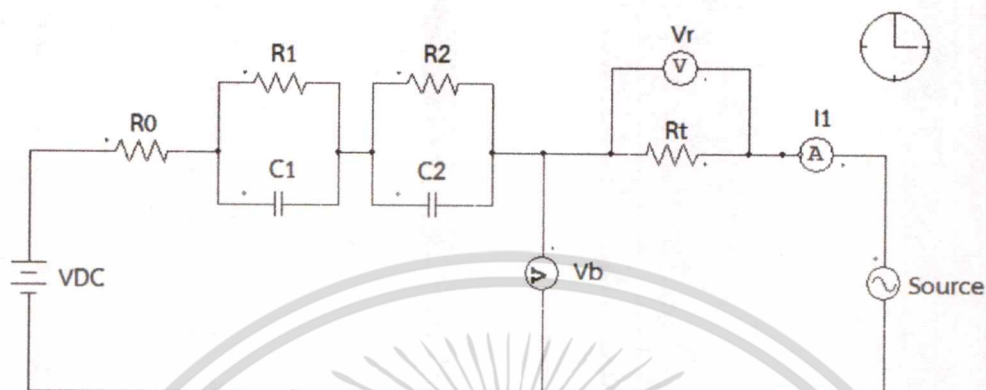
จากการ Simulation วงจรสมมูลแบบ One-RC Branch Equivalent ในโปรแกรม PSIM ดังรูปที่ 4.27 และนำไปเขียนกราฟ Nyquist Plot จะมีลักษณะดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.28 Nyquist Plot ของวงจร One-RC Branch Equivalent ในโปรแกรม PSIM

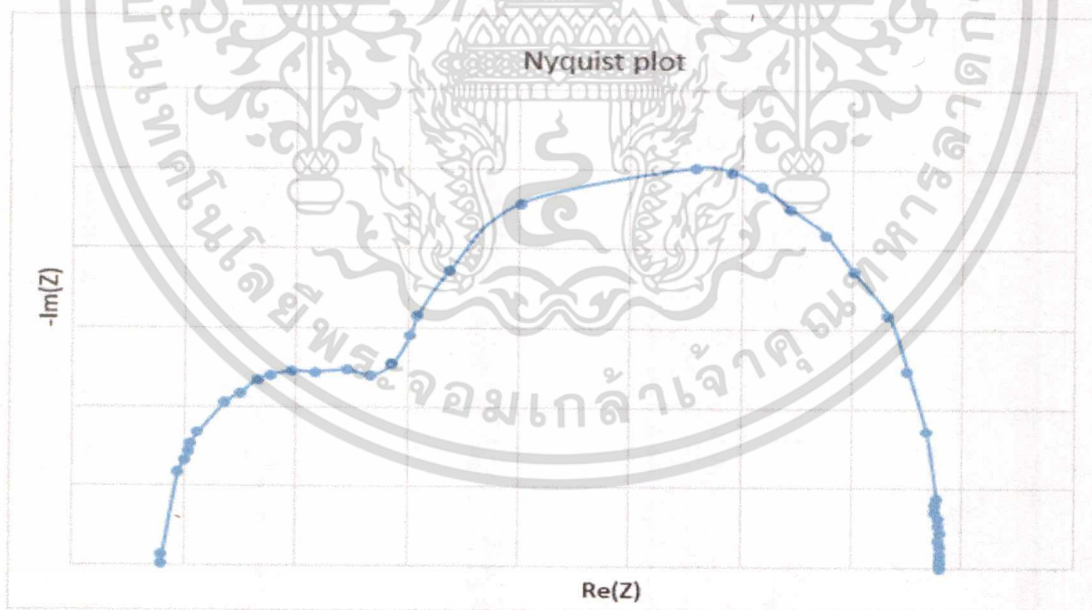
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.2 Two-RC Branch Equivalent



รูปที่ 4.29 วงจรสมมูลแบบ Two-RC Branch Equivalent ในโปรแกรม PSIM

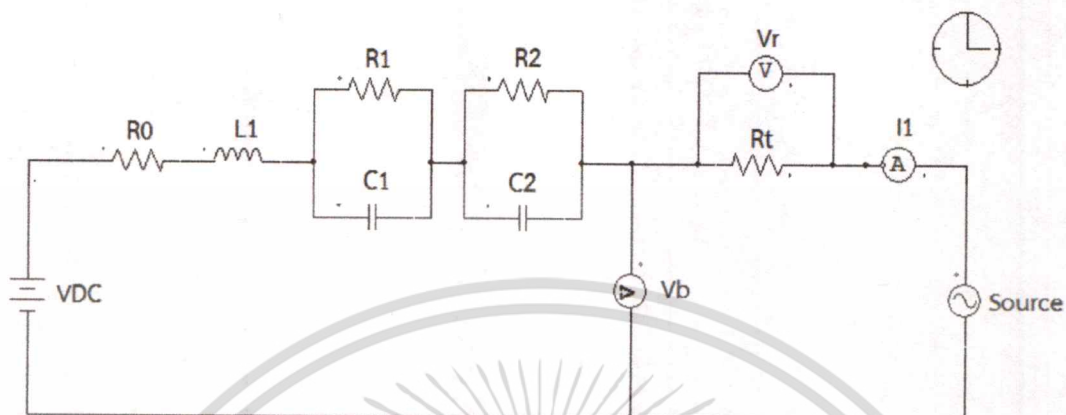
จากการ Simulation วงจรสมมูลแบบ Two-RC Branch Equivalent ในโปรแกรม PSIM ดังรูปที่ 4.29 และนำไปเขียนกราฟ Nyquist Plot จะมีลักษณะดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.30 Nyquist Plot ของวงจร Two-RC Branch Equivalent ในโปรแกรม PSIM

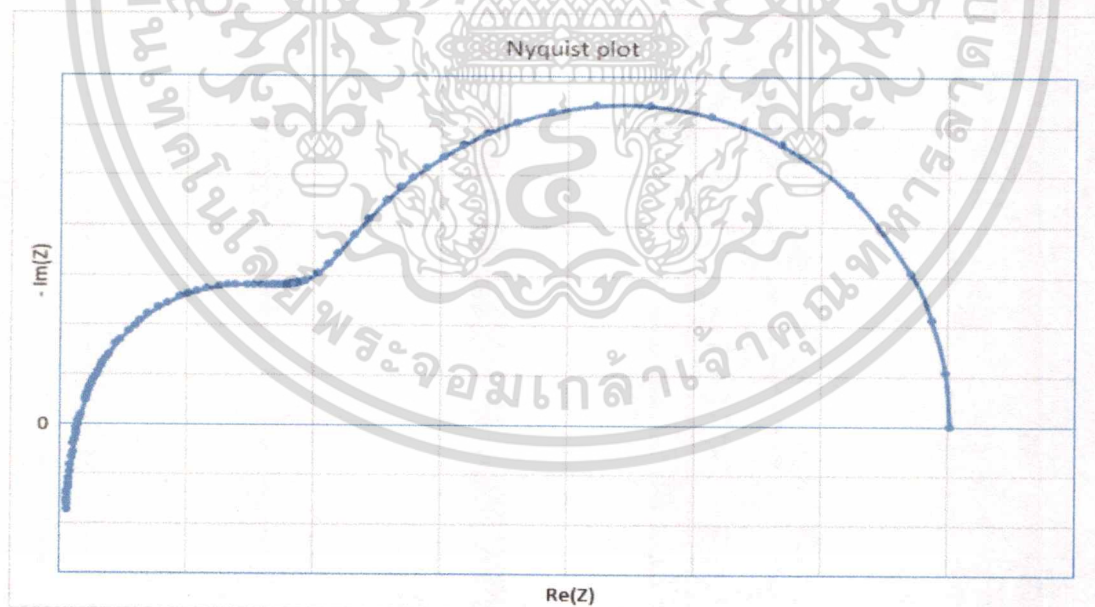
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.3 Two-RC-L Branch Equivalent



รูปที่ 4.31 วงจรสมมูลแบบ Two-RC-L Branch Equivalent ในโปรแกรม PSIM

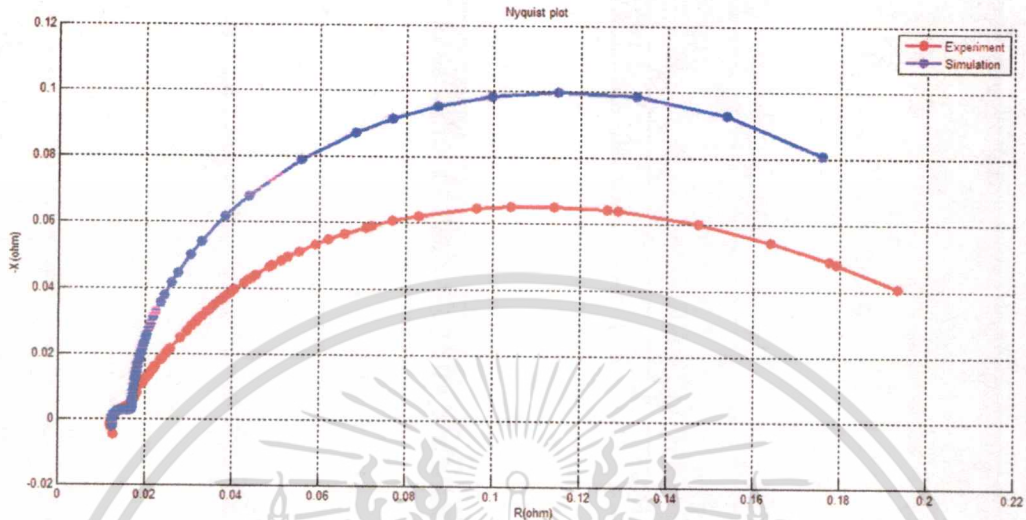
จากการ Simulation วงจรสมมูลแบบ Two-RC-L Branch Equivalent ในโปรแกรม PSIM ดังรูปที่ 4.31 และนำไปเขียนกราฟ Nyquist Plot จะมีลักษณะดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.32 Nyquist Plot ของวงจร Two-RC-L Branch Equivalent ในโปรแกรม PSIM

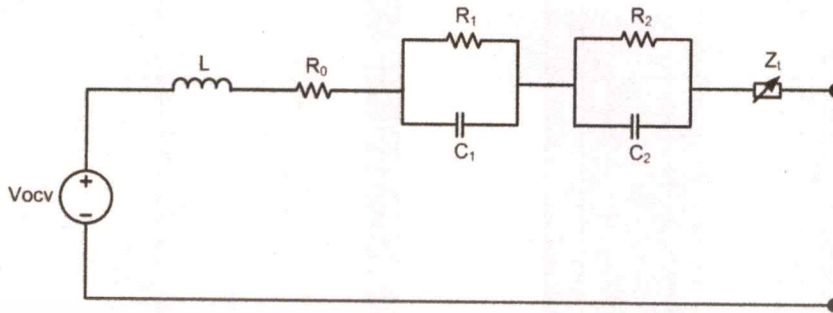
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 เปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการ Simulation วงจรสมมูลจากโปรแกรม PSIM



รูปที่ 4.33 เปรียบเทียบผลการทดลองจริงกับผลการ Simulation วงจรสมมูลแบบ Two-RC-L Branch Equivalent ของแบตเตอรี่ A123 (N0) 0V

จากรูปที่ 4.33 เส้นสีแดงเป็นค่าจากการทดลองจริงของแบตเตอรี่ A123 (N0) 0V ส่วนสีน้ำเงินเป็นค่าจากการ Simulation วงจรสมมูลแบบ Two-RC-L Branch Equivalent ด้วยโปรแกรม PSIM ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่นำมาทำการ Simulation สามารถอ่านได้จาก Nyquist Plot ของผลการทดลองจริงในหัวข้อที่ 4.3.2 และรูปที่ 4.26 จะพบว่าผลการ Simulation วงจรสมมูลแบบ Two-RC-L Branch Equivalent มีลักษณะรูปกราฟคล้ายคลึงกับผลการทดลองจริง แต่ค่าในแต่ละความถี่มีความคลาดเคลื่อนไปจากผลการทดลองจริง ซึ่งเหตุนี้ทำให้ทราบว่า วงจรสมมูลของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียม-ไอออนไม่เป็นไปตามวงจรสมมูลทั้ง 3 แบบที่ได้ทำการ Simulation แต่มีลักษณะคล้ายคลึงกับวงจรสมมูลแบบ Two-RC-L Branch Equivalent มากที่สุด จึงสามารถสรุปได้ว่า แบตเตอรี่ชนิดลิเทียม-ไอออนมีวงจรสมมูลแบบ Two-RC-L Branch Equivalent ที่มีอิมพีแดนซ์ตัวอื่นต่ออนุกรมอยู่ด้วยและอิมพีแดนซ์ตัวนี้เป็นสาเหตุที่มีผลทำให้ค่าจากการ Simulation มีความคลาดเคลื่อนไปจากค่าจากการทดลองจริง โดยเป็นวงจรสมมูลที่มีลักษณะดังรูปที่ 4.34



รูปที่ 4.34 วงจรสมมูลที่ได้จากการทดลอง

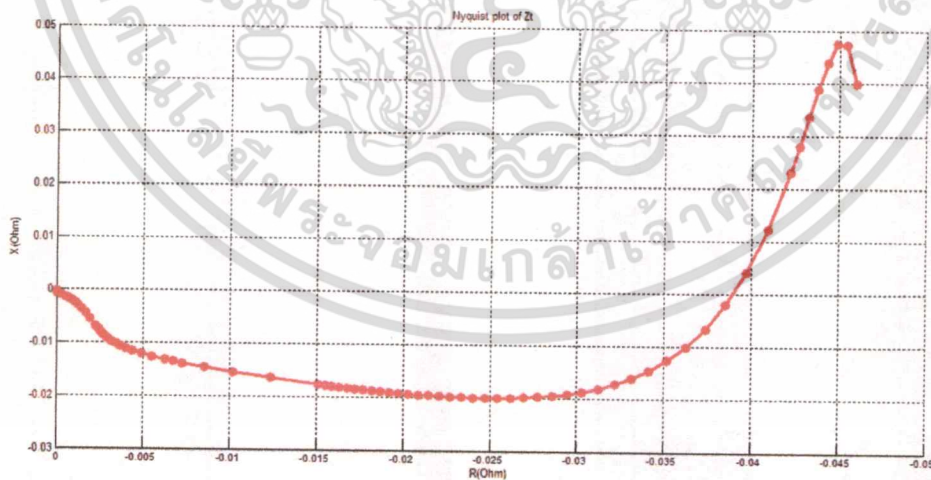
โดย Z_t คืออิมพีแดนซ์ที่อยู่ในฟังก์ชันของความถี่และต่ออนุกรมกับวงจรสมมูลแบบ Two-RC-L Branch Equivalent แล้วทำให้ได้ผลการ Simulation มีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองมากขึ้น ดังรูปที่ 4.36 ซึ่ง Z_t สามารถหาค่าได้จากสมการต่อไปนี้

$$Z_t = -(R_t + jX_t) \quad 4.4$$

$$R_t = (-0.004411)e^{(-0.1389)f} + (-0.04333)e^{(-1.347)f} \quad 4.5$$

$$X_t = \frac{(-0.0002722)f^5 + (-0.008791)f^4 + (-0.004426)f^3 + (-0.6744)f^2 + (0.1221)f + (-0.00171)}{f^5 + (-5.497)f^4 + (27.43)f^3 + (8.828)f^2 + (0.3291)f + (0.01523)} \quad 4.6$$

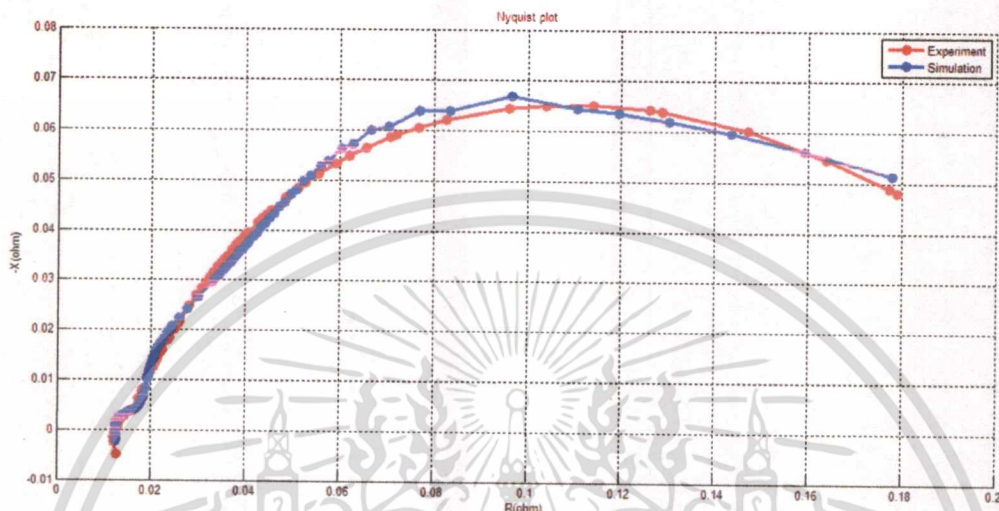
จากสมการข้างต้น อิมพีแดนซ์ที่อยู่ในฟังก์ชันของความถี่ (Z_t) จะสามารถเขียนกราฟ Nyquist Plot ได้ดังนี้



รูปที่ 4.35 Nyquist Plot ของอิมพีแดนซ์ในฟังก์ชันของความถี่ (Z_t)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการรวมกราฟ Nyquist Plot ของ Z_c กับผล Simulation ของวงจรสมมูลแบบ Two-RC-L Branch Equivalent จะได้เส้นกราฟสีน้ำเงินที่มีค่าใกล้เคียงกับเส้นกราฟสีแดงที่เป็นผลการทดลองจริงในรูปที่ 4.36



รูปที่ 4.36 เปรียบเทียบผลการทดลองจริงกับผลการ Simulation วงจรสมมูลแบบ Two-RC-L Branch Equivalent ที่มี Z_c ต่ออนุกรมอยู่ของแบตเตอรี่ A123 (N0) 0V

4.6 สรุป

ผลการทดลองของปริณญาณิพนธ์นี้ประกอบด้วยผลการทดลองจากวิธีการวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงเวลา (Time domain) และการวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงความถี่ (Frequency domain) โดยการทดลองทางจรสมมูลและพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนในโดเมนของเวลา (Time domain) พบว่าวงจรสมมูลของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนมีลักษณะเป็นแบบ Two – RC Branch Equivalent โดยค่าพารามิเตอร์ R_0 และ R_1+R_2 จะแปรผกผันแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่ และสำหรับการวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงความถี่ (Frequency domain) จะสามารถอ่านค่าพารามิเตอร์ได้จากกราฟ Nyquist Plot โดยตรง และเมื่อนำผลการทดลองเปรียบเทียบกับผลการ Simulation จากโปรแกรม PSIM แล้วพบว่า แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนมีวงจรสมมูลแบบ Two – RC-L Branch Equivalent ที่มี Z_c ต่ออนุกรมอยู่ด้วย

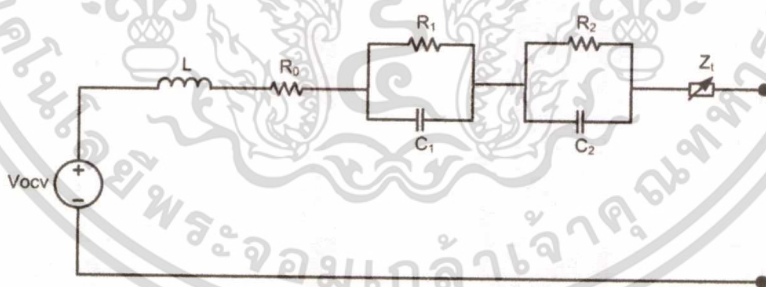
บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอเทคนิคในการหาพารามิเตอร์ของแบบเตอรีชนิดลิเทียมไอออน โดยแบ่งการทดลองเป็น การทดลองเพื่อดูผลตอบสนองทางเวลา (Time domain) และ การทดลองเพื่อดูผลตอบสนองเชิงความถี่ (Frequency domain) จากผลการทดลองในส่วนของผลตอบสนองทางเวลาทำให้ทราบว่าพารามิเตอร์ของแบบเตอรีชนิดลิเทียมไอออนนั้น จะประกอบไปด้วยตัวต้านทานขนานกับตัวเก็บประจุที่ต่ออนุกรมกัน 2 ชุด หรืออาจพิจารณาเป็นวงจรที่มีค่าคงที่เวลา (T : Time constant) 2ค่า แต่จากการทดลองดังกล่าวไม่สามารถหาขนาดของพารามิเตอร์ภายในวงจรสมมูลของแบบเตอรีชนิดลิเทียมไอออนได้ทุกตัวจึงต้องทำการทดลองเพื่อดูผลตอบสนองเชิงความถี่เปรียบเทียบกับ ซึ่งในการทดลองเพื่อดูผลตอบสนองเชิงความถี่นี้จะใช้เทคนิคที่เรียกว่า EIS (Electrochemical Impedance Spectroscopy) เพื่อหาพารามิเตอร์โดยการป้อนสัญญาณรูปไซน์ขาเข้าที่มีความถี่ต่างๆเพื่อดูผลตอบสนองของสัญญาณขาออก ซึ่งจากการทดลองหาพารามิเตอร์ของแบบเตอรีชนิดลิเทียมไอออนสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการทดลอง

1. วงจรสมมูลที่ได้จากการทดลองจริงคือวงจรในรูปที่ 5.1 ซึ่งประกอบไปด้วยตัวต้านทาน (R_0), ตัวเหนี่ยวนำ (L), ตัวต้านทานที่ต่อขนานกับตัวเก็บประจุสองชุด (R_1 กับ C_1 และ R_2 กับ C_2) และสุดท้ายคือค่าอิมพีแดนซ์ที่แปรผันกับความถี่ (Z_f)



รูปที่ 5.1 วงจรสมมูลที่ได้จากการทดลองจริง

2. ตัวต้านทานที่ขนานกับตัวเก็บประจุแล้วต่ออนุกรมกัน 2 ชุดนั้น ชุดหนึ่งจะตอบสนองที่ความถี่ต่ำ 20mHz - 20Hz ส่วนตัวต้านทานที่ขนานกับตัวเก็บประจุอีกชุดนั้นจะตอบสนองที่ความถี่สูง 20Hz - 300Hz

3. ค่าของตัวเก็บประจุที่ตอบสนองกับความถี่ต่ำจะมีค่าสูงกว่าค่าของตัวเก็บประจุที่ตอบสนองกับความถี่สูงมาก

4. ค่าอิมพีแดนซ์ภายในของวงจรสมมูลของแบตเตอรี่ที่เสื่อมสภาพจะมีขนาดมากกว่าอิมพีแดนซ์ภายในของวงจรสมมูลของแบตเตอรี่ที่มีสภาพปกติอย่างเห็นได้ชัด

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ปรับปรุงวงจรที่ใช้ในการทดสอบแบตเตอรี่เพื่อดูผลตอบสนองเชิงความถี่ให้สามารถทดสอบกับแบตเตอรี่ที่มีพิกัดแรงดันไฟฟ้าและพิกัดกำลังที่สูงขึ้นได้

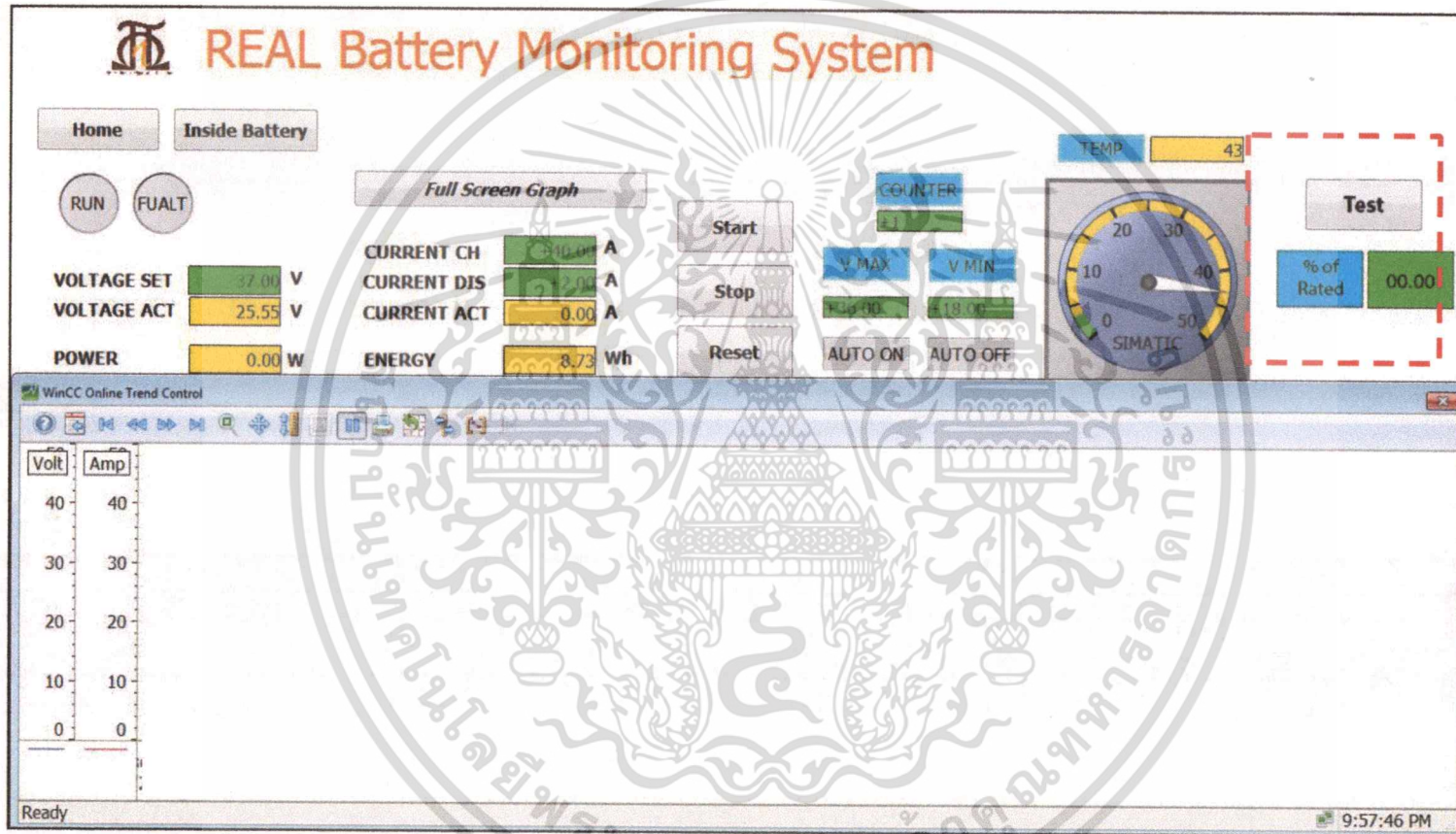
2. พัฒนาชุดทำการทดสอบให้สามารถตรวจวัดสัญญาณแรงดันกับสัญญาณกระแสและเก็บค่าของความต่างเฟสในแต่ละความถี่และสามารถคำนวณเพื่อนำมาแสดงผลเป็น Nyquist Plot ได้อย่างอัตโนมัติ

3. ในส่วนของวงจรวัดที่ใช้ตรวจวัดสัญญาณนั้นควรทำการป้องกันการรบกวนจากสัญญาณรบกวนภายนอกที่อาจส่งผลกระทบต่อค่าที่วัดได้ทำให้มีความคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง

4. ควบคุมอุณหภูมิในระหว่างทำการทดลองให้เท่ากันทุกครั้งทำการทดลองเนื่องจากอุณหภูมินั้นเป็นตัวแปรสำคัญที่มีผลกระทบต่อผลการทดลองของแบตเตอรี่

5.3 แนวทางการพัฒนาต่อของงานวิจัย

โครงการวิจัยนี้สามารถทำการพัฒนาต่อเติมเพิ่มเติม เพื่อนำไปลดต้นทุนในส่วนของระบบกักเก็บพลังงานที่เป็นแบตเตอรี่ในระบบโครงข่ายไฟฟ้า และพัฒนาออกแบบต่อไปในส่วนของเครื่องอัดประจุสำหรับไฮบริดแบตเตอรี่ (Hybrid Battery Charger) เพื่อที่จะสามารถใช้กับแบตเตอรี่ที่ได้นำมาไฮบริดกัน ทำให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดและเหมาะสม ทั้งนี้เนื่องจากแบตเตอรี่ดังกล่าวไม่สามารถใช้เครื่องอัดประจุแบบทั่วไปในการอัดประจุได้จึงจำเป็นต้องมีการศึกษาและพัฒนาต่อไป และเมื่อมีแบตเตอรี่ไฮบริดที่กันแล้ว และมีเครื่องอัดประจุสำหรับไฮบริดแบตเตอรี่ ส่วนต่อไปที่จำเป็นสำหรับการไฮบริดแบตเตอรี่คือระบบ BMS (Battery Monitoring System) ซึ่งเป็นระบบที่คอยบริหารจัดการและตรวจสอบประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ ซึ่งทั้งหมดที่กล่าวมาแล้วแต่ต้องอาศัยวงจรสมมูลทั้งสิ้น

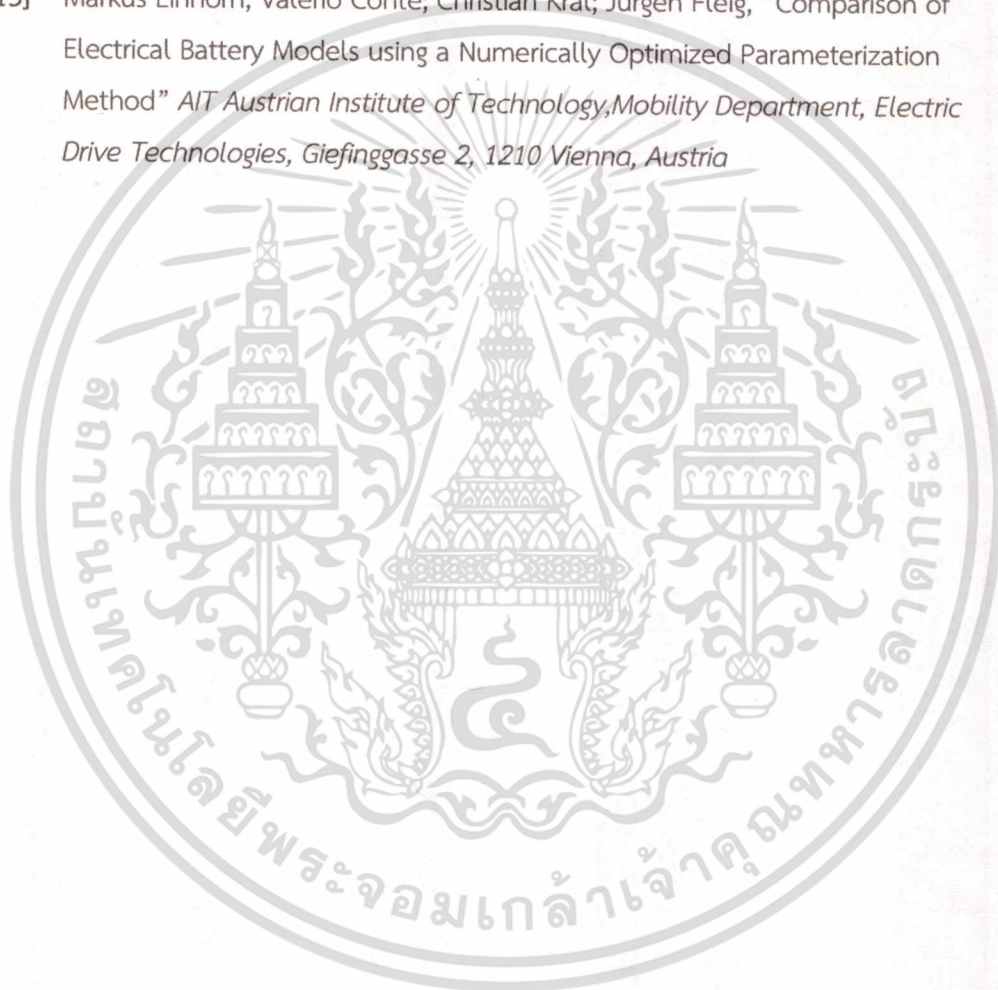


รูปที่ 5.2 ตัวอย่างหน้าต่างโปรแกรมระบบตรวจวัดคุณภาพของแบตเตอรี่

เอกสารอ้างอิง

- [1] อาคารที่ใช้ไฟฟ้าสุทธิเป็นศูนย์ (Net Zero Energy Building) [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา http://www.wrsc.org/attach_image/net-zero-energy-home
- [2] ระบบสำรองพลังงานไฟฟ้าด้วยแบตเตอรี่ [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://www.triplepundit.com/2014/11/doe-invests-15-million-solar-pv-energy-storage-grid-integration/>
- [3] แบตเตอรี่ชนิดลิเทียม [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://www.nexeon.co.uk/about-li-ion-batteries/>
- [4] แบตเตอรี่ชนิดลิเทียม-ไอออน โพลีเมอร์ [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://www.all-battery.com/polymerli-ionbattery37v2500mah0550100.aspx>
- [5] Ahmad RAHMOUN; Helmut BIECHL, "Modelling of Li-ion batteries using equivalent circuit diagrams" *University of Applied Sciences Kempten*
- [6] Anand Ramamurthy; Subhashish Bhattacharya, "Advanced Lithium Ion Battery Modeling and Power Stage Integration Technique" *North Carolina*
- [7] Liao Chenglin; Li Huiju; Wang Lifang, "A Dynamic Equivalent Circuit Model of LiFePO₄ Cathode Material for Lithium Ion Batteries on Hybrid Electric Vehicles" *Chinese Academy of Sciences Beijing, China*
- [8] Marie-Georges Olivier; Mireille Poelman, "Use of Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) for the Evaluation of Electrocoatings Performances" *University of Mons, Materials Science Department, Materia Nova Research Centre, Mons, Belgium*
- [9] Markus Einhorn; Valerio Conte; Christian Kral; Jürgen Fleig, "Comparison of Electrical Battery Models using a Numerically Optimized Parameterization Method" *Vienna University of Technology Institute of Chemical Technologies and Analytics, Austria*
- [10] T. Huria; M. Ceraolo; J. Gazzarri; R. Jackey, "High Fidelity Electrical Model with Thermal Dependence for Characterization and Simulation of High Power Lithium Battery Cells" *IEEE International Electric Vehicle Conference, March 2012*

- [11] Stephan Buller; Marc Thele; Rik W. A. A. De Doncker; Eckhard Karden, "Impedance-Based Simulation Models of Supercapacitors and Li-Ion Batteries for Power Electronic Applications" *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL. 41, NO. 3, MAY/JUNE 2005*
- [12] Gao Xiangyang; Zhang Jun; Ning Ning, "Transient Behavior Modeling and Physical Meaning Analysis for Battery" *College of Automation Northwestern Poly technical University Xi'an, Shaanxi Province, P.R.China*
- [13] Markus Einhorn; Valerio Conte; Christian Kral; Jurgen Fleig, "Comparison of Electrical Battery Models using a Numerically Optimized Parameterization Method" *AIT Austrian Institute of Technology, Mobility Department, Electric Drive Technologies, Giefinggasse 2, 1210 Vienna, Austria*





ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

อุปกรณ์	รายละเอียด
	<p>แบตเตอรี่หมายเลข 1 :</p> <p>เป็นแบตเตอรี่ที่มีแรงดัน 0 V (แบตเตอรี่เสีย)</p>
	<p>แบตเตอรี่หมายเลข 2 :</p> <p>เป็นแบตเตอรี่ที่มีแรงดัน 0 V (แบตเตอรี่เสีย)</p>
	<p>แบตเตอรี่หมายเลข 3 :</p> <p>เป็นแบตเตอรี่ที่เกิดจากการ อัดประจุแบตเตอรี่ที่สูงเกินไป (Overcharge)</p>

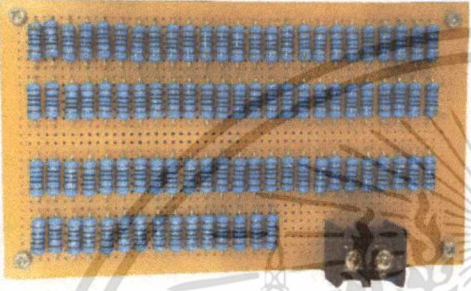


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

อุปกรณ์	รายละเอียด
	<p>แบตเตอรี่หมายเลข 4 : เป็นแบตเตอรี่ที่มีความจุต่ำ</p>
	<p>แบตเตอรี่หมายเลข 5 : แบตเตอรี่ที่มีสภาพดี</p>
	<p>Isolate Transformer</p>


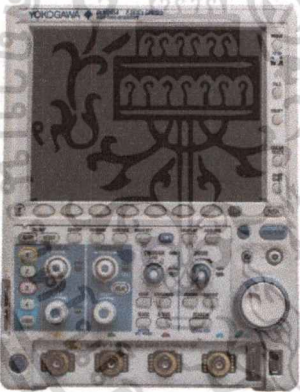

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

อุปกรณ์	รายละเอียด
	<p>โหนดตัวต้านทาน</p>
	<p>Current Sensor : ตัวต้านทานที่ใช้วัดกระแส</p>
	<p>MOSFET IRF460N</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

อุปกรณ์	รายละเอียด
	<p>DC Power Supply</p>
	<p>Digital Oscilloscope YOKOGAWA DLM2054</p>
	<p>Function Generator RIGOL DG4162</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

อุปกรณ์	รายละเอียด
	Infrared Thermometer FLUKE 62 MAX
	Multi meter
	Clamp Meter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

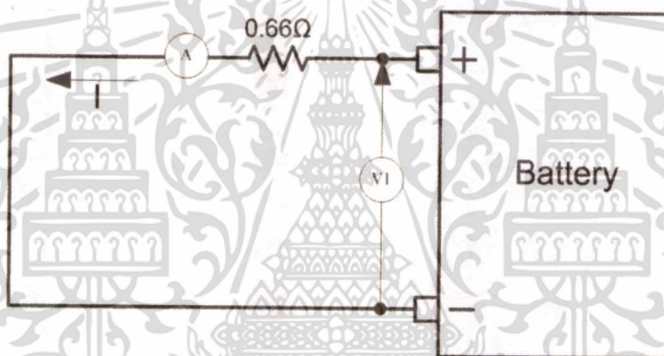


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

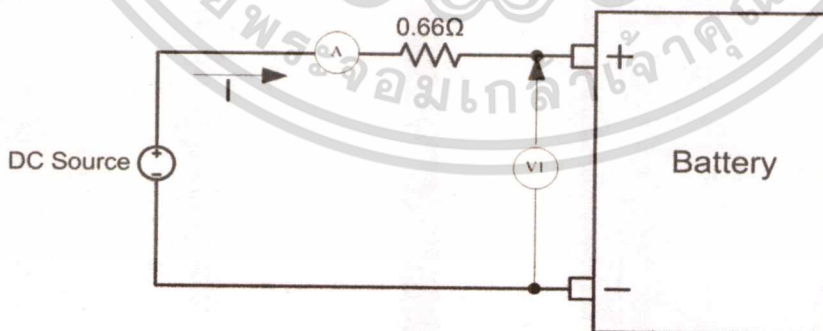
เทคนิควิธีการทดลองหาจรรยาสมมูลของแบตเตอรี่

โดยปกติการทำงานของแบตเตอรี่จะมี 2 สถานะ คือ สถานะการอัดประจุ (Charge) และสถานะคายประจุ (Discharge) ดังนั้นในการทดสอบหาจรรยาสมมูลของแบตเตอรี่ควรจะทำ การทดสอบในสถานะใด เพื่อที่จะให้ได้ผลการทดลองที่มีความถูกต้องแม่นยำ จึงทำการทดลองเพื่อหาวิธี ในการทดลองเพื่อหาจรรยาสมมูลแบตเตอรี่

ทำการทดลองในส่วนของการทดสอบแบบ DC โดยทำการทดลองทั้งการอัดประจุ และคายประจุแล้วทำการเปรียบเทียบผล ซึ่งในทดลองต้องคงที่กระแสการอัดประจุและคายประจุให้ คงที่เท่ากัน แล้ววัดค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของแบตเตอรี่และค่ากระแส และนำไปคำนวณหาค่าความ ต้านทานเพื่อนำไปวิเคราะห์ ซึ่งวงจรทดลองดังรูปที่ ข.1 และรูปที่ ข.2



รูปที่ ข.1 วงจรทดลองในสถานะคายประจุ (Discharge test)



รูปที่ ข.2 วงจรทดลองในสถานะอัดประจุ (Charge test)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลอง

จากผลการทดลองอัดประจุและคายประจุ ทำการคงที่กระแสไว้ที่ 4.4 แอมแปร์ จะได้ผลการทดลองดังตาราง

ตารางที่ ข.1 ผลการทดลองอัดประจุและคายประจุ

Time (min)	Discharge Test			Charge Test		
	V(V)	I(A)	R(Ohm)	V(V)	I(A)	R(Ohm)
0.5	2.944	4.421	0.666	3.671	4.458	0.823
1.0	2.940	4.416	0.666	3.605	4.438	0.812
1.5	2.932	4.425	0.663	3.608	4.440	0.812
2.0	2.928	4.407	0.664	3.672	4.4415	0.832
2.5	2.925	4.413	0.663	3.669	4.425	0.829
3.0	2.924	4.410	0.663	3.678	4.426	0.831
3.5	2.923	4.415	0.662	3.683	4.407	0.846
4.0	2.924	4.413	0.663	3.708	4.438	0.836
4.5	2.917	4.408	0.662	3.715	4.432	0.838
5.0	2.920	4.410	0.662	3.718	4.42	0.840

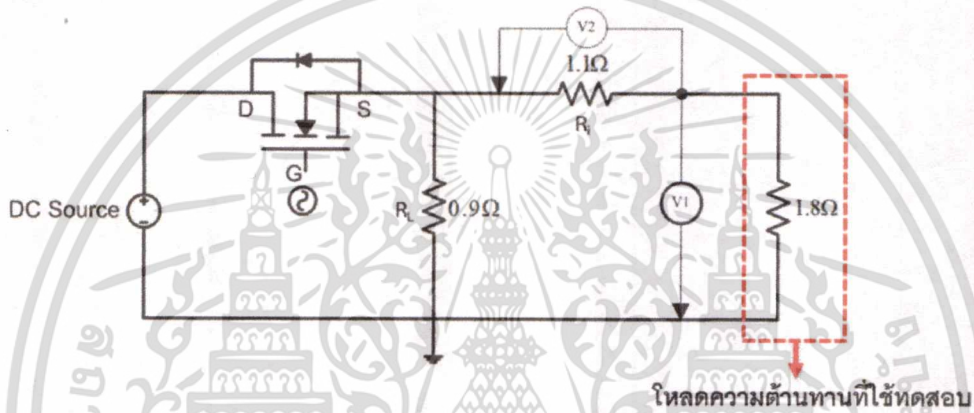
จากผลการทดลองพบว่าค่าความต้านทานที่คำนวณได้ในการทดลองแบบคายประจุ จะมีค่าเท่ากับ 0.66 Ω ซึ่งมีค่าเท่ากับโหนดความต้านทานในวงจร ส่วนการทดลองแบบอัดประจุ นั้นค่าความต้านทานที่ได้จากการคำนวณมีค่าเพิ่มมากขึ้น แสดงว่าวิธีการทดลองในสถานะคายประจุ (Discharge test) ไม่สามารถวัดค่าความต้านทานของแบตเตอรี่ได้ ในส่วนวิธีการทดลองอัดประจุ พบว่าค่าความต้านทานที่วัดได้ไม่เท่ากับโหนดความต้านทานที่ต่ออยู่ในวงจร ดังนั้นวิธีการในการทดสอบทางจรสมมูลของแบตเตอรี่จะหาโดยวิธีทดสอบในสภาวะอัดประจุ นอกจากนี้การทดสอบในสภาวะอัดประจุนั้นยังมีข้อดีคือสามารถควบคุมกระแสให้คงที่ได้โดยการควบคุมแหล่งจ่ายกระแสตรง (DC Source)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

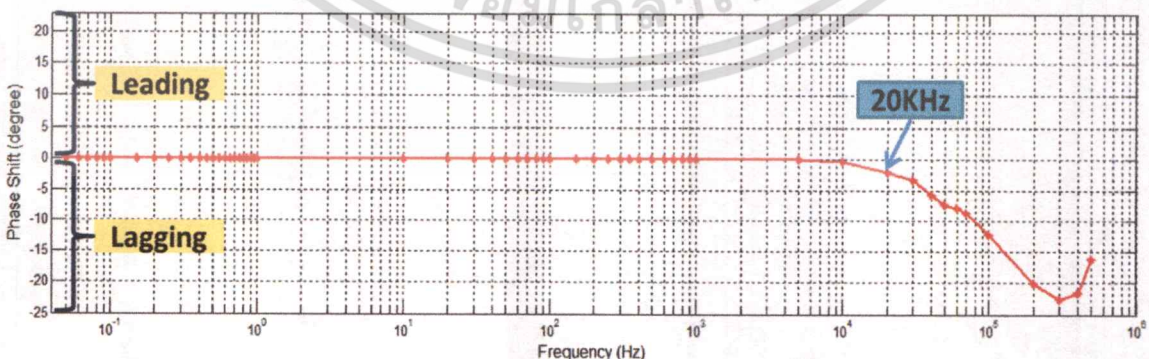
การทดสอบโพลความต้านทาน

จุดประสงค์ของการทดสอบโพลความต้านทานเพื่อตรวจสอบผลของวงจรที่ใช้ในการทดลองต่อวงจรสมมูลของแบตเตอรี่ที่ได้เพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้องและแม่นยำที่สุด ทำการทดลองโดยใช้วงจรดังรูปที่ ค.1 ในช่วงความถี่ 10mHz – 500KHz โดยจะทำการวัดความต่างเฟสของกระแสและแรงดันไฟฟ้าของโพลความต้านทานที่ใช้ทดสอบ



รูปที่ ค.1 วงจรที่ใช้ทดสอบโพลความต้านทาน

จากผลการทดลองพบว่าในช่วงความถี่ 50mHz – 10KHz ความต่างเฟสของกระแสและแรงดันเท่ากับ 0 องศา (In-Phase) แต่เมื่อเพิ่มความถี่ที่ทำการทดลองขึ้นไปถึง 20KHz จะสังเกตเห็นว่ามีความต่างเฟสระหว่างสัญญาณแรงและสัญญาณกระแสเกิดขึ้น โดยสัญญาณกระแสจะนำหน้าสัญญาณแรงดัน (lagging) ดังรูปที่ ค.2



รูปที่ ค.2 กราฟความต่างเฟสของกระแสและแรงดันไฟฟ้ากับความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองทางจรสมมูลของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน ในช่วงความถี่ 20mHz – 1KHz จะไม่มีผลของวงจรทดลองเข้าไปกระทบต่อผลของวงจรสมมูลที่ได้ เนื่องจากในช่วงความถี่ดังกล่าวผลของค่าความเหนี่ยวนำแฝงของวงจรทดสอบยังไม่ส่งผลกระทบต่อหรืออาจจะส่งผลกระทบต่อแต่ด้วยปริมาณที่น้อยจึงอาจจะเลยในส่วนนี้ไปได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวเก็บประจุ (Capacitor)

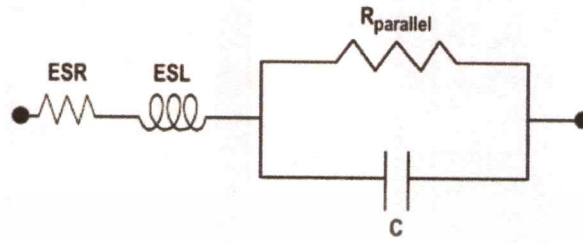
ตัวเก็บประจุ (Capacitor) เป็นอุปกรณ์ทางไฟฟ้าอย่างหนึ่ง ทำหน้าที่เก็บพลังงานในรูปแบบของสนามไฟฟ้า โดยการทำงานของตัวเก็บประจุนั้นมี 2 สถานะ คือ สถานะเก็บประจุ (Charge) และ สถานะคายประจุ (Discharge)

ตัวเก็บประจุในอุดมคติจะมีลักษณะดังรูปที่ ง.1 โดยค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุจะมีค่าเท่ากับ $Z = \frac{1}{j\omega C}$ ค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุขึ้นอยู่กับความถี่ เมื่อความถี่เพิ่มขึ้นค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุลดลงดังรูปที่ ง.2



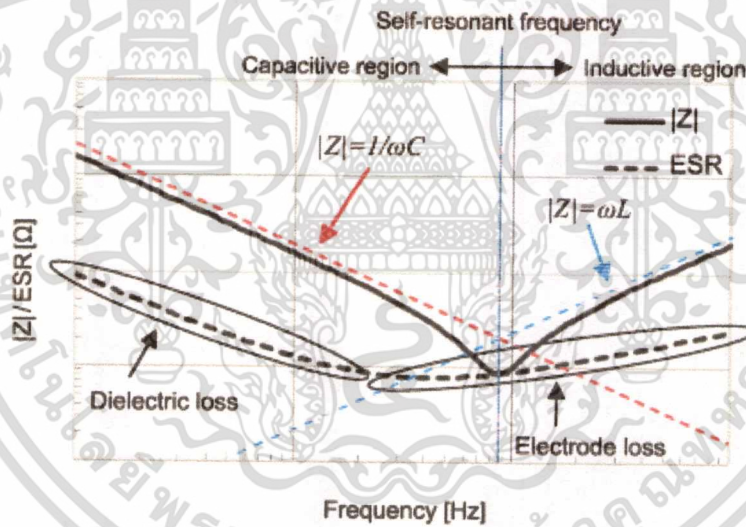
ในทางปฏิบัติเมื่อย่านความถี่การใช้ตัวเก็บประจุจะมีย่านความถี่ใช้งานอยู่ หากมีการนำไปใช้งานที่ความถี่สูงกว่าย่านความถี่ใช้งานของตัวเก็บประจุดังกล่าวก็จะมีค่าขององค์ประกอบอื่นเพิ่มมาด้วย (Parasitic) โดยจะประกอบไปด้วย ค่าความต้านทานที่ต่ออนุกรมอยู่ที่เรียกว่า ESR (Equivalent Series Resistance) ซึ่งเป็นผลมาจากการสูญเสียในไดอิเล็กตริกของตัวเก็บประจุดังกล่าวและค่าความเหนี่ยวนำแฝงที่ต่ออนุกรมที่เรียกว่า ESL (Equivalent Series Inductance)

ซึ่งเป็นผลมาจากแผ่นอิเล็กโทรดที่อยู่ภายในตัวเก็บประจุ โดยวงจรสมมูลของตัวเก็บประจุจะเป็นดังรูปที่ ๓.3



รูปที่ ๓.3 วงจรสมมูลของตัวเก็บประจุในทางปฏิบัติ

จากวงจรสมมูลของตัวเก็บประจุในทางปฏิบัติ ค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุกับความถี่จะมีลักษณะเป็น V-Shaped curve หรือ U-Shaped curve ดังรูปที่ ๓.4 โดยจะขึ้นอยู่กับชนิด ขนาด และค่าความเก็บประจุของตัวเก็บประจุนั้นๆ



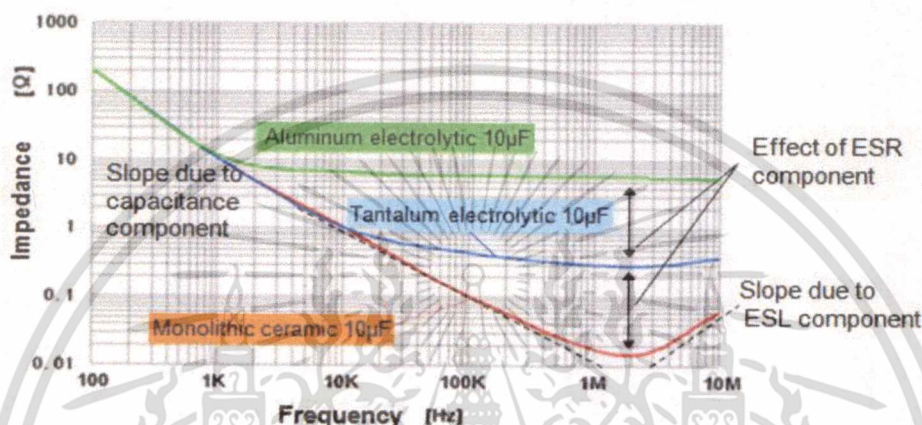
รูปที่ ๓.4 ความสัมพันธ์ของอิมพีแดนซ์ตัวเก็บประจุในทางปฏิบัติกับความถี่

- Low-frequency region : ค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุจะมีลักษณะเหมือนกับอิมพีแดนซ์ตัวเก็บประจุในอุดมคติ คือจะแปรผกผันกับความถี่ เมื่อความถี่เพิ่มขึ้นอิมพีแดนซ์จะมีค่าลดลง
- Self-resonant frequency : เป็นจุดที่มีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำสุดเนื่องจากขนาดของ $|X_C| = |X_L|$

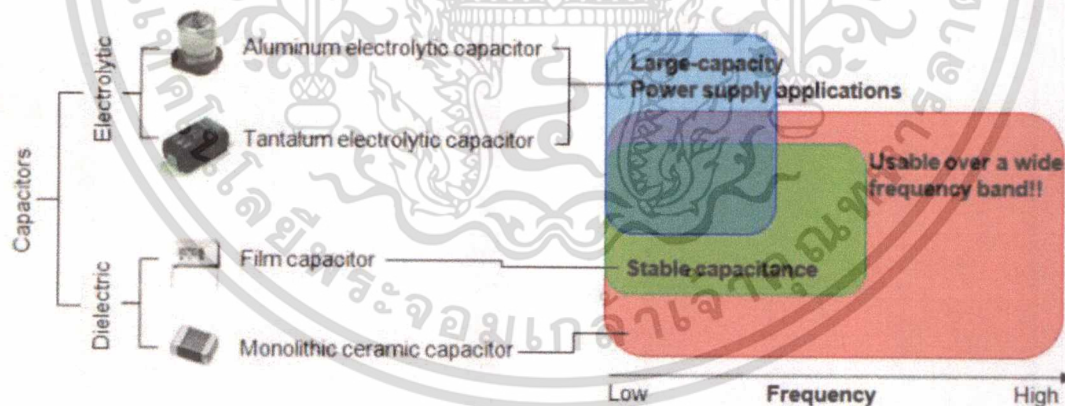
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

➤ High-frequency region : เป็นย่านความถี่ที่แสดงผลของความเหนี่ยวนำแฝง ซึ่งขนาดของอิมพีแดนซ์จะแปรผันตรงกับความถี่ $Z = j\omega C$

ลักษณะการตอบสนองต่อความถี่ในย่านต่างๆของตัวเก็บประจุจะขึ้นอยู่กับชนิดของตัวเก็บประจุนั้นๆ ดังรูปที่ ง.5 และ รูปที่ ง.6



รูปที่ ง.5 ผลการตอบสนองต่อความถี่ของตัวเก็บประจุชนิดต่างๆ



รูปที่ ง.6 ย่านความถี่การใช้งานของตัวเก็บประจุชนิดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Autolab Application Note EIS01

Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) Part 1 – Basic Principles

Keywords

Electrochemical impedance spectroscopy; frequency response analysis; Nyquist and Bode presentations

Summary

Electrochemical Impedance Spectroscopy or EIS is a powerful technique for the characterization of electrochemical systems. The promise of EIS is that, with a single experimental procedure encompassing a sufficiently broad range of frequencies, the influence of the governing physical and chemical phenomena may be isolated and distinguished at a given applied potential.

In recent years, EIS has found widespread applications in the field of characterization of materials. It is routinely used in the characterization of coatings, batteries, fuel cells, and corrosion phenomena. It has also been used extensively as a tool for investigating mechanisms in electro-deposition, electrodisolution, passivity, and corrosion studies. It is gaining popularity in the investigation of diffusion of ions across membranes and in the study of semiconductor interfaces.

Principles of EIS measurements

The fundamental approach of all impedance methods is to apply a small amplitude sinusoidal excitation signal to the system under investigation and measure the response (current or voltage or another signal of interest¹). In the following figure, a non-linear i-V curve for a theoretical electrochemical system is shown in Figure 1.

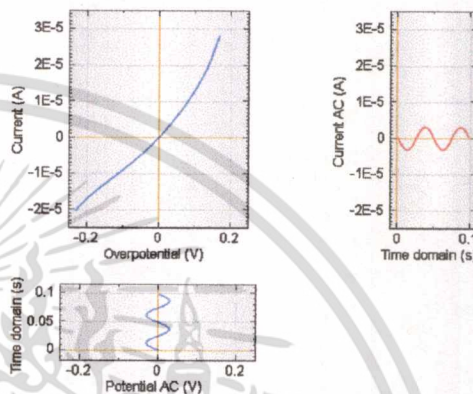


Figure 1 - Potential and current modulation recorded during an impedance measurement

A low amplitude sinewave $\Delta E \cdot \sin(\omega t)$, of a particular frequency ω , is superimposed on the DC polarization voltage E_0 . This results in a current response of a sine wave superimposed on the DC current $\Delta i \cdot \sin(\omega t + \phi)$. The current response is shifted with respect to the applied potential (see Figure 2).

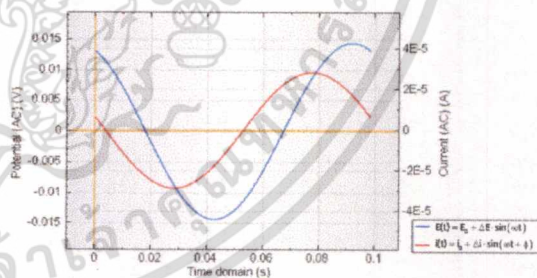


Figure 2 – Time domain plots of the low amplitude AC modulation and response

The Taylor series expansion for the current is given by:

$$\Delta i = \left(\frac{di}{dE} \right)_{E_0, I_0} \Delta E + \frac{1}{2} \left(\frac{d^2i}{dE^2} \right)_{E_0, I_0} \Delta E^2 + \dots$$

If the magnitude of the perturbing signal ΔE is small, then the response can be considered linear in first approximation. The higher order terms in the Taylor series can be assumed to be negligible.

¹ This signal is typically voltage or current but can be any other signal of interest, e.g. in the case of Electrohydrodynamic (EHD) impedance spectroscopy, the signal is rotation speed.

The impedance of the system can then be calculated using Ohm's law as:

$$Z(\omega) = \frac{E(\omega)}{i(\omega)}$$

This ratio is called impedance, $Z(\omega)$, of the system and is a complex quantity with a magnitude and a phase shift which depends on the frequency of the signal. Therefore by varying the frequency of the applied signal one can get the impedance of the system as a function of frequency. Typically in electrochemistry, a frequency range of 100 kHz – 0.1 Hz is used.

The impedance, $Z(\omega)$, as mentioned above is a complex quantity and can be represented in Cartesian as well as polar coordinates.

In polar coordinates the impedance of the data is represented by:

$$Z(\omega) = |Z(\omega)|e^{j\varphi\omega}$$

Where $|Z(\omega)|$ is the magnitude of the impedance and φ is the phase shift.

In Cartesian coordinates the impedance is given by:

$$Z(\omega) = Z'(\omega) - j \cdot Z''(\omega)$$

where $Z'(\omega)$ is the real part of the impedance and $Z''(\omega)$ is the imaginary part and $j = \sqrt{-1}$.

Data presentation

The plot of the real part of impedance against the imaginary part gives a Nyquist Plot, as shown in Figure 3. The advantage of Nyquist representation is that it gives a quick overview of the data and one can make some qualitative interpretations. While plotting data in the Nyquist format the real axis must be equal to the imaginary axis so as not to distort the shape of the curve. The shape of the curve is important in making qualitative interpretations of the data. The disadvantage of the Nyquist representation is that one loses the frequency dimension of the data. One way of overcoming this problem is by labeling the frequencies on the curve.

The absolute value of impedance and the phase shifts are plotted as a function of frequency in two different plots

giving a Bode plot, as shown in Figure 4. This is the more complete way of presenting the data.

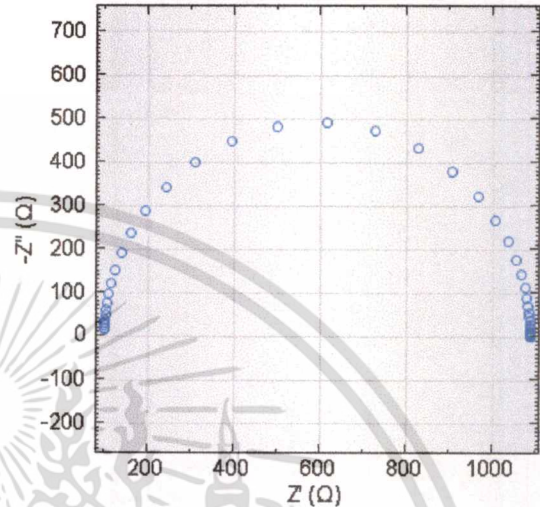


Figure 3 – A typical Nyquist plot

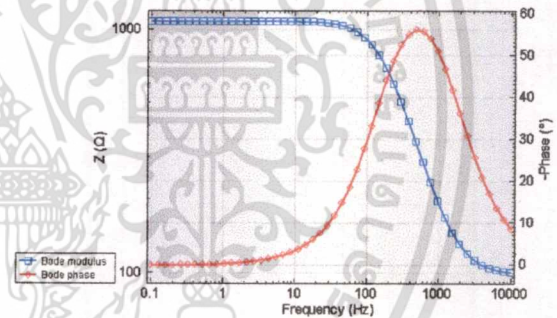


Figure 4 – A typical Bode plot

A third data presentation mode involving a 3D plot, is available. In this presentation mode the real and imaginary components are plotted on the X and Y axis, respectively and the logarithm of the frequency is plotted on the Z axis (see Figure 5).

The relationship between the two ways of representing the data is given by:

$$|Z|^2 = (Z')^2 + (-Z'')^2$$

$$\tan(\varphi) = \frac{-Z''}{Z'}$$

Alternatively, the real and imaginary components can be obtained from:

$$Z' = |Z| \cos \varphi$$

$$-Z'' = -|Z| \sin \varphi$$

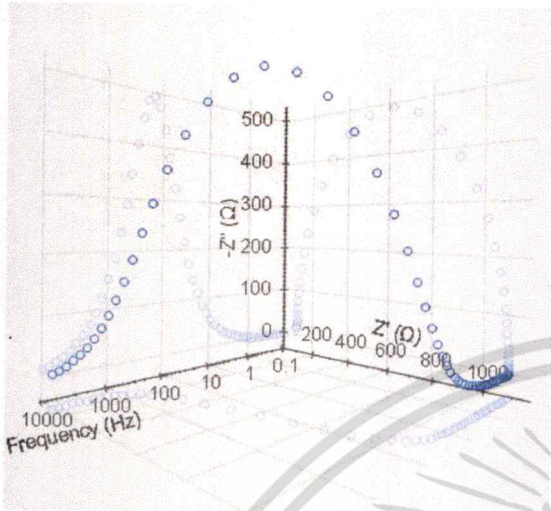


Figure 5 – 3D projection plot

Date

1 July 2011



Autolab Application Note EIS02

Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) Part 2 – Experimental Setup

Keywords

Electrochemical impedance spectroscopy; frequency response analysis; Nyquist and Bode presentations; data fitting; equivalent circuit

Summary

A typical electrochemical impedance experimental setup consists of an electrochemical cell (the system under investigation), a potentiostat/galvanostat, and a frequency response analyzer (FRA). The FRA applies the sine wave and analyses the response of the system to determine the impedance of the system.

The Electrochemical Cell

The electrochemical cell in an impedance experiment can consist of two, three, or four electrodes. The most basic form of the cell has two electrodes. Usually the electrode under investigation is called the working electrode, and the electrode necessary to close the electrical circuit is called the counter electrode. The electrodes are usually immersed in a liquid electrolyte. For solid-state systems, there may be a solid electrolyte or no electrolyte.

Two electrode cell

A two-electrode configuration for the cell is used when precise control of the potential across the electrochemical interface is not critical (see Figure 1).

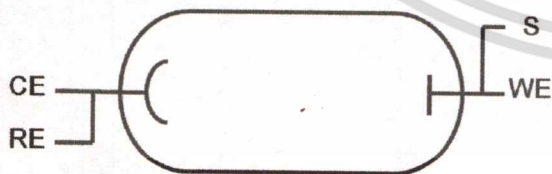


Figure 1 – Schematic overview of the two electrode setup

This arrangement is used to investigate electrolyte properties, such as conductivity, or to characterize solid-state systems.

The impedance is measured between the RE and the S.

Three electrode cell

A three-electrode configuration for an electrochemical cell is most common for typical electrochemical applications. A third electrode (the reference electrode) is used to determine the potential across the electrochemical interface accurately (see Figure 2).

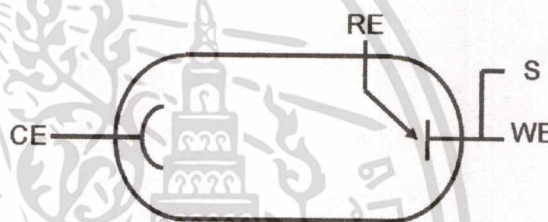


Figure 2 – Schematic overview of the three electrode setup

Since the absolute potential of a single electrode cannot be measured, all potential measurements, in electrochemical systems are performed with respect to a reference electrode. A reference electrode, therefore, should be reversible, and its potential should remain constant during the course of the measurement.

The impedance is measured between the RE and the S.

Four electrode cell

A four-electrode cell is used to analyse processes occurring within the electrolyte, between two measuring electrodes separated by a membrane. In this configuration, the working electrode and the counter enable current flow (see Figure 3).

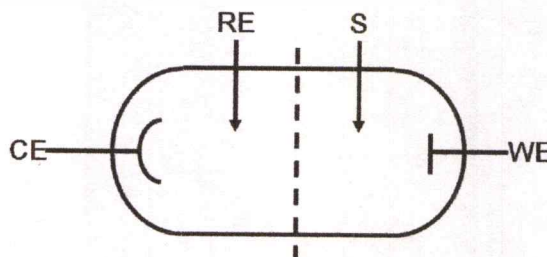


Figure 3 – Schematic overview of the four electrode setup

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This kind of a cell is usually used to study ion transport through a membrane or to perform electron or ion conductivity measurements. A four-electrode configuration is also necessary for measurements on low impedance solids where the influence of contact and wire resistance should be minimal.

The impedance is measured between the RE and the S.

Main experimental parameters

The main experiment parameters can be divided in the parameters or settings of the potentiostat and the parameters or settings of the FRA.

Instrumental settings

Potentiostatic or Galvanostatic Mode

EIS measurements can be done in the potentiostatic or galvanostatic mode. In the potentiostatic mode, experiments are done at a fixed DC potential. A sinusoidal potential perturbation is superimposed on the DC potential and applied to the cell. The resulting current is measured to determine the impedance of the system.

In the galvanostatic mode, experiments are done at a fixed DC current. A sinusoidal current perturbation is superimposed on the DC current and is applied to the cell. The resulting potential is measured to determine the impedance of the system. Typically impedance experiments are done under potentiostatic control. In some cases, e.g. electrodeposition at constant current and battery research, impedance experiments can be performed under galvanostatic control.

DC potential or current

Impedance measurements allow the investigation, in detail, of the various phenomena occurring at a certain dc potential (or current) of interest. This DC value is also referred to as the bias potential (or current). In Figure 4 a typical current potential curve for a corrosion of iron in passivating solution is shown.

EIS measurements, in this case, can be performed at the following bias potentials or currents:

- Open circuit potential (OCP), corrosion potential or zero current
- Potential or current in the active region

- Potential or current in the passive region
- Potential or current in the limiting current plateau region

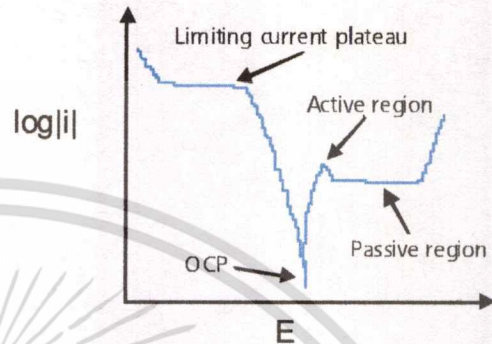


Figure 4 – Different regions in the polarization curve

Note: care must be taken when doing the experiments at OCP. A typical impedance scan takes around 10 minutes. For certain systems, the OCP can drift during the course of the impedance experiment. If the OCP is measured at start of the impedance scan and the potential bias fixed at that value at the beginning of the scan, then as the experiment progresses, the OCP can change due to changes in the electrode surface. As the bias potential is fixed at the beginning of the experiment, this can result in a difference between the OCP and the potential applied to the working electrode causing in errors. It is desirable that OCP is measured dynamically at each frequency or the measurements are done under galvanostatic control at zero current, thus eliminating the problem.

FRA Parameters or Settings

AC Mode - Single sine or Multi sine

Typically measurements are done in the single sine mode. Multi sine (5 or 15) can be used to save time when measuring very low frequencies.

Perturbation (sine wave) amplitude

It is important that the impedance response of a system is linear. The linearity condition implies that the impedance response is independent of the perturbation amplitude. This can be achieved by using small amplitude perturbations. A very small value can give rise to poor signal to noise ratio and hence noisy data. A large value can result in the violation of the linearity condition. Typically a value of 10 mV is used for most electrochemical systems.

Experimentally, one can verify the linearity condition by performing the same experiment at different perturbation

amplitude. The range for which the impedance is independent of the perturbation amplitude provides the acceptable range. The largest value in this range can be used to give the highest signal to noise ratio.

Integration time

As the amplitude of the perturbation is decreased the signal to noise ratio becomes poor. To improve the signal to noise ratio an average of measurements over several sine waves or cycles can be taken. This process of averaging is also referred to as integration and the time needed to measure is called the integration time. Increasing integration time increases the signal to noise ratio.

Wait for steady state

During a scan when a new frequency is applied, one needs to wait for some time for the system to stabilize before measurements can start. This can be achieved by skipping the first few cycles.

Frequency range

In theory one must choose the widest possible frequency range to capture all the time constants of the system. In practice the frequency range is constrained by the instrument limitations and system considerations.

The highest frequency of an impedance scan is often limited by the high frequency limit of the potentiostat and the slow response of the reference electrode. Typically potentiostats can go up to 1 MHz.

The measurement time at each frequency is the inverse of the frequency. Hence, a very low frequency limit can result in a very long time for the collection of a complete scan. For example the measurement of one data point at a frequency of 1 mHz will take 1000 s. For systems that are changing with time (e.g. due to corrosion, growth of a film etc.) this implies that the system has changed during the course of the data collection. Therefore, the low frequency limit should be chosen to ensure minimal change in the system during data collection.

A frequency range of 100 kHz – 0.1 Hz is typically used for most electrochemical systems. The total measurement time for this frequency range is around 10 minutes.

Frequency distribution

The frequency can be distributed over the frequency range linearly, logarithmically or with a square root distribution. The most common distribution is logarithmic distribution.

Date

1 July 2011

Autolab Application Note EIS03

Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) Part 3 – Data Analysis

Keywords

Electrochemical impedance spectroscopy; frequency response analysis; Nyquist and Bode presentations; data fitting; equivalent circuit

Summary

The characterization of electrochemical systems with impedance spectroscopy requires the interpretation of the data with the help of suitable models. These models can be divided into two broad categories: equivalent circuit models and process models. The models are regressed to experimental data to estimate parameters that can describe the experimental data adequately and can be used to predict the behavior of the system under various conditions.

Equivalent circuit models

The equivalent circuit models are most commonly used to interpret impedance data. These models are built with the help of well-known passive elements such as, resistors, capacitors, and inductors and distributed elements such as, constant phase element and Warburg impedance. These elements can be combined in series and parallel to give complex equivalent circuits. A certain physical meaning is then assigned to the various elements of the equivalent circuit.

Resistance, R

The circuit element resistance, R, has an impedance of:

$$Z_R = R$$

The impedance is independent of frequency and has no imaginary part. The current through a resistor is always in phase with the voltage. In NOVA, the R element is represented by the following symbol:



Some examples of the use of Resistance, R, to describe electrochemical phenomena are:

Ohmic resistance, R_Ω

The potential drop between the reference electrode and the working electrode, is the ohmic resistance, or the uncompensated resistance and can be modelled using R. The ohmic resistance depends on the conductivity of the electrolyte and the geometry of the electrode. For a rotating disc electrode, the ohmic resistance is given by:

$$R_\Omega = \frac{1}{4\kappa R}$$

where, κ is the specific conductivity of the bulk electrolyte, r is the radius of the disc.

For more complex geometries the ohmic resistance is determined experimentally and can be estimated by impedance spectroscopy.

In a Nyquist plot, the intersection of the impedance data with the real part of the axis at the high frequency end gives the ohmic resistance.

Polarization resistance, R_p

An electrode is polarized when its potential is forced away from its value at open circuit. Polarization of an electrode causes current to flow due to electrochemical reactions it induces at the electrode surface. The magnitude of the current is controlled by reaction kinetics and diffusion of reactants both towards and away from the electrode.

When an electrode undergoes uniform corrosion at open circuit, the open circuit potential is controlled by the equilibrium between anodic and cathodic reactions resulting in anodic and cathodic currents. The open circuit potential is the potential where the two currents are equal. The value of the current for either of the reactions is known as the corrosion current. When the two reactions are under kinetic

control, the potential of the cell can be related to the current by the Butler-Volmer equation:

$$i = i_0(e^{\beta_a \eta} - e^{-\beta_c \eta})$$

where, i is the measured cell current, i_0 is the exchange current, η is the over potential, β_a and β_c are the anodic and cathodic Tafel coefficients, respectively.

For small η the above equation can be transformed to:

$$i_0 = \frac{\beta_a \beta_c}{\beta_a + \beta_c} \left(\frac{1}{R_p} \right)$$

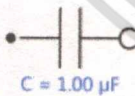
The parameter, R_p , the polarization resistance behaves like a resistor. If the Tafel constants are known, one can calculate the i_0 from R_p . The exchange current, i_0 can be used to calculate the corrosion rate, for example.

Capacitance, C

The circuit element capacitance, C, has an impedance of:

$$Z_c = \frac{1}{j\omega C}$$

The impedance of capacitors is a function of frequency and has only an imaginary part. A capacitor's impedance decreases as the frequency is raised. The current through a capacitor is phase shifted -90° with respect to voltage. In NOVA, the C element is represented by the following symbol:



Some examples of the use of capacitance to describe electrochemical phenomena are provided below.

Double layer capacitance, C_{dl}

An electrical double layer exists at the electrode/electrolyte interface. This double layer is formed as ions from the solution approach the electrode surface. Charges in the electrode are separated from the charges of these ions. The separation is of the order of angstroms. The value of the double layer capacitance depends on many variables including electrode potential, temperature, ionic

concentrations, types of ions, oxide layers, electrode roughness, impurity adsorption, etc.

Coating capacitance, C_c

For polymer coated substrates, the coating capacitance C_c is given by:

$$C_c = \frac{\epsilon \epsilon_0 A}{d}$$

Where, ϵ is the dielectric constant of the coating, ϵ_0 is the dielectric constant of vacuum, A is the area of the coating, d is the thickness of the coating.

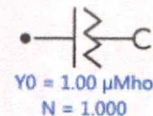
Typical dielectric constants of coatings are in the range 3-4 and of water around 80. When water penetrates the coating, its dielectric constant increases, resulting in an increased coating capacitance. Hence, C_c can be used to measure the water absorbed by the coating.

Constant Phase Element, CPE

Modelling an electrochemical phenomenon with an ideal capacitor assumes that the surface under investigation is homogeneous which is normally not the case. This lack of homogeneity is modelled with a Q element, used to represent the CPE:

$$Z_Q = \frac{1}{Y_0(j\omega)^n}$$

where, Y_0 is the admittance of an ideal capacitance and n is an empirical constant, ranging from 0 to 1. It is noteworthy that when $n = 1$, the CPE behaves as a pure capacitor, while when $n = 0$, the CPE behaves a pure resistor. Furthermore, when $n = 0.5$, the CPE is the equivalent of the so-called Warburg element, described below. In NOVA, the Q element is represented by the following symbol:



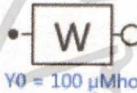
Double layer capacitance and coating capacitance, described in the previous section, are usually modelled with a CPE.

Warburg Impedance, W

In electrochemical systems, diffusion of ionic species at the interface is common. The Warburg impedance was developed to model this phenomenon. Several expressions, based on different assumptions, are used to describe diffusion impedance. Under the assumption of semi-infinite diffusion layer, the impedance is:

$$Z_W = \frac{1}{Y_0 \sqrt{j\omega}}$$

where, Y_0 is the diffusion admittance. A Warburg impedance is characterized by having identical real and imaginary contributions, resulting in a phase angle of 45° . In NOVA, the W element is represented by the following symbol:



Under the assumption of a finite diffusion layer thickness (Nernst hypothesis), the diffusion impedance is modelled by:

$$Z_o = \frac{1}{Y_0} \tanh(B\sqrt{j\omega})$$

where, B is given by:

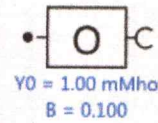
$$B = \frac{\delta}{\sqrt{D}}$$

Where δ is the diffusion layer thickness and D is the diffusion coefficient. It is noteworthy to point out that when B is large, the Z_o is reduced to a Z_W .

For a rotating disc electrode, the diffusion layer thickness is given by:

$$\delta = \frac{1.61 \cdot D^{1/3} \nu^{1/6}}{\sqrt{\omega_{RDE}}}$$

where ν is the kinematic viscosity of the solution and ω_{RDE} is the angular frequency of the rotating disc electrode. In NOVA, the O element is represented by the following symbol:



Inductance, L

The impedance of an inductance, L, is given by:

$$Z_L = j\omega L$$

The impedance of an inductor increases with frequency. Like capacitors, inductors have only an imaginary impedance component. But current through an inductor is phase shifted 90° degrees with respect to the voltage.

The impedance of an electrochemical cell can sometimes appear to be inductive due to adsorption of reactants on the surface and can be modeled using Inductance.

Inductive behaviour can also result from non-uniform current distribution, inductance of cell cables, slow response of reference electrodes and potentiostat non-idealities. In these cases, the appearance of inductance indicates an error in the EIS measurement. In NOVA, the L element is represented by the following symbol:



Date

1 July 2011

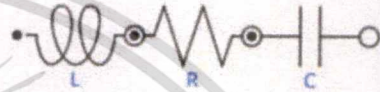
Autolab Application Note EIS04

**Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS)
Part 4 – Equivalent Circuit Models**

Keywords

Electrochemical impedance spectroscopy; frequency response analysis; Nyquist and Bode presentations; data fitting; equivalent circuit

Model 2 – A resistance, a capacitance and an inductance in series



Summary

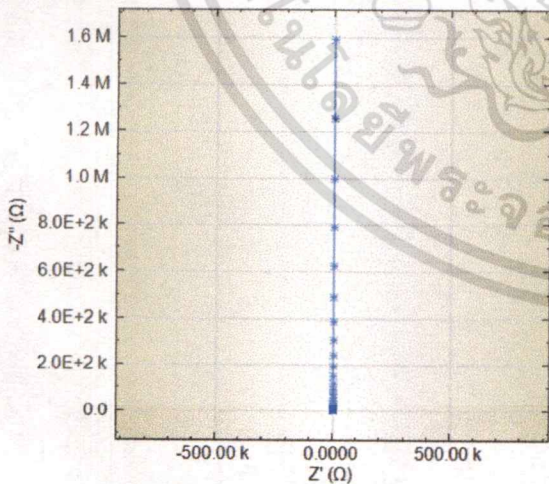
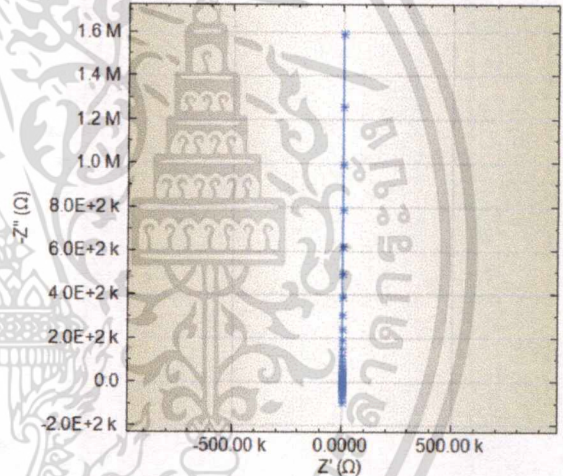
The passive circuit elements, described in the previous note on data analysis, can be combined in series and parallel to build equivalent circuit models, which can then be used to model the various phenomena going on at the interface. In this note the use of the circuit elements to build models is described.

Model 2 can be used to model the response of a supercapacitor.

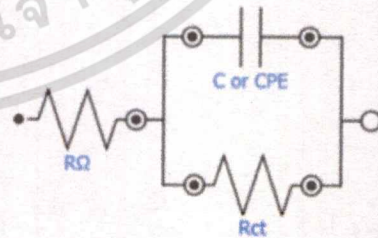
Model 1 – A resistance and capacitance in series



Model 1 can be used, for example, to model a metal with an undamaged high impedance coating.

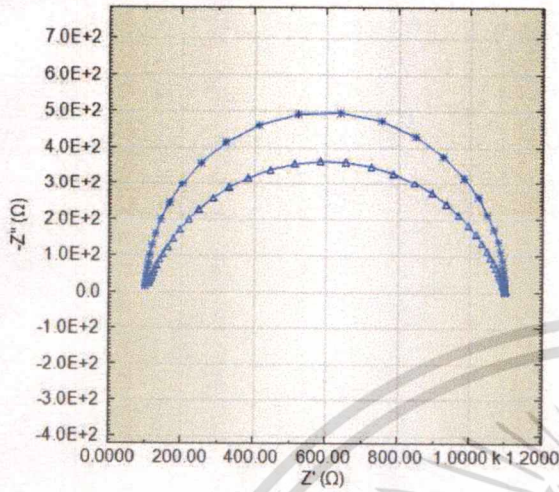


Model 3 – A resistance and a capacitance in parallel (Randles circuit)

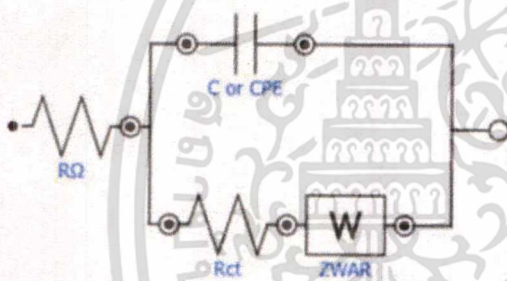


The Randles circuit is one of the simplest and most common cell models. It includes a solution resistance, a double layer capacitor or a CPE and a polarization resistance. It is used to model corrosion processes and is often the starting point for other more complex models.

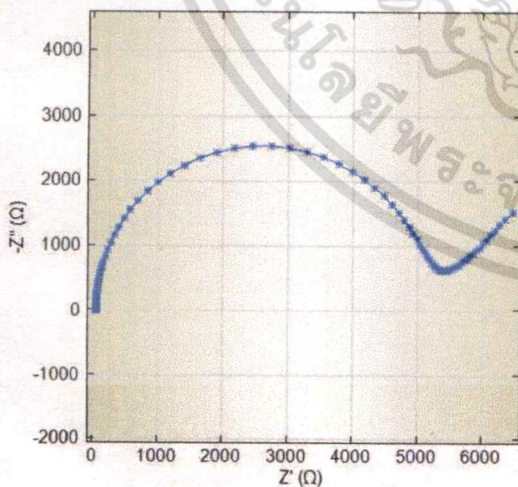
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



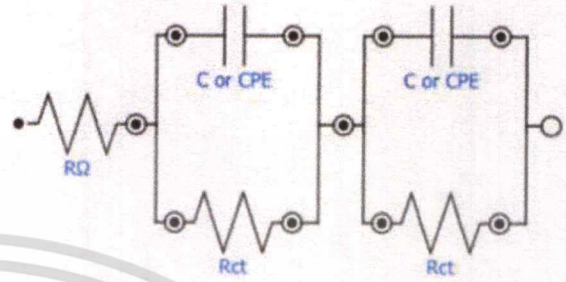
Model 4 – Mixed kinetic and diffusion control



Model 4 can be used to describe electrode processes when both kinetics and diffusion are important.

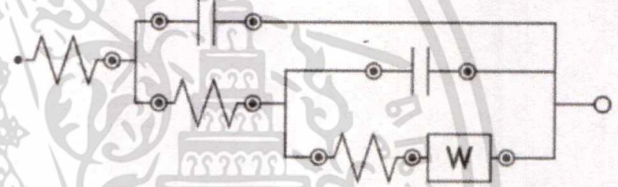


Model 5 – Two Randles circuits in series

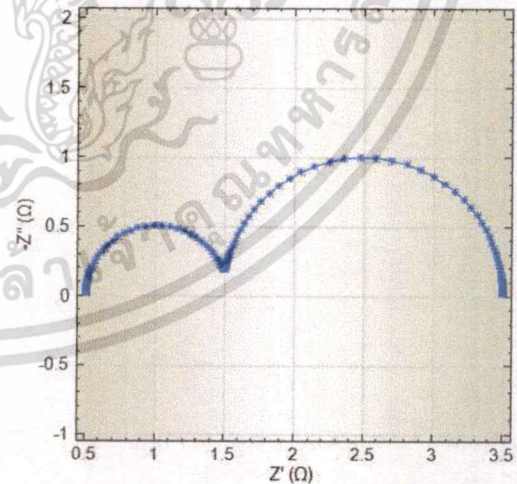


Model 5 can be used, for example, to model the response of batteries.

Model 6 – A complex circuit



Model 6 can be used, for example, to describe the impedance of an organic coating on a metal substrate in contact with an electrolyte.



Non uniqueness of models

It is important to keep in mind that the equivalent circuit modelling is a method that aims at matching a theoretical model of an electrochemical interface with an experimental set of data. Proper assignment of the circuit elements can

only be performed when the sufficient information on the chemical and electrochemical phenomena taken place at the interface is available.

Moreover, it is important to keep in mind at all times that several arrangements of circuit elements are possible for a given set of data and that some equivalent circuits are mathematically identical (see application note #15).

Date

1 July 2011



Autolab Application Note EIS05

Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) Part 5 – Parameter Estimation

Keywords

Electrochemical impedance spectroscopy; frequency response analysis; Nyquist and Bode presentations; data fitting; equivalent circuit; parameter estimation

$$W_{r,k} = W_{j,k} = 1$$

When no weighting is used then the low frequency points would have higher weight than the high frequency points. This introduces a bias and can give large errors in parameter estimation. Therefore, this weighting should not be used.

Summary

In the previous application note on equivalent circuit models, an overview of the different circuit elements that are used to build an equivalent circuit model was given. It was shown that these circuit elements provide the building blocks for more complex models. After identifying a suitable model for the system under investigation, the next step in the data analysis is estimation of the model parameters. This is done by the non-linear regression of the model to the data. Most impedance systems come with a data-fitting program. Although these programs can be used as a black box, care must be taken to avoid problems.

Proportional weighting

Usually at high and low frequencies the imaginary part of the data goes to zero.

$$W_{r,k} = Z_{r,k}$$

$$W_{j,k} = Z_{j,k}$$

In that case proportional weighting can cause numerical problems because of division by zero. Therefore, this weighting should not be used.

Weighting the data

The fitting of a model to data is the minimization of the objective function, J, using a non-linear regression routine:

$$J = \sum_k \frac{(Z_{r,k} - \hat{Z}_{r,k})^2}{W_{r,k}^2} + \sum_k \frac{(Z_{j,k} - \hat{Z}_{j,k})^2}{W_{j,k}^2}$$

Modulus weighting

Weighting the data by the absolute value of impedance is the most recommended weighting strategy and is the default weighting in the AUTOLAB software.

where:

$Z_{r,k}, Z_{j,k}$ are the real and imaginary data

$\hat{Z}_{r,k}, \hat{Z}_{j,k}$ are the real and imaginary model

$W_{r,k}, W_{j,k}$ are the real and imaginary weights

$$W_{r,k} = W_{j,k} = |Z|$$

Initial Guess

The models in impedance spectroscopy are highly non-linear in parameter space, which implies that the objective function can have several local minima. An initial guess of the parameters is required to begin the regression procedure. A poor choice of the initial guess can result in the procedure terminating at a local minimum with, for example, wrong estimates for the model parameters. A good initial guess requires some experience. An examination of asymptotes and inflexion points in the Nyquist and Bode diagrams can give some clues for making a good initial guess.

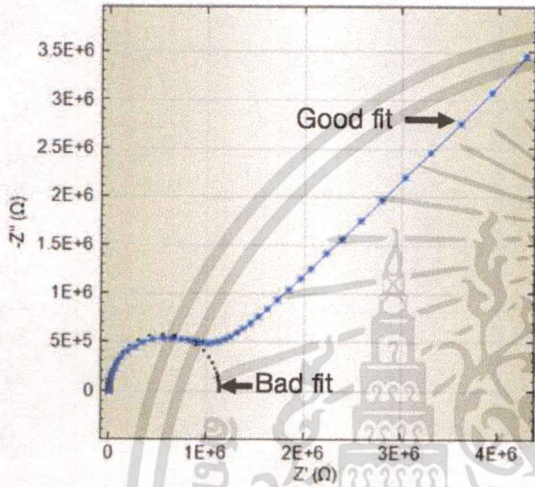
There are several different weighting strategies that are possible. The three most common strategies are described in this section.

No weighting

In impedance spectroscopy the value of low frequency data points is usually much larger than that of the high frequency data points (sometimes by several orders of magnitude).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

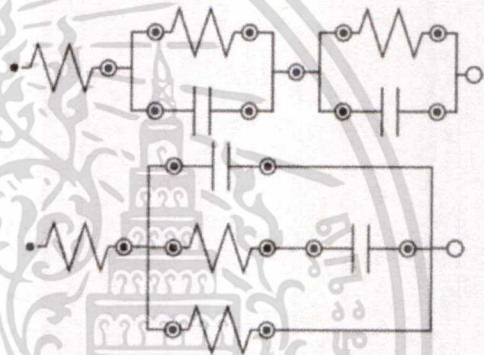
In the following figure the errors that can be introduced due to bad initial guess are illustrated. The circles represent the experimental data. The solid line is the result of fit to the data using a good initial guess, and the dotted line represents the result with a poor initial guess. One can see that a poor initial guess can result in poor fit of the model to the data.



the data would give an identical fit, with only the circuit parameters being different.

In this case, there is no unique equivalent circuit that describes the spectrum. One cannot assume that an equivalent circuit that produces a good fit to a data set represents an accurate physical model of the cell. One needs prior knowledge or complementary experiments to determine the appropriate model for the data. This is one of the limitations of impedance spectroscopy.

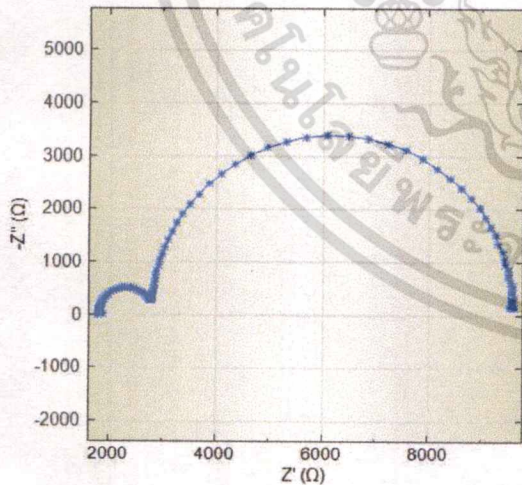
Equivalent Circuit Models with Two Time Constants



Non-uniqueness of circuit models

The impedance spectrum, shown in the following figure, shows two clearly defined semi circles.

The three equivalent circuits shown above are mathematically identical.



Date
1 July 2011

An equivalent circuit that consists of two RC time constants can model this spectrum. The two RC time constants can be produced by combining the resistances and capacitances in three different ways resulting in three equivalent circuits shown in the following figure. All three circuits when fitted to

Autolab Application Note EIS06

Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) Part 6 – Measuring raw signals in EIS

Keywords

Electrochemical impedance spectroscopy; frequency response analysis; Nyquist and Bode representations; raw data; Resolution plot, Lissajous plot

Summary

Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) involves the study of the variation of the impedance of an electrochemical system with the frequency of a small-amplitude AC perturbation. In practice, the time-domain of the input and output signals are converted into a complex quantity that is a function of a frequency. The input and the resulting output signals are hardware and software processed to yield a frequency dependent transfer function. More details about the instrumentation and the data conversion process are described in the available literature.

The Nyquist, Bode phase and Bode modulus plots are the most often used data plots in impedance spectroscopy. These plots are representations of calculated (processed) data. Because of this, it is difficult for the user to evaluate in real time or after the measurement if the measured data fulfils all the above conditions. Moreover, if the Nyquist and Bode plots do not show the expected behavior of the system, it is difficult for the user to pinpoint the cause of the problem (e.g. noise in the system, lack of sensitivity etc.).

In this application note, the advantage of recording the raw time domain data for each individual frequency during an electrochemical impedance measurement is described.

Experimental conditions for a valid EIS measurement

From the experimental point of view, in order for the electrochemical impedance measurement data to be valid, three conditions have to be fulfilled:

- **Linearity:** the applied AC amplitude must be small enough so that the response of the cell can be assumed to be linear, in first approximation, but still large enough to measure a response. (see Figure 1).
- **Stability:** the overall state of the system must not change significantly during the acquisition of the data.

The choice of the frequency range and measurement conditions have an influence on this condition.

- **Causality:** The measured AC response of the system must be directly correlated to the applied AC stimulus. The shielding of the cell from outside perturbations is important in this case.

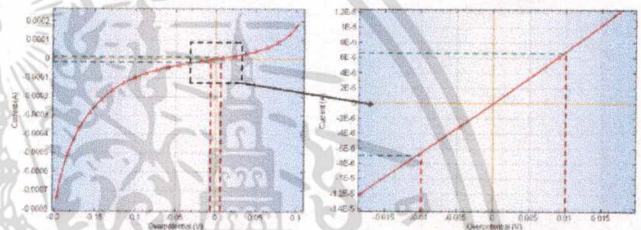


Figure 1 – Example of a linear i-V response which fulfils the linearity condition

Possible tests for the validity of EIS data

Kronig-Kramers (KK) test

The Kronig-Kramers (KK) relations are mathematical properties which connect the real and imaginary parts of any complex function. These relations are often used to relate the real and imaginary parts of a complex transfer function (like electrochemical impedance, Z). During the KK test, the experimental data points are fitted using a special model circuit which always satisfies the KK relations. If the measured data set can be represented with this circuit, then the data set should also satisfy Kronig-Kramers assumptions. More details regarding the KK test can be found in the Impedance spectroscopy tutorial, in Nova and also in the specified reference material.

Satisfaction of the Kramers-Kronig test is a necessary but not sufficient condition for meeting the above mentioned requirements.

Monitoring the raw signal (time domain)

In impedance spectroscopy, the raw signal is the actual applied sinwave and the resulting response (AC and DC). These can be recorded individually for each frequency during a frequency scan. Even though there are other experimental methods which can be used for the assessment of consistency of the electrochemical impedance measurements, monitoring the raw signals and recording the specific plots for each individual applied frequency in the dataset is one of the most convenient ways to get a fast and reliable image over the validity of the measurement.

Advantages of recording the raw data in EIS

In the Autolab Nova software, during a frequency scan, the values of the following six signals are *derived* from a synchronized measurement of the potential and current sine waves in the time domain:

- **Frequency (Hz):** the frequency of the applied sinwave.
- **Time (s):** the time coordinate, corresponding to the measured data point in the spectrum.
- **Z, modulus (Ohm):** the modulus of the measured impedance.
- **Z', real part (Ohm):** the real part of the measured impedance.
- **-Z'', imaginary part (Ohm):** the imaginary part of the measurement impedance.
- **-Phase (°):** the phase shift.

Ten additional signals can be recorded in Nova, using the dedicated FRA sampler (see Figure 2):

- **Potential (DC) and Current (DC):** the DC component of the potential and current, respectively.
- **Time domain (s):** contains the relative time coordinates of the measured sinewaves.
- **Potential and Current resolution (%):** the measured resolution for Potential and Current, respectively, expressed in % of ADC range.
- **Potential (AC) and Current (AC):** the raw values of the Potential (in Volt) and the Current (in Ampere).
- **Frequency domain (Hz):** the frequency component of the power spectrum of the Potential and Current.
- **Potential and Current frequency domain (a.u):** the magnitude of the spectral power of the Potential and Current, expressed in arbitrary units.

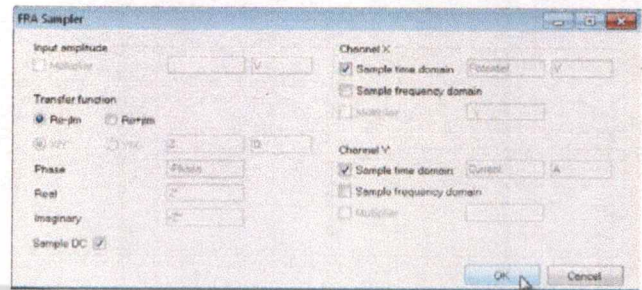


Figure 2 – Sampling the raw data in NOVA

The ten additional signals which represent the raw, measured signals can be used to build additional plots in Nova. To add these signals to the measurement, the FRA sampler window (shown in Figure 2), is used. Details on how to setup the Nova software to sample the raw signals and build the specific plots, can be found in the *Nova Technical note #15 – Raw FRA data* available on www.metrohm-autolab.com.

These plots can be used very conveniently for a clear and correct evaluation of the fulfillment of the linearity and causality conditions (e.g. Lissajous plot, E_{ac} and i_{ac} vs time, see Figure 3, Figure 4, Figure 5 and Figure 6).

Lissajous plot

The Lissajous plot typically shows the AC Potential on X axis and the AC Current on the Y-axis. When the linearity condition is respected, the plot exhibits a central symmetry with respect to the origin of the plot (see Figure 3). The plot shape changes from a straight line to a perfect circle, depending on the phase shift.

A non-linear response can be observed in the Lissajous plot when the central symmetry of the plot is not respected, as illustrated in Figure 4.

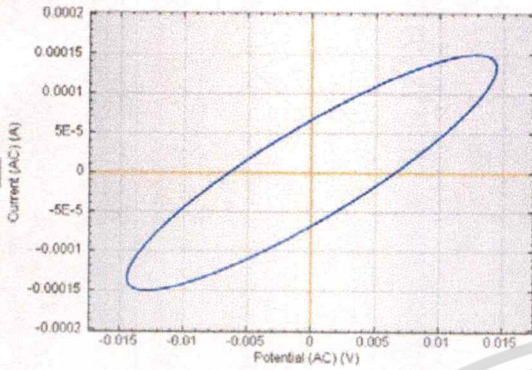


Figure 3 – A typical Lissajous plot for a linear system

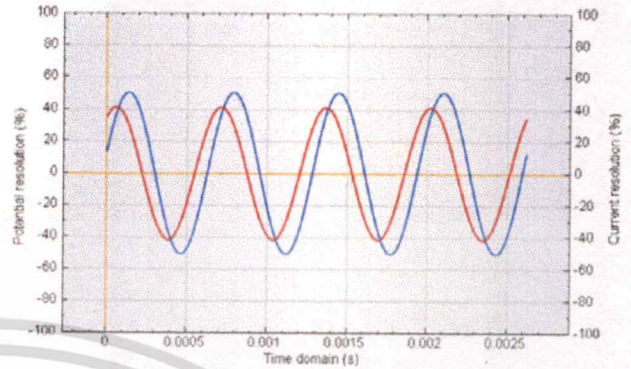


Figure 5 – A resolution plot showing large resolution values for both Potential (AC) and Current (AC)

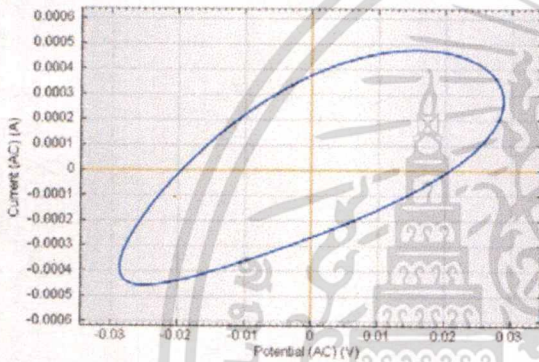


Figure 4 – A Lissajous plot showing a non-linear response

Resolution plot

The resolution plot typically shows the AC Current and/or AC Potential resolution on the Y-axis versus the time domain data on the X-axis. Alternatively, the raw AC Current and/or Potential can be used instead. The resolution plots will indicate if the sensitivity of the system is high enough so that the errors in the processed data will be minimal.

Figure 5 shows an example of resolution plot with enough resolution on both signals (AC current and AC potential). The impedance data derived from these signals will be very accurate. On the other hand, Figure 6 displays low resolution values for the recorded AC current. The impedance data derived from these raw values will be less accurate.

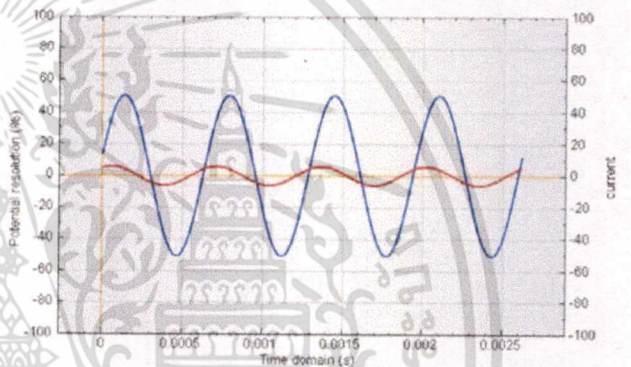


Figure 6 – A resolution plot showing large resolution values for Potential (AC) but low resolution for the Current (AC)

Conclusions

It is clear that analyzing the raw measured signal, besides the classical Nyquist and Bode plots, is a very straightforward and easy to use tool which can help the user to make sure that the linearity, stability and causality conditions are fulfilled and, if necessary, to pinpoint the source or error(s) in an electrochemical impedance measurement.

References

- Bernard Tribollet & Mark E. Orazem: Electrochemical Impedance Spectroscopy, Wiley-Interscience, 2008

Date

20 December 2011



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การใช้งานแบตเตอรี่แบบผสมผสานสำหรับระบบกักเก็บพลังงานในโครงข่ายไฟฟ้า

Hybrid Battery for Grid Support Function

จตุรงค์ ทองแถมแก้ว จตุรัส ศรีกระจิบ จารุพงษ์ หนูเหลือ และชญาณิศ ดันกุล

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1 ซอยฉลองกรุง 1 ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์ 02-739-2478 E-Mail : noah3.jaru@gmail.com

บทคัดย่อ

แนวคิดของระบบแบตเตอรี่แบบผสมผสานที่ถูกนำเสนอในงานวิจัยนี้ หัวใจหลักสำคัญของระบบแบตเตอรี่แบบผสมผสานดังกล่าวคือวงจรสมมูลที่แสดงพฤติกรรมของแบตเตอรี่ ดังนั้นวงจรสมมูลของแบตเตอรี่ตะกั่วกรดและแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนจึงถูกพัฒนาขึ้นมา โดยวิธีการที่ได้นำเสนอเพื่อหาวงจรมูลของแบตเตอรี่คือการอัดประจุไฟฟ้าเพื่อวัดกระแส แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วอิมพีแดนซ์ และความต่างเฟสของแบตเตอรี่ที่ทำการทดสอบ วงจรสมมูลที่นำเสนอได้จากการทดสอบเพื่อตรวจสอบสองทั้งเชิงเวลาและเชิงความถี่ ซึ่งได้มีการนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลจำลองโดยใช้โปรแกรม MATLAB / Simulink และ PSIM จากผลที่ได้สรุปว่าวงจรมูลที่นำเสนอมีความถูกต้องเพียงพอสามารถนำมาใช้ในการออกแบบระบบแบตเตอรี่แบบผสมผสานรวมทั้งระบบการตรวจจับและแสดงผลของแบตเตอรี่ และระบบการอัดประจุในอนาคตต่อไป

คำสำคัญ : วงจรมูล, แบตเตอรี่, ระบบกักเก็บพลังงาน

Abstract

The concept of hybrid battery system is proposed in this thesis. The key of hybrid battery system is the equivalent circuit represented battery characteristics. Therefore, the equivalent circuit of lead acid and lithium ion batteries are developed. The measurement method and tested circuit for getting battery model are also proposed by using charging current terminal voltage and impedance angle of tested batteries. The proposed equivalent circuit are validated under both time and frequency responses using MATLAB/Simulink and PSIM 9.0. The results show that the proposed equivalent circuit is accurate adequately. The results of this study can be used to design the hybrid battery system including battery monitoring and charger system in the future.

Keyword : Equivalent Circuit, Battery, Energy Storage System

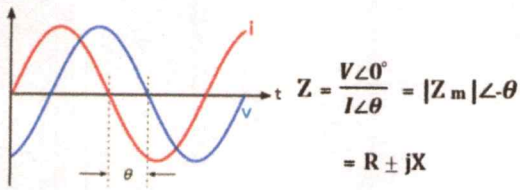
1. บทนำ

ปัจจุบันพลังงานได้เข้ามามีส่วนสำคัญต่อการดำเนินชีวิต การขับเคลื่อนระบบเศรษฐกิจของประเทศและยังมีแนวโน้มความต้องการการใช้พลังงานที่สูงขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งพลังงานไฟฟ้า ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีระบบกักเก็บพลังงานเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและความน่าเชื่อถือของระบบไฟฟ้า แต่เนื่องจากปัจจุบันแบตเตอรี่มีราคาที่สูงส่งผลต่อต้นทุนของระบบกักเก็บพลังงานที่สูงขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นจึงมีแนวคิดในการลดต้นทุนของระบบกักเก็บพลังงานโดยการใช้งานแบตเตอรี่แบบผสมผสาน (Hybrid Battery) คือ การใช้งานร่วมกันของแบตเตอรี่ตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป แต่การนำแบตเตอรี่แต่ละชนิดมาใช้งานแบบผสมผสานนั้นจำเป็นต้องรู้วงจรมูลและพารามิเตอร์ภายในของแบตเตอรี่ เพื่อนำไปสู่การออกแบบและสร้างเครื่องอัดประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่แบบผสมผสานได้อย่างเหมาะสมและมีประสิทธิภาพสูงสุด

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 เทคนิคในการหาจรมูล

การหาจรมูลของลิเทียมไอออนแบตเตอรี่จะใช้หลักการ Electrochemical Impedance Spectroscopy : EIS โดยใช้การกระตุ้นด้วยสัญญาณแรงดันไฟฟ้ารูปไซน์ (sine wave) เพื่อตรวจสอบสองของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของแบตเตอรี่และกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านแบตเตอรี่ในช่วงความถี่ที่ทดลอง จะได้ว่ารูปคลื่นสัญญาณแรงดันและกระแสที่มีมุม Phase Shift กัน ดังรูปที่ 1 และผลที่ได้นำมาคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์และค่าความต่างเฟสของแต่ละความถี่จากนั้นใช้ Nyquist plot เป็นตัวช่วยในการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่อยู่ภายในแบตเตอรี่ และวงจรมูลของแบตเตอรี่

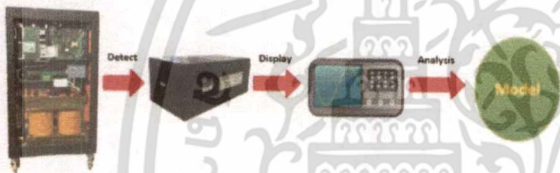


รูปที่ 1 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันและกระแส

3. การทดลอง

3.1 การทดลองเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ทางเวลา

ทำการทดลองโดยการอัดและคายประจุแบบพัลส์ชาร์จ (Pulse Charge) ที่พิกัดกระแสต่างๆ เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของแบตเตอรี่ โดยแบตเตอรี่ที่ใช้ทำการทดลองพิกัด 40 Ahr, Nominal Voltage 27.6 Vdc ได้ดังรูปที่ 2 จากนั้นนำผลการทดลองที่ได้ไปวิเคราะห์หาจรรยาบรรณและพารามิเตอร์ภายในแบตเตอรี่



รูปที่ 2 การหาจรรยาบรรณของแบตเตอรี่โดยวิธีการวิเคราะห์

ผลตอบสนองเชิงเวลา

ทำการทดลองโดยการปรับเปลี่ยนค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของแบตเตอรี่และนำผลการทดลองที่ได้มาทำการหาค่าพารามิเตอร์จะได้ค่าดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ขนาดแรงดันไฟฟ้ากับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในวงจรสมมูล

V(V)	R0(Ω)	R1+R2 (Ω)	Ratio(R1+R2)/R0
23	0.0148	0.0153	1.034
24	0.0135	0.0110	0.815
25	0.0113	0.0040	0.356
26	0.0103	0.0028	0.268
27	0.0113	0.0028	0.244
28	0.0105	0.0043	0.405
29	0.0110	0.0035	0.318
30	0.0110	0.0040	0.364
31	0.0115	0.0035	0.304
32	0.0088	0.0027	0.303

จะพบว่าเมื่อแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของแบตเตอรี่มีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าพารามิเตอร์ R₀ และ R₁+R₂ จะมีค่าลดลงและเมื่อนำค่า R₁+R₂/R₀ มาพล็อตเปรียบเทียบความสัมพันธ์กับแรงดันที่ขั้วของแบตเตอรี่จะเห็นว่าในช่วงแรกนั้นอัตราส่วนลดลงเรื่อยๆ ส่วนช่วงที่สองนั้นค่าอัตราส่วนนั้นค่อนข้างคงที่อยู่ที่ประมาณ 0.3-0.4 เท่า

ทำการทดลองโดยการอัดประจุ (Charge) แบตเตอรี่ที่ค่ากระแสต่างๆ คือ 1C (40A) , 2C (80A) และ 3C (120A) ที่แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่เท่ากันและนำข้อมูลที่ได้ไปทำการ Curve fitting แบบฟังก์ชันเอ็กซ์โพเนนเชียล 2 พจน์ แล้วทำการหาค่าพารามิเตอร์ภายในแบตเตอรี่ ได้ดังตารางที่ 2

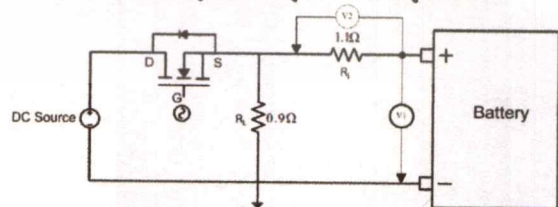
ตารางที่ 2 ค่าพารามิเตอร์ภายในแบตเตอรี่ที่กระแสอัดประจุที่ 1C, 2C และ 3C

Charge (C-rate)	Time Constant (s)		R(mΩ)	
	T ₁	T ₂	R ₀	R ₁ +R ₂
1C	6.88	80,321	9.75	4.50
2C	6.76	78,431	9.63	2.99
3C	6.77	33,467	9.42	2.83

จากผลการทดลองพบว่าทำการอัดประจุที่กระแสต่างๆ ค่าคงที่เวลาหนึ่ง (Time constant: T₁) จะค่อนข้างคงที่ไม่ได้แปรผันตามกระแสที่เพิ่มขึ้น ส่วนค่าคงที่เวลาสอง (Time constant: T₂) R₀ และ R₁+R₂ มีค่าลดลงเมื่อกระแสการอัดประจุเพิ่มขึ้น

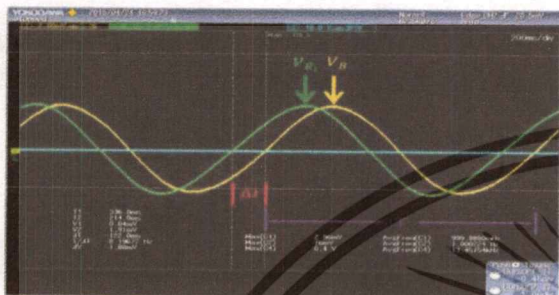
3.2 การทดลองเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ทางความถี่

ทำการทดลองโดยวิธีการอัดประจุแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน nominal voltage 3.3 V, 20Ahr ในช่วงความถี่ 20 mHz – 1000 Hz แต่เนื่องจากไม่สามารถใช้ แหล่งจ่ายสัญญาณไซน์จ่ายสัญญาณเข้าไปในแบตเตอรี่โดยตรงได้เนื่องจากภายในแบตเตอรี่นั้นมีแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงอยู่อีกสาเหตุหนึ่งคือผลของการกระเพื่อมของแรงดันที่ใช้ในการอัดประจุแบตเตอรี่นั้นมีผลต่ออายุการใช้งานของแบตเตอรี่ดังกล่าว จึงจำเป็นที่จะต้องออกแบบวงจรที่ใช้ในการทดสอบแบตเตอรี่เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ทางความถี่ เพื่อให้ได้ผลการทดลองที่ถูกต้องและถูกหลักการ ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 วงจรทดสอบแบตเตอรี่

โดยหลักการในการออกแบบนั้นจะใช้มอสเฟตควบคุมการไหลของกระแสให้เป็นสัญญาณไซน์รวมอยู่กับสัญญาณกระแสตรง ส่วนในการตรวจจับกระแสนั้นจะใช้การวัดรูปคลื่นแรงดันคร่อมตัวต้านทาน R_s และวัดสัญญาณรูปคลื่นแรงดันคร่อมแบตเตอรี่ เพื่อนำมาคำนวณหาค่าความต่างเฟสและค่าอิมพีแดนซ์ภายในของแบตเตอรี่ในแต่ละความถี่ ดังรูปที่ 3



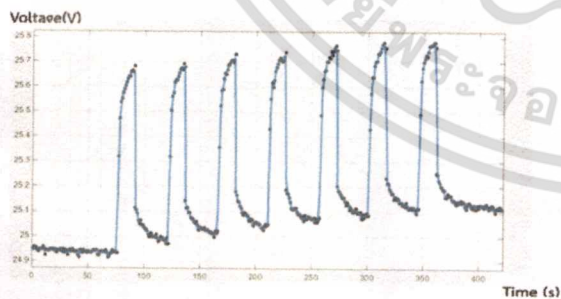
รูปที่ 3 ตัวอย่างรูปคลื่นสัญญาณที่ใช้ในการคำนวณหาอิมพีแดนซ์

4. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

การทดสอบแบตเตอรี่เพื่อหาพารามิเตอร์และวงจรสมมูลของแบตเตอรี่จะใช้วิธีการวิเคราะห์ 2 วิธีด้วยกัน คือ วิธีการวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงเวลา (Time Domain Response) และวิธีการวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงความถี่ (Frequency Domain Response)

4.1 วิธีการวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงเวลา

ทำการทดลองด้วยการอัดประจุ (Charge) แบตเตอรี่ที่ติดตั้งกระแส IC หรือ 40 แอมแปร์ ที่อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส โดยอัดประจุเป็นพัลส์อัดประจุแบตเตอรี่ 15 วินาที และพัก 30 วินาที ทำเรื่อยๆ แล้ววัดแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากนั้นจึงนำข้อมูลแรงดันดังกล่าวมาพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับเวลาจะได้กราฟดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 กราฟแรงดันในขณะทำการอัดประจุ

นำข้อมูลที่ได้มาทำการ Curve fitting แบบฟังก์ชันเอ็กซ์โพเนนเชียลโดยใช้โปรแกรม MATLAB และเปรียบเทียบค่า R^2 จะพบว่าการ Curve fitting แบบฟังก์ชันเอ็กซ์โพเนนเชียล 2 พจน์จะให้กราฟที่มีความใกล้เคียงกับค่าข้อมูลจากการทดลองมากกว่าการ Curve fitting แบบฟังก์ชันเอ็กซ์โพเนนเชียล 1 พจน์ ทำให้สรุปได้ว่าวงจรสมมูลที่สามารถอธิบายพฤติกรรมของแบตเตอรี่ได้ก็คือวงจรสมมูลที่ประกอบด้วย R และ C ขนานกัน 2 ชุด ซึ่งมีค่า Time Constant 2 ค่า แต่วิธีการวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงเวลา (Time Domain) ไม่สามารถหาค่าพารามิเตอร์บางค่าได้ จึงต้องใช้วิธีการวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงความถี่ (Frequency Domain) เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ต่อไป

4.2 วิธีการวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงความถี่

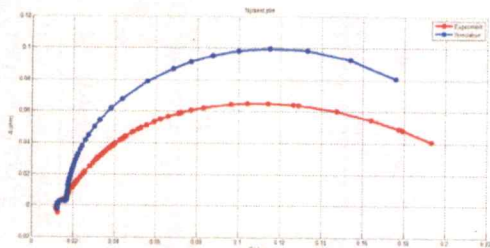
ทำการทดลองด้วยการอัดประจุแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน nominal voltage 3.3 V , 20 Ahr ในช่วงความถี่ 20mHz – 1000Hz แล้วทำการวัดสัญญาณรูปคลื่นแรงดันคร่อมตัวต้านทาน R_s และวัดสัญญาณรูปคลื่นแรงดันคร่อมแบตเตอรี่ เพื่อนำมาคำนวณหาค่าความต่างเฟสและค่าอิมพีแดนซ์ภายในของแบตเตอรี่ในแต่ละความถี่ที่ได้ทำการวัด จากผลการทดลองนำมาทำ Nyquist Plot ได้ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 Nyquist Plot

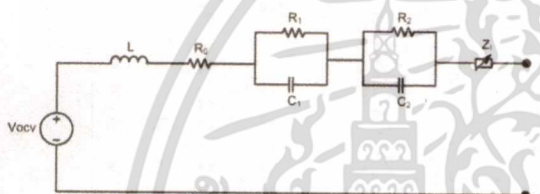
Nyquist Plot ที่ได้จะพบว่าเกิดรูปครึ่งวงกลม 2 ลูก โดยที่ลูกใหญ่เกิดที่ความถี่ค่า 20mHz – 20Hz ซึ่งเป็นผลของ R_2 , C_2 เป็นผลทำให้กระแสหน้าหน้าแรงดันไฟฟ้า ส่วนครึ่งวงกลมลูกเล็กเกิดที่ความถี่สูง 20Hz – 300Hz ซึ่งเป็นผลของ R_1 และ C_1 ทำให้กระแสหน้าหน้าแรงดันไฟฟ้า นอกจากนี้ยังเกิดแรงดันไฟฟ้านำหน้ากระแสซึ่งเป็นผลของ L ในช่วงความถี่ 400 – 1000Hz

นำผลที่ได้จากการทดลองไปเปรียบเทียบกับผลการ Simulation จากโปรแกรม PSIM ทำให้ได้ดังรูปที่ 6



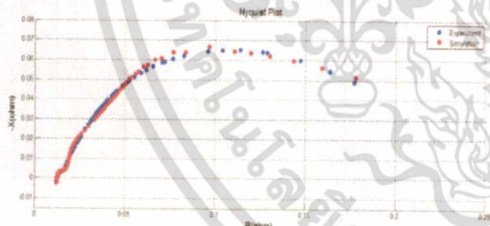
รูปที่ 6 เปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการ Simulation จาก PSIM

จะพบว่าผลการทดลองจริงมีลักษณะรูปกราฟคล้ายคลึงกับผลการ simulation แต่ค่าในแต่ละความถี่มีความคลาดเคลื่อนไปจากผลการทดลองจริง ซึ่งเหตุนี้ทำให้ทราบว่าต้องมีค่าอิมพีแดนซ์ตัวอื่นต่ออยู่ด้วย ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้ผลการ Simulation มีค่าคลาดเคลื่อนไปจากผลการทดลองจริง ทำให้สามารถวิเคราะห์เป็นวงจรสมมูลของแบตเตอรี่ได้ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 วงจรสมมูลของลิเทียมไอออนแบตเตอรี่

โดย Z, คืออิมพีแดนซ์ที่อยู่ในฟังก์ชันของความถี่และต่ออนุกรมกับวงจรสมมูลแบบ Two-RC-L Branch Equivalent แล้วทำให้ผลการ simulation มีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองมากขึ้น ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 ผลการทดลองจริงเทียบกับผลการ Simulation

5.สรุป

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการเทคนิคในการหาวงจรมูลของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน โดยแบ่งการทดลองเป็น การทดลองเพื่อหาคะตอบสนองทางเวลา (Time domain) และ การทดลองเพื่อหาคะตอบสนองเชิงความถี่ (Frequency domain) จากผลการทดลองทำให้ทราบว่าวงจรมูลของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนประกอบไปด้วยตัวต้านทานขนานกับตัวเก็บประจุที่ต่ออนุกรมกันอยู่ 2 ชุด ต่อ

อนุกรมอยู่กับตัวต้านทานและค่าอิมพีแดนซ์ที่แปรผันกับความถี่ ซึ่งสามารถทำการพัฒนาต่อยอดเพิ่มเติม เพื่อนำไปลดต้นทุนในส่วน of ระบบกักเก็บพลังงานที่เป็นแบตเตอรี่ในระบบโครงข่ายไฟฟ้า และพัฒนาออกแบบต่อไปในส่วน of เครื่องอัดประจุสำหรับไฮบริดแบตเตอรี่ (Hybrid Battery Charger) เพื่อที่จะสามารถใช้กับไฮบริดแบตเตอรี่ ทั้งนี้เนื่องจากแบตเตอรี่ดังกล่าวไม่สามารถใช้เครื่องอัดประจุแบบทั่วไปในการอัดประจุได้จึงจำเป็นต้องมีการศึกษาและพัฒนาต่อไป และเมื่อมีไฮบริดแบตเตอรี่แล้ว และมีเครื่องอัดประจุสำหรับไฮบริดแบตเตอรี่ ส่วนต่อไปที่จำเป็นสำหรับการไฮบริดแบตเตอรี่คือระบบ BMS (Battery Monitoring System) ซึ่งเป็นระบบที่คอยบริหารจัดการและตรวจสอบประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ ซึ่งทั้งหมดที่กล่าวมาส่วนแล้วแต่ต้องอาศัยวงจรสมมูลทั้งสิ้น

6.กิตติกรรมประกาศ

บทความนี้เป็นส่วนหนึ่งของงานวิจัย ที่ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัย จากกองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน สำนักนโยบายและแผนพลังงาน (สนพ.) การทรวงพลังงาน ประจำปีงบประมาณ 2557 ขอขอบคุณ รศ.ดร.สุรินทร์ คำผวย และ รศ.ประกาย ไพธูวรรณ รวมถึงทุกท่านในห้องปฏิบัติการ Renewable Energy Application Laboratory (REAL) ที่คอยช่วยเหลือ จนการวิจัยนี้สำเร็จสุด่วงไปได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] Ahmad RAHMOUN; Helmuth BIECHL, "Modelling of Li-ion batteries using equivalent circuit diagrams" *University of Applied Sciences Kempten*
- [2] Anand Ramamurthy; Subhashish Bhattacharya, "Advanced Lithium Ion Battery Modeling and Power Stage Integration Technique" *North Carolina*
- [3] Marie-Georges Olivier; Mireille Poelman, "Use of Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) for the Evaluation of Electrocoatings Performances" *University of Mons, Materials Science Department, Materia Nova Research Centre, Mons, Belgium*

ประวัติผู้เขียน



ชื่อ-นามสกุล นายจตุรงค์ ทองแกมแก้ว
 วัน เดือน ปีเกิด 7 กรกฎาคม 2534
 ที่อยู่ 43/1 หมู่ 2 ตำบลท่าช้าง อำเภอบางกล่ำ
 จังหวัดสงขลา 90110

ประวัติการศึกษา

ปีการศึกษา 2553 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนหาดใหญ่วิทยาลัย2
 ปีการศึกษา 2557 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 ฝึกงานภาคฤดูร้อน บริษัท เอสซีจี ปูนซีเมนต์ไทย จำกัด (มหาชน)
 ระหว่างวันที่ 1 เมษายน ถึง 30 พฤษภาคม 2557



ชื่อ-นามสกุล นายจตุรัส ศรีกระจิบ
 วัน เดือน ปีเกิด 13 ตุลาคม 2535
 ที่อยู่ 199/8 หมู่บ้านเดชนิ4 ถนนสุขจิต ตำบลประจวบ
 อำเภอเมือง จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ 77000

ประวัติการศึกษา

ปีการศึกษา 2553 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนประจวบวิทยาลัย
 ปีการศึกษา 2557 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 ฝึกงานภาคฤดูร้อน การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค(Provincial Electricity Authority : PEA)
 แผนกปฏิบัติการ และบำรุงรักษา
 ระหว่างวันที่ 1 เมษายน ถึง 30 พฤษภาคม 2557



ชื่อ-นามสกุล นายจรรพงษ์ หนูเหลือ
 เดือน ปีเกิด 21 มิถุนายน 2535
 ที่อยู่ 163 หมู่ 6 ตำบลบ้านโพธิ์
 อำเภอเมือง จังหวัดตรัง 92000

ประวัติการศึกษา

ปีการศึกษา 2553 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนวิเชียรมาตุ

ปีการศึกษา 2557 สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ฝึกงานภาคฤดูร้อน บริษัท ซีโน-ไทย เอ็นจิเนียริง แอนด์ คอนสตรัคชั่น จำกัด (มหาชน)

โครงการรถไฟฟ้าสายสีน้ำเงิน

ระหว่างวันที่ 1 เมษายน ถึง 30 พฤษภาคม 2557



ชื่อ-นามสกุล นางสาวชฎานิศ ตันกุล
 วัน เดือน ปีเกิด 6 มีนาคม 2536
 ที่อยู่ 30/1 ถนนชลระอุ ตำบลเขานิวเวศน์
 อำเภอเมือง จังหวัดระนอง 85000

ประวัติการศึกษา

ปีการศึกษา 2553 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนพิชัยรัตนาคาร

ปีการศึกษา 2557 สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ฝึกงานภาคฤดูร้อน Tokai University, Japan (Kanagawa)

ระหว่างวันที่ 21 เมษายน ถึง 18 พฤษภาคม 2557