

ระบบติดตามสถานะแบตเตอรี่เชิงรุกสำหรับระบบจ่ายไฟกระแสตรงในสถานีไฟฟ้าย่อย
PROACTIVE BATTERY MONITORING SYSTEM FOR DC DISTRIBUTION IN
A SUBSTATION



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ปีการศึกษา 2563

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

PROACTIVE BATTERY MONITORING SYSTEM FOR DC DISTRIBUTION IN
A SUBSTATION



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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

ปีการศึกษา 2563

ระบบติดตามสถานะแบตเตอรี่เชิงรุกสำหรับระบบจ่ายไฟกระแสตรงในสถานีไฟฟ้าย่อย

PROACTIVE BATTERY MONITORING SYSTEM FOR DC DISTRIBUTION IN
A SUBSTATION



อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน **รศ.ดร. สุรินทร์ คำฝอย** ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องยกย่องเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
อาจารย์ ชัยทัต มณีอินทร์ เจ้าของเอกสาร

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

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

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2563

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง ระบบติดตามสถานะแบตเตอรี่เชิงรุกสำหรับระบบจ่ายไฟกระแสตรงในสถานีไฟฟ้าย่อย

ผู้จัดทำ

1. นางสาวนฤมา ใจอินทร์
2. นางสาวปัทมา รัตน์เพ็ชร
3. นายวิษธร ศรีตุลา
4. นายอหามัตชูกี สะอี่



.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุรินทร์ คำฝอย)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

ระบบติดตามสถานะแบตเตอรี่เชิงรุกสำหรับระบบจ่ายไฟกระแสตรงในสถานีไฟฟ้าย่อย

นางสาว นฤมา	ใจอินทร์	
นางสาว ปัทมา	รัตน์เพชร	
นาย วิษธร	ศรีตุลา	
นาย อาหามัดซูกี	สะอิ	
รศ.ดร. สุรินทร์	คำฝอย	อาจารย์ที่ปรึกษา
อาจารย์ชัยทัต	มณีอินทร์	อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2563

บทคัดย่อ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการศึกษาระบบติดตามสถานะแบตเตอรี่เชิงรุกสำหรับระบบส่งจ่ายไฟฟ้กระแสตรงในสถานีไฟฟ้าย่อย ซึ่งเทคนิคที่ถูกนำมาใช้ในการพัฒนาระบบติดตามสถานะแบตเตอรี่ คือ การออกแบบฟังก์ชันทำนายระยะเวลาที่แบตเตอรี่เสื่อมสภาพ โดยการรวบรวมข้อมูลจากสถานะการใช้งานจริงของแบตเตอรี่ในสถานีไฟฟ้าย่อย ประกอบด้วย ค่าแรงดันลอยของแบตเตอรี่ ณ ขณะนั้นและค่าแรงดันลอยพิกัดของแบตเตอรี่, อุณหภูมิที่ขั้วแบตเตอรี่, อุณหภูมิแวดล้อมและค่ากระแสขณะที่แบตเตอรี่ถูกอัดประจุ ณ แรงดันลอย พร้อมทั้งออกแบบสมการถดถอยเพื่อทำนายค่าความต้านทานภายในแบตเตอรี่ซึ่งเป็นตัวแปรที่สามารถนำมาคำนวณหาสถานะเสื่อมสภาพของแบตเตอรี่ โดยสมการถดถอยนี้สามารถนำไปใช้เป็นส่วนหนึ่งของฟังก์ชันการติดตามสถานะแบตเตอรี่ในเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่ได้ นอกจากนี้กระบวนการดังกล่าวยังสามารถบันทึกข้อมูลจริงและข้อมูลที่ได้จากการทำนายจากสมการถดถอย เพื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ถูเก็บบันทึกไว้ก่อนหน้าในคอมพิวเตอร์ประมวลผลกลาง ซึ่งจะนำไปสู่การบำรุงรักษาเชิงรุกสำหรับระบบส่งจ่ายไฟฟ้กระแสตรงในสถานีไฟฟ้าย่อยเพื่อหลีกเลี่ยงความเสียหายร้ายแรงที่อาจเกิดขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

PROACTIVE BATTERY MONITORING SYSTEM FOR DC DISTRIBUTION IN A SUBSTATION

Ms.Narucha	Jai-in	
Ms.Pattama	Ratpet	
Mr.Wisathon	Sritula	
Mr.Ahamadsukee	Sa-e	
Assc.Prof.Dr.Surin	Khomfoi	Advisor
Mr.Chaitat	Maneein	Advisor

ABSTRACT

A study of the proactive battery monitoring system for a DC distribution system in a substation is presented in the thesis. The developed technique of a battery monitoring system is included battery deteriorated time prediction function by collecting data from actual usage conditions of battery in a substation. The battery data consist of the float voltage of the battery and the rated float voltage, the temperature at the battery terminals, and ambient temperature along with the current while the battery is charged at the float voltage. The regression model is also developed to predict the battery internal resistance: this battery internal resistance can be used to calculate battery deteriorated condition. The regression model can then be implemented as a battery monitoring function in a charger. In addition, the proposed method can store the actual data and predictive data from the developed regression model to compare with historical data in a server computer. These stored data can use for proactive maintenance of a dc distribution in a substation to avoid catastrophically damage.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

Forbidden to modify the content, and ^{||} cite the document when use.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดี โดยมีรองศาสตราจารย์ ดร.สุรินทร์ คำฝอย และอาจารย์ชัยทัต มณีอินทร์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาในโครงการวิจัยนี้ ให้การสนับสนุนทั้งทางด้านวิชาการ ด้านเทคนิคและด้านอุปกรณ์ แนะนำแนวทางในการทำโครงการให้ดำเนินไปในทางที่ถูกต้องและสำเร็จด้วยดี ทางคณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณดร.สมภพ ผลไม้, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ฝ่ายสถานที่ของทางสถาบัน และห้องปฏิบัติการ ฌ อาคารระบบไฟฟ้าอัจฉริยะที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือและวัสดุอุปกรณ์ ต่างๆที่จำเป็นต้องใช้ในโครงการนี้

ขอขอบคุณนายปณณวัฒน์ เพียรจัด ที่ให้คำชี้แนะที่เป็นประโยชน์พร้อมให้ความรู้ทั้ง ยังให้ความช่วยเหลือทุกครั้งด้วยความเต็มใจ ทำให้โครงการนี้ได้ดำเนินมาจนถึงตอนจบด้วยดีที่มีส่วน เกี่ยวข้องกับการทำโครงการวิจัยครั้งนี้

สุดท้ายนี้ทางคณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่คอยสนับสนุน ส่งเสริมทางการศึกษาและทุกๆด้าน จนสามารถประสบความสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี จึงขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

คณะผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

Forbidden to modify the content, and ^{III} cite the document when use.

สารบัญ

บทคัดย่อ.....	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญ (ต่อ).....	V
สารบัญรูปภาพ.....	VI
สารบัญรูปภาพ (ต่อ).....	VII
สารบัญตาราง.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	4
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ.....	4
1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงการ.....	5
1.5 แผนการดำเนินโครงการ.....	6
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย.....	7
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	8
2.1 ระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรง (DC-DISTRIBUTION SYSTEM).....	8
2.2 แบตเตอรี่ตะกั่วกรด.....	9
2.3 ระบบติดตามสถานะแบตเตอรี่ (BATTERY MONITORING SYSTEM: BMS).....	18
2.4 การซ่อมบำรุงเชิงรุก (PROACTIVE MAINTENANCE).....	20
2.5 การตรวจวัดและวิเคราะห์ค่าความต้านทานภายในของแบตเตอรี่ด้วยวิธี AC MEASUREMENT ที่ ความถี่สูง (1 KHZ).....	21
2.6 สมการถดถอย (REGRESSION).....	25
2.7 การวิเคราะห์ฟังก์ชันที่เหมาะสมกับข้อมูล 2 มิติ (CURVE FITTING).....	26
2.8 ตัวแปรทางสถิติ.....	29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามนำไปให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

สารบัญ (ต่อ)

บทที่ 3 การออกแบบการทดลอง.....	31
3.1 การทำแบบสำรวจลักษณะความต้องการระบบติดตามสถานะแบตเตอรี่ในสถานีไฟฟ้าย่อย ..	31
3.2 การออกแบบระบบติดตามสถานะแบตเตอรี่	31
3.3 การออกแบบฟังก์ชันการทำงานายระยะเวลาที่แบตเตอรี่เกิดการเสื่อมสภาพ	37
3.5 การออกแบบฟังก์ชันวิเคราะห์สาเหตุการเสื่อมสภาพของแบตเตอรี่	44
บทที่ 4 การทดสอบและผลการทดสอบ	45
4.1 ผลการออกแบบระบบติดตามสถานะแบตเตอรี่.....	45
4.2 ผลการออกแบบฟังก์ชันการทำงานายระยะเวลาที่แบตเตอรี่เกิดการเสื่อมสภาพ	49
4.3 ผลการออกแบบฟังก์ชันวิเคราะห์สาเหตุการเสื่อมสภาพของแบตเตอรี่	62
บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินโครงการ	64
5.1 สรุปผลการดำเนินงานโครงการ	64
5.2 ปัญหาและข้อจำกัด	65
5.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา	65
เอกสารอ้างอิง.....	66
ภาคผนวก.....	67
ภาคผนวก ก.....	68
ภาคผนวก ข.....	73
ภาคผนวก ค.....	78

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 1.1 125V _{DC} SYSTEM KEY DIAGRAM	2
รูปที่ 1.2 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าซ่อมบำรุงเครื่องมือการผลิตต่อกำลังแรงม้า (EPRI's,2020)	3
รูปที่ 2.1 การทำงานของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรง	8
รูปที่ 2.2 ปฏิกริยาไฟฟ้าเคมีในแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด	11
รูปที่ 2.3 A) วงจรสมมูลแบบ ONE-RC BRANCH.....	13
รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสกับเวลาของ CONSTANT CURRENT CHARGING	14
รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสกับเวลาของ CONSTANT VOLTAGE CHARGING	15
รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสกับเวลาของ DUAL STEP CHARGING	16
รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุการใช้งานกับความจุของแบตเตอรี่ที่อุณหภูมิต่างกัน.....	17
รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างรอบการใช้งานและความจุของแบตเตอรี่ที่อัตราการอัดประจุและคายประจุต่างกัน	18
รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของการคายประจุและรอบการใช้งานของแบตเตอรี่.....	18
รูปที่ 2.10 ระบบติดตามสถานะแบตเตอรี่	19
รูปที่ 2.11 AC MEASUREMENT DIAGRAM.....	21
รูปที่ 2.12 ค่าต่างเฟสระหว่างสัญญาณกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า.....	22
รูปที่ 2.13 COLE-COLE PLOT	23
รูปที่ 2.14 COLE-COLE PLOT องค์ประกอบของวงจรสมมูลแบตเตอรี่ตะกั่วกรด.....	24
รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ของฟังก์ชัน $Y = 0.5x + 0.5$	27
รูปที่ 2.16 ความสัมพันธ์ของฟังก์ชัน $Y = 0.5E^{0.5x}$	28
รูปที่ 2.17 ความสัมพันธ์ของฟังก์ชัน $Y = 0.1\text{LOG}(0.1x) + 0.1$	28
รูปที่ 3.1 SCHEMATIC DIAGRAM เซ็นเซอร์ตัวส่งและตัวรับ	32
รูปที่ 3.2 แผ่นวงจรพิมพ์ของวงจรที่ออกแบบ	33
รูปที่ 3.3 วงจรสำหรับการปรับเทียบเซ็นเซอร์วัดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง	34
รูปที่ 3.4 วงจรสำหรับการปรับเทียบเซ็นเซอร์วัดกระแสไฟฟ้ากระแสตรง	35
รูปที่ 3.5 BATTERY ANALYZER MODEL BA6011	38
รูปที่ 3.6 วงจรสมมูลของแบตเตอรี่ ONE-RC BRANCH CIRCUIT	39
รูปที่ 3.7 การจำลองวงจรสมมูลแบตเตอรี่เพื่อวัดค่าความต้านทานภายใน	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด

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

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

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่ 3.8	วงจรวินิจฉัยความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานภายในแบตเตอรี่กับสถานะการณ้เก็บประจุ	41
รูปที่ 3.9	วิธีการเก็บข้อมูล SOH ของแบตเตอรี่	42
รูปที่ 3.10	วงจรถ่วงลักษณะการใช้งานแบตเตอรี่ในระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง	43
รูปที่ 4.1	แผนภาพระบบติดตามสถานะแบตเตอรี่	45
รูปที่ 4.2	FLOW CHART หลักการทำงานของระบบติดตามสถานะแบตเตอรี่	46
รูปที่ 4.3	หน้าจอแสดงผล BATTERY MONITORING	47
รูปที่ 4.4	หน้าจอแสดงผล NOTIFICATION	47
รูปที่ 4.5	หน้าจอแสดงผล CALCULATE FUNCTION	48
รูปที่ 4.6	หน้าจอแสดงผล DATA STORAGE	48
รูปที่ 4.7	สัญญาณที่ BATTERY ANALYZER จ่ายออกมา	54
รูปที่ 4.8	สัญญาณผลตอบสนองของแรงดันวงจรรวมเทียบกับสัญญาณกระแส	54
รูปที่ 4.9	ค่าพารามิเตอร์ที่วัดได้จากเครื่อง BATTERY ANALYZER	55
รูปที่ 4.10	ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานภายในแบตเตอรี่กับ %SoH	55
รูปที่ 4.11	ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานภายในแบตเตอรี่กับ %SOC	56
รูปที่ 4.12	ค่าความต้านทานภายในที่ได้จากการเก็บข้อมูลจริงและจากการทำนายโดย	59
รูปที่ 4.13	ค่าความต้านทานภายในที่ได้จากการเก็บข้อมูลจริงและจากการทำนายโดย	60
รูปที่ 4.14	ค่าความต้านทานภายในที่ได้จากการเก็บข้อมูลจริงและจากการทำนายโดย	61
รูปที่ 4.15	หน้าจอแสดงผลการวิเคราะห์สาเหตุที่ทำให้แบตเตอรี่เสื่อมสภาพ	63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

Forbidden to modify the content, and ^{VII} cite the document when use.

สารบัญตาราง

ตารางที่ 1.1	แผนการดำเนินโครงการงาน	6
ตารางที่ 3.1	ค่าเปรียบเทียบเซ็นเซอร์วัดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง	34
ตารางที่ 3.2	ค่าเปรียบเทียบเซ็นเซอร์วัดกระแสไฟฟ้ากระแสตรง	35
ตารางที่ 3.3	ค่าเปรียบเทียบเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ	36
ตารางที่ 3.4	ตัวแปรสำหรับการศึกษาศักยภาพการถดถอย	37
ตารางที่ 3.5	การศึกษาค่าพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่ที่ย่านความถี่ต่างๆ	39
ตารางที่ 3.6	การศึกษาผลของความถี่ที่มีต่อ COLE-COLE PLOT	40
ตารางที่ 4.1	ผลของการศึกษาค่าพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่ที่ย่านความถี่ต่างๆ	49
ตารางที่ 4.2	ผลของการศึกษาผลของความถี่ที่มีต่อ COLE-COLE PLOT	52
ตารางที่ 4.3	ลักษณะข้อมูลตัวอย่าง 24 ชุดข้อมูล	56
ตารางที่ 4.4	การศึกษาค่าสหสัมพันธ์ของกลุ่มตัวแปร	58
ตารางที่ 4.5	ค่าทางสถิติของโมเดลสมการถดถอยแบบเชิงเส้น	59
ตารางที่ 4.6	ค่าทางสถิติของโมเดลสมการถดถอยแบบไม่เชิงเส้น QUADRATIC RESPONSE SURFACE MODEL 10 พจน์	60
ตารางที่ 4.7	ค่าทางสถิติของโมเดลสมการถดถอยแบบไม่เชิงเส้น QUADRATIC RESPONSE SURFACE MODEL 7 พจน์	61
ตารางที่ 4.8	เปรียบเทียบความเหมาะสมของโมเดลสมการถดถอย	62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่หาโครงการ

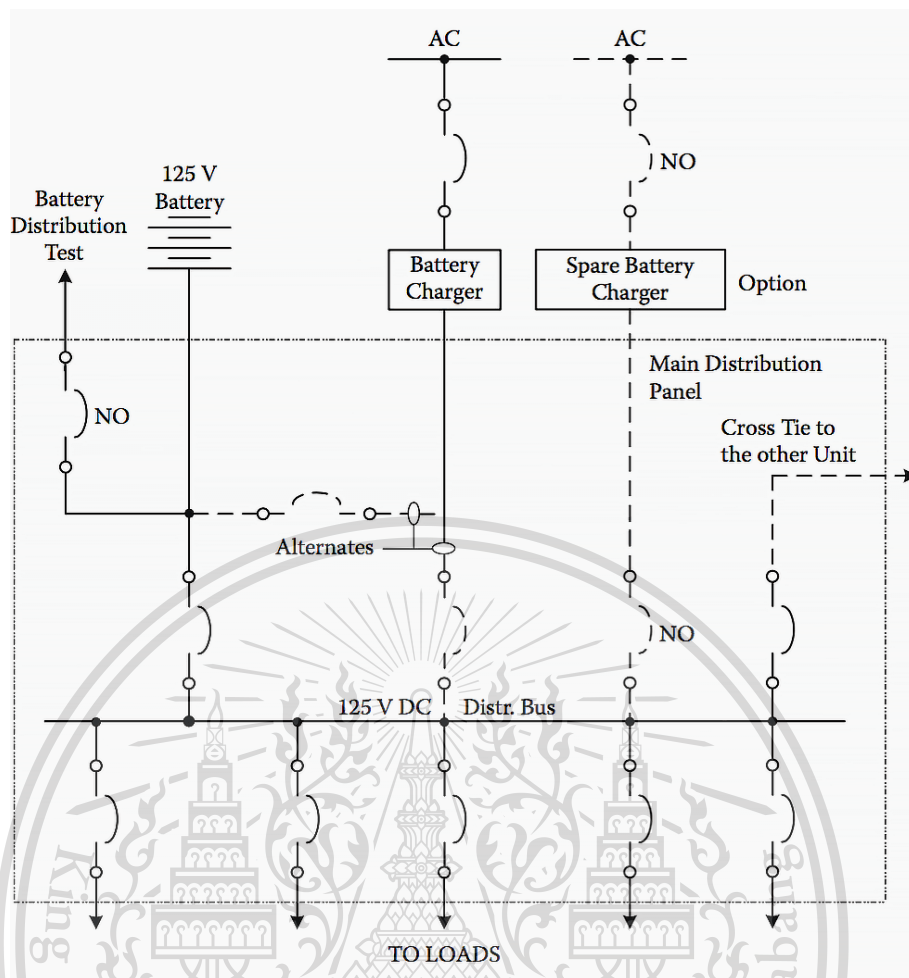
ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของประเทศไทยประกอบด้วยองค์ประกอบหลายภาคส่วนหนึ่งในองค์ประกอบสำคัญ คือ สถานีไฟฟ้าย่อย ซึ่งทำหน้าที่ปรับระดับแรงดันไฟฟ้าให้เหมาะสมกับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแต่ละระบบ อีกทั้งยังเป็นจุดติดตั้งและควบคุมอุปกรณ์ป้องกันระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าอีกด้วย ดังนั้นหากสถานีไฟฟ้าย่อยเกิดความผิดปกติ (Fault) ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่เชื่อมต่ออยู่กับสถานีไฟฟ้าย่อยนั้นจะเกิดความผิดปกติไปด้วย และอาจสร้างความเสียหายต่อทรัพย์สินรวมถึงชีวิตของผู้คนได้

ด้วยหน้าที่และความสำคัญของสถานีไฟฟ้าย่อยข้างต้น จึงทำให้ภายในสถานีไฟฟ้าย่อยประกอบไปด้วยองค์ประกอบหลายอย่างที่ทำหน้าที่ควบคุมและป้องกันให้สถานีไฟฟ้าย่อยมีความปลอดภัยและน่าเชื่อถือ อาทิ ไฟฉุกเฉิน (Emergency Lighting) วงจรควบคุมอัตโนมัติ (Automated Control Circuit) รวมทั้งระบบป้องกัน (Protection System) ซึ่งทำหน้าที่ในการตัดอุปกรณ์หลักออกขณะเกิดการลัดวงจรในสายส่ง หรือในระบบจำหน่าย หรืออุปกรณ์ภายในสถานีเกิดความเสียหาย โดยหนึ่งในระบบที่สำคัญต่ออุปกรณ์ควบคุมและระบบป้องกันความปลอดภัยของสถานีไฟฟ้าย่อย คือ ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรง (DC Distribution System) ซึ่งมีหน้าที่จ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงให้แก่อุปกรณ์ต่าง ๆ ดังที่กล่าวมาข้างต้น โดยมีลักษณะการต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าและวงจรไฟฟ้าของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรง ดังรูปที่ 1.1 จากไดอะแกรมจะเห็นว่าแบตเตอรี่เป็นองค์ประกอบหนึ่งที่มีความสำคัญสำหรับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงในสถานีไฟฟ้าย่อย โดยทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าสำรองเมื่อเกิดเหตุผิดปกติของแหล่งจ่ายไฟฟ้าหลัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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



รูปที่ 1.1 125V_{DC} system key diagram

(ELECTRICAL ENGINEERING PORTAL by Edvard, 2016)

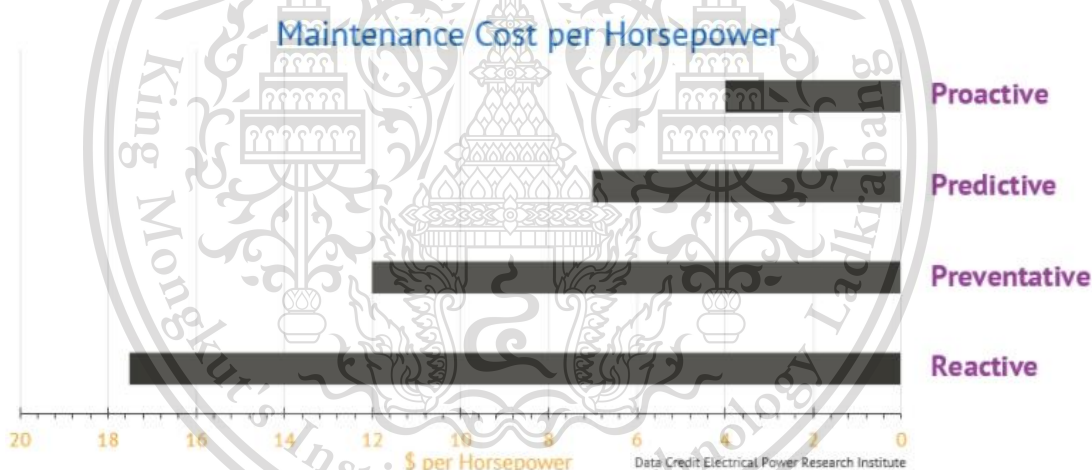
จากการสำรวจชนิดแบตเตอรี่ในระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงของสถานีไฟฟ้าย่อยในประเทศไทยพบว่า เป็นชนิดตะกั่วกรด (Lead Acid Battery) ซึ่งลักษณะการใช้งานแบตเตอรี่ดังกล่าวจะพบปัญหาภาวะแบตเตอรี่เสื่อมสภาพตามกัน ซึ่งเป็นภาวะที่แบตเตอรี่ถูกต่ออนุกรมกันหลายก้อน แล้วมีก้อนใดก้อนหนึ่งเสื่อมสภาพทำให้ประสิทธิภาพในการอัดและคายประจุลดลง แบตเตอรี่ก้อนที่อยู่ใกล้กับแบตเตอรี่ดังกล่าวจึงต้องรับภาระอัดและคายประจุทดแทน ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพตามกันในที่สุด ปัญหาดังกล่าวอาจส่งผลให้ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเกิดความผิดพลาด ทำให้ระบบควบคุมและป้องกันความปลอดภัยของสถานีไฟฟ้าย่อยไม่สามารถทำงานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ และอาจสร้างความเสียหายที่รุนแรงได้ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมี การตรวจสอบหรือการซ่อมบำรุงแบตเตอรี่ด้วยวิธีการที่ถูกต้องและเป็นไปตามมาตรฐานเพื่อความปลอดภัยและสร้างความน่าเชื่อถือให้กับระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง โดยแนวทางการบริหารจัดการสำหรับแบตเตอรี่ตะกั่วกรดจะเป็นไปตามมาตรฐาน IEEE Std 1188 (Institute of Electrical and Electronic Engineers) ซึ่งมาตรฐานดังกล่าวได้แนะนำการปฏิบัติสำหรับการซ่อมบำรุง

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

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

(Maintenance) การทดสอบ (Testing) และเกณฑ์การถ่ายเปลี่ยนแบตเตอรี่ (Battery replacement criteria) สำหรับแบตเตอรี่ตะกั่วกรดชนิด VRLA (Valve-Regulated Lead-Acid) ที่มีการใช้งานแบบประจำที่ (Stationary Applications) (IEEE Std 1188-2005, 2006)

ปัจจุบันการซ่อมบำรุงแบตเตอรี่ที่ได้รับความนิยมมากที่สุดของภาคอุตสาหกรรม คือ การซ่อมบำรุงเชิงป้องกัน (Preventive Maintenance) ซึ่งเป็นการซ่อมบำรุงตามระยะเวลา (Periodic) ที่กำหนด ทำให้เทคนิคการซ่อมบำรุงประเภทนี้มีข้อจำกัด คือ ไม่สามารถขจัดปัญหาการชำรุดของเครื่องมือหรือแบตเตอรี่โดยไม่คาดคิดได้ และอาจมีการถ่ายเปลี่ยนแบตเตอรี่โดยไม่จำเป็น ซึ่งทำให้เกิดเป็นค่าใช้จ่ายสิ้นเปลือง โดยทางสถาบันวิจัยพลังงานไฟฟ้า (Electric Power Research Institute หรือ EPRI's) ได้คำนวณเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงที่มีวิธีการหรือเทคนิคแตกต่างกัน หน่วยเป็นดอลลาร์สหรัฐต่อแรงแม้า (\$ per Horsepower) โดยวิเคราะห์ข้อมูลออกมาในรูปแบบแผนภูมิ ดังรูปที่ 1.2 พบว่าค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงเชิงรับ (Reactive Maintenance) สูงที่สุดอยู่ที่ 18 \$/HP โดยค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงที่มีค่าสูงรองลงมาเป็นการซ่อมบำรุงเชิงป้องกันมีค่าใช้จ่ายอยู่ที่ 12 \$/HP (EPRI's, 2020)



รูปที่ 1.2 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าซ่อมบำรุงเครื่องมือการผลิตต่อกำลังแรงแม้า (EPRI's, 2020)

ผลของค่าใช้จ่ายที่สูงและข้อจำกัดของการซ่อมบำรุงเชิงป้องกันนั้นทำให้หลายประเทศได้มีการพัฒนาเทคนิคการซ่อมบำรุงเชิงคาดการณ์ (Predictive Maintenance) โดยการใช้เทคนิคใหม่ๆ อาทิ เครื่องมือวัดหรืออุปกรณ์ตรวจจับ (Sensor) ต่าง ๆ เพื่อติดตามสถานะของเครื่องจักร มีการแจ้งเตือนเมื่อตรวจพบความผิดปกติ และระบุแนวโน้มของปัญหาซึ่งได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลที่ถูกเก็บรวบรวม โดยข้อมูลเหล่านี้จะถูกนำมาใช้ในการวางแผนการซ่อมบำรุง ส่งผลให้อัตราความเสียหายของเครื่องจักรที่อาจเกิดขึ้นโดยไม่คาดคิดลดลงและสามารถแก้ไขข้อจำกัดของการซ่อมบำรุงเชิงป้องกันได้ด้วย เทคโนโลยีระบบติดตามสถานะแบตเตอรี่ (Battery Monitoring

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

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

System) เป็นอีกหนึ่งทางออกสำหรับการแก้ไขปัญหาการเสื่อมสภาพของแบตเตอรี่ก่อนกำหนดการซ่อมบำรุง โดยระบบติดตามสถานะแบตเตอรี่ปัจจุบันมีฟังก์ชันการทำงานที่หลากหลายและทันสมัย เพื่อตอบสนองความต้องการตามท้องตลาด อาทิ การติดตามสถานะแบตเตอรี่ตลอดเวลา (Real-time monitoring) การแจ้งเตือนเมื่อตรวจพบความผิดปกติของแบตเตอรี่โดยแสดงผลทางจอแสดงผล หรือแจ้งเตือนระยะไกลโดยการส่งข้อความ SMS (Remote alarms notification) การวิเคราะห์แนวโน้มของพารามิเตอร์ต่าง ๆ (Trend curve analysis) เป็นต้น แต่การวิเคราะห์ดังกล่าวยังไม่มี ความแม่นยำมากพอเพราะมีความคลาดเคลื่อนจากการใช้การวิเคราะห์ของตัวแปรเพียงตัวแปรเดียวผ่านตัวบุคคล และยังไม่สามารถระบุถึงสาเหตุของการเสื่อมสภาพของแบตเตอรี่ได้

ทางคณะวิจัยได้เล็งเห็นถึงข้อจำกัดของเทคโนโลยีการซ่อมบำรุงเชิงคาดการณ์ซึ่งอาจพัฒนาต่อยอดได้โดยสามารถจำแนกสาเหตุหลักของปัญหา (Root Cause Failure) เพื่อระบุแนวทางการแก้ปัญหา และแนวทางการวิเคราะห์ที่จะนำมาซึ่งความแม่นยำของข้อมูล โดยการนำแนวคิดการซ่อมบำรุงเชิงรุก (Proactive Maintenance) มาร่วมด้วย โดยระบบติดตามสถานะแบตเตอรี่ที่ทางคณะวิจัยทำการศึกษามีการเพิ่มฟังก์ชันการคาดการณ์ระยะเวลาที่แบตเตอรี่เสื่อมสภาพและฟังก์ชันการวิเคราะห์สาเหตุการเสื่อมสภาพของแบตเตอรี่ เพื่อลดค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงและช่วยยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ได้อีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาและออกแบบระบบติดตามสถานะแบตเตอรี่เชิงรุกสำหรับระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงในสถานีไฟฟ้าย่อย
- 2) เพื่อศึกษาพฤติกรรมของแบตเตอรี่ตะกั่วกรดตลอดอายุการใช้งาน
- 3) เพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด

1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ

- 1) ชนิดแบตเตอรี่ที่ศึกษาคือแบตเตอรี่ตะกั่วกรด (Lead Acid Battery)
- 2) ระบบติดตามสถานะแบตเตอรี่ที่ออกแบบต้องไม่ส่งสัญญาณรบกวนระบบอื่นภายในสถานีไฟฟ้าย่อย
- 3) การเก็บข้อมูลโดยการวัดค่าจากระบบจำลองขึ้นเองและวิเคราะห์ข้อมูลทั้งหมด 5 ตัวแปรได้แก่ แรงดันตกคร่อมแบตเตอรี่ กระแสไฟฟ้า ความต้านทานภายในแบตเตอรี่ อุณหภูมิที่ขั้วแบตเตอรี่ และอุณหภูมิแวดล้อม
- 4) ออกแบบระบบติดตามสถานะแบตเตอรี่เชิงรุกโดยโปรแกรม PyCharm

เอกสารนี้เป็นและใช้ Arduino Nano เป็นตัวประมวลผลหลักศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีการแสดงผลออนไลน์ผ่านแอปพลิเคชัน (Application) Remote red ซึ่งมีการนำไปใช้

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

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

1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงการงาน

- 1) ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับคุณสมบัติและลักษณะของแบตเตอรี่ตะกั่วกรด รวมทั้งศึกษาถึงวิธีการเขียนโปรแกรมที่ใช้ในโครงการงาน คือ PyCharm, MATLAB และ Node-red
- 2) ออกแบบและจัดทำระบบติดตามสถานะแบตเตอรี่ สำหรับศึกษาพฤติกรรมแบตเตอรี่ตลอดอายุการใช้งาน เพื่อนำไปวิเคราะห์หาระยะเวลาที่แบตเตอรี่จะเสื่อมสภาพ พร้อมทั้งทดสอบระบบติดตามสถานะแบตเตอรี่ที่ออกแบบ
- 3) เก็บค่าตัวแปรทั้งหมด 4 ตัวแปร คือ แรงดันตกคร่อมแบตเตอรี่ กระแสในวงจร อุณหภูมิที่ขั้วแบตเตอรี่และอุณหภูมิแวดล้อม แล้วนำมาวิเคราะห์หากกลุ่มตัวแปรทำนายเพื่อสร้างสมการถดถอยสำหรับการวิเคราะห์หาตัวแปรตอบสนอง (ความต้านทานภายในแบตเตอรี่)
- 4) เก็บบันทึกข้อมูลที่ได้จากระบบติดตามสถานะแบตเตอรี่โดยการจำลองสถานการณ์การทำงานที่อาจส่งผลให้แบตเตอรี่เสื่อมสภาพ โดยกำหนดขอบเขตตามมาตรฐาน
- 5) วิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพแบตเตอรี่กับค่าความต้านทานภายในแบตเตอรี่ เพื่อสร้างฟังก์ชันทำนายระยะเวลาที่แบตเตอรี่เสื่อมสภาพ
- 6) วิเคราะห์หาสาเหตุที่ทำให้แบตเตอรี่เสื่อมสภาพ จากประวัติข้อมูลการแจ้งเตือนจากระบบติดตามสถานะแบตเตอรี่ เพื่อสร้างฟังก์ชันการวิเคราะห์หาสาเหตุที่แบตเตอรี่เสื่อมสภาพ
- 7) ออกแบบและเขียนโปรแกรมสร้างฟังก์ชันการทำนายระยะเวลาที่แบตเตอรี่เสื่อมสภาพ และฟังก์ชันวิเคราะห์หาสาเหตุที่แบตเตอรี่เสื่อมสภาพเพิ่มลงในระบบติดตามสถานะแบตเตอรี่ที่ออกแบบไว้
- 8) ทดสอบและแก้ไขข้อผิดพลาดระบบติดตามสถานะแบตเตอรี่เชิงรุก
- 9) รวบรวมข้อมูลการทดลองและจัดทำรูปเล่มปริญญานิพนธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

1.5 แผนการดำเนินงาน

คณะจัดทำได้ทำการศึกษาค้นคว้าข้อมูล และทำความเข้าใจในทฤษฎีตลอดจนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องต่าง ๆ ทั้งภายในประเทศและต่างประเทศ พร้อมทั้งดำเนินงานในส่วนของการออกแบบและทดสอบระบบติดตามสถานะแบตเตอรี่ โดยมีระยะเวลาดำเนินการดังนี้

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงาน

ขั้นตอนการดำเนินงาน	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. ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับแบตเตอรี่ตะกั่วกรดและการเขียนโปรแกรมที่เกี่ยวข้อง										
2. ออกแบบและจัดทำระบบติดตามสถานะแบตเตอรี่พร้อมทดสอบระบบ										
3. เก็บข้อมูลที่ใช้ในการสร้างสมการถดถอยเพื่อวิเคราะห์หาความต้านทานภายในแบตเตอรี่										
4. เก็บบันทึกข้อมูลที่ได้จากระบบติดตามสถานะแบตเตอรี่เทียบกับปัจจัยหลักที่ทำให้แบตเตอรี่เสื่อมสภาพ										
5. วิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพแบตเตอรี่ กับค่าความต้านทานภายในแบตเตอรี่										
6. วิเคราะห์หาสาเหตุที่ทำให้แบตเตอรี่เสื่อมสภาพ จากประวัติข้อมูลการแจ้งเตือนจากระบบติดตามสถานะแบตเตอรี่										
7. ออกแบบและสร้างฟังก์ชันทำนายระยะเวลาที่แบตเตอรี่เสื่อมสภาพ และฟังก์ชันวิเคราะห์หาสาเหตุที่แบตเตอรี่เสื่อมสภาพ										
8. ทดสอบและแก้ไขข้อผิดพลาดระบบติดตามสถานะแบตเตอรี่เชิงรุก										
9. รวบรวมข้อมูลการทดลองและจัดทำรูปเล่มปริญญานิพนธ์										

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของโรงเรียนอัสสัมชัญศรีราชา เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำไปใช้ประโยชน์ด้วย การคัดลอกหรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1. ลดค่าใช้จ่ายและระยะเวลาในการซ่อมบำรุงแบตเตอรี่ในสถานีไฟฟ้าย่อย
2. เพิ่มประสิทธิภาพด้านความปลอดภัยและความน่าเชื่อถือของสถานีไฟฟ้าย่อย
3. ได้ความรู้เกี่ยวกับพฤติกรรมและคุณลักษณะของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด
4. สามารถนำไปพัฒนาเป็นระบบติดตามสถานะแบตเตอรี่เชิงรุกสำหรับแบตเตอรี่

ชนิดอื่น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

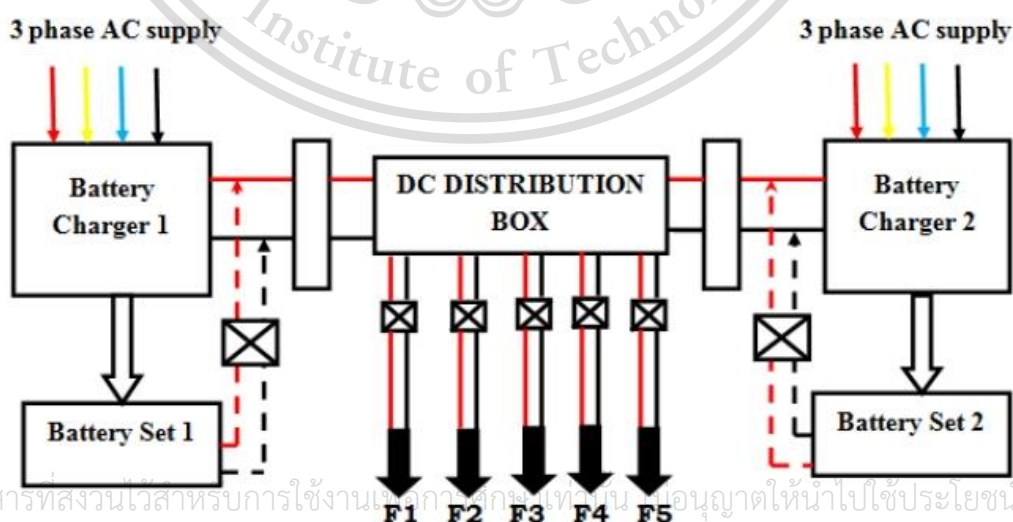
บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรง (DC-distribution system)

ระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรง เป็นระบบหนึ่งที่มีความสำคัญในการควบคุม ความน่าเชื่อถือและความปลอดภัยของสถานีไฟฟ้าย่อย โดยมีองค์ประกอบสำคัญของระบบ คือ แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC supply), อุปกรณ์ควบคุมและป้องกัน (DC load) ประกอบด้วย Protection circuit, Switchgear trip and close trip, Alarm and SCADA circuit, Auxiliary and emergency lighting, Security and fire detection system เป็นต้น ซึ่งอุปกรณ์ดังกล่าวต้องใช้ ไฟฟ้ากระแสตรงในการทำงาน

การทำงานของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงสามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 2.1 แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงมี 2 แหล่งจ่าย คือ เครื่องประจุแบตเตอรี่ (Battery charge) ซึ่งจะทำงาน ในสภาวะปกติ โดยรับไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ (AC supply) และแปลงไฟฟ้า กระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อใช้ในการจ่ายกำลังให้กับ DC load รวมถึงเป็นแหล่งจ่าย ไฟฟ้าในการประจุแบตเตอรี่ด้วยพิกัดแรงดันลอย (Float voltage) ซึ่งในสภาวะปกติ แบตเตอรี่จะมีการ ใช้งานจากการคายประจุเป็นช่วงๆให้กับ Trip coils, Relay coils, NO-NC switches หรือ แบตเตอรี่อาจเกิดการ Self-discharge แต่ในกรณีฉุกเฉินซึ่งอาจเกิดเหตุการณ์ที่เครื่องประจุแบตเตอรี่ เกิดความเสียหายหรือไฟดับ แบตเตอรี่จำเป็นต้องทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแทนเครื่อง ประจุแบตเตอรี่ชั่วคราวในระหว่างการซ่อมแซมให้เครื่องประจุแบตเตอรี่กลับมาทำงานปกติหรือระบบ ไฟฟ้ากลับมาเป็นปกติ (Anantha Krishna M S and A.D Srinivasan, 2019)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเฉพาะกิจเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามรูปที่ 2.1 การทำงานของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรง ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

ดังนั้นการออกแบบและการซ่อมบำรุงแบตเตอรี่สำหรับการรองรับการทำงาน ในระยะเวลาที่เกิดกรณีฉุกเฉินข้างต้นจึงมีความสำคัญมาก โดยส่วนใหญ่แบตเตอรี่ที่ใช้เป็นแหล่งจ่าย สாரองไฟฟ้ากระแสตรงจะเป็นประเภทตะกั่วกรดหลายก้อนต่ออนุกรมกัน ซึ่งพิกัดของแบตเตอรี่ (Ah และ Rated voltage) จะขึ้นอยู่กับ DC load และพิกัดกำลังการใช้งานที่แตกต่างกันในแต่ละสถานี ไฟฟ้าย่อย

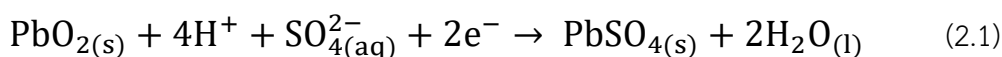
2.2 แบตเตอรี่ตะกั่วกรด

แบตเตอรี่ตะกั่วกรด เป็นแบตเตอรี่ชนิดชาร์จไฟได้ ซึ่งมีอัตราส่วนพลังงานต่อน้ำหนัก และอัตราส่วนพลังงานต่อปริมาตรที่ต่ำ แต่มีอัตราส่วนกำลังงานต่อน้ำหนักค่อนข้างสูง นั้นหมายถึง ความสามารถในการจ่ายกระแสไฟกระชากสูง ด้วยคุณสมบัติข้างต้นรวมทั้งราคาที่ค่อนข้างถูกเมื่อ เทียบกับเทคโนโลยีการสำรองพลังงานสมัยใหม่แบบอื่น ทำให้แบตเตอรี่ตะกั่วกรดถูกใช้กันอย่าง แพร่หลาย อาทิ อุปกรณ์สำรองพลังงานในสถานีฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่ (Cellular base station) ระบบในโรงพยาบาล (High-availability setting) และระบบอิสระ (Stand-alone power system) เป็นต้น

2.2.1 หลักการทำงานของแบตเตอรี่ตะกั่วกรด

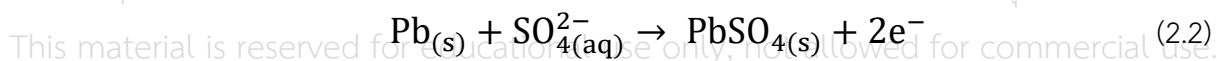
องค์ประกอบสำคัญของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดประกอบด้วยแผ่นขั้วบวก (Positive Plate) และแผ่นขั้วลบ (Negative Plate) โดยที่แผ่นขั้วบวกจะมีอิเล็กโทรดในรูปตะกั่ว ออกไซด์ (Lead Oxide : PbO_2) ส่วนแผ่นขั้วลบจะมีอิเล็กโทรดในรูปธาตุตะกั่ว (Lead : Pb) อิเล็กโทรดทั้งสองขั้วถูกแยกออกจากกันโดยสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) ที่มีส่วนประกอบ เป็นกรดซัลฟิวริก (Sulfuric Acid : H_2SO_4) ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวป้องกันการลัดวงจรและตัวทำ ปฏิกิริยาเคมีกับอิเล็กโทรดทั้งสองขั้ว ซึ่งแต่ละขั้วจะเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีระหว่างการอัดประจุและ คายประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่

ในระหว่างการคายประจุของแบตเตอรี่ แผ่นอิเล็กโทรดทั้งสองจะทำปฏิกิริยากับกรด ซัลฟิวริก โดยอิเล็กโทรดขั้วบวกเกิดปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction Reaction) ระหว่างตะกั่วออกไซด์ กับกรดซัลฟิวริก ได้ผลิตภัณฑ์เป็นตะกั่วซัลเฟตและน้ำ ดังสมการ (2.1)



อิเล็กโทรดขั้วลบเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation Reaction) ระหว่างธาตุตะกั่ว กับซัลเฟตไอออน (Sulfate Ion : SO_4^{2-}) ได้ผลิตภัณฑ์เป็นตะกั่วซัลเฟต (Lead Sulfate : $PbSO_4$)

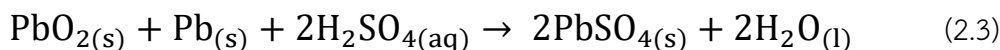
เอกสารนี้เป็นเอกสาร (2.2) สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



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

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

ปฏิกิริยารวมของสมการ (2.1) และ (2.2) คือ



จากสมการการทำปฏิกิริยาระหว่างการคายประจุของแบตเตอรี่ ดังสมการ (2.1) และ (2.2) ข้างต้น จะเห็นว่าอิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากขั้วลบผ่านวงจรภายนอกไปยังขั้วบวก ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลจากขั้วบวกไปยังขั้วลบ เมื่อแบตเตอรี่คายประจุอย่างต่อเนื่อง จนถึงสภาวะหนึ่งที่สามารถตั้งต้นทางขั้วมือของสมการ (2.3) หมดไป ปฏิกิริยาเคมีก็จะไม่เกิดขึ้น ทำให้ไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลระหว่างขั้วบวกและขั้วลบ ที่แผ่นขั้วบวกและขั้วลบจะเกิดการสะสมของตะกั่วซัลเฟต

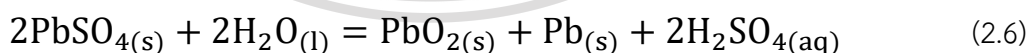
ในระหว่างการประจุไฟฟ้ากลับเข้าไปให้แบตเตอรี่ แผ่นอิเล็กโทรดขั้วลบจะได้รับอิเล็กตรอนจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าภายนอก ซึ่งจะทำให้ตะกั่วซัลเฟตและน้ำมีสภาวะที่ไม่เสถียร พร้อมทั้งจะทำปฏิกิริยาให้กลับไปอยู่ในสภาวะเช่นเดิมก่อนการคายประจุ โดยที่อิเล็กโทรดขั้วบวกจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างตะกั่วซัลเฟตกับน้ำ ได้ผลิตภัณฑ์เป็นตะกั่วออกไซด์ กรดซัลฟิวริก และก๊าซไฮโดรเจน ดังสมการ (2.4)



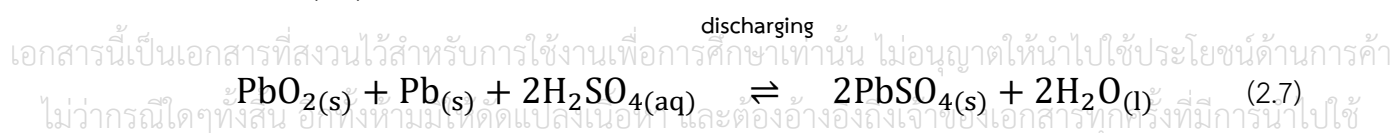
อิเล็กโทรดขั้วลบจะเกิดปฏิกิริยารีดักชันของตะกั่วซัลเฟต ได้ผลิตภัณฑ์เป็นตะกั่ว กรดซัลฟิวริก และก๊าซออกซิเจนที่ไม่เสถียร ดังสมการ (2.5)



ปฏิกิริยารวมทั้งสองสมการคือ

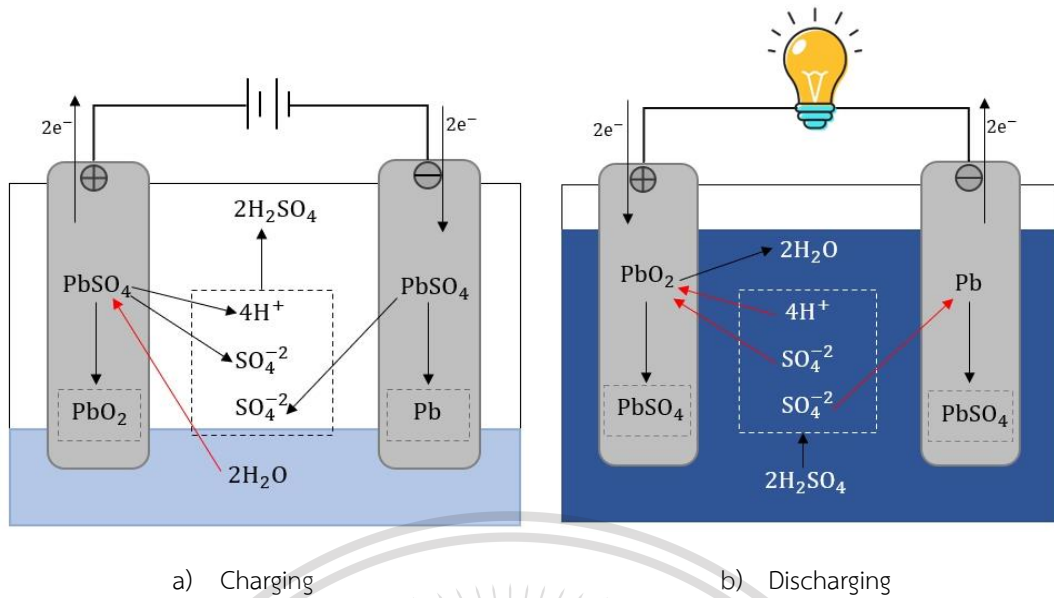


จากปฏิกิริยาเคมีรวมที่เกิดขึ้นในระหว่างการคายประจุและประจุแบตเตอรี่ ดังสมการที่ (2.3) และ (2.6) ตามลำดับ จะเห็นว่าทั้งสองสมการเป็นปฏิกิริยาที่ผันกลับกัน ดังภาพที่ 2.2 อาจกล่าวได้ว่าปฏิกิริยาเคมีการผลิตกระแสไฟฟ้าของแบตเตอรี่ทุติยภูมิเป็นปฏิกิริยาแบบย้อนกลับได้ ดังสมการ (2.7)



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

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



a) Charging

b) Discharging

รูปที่ 2.2 ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีในแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด

2.2.2 คุณสมบัติเชิงสมรรถนะของแบตเตอรี่ตะกั่วกรด

2.2.2.1 ความจุหรือความจุปกติ (Capacity or Nominal capacity : Ah) ค่าความจุทางไฟฟ้า โดยจากการที่แบตเตอรี่คายประจุด้วยกระแสคงที่ค่าหนึ่ง (กำหนดลักษณะเป็น C_{rate}) แล้วจับเวลาเป็นชั่วโมงจนคายประจุถึงค่าแรงดันตัด (Cutoff voltage) โดยคำนวณความจุจากการนำค่ากระแสคายประจุคูณกับเวลาเป็นชั่วโมง เช่น แบตเตอรี่ความจุ 80 แอมแปร์-ชั่วโมง หมายความว่า แบตเตอรี่จ่ายกระแสไฟคงที่ 8 แอมแปร์ ได้ 10 ชั่วโมง หรือจ่ายกระแสไฟคงที่ 10 แอมแปร์ได้ 8 ชั่วโมง ซึ่งค่าความจุจะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณการจ่ายกระแสหรือเพิ่ม C_{rate}

2.2.2.2 แรงดันตัด (Cutoff Voltage) แรงดันไฟฟ้าที่ต่ำที่สุดที่แบตเตอรี่ยอมให้มีได้ขณะคายประจุหรือแรงดันสุดท้ายของการคายประจุ ถ้าต่ำกว่านี้แบตเตอรี่จะเสียหายแบบถาวร โดยค่านี้จะกำหนดเฉพาะเจาะจงที่อัตราการคายประจุแตกต่างกันตามบริษัทผู้ผลิต

2.2.2.3 รอบการใช้งาน (Cycle) การประจุแบตเตอรี่จนเต็มนำไปใช้งานแล้วมาประจุใหม่จนเต็มอีกครั้งหนึ่งเรียกรอบการใช้งาน ในการใช้งานที่มีการคายประจุมาก มักจะไม่ใช้การคายประจุจนหมด แต่มีการคายประจุมากกว่า 50% ต่อรอบการใช้งาน

2.2.2.4 สถานะของการประจุ (Stage of Charge : SoC) ค่าที่บอกความจุของแบตเตอรี่ขณะใช้งานหรือสัดส่วนของความจุที่คงใช้งานได้ เป็นอัตราส่วนระหว่างความจุของแบตเตอรี่ในขณะนั้นต่อความจุแบตเตอรี่เมื่อประจุเต็มพิกัด

2.2.2.5 ความลึกของการคายประจุ (Depth of Discharge : DOD) เปอร์เซ็นต์ของความจุแบตเตอรี่ที่ถูกคายประจุออกไปเทียบกับความจุทั้งหมด หรือสัดส่วนของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาดูงาน ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดก็ตาม กรุณาแจ้งผู้จัดทำเอกสาร และต้องอ้างอิงถึงชื่อของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

ความจุที่ถูกใช้งานไปแล้วจากเดิมที่มีการอัดประจุเต็มพิกัด โดยความสัมพันธ์ของ SOC กับ DOD คือ $DOD = 1 - SOC$

2.2.2.6 สถานะทางสุขภาพ (State of Health : SoH)

ค่าเปอร์เซ็นต์ที่บ่งบอกถึงการเสื่อมสภาพของแบตเตอรี่ เป็นอัตราส่วนระหว่างค่าความจุแบตเตอรี่ที่ได้ใช้งานแล้วโดยได้รับการประจุเต็มพิกัด เทียบกับค่าความจุสูงสุดของแบตเตอรี่ที่เริ่มใช้งานครั้งแรก โดยแบตเตอรี่ที่มีสถานะทางสุขภาพแย่หรือแบตเตอรี่เสื่อมจะมีค่า SoH ต่ำกว่า 80%

2.2.2.7 แรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วแบตเตอรี่ (Terminal Voltage)

แรงดันไฟฟ้าขณะมีโหลดโดยแรงดันไฟฟ้านี้ขึ้นอยู่กับสถานะการประจุและกระแสไฟฟ้าอัดประจุ หรือคายประจุ

2.2.2.8 แรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจร (Open-circuit Voltage)

แรงดันที่แบตเตอรี่อยู่ในสภาวะสมดุล ไม่มีการประจุหรือคายประจุ แรงดันนี้ขึ้นกับลักษณะการออกแบบแบตเตอรี่ ความถ่วงจำเพาะ และอุณหภูมิแวดล้อม

2.2.2.9 การคายประจุด้วยตัวเอง (Self-discharge Rate) อัตรา

การคายประจุด้วยตัวเองจะกำหนดเป็นเปอร์เซ็นต์ของความจุทั้งหมดในช่วงเวลา 1 เดือน การคายประจุด้วยตัวเองขึ้นอยู่กับเกิดการกัดกร่อนที่แผ่นเพลทเมื่อมีการประจุเกิน และหากอุณหภูมิมีค่าสูงจะส่งผลให้อัตราการคายประจุด้วยตัวเองสูงขึ้นด้วย

2.2.2.10 อัตราการประจุและคายประจุ (Rate of Charge and Discharge)

อัตราส่วนของความจุต่อเวลาเป็นชั่วโมง เช่น แบตเตอรี่ความจุ 80 แอมแปร์-ชั่วโมง ที่ C10 หมายถึง แบตเตอรี่สามารถคายประจุ 8 แอมแปร์ เป็นเวลา 10 ชั่วโมง

2.2.2.11 ความต้านทานภายใน (Internal Resistance) โดยปกติ

ค่าความต้านทานภายในแบตเตอรี่จะมีค่าแตกต่างกันในระหว่างการอัดประจุและคายประจุ นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับสถานะของการประจุแบตเตอรี่ (SoC) ซึ่งเมื่อค่าความต้านทานภายในเพิ่มขึ้น ความเสถียรทางความร้อนของแบตเตอรี่จะลดลงเนื่องจากพลังงานในการประจุจะถูกเปลี่ยนเป็นความร้อน ส่งผลให้สถานะทางสุขภาพ (SoH) ของแบตเตอรี่ลดลง

2.2.2.12 ความถ่วงจำเพาะของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ เป็นสิ่งที่

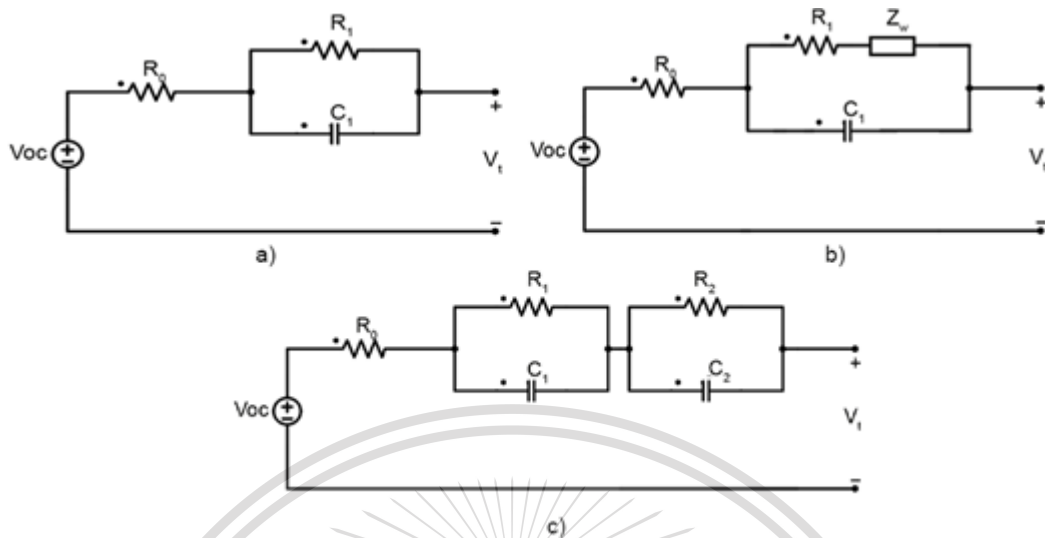
บ่งบอกสภาวะหรือพฤติกรรมของแบตเตอรี่ว่าอยู่ในช่วงการอัดประจุหรือคายประจุ โดยค่าความถ่วงจำเพาะจะแปรผันตามค่าความเป็นกรดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

2.2.3 วงจรสมมูลของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด



รูปที่ 2.3 a) วงจรสมมูลแบบ One-RC branch

b) วงจรสมมูลแบบ Finite Warburg Impedance

c) วงจรสมมูลแบบ Two-RC branch

จากรูปที่ 2.3 แสดงให้เห็นถึงวงจรสมมูลของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดแบบต่างๆ ซึ่งมีพารามิเตอร์พื้นฐานเหมือนกัน ดังนี้

- R_0 คือ Ohmic resistance หรือ Electrolyte resistance เป็นพารามิเตอร์ที่ทำให้เกิดแรงดันตกอย่างทันทีทันใดและสามารถแสดงถึงประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ได้ โดยค่าของพารามิเตอร์ R_0 ขึ้นอยู่กับสภาพการนำไฟฟ้าของสารละลายอิเล็กโทรไลต์

- R_1 และ C_1 ที่ต่อขนานกัน คือ ค่าที่แสดงพฤติกรรมในช่วงทรานเซียนต์ ซึ่งเป็นค่าในช่วง short-term โดย R_1 เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทประจุระหว่างแผ่นอิเล็กโทรดทั้ง 2 ฝั่ง ที่จมอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ในขณะที่ C_1 คือ ตัวเก็บประจุที่อยู่ระหว่างอิเล็กโทรดและอิเล็กโทรด

โดยวงจรสมมูล a) เป็นวงจรสมมูลแบบ One-RC branch ประกอบไปด้วยพารามิเตอร์พื้นฐานที่กล่าวไปข้างต้นเท่านั้น ในขณะที่วงจรสมมูลแบบ Finite Warburg impedance ในรูป b) จะมีพารามิเตอร์ Z_w คือ Warburg impedance แสดงถึงการแพร่ของประจุระหว่างวัสดุที่ใช้งานกับอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งมักนำไปใช้สำหรับศึกษาในเชิงไฟฟ้าเคมีที่เกิดขึ้นในแบตเตอรี่ และมักจะทดสอบโดยการจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับที่ความถี่ต่างๆ เพื่อดูผลของค่า Warburg impedance มากกว่าเพื่อทดสอบหาค่า R_0 อีกทั้งมีวิธีการทดสอบที่ค่อนข้างซับซ้อนกว่าการทดสอบโดยวิเคราะห์จากวงจร

สมมูล a) และ c) ในขณะที่วงจรสมมูลแบบ Two-RC branch นั้นจะมีแนวคิดเช่นเดียวกับวงจรสมมูล

แบบ One-RC branch แต่จะเพิ่มพารามิเตอร์ R_2 และ C_2 ที่ต่อขนานกัน เพื่อแสดงพฤติกรรม

ในช่วงทรานเซียนต์ซึ่งเป็นค่าในช่วง long-term

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

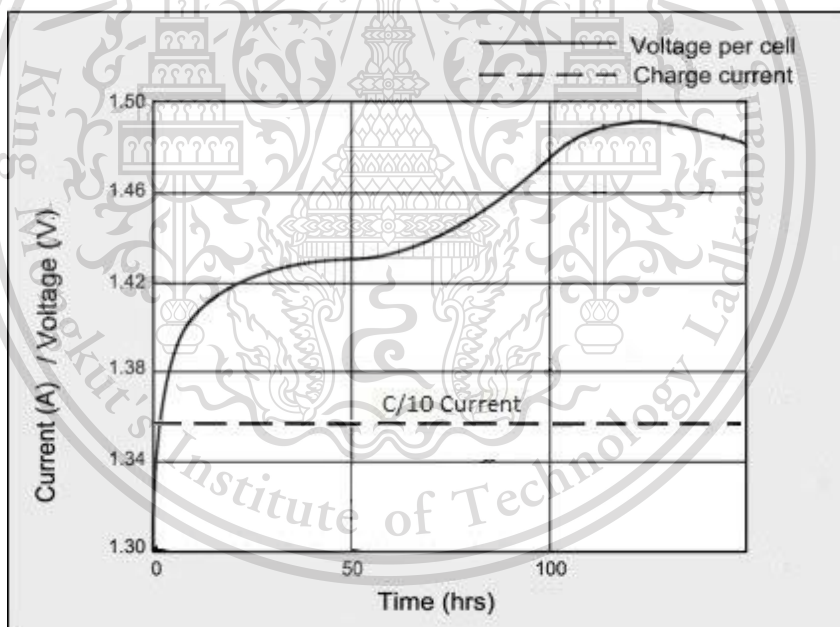
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เนื่องจากโครงงานนี้สนใจพารามิเตอร์ที่แสดงถึงประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ ซึ่งก็คือ R_0 ดังนั้นวงจรสมมูลแบตเตอรี่ที่เลือกใช้เพื่อนำไปการศึกษาพฤติกรรมของแบตเตอรี่ คือ วงจรสมมูลแบบ One-RC branch

2.2.4 การอัดประจุแบตเตอรี่

หลักการการอัดประจุแบตเตอรี่ทุติยภูมิ คือ กระแสไฟฟ้าที่จ่ายเข้าสู่แบตเตอรี่ต้องมีทิศทางตรงข้ามกับการคายประจุ โดยขนาดกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของการอัดประจุขึ้นอยู่กับวิธีการที่เลือกใช้ โดยทั่วไปแล้ววิธีการอัดประจุมีอยู่ 2 แบบ ดังนี้

2.2.4.1 การอัดประจุแบบกระแสตรงคงที่ (Constant Current Charging : CC) เป็นการอัดประจุที่ทำการรักษาระดับของกระแสไฟฟ้าอัดประจุโดยคำนึงถึงกระแสไฟฟ้าสูงเกินพิกัด หรืออุณหภูมิที่เกิดขึ้น ค่าแรงดันไฟฟ้าจะสูงขึ้นเมื่อความจุในแบตเตอรี่สูงขึ้น และจะสูงขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อแบตเตอรี่เข้าสู่ภาวะกระแสไฟฟ้าสูงเกินพิกัด ดังนั้นจึงต้องมีการควบคุมการอัดประจุ โดยเลือกระดับของกระแสไฟฟ้าอัดประจุไม่เกินค่าพิกัดกระแสที่แบตเตอรี่กำหนดไว้ เพื่อป้องกันไม่ทำให้แบตเตอรี่เกิดความเสียหาย



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสกับเวลาของ Constant Current Charging

2.2.4.2 การอัดประจุแบบแรงดันไฟฟ้าคงที่ (Constant Voltage Charging : CV) ใช้วิธีการจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่แน่นอนจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงให้กับแบตเตอรี่ ปริมาณของกระแสไฟฟ้าอัดประจุขึ้นอยู่กับความต่างศักย์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟตรงกับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่ โดยในตอนต้นของการอัดประจุจะต้องใช้กระแสไฟฟ้าสูงมาก

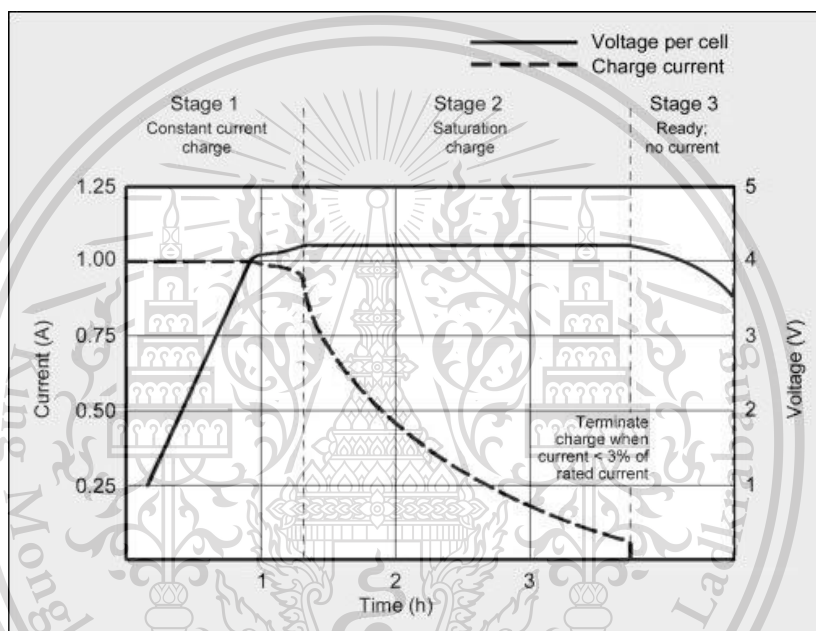
ไม่ว่ากรณีใดเนื่องจากแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่มีค่าต่ำมาก จากนั้นค่ากระแสไฟฟ้าจะลดลงเนื่องจาก

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

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

แรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่เพิ่มขึ้น จนมีสถานะในการอัดประจุ (Stage of Charge, SoC) เข้าใกล้ 100%

เครื่องอัดประจุโดยทั่วไปมีอยู่ 2 แบบ คือ แบบ Fast Charge จะอัดประจุที่แรงดันไฟฟ้าสูง กระแสไฟฟ้าที่อัดประจุจึงสูงตาม เวลาที่ใช้อัดประจุจะเร็ว แต่มีความเสี่ยงต่อการทำให้อุณหภูมิของแบตเตอรี่สูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้แบตเตอรี่เสื่อมสภาพเร็ว อีกแบบหนึ่งคือ Float Charge คือ การอัดประจุที่แรงดันไฟฟ้าสูงกว่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่เล็กน้อย กระแสไฟฟ้าจึงไม่สูงมากนัก จึงทำให้ใช้เวลาในการอัดประจุค่อนข้างนาน นิยมใช้ในการอัดประจุแบบต่อเนื่อง เหมาะสำหรับอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบไฟฟ้าสำรอง เช่น UPS ไฟฉุกเฉิน เป็นต้น



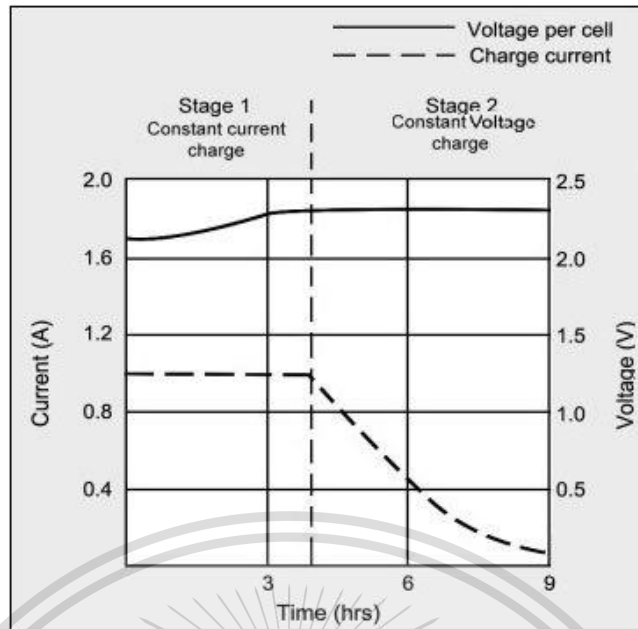
รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสกับเวลาของ Constant Voltage Charging

ปัจจุบันมีการประยุกต์ให้การอัดประจุแบบแรงดันไฟฟ้าคงที่ให้เป็นแบบ Dual Step Charging คือ เริ่มแรกให้อัดประจุแบบ Fast Charge ก่อน เมื่อสถานะในการอัดประจุของแบตเตอรี่เริ่มสูงขึ้นให้เปลี่ยนระดับแรงดันไฟฟ้าเป็นแบบ Float Charge เพื่อทำให้กระแสไฟฟ้าในการอัดประจุไม่สูงมาก (Overcharge) เพื่อยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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



รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสกับเวลาของ Dual Step Charging

2.2.5 ปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพและอายุการใช้งานของ (IEEE Std 1184-1994)

2.2.5.1 อุณหภูมิ (Temperature) การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ

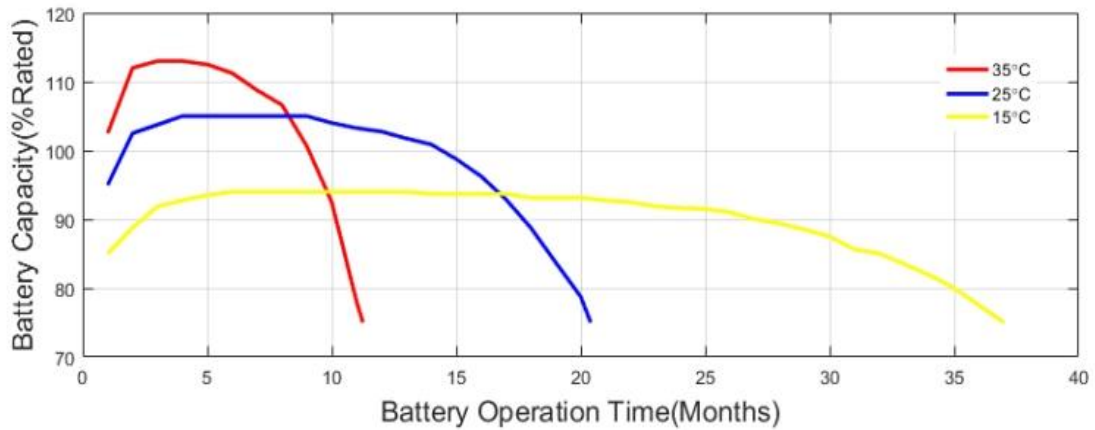
ส่งผลต่อประสิทธิภาพของแบตเตอรี่เนื่องจากการทำปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีของแบตเตอรี่ตะกั่วกรดมีอุณหภูมิเป็นตัวเร่ง ซึ่งหากอุณหภูมิของสารละลายอิเล็กโทรไลต์สูง จะทำให้กระแสในการอัดประจุและอัตราการสึกกร่อนของขั้วแบตเตอรี่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น หากแบตเตอรี่ยังทำงานต่อไปในสภาวะนี้จะส่งผลให้อายุการใช้งานของแบตเตอรี่ลดลง ในทางตรงกันข้ามการทำงานของแบตเตอรี่ที่อุณหภูมิต่ำจะทำให้แบตเตอรี่มีอายุการใช้งานที่ยาวนานกว่า แต่จะมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่ช้า ส่งผลให้ความจุของแบตเตอรี่ลดลง

เพื่อรักษาประสิทธิภาพสูงสุดของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด ควรมีการติดตั้งแบตเตอรี่ให้มีระยะห่างกันประมาณ 1.5-2 เซนติเมตร เพื่อให้มีพื้นที่ในการระบายอากาศและควบคุมอุณหภูมิแวดล้อมให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมตามข้อกำหนดของ IEEE Std 1184 คือ อายุการใช้งานและคุณลักษณะเชิงไฟฟ้าของแบตเตอรี่ มีพิกัดอุณหภูมิมาตรฐานที่ 25 °C (77 °F) และในขณะที่การทำงานของแบตเตอรี่ การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิแต่ละเซลล์ควรไม่เกิน 2 °C (5 °F)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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



รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุการใช้งานกับความจุของแบตเตอรี่ที่อุณหภูมิต่างกัน

2.2.5.2 แรงดันไฟฟ้า (Float Voltage) แบตเตอรี่สำหรับใช้งานในระบบไฟฟ้าสำรอง ระดับแรงดันที่แบตเตอรี่มีการถูกอัดประจุจนเต็ม หรือ Float voltage ถูกแนะนำให้มีค่าระหว่าง 2.20-2.30 V/cell โดยขึ้นอยู่กับค่าความถ่วงจำเพาะของสารละลายอิเล็กโทรไลต์โดยหากระดับแรงดันมากกว่า 2.30 V/cell จะทำให้แบตเตอรี่เกิดภาวะขาดน้ำ (Dehydration) เนื่องจากน้ำในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ถูกทำให้แตกตัวกลายเป็นก๊าซระเหยออกไป ทั้งยังเกิดไอออนของออกซิเจนอิสระที่ขั้วบวกแบตเตอรี่ ส่งผลให้อัตราการกัดกร่อนที่ขั้วแบตเตอรี่เพิ่มขึ้น อายุการใช้งานลดลง ในทางตรงกันข้ามหากระดับแรงดันต่ำกว่า 2.30 V/cell จะทำให้การประจุแบตเตอรี่ไม่เต็มหรือเต็มช้า เกิดภาวะที่มีซัลเฟตไปเกาะที่ขั้วของแบตเตอรี่ (Sulfation) ทำให้แบตเตอรี่ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาได้อย่างมีประสิทธิภาพ ความจุของแบตเตอรี่ลดลง

แรงดันกระเพื่อมกระแสสลับ (AC Ripple Voltage) คร่อมแบตเตอรี่มีผลทำให้เกิดการคายประจุและเกิดก๊าซที่ขั้วแบตเตอรี่ ตลอดช่วงการประจุ ขึ้นอยู่กับความถี่ของ Charger นั้นๆ ตามข้อกำหนดของผู้ผลิตแบตเตอรี่กำหนดให้แรงดันกระเพื่อมกระแสสลับควรมีค่าไม่เกิน 0.5% ของแรงดัน Float Voltage

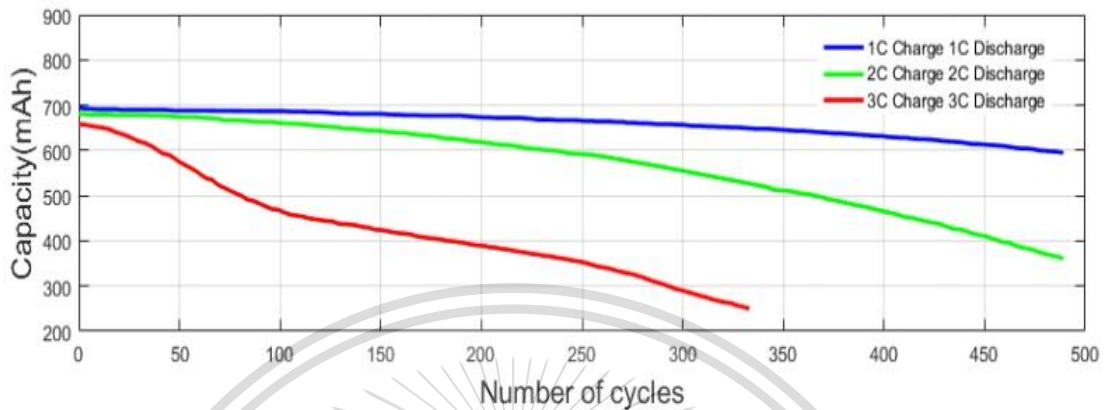
2.2.5.3 กระแสไฟฟ้า (Float and Charge Current) กระแสที่ไหลในแบตเตอรี่ขณะประจุแบตเตอรี่จนเต็ม ประกอบด้วย ไฟฟ้ากระแสตรง (DC Current) กระแสนี้ประมาณ 5% จะไปชดเชยการคายประจุภายในตัวเอง (Self-discharge) ของแบตเตอรี่ ทำให้แบตเตอรี่มีประจุเต็มพร้อมใช้งานตลอดเวลา โดยอีก 95% จะเป็นตัวทำให้เกิดความร้อนภายในแบตเตอรี่ อีกหนึ่งองค์ประกอบคือ ไฟฟ้ากระแสสลับ (AC Current) เป็นกระแสที่เกิดจากอุปกรณ์เรียงกระแส (Rectifier) และตัวแปลงกระแส (Inverter) กระแสนี้เมื่อมีค่าสูงเกินกว่า 5% ของความจุแบตเตอรี่ จะทำให้แบตเตอรี่เกิดการเสื่อมสภาพลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ 2.2.5.4 รอบการใช้งาน (Cycle Service) สำหรับแบตเตอรี่ที่ถูก ออกแบบมาให้ใช้งานในลักษณะติดตั้งอยู่กับที่ (Stationary) อัตราการคายประจุ (Discharge Rate) ไม่ว่ากรณีใดก็ตาม ไม่ควรเกินค่าที่กำหนดไว้ และต้องอยู่ในเงื่อนไขของเอกสารกำกับที่แนบไปใช้ ส่งผลต่อรอบการคายประจุ (Discharge Cycle) และเป็นตัวกำหนดเวลาในตรวจสอบและซ่อมบำรุง

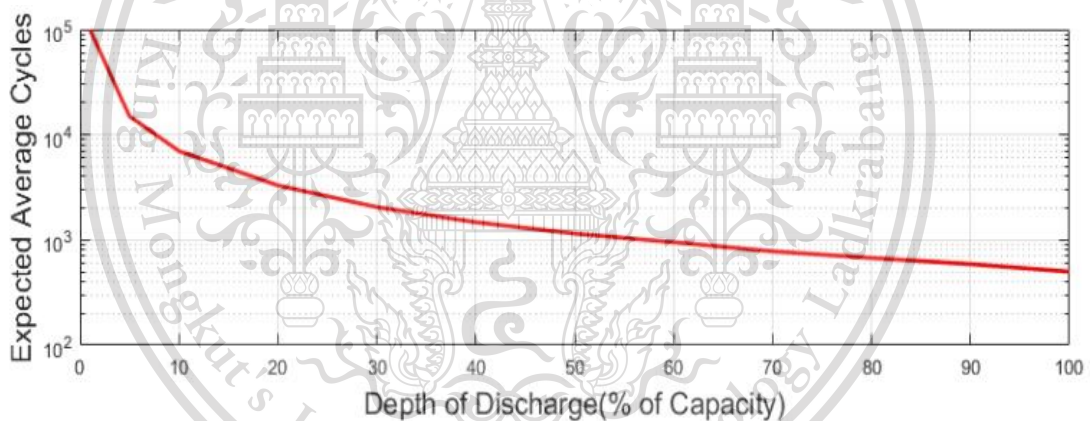
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

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

แบตเตอรี่ โดยแบตเตอรี่ที่มีจำนวนรอบการคายประจุแบบตื้นในระยะเวลานั้นๆ จะมีอายุการใช้งานยาวนานกว่าแบตเตอรี่ที่มีรอบการคายประจุแบบลึกในระยะยาว อาจกล่าวได้ว่าแบตเตอรี่มีอายุการใช้งานสั้นลงทุกครั้งเมื่อมีรอบการคายประจุมาก



รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างรอบการใช้งานและความจุของแบตเตอรี่ที่อัตราการอัดประจุและคายประจุต่างกัน



รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของการคายประจุและรอบการใช้งานของแบตเตอรี่

2.3 ระบบติดตามสถานะแบตเตอรี่ (Battery monitoring system: BMS)

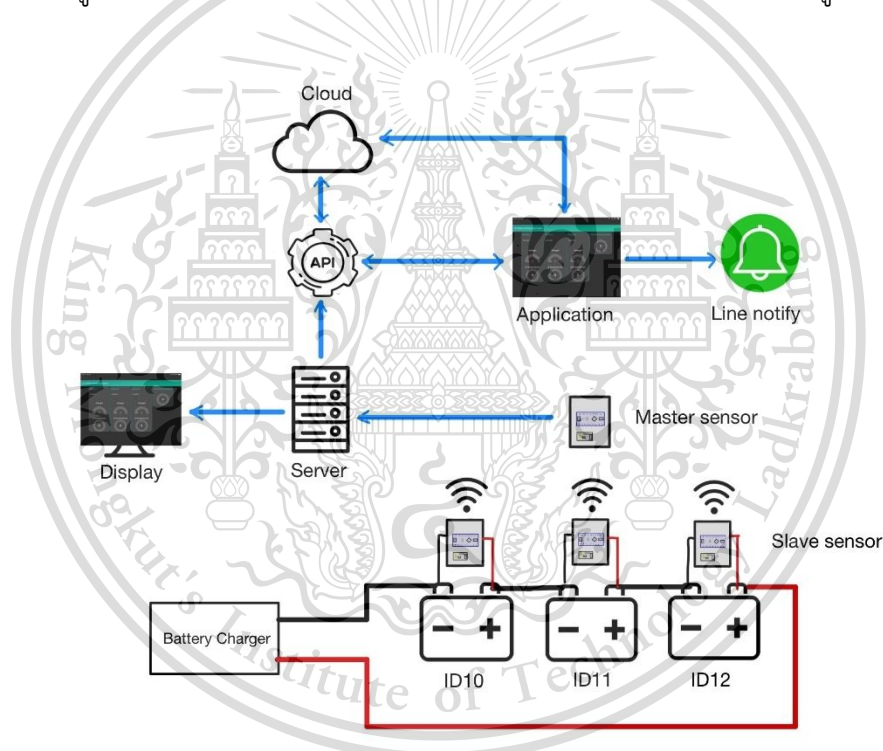
เนื่องจากปัญหาอุปกรณ์หรือเครื่องจักรขัดข้องในภาคอุตสาหกรรมส่งผลกระทบต่อความน่าเชื่อถือและความปลอดภัยในสายการผลิต ทำให้งานซ่อมบำรุงเป็นปัจจัยที่สนับสนุนความน่าเชื่อถือของกระบวนการดังกล่าว ซึ่งวิธีการซ่อมบำรุงในปัจจุบันมีหลากหลายรูปแบบ โดยการใช้งานของแต่ละรูปแบบขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของลักษณะงาน ในปัจจุบันวิธีการซ่อมบำรุงที่ถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลาย คือ การซ่อมบำรุงเชิงป้องกัน (Preventive Maintenance) เป็นการวางแผนการซ่อมบำรุงและเปลี่ยนชิ้นส่วนหรืออุปกรณ์ตามระยะเวลาที่อ้างอิงตามมาตรฐานหรือจากคู่มือของผู้ผลิต เพื่อให้เครื่องจักรและอุปกรณ์ต่างๆ ทำงานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ และป้องกันความ

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

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

เสียหายที่อาจเกิดขึ้น ส่วนแนวคิดสมัยใหม่ที่กำลังได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก คือ การซ่อมบำรุงเชิงคาดการณ์ (Predictive Maintenance) โดยการติดตามสถานะ (Monitoring) อุปกรณ์ตลอดเวลาผ่าน Industrial Internet of Things หรือ IIoT ทำให้ข้อมูลที่ถูกจัดเก็บสามารถเข้าถึงได้โดยผ่านการเชื่อมต่อระยะไกล รวมถึงมีการแจ้งเตือนระยะไกล (Remote notification) เมื่อตรวจพบความผิดปกติและวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้เพื่อประเมินระยะเวลาที่เหมาะสมแก่การซ่อมแซมหรือถ่ายเปลี่ยนอุปกรณ์

ระบบติดตามสถานะแบตเตอรี่ (Battery Monitoring System) เป็นเครื่องมือหนึ่งในการซ่อมบำรุงเชิงคาดการณ์ เครื่องมือนี้ใช้สำหรับติดตามสถานะค่าพารามิเตอร์ต่างๆของแบตเตอรี่ เช่น แรงดันไฟฟ้าตกรวมแบตเตอรี่ (Battery voltage), ความต้านทานภายในของแบตเตอรี่ (Battery internal resistance) และอุณหภูมิที่ขั้วแบตเตอรี่ (Battery temperature) เป็นต้น จากนั้นนำข้อมูลที่เก็บรวบรวมได้ไปวิเคราะห์แนวโน้มการทำงานของแบตเตอรี่ ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ระบบติดตามสถานะแบตเตอรี่

ตามมาตรฐาน IEEE Std 1491 แนวทางสำหรับการเลือกและใช้เครื่องมือการติดตามแบตเตอรี่ได้ระบุฟังก์ชันที่จำเป็นสำหรับระบบติดตามแบตเตอรี่ ดังนี้

1) สามารถตรวจสอบค่าพารามิเตอร์ต่างๆได้ตลอด 24 ชั่วโมง (Real-time) รวมถึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่แบตเตอรี่มีการคายประจุ โดยในการวัดค่าต้องไม่ส่งผลต่อความน่าเชื่อถือของสถานะการค้ำทางสุขภาพของแบตเตอรี่ (State of Health : SoH)

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

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

2) สามารถเก็บรวบรวมข้อมูลนำมาวิเคราะห์แนวโน้มการทำงานของแบตเตอรี่ที่อาจเกิดขึ้นในอนาคตเปรียบเทียบกับค่าพื้นฐานที่มีการกำหนดไว้และรายงานผลการวิเคราะห์

3) สามารถเชื่อมต่อและสื่อสารข้อมูลระหว่างคอมพิวเตอร์กับผู้ใช้งานทางไกลได้โดยใช้สื่อหลายรูปแบบ เช่น การใช้อุปกรณ์สื่อสารไร้สาย (Wireless device), การสั่งการทางไกล (Remote controllers), การใช้เส้นใยแก้ว (Fiber-optics) เป็นต้น โดยสื่อหรืออุปกรณ์ข้างต้นต้องเป็นไปตามมาตรฐานการสื่อสารของอุปกรณ์ IEC 61850

4) ควบคุมการเข้าถึงข้อมูลได้หลายรูปแบบ เช่น อ่านได้เพียงอย่างเดียว, ดูรายงานผลการวิเคราะห์ข้อมูลได้เพียงอย่างเดียว หรือ มีการควบคุมและตั้งค่าได้เต็มรูปแบบ เป็นต้น โดยระดับความปลอดภัยในการเข้าถึงข้อมูลจะเป็นไปตามนโยบายของผู้ใช้งานในแต่ละองค์กร

5) การจัดการข้อมูลควรได้รับการสำรองข้อมูลไว้ในแหล่งอื่นที่นอกเหนือจากแหล่งเก็บข้อมูลในคอมพิวเตอร์ส่วนกลาง

6) การออกแบบอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบติดตามสถานะแบตเตอรี่ให้มีความแข็งแรงเหมาะสมแก่การใช้งานในลักษณะต่างๆ สามารถทำงานร่วมกับระบบอื่นๆ ได้โดยไม่ไปรบกวนระบบอื่น (Electromagnetic Compatibility : EMC) มีการใช้งานที่ง่ายและสอดคล้องกับข้อมูลผู้ผลิตและคู่มือการซ่อมบำรุงแบตเตอรี่

2.4 การซ่อมบำรุงเชิงรุก (Proactive maintenance)

การซ่อมบำรุงเชิงรุก คือ การคาดการณ์ถึงผลกระทบล่วงหน้าหรือการวิเคราะห์รากสาเหตุของปัญหา (Root cause analysis) และนำมาทำการวางแผนการซ่อมบำรุงหรือออกแบบเพื่อป้องกันความเสียหายและเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องมือได้ ซึ่งประเด็นที่สำคัญในปัจจุบันสำหรับการซ่อมบำรุงเชิงรุก คือ รูปแบบการซ่อมบำรุงที่แตกต่างไปจากเดิม (Culture change) อาจส่งผลต่อความเชื่อมั่นของการซ่อมบำรุงเชิงรุกว่าจะมีประสิทธิภาพเทียบเท่าแบบเดิมหรือไม่ อีกหนึ่งประเด็นคือ ต้นทุน (Budget) ที่สูงสำหรับการติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบติดตามสถานะ, การสร้างระบบที่ปลอดภัยและน่าเชื่อถือ รวมถึงเจ้าหน้าที่ที่ควบคุมระบบส่วนใหญ่ยังขาดทักษะและความชำนาญ (Lack of training resource) ในการนำข้อมูลไปวิเคราะห์หาแนวโน้มที่อาจเกิดขึ้นได้ในอนาคต

ประเด็นดังกล่าวสามารถวิเคราะห์ในอีกมุมมองหนึ่งได้โดยการปรับทัศนคติเกี่ยวกับการซ่อมบำรุงเชิงรุกให้กับบุคลากร การมองเห็นถึงแนวคิดและการใช้ประโยชน์จากข้อมูลที่ได้จากระบบติดตามสถานะเพื่อใช้ในการวางแผนการซ่อมบำรุงเครื่องมือให้ถูกจุดและลดปริมาณงานการซ่อมบำรุงเชิงป้องกัน รวมถึงการเลือกใช้เทคโนโลยีและการจัดการข้อมูลที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการวิเคราะห์ข้อมูลให้มีความแม่นยำและสร้างความเชื่อมั่นให้กับการซ่อมบำรุงเชิงรุก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

2.5 การตรวจวัดและวิเคราะห์ค่าความต้านทานภายในของแบตเตอรี่ด้วยวิธี AC Measurement ที่ความถี่สูง (1 kHz)

2.5.1 หลักการวัดสัญญาณกระแสสลับที่ความถี่สูง (AC measurement at high frequency: 1 kHz) โดยการกระตุ้นสัญญาณกระแสไฟฟ้ากระแสสลับที่มีลักษณะในรูปคลื่นไซน์ (Sine wave) มีความถี่สูง 1 kHz ให้กับแบตเตอรี่ จากนั้นวัดผลตอบสนองในรูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้า และความต่างของเฟส (Phase shift) ระหว่างสัญญาณกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า ดังรูปที่ 2.11 เพื่อนำไปคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์ (Impedance) โดยอาศัยกฎของโอห์ม (Ohm's law) ดังสมการ

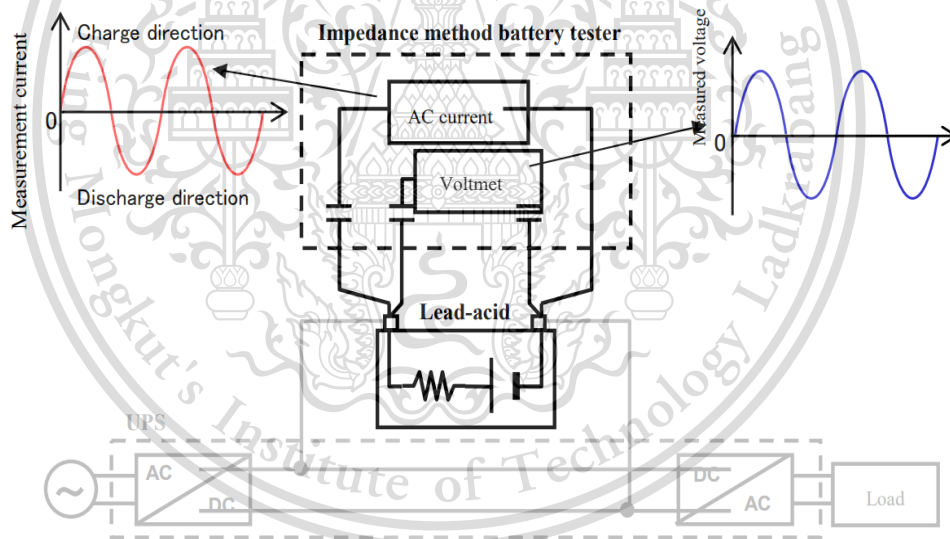
$$V = IZ \quad (2.8)$$

โดย

V คือ แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่คร่อมแบตเตอรี่ หน่วย V

I คือ กระแสไฟฟ้ากระแสสลับที่กระตุ้นให้กับแบตเตอรี่ หน่วย A

Z คือ ค่าอิมพีแดนซ์ (Impedance) หน่วย Ω

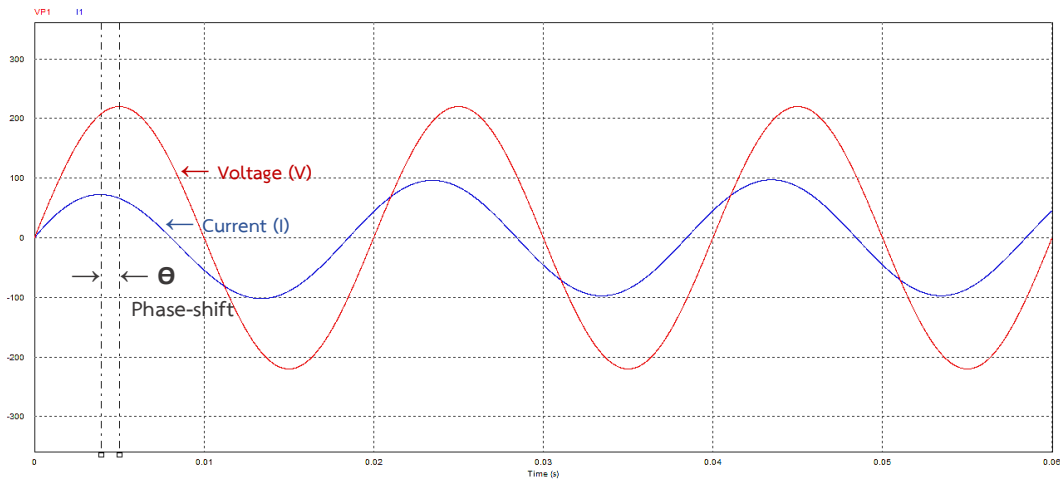


รูปที่ 2.11 AC Measurement Diagram

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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



รูปที่ 2.12 ค่าต่างเฟสระหว่างสัญญาณกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า

โดยทั่วไปแล้วไฟฟ้ากระแสสลับจะมีค่าความต่างเฟส (Phase shift) ระหว่างสัญญาณกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าอยู่ θ (เรเดียน) ดังรูปที่ 2.12 ซึ่งเมื่อค่าความต่างเฟสมีค่าเป็นศูนย์ ค่าอิมพีแดนซ์จะมีค่าเท่ากับค่าความต้านทาน (Resistance) ซึ่งขนาดของอิมพีแดนซ์ในรูปของไฟฟ้ากระแสสลับหาได้ดังสมการ

$$Z = \frac{V \sin(\omega t)}{I \sin(\omega t + \theta)} \quad (2.10)$$

โดย ω คือ ความถี่เชิงมุม หน่วย เมื่อ $\omega = 2\pi f$, f คือ ความถี่ หน่วย Hz

θ คือ ความต่างเฟส หน่วย radian

t คือ เวลา หน่วย second

นอกจากนี้อิมพีแดนซ์สามารถจัดให้อยู่ในรูปพิกัดคาร์ทีเซียนได้ดังสมการ (2.11)

$$Z = R + jX \quad (2.11)$$

เมื่อพิจารณาขนาดของค่าอิมพีแดนซ์ในสมการ (2.11) จะประกอบด้วยค่าจริง (Real Impedance) คือ R และค่าจินตภาพ (Imaginary Impedance) คือ X ในกรณีค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรสมมูลแบบเตอเรียแบบ One-RC branch สามารถจัดรูปในพิกัดคาร์ทีเซียนได้ดังสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

$$Z = R_0 + \frac{R_1}{1 - \omega^2 C_1^2 R_1^2} - j \frac{\omega C_1 R_1^2}{1 - \omega^2 C_1^2 R_1^2} \quad (2.12)$$

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

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

โดย Z คือ ค่าความต้านทาน
 R_0 คือ ค่าความต้านทานที่บ่งบอกถึงประสิทธิภาพของแบตเตอรี่
 R_1 คือ ค่าความต้านทานจากการถ่ายโอนประจุระหว่างแผ่นอิเล็กโทรด
 C_1 คือ ค่าตัวเก็บประจุที่อยู่ระหว่างอิเล็กโทรไลต์และอิเล็กโทรด

จากสมการ (2.12) ค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรสมมูลแบตเตอรี่ประกอบด้วยพจน์จริง คือ

$$R_0 + \frac{R_1}{1 - \omega^2 C_1^2 R_1^2} \text{ และพจน์จินตภาพ คือ } \frac{\omega C_1 R_1^2}{1 - \omega^2 C_1^2 R_1^2}$$

จากสมการ (2.11) สามารถสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าจริงกับ

ค่าจินตภาพของอิมพีแดนซ์ ซึ่งมีลักษณะเฉพาะเรียกว่า Nyquist plot หรือ Cole-Cole plot ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 Cole-Cole plot

การแสดงผลของ Cole-Cole plot จะประกอบด้วย แกนนอนเป็นค่าจริง (Real impedance : ReZ) แกนตั้งเป็นค่าจินตภาพ (Imaginary impedance : ImZ) ข้อมูลในช่วงความถี่ต่ำจะอยู่ด้านขวาของกราฟและข้อมูลในช่วงความถี่สูงจะอยู่ด้านซ้ายของกราฟ ลักษณะรูปกราฟของ Cole-Cole plot จะมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับความถี่และการแปรรูปแบบของค่าอิมพีแดนซ์ให้อยู่ในรูปของค่าพารามิเตอร์ในวงจรไฟฟ้า เช่น ความต้านทาน (Resistance), ตัวเก็บประจุ (Capacitance) และตัวเหนี่ยวนำ (Inductance) รวมถึงองค์ประกอบอื่นๆ ซึ่งอาจมีการต่อวงจรกันแบบอนุกรม ต่อขนาน ธรรมดา หรือมีพารามิเตอร์หลายองค์ประกอบในวงจรที่ซับซ้อน โดย Cole-Cole plot มีประโยชน์ในการแสดงภาพรวมของข้อมูลและอธิบายข้อมูลในเชิงคุณภาพได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เฉพาะเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดก็ตาม เว้นแต่ได้รับอนุญาตเป็นอย่างชัดแจ้งจากผู้จัดทำเอกสาร หากต้องการนำเอกสารนี้ไปใช้

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

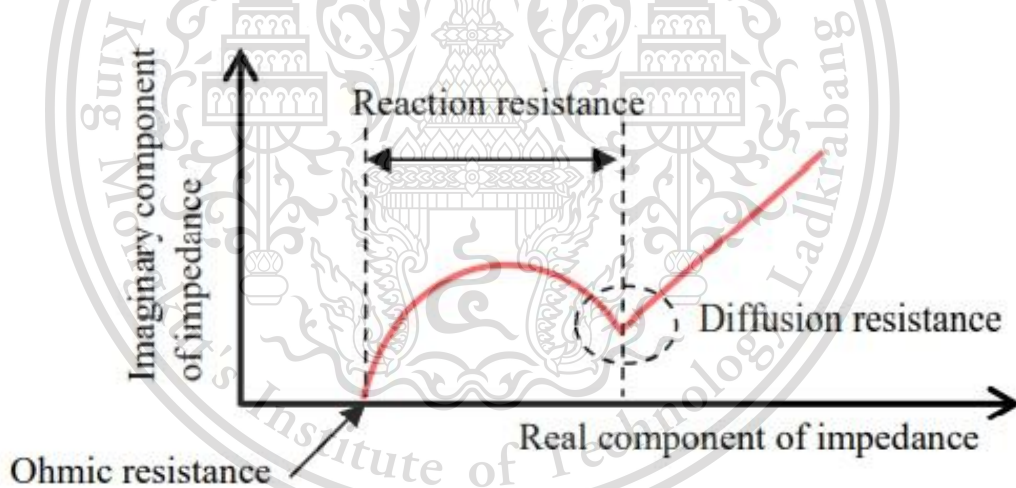
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เมื่อพิจารณา Cole-Cole plot องค์ประกอบของวงจรสมมูลแบบเตอริ์ตะกั้วกรด ดังรูปที่ 2.14 ซึ่งประกอบไปด้วยความต้านทานเนื่องจากสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (R_0) ความต้านทานจากการถ่ายโอนประจุ (R_1) และค่าตัวเก็บประจุ (C) สามารถอธิบายข้อมูลแต่ละองค์ประกอบในเชิงเคมีไฟฟ้าได้ว่า

- Ohmic resistance คือ ค่าความต้านทานเนื่องจากสารละลายอิเล็กโทรไลต์ขึ้นอยู่กับกระบวนการเหนี่ยวนำของเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนและลักษณะของขั้วอิเล็กโทรด เป็นพารามิเตอร์ที่ทำให้ศักย์ไฟฟ้าลดลงระหว่างขั้วไฟฟ้าอ้างอิงกับขั้วไฟฟ้าทำงาน และเป็นจุดตัดแกนนอนของกราฟในช่วงความถี่สูง

- Reaction resistance คือ ความต้านทานเนื่องจากการแพร่หรือถ่ายโอนไอออน ขึ้นอยู่กับการทำปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมีของแบบเตอริ์ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าของแบบเตอริ์

- Diffusion resistance คือ ความต้านทานที่เกิดจากการแพร่ไอออนไปยังขั้วอิเล็กโทรดเนื่องจากการทำปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าของแบบเตอริ์ ขึ้นอยู่กับอัตราการเกิดปฏิกิริยาและความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ เป็นจุดตัดแกนนอนในช่วงความถี่ต่ำ



รูปที่ 2.14 Cole-Cole plot องค์ประกอบของวงจรสมมูลแบบเตอริ์ตะกั้วกรด

ดังนั้นในการหาค่าพารามิเตอร์ของแบบเตอริ์โดยวิธี AC measurement ที่ความถี่ 1 kHz โดยใช้หลักการวิเคราะห์จาก Cole-Cole plot มีผลทำให้พจน์จินตภาพมีค่าน้อยมากหรืออาจเปรียบได้ว่าพารามิเตอร์ที่วัดได้มีแค่พจน์จริง คือ $Z = \text{Re}Z$ และคำนวณจากสมการในรูปพิกัดคาร์ทีเซียนดังสมการ (2.12) จะได้ว่าพจน์จินตภาพและพจน์จริงในส่วน $\frac{R_1}{1-\omega^2 C_1^2 R_1^2}$ มีค่าน้อยมาก

หรืออาจละทิ้งได้ ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่ากรวัดค่าความต้านทานภายในด้วยวิธี AC Measurement การคำนวณค่าความถี่ 1 kHz จะได้ $Z = R_0$ ไม่ว่ากรณีใดก็ตาม

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

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

2.6 สมการถดถอย (Regression)

สมการถดถอยเป็นการคาดคะเนกลุ่มของตัวแปรที่ใช้ในการทำนาย (Map a group of predictor variables, X) ต่อตัวแปรตอบสนอง (Response variable, y) โดยเมทริกซ์น้ำหนัก (W) ซึ่งอาศัยชุดข้อมูลในการสร้างสมการถดถอย 2 ชุด ประกอบด้วย

1) ชุดข้อมูลสำหรับการเรียนรู้ (Training data) สำหรับแก้สมการหาค่าเมทริกซ์น้ำหนัก เพื่อสร้างเป็นโมเดลสมการถดถอย

2) ชุดข้อมูลสำหรับการทดสอบ (Testing data) สำหรับทดสอบโมเดลของสมการถดถอยที่ได้จากชุดข้อมูลสำหรับการเรียนรู้ โดยจะเลือกจากชุดข้อมูลที่คล้ายคลึงกับชุดข้อมูลสำหรับการทดสอบและโมเดลสมการถดถอยที่ถูกทดสอบต้องไม่เคยเห็นข้อมูลสำหรับการทดสอบมาก่อน ซึ่งโมเดลสมการถดถอยสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้

2.6.1 สมการถดถอยเชิงเส้น (Multiple linear regression)

สมการถดถอยเชิงเส้นเป็นเทคนิคที่เหมาะสมกับการแก้ปัญหาที่มีลักษณะเป็นเชิงเส้น สำหรับปัญหาที่ไม่เป็นเชิงเส้นนั้นเทคนิคสมการถดถอยก็ยังสามารถนำมาใช้แก้ปัญหาได้ แต่ประสิทธิภาพการวิเคราะห์ที่ได้จะน้อยกว่ากรณีที่ปัญหามีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้น โดยการวิเคราะห์ค่าของพารามิเตอร์เป้าหมายโดยเทคนิคสมการถดถอยสามารถอธิบายโดยสังเขปได้ดังนี้

$$y = Xw + \epsilon \quad (2.13)$$

โดยที่

y คือ เวกเตอร์ขนาด (n×1) ของตัวอย่างของพารามิเตอร์ตอบสนอง

X คือ เมทริกซ์ขนาด (n×p) ของพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคาดการณ์ (Predictor variable) ที่มีคอลัมน์แสดงพารามิเตอร์และแถวแสดงตัวอย่างหรือการสังเกต

w คือ เมทริกซ์ค่าน้ำหนัก (Weight matrix) ขนาด (p×1)

ε คือ เวกเตอร์ขนาด (n×1) ของความผิดพลาดที่เกิดจากการคาดการณ์

ซึ่งจากสมการ (2.13) เมื่อนำเมทริกซ์ค่าน้ำหนักไปทำ Least squares sense เพื่อให้ค่าความผิดพลาดมีค่าต่ำที่สุดจน ε มีค่าน้อยมาก จะสามารถหาค่าเมทริกซ์น้ำหนัก W ได้โดย

$$w = X^{-1}y \quad (2.14)$$

2.6.2 สมการถดถอยแบบไม่เชิงเส้น (Non-linear regression)

สมการถดถอยแบบไม่เชิงเส้น คือ การสมมติว่าข้อมูลที่นำมาสร้างโมเดลสมการถดถอยมีความสัมพันธ์ที่เป็นแบบไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งในการศึกษาโมเดลสมการถดถอยนี้จะใช้รูปแบบโมเดลสมการถดถอยแบบไม่เชิงเส้น 2 รูปแบบ ดังนี้

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

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

2.6.2.1 สมการถดถอยแบบ Quadratic response surface model เป็นโมเดลที่เหมาะสมกับการตอบสนองแบบ quadratic ซึ่งเอาต์พุตที่ได้จะเป็นฟังก์ชัน polynomial ดีกรี 2 ซึ่งสำหรับโมเดลที่มีกลุ่มตัวแปรทำนาย 3 ตัวแปร จะมีลักษณะฟังก์ชันดังสมการ (2.15)

$$y = w_0 + w_1x_1 + w_2x_2 + w_3x_3 + w_4x_1x_2 + w_5x_1x_3 + w_6x_2x_3 + w_7x_1^2 + w_8x_2^2 + w_9x_3^2 \quad (2.15)$$

ซึ่งโมเดลสมการถดถอยแบบ Quadratic response surface model นี้จะต้องจัดรูปแบบของเมทริกซ์กลุ่มตัวแปรทำนายใหม่ให้สอดคล้องกับโมเดลที่ต้องการด้วย ดังนั้นสมการถดถอยแบบนี้จะมีความซับซ้อนในการศึกษามากกว่าสมการถดถอยเชิงเส้น

2.6.2.2 สมการถดถอยแบบลำดับขั้น (Stepwise regression)

สมการถดถอยแบบลำดับขั้นถูกนำมาใช้ในการเลือกตัวแปรที่มีความสำคัญที่ควรนำไปใช้ในการศึกษาสมการถดถอย โดยเป็นการพิจารณาหาจำนวนตัวแปรทำนายที่เหมาะสมต่อการศึกษาโมเดลสมการถดถอย

สำหรับโครงการนี้จะใช้โปรแกรม MATLAB ในการศึกษาหาโมเดลสมการถดถอยที่เหมาะสมต่อการทำนายหาค่าความต้านทานภายในแบตเตอรี่ ด้วยคำสั่ง regress()

2.7 การวิเคราะห์ฟังก์ชันที่เหมาะสมกับข้อมูล 2 มิติ (Curve fitting)

การทำ Curve fitting คือ การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของข้อมูลระหว่างตัวแปรอิสระ (Independent variable, x) กับตัวแปรตาม (Dependent variable) ซึ่งความสัมพันธ์ของข้อมูลสามารถแบ่งได้เป็น 2 รูปแบบ คือ

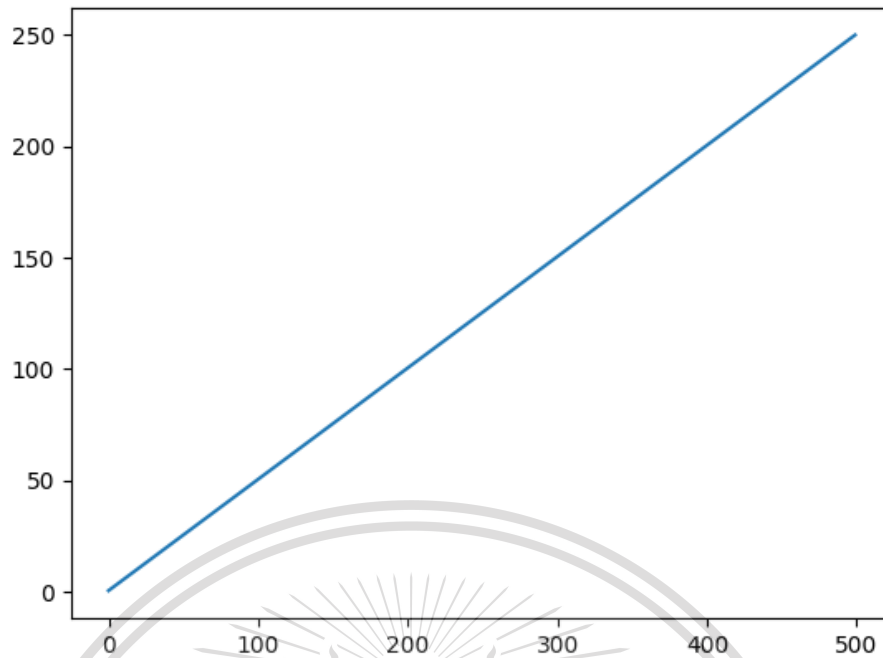
2.7.1 ความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear curve fitting) จะมีลักษณะความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง สามารถอธิบายได้ด้วยสมการ (2.16)

$$y = ax + b \quad (2.16)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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



รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ของฟังก์ชัน $y = 0.5x + 0.5$

2.7.2 ความสัมพันธ์แบบไม่เชิงเส้น (Non-linear curve fitting) จะมีลักษณะความสัมพันธ์เป็นไม่เป็นเส้นตรง ในทางคณิตศาสตร์ประกอบไปด้วยฟังก์ชันหลายรูปแบบแต่ในการวิเคราะห์ข้อมูลมักจะใช้ฟังก์ชันในการหาความสัมพันธ์ 2 แบบ ดังนี้

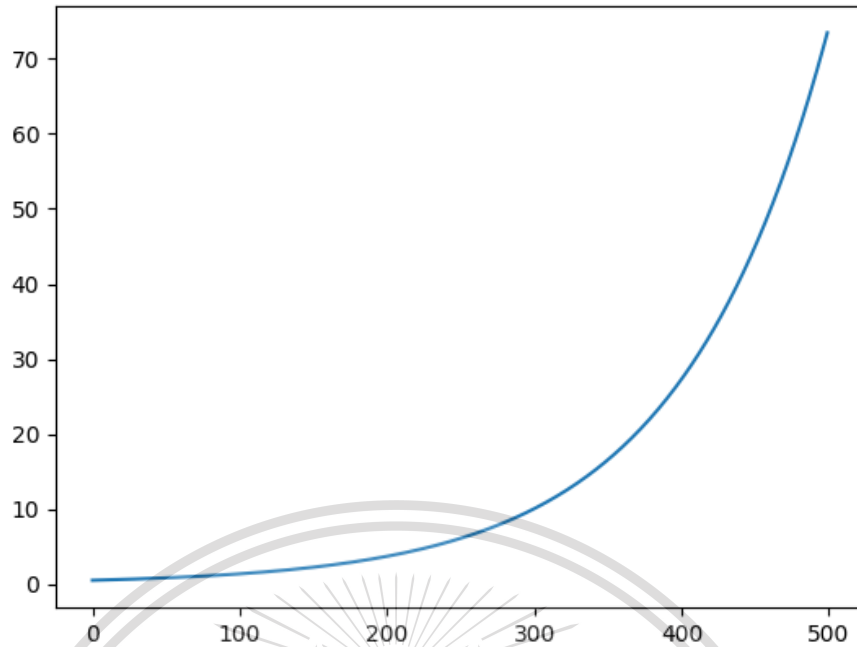
2.7.2.1 ฟังก์ชันเอ็กซ์โปเนนเชียล (Exponential function) สามารถอธิบายได้ด้วยสมการ (2.17)

$$y = ae^{bx} \quad (2.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

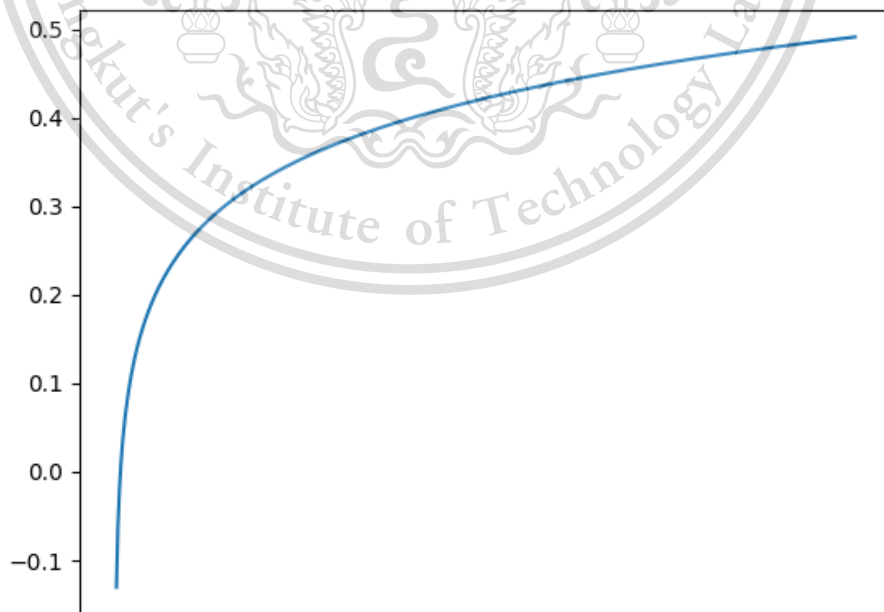
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.16 ความสัมพันธ์ของฟังก์ชัน $y = 0.5e^{0.5x}$

2.7.2.2 ฟังก์ชันลอการิทึม (Logarithmic function) สามารถอธิบายได้ด้วยสมการ (2.18)

$$y = a \log(bx) + c \tag{2.18}$$



รูปที่ 2.17 ความสัมพันธ์ของฟังก์ชัน $y = 0.1 \log(0.1x) + 0.1$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุผลเชิงนโยบายที่จำเป็นต้องอ้างอิงเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

2.8 ตัวแปรทางสถิติ

2.8.1 ค่าสหสัมพันธ์ (Correlation coefficient : R)

ค่าสหสัมพันธ์ คือ ค่าตัวแปรที่ใช้บ่งชี้ระดับความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอินพุต (x) กับเอาต์พุต (y) โดยระดับความสัมพันธ์จะอยู่ในช่วง -1 ถึง 1 โดยค่าสหสัมพันธ์ที่มีค่าเท่ากับ 1 หมายความว่า ตัวแปรอินพุตและเอาต์พุตมีแนวโน้มในทิศทางเดียวกันในระดับความสัมพันธ์ที่สูง ในทำนองเดียวกัน หากค่าสหสัมพันธ์ที่มีค่าเท่ากับ -1 หมายความว่าตัวแปรอินพุตกับเอาต์พุตมีระดับความสัมพันธ์กันสูงแต่ในทิศทางตรงข้ามกัน ในขณะที่ถ้าค่าสหสัมพันธ์มีค่าเท่ากับ 0 หมายถึง ตัวแปรทั้งสองไม่มีความสัมพันธ์ต่อกันเลย ซึ่งค่าสหสัมพันธ์สามารถคำนวณได้จากสมการ (2.19) หรือสามารถคำนวณได้ด้วยโปรแกรม MATLAB ผ่านคำสั่ง corrcoef()

$$R = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 \sum(y_i - \bar{y})^2}} \quad (2.19)$$

2.8.2 ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Mean Square Error : MSE)

ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยเป็นค่าที่ใช้กับการศึกษาโมเดลสมการถดถอย โดยเป็นค่าที่บอกถึงระดับความคลาดเคลื่อนของสมการถดถอยกับชุดข้อมูล โมเดลสมการถดถอยที่ดีควรมีค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยเข้าใกล้ 0 ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ (2.20)

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (2.20)$$

เมื่อ

y คือ ค่าตัวแปรตอบสนองของข้อมูลจริง

\hat{y} คือ ค่าตัวแปรตอบสนองที่ได้จากสมการถดถอย

n คือ จำนวนของตัวแปรตอบสนองทั้งหมด

2.8.3 ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination : R^2)

ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเป็นค่าที่สืบเนื่องมาจากค่าสหสัมพันธ์ โดยค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจจะบ่งบอกถึงประสิทธิภาพในการคำนวณตัวแปรเป้าหมายของโมเดลสมการถดถอยรวมไปถึงฟังก์ชันที่ได้จากการทำ curve fitting โดยโมเดลสมการถดถอยที่ดีควรมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเข้าใกล้ 1 ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสามารถคำนวณได้จากสมการ (2.21)

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} = 1 - \frac{SSE}{SST} \quad (2.21)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

2.8.3.1 ผลรวมกำลังสองของสมการถดถอย (Sum of Square due to Regression: SSR) ค่า SSR เป็นค่าที่ใช้แสดงถึงความเหมาะสมของโมเดลสมการถดถอยที่มีต่อชุดข้อมูลที่ใช้สร้างโมเดล โดยจะพิจารณาผลต่างค่าตัวแปรตอบสนองที่ได้จากสมการถดถอย (\hat{y}) กับค่าตัวแปรตอบสนองเฉลี่ยของชุดข้อมูลที่ใช้สร้างโมเดล (\bar{y}) ดังสมการ (2.22)

$$SSR = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \quad (2.22)$$

2.8.3.2 ผลรวมกำลังสองของค่าคลาดเคลื่อน (Sum of Square Error: SSE) ค่า SSE เป็นค่าที่แสดงถึงความคลาดเคลื่อนของค่าตัวแปรตอบสนองที่ได้จากสมการถดถอย (\hat{y}) กับค่าตัวแปรตอบสนองของชุดข้อมูลที่ใช้สร้างโมเดล (y) ดังสมการ (2.23)

$$SSE = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2 \quad (2.23)$$

2.8.3.3 ผลรวมกำลังสองทั้งหมด (Sum of Square Total: SST) ค่า SST เป็นค่าความแตกต่างของค่าตัวแปรตอบสนองของชุดข้อมูลที่ใช้สร้างโมเดล (y) กับค่าตัวแปรตอบสนองเฉลี่ยของชุดข้อมูลที่ใช้สร้างโมเดล (\bar{y}) ดังสมการ (2.24)

$$SST = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (2.24)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

บทที่ 3

การออกแบบการทดลอง

3.1 การทำแบบสำรวจลักษณะความต้องการระบบติดตามสถานะแบตเตอรี่ในสถานีไฟฟ้าย่อย

จากการลงพื้นที่สำรวจสถานีไฟฟ้าย่อย KMITL เพื่อสอบถามถึงปัญหาและความต้องการของผู้ใช้งานหรือผู้ควบคุมระบบภายในสถานีไฟฟ้าย่อย และกำหนดขอบเขตของการศึกษาของโครงการนี้สามารถสรุปประเด็นสำคัญได้ ดังนี้

- 1) การซ่อมซ่อมบำรุงแบตเตอรี่ยังคงเป็นการซ่อมบำรุงเชิงป้องกัน (Preventive Maintenance) คือ ทดสอบและถ่ายเปลี่ยนแบตเตอรี่ตามระยะเวลาการใช้งานที่ผู้ผลิตกำหนด
- 2) หากมีการถ่ายเปลี่ยนแบตเตอรี่จะเปลี่ยนแบตเตอรี่ทั้งระบบ เพื่อคงประสิทธิภาพการทำงานของระบบ ไม่ต้องการถ่ายเปลี่ยนแบตเตอรี่ทีละก้อนเพราะอาจทำให้การทำงานของระบบไม่เสถียร
- 3) หากมีการติดตั้งอุปกรณ์เพิ่มเติมเข้าไปในระบบอุปกรณ์ดังกล่าวต้องไม่รบกวนระบบเดิมหรือขั้นตอนการติดตั้งอุปกรณ์ต้องไม่ส่งผลให้ระบบเดิมหยุดการทำงาน
- 4) ระบบติดตามแบตเตอรี่ สามารถแก้ปัญหาแบตเตอรี่เสื่อมก่อนกำหนดการซ่อมบำรุงและลดค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงตามระยะเวลา

จากประเด็นดังกล่าวทำให้คณะผู้จัดทำโครงการได้กำหนดขอบเขตการศึกษา โดยระบบติดตามแบตเตอรี่ต้องไม่รบกวนการทำงานของระบบเดิม จึงใช้วิธีการเก็บข้อมูลหรือจำลองสถานะการทำงานของแบตเตอรี่ในสถานีไฟฟ้าย่อยจากแบตเตอรี่ทดสอบ ซึ่งเป็นประเภทตะกั่วกรดมีขนาดพิกัด 12 V โดยแบตเตอรี่แต่ละยี่ห้อจะมีสมการถดถอย (regression model) แตกต่างกัน และเพิ่มฟังก์ชันการวิเคราะห์ระยะเวลาก่อนแบตเตอรี่เสื่อม รวมถึงวิเคราะห์หาสาเหตุการเสื่อมของแบตเตอรี่

3.2 การออกแบบระบบติดตามสถานะแบตเตอรี่

3.2.1 การออกแบบอุปกรณ์วัดค่าพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่

ในการสร้างอุปกรณ์เพื่อที่จะใช้ในระบบติดตามสถานะแบตเตอรี่ต้องออกแบบวิธีวัดค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับแบตเตอรี่ ดังนี้

3.2.1.1 แรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่

ใช้เซ็นเซอร์วัดค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (Voltage sensor) ซึ่งใช้หลักการของวงจรแบ่งแรงดัน (Voltage Divider) ในการวัดค่าแรงดันขณะทำการอัดประจุด้วยแรงดันลอย

3.2.1.2 กระแสไฟฟ้าของวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่ไม่ใช่การค้าและไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

ใช้เซ็นเซอร์วัดค่ากระแสไฟฟ้ากระแสตรง (Current sensor) วัดค่ากระแสในวงจร จากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงในขณะที่อัดประจุถึงแบตเตอรี่ด้วยแรงดันลอย

3.2.1.3 อุณหภูมิแวดล้อมและอุณหภูมิที่ขั้วของแบตเตอรี่

ใช้ Thermistor 100K ในการวัดค่าอุณหภูมิเพื่อนำมาเปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่ขั้วของ แบตเตอรี่กับอุณหภูมิแวดล้อม

3.2.2 การออกแบบวงจรการทำงานของอุปกรณ์วัดค่าและแผ่นวงจรพิมพ์

การจัดวางเซ็นเซอร์มีความซับซ้อนจึงมีความจำเป็นต้องจัดวางในตำแหน่งที่เหมาะสม โดยทั้งหมดนี้จะอยู่ในแผ่นวงจรพิมพ์เดียวกัน เพื่อจำกัดขนาดของอุปกรณ์ให้เหมาะสมต่อการใช้งาน ในส่วนนี้จะใช้โปรแกรม Fritzing ในการออกแบบวงจรไฟฟ้าเป็น Schematic Diagram จากนั้นใช้โปรแกรม Proteus ออกแบบแผ่นวงจรพิมพ์ โดยอุปกรณ์วัดค่าพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่ จะมี Arduino nano ทั้งหมด 4 ตัว เป็นตัวประมวลผลการทำงาน สามารถแบ่งส่วนการทำงานได้ดังนี้

3.2.2.1 ตัวประมวลผลหลัก Arduino nano

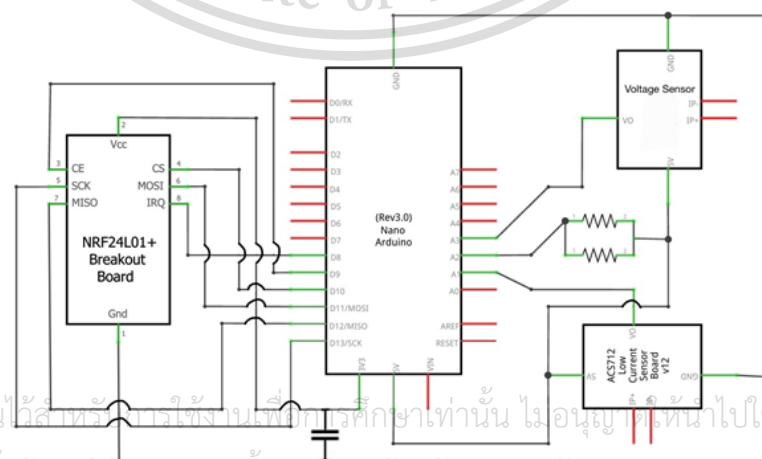
จะถูกแบ่งใช้งานใน 2 ส่วน คือ ตัวส่งและตัวรับ (Slave and Master) โดยจะแบ่งเป็นตัวส่ง 3 ตัวและตัวรับ 1 ตัว ตัวส่งมีหน้าที่ในการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมแบตเตอรี่, กระแสไฟฟ้ากระแสตรง, อุณหภูมิแวดล้อม และอุณหภูมิที่ขั้วของแบตเตอรี่ จากนั้นส่งข้อมูลไปยังตัวรับซึ่งจะทำหน้าที่ส่งข้อมูลทั้งหมดไปยังหน่วยแสดงผลและฐานข้อมูล (Cloud)

3.2.2.2 ตัวสื่อสารระหว่าง Arduino nano

ในการสื่อสารระหว่างตัวส่งและตัวรับ จะใช้การสื่อสารแบบไร้สาย (Wireless) เพื่อลดการใช้สายในระบบ โดยจะใช้โมดูลไร้สาย nRF24L01

3.2.2.3 เซ็นเซอร์ในการวัดค่าพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่

เซ็นเซอร์วัดค่าแรงดันไฟฟ้า ตกคร่อมแบตเตอรี่และค่าอุณหภูมิที่ขั้วของแบตเตอรี่จะอยู่ในส่วนของตัวส่งข้อมูล ส่วนตัวรับข้อมูลจะมีเซ็นเซอร์วัดค่ากระแสไฟฟ้าของและค่าอุณหภูมิแวดล้อม

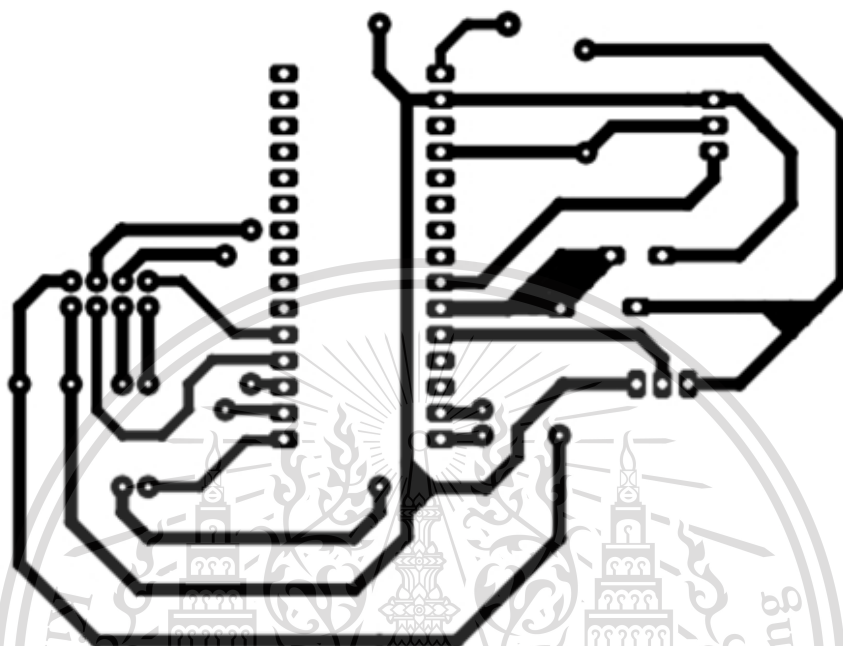


รูปที่ 3.1 Schematic Diagram เซ็นเซอร์ตัวส่งและตัวรับ

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

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

รูปที่ 3.1 เป็นการออกแบบ Schematic Diagram ของอุปกรณ์วัดค่าพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่ทั้งตัวรับและตัวส่ง จากนั้นนำไปสร้างแผ่นวงจรพิมพ์ออกมาเป็นดังรูปที่ 3.2 ซึ่งตัวรับและตัวส่งสามารถใช้แผ่นวงจรพิมพ์เดียวกันได้



รูปที่ 3.2 แผ่นวงจรพิมพ์ของวงจรที่ออกแบบ

3.2.3 การเปรียบเทียบอุปกรณ์วัดค่าพารามิเตอร์แบตเตอรี่

ในการเปรียบเทียบอุปกรณ์วัดค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง กระแสไฟฟ้ากระแสตรง อุณหภูมิแวดล้อมและอุณหภูมิที่ขั้วแบตเตอรี่ จะทำการเปรียบเทียบเซ็นเซอร์ทั้งหมด 3 ตัว ดังนี้

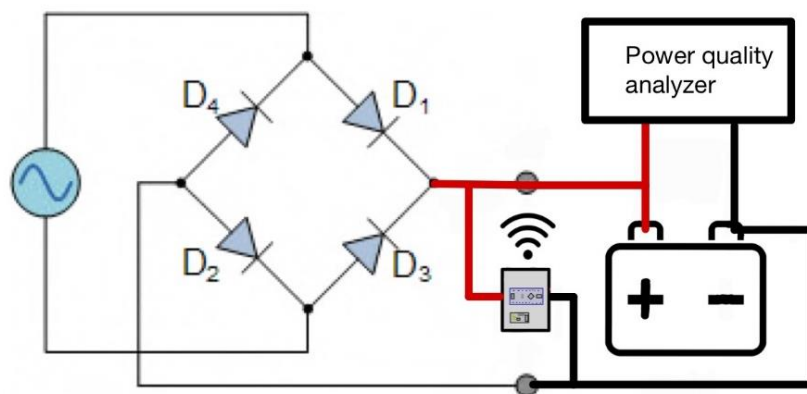
3.2.3.1 การเปรียบเทียบเซ็นเซอร์วัดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

การเปรียบเทียบเซ็นเซอร์วัดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจะทำการเปรียบเทียบกับ Power Quality Analyzer มีวงจรการปรับเทียบดังรูปที่ 3.3 โดยจะทำการปรับเทียบในช่วง 10-15 V เพื่อให้ครอบคลุมย่านการวัดที่ใช้ในการทดลอง โดยเริ่มจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจที่ระดับแรงดัน 10 V ปรับเพิ่มขึ้นขั้นละ 0.5 V จนถึง 15 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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



รูปที่ 3.3 วงจรสำหรับการเปรียบเทียบเซ็นเซอร์วัดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

ตารางที่ 3 1 ค่าเปรียบเทียบเซ็นเซอร์วัดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

Power Quality Analyzer (V)	Arduino nano (V)
10	11.2
10.5	11.7
11	12.1
11.5	12.6
12	12.9
12.5	13.1
13	13.3
13.5	13.9
14	14.4
14.5	14.7
15	15.1

ได้สมการการเปรียบเทียบเป็น $y = 0.7527x + 3.7727$ โดยที่ y คือ ค่าจาก Power Quality Analyzer และ x คือ ค่าจาก Arduino nano

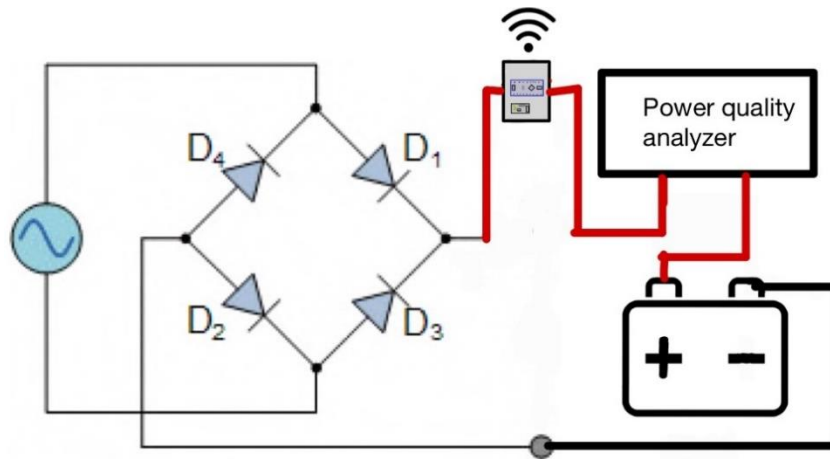
3.2.3.2 การเปรียบเทียบเซ็นเซอร์วัดกระแสไฟฟ้ากระแสตรง

การเปรียบเทียบเซ็นเซอร์วัดกระแสไฟฟ้ากระแสตรงจะทำการเปรียบเทียบกับ AC/DC AUTO ZERO CURRENT SENSOR-CT7736 โดยมีวงจรการเปรียบเทียบดังรูปที่ 3.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารประกอบการเรียนการสอนของนักศึกษาปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี โดยเริ่มจากการจ่ายกระแสไฟฟ้ากระแสตรงที่ 0.2 A เพิ่มขึ้นทีละ 0.2 A จนถึง 2 A

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

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



รูปที่ 3.4 วงจรสำหรับการเปรียบเทียบเซ็นเซอร์วัดกระแสไฟฟ้ากระแสตรง

ตารางที่ 3.2 ค่าเปรียบเทียบเซ็นเซอร์วัดกระแสไฟฟ้ากระแสตรง

AC/DC Auto zero current sensor-CT7736 (A)	Arduino nano (A)
0.2	0.18
0.4	0.39
0.6	0.6
0.8	0.78
1	1.05
1.2	1.18
1.4	1.4
1.6	1.6
1.8	1.8
2	2

ได้สมการการเปรียบเทียบเป็น $y = 0.9917x + 0.0111$ โดยที่ y คือค่าจาก AC/DC Auto zero current sensor-CT7736 และ x คือค่าจาก Arduino nano

3.2.3.3 การเปรียบเทียบเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ

การเปรียบเทียบเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิจะทำการเปรียบเทียบกับ Temperature and humidity chamber Platinous J series โดยการนำเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิไปวางไว้ในตู้อบและปรับระดับอุณหภูมิของตู้อบในช่วง 20-40 °C เพื่อให้ครอบคลุมย่านการวัดที่ใช้ในการทดลอง โดยเริ่มจากอุณหภูมิ 20 °C ปรับเพิ่มขึ้นขั้นละ 1 °C แล้วทำการเปรียบเทียบค่าเซ็นเซอร์ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

ตารางที่ 3.3 ค่าเปรียบเทียบเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ

Temperature and humidity chamber Platinous J series (°C)	Arduino nano (°C)
20	17.7
21	18.21
22	18.64
23	19.25
24	22.46
25	23.89
26	24.5
27	25.83
28	26.42
29	28.5
30	29.65
31	31.2
32	32.58
33	33.8
34	35.22
35	36.7
36	36.92
37	38.13
38	39.33
39	41.42
40	43.5

ได้สมการการปรับเทียบเป็น $y = 0.768x + 7.1861$ โดยที่ y คือ ค่าจาก Temperature and humidity chamber Platinous J series และ x คือ ค่าจาก Arduino nano

3.2.4 การออกแบบระบบแสดงผล

การได้มาของข้อมูลจากอุปกรณ์ติดตามสถานะแบตเตอรี่ จะได้รับมาจากการสื่อสารกันระหว่างอุปกรณ์ตัวรับ (Master) และระบบประมวลผล เพื่อส่งค่าไปยังตัวแสดงผลซึ่งจะใช้ Node-red เป็นเครื่องมือในการออกแบบระบบแสดงผล หน้าจอแสดงผลจะแบ่งเป็นสัดส่วน ดังนี้

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

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

3.2.4.1 ส่วนแสดงผลข้อมูลของแบตเตอรี่แบบ Real time

ในส่วนนี้จะแสดงผลข้อมูลพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่ คือ แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมแบตเตอรี่, กระแสไฟฟ้ากระแสตรงของวงจร, อุณหภูมิที่ขั้วแบตเตอรี่ และแสดงผลเพิ่มเติม คือ อุณหภูมิแวดล้อม

3.2.4.2 ส่วนแสดงผลข้อมูลแบบย้อนหลัง

ระบบจะมีการบันทึกข้อมูลไว้ทั้งหมด 2 รูปแบบ คือ ข้อมูลแบตเตอรี่ในแต่ละวันและข้อมูลแบตเตอรี่ตั้งแต่ระบบเริ่มทำงาน โดยผู้ใช้งานสามารถเข้าไปดูข้อมูลการใช้งานย้อนหลังได้

3.2.4.3 ส่วนแสดงอายุการใช้งานของแบตเตอรี่

ระบบจะทำการประมาณค่าอายุการใช้งานของแบตเตอรี่เมื่อมีคำสั่งจากผู้ใช้งานผ่านทางหน้าจอ จากนั้นจะแสดงผลที่หน้าจอแสดงผลเป็นค่าสถานะทางสุขภาพของแบตเตอรี่ (SoH) และระยะเวลาที่แบตเตอรี่ใกล้เสื่อม

3.2.4.4 ส่วนแสดงประวัติการแจ้งเตือน

เมื่อมีการแจ้งเตือนไปยังแอปพลิเคชันไลน์ (Line notify) ระบบจะทำการเก็บข้อมูลการแจ้งเตือนไว้และแยกเป็นหัวข้อแต่ละสาเหตุของการทำงานของแบตเตอรี่ในสถานะที่ผิดปกติ จากนั้นสรุปผลการแจ้งเตือนออกมาเป็นแผนภูมิซึ่งบอกถึงจำนวนครั้งในการเกิดการทำงานในสถานะที่ผิดปกติ

3.3 การออกแบบฟังก์ชันการทำงานระยะเวลาที่แบตเตอรี่เกิดการเสื่อมสภาพ

3.3.1 ออกแบบหลักการทำงานระยะเวลาที่แบตเตอรี่เกิดการเสื่อมสภาพ

ฟังก์ชันการทำงานระยะเวลาที่แบตเตอรี่เกิดการเสื่อมสภาพนั้นจะพิจารณาการเพิ่มขึ้นของค่าความต้านทานภายในแบตเตอรี่ โดยอาศัยหลักการของสมการถดถอยในการคาดคะเนค่าความต้านทานภายในแบตเตอรี่ ณ เวลาใดๆด้วยเมทริกซ์น้ำหนัก (w) ที่ได้จากการหาโมเดลสมการถดถอยของแบตเตอรี่ตะกั่วกรดยี่ห้อ Vision (12V 5Ah) ซึ่งสามารถกำหนดตัวแปรในการศึกษาสมการถดถอยสำหรับโครงการนี้ได้ดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ตัวแปรสำหรับการศึกษาสมการถดถอย

ตัวแปรที่ใช้ในการทำนาย (Predictor variables, x)	ตัวแปรตอบสนอง (Response variable, y)
x_1 : ความแตกต่างระหว่างแรงดันตกคร่อม แบตเตอรี่แต่ละก้อนกับพิกัดแรงดันลอย (ΔV)	y : ความต้านทานภายในแบตเตอรี่ (R_0)
x_2 : กระแสในวงจร (I) ใช้งานเพื่อการศึกษา	
x_3 : ความแตกต่างของอุณหภูมิที่ขั้วแบตเตอรี่กับ อุณหภูมิแวดล้อม (ΔT)	

ในการหาโมเดลสมการถดถอยนี้ จะใช้ทั้งเทคนิคสมการถดถอยเชิงเส้น (Multiple linear regression) และเทคนิคสมการถดถอยแบบไม่เชิงเส้น (Non-linear regression) เพื่อให้ได้โมเดลที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งจะพิจารณาจากค่าทางสถิติต่างๆ ดังนี้

- 1) ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์พหุ (Correlation coefficient : R)
- 2) ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Mean Square Error : MSE)
- 3) ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination : R²)

โมเดลสมการถดถอยนี้จะคาดคะเนค่าความต้านทานภายในแบตเตอรี่ ณ เวลาใดๆ จากนั้นระบบจะบันทึกค่าความต้านทานดังกล่าวไว้ และนำไปวิเคราะห์หาฟังก์ชันการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานภายในแบตเตอรี่เทียบกับระยะเวลาต่อไป เพื่อคำนวณหาระยะเวลาที่แบตเตอรี่เสื่อมสภาพ ซึ่งสามารถอธิบายด้วย Flow chart

3.3.2 การเก็บข้อมูลเพื่อสร้างโมเดลสมการถดถอย

3.3.2.1 การตรวจสอบความถูกต้องของค่าความต้านทานภายในแบตเตอรี่ การวัดค่าความต้านทานภายในแบตเตอรี่ในโครงการนี้ จะวัดโดยใช้ Battery analyzer model BA6011 ซึ่งเป็นเครื่องมือที่วัดค่าความต้านทานภายในแบตเตอรี่โดยใช้หลักการวัดสัญญาณกระแสสลับที่ความถี่สูง (AC measurement at high frequency: 1 kHz)



รูปที่ 3.5 Battery Analyzer model BA6011

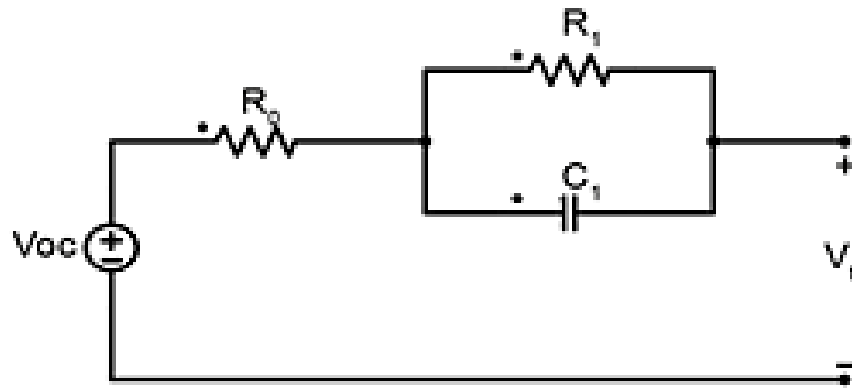
เนื่องจาก R_0 เป็นตัวแปรจากวงจรสมมูลแบตเตอรี่ ดังนั้นจึงต้องตรวจสอบความถูกต้องของทฤษฎีการวัดค่าความต้านทานภายในแบตเตอรี่ที่สัญญาณกระแสสลับที่ความถี่สูง 1 kHz และความถูกต้องของเครื่องมือวัด เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลก่อนจะนำไปสร้างโมเดลสมการถดถอย

ตอนที่ 1 : ตรวจสอบความถูกต้องของทฤษฎีการวัดค่าความต้านทานภายในแบตเตอรี่ที่สัญญาณกระแสสลับที่ความถี่สูง 1 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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



รูปที่ 3.6 วงจรสมมูลของแบตเตอรี่ One-RC branch circuit

จากวงจรสมมูลแบตเตอรี่ One-RC branch circuit ดังรูปที่ 3.6 จะได้ค่าอิมพีแดนซ์รวมของวงจร (Z) ดังสมการ (3.1)

$$Z = R_0 + \frac{R_1}{1 - \omega^2 C_1^2 R_1^2} - j \frac{\omega C_1 R_1^2}{1 - \omega^2 C_1^2 R_1^2} \quad (3.1)$$

จากสมการ (3.1) จะนำไปจำลองผลการตอบสนองของสัญญาณกระแสสลับที่ความถี่ย่านต่างๆ ด้วยโปรแกรม PyCharm ในรูปแบบของกราฟ Cole-Cole plot เพื่อศึกษาพฤติกรรมของพารามิเตอร์แบตเตอรี่ที่ความถี่ต่างๆ

ตอนที่ 1.1 : ศึกษากราฟ Cole-Cole plot ของแบตเตอรี่เมื่อพารามิเตอร์ในวงจรสมมูลมีค่าเปลี่ยนไปที่ความถี่ 1 kHz

ตารางที่ 3.5 การศึกษาค่าพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่ที่ย่านความถี่ต่างๆ

ความถี่	พารามิเตอร์ในวงจรสมมูล		
	R_0 (Ω)	R_1 (Ω)	C_1 (Farad)
1 kHz	0.01	0.02	0.12
	0.05		
	0.1		
	0.01	0.02	0.12
		0.05	
		0.1	
0.01	0.02	0.12	
		0.25	
		0.5	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ในเชิงพาณิชย์ด้วยการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

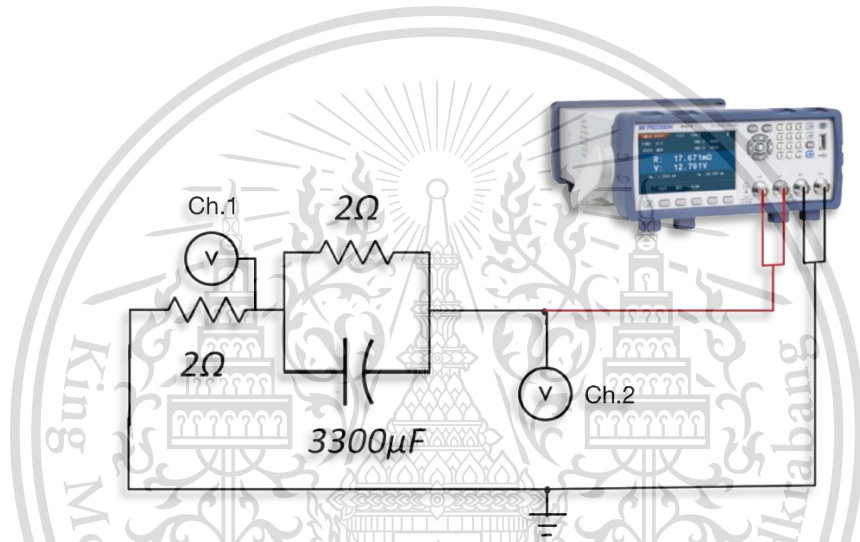
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตอนที่ 1.2 : ศึกษาผลของความถี่ที่มีต่อกราฟ Cole-Cole plot

ตารางที่ 3.6 การศึกษาผลของความถี่ที่มีต่อ Cole-Cole plot

พารามิเตอร์ในวงจรสมมูล	ความถี่		
$R_0 = 0.01 (\Omega)$	100 Hz	500 Hz	1 kHz
$R_1 = 0.02 (\Omega)$			
$C_1 = 0.12 (\text{Farad})$			

ตอนที่ 2 : ตรวจสอบความถูกต้องของเครื่องมือวัด



รูปที่ 3.7 การจำลองวงจรสมมูลแบบเตอเรียเพื่อวัดค่าความต้านทานภายใน

ต่อวงจรดังรูปที่ 3.7 เพื่อจำลองการวัดค่าความต้านทานภายในแบบเตอเรียของเครื่อง Battery analyzer model BA6011 โดยการจำลองวงจรสมมูลแบบเตอเรีย One-RC branch circuit ที่ทราบค่าพารามิเตอร์ทั้งหมด จากนั้นวัดสัญญาณผลตอบสนองของแรงดันวงจรรวมเทียบกับสัญญาณกระแสในวงจรด้วยออสซิลโลสโคป เพื่อเปรียบเทียบผลกับค่าความต้านทานที่เครื่องมือวัดได้ ซึ่งสามารถคำนวณค่าความต้านทานได้จากกฎของโอห์ม (Ohm's law)

$$Z = \frac{V}{I} \quad (3.2)$$

โดย Z คือ ความต้านทานภายในแบบเตอเรีย (Ω)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ V คือ แรงดันไฟฟ้า AC ตกคร่อมแบบเตอเรีย (V) อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งที่ คือ กระแสไฟฟ้า AC ที่ไหลผ่านแบบเตอเรีย (A) เจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

3.3.2.2 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อค่าความต้านทานภายใน

แบตเตอรี่

ตอนที่ 1 : วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานภายในแบตเตอรี่กับสถานะทางสุขภาพแบตเตอรี่ (Stage of health : SoH) โดยเก็บบันทึกข้อมูลได้จากหัวข้อ 3) การเก็บข้อมูลตัวแปรต่างๆ จากนั้นบันทึกผลและวิเคราะห์ผลเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า SoH และ R_0 ของแบตเตอรี่ โดยความสัมพันธ์ดังกล่าวจะถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อทำนายค่า R_0 ที่ SoH 80%

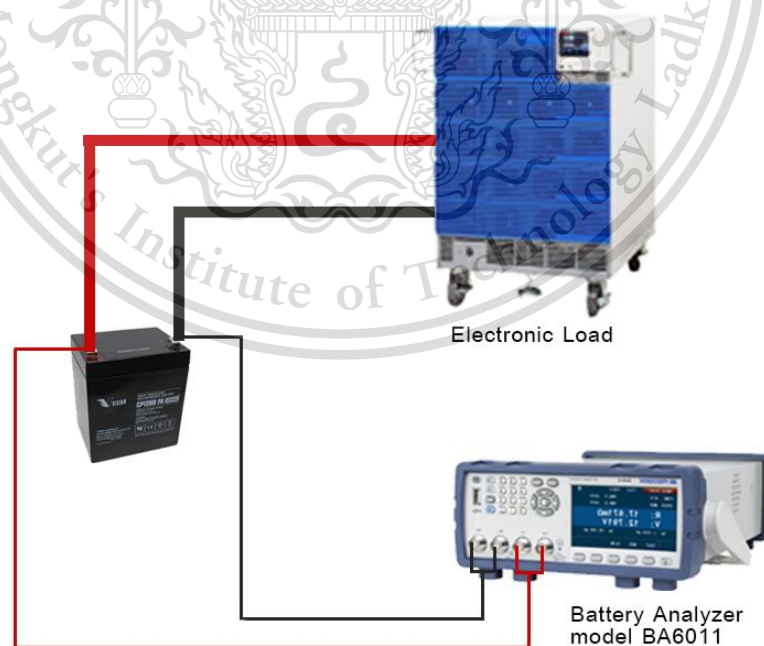
ตอนที่ 2 : วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานภายในแบตเตอรี่กับสถานะการเก็บประจุ (Stage of charge, SoC)

1) ต่อดวงจรดังรูปที่ 3.8

2) วัด R_0 : วัดค่า R_0 ของแบตเตอรี่ทดสอบโดยเครื่อง Battery Analyzer model BA6011 ซึ่งแบตเตอรี่ทดสอบมีประสิทธิภาพดี 100% และถูกอัดประจุจนมีค่า SoC 100%

3) ปรับค่า SoC: หลังจากวัดค่า R_0 ของแบตเตอรี่ก็้อนทดสอบที่ SoC 100% แล้วจึงทำการคายประจุแบตเตอรี่ด้วยพิกัดกระแสคงที่รอบละ 2 A จำนวน 30 รอบ โดยแต่ละรอบจะทำการคายประจุแบตเตอรี่เป็นเวลา 2 นาที และพัก 2 นาที เพื่อทำการวัดค่า R_0 แต่ละรอบการคายประจุ

4) บันทึกผลและวิเคราะห์ผลเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า SoC และค่า R_0 ของแบตเตอรี่



รูปที่ 3.8 วงจรวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานภายในแบตเตอรี่กับสถานะการเก็บ

ประจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นใบนี้โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

3.3.2.3 เก็บข้อมูลตัวแปรต่างๆ

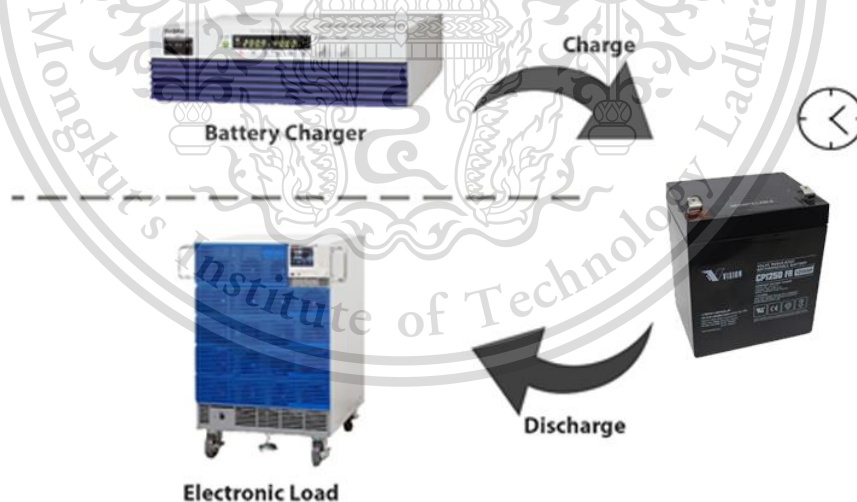
เพื่อเก็บข้อมูลตัวแปรกลุ่มทำนายและตัวแปรตอบสนองตลอดจนค่า SoH ของแบตเตอรี่สำหรับสร้างโมเดลสมการถดถอยและสำหรับสร้างฟังก์ชันทำนายระยะเวลาที่แบตเตอรี่เสื่อมสภาพ มีลำดับการเก็บข้อมูล ดังนี้

1) ค่าความต้านทานภายใน (R_0) : เริ่มต้นด้วยแบตเตอรี่ทดสอบที่มีประสิทธิภาพดี 100% โดยสามารถวัดค่า R_0 ได้โดยเครื่อง Battery Analyzer model BA6011

2) ค่า State of Health (SoH) : โดยการนำแบตเตอรี่ทดสอบมาอัดประจุด้วยอัตรา 0.2C- 0.3C และคายประจุ 3.25 A อ้างอิงข้อมูลจากเนมเพลตผู้ผลิต จากนั้นจับเวลาที่แบตเตอรี่ใช้ในการอัดประจุจนเต็มหรือคายประจุจนหมดเทียบกับเวลาที่คำนวณเทียบจากพิกัดความจุเริ่มต้นของแบตเตอรี่ ดังสมการ (3.3)

$$\text{SoH} = \frac{I_{\text{discharge}}(\text{A})t_{\text{discharge}}(\text{h})}{\text{Capacity}_{\text{nominal}}(\text{Ah})} \times 100\% \quad (3.3)$$

ในโครงการนี้ได้ใช้แบตเตอรี่ตะกั่วกรดชนิด GEL 12V 5Ah นั้นแสดงว่าหากอัดประจุและคายประจุด้วยอัตรา 0.2C แบตเตอรี่ที่มีค่า SoH 100% ต้องสามารถอัดประจุได้ 5 ชั่วโมงและคายประจุได้ 1 ชั่วโมง (3.25Ah) เป็นต้น



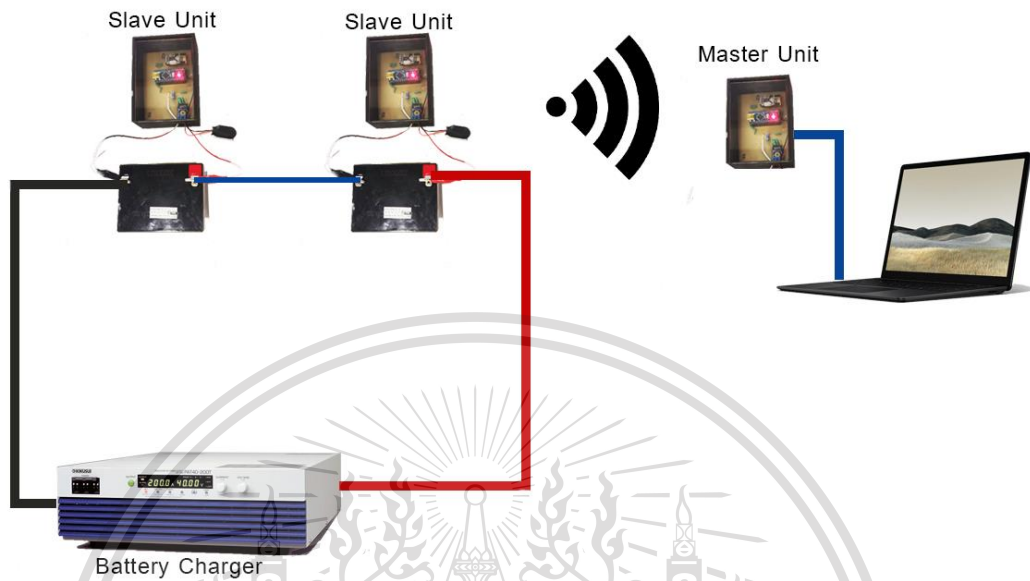
รูปที่ 3.9 วิธีการเก็บข้อมูล SoH ของแบตเตอรี่

3) กลุ่มตัวแปรทำนาย : ประกอบด้วย V_{batt} , I_{string} , T_{amb} และ T_{batt} โดยจำลองเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ลักษณะการใช้งานแบตเตอรี่ในระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงของสถานไฟฟ้าย่อย โดยการนำไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามแก้ไขเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

แบตเตอรี่ทดสอบโพลต์แรงดันวงจรอนุกรมกับแบตเตอรี่ที่ถูกควบคุมให้มีค่า SoH 100% เสมอ จากนั้นวัดค่าพารามิเตอร์ V_{Batt} , T_{Batt} , T_{amb} , I_{string} และบันทึกผลดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 วงจรจำลองลักษณะการใช้งานแบตเตอรี่ในระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

4) ศึกษาผลของตัวแปรต่างๆเมื่อแบตเตอรี่มีประสิทธิภาพลดลง : นำแบตเตอรี่ทดสอบไปผ่านกระบวนการทำให้เสื่อมสภาพด้วยการอัดประจุเกิน (Over-charge) และคายประจุเกิน (Over-discharge) จากนั้นทำซ้ำตามขั้นตอนที่ 3.1) ถึง 3.3) เพื่อเก็บข้อมูล 70 ข้อมูล สำหรับการทำโมเดลสมการถดถอย

3.3.3 การสร้างฟังก์ชันทำนายระยะเวลาที่แบตเตอรี่เกิดการเสื่อมสภาพ

หลังจากได้โมเดลสมการถดถอยที่เหมาะสมกับแบตเตอรี่ยี่ห้อที่นำมาทดสอบแล้ว ลำดับต่อไประบบจะนำค่าความต้านทานภายในแบตเตอรี่ที่ได้จากการคาดคะเนของโมเดลสมการถดถอยดังกล่าวไปศึกษาถูกพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงเทียบกับเวลา ซึ่งค่าความต้านทานภายในแบตเตอรี่ดังกล่าวจะถูกตรวจวัดทุกวัน จากนั้นระบบจะวิเคราะห์หาฟังก์ชันความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานภายในแบตเตอรี่ (Dependent variable : R_0) กับจำนวนวัน (Independent variable : Day) ที่มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination : R^2) สูงที่สุด โดยรูปแบบฟังก์ชันที่เป็นไปได้จะประกอบไปด้วย 3 รูปแบบดังนี้

1. ฟังก์ชันแบบเชิงเส้น (Linear curve fitting)
2. ฟังก์ชันเอ็กซ์โปเนนเชียล (Exponential function)
3. ฟังก์ชันลอการิทึม (Logarithmic function)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ใช้... อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า... โดยระบบจะคำนวณระยะเวลาที่แบตเตอรี่เกิดการเสื่อมสภาพได้จากสมการ (3.4)

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

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

$$\text{Rest of battery lifetime} = f(\text{RO at SoH } 80\%) - f(\text{RO at the present}) \quad (3.4)$$

3.5 การออกแบบฟังก์ชันวิเคราะห์สาเหตุการเสื่อมสภาพของแบตเตอรี่

จากพฤติกรรมการใช้งานของแบตเตอรี่ในระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงของสถานีไฟฟ้าย่อยและจากฟังก์ชันแจ้งเตือนของระบบติดตามสถานะแบตเตอรี่ที่ได้ออกแบบในหัวข้อที่ 3.1 จึงสามารถสร้างฟังก์ชันการวิเคราะห์สาเหตุการเสื่อมสภาพของแบตเตอรี่ที่ตรวจวัดได้โดยอาศัยหลักการทางสถิติ ในการสรุปภาพรวมสาเหตุของปัญหาต่าง ๆ ซึ่งสามารถจำแนกสาเหตุที่ส่งผลให้แบตเตอรี่เสื่อมสภาพ ได้ดังนี้

1.) การชาร์จด้วยแรงดันที่มากกว่าหรือน้อยกว่าแรงดันพิกัดของแบตเตอรี่ที่ได้รับได้ โดยจากข้อมูลทั่วไปของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด 12 V จะกำหนดให้แรงดันขณะ Float charge มีค่าไม่เกิน 13.8 V

2.) การชาร์จด้วยกระแสที่มากกว่าความเหมาะสมของแบตเตอรี่ โดยจากข้อมูลทั่วไปของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด กำหนดค่ากระแสไว้ให้ไม่เกิน 20% ของความจุของแบตเตอรี่ (0.2C)

3.) อุณหภูมิที่ขั้วของแบตเตอรี่แต่ละก้อนมีค่ามากกว่าอุณหภูมิแวดล้อมเกินค่ามาตรฐาน โดยจากมาตรฐาน IEEE 1149 กำหนดไว้ว่าอุณหภูมิที่ขั้วแบตเตอรี่ที่เหมาะสมไม่ควรมีค่าต่างกับอุณหภูมิแวดล้อมเกินกว่า 3°C

4.) เกิดสภาวะแบตเตอรี่เสื่อมสภาพตามกัน เนื่องจากเมื่อมีแบตเตอรี่ในระบบก่อนใดก้อนหนึ่งเสื่อมสภาพ ประสิทธิภาพการคงสภาพแรงดันของแบตเตอรี่ก้อนนั้นจะลดน้อยลง ส่งผลให้แบตเตอรี่ก้อนข้างเคียงที่ประสิทธิภาพดีกว่าต้องชดเชยแรงดันให้และจะประสบกับปัญหาดังข้อที่ 1) และข้อที่ 3) ต่อไป

โดยทุกการแจ้งเตือนการตรวจพบความผิดปกติของระบบติดตามสถานะแบตเตอรี่ ข้อมูลของพารามิเตอร์และสาเหตุที่ตรวจพบจะถูกบันทึกไว้ในคลังเก็บข้อมูลส่วนกลาง (Cloud) เพื่อนำมาวิเคราะห์ภาพรวมของปัญหาว่าแบตเตอรี่แต่ละก้อนที่เสื่อมสภาพนั้นเกิดจากสาเหตุใดบ้าง และแต่ละสาเหตุมีอัตราการเกิดแตกต่างกันอย่างไร โดยอ้างอิงข้อมูลทางสถิติของค่าพารามิเตอร์ย้อนหลังออกมาในรูปแบบแผนภูมิวงกลม (Pie chart)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

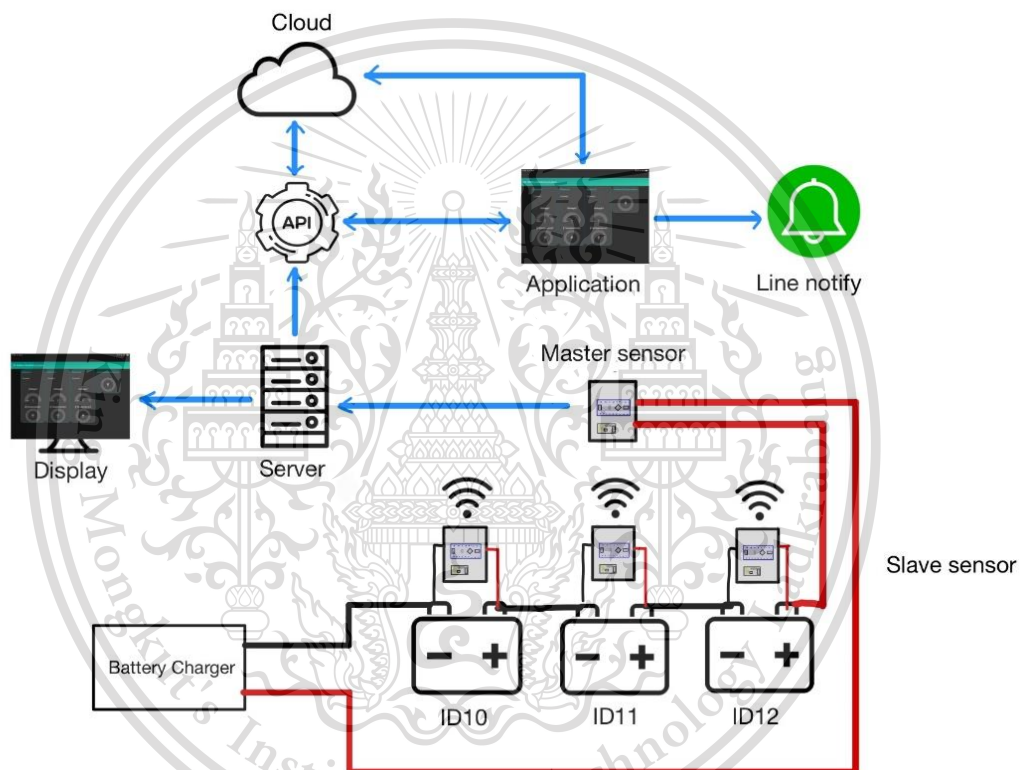
บทที่ 4

การทดสอบและผลการทดสอบ

4.1 ผลการออกแบบระบบติดตามสถานะแบตเตอรี่

4.1.1 ผลการออกแบบอุปกรณ์วัดค่าพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่

เมื่อนำอุปกรณ์วัดค่าพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่ที่ออกแบบมาใช้ในระบบติดตามสถานะแบตเตอรี่ และเพิ่มฟังก์ชันการทำงานเพิ่มเติมเข้าไปจะมีลักษณะดังรูปที่ 4.1



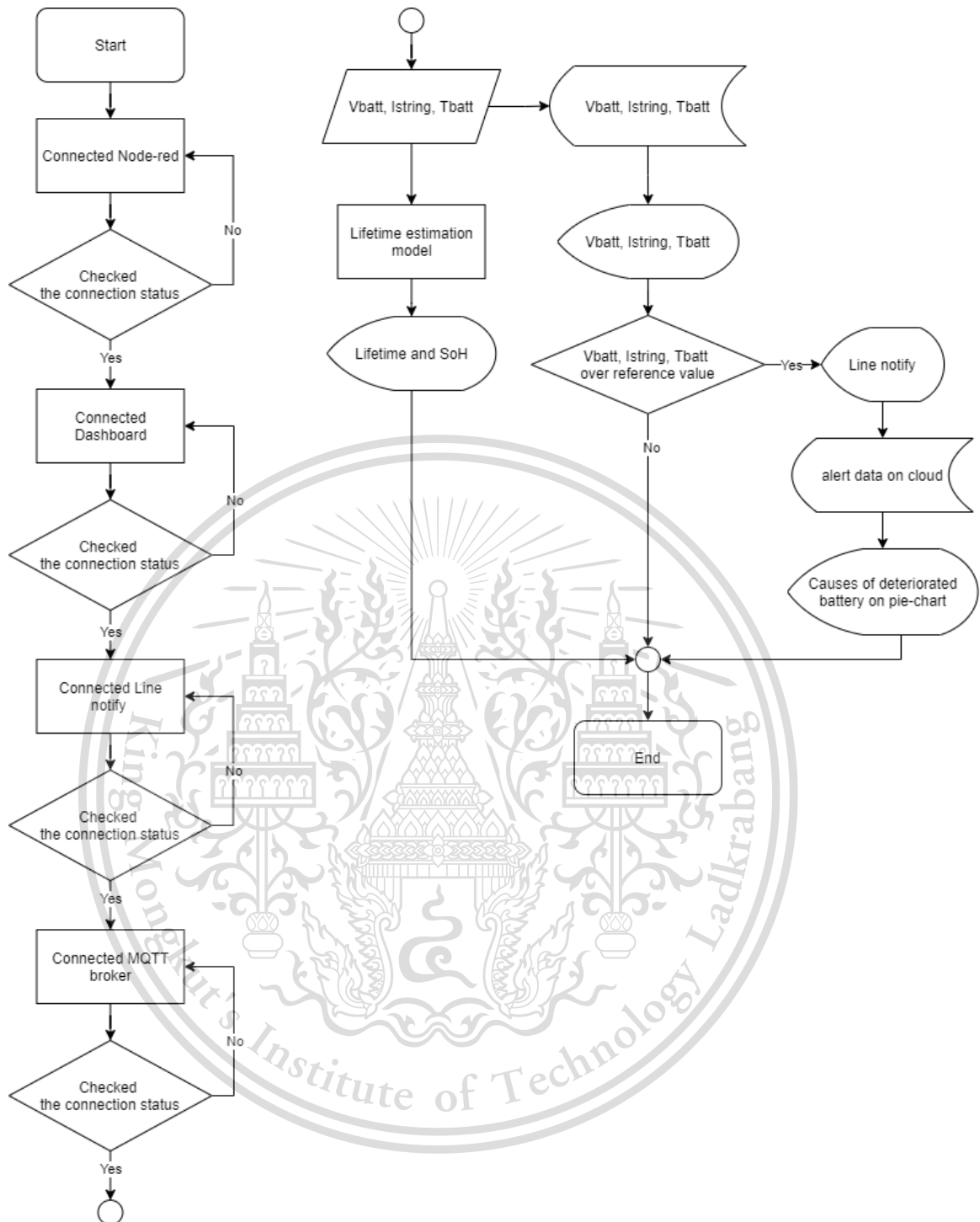
รูปที่ 4.1 แผนภาพระบบติดตามสถานะแบตเตอรี่

ข้อมูลจากอุปกรณ์วัดค่าพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่จากตัวส่ง (Slave) จะถูกส่งให้กับตัวรับ (Master) และถูกส่งต่อไปยังเซิร์ฟเวอร์ซึ่งเป็นตัวประมวลผลหลักผ่านทางพอร์ตอนุกรม (Serial port) เพื่อแสดงผลผ่านทางหน้าจอและส่งข้อมูลต่อไปยังแอปพลิเคชัน (Application) ผ่านทางส่วนต่อประสานโปรแกรมประยุกต์ (Application Programming Interface : API) โดยมีการเก็บข้อมูลไว้ในระบบจัดเก็บฐานข้อมูลอยู่ตลอดเพื่อนำไปใช้ในการทำนายระยะเวลาที่แบตเตอรี่เสื่อมสภาพและวิเคราะห์สาเหตุการเสื่อมสภาพของแบตเตอรี่เมื่อมีคำสั่งจากตัวแอปพลิเคชัน โดยสามารถอธิบายภาพรวมการทำงานของระบบติดตามแบตเตอรี่ได้ดังรูปที่ 4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับการใช้งานภายในเท่านั้น เมื่อนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตเป็นการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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



รูปที่ 4.2 Flow chart หลักการทำงานของระบบติดตามสถานะแบตเตอรี่

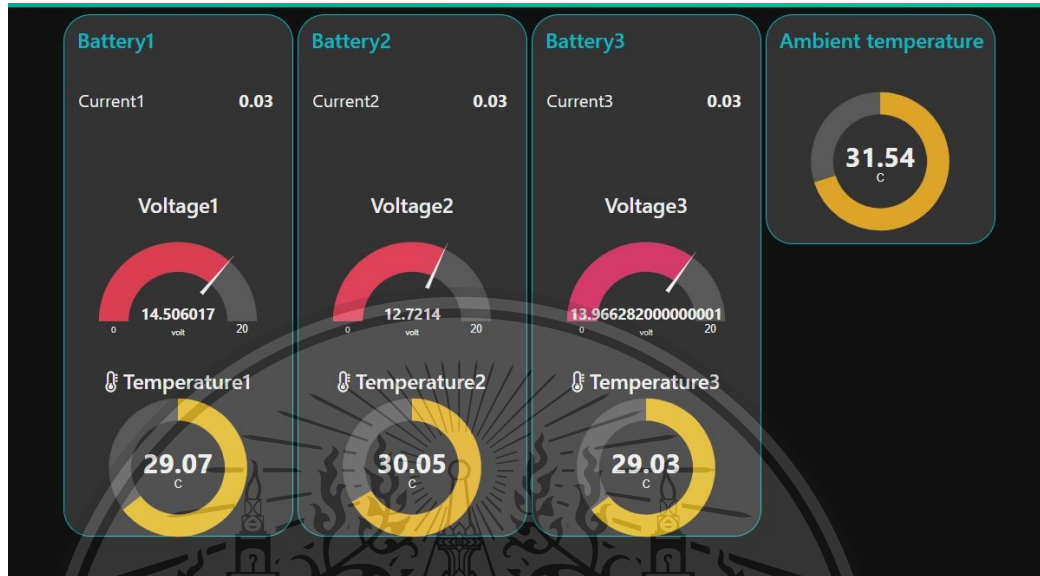
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

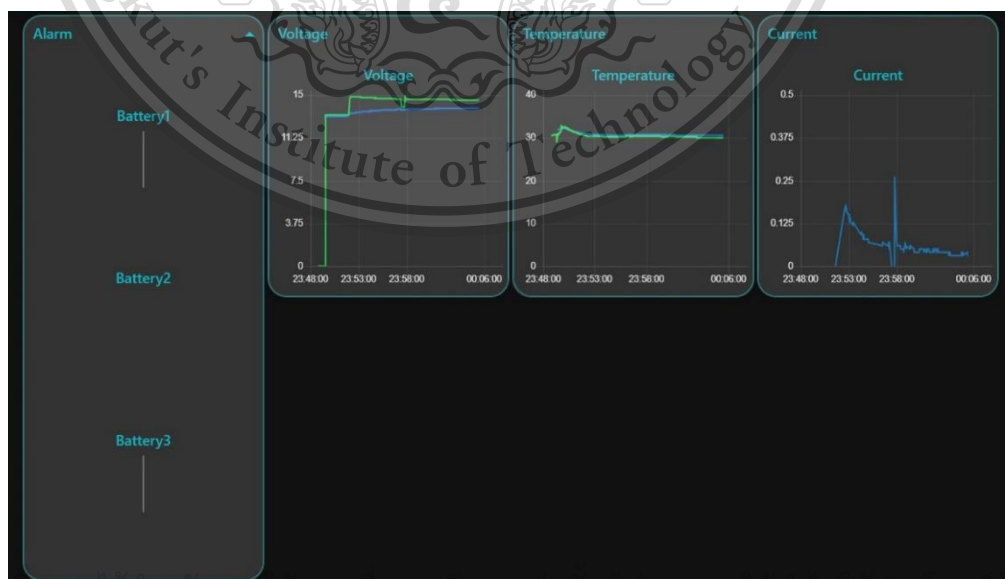
4.1.2 ผลการออกแบบหน้าจอแสดงผลและแอปพลิเคชัน

4.1.2.1 หน้าจอแสดงผล Battery Monitoring ในส่วนนี้จะแสดงค่าแรงดันตกคร่อมแบตเตอรี่, กระแสไฟฟ้าในวงจร อุณหภูมิที่ขั้วของแบตเตอรี่ และอุณหภูมิแวดล้อม



รูปที่ 4.3 หน้าจอแสดงผล Battery Monitoring

4.2.1.2 หน้าจอแสดงผล Notification เป็นหน้าจอแสดงแผนภูมิสรุปสาเหตุของการแจ้งเตือนของแบตเตอรี่แต่ละก้อน และแสดงกราฟของข้อมูลแบบเรียลไทม์เพื่อดูแนวโน้ม



รูปที่ 4.4 หน้าจอแสดงผล Notification

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำเอกสารนี้ไปใช้ในเชิงพาณิชย์ได้ หากมีการนำเอกสารนี้ไปใช้ในเชิงพาณิชย์โดยไม่ได้รับอนุญาตจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ขอสงวนสิทธิ์ในเอกสารฉบับนี้

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

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

4.2 ผลการออกแบบฟังก์ชันการทำนายระยะเวลาที่แบตเตอรี่เกิดการเสื่อมสภาพ

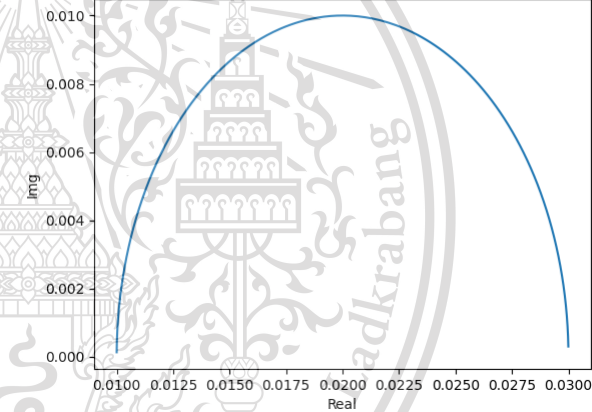
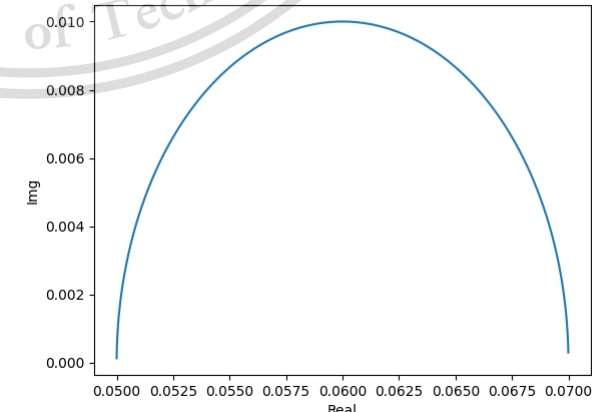
4.2.1 ผลการเก็บข้อมูลเพื่อสร้างโมเดลสมการถดถอย

4.2.1.1 ตรวจสอบความถูกต้องของค่าความต้านทานภายใน

ตอนที่ 1 : ตรวจสอบความถูกต้องของทฤษฎีการวัดค่าความต้านทานภายในแบตเตอรี่ที่สัญญาณกระแสสลับที่ความถี่สูง 1 kHz

ตอนที่ 1.1 : ศึกษากราฟ Cole-Cole plot ของแบตเตอรี่เมื่อพารามิเตอร์ในวงจรสมมูลมีค่าเปลี่ยนไปที่ความถี่ 1 kHz

ตารางที่ 4.1 ผลของการศึกษาค่าพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่ที่ย่านความถี่ต่างๆ

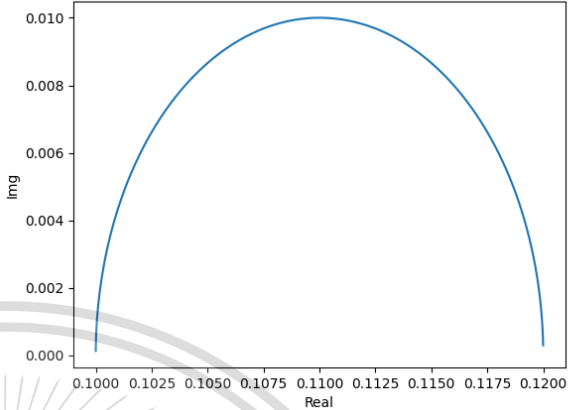
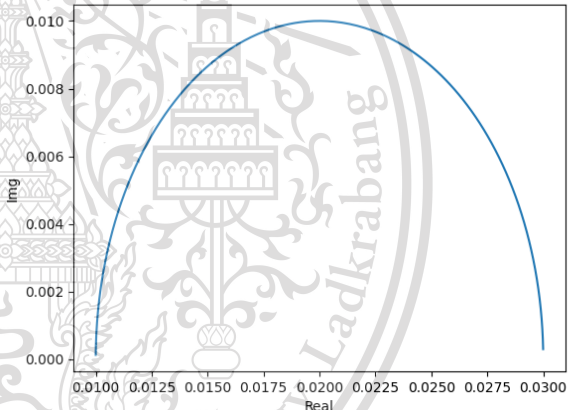
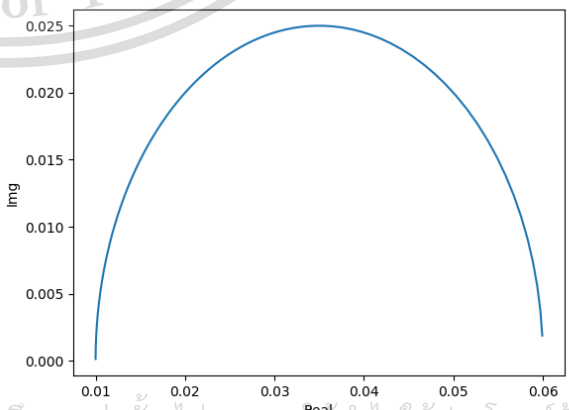
ความถี่	พารามิเตอร์ในวงจรสมมูล			Cole-Cole plot
	R_0 (Ω)	R_1 (Ω)	C_1 (F)	
1 kHz	0.01			
		0.02	0.12	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้แก้ไขหรือดัดแปลงเนื้อหา

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

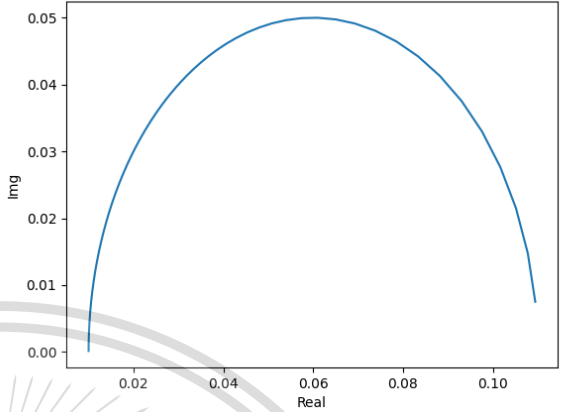
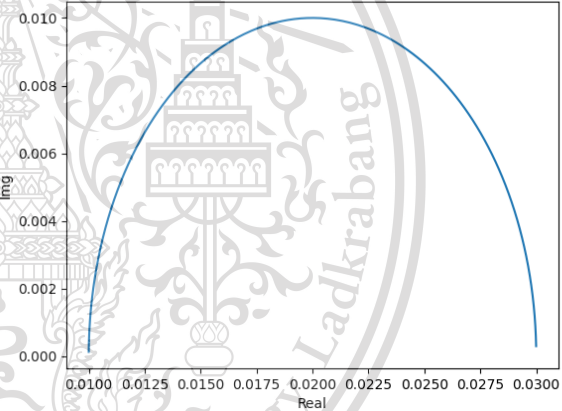
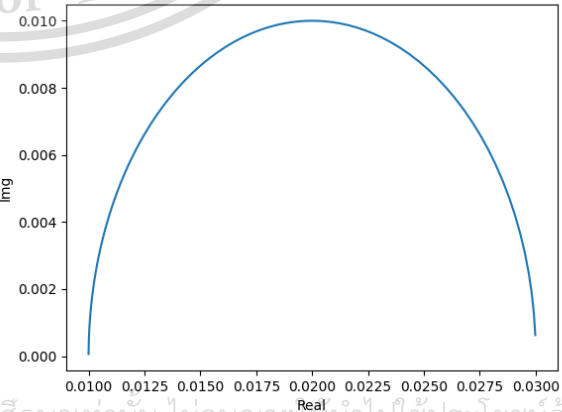
ความถี่	พารามิเตอร์ในวงจรสมมูล			Cole-Cole plot
	R_0 (Ω)	R_1 (Ω)	C_1 (F)	
1 kHz	0.1	0.02	0.12	
	0.01	0.02	0.12	
		0.05		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

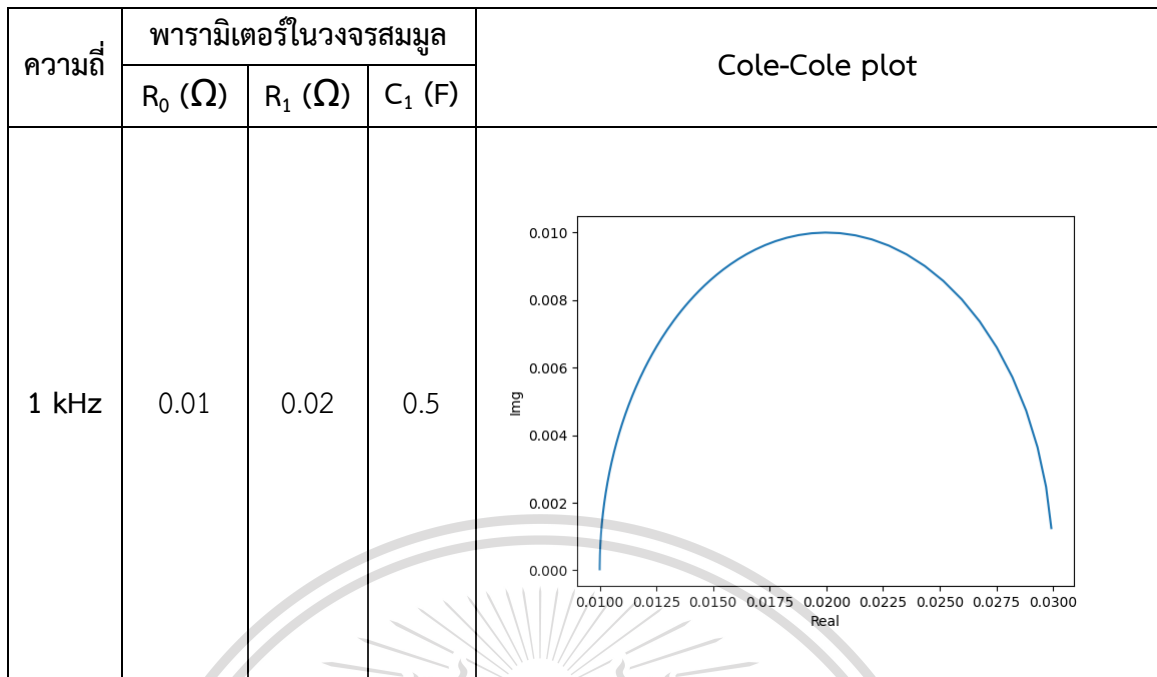
ความถี่	พารามิเตอร์ในวงจรสมมูล			Cole-Cole plot
	R_0 (Ω)	R_1 (Ω)	C_1 (F)	
1 kHz	0.01	0.1	0.12	
	0.01	0.02	0.12	
	0.01	0.02	0.25	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

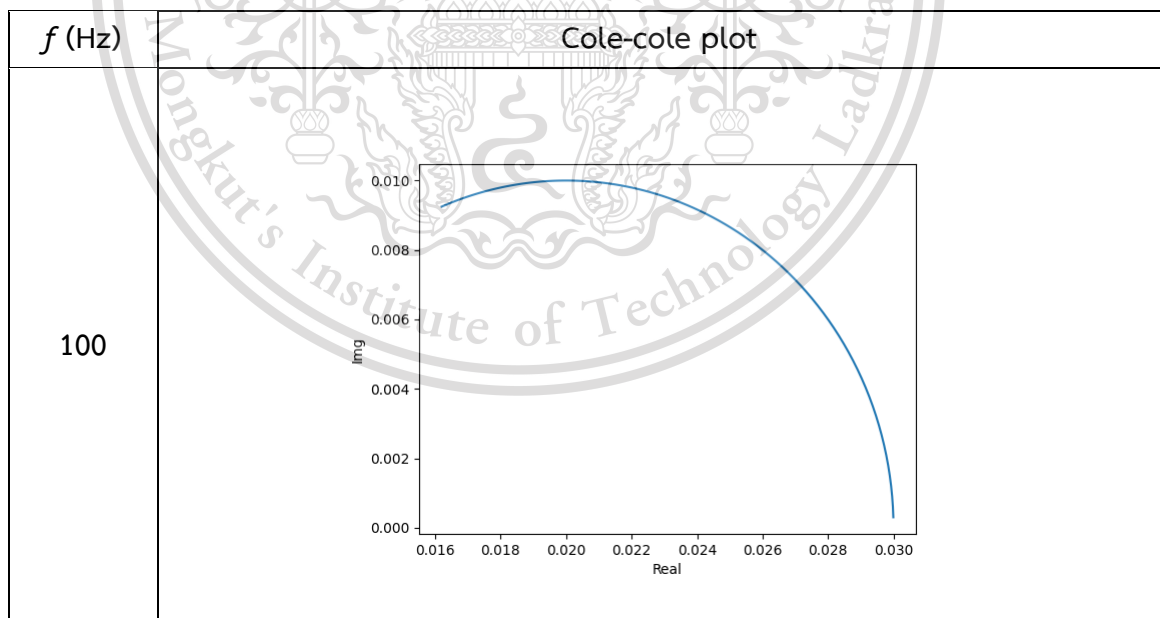
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

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



ตอนที่ 1.2 : ศึกษาผลของความถี่ที่มีต่อกราฟ Cole-Cole plot
กำหนดให้ค่าพารามิเตอร์ในวงจรสมมูลมีค่าคงที่ $R_0 = 0.01 \Omega$, $R_1 = 0.02 \Omega$, $C_1 = 0.12 \text{ F}$

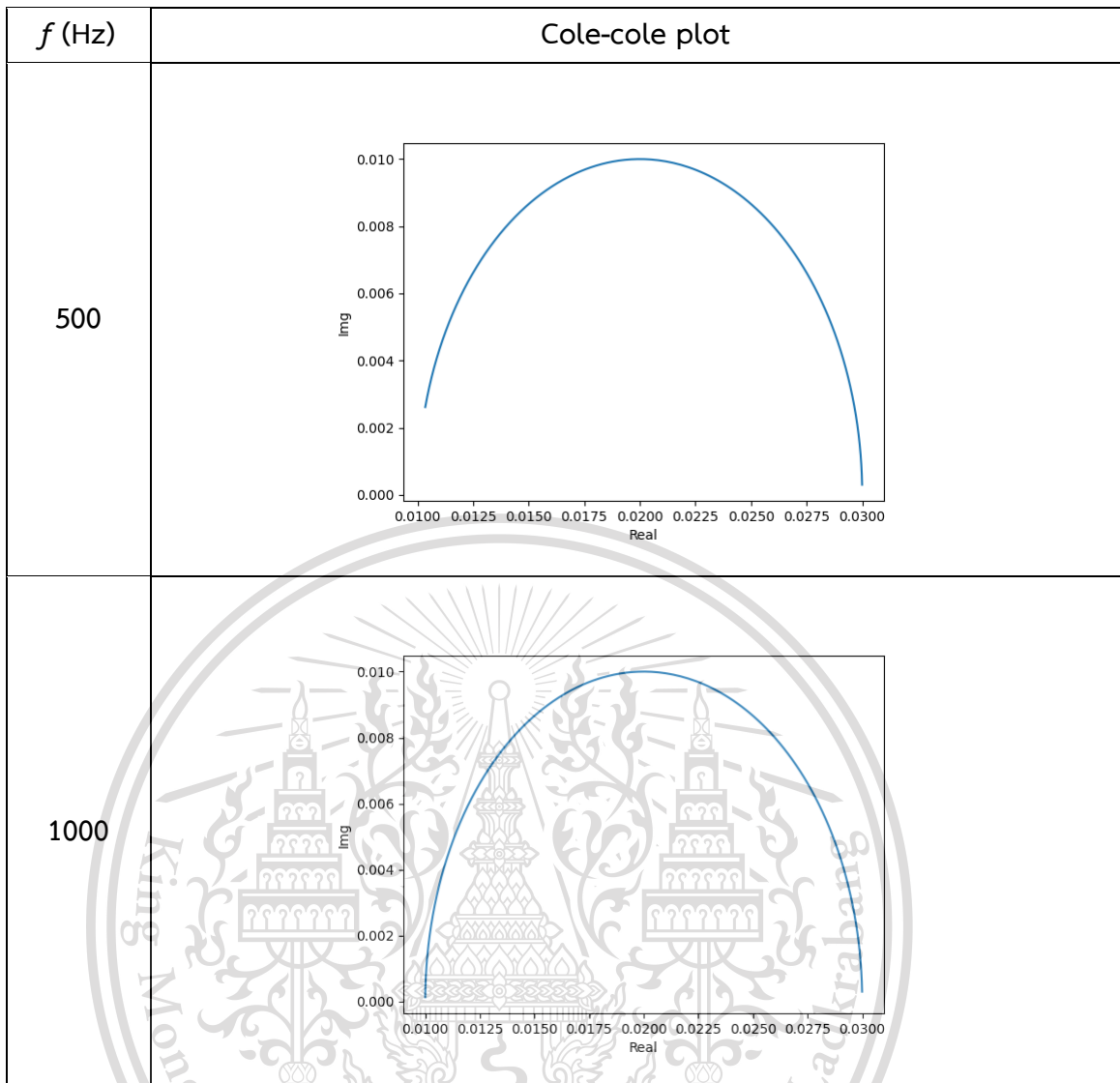
ตารางที่ 4.2 ผลของการศึกษาผลของความถี่ที่มีต่อ Cole-Cole plot



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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



จากตารางที่ 4.1 และ 4.2 จะเห็นว่าช่วงที่ข้อมูลมีผลของพจน์จินตภาพต่ำ กราฟมีแนวโน้มตัดแกน X (ใกล้จุดกำเนิด) ที่มีค่าเท่ากับ R_0 สังเกตได้จากเมื่อเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ R_0 จุดตัดแกน X มีแนวโน้มเปลี่ยนตามไปด้วย นอกจากนี้ระยะของกราฟในแนวนอนจะมีค่าเท่ากับ R_1 และลักษณะของกราฟจะเปลี่ยนไปตามค่าพารามิเตอร์ R_1 , C_1 และความถี่

ตอนที่ 2 : ผลจากการตรวจสอบความถูกต้องของเครื่องมือวัด

จากการทดลองวัดค่าอิมพีแดนซ์รวมของวงจรในรูปที่ 3.4 ด้วยเครื่อง Battery Analyzer model BA6011 จากนั้นวัดสัญญาณผลตอบสนองของแรงดันวงจรรวม (Ch.2) เทียบกับสัญญาณกระแสในวงจร (Ch.1) ด้วยออสซิลโลสโคป จะได้ผลตอบสนองดังรูปที่ 4.8 อ่านค่าจากออสซิลโลสโคปได้ $V = 30.4 \angle 0^\circ$ mV, Phase shift = 2° คำนวณค่ากระแสและความต้านทานได้จากกฎของโอห์ม (Ohm's law) ดังสมการ (3.2) จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Z = \frac{V}{I} \text{ โดย } V = 30.4 \angle 0^\circ \text{ mV และ } I = \frac{30.4 \angle 2^\circ}{2} = 15.2 \angle 2^\circ \text{ mA}$$

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

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

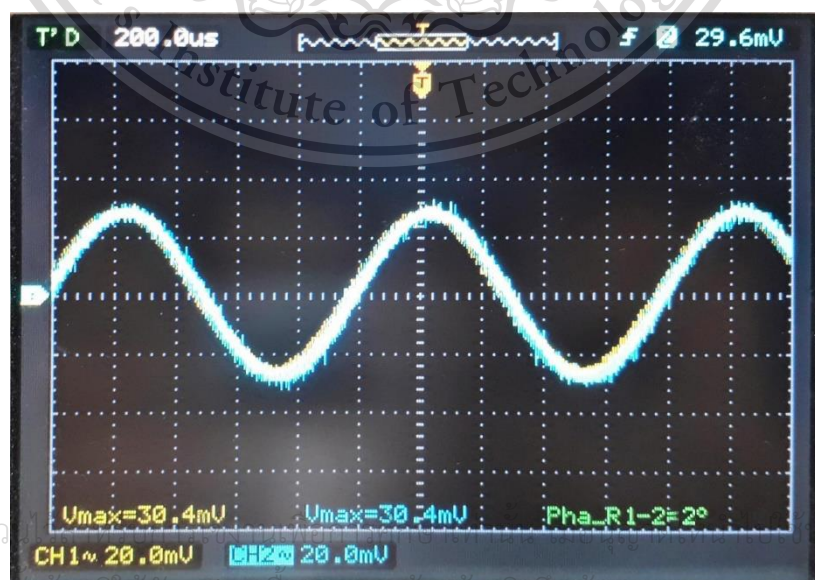
จะได้

$$Z = \frac{30.4 \angle 0^\circ}{15.2 \angle 2^\circ} = 1.9988 - j0.0698 \Omega$$

พิจารณาผลของค่าอิมพีแดนซ์ข้างต้น พบว่าพจน์จริงมีค่าประมาณ 2Ω ในขณะที่พจน์จินตภาพมีค่าประมาณ 0Ω จึงกล่าวได้ว่าค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรสมมูลแบบเตอรีที่กระแสสลับความถี่ 1 kHz มีผลเฉพาะค่าพารามิเตอร์ R_0 เท่านั้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองในตอนต้นที่ 1 และเมื่อเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการคำนวณข้างต้นกับค่าที่วัดได้จากเครื่อง Battery Analyzer model BA6011 ในรูปที่ 4.9 สามารถสรุปได้ว่าเครื่อง Battery Analyzer model BA6011 มีความถูกต้องและสามารถเชื่อถือได้



รูปที่ 4.7 สัญญาณที่ Battery analyzer จ่ายออกมา

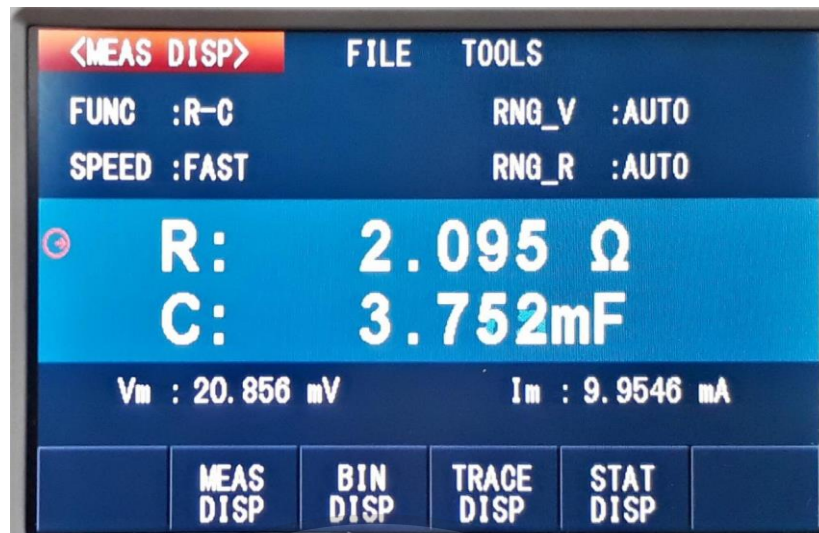


รูปที่ 4.8 สัญญาณผลตอบสนองของแรงดันวงจรรวมเทียบกับสัญญาณกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระยาโชชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังขอสงวนสิทธิ์ในการนำไปใช้

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

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

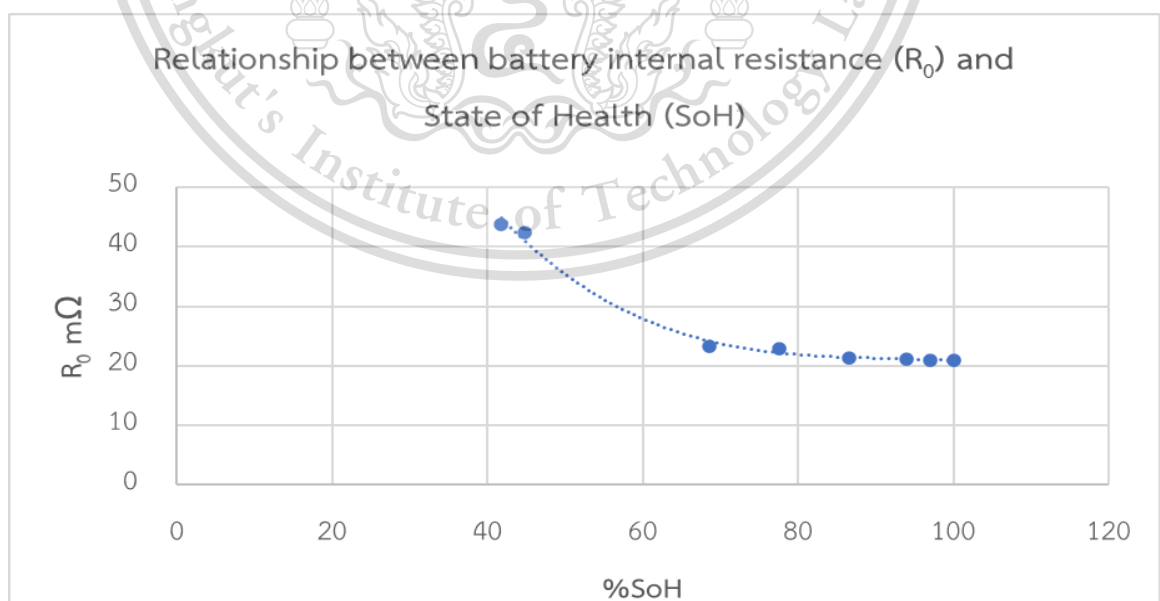


รูปที่ 4.9 ค่าพารามิเตอร์ที่วัดได้จากเครื่อง Battery analyzer

4.2.1.2 ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความต้านทานภายในแบตเตอรี่

ตอนที่ 1 : วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานภายในแบตเตอรี่กับสถานะทางสุขภาพแบตเตอรี่ (State of health : SoH) จากรูปที่ 4.10 จะเห็นว่าแนวโน้มของ R_0 เพิ่มขึ้นเมื่อ %SoH ของแบตเตอรี่ลดลง จึงสรุปได้ว่าความต้านทานภายในแบตเตอรี่แปรผกผันกับ %SoH และมีความสัมพันธ์กันดังสมการ (4.1) โดยที่ SoH 80% ค่า R_0 มีค่าเท่ากับ 22.45 m Ω

$$\text{SoH} = 1629e^{-0.135R_0} \quad (4.1)$$



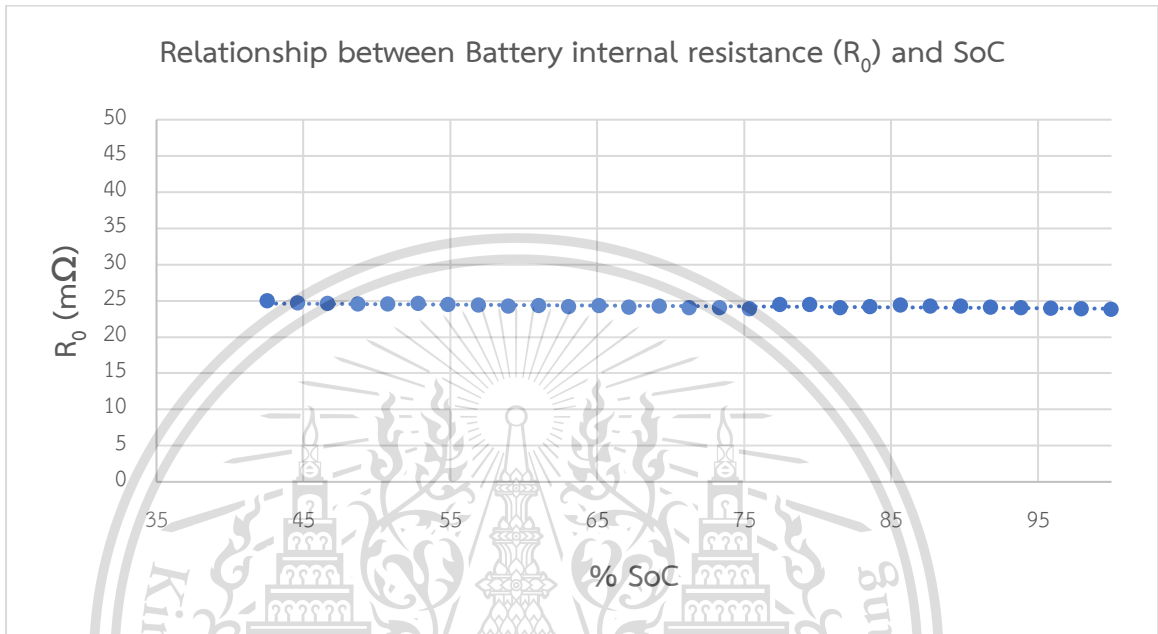
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานภายในแบตเตอรี่กับ %SoH
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

ตอนที่ 2 : วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานภายในแบตเตอรี่กับสถานะการเก็บประจุ (State of charge, SoC) จากรูปที่ 4.11 จะเห็นว่าที่ %SoC ใดๆในช่วง 40.5%-100%แนวโน้มของค่าความต้านทานภายในแบตเตอรี่มีค่าคงที่ จึงสรุปได้ว่าความต้านทานภายในแบตเตอรี่ไม่ขึ้นกับ %SoC



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานภายในแบตเตอรี่กับ %SoC

4.2.1.3 เก็บข้อมูลตัวแปรต่างๆ จากการศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ

เมื่อแบตเตอรี่มีประสิทธิภาพลดลงและเก็บข้อมูลสำหรับการทำโมเดลสมการถดถอย จะได้ลักษณะของข้อมูลตัวอย่าง ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ลักษณะข้อมูลตัวอย่าง 24 ชุดข้อมูล

R_0 (Ω)	V_{batt}	T_{batt}	T_{amb}	I_{string}	ΔV	ΔT
20.87	13.75	20.78	20.7	0.17	0.05	0.08
20.87	13.77	20.39	20.05	0.19	0.03	0.34
20.87	13.78	20.14	19.77	0.19	0.02	0.37
20.99	13.73	23.04	23	0.17	0.07	0.04
20.99	13.76	22.01	22	0.04	0.04	0.01
20.99	13.81	21.47	20.87	0.04	-0.01	0.6
21.07	13.8	24.9	24.1	0.1	0	0.8
21.07	13.82	24.1	23.9	0.1	-0.02	0.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้ใช้เฉพาะในวงวิชาการเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้เพื่อวัตถุประสงค์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่ใช้

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

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

R_0 (Ω)	V_{batt}	T_{batt}	T_{amb}	I_{string}	ΔV	ΔT
21.07	13.84	25.8	25.9	0.1	-0.04	-0.1
21.21	13.77	20.39	20.37	0.57	0.03	0.02
21.21	13.79	19.98	19.8	0.51	0.01	0.18
21.42	13.84	27.59	27.39	0.1	-0.04	0.2
21.42	13.76	27.61	27.33	0.11	0.04	0.28
21.46	13.73	26.83	26.53	0.1	0.07	0.3
21.46	13.74	22.08	21.5	0.08	0.06	0.29
21.46	13.77	19.96	19.89	0.08	0.03	0.07
21.45	13.76	27.7	26.5	0.1	0.04	1.2
21.45	13.82	25.3	24.6	0.07	-0.02	0.7
21.45	13.81	25	24.7	0.08	-0.01	0.9
21.58	13.83	26.1	25.4	0.1	-0.03	0.7
21.58	13.83	26.2	25.4	0.05	-0.03	0.8
21.58	13.84	25.6	25	0.02	-0.04	0.6
21.95	13.76	28	27.8	0.1	0.04	0.2
21.95	13.77	28.5	28.5	0.1	0.03	0

4.2.2 ผลการออกแบบฟังก์ชันทำนายระยะเวลาที่แบตเตอรี่เสื่อมสภาพ

4.2.2.1 ผลการวิเคราะห์หาสมการถดถอยสำหรับทำนายค่า-

ความต้านทานภายในแบตเตอรี่ เพื่อความสะดวกในการอธิบายผลการวิเคราะห์โมเดลสมการถดถอย จึงกำหนดสัญลักษณ์แทนตัวกลุ่มตัวแปรทำนายไดโนอ้างอิงจากตาราง 3.4 ดังนี้

$$X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta V \\ I \\ \Delta T \end{bmatrix}$$

1) ผลการศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปร (Correlation coefficient)

ก่อนวิเคราะห์หาโมเดลสมการถดถอยที่เหมาะสม จำเป็นต้องศึกษาระดับความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรเพื่อตรวจสอบถึงประสิทธิภาพในการนำตัวแปรไปสร้างโมเดลสมการถดถอยต่อไป ซึ่งได้ผลดังตารางที่ 4.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

ตารางที่ 4.4 การศึกษาค่าสหสัมพันธ์ของกลุ่มตัวแปร

	x_1	x_2	x_3	R_0
x_1	1	-0.1735	0.6012	0.7679
x_2	-0.1735	1	-0.3447	-0.3714
x_3	0.6012	-0.3447	1	0.6157
R_0	0.7679	-0.3714	0.6151	1

จากตารางที่ 4.4 เมื่อพิจารณาค่าสหสัมพันธ์ของกลุ่มตัวแปรทำนายต่อค่าความต้านทานภายในแบตเตอรี่ พบว่าผลต่างระหว่างแรงดันตกคร่อมแบตเตอรี่กับพิกัดแรงดันลอย (x_1) และความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิแบตเตอรี่กับอุณหภูมิแวดล้อม (x_3) มีความสัมพันธ์กับค่าความต้านทานภายในแบตเตอรี่ในระดับสูง คือ 0.7679 และ 0.6157 ทิศทางเดียวกันตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวแปร x_1 และ x_3 เหมาะสมที่จะนำมาสร้างโมเดลสมการถดถอยเพื่อทำนายค่าความต้านทานภายในแบตเตอรี่ ในขณะที่ค่ากระแสในวงจร (x_2) มีค่าความสัมพันธ์ต่อความต้านทานภายในแบตเตอรี่เพียง 0.3714 ในทิศทางตรงข้ามแต่ยังสามารถยอมรับได้ ดังนั้นในการสร้างโมเดลสมการถดถอยนี้จึงใช้กลุ่มตัวแปรทำนายทั้งหมด 3 ตัวแปร

2) ผลการสร้างโมเดลสมการถดถอยด้วยโมเดลสมการถดถอยเชิงเส้น (Multiple - linear regression) นำโมเดลสมการถดถอยเชิงเส้นโดยเมทริกซ์ค่าน้ำหนัก (w) ไปทำ Least squares sense เพื่อให้ค่าความคลาดเคลื่อนมีค่าน้อยที่สุด มีลักษณะดังนี้

$$y = Xw$$

โดยที่ y คือ เวกเตอร์ขนาด ($n \times 1$) ของตัวอย่างของพารามิเตอร์ตอบสนอง
 X คือ เมทริกซ์ขนาด ($n \times p$) ของพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคาดการณ์ (Predictor variable) ที่มีคอลัมน์แสดงพารามิเตอร์และแถวแสดงตัวอย่างหรือการสังเกต
 w คือ เมทริกซ์ค่าน้ำหนัก (Weight matrix) ขนาด ($p \times 1$)

จากการพิจารณาค่าสหสัมพันธ์ของกลุ่มตัวแปรทำนายดังหัวข้อที่ 1) ในการสร้างโมเดลสมการถดถอยจะพิจารณาใช้กลุ่มตัวแปรทำนายทั้งหมด 3 ตัวแปร จะได้

$$y = w_0 + w_1x_1 + w_2x_2 + w_3x_3$$

จากการวิเคราะห์สมการถดถอยด้วยโปรแกรม MATLAB ผ่านคำสั่ง regress() ทำให้ได้สมการถดถอยเชิงเส้นดังสมการ (4.2) และมีค่าทางสถิติดังตารางที่ 4.5

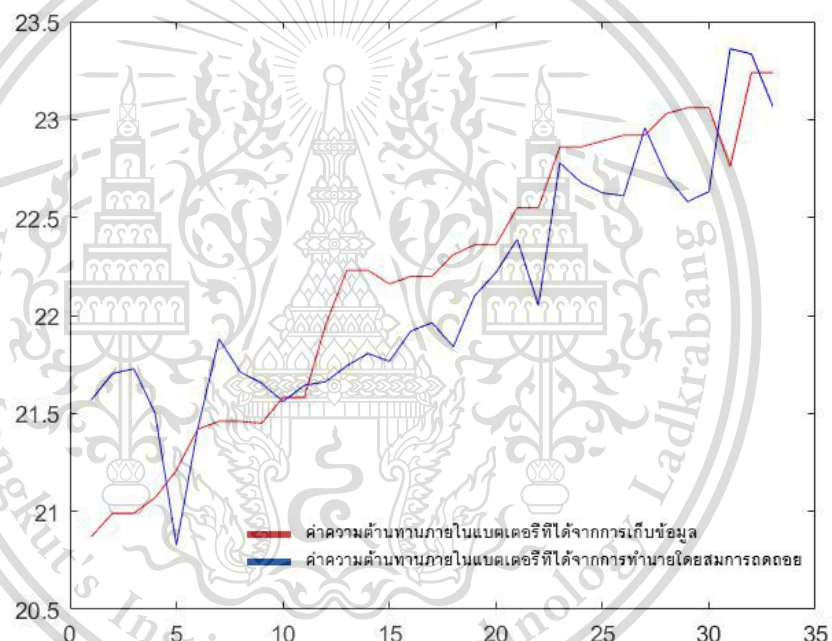
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

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

$$R_0 = 21.70 + 3.99x_1 - 1.78x_2 + 0.2x_3 \quad (4.2)$$

ตารางที่ 4.5 ค่าทางสถิติของโมเดลสมการถดถอยแบบเชิงเส้น

ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Mean Square Error : MSE)	0.3192
ผลรวมกำลังสองของสมการถดถอย (Sum of Square due to Regression: SSR)	11.6425
ผลรวมกำลังสองของค่าคลาดเคลื่อน (Sum of Square Error: SSE)	4.6549
ผลรวมกำลังสองทั้งหมด (Sum of Square Total: SST)	17.5066
ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination : R ²)	0.6650



รูปที่ 4.12 ค่าความต้านทานภายในที่ได้จากการเก็บข้อมูลจริงและจากการทำนายโดยสมการถดถอยเชิงเส้น

3) ผลการสร้างโมเดลสมการถดถอยแบบไม่เชิงเส้น (Non-linear regression)

a) Quadratic response surface model 10 พจน์ โมเดล

สมการถดถอยเชิงแบบไม่เชิงเส้น Quadratic response surface model 10 พจน์ มีลักษณะดังนี้

$$y = w_0 + w_1x_1 + w_2x_2 + w_3x_3 + w_4x_1x_2 + w_5x_1x_3 + w_6x_2x_3 + w_7x_1^2 + w_8x_2^2 + w_9x_3^2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานวิจัยทางวิชาการเท่านั้น ไม่นิยมนำไปเผยแพร่ขึ้นด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

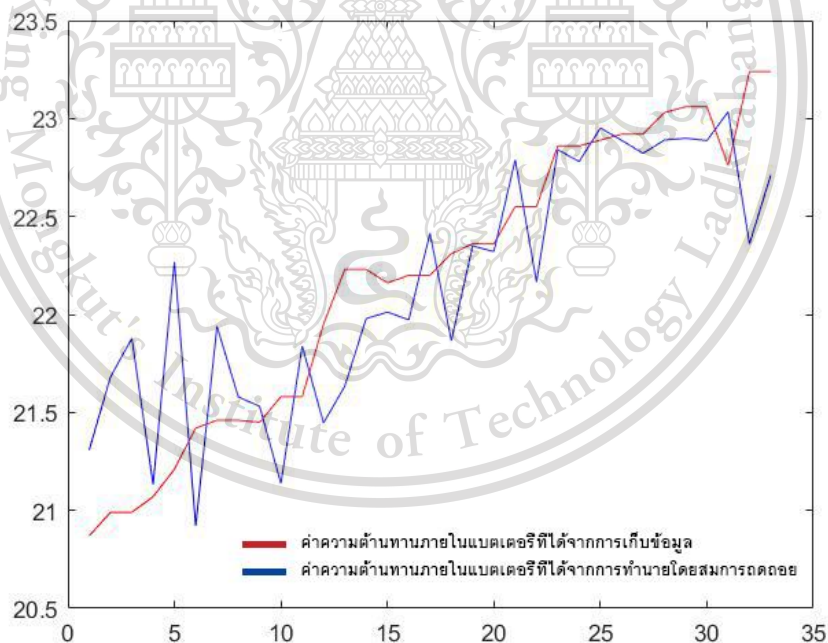
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จากการวิเคราะห์สมการถดถอยด้วยโปรแกรม MATLAB ผ่านคำสั่ง regress() ทำให้ได้สมการถดถอยเชิงเส้นดังสมการ (4.3) และมีค่าทางสถิติดังตารางที่ 4.6

$$R_0 = 21.80 + 4.05x_1 - 7.05x_2 + 1.16x_3 + 47.23x_1x_2 + 2.64x_1x_3 - 4.48x_2x_3 - 21.61w_7x_1^2 + 11.10w_8x_2^2 - 0.47w_9x_3^2 \quad (4.3)$$

ตารางที่ 4.6 ค่าทางสถิติของโมเดลสมการถดถอยแบบไม่เชิงเส้น Quadratic response surface model 10 พจน์

ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Mean Square Error : MSE)	0.3189
ผลรวมกำลังสองของสมการถดถอย (Sum of Square due to Regression: SSR)	12.2162
ผลรวมกำลังสองของค่าคลาดเคลื่อน (Sum of Square Error: SSE)	5.7677
ผลรวมกำลังสองทั้งหมด (Sum of Square Total: SST)	17.4011
ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination : R ²)	0.7020



รูปที่ 4.13 ค่าความต้านทานภายในที่ได้จากการเก็บข้อมูลจริงและจากการทำนายโดยสมการถดถอย Quadratic response surface model 10 พจน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

b) Quadratic response surface model 7 พจน์

โมเดลสมการถดถอยเชิงแบบไม่เชิงเส้น Quadratic response surface model 7 พจน์ มีลักษณะดังนี้

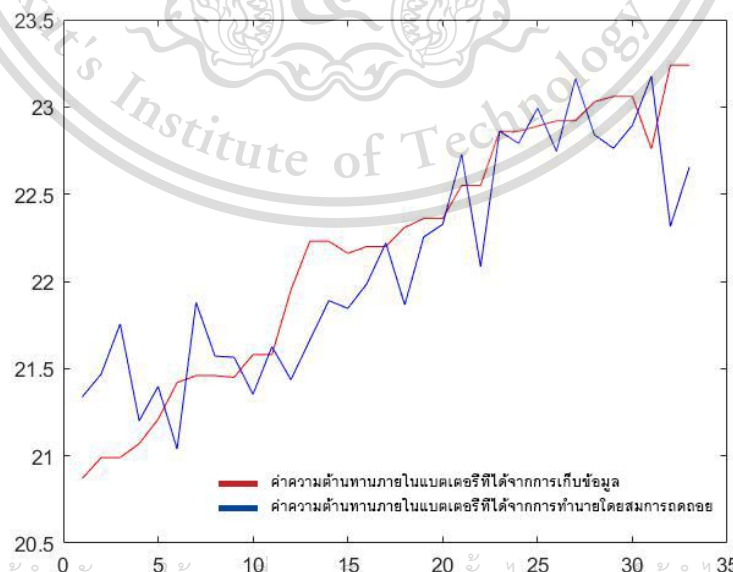
$$y = w_0 + w_1x_1 + w_2x_2 + w_3x_3 + w_7x_1^2 + w_8x_2^2 + w_9x_3^2$$

จากการวิเคราะห์สมการถดถอยด้วยโปรแกรม MATLAB ผ่านคำสั่ง regress() ทำให้ได้สมการถดถอยเชิงเส้นดังสมการ (4.4) และมีค่าทางสถิติดังตารางที่ 4.7

$$R_0 = 21.73 + 7.43x_1 - 5.92x_2 + 0.70x_3 - 10.44x_1^2 + 8.67x_2^2 - 0.26w_9x_3^2 \quad (4.4)$$

ตารางที่ 4.7 ค่าทางสถิติของโมเดลสมการถดถอยแบบไม่เชิงเส้น Quadratic response surface model 7 พจน์

ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Mean Square Error : MSE)	0.2939
ผลรวมกำลังสองของสมการถดถอย (Sum of Square due to Regression: SSR)	12.7416
ผลรวมกำลังสองของค่าคลาดเคลื่อน (Sum of Square Error: SSE)	4.4212
ผลรวมกำลังสองทั้งหมด (Sum of Square Total: SST)	17.5466
ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination : R ²)	0.7262



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น รูปที่ 4.14 ค่าความต้านทานภายในที่ได้จากการเก็บข้อมูลจริงและจากการทำนายโดย

สมการถดถอย Quadratic response surface model 7 พจน์

4) ผลการเปรียบเทียบความเหมาะสมของโมเดลสมการถดถอย

เมื่อพิจารณาผลการสร้างโมเดลสมการถดถอยเพื่อทำนายค่าความต้านทานภายในแบตเตอรี่ในหัวข้อที่ 2) และ 3) สามารถเปรียบเทียบระดับความเหมาะสมได้ดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 เปรียบเทียบความเหมาะสมของโมเดลสมการถดถอย

	ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Mean Square Error : MSE)	ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination : R ²)
สมการถดถอยแบบเชิงเส้น (Multiple linear regression)	0.3192	0.6650
สมการถดถอยแบบ Quadratic response surface model 10 พจน์	0.3189	0.7020
สมการถดถอยแบบ Quadratic response surface model 7 พจน์	0.2939	0.7262

จากตารางที่ 4.8 เมื่อกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยที่ยอมรับได้สำหรับโมเดลสมการถดถอยในโครงการนี้ไว้ที่ 0.3 และพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ดีที่สุด สามารถสรุปได้ว่าโมเดลสมการถดถอยที่เหมาะสมในการนำไปทำนายค่าความต้านทานภายในแบตเตอรี่ คือ โมเดลสมการถดถอยแบบ Quadratic response surface model 7 พจน์

4.3 ผลการออกแบบฟังก์ชันวิเคราะห์สาเหตุการเสื่อมสภาพของแบตเตอรี่

จากการเก็บข้อมูลทางสถิติของระบบติดตามสถานะแบตเตอรี่ผ่านการจำลองสถานการณ์การทำงานที่อาจทำให้แบตเตอรี่เสื่อมสภาพ โดยภาพรวมของสาเหตุที่อาจทำให้แบตเตอรี่เกิดการเสื่อมสภาพสามารถจำแนก 4 สาเหตุ คือ

- 1) การชาร์จด้วยแรงดันที่มากกว่าหรือน้อยกว่าแรงดันพิกัด 13.8 V
- 2) การชาร์จด้วยกระแสที่มากกว่าความเหมาะสมของแบตเตอรี่ (0.2C)
- 3) อุณหภูมิที่ขั้วของแบตเตอรี่แต่ละก้อนมีค่ามากกว่าอุณหภูมิแวดล้อมเกินค่า (3°C)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ 4) เกิดสถานะแบตเตอรี่เสื่อมสภาพตามกัน ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

ภาพรวมของปัญหาสามารถแสดงผลออกมาในรูปแบบแผนภาพวงกลมซึ่งมีการแบ่งสัดส่วนของแต่ละสาเหตุที่เกิดขึ้นได้ชัดเจน โดยจะทำงานเมื่อมีการสั่งการให้วิเคราะห์หาสาเหตุการเสื่อมสภาพของแบตเตอรี่ทางหน้าจอแสดงผล Notification ดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 หน้าจอแสดงผลการวิเคราะห์สาเหตุที่ทำให้แบตเตอรี่เสื่อมสภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

บทที่ 5

สรุปผลการดำเนินงานโครงการ

5.1 สรุปผลการดำเนินงานโครงการ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ได้เสนอระบบติดตามสถานะแบตเตอรี่เชิงรุก เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการซ่อมบำรุงแบตเตอรี่ของระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงในสถานีไฟฟ้าย่อยที่เดิมจะทำการซ่อมบำรุงเชิงป้องกันซึ่งจะเป็นการซ่อมบำรุงตามระยะเวลาตามมาตรฐาน IEEE 1188 หรือตามอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ที่ผู้ผลิตกำหนด โดยสร้างฟังก์ชันทำนายระยะเวลาที่แบตเตอรี่จะเสื่อมสภาพและฟังก์ชันวิเคราะห์สาเหตุการเสื่อมสภาพของแบตเตอรี่ ซึ่งทำให้สามารถจัดทำแผนซ่อมบำรุงแบตเตอรี่ได้ทัน่วงทีก่อนที่แบตเตอรี่จะเสื่อมสภาพและสามารถวางแผนการซ่อมบำรุงแบตเตอรี่ได้ตรงจุด ส่งผลให้ระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงมีความน่าเชื่อถือมากขึ้น อีกทั้งยังช่วยลดค่าใช้จ่ายและลดระยะเวลาในการซ่อมบำรุงอีกด้วย

ระบบติดตามสถานะแบตเตอรี่เชิงรุกนี้ เป็นระบบที่ถูกออกแบบมาโดยคำนึงถึงความเหมาะสมในการใช้งานจริง นั่นคือระบบติดตามสถานะดังกล่าวจะต้องไม่เป็นการปรับเปลี่ยนหรือตัดแปลงวงจรหรือระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเดิม ดังนั้นในการสร้างฟังก์ชันทำนายระยะเวลาที่แบตเตอรี่จะเสื่อมสภาพและฟังก์ชันวิเคราะห์สาเหตุการเสื่อมสภาพของแบตเตอรี่จึงอาศัยการวิเคราะห์ด้วยข้อมูลที่วัดโดยตรงจากเซ็นเซอร์ คือ แรงดันตกคร่อมแบตเตอรี่ กระแสในวงจร อุณหภูมิขั้วแบตเตอรี่ และอุณหภูมิแวดล้อม จะถูกนำมาวิเคราะห์เป็นกลุ่มตัวแปรทำนายเพื่อสร้างสมการถดถอยโดยมีค่าความต้านทานภายในแบตเตอรี่เป็นตัวแปรตอบสนอง โดยจากการศึกษาสมการถดถอยที่เหมาะสมพบว่ารูปแบบที่เหมาะสมที่สุด คือ สมการถดถอยแบบไม่เชิงเส้น Quadratic response surface แบบ 7 พจน์ มีค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยอยู่ที่ 0.2939 และมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจอยู่ที่ 0.7262 ระบบจะคำนวณและบันทึกค่าความต้านทานภายในแบตเตอรี่ทุกวัน จากนั้นระบบจะวิเคราะห์พฤติกรรมการเพิ่มขึ้นของค่าความต้านทานภายในและสร้างฟังก์ชันทำนายระยะเวลาที่แบตเตอรี่จะเสื่อมสภาพ ซึ่งมีรูปแบบการเพิ่มขึ้นของข้อมูล 3 แบบ คือ แบบเชิงเส้น แบบเอ็กซ์โปเนนเชียล และแบบลอการิทึม ซึ่งระบบจะตัดสินใจเลือกใช้ฟังก์ชันที่มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจดีที่สุด ทำให้ฟังก์ชันนี้มีความแม่นยำและเชื่อถือได้ โดยระยะเวลาก่อนแบตเตอรี่จะเสื่อมสภาพจะคำนวณได้จากการเทียบหาระยะเวลาที่ค่าความต้านทานภายในแบตเตอรี่ขณะมี SoH 80% หรือมีค่าเท่ากับ 22.45 mΩ ในทำนองเดียวกันฟังก์ชันวิเคราะห์สาเหตุการเสื่อมสภาพของแบตเตอรี่ อาศัยการประเมินผลทางสถิติจากประวัติความผิดปกติของแบตเตอรี่ที่ถูกบันทึกไว้ที่ระบบจัดเก็บข้อมูลในคอมพิวเตอร์ส่วนกลาง ซึ่งได้กำหนดลักษณะความผิดปกติที่อาจเกิดขึ้นกับแบตเตอรี่ขณะทำงานในสถานีไฟฟ้าย่อยไว้ 4 ประการ คือ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

- 1) แรงดันตกคร่อมแบตเตอรี่มีค่าเกินขนาดแรงดันพิกัดของแบตเตอรี่ที่รับได้
- 2) ขนาดกระแสในวงจรมีค่าสูงเกินความเหมาะสมคือเกินกว่า 0.2C
- 3) อุณหภูมิที่ขั้วของแบตเตอรี่แต่ละก้อนมีค่ามากกว่าอุณหภูมิแวดล้อมเกิน 3°C
- 4) แบตเตอรี่เสื่อมสภาพตามกัน

โดยข้อมูลทั้งหมดที่กล่าวไปข้างต้นจะถูกแสดงผลบนจอแสดงผล อีกทั้งยังแสดงผลผ่านแอปพลิเคชันรีโมทและแอปพลิเคชันไลน์ ทำให้สามารถติดตามสถานะการใช้งานแบตเตอรี่ได้ตลอดเวลา

5.2 ปัญหาและข้อจำกัด

- 1) สถานการณ์ความรุนแรงของโรคระบาด COVID-19 ทำให้การดำเนินงานเป็นไปได้ด้วยความยากลำบาก ส่งผลให้ระยะเวลาในการเก็บข้อมูลที่มีอย่างจำกัดอยู่แล้วลดน้อยลงไปอีก ทำให้จำนวนข้อมูลที่นำไปใช้ในการวิเคราะห์ค่าความต้านทานและสร้างฟังก์ชันทำนายระยะเวลาที่แบตเตอรี่เสื่อมสภาพมีไม่เพียงพอ ความแม่นยำของผลการวิเคราะห์อาจมีความคลาดเคลื่อน
- 2) ความไม่เที่ยงตรงของข้อมูลจากการใช้ Arduino เป็นตัวประมวลผลหลักและตัวสื่อสารของระบบติดตามสถานะแบตเตอรี่
- 3) การจำกัดขอบเขตของโครงการโดยการใช้ข้อมูลพื้นฐานและข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาสมการถดถอยของแบตเตอรี่ทดสอบเพียงยี่ห้อเดียว อาจทำให้ระบบติดตามสถานะแบตเตอรี่ไม่สามารถนำไปใช้งานกับแบตเตอรี่ยี่ห้ออื่นได้
- 4) ข้อจำกัดของระบบติดตามสถานะแบตเตอรี่และแสดงผลต้องเชื่อมต่อเครือข่ายอินเทอร์เน็ตเดียวกัน ส่งผลให้การแจ้งเตือนและการติดตามสถานะแบตเตอรี่ระยะไกลมีข้อจำกัดในเรื่องของระยะทาง

5.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา

- 1) เพิ่มจำนวนการเก็บข้อมูลที่นำไปวิเคราะห์ค่าความต้านทานและสร้างฟังก์ชันทำนายระยะเวลาที่แบตเตอรี่เสื่อมสภาพ เพื่อให้เห็นผลการวิเคราะห์ที่มีความแม่นยำมากขึ้น
- 2) ปรับเปลี่ยนอุปกรณ์ที่ใช้ Arduino เป็นตัว Master, Slaves และแหล่งจ่ายสำรองสำหรับ Slaves ที่มีความเสถียร เพื่อการทำงานที่มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น
- 3) เพิ่มผลการเก็บข้อมูลแบตเตอรี่หลากหลายยี่ห้อสำหรับสร้างโมเดลสมการถดถอยของแบตเตอรี่แต่ละยี่ห้อ เพื่อให้ระบบติดตามสถานะแบตเตอรี่สามารถใช้งานได้อย่างครอบคลุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ใช้เฉพาะในวงจำกัดเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้หรือเผยแพร่สู่สาธารณะโดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดแก้ไขข้อจำกัดในเรื่องของระยะทางการแสดงผลติดตามสถานะแบตเตอรี่และแจ้งเตือนได้ในระยะไกลไปใช้

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

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

เอกสารอ้างอิง

- [1] Anantha Krishna M S and A.D Srinivasna, “Detection of DC Ground Faults of Ungrounded DC System in Sub-Station/Power Plants”, International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE), Vol-8, 2019
- [2] Edvard, “3 Designs of DC Distribution Systems In Power Substations”, ELECTRICAL ENGINEERING PORTAL, (Online), electrical-engineering-portal.com/dc-distribution-systems, 2016
- [3] ElectraNet, “Transmission Substation”, (Online), electranet.com.au/our-approach/safety/transmission-substations/, 2016
- [4] IEEE Power & Energy SoCiety, “IEEE Guide for Selection and Use of Battery Monitoring Equipment in Stationary Applications”, IEEE Std 1491™-2012,2012
- [5] IEEE Power Engineering SoCiety, “IEEE Recommended Practice for Maintenance, Testing, and Replacement of Valve-Regulated Lead-Acid (VRLA) Battery for Stationary Applications”, IEEE Std 1188™-2005,2006
- [6] Instrumentos de medida, “Lead-acid Battery Handbook”, HIOKI E.E.CORPORATION
- [7] Kiadtisak Nakjuy and Surin Khomfoi, “Battery Monitoring System for DC Distribution in a Substation Using Travelling Wave Theory.”, IEEE Xplore, 2018
- [8] PRETON JOHNSON, “Proactive and Predictive Maintenance in Smart Factories”, (Online), www.cbtechinc.com/proactive-and-predictive-maintenance-in-smart-factories/, 2020
- [9] Surin Khomfoi, “Practical Neural Network for Electrical Engineering”
- [10] กชิตติส จันท์เสนา และ คณะจัดทำ, “การศึกษาการเสื่อมสภาพก่อนกำหนดของแบตเตอรี่ชนิดแทรกซ์ชันจากข้อมูลการใช้งานจริง”, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2020

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

ระบบติดตามสถานะแบตเตอรี่เชิงรุกสำหรับระบบจ่ายไฟกระแสตรงในสถานีไฟฟ้าย่อย

PROACTIVE BATTERY MONITORING SYSTEM FOR DC DISTRIBUTION IN A SUBSTATION

นฤมา ใจอินทร์¹ ปัทมา รัตน์เพ็ชร² วิษัฒ ศรีศุลา³ อาหามัดชุกี สะอิ⁴

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

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

บทคัดย่อ

ปัญหานี้มีจุดประสงค์เพื่อนำเสนอการศึกษาระบบติดตามสถานะแบตเตอรี่เชิงรุกสำหรับระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงในสถานีไฟฟ้าย่อย ซึ่งเทคนิคที่ถูกนำมาใช้ในการพัฒนาระบบติดตามสถานะแบตเตอรี่คือการออกแบบฟังก์ชันทำนายระยะเวลาที่แบตเตอรี่เสื่อมสภาพ โดยการรวบรวมข้อมูลจากสภาวะการใช้งานจริงของแบตเตอรี่ในสถานีไฟฟ้าย่อย ประกอบด้วย ค่าแรงดันลอยของแบตเตอรี่ ณ ขณะนั้นและค่าแรงดันลอยที่กักของแบตเตอรี่, อุณหภูมิที่ขั้วแบตเตอรี่, อุณหภูมิแวดล้อมและค่ากระแสขณะแบตเตอรี่ถูกอัดประจุ ณ แรงดันลอย พร้อมทั้งออกแบบสมการถดถอยเพื่อทำนายค่าความต้านทานภายในแบตเตอรี่ซึ่งเป็นตัวแปรที่สามารถนำมาคำนวณหาสภาวะเสื่อมสภาพของแบตเตอรี่ โดยสมการถดถอยนี้สามารถนำไปใช้เป็นส่วนหนึ่งของฟังก์ชันการติดตามสถานะแบตเตอรี่ในเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่ได้ นอกจากนี้กระบวนการดังกล่าวยังสามารถบันทึกข้อมูลจริงและข้อมูลที่ได้จากการทำนายจากสมการถดถอยเพื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ถูกเก็บบันทึกไว้ก่อนหน้านี้ในคอมพิวเตอร์ประมวลผลกลาง ซึ่งจะนำไปสู่การบำรุงรักษาเชิงรุกสำหรับระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงในสถานีไฟฟ้าย่อยเพื่อหลีกเลี่ยงความเสียหายร้ายแรงที่อาจเกิดขึ้น

คำสำคัญ: ระบบติดตามสถานะแบตเตอรี่เชิงรุก, สมการถดถอย, ความต้านทานภายในแบตเตอรี่

Abstract

A study of the proactive battery monitoring system for a DC distribution system in a substation is presented in the thesis. The developed technique of a battery monitoring system is included battery deteriorated time prediction function by collecting data from actual usage conditions of battery in a substation. The battery data consist of the float voltage of the battery and the rated float voltage, the temperature at the battery terminals, and ambient temperature along with the current while the battery is charged at the float voltage. The regression model is also developed to predict the battery internal resistance: this battery internal resistance can be used to calculate battery deteriorated condition. The regression model can then be implemented as a battery monitoring

function in a charger. In addition, the proposed method can store the actual data and predictive data from the developed regression model to compare with historical data in a server computer. These stored data can use for proactive maintenance of a dc distribution in a substation to avoid catastrophically damage.

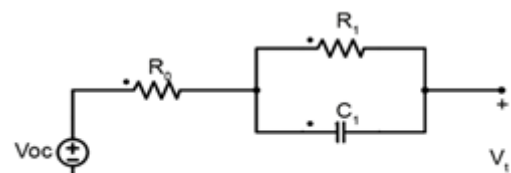
Keywords: Proactive battery monitoring system, Regression, Internal resistance

1. บทนำ

สถานีไฟฟ้าย่อยเป็นองค์ประกอบหนึ่งที่มีความสำคัญสำหรับระบบไฟฟ้ากำลัง การซ่อมบำรุงอุปกรณ์ในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งมีความสำคัญต่อระบบควบคุมและวงจรถูกป้องกันของสถานีไฟฟ้าย่อยจึงมีความจำเป็นต้องมีความปลอดภัยและความน่าเชื่อถือ โดยเฉพาะการซ่อมบำรุงแบตเตอรี่สำหรับแหล่งจ่ายไฟสำรอง ซึ่งเป็นการซ่อมบำรุงตามระยะเวลา อาจทำให้เกิดกรณีที่แบตเตอรี่เสื่อมสภาพก่อนกำหนดการซ่อมบำรุง หรืออาจถ่ายเปลี่ยนแบตเตอรี่ทั้งที่ยังมีประสิทธิภาพเหลืออยู่ ส่งผลให้เสียค่าซ่อมบำรุงโดยไม่จำเป็น ดังนั้นคณะผู้จัดทำโครงการจึงได้นำเสนอการพัฒนาระบบการซ่อมบำรุงโดยใช้ระบบติดตามสถานะแบตเตอรี่ที่มีการวิเคราะห์หาระยะเวลาที่แบตเตอรี่เสื่อมสภาพและสามารถวิเคราะห์หาสาเหตุการเสื่อมสภาพของแบตเตอรี่

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 วงจรสมมูลแบตเตอรี่แบบ One-RC branch



รูปที่ 2.1 วงจรสมมูลแบตเตอรี่แบบ One-RC branch

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับใช้ในการเรียนการสอนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

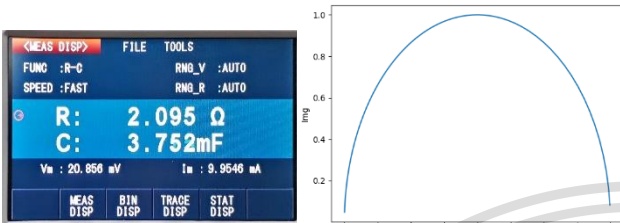
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

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

4. การทดสอบและผลการทดสอบ

4.1 ผลการตรวจสอบความถูกต้องของเครื่องมือวัด

จากการวิเคราะห์ Cole-Cole plot ที่ความถี่ 1 kHz กราฟไม่มีผลของพจน์จินตภาพน้อยมากและมีแนวโน้มที่กราฟจะตัดแกน x ซึ่งจุดที่ตัดมีค่าเท่ากับค่า R_0 คือ 2 Ω โดยเปรียบเทียบผลการวัดจากเครื่องมือ Battery Analyzer ซึ่งวัดค่าความต้านทานและค่าตัวเก็บประจุได้ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ผลการตรวจสอบเครื่องมือวัดกับ Cole-Cole plot

4.2 ผลการสร้างโมเดลสมการถดถอย

จากการสร้างโมเดลสมการถดถอย 3 รูปแบบ คือ โมเดลสมการถดถอยเชิงเส้น โมเดลสมการถดถอยไม่เชิงเส้นแบบ quadratic response surface model 10 พจน์ และโมเดลสมการถดถอยไม่เชิงเส้นแบบ quadratic response surface model 7 พจน์ สมการถดถอยที่นำมาใช้ในโครงการจะใช้จากโมเดล quadratic response surface model 7 พจน์ ดังสมการ (4.1) โดยรูปที่ 4.2, 4.3 และ 4.4 แสดงการเปรียบเทียบค่าความต้านทานภายในที่ได้จากการเก็บข้อมูลจริงกับที่ได้จากการทำนายจากโมเดลสมการถดถอยแต่ละรูปแบบตามลำดับ ซึ่งความเหมาะสมของแต่ละโมเดลแสดงดังตารางที่ 4.1

$$R_0 = 21.73 + 7.43x_1 - 5.92x_2 + 0.70x_3 - 10.44x_1^2 + 8.67x_2^2 - 0.26w_9x_3^2 \quad (4.1)$$

4.3 ผลการเก็บข้อมูลเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานภายในกับ %SoH

จากรูปที่ 4.5 จะเห็นว่าแนวโน้มของ R_0 เพิ่มขึ้นเมื่อ %SoH ของแบตเตอรี่ลดลง จึงสรุปได้ว่าความต้านทานภายในแบตเตอรี่แปรผกผันกับ %SoH และมีความสัมพันธ์กันดังสมการ (4.2) โดยที่ SoH 80% ค่า R_0 มีค่าเท่ากับ 22.45 m Ω

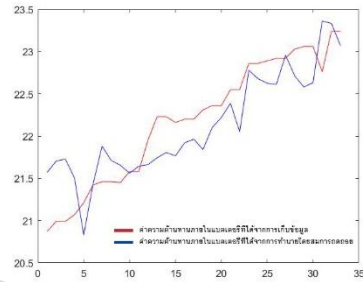
$$SoH = 1629e^{-0.135R_0} \quad (4.2)$$

4.4 ผลการวิเคราะห์สาเหตุการเสื่อมสภาพของแบตเตอรี่

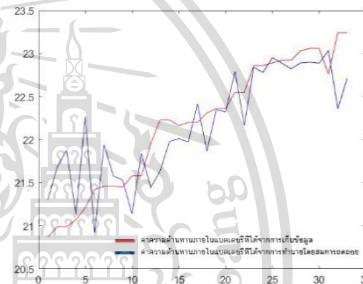
จากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของระบบติดตามสถานะการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าแบตเตอรี่เสื่อมสภาพเนื่องจากการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ทราบได้จากทั้งสี่ ลักษณะงานเป็นจุดเปลี่ยน และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

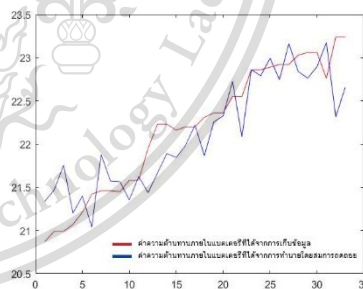
ที่มากกว่าหรือน้อยกว่าแรงดันพิกัด 13.8 V, การชาร์จด้วยกระแสที่มากกว่าความเหมาะสมของแบตเตอรี่ (0.2C), อุณหภูมิที่ช้าของแบตเตอรี่แต่ละก้อนมีค่ามากกว่าอุณหภูมิห้องเกินค่า (3°C) และเกิดสภาวะแบตเตอรี่เสื่อมสภาพตามกัน โดยภาพรวมของปัญหาสามารถแสดงผลดังรูปที่ 4.6



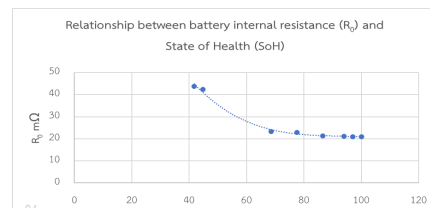
รูปที่ 4.2 ค่าความต้านทานภายในที่ได้จากการเก็บข้อมูลจริงและจากการทำนายโดยสมการถดถอยเชิงเส้น



รูปที่ 4.3 ค่าความต้านทานภายในที่ได้จากการเก็บข้อมูลจริงและจากการทำนายโดยสมการถดถอย Quadratic response surface model 10 พจน์



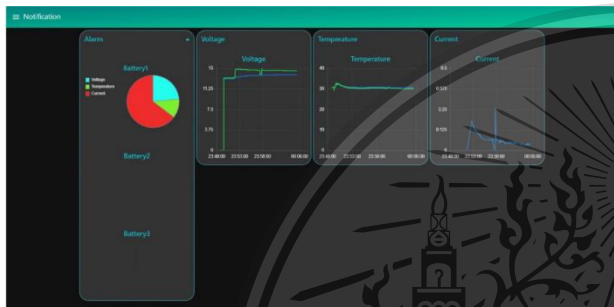
รูปที่ 4.4 ค่าความต้านทานภายในที่ได้จากการเก็บข้อมูลจริงและจากการทำนายโดยสมการถดถอย Quadratic response surface model 7 พจน์



รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานภายในแบตเตอรี่กับ %SoH

ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบความเหมาะสมของโมเดลสมการถดถอย

Regression model	Mean Square Error: MSE	Coefficient of determination: R ²
Linear	0.3192	0.6650
Non-linear quadratic response surface model 10 terms	0.3189	0.7020
Non-linear quadratic response surface model 7 terms	0.2939	0.7262



รูปที่ 4.6 หน้าจอแสดงผลการวิเคราะห์สาเหตุที่ทำให้แบตเตอรี่เสื่อมสภาพ

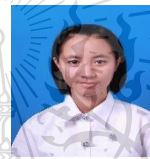
5 สรุปผลการดำเนินโครงการ

ระบบติดตามสถานะแบตเตอรี่เชิงรุกนี้ เป็นระบบที่ถูกออกแบบมาโดยคำนึงถึงความเหมาะสมในการใช้งานจริง คือระบบติดตามสถานะดังกล่าวจะไม่รบกวนหรือตัดแปลงวงจรของระบบเดิม ในการสร้างฟังก์ชันทำนายระยะเวลาที่แบตเตอรี่จะเสื่อมสภาพจึงอาศัยการวิเคราะห์ด้วยข้อมูลที่วัดโดยตรงจากเซ็นเซอร์ซึ่งจะถูกนำมาวิเคราะห์เป็นกลุ่มตัวแปรทำนายเพื่อสร้างสมการถดถอยโดยโมเดลสมการถดถอยที่มีรูปแบบที่เหมาะสมที่สุด คือ สมการถดถอยแบบไม่เชิงเส้น Quadratic response surface แบบ 7 พจน์ ระบบจะวิเคราะห์พฤติกรรมการเพิ่มขึ้นของค่าความต้านทานภายในและสร้างฟังก์ชันทำนายระยะเวลาที่แบตเตอรี่จะเสื่อมสภาพ โดยเทียบกับก่อนระยะเวลาที่ค่าความต้านทานภายในแบตเตอรี่ขณะมี SoH 80% หรือมีค่าเท่ากับ 22.45 mΩ ในทำนองเดียวกัน ฟังก์ชันวิเคราะห์สาเหตุการเสื่อมสภาพของแบตเตอรี่ อาศัยการประเมินผลทางสถิติจากประวัติความผิดปกติของแบตเตอรี่ที่ถูกบันทึกไว้ ตามลักษณะความผิดปกติที่กำหนดเทียบกับลักษณะการทำงานของแบตเตอรี่ตามมาตรฐาน ซึ่งข้อมูลดังกล่าวจะถูกแสดงบนจอแสดงผลรวมถึงสามารถแสดงผลระยะไกลผ่านแอปพลิเคชันริโมทและแอปพลิเคชันไลน์ ทำให้สามารถติดตามสถานะการใช้งานแบตเตอรี่ได้ตลอดเวลา

เอกสารอ้างอิง

- [1] IEEE Power & Energy Society, “IEEE Guide for Selection and Use of Battery Monitoring Equipment in Stationary Applications”, IEEE Std 1491™-2012,2012
- [2] IEEE Power Engineering Society, “IEEE Recommended Practice for Maintenance, Testing, and Replacement of Valve-Regulated Lead-Acid (VRLA) Battery for Stationary Applications”, IEEE Std 1188™-2005,2006
- [3] Instrumentos de medida, “Lead-acid Battery Handbook”, HIOKI E.E.CORPORATION
- [4] Surin Khomfoi. “Practical Neural Network for Electrical Engineering”

ประวัติผู้เขียน



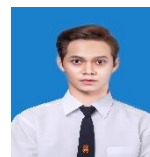
นางสาวณณา ใจอินทร์
2013-2016: โรงเรียนอนุบาลวชิรวิทยาลัย อ.เมือง จ.ลำปาง
2017-2020: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า



นางสาวปัทมา รัตนเพ็ชร
2013-2016: โรงเรียนอุตรดิตถ์ศรีธานี อ.เมือง จ.อุตรดิตถ์
2017-2020: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า



นายวิษร ศรีตุลา
2013-2016: โรงเรียนสาธิตมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.เมือง จ.ปัตตานี
2017-2020: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า



นายอหามัดชุกี สะอิ
2013-2016: โรงเรียนธรรมวิทยามูลนิธิ อ.เมือง ยะลา จ.ยะลา
2017-2020: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษานั่นเอง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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


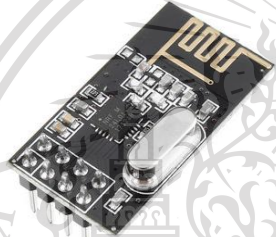

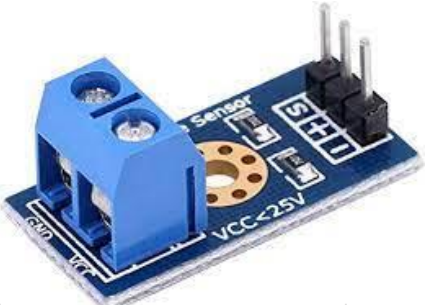
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

รูปภาพ	รายละเอียด
	<p>Arduino nano 3.0 Driver CH340G ไมโครคอนโทรลเลอร์ใช้เป็นตัวประมวลผลหลักให้กับ master sensor และ slave sensor</p>
	<p>NRF24L01 Module โมดูลสื่อสารไร้สายความถี่ 2.4G ใช้งานร่วมกับ Arduino nano เพื่อสื่อสารระหว่าง master sensor กับ slave sensor</p>
	<p>Thermistor NTC 100K 3D Printer ใช้สำหรับวัดอุณหภูมิที่หัวแบดเตอร์สำหรับ slave sensor วัดได้ในช่วง -50 ถึง 260 °C</p>
	<p>Voltage sensor ใช้สำหรับวัดแรงดันลอยของแบดเตอร์ วัดได้ในช่วง 0-25V</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

รูปภาพ	รายละเอียด
	<p>Current sensor</p> <p>วัดกระแสในวงจรขณะชาร์จ ย่านการวัดน้อยกว่า 5 A.</p>
	<p>Rechargeable Battery (BESTON)</p> <p>แบตเตอรี่แบบชาร์จใหม่ ขนาด 9V. ใช้สำหรับจ่ายไฟให้กับ slave sensor</p>
	<p>Resistor 100k 1W</p> <p>ตัวต้านทานขนาด 100 kΩ</p>
	<p>Capacitor 0.1μF 50V</p> <p>ตัวเก็บประจุขนาด 0.1μF 50V ใช้สำหรับไฟฟ้ากระแสตรง</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

รูปภาพ	รายละเอียด
	<p>KIKUSUI PLZ-5WH Series Electronic Load</p> <p>อิเล็กทรอนิกส์โหลดขนาด 20kW , 800V , 400A สำหรับทดสอบแบตเตอรี่</p>
	<p>KIKUSUI PAT650-12.3T</p> <p>อุปกรณ์อัดประจุ ขนาด 650V , 12.3A สำหรับการทดลอง</p>
	<p>Battery Analyzer BA6010</p> <p>เครื่องทดสอบแบตเตอรี่ด้วยการกระตุ้นด้วยสัญญาณ AC 1kHz</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

รูปภาพ	รายละเอียด
	<p>Power Quality Analyzer PQ3198-94 เครื่องวัดและวิเคราะห์กำลังไฟฟ้าแบบพกพา ใช้สำหรับเก็บข้อมูลเพื่อทดสอบแบตเตอรี่ และเปรียบเทียบกับตัว slave sensor</p>
	<p>Multimeter UNI-T UT203+ Digital Automatic Range True RMS Clamp Meter with LCD Display มัลติมิเตอร์สามารถใช้วัดค่า DC current</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

ข้อมูล 70 ชุด ใช้ในการสร้าง Regression model

R_0 (Ω)	V_{batt} (V)	T_{batt} ($^{\circ}C$)	T_{amb} ($^{\circ}C$)	I (A)	V_{string} (V)	ΔV	ΔT
20.87	13.75	20.78	20.7	0.17	27.55	0.05	0.08
20.87	13.77	20.39	20.05	0.19	27.59	0.03	0.34
20.87	13.78	20.14	19.77	0.19	27.63	0.02	0.37
20.99	13.73	23.04	23	0.17	27.57	0.07	0.04
20.99	13.76	22.01	22	0.04	27.64	0.04	0.01
20.99	13.81	21.47	20.87	0.04	27.67	-0.01	0.6
21.07	13.8	24.9	24.1	0.1	27.65	0	0.8
21.07	13.82	24.1	23.9	0.1	27.69	-0.02	0.2
21.07	13.84	25.8	25.9	0.1	27.7	-0.04	-0.1
21.21	13.77	20.39	20.37	0.57	27.68	0.03	0.02
21.21	13.79	19.98	19.8	0.51	27.71	0.01	0.18
21.42	13.84	27.59	27.39	0.1	27.73	-0.04	0.2
21.42	13.76	27.61	27.33	0.11	27.66	0.04	0.28
21.46	13.73	26.83	26.53	0.1	27.62	0.07	0.3
21.46	13.74	22.08	21.5	0.08	27.56	0.06	0.29
21.46	13.77	19.96	19.89	0.08	27.62	0.03	0.07
21.45	13.76	27.7	26.5	0.1	27.61	0.04	1.2
21.45	13.82	25.3	24.6	0.07	27.65	-0.02	0.7
21.45	13.81	25	24.7	0.08	27.65	-0.01	0.9
21.58	13.83	26.1	25.4	0.1	27.72	-0.03	0.7
21.58	13.83	26.2	25.4	0.05	27.74	-0.03	0.8
21.58	13.84	25.6	25	0.02	27.74	-0.04	0.6
21.95	13.76	28	27.8	0.1	27.69	0.04	0.2
21.95	13.77	28.5	28.5	0.1	27.69	0.03	0
21.95	13.78	27.8	27.3	0.1	27.69	0.02	0.5
22.23	13.76	28.07	27.5	0.14	27.62	0.04	0.57
22.22	13.76	28.11	27.6	0.03	27.67	0.04	0.51
22.23	13.78	28.4	28.1	0.03	27.74	0.02	0.3
22.16	13.79	28.5	28.2	0.1	27.71	0.01	0.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม หากมีข้อผิดพลาดประการใด ขออภัยไว้ล่วงหน้า และขอสงวนสิทธิ์ในเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์นี้ไว้

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

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

R_0 (Ω)	V_{batt} (V)	T_{batt} ($^{\circ}\text{C}$)	T_{amb} ($^{\circ}\text{C}$)	I (A)	V_{string} (V)	ΔV	ΔT
22.16	13.81	29.2	28.5	0.03	27.73	-0.01	0.7
22.16	13.82	30.3	29.9	0.02	27.75	-0.02	0.4
22.2	13.75	28.8	27.9	0.1	27.67	0.05	0.9
22.2	13.77	30.5	28.8	0.03	27.66	0.03	1.7
22.2	13.77	29.8	29	0.02	27.65	0.03	0.8
22.31	13.75	27.4	26.9	0.1	27.62	0.05	0.5
22.31	13.76	27.9	27.2	0.1	27.65	0.04	0.7
22.31	13.78	26.6	25.8	0.1	27.71	0.02	0.8
22.36	13.7	26.3	25.5	0.1	27.6	0.1	0.8
22.36	13.71	28.8	27.5	0.1	27.65	0.09	1.3
22.36	13.7	27.5	26.1	0.1	27.66	0.1	1.4
22.55	13.69	28.6	27.3	0.1	27.6	0.11	1.3
22.55	13.66	28.7	27.7	0.05	27.59	0.14	1
22.55	13.67	30.1	28.7	0.03	27.61	0.13	1.4
22.55	13.69	23.5	22.43	0.18	27.66	0.11	1.07
22.55	13.67	24.12	23.3	0.07	27.66	0.13	0.82
22.86	13.53	27.7	26.9	0.1	27.6	0.27	0.8
22.86	13.54	29.3	28.8	0.1	27.62	0.26	0.5
22.86	13.55	28.9	28.2	0.1	27.61	0.25	0.7
22.89	13.59	26.6	25.1	0.09	27.63	0.21	1.5
22.89	13.61	26.4	25.3	0.04	27.67	0.19	1.1
22.89	13.64	26.2	25.6	0.05	27.69	0.16	0.6
22.92	13.57	25.67	23.69	0.11	27.63	0.23	0.85
22.92	13.59	24.42	22.2	0.06	27.67	0.21	0.91
22.92	13.52	25.1	24.05	0.05	27.61	0.28	1.05
23.03	13.53	30.1	32.1	0.1	27.61	0.27	0.87
23.03	13.55	28.5	28.7	0.1	27.66	0.25	0.87
23.03	13.56	28.6	27.7	0.1	27.66	0.24	0.9
23.06	13.59	26.4	25.39	0.1	27.72	0.21	1.01
23.06	13.56	25.2	25.7	0.09	27.72	0.24	1.02

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับวงวิชาชีพการศึกษานานาชาติ ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดก็ตาม หากมีข้อสงสัยหรือต้องการข้อมูลเพิ่มเติม กรุณาติดต่อฝ่ายวิชาการ โทร. 02-2565000

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

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

R_0 (Ω)	V_{batt} (V)	T_{batt} ($^{\circ}C$)	T_{amb} ($^{\circ}C$)	I (A)	V_{string} (V)	ΔV	ΔT
23.06	13.59	24.5	23.5	0.07	27.75	0.21	1
22.76	13.38	26.75	25.04	0.12	27.48	0.42	1.71
22.76	13.49	29.09	26.88	0.02	27.67	0.31	2.21
22.76	13.5	26.81	25	0.01	27.68	0.3	1.81
23.24	13.49	23.88	21	0.11	27.71	0.31	2.88
23.24	13.52	21.76	19.14	0.02	27.75	0.28	2.62
23.24	13.59	21.58	18.84	0.02	27.82	0.21	2.74
42.3	13.43	24.61	21.78	0.16	27.73	0.37	2.83
42.3	13.44	23.48	22.02	0.03	27.76	0.36	2.8
42.3	13.44	22.76	21.95	0.02	27.79	0.36	2.8



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

ประวัติผู้เขียน



นางสาวนฤมา ใจอินทร์
 2013-2016: โรงเรียนบุญวาทย์วิทยาลัย อ.เมือง จ.ลำปาง
 2017-2020: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า



นางสาวปัทมา รัตน์เพชร
 2013-2016: โรงเรียนนอตริตต์ดรณี อ.เมือง จ.อุดรดิตถ์
 2017-2020: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า



นายวิษร ศรีตุลา
 2013-2016: โรงเรียนสาธิตมหาวิทยาลัยสงขลา-
 นครินทร์ อ.เมือง จ.ปัตตานี
 2017-2020: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า



นายอหามัดชูกี สะอี่
 2013-2016: โรงเรียนธรรมวิทยามูลนิธิ อ.เมืองยะลา จ.ยะลา
 2017-2020: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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