ระบบตรวจสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่สำหรับสถานีไฟฟ้าย่อย โดยอ้างอิงตามมาตรฐานสากล IEC61850

BATTERY MONITORING SYSTEM FOR SUBSTATION BASED ON IEC61850 STANDARD

โดย

นายจุมพล วัฒนะ
นายสุรเชษฐ์ ชมใจ
นายไอยรา พยัคฆ์อังกูร

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

ระบบตรวจสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่สำหรับสถานีไฟฟ้าย่อย โดยอ้างอิงมาตรฐานสากล IEC61850

BATTERY MONITORING SYSTEM FOR SUBSTATION BASED ON IEC61850 STANDARD

โดย

นายจุมพล วัฒนะ

นายสุรเชษฐ์ ชมใจ

นายไอยรา พยัคฆ์อังกูร

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

BATTERY MONITORING SYSTEM FOR SUBSTATION BASED ON IEC61850 STANDARD

CHUMPOL WATANA
SURACHED CHOMJAI
IYARA PHAYAKANGKUL

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
2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2559

ระบบตรวจสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่สำหรับสถานีไฟฟ้าย่อย
โดยอ้างอิงมาตรฐานสากล IEC61850
BATTERY MONITORING SYSTEM FOR SUBSTATION
BASED ON IEC61850 STANDARD

โดย

นายจุมพล วัฒนะ

นายสุรเชษฐ์ ชมใจ

นายไอยรา พยัคฆ์อังกูร

อาจารย์ที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์ ดร. สุรินทร์ คำฝอย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2559

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สาขาพลังงานไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง ระบบตรวจสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่สำหรับสถานีไฟฟ้าย่อยโดยอ้างอิงมาตรฐานสากล IEC61850

ผู้จัดทำ

1. นายจุมพล วัฒนะ
2. นายสุรเชษฐ์ ชมใจ
3. นายไอยรา พยัคฆ์อังกูร

.... อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์ ดร. สุรินทร์ คำฝอย)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบตรวจสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่สำหรับสถานีไฟฟ้าย่อย โดยอ้างอิงมาตรฐานสากล IEC61850

นายจุมพล วัฒนะ
นายสุรเชษฐ์ ชมใจ
นายไอยรา พยัคฆ์อังกูร
รศ.ดร. สุรินทร์ คำฝอย อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2559

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้นำเสนอระบบตรวจสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดที่ถูกใช้งานภายในสถานีไฟฟ้าย่อย จุดประสงค์สำหรับงานวิจัยนี้ คือการแสดงสมรรถนะและประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด เพื่อให้ผู้ใช้งานมีแบตเตอรี่ที่พร้อมใช้งานและมีสมรรถนะสูงสุด ซึ่งในสถานีไฟฟ้าย่อยมีการนำแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดมาสำรองพลังงานไฟฟ้าไว้เพื่อใช้เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับระบบป้องกันในกรณีที่เกิดเหตุขัดข้องขึ้น ในกรณีที่เกิดเหตุขัดข้องและแบตเตอรี่มีการเสื่อมสมรรถนะหรือไม่พร้อมใช้งาน จะส่งผลให้ระบบป้องกันไม่สามารถทำงานได้ อาจก่อให้เกิดความเสียหายที่คาดไม่ถึงตามมา เช่น การระเบิดของสถานีไฟฟ้าย่อย เป็นต้น จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่แบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดจะต้องมีประสิทธิภาพและพร้อมใช้งานอยู่เสมอ หัวใจหลักสำคัญของระบบตรวจสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่ดังกล่าว คือวงจรสมมูลที่แสดงพฤติกรรมของแบตเตอรี่และพารามิเตอร์ของวงจรสมมูล ซึ่งวิธีการที่ใช้หาวงจรสมมูลของแบตเตอรี่ คือการอัดประจุไฟฟ้าเข้าแบตเตอรี่เพื่อวัดกระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และอิมพีแดนซ์ของแบตเตอรี่ที่ทำการทดสอบ วงจรสมมูลที่นำเสนอจะได้มาจากการทำการทดลองที่ดูผลตอบสนองเชิงเวลา นอกจากนั้นจะมีการนำทฤษฎีคลื่นเดินทางมาประยุกต์ใช้ ทำให้สามารถบ่งบอกแนวโน้มของแบตเตอรี่ที่เสื่อมสมรรถนะได้จากรูปแบบคลื่นที่เปลี่ยนไป ทั้งนี้การส่งข้อมูลต่าง ๆ จะอ้างอิงตามมาตรฐานสากล IEC61850 นอกจากนั้น องค์ความรู้ที่ได้จากงานวิจัยนี้จะสามารถนำไปพัฒนาและประยุกต์ใช้เป็นอีกฟังก์ชันหนึ่งของเครื่องอัดประจุไฟฟ้าที่ใช้งานภายในสถานีไฟฟ้าย่อย และยังสามารถนำไปพัฒนาเพื่อเชิงพาณิชย์ต่อไปในอนาคต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

BATTERY MONITORING SYSTEM FOR SUBSTATION BASED ON IEC61850 STANDARD

Chumpol Watana
Surached Chomjai
Iyara Phayakangkul
Assoc.Prof. Dr. Surin Khomfoi Advisor
Year 2016

ABSTRACT

This thesis presents the concept of Lead-acid battery monitoring system in a power substation. The purpose of this thesis is to identify the performance of Lead-acid battery in a power substation. Since Lead-acid battery in substation is used to reserve the energy for DC supply for the emergency cases, the batteries have to be efficient and available at all time. In case of the protection system failure, the batteries are unavailable: these could lead to the enormous impact such as the substation explosion. The keys of battery monitoring system are the equivalent circuit representing battery characteristics. The traveling wave theory can be utilized for indicating tendency of weak or abnormal battery. The measurement method and tested circuit for getting battery's parameters is proposed by charging the battery to measure the current, voltage, and impedances. The proposed equivalent circuit is validated in time domain. Then, the abnormal battery indicative method is proposed by applying the traveling wave to find the difference, and the data reporting will be based on IEC61850. Moreover, the knowledge from this thesis can be used to develop and apply in a function of battery charger which is used in a power substation and can be applied in the future.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เรื่องระบบตรวจสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่สำหรับสถานีไฟฟ้าย่อย โดยอ้างอิงมาตรฐาน IEC61850 สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เกิดจากการดำเนินงานด้วยความมุ่งมั่นวิริยะอุตสาหะ พร้อมทั้งยังได้รับการสนับสนุนในด้านต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นด้านความรู้วิชาการ ด้านเทคนิคการดำเนินงาน ด้านทุนสนับสนุน รวมถึงคำแนะนำต่าง ๆ ทางคณะผู้จัดทำจึงขอขอบพระคุณในความอนุเคราะห์ที่ให้มา

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สุรินทร์ คำฝอย ผู้ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาของปริญญานิพนธ์นี้ ทั้งยังช่วยประสิทธิ์ประสาทความรู้ทางด้านวิชาการ ดูแลเอาใจใส่ตลอดจนให้คำแนะนำในการดำเนินงาน รวมถึงเป็นผู้ฝึกฝนให้เพียบพร้อมสำหรับการบรรยาย ทำให้ปริญญานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ คุณเกียรติศักดิ์ นาคจุ้ย ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการให้คำแนะนำ ความช่วยเหลือทางด้านวิชาการและทางด้านการทดลอง การวิเคราะห์ผลการทดลอง และความช่วยเหลือทางด้านปริญญานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณห้องปฏิบัติการ REAL (Renewable Energy Application Laboratory) ที่ให้ความอนุเคราะห์ทางด้านการศึกษาวิจัยและการศึกษาทดลอง นอกจากนั้นยังเป็นเสมือนห้องสมุดแห่งแหล่งความรู้ และที่สำคัญทำให้ทุกคนในห้องปฏิบัติการเป็นเหมือนครอบครัวเดียวกัน

ขอขอบพระคุณทุนอุดหนุนการวิจัย จากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ซึ่งเป็นผู้สนับสนุนทุนวิจัยเรื่องระบบตรวจสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่สำหรับสถานีไฟฟ้าย่อยโดยอ้างอิงตามมาตรฐาน IEC61850 เพื่อนำมาเป็นทุนทางด้านการวิจัย

ท้ายสุดนี้ขอขอบพระคุณ บิดามารดา ที่ได้อุปการะเลี้ยงดูอบรมสั่งสอน ตลอดจนให้การสนับสนุนและเติมกำลังใจในการทำงานปริญญานิพนธ์ครั้งนี้จนสำเร็จด้วยดี คุณค่าและประโยชน์อันพึงประสงค์จากปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ คณะผู้จัดทำขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน และหวังเป็นอย่างยิ่งว่าปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์แก่ผู้ที่ได้ทำการศึกษาเพื่อจะนำไปประยุกต์ใช้ในงานวิจัยในด้านต่าง ๆ ต่อไป

คณะผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VIII
สารบัญตาราง	XIV
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน	4
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงงาน	4
1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงงาน	5
1.5 แผนการดำเนินโครงงาน	6
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย	8
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	9
2.1 บทนำ	9
2.2 ประเภทของแบตเตอรี่	9
2.3 แบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด	10
2.3.1 ส่วนประกอบของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด	10
2.3.2 การแบ่งประเภทของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด	12
2.3.3 แบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดชนิด VRLA	13
2.4 การอัดประจุเข้าสู่แบตเตอรี่	15
2.4.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการอัดประจุไฟฟ้า	16
2.4.2 ประเภทของการอัดประจุไฟฟ้า	18
2.5 การใช้งานแบตเตอรี่ให้เหมาะสม	19
2.6 มาตรฐานการทดสอบสภาพแบตเตอรี่	20
2.7 ระบบจัดการแบตเตอรี่ (Battery Management System : BMS)	21
2.8 วงจรสมมูลของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด	23
2.8.1 การหาค่าพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด โดยผลการตอบสนองเชิงเวลา	24
2.9 คลื่นเดินทาง	25
2.9.1 การสะท้อนของคลื่นเดินทาง	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.9.2 ความเร็วของคลื่นเดินทางภายในสายส่งชนิดต่างๆ	27
2.9.3 การสะท้อนของคลื่นเดินทาง	28
2.9.4 การสะท้อนและสัมประสิทธิ์การสะท้อนแรงดัน	30
2.10 ระบบมอนิเตอร์ IED และครือข่ายในสถานีไฟฟ้าย่อยอัตโนมัติ ตามมาตรฐาน IEC61850	39
2.10.1 ระบบมอนิเตอร์ IED และเครือข่าย	39
2.10.1.1 คอมพิวเตอร์	40
2.10.1.2 การสื่อสารในระบบมอนิเตอร์ IED และเครือข่าย	41
2.10.1.2.1 การสื่อสารภายในระบบมอนิเตอร์ IED และเครือข่าย	41
2.10.1.2.2 การสื่อสารระหว่างระบบสถานีย่อยอัตโนมัติ และระบบมอนิเตอร์ IED และเครือข่าย	41
2.10.1.3 ซอฟต์แวร์สำหรับระบบมอนิเตอร์ IED และเครือข่าย	41
2.10.1.3.1 INMS Manager	42
2.10.1.3.2 INMS Agent	42
2.10.1.4 การสื่อสารระหว่าง INMS Agent และ IEDสำหรับ วิเคราะห์ประสิทธิภาพการสื่อสาร	43
2.10.1.5 การสื่อสารระหว่าง INMS Agent และ IED ของสถานะ ไฟฟ้าย่อยอัตโนมัติเพื่อส่งการแจ้งเตือน	44
2.10.1.5.1 การใช้เมสเซจ GOOSE	45
2.11 สรุป	47
บทที่ 3 การออกแบบการทดลอง	48
3.1 บทนำ	48
3.2 ข้อมูลแบตเตอรี่ที่ใช้ทำการทดลอง	49
3.3 การออกแบบการทดลองเพื่อวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงเวลา	51
3.4 การออกแบบวงจรสำหรับคลื่นเดินทาง	53
3.5 สรุป	55
บทที่ 4 ผลการทดลอง	56
4.1 บทนำ	56
4.2 การทดลองหาค่าพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดด้วยการวิเคราะห์ ผลตอบสนองเชิงเวลา	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.1 การทดลองหาค่าพารามิเตอร์	56
4.2.2 การวิเคราะห์หาพารามิเตอร์	57
4.3 การทดลองการส่งคลื่นเดินทางเข้าไปในวงจรโหลดทางไฟฟ้าผ่านทางสายส่ง	62
4.3.1 การทดลองการส่งคลื่นเดินทางผ่านทางสายส่งโดยไม่มีโหลดทางไฟฟ้าแบบเปิดวงจร	62
4.3.2 การทดลองการส่งคลื่นเดินทางผ่านทางสายส่งโดยไม่มีโหลดทางไฟฟ้าแบบปิดวงจร	65
4.3.3 การทดลองการส่งคลื่นเดินทางผ่านทางสายส่งโดยมีโหลดทางไฟฟ้า	67
4.3.3.1 การทดลองการส่งคลื่นเดินทางผ่านทางสายส่งโดยเชื่อมต่อกับตัวต้านทานขนาด 1.42 Ω	74
4.3.4 การทดลองการส่งคลื่นเดินทางผ่านทางสายส่งโดยเชื่อมต่อเข้ากับแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด	76
4.3.4.1 การทดลองการส่งคลื่นเดินทางผ่านทางสายส่งโดยเชื่อมต่อเข้ากับแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด แบบต่อแบตเตอรี่ 1 ลูก	76
4.3.4.2 การทดลองการส่งคลื่นเดินทางผ่านทางสายส่งโดยเชื่อมต่อเข้ากับแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด แบบต่ออนุกรมกัน 2 ลูก และ 3 ลูก	78
4.3.4.3 การทดลองการส่งคลื่นเดินทางผ่านทางสายส่งโดยเชื่อมต่อเข้ากับแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด แบบต่ออนุกรมกัน 2 ลูก และเพิ่มระยะสายส่งระหว่างแบตเตอรี่	81
4.3.4.4 การทดลองการส่งคลื่นเดินทางผ่านทางสายส่งโดยเชื่อมต่อเข้ากับแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด แบบต่ออนุกรมกัน 2 ลูก และต่อโหลดตัวต้านทาน	83
4.3.4.5 การทดลองการส่งคลื่นเดินทางผ่านทางสายส่งโดยเชื่อมต่อเข้ากับแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด แบบต่อแบตเตอรี่ 2 ลูก และต่อโหลดตัวต้านทานขนาดใกล้เคียงกับ R_0 ของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด	87
4.3.5 การทดลองการส่งคลื่นเดินทางผ่านทางสายส่งโดยเชื่อมต่อเข้ากับแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด แบบต่ออนุกรมกัน 2 ลูก โดยมีแบตเตอรี่ที่เสื่อมสมรรถนะ จำนวน 1 ลูก	92

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3.6 การทดลองการส่งคลื่นเดินทางผ่านทางสายส่งโดยเชื่อมต่อเข้ากับแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด แบบต่ออนุกรมกัน 3 ลูก โดยมีแบตเตอรี่ ที่เสื่อมสมรรถนะ	95
4.3.7 การทดลองการส่งคลื่นเดินทางผ่านทางสายส่งโดยเชื่อมต่อเข้ากับแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด แบบต่ออนุกรมกัน 3 ลูก และทำการสลับตำแหน่งแบตเตอรี่	97
4.6 สรุป	101
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ	102
5.1 สรุปผลการทดลอง	102
5.2 ข้อเสนอแนะ	103
5.3 แนวทางการพัฒนาต่อยอดงานวิจัย	103
เอกสารอ้างอิง	104
ภาคผนวก	107
ภาคผนวก ก เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ	108
ภาคผนวก ข เทคนิควิธีการวิเคราะห์ค่าอิมพีแดนซ์ของโหลดทางไฟฟ้า	117
ภาคผนวก ค บทความทางวิชาการ	121
ประวัติผู้เขียน	126

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ภาพแสดงตัวอย่างการแจกจ่ายพลังงานไฟฟ้าจากผู้ผลิตแก่ผู้บริโภค	1
1.2 ระบบการแจกจ่ายพลังงานไฟฟ้า	2
1.3 ระบบควบคุมและรักษาความปลอดภัยภายในสถานีไฟฟ้าย่อย	2
1.4 การเกิดการระเบิดขึ้นภายในสถานีไฟฟ้าย่อย	3
1.5 ระบบสำรองพลังงานไฟฟ้าในสถานีไฟฟ้าย่อยโดยใช้แบตเตอรี่	4
2.1 โครงสร้างของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด	10
2.2 โครงแผ่นธาตุ	11
2.3 แผ่นกั้นเมื่อใช้ร่วมกันระหว่าง แผ่นกั้นและโครงแผ่นธาตุ	12
2.4 Valve Regulated Lead-Acid Battery (VRLA)	13
2.5 Gelled Battery	14
2.6 Absorbed Glass Mat Battery	14
2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิภายในแบตเตอรี่และอายุการใช้งานของแบตเตอรี่	16
2.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานภายในแบตเตอรี่และเวลาในการคายประจุไฟฟ้าที่ค่ากระแสต่างกัน	17
2.9 วงจรสมมูลของแบตเตอรี่	18
2.10 ระบบจัดการแบตเตอรี่ในปัจจุบัน	22
2.11 วงจรสมมูลของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด	23
2.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและเวลาสำหรับแบตเตอรี่ 12 V	24
2.13 รูปแสดงภายในของแบตเตอรี่ ในกรณีที่แบตเตอรี่ยังไม่เกิดการซัลเฟชั่นและกรณีที่เกิดการซัลเฟชั่น	
2.14 การสะท้อนของคลื่นเคลื่อนที่	28
2.15 วงจรสมมูลของสายส่ง	28
2.16 วงจรสมมูลอย่างง่ายของสายส่ง	28
2.17 วงจรของเครื่องส่งสัญญาณเชื่อมต่อโหลดที่มีอิมพีแดนซ์เท่ากับอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ	31
2.18 กราฟการสะท้อนของสัญญาณ เมื่อเครื่องส่งสัญญาณเชื่อมต่อโหลดที่มีอิมพีแดนซ์เท่ากับอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ	31
2.19 วงจรของเครื่องส่งสัญญาณเชื่อมต่อกับสายส่งที่ปิดวงจรไว้	32
2.20 กราฟการสะท้อนของสัญญาณ เมื่อเครื่องส่งสัญญาณเชื่อมต่อกับสายส่งที่ปิดวงจรไว้	32
2.21 วงจรของเครื่องส่งสัญญาณเชื่อมต่อกับสายส่งที่เปิดวงจรไว้	33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

2.22 กราฟการสะท้อนของสัญญาณ เมื่อเครื่องส่งสัญญาณเชื่อมต่อกับสายส่งที่เปิดวงจรไว้ 33
2.23 วงจรของเครื่องส่งสัญญาณเชื่อมต่อโหลดที่มีอิมพีแดนซ์คุณลักษณะมีค่ามากกว่าค่าอิมพีแดนซ์ของโหลด 34
2.24 กราฟการสะท้อนของสัญญาณ เมื่ออิมพีแดนซ์คุณลักษณะมีค่ามากกว่าค่าอิมพีแดนซ์ของโหลด 34
2.25 วงจรของเครื่องส่งสัญญาณเชื่อมต่อโหลดที่มีอิมพีแดนซ์คุณลักษณะมีค่าน้อยกว่าค่าอิมพีแดนซ์ของโหลด 35
2.26 กราฟการสะท้อนของสัญญาณ เมื่ออิมพีแดนซ์คุณลักษณะมีค่าน้อยกว่าค่าอิมพีแดนซ์ของโหลด 35
2.27 วงจรของเครื่องส่งสัญญาณเชื่อมต่อโหลดที่เป็นลักษณะของตัวเหนี่ยวนำ (L) และตัวต้านทาน (R) ต่ออนุกรมกัน 36
2.28 กราฟการสะท้อนของสัญญาณ เมื่อเชื่อมต่อโหลดที่เป็นลักษณะของตัวเหนี่ยวนำ (L) และตัวต้านทาน (R) ต่ออนุกรมกัน 36
2.29 วงจรของเครื่องส่งสัญญาณเชื่อมต่อโหลดที่เป็นลักษณะของตัวเก็บประจุ (C) และตัวต้านทาน (R) ต่ออนุกรมกัน 37
2.30 กราฟการสะท้อนของสัญญาณ เมื่อเชื่อมต่อโหลดที่เป็นลักษณะของตัวเก็บประจุ (C) และตัวต้านทาน (R) ต่ออนุกรมกัน 37
2.31 วงจรของเครื่องส่งสัญญาณเชื่อมต่อโหลดที่เป็นลักษณะของตัวเก็บประจุ (C) และตัวต้านทาน (R) ต่ออนุกรมกัน 38
2.32 กราฟการสะท้อนของสัญญาณ เมื่อเชื่อมต่อโหลดที่เป็นลักษณะของตัวเก็บประจุ (C) และตัวต้านทาน (R) ต่ออนุกรมกัน 38
2.33 ระบบการส่งและสื่อสารข้อมูลตามมาตรฐาน IEC61850 40
2.34 รูปแบบ GUI ของ INMS Manager 42
2.35 รูปแบบ GUI ของ INMS Agent 43
2.36 กลไกการส่งข้อมูลของ IEC61850 44
2.37 ตัวอย่างภาษา SCL 45
2.38 เมสเซจ GOOSE 46
3.1 Data Sheet ของแบตเตอรี่ Discover 2VRE-800TG ส่วนที่ 1 49
3.2 Data Sheet ของแบตเตอรี่ Discover 2VRE-800TG ส่วนที่ 2 50
3.3 แบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด Discover 2VRE-800TG ที่ใช้ในการทดลอง 51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

3.4 การหาวงจรสมมูลของแบตเตอรี่โดยวิธีการวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงเวลา 51

3.5 การหาวงจรสมมูลของแบตเตอรี่โดยวิธีการวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงเวลา 52

3.6 วงจรที่ใช้ในการทดสอบคลื่นเดินทาง 53

3.7 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบคลื่นเดินทาง 54

4.1 กราฟแรงดันในขณะทำการอัดประจุ 56

4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและเวลาสำหรับแบตเตอรี่ 12 V 57

4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและเวลาสำหรับแบตเตอรี่ 2 V ลูกที่ 1 58

4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและเวลาสำหรับแบตเตอรี่ 2 V ลูกที่ 2 58

4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและเวลาสำหรับแบตเตอรี่ 2 V ลูกที่ 3 59

4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและเวลาสำหรับแบตเตอรี่ 2 V ลูกที่ 4 59

4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและเวลาสำหรับแบตเตอรี่ 2 V ลูกที่ 5 60

4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและเวลาสำหรับแบตเตอรี่ 2 V ลูกที่ 6 60

4.9 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางเมื่อวัดที่จุดกำเนิดคลื่นเดินทางโดยใช้คลื่นเดินทางที่มีความถี่ขนาด 200 kHz แบบเปิดวงจร 63

4.10 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางเมื่อวัดที่จุดกำเนิดคลื่นเดินทางโดยใช้คลื่นเดินทางที่มีความถี่ขนาด 300 kHz แบบเปิดวงจร 63

4.11 การเปรียบเทียบสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางที่มีขนาดความถี่ 200 kHz และ 300 kHz แบบเปิดวงจร 64

4.12 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางเมื่อวัดที่จุดกำเนิดคลื่นเดินทาง โดยใช้คลื่นเดินทางที่มีความถี่ขนาด 200 kHz แบบปิดวงจร 65

4.13 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางเมื่อวัดที่จุดกำเนิดคลื่นเดินทาง โดยใช้คลื่นเดินทางที่มีความถี่ขนาด 300 kHz แบบปิดวงจร 66

4.14 การเปรียบเทียบสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางที่มีขนาดความถี่ 200 kHz และ 300 kHz แบบปิดวงจร 66

4.15 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางเมื่อวัดที่จุดกำเนิดคลื่นเดินทาง โดยใช้คลื่นเดินทางที่มีความถี่ขนาด 200 kHz แบบต่อตัวต้านทานขนาด 1.42 Ω 68

4.16 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางเมื่อวัดที่จุดกำเนิดคลื่นเดินทาง โดยใช้คลื่นเดินทางที่มีความถี่ขนาด 300 kHz แบบต่อตัวต้านทานขนาด 1.42 Ω 68

4.17 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางเมื่อวัดที่จุดกำเนิดคลื่นเดินทาง โดยใช้คลื่นเดินทางที่มีความถี่ขนาด 200 kHz แบบต่อตัวต้านทานขนาด 120 Ω 69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.18 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางเมื่อวัดที่จุดกำเนิดคลื่นเดินทาง โดยใช้คลื่นเดินทางที่มีความถี่ขนาด 300 kHz แบบต่อตัวต้านทานขนาด 120 Ω 69

4.19 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางเมื่อวัดที่จุดกำเนิดคลื่นเดินทาง โดยใช้คลื่นเดินทางที่มีความถี่ขนาด 200 kHz แบบต่อตัวต้านทานขนาด 75 Ω 70

4.20 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางเมื่อวัดที่จุดกำเนิดคลื่นเดินทาง โดยใช้คลื่นเดินทางที่มีความถี่ขนาด 300 kHz แบบต่อตัวต้านทานขนาด 75 Ω 70

4.21 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางเมื่อวัดที่จุดกำเนิดคลื่นเดินทาง โดยใช้คลื่นเดินทางที่มีความถี่ขนาด 200 kHz แบบต่อตัวต้านทานขนาด 200 Ω 71

4.22 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางเมื่อวัดที่จุดกำเนิดคลื่นเดินทาง โดยใช้คลื่นเดินทางที่มีความถี่ขนาด 300 kHz แบบต่อตัวต้านทานขนาด 200 Ω 71

4.23 การเปรียบเทียบสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางที่มีขนาดความถี่ 200 kHz แบบต่อตัวต้านทานขนาด 1.42 Ω, 75 Ω, 120 Ω และ 200 Ω 72

4.24 การเปรียบเทียบสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางที่มีขนาดความถี่ 300 kHz แบบต่อตัวต้านทานขนาด 1.42 Ω, 75 Ω, 120 Ω และ 200 Ω 72

4.25 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางเมื่อวัดที่จุดกำเนิดคลื่นเดินทาง โดยใช้คลื่นเดินทางที่มีความถี่ขนาด 20 kHz แบบต่อตัวต้านทานขนาด 1.42 Ω 75

4.26 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางเมื่อวัดที่จุดกำเนิดคลื่นเดินทาง โดยใช้คลื่นเดินทางที่มีความถี่ขนาด 200 kHz แบบต่อแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดจำนวน 1 ลูก 76

4.27 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางเมื่อวัดที่จุดกำเนิดคลื่นเดินทาง โดยใช้คลื่นเดินทางที่มีความถี่ขนาด 100 kHz แบบต่อแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดจำนวน 1 ลูก 77

4.28 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางเมื่อวัดที่จุดกำเนิดคลื่นเดินทาง โดยใช้คลื่นเดินทางที่มีความถี่ขนาด 20 kHz แบบต่อแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดจำนวน 1 ลูก 77

4.29 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางเมื่อวัดที่จุดกำเนิดคลื่นเดินทาง โดยใช้คลื่นเดินทางที่มีความถี่ขนาด 200 kHz แบบต่อแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดจำนวน 2 ลูก 79

4.30 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางเมื่อวัดที่จุดกำเนิดคลื่นเดินทาง โดยใช้คลื่นเดินทางที่มีความถี่ขนาด 200 kHz แบบต่อแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดจำนวน 3 ลูก 79

4.31 การเปรียบเทียบสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางที่มีขนาดความถี่ 20 kHz แบบต่อแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด จำนวน 2 และ 3 ลูก 80

4.32 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางเมื่อวัดที่จุดกำเนิดคลื่นเดินทาง โดยใช้คลื่นเดินทางที่มีความถี่ขนาด 20 kHz แบบต่อแบตเตอรี่ จำนวน 2 ลูก และเพิ่มระยะสายส่งระหว่างแบตเตอรี่ 82

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.33 การเปรียบเทียบสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางที่มีขนาดความถี่ 20 kHz แบบต่อแบตเตอรี่ จำนวน 2 ลูก และกรณีต่อสายส่งขนาด 19 m ระหว่างแบตเตอรี่ 82

4.34 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางเมื่อวัดที่จุดกำเนิดคลื่นเดินทาง โดยใช้คลื่นเดินทางที่มีความถี่ขนาด 20 kHz แบบต่อแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด จำนวน 2 ลูก และต่อตัวต้านทานขนาด 1.42 Ω 84

4.35 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางเมื่อวัดที่จุดกำเนิดคลื่นเดินทาง โดยใช้คลื่นเดินทางที่มีความถี่ขนาด 20 kHz แบบต่อแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด จำนวน 2 ลูก และต่อตัวต้านทานขนาด 75 Ω 85

4.36 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางเมื่อวัดที่จุดกำเนิดคลื่นเดินทาง โดยใช้คลื่นเดินทางที่มีความถี่ขนาด 20 kHz แบบต่อแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด จำนวน 2 ลูก และต่อตัวต้านทานขนาด 200 Ω 85

4.37 การเปรียบเทียบสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางที่มีขนาดความถี่ 20 kHz และ 300kHz แบบต่อแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด จำนวน 2 ลูก และตัวต้านทานขนาด 1.42 Ω, 75 Ω และ 200 Ω 86

4.38 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางเมื่อวัดที่จุดกำเนิดคลื่นเดินทาง โดยใช้คลื่นเดินทางที่มีความถี่ขนาด 20 kHz แบบต่อแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดจำนวน 2 ลูก และตัวต้านทาน 10 mΩ 88

4.39 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางเมื่อวัดที่จุดกำเนิดคลื่นเดินทาง โดยใช้คลื่นเดินทางที่มีความถี่ขนาด 20 kHz แบบต่อแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดจำนวน 2 ลูก และตัวต้านทาน 5 mΩ 88

4.40 การเปรียบเทียบสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางที่มีขนาดความถี่ 20 kHz แบบต่อแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด จำนวน 2 ลูก และต่อตัวต้านทานขนาด 5 mΩ และ 10mΩ มาเปรียบเทียบกัน 89

4.41 การเปรียบเทียบสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางที่มีขนาดความถี่ 20 kHz แบบต่อแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด จำนวน 2 ลูก แบบต่อแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด จำนวน 2 ลูก และต่อตัวต้านทานขนาด 5 mΩ และ 10 mΩ มาเปรียบเทียบกัน 90

4.42 การเปรียบเทียบสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางที่มีขนาดความถี่ 20 kHz แบบต่อแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด จำนวน 2 ลูก และต่อตัวต้านทานขนาด 5 mΩ และ 10 mΩ มาเปรียบเทียบกัน แบบขยายช่วงที่ทำการวิเคราะห์แรงดันไฟฟ้า 91

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.43 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางเมื่อวัดที่จุดกำเนิดคลื่นเดินทาง โดยใช้คลื่นเดินทางที่มีความถี่ขนาด 20 kHz แบบต่อแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดจำนวน 2 ลูก โดยไม่มีแบตเตอรี่เสื่อมสภาพ 92

4.44 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางเมื่อวัดที่จุดกำเนิดคลื่นเดินทาง โดยใช้คลื่นเดินทางที่มีความถี่ขนาด 20 kHz แบบต่อแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด จำนวน 2 ลูก โดยมีแบตเตอรี่เสื่อมสมรรถนะเนื่องจากการอัดประจุเกิน 93

4.45 การเปรียบเทียบสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางที่มีขนาดความถี่ 20 kHz แบบต่อแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด จำนวน 2 ลูก แบบไม่มีแบตเตอรี่ที่เสื่อมสภาพ และแบบมีแบตเตอรี่ที่เสื่อมสมรรถนะเนื่องจากการอัดประจุเกิน 94

4.46 การเปรียบเทียบสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางเมื่อวัดที่จุดกำเนิดคลื่นเดินทางโดยใช้คลื่นเดินทางที่มีความถี่ขนาด 20 kHz แบบต่อแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด จำนวน 3 ลูก โดยไม่มีแบตเตอรี่ที่เสื่อมสภาพ, แบตเตอรี่ที่เสื่อมสภาพ 1 ลูก และ 2 ลูก ตามลำดับ 96

4.47 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางเมื่อวัดที่จุดกำเนิดคลื่นเดินทาง โดยใช้คลื่นเดินทางที่มีความถี่ขนาด 20 kHz แบบต่อแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด จำนวน 3 ลูก ลำดับแบบ 124 98

4.48 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางเมื่อวัดที่จุดกำเนิดคลื่นเดินทาง โดยใช้คลื่นเดินทางที่มีความถี่ขนาด 20 kHz แบบต่อแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด จำนวน 3 ลูก ลำดับแบบ 142 98

4.49 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางเมื่อวัดที่จุดกำเนิดคลื่นเดินทาง โดยใช้คลื่นเดินทางที่มีความถี่ขนาด 20 kHz แบบต่อแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด จำนวน 3 ลูก ลำดับแบบ 214 99

4.50 การเปรียบเทียบสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางที่มีขนาดความถี่ 20 kHz แบบต่อแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด จำนวน 3 ลูก และแบบต่อแบตเตอรี่ลำดับแบบ 124, 142 และ 214 99

ข.1 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางเมื่อวัดที่จุดกำเนิดคลื่นเดินทาง โดยใช้คลื่นเดินทางที่มีความถี่ขนาด 200 kHz แบบต่อตัวต้านทานขนาด 200 Ω 118

ข.2 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางเมื่อวัดที่จุดกำเนิดคลื่นเดินทาง โดยใช้คลื่นเดินทางที่มีความถี่ขนาด 200 kHz แบบต่อตัวต้านทานขนาด 75 Ω 119

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แผนการดำเนินงาน	7
2.1 ขนาดความจุของแบตเตอรี่ (Ampere Hour) กับค่าความต้านทานภายใน	20
2.2 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และคุณสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุแต่ละชนิด	27
4.1 แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของแบตเตอรี่ กระแสไฟฟ้าที่อัดประจุเข้าแบตเตอรี่ รวมถึงค่าพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด ที่มีแรงดันไฟฟ้า 2 V ทั้ง 6 ลูก	61
4.2 สมรรถนะของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด ที่มีแรงดันไฟฟ้า 2 V ทั้ง 6 ลูก	
4.3 ความเร็วของคลื่นเดินทางภายในสายส่ง ระยะเวลาที่ใช้ในการเดินทาง และจุดกำเนิดข้อผิดพลาดภายในสายส่ง แบบเปิดวงจร	64
4.4 ความเร็วของคลื่นเดินทางภายในสายส่ง ระยะเวลาที่ใช้ในการเดินทาง และจุดกำเนิดข้อผิดพลาดภายในสายส่ง แบบปิดวงจร	67
4.5 ความเร็วของคลื่นเดินทางภายในสายส่ง ระยะเวลาที่ใช้ในการเดินทาง และจุดกำเนิดข้อผิดพลาดภายในสายส่ง แบบต่อตัวต้านทานขนาด 1.42 Ω, 75 Ω, 120 Ω และ 200 Ω	73
4.6 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแรงดัน แรงดันของโหลดอิมพีแดนซ์ แรงดันของเครื่องส่งคลื่นเดินทาง อิมพีแดนซ์ของโหลด และอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายส่งและเครื่องส่งสัญญาณ กรณีตัวต้านทาน 1.42 Ω, 75 Ω, 120 Ω และ 200 Ω โดยใช้คลื่นความถี่ 200 kHz	73
4.7 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแรงดัน แรงดันของโหลดอิมพีแดนซ์ แรงดันของเครื่องส่งคลื่นเดินทาง อิมพีแดนซ์ของโหลด และอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายส่งและเครื่องส่งสัญญาณ กรณีตัวต้านทาน 1.42 Ω, 75 Ω, 120 Ω, และ 200 Ω โดยใช้คลื่นความถี่ 300 kHz	74
4.8 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแรงดัน แรงดันของโหลดอิมพีแดนซ์ แรงดันของเครื่องส่งคลื่นเดินทาง อิมพีแดนซ์ของโหลด และอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายส่งและเครื่องส่งสัญญาณ กรณีตัวต้านทาน 1.42 Ω โดยใช้คลื่นความถี่ 20 kHz	75
4.9 ความเร็วของคลื่นเดินทางภายในสายส่ง ระยะเวลาที่ใช้ในการเดินทางและจุดกำเนิดข้อผิดพลาดภายในสายส่ง แบบเชื่อมต่อแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด จำนวน 2 ลูก	78
4.10 ความเร็วของคลื่นเดินทางภายในสายส่ง ระยะเวลาที่ใช้ในการเดินทางและจุดกำเนิดข้อผิดพลาดภายในสายส่ง แบบเชื่อมต่อแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด จำนวน 2 ลูก และ 3 ลูก	80
4.11 ความเร็วของคลื่นเดินทางภายในสายส่ง ระยะเวลาที่ใช้ในการเดินทางและจุดกำเนิดข้อผิดพลาดภายในสายส่ง แบบเชื่อมต่อแบตเตอรี่ 2 ลูก และต่อสายส่งระหว่างแบตเตอรี่	83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.12 ความเร็วของคลื่นเดินทางภายในสายส่ง ระยะเวลาที่ใช้ในการเดินทาง และจุดกำเนิดข้อผิดพลาดภายในสายส่ง แบบต่อตัวต้านทานขนาด 1.42 Ω, 75 Ω และ 200 Ω	86
4.13 แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย ช่วงเวลาที่ทำการวิเคราะห์ ความเร็วของคลื่นเดินทางและตำแหน่งกำเนิดความผิดพลาด กรณีแบตเตอรี่ 2 ลูก และแบบเชื่อมต่อตัวต้านทาน 5 mΩ และ 10 mΩ	91
4.14 ความเร็วของคลื่นเดินทางภายในสายส่ง ระยะเวลาที่ใช้ในการเดินทาง และจุดกำเนิดข้อผิดพลาดภายในสายส่ง แบบเชื่อมต่อแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด จำนวน 2 ลูก แบบมีและไม่มีแบตเตอรี่ที่เสื่อมสภาพ	95
4.15 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เมื่อเชื่อมต่อแบตเตอรี่ จำนวน 3 ลูก แบบไม่มีแบตเตอรี่ที่เสื่อมสภาพ และแบบมีแบตเตอรี่ที่เสื่อมสภาพ จำนวน 1 ลูก และ 2 ลูก ตามลำดับ	97
4.16 ความเร็วของคลื่นเดินทางภายในสายส่ง ระยะเวลาที่ใช้ในการเดินทาง และจุดกำเนิดข้อผิดพลาดภายในสายส่ง แบบต่อแบตเตอรี่จำนวน 3 ลูก ลำดับแบบ 124, 142 และ 214	100

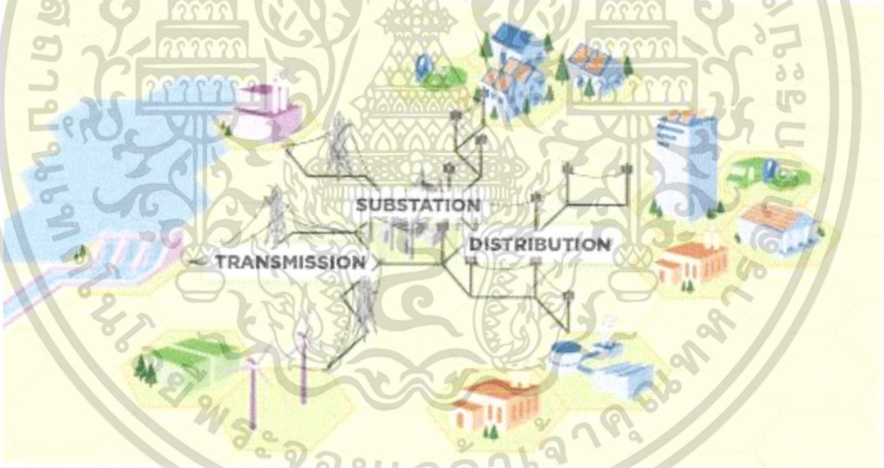
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ปัจจุบันพลังงานไฟฟ้ามีบทบาทสำคัญในการดำเนินชีวิตประจำวันของคนทั่วไปและมีส่วนสำคัญในการขับเคลื่อนระบบเศรษฐกิจของประเทศ การขยายตัวของประชากร การเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจและอุตสาหกรรมให้เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทำให้ความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าเติบโตเพิ่มขึ้น และในอนาคตปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องอันเนื่องจากการพัฒนาเศรษฐกิจและประเทศชาติ ดังรูปที่ 1.1 ดังนั้นเพื่อที่จะสามารถรองรับปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น จำเป็นจะต้องมีการขยายฐานการผลิตพลังงานไฟฟ้าให้มากขึ้น อันเนื่องจากการขยายฐานการผลิตพลังงานไฟฟ้าที่มากขึ้นจึงต้องมีการก่อตั้งสถานีไฟฟ้าย่อยเพื่อที่จะรองรับปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่มากขึ้น และสามารถกระจายพลังงานไฟฟ้าเพื่อรองรับความต้องการของประชากรทั่วไป อุตสาหกรรมและรวมถึงพื้นที่ที่ห่างไกลได้อย่างทั่วถึง

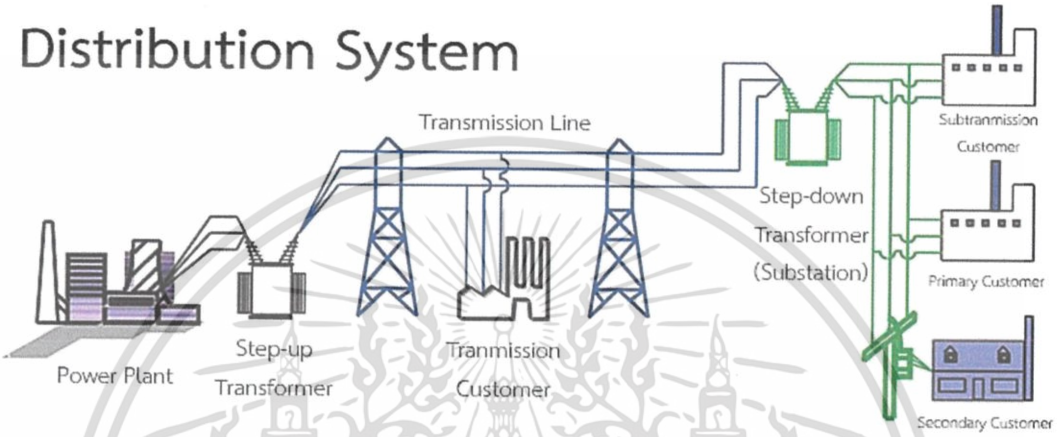


รูปที่ 1.1 ภาพแสดงตัวอย่างการแจกจ่ายพลังงานไฟฟ้าจากผู้ผลิตแก่ผู้บริโภค

สถานีไฟฟ้าย่อยมีหน้าที่ในการรับพลังงานไฟฟ้าแรงสูงจากผู้ผลิตไฟฟ้า ไม่ว่าจะเป็นหน่วยงานของรัฐบาล รวมถึงหน่วยงานภาคเอกชนเพื่อที่จะลดระดับแรงดันไฟฟ้าให้เหมาะสมกับการแจกจ่ายให้แก่ผู้บริโภค ดังรูปที่ 1.2 เนื่องจากอุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ ที่ใช้ตามบ้านเรือนและอุตสาหกรรมนั้น จะมีระดับแรงดันไฟฟ้าที่เป็นมาตรฐานอยู่ ดังนั้นผู้ผลิตพลังงานไฟฟ้าไม่ว่าจะหน่วยงานของรัฐบาล และหน่วยงานภาคเอกชน จะไม่สามารถแจกจ่ายพลังงานไฟฟ้าแรงดันสูงให้แก่ผู้บริโภคได้โดยตรง เพราะพลังงานไฟฟ้าแรงดันสูงจะสามารถก่อให้เกิดความเสียหายแก่อุปกรณ์ไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อีกทั้งยังอาจก่อให้เกิดอันตรายแก่ผู้บริโภคได้ เพราะฉะนั้นสถานีไฟฟ้าย่อยจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งในแจกจ่ายพลังงานไฟฟ้าที่ให้แก่ผู้บริโภค ในระดับมาตรฐานที่ไม่ก่อให้เกิดความเสียหายแก่อุปกรณ์ไฟฟ้าและลดระดับความอันตรายแก่ผู้บริโภคลง เนื่องมาจากสถานีไฟฟ้าย่อยมีความเกี่ยวข้องกับระบบไฟฟ้าอย่างมาก ดังนั้นจึงจะเป็นต้องมีมาตรฐานความปลอดภัยที่เกี่ยวข้องกับอุปกรณ์ไฟฟ้า เจ้าหน้าที่ และประชาชนทั่วไป สำหรับภายในสถานีไฟฟ้าย่อยและภายนอกสถานีไฟฟ้าย่อย



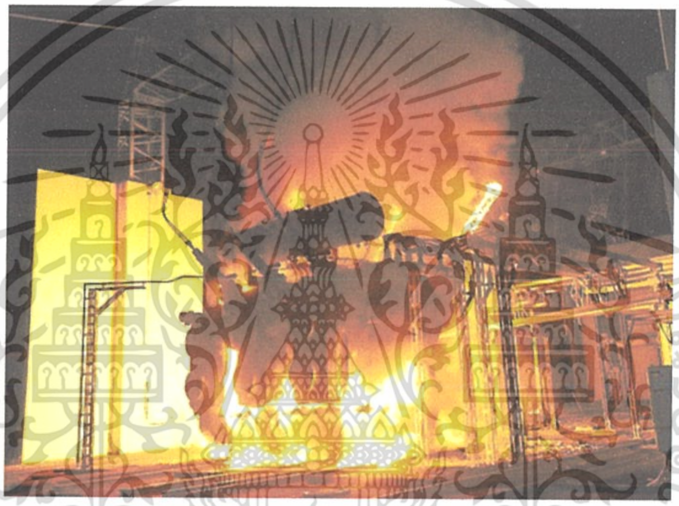
รูปที่ 1.2 ระบบการแจกจ่ายพลังงานไฟฟ้า

สถานีไฟฟ้าย่อยเกี่ยวข้องกับระบบทางไฟฟ้า และประชาชนดังนั้นจึงต้องมีมาตรฐานความปลอดภัยในทุก ๆ ส่วน ดังรูปที่ 1.3 ถ้าหากสถานีไฟฟ้าย่อยเกิดเหตุผิดปกติขึ้นภายในระบบไฟฟ้า สถานีไฟฟ้าย่อยจำเป็นที่จะต้องสามารถคงรักษาระบบรักษาความปลอดภัยเอาไว้ให้ได้ ดังนั้นแบตเตอรี่จึงเข้ามามีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งในการกักเก็บพลังงานไฟฟ้าสำรองไว้ใช้ในกรณีที่สถานีไฟฟ้าย่อยไม่สามารถใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบหลักได้ เพื่อที่จะคงรักษาระบบความปลอดภัยเอาไว้

รูปที่ 1.3 ระบบควบคุมและรักษาความปลอดภัยภายในสถานีไฟฟ้าย่อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภายในสถานีไฟฟ้าย่อย แบตเตอรี่นับเป็นส่วนหนึ่งของระบบความปลอดภัย เมื่อเกิดเหตุระบบไฟฟ้าขัดข้องและสถานีไฟฟ้าย่อยไม่สามารถรับพลังงานไฟฟ้าจากระบบจ่ายไฟฟ้าหลักได้ แบตเตอรี่จะทำหน้าที่เป็นแหล่งพลังงานไฟฟ้าสำรองเพื่อที่จะแจกจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้แก่อุปกรณ์รักษาความปลอดภัยที่ต้องการพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง อาทิ รีเลย์ อุปกรณ์สื่อสาร เมื่อเกิดเหตุผิดปกติขึ้นในระบบไฟฟ้าเช่น การเกิดการลัดวงจรในระบบไฟฟ้า และรีเลย์ไม่สามารถรับรู้ได้ว่าเกิดการลัดวงจรขึ้นในระบบไฟฟ้าเนื่องจากไม่มีพลังงานไฟฟ้าในการขับเคลื่อนการทำงาน ดังนั้นรีเลย์จะไม่สามารถสั่งปลดวงจรไฟฟ้าที่เกิดความผิดปกติขึ้นได้ จึงอาจก่อให้เกิดความเสียหายอย่างรุนแรงเช่น การระเบิด แก่สถานีไฟฟ้าย่อยรวมถึงอาณาเขตบริเวณรอบ ๆ ด้วย ดังรูปที่ 1.4



รูปที่ 1.4 การเกิดการระเบิดขึ้นภายในสถานีไฟฟ้าย่อย

ดังนั้นจึงต้องมั่นใจได้ว่า แบตเตอรี่ที่ใช้สำหรับสำรองพลังงานไฟฟ้านั้นมีประสิทธิภาพและสามารถพร้อมใช้งานได้อยู่ตลอดเวลาอีกด้วย แบตเตอรี่จึงจำเป็นที่จะต้องได้รับการตรวจสอบสมรรถนะและสภาพของแบตเตอรี่อยู่เป็นประจำ เนื่องจากผู้ตรวจสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่นั้น เป็นเจ้าหน้าที่ภายในสถานีไฟฟ้าย่อย ไม่สามารถทำงานได้ตลอดเวลา ดังนั้นระบบตรวจสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่จึงมีบทบาทสำคัญในการช่วยตรวจสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่เป็นอย่างมาก เนื่องจากระบบตรวจสอบสรรถนะของแบตเตอรี่สามารถลดระยะเวลาในการตรวจสอบของเจ้าหน้าที่ได้ และสามารถอำนวยความสะดวกแก่เจ้าหน้าที่ เพื่อที่เจ้าหน้าที่จะสามารถทำงานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 1.5 ระบบสำรองพลังงานไฟฟ้าในสถานีไฟฟ้าย่อยโดยใช้แบตเตอรี่

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน

1. เพื่อศึกษาหาวงจรสมมูลของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดและสามารถหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในวงจรสมมูลได้
2. เพื่อศึกษาและพัฒนาเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบสถานะต่าง ๆ ของแบตเตอรี่ โดยแสดงข้อมูลผ่านทางหน้าจอแสดงผล
3. เพื่อศึกษาและพัฒนาเครื่องมือที่มีคุณสมบัติในการตรวจสอบคุณภาพของแบตเตอรี่ ซึ่งสามารถตรวจสอบความเสื่อมสภาพของแบตเตอรี่ลูกที่เสื่อมสภาพ
4. เพื่อลดความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับแบตเตอรี่ข้างเคียง เนื่องมาจากการเสื่อมสภาพของแบตเตอรี่ชุดใดชุดหนึ่ง และลดการกำจัดและทำลายแบตเตอรี่เพื่อรักษาสภาพแวดล้อม
5. เพื่อป้องกันความเสียหายต่ออุปกรณ์ซอฟแวร์และฮาร์ดแวร์ของระบบเมื่อใช้แบตเตอรี่ร่วมกับระบบจัดเก็บพลังงานไฟฟ้า ซึ่งสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงได้ และเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบไฟฟ้า

1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงงาน

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาเพื่อบ่งบอกแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดที่เสื่อมสมรรถนะภายในระบบสำรองพลังงานไฟฟ้าภายในสถานีไฟฟ้าย่อย เพื่อสามารถป้องกันการเกิดอุบัติเหตุที่อาจก่อให้เกิดความเสียหายแก่สถานีไฟฟ้าย่อยและอาณาเขตข้างเคียง เนื่องจากภายในสถานีไฟฟ้าย่อยมีการนำแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดไปใช้ในระบบเก็บสะสมพลังงานเพื่อสำรองพลังงานไฟฟ้าไว้ใช้สำหรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีที่มีเหตุผิดปกติขึ้นในระบบไฟฟ้า และสถานีไฟฟ้าย่อยไม่สามารถรับพลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าหลักได้ โดยจะแจกจ่ายพลังงานไฟฟ้าสำรองให้แก่ระบบรักษาความปลอดภัยและระบบสื่อสารภายในสถานีไฟฟ้าย่อย นอกจากนั้นยังสามารถป้องกันการเสื่อมสมรรถนะของแบตเตอรี่เมื่อนำแบตเตอรี่ใบอื่น ๆ มาเชื่อมต่อกันเพื่อสำรองพลังงานไฟฟ้าได้ โดยการศึกษาคุณสมบัติและวงจรสมมูลของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด การตรวจสอบหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในวงจรสมมูล นำไปสู่การออกแบบและสร้างเครื่องอัดประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่ซึ่งสามารถตรวจสอบคุณภาพของแบตเตอรี่โดยสามารถตรวจสอบแบตเตอรี่ที่เสื่อมสภาพและทำการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ภายในวงจรสมมูลของแบตเตอรี่ได้อย่างเหมาะสม หากระบบตรวจสอบแบตเตอรี่ตรวจพบแบตเตอรี่ที่มีค่าพารามิเตอร์ที่ถูกจัดว่าเป็นแบตเตอรี่ที่เสื่อมสภาพก็จะสามารถทำการเปลี่ยนแบตเตอรี่ตัวนั้นได้ เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้นแก่แบตเตอรี่ตัวอื่น ๆ ในชุดนั้นหากมีการใช้งานแบตเตอรี่ตัวที่เสื่อมสภาพร่วมกันต่อไป

1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงงาน

1. ศึกษาความรู้เกี่ยวกับคุณสมบัติของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด วงจรสมมูลของแบตเตอรี่ที่ใช้ในการทำโครงงานรวมถึงวิธีการตรวจสอบและบ่งชี้แบตเตอรี่ที่เสื่อมสภาพ
2. จัดเตรียมเครื่องมือและอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย ตลอดจนการศึกษาวิธีการใช้งานเครื่องมือและอุปกรณ์ต่าง ๆ
3. ทดลองหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของวงจรสมมูลแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด ผ่านการทดลองในผลตอบสนองเชิงเวลา
4. นำผลที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์เพื่อหาแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดที่มีการเสื่อมสภาพ
5. ศึกษาความรู้เกี่ยวกับคุณสมบัติของคลื่นเดินทางที่ใช้สำหรับการบอกตำแหน่งที่เกิดความผิดพลาดในสายส่ง
6. ทดลองส่งคลื่นเดินทางเข้าภายในสายส่งและทำการวิเคราะห์ เพื่อทดลองความเป็นไปได้ของทฤษฎีเพื่อจะนำไปประยุกต์ใช้กับแบตเตอรี่
7. ทดลองส่งคลื่นเดินทางเข้าภายในแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดที่เชื่อมต่อกันแบบอนุกรมเพื่อบ่งบอกแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดที่มีการเสื่อมสภาพ
8. นำผลที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์เพื่อบ่งบอกความเป็นไปได้ที่จะมีแบตเตอรี่ที่เสื่อมสภาพ
9. รวบรวมข้อมูลการทดลองและจัดทำรูปเล่มปริญญานิพนธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 แผนการดำเนินโครงงาน

ทางผู้จัดทำได้ทำการศึกษาค้นคว้าข้อมูล และทำความเข้าใจในทฤษฎี ตลอดจนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องต่าง ๆ ทั้งภายในประเทศและต่างประเทศ พร้อมทั้งดำเนินงานในส่วนของการทดสอบและออกแบบ โดยมีระยะเวลาดำเนินการตั้งแต่ สิงหาคม 2559 ถึง เมษายน 2560 รวมเป็นเวลา 9 เดือน โดยมีแผนการดำเนินโครงงานดังนี้

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงาน

การดำเนินงาน	ภาคเรียนที่ 1					ภาคเรียนที่ 2			
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.
1. ศึกษาข้อมูลและคุณลักษณะของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด									
2. ศึกษาหาวงจรสมมูลของแบตเตอรี่ และกระบวนการหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ จากวงจรสมมูล									
3. ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการหาค่าพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่โดยผลตอบสนองเชิงเวลา									
4. ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในการหาระยะทางเพื่อบ่งชี้แบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดที่เสื่อมสภาพเมื่อนำมาใช้งานร่วมกัน									
5. ทำการทดลองหาค่าพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด ผ่านการทดลองผลตอบสนองเชิงเวลา									
6. ทำการทดลองส่งคลื่นเดินทางเข้าภายในสายส่งเพื่อหาความเป็นไปได้เพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับแบตเตอรี่									
7. ทำการทดลองส่งคลื่นเดินทางเข้าภายในแบตเตอรี่ที่ต่อกันแบบอนุกรมเพื่อบ่งบอกความเสื่อมสภาพของแบตเตอรี่									
8. บันทึกผลการทดลองและสรุปผลงานวิจัย									
9. จัดทำรูปเล่มปริญญานิพนธ์									

1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1. ใช้เป็นอุปกรณ์ช่วยในการศึกษาการทำงานและพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด

2. ใช้เป็นเครื่องมือในการตรวจสอบคุณภาพของแบตเตอรี่ ที่ทำให้มั่นใจได้ว่าแบตเตอรี่สามารถพร้อมใช้งานอย่างเต็มประสิทธิภาพในขณะที่จำเป็นต้องใช้งาน

3. โครงงานวิจัยนี้สามารถนำไปวิจัยเพิ่มเติมเพื่อให้ระบบมอนิเตอร์แบตเตอรี่สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

4. ลดความเสี่ยงและการสูญเสียที่อาจเกิดขึ้นในขณะที่จำเป็นต้องใช้งานแบตเตอรี่

5. เพื่อนำเข้าสู่กระบวนการเปลี่ยนหรือฟื้นฟูได้ทันเวลา เมื่อตรวจพบแบตเตอรี่ที่ใช้งานมีการเสื่อมสภาพ

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

บทนี้เป็นการรวมรวมข้อมูลของแบตเตอรี่แบบทุติยภูมิ โดยจะเน้นการศึกษาข้อมูลของแบตเตอรี่แบบทุติยภูมิชนิดตะกั่วกรด และยังได้มีการจำแนกวิธีการอัดประจุเข้าสู่แบตเตอรี่ในลักษณะต่าง ๆ การใช้งานแบตเตอรี่ให้เหมาะสม มาตรฐานการทดสอบสภาพแบตเตอรี่ และระบบจัดการแบตเตอรี่ (BMS) รวมถึงทฤษฎีเบื้องต้นของคลื่นเคลื่อนที่ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย นอกจากนี้ยังกล่าวถึงมาตรฐาน IEC61850 เป็นมาตรฐานการสื่อสารและระบบการจัดการที่เกี่ยวข้องอีกด้วย

2.2 ประเภทของแบตเตอรี่

แบตเตอรี่ (Battery) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บพลังงานไฟฟ้าเพื่อเอาไว้ใช้งาน เนื่องมาจากแบตเตอรี่มีขนาดและคุณสมบัติที่หลากหลายสามารถเลือกใช้ได้ตามคุณสมบัติที่ต้องการ นอกจากนี้แบตเตอรี่ยังเป็นอุปกรณ์ที่ใช้งานได้สะดวกอีกด้วย ในปัจจุบันแบตเตอรี่ก็ยังมีการใช้งานอย่างแพร่หลายและยังเป็นที่ต้องการของตลาด โดยหลักการของแบตเตอรี่จะเก็บรักษาพลังงานในรูปของพลังงานเคมี เมื่อนำไปใช้งานแบตเตอรี่จะคายพลังงานดังกล่าวเพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับโหลดที่ใช้งาน โดยแบตเตอรี่จะทำการเปลี่ยนพลังงานที่เก็บรักษาในรูปของพลังงานเคมีไปเป็นพลังงานไฟฟ้าแล้วนำไปใช้งาน

1. แบตเตอรี่แบบปฐมภูมิ (Primary Battery) เป็นแบตเตอรี่ที่สามารถใช้งานได้ครั้งเดียว เมื่อจ่ายพลังงานไฟฟ้าหมดแล้ว จะไม่สามารถนำมาอัดประจุกลับเข้าไปใช้งานใหม่ได้ เนื่องจากไฟฟ้าที่ได้เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของสารเคมี เมื่อสารเคมีเปลี่ยนแปลงหมดพลังงานไฟฟ้าก็จะหมด แบตเตอรี่เหล่านี้เหมาะสำหรับใช้ในอุปกรณ์ขนาดเล็กและสามารถเคลื่อนย้ายได้สะดวก ใช้ไฟน้อยหรือในที่ ๆ ห่างไกลจากพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับ ตัวอย่างของแบตเตอรี่แบบปฐมภูมิ เช่น แบตเตอรี่ชนิดคาร์บอนสังกะสี แบตเตอรี่ชนิดอัลคาไลน์ แบตเตอรี่ชนิดนิคเกิล-แคดเมียม เป็นต้น

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

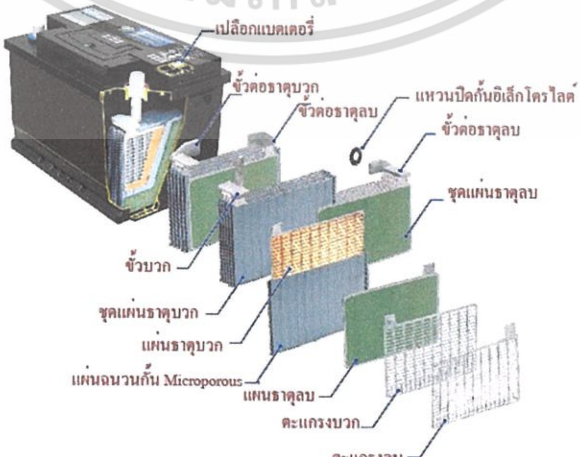
2.3 แบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด

แบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด เป็นแบตเตอรี่แบบชาร์จได้ที่เก่าแก่ที่สุดในบรรดาแบตเตอรี่ด้วยกันที่ประดิษฐ์ขึ้นมา โดยถูกประดิษฐ์ขึ้นโดย แกสตัน พลองค์ (Gaston Plante') นักฟิสิกส์ชาวฝรั่งเศสตั้งแต่ปี ค.ศ. 1859 (พ.ศ.2402) ซึ่งเป็นแบตเตอรี่แบบชาร์จได้ชนิดแรกที่ทำออกมาเพื่อเชิงพาณิชย์ และในปัจจุบันยังมีการใช้งานกันอยู่อย่างแพร่หลาย โดยมักจะทำเป็นแบตเตอรี่ที่มีความจุสูง ๆ ที่สามารถจ่ายกระแสได้มาก เนื่องจากมีต้นทุนในการเก็บพลังงานถูกกว่าแบตเตอรี่แบบชาร์จได้ชนิดอื่น ๆ โดยแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดจะนิยมใช้ในรถยนต์และยานพาหนะต่าง ๆ อาทิ รถยนต์ รถยกไฟฟ้า รถเข็น สกู๊ตเตอร์ รถกอล์ฟ รวมถึง ระบบสำรองไฟฟ้า และระบบไฟแสงสว่างฉุกเฉินอีกด้วย

ในตอนแรกแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดที่ผลิตออกมาจำหน่ายมีเฉพาะที่เป็นแบตเตอรี่แบบเปียก (Flooded Type หรือ Wet Type) ที่ต้องคอยเติมน้ำกลั่นเท่านั้น จนกระทั่งในช่วงกลางของทศวรรษที่ 70 (ระหว่างปี พ.ศ.2513-2523) ได้มีการพัฒนาแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดแบบแห้งให้ใช้งานได้หลังจากที่มีการจดสิทธิบัตรมาตั้งแต่ปี ค.ศ.1957 (พ.ศ.2500) โดย อ๊อตโต จาเช่ (Otto Jache) ทำให้การใช้งานสะดวกขึ้น นอกจากนั้นยังสามารถวางตำแหน่งของแบตเตอรี่ได้หลายรูปแบบมากขึ้น ซึ่งสามารถวางนอนหรือวางตะแคงได้ ไม่จำเป็นต้องวางในแนวตั้งเพียงอย่างเดียวเพราะอิเล็กโทรไลต์ที่เป็นน้ำกรดจะไม่ไหลหกออกมาเหมือนแบตเตอรี่แบบเปียก ซึ่งเทคนิคในการทำให้น้ำกรดไม่ไหลออกมา คือ การใช้วัสดุดูดซับน้ำกรดไว้ จากนั้นจึงทำการผนึก (Seal) ให้ปิดสนิทเพื่อป้องกันการระเหยของน้ำและแก๊ส ซึ่งเป็นส่วนประกอบของน้ำกรด ดังนั้นแบตเตอรี่จึงไม่มีการสูญเสียอิเล็กโทรไลต์ออกไปจากแบตเตอรี่

2.3.1 ส่วนประกอบของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด

ส่วนประกอบของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด วัสดุภายในที่นำมาใช้อาจแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับประเภทที่นำไปใช้งานและการออกแบบของผู้ผลิต ดังรูปที่ 2.1 แต่จะมีส่วนประกอบหลักที่เหมือนกันดังนี้

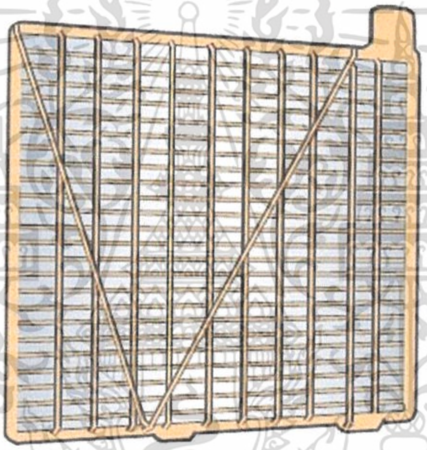


รูปที่ 2.1 โครงสร้างของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1) วัสดุทำปฏิกิริยา (Active Material) ในเซลล์ไฟฟ้าเคมีนั้น จะประกอบไปด้วยขั้วบวกและขั้วลบซึ่งทำจากวัสดุต่างชนิดกัน เป็นผลให้เกิดความต่างศักย์ระหว่างสองขั้ว สำหรับแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดนั้น แผ่นธาตุบวกจะเป็น PbO_2 ผงตะกั่วออกไซด์จะมีสีน้ำตาลฉาบในแผ่นโครงสร้าง แผ่นธาตุลบจะเป็น Pb ผงตะกั่วออกไซด์จะมีสีเทาฉาบในแผ่นโครงสร้างและผิวสัมผัสระหว่างอิเล็กโทรไลต์กับวัสดุทำปฏิกิริยาเพื่อลดการตกลงของแรงดันอันเนื่องมาจากปรากฏการณ์ Polarization

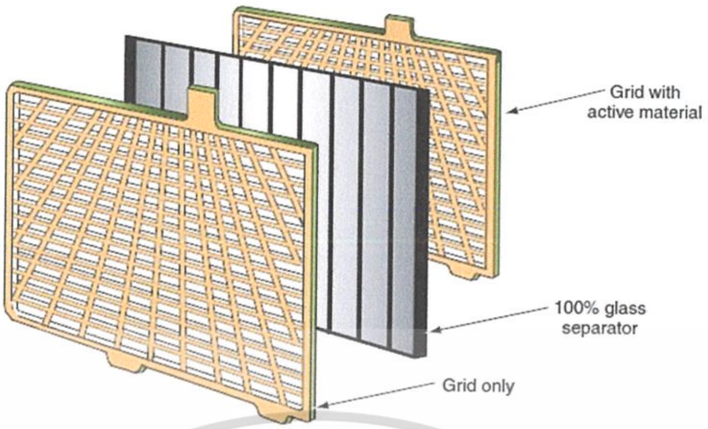
2) โครงแผ่นธาตุ (Support Grids) ดังรูปที่ 2.2 จะทำจากตะกั่วผสม อาจเป็นพลวง ดีบุก บิสมัท แคลเซียม ซิลิเนียม ซึ่งตะกั่ว-พลวงเป็นโลหะผสมที่ใช้กับแบตเตอรี่ชนิดแรกเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางกลของตะกั่วโดยใช้ประมาณ 1.5-1.8% แต่ทำให้เกิดผลเสียคือเพิ่มความต้านทานภายในเซลล์แบตเตอรี่ ทำให้เกิดการคายประจุเร็วขึ้น และอายุการใช้งานสั้นลง



รูปที่ 2.2 โครงแผ่นธาตุ

3) แผ่นกั้น (Separator) ดังรูปที่ 2.3 มีหน้าที่ป้องกันการสัมผัสกันโดยตรงของขั้วอิเล็กโทรดทั้งสอง โดยคุณสมบัติที่ดีของแผ่นกั้นนั้น จะต้องมีความต้านทานการไหลของอิออนในสารละลายต่ำ ซึ่งอาจหมายถึงต้องมีความพรุนเพื่อให้อิออนผ่านได้สะดวกและไม่ทำปฏิกิริยากับกรดหรือแผ่นธาตุในระบบด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 แผ่นกั้นเมื่อใช้ร่วมกันระหว่าง แผ่นกั้นและโครงแผ่นธาตุ

4) สารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ในแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดนั้น จะเป็นกรดซัลฟูริก ซึ่งมีค่าความถ่วงจำเพาะประมาณ 1.21-1.30 ซึ่งจะขึ้นอยู่กับการออกแบบและประเภทการใช้งาน รวมถึงสภาพภูมิอากาศอีกด้วย ถ้าใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มีค่าความถ่วงจำเพาะมากเกินไปจะทำให้เกิดผลเสียหลายอย่าง เช่น การคายประจุในตัวเองและการผุกร่อนของแผ่นธาตุ

5) หม้อแบตเตอรี่ (Container) หม้อแบตเตอรี่มีวิวัฒนาการมาอย่างต่อเนื่องจากไม้ แก้ว พลาสติก โดยปัจจุบันนิยมทำมาจากพลาสติกประเภท PVC หรือไม่ก็ทำมาจาก โพลิเอทิลีน และจะถูกแบ่งออกเป็นช่อง ๆ ขึ้นอยู่กับการออกแบบ โดยกำหนดให้หนึ่งเซลล์มีความต่างศักย์ประมาณ 2 V ซึ่งต่ออนุกรมกัน

2.3.2 การแบ่งประเภทของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด

แบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด มีคุณสมบัติที่เหมาะสมกับการใช้งานที่แตกต่างกันออกไป โดยทั่วไปจะจัดแบ่งออกเป็น 3 ลักษณะใหญ่ ๆ คือ

1) แบตเตอรี่รถยนต์ (Starting Lighting and Ignition : SLI) เป็นแบตเตอรี่ที่ออกแบบมาใช้งานลักษณะการคายประจุน้อย ใช้กับระบบรถยนต์เป็นส่วนใหญ่ แบตเตอรี่ชนิดนี้จะมีแผ่นเพลทแบบบางทั้งเพลทบวกและลบ ลักษณะการออกแบบแบบนี้เพื่อเพิ่มพื้นที่การทำปฏิกิริยาการที่เพลทมีพื้นที่ทำปฏิกิริยามากต่อเซลล์ ทำให้แบตเตอรี่ชนิดนี้จ่ายกระแสสูง ๆ ในช่วงเวลาสั้น ๆ ได้ ถึงแม้ว่าจะไม่ได้รับการออกแบบให้มีอายุการใช้งานนานกับลักษณะการคายประจุแบบลึก

2) แบตเตอรี่รถไฟฟ้า (Motive Power or Traction Battery) แบตเตอรี่ชนิดนี้ได้รับการออกแบบสำหรับการใช้งานที่มีการคายประจุมาก ส่วนใหญ่ใช้ในรถยนต์ไฟฟ้าและรถยกไฟฟ้า แบตเตอรี่ชนิดนี้จะมีจำนวนเพลทต่อเซลล์น้อยกว่าแบบที่ใช้กับรถยนต์ แต่อย่างไรก็ตามลักษณะเพลทจะหนาและทนทาน นอกจากนั้นยังมีการนำมาใช้งานกับระบบเซลล์แสงอาทิตย์อย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กว้างขวาง เนื่องจากความสามารถในการคายประจุมาก อายุการใช้งานนาน และออกแบบให้มีความทนทานสูง

3) แบตเตอรี่สำหรับระบบไฟฟ้า (Stationary Battery) แบตเตอรี่ชนิดนี้มีการใช้งานอย่างแพร่หลายในระบบพลังงานไฟฟ้าสำรอง เพื่อจ่ายพลังงานไฟฟ้าสำรองให้กับระบบไฟฟ้าที่ต้องการ แบตเตอรี่สำหรับระบบไฟฟ้ามีคุณลักษณะคล้ายกับทั้งแบตเตอรี่รถยนต์และแบตเตอรี่รถไฟฟ้า และออกแบบให้มีการคายประจุมาก และสามารถจ่ายไฟฟ้าให้แก่ระบบได้อย่างยาวนานเนื่องมาจากความจุที่สูง

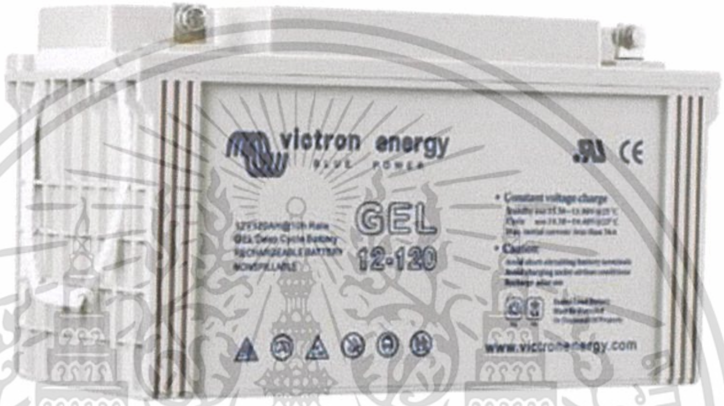
2.3.3 แบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดชนิด VRLA

ปัจจุบันมีแบตเตอรี่ชนิดเติมสารละลายหรือแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด ถูกผลิตออกมาจำหน่ายหลายชนิด โดยที่จะกล่าวต่อไปนี้เป็นชนิดที่มีการนำมาประยุกต์ใช้กับระบบไฟฟ้าสำรอง แบตเตอรี่ชนิด Captive Electrolyte Lead-Acid (VRLA) ดังรูปที่ 2.4 เป็นแบตเตอรี่ที่สารอิเล็กโทรไลต์จะถูกอิมโมบิไลซ์ (Immobilized) และปิดผนึกในภาชนะบรรจุ ถ้าเกิดสภาวะประจุเกิน ช่องระบายอากาศจะเปิดโดยแรงดันอากาศภายในแบตเตอรี่ ส่วนใหญ่แล้วจะเรียกแบตเตอรี่ชนิดนี้ว่า Valve Regulated Lead-Acid ซึ่งสารอิเล็กโทรไลต์จะไม่สามารถเติมได้ในแบตเตอรี่ชนิดนี้ ดังนั้นในการใช้แบตเตอรี่ชนิดนี้ต้องไม่ทำการประจุเกินแก่แบตเตอรี่ เทคโนโลยีของแบตเตอรี่ชนิดนี้มีผลกระทบเร็วมากต่อสภาวะการประจุ โดยเฉพาะข้อจำกัดระดับแรงดันและอุณหภูมิ การประจุแบตเตอรี่ชนิดนี้จะต้องปฏิบัติตามข้อกำหนดของผู้ผลิต นอกจากนั้นยังแบ่งได้อีก 2 ชนิด คือ

รูปที่ 2.4 Valve Regulated Lead-Acid Battery (VRLA)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1) แบตเตอรี่แบบเจล (Gelled Battery) ดังรูปที่ 2.5 แบตเตอรี่ชนิดนี้ออกแบบสำหรับใช้งานเครื่องมือวัดและอุปกรณ์ไฟฟ้าทั่วไป ส่วนใหญ่ใช้โครงแผ่นธาตุแบบตะกั่ว-แคลเซียม แบตเตอรี่ชนิดนี้มีการเติมซิลิกอนไดออกไซด์เข้าไปในสารอิเล็กโทรไลต์ก่อนที่จะทำให้เป็นเจล ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยารวมกันภายใน เพื่อลดการเกิดก๊าซและลดการสูญเสียน้ำ แบตเตอรี่แบบเจลบางชนิดมีการผสมกรดฟอสฟอริกในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ เพื่อปรับปรุงความสามารถในการคายประจุให้มากขึ้น



รูปที่ 2.5 Gelled Battery

2) แบตเตอรี่แบบ Absorbed Glass Mat (AGM) ดังรูปที่ 2.6 แบตเตอรี่ชนิดนี้แตกต่างจากแบบเจล คือสารอิเล็กโทรไลต์จะถูกดูดซับด้วย Glass Mats และวางเป็นชั้น ๆ ระหว่างเพลท แต่จะมีลักษณะทางกายภาพเหมือนกับแบบเจล การพัฒนาแบตเตอรี่ชนิดนี้ ทำให้สามารถใช้งานในสภาวะประจุเกินและสภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิสูงได้ ดังนั้นข้อแนะนำในการประจุสำหรับแบตเตอรี่ชนิดนี้จะกำหนดแรงดันคงที่สูงกว่าแบบเจลได้

รูปที่ 2.6 Absorbed Glass Mat Battery

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะเด่นของแบตเตอรี่แบบ AGM คือปรากฏการณ์การรวมตัวของก๊าซภายใน เมื่อเราทำการประจุแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดใกล้ถึงสภาวะประจุเต็ม จะเกิดก๊าซไฮโดรเจนและออกซิเจน จากปฏิกิริยาในขั้วบวกและลบ ถ้าเป็นแบตเตอรี่แบบเติมน้ำกลั่น ก๊าซที่เกิดขึ้นจะระบายออกมาภายนอก ทำให้ต้องเติมน้ำกลั่นเข้าไปทดแทน แต่ใน AGM แบตเตอรี่ โมเลกุลของออกซิเจนที่เกิดขึ้นในเพลท บวกสามารถเคลื่อนที่ไปรวมกับโมเลกุลของไฮโดรเจนที่เพลทลบและรวมตัวกลับเป็นน้ำอีกครั้ง ดังนั้นแบตเตอรี่ชนิดนี้จะปิดสนิทเพื่อป้องกันการสูญเสียน้ำและก๊าซที่เกิดขึ้นภายใน

2.4 การอัดประจุเข้าสู่แบตเตอรี่

แบตเตอรี่ทุติยภูมิได้แก่ แบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด (Lead-Acid) และแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน (Lithium-ion) สามารถเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับได้หากนำมาอัดประจุไฟฟ้าเข้าไปอีกครั้งหลังจากการใช้งาน ดังนั้นแบตเตอรี่จึงสามารถจ่ายพลังงานได้หลาย ๆ ครั้งตลอดอายุการใช้งาน ความสำคัญของการอัดประจุเข้าสู่แบตเตอรี่ก็คือ การเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับของแบตเตอรี่ทุติยภูมิอย่างมีประสิทธิภาพ โดยไม่ก่อให้เกิดความเสียหายจากการอัดประจุที่เกินกว่าขีดจำกัดของแบตเตอรี่

ในการอัดประจุแบตเตอรี่นั้น พลังงานที่เราอัดประจุเข้าไปจะมากกว่าพลังงานที่เราได้รับออกมาจากแบตเตอรี่ นั่นเป็นเพราะว่าพลังงานในการอัดประจุแบตเตอรี่ส่วนหนึ่งจะสูญหายไปในแบตเตอรี่ เนื่องจากความต้านทานภายในแบตเตอรี่และการเกิดปฏิกิริยาที่ไม่ใช่การเปลี่ยนรูปพลังงานไฟฟ้าไปสู่พลังงานเคมี เช่น การเกิดแก๊สในแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด (Lead-Acid) ทำให้ประสิทธิภาพของการอัดประจุจึงไม่ถึง 100%

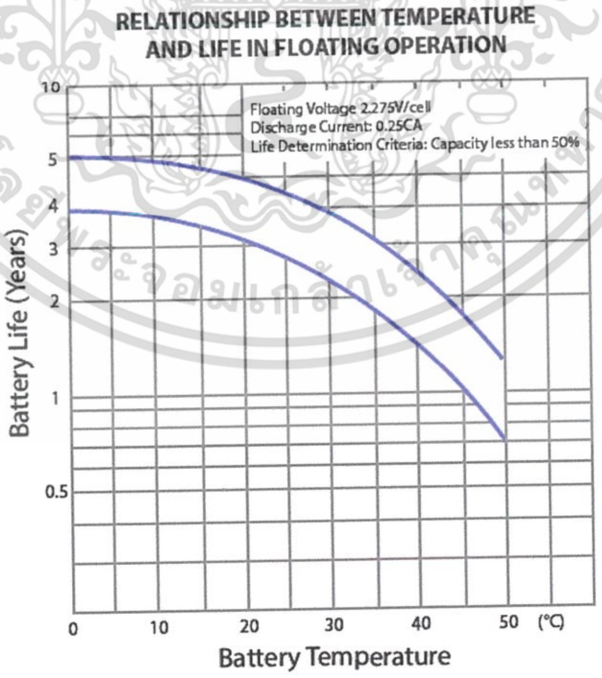
ดังนั้นหากจะต้องการใช้แบตเตอรี่อย่างเต็มประสิทธิภาพจึงจำเป็นต้องทำการอัดประจุจนถึงสถานะการอัดประจุที่กระแสไฟฟ้าสูงเกินพิกัด (Overcharge) คือสถานะประจุของแบตเตอรี่ที่อัดประจุ (State of Charge) ของแบตเตอรี่ใกล้เคียงกับ 100% ไม่สามารถรู้ได้ว่าแบตเตอรี่จะถูกอัดประจุจนเต็มที่เวลาใด การอัดประจุที่สถานะกระแสไฟฟ้าสูงเกินพิกัด (Overcharge) นั้นจะทำให้มีความร้อนสูญเสียมากกว่าปกติ รวมไปถึงความดันที่จะเกิดขึ้นจากแก๊สที่ผลิตภายในแบตเตอรี่ แต่ก็สามารถที่จะทำให้ใช้แบตเตอรี่ได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ จึงต้องมีการควบคุมการอัดประจุที่กระแสไฟฟ้าสูงเกินพิกัด (Overcharge) เพื่อที่จะป้องกันและควบคุมไม่ให้เกิดความเสียหายขึ้น การอัดประจุด้วยแรงดันไฟฟ้าคงที่ภายใต้ผลของอุณหภูมิและความดันต่างจากการอัดประจุที่กระแสไฟฟ้าคงที่เล็กน้อยก็คือในการอัดประจุแบบแรงดันไฟฟ้าคงที่ กระแสไฟฟ้าอัดประจุจะค่อย ๆ ลดลง เมื่อเข้าสู่สภาวะกระแสไฟฟ้าสูงเกินพิกัด (Overcharge) เมื่อกระแสไฟฟ้าลดลงปฏิกิริยาจะลดลงด้วย ทำให้แก๊สที่เกิดขึ้นก็ลดลงและอุณหภูมิก็ต่ำกว่าแบบกระแสไฟฟ้าคงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการอัดประจุไฟฟ้า

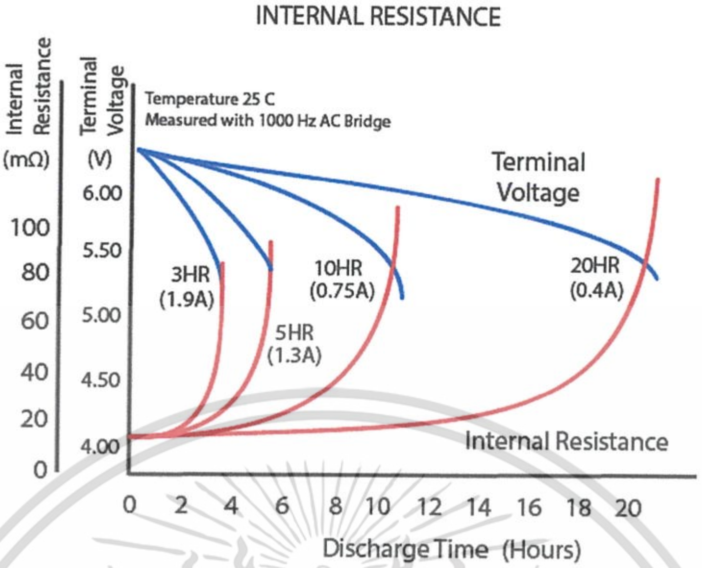
การอัดประจุที่เหมาะสมเป็นกระบวนการอัดประจุที่จะทำให้การอัดประจุเกิดประสิทธิภาพสูงสุด ดังนั้นการพิจารณาหาจุดอัดประจุที่เหมาะสมจึงมีความสำคัญเพื่อที่จะทำให้พลังงานที่อัดประจุไม่สูญเปล่าไป ปัจจัยที่มีผลต่อการอัดประจุมีดังนี้

1. วิธีการอัดประจุ (Charging Method)
   วิธีการอัดประจุนั้นขึ้นกับสภาวะที่แบตเตอรี่ถูกอัดประจุไฟฟ้าด้วยขนาดกระแสไฟฟ้าเท่าใด หากการอัดประจุนั้นใช้ขนาดกระแสไฟฟ้ามาก จะทำให้เวลาในการอัดประจุลดลงแต่อาจทำให้แบตเตอรี่เสื่อมสภาพเร็วขึ้น
2. สถานะการอัดประจุของแบตเตอรี่ (State of Charge : SOC)
   สถานะในการอัดประจุของแบตเตอรี่เป็นตัวบ่งชี้ว่าการอัดประจุนั้นมีความเหมาะสมหรือไม่ในกรณีที่แบตเตอรี่ยังเต็มอยู่จะไม่มีความเหมาะสมในการอัดประจุ เพราะพลังงานในการอัดประจุไม่ได้ถูกใช้ในการเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานเคมีแต่จะเป็นความร้อนสูญเสีย
3. อุณหภูมิ (Temperature)
   อุณหภูมิมีผลในการเร่งปฏิกิริยาการอัดประจุให้ดีขึ้น การอัดประจุที่อุณหภูมิสูงจะมีประสิทธิภาพ ดีกว่าการอัดประจุที่อุณหภูมิต่ำ



รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิภายในแบตเตอรี่และอายุการใช้งานของแบตเตอรี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานภายในแบตเตอรี่
และเวลาในการคายประจุไฟฟ้าที่ค่ากระแสต่างกัน

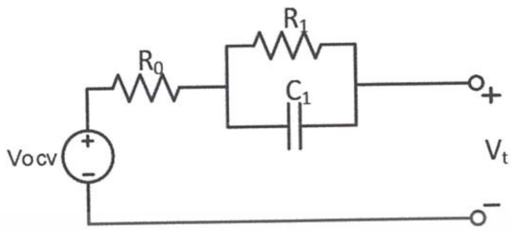
ในการใช้งานแบตเตอรี่แต่ละครั้ง หากใช้งานแบตเตอรี่จนอุณหภูมิภายในแบตเตอรี่เพิ่มสูงขึ้น ค่าอุณหภูมิที่สูงขึ้นนี้จะส่งผลต่ออายุการใช้งานของแบตเตอรี่ เนื่องจากอุณหภูมิเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีภายใน หากมีการใช้งานแล้วอุณหภูมิภายในแบตเตอรี่สูงเกินค่าที่บริษัทผู้ผลิตกำหนดไว้ จะทำให้แบตเตอรี่เสื่อมสภาพเร็วขึ้นหรือมีอายุการใช้งานที่สั้นลงจากที่บริษัทได้ระบุไว้ ปัจจัยที่ส่งผลต่ออุณหภูมิของแบตเตอรี่โดยตรง คือค่าความต้านทานภายในของแบตเตอรี่ ซึ่งหากค่าความต้านทานภายในมีค่ามากจะส่งผลให้เกิดความร้อนกับแบตเตอรี่ในขณะอัดประจุไฟฟ้าและคายประจุไฟฟ้า เนื่องจากความสูญเสียที่ตัวต้านทานภายในเมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานภายในแบตเตอรี่และเวลาในการคายประจุไฟฟ้าที่ค่ากระแสต่างกัน โดยค่าความต้านทานภายในจะมีค่ามากขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป และเมื่อเปรียบเทียบการคายประจุไฟฟ้าที่ค่ากระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น พบว่าค่าความต้านทานจะมีแนวโน้มสูงขึ้นเช่นกันดังรูปที่ 2.8 เส้นกราฟสีแดง

ในการใช้งานของแบตเตอรี่ ค่าความต้านทานภายในจะเป็นตัวชี้วัดถึงสภาพการเปลี่ยนแปลงหรือการเสื่อมสภาพของแบตเตอรี่ ค่าความต้านทานภายในของวงจรสมมูลแบตเตอรี่ ดังรูปที่ 2.9 ที่นำมาพิจารณาคือค่า R_0 เนื่องจากเป็นค่าที่ส่งผลให้เกิดความสูญเสีย โดยค่าความต้านทานภายในที่พิจารณาสามารถหาได้โดยวิธีการอัดประจุไฟฟ้าหรือคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแสไฟฟ้าคงที่จะได้ผลต่างของแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งลักษณะของกราฟดังกล่าวสามารถนำมาหาค่าความต้านทานภายในได้จากกฎของโอห์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_0 = \frac{(V_1 - V_2)}{I} \tag{2.1}$$



รูปที่ 2.9 วงจรสมมูลของแบตเตอรี่

2.4.2 ประเภทของการอัดประจุไฟฟ้า

การอัดประจุแบตเตอรี่แบบทุติยภูมินั้นมีอยู่หลายวิธี หลักการของการอัดประจุก็คือการจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าสู่แบตเตอรี่ในทิศทางที่ตรงกันข้ามกับการคายประจุ การอัดประจุแรงดันไฟฟ้าคงที่นิยมใช้กันทั่วไป แต่ก็ยังมีการอัดประจุแบบกระแสไฟฟ้าคงที่ใช้อยู่ สิ่งที่ต้องนำมาพิจารณาในการเลือกเครื่องอัดประจุก็คือการถูกคายประจุ เวลาในการอัดประจุ อุณหภูมิที่สูงขึ้นและจำนวนเซลล์ของแบตเตอรี่

1. การอัดประจุด้วยแรงดันไฟฟ้าคงที่

การอัดประจุด้วยแรงดังไฟฟ้าคงที่หมายถึงการอัดประจุไฟฟ้าโดยคำนึงถึงแรงดันไฟฟ้าอย่างเดียว ไม่คำนึงถึงกระแสไฟฟ้าขณะอัดประจุไฟฟ้า ปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่ใช้อัดประจุไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับความต่างศักย์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าเครื่องอัดประจุกับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่ ดังนั้นเมื่อเริ่มต้นอัดประจุไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าจะค่อย ๆ เพิ่มสูงขึ้นและจะลดลงเมื่อแบตเตอรี่มีสถานะในการอัดประจุของแบตเตอรี่ (State of Charge : SOC) เข้าใกล้ 100% เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่สูงขึ้น เครื่องอัดประจุที่ใช้โดยทั่วไปมีอยู่ 2 แบบ ก็คือ แบบ Fast Charge จะอัดประจุที่แรงดันสูง กระแสไฟฟ้าที่อัดประจุจึงสูงตาม เวลาที่ใช้อัดประจุจะเร็วแต่มีความเสี่ยงต่อความเสียหายของแบตเตอรี่ ทำให้อายุการใช้งานลดลง อีกแบบหนึ่งคือการอัดประจุแบบ Float Charge คือการอัดประจุที่แรงดันไฟฟ้าสูงกว่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่เล็กน้อย กระแสไฟฟ้าอัดประจุจึงไม่สูง แต่ก็จะใช้เวลาในการอัดประจุค่อนข้างนานในการอัดประจุแบบ Float charge นิยมใช้ในการอัดประจุแบบต่อเนื่องเหมาะสำหรับอุปกรณ์ที่ใช้สำรองไฟต่าง ๆ เช่น UPS ไฟฉุกเฉิน จะเห็นได้ว่ามีข้อดีข้อเสียที่ต่างกัน ดังนั้นจึงมีการประยุกต์ให้การอัดประจุแบบแรงดันไฟฟ้าคงที่นี้ให้เป็นแบบ Dual-Step Charging คือเริ่มแรกจะอัดประจุแบบ Fast Charge ก่อน เพื่อแก้ไขจุดอ่อนในเรื่องเวลาในการอัดประจุเมื่อเวลาผ่านไปเมื่อสถานะในการอัดประจุของแบตเตอรี่ (State of Charge : SOC) เริ่มสูงขึ้นก็ให้เปลี่ยนระดับแรงดันไฟฟ้าเป็นแบบ Float Charge เพื่อทำให้กระแสไฟฟ้าที่สถานะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Overcharge ไม่สูงมากเพื่อยืดอายุการใช้งานให้สูงขึ้น การอัดประจุแบบ Dual-Step Charging จะมีประสิทธิภาพสูงมาก

2. การอัดประจุแบบกระแสไฟฟ้าคงที่

การอัดประจุแบบกระแสไฟฟ้าคงที่นั้นเป็นวิธีอัดประจุที่ควรที่จะนำมาใช้งานมากที่สุดเพราะเป็นวิธีที่คืนพลังงานให้แก่แบตเตอรี่ได้เร็วโดยไม่ส่งผลต่ออายุการใช้งานของแบตเตอรี่ การอัดประจุแบบกระแสไฟฟ้าคงที่จะทำงานได้ดีกับการต่ออนุกรมกันของเซลล์แบตเตอรี่ที่ไม่สมดุล การอัดประจุแบบกระแสไฟฟ้าคงที่นั้นเป็นการอัดประจุที่ทำการรักษาระดับของกระแสไฟฟ้าคำนึงถึงกระแสไฟฟ้าสูงเกินพิกัด (Overcharge) หรืออุณหภูมิที่เกิดขึ้น ค่าแรงดันไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเมื่อความจุในแบตเตอรี่สูงขึ้นและจะสูงขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อแบตเตอรี่เข้าสู่สภาวะกระแสไฟฟ้าสูงเกินพิกัด ดังนั้นในการอัดประจุแบบกระแสไฟฟ้าคงที่จึงต้องมีการควบคุมการอัดประจุกรณีเกิดกระแสไฟฟ้าสูงเกินพิกัด การเลือกระดับของกระแสไฟฟ้าอัดประจุนั้นเป็นการตัดสินใจที่สำคัญมากเพราะจะส่งผลไปยังอายุการใช้งาน ซึ่งแบตเตอรี่แต่ละชนิดก็จะมีขีดจำกัดของกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้ในการอัดประจุอยู่โดยทั่วไปทางผู้ผลิตจะต้องบอกกระแสไฟฟ้าในการอัดประจุสูงสุดไว้เพื่อใช้ในการออกแบบหรือเลือกกระแสไฟฟ้าอัดประจุ การใช้งานจริงนั้นก็จะมีทั้งแบบกระแสอัดประจุระดับเดียวและแบบกระแสไฟฟ้าอัดประจุหลายระดับ ในแบบหลายระดับนั้นเริ่มแรกก็จะอัดประจุที่ระดับสูง (High Charge) หรืออัดประจุระดับกลาง (Medium Charge) ก่อน เมื่อแบตเตอรี่ใกล้จะเต็ม ก็จะทำการเปลี่ยนกระแสไฟฟ้าอัดประจุเป็นแบบอัดประจุระดับต่ำ (Low Charge)

2.5 การใช้งานแบตเตอรี่ให้เหมาะสม

1. การจ่ายกระแสไฟฟ้า (Discharge) ควรหลีกเลี่ยงการจ่ายกระแสไฟฟ้าสูงเกินพิกัด การใช้งานเกินพิกัดของแบตเตอร์รี่จะส่งผลทำให้อายุของแบตเตอรี่สั้นลง เพราะฉะนั้นควรให้แบตเตอรี่จ่ายกระแสไฟฟ้าประมาณ 70-80% ของความจุแบตเตอรี่ เช่น แบตเตอรี่ 24 V ควรมีการตัดการจ่ายกระแสไฟฟ้าที่แรงดันไฟฟ้าประมาณ 20.4 V หรือประมาณ 85% ของความจุแบตเตอรี่ โดยความสามารถในการจ่ายกระแสไฟฟ้าขึ้นอยู่กับสภาพของแบตเตอรี่ เช่น แบตเตอรี่ที่แห้งและสะอาดจะมีความสามารถในการจ่ายกระแสไฟฟ้าได้ดี

2. การคายประจุของแบตเตอร์รี่ (Normal Charge) ควรระวังไม่ให้อุณหภูมิของอิเล็กโทรไลต์สูงเกิน 50°C หรือเกินพิกัดของตัวแบตเตอรี่ ถ้าหากอุณหภูมิสูงเกินไป ควรลดกระแสไฟฟ้าในการอัดประจุเพื่อป้องกันไม่ให้อุณหภูมิของของอิเล็กโทรไลต์สูงขึ้น และต้องตรวจสอบให้แน่ใจว่าในการต่อกับขั้วแบตเตอรี่ต้องแน่นกระชับ ต่อขั้วถูกต้อง ขณะอัดประจุไฟฟ้าห้ามถอดหรือขยับปลั๊กเพราะอาจทำให้เกิดประกายไฟซึ่งจะเป็นอันตรายต่อขั้วต่อ

3. การอัดประจุไฟแบบกระตุ้น (Equalizing Charge) เป็นการอัดประจุด้วยกระแสไฟฟ้าสูงเกินพิกัด สำหรับแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดเพื่อกำจัดการสะสมของสารซัลเฟต (SO_4)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บนแผ่นธาตุประจุ ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาซัลเฟชั่น (Sulfation) หรือซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาเคมีที่ไม่สมบูรณ์ของแบตเตอรี่ ควรมีการอัดประจุไฟแบบกระตุ้น (Equalizing Charge) ทุก 6 เดือนหรือหลังจาก 20 ครั้งของการอัดประจุเพื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าให้กับเซลล์ภายในแบตเตอรี่ประมาณ 10%

4. พยายามหลีกเลี่ยงการใช้แบตเตอรี่จนหมดแล้วค่อยอัดประจุไฟเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดอัตราการคายประจุในอัตราที่สูงซึ่งจะทำให้แบตเตอรี่เสื่อมเร็ว

5. ในการเก็บรักษาสภาพแบตเตอรี่นั้นไม่ควรเก็บในที่ ๆ อุณหภูมิสูงเกินไป เพราะอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะเร่งปฏิกิริยาเคมีภายในให้ไอออนต่างเคลื่อนที่ไวมากขึ้น มีความไวต่อปฏิกิริยามากขึ้นและส่งผลให้อายุของแบตเตอรี่สั้นลง

ตารางที่ 2.1 ขนาดความจุของแบตเตอรี่ (Ampere Hour) กับค่าความต้านทานภายใน

Battery Capacity (Ah)	Conductance (G)	Impedance (Z)	Resistance (R)
แบตเตอรี่มีขนาดความจุน้อย	ต่ำ	สูง	สูง
แบตเตอรี่มีขนาดความจุมาก	สูง	ต่ำ	ต่ำ

2.6 มาตรฐานการทดสอบสภาพแบตเตอรี่

ในมาตรฐานสำหรับการตรวจสอบแบตเตอรี่ (Std IEEE1188-2005) นอกจากการวัดแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าและอุณหภูมิแล้วยังกำหนดให้การทดสอบค่าความต้านทานภายใน (Internal Ohmic Measurement) ของแบตเตอรี่ซึ่งเป็นขั้นตอนมาตรฐานที่ต้องทำการตรวจวัด ทั้งนี้เพราะว่าค่าความต้านทานภายในของแบตเตอรี่เป็นค่าที่แสดงถึงสภาพภายในของแบตเตอรี่ เช่น สภาพของแผ่นธาตุ ความนำไฟฟ้าของอิเล็กโตรไลต์และสภาพการเชื่อมต่อภายในของแบตเตอรี่เป็นต้น ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานภายในของแบตเตอรี่จึงเป็นตัวชี้วัดถึงการเปลี่ยนแปลง (การเสื่อมลงของแบตเตอรี่) ได้ การทดสอบค่าความต้านทานภายในของแบตเตอรี่นั้นสามารถทดสอบตามมาตรฐาน (Std IEEE1188-2005) ได้จำแนกวิธีการทดสอบค่าความต้านทานภายใน แบ่งออกเป็น 3 วิธี คือ

1. การวัดค่าอิมพีแดนซ์ (Impedance ; Z ; มีหน่วยเป็น Ohms, Ω)
2. การวัดค่าคอนดักแตนซ์ (Conductance ; G ; มีหน่วยเป็น Siemens, S)
3. การวัดค่ารีซิสแตนซ์ (Resistance ; R ; มีหน่วยเป็น Ohms, Ω)

จากการทดสอบค่าความต้านทานภายใน สามารถรู้แนวโน้มค่าความจุของแบตเตอรี่ได้ดังตารางที่ 2.1 จากมาตรฐานการตรวจสอบแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด พบว่าแบตเตอรี่ที่เกิดการเสื่อมสภาพ จะมีขนาดความจุ (Ampere Hour : Ah) ลดลงคือมีค่าคอนดักแตนซ์ (G) ต่ำ แต่มีค่าอิมพีแดนซ์ (Z) และค่ารีซิส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แตนซ์ (R) สูง ซึ่งเมื่อเกิดปัญหาดังกล่าวเราจำเป็นต้องทำการกระตุ้นฟื้นฟูสภาพของแบตเตอรี่โดยการอัดประจุด้วยพัลซ์ความถี่ เพื่อทำให้ค่าความจุของแบตเตอรี่มีค่าเพิ่มขึ้น และกลับสู่สภาวะความจุปกติ จึงเป็นการสิ้นสุดกระบวนการกระตุ้นฟื้นฟูสภาพของแบตเตอรี่ สามารถนำแบตเตอรี่ที่ผ่านกระบวนการนี้กลับไปใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.7 ระบบจัดการแบตเตอรี่ (Battery Management System : BMS)

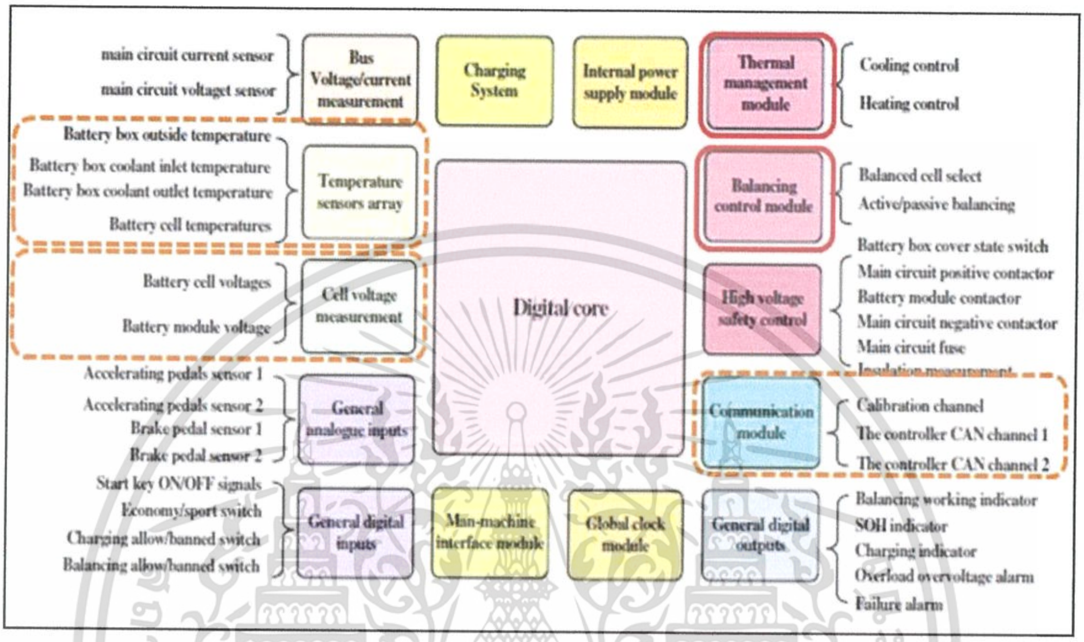
ในปัจจุบันระบบจัดการแบตเตอรี่ (Battery Management System : BMS) ดังรูปที่ 2.10 สามารถควบคุมการอัดประจุได้โดยในการควบคุมนี้ เราจะต้องรู้ขอบเขตและศักยภาพของตัวแบตเตอรี่ตัวนั้น ๆ ซึ่งแบตเตอรี่แต่ละชนิดมีรูปแบบและลักษณะการอัดประจุที่แตกต่างกันไป ดังนั้นการทำให้เครื่องอัดประจุสามารถที่จะรองรับลักษณะการอัดประจุของแบตเตอรี่ได้ทุกชนิดนั้นเป็นเรื่องสำคัญ ซึ่งสามารถทำได้โดยการกำหนดข้อตกลงในการสื่อสารหรือที่เรียกว่าโปรโตคอล (Protocol) ระหว่างเครื่องอัดประจุกับแบตเตอรี่ให้เป็นไปตามมาตรฐานเดียวกัน

โดยโปรโตคอลจะเป็นส่วนที่ควบคุมเครื่องอัดประจุเพื่อให้สามารถอัดประจุไปยังแบตเตอรี่แต่ละชนิดได้อย่างเหมาะสม มีประสิทธิภาพและมีความน่าเชื่อถือ เพราะว่าแบตเตอรี่แต่ละชนิดมีคุณสมบัติพิกัดแรงดันไฟฟ้าและพิกัดอุณหภูมิที่แตกต่างกันไป หากเกิดแรงดันไฟฟ้าเกินหรืออุณหภูมิที่สูงเกินไปในขณะทำการอัดประจุจะส่งผลให้ประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ลดลง และจะทำให้การจ่ายพลังงานของแบตเตอรี่ให้กับโหลดลดลงตามไปด้วย ดังนั้นเราจึงควรจะทราบค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เช่น ค่าแรงดันไฟฟ้าและอุณหภูมิของแบตเตอรี่ตลอดระยะเวลาการอัดประจุโดยเราสามารถตรวจสอบและแสดงผลออกโดยระบบจัดการแบตเตอรี่ (Battery Monitoring System : BMS) ซึ่งในปัจจุบันสามารถดูค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้มากมาย เพราะฉะนั้น ระบบจัดการแบตเตอรี่ (Battery Monitoring System : BMS) จึงเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบคุณภาพของแบตเตอรี่ โดยจะตรวจสอบค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแบตเตอรี่ในขณะนั้น แล้วนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้มาคำนวณ และแสดงผลผ่านทางหน้าจอ LCD สามารถให้ข้อมูลแบบ เรียลไทม์ (ระบบเวลาจริง) ซึ่งจะมีคุณสมบัติในการแสดงผลและแจ้งเตือนไปยัง ระบบจัดการแบตเตอรี่ (Battery Management System : BMS) ซึ่งค่าที่เราทำการวัดและแสดงผลหลัก ๆ มีดังต่อไปนี้

- การตรวจสอบ ระบบ BMS จะทำการตรวจสอบค่าสถานะต่าง ๆ ของแบตเตอรี่ในขณะนั้น เช่น
  - ค่าแรงดันไฟฟ้า (Voltage) : แรงดันไฟฟ้ารวม, แรงดันไฟฟ้าในแต่ละเซลล์
  - ค่าอุณหภูมิ (Temperature) : อุณหภูมิเฉลี่ย, อุณหภูมิในแต่ละเซลล์
  - สถานะในการอัดประจุของแบตเตอรี่ (State of Charge: SOC)
  - ความลึกของการคายประจุของแบตเตอรี่ในการอัดประจุแบตเตอรี่ใหม่ในแต่ละครั้ง (Depth of Discharge : DOD)
  - กระแสไฟฟ้า (Current): ทั้งกระแสไฟฟ้าที่เข้าสู่แบตเตอรี่และออกจากแบตเตอรี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การคำนวณ ค่าพารามิเตอร์ที่ระบบ BMS ได้คำนวณ มีดังต่อไปนี้
    - ค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดในการอัดประจุ (Charge Current Limit : CCL)
    - กระแสไฟฟ้าสูงสุดในการคายประจุ (Discharge Current Limit : DCL)



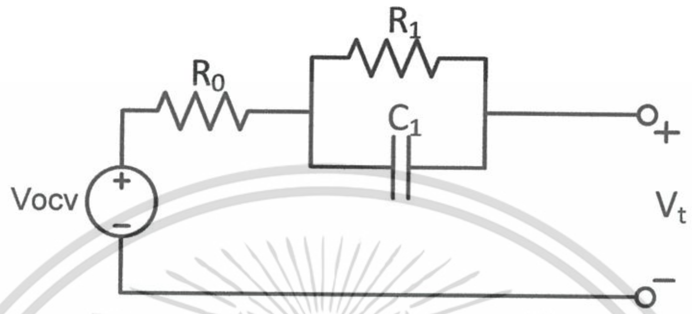
รูปที่ 2.10 ระบบจัดการแบตเตอรี่ในปัจจุบัน

- การสื่อสารระบบ BMS จะทำการรายงานข้อมูลต่าง ๆ ผ่านวิธีการสื่อสารดังต่อไปนี้
    - การสื่อสารแบบ CAN (Controller Area Network)
    - การสื่อสารแบบแลนไร้สาย (Wireless LAN)
- การป้องกันระบบ BMS ทำป้องกันแบตเตอรี่โดยสาเหตุดังต่อไปนี้
    - กระแสไฟฟ้าเกินกว่าปกติ (Over-Current)
    - อุณหภูมิเกินกว่าปกติ (Over-Temperature)
    - แรงดันไฟฟ้าเกินกว่าปกติ (Over-Voltage)
    - อุณหภูมิต่ำกว่าปกติ (Under-Temperature)
    - แรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าปกติ (Under-Voltage)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 วงจรสมมูลของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด

วงจรทางไฟฟ้าจากสมการเทวินินได้จำลองรูปแบบภายในแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด โดยมี R และ RC ขนาน ดังรูปที่



รูปที่ 2.11 วงจรสมมูลของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด

สามารถหาค่าความสัมพันธ์ของวงจรได้โดย

$$V_1(k+1) = V_1(k)e^{-\Delta t/\tau_1} + I_k R_1(1-e^{-\Delta t/\tau_1}) \quad (2.2)$$

$$V_t(k) = V_{OCV} + I_k R_0 + V_1(k) \quad (2.3)$$

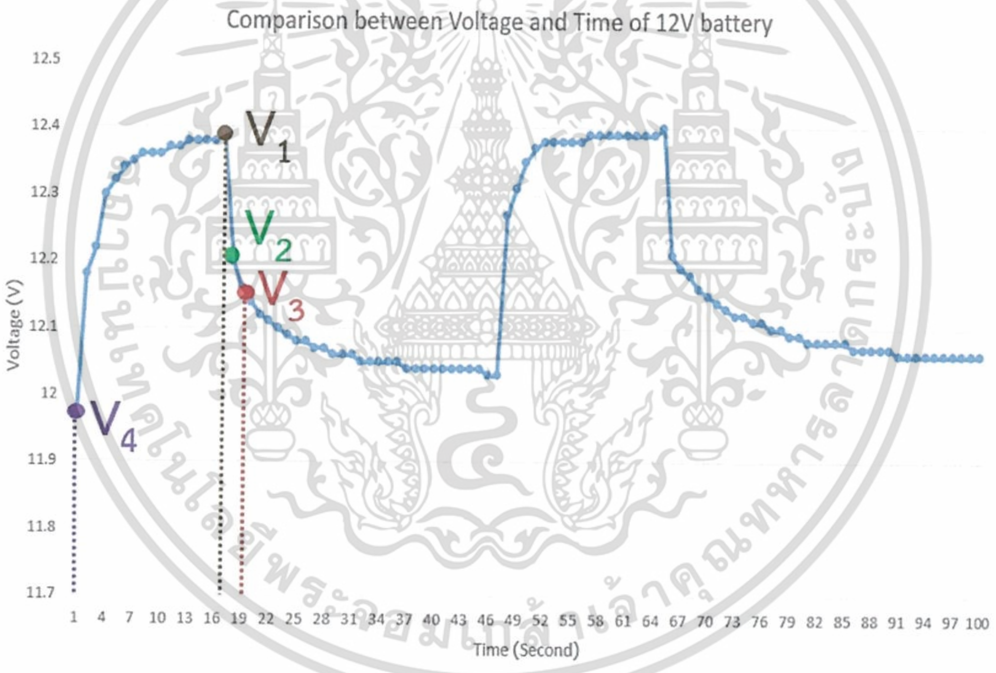
ประกอบด้วยพารามิเตอร์ ดังต่อไปนี้

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8.1 การหาค่าพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด โดยผลการตอบสนองเชิงเวลา

การหาค่าพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด สามารถหาได้โดยการทดลองผลการตอบสนองเชิงเวลา เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่จะเกี่ยวข้องกับแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ กระแสที่จ่ายเข้าแบตเตอรี่และกระแสที่จ่ายออกจากแบตเตอรี่ และเวลา โดยผลการตอบสนองเชิงเวลาสามารถทำได้โดยทั้งการอัดประจุแบตเตอรี่หรือการคายประจุแบตเตอรี่ก็ได้ โดยวิธีการอัดประจุแบตเตอรี่จะสามารถทำการทดลองเพื่อให้ได้ค่าที่แม่นยำมากกว่าการคายประจุแบตเตอรี่ เนื่องจากสามารถควบคุมอัตราการอัดประจุแบตเตอรี่ (C-rate) และแรงดันไฟฟ้าสำหรับการอัดประจุแบตเตอรี่ได้ โดยทำการอัดประจุแบตเตอรี่และหยุดการอัดประจุแบตเตอรี่ให้เป็นช่วงเวลา เพื่อทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า ในช่วงเวลาต่าง ๆ เพื่อนำมาหาค่าพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่ได้ ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและเวลาสำหรับแบตเตอรี่ 12V

โดยค่าความต้านทานของแบตเตอรี่สามารถหาได้ดัง สมการที่ 2.4

$$R_0 = \frac{V_1 - V_2}{I} \tag{2.4}$$

โดยค่าความจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่สามารถหาได้ โดยหาค่าคงที่ของเวลาได้ดัง สมการที่ 2.5

$$\tau = R_0 C_1 \tag{2.5}$$

ซึ่งค่าคงที่ของเวลาจากกราฟซึ่งเป็นเวลาของ V_3 ซึ่งสามารถหาค่า V_3 ได้ดัง สมการที่ 2.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_3 = [(V_1 - V_4) \times 0.37] + V_4 \tag{2.6}$$

โดยค่าคงที่ของเวลา จะเท่ากับเวลาที่แรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่มีค่าที่ V_3 ดัง สมการที่ 2.7

$$\tau = t_{v3} \tag{2.7}$$

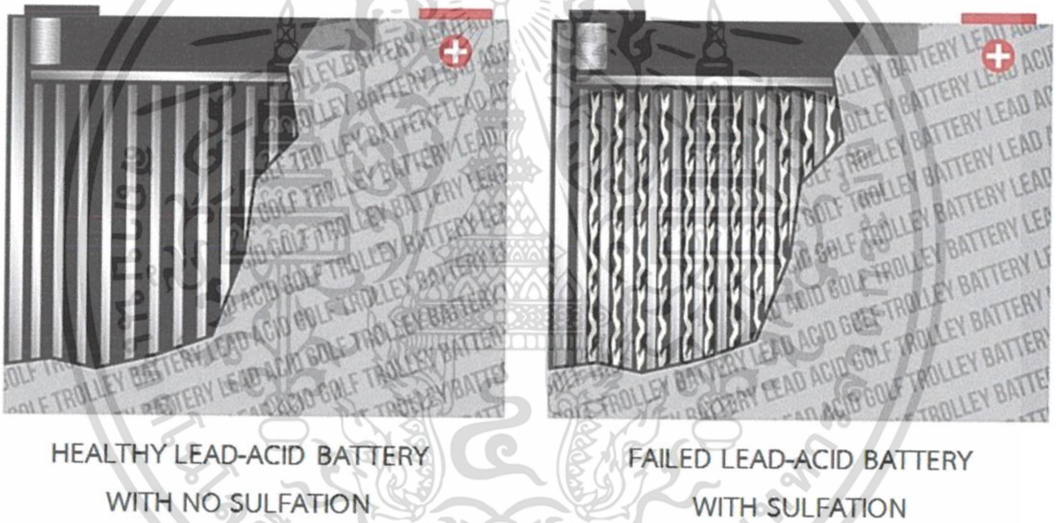
V_1 คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ ณ วินาทีสุดท้ายที่ทำการอัดประจุไฟฟ้า

V_2 คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ ณ วินาทีแรกหลังจากทำการหยุดอัดประจุไฟฟ้า

V_3 คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ ณ ค่าคงที่ของเวลา

V_4 คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ ณ วินาทีก่อนทำการอัดประจุไฟฟ้า

โดยค่าพารามิเตอร์ที่ใช้เพื่อบ่งบอกแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดที่เสื่อมสภาพนั้น จะให้ความสนใจพารามิเตอร์ R_0 เป็นหลัก เนื่องจากพารามิเตอร์ R_0 นั้นเกิดจากการเกิดซัลเฟชั่นของแผ่นขั้วธาตุ ดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 รูปแสดงภายในของแบตเตอรี่ ในกรณีที่แบตเตอรี่ยังไม่เกิดการซัลเฟชั่นและกรณีที่เกิดการซัลเฟชั่น

ซึ่งการเกิดซัลเฟชั่นของแผ่นขั้วธาตุนั้นจะเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้แบตเตอรี่เสื่อมสภาพ เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ R_0 ที่เพิ่มขึ้นจะเป็นไป ดังสมการที่ 2.8

$$R_0 = \rho \frac{L}{A} \tag{2.8}$$

2.9 คลื่นเดินทาง

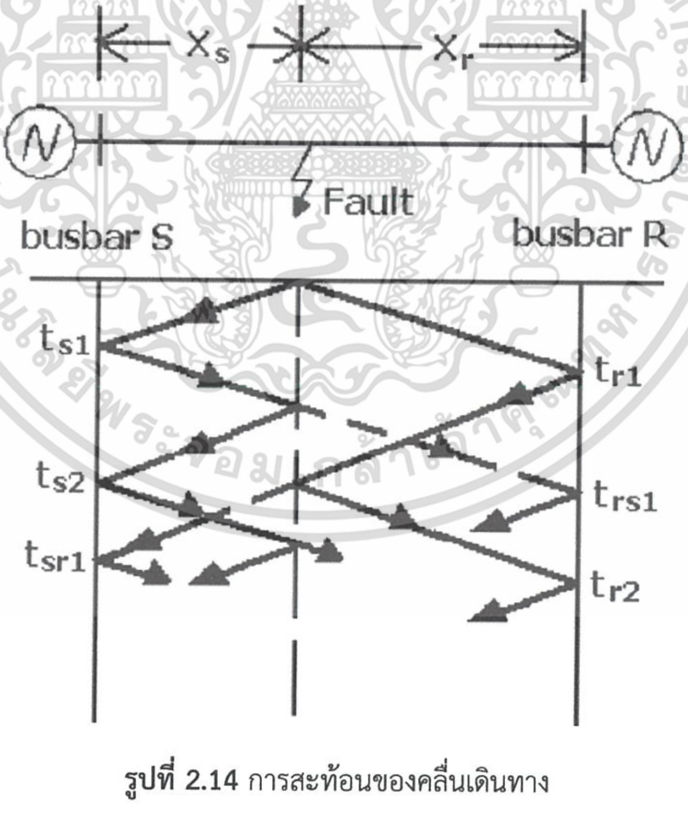
คลื่น หมายถึง ลักษณะของการถูกรบกวนที่มีการแผ่กระจาย เคลื่อนที่ออกไปในลักษณะของการกวัดแกว่งหรือกระเพื่อม และมักจะมีการส่งถ่ายพลังงานไปด้วย คลื่นเชิงกลซึ่งเกิดขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในตัวกลาง (ซึ่งเมื่อมีการปรับเปลี่ยนรูป จะมีความแรงยืดหยุ่นในการดีดตัวกลับ) จะเดินทางและส่งผ่านพลังงานจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งในตัวกลาง โดยไม่ทำให้เกิดการเคลื่อนตำแหน่งอย่างถาวรของอนุภาคตัวกลางหรือก็คือไม่มีการส่งถ่ายอนุภาค แต่จะมีการเคลื่อนที่แกว่งกวัด (Oscillation) ไปกลับของอนุภาค อย่างไรก็ตามสำหรับ การแผ่รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและการแผ่รังสีแรงดึงดูดนั้นสามารถเดินทางในสุญญากาศได้ โดยไม่ต้องมีตัวกลาง คลื่นที่ไม่เคลื่อนที่เรียกคลื่นนิ่ง (Standing Wave) เช่น การสั่นของสายไวโอลิน ส่วนคลื่นที่มีการเคลื่อนย้ายตำแหน่งเรียก คลื่นเดินทาง (Traveling Wave) ในบทนี้จะพูดถึงการสะท้อนกลับของสัญญาณคลื่นที่ถูกส่งเข้าไปในระบบใด ๆ ซึ่งในที่นี้จะเป็นระบบสายส่ง (Transmission Line)

2.9.1 การสะท้อนของคลื่นเดินทาง

ในปัจจุบันได้มีการนำเอาทฤษฎีของคลื่นเดินทางมาประยุกต์ใช้กับระบบสายส่ง โดยเมื่อเกิดการลัดวงจรขึ้นในสายส่ง ค่าพารามิเตอร์ของอิมพีแดนซ์ที่จุดลัดวงจรจะเปลี่ยนไป สัญญาณเดินทางถูกส่งไปจะถูกสะท้อนกลับมา ซึ่งเวลาที่คลื่นใช้ในการเดินทางจะสามารถบ่งบอกได้ว่าเกิดการลัดวงจรที่จุดใดในสายส่ง



รูปที่ 2.14 การสะท้อนของคลื่นเดินทาง

จากสมการระยะทางดัง สมการที่ 2.9

$$s = vt \tag{2.9}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้ว่าระยะทางจากจุดที่ส่งสัญญาณคลื่นจนถึงจุดที่เกิดการลัดวงจรโดยอ้างอิงจาก busbar S ดังสมการที่ 2.10

$$X_s = \frac{t_{s2} - t_{s1}}{2} v \tag{2.10}$$

X_s คือ ระยะทางจาก busbar S ถึงจุดที่เกิดการลัดวงจร

t_{s1} คือ เวลาแรกเริ่มที่คลื่นใช้ในการเดินทางจาก busbar S ถึงจุดที่เกิดการลัดวงจร

t_{s2} คือ เวลาสิ้นสุดที่คลื่นใช้ในการเดินทางจาก busbar S ถึงจุดที่เกิดการลัดวงจร

v คือ ความเร็วของคลื่นเดินทางในสายส่ง

และระยะทางจากจุดที่ส่งสัญญาณคลื่นจนถึงจุดที่เกิดการลัดวงจรโดยอ้างอิงจาก busbar R ดังสมการที่ 2.6

$$X_r = \frac{t_{r2} - t_{r1}}{2} v \tag{2.11}$$

X_r คือ ระยะทางจาก busbar R ถึงจุดที่เกิดการลัดวงจร

t_{r1} คือ เวลาแรกเริ่มที่คลื่นใช้ในการเดินทางจาก busbar R ถึงจุดที่เกิดการลัดวงจร

t_{r2} คือ เวลาสิ้นสุดที่คลื่นใช้ในการเดินทางจาก busbar R ถึงจุดที่เกิดการลัดวงจร

v คือ ความเร็วของคลื่นเดินทางในสายส่ง

จากสมการข้างต้นสามารถหาจุดลัดวงจรโดยอ้างอิงได้จากทั้ง busbar S และ busbar R

2.9.2 ความเร็วของคลื่นเดินทางภายในสายส่งชนิดต่างๆ

ความเร็วของคลื่นเดินทางผ่านสายส่งประเภทต่างๆนั้นจะขึ้นอยู่กับค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric Constant) ซึ่งเกี่ยวข้องกับคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุนั้น ๆ ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และคุณสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุแต่ละชนิด

Dielectric Material	Dielectric Constant	Time Delay (ns/m)	Velocity Factor	Speed of Light (m/s)
โพลีเอทิลีน (PE)	2.3	5.05	0.66	3×10^8
โฟมโพลีเอทิลีน (FE)	1.3 – 1.6	4.17	0.80	
เทฟลอน (PTFE)	2.07	3.77 – 3.97	0.84 – 0.88	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยจะสามารถคำนวณแฟคเตอร์ของความเร็วคลื่นในสายส่งชนิดต่างๆ (Velocity Factor, VF) จากค่าคงที่ไดอิเล็กทริกได้ดัง สมการที่ 2.12

$$VF = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon}} \tag{2.12}$$

VF คือ แฟคเตอร์ของความเร็วคลื่น

ε คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric Constant)

ซึ่งค่าแฟคเตอร์ของความเร็วของคลื่นในสายส่งจะเป็นเปอร์เซ็นต์เทียบกับค่าความเร็วแสงดังสมการที่ 2.13

$$v = VF \times c \tag{2.13}$$

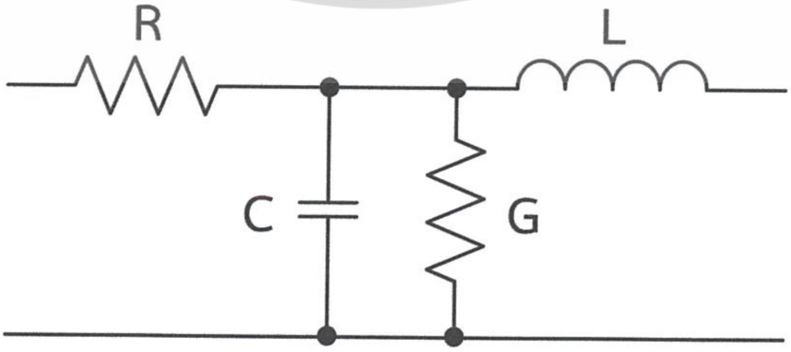
v คือ ความเร็วคลื่นในสายส่ง

VF คือ แฟคเตอร์ของความเร็วคลื่น

c คือ ความเร็วแสงที่เคลื่อนที่ในสุญญากาศ (3×10^8 เมตร / วินาที)

2.9.3 วงจรสมมูลและอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายส่ง

สายส่งเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่พิจารณาว่าเป็นอุปกรณ์กระจาย ในการวิเคราะห์สายส่งนั้นจึงแตกต่างจากการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้าของอุปกรณ์ประเภทลัมป์ทั่วไป ในกรณีของอุปกรณ์ประเภทกระจายนี้ แรงดันและกระแส ณ จุดต่าง ๆ บนตัวอุปกรณ์สามารถพิจารณาว่ามีขนาดและเฟสแตกต่างกันได้ อย่างไรก็ตามในการวิเคราะห์นั้นก็จะมีการสร้างวงจรสมมูลแทนด้วยอุปกรณ์ประเภทลัมป์ เมื่อแบ่งส่วนสายส่งออกเป็นช่วงสั้น ๆ ต่อกัน สามารถเขียนวงจรสมมูลของสายส่งแต่ละส่วนด้วยอุปกรณ์ประเภทลัมป์ ซึ่งจะประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำ (L) ต่ออนุกรมซึ่งเกิดจากความเหนี่ยวนำในตัวเส้นลวด ตัวเก็บประจุ (C) ต่อขนานซึ่งเกิดจากโครงสร้างที่มีตัวนำวางขนานกันไปในระยะใกล้ ๆ กัน ตัวต้านทาน (R) ต่ออนุกรมแทนความต้านทานของตัวนำของวัสดุที่ใช้ในสายส่ง และความนำ (G) ต่อขนานแทนความนำของฉนวนที่คั่นระหว่างตัวนำ ซึ่งจะแสดงได้ ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 วงจรสมมูลของสายส่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

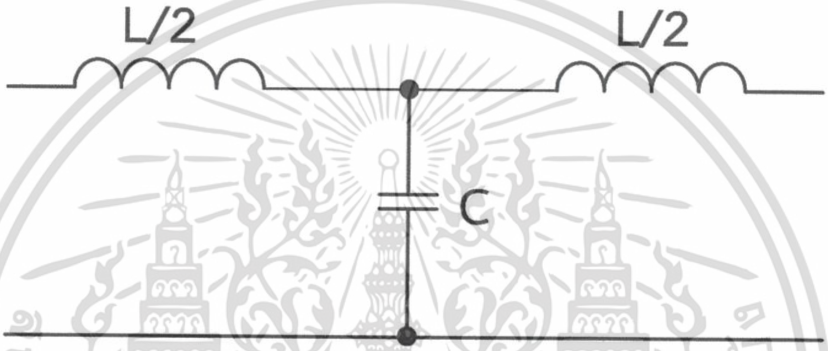
R คือ ความต้านทานต่อหน่วยความยาวตัวนำทั้งสอง

L คือ ความเหนี่ยวนำต่อหน่วยความยาวของตัวนำทั้งสอง

G คือ ความนำต่อหน่วยความยาวของตัวนำทั้งสอง

C คือ ความจุไฟฟ้าต่อหน่วยความยาวของตัวนำทั้งสอง

โดยความต้านทาน (R) ที่แทนการสูญเสียของตัวนำนั้นจะมีค่าน้อย และความนำ (G) ที่แทนการสูญเสียของฉนวนก็มีค่าน้อยเช่นกัน ในการใช้งานหลาย ๆ กรณี ค่าทั้งสองนี้จึงไม่มีนัยสำคัญที่จะคำนึงถึง วงจรสมมูลอย่างง่ายหรือวงจรสมมูลที่ไม่มีการสูญเสียจึงสามารถเขียนได้ ดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 วงจรสมมูลอย่างง่ายของสายส่ง

อิมพีแดนซ์คุณลักษณะ(Characteristic impedance)เป็นค่าประจำสายส่งแต่ละเส้นโดยเกิดจากลักษณะโครงสร้างและวัสดุของสายส่งนั้น ๆ ซึ่งจะมีความสำคัญเมื่อนำสายส่งไปเชื่อมต่อกับเครื่องส่งหรือรับ โดยจะต้องมีค่าเท่ากับอิมพีแดนซ์ขาออกของเครื่องส่งหรืออิมพีแดนซ์ขาเข้าของเครื่องรับเพื่อไม่ให้เกิดการสะท้อนของสัญญาณ จากวงจรสมมูลของสายส่งพิจารณาได้ว่าเป็นรูปแบบ T ต่ออยู่กับอิมพีแดนซ์ค่าหนึ่ง เมื่อสายสายส่งมีความยาวเป็นอนันต์ อิมพีแดนซ์นี้จะเรียกว่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ เมื่อพิจารณาตามรูปวงจรจะได้ว่า

$$Z_0 = \frac{Z_1}{2} + \frac{(\frac{Z_1Z_2}{2}) + Z_0Z_2}{Z_2 + (\frac{Z_2}{2})} \tag{2.14}$$

$$Z_0 = \frac{Z_0Z_2 + (\frac{Z_1^2}{2}) + Z_0Z_1 + (\frac{2Z_1Z_2}{2}) + 2Z_0Z_2}{2[Z_2 + (\frac{Z_1}{2}) + Z_0]} \tag{2.15}$$

$$Z_0^2 = Z_1Z_2 + (\frac{Z_1}{2})^2 \tag{2.16}$$

Z_0 คือ ค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ

Z_1 คือ ค่าความเหนี่ยวนำ

Z_2 คือ ค่าความจุประจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าสายส่งถูกแทนที่ด้วยวงจรสมมูลลักษณะส่วนย่อยของรูปแบบ T เช่นนี้ไปเรื่อย ๆ จนถึงอนันต์ สมการที่ 2.16 จะเปลี่ยนเป็น ดังสมการที่ 2.17

$$Z_0^2 = Z_1 Z_2 \tag{2.17}$$

เมื่อแทนค่า Z_1, Z_2 ด้วยค่าความเหนี่ยวนำและค่าความจุประจุ จะได้ ดังสมการที่ 2.18

$$Z_0 = \sqrt{2\pi fL \times \frac{1}{2\pi fC}} = \sqrt{\frac{L}{C}} \tag{2.18}$$

ดังนั้นค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะจะขึ้นอยู่กับค่าความเหนี่ยวนำและค่าความจุประจุของสายส่ง

2.9.4 การสะท้อนและสัมประสิทธิ์การสะท้อนแรงดัน

เมื่อสายส่งถูกนำไปต่อกับโหลดที่มีอิมพีแดนซ์ Z_L ใด ๆ จะเกิดการสะท้อนของคลื่นหรือสัญญาณกลับไปยังแหล่งกำเนิดตามสายส่ง ซึ่งสัญญาณที่ได้ออกมาจะแตกต่างกันเมื่อมีการเปลี่ยนชนิดหรือขนาดของโหลดอิมพีแดนซ์ โดยจะมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแรงดัน (Rho, ρ) เป็นตัวบ่งบอกถึงขนาดและรูปแบบของสัญญาณเมื่อเทียบระหว่างโหลดอิมพีแดนซ์กับอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ ดังสมการที่ 2.19

$$\rho = \frac{v_L}{v_i} = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \tag{2.19}$$

ρ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแรงดัน

v_L คือ แรงดันของโหลดอิมพีแดนซ์

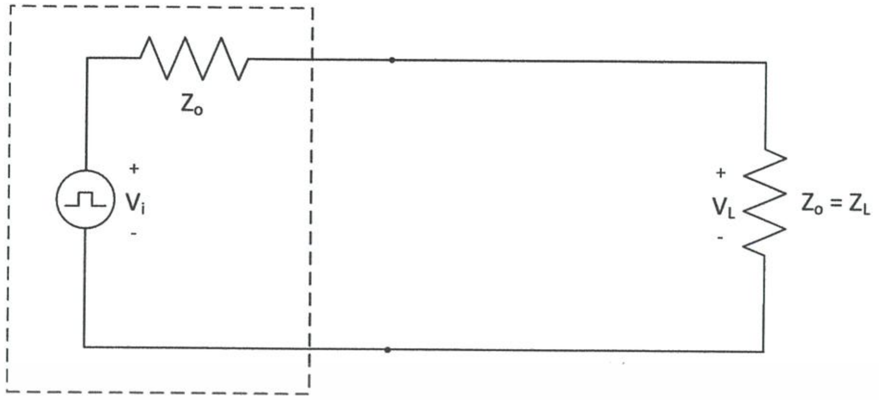
v_i คือ แรงดันของเครื่องส่งคลื่นเดินทาง

Z_L คือ อิมพีแดนซ์ของโหลด

Z_0 คือ อิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายส่งและเครื่องส่งสัญญาณ

เมื่อค่าอิมพีแดนซ์ของโหลดมีค่าเท่ากับอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ ดังรูปที่ 2.17 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแรงดันจะเท่ากับ 0 หรือก็คือคลื่นไม่เกิดการสะท้อน ดังรูปที่ 2.18 ในกรณีเช่นนี้จะเรียกว่าโหลดแมตช์กับสายส่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

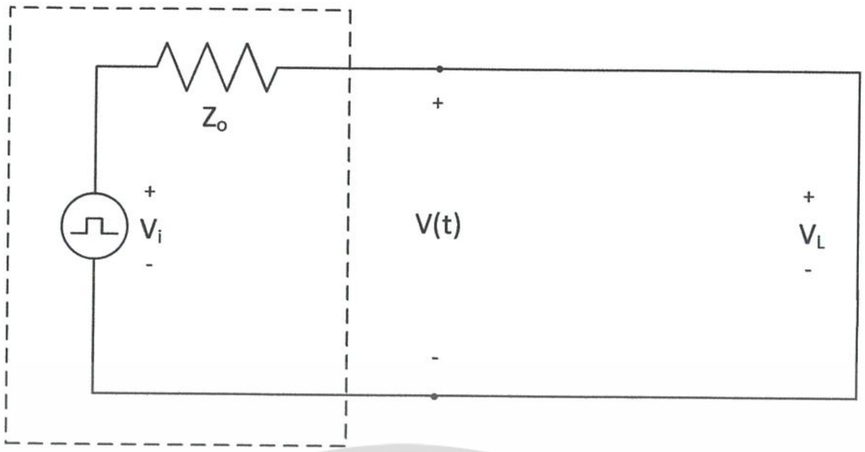


รูปที่ 2.17 วงจรของเครื่องส่งสัญญาณเชื่อมต่อโหลดที่มีอิมพีแดนซ์เท่ากับอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ

รูปที่ 2.18 กราฟการสะท้อนของสัญญาณ เมื่อเครื่องส่งสัญญาณเชื่อมต่อโหลดที่มีอิมพีแดนซ์เท่ากับอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ

เมื่อค่าอิมพีแดนซ์ของโหลดมีค่าเท่ากับ 0 หรือก็คือปิดวงจร ดังรูปที่ 2.19 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแรงดัน จะมีค่าเท่ากับ -1 ซึ่งหมายความว่า คลื่นสะท้อนจะมีขนาดเท่ากับคลื่นที่แหล่งจ่ายส่งเข้าไปในวงจร แต่จะมีทิศทางตรงกันข้ามกับคลื่นที่ส่งเข้าไป ดังรูปที่ 2.20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

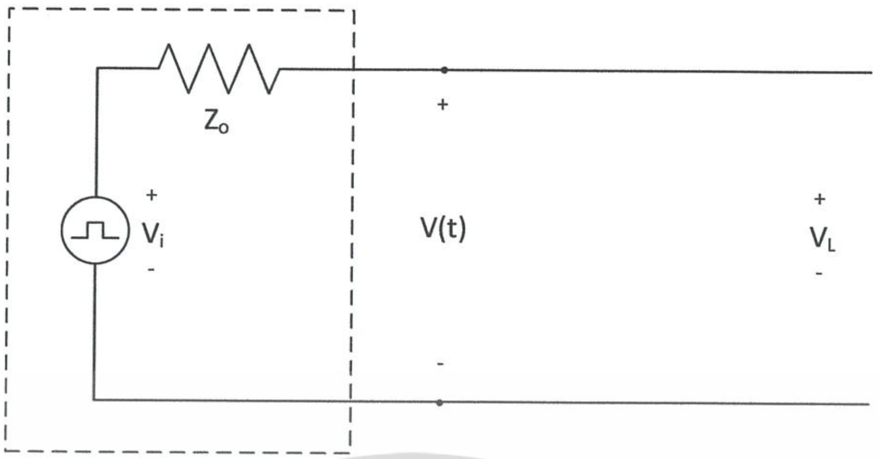


รูปที่ 2.19 วงจรของเครื่องส่งสัญญาณเชื่อมต่อกับสายส่งที่ปิดวงจรไว้

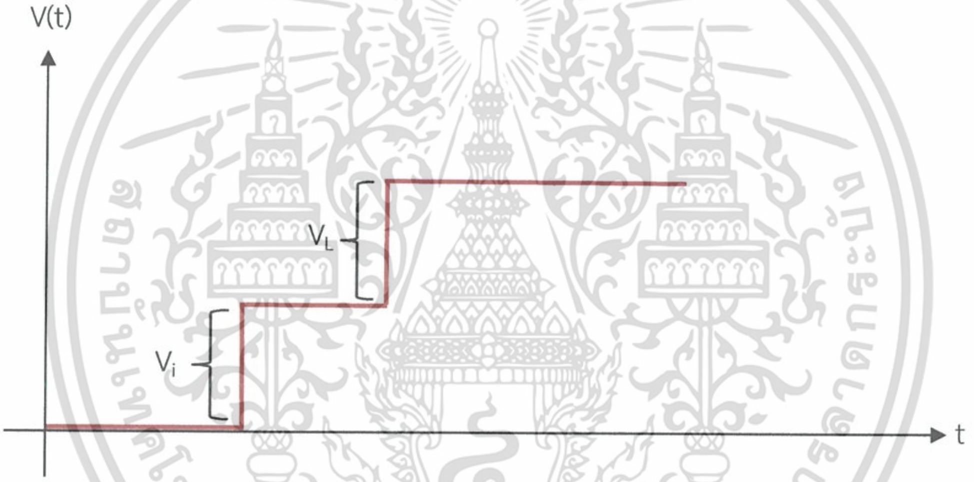
รูปที่ 2.20 กราฟการสะท้อนของสัญญาณ เมื่อเครื่องส่งสัญญาณเชื่อมต่อกับสายส่งที่ปิดวงจรไว้

เมื่อค่าอิมพีแดนซ์ของโหลดมีค่าเท่ากับอนันต์ หรือก็คือเปิดวงจร ดังรูปที่ 2.21 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแรงดัน จะมีค่าเท่ากับ 1 ซึ่งหมายความว่า คลื่นสะท้อนจะมีขนาดเท่ากับคลื่นที่แหล่งจ่ายส่งเข้าไปในวงจร และจะมีทิศทางเดียวกันกับคลื่นที่ส่งเข้าไป อีกนัยหนึ่งคือ คลื่นสะท้อนจะไปเสริมกันกับคลื่นของแรงดันที่ส่งเข้าไป ดังรูปที่ 2.22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



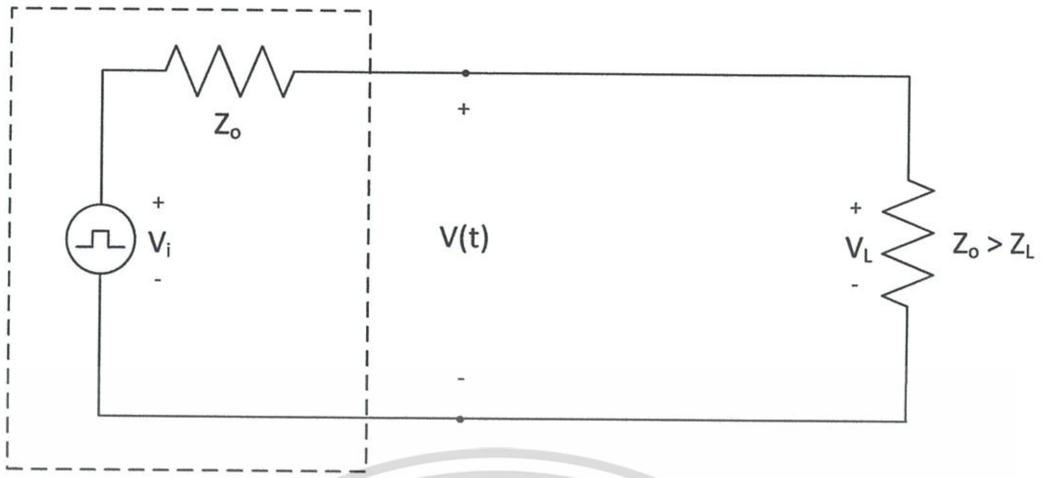
รูปที่ 2.21 วงจรของเครื่องส่งสัญญาณเชื่อมต่อกับสายส่งที่เปิดวงจรไว้



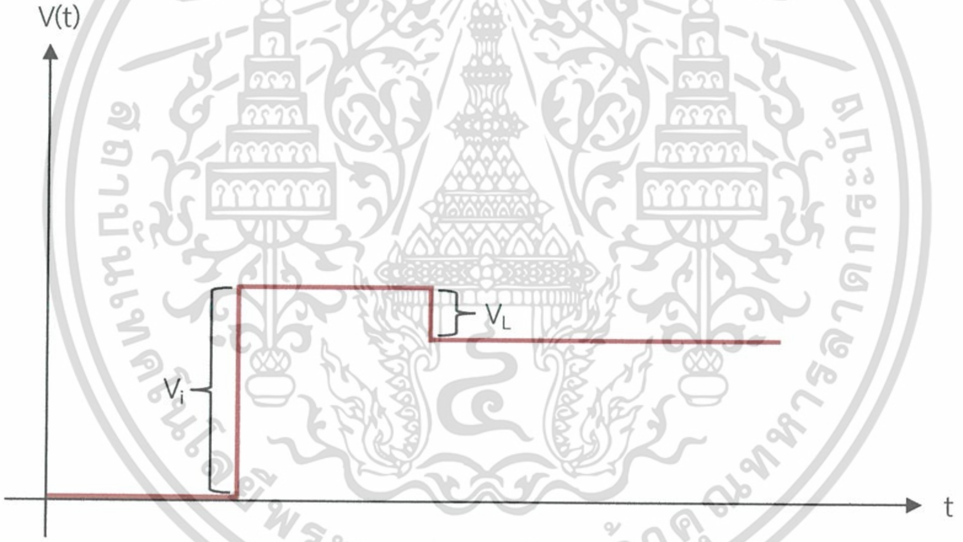
รูปที่ 2.22 กราฟการสะท้อนของสัญญาณ เมื่อเครื่องส่งสัญญาณเชื่อมต่อกับสายส่งที่เปิดวงจรไว้

เมื่อค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะมีค่ามากกว่าค่าอิมพีแดนซ์ของโหลด ดังรูปที่ 2.23 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแรงดันจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง -1 ซึ่งมีค่าเท่ากับ $-\frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0}$ ซึ่งหมายความว่า คลื่นสะท้อนจะมีขนาดน้อยกว่าคลื่นที่แหล่งจ่ายส่งเข้าไปในวงจร และจะมีทิศทางตรงกันข้ามกับคลื่นที่ส่งเข้าไป อีกนัยหนึ่งคือ คลื่นสะท้อนจะไปหักล้างกันกับคลื่นของแรงดันที่ส่งเข้าไป ดังรูปที่ 2.24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



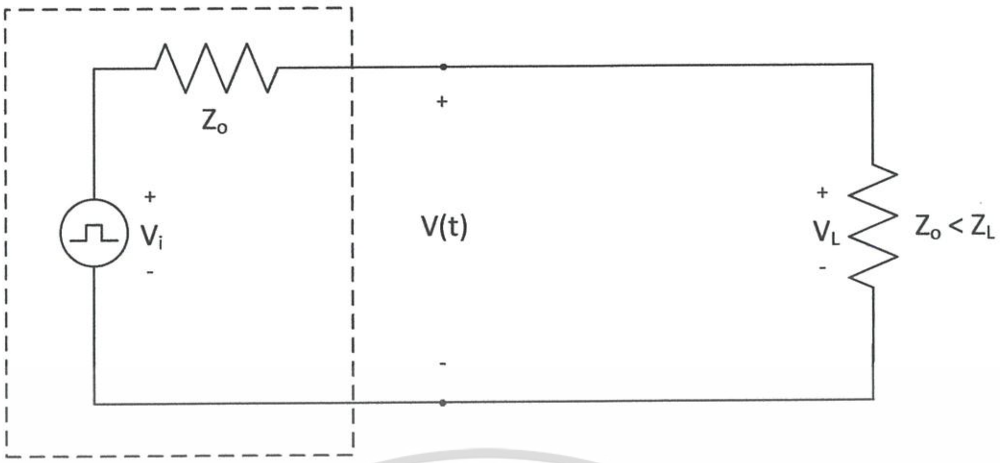
รูปที่ 2.23 วงจรของเครื่องส่งสัญญาณเชื่อมต่อโหลดที่มีอิมพีแดนซ์คุณลักษณะมีค่ามากกว่าค่าอิมพีแดนซ์ของโหลด



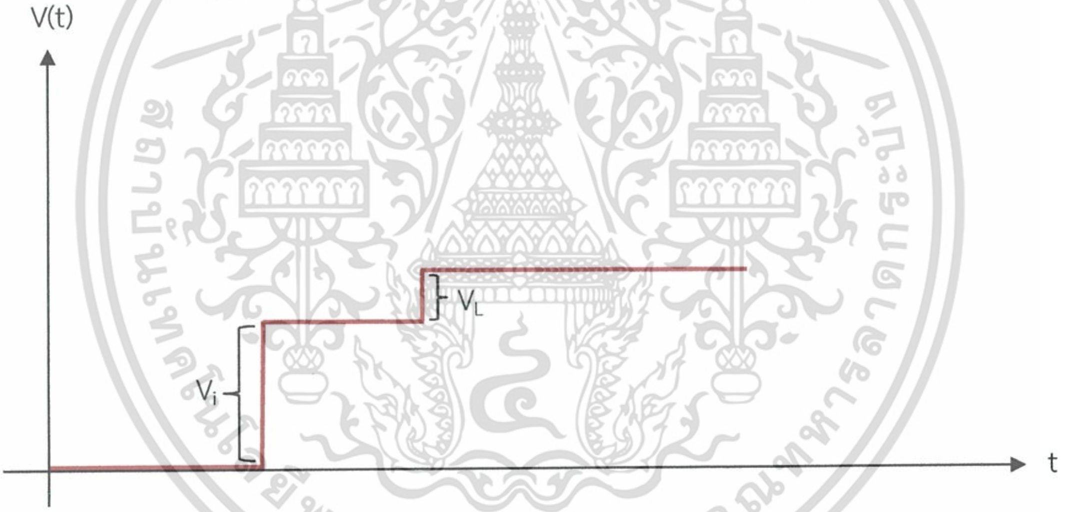
รูปที่ 2.24 กราฟการสะท้อนของสัญญาณ เมื่ออิมพีแดนซ์คุณลักษณะมีค่ามากกว่าค่าอิมพีแดนซ์ของโหลด

เมื่อค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะมีค่าน้อยกว่าอิมพีแดนซ์ของโหลด ดังรูปที่ 2.25 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแรงดันจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0}$ หมายความว่า คลื่นสะท้อนจะมีขนาดน้อยกว่าคลื่นที่แหล่งจ่ายส่งเข้าไปในวงจร และจะมีทิศทางเดียวกันกับคลื่นที่ส่งเข้าไป อีกนัยหนึ่งคือ คลื่นสะท้อนจะไปเสริมกันกับคลื่นของแรงดันที่ส่งเข้าไป ดังรูปที่ 2.26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



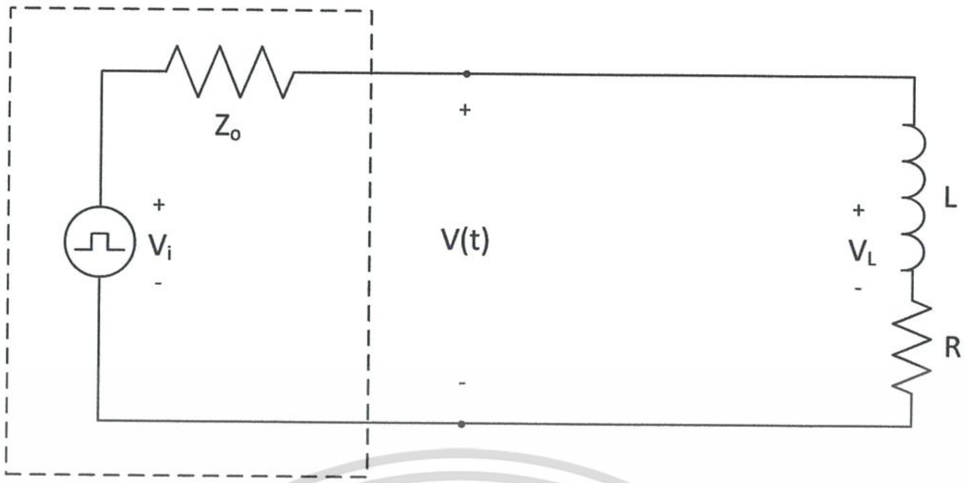
รูปที่ 2.25 วงจรของเครื่องส่งสัญญาณเชื่อมต่อโหลดที่มีอิมพีแดนซ์คุณลักษณะมีค่าน้อยกว่าค่าอิมพีแดนซ์ของโหลด



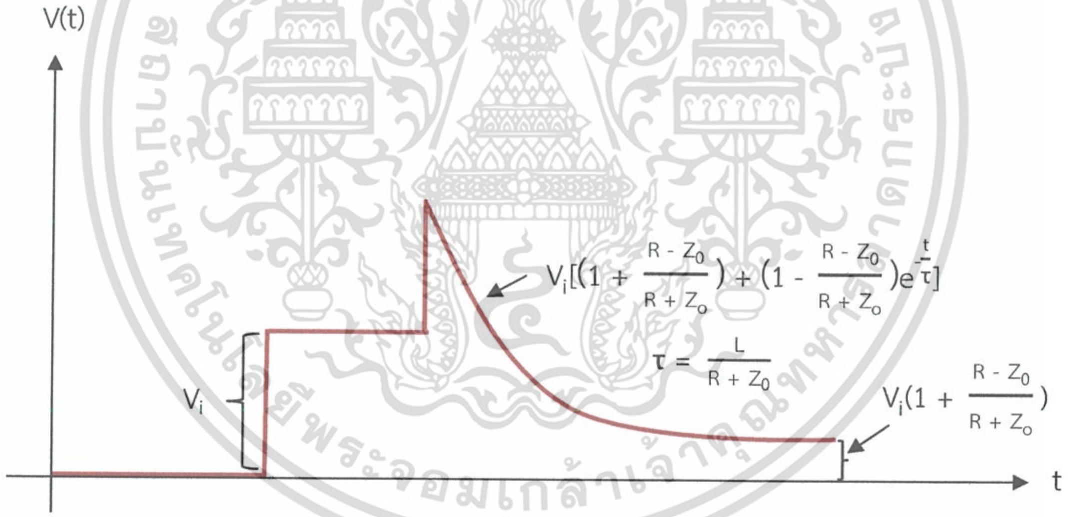
รูปที่ 2.26 กราฟการสะท้อนของสัญญาณ เมื่ออิมพีแดนซ์คุณลักษณะมีค่าน้อยกว่าค่าอิมพีแดนซ์ของโหลด

เมื่อค่าอิมพีแดนซ์ของโหลดเป็นลักษณะของตัวเหนี่ยวนำ (L) และตัวต้านทาน (R) ต่ออนุกรมกัน ดังรูปที่ 2.27 จะเกิดค่าคงที่ของเวลาขึ้น และจะมีลักษณะของคลื่นสะท้อน ดังรูปที่ 2.28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



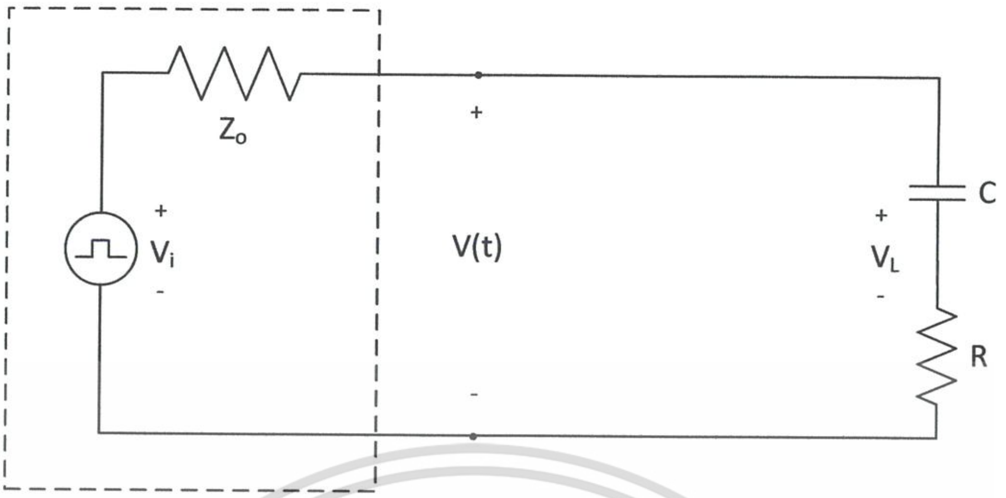
รูปที่ 2.27 วงจรของเครื่องส่งสัญญาณเชื่อมต่อโหลดที่เป็นลักษณะของตัวเหนี่ยวนำ (L) และตัวต้านทาน (R) ต่ออนุกรมกัน



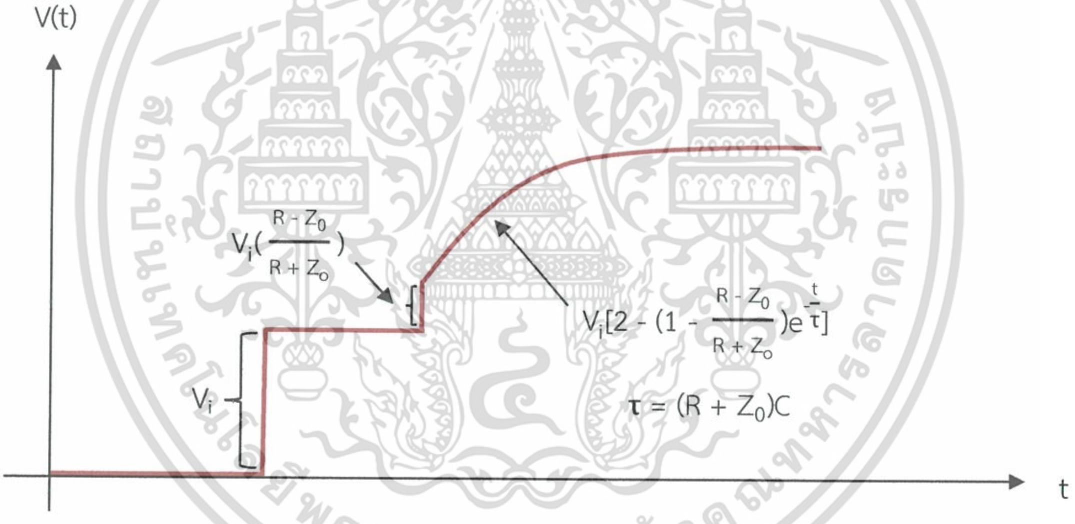
รูปที่ 2.28 กราฟการสะท้อนของสัญญาณ เมื่อเชื่อมต่อโหลดที่เป็นลักษณะของตัวเหนี่ยวนำ (L) และตัวต้านทาน (R) ต่ออนุกรมกัน

เมื่อค่าอิมพีแดนซ์ของโหลด เป็นลักษณะของตัวเก็บประจุ (C) และตัวต้านทาน (R) ต่ออนุกรมกัน ดังรูปที่ 2.29 จะเกิดค่าคงที่ของเวลาขึ้น และจะมีลักษณะของคลื่นสะท้อน ดังรูปที่ 2.30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



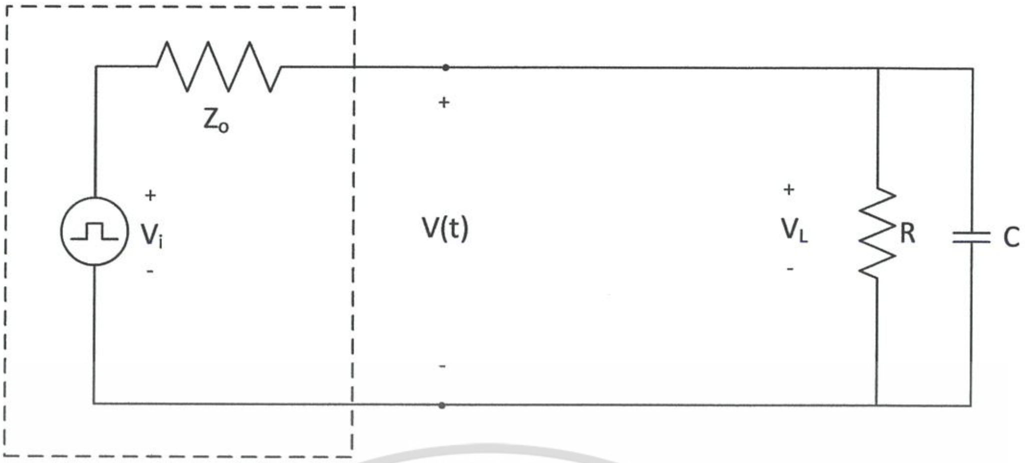
รูปที่ 2.29 วงจรของเครื่องส่งสัญญาณเชื่อมต่อโหลดที่เป็นลักษณะของตัวเก็บประจุ (C) และตัวต้านทาน (R) ต่ออนุกรมกัน



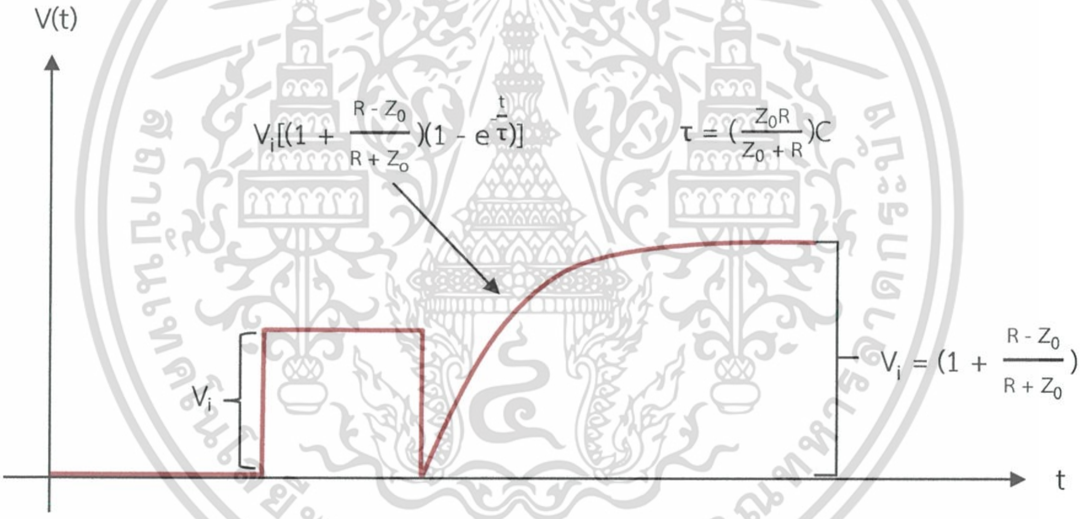
รูปที่ 2.30 กราฟการสะท้อนของสัญญาณ เมื่อเชื่อมต่อโหลดที่เป็นลักษณะของตัวเก็บประจุ (C) และตัวต้านทาน (R) ต่ออนุกรมกัน

เมื่อค่าอิมพีแดนซ์ของโหลด เป็นลักษณะของตัวเก็บประจุ (C) และตัวต้านทาน (R) ต่อขนานกัน ดังรูปที่ 2.31 จะเกิดค่าคงที่ของเวลาขึ้น และจะมีลักษณะของคลื่นสะท้อน ดังรูปที่ 2.32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.31 วงจรของเครื่องส่งสัญญาณเชื่อมต่อโหลดที่เป็นลักษณะของตัวเก็บประจุ (C) และตัวต้านทาน (R) ต่อขนานกัน



รูปที่ 2.32 กราฟการสะท้อนของสัญญาณ เมื่อเชื่อมต่อโหลดที่เป็นลักษณะของตัวเก็บประจุ (C) และตัวต้านทาน (R) ต่อขนานกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10 ระบบมอนิเตอร์ IED และครือข่ายในสถานีไฟฟ้าย่อยอัตโนมัติตามมาตรฐาน IEC61850

สถานีไฟฟ้าย่อยอัตโนมัติคือ ระบบอัตโนมัติที่อนุญาตให้สถานีย่อยสามารถทำงานได้อย่างอัตโนมัติเมื่อเกิดเหตุการณ์ที่ไม่ปกติ รวมทั้งสามารถส่งข้อมูลให้ระบบอื่น ๆ เพื่อใช้ในการพิจารณาในการวางแผนการจ่ายพลังงานไฟฟ้าและการบำรุงรักษา ดังนั้นการที่จะทำให้ระบบทำงานได้อย่างอัตโนมัติ และปรับปรุงข้อมูลต่าง ๆ อยู่ตลอดเวลานั้น จะต้องมีการแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในระบบ โดยอาจใช้วิธีการสื่อสารข้อมูลหลากหลายชนิดเช่น ระบบ SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition), RTU (Remote Terminal Unit), ระบบควบคุมและป้องกัน BCU (Bay Control Unit) ทำงานร่วมกันโดยอาศัยเทคโนโลยีการสื่อสารเพื่อแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างกัน

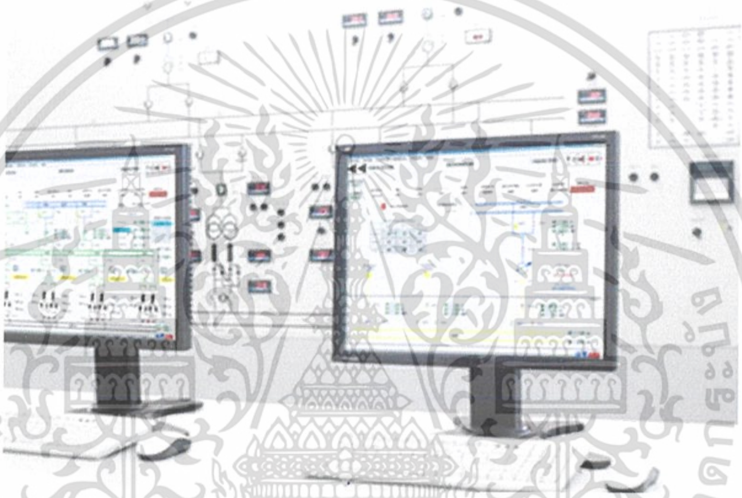
IEC61850 เป็นมาตรฐานในการกำหนดวิธีการสื่อสารภายในสถานีไฟฟ้าย่อย โดยเทคโนโลยีสื่อสารหลักที่ใช้ในปัจจุบันของ IEC61850 คือ การประยุกต์ใช้การสื่อสารแบบอีเทอร์เนต (Ethernet) และ TCP/IP (Transmission Control Protocol/Internet Protocol) โดยเน้นไปที่ความเร็วและคุณภาพในการบริการ (QOS: Quality of Service) โดยหนึ่งในการประยุกต์ใช้คือ การส่งข้อมูลเป็นแบบเรียลไทม์ โดยจะใช้วิธีการจัดระดับความสำคัญของเมสเซจข้อมูล ระบบงาน หรือวงจรควบคุมการป้องกันที่เชื่อมต่อระหว่างกันโดยใช้สายทองแดง ฮาร์ไวล์ หรือ ใช้การสื่อสารข้อมูลโดยวีการจำเพาะก็สามารถเปลี่ยนมาใช้มาตรฐาน IEC61850 แทนได้เช่น การประยุกต์ใช้เมสเซจ GOOSE (Generic Object Oriented Substation Event) ที่มีความเร็วในการส่งข้อมูลสูง เพื่อที่จะสามารถรองรับกับฟังก์ชั่นสำคัญทั้งหมดในสถานีไฟฟ้าย่อยได้ ดังนั้นจึงควรมีการบำรุงรักษาตรวจสอบให้ระบบสถานไฟฟ้าย่อยอัตโนมัติสามารถทำงานได้อย่างปกติเสมอ

เพื่อปรับปรุงประสิทธิผลการจำหน่ายพลังงานไฟฟ้า และลดค่าใช้จ่ายในด้านการดำเนินการ สถานีไฟฟ้าย่อยหลายแห่งมีความจำเป็นที่จะต้องนำหลักการสถานีไฟฟ้าย่อยที่ไม่มีเจ้าหน้าที่ประจำ หรืออันแมนซับสเตชั่น (Unmanned Substation) และ IEC61850 มาประยุกต์ใช้ในสถานีไฟฟ้าย่อย อย่างไรก็ตาม ถ้าระบบสถานีไฟฟ้าย่อยอัตโนมัติไม่มีระบบคอยตรวจสอบการทำงานของ IED (Intelligent Electronic Device) และเครือข่าย ซึ่ง IED คืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทุกชนิดที่สารถสื่อสารได้ในระบบสถานีไฟฟ้าย่อยอัตโนมัติรวมไปถึงอีเทอร์สวิตช์ ในกรณีที่ไม่มีศูนย์เฝ้าระวังดังกล่าว ศูนย์ SCADA ก็อาจไม่รับทราบข้อมูลบางอย่างได้ เช่นการเสื่อมประสิทธิภาพในการสื่อสารของอุปกรณ์เครือข่าย, IED หรือกระทั่งมีการทำงานล้มเหลวเกิดขึ้น ดังนั้นเพื่อลดผลกระทบจากเหตุการณ์ที่ไม่ปกติดังกล่าว ระบบมอนิเตอร์ IED และเครือข่ายจึงได้ถูกออกแบบ และพัฒนาบนเงื่อนไขที่ใช้งบประมาณอย่างเหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10.1 ระบบมอนิเตอร์ IED และเครือข่าย

ระบบมอนิเตอร์ IED และเครือข่ายคือ ซอฟต์แวร์ที่ติดตั้งบนคอมพิวเตอร์ทั่วไป โดยที่คอมพิวเตอร์นั้นจะถูกติดตั้งที่สถานีย่อยและศูนย์บำรุงรักษาระบบไฟฟ้า ระบบมอนิเตอร์ IED และเครือข่ายจะประยุกต์ใช้คุณสมบัติของโปรโตคอลสื่อสาร เพื่อดึงข้อมูล ตรวจสอบ และวิเคราะห์ว่าอุปกรณ์หรือระบบเครือข่ายสื่อสารทำงานเป็นปกติหรือไม่ การทำงานทั่วไปของระบบมอนิเตอร์ IED และเครือข่ายคือการเฝ้าระวังอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะที่เกี่ยวกับสถานะการทำงานของ IED และอุปกรณ์เครือข่าย รวมทั้งทำการแจ้งสัญญาณเตือนไปยังผู้ที่เกี่ยวข้องถ้าระบบประเมินสถานการณ์แล้วว่าอาจมีผลกระทบต่อการทำงานของสถานีไฟฟ้าย่อยอัตโนมัติ



รูปที่ 2.33 ระบบการส่งและสื่อสารข้อมูลตามมาตรฐาน IEC61850

ระบบมอนิเตอร์ IED และเครือข่ายนั้นประกอบด้วย 3 ส่วนหลักนั่นคือ คอมพิวเตอร์ ระบบสื่อสาร และซอฟต์แวร์ประยุกต์ที่สนับสนุนหลายโปรโตคอลสื่อสารและอุตสาหกรรม

2.10.1.1 คอมพิวเตอร์

ในระบบมอนิเตอร์ IED และเครือข่ายจะประกอบด้วยคอมพิวเตอร์อยู่สองประเภท คอมพิวเตอร์ประเภทแรกคือ คอมพิวเตอร์ที่ศูนย์บำรุงรักษาระบบไฟฟ้าซึ่งจะเป็นคอมพิวเตอร์กลางคอยเฝ้าระวังตรวจสอบอุปกรณ์เครือข่าย อุปกรณ์ IED ของทุก ๆ สถานีย่อยผ่านคอมพิวเตอร์ประจำสถานีย่อย คอมพิวเตอร์กลางจะมีการติดตั้งซอฟต์แวร์ที่เรียกว่า INMS Manager (IED and Network Monitoring System) สำหรับรวบรวมข้อมูลจากคอมพิวเตอร์ที่ประมวลผลในแต่ละสถานีไฟฟ้าย่อยโดยใช้สายใยแก้วนำแสงเป็นสื่อสัญญาณหลัก เนื่องจากโดยทั่วไปการไฟฟ้าจะมีโครงข่ายสายใยแก้วนำแสงเป็นโครงสร้างพื้นฐานขององค์กรอยู่แล้ว อย่างไรก็ตามระบบมอนิเตอร์ IED และเครือข่ายจะใช้จำนวนคอร์ของสายใยแก้วนำแสงให้คุ้มค่าที่สุดโดยการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีแบบอีเทอร์เน็ต และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรโตคอล TCP/IP เพื่อให้การส่งข้อมูลในแต่ละสถานีสามารถใช้สายใยแก้วนำแสงร่วมกันได้ อีกทั้งเทคโนโลยีอีเทอร์เนต และ TCP/IP นั้นเป็นเทคโนโลยีที่ได้รับการพิสูจน์และใช้กันอย่างแพร่หลาย และยังอนุญาตให้เทคโนโลยีอื่นใช้งานร่วมกันได้ แต่ต้องมีการติดตั้งอุปกรณ์ประเภทมีเดียคอนเวอร์เตอร์ (Media Converter) สำหรับเปลี่ยนสายสัญญาณสายทองแดงให้เป็นสายสัญญาณใยแก้วนำแสง นั่นหมายความว่าคอมพิวเตอร์สามารถใช้สาย UTP (Unshieded Twisted Pair) ได้โดยตรงโดยไม่มีค่าใช้จ่ายเพิ่มเติมมาก คอมพิวเตอร์ประเภทที่สอง คือคอมพิวเตอร์สถานีไฟฟ้าย่อย ซึ่งเป็นคอมพิวเตอร์ทั่วไปเช่นเดียวกับคอมพิวเตอร์กลาง แต่ติดตั้งซอฟต์แวร์ที่มีชื่อว่า INMS Agent คอมพิวเตอร์สถานีไฟฟ้าย่อยจะมีความสามารถในการสื่อสาร และตรวจสอบ IED และอีเทอร์เน็ตสวิตช์ของระบบสถานีไฟฟ้าย่อยอัตโนมัติ ข้อมูลที่ได้จาก IED และอีเทอร์เน็ตสวิตช์จะถูกนำมาวิเคราะห์ และส่งผลลัพธ์ไปให้คอมพิวเตอร์กลางที่ศูนย์บำรุงรักษาระบบไฟฟ้า หรือส่งผลให้สเตชั่นเซิร์ฟเวอร์ (Station Server) ของระบบสถานีไฟฟ้าย่อยอัตโนมัติ เพื่อส่งต่อให้ระบบ SCADA หรือแจ้งเตือนโดยตรงไปให้พนักงานบำรุงรักษาโดยผ่านข้อความ SMS หรืออีเมล์ เมื่อมีเหตุการณ์ผิดปกติเกิดขึ้น

2.10.1.2 การสื่อสารในระบบมอนิเตอร์ IED และเครือข่าย

ระบบมอนิเตอร์ IED และเครือข่ายนั้นสนับสนุนโปรโตคอลหลากหลายชนิด เพื่อที่จะสามารถมอนิเตอร์ IED และอีเทอร์เน็ตได้หลากหลายวิธีการ ดังนั้นระบบมอนิเตอร์ IED และเครือข่ายจึงมีความจำเป็นต้องมีจุดเชื่อมต่อเข้ากับระบบสถานีย่อยอัตโนมัติ หรือแม้กระทั่งเพื่อตรวจสอบสถานะของระบบตัวระบบเองด้วย โดยปกติแล้วสำหรับระบบมอนิเตอร์ IED และเครือข่ายสามารถจำแนกการสื่อสารได้สองประเภทดังต่อไปนี้

2.10.1.2.1 การสื่อสารภายในระบบมอนิเตอร์ IED และเครือข่าย

การสื่อสารภายในนั้นหมายถึงทุก ๆ การสื่อสารภายในตัวระบบยกเว้นการสื่อสารโดยตรงกับอุปกรณ์ทุกประเภทของระบบสถานีย่อยอัตโนมัติ โดยคอมพิวเตอร์ที่ติดตั้ง INMS Agent นั้นมีความสำคัญมากในการสื่อสารประเภทนี้อันเนื่องจากต้องมีส่วนเกี่ยวข้องทุกหน้าที่รวมทั้งหน้าที่ในการสื่อสาร

2.10.1.2.2 การสื่อสารระหว่างระบบสถานีย่อยอัตโนมัติ และระบบมอนิเตอร์ IED และเครือข่าย

INMS Agent นั้นมีหน้าที่หลักอย่างหนึ่งคือติดต่อสื่อสารกับ IED ในระบบสถานีย่อยอัตโนมัติ แต่เนื่องจากระบบสถานีย่อยอัตโนมัตินั้นใช้เทคโนโลยีอีเทอร์เน็ต และ TCP/IP ดังนั้นคอมพิวเตอร์สถานีก็ต้องการพอร์ตอีเทอร์เน็ตอย่างน้อยหนึ่งพอร์ตสำหรับเชื่อมต่อเข้ากับระบบเครือข่ายของระบบสถานีย่อยอัตโนมัติ หลังจากนั้นก็ใช้โปรโตคอลต่าง ๆ ตรวจสอบอุปกรณ์ IED และเครือข่าย

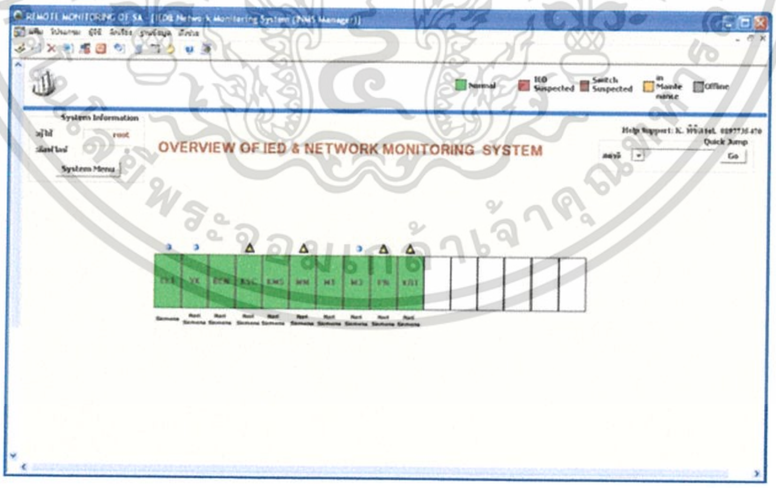
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10.1.3 ซอฟต์แวร์สำหรับระบบมอนิเตอร์ IED และเครือข่าย

สำหรับระบบมอนิเตอร์ IED และเครือข่ายจะมีโปรแกรมประยุกต์ หรือซอฟต์แวร์อยู่สองประเภทหลักคือ INMS Manager และ INMS Agent ซึ่งได้ถูกพัฒนาบนระบบปฏิบัติการไมโครซอฟต์วินโดวส์ อันเนื่องจากสามารถพัฒนาได้ง่ายสุดเนื่องจากมีตัวอย่างโปรแกรมและการสนับสนุนสูงสุดบนอินเตอร์เน็ต

2.10.1.3.1 INMS Manager

ซอฟต์แวร์ INMS Manager จะถูกติดตั้งบนคอมพิวเตอร์ที่ศูนย์บำรุงรักษาระบบไฟฟ้าโดยจะรับข้อมูลต่าง ๆ มาจากซอฟต์แวร์ INMS Agents อีกต่อหนึ่ง INMS Manager สามารถพัฒนาได้เองด้วยโปรแกรมไมโครวิชวลสตูดิโอและ INMS Manager สามารถสื่อสารกับหลาย INMS Agent ในเวลาเดียวกัน ผู้ใช้งานยังสามารถตั้งค่าเวลาในการส่งข้อมูลหรือโพลลิ่ง จำนวนรอบในการพิจารณาว่า INMS Agent ผิดปกติหรือไม่ รวมทั้งพารามิเตอร์ที่เกี่ยวกับ TCP/IP เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการทำงานดีที่สุด อีกประการหนึ่งก็คือรูปแบบของ GUI (Graphical User Interface) นั้นได้ถูกออกแบบมาให้ใช้งานได้ง่ายดังรูปที่ 2.34 รูปแบบการแสดงผลหลักจะประกอบด้วยแถวสัญลักษณ์สี่เหลี่ยมที่มีรายชื่อสถานีย่อยกำกับ ผู้ใช้งานสามารถเข้าไปดูรายละเอียดเกี่ยวกับการแจ้งเตือนในแต่ละสถานีไฟฟ้าย่อยโดยการคลิกที่สัญลักษณ์ตัวแทนสถานีย่อยที่ต้องการ ยิ่งกว่านั้นยังมีการแจ้งเตือนด้วยระบบสีต่าง ๆ พร้อมกับการกระพริบเตือน เสียง อีเมล์ SMS ถ้ามีเหตุการณ์ผิดปกติเกิดขึ้น



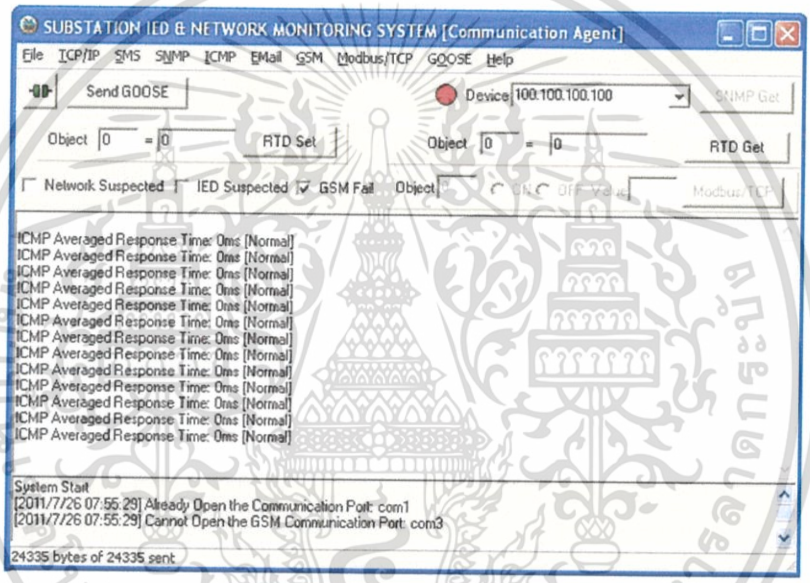
รูปที่ 2.34 รูปแบบ GUI ของ INMS Manager

2.10.1.3.2 INMS Agent

ซอฟต์แวร์ INMS Agent ถูกพัฒนาด้วยโปรแกรม Borland C++builder เนื่องจากภาษา C++ ง่ายในการจัดการข้อมูลระดับบิต ตัว INMS Agent นั้นสามารถเข้าถึงข้อมูลเกี่ยวกับการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สื่อสารของอุปกรณ์ IED ในระบบสถานีไฟฟ้าย่อยอัตโนมัติด้วยโปรโตคอล SNMP (Simple Network Management Protocol) และยังสามารถตรวจสอบสถานะการทำงานของอุปกรณ์โดยการเปรียบเทียบค่าสถิติของเวลาการตอบสนองของแต่ละ IED ด้วยโปรโตคอล ICMP (Internet Control Message Protocol) INMS Agent ยังสามารถส่งผลการวิเคราะห์ไปยังระบบสถานีย่อยอัตโนมัติโดยใช้โปรโตคอล Modbus/TCP หรือเมสเซจ GOOSE ได้ แต่ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความสามารถของระบบสถานีย่อยอัตโนมัติที่จัดซื้อ INMS Agent ยังมี GUI ขนาดเล็กสำหรับการทำวิเคราะห์โดยพนักงานบำรุงรักษาดังรูปที่ 2.35 อีกประการหนึ่ง INMS Agent สามารถส่งการแจ้งเตือนให้พนักงานบำรุงรักษาผ่านอีเมล์ และ SMS เมื่อมีเหตุการณ์ผิดปกติได้เช่นกัน



รูปที่ 2.35 รูปแบบ GUI ของ INMS Agent

2.10.1.4 การสื่อสารระหว่าง INMS Agent และ IED สำหรับวิเคราะห์ประสิทธิภาพการสื่อสาร

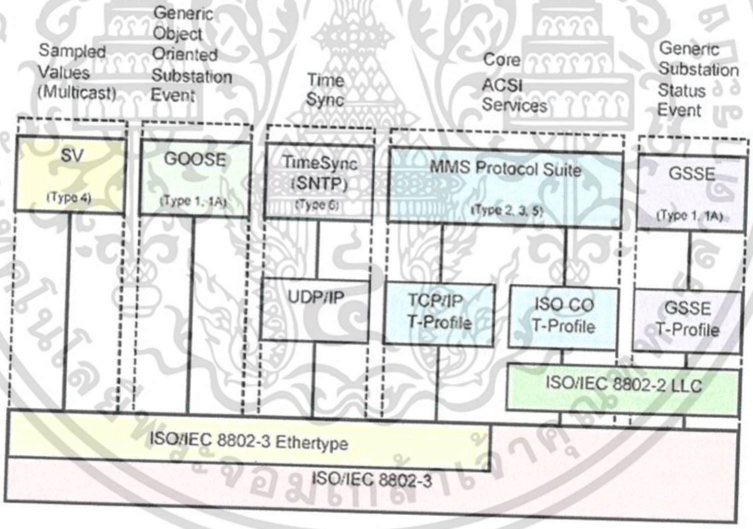
หนึ่งในวิธีการตรวจสอบประสิทธิภาพการสื่อสารก็คือ การใช้ฟังก์ชั่น ICMP (Internet Control Message Protocol) ในไฟล์ icmp.dll ซึ่งมีมาให้อยู่แล้วในระบบปฏิบัติการไมโครซอฟต์วินโดวส์ โปรโตคอล ICMP นั้นเป็นหนึ่งโปรโตคอลในชุดโปรโตคอล TCP/IP ที่มีไว้สำหรับรายงานความผิดพลาด และข้อมูลที่มีประโยชน์ในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพและการทำงานของเครือข่าย สิ่งสำคัญคือโปรโตคอล ICMP นั้นสามารถคำนวณค่าเวลาการตอบสนองของการสื่อสารโดยการใช้เฟรมที่มีขนาดเล็กและมีฟังก์ชั่นที่ใช้เวลาในการประมวลต่ำจึงสามารถใช้เป็นที่อ้างอิงถึงประสิทธิภาพของเวลาการตอบสนองของโปรโตคอลอื่น ๆ ได้ วิธีการคำนวณ หรือวิเคราะห์นั้นก็ไม่ยากโดยจะใช้เวลาการตอบสนองของเมสเซจ ICMP ล่าสุดของแต่ละ IED มาทำการเปรียบเทียบกับค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทางสถิติที่เก็บไว้ก่อนตอนการทำคอนมิสชั่นนิ่งแล้วพิจารณาว่าอุปกรณ์ IED นั้นยังคงทำงานเป็นปกติหรือไม่ อย่างไรก็ตามการส่งเมสเซจ ICMP มากเกินไปอาจจะไปรบกวนการทำงานปกติของระบบสถานีไฟฟ้าย่อยอัตโนมัติได้ ดังนั้นช่วงรอบในการตรวจสอบโดย ICMP ควรมีความเหมาะสม

2.10.1.5 การสื่อสารระหว่าง INMS Agent และ IED ของสถานีไฟฟ้าย่อยอัตโนมัติเพื่อส่งการแจ้งเตือน

ในสถานีไฟฟ้าย่อยอันแมนที่ไม่มีช่างไฟฟ้าประจำ โดยกฎพื้นฐานแล้ว ทุก ๆ การแจ้งเตือนต้องถูกรายงานไปยังศูนย์ SCADA ผ่านคอมมิวนิเคชั่นเกตเวย์ (Communication Gateway) ของสถานีไฟฟ้าย่อยอัตโนมัติ เพื่อสนับสนุนความต้องการนี้ ตัว INMS Agent ต้องติดต่อสื่อสารผ่านระบบสถานีไฟฟ้าย่อยอัตโนมัติเพื่อส่งการแจ้งเตือนไปยังศูนย์ SCADA ให้ได้ ในกรณีที่สเตชั่นเซิร์ฟเวอร์ของสถานีย่อยอัตโนมัติมีโปรแกรม SMNP Manager ภายในตัวอยู่แล้ว ระบบสถานีไฟฟ้าย่อยอัตโนมัติสามารถดึงข้อมูลที่ต้องการโดยโปรโตคอล SNMP จาก IED/อีเทอร์เน็ตสวิตช์ รวมทั้งข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์จาก INMS Agent หลังจากนั้นก็ส่งต่อให้ศูนย์สั่งการ อย่างไรก็ตามถ้าสเตชั่นเซิร์ฟเวอร์ไม่มี SMNP Manager ภายในตัวก็ยังมีเทคนิคที่จะแนะนำคือ



รูปที่ 2.36 กลไกการส่งข้อมูลของ IEC61850

2.10.1.5.1 การใช้เมสเซจ GOOSE

เมสเซจ GOOSE เป็นหนึ่งในกลไกการส่งข้อมูลของ IEC61850 ซึ่งเป็นวิธีการส่งข้อมูลที่ง่าย มีทิศทางเดียว เน้นไปที่ความเร็วในการส่งข้อมูลเป็นหลัก ซึ่งจะสามารถสร้างเมสเซจ GOOSE โดยใช้ไดรฟ์เวอร์ NDIS (Network Driver Interface Specification) การใช้ไดรฟ์เวอร์ NDIS มีจุดประสงค์เพื่อตัดชั้นโปรโตคอล TCP/IP ออก หลีกหนีการเติมหมายเลข MAC อัตโนมัติโดยระบบปฏิบัติการ และด้วยไดรฟ์เวอร์ NDIS ทำให้ IMNS Agent สามารถส่งการแจ้งเตือนด้วยเมสเซจ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

GOOSE ไปยัง IED หลังจากนั้นก็ให้สเตชั่นเซิร์ฟเวอร์ของระบบสถานีไฟฟ้าย่อยอัตโนมัติทำการดึงการแจ้งเตือนจาก IED ตัวดังกล่าวด้วยเมสเซจ MMS (Manufacturing Message Specification) อีกทีหนึ่ง ซึ่งเมสเซจ MMS เป็นอีกกลไกการส่งข้อมูลของ IEC61850 สิ่งที่ยากของการใช้เมสเซจ GOOSE ก็คือ การพัฒนา INMS Agent ให้สามารถสนับสนุนภาษา SCL (Substation Configuration Language) ซึ่งเป็นภาษาในการทำคอนฟิกูเรชั่นของ IEC61850 อย่างไรก็ตามยังมีสองเทคนิคที่สนับสนุนการใช้เมสเซจ GOOSE โดยไม่จำเป็นต้องพัฒนาฟังก์ชั่นสนับสนุน SCL ในตัว INMS Agent ดังต่อไปนี้

```
<Substation Ref="">
   <VoltageLevel Ref="E1">
      <Bay Ref="Q1">
         <Bfunction Ref="">
            <Device Ref="QA1" Type="CBR">
               <Connection NodeRef="L1"/>
               <LNode Ref="1"
LNClass="CSWI"/>
            </Device>
            <Device Ref="QB1" Type="DIS">
               <Connection NodeRef="L1"/>
               <LNode Ref="2"
LNClass="CSWI"/>
            </Device>
         </Bfunction>
      </Bay>
   </VoltageLevel>
</Substation>
```

Described is a substation with the **bay E1Q1**, the **Circuit breaker QA1** and the **Isolator QB1**, both electrical connected in **Connection Node L1**. The Controller is represented by - **LN CSWI** controls both switches.

รูปที่ 2.37 ตัวอย่างภาษา SCL

- การแก้ไขไฟล์ SCD ของสถานีย่อยอัตโนมัติโดยตรง

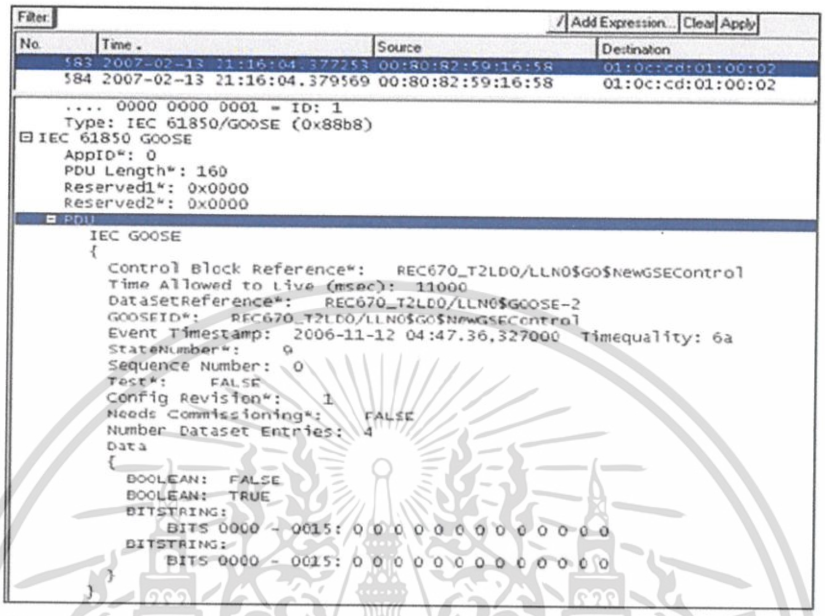
ไฟล์ SCD (Substation Configuration Description) คือไฟล์สุดท้ายที่ได้จากการทำคอนฟิกูเรชั่นทั้งสถานีไฟฟ้าย่อยของระบบสถานีไฟฟ้าย่อยอัตโนมัติ ดังนั้นเนื้อหาบางส่วนของไฟล์ SCD จะอธิบายคุณสมบัติอุปกรณ์ และการแมปปิ้ง (Mapping) ข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ ดังนั้นด้วยเทคนิคนี้จำเป็นต้องมีพนักงานที่มีความชำนาญเกี่ยวภาษา SCL เพื่อเข้าไปเพิ่มฟังก์ชั่น และแมปปิ้งข้อมูลของ INMS Agent หลังจากการทำการแก้ไขไฟล์ SCD เรียบร้อย ไฟล์ SCD จะถูกอัปโหลดไปยังสเตชั่นเซิร์ฟเวอร์ และ IED ที่รับจะเมสเซจ GOOSE จาก INMS Agent

- การจำลองด้วย IED

เทคนิคนี้สามารถใช้โปรแกรมมาตรฐานที่เรียกว่า IEC61850 คอนฟิกูเรเตอร์ และ IED ที่สนับสนุนภาษา SCL มาทำการแมปปิ้งข้อมูลให้ IED อีกตัวหนึ่งที่ต้องรับข้อมูลจาก INMS Agent และส่งข้อมูลให้สเตชั่นเซิร์ฟเวอร์ ในทางปฏิบัตินั้นสามารถดักจับเมสเซจของ IED ที่จำลองเป็น INMS Agent ด้วยโปรแกรม WireShark หรือ Ethereal ในระหว่างการทดสอบ ซึ่งจะเป็นประโยชน์อย่างมาก ดังแสดงในรูปที่ 2.38 หลังจากนี้ก็สามารถใช้เมสเซจดักเพื่อทำการคัดลอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พารามิเตอร์ และโครงสร้างนำไปตั้งค่าใน INMS Agent เช่น พารามิเตอร์ GoCBRef เป็นต้น สุดท้ายก็นำ INMS Agent เข้ามาใช้งานแทน IED ที่ทำหน้าที่จำลอง INMS Agent เพื่อทำคอนฟิกูเรชั่น



รูปที่ 2.38 เมสเซจ GOOSE

ระบบสถานีไฟฟ้าย่อยอัตโนมัติปัจจุบันใช้มาตรฐาน IEC61850 (IEC61850 SA) ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในวงการอุตสาหกรรมไฟฟ้า โครงสร้างของการสื่อสารที่ใช้ปัจจุบันนั้นคือเทคโนโลยีอีเทอร์เน็ตและ TCP/IP ดังนั้นระบบสถานีไฟฟ้าย่อยอัตโนมัติจะประกอบไปด้วยคอมพิวเตอร์ อีเทอร์เน็ตสวิตช์และ IED หลากหลายชนิด เช่น รีเลย์ป้องกัน เบย์คอนโทรลยูนิต การทำงานของสถานีไฟฟ้าย่อยอัตโนมัตินั้นมีการทำงานบนระบบสื่อสารข้อมูลซึ่งมีความเกี่ยวเนื่องกับระยะเวลาในการส่งข้อมูลระหว่าง IED เช่น การส่งคำสั่งปลดหรือการส่งคำสั่งบล็อก (Blocking) ดังนั้นถ้ามีฟังก์ชั่นที่สำคัญไม่สามารถทำงานได้บนเวลาที่แน่นอน ผลลัพธ์ที่ได้นั้นอาจจะเกิดไฟฟ้าดับบริเวณกว้างมากกว่าที่ควรจะเป็น ดังนั้นระบบมอนิเตอร์ IED และเครือข่ายจึงจำเป็นในการตรวจสอบสถานะการสื่อสารของ IED รวมไปถึงอุปกรณ์สื่อสาร และยังสามารถรายงานการแจ้งเตือนข้อมูลที่มีประโยชน์ไปยังพนักงานบำรุงรักษา และศูนย์ SCADA เพื่อตรวจสอบและแก้ไขอุปกรณ์ที่น่าสงสัยก่อนที่ฟังก์ชั่นที่สำคัญจะทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.12 สรุป

จากที่กล่าวมาข้างต้นในบทที่ 2 นี้ จะเป็นการกล่าวถึงคุณสมบัติ ส่วนประกอบ ข้อดี ข้อเสีย และการนำไปใช้งานของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด การอัดประจุ การคายประจุรวมไปถึงปัจจัยที่มีผลต่อแบตเตอรี่ โดยจะทำการศึกษาแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดชนิด VRLA เป็นหลัก นอกจากนั้นจะศึกษาในส่วนของคลื่นเดินทางเพื่อนำมาประยุกต์ใช้กับระบบแบตเตอรี่ เมื่อนำแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดมาต่อกันแบบอนุกรม เพื่อนำมาบ่งบอกแบตเตอรี่ที่เสื่อมสภาพภายในระบบแบตเตอรี่ได้ซึ่งในส่วนของคลื่นเดินทางนั้น จะทำการศึกษาทฤษฎีพื้นฐานที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับระบบแบตเตอรี่ได้ โดยจะทำการประยุกต์จากระบบสายส่งเป็นระบบอัดประจุแบตเตอรี่ เนื่องจากวงจรสมมูลของแบตเตอรี่นั้นเหมือนกัน อีกทั้งค่าพารามิเตอร์ยังมีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นเมื่อแบตเตอรี่มีการเสื่อมสภาพหรือก็คือค่าพารามิเตอร์เปลี่ยนไปก็จะมีการสะท้อนของคลื่นกลับมาที่จุดอ้างอิง โดยที่นี้จุดอ้างอิงคือเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่ ทำให้สามารถประมาณการณ์ได้ว่าแบตเตอรี่ที่เสื่อมสภาพนั้นอยู่ที่ตำแหน่งใด ซึ่งการจะบ่งบอกแบตเตอรี่ที่เสื่อมสภาพได้นั้นจำเป็นที่จะต้องทราบวงจรสมมูลภายในของแบตเตอรี่ รวมถึงวงจรที่จะนำคลื่นเดินทางมาประยุกต์ใช้อีกด้วยและภายในบทนี้ได้กล่าวถึงเทคนิคการหาวงจรสมมูลภายในของแบตเตอรี่ โดยใช้เทคนิคที่เรียกว่า การวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงเวลา โดยจะทำการทดลองเพื่อหาวงจรสมมูลภายในของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด หลังจากนั้นจะนำมาวิเคราะห์สมรรถนะของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดที่จะใช้ทำการทดลอง เพื่อให้ทราบได้ว่าแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดนั้นมีการเสื่อมสภาพหรือไม่ ซึ่งหัวข้อการออกแบบวงจรจะกล่าวในบทถัดไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
การออกแบบการทดลอง

3.1 บทนำ

ในปัจจุบันสถานีไฟฟ้าย่อยมีการใช้งานแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด เพื่อสำรองพลังงานไฟฟ้าไว้ใช้ในกรณีฉุกเฉินหรือเกิดเหตุผิดปกติขึ้นในระบบจำหน่ายไฟฟ้า เมื่อเกิดเหตุผิดปกติขึ้นในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดจะทำหน้าที่เป็นแหล่งพลังงานไฟฟ้าสำรอง เพื่อจำหน่ายพลังงานไฟฟ้าให้แก่ระบบรักษาความปลอดภัย (Protection System) และระบบสื่อสาร (Communication System) ให้สามารถคงการทำงานไว้ได้อย่างเป็นปกติ ดังนั้นต้องมั่นใจได้ว่าแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดที่ใช้งานนั้นมีสมรรถนะที่ดีและพร้อมใช้งานเสมอ ถ้าแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดที่ใช้งานในระบบมีการเสื่อมสภาพ จะทำให้แบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดลูกอื่น ๆ ในระบบเสื่อมสภาพตามไปด้วย ดังนั้นระบบจัดการแบตเตอรี่ (Battery Monitoring System) จึงเข้ามามีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งเพื่อที่จะสามารถบ่งชี้แบตเตอรี่ที่เสื่อมสภาพได้ ซึ่งในบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงการออกแบบการทางลองเพื่อหาค่าพารามิเตอร์และหาวงจรสมมูลของแบตเตอรี่ โดยใช้การวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงเวลา (Time Domain) และใช้คลื่นเดินทางสำหรับสายส่งเพื่อวิเคราะห์การนำไปประยุกต์และใช้คลื่นเดินทางเพื่อบ่งบอกแบตเตอรี่ที่เสื่อมสภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 ข้อมูลแบตเตอรี่ที่ใช้ทำการทดลอง

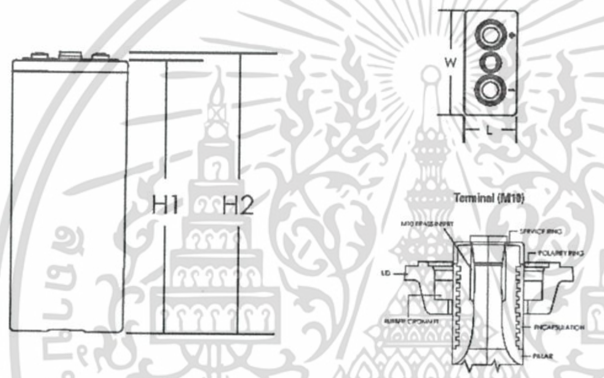
Discover®
Innovative Battery Solutions

2VRE-800TG
DATASHEET

Tubular Gel OPzV Cell

Discover® Tubular Gel RE Batteries provide superior deep cycling performance and reliability for demanding commercial, industrial and residential applications. Discover® Tubular Gel RE Batteries utilize Advanced Tubular Plate Technology to deliver long service life with maintenance-free requirements. Gel RE Batteries provide reliable energy storage for Stationary Backup and Telecom Networks, Road Surface, and Rail Traffic Signaling Systems, Solar, Wind, and Hybrid Off-grid and Grid-tie renewable energy applications. Discover® Tubular Gel RE Batteries provide maximum efficiency per discharge-charge cycle, and proven reliability in remote, high temperature, or unstable power network installations.

MECHANICAL DRAWINGS



MECHANICAL SPECIFICATIONS

Voltage	2	
Industry Reference	Tubular Gel OPzV	
Length (A)	5.0 in	126 mm
Width (B)	8.2 in	208 mm
Height (C)	14.4 in	367 mm
Total Height (D)	15.4 in	392 mm
Weight	49 lbs	22 kgs
Terminal	M10	
Poles	2	
Cell(s)	1	
Container	ABS	

ELECTRICAL SPECIFICATIONS

Reference LVD / I10	20% DOD	2.05V
	50% DOD	1.97V
	80% DOD	1.91V
Cycle Life	20% DOD	7000 cycles
	50% DOD	2950 cycles
	80% DOD	1900 cycles
Internal Resistance		0.78 mΩ
Short Circuit		2100 A
Self Discharge		2-3% per month
Maximum Operating Temperature		-35°C / -31°F | 50°C / 122°F
Electrolyte		Gel

ELECTRICAL SPECIFICATIONS

240 HR	120 HR	100 HR	20 HR	10 HR	5 HR	3 HR	1 HR
1.85 Volts Per Cell (VPC)				1.75 Volts Per Cell (VPC)			
382 AH	380 AH	376 AH	308 AH	280 AH	253 AH	224 AH	155 AH

BENEFITS & FEATURES

Engineered to deliver 80% of rated capacity above 1.9 volts.

Tubular positive plates and proprietary alloy compositions to provide a 50% Depth of Discharge cycle life of up to 2950 cycles @ 20°C / 68°F.

Low cost per cycle. Lifetime value maximized especially in hybrid systems where using batteries can dramatically reduce generator run times delivering lower maintenance and fuel costs and less CO2 emissions.

Sealed technology. Gel electrolyte and safety pressure relief valve with integral flame arrestor.

Complete and ready to install systems with all necessary installation accessories. Flame retardant (UL 94-V0) containers available upon request.

Tested and verified for compliance to applicable International Safety Standards.

IEC 61427 Compliant. Tested for compliance with the International Electrical Commission requirements for battery performance and life in PV applications.

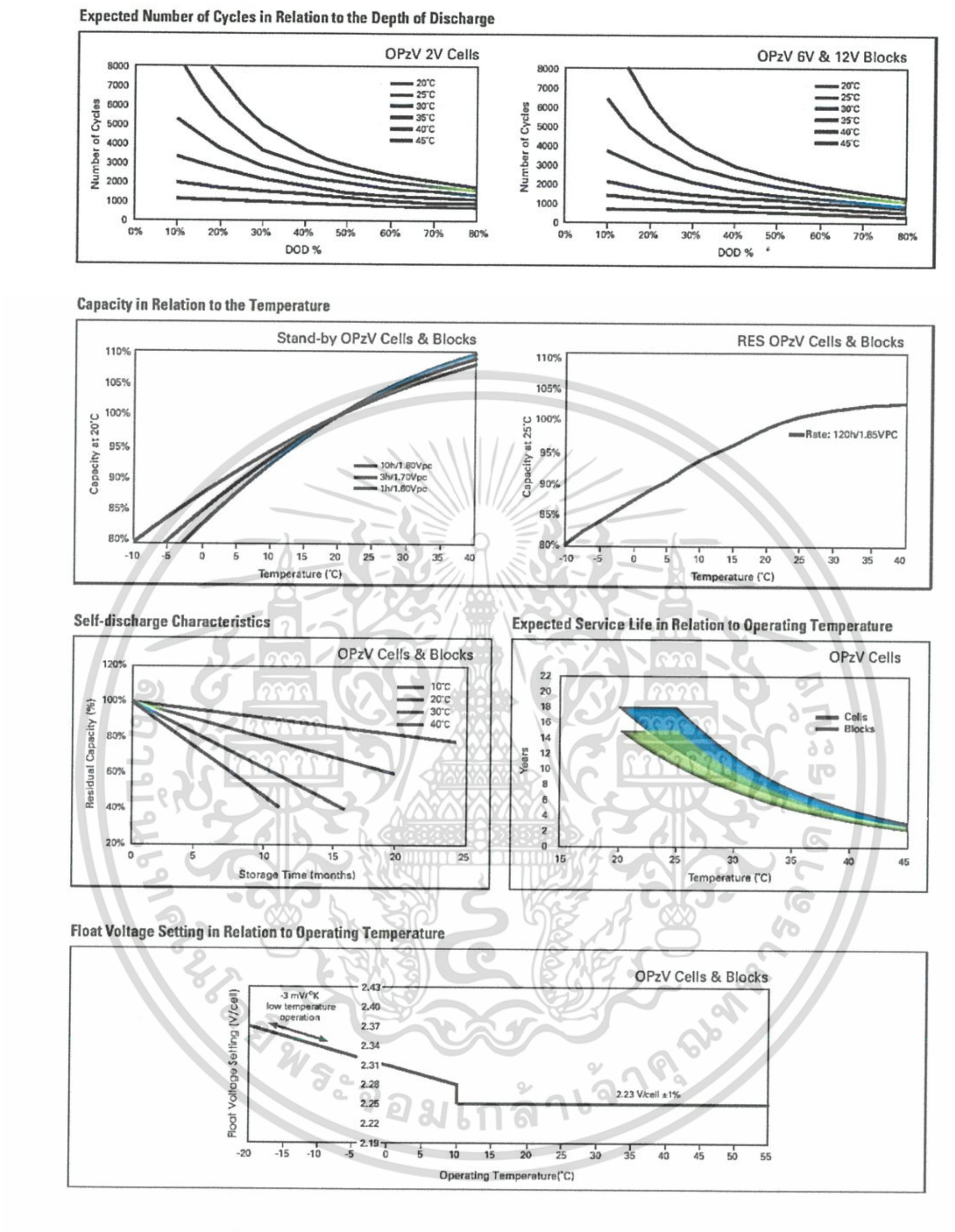
CERTIFIED QUALITY

Discover and its facilities and products are certified to multiple standards and compliance:

- IEC 60896-21: Requirements for Photovoltaic Energy
- IEC 60896-22: Requirements for Valve-Regulated lead-acid batteries
- DIN 40742: Specifications for Tubular Gel RE Cells
- DIN 40744: Specifications for Tubular Gel RE Blocks
- EN 50272-2: Safety Requirements for stationary batteries
- ISO 9001, ISO 14001, BS OHSAS 18001: Manufacturing and Production facilities.
- ETTS Germany

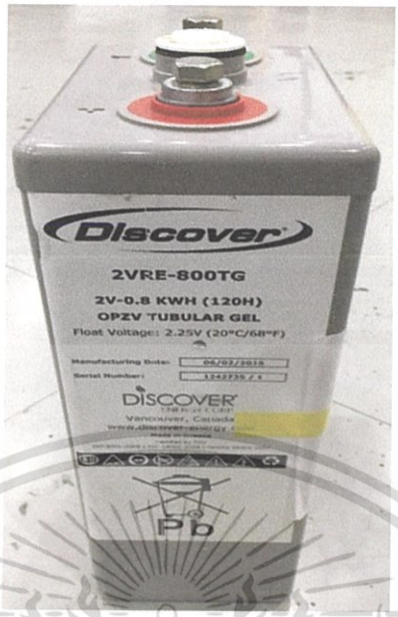
รูปที่ 3.1 Data Sheet ของแบตเตอรี่ Discover 2VRE-800TG ส่วนที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 Data Sheet ของแบตเตอรี่ Discover 2VRE-800TG ส่วนที่ 2

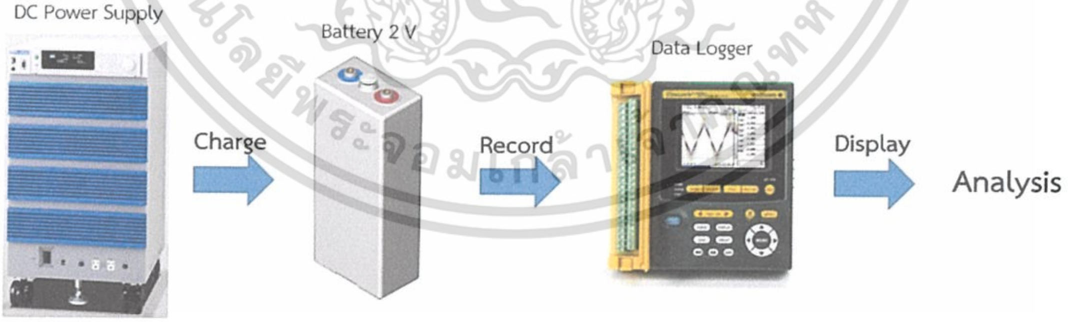
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 แบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด Discover 2VRE-800TG ที่ใช้ในการทดลอง

3.3 การออกแบบการทดลองเพื่อวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงเวลา (Time Domain)

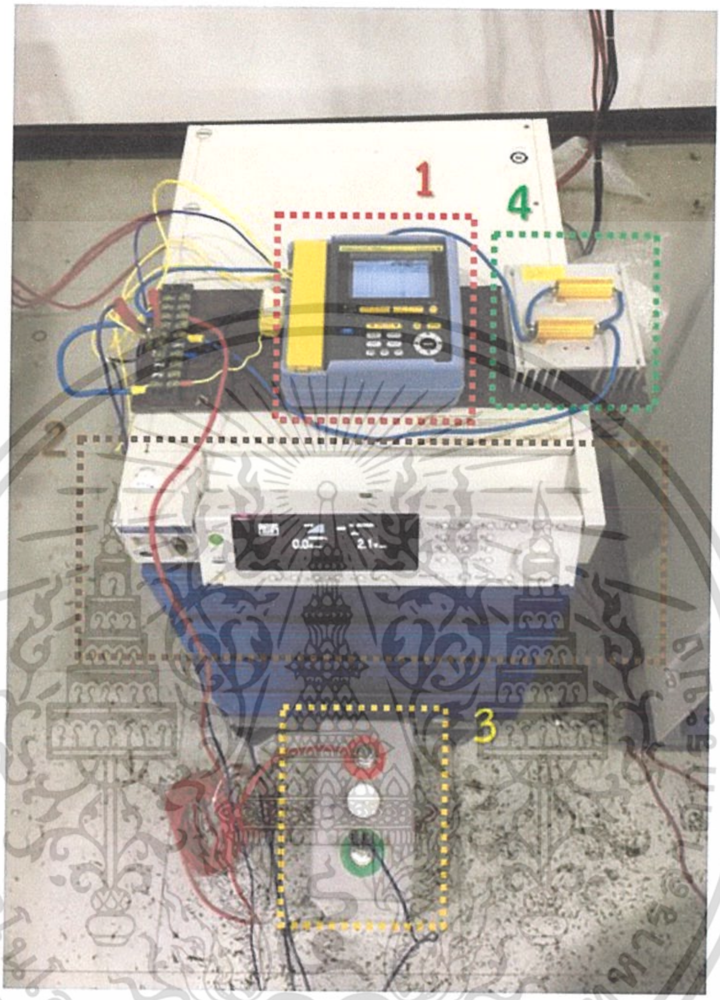
ทำการทดลองโดยการอัดและคายประจุแบตเตอรี่แบบพัลซ์ชาร์จ (Pulse Charged) ที่พิกัดแรงดันไฟฟ้าคงที่ เพื่อดูผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วและกระแสอัดประจุของแบตเตอรี่ จากนั้นนำผลการทดลองที่ได้ไปวิเคราะห์หาวงจรสมมูลและพารามิเตอร์ภายในแบตเตอรี่ และนำผลการทดลองที่ได้มาทำการวิเคราะห์สมรรถนะของแบตเตอรี่



รูปที่ 3.4 การหาวงจรสมมูลของแบตเตอรี่โดยวิธีการวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยอุปกรณ์ที่ใช้ทำการทดลองจริงจะเป็นไป ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 อุปกรณ์จริงที่ใช้ในการทดลองกับแบตเตอรี่เพื่อทดลองผลตอบสนองเชิงเวลา

ซึ่งประกอบไปด้วยอุปกรณ์ดังต่อไปนี้

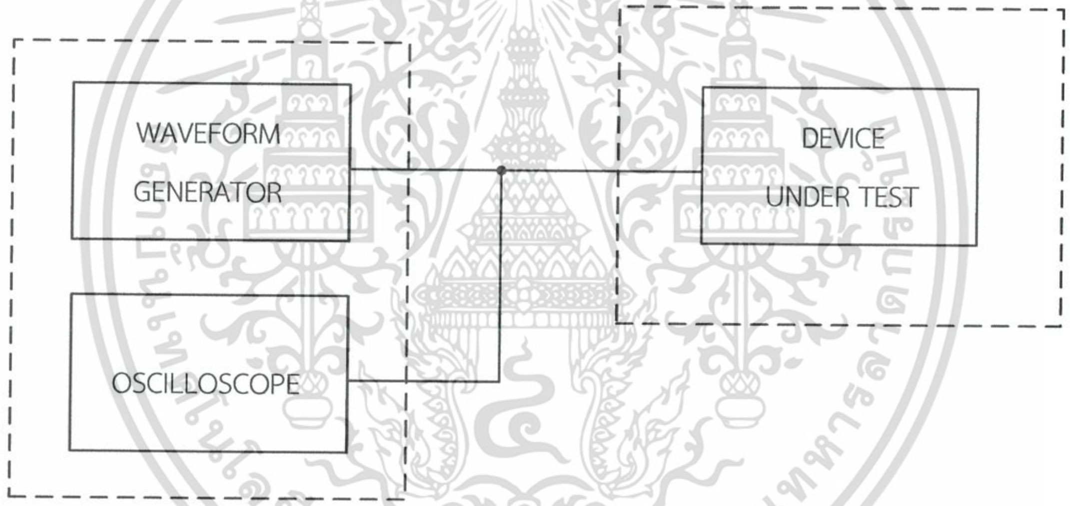
1. เครื่องบันทึกข้อมูล
2. แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบปรับค่าได้
3. แบตเตอรี่ที่ต้องการทดสอบ
4. ตัวต้านทานสำหรับตรวจจับกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยหลักการในการออกแบบนั้นจะใช้ตัวต้านทานสำหรับตรวจจับกระแสในการวัดกระแสที่อัดประจุแบตเตอรี่ โดยใช้เครื่องบันทึกข้อมูล เพื่อบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ กระแสที่อัดประจุแบตเตอรี่ ในช่วงเวลาต่าง ๆ และนำค่าที่ได้มาวิเคราะห์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ต่อไป

3.4 การออกแบบวงจรสำหรับคลื่นเดินทาง

การหาตำแหน่งของแบตเตอรี่ใบที่เสื่อมนั้นจำเป็นต้องรู้วงจรสมมูลและค่าพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่แต่ละใบ เนื่องจากวงจรสมมูลของแบตเตอรี่นั้นเหมือนกันทุกใบ และพารามิเตอร์มีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อมีการจ่ายสัญญาณคลื่นเคลื่อนที่เข้าไป สัญญาณจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากเกินไป แต่ถ้าหากมีแบตเตอรี่ใบใดที่เสื่อมหรือค่าพารามิเตอร์ต่างจากปกติ สัญญาณจะมีการเปลี่ยนแปลง จากนั้นจะนำกราฟมาวิเคราะห์เพื่อหาความเป็นไปได้ที่จะมีแบตเตอรี่ที่เสื่อมสภาพ โดยการออกแบบ ดังรูปที่ 3.6



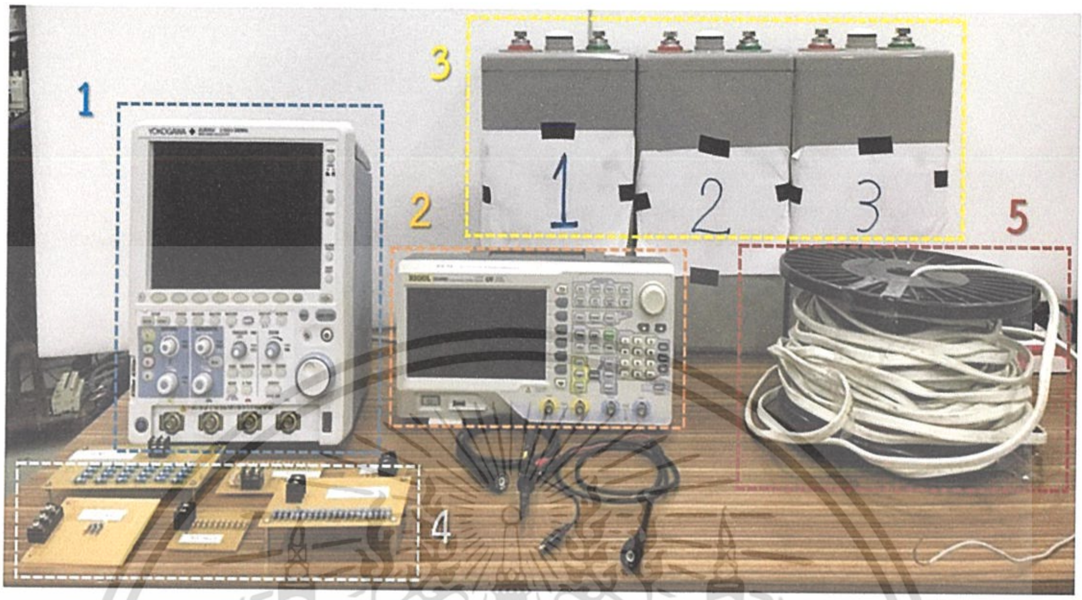
รูปที่ 3.6 วงจรที่ใช้ในการทดสอบคลื่นเดินทาง

ซึ่งการทดลองเพื่อทดสอบคลื่นเดินทางนั้น จะแบ่งออกเป็น 3 กรณี ดังนี้

1. ทดสอบคลื่นเดินทางภายในสายส่ง
2. ทดสอบคลื่นเดินทางโดยใช้โหลดทางไฟฟ้าเป็นตัวต้านทาน
3. ทดสอบคลื่นเดินทางสำหรับแบตเตอรี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยวงจรที่ใช้ในการทดลองจริง ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบคลื่นเดินทาง

ซึ่งประกอบไปด้วยอุปกรณ์ ดังนี้

1. ออสซิลโลสโคป
2. เวฟฟอร์มเจเนอเรเตอร์
3. แบตเตอรี่ที่ต้องการทดสอบ
4. ตัวต้านทานสำหรับทดสอบ
5. สายส่ง

โดยหลักการในการออกแบบนั้นจะใช้เวฟฟอร์มเจเนอเรเตอร์เพื่อสร้างคลื่นสัญญาณแบบ Square Wave เข้าไปภายในวงจรที่ต้องทำการทดสอบ ซึ่งวงจรที่ทำการทดสอบจะประกอบไปด้วย สายส่ง สายส่งและตัวต้านทาน สายส่งและแบตเตอรี่ และ สายส่งและตัวต้านทานและแบตเตอรี่ โดยใช้งานออสซิลโลสโคปในการตรวจรับและแสดงสัญญาณคลื่นที่ต้องการตรวจจับ เพื่อนำผลและรูปคลื่นที่ได้ไปทำการวิเคราะห์เพื่อหาความเป็นไปได้ที่จะมีแบตเตอรี่ที่เสื่อมสภาพต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงการออกแบบวงจรที่ใช้ในการทดลองเพื่อหาวงจรสมมูลและพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด โดยใช้การวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงเวลาทำการอัดและคายประจุแบตเตอรี่แบบพัลซ์ชาร์จเพื่อดูผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่ นอกจากนั้นยังใช้ตัวต้านทานสำหรับตรวจจับกระแส เพื่อตรวจจับกระแสที่ทำการอัดประจุแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด เพื่อนำมาหาค่าพารามิเตอร์ภายในแบตเตอรี่ นอกจากนั้นยังกล่าวถึงการออกแบบวงจรสำหรับวิเคราะห์แบตเตอรี่ โดยการนำคลื่นเดินทางมาประยุกต์ใช้ร่วมกับแบตเตอรี่ เพื่อที่จะหาความแตกต่างของลักษณะกราฟเมื่อแบตเตอรี่มีการเสื่อมสภาพ นอกจากนั้นจะมีรายละเอียดของวงจรที่ใช้ในการทำการทดลองและอุปกรณ์จริงที่ใช้ในการทำการทดลอง

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลอง

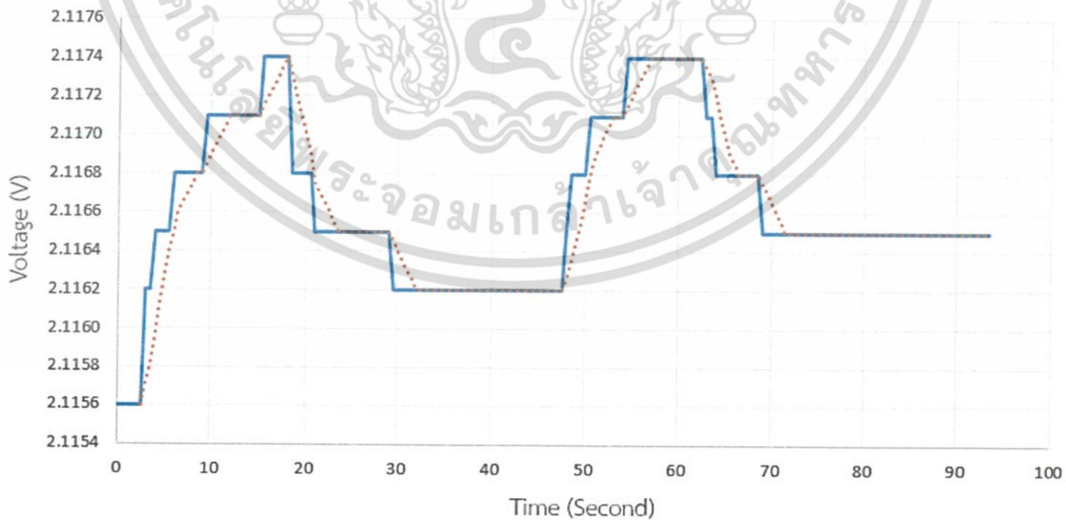
4.1 บทนำ

ในบทนี้จะนำเสนอถึงผลการทดสอบผลตอบสนองเชิงเวลา (Time Domain) กับแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด เพื่อหาพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด รวมถึงเพื่อบ่งบอกสมรรถนะของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด นอกจากนั้นจะนำเสนอผลการทดสอบด้วยวิธีการใช้คลื่นเดินทาง (Traveling Wave) โดยการทดสอบกับสายส่ง, ตัวต้านทานสำหรับทดสอบ และแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด เพื่อวิเคราะห์หาความเป็นไปได้ที่จะมีแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดที่มีการเสื่อมสภาพ

4.2 การทดลองหาค่าพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดด้วยการวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงเวลา (Time Domain)

4.2.1 การทดลองหาค่าพารามิเตอร์

ทำการทดลองด้วยการอัดประจุ(Charge)แบตเตอรี่ที่พิกัดแรงดัน 2.5 V ที่อุณหภูมิ 32 องศาเซลเซียส โดยอัดประจุแบบพัลซ์ อัดประจุแบตเตอรี่ 15 วินาที และพัก 30 วินาที แล้ววัดแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากนั้นจึงนำข้อมูลแรงดันดังกล่าวมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับเวลาจะได้กราฟ ดังรูปที่ 4.1

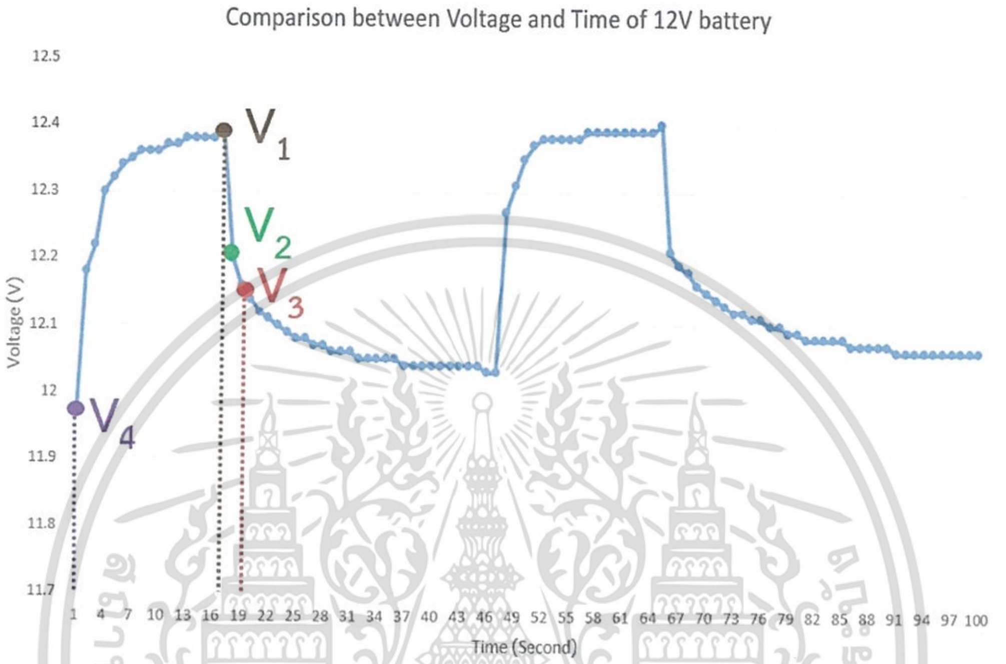


รูปที่ 4.1 กราฟแรงดันในขณะทำการอัดประจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 การวิเคราะห์หาพารามิเตอร์

จากผลการทดลองดังที่ได้กล่าวมาในข้างต้นสามารถนำข้อมูลที่ได้ดังกล่าวมาใช้ในการหาค่าพารามิเตอร์ในวงจรสมมูลเบื้องต้นได้ ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและเวลาสำหรับแบตเตอรี่ 12 V

โดยสามารถวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ได้ดังนี้

R_0 เป็นพารามิเตอร์ที่ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าตกทันทีทันใด ซึ่งสามารถหาได้จาก $R_0 = \frac{V_1 - V_2}{I}$

C_1 เป็นพารามิเตอร์ที่แสดงถึงความจุของประจุที่สามารถใช้งานได้ โดยจะเกี่ยวข้องกับสารเคมีภายในแบตเตอรี่ โดยค่าความจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่สามารถหาได้ โดยหาค่าคงที่ของเวลาได้ดัง สมการที่ 4.1

$$\tau = R_0C_1 \tag{4.1}$$

ซึ่งค่าคงที่ของเวลาจากกราฟซึ่งเป็นเวลาของ V_3 ซึ่งสามารถหาค่า V_3 ได้ดัง สมการที่ 2.6

$$V_3 = [(V_1 - V_4) \times 0.37] + V_4 \tag{4.2}$$

โดยค่าคงที่ของเวลาจะเท่ากับเวลาที่แรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่มีค่าที่ V_3 ดัง สมการที่ 2.7

$$\tau = t_{v3} \tag{4.3}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

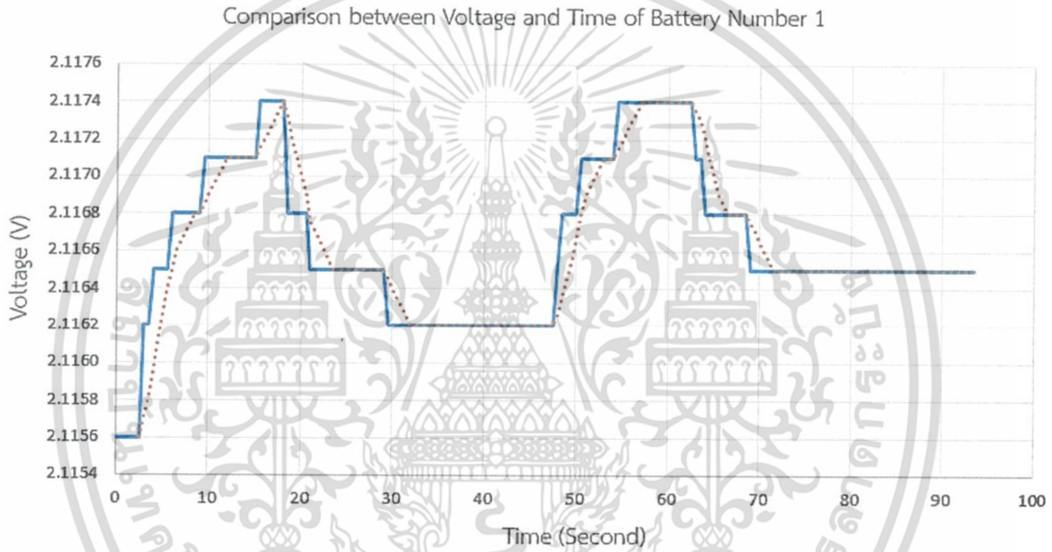
V_1 คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ ณ วินาทีสุดท้ายที่ทำการอัดประจุไฟฟ้า

V_2 คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ ณ วินาทีแรกหลังจากทำการหยุดอัดประจุไฟฟ้า

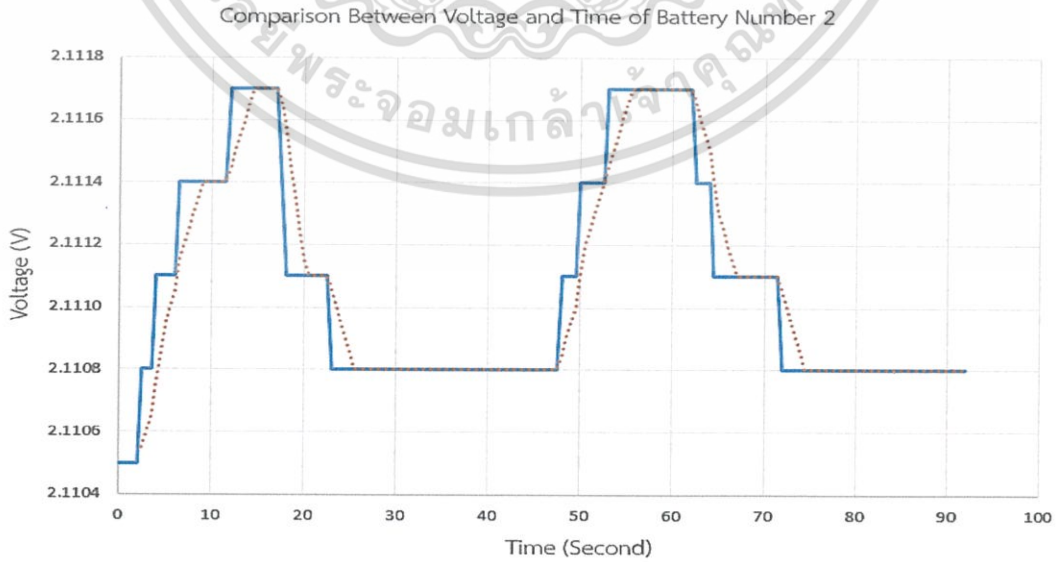
V_3 คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ ณ ค่าคงที่ของเวลา

V_4 คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ ณ วินาทีก่อนทำการอัดประจุไฟฟ้า

และเมื่อทำการทดลองแบบเดียวกันกับแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดทั้งหมด 6 ลูก โดยทำการทดลองที่แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดที่ประมาณ 2.10 V โดยทำการอัดประจุแบตเตอรี่ที่แรงดันไฟฟ้าที่ 2.5 V โดยทำการอัดประจุแบตเตอรี่แบบคงที่แรงดัน เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่ และกระแสไฟฟ้าที่อัดประจุเข้าแบตเตอรี่ดังแสดง ดังรูปต่อไปนี้

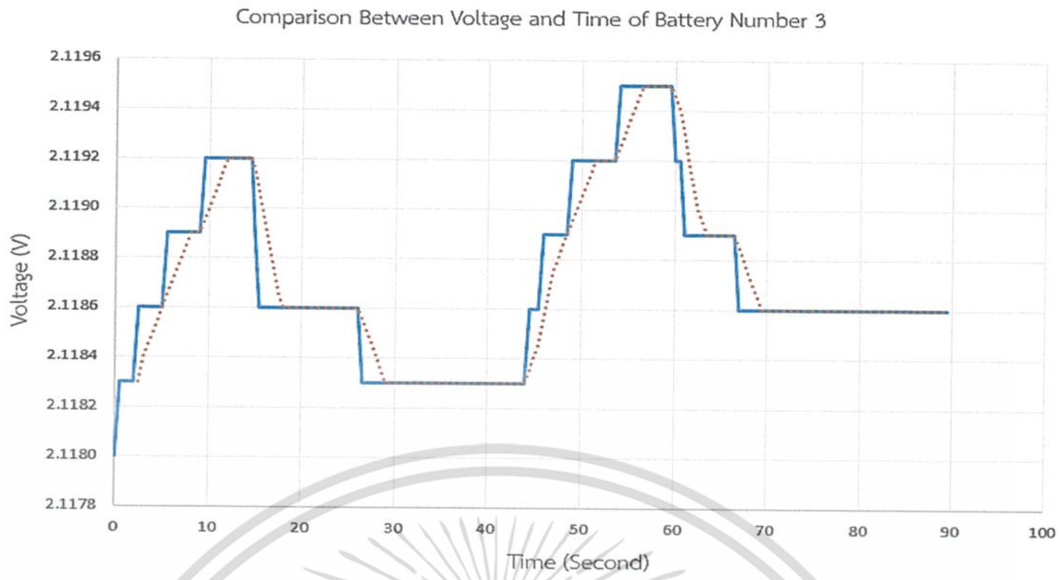


รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและเวลาสำหรับแบตเตอรี่ 2 V ลูกที่ 1

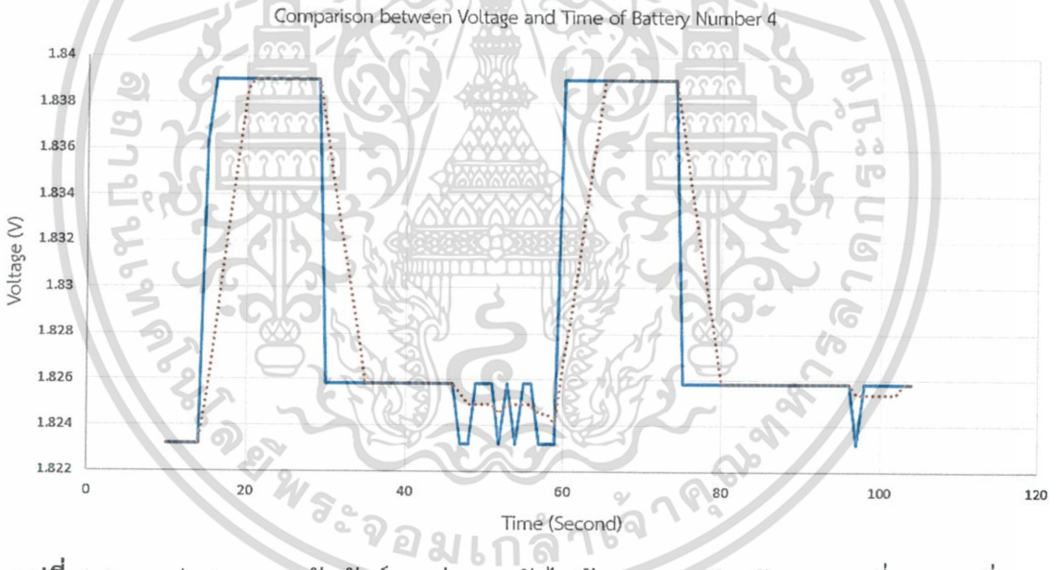


รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและเวลาสำหรับแบตเตอรี่ 2 V ลูกที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

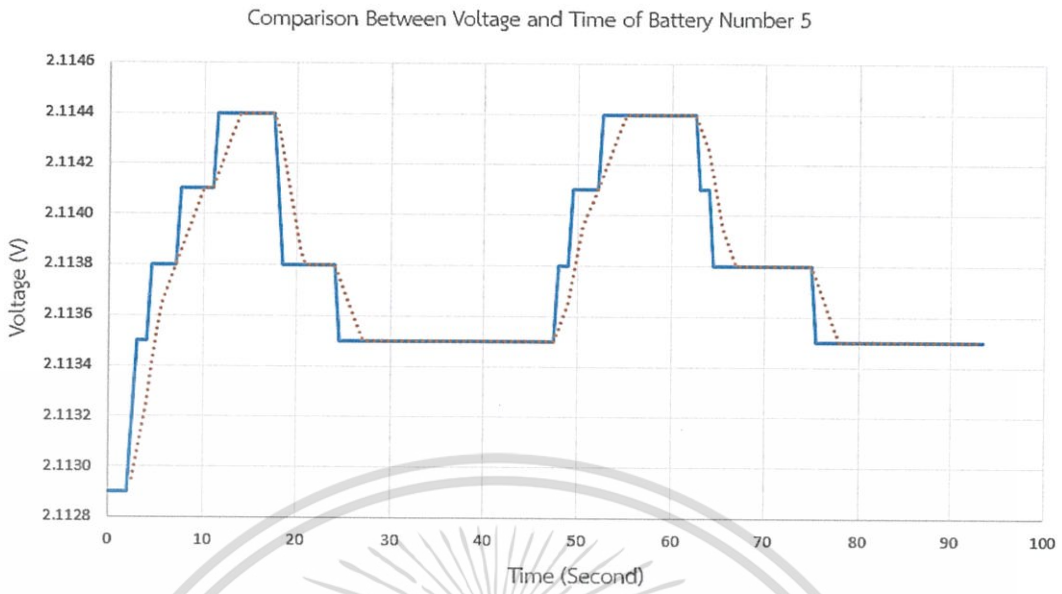


รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและเวลาสำหรับแบตเตอรี่ 2 V ลูกที่ 3

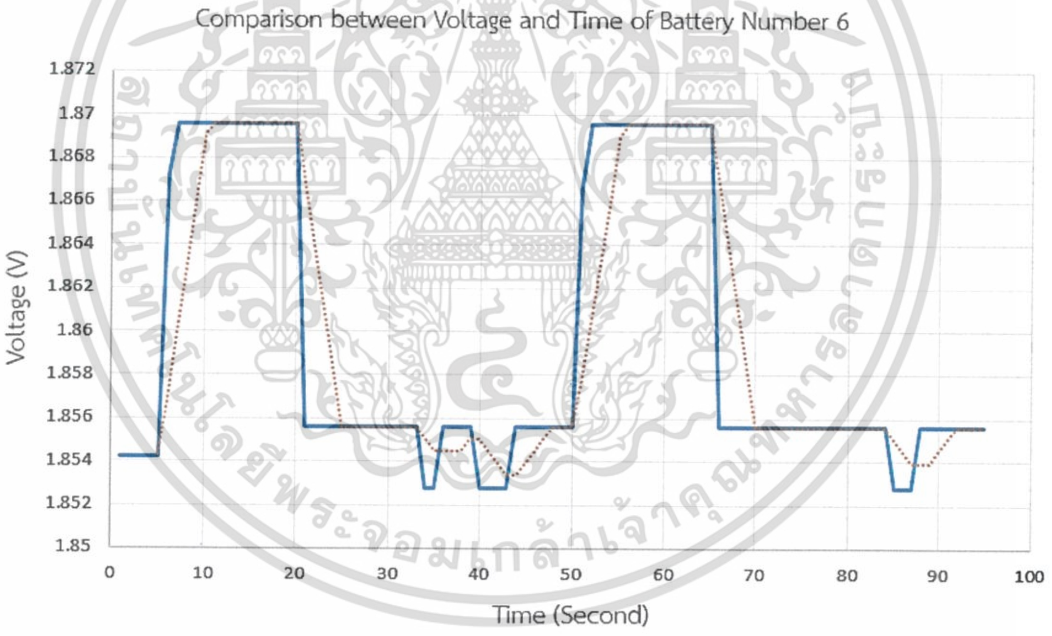


รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและเวลาสำหรับแบตเตอรี่ 2 V ลูกที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและเวลาสำหรับแบตเตอรี่ 2 V ลูกที่ 5



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและเวลาสำหรับแบตเตอรี่ 2 V ลูกที่ 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยนำสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสอัดประจุแบตเตอรี่มาวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่ได้ ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของแบตเตอรี่ กระแสไฟฟ้าที่อัดประจุเข้าแบตเตอรี่ รวมถึงค่าพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด ที่มีแรงดันไฟฟ้า 2 V ทั้ง 6 ลูก

Battery	Voltage Max (V)	Voltage Min (V)	Current (A)	R_0 (mΩ)	C_1 (F)
1	2.1174	2.1156	0.5762	1.0413	10,563
2	2.1117	2.1105	0.6000	1.0000	8,000
3	2.1192	2.1180	0.5643	1.0632	10,816
4	1.8390	1.8258	0.3257	40.5281	75
5	2.1144	2.1129	0.5857	1.0243	14,644
6	1.8696	1.8542	0.3942	35.5150	20

และเมื่อนำค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณได้ดังกล่าวมาทำการเปรียบเทียบกับข้อมูลทางเทคนิคของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดซึ่งจัดทำโดยผู้ผลิตนั้น ซึ่งมีค่าพารามิเตอร์ R_0 เท่ากับ 0.78 mΩ โดยจะสามารถบ่งบอกสมรรถนะของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดได้ ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 สมรรถนะของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด ที่มีแรงดันไฟฟ้า 2 V ทั้ง 6 ลูก

Battery	R_0 (mΩ)	Condition
1	1.0413	Satisfied
2	1.0000	Satisfied
3	1.0632	Satisfied
4	40.5281	Unsatisfied
5	1.0243	Satisfied
6	35.5150	Unsatisfied

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การทดลองการส่งคลื่นเดินทางเข้าไปในวงจรโหลดทางไฟฟ้าผ่านทางสายส่ง (Traveling Wave Method)

เนื่องจากสามารถหาระยะจุดกำเนิดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นภายในสายส่งได้โดยการใช้คลื่นเดินทางเข้ามาใช้ในการวิเคราะห์ ซึ่งขั้นตอนแรกจึงเป็นการทดลองนำคลื่นเดินทางมาใช้วิเคราะห์หาระยะจุดกำเนิดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นภายในสายส่งก่อน หลังจากนั้นจึงทำการทดลองส่งคลื่นเดินทางเข้าไปในวงจรที่มีโหลดทางไฟฟ้าผ่านทางสายส่ง เนื่องจากเมื่อมีโหลดทางไฟฟ้าภายในวงจร ลักษณะของคลื่นเดินทางจะมีลักษณะแตกต่างไปจากเดิมซึ่งจะนำการวิเคราะห์นี้ไปประยุกต์ใช้เพื่อบ่งบอกแบตเตอรี่ที่เสื่อมสภาพต่อไป

4.3.1 การทดลองการส่งคลื่นเดินทางผ่านทางสายส่งโดยไม่มีโหลดทางไฟฟ้าแบบเปิดวงจร

ทำการทดลองส่งคลื่นเดินทางแบบ Square Wave ขนาด 5 V_{pp} โดยใช้คลื่นความถี่ขนาด 200 kHz และ 300 kHz ผ่านสายส่งที่มีความยาวขนาด 75 m โดยทำการเปิดวงจร ณ จุดความยาวที่ 75 m เพื่อค้นหาลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและระยะของจุดกำเนิดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นภายในสายส่ง ดังสมการที่ 4.4

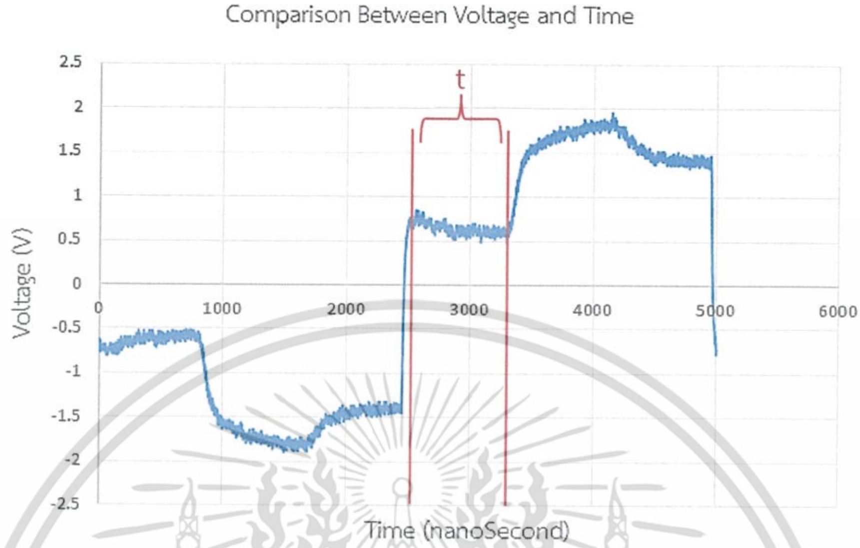
$$2s = vt \tag{4.4}$$

s คือ จุดกำเนิดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นภายในสายส่ง
v คือ ความเร็วของคลื่นเดินทางภายในสายส่ง โดยอ้างอิงเท่ากับ 66% ของความเร็วแสง
t คือ ระยะเวลาที่คลื่นเดินทาง เดินทางไปและกลับภายในสายส่ง

โดยกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและเวลาเป็นไปดังรูปต่อไปนี้

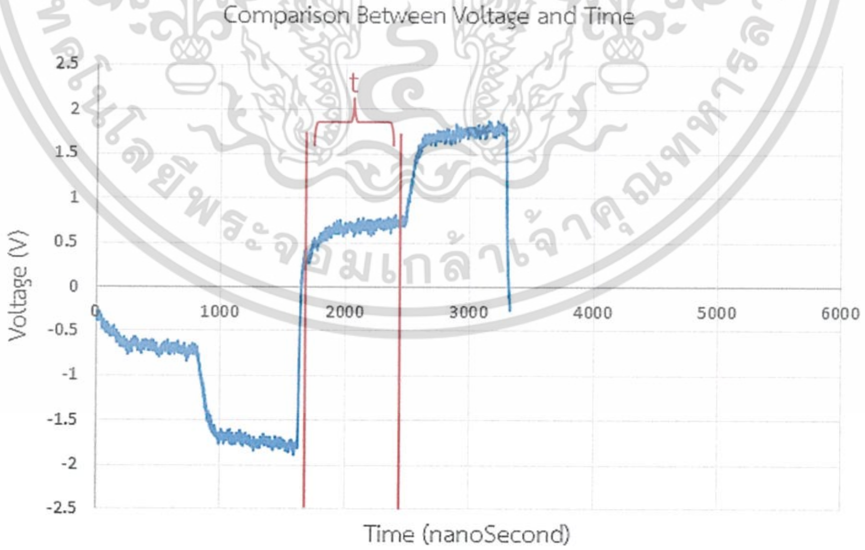
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- กรณีทำการเปิดวงจร ณ จุดกำเนิดความผิดพลาดที่ 75 m โดยใช้คลื่นเดินทางที่มีความถี่ขนาด 200 kHz



รูปที่ 4.9 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางเมื่อวัดที่จุดกำเนิดคลื่นเดินทาง โดยใช้คลื่นเดินทางที่มีความถี่ขนาด 200 kHz แบบเปิดวงจร

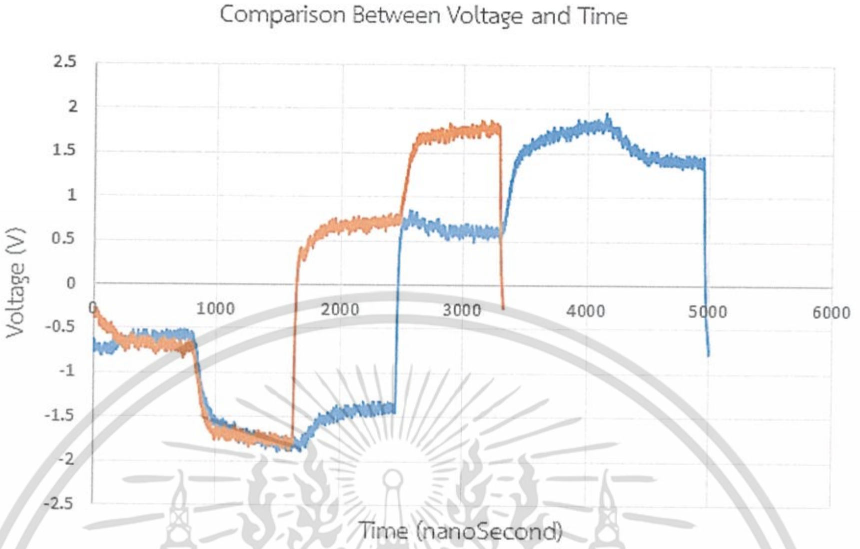
- กรณีทำการเปิดวงจร ณ จุดกำเนิดความผิดพลาดที่ 75 m โดยใช้คลื่นเดินทางที่มีความถี่ขนาด 300 kHz



รูปที่ 4.10 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางเมื่อวัดที่จุดกำเนิดคลื่นเดินทาง โดยใช้คลื่นเดินทางที่มีความถี่ขนาด 300 kHz แบบเปิดวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- กรณีนำสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางที่มีความถี่ขนาด 200 kHz และ 300 kHz มาเปรียบเทียบกัน



รูปที่ 4.11 การเปรียบเทียบสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางที่มีขนาดความถี่ 200 kHz และ 300 kHz แบบเปิดวงจร

จากรูปการเปรียบเทียบสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางที่มีขนาดความถี่ 200 kHz และ 300 kHz ดังรูปที่ 4.11 จะแสดงให้เห็นว่า จุดกำเนิดความผิดพลาดในสายส่งนั้นจะมีความยาวของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่มีขนาดความยาวเท่ากันทั้ง 200 kHz และ 300 kHz ซึ่งทำการวัดค่าจุดกำเนิดความผิดพลาดในสายส่งได้ ดังสมการที่ 4.4 โดยใช้พารามิเตอร์และแสดงจุดกำเนิดความผิดพลาดในสายส่ง ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ความเร็วของคลื่นเดินทางภายในสายส่ง ระยะเวลาที่ใช้ในการเดินทาง และจุดกำเนิดข้อผิดพลาดภายในสายส่ง แบบเปิดวงจร

Frequency (kHz)	Velocity (m/s)	Time (nanoSecond)	Position (metre)
200	1.98×10^8	791	78.3
300	1.98×10^8	791	78.3

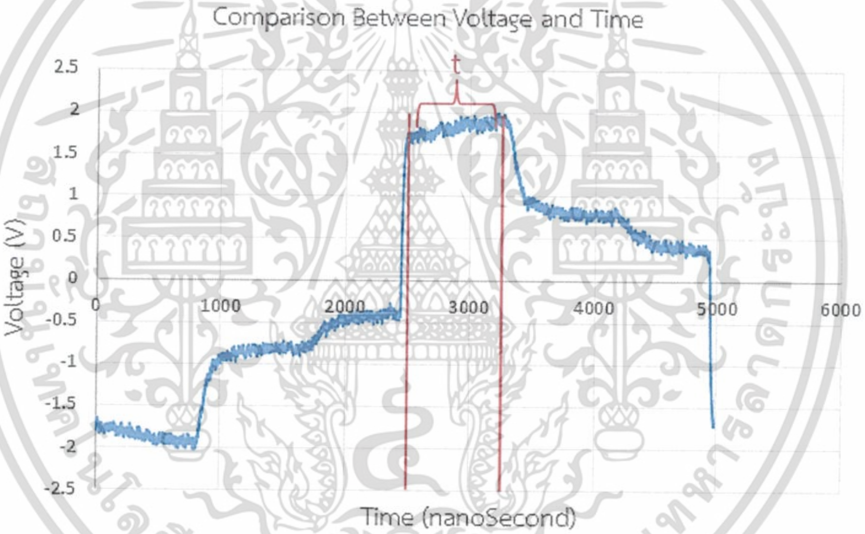
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 การทดลองการส่งคลื่นเดินทางผ่านทางสายส่งโดยไม่มีโหลดทางไฟฟ้า แบบปิดวงจร

ทำการทดลองส่งคลื่นเดินทางแบบ Square Wave ขนาด 5 V_{pp} โดยใช้คลื่นความถี่ขนาด 200 kHz และ 300 kHz ผ่านสายส่งที่มีความยาวขนาด 75 m โดยทำการปิดวงจร ณ จุดความยาวที่ 75 m เพื่อค้นหาระยะของจุดกำเนิดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นภายในสายส่งและลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณแรงดันไฟฟ้า

โดยกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและเวลาเป็นไปดังรูปต่อไปนี้

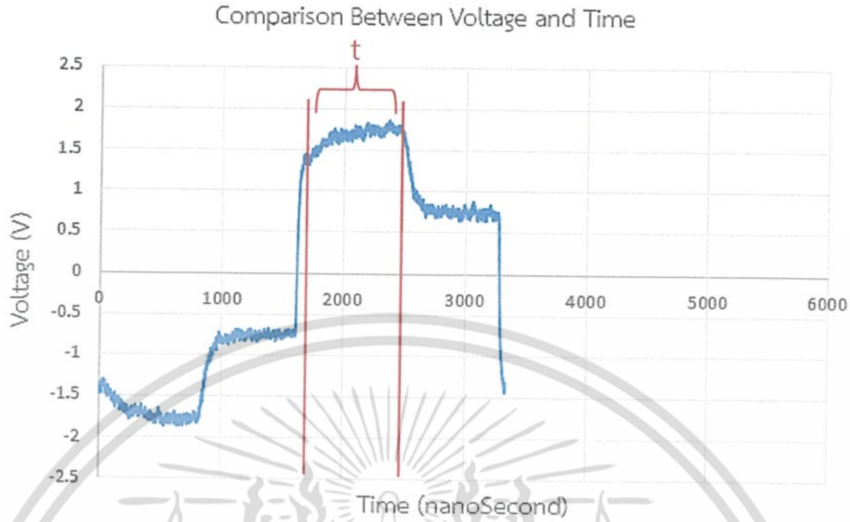
- กรณีทำการปิดวงจร ณ จุดกำเนิดความผิดพลาดที่ 75 m โดยใช้คลื่นเดินทางที่มีความถี่ขนาด 200 kHz



รูปที่ 4.12 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางเมื่อวัดที่จุดกำเนิดคลื่นเดินทาง โดยใช้คลื่นเดินทางที่มีความถี่ขนาด 200 kHz แบบปิดวงจร

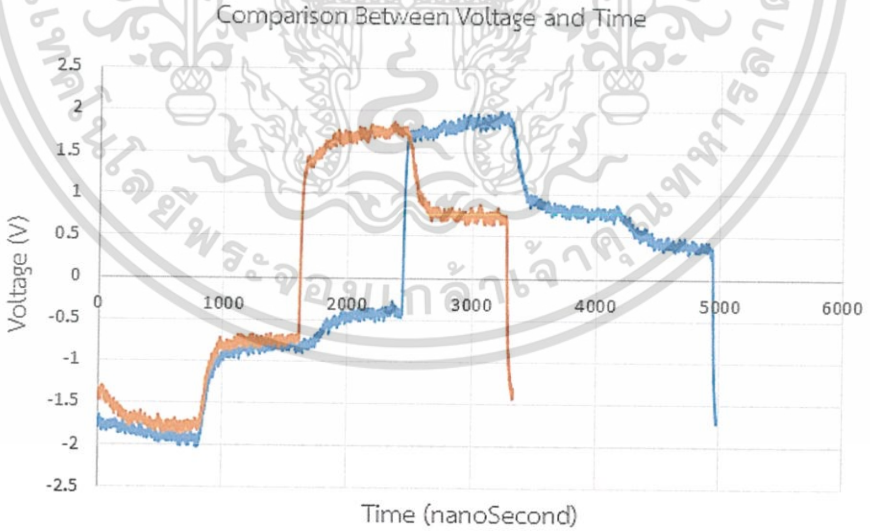
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- กรณีทำการปิดวงจร ณ จุดกำเนิดความผิดพลาดที่ 75 m โดยใช้คลื่นเดินทางที่มีความถี่ขนาด 300 kHz



รูปที่ 4.13 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางเมื่อวัดที่จุดกำเนิดคลื่นเดินทาง โดยใช้คลื่นเดินทางที่มีความถี่ขนาด 300 kHz แบบปิดวงจร

- กรณีนำสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางที่มีความถี่ขนาด 200 kHz และ 300 kHz มาเปรียบเทียบกัน



รูปที่ 4.14 การเปรียบเทียบสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางที่มีขนาดความถี่ 200 kHz และ 300 kHz แบบปิดวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปการเปรียบเทียบสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางที่มีขนาดความถี่ 200 kHz และ 300 kHz ดังรูปที่ 4.14 จะแสดงให้เห็นว่า จุดกำเนิดความผิดพลาดในสายส่งนั้นจะมีความยาวของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่มีขนาดความยาวเท่ากันทั้ง 200 kHz และ 300 kHz ซึ่งทำการวัดค่าจุดกำเนิดความผิดพลาดในสายส่งได้ ดังสมการที่ 4.4 โดยใช้พารามิเตอร์และแสดงจุดกำเนิดความผิดพลาดในสายส่ง ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ความเร็วของคลื่นเดินทางภายในสายส่ง ระยะเวลาที่ใช้ในการเดินทาง และจุดกำเนิดข้อผิดพลาดภายในสายส่ง แบบปิดวงจร

Frequency (kHz)	Velocity (m/s)	Time (nanoSecond)	Position (metre)
200	1.98×10^8	795	78.7
300	1.98×10^8	795	78.7

เมื่อนำจุดกำเนิดความผิดพลาดขึ้นที่คำนวณได้ ดังสมการที่ 4.4 แบบทำการทดลองแบบเปิดวงจรและแบบปิดวงจร จะพบว่าจุดที่เกิดความผิดพลาดที่คำนวณได้จะมีความคาดเคลื่อนเมื่อเทียบกับตำแหน่งของสายส่งของจริงประมาณ 4.4% และ 4.9% ตามลำดับ ซึ่งถือว่าเป็นความเคลื่อนที่ยอมรับได้ จากการทดลองจะพบว่าสามารถคำนวณหาจุดกำเนิดความผิดพลาดภายในสายส่งได้ ขั้นตอนถัดไปคือการทดลองการหาจุดกำเนิดความผิดพลาดเมื่อมีโหลดทางไฟฟ้า

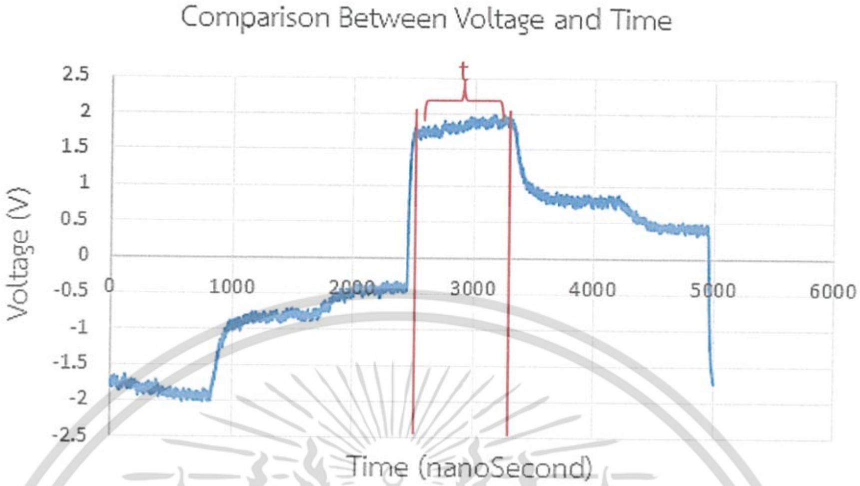
4.3.3 การทดลองการส่งคลื่นเดินทางผ่านทางสายส่งโดยมีโหลดทางไฟฟ้า

ทำการทดลองส่งคลื่นเดินทางแบบ Square Wave ขนาด 5 V_{pp} โดยใช้คลื่นความถี่ขนาด 200 kHz และ 300 kHz ผ่านสายส่งที่มีความยาวขนาด 75 m โดยทำการต่อโหลดทางไฟฟ้าคือตัวต้านทานขนาด 1.42 Ω, 75 Ω, 120 Ω และ 200 Ω ณ จุดความยาวที่ 75 m เพื่อค้นหาระยะของจุดกำเนิดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นภายในสายส่งและลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณแรงดันไฟฟ้า

โดยกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและเวลาเป็นไปดังรูปต่อไปนี้

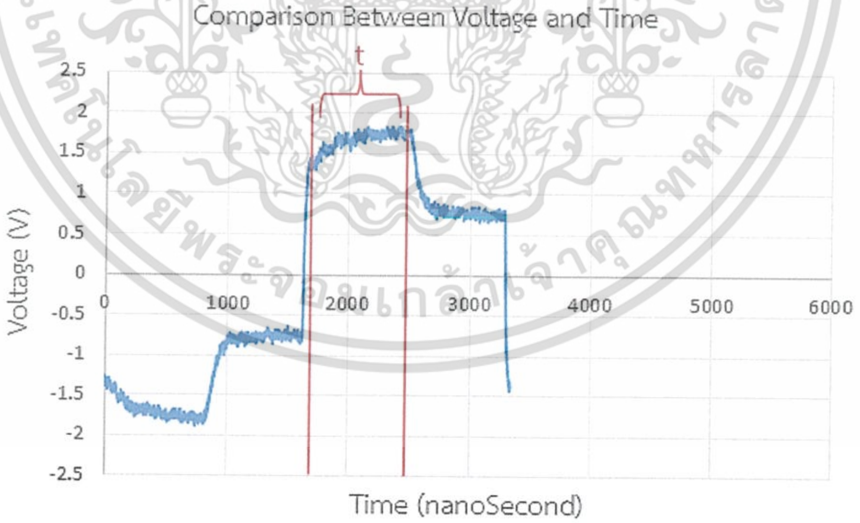
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- กรณีทำการต่อตัวต้านทานขนาด 1.42 Ω ณ จุดกำเนิดความผิดพลาดที่ 75 m โดยใช้คลื่นเดินทางที่มีความถี่ขนาด 200 kHz



รูปที่ 4.15 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางเมื่อวัดที่จุดกำเนิดคลื่นเดินทาง โดยใช้คลื่นเดินทางที่มีความถี่ขนาด 200 kHz แบบต่อตัวต้านทานขนาด 1.42 Ω

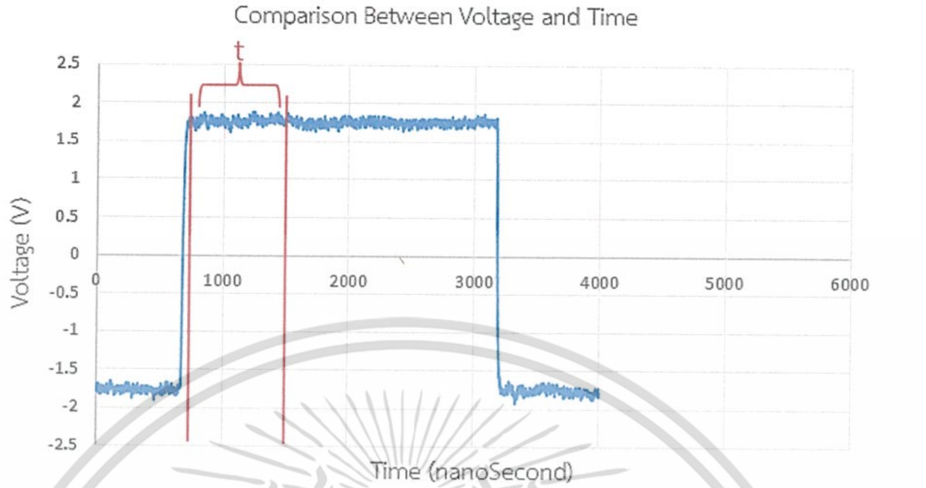
- กรณีทำการต่อตัวต้านทานขนาด 1.42 Ω ณ จุดกำเนิดความผิดพลาดที่ 75 m โดยใช้คลื่นเดินทางที่มีความถี่ขนาด 300 kHz



รูปที่ 4.16 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางเมื่อวัดที่จุดกำเนิดคลื่นเดินทาง โดยใช้คลื่นเดินทางที่มีความถี่ขนาด 300 kHz แบบต่อตัวต้านทานขนาด 1.42 Ω

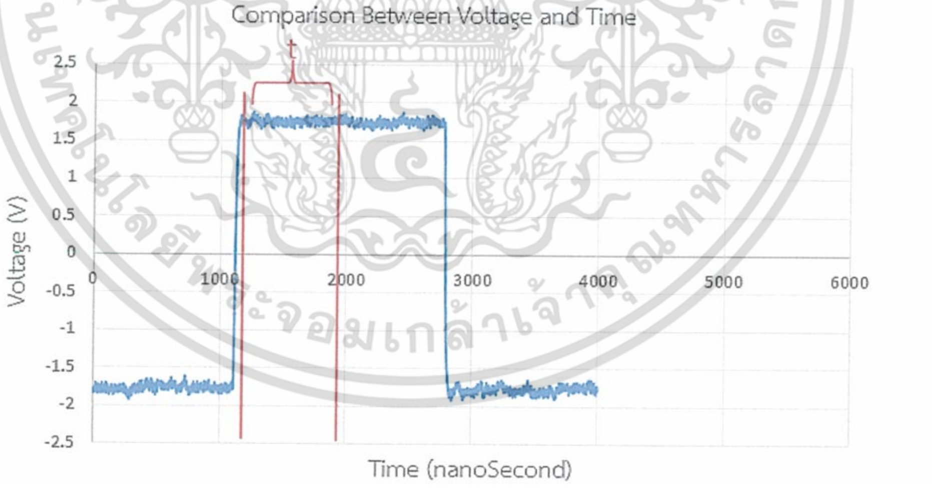
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- กรณีทำการต่อตัวต้านทานขนาด 120 Ω ณ จุดกำเนิดความผิดพลาดที่ 75 m โดยใช้คลื่นเดินทางที่มีความถี่ขนาด 200 kHz



รูปที่ 4.17 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางเมื่อวัดที่จุดกำเนิดคลื่นเดินทาง โดยใช้คลื่นเดินทางที่มีความถี่ขนาด 200 kHz แบบต่อตัวต้านทานขนาด 120 Ω

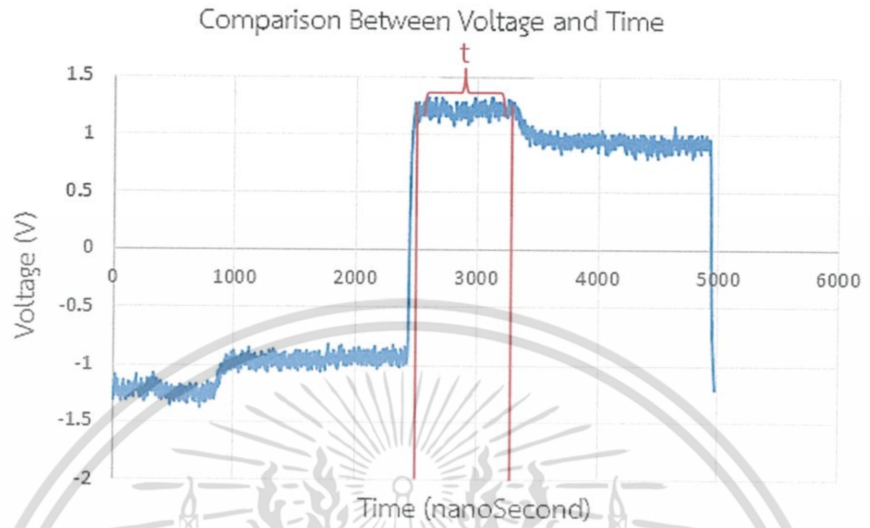
- กรณีทำการต่อตัวต้านทานขนาด 120 Ω ณ จุดกำเนิดความผิดพลาดที่ 75 m โดยใช้คลื่นเดินทางที่มีความถี่ขนาด 300 kHz



รูปที่ 4.18 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางเมื่อวัดที่จุดกำเนิดคลื่นเดินทาง โดยใช้คลื่นเดินทางที่มีความถี่ขนาด 300 kHz แบบต่อตัวต้านทานขนาด 120 Ω

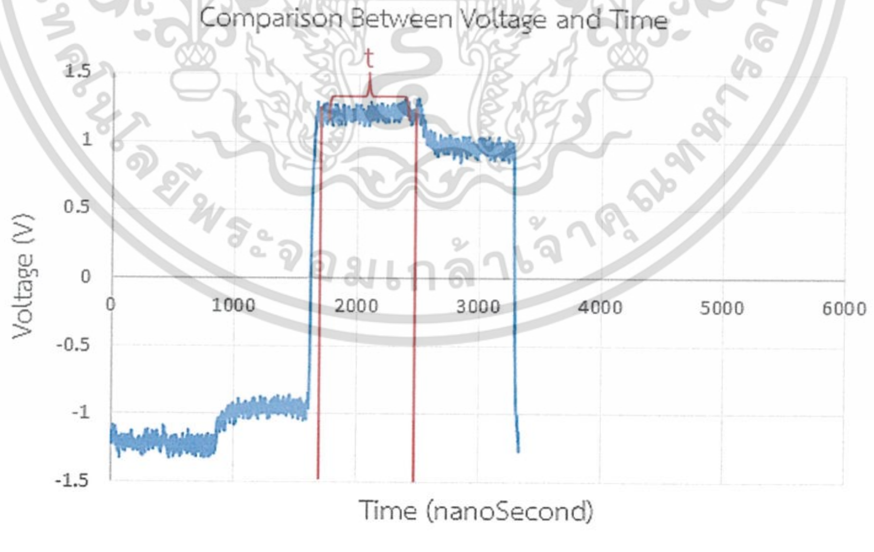
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- กรณีทำการต่อตัวต้านทานขนาด 75 Ω ณ จุดกำเนิดความผิดพลาดที่ 75 m โดยใช้คลื่นเดินทางที่มีความถี่ขนาด 200 kHz



รูปที่ 4.19 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางเมื่อวัดที่จุดกำเนิดคลื่นเดินทาง โดยใช้คลื่นเดินทางที่มีความถี่ขนาด 200 kHz แบบต่อตัวต้านทานขนาด 75 Ω

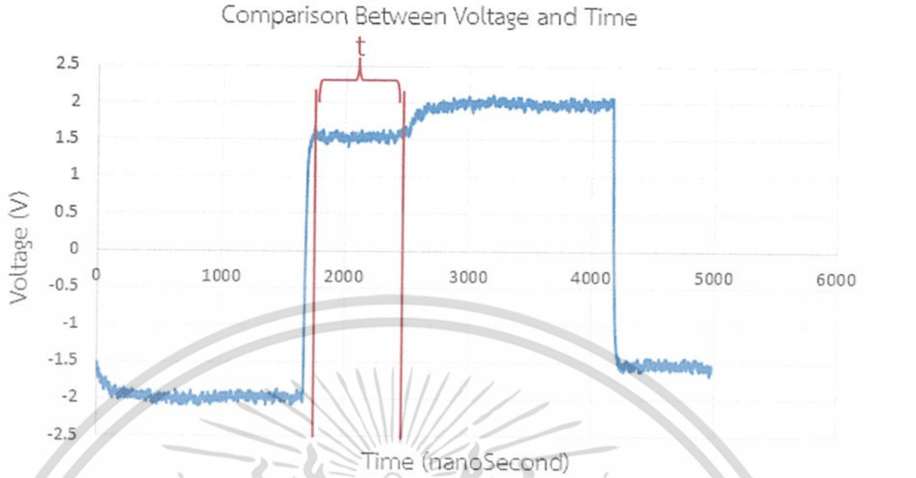
- กรณีทำการต่อตัวต้านทานขนาด 75 Ω ณ จุดกำเนิดความผิดพลาดที่ 75 m โดยใช้คลื่นเดินทางที่มีความถี่ขนาด 300 kHz



รูปที่ 4.20 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางเมื่อวัดที่จุดกำเนิดคลื่นเดินทาง โดยใช้คลื่นเดินทางที่มีความถี่ขนาด 300 kHz แบบต่อตัวต้านทานขนาด 75 Ω

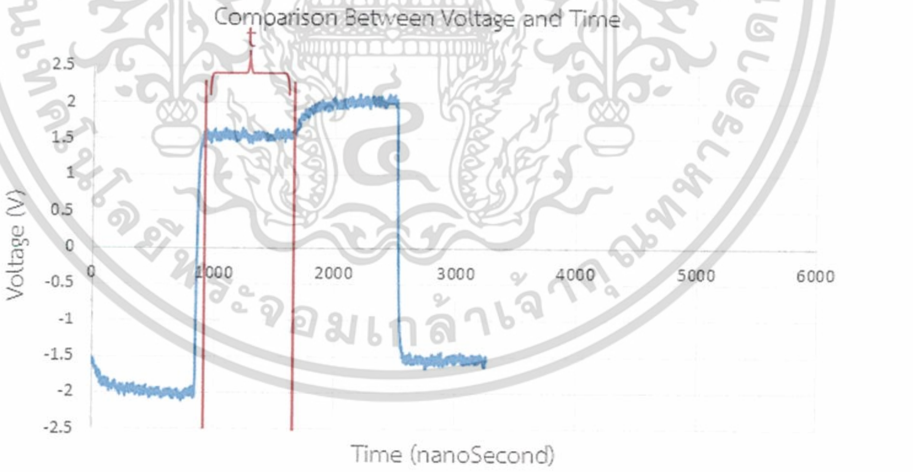
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- กรณีทำการต่อตัวต้านทานขนาด 200 Ω ณ จุดกำเนิดความผิดพลาดที่ 75 m โดยใช้คลื่นเดินทางที่มีความถี่ขนาด 200 kHz



รูปที่ 4.21 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางเมื่อวัดที่จุดกำเนิดคลื่นเดินทาง โดยใช้คลื่นเดินทางที่มีความถี่ขนาด 200 kHz แบบต่อตัวต้านทานขนาด 200 Ω

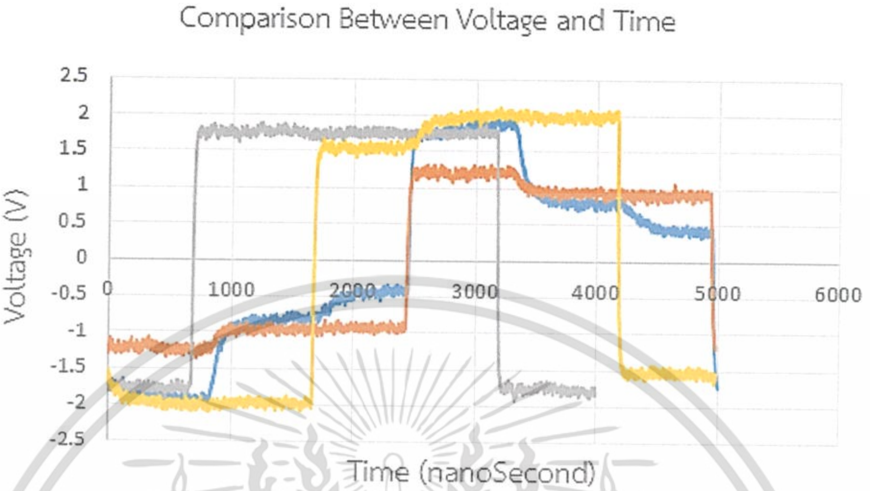
- กรณีทำการต่อตัวต้านทานขนาด 200 Ω ณ จุดกำเนิดความผิดพลาดที่ 75 m โดยใช้คลื่นเดินทางที่มีความถี่ขนาด 300 kHz



รูปที่ 4.22 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางเมื่อวัดที่จุดกำเนิดคลื่นเดินทาง โดยใช้คลื่นเดินทางที่มีความถี่ขนาด 300 kHz แบบต่อตัวต้านทานขนาด 200 Ω

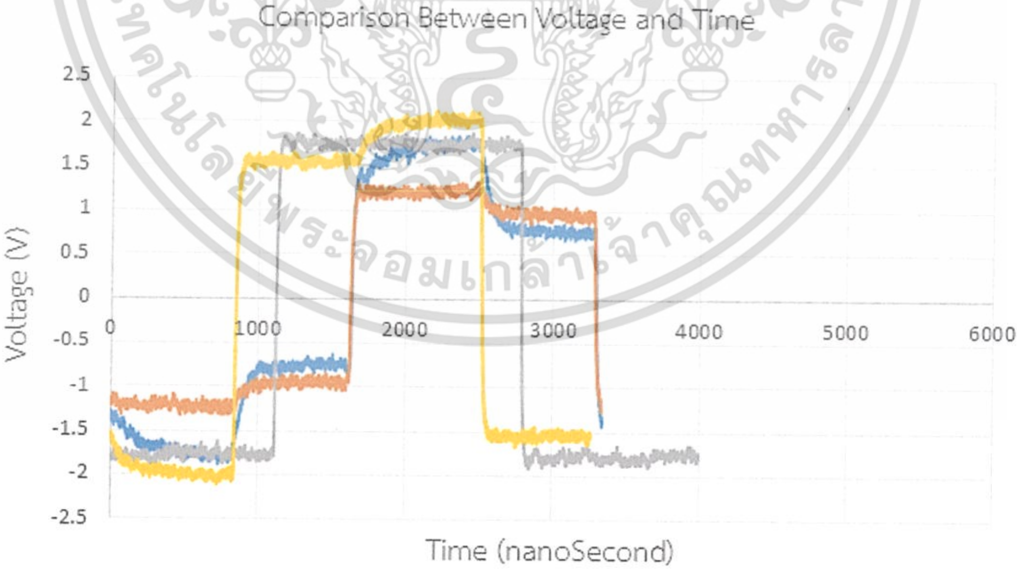
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- กรณีนำสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางที่มีความถี่ขนาด 200 kHz แบบต่อโหลดตัวต้านทานขนาด 1.42 Ω, 75 Ω, 120 Ω และ 200 Ω มาเปรียบเทียบกัน



รูปที่ 4.23 การเปรียบเทียบสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางที่มีขนาดความถี่ 200 kHz แบบต่อตัวต้านทานขนาด 1.42 Ω, 75 Ω, 120 Ω และ 200 Ω

- กรณีนำสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางที่มีความถี่ขนาด 300 kHz แบบต่อโหลดตัวต้านทานขนาด 1.42 Ω, 75 Ω, 120 Ω และ 200 Ω มาเปรียบเทียบกัน



รูปที่ 4.24 การเปรียบเทียบสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางที่มีขนาดความถี่ 300 kHz แบบต่อตัวต้านทานขนาด 1.42 Ω, 75 Ω, 120 Ω และ 200 Ω

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปการเปรียบเทียบสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางที่มีขนาดความถี่ 200 kHz และ 300 kHz ดังรูปที่ 4.23 และ 4.24 จะแสดงให้เห็นว่า สัญญาณแรงดันไฟฟ้าเมื่อมีการต่อตัวต้านทานขนาด 1.42 Ω, 75 Ω, 120 Ω และ 200 Ω จะมีสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ต่างกันไป แต่ทว่าจุดกำเนิดความผิดพลาดในสายส่งนั้น จะมีความยาวของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่มีขนาดความยาวเท่ากันทั้ง 200 kHz และ 300 kHz ซึ่งทำการวัดค่าจุดกำเนิดความผิดพลาดในสายส่งได้ดังสมการที่ 4.4 โดยใช้พารามิเตอร์และแสดงจุดกำเนิดความผิดพลาดในสายส่ง ดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ความเร็วของคลื่นเดินทางภายในสายส่ง ระยะเวลาที่ใช้ในการเดินทาง และจุดกำเนิดข้อผิดพลาดภายในสายส่ง แบบต่อตัวต้านทานขนาด 1.42 Ω, 75 Ω, 120 Ω และ 200 Ω

Frequency (kHz)	Velocity (m/s)	Time (nanoSecond)	Position (metre)
200	1.98×10^8	793	78.5
300	1.98×10^8	793	78.5

เมื่อนำจุดกำเนิดความผิดพลาดขึ้นที่คำนวณได้ ดังสมการที่ 4.4 แบบทำการทดลองแบบต่อกับโหลดทางไฟฟ้าหรือตัวต้านทานขนาด 1.42 Ω, 75 Ω, 120 Ω และ 200 Ω จะพบว่าจุดที่เกิดความผิดพลาดที่คำนวณได้ จะมีความคาดเคลื่อนเมื่อเทียบกับตำแหน่งของสายส่งของจริงประมาณ 4.6% ซึ่งถือว่าเป็นความเคลื่อนที่ยอมรับได้ จากการทดลองจะพบว่าเราสามารถคำนวณหาจุดกำเนิดความผิดพลาดภายในสายส่งกรณีที่มีโหลดทางไฟฟ้าหรือตัวต้านทานได้ โดยเมื่อคำนวณค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายส่ง ดังสมการที่ 2.19 โดยใช้ค่าพารามิเตอร์จากการทดลอง จะได้ดังตารางที่ 4.6 และ 4.7

ตารางที่ 4.6 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแรงดัน แรงดันของโหลดอิมพีแดนซ์ แรงดันของเครื่องส่งคลื่นเดินทาง อิมพีแดนซ์ของโหลด และอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายส่งและเครื่องส่งสัญญาณ กรณีตัวต้านทาน 1.42 Ω, 75 Ω, 120 Ω, และ 200 Ω โดยใช้คลื่นความถี่ 200 kHz

Resistance (Ω)	V_L (Voltage)	V_i (Voltage)	ρ	Z_L (Ω)	Z_0 (Ω)
1.42	1.5747	1.7583	- 0.8956	6.608	120
75	0.2941	1.2573	- 0.2339	74.50	
120	1.7530	1.7530	0	120	
200	0.3871	1.5467	0.2503	200.12	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแรงดัน แรงดันของโหลดอิมพีแดนซ์ แรงดันของเครื่องส่งคลื่นเดินทาง อิมพีแดนซ์ของโหลด และอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายส่งและเครื่องส่งสัญญาณ กรณีตัวต้านทาน 1.42 Ω, 75 Ω, 120 Ω และ 200 Ω โดยใช้คลื่นความถี่ 300 kHz

Resistance (Ω)	V_L (Voltage)	V_i (Voltage)	ρ	Z_L (Ω)	Z_0 (Ω)
1.42	0.9916	1.7534	- 0.5655	33.30	120
75	0.2747	1.2573	-0.2185	76.96	
120	1.7512	1.7512	0	120	
200	0.4285	1.5714	0.2727	209.98	

จากผลการทดลอง ดังตารางที่ 4.6 และ 4.7 จะแสดงให้เห็นว่า ตัวต้านทานขนาด 120 Ω เป็นค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของเครื่องส่งสัญญาณ โดยพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแรงดัน นอกจากนั้นจะสามารถหาค่าอิมพีแดนซ์ของโหลดทางไฟฟ้าที่นำมาทดลองได้ แต่ทว่าค่าอิมพีแดนซ์ของโหลดที่ต้องการทดสอบจะต้องมีค่าใกล้เคียงกับ Z_0 ในกรณีที่ค่าอิมพีแดนซ์ของโหลดที่ต้องการทดสอบมีค่าสูงหรือต่ำกว่า Z_0 มาก ๆ จะทำให้ค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณได้มีค่าความคลาดเคลื่อนค่อนข้างมาก เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแรงดันจะเข้าใกล้ -1 และ 1 ดังนั้นเพื่อที่จะดำเนินการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ได้จำเป็นจะต้องใช้อุปกรณ์วัดค่าที่มีความละเอียดสูงและต้องทดสอบในกรณีที่ค่าสัญญาณรบกวนน้อยที่สุดหรือใช้เครื่องส่งสัญญาณที่มีค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะที่ใกล้เคียงกันกับโหลดที่ต้องการจึงจะสามารถคำนวณค่าพารามิเตอร์ได้อย่างแม่นยำ

ในกรณีที่ค่าอิมพีแดนซ์ของโหลดที่ต้องการทดสอบ มีค่าน้อยกว่า Z_0 มาก ๆ จำเป็นจะต้องทำการทดสอบที่ความถี่ของสัญญาณต่ำเนื่องจากจะทำให้การวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ได้ง่ายกว่าและความคลาดเคลื่อนลดลง ขั้นตอนถัดไปจะเป็นทดสอบค่าความต้านทาน 1.42 Ω กับความถี่ของสัญญาณ 20 kHz

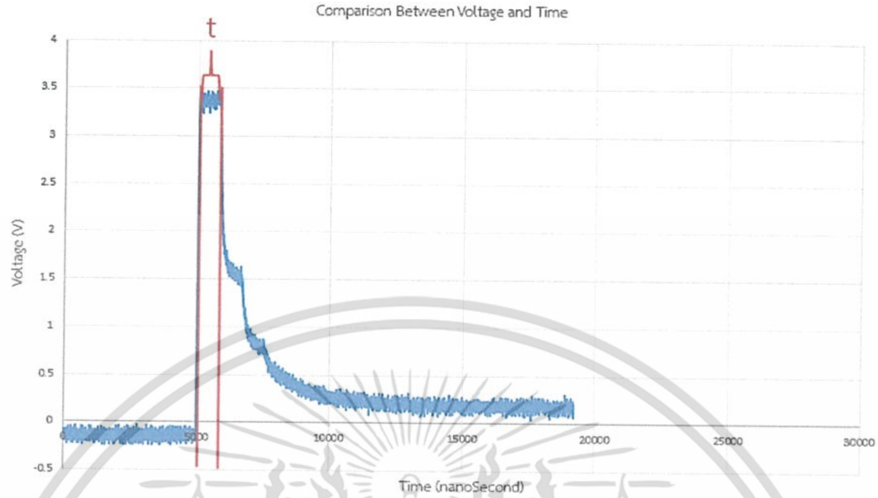
4.3.3.1 การทดลองการส่งคลื่นเดินทางผ่านทางสายส่งโดยเชื่อมต่อกับตัวต้านทานขนาด 1.42 Ω

ทำการทดลองส่งคลื่นเดินทางแบบ Square Wave ขนาด 5 V_{pp} โดยใช้คลื่นความถี่ขนาด 20 kHz ผ่านสายส่งที่มีความยาวขนาด 75 m โดยทำการต่อตัวต้านทานขนาด 1.42 Ω ณ จุดความยาวที่ 75 m เพื่อค้นหาลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและระยะของจุดกำเนิดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นและเพื่อขนาดคลื่นความถี่ของสัญญาณที่เหมาะสมที่สุด

โดยกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและเวลาเป็นไปดังรูปต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- กรณีทำการต่อตัวต้านทานขนาด 1.42 Ω จุดกำเนิดความผิดพลาดที่ 75 m โดยใช้คลื่นเดินทางที่มีความถี่ขนาด 20 kHz



รูปที่ 4.25 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางเมื่อวัดที่จุดกำเนิดคลื่นเดินทาง โดยใช้คลื่นเดินทางที่มีความถี่ขนาด 20 kHz แบบต่อตัวต้านทานขนาด 1.42 Ω

ตารางที่ 4.8 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแรงดัน แรงดันของโหลดอิมพีแดนซ์ แรงดันของเครื่องส่งคลื่นเดินทาง อิมพีแดนซ์ของโหลด และอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายส่งและเครื่องส่งสัญญาณ กรณีตัวต้านทาน 1.42 Ω โดยใช้คลื่นความถี่ 20 kHz

Resistance (Ω)	V_L (Voltage)	V_i (Voltage)	ρ	Z_0 (Ω)	Z_L (Ω)
1.42	3.2649	3.3741	- 0.9676	120	1.98

จากผลการทดลอง ดังตารางที่ 4.8 จะแสดงให้เห็นว่า สามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ได้แม่นยำกว่ากรณีใช้คลื่นความถี่ 200 kHz และ 300 kHz ขั้นตอนถัดไปจะเป็นการทดลองกับแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.4 การทดลองการส่งคลื่นเดินทางผ่านทางสายส่งโดยเชื่อมต่อเข้ากับแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด

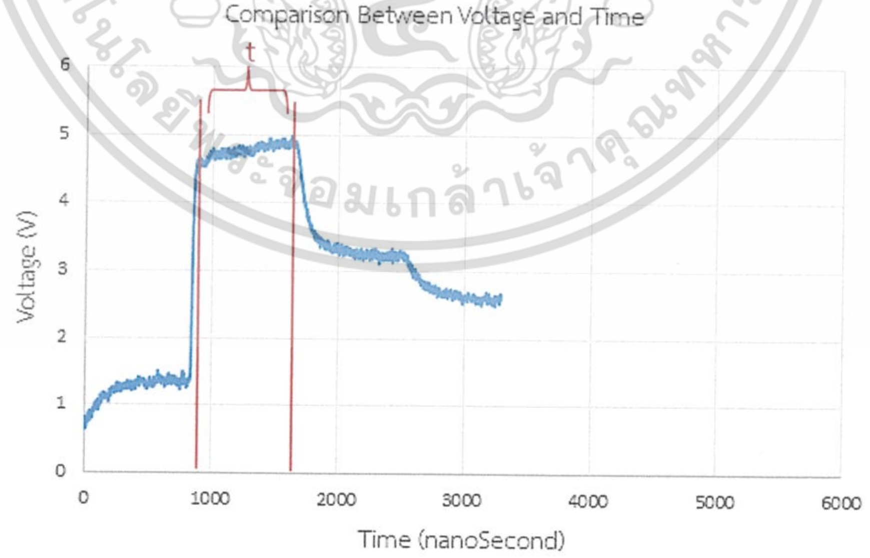
เนื่องจากการทดลองในกรณีที่ทำการทดลองผ่านสายส่งแบบเปิดวงจร แบบปิดวงจร และแบบต่อตัวต้านทาน แสดงให้เห็นว่า จุดกำเนิดความผิดพลาดในสายส่งนั้นแทบจะมีตำแหน่งเท่าเดิม มีความผิดพลาดไม่เกิน 5% ไม่ว่าจะทำการเปิดวงจร ปิดวงจร และต่อตัวต้านทาน นอกจากนั้นการเปลี่ยนแปลงค่าขนาดความถี่ของคลื่นเดินทางก็ไม่ได้ส่งผลต่อระยะจุดกำเนิดความผิดพลาด จึงเป็นข้อสังเกตได้ว่าจะสามารถนำมาวิเคราะห์เพื่อหาความเป็นได้ไปที่จะมีแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดที่เสื่อมสภาพและสามารถบ่งบอกตำแหน่งของแบตเตอรี่ที่ชนิดตะกั่วกรดที่เสื่อมสภาพภายในวงจรได้

4.3.4.1 การทดลองการส่งคลื่นเดินทางผ่านทางสายส่งโดยเชื่อมต่อเข้ากับแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด แบบต่อแบตเตอรี่ 1 ลูก

ทำการทดลองส่งคลื่นเดินทางแบบ Square Wave ขนาด 5 V_{pp} โดยใช้คลื่นความถี่ขนาด 200 kHz, 100 kHz และ 20 kHz ผ่านสายส่งที่มีความยาวขนาด 75 m โดยทำการต่อแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดที่มีแรงดันไฟฟ้า 2 V จำนวน 1 ลูก ณ จุดความยาวที่ 75 m เพื่อค้นหาลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและระยะของจุดกำเนิดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นและเพื่อหาขนาดคลื่นความถี่ของสัญญาณที่เหมาะสมที่สุด

โดยกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและเวลา เป็นไปดังรูปต่อไปนี้

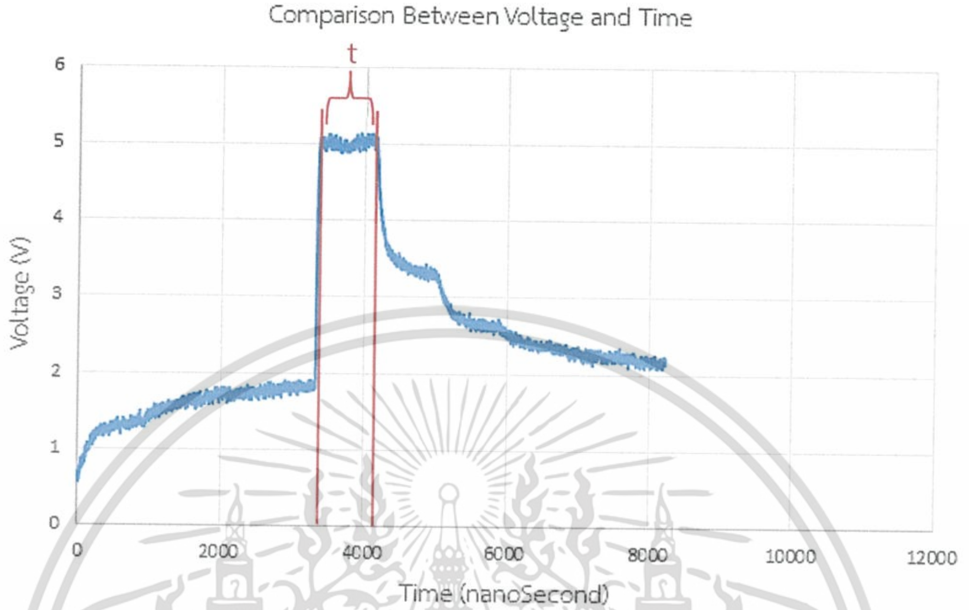
- กรณีทำการต่อแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด จำนวน 1 ลูก ณ จุดกำเนิดความผิดพลาดที่ 75 m โดยใช้คลื่นเดินทางที่มีความถี่ขนาด 200 kHz



รูปที่ 4.26 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางเมื่อวัดที่จุดกำเนิดคลื่นเดินทาง โดยใช้คลื่นเดินทางที่มีความถี่ขนาด 200 kHz แบบต่อแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด จำนวน 1 ลูก

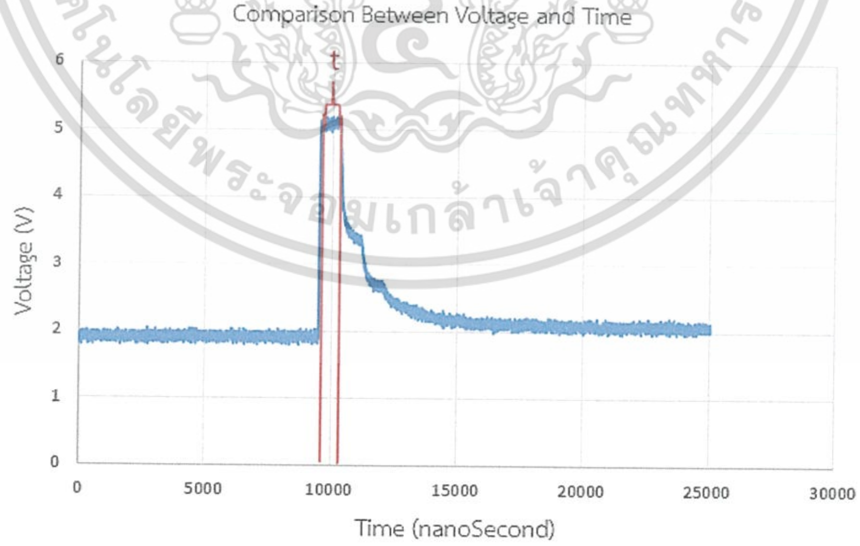
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- กรณีทำการต่อแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด จำนวน 1 ลูก ณ จุดกำเนิดความผิดพลาดที่ 75 m โดยใช้คลื่นเดินทางที่มีความถี่ขนาด 100 kHz



รูปที่ 4.27 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางเมื่อวัดที่จุดกำเนิดคลื่นเดินทาง โดยใช้คลื่นเดินทางที่มีความถี่ขนาด 100 kHz แบบต่อแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด จำนวน 1 ลูก

- กรณีทำการต่อแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด จำนวน 1 ลูก ณ จุดกำเนิดความผิดพลาดที่ 75 m โดยใช้คลื่นเดินทางที่มีความถี่ขนาด 20 kHz



รูปที่ 4.28 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางเมื่อวัดที่จุดกำเนิดคลื่นเดินทาง โดยใช้คลื่นเดินทางที่มีความถี่ขนาด 20 kHz แบบต่อแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด จำนวน 1 ลูก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปการเปรียบเทียบสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางที่มีขนาดความถี่ 200 kHz, 100 kHz และ 20 kHz ดังรูปที่ 4.26, 4.27 และ 4.28 จะแสดงให้เห็นว่า จุดกำเนิดความผิดพลาดในสายส่งนั้นจะมีความยาวของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่มีขนาดความยาวเท่ากันทั้ง 200 kHz, 100 kHz และ 20 kHz ซึ่งทำการวัดค่าจุดกำเนิดความผิดพลาดในสายส่งได้ดังสมการที่ 4.4 โดยใช้พารามิเตอร์และแสดงจุดกำเนิดความผิดพลาดในสายส่ง ดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ความเร็วของคลื่นเดินทางภายในสายส่ง ระยะเวลาที่ใช้ในการเดินทาง และจุดกำเนิดข้อผิดพลาดภายในสายส่ง แบบเชื่อมต่อแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด จำนวน 2 ลูก

Frequency (kHz)	Velocity (m/s)	Time (nanoSecond)	Position (metre)
20	1.98×10^8	792	78.4
100	1.98×10^8	792	78.4
200	1.98×10^8	792	78.4

เมื่อนำจุดกำเนิดความผิดพลาดขึ้นที่คำนวณได้ ดังสมการที่ 4.4 แบบทำการทดลองแบบต่อกับแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด จำนวน 1 ลูก จะพบว่าจุดที่เกิดความผิดพลาดที่คำนวณได้ จะมีความคาดเคลื่อนเมื่อเทียบกับตำแหน่งของสายส่งของจริงประมาณ 4.5% ซึ่งถือว่าเป็นความเคลื่อนที่ยอมรับได้ และเมื่อพิจารณาถึงสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางนั้น กรณีที่ใช้ขนาดคลื่นความถี่ 20 kHz สัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่วัดค่าได้จะมีค่าความเสถียรของสัญญาณมากที่สุด นั่นคือสัญญาณแรงดันไฟฟ้าในช่วงขาขึ้นและในช่วงขาลงมีขนาดที่เท่ากัน จึงพิจาณาทำการทดลองที่ 20 kHz ขั้นตอนถัดไปจะทดลองใช้แบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด จำนวน 2 ลูก และ 3 ลูก เพื่อวิเคราะห์ถึงสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลง

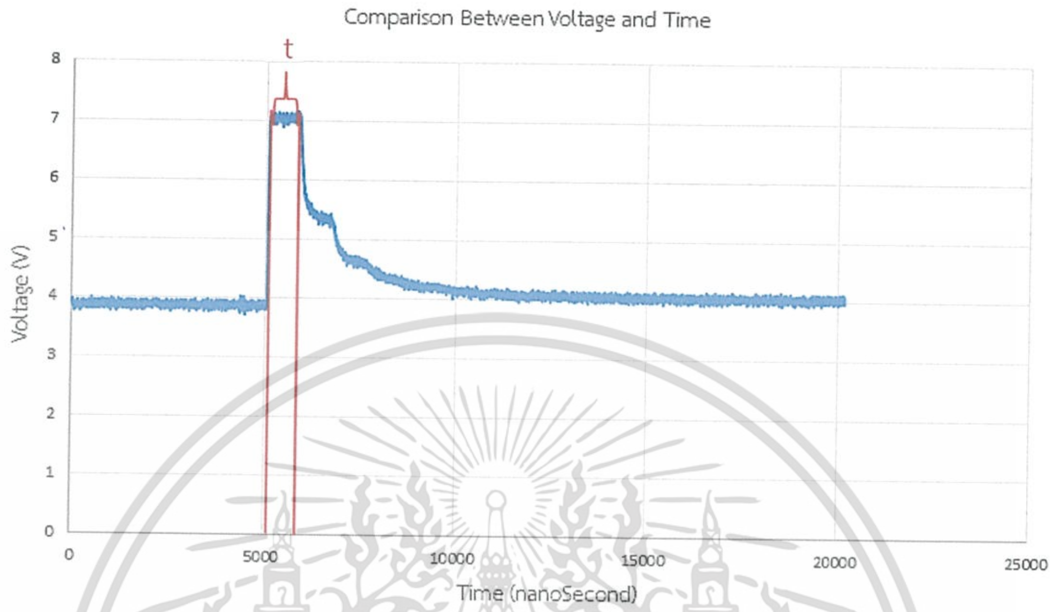
4.3.4.2 การทดลองการส่งคลื่นเดินทางผ่านทางสายส่งโดยเชื่อมต่อเข้ากับแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด แบบต่ออนุกรมกัน 2 ลูก และ 3 ลูก

ทำการทดลองส่งคลื่นเดินทางแบบ Square Wave ขนาด 5 V_{pp} โดยใช้คลื่นความถี่ขนาด 20 kHz ผ่านสายส่งที่มีความยาวขนาด 75 m โดยทำการต่อแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดที่มีแรงดันไฟฟ้า 2 V จำนวน 2 ลูก และ 3 ลูก ณ จุดความยาวที่ 75 m เพื่อค้นหาลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและระยะของจุดกำเนิดความผิดพลาดที่เกิดขึ้น

โดยกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและเวลาเป็นไปดังรูปต่อไปนี้

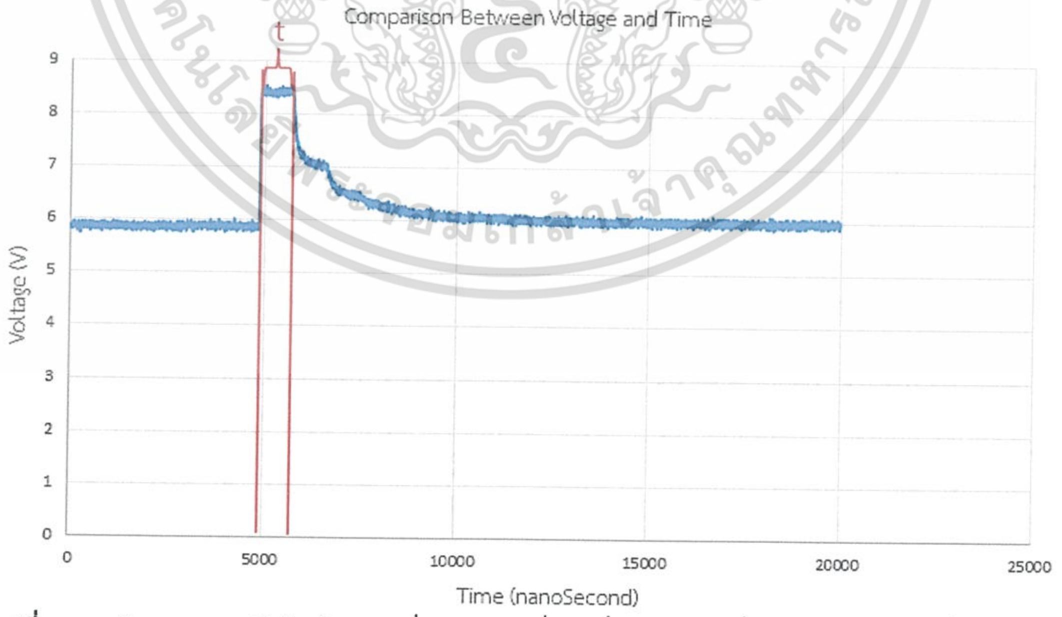
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- กรณีทำการต่อแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด จำนวน 2 ลูก ณ จุดกำเนิดความผิดพลาด ที่ 75 m โดยใช้คลื่นเดินทางที่มีความถี่ขนาด 20 kHz



รูปที่ 4.29 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางเมื่อวัดที่จุดกำเนิดคลื่นเดินทาง โดยใช้คลื่นเดินทางที่มีความถี่ขนาด 20 kHz แบบต่อแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด จำนวน 2 ลูก

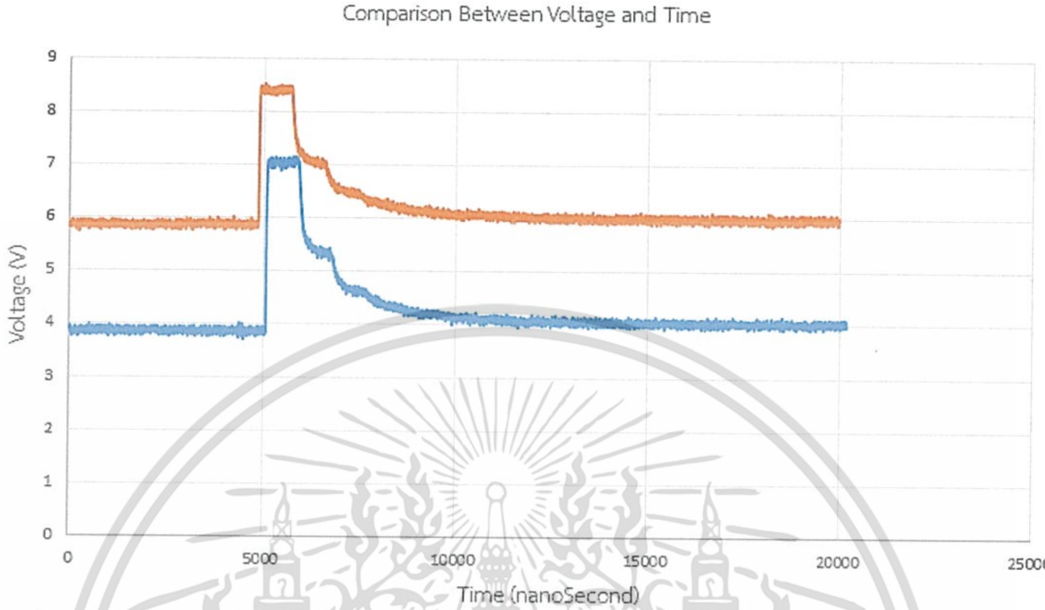
- กรณีทำการต่อแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด จำนวน 3 ลูก ณ จุดกำเนิดความผิดพลาด ที่ 75 m โดยใช้คลื่นเดินทางที่มีความถี่ขนาด 20 kHz



รูปที่ 4.30 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางเมื่อวัดที่จุดกำเนิดคลื่นเดินทาง โดยใช้คลื่นเดินทางที่มีความถี่ขนาด 20 kHz แบบต่อแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด จำนวน 3 ลูก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- กรณีนำสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางที่มีความถี่ขนาด 20 kHz มาเปรียบเทียบกัน



รูปที่ 4.31 การเปรียบเทียบสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางที่มีขนาดความถี่ 20 kHz แบบต่อแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด จำนวน 2 และ 3 ลูก

จากรูปการเปรียบเทียบสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางที่มีขนาดความถี่ 20 kHz ดังรูปที่ 4.31 จะแสดงให้เห็นว่า จุดกำเนิดความผิดพลาดในสายส่งนั้นจะมีความยาวของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่มีขนาดความยาวเท่ากัน โดยทำการวัดค่าจุดกำเนิดความผิดพลาดในสายส่งได้ ดังสมการที่ 4.4 โดยใช้พารามิเตอร์และแสดงจุดกำเนิดความผิดพลาดในสายส่ง ดังตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 ความเร็วของคลื่นเดินทางภายในสายส่ง ระยะเวลาที่ใช้ในการเดินทาง และจุดกำเนิดข้อผิดพลาดภายในสายส่ง แบบเชื่อมต่อแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด จำนวน 2 ลูก และ 3 ลูก

Battery (Unit)	Frequency (kHz)	Velocity (m/s)	Time (nanoSecond)	Position (metre)	V_{AVG} (V)
2	20	1.98×10^8	792	78.4	7.3686
3	20	1.98×10^8	792	78.4	6.8521

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำจุดกำเนิดความผิดพลาดขึ้นที่คำนวณได้ ดังสมการที่ 4.4 แบบทำการทดลองแบบต่อกับแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด จำนวน 2 และ 3 ลูก จะพบว่าจุดที่เกิดความผิดพลาดที่คำนวณได้จะมีความคาดเคลื่อนเมื่อเทียบกับตำแหน่งของสายส่งของจริงประมาณ 4.5% ซึ่งถือว่าเป็นความเคลื่อนที่ยอมรับได้ แต่ทว่าจากสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางไม่สามารถบ่งบอกได้ว่าแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด ลูกที่ 1 ลูกที่ 2 และลูกที่ 3 อยู่ในตำแหน่งใด ซึ่งส่งผลให้ไม่สามารถวิเคราะห์หาแบตเตอรี่ลูกที่เสื่อมสภาพได้เมื่อเชื่อมต่อกันแบบอนุกรม นอกจากนั้นกรณีที่เชื่อมต่อแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด จำนวน 2 และ 3 ลูก โดยทำการเปรียบเทียบสัญญาณแรงดันไฟฟ้า ดังรูปที่ 4.28 จะแสดงให้เห็นว่าจุดกำเนิดความผิดพลาดทั้ง 2 กรณี จะเป็นจุดใกล้เคียงกัน ซึ่งสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่วัดค่าได้เปรียบเสมือนมีแบตเตอรี่เชื่อมต่ออยู่เป็นโหลดทางไฟฟ้าชุดเดียวทำให้ไม่สามารถแยกตำแหน่งของแบตเตอรี่ได้ ขั้นตอนต่อไปจึงทำการเพิ่มระยะสายส่งระหว่างแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด จำนวน 2 ลูก เพื่อวิเคราะห์จุดกำเนิดความผิดพลาดในกรณีที่แบตเตอรี่ จำนวน 2 ลูก อยู่ห่างกัน

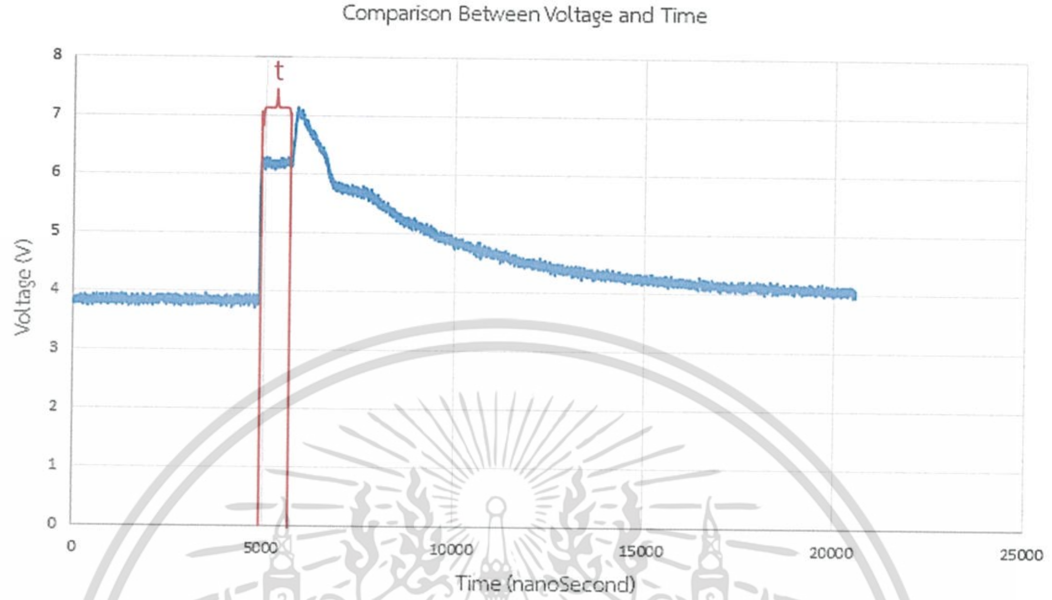
4.3.4.3 การทดลองการส่งคลื่นเดินทางผ่านทางสายส่งโดยเชื่อมต่อเข้ากับแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด แบบต่ออนุกรมกัน 2 ลูก และเพิ่มระยะสายส่งระหว่างแบตเตอรี่

ทำการทดลองส่งคลื่นเดินทางแบบ Square Wave ขนาด 5 V_{pp} โดยใช้คลื่นความถี่ขนาด 20 kHz สายส่งที่มีความยาวขนาด 75 m โดยทำการต่อแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดที่มีแรงดันไฟฟ้า 2 V จำนวน 2 ลูก และเพิ่มระยะสายส่งระหว่างแบตเตอรี่ขนาด 19 m ณ จุดความยาวที่ 75 m เพื่อค้นหาลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและระยะของจุดกำเนิดความผิดพลาดที่เกิดขึ้น

โดยกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและเวลาเป็นไปดังรูปต่อไปนี้

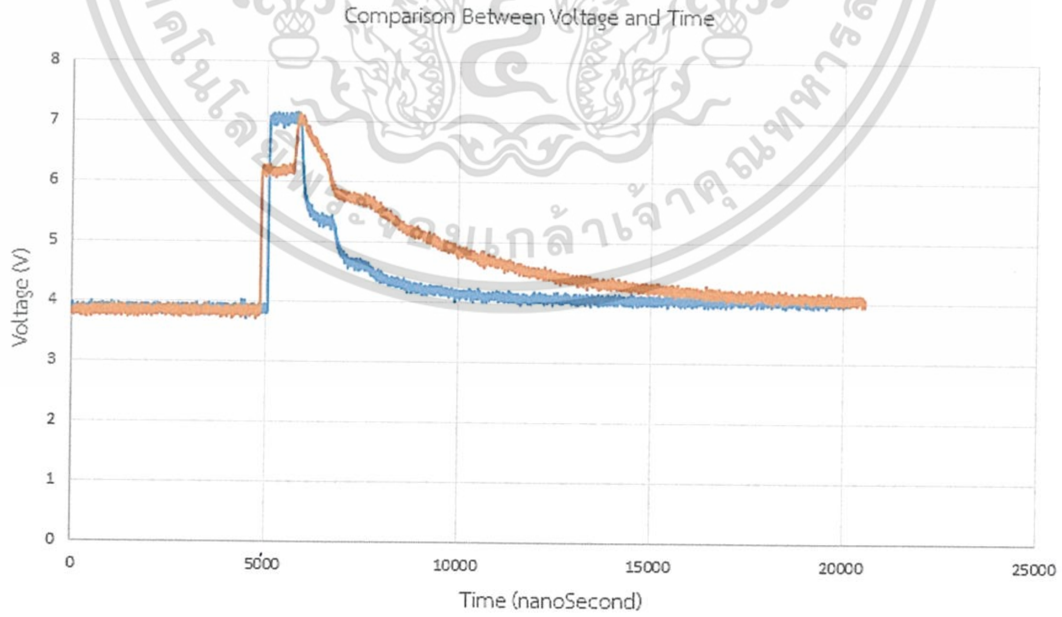
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- กรณีทำการต่อแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด จำนวน 2 ลูก และเพิ่มระยะสายส่งระหว่างแบตเตอรี่ ณ จุดกำเนิดความผิดพลาดที่ 75 m โดยใช้คลื่นเดินทางที่มีความถี่ขนาด 20 kHz



รูปที่ 4.32 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางเมื่อวัดที่จุดกำเนิดคลื่นเดินทาง โดยใช้คลื่นเดินทางที่มีความถี่ขนาด 20 kHz แบบต่อแบตเตอรี่ จำนวน 2 ลูก และเพิ่มระยะสายส่งระหว่างแบตเตอรี่

- กรณีนำสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางที่มีความถี่ขนาด 20 kHz เชื่อมต่อแบตเตอรี่จำนวน 2 ลูก และกรณีต่อสายส่งขนาด 19 m ระหว่างแบตเตอรี่ มาเปรียบเทียบกัน



รูปที่ 4.33 การเปรียบเทียบสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางที่มีขนาดความถี่ 20 kHz แบบต่อแบตเตอรี่ จำนวน 2 ลูก และ กรณีต่อสายส่งขนาด 19 m ระหว่างแบตเตอรี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปการเปรียบเทียบสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางที่มีขนาดความถี่ 20 kHz รูปที่ 4.33 จะแสดงให้เห็นว่า จุดกำเนิดความผิดพลาดในสายส่งนั้นจะมีความยาวของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่มีขนาดต่างกันทั้งแบบต่อแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด จำนวน 2 ลูก และ กรณีเชื่อมต่อแบตเตอรี่ 2 ลูก และต่อสายส่งระหว่างแบตเตอรี่ ซึ่งทำการวัดค่าจุดกำเนิดความผิดพลาดในสายส่งได้ดังสมการที่ 4.4 โดยใช้พารามิเตอร์และแสดงจุดกำเนิดความผิดพลาดในสายส่ง ดังตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 ความเร็วของคลื่นเดินทางภายในสายส่ง ระยะเวลาที่ใช้ในการเดินทาง และจุดกำเนิดข้อผิดพลาดภายในสายส่ง แบบเชื่อมต่อแบตเตอรี่ 2 ลูก และต่อสายส่งระหว่างแบตเตอรี่

Frequency (kHz)	Velocity (m/s)	Time (nanoSecond)	Position (metre)
20	1.98×10^8	854	84.6

เมื่อเปรียบเทียบสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากรณีเชื่อมต่อแบตเตอรี่จำนวน 2 ลูก และเชื่อมต่อแบตเตอรี่จำนวน 2 ลูก และเพิ่มสายส่งระหว่างแบตเตอรี่ จะพบว่าเมื่อนำจุดกำเนิดความผิดพลาดขึ้นที่คำนวณได้ ดังสมการที่ 4.4 แบบทำการทดลองแบบต่อกับแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด จำนวน 2 ลูก และเพิ่มสายส่งระหว่างแบตเตอรี่ จะพบว่าจุดที่เกิดความผิดพลาดที่คำนวณได้จะมีความคาดเคลื่อนเมื่อเทียบกับตำแหน่งของสายส่งของจริงประมาณ 10% ซึ่งถือว่าเป็นความเคลื่อนที่ค่อนข้างมากและลักษณะของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าจะมีลักษณะเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม แต่ทว่าไม่สามารถบ่งบอกได้ว่าแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด ลูกที่ 1 ลูกที่ 2 อยู่ในตำแหน่งใดซึ่งส่งผลให้ไม่สามารถวิเคราะห์หาแบตเตอรี่ลูกที่เสื่อมสภาพได้เมื่อเชื่อมต่อกันแบบอนุกรม ซึ่งสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่วัดค่าได้เปรียบเสมือนมีแบตเตอรี่เชื่อมต่ออยู่เป็นโหลดทางไฟฟ้าชุดเดียวทำให้ไม่สามารถแยกตำแหน่งของแบตเตอรี่ได้ขั้นตอนต่อไปจึงทำการเชื่อมต่อแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด จำนวน 2 ลูก และทำการเพิ่มตัวต้านทานเข้าไปเพื่อวิเคราะห์ถึงสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลง

4.3.4.4 การทดลองการส่งคลื่นเดินทางผ่านทางสายส่งโดยเชื่อมต่อเข้ากับแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด แบบต่ออนุกรมกัน 2 ลูก และต่อโหลดตัวต้านทาน

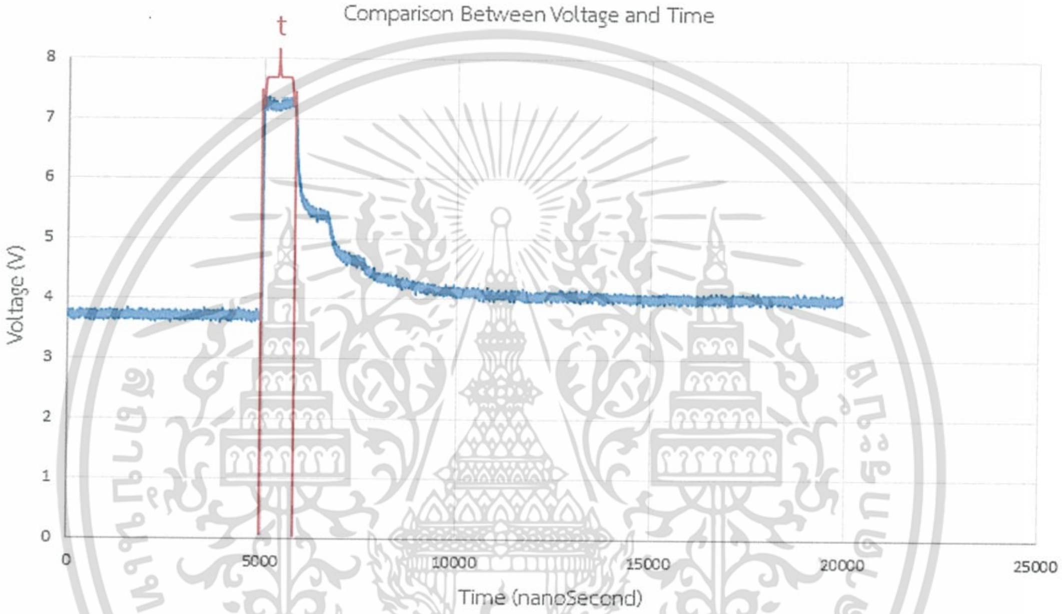
เนื่องจากแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดที่เสื่อมสภาพนั้นจะเกิดการซัลเฟชั่นที่ขั้วแผ่นธาตุซึ่งส่งผลให้เกิดการเพิ่มขึ้นของ R_0 ของแบตเตอรี่ จึงทำการทดลองเพิ่มตัวต้านทานเข้าไปในวงจรแบตเตอรี่ที่ต่อกันแบบอนุกรมเพื่อวิเคราะห์ว่า การเพิ่มขึ้นของค่าความต้านทานในวงจรจะส่งผลอย่างไรต่อสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางโดยทำการทดลองส่งคลื่นเดินทางแบบ Square Wave ขนาด 5 V_{pp} โดยใช้คลื่นความถี่ขนาด 20 kHz ผ่านสายส่งที่มีความยาวขนาด 75 m โดยทำการต่อแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด ที่มีแรงดันไฟฟ้า 2 V จำนวน 2 ลูก และต่อโหลดตัวต้านทานขนาด 1.42 Ω, 75 Ω และ 200 Ω ณ จุดความยาวที่ 75 m เพื่อค้นหาลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันไฟฟ้าและระยะของจุดกำเนิดความผิดพลาดที่เกิดขึ้น เนื่องจากตัวต้านทาน 120 Ω เป็นอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายส่งจึงไม่นำมาทำการทดลอง

โดยกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและเวลา เป็นไปดังรูปต่อไปนี้

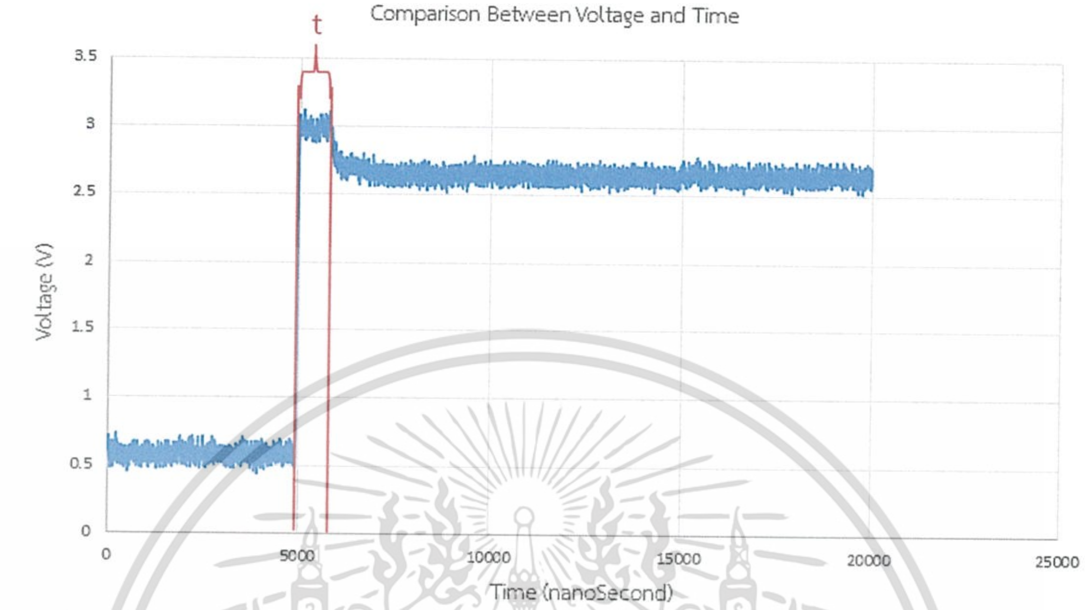
- กรณีทำการต่อแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด จำนวน 2 ลูก และต่อโหลดตัวต้านทานขนาด 1.42 Ω ณ จุดกำเนิดความผิดพลาดที่ 75 m โดยใช้คลื่นเดินทางที่มีความถี่ขนาด 20 kHz



รูปที่ 4.34 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางเมื่อวัดที่จุดกำเนิดคลื่นเดินทาง โดยใช้คลื่นเดินทางที่มีความถี่ขนาด 20 kHz แบบต่อแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด จำนวน 2 ลูก และต่อตัวต้านทานขนาด 1.42 Ω

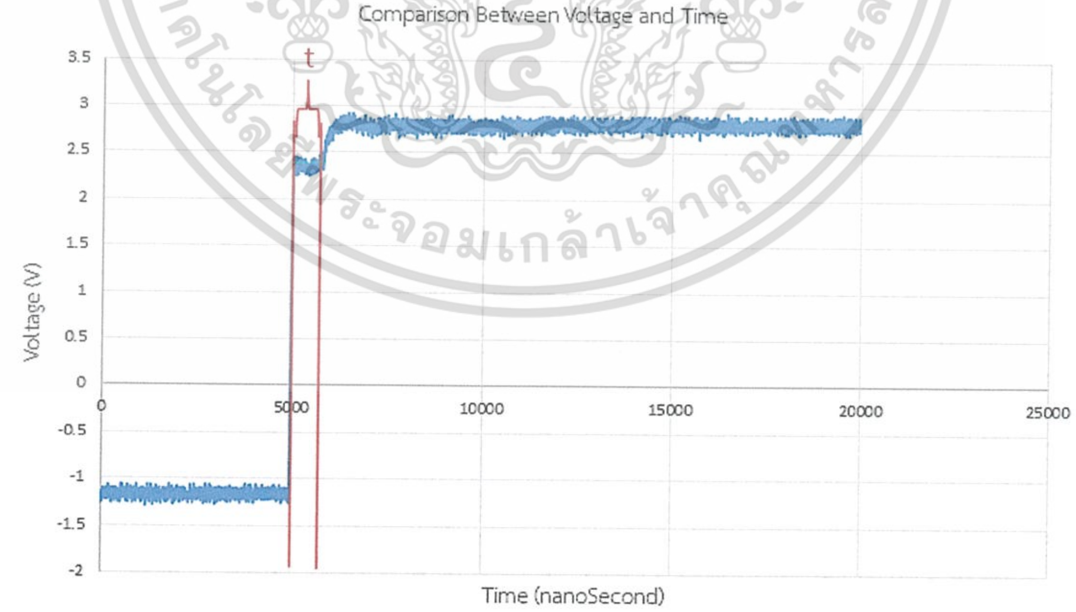
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- กรณีทำการต่อแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด จำนวน 2 ลูก และต่อโหลดตัวต้านทานขนาด 75 Ω ณ จุดกำเนิดความผิดพลาดที่ 75 m โดยใช้คลื่นเดินทางที่มีความถี่ขนาด 20 kHz



รูปที่ 4.35 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางเมื่อวัดที่จุดกำเนิดคลื่นเดินทาง โดยใช้คลื่นเดินทางที่มีความถี่ขนาด 20 kHz แบบต่อแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด จำนวน 2 ลูกและตัวต้านทานขนาด 75 Ω

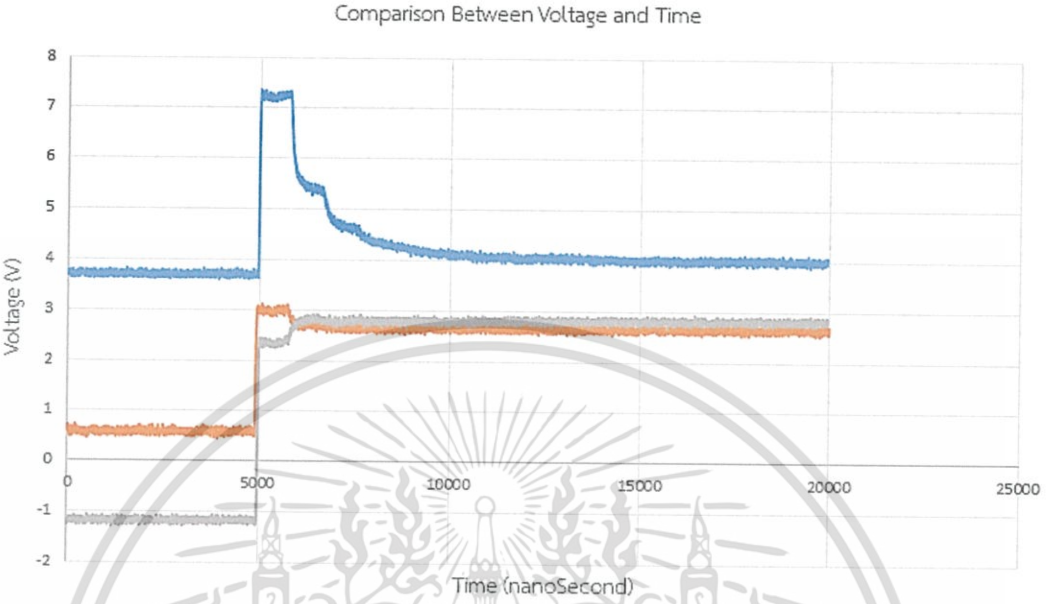
- กรณีทำการต่อแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด จำนวน 2 ลูก และต่อโหลดตัวต้านทานขนาด 200 Ω ณ จุดกำเนิดความผิดพลาดที่ 75 m โดยใช้คลื่นเดินทางที่มีความถี่ขนาด 20 kHz



รูปที่ 4.36 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางเมื่อวัดที่จุดกำเนิดคลื่นเดินทาง โดยใช้คลื่นเดินทางที่มีความถี่ขนาด 20 kHz แบบต่อแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด จำนวน 2 ลูก และตัวต้านทานขนาด 200 Ω

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- กรณีนำสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางที่มีความถี่ขนาด 20 kHz แบบต่อแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด จำนวน 2 ลูก และตัวต้านทานขนาด 1.42 Ω, 75 Ω และ 200 Ω มาเปรียบเทียบกัน



รูปที่ 4.37 การเปรียบเทียบสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางที่มีขนาดความถี่ 20 kHz และ 300 kHz แบบต่อแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด จำนวน 2 ลูก และตัวต้านทานขนาด 1.42 Ω, 75 Ω และ 200 Ω

จากรูปการเปรียบเทียบสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางที่มีขนาดความถี่ 20 kHz ดังรูปที่ 4.37 จะแสดงให้เห็นว่า สัญญาณแรงดันไฟฟ้าเมื่อมีการเชื่อมต่อแบตเตอรี่ จำนวน 2 ลูก และตัวต้านทานขนาด 1.42 Ω, 75 Ω และ 200 Ω จะมีสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ต่างกันไป แต่ทว่าจุดกำเนิดความผิดพลาดในสายส่งนั้นจะมีความยาวของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่มีขนาดความยาวเท่ากันทั้งแบบต่อตัวต้านทานขนาด 1.42 Ω, 75 Ω, และ 200 Ω ซึ่งทำการวัดค่าจุดกำเนิดความผิดพลาดในสายส่งได้ดังสมการที่ 4.4 โดยใช้พารามิเตอร์และแสดงจุดกำเนิดความผิดพลาดในสายส่ง ดังตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 ความเร็วของคลื่นเดินทางภายในสายส่ง ระยะเวลาที่ใช้ในการเดินทาง และจุดกำเนิดข้อผิดพลาดภายในสายส่ง แบบต่อตัวต้านทานขนาด 1.42 Ω, 75 Ω และ 200 Ω

Resistance (Ω)	Frequency (kHz)	Velocity (m/s)	Time (nanoSecond)	Position (metre)	Z_L (Ω)
1.42	20	1.98×10^8	793	78.5	1.98
75	20	1.98×10^8	793	78.5	76.96
200	20	1.98×10^8	793	78.5	209.98

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำจุดกำเนิดความผิดพลาดขึ้นที่คำนวณได้ ดังสมการที่ 4.4 แบบทำการทดลองแบบต่อกับโหลดทางไฟฟ้าหรือตัวต้านทานขนาด 1.42 Ω, 75 Ω และ 200 Ω จะพบว่าจุดที่เกิดความผิดพลาดที่คำนวณได้จะมีความคาดเคลื่อนเมื่อเทียบกับตำแหน่งของสายส่งของจริงประมาณ 4.6% ซึ่งถือว่าเป็นความเคลื่อนที่ยอมรับได้ แต่ทว่าไม่สามารถบ่งบอกตำแหน่งของแบตเตอรี่ ลูกที่ 1 และ ลูกที่ 2 ได้

เมื่อพิจารณา รูปที่ 4.37 เมื่อโหลดตัวต้านทานมีขนาดเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางโดยสัญญาณแรงดันไฟฟ้ามีขนาดแรงดันไฟฟ้าลดลงตามสัดส่วนของตัวต้านทานที่เพิ่มขึ้นและสัญญาณแรงดันไฟฟ้าก็มีลักษณะแตกต่างกัน โดยขั้นตอนถัดไป จะทำการต่อโหลดตัวต้านทานขนาดใกล้เคียงกับ R_0 ของแบตเตอรี่เพื่อวิเคราะห์สัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป

4.3.4.5 การทดลองการส่งคลื่นเดินทางผ่านทางสายส่งโดยเชื่อมต่อเข้ากับแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด แบบต่ออนุกรมกัน 2 ลูก และต่อโหลดตัวต้านทานขนาดใกล้เคียงกับ R_0 ของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด

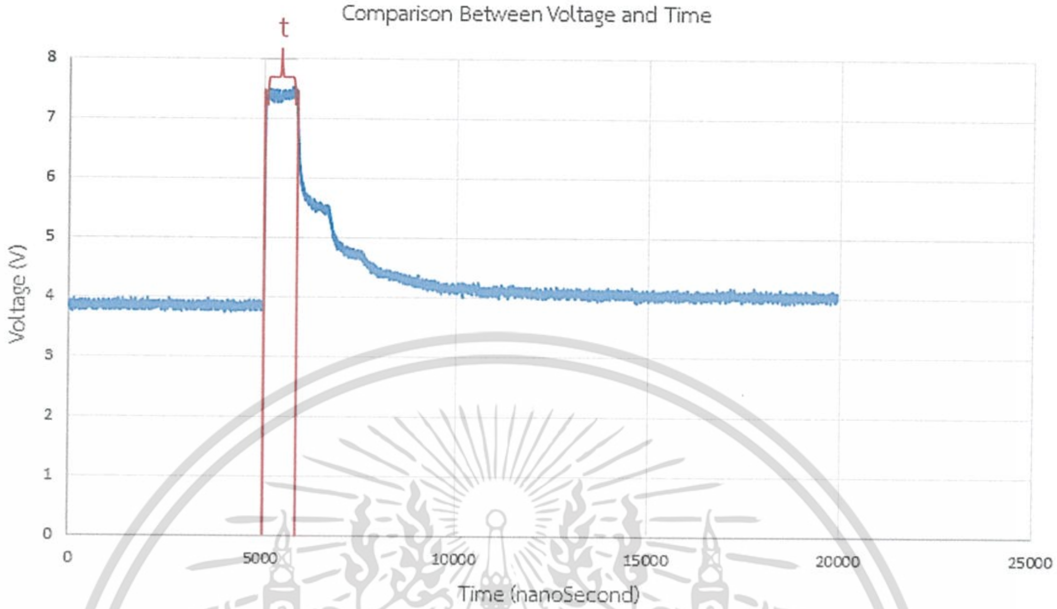
จากรูปที่ 4.37 เมื่อโหลดตัวต้านทานมีขนาดเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทาง เมื่อพิจารณาจากโหลดตัวต้านทานที่เพิ่มขึ้นนั้นจะมีค่าความต้านทานคิดเป็นสัดส่วนกับ R_0 ของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดที่ใช้ในการทดลองค่อนข้างมาก ดังนั้นจึงพิจารณาที่จะใส่โหลดตัวต้านทานที่มีค่าความต้านทานขนาดใกล้เคียงกับ R_0 ของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดเข้าไปเพื่อวิเคราะห์ถึงสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลง

โดยทำการทดลองส่งคลื่นเดินทางแบบ Square Wave ขนาด 5 V_{pp} โดยใช้คลื่นความถี่ขนาด 20 kHz ผ่านสายส่งที่มีความยาวขนาด 75 m โดยทำการต่อแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด ที่มีแรงดันไฟฟ้า 2 V จำนวน 2 ลูก และต่อโหลดตัวต้านทานขนาด 5 mΩ และ 10 mΩ เพื่อหาลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและระยะของจุดกำเนิดความผิดพลาดที่เกิดขึ้น

โดยกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและเวลา เป็นไปดังรูปต่อไปนี้

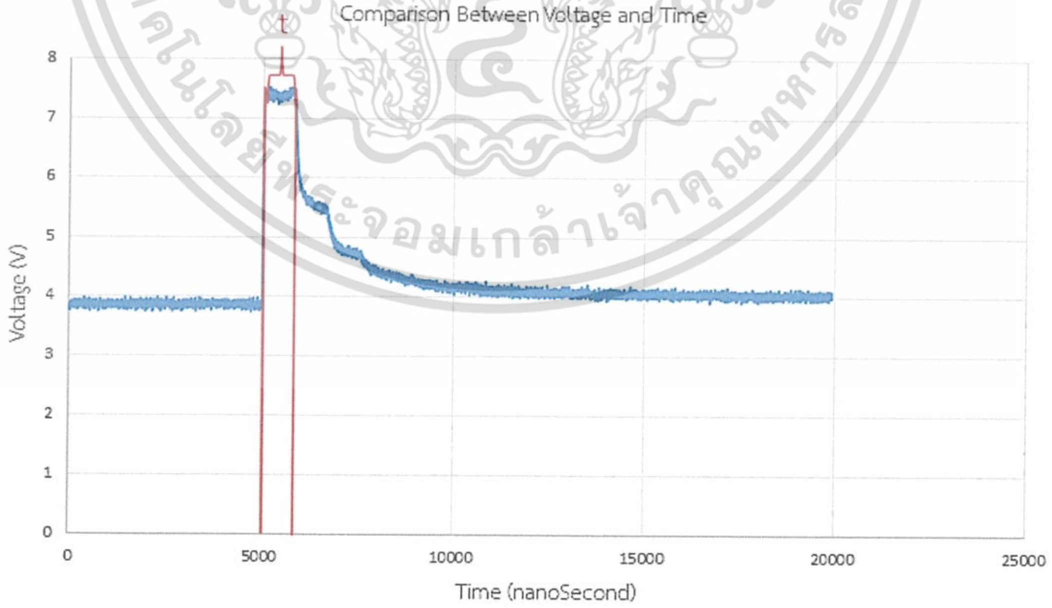
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- กรณีทำการต่อแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด จำนวน 2 ลูก และต่อโหลดตัวต้านทานขนาด 10 mΩ ณ จุดกำเนิดความผิดพลาดที่ 75 m โดยใช้คลื่นเดินทางที่มีความถี่ขนาด 20 kHz



รูปที่ 4.38 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางเมื่อวัดที่จุดกำเนิดคลื่นเดินทาง โดยใช้คลื่นเดินทางที่มีความถี่ขนาด 20 kHz แบบต่อแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด จำนวน 2 ลูก และตัวต้านทาน 10 mΩ

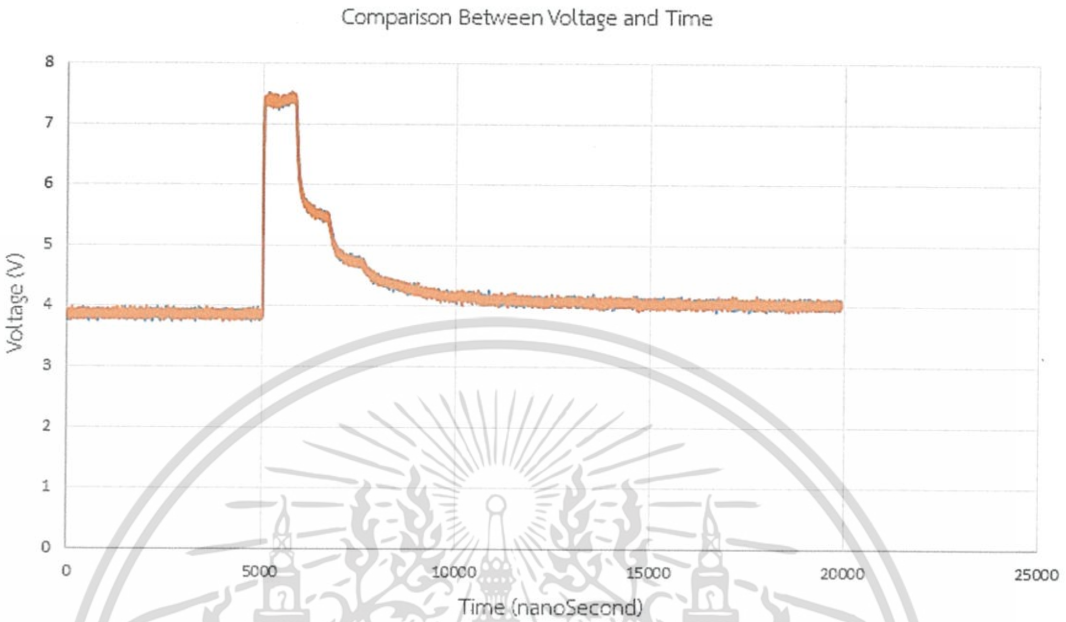
- กรณีทำการต่อแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด จำนวน 2 ลูก และต่อโหลดตัวต้านทานขนาด 5 mΩ ณ จุดกำเนิดความผิดพลาดที่ 75 m โดยใช้คลื่นเดินทางที่มีความถี่ขนาด 20 kHz



รูปที่ 4.39 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางเมื่อวัดที่จุดกำเนิดคลื่นเดินทาง โดยใช้คลื่นเดินทางที่มีความถี่ขนาด 20 kHz แบบต่อแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด จำนวน 2 ลูกและตัวต้านทาน 5 mΩ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

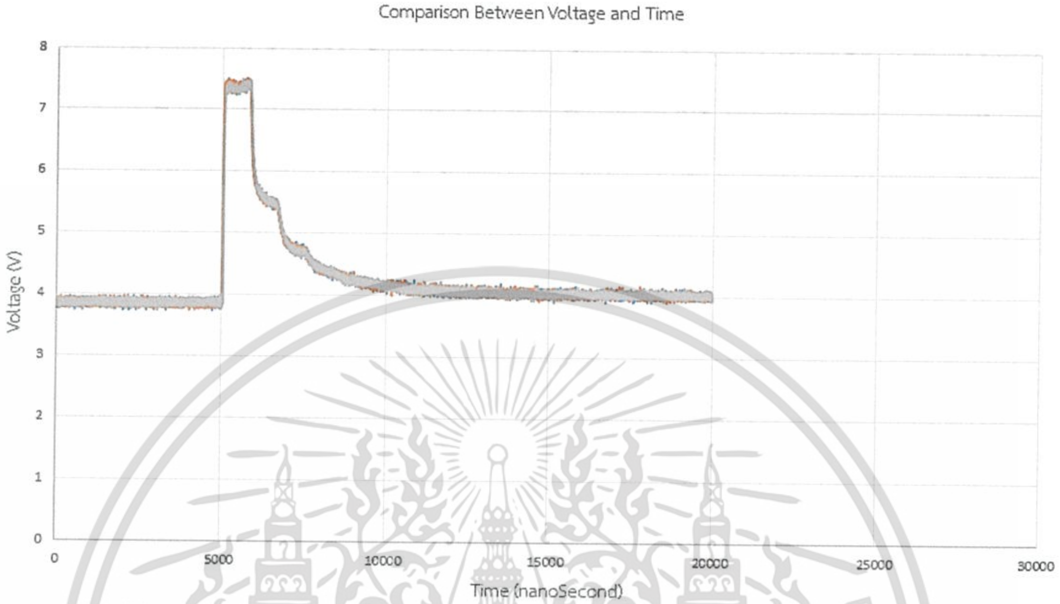
- กรณีนำสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางที่มีความถี่ขนาด 20 kHz แบบต่อแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด จำนวน 2 ลูก และต่อตัวต้านทานขนาด 5 mΩ และ 10 mΩ มาเปรียบเทียบกัน



รูปที่ 4.40 การเปรียบเทียบสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางที่มีขนาดความถี่ 20 kHz แบบต่อแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด จำนวน 2 ลูก และต่อตัวต้านทานขนาด 5 mΩ และ 10 mΩ มาเปรียบเทียบกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

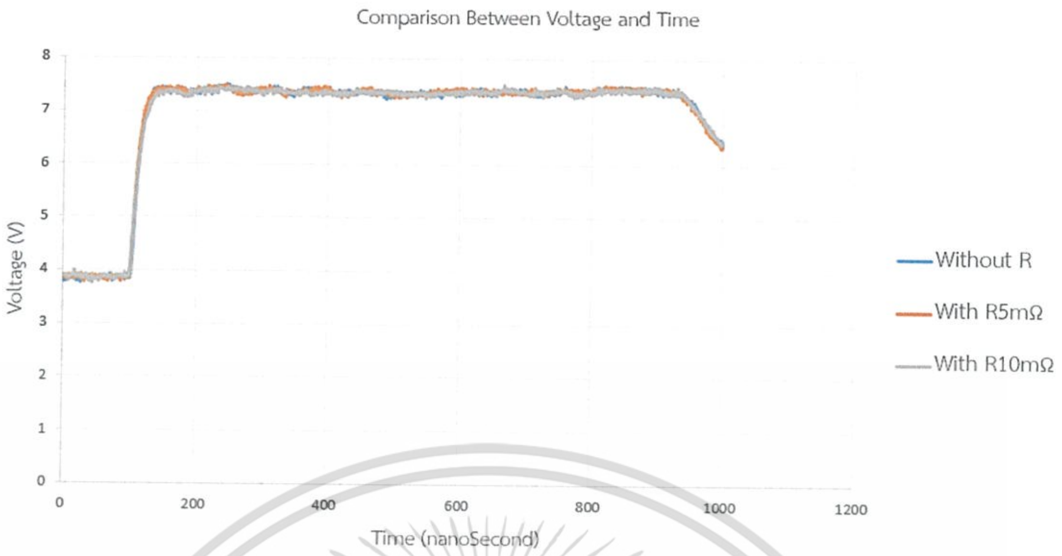
- กรณีนำสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางที่มีความถี่ขนาด 20 kHz แบบต่อแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด จำนวน 2 ลูก แบบต่อแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด จำนวน 2 ลูก และต่อตัวต้านทานขนาด 5 mΩ และ 10 mΩ มาเปรียบเทียบกัน



รูปที่ 4.41 การเปรียบเทียบสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางที่มีขนาดความถี่ 20 kHz แบบต่อแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด จำนวน 2 ลูก แบบต่อแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด จำนวน 2 ลูก และต่อตัวต้านทานขนาด 5 mΩ และ 10 mΩ มาเปรียบเทียบกัน

จากรูปผลการทดลองรูปที่ 4.40 และ 4.41 จะแสดงให้เห็นว่า เมื่อโหลดตัวต้านทานที่นำมาต่อเข้ากับแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดแบบอนุกรมมีค่าความต้านทานใกล้เคียงกับ R_0 ของแบตเตอรี่ จะส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงสัญญาณแรงดันไฟฟ้าในระดับเล็กน้อย ดังรูปที่ 4.42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.42 การเปรียบเทียบสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางที่มีขนาดความถี่ 20 kHz แบบต่อแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด จำนวน 2 ลูก และต่อตัวต้านทานขนาด 5 mΩ และ 10 mΩ มาเปรียบเทียบกัน แบบขยายช่วงที่ทำการวิเคราะห์แรงดันไฟฟ้า

ซึ่งเป็นไปตามการวิเคราะห์ที่ว่า เมื่อค่าความต้านทานเพิ่มขึ้น สัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางจะลดลงโดยแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยของสัญญาณคลื่นเดินทางในช่วงที่สนใจจะเป็นไปดังตารางที่ 4.13

ตารางที่ 4.13 แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย ช่วงเวลาที่ทำการวิเคราะห์ ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแรงดันและตำแหน่งกำเนิดความผิดพลาด กรณีแบตเตอรี่ 2 ลูก และแบบเชื่อมต่อตัวต้านทาน 5 mΩ และ 10 mΩ

Battery (Unit)	Resistance (mΩ)	Time (nanoSecond)	Position (metre)	V_{AVG} (V)	Z_L (mΩ)	ρ
2	-	795	78.7	7.3686	180.44	-0.9970
2	5	795	78.7	7.3371	221.25	-0.9963
2	10	795	78.7	7.3014	438.85	-0.9927

เมื่อนำจุดกำเนิดความผิดพลาดขึ้นที่คำนวณได้ ดังสมการที่ 4.4 แบบทำการทดลองแบบแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด จำนวน 2 ลูก ในกรณีไม่เชื่อมต่อกับตัวต้านทานและกรณีเชื่อมต่อกับตัวต้านทานขนาด 5 mΩ และ 10 mΩ จะพบว่าจุดที่เกิดความผิดพลาดที่คำนวณได้จะมีความคาดเคลื่อนเมื่อเทียบกับตำแหน่งของสายส่งของจริงประมาณ 4.9% ซึ่งถือว่าเป็นความเคลื่อนที่ยอมรับได้แต่ไม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถบ่งบอกตำแหน่งของแบตเตอรี่ ลูกที่ 1 และ ลูกที่ 2 ได้ เมื่อวิเคราะห์จากสัญญาณแรงดันไฟฟ้า พบว่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยในช่วงการวิเคราะห์จะสามารถบ่งบอกได้ว่าแบตเตอรี่ที่เชื่อมต่อแบบอนุกรมนั้นมีการเสื่อมสภาพหรือไม่ เนื่องจากการทดลองที่ผ่านมาสามารถบ่งบอกแบตเตอรี่ที่เสื่อมสภาพได้โดยพิจาณาจากสัญญาณแรงดันไฟฟ้าซึ่งจะมีค่าเปลี่ยนแปลงในขนาดที่ลดลง โดยสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย มีค่าลดลง 0.4% และ 0.9% ตามลำดับ เมื่อพิจารณาถึงค่าความต้านทานที่คำนวณได้นั้นจะมีค่าความผิดพลาดค่อนข้างสูงทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์ถึง R_0 ภายในแบตเตอรี่ได้ แต่ทว่าเมื่อพิจารณาถึงค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแรงดันจะพบว่า เมื่ออิมพีแดนซ์มากขึ้น จะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแรงดันมีค่าเข้าใกล้ 0 มากขึ้น ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้บ่งบอกความเสื่อมสภาพของแบตเตอรี่ได้ ขั้นตอนถัดไปจึงจะทำการทดลองโดยเชื่อมต่อแบตเตอรี่ที่พังเนื่องจากการอัดประจุเกิน

4.3.5 การทดลองการส่งคลื่นเดินทางผ่านทางสายส่งโดยเชื่อมต่อเข้ากับแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด แบบต่ออนุกรมกัน 2 ลูก โดยมีแบตเตอรี่ที่เสื่อมสมรรถนะ จำนวน 1 ลูก

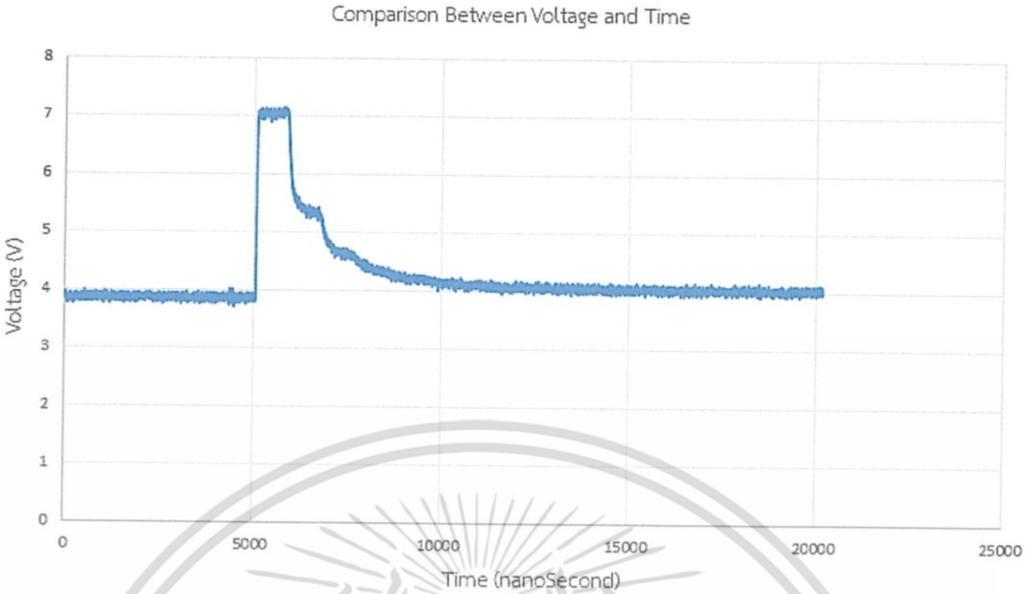
จากรูปที่ 4.37 เมื่อโหลดตัวต้านทานมีขนาดเพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางจึงทำการทดสอบโดยมีแบตเตอรี่ที่เสื่อมสมรรถนะหรือพังเนื่องจากการอัดประจุเกินเพื่อพิจารณาสัญญาณแรงดันไฟฟ้า

โดยทำการทดลองส่งคลื่นเดินทางแบบ Square Wave ขนาด 5 V_{pp} โดยใช้คลื่นความถี่ขนาด 20 kHz ผ่านสายส่งที่มีความยาวขนาด 75 m โดยทำการต่อแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดที่มีแรงดันไฟฟ้า 2 V จำนวน 2 ลูก และมีแบตเตอรี่ที่เสื่อมสมรรถนะหรือพังเนื่องจากการอัดประจุเกินเพื่อหาลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและระยะของจุดกำเนิดความผิดพลาด

โดยกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและเวลา เป็นไปดังรูปต่อไปนี้

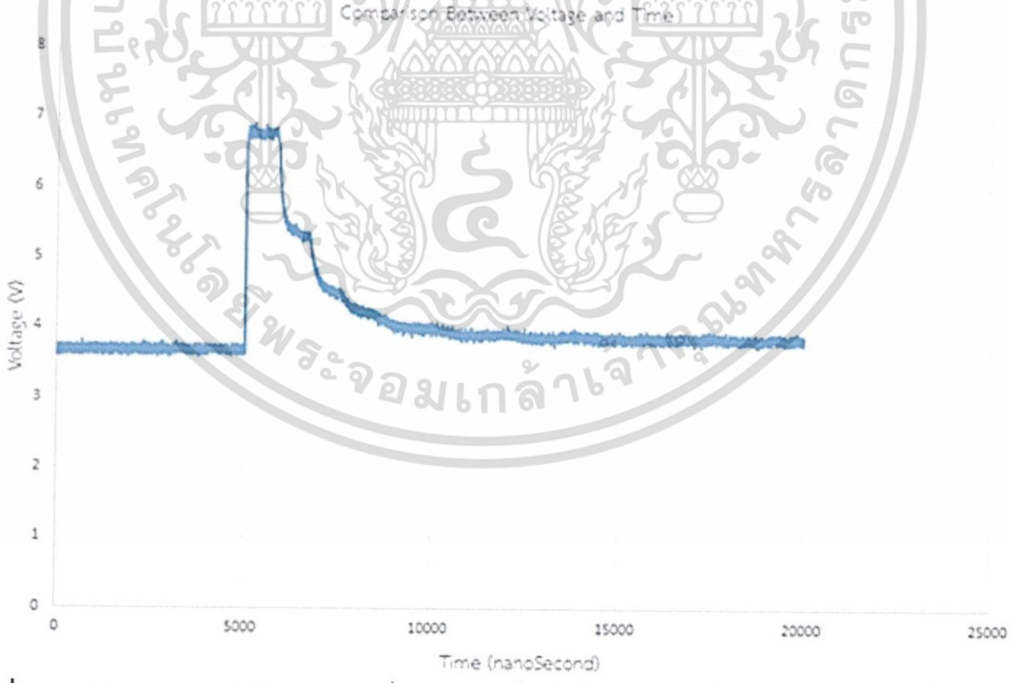
- กรณีทำการต่อแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด จำนวน 2 ลูก จุดกำเนิดความผิดพลาดที่ 75 m โดยใช้คลื่นเดินทางที่มีความถี่ขนาด 20 kHz โดยไม่มีแบตเตอรี่เสื่อมสภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.43 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางเมื่อวัดที่จุดกำเนิดคลื่นเดินทาง โดยใช้คลื่นเดินทางที่มีความถี่ขนาด 20 kHz แบบต่อแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดจำนวน 2 ลูก โดยไม่มีแบตเตอรี่เสื่อมสภาพ

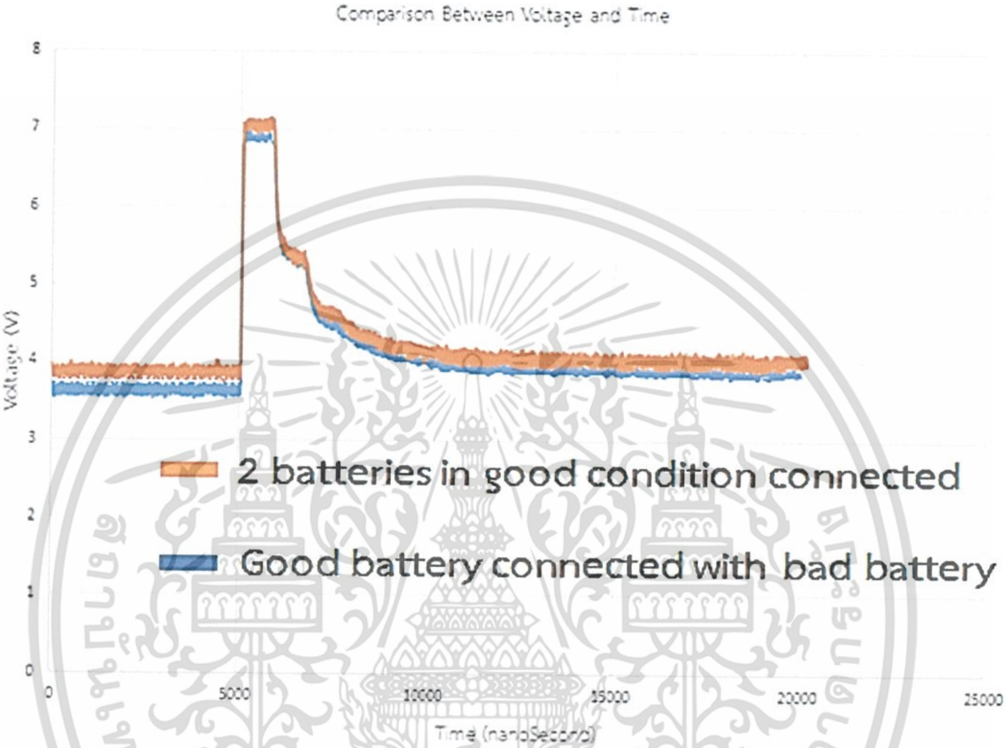
- กรณีทำการต่อแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด จำนวน 2 ลูก จุดกำเนิดความผิดพลาดที่ 75 m โดยใช้คลื่นเดินทางที่มีความถี่ขนาด 20 kHz โดยมีแบตเตอรี่เสื่อมสมรรถนะ



รูปที่ 4.44 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางเมื่อวัดที่จุดกำเนิดคลื่นเดินทาง โดยใช้คลื่นเดินทางที่มีความถี่ขนาด 20 kHz แบบต่อแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด จำนวน 2 ลูก โดยมีแบตเตอรี่เสื่อมสมรรถนะเนื่องจากการอัดประจุเกิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- กรณีนำสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางที่มีความถี่ขนาด 20 kHz แบบต่อแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด จำนวน 2 ลูก แบบไม่มีแบตเตอรี่ที่เสื่อมสภาพ และแบบมีแบตเตอรี่ที่เสื่อมสมรรถนะเนื่องจากการอัดประจุเกิน มาเปรียบเทียบกัน



รูปที่ 4.45 การเปรียบเทียบสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางที่มีขนาดความถี่ 20 kHz แบบต่อแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด จำนวน 2 ลูก แบบไม่มีแบตเตอรี่ที่เสื่อมสภาพ และแบบมีแบตเตอรี่ที่เสื่อมสมรรถนะเนื่องจากการอัดประจุเกิน

เมื่อพิจารณาผลการทดลอง **จะพบว่า** สัญญาณแรงดันไฟฟ้าในกรณีที่แบตเตอรี่ 2 ลูก เชื่อมต่อกันแบบอนุกรมแบบไม่มีแบตเตอรี่ที่เสื่อมสภาพ จะมีสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่สูงกว่ากรณีที่แบตเตอรี่ 2 ลูก เชื่อมต่อกันแบบอนุกรมแบบมีแบตเตอรี่ที่เสื่อมสมรรถนะเนื่องจากการอัดประจุเกิน โดยสามารถคำนวณจุดกำเนิดความผิดพลาด ดังสมการที่ 4.4 ได้ ดังตารางที่ 4.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.14 ความเร็วของคลื่นเดินทางภายในสายส่ง ระยะเวลาที่ใช้ในการเดินทาง และจุดกำเนิดข้อผิดพลาดภายในสายส่ง แบบเชื่อมต่อแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด จำนวน 2 ลูก แบบมีและไม่มีแบตเตอรี่ที่เสื่อมสภาพ

Battery	Frequency (kHz)	Time (nanoSecond)	Position (metre)	V_{AVG} (V)	Z_L (mΩ)	ρ
ไม่เสื่อมสภาพ	20	792	78.4	7.3686	180.44	-0.9970
เสื่อมสภาพ	20	792	78.4	6.8521	1328.55	-0.9781

เมื่อนำจุดกำเนิดความผิดพลาดขึ้นที่คำนวณได้ ดังสมการที่ 4.4 จะพบว่าจุดที่เกิดความผิดพลาดที่คำนวณได้ จะมีความคาดเคลื่อนเมื่อเทียบกับตำแหน่งของสายส่งของจริงประมาณ 4.5% ซึ่งถือว่าเป็นความเคลื่อนที่ยอมรับได้ แต่ทว่าจากสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางไม่สามารถบ่งบอกได้ว่า แบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดที่เสื่อมสมรรถนะเนื่องจากการอัดประจุเกินนั้นอยู่ในตำแหน่งใด ซึ่งส่งผลให้ไม่สามารถวิเคราะห์หาแบตเตอรี่ลูกที่เสื่อมสภาพได้เมื่อเชื่อมต่อกันแบบอนุกรม แต่ทว่าสัญญาณแรงดันไฟฟ้าจะมีความต่างกัน เมื่อพิจาณาจากสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ตกลงเมื่อมีแบตเตอรี่ที่เสื่อมสมรรถนะ จะพบว่าสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยในช่วงที่ใช้ทำการวิเคราะห์จะลดลงไปประมาณ 7% ซึ่งเป็นไปตามผลการทดลองในกรณีที่เชื่อมต่อกับโหลดตัวต้านทานที่ว่า เมื่อขนาดของตัวต้านทานภายในระบบที่เชื่อมต่อกันแบบอนุกรมเพิ่มขึ้นนั้นจะส่งผลให้สัญญาณแรงดันไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงในทิศทางลดลง ซึ่งแบตเตอรี่ที่นำมาทดสอบนั้นเป็นแบตเตอรี่ที่พังเนื่องจากการอัดประจุไฟฟ้าเกิน นอกจากนั้น เมื่อพิจารณาถึงค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแรงดัน จะพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแรงดันมีขนาดเข้าใกล้ 0 มากขึ้น เมื่อมีแบตเตอรี่ที่เสื่อมสภาพภายในระบบ ซึ่งเป็นไปตามการทดลองในหัวข้อก่อน ขั้นตอนต่อไปจะทำการเชื่อมต่อแบตเตอรี่จำนวน 3 ลูก โดยเพิ่มจำนวนแบตเตอรี่ที่เสื่อมสมรรถนะ จำนวน 1 ลูก และ 2 ลูก เพื่อพิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแรงดันที่เปลี่ยนแปลง จะเพิ่มขึ้นตามความเสื่อมสมรรถนะของแบตเตอรี่หรือไม่

4.3.6 การทดลองการส่งคลื่นเดินทางผ่านทางสายส่งโดยเชื่อมต่อเข้ากับแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด แบบต่ออนุกรมกัน 3 ลูก โดยมีแบตเตอรี่ที่เสื่อมสมรรถนะ

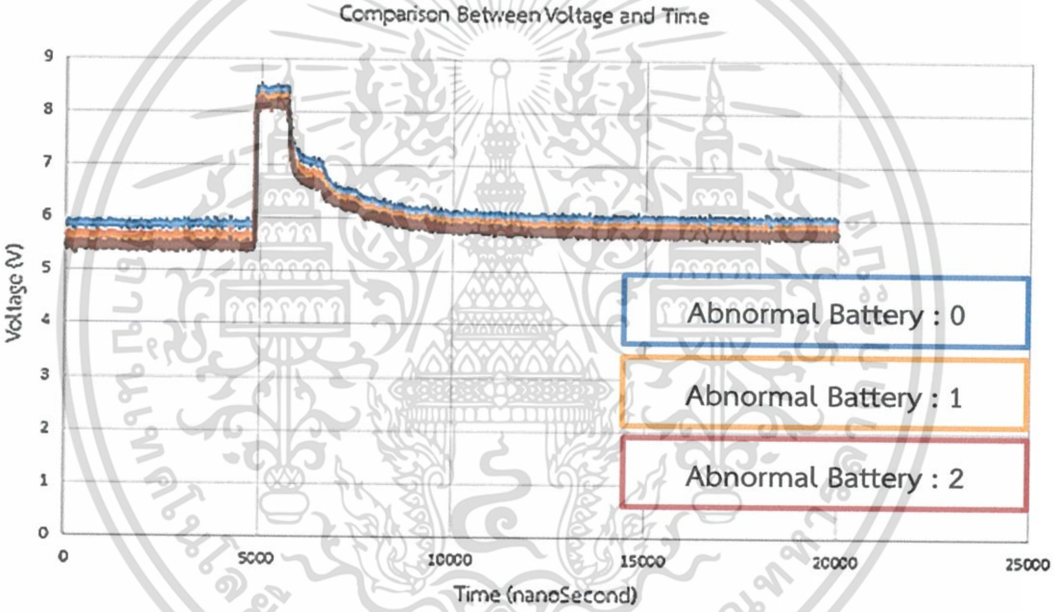
เนื่องจากการทดลองที่ 4.3.5 พบว่าเมื่อมีแบตเตอรี่ที่เสื่อมสภาพภายในระบบ จะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแรงดันมีขนาดเข้าใกล้ 0 มากขึ้น เพื่อที่จะสันนิฐานได้ว่าเมื่อมีแบตเตอรี่ที่เสื่อมในระบบมากขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแรงดันจะเข้าใกล้ 0 มากขึ้น ขั้นตอนถัดไปจึงเพิ่มเป็นแบตเตอรี่ที่เสื่อมสภาพภายในระบบจำนวน 1 ลูก และ 2 ลูก เพื่อวิเคราะห์ถึงค่าพารามิเตอร์ที่เปลี่ยนแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยทำการทดลองส่งคลื่นเดินทางแบบ Square Wave ขนาด 5 V_{pp} โดยใช้คลื่นความถี่ขนาด 20 kHz ผ่านสายส่งที่มีความยาวขนาด 75 m โดยทำการต่อแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดที่มีแรงดันไฟฟ้า 2 V จำนวน 3 ลูก และมีแบตเตอรี่ที่เสื่อมสมรรถนะหรือพังเนื่องจากการอัดประจุเกินจำนวน 1 ลูก และ 2 ลูก เพื่อหาลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและระยะของจุดกำเนิดความผิดพลาด

โดยกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและเวลา เป็นไปดังรูปต่อไปนี้

- กรณีทำการต่อแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด จำนวน 3 ลูก จุดกำเนิดความผิดพลาดที่ 75 m โดยใช้คลื่นเดินทางที่มีความถี่ขนาด 20 kHz โดยไม่มีแบตเตอรี่ที่เสื่อมสภาพ, แบตเตอรี่ที่เสื่อมสภาพ 1 ลูก และ 2 ลูก ตามลำดับ โดยนำมาเปรียบเทียบกัน



รูปที่ 4.46 การเปรียบเทียบสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางเมื่อวัดที่จุดกำเนิดคลื่นเดินทาง โดยใช้คลื่นเดินทางที่มีความถี่ขนาด 20 kHz แบบต่อแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด จำนวน 3 ลูก โดยไม่มีแบตเตอรี่ที่เสื่อมสภาพ, แบตเตอรี่ที่เสื่อมสภาพ 1 ลูก และ 2 ลูก ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาผลการทดลอง จะพบว่า สัญญาณแรงดันไฟฟ้าในกรณีที่แบตเตอรี่ 4 ลูก เชื่อมต่อกันแบบอนุกรมแบบไม่มีแบตเตอรี่ที่เสื่อมสภาพ จะมีสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่สูงกว่ากรณีที่มีแบตเตอรี่ที่เสื่อมสภาพภายในระบบ โดยสามารถคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้ ดังตารางที่ 4.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.15 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เมื่อเชื่อมต่อแบตเตอรี่ จำนวน 3 ลูก แบบไม่มีแบตเตอรี่ที่เสื่อมสภาพ และแบบมีแบตเตอรี่ที่เสื่อมสภาพ จำนวน 1 ลูก และ 2 ลูก ตามลำดับ

Abnormal Battery	Time (nanoSecond)	Position (metre)	V_{AVG} (V)	Z_L (mΩ)	ρ
-	792	78.4	8.4722	324.88	-0.9946
1	792	78.4	8.3056	1538.24	-0.9747
2	792	78.4	8.1220	2214.56	-0.9637

เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแรงดัน ในกรณีเชื่อมต่อแบตเตอรี่ จำนวน 3 ลูก แบบอนุกรม แบบไม่มีแบตเตอรี่ที่เสื่อมสภาพ และแบบมีแบตเตอรี่ที่เสื่อมสภาพ จำนวน 1 ลูก และ 2 ลูก ตามลำดับ จะพบว่า เมื่อในระบบมีจำนวนแบตเตอรี่ที่เสื่อมสภาพมากขึ้น จะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแรงดันมีค่าเข้าใกล้ 0 มากขึ้น ซึ่งเป็นไปตามการสันนิฐานในหัวข้อ 4.3.6 ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้บ่งบอกความเป็นไปได้ที่จะมีแบตเตอรี่ที่เสื่อมสภาพภายในระบบได้ แต่เมื่อพิจารณาถึงจุดกำเนิดความผิดพลาดแล้ว จะไม่สามารถบ่งบอกแบตเตอรี่ที่เสื่อมสภาพภายในระบบได้ ขั้นตอนถัดไปจึงทำการทดลองสลับตำแหน่งแบตเตอรี่ที่เสื่อมสภาพภายในระบบเพื่อหาลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณแรงดันไฟฟ้า

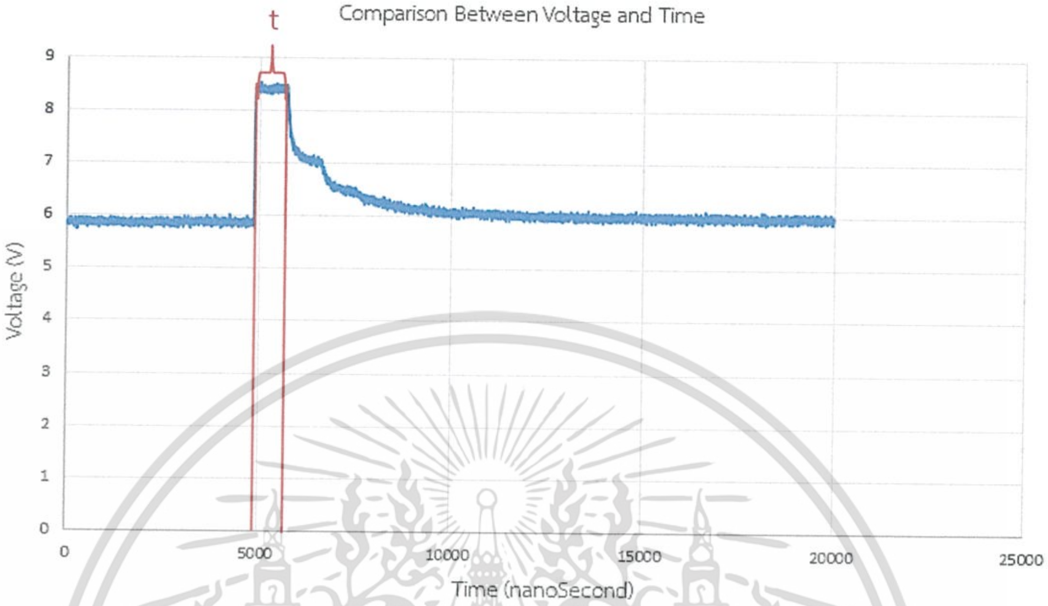
4.3.7 การทดลองการส่งคลื่นเดินทางผ่านทางสายส่งโดยเชื่อมต่อเข้ากับแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด แบบต่ออนุกรมกัน 3 ลูก และทำการสลับตำแหน่งแบตเตอรี่

ทำการทดลองส่งคลื่นเดินทางแบบ Square Wave ขนาด 5 V_{pp} โดยใช้คลื่นความถี่ขนาด 20 kHz ผ่านสายส่งที่มีความยาวขนาด 75 m โดยทำการต่อแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด ที่มีแรงดันไฟฟ้า 2 V จำนวน 3 ลูก เมื่อมีแบตเตอรี่ที่เสื่อมสภาพและทำการสลับตำแหน่งแบตเตอรี่ โดยให้ลำดับเป็น 124, 142 และ 214 ตามลำดับ ณ จุดความยาวที่ 75 m เพื่อค้นหาลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและระยะของจุดกำเนิดความผิดพลาดที่เกิดขึ้น

โดยกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและเวลา เป็นไปดังรูปต่อไปนี้

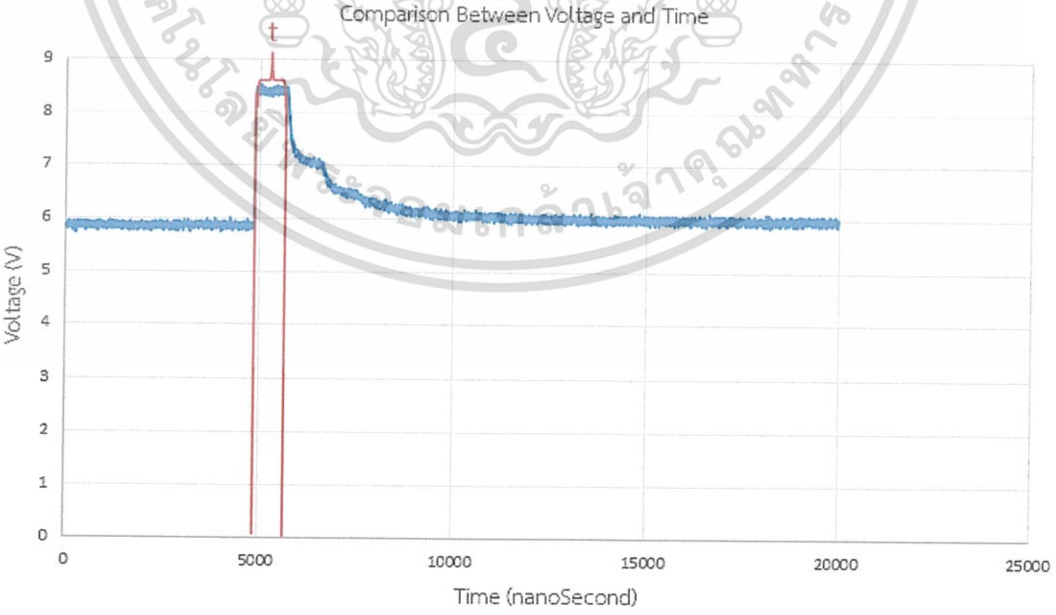
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- กรณีทำการต่อแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด จำนวน 3 ลูก และต่อแบตเตอรี่ลำดับแบบ 124 ณ จุดกำเนิดความผิดพลาดที่ 75 m โดยใช้คลื่นเดินทางที่มีความถี่ขนาด 20 kHz



รูปที่ 4.47 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางเมื่อวัดที่จุดกำเนิดคลื่นเดินทาง โดยใช้คลื่นเดินทางที่มีความถี่ขนาด 20 kHz แบบต่อแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด จำนวน 3 ลูก ลำดับแบบ 124

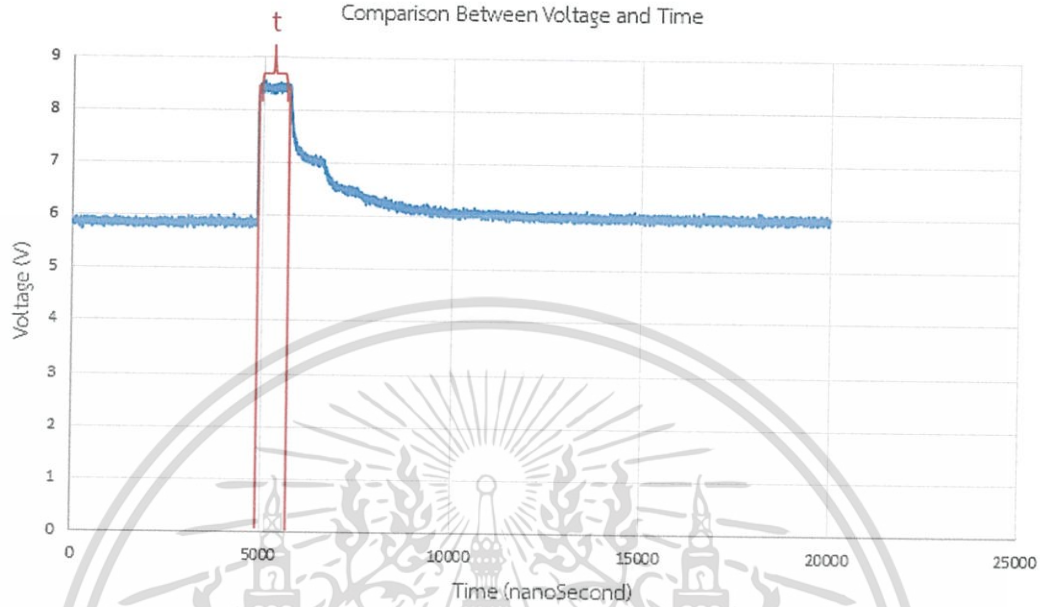
- กรณีทำการต่อแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด จำนวน 3 ลูก และต่อแบตเตอรี่ลำดับแบบ 142 ณ จุดกำเนิดความผิดพลาดที่ 75 m โดยใช้คลื่นเดินทางที่มีความถี่ขนาด 20 kHz



รูปที่ 4.48 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางเมื่อวัดที่จุดกำเนิดคลื่นเดินทาง โดยใช้คลื่นเดินทางที่มีความถี่ขนาด 20 kHz แบบต่อแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด จำนวน 3 ลูก ลำดับแบบ 142

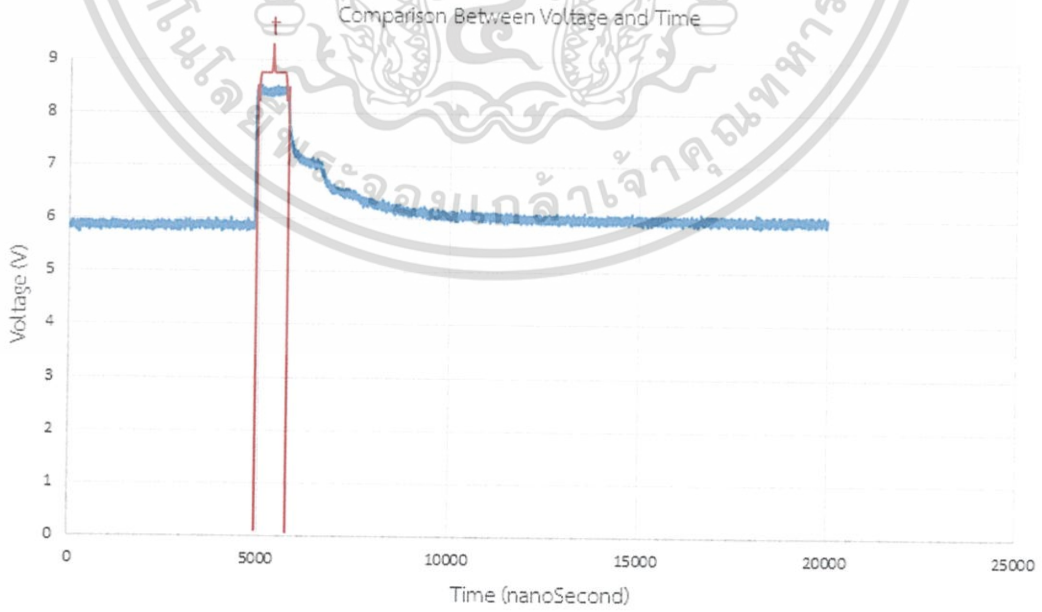
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- กรณีทำการต่อแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด จำนวน 3 ลูก และต่อแบตเตอรี่ลำดับแบบ 214 ณ จุดกำเนิดความผิดพลาดที่ 75 m โดยใช้คลื่นเดินทางที่มีความถี่ขนาด 20 kHz



รูปที่ 4.49 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางเมื่อวัดที่จุดกำเนิดคลื่นเดินทาง โดยใช้คลื่นเดินทางที่มีความถี่ขนาด 20 kHz แบบต่อแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด จำนวน 3 ลูก ลำดับแบบ 214

- กรณีนำสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางที่มีความถี่ขนาด 20 kHz แบบต่อแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด จำนวน 3 ลูก และแบตเตอรี่ลำดับแบบ 124, 142 และ 214 มาเปรียบเทียบกัน



รูปที่ 4.50 การเปรียบเทียบสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางที่มีขนาดความถี่ 20 kHz แบบต่อแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด จำนวน 3 ลูก และแบบต่อแบตเตอรี่ลำดับแบบ 124, 142 และ 214

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปการเปรียบเทียบสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางที่มีขนาดความถี่ 20 kHz ดังรูปที่ 4.37 จะแสดงให้เห็นว่า จุดกำเนิดความผิดพลาดในสายส่งนั้นจะมีความยาวของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่มีขนาดความยาวเท่ากันทั้ง แบบต่อแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด จำนวน 3 ลูก และแบบต่อแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด จำนวน 3 ลูก และต่อแบตเตอรี่ลำดับแบบ 124, 142 และ 214 ซึ่งทำการวัดค่าจุดกำเนิดความผิดพลาดในสายส่งได้ดังสมการที่ 4.4 โดยใช้พารามิเตอร์และแสดงจุดกำเนิดความผิดพลาดในสายส่ง ดังตารางที่ 4.16

ตารางที่ 4.16 ความเร็วของคลื่นเดินทางภายในสายส่ง ระยะเวลาที่ใช้ในการเดินทาง และจุดกำเนิดข้อผิดพลาดภายในสายส่ง แบบต่อแบตเตอรี่จำนวน 3 ลูก ลำดับแบบ 124, 142 และ 214

Frequency (kHz)	Velocity (m/s)	Time (nanoSecond)	Position (metre)
124	1.98×10^8	790	78.2
142	1.98×10^8	790	78.2
214	1.98×10^8	790	78.2

เมื่อเปรียบเทียบสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากรณีเชื่อมต่อแบตเตอรี่จำนวน 3 ลูก และทำการสลับตำแหน่งแบตเตอรี่ จะพบว่าเมื่อนำจุดกำเนิดความผิดพลาดขึ้นที่คำนวณได้ ดังสมการที่ 4.4 จะมีความคาดเคลื่อนเมื่อเทียบกับตำแหน่งของสายส่งของจริงประมาณ 4.3% ซึ่งถือว่าเป็นความเคลื่อนที่ยอมรับได้ แต่ทว่าลักษณะของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าไม่แตกต่างกันไม่ว่ากรณีสลับแบตเตอรี่แบบ 124, 142 และ 214 ซึ่งสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่วัดค่าได้เปรียบเสมือนมีแบตเตอรี่เชื่อมต่ออยู่เป็นโหลดทางไฟฟ้าชุดเดียว ทำให้ไม่สามารถแยกตำแหน่งของแบตเตอรี่ได้เนื่องจากไม่สามารถบ่งบอกตำแหน่งแบตเตอรี่ที่เสื่อมสภาพเมื่อเชื่อมต่อกันแบบอนุกรมได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6 สรุป

ผลการทดลองของปริญญานิพนธ์นี้ประกอบด้วยผลการทดลองวิธีการวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงเวลา(Time Domain Method) เพื่อใช้วิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด และวิธีการใช้คลื่นเดินทาง (Traveling Wave Method) เพื่อบ่งบอกแบตเตอรี่ที่เสื่อมสภาพเมื่อเชื่อมต่อกันแบบอนุกรม พบว่าการใช้วิธีการ Time Domain Method สามารถวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดได้ใกล้เคียงกับค่าดาต้าชีทที่ผู้ผลิตได้จัดทำ เนื่องจากแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดที่นำมาทำการทดลองนั้นมีอายุการใช้งานมาก่อน ส่งผลให้เกิดการเกิดซัลเฟชั่นของขั้วแผ่นธาตุซึ่งส่งผลให้ค่า R_0 มีการเปลี่ยนแปลงตามอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ ค่า R_0 ที่วิเคราะห์ได้นั้นจึงมากกว่าค่าดาต้าชีท นอกจากนั้นการใช้วิธีการ Traveling Wave Method เพื่อบ่งบอกแบตเตอรี่ที่เสื่อมสภาพเมื่อเชื่อมต่อกันแบบอนุกรมนั้น ไม่สามารถบ่งบอกได้ว่าแบตเตอรี่ลูกใดในวงจรที่มีการเสื่อมสภาพ เนื่องจาก Traveling Wave จะเหมือนกับการมีโหลดทางไฟฟ้าเพียงตัวเดียวไม่ว่าระยะทางระหว่างโหลดทางไฟฟ้าจะห่างกันเท่าใดก็ตาม ทำให้ไม่สามารถบ่งบอกตำแหน่งของแบตเตอรี่แต่ละลูกได้ แต่ทว่าการใช้วิธีการ Traveling Wave Method นั้น จะสามารถบ่งบอกความเป็นไปได้ที่จะมีแบตเตอรี่ที่เสื่อมสภาพภายในแบตเตอรี่ที่เชื่อมต่อกันแบบอนุกรมได้ โดยการใช้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแรงดันมาพิจารณา

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการวิเคราะห์แบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดที่มีการเสื่อมสภาพ โดยแบ่งการทดลองเป็น การวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงเวลา (Time Domain Method) เพื่อวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดกรณีทำการทดลองโดยใช้แบตเตอรี่เพียง 1 ลูก และ การใช้คลื่นเดินทาง (Traveling Wave Method) เพื่อบ่งบอกความเป็นไปได้ที่จะมีแบตเตอรี่ที่เสื่อมสภาพและตำแหน่งของแบตเตอรี่ที่เสื่อมสภาพเมื่อเชื่อมต่อกันแบบอนุกรม จากผลการทดลองในส่วนการวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงเวลานั้น สามารถหาค่าพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดคือ ค่า R_0 และ C_1 ได้ ซึ่งค่า R_0 นั้นสามารถนำมาวิเคราะห์เพื่อบ่งบอกได้ว่าแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดนั้นมีการเสื่อมสภาพหรือไม่ สำหรับผลการทดลองในส่วนการใช้คลื่นเดินทางนั้นไม่สามารถใช้คลื่นเดินทางในการหาตำแหน่งแบตเตอรี่ที่เสื่อมสภาพเมื่อนำมาเชื่อมต่อกันแบบอนุกรมได้ แต่สามารถบ่งบอกความเป็นไปได้ที่จะมีแบตเตอรี่ใบที่เสื่อมสภาพเมื่อเชื่อมต่อกันแบบอนุกรม ซึ่งผลการทดลองทั้งสองการทดลอง สามารถสรุปได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการทดลอง

1. Time Domain Method สามารถบ่งบอกสมรรถนะของแบตเตอรี่ได้ว่าแบตเตอรี่ลูกนั้นมีการเสื่อมสภาพหรือไม่เสื่อมสภาพ โดยการวิเคราะห์พารามิเตอร์ R_0
2. จากการทดลอง Time Domain Method สามารถบ่งบอกได้ว่า แบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดที่ผ่านการใช้งานและมีอายุการใช้งานมากขึ้น จะมีการเพิ่มขึ้นของพารามิเตอร์ R_0 เนื่องจากการเกิดซัลเฟชั่น ก่อให้เกิดการเสื่อมสภาพของแบตเตอรี่
3. Traveling Wave Method สามารถหาจุดที่เกิดความผิดพลาดขึ้นภายในสายส่งได้ แต่ทว่าไม่สามารถบ่งบอกตำแหน่งของแบตเตอรี่ที่เสื่อมสภาพเมื่อเชื่อมต่อกันแบบอนุกรมได้
4. Traveling Wave Method สามารถใช้เพื่อวิเคราะห์ความเป็นไปได้ที่จะมีแบตเตอรี่ที่เสื่อมสภาพเมื่อเชื่อมต่อกันแบบอนุกรมได้ เนื่องจากการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทาง และค่าสัมประสิทธิการสะท้อนแรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในส่วนการทดลองวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงเวลานั้น ควรทดลองตอนแบตเตอรี่มีแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของแบตเตอรี่ใกล้เคียงกันเพื่อให้สามารถวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่ได้แม่นยำมากขึ้น

2. ในส่วนการทดลองวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงเวลานั้นควรใช้เครื่องมือบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของแบตเตอรี่และกระแสอัดประจุแบตเตอรี่แบบอัตโนมัติเพื่อให้ได้ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่และกระแสอัดประจุที่แม่นยำ เพื่อนำมาวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ได้แม่นยำมากขึ้น

3. ในส่วนการทดลองการใช้คลื่นเดินทางนั้นควรจะทำการทดลองเมื่อกระแสไฟฟ้าในพื้นที่ทำการทดลองไม่มีฮาร์โมนิก เนื่องจากสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางที่นำมาวิเคราะห์นั้นควรจะเป็นสัญญาณที่แม่นยำสูงและมีความนิ่งของสัญญาณและไม่มีสัญญาณรบกวน เนื่องจากการวิเคราะห์สัญญาณแรงดันไฟฟ้านั้นจะเป็นการวิเคราะห์ส่วนเล็ก ๆ ภายในสัญญาณแรงดันไฟฟ้า

4. ควบคุมอุณหภูมิในระหว่างทำการทดลองให้เท่ากันทุกครั้งที่ทำการทดลอง เนื่องจากอุณหภูมินั้นเป็นตัวแปรสำคัญที่มีผลกระทบต่อผลการทดลองของแบตเตอรี่

5.3 แนวทางการพัฒนาต่อยอดงานวิจัย

โครงงานวิจัยนี้สามารถทำการพัฒนาต่อยอดเพื่อนำไปลดเวลาที่ใช้ในส่วนของการตรวจสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่ภายในสถานีไฟฟ้าย่อยได้ และสามารถพัฒนาออกแบบต่อไปในส่วนของเครื่องตรวจสมรรถนะของแบตเตอรี่แบบเชื่อมต่อกับเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่ โดยพัฒนาให้เป็นระบบอัตโนมัติโดยใช้โปรแกรมในการออกแบบได้เพื่อที่จะใช้บ่งบอกการความเสื่อมสภาพของแบตเตอรี่และแจ้งเตือนให้แก่ผู้ใช้งานได้ มากไปกว่านั้นจะสามารถพัฒนาเพื่อไปใช้กับแบตเตอรี่ชนิดอื่น ๆ ได้ นอกจากนั้นสามารถพัฒนาเพื่อบ่งบอกตำแหน่งของแบตเตอรี่ที่เสื่อมสภาพได้ ทั้งนี้การวิจัยจำเป็นจะต้องใช้เครื่องมือวัดที่มีความแม่นยำสูงถึงจะสามารถคำนวณค่าและบ่งบอกได้อย่างแม่นยำมากขึ้น ส่วนต่อไปที่จำเป็นสำหรับการพัฒนาคือระบบ Battery Monitoring System ซึ่งเป็นระบบที่คอยบริหารจัดการและตรวจสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่และสามารถแจ้งเตือนให้แก่ผู้ใช้งานได้ ซึ่งที่กล่าวมาจำเป็นจะต้องทราบถึงค่าพารามิเตอร์และสมรรถนะของแบตเตอรี่ทั้งสิ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] Electricity Delivery and its Environmental Impacts [ระบบออนไลน์].
Available: https://www.epa.gov/energy/electricity-delivery-and-its-environmental-impacts

[2] ไมโครกริด [ระบบออนไลน์].
Available: http://www.eng.mut.ac.th/article_detail.php?id=93

[3] Substation Automation Systems [ระบบออนไลน์].
Available: http://new.abb.com/substation-automation/systems

[4] Substation fire causes blackout in almost half of Prague [ระบบออนไลน์].
Available: http://www.radio.cz/en/section/curraffrs/substation-fire-causes-blackout-in-almost-half-of-prague

[5] Batteries Lead Charge for California Energy Storage Mandate [ระบบออนไลน์].
Available: http://www.burnsmcdblog.com/2015/12/07/batteries-lead-charge-california-energy-storage-mandate/

[6] ส่วนประกอบของแบตเตอรี่ [ระบบออนไลน์].
Available: http://www.chokbuncha.com/เกร็ดความรู้/ส่วนประกอบของแบตเตอรี่-9

[7] Maintenance-Free Batteries [ระบบออนไลน์].
Available: http://autosystempro.com/maintenance-free-batteries/

[8] Hybrid Batteries [ระบบออนไลน์].
Available: http://autosystempro.com/hybrid-batteries/

[9] Valve Regulated VRLA (AGM & GEL) [ระบบออนไลน์].
Available: http://www.sbsbattery.com/products-services/by-product/batteries/valve-regulated-batteries.html

[10] Victron Energy 12V/130Ah Gel Deep Cycle Battery [ระบบออนไลน์].
Available: http://www.cactusnav.com/victron-energy-12v130ah-deep-cycle-battery-p-13287.html

[11] AGM VRLA 12V Battery Feature [ระบบออนไลน์].
Available: http://www.kweightbattery.com/12v-batteries/agm-vrla-12-v-battery-feature

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[12] J. Tongkamkaew; J. Srikrajib; J. Nooleau; C. Tankul, “Hybrid Battery For Grid Support Function” King Mongkut’s Institute of Technology Ladkrabang, Electrical Engineering Department, Thailand

[13] B. Datta; S. Chatterjee, “A literature review on use of Bewley’s lattice diagram” North Eastern Regional Institute of Science & Technology, Electrical Engineering Department, India

[14] Station Level Solution [ระบบออนไลน์].
Available: http://new.abb.com/substation-automation/systems/station-level-solutions

[15] IEC TC-57 Communication Networks and Systems in Substation—Part 7-2: Basic Communication Structure for Substation and Feeder Equipment—Abstract Communication Service Interface (ACSI), Int. Std. IEC 61850-7-2, Int. Electrotech. Comm., 2003, Geneva, Switzerland

[16] IEC TC-57 Communication Networks and Systems in Substation—Part 8-1: Specific Communication Service Mapping (SCSM)—Mapping to MMS (ISO 9506-1 and ISO 9506-2) and to ISO/IEC 8802-3, Int. Std. IEC 61850-8-2, Int. Electrotech. Comm., 2004, Geneva, Switzerland

[17] Communication Delivery Time Performance Requirements for Electric Power Substation Automation, Std. 1646-2004,IEEE Power Eng. Soc. (Power Eng. Soc.), Feb.2005, IEEE Std., NY, USA

[18] SNMP:Simple? Network Management Protocol [ระบบออนไลน์].
Available: http://www.rane.com

[19] Open MODBUS/TCP SPECIFICATION [ระบบออนไลน์].
Available: http://www2.schneider-electric.com

[20] AT commands for GPRS [ระบบออนไลน์].
Available: http://www.wavecom.com

[21] S. Mackay; E. Wright; D. Reynders; J. Park, “Practical Industrial Data Network: Design, Installation and Troubleshooting” IDC Technologies, Perth

[22] P. Jintagosonwit, “Implementation Techniques of the IED and Network Monitoring System in IEC61850 SA” 2012 IEEE Power & Energy Society Tranmission and Distribution Conference and Exposition, Orlando, FL, USA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[23] Discover Energy Corporation, (2014), “2VRE-800TG Data Sheet”. Discover Energy Corporation Publishing.

[24] Tektronix Company, (2008), “TDR Impedance Measurements: A Foundation for Signal Integrity”. Tektronix Publishing.

[25] Agilent Technologies, (2013), “Time Domain Reflectometry Theory”. Agilent Technologies Publishing.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

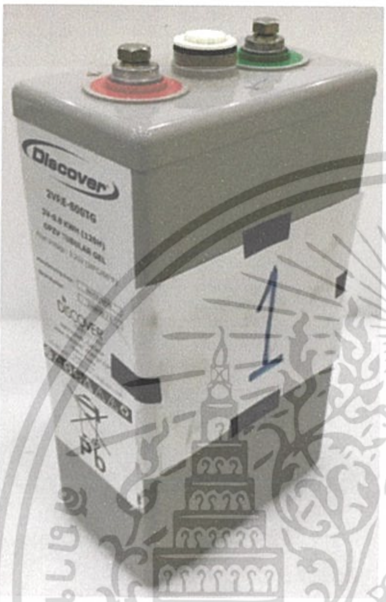
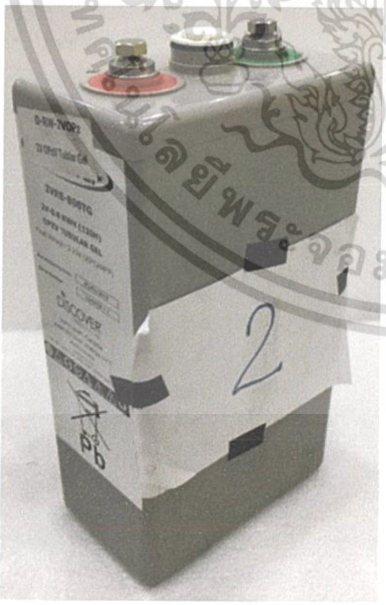
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

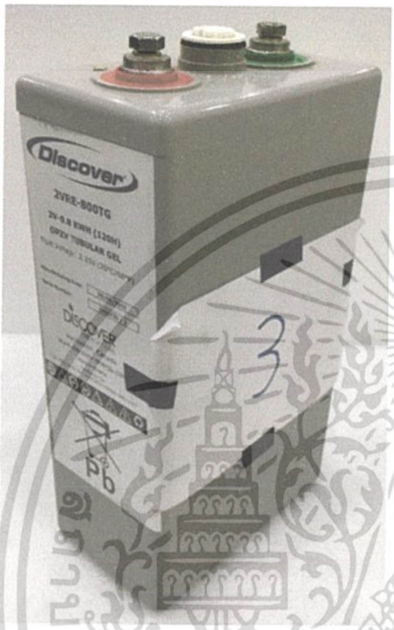
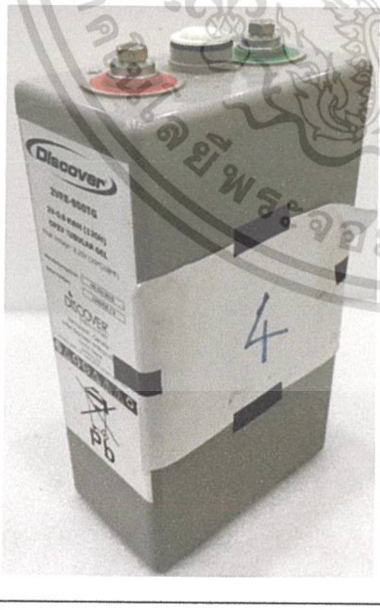
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

อุปกรณ์	รายละเอียด
	แบตเตอรี่หมายเลข 1 : เป็นแบตเตอรี่ที่มีแรงดัน 2 V
	แบตเตอรี่หมายเลข 2 : เป็นแบตเตอรี่ที่มีแรงดัน 2 V

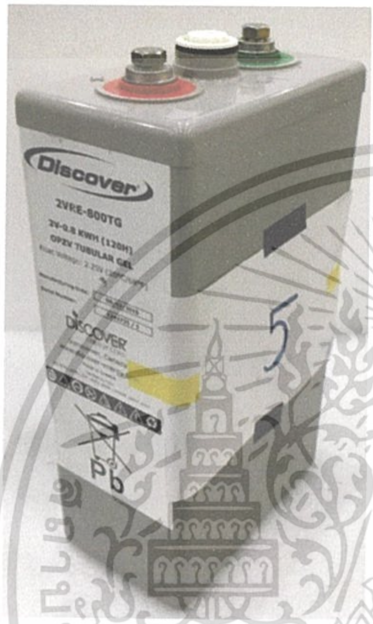
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

อุปกรณ์	รายละเอียด
	แบตเตอรี่หมายเลข 3 : เป็นแบตเตอรี่ที่มีแรงดัน 2 V
	แบตเตอรี่หมายเลข 4 : เป็นแบตเตอรี่ที่มีแรงดัน 1.8 V และเป็นแบตเตอรี่ที่เสื่อมสภาพ

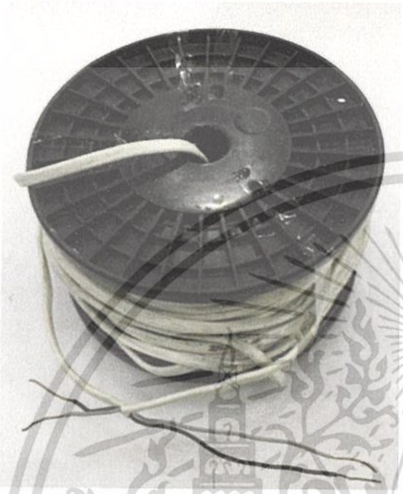
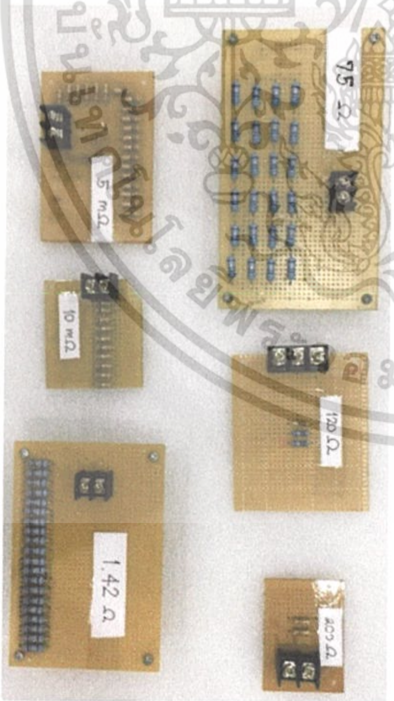
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

อุปกรณ์	รายละเอียด
	แบตเตอรี่หมายเลข 5 : เป็นแบตเตอรี่ที่มีแรงดัน 2 V
	แบตเตอรี่หมายเลข 6 : เป็นแบตเตอรี่ที่มีแรงดัน 1.8 V และเป็นแบตเตอรี่ที่เสื่อมสภาพ

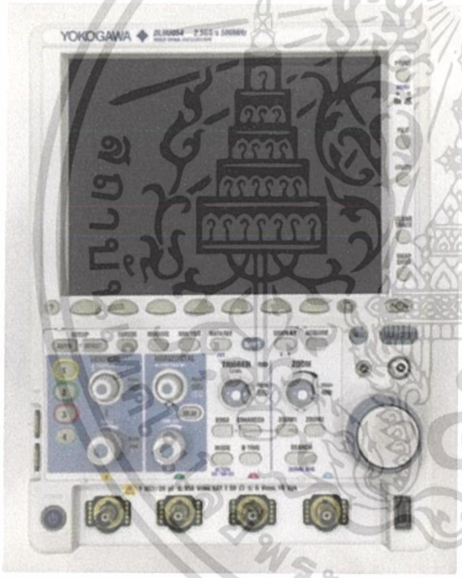
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

อุปกรณ์	รายละเอียด
	สายส่งความยาว 75 m
	โหลดตัวต้านทานที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

อุปกรณ์	รายละเอียด
	Waveform Generator RIGOL DG4162
	Digital Oscilloscope YOKOGAWA DLM2054

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

อุปกรณ์	รายละเอียด
	KIKUSUI PCR4000LE DC Power Supply
	Isolate Transformer

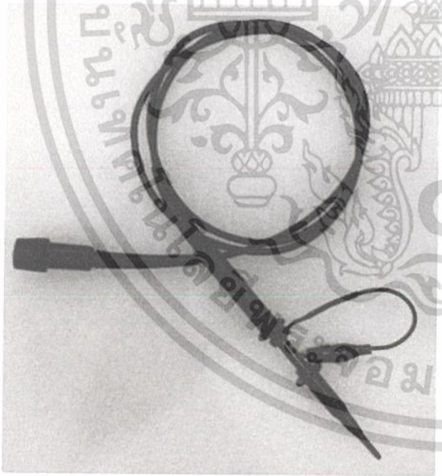
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

อุปกรณ์	รายละเอียด
	YOKOGAWA Datum-XL120 Data Logger
	Clamp Meter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

อุปกรณ์	รายละเอียด
	Voltage Meter
	Voltage Probe

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

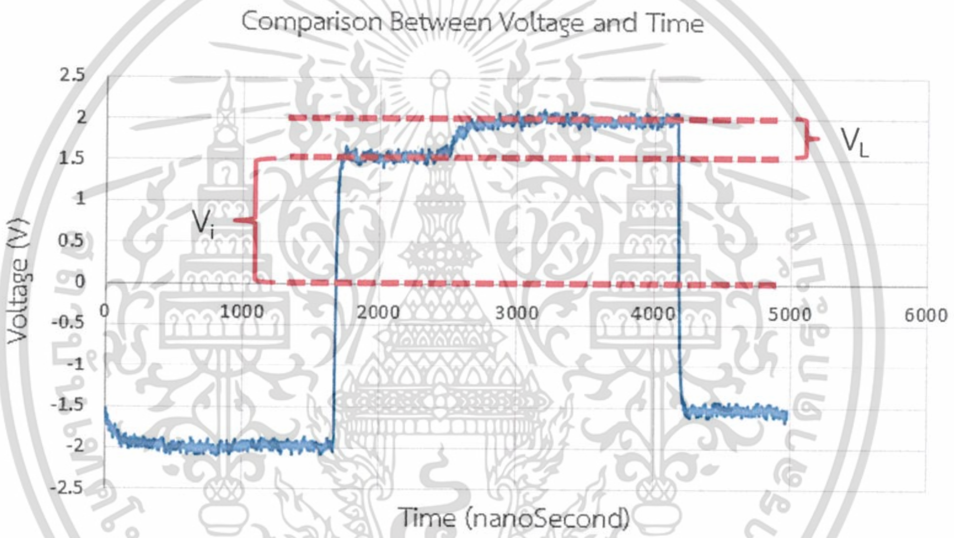
เทคนิควิธีการวิเคราะห์ค่าอิมพีแดนซ์ของโหลดทางไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<u>เทคนิควิธีการวิเคราะห์ค่าอิมพีแดนซ์ของโหลดทางไฟฟ้า</u>

การคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์ของโหลดทางไฟฟ้าได้นั้นจำเป็นจะต้องทราบค่าแรงดันไฟฟ้าของโหลด แรงดันไฟฟ้าของเครื่องส่งสัญญาณ และค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ ซึ่งค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะสามารถหาได้จากกราฟการสะท้อนของสัญญาณคลื่นเดินทาง โดยกราฟของสัญญาณจะไม่มีการสะท้อนของคลื่น หรือก็คือโหลดแมตช์กับสายส่ง ($\rho = 0$) จากนั้นสามารถหาค่าอิมพีแดนซ์ของโหลดทางไฟฟ้าได้จากสมการที่ 2.19 โดยจะยกตัวอย่างการคำนวณของการหาโหลดอิมพีแดนซ์ทางไฟฟ้าที่มีค่าสูงกว่าและต่ำกว่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะตามลำดับ

โดยกรณีแรกจะคำนวณหาโหลดทางไฟฟ้าที่มีค่าเท่ากับ 200 Ω ต่ออยู่กับสายส่ง 75 m ที่ความถี่ 200 kHz ดังรูปที่ ข.1



รูปที่ ข.1 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางเมื่อวัดที่จุดกำเนิดคลื่นเดินทาง โดยใช้คลื่นเดินทางที่มีความถี่ขนาด 200 kHz แบบต่อตัวต้านทานขนาด 200 Ω

จากสมการที่ 2.19

$$\rho = \frac{v_L}{v_i} = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (2.19)$$

เนื่องจากค่าแรงดันของโหลดทางไฟฟ้ามีค่าสูงกว่าแรงดันของเครื่องส่งสัญญาณ ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแรงดันจึงมีค่าเป็นบวก ดังนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

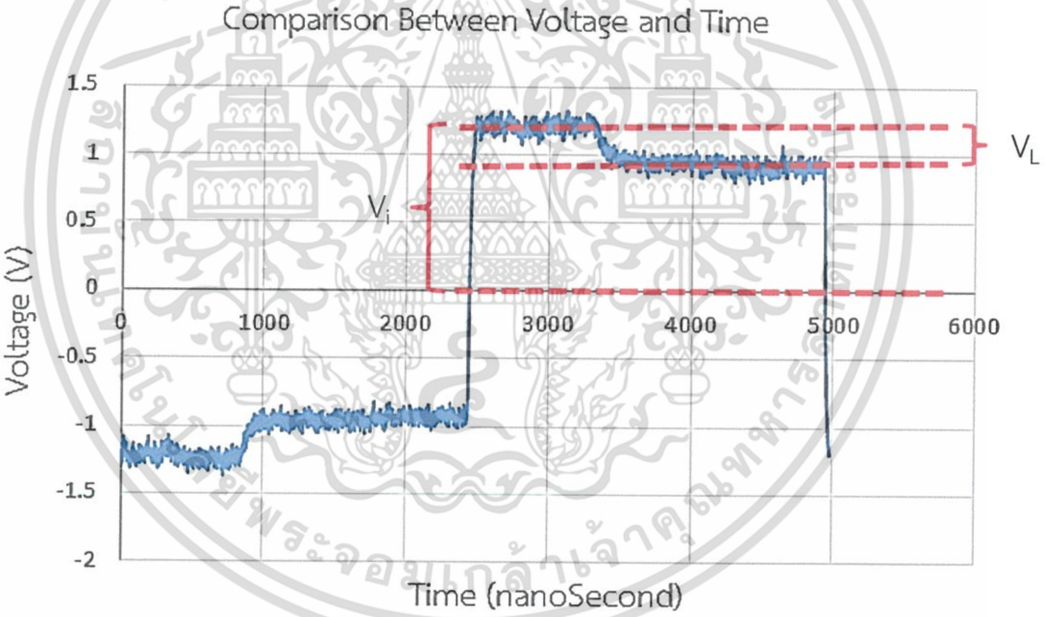
$$\rho = \frac{v_L}{v_i} = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0}$$

$$\rho = \frac{0.3871}{1.5467} = \frac{Z_L - 120}{Z_L + 120}$$

$$\rho = 0.2503,\ \ Z_L = 200.12\ \Omega$$

จากการคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์ของโหลดทางไฟฟ้าจากรูปที่ ข.1 จะได้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแรงดันเท่ากับ 0.2503 โดยที่คลื่นสะท้อนจะมีทิศทางเดียวกันกับคลื่นที่ส่งเข้าไปหรือก็คือจะเป็นการเสริมกัน และอิมพีแดนซ์ของโหลดทางไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 200.12 Ω ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนที่ค่อนข้างน้อย

อีกกรณีหนึ่งนั้นจะคำนวณหาโหลดทางไฟฟ้าที่มีค่าเท่ากับ 75 Ω ต่ออยู่กับสายส่ง 75 m ที่ความถี่ 200 kHz ดังรูปที่ ข.2



รูปที่ ข.2 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทางเมื่อวัดที่จุดกำเนิดคลื่นเดินทาง โดยใช้คลื่นเดินทางที่มีความถี่ขนาด 200kHz แบบต่อตัวต้านทานขนาด 75 Ω

จากสมการที่ 2.19

$$\rho = \frac{v_L}{v_i} = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \tag{2.19}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากค่าแรงดันของโหลดทางไฟฟ้ามีค่าต่ำกว่าแรงดันของเครื่องส่งสัญญาณ ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแรงดันจึงมีค่าติดลบ ดังนั้น

$$\rho = -\frac{v_L}{v_i} = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0}$$

$$\rho = -\frac{0.2941}{1.2573} = \frac{Z_L - 120}{Z_L + 120}$$

$$\rho = -0.2339,\ Z_L = 74.50\ \Omega$$

จากการคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์ของโหลดทางไฟฟ้าจากรูปที่ ข.2 จะได้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแรงดันเท่ากับ 0.2339 โดยที่คลื่นสะท้อนจะมีทิศทางตรงข้ามกับคลื่นที่ส่งเข้าไปหรือก็คือจะเป็นการหักล้างกัน และอิมพีแดนซ์ของโหลดทางไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 74.5 Ω ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนที่ค่อนข้างน้อย

คลื่นเดินทางสามารถหาค่าอิมพีแดนซ์ของโหลดทางไฟฟ้าที่นำมาทดลองได้ แต่ทว่าค่าอิมพีแดนซ์ของโหลดที่ต้องการทดสอบจะต้องมีค่าใกล้เคียงกับ Z_0 ในกรณีที่ค่าอิมพีแดนซ์ของโหลดที่ต้องการทดสอบมีค่าสูงหรือต่ำกว่า Z_0 มาก ๆ จะทำให้ค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณได้มีค่าความคลาดเคลื่อนค่อนข้างมาก เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแรงดันจะเข้าใกล้ -1 และ 1 ดังนั้นเพื่อที่จะดำเนินการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ได้จำเป็นจะต้องใช้อุปกรณ์วัดค่าที่มีความละเอียดสูงและต้องทดสอบในกรณีที่ค่าสัญญาณรบกวนน้อยที่สุดหรือใช้เครื่องส่งสัญญาณที่มีค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะที่ใกล้เคียงกันกับโหลดที่ต้องการจึงจะสามารถคำนวณค่าพารามิเตอร์ได้อย่างแม่นยำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

บทความทางวิชาการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบตรวจสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่สำหรับสถานีไฟฟ้าย่อยโดยอ้างอิงมาตรฐาน IEC61850

Battery Monitoring System for Substation Based On IEC61850 Standard

จุมพล วัฒนะ สุรเชษฐ์ ชมใจ และ ไอยรา พยัคฆ์อังกูร

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1 ซอยฉลองกรุง 1 ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์ 085-261-8114 E-Mail : iyaraphayak@gmail.com

บทคัดย่อ

แนวคิดของระบบตรวจสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดที่ถูกใช้งานในสถานีไฟฟ้าย่อยนี้ หลักสำคัญคือวงจรสมมูลที่แสดงพฤติกรรมของแบตเตอรี่ โดยวิธีการที่ได้นำเสนอคือการอัดประจุไฟฟ้าเพื่อวัดกระแส แรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว และอิมพีแดนซ์ของแบตเตอรี่ที่ทำการทดสอบ โดยวงจรที่นำเสนอมาจากการทดสอบเพื่อดูผลตอบสนองเชิงเวลา อีกทั้งยังมีการประยุกต์ใช้คลื่นเดินทางเพื่อบ่งบอกแนวโน้มของแบตเตอรี่ที่เสื่อมสมรรถนะได้ โดยสังเกตได้จากรูปแบบของคลื่นที่เปลี่ยนไป โดยการรับส่งข้อมูลทั้งหมดจะอ้างอิงตามมาตรฐานสากล IEC 61850 จากผลที่ได้สรุปได้ว่าวงจรสมมูลที่นำเสนอมีความถูกต้อง และการประยุกต์ใช้คลื่นเดินทางสามารถบ่งบอกแนวโน้มการเสื่อมสมรรถนะของแบตเตอรี่ได้จริง ซึ่งสามารถนำไปเป็นอีกฟังก์ชั่นของเครื่องอัดประจุไฟฟ้าในสถานีไฟฟ้าย่อยได้

คำสำคัญ : วงจรสมมูล, แบตเตอรี่, คลื่นเดินทาง

Abstract

The concept of Battery Monitoring System for Substation Based on IEC61850 Standard is proposed in this thesis. The keys of battery monitoring system are the equivalent circuit represented battery characteristics and traveling wave for indicating tendency of weak or abnormal battery. The measurement method and tested circuit for getting battery's parameters is proposed by charging the battery to measure the current, voltage, and impedances .The proposed equivalent circuit is validated time domain .Then, the abnormal battery indicative method is proposed by applying the traveling wave to find the difference, and the data reporting will be based on IEC61850 . The results of the experiment can summarize that the equivalent circuit of tested battery is acceptable and applying the traveling wave is able to indicate the tendency of battery deterioration. This research could be used to develop and apply for being another function in battery charger using in substation.

Keyword : Equivalent Circuit, Battery, Traveling Wave

1.บทนำ

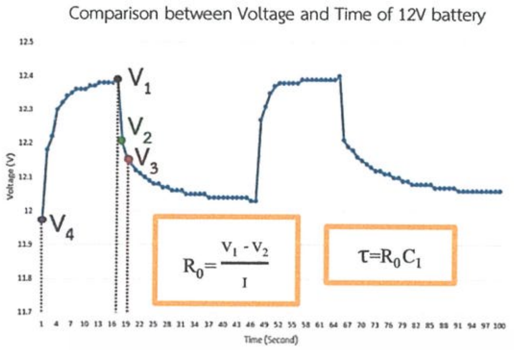
ปัจจุบันพลังงานไฟฟ้าได้เข้ามามีส่วนสำคัญต่อการดำเนินชีวิต การขับเคลื่อนเศรษฐกิจและประเทศชาติ มากไปกว่านั้นความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้ามีแนวโน้มที่สูงขึ้นตามการพัฒนาของประเทศชาติและเพื่อประชากรในประเทศมีพลังงานไฟฟ้าใช้อย่างครอบคลุมจึงจำเป็นต้องมีการก่อตั้งสถานีไฟฟ้าย่อยเพื่อแจกจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้แก่อุตสาหกรรมและครัวเรือนอย่างทั่วถึง เมื่อสถานีไฟฟ้าเกิดความขัดข้องหรืออุบัติการณ์ที่คาดไม่ถึงอาจทำให้ระบบไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าย่อยไม่สามารถใช้การได้ สถานีไฟฟ้าย่อยจึงจำเป็นจะต้องมีแบตเตอรี่เพื่อกักเก็บสำรองพลังงานไฟฟ้าไว้ใช้ยามจำเป็นเพื่อแจกจ่ายให้กับระบบสำคัญ เช่น ระบบรักษาความปลอดภัย ระบบตรวจสอบสมรรถนะของแบตเตอรี่จึงเข้ามามีบทบาทสำคัญเพื่อตรวจสอบและบ่งบอกสมรรถนะของแบตเตอรี่ที่เชื่อมต่อกันแบบอนุกรม ให้พร้อมใช้งานได้อยู่เสมอ

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 เทคนิคในการบ่งบอกแบตเตอรี่ที่เสื่อมสภาพ

การวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์เพื่อใช้บ่งบอกแบตเตอรี่ที่เสื่อมสภาพได้นั้น จะใช้หลักการ Time Domain Method โดยใช้การอัดประจุแบบพัลซ์ (Pulse Charge) เพื่อดูผลตอบสนองของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของแบตเตอรี่และกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านแบตเตอรี่ในช่วงความถี่ที่ทำการทดลอง จะได้รูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเทียบกับเวลา ดังรูปที่ 1 และนำผลที่ได้มาคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ความต้านทานภายในและความจุเพื่อบ่งบอกความเสื่อมสภาพของแบตเตอรี่

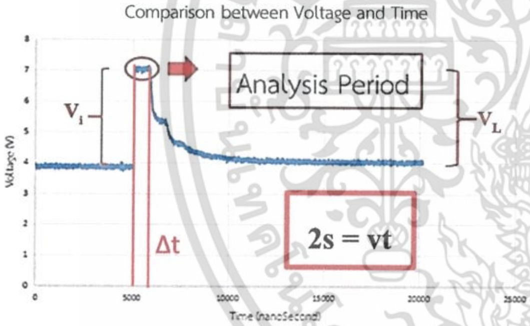
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันและกระแส

2.2 เทคนิคในการบ่งบอกแบตเตอรี่ที่เสื่อมสภาพเมื่อเชื่อมต่ออนุกรม

การวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์เพื่อใช้บ่งบอกแบตเตอรี่ที่เสื่อมสภาพเมื่อเชื่อมต่ออนุกรมได้นั้น จะประยุกต์ใช้ Traveling Wave เพื่อดูผลตอบสนองของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของแบตเตอรี่เมื่อเทียบกับเวลาในช่วงความถี่ที่ทำการทดลอง เพื่อนำสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ได้มาทำการวิเคราะห์เพื่อบ่งบอกความเป็นไปได้ที่จะมีแบตเตอรี่ที่เสื่อมสภาพต่อไป ดังรูปที่ 2

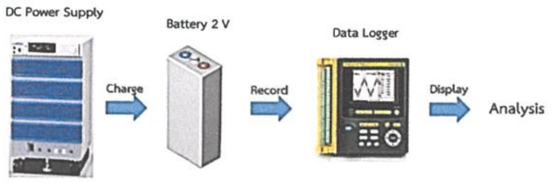


รูปที่ 2 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันและกระแส

3. การทดลอง

3.1 การทดลองเพื่อดูผลตอบสนองเชิงเวลา

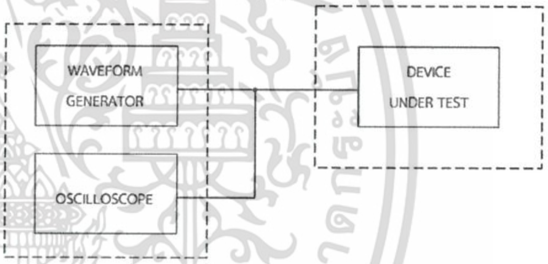
ทำการทดลองโดยการอัดและคายประจุแบบพัลซ์ชาร์จ (Pulse Charge) ที่พิกัดแรงดันไฟฟ้าคงที่ เพื่อดูผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของแบตเตอรี่ โดยแบตเตอรี่ที่ใช้ทำการทดลองพิกัด 380 Ah, Nominal Voltage 2 V_{dc} ได้ดังรูปที่ 3 จากนั้นนำผลการทดลองที่ได้ไปวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่เพื่อใช้บ่งบอกความเสื่อมสภาพของแบตเตอรี่



รูปที่ 3 การหาพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่โดยวิธีการวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงเวลา

3.2 การทดลองประยุกต์ใช้คลื่นเดินทาง

การหาตำแหน่งของแบตเตอรี่ลูกที่เสื่อมนั้นจำเป็นต้องรู้วงจรสมมูลและค่าพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่แต่ละลูก เนื่องจากวงจรสมมูลของแบตเตอรี่นั้นเหมือนกันทุกลูก และพารามิเตอร์มีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อมีการจ่ายสัญญาณคลื่นเคลื่อนที่เข้าไป สัญญาณจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากเกินไป แต่ถ้าหากมีแบตเตอรี่ลูกใดที่เสื่อมหรือค่าพารามิเตอร์ต่างจากปกติ สัญญาณจะมีการเปลี่ยนแปลง จากนั้นจะนำกราฟมาวิเคราะห์เพื่อหาความเป็นไปได้ที่จะมีแบตเตอรี่ที่เสื่อมสภาพ โดยการออกแบบ ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 วงจรที่ใช้ในการทดสอบคลื่นเดินทาง

โดยหลักการในการออกแบบนั้นจะใช้เวฟฟอร์มเจเนอเรเตอร์เพื่อสร้างคลื่นสัญญาณแบบ Square Wave เข้าไปภายในวงจรที่ต้องทำการทดสอบ ซึ่งวงจรที่ทำการทดสอบจะประกอบไปด้วย สายส่งความยาว 75 m ตัวต้านทาน และแบตเตอรี่ที่ต้องการทดสอบ โดยใช้งานออสซิลโลสโคปในการตรวจรับและแสดงสัญญาณคลื่นที่ต้องการตรวจจับ เพื่อนำผลและรูปคลื่นที่ได้ไปทำการวิเคราะห์เพื่อหาความเป็นไปได้ที่จะมีแบตเตอรี่ที่เสื่อมสภาพต่อไป

4. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

การทดสอบแบตเตอรี่เพื่อหาค่าพารามิเตอร์และเพื่อบ่งบอกความเสื่อมสภาพของแบตเตอรี่ จะใช้วิธีการวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงเวลา เมื่อต่อแบตเตอรี่จำนวน 1 ลูก สำหรับการบ่งบอกความเป็นไปได้ที่จะมีแบตเตอรี่ที่เสื่อมสภาพเมื่อต่อกันแบบอนุกรมนั้น จะใช้การประยุกต์ใช้คลื่นเดินทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1 วิธีการวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงเวลา

ทำการทดลองอัดประจุแบตเตอรี่ที่แรงดันฟ้าที่ขั้วของแบตเตอรี่ประมาณ 2.1 V และอัดประจุที่พิกัดแรงดันไฟฟ้า 2.5 V เพื่อบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสอัดประจุที่เปลี่ยนแปลงของแบตเตอรี่ 6 ลูก เพื่อวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์จะได้ค่า ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแบตเตอรี่ที่ทำการทดสอบ

Battery	V_{Max} (V)	V_{Min} (V)	Current (A)	R_0 (mΩ)	C_1 (F)
1	2.1174	2.1156	0.5762	1.0413	10,563
2	2.1117	2.1105	0.6000	1.0000	8,000
3	2.1192	2.1180	0.5643	1.0632	10,816
4	1.839	1.8258	0.3257	40.5281	75
5	2.1144	2.1129	0.5857	1.0243	14,644
6	1.8696	1.8542	0.3942	35.5150	20

ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้เพื่อบ่งบอกแบตเตอรี่ที่เสื่อมสภาพนั้นจะให้ความสำคัญกับ R_0 เป็นหลักเนื่องจากการเกิดซัลเฟชั่นของแผ่นขั้วธาตุตามอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ ดังสมการที่ 1

$$R_0 = \rho_0 \frac{L}{A} \quad (1)$$

และเมื่อนำค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณได้ดังกล่าวมาทำการเปรียบเทียบกับข้อมูลทางเทคนิคของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดซึ่งจัดทำโดยผู้ผลิตนั้น ซึ่งมีค่าพารามิเตอร์ R_0 เท่ากับ 0.78 mΩ โดยจะสามารถบ่งบอกสมรรถนะของแบตเตอรี่ได้ ดังตารางที่ 2

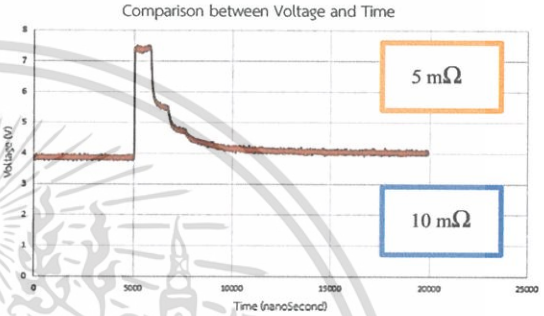
ตารางที่ 2 สมรรถนะของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดทั้ง 6 ลูก

Battery	R_0 (mΩ)	Condition
1	1.0413	Satisfied
2	1.0000	Satisfied
3	1.0632	Satisfied
4	40.5281	Unsatisfied
5	1.0243	Satisfied
6	35.5150	Unsatisfied

จากผลการทดลองพบว่า แบตเตอรี่ที่เสื่อมสภาพจะมีค่าพารามิเตอร์ R_0 มากกว่าค่าตามดาต้าชีท และมีค่าความจุ C_1 น้อย แสดงให้เห็นว่าแบตเตอรี่ลูกนั้น ๆ มีการเสื่อมสภาพตามอายุการใช้ของแบตเตอรี่

4.2 วิธีการวิเคราะห์การประยุกต์ใช้คลื่นเดินทาง

ทำการทดลองส่งคลื่นเดินทางแบบ Square Wave ขนาด 5 V_{pp} โดยใช้คลื่นความถี่ขนาด 20 kHz ผ่านสายส่งที่มีความยาวขนาด 75 m โดยทำการต่อแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด ที่มีแรงดันไฟฟ้า 2 V จำนวน 2 ลูก และตัวต้านทานขนาด 5 mΩ และ 10 mΩ ซึ่งเป็นตัวต้านทานใกล้เคียง R_0 ของแบตเตอรี่ ณ จุดความยาวที่ 75 m เพื่อค้นหาลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและระยะของจุดกำเนิดความผิดพลาดที่เกิดขึ้น จะได้ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเดินทาง แบบต่อแบตเตอรี่จำนวน 2 ลูก และ ตัวต้านทานขนาด 5 mΩ และ 10 mΩ

โดยทำการวิเคราะห์สัญญาณแรงดันไฟฟ้าในช่วงที่สนใจ จะสามารถบ่งบอกตำแหน่ง, ค่าแรงดันไฟฟ้า, ค่า Z_0 และค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแรงดัน (ρ) ได้ ดังสมการที่ 2 และ สมการ 2s = vt และแสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังตารางที่ 3

$$\rho = \frac{v_L}{v_i} = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (2)$$

ตารางที่ 3 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เมื่อมีโหลดตัวต้านทาน

Resistance (mΩ)	Time (ns)	Position (metre)	V_{AVG} (V)	Z_L (mΩ)	ρ
-	795	78.7	7.3686	180.44	-0.9970
5	795	78.7	7.3371	221.25	-0.9963
10	795	78.7	7.3014	438.85	-0.9927

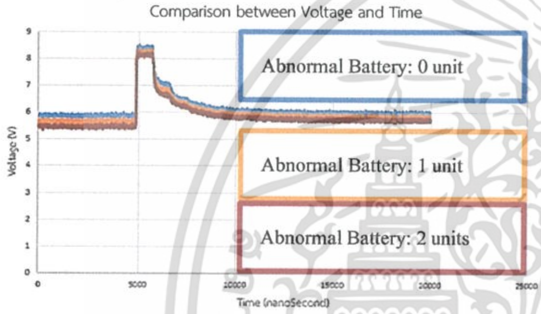
จะพบว่าจุดที่เกิดความผิดพลาดที่ได้ จะมีความคลาดเคลื่อนเมื่อเทียบกับตำแหน่งของสายส่งของจริงประมาณ 4.9% แต่ไม่สามารถบ่งบอกตำแหน่งของแบตเตอรี่ที่เสื่อมสภาพได้ เมื่อวิเคราะห์แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยในช่วงที่สนใจ จะพบว่าเมื่อมีโหลดตัวต้านทานเพิ่มขึ้น แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยจะลดลงตามลำดับ และเมื่อคำนวณค่าอิมพีแดนซ์จะพบว่า ค่าที่คำนวณได้มีความผิดพลาดจากความเป็นจริง เนื่องจากค่า Z_0 ของเวฟฟอร์มเจเนอเรเตอร์และค่า Z_L มีค่าต่างกันมากเกินไป แต่ทว่าเมื่อพิจารณาถึงค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แล้ว จะสามารถบ่งบอกได้ว่าเมื่อโหลดทางไฟฟ้ามีค่าอิมพีแดนซ์มากขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแรงดันจะมีค่าเข้าใกล้ 0 มากขึ้น เนื่องจากค่าที่ได้จะมีความต่างระหว่าง Z_0 และ Z_L ลดลง

4.2 วิธีการวิเคราะห์การประยุกต์ใช้คลื่นเดินทางเมื่อมีแบตเตอรี่ที่เสื่อมสภาพ

ทำการทดลองส่งคลื่นเดินทางแบบ Square Wave ขนาด 5 V_{pp} โดยใช้คลื่นความถี่ขนาด 20 kHz ผ่านสายส่งที่มีความยาวขนาด 75 m โดยทำการต่อแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด ที่มีแรงดันไฟฟ้า 2 V จำนวน 3 ลูก และมีแบตเตอรี่ที่เสื่อมสมรรถนะหรือพังเนื่องจากการอัดประจุเกิน เพื่อหาลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและระยะของจุดกำเนิดความผิดพลาดที่เกิดขึ้น ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ จำนวน 3 ลูก แบบไม่มีแบตเตอรี่ที่เสื่อมสภาพ และแบบมีแบตเตอรี่ที่เสื่อมสภาพ

ตารางที่ 4 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ แบบเชื่อมต่อแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด จำนวน 2 ลูกและมีลูกที่เสื่อมสภาพ

Abnormal Battery	Time (ns)	Position (metre)	Z_L (mΩ)	ρ
-	792	78.4	324.88	-0.9946
1	792	78.4	1538.24	-0.9747
2	792	78.4	2214.56	-0.9637

จะพบว่าจุดที่เกิดความผิดพลาดที่คำนวณได้ จะมีความคลาดเคลื่อนเมื่อเทียบกับตำแหน่งของสายส่งของจริงประมาณ 4.5% แต่ไม่สามารถบ่งบอกตำแหน่งของแบตเตอรี่ที่เสื่อมสภาพ เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแรงดันเมื่อมีแบตเตอรี่ที่เสื่อมสภาพจำนวนมากขึ้น จะส่งผลให้มีค่าเข้าใกล้ 0 มากขึ้น ซึ่งสามารถพิจารณาว่ามีแบตเตอรี่ที่เสื่อมสภาพในระบบได้

5.สรุป

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอเทคนิคการบ่งบอกแบตเตอรี่ที่เสื่อมสภาพ โดยแบ่งการทดลองเป็น การทดลองเพื่อดูผลตอบสนองเชิงเวลา และการทดลองประยุกต์ใช้คลื่นเดินทาง จากการทดลองพบว่า สามารถใช้การวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงเวลาในการบ่งบอกการเสื่อมสภาพของแบตเตอรี่ 1 ลูกได้ สำหรับการเชื่อมต่อกันแบบอนุกรมนั้นจำเป็นจะต้องประยุกต์ใช้คลื่นเดินทาง เนื่องจากสามารถบ่งบอกตำแหน่งกำเนิดความผิดพลาดภายในสายส่งได้และมีค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ จากการทดลองพบว่า สัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ทำการทดสอบ จะพิจารณาแบตเตอรี่ที่เชื่อมต่อกันแบบอนุกรมเป็นโหลดทางไฟฟ้าชุดเดียว ทำให้ไม่สามารถบ่งบอกตำแหน่งแบตเตอรี่ที่เสื่อมสภาพได้ แต่ทว่าสามารถบ่งบอกถึงความเป็นไปได้ที่จะมีแบตเตอรี่ที่เสื่อมสภาพได้ ซึ่งสามารถพัฒนาต่อยอดเพิ่มเติมเพื่อนำไปลดเวลาในส่วนการตรวจสมรรถนะของแบตเตอรี่ภายในสถานีไฟฟ้าย่อยได้และพัฒนาการออกแบบให้เป็นส่วนหนึ่งของเครื่องอัดประจุไฟฟ้าเพื่อบันทึก แสดงผล และแจ้งเตือนให้แก่ผู้ใช้งานได้

6.กิตติกรรมประกาศ

บทความนี้เป็นส่วนหนึ่งของงานวิจัย ที่ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัย จากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ประจำปี 2559 ขอขอบคุณ รศ.ดร.สุรินทร์ คำฝอย ผู้ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ให้คำปรึกษาและช่วยเหลือในการวิจัย และคุณเกียรติศักดิ์ นาคจุ้ย ผู้ซึ่งเป็นรุ่นพี่ที่คอยช่วยเหลือในการวิจัย รวมถึงทุกท่านในห้องปฏิบัติการ Renewable Energy Application Laboratory (REAL) ที่คอยช่วยเหลือ จนการวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

[1] Agilent Technologies, (2013), "Time Domain Reflectometry Theory". Agilent Technologies Publishing.

[2] Jaturong Tongkamkaew; Jaturat Srikrajib; Jarupong Nooleau; Chayanit Tankul, (2014), "Hybrid Battery For Grid Support Function". King Mongkut's Institute of Techonology Ladkrabang.

[3] Tektronix Company, (2008), "TDR Impedance Measurements: A Foundation for Signal Integrity". Tektronix Publishing.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายจุมพล วัฒนะ
วัน เดือน ปีเกิด 20 พฤศจิกายน 2537
ที่อยู่ 115/122 ซอย7/2 ตำบลบางรักพัฒนา อำเภอบางบัวทอง จังหวัดนนทบุรี 11110

ประวัติการศึกษา

ปีการศึกษา 2556 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนศรีบุณยานนท์
ปีการศึกษา 2560 สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ฝึกงานภาคฤดูร้อน National Institute of Technology, Kushiro, Japan (Kushiro) ระหว่างวันที่ 1 มิถุนายน ถึง 30 มิถุนายน 2559

ชื่อ-นามสกุล นายสุรเชษฐ์ ชมใจ
วัน เดือน ปีเกิด 4 สิงหาคม 2537
ที่อยู่ 59/1 หมู่ 8 ตำบลเจดีย์หัก อำเภอเมือง จังหวัดราชบุรี 70000

ประวัติการศึกษา

ปีการศึกษา 2556 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนเบญจมราชูทิศ ราชบุรี
ปีการศึกษา 2560 สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ฝึกงานภาคฤดูร้อน บริษัท ผลิตไฟฟ้าราชบุรี จำกัด แผนกปฏิบัติการ และบำรุงรักษา ระหว่างวันที่ 1 มิถุนายน ถึง 31 กรกฎาคม 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อ-นามสกุล นายไอยรา พยัคฆ์อังกูร

เดือน ปีเกิด 14 เมษายน 2538

ที่อยู่ 28/4 ซอยจันทคามวิถี2 ตำบลตลาด อำเภอเมือง จังหวัดจันทบุรี 22000

ประวัติการศึกษา

ปีการศึกษา 2556 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนเบญจมราชูทิศ จันทบุรี

ปีการศึกษา 2560 สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ฝึกงานภาคฤดูร้อน Tokai University, Japan (Kanagawa) ระหว่างวันที่ 1 มิถุนายน ถึง 9 กรกฎาคม 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้