

การวิเคราะห์ลักษณะการแพร่กระจายของพัลส์ดีสชาร์จบางส่วน

ในระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีความแตกต่างในรูปแบบการต่อลงดิน

PARTIAL DISCHARGE PULSE PROPAGATION CHARACTERISTICS DIAGNOSIS
IN UNDERGROUND CABLE WITH DIFFERENT GROUNDING SYSTEMS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2565

KMITL-2022-EN-M-020-089

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PARTIAL DISCHARGE PULSE PROPAGATION CHARACTERISTICS DIAGNOSIS
IN UNDERGROUND CABLE WITH DIFFERENT GROUNDING SYSTEMS

WORANAN INWANNA

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF

MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING

SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2022

KMITL-2022-EN-M-020-089

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2022

SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ สงวนลิขสิทธิ์ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์ลักษณะการแพร่กระจายของพัลส์ดิสชาร์จบางส่วน ในระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีความแตกต่างในรูปแบบการต่อลงดิน
นักศึกษา	นางสาววรรณ อินวรรณ
รหัสประจำตัว	62601062
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2565
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ. ดร.ภพ จันทร์เจริญสุข รศ.ดร.นรเศรษฐ์ พัฒนเดช

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการศึกษาเทคนิคในการตรวจวัดสัญญาณดิสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge; PD) และวิธีการวิเคราะห์ผลการทดสอบรวมถึงการระบุตำแหน่งจุดเกิด PD ด้วยวิธี Time Domain Reflection (TDR) และวิธี Time of Arrival (TOA) ในระบบเคเบิลใต้ดินที่มีการต่อลงดินที่แตกต่างกัน โดยจะแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ส่วน คือ 1. ทดสอบในห้องปฏิบัติการ 2. ทดสอบในภาคสนาม สำหรับการทดสอบในห้องปฏิบัติการจะทำการจำลองการต่อลงดิน 4 รูปแบบ คือ 1. การต่อลงดินข้างเดียว (Single-point Bonding) 2. การต่อลงดินแบบกึ่งกลาง (Middle-point Bonding) 3. การต่อลงดินทั้งสองปลาย (Both-Ends Bonding) 4. การต่อลงดินแบบไขว้ (Cross-Bonding) วิธีการตรวจวัดสัญญาณจะใช้เซ็นเซอร์ High Frequency Current Transformer (HFCT) และเซ็นเซอร์ PD Line ติดตั้งในตำแหน่งที่ต่างกันเพื่อนำมาวิเคราะห์และเปรียบเทียบรูปแบบสัญญาณและลักษณะเฉพาะของพัลส์ PD จากผลทดสอบ พบว่า การต่อลงดินข้างเดียวและทั้งสองปลายสามารถติดตั้งเซ็นเซอร์ในลักษณะเดียวกันและให้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกัน ในขณะที่การต่อลงดินแบบกึ่งกลางและการต่อลงดินแบบไขว้จะมีวิธีการติดตั้งเซ็นเซอร์และการวิเคราะห์ที่ต่างออกไป นอกจากนี้สามารถระบุระยะจุดเกิด PD ที่มีความใกล้เคียงกับความเป็นจริงจากพัลส์สะท้อนที่เกิดขึ้นหรือจากการเปรียบเทียบเวลาของพัลส์จากเซ็นเซอร์แต่ละตัว สำหรับผลการทดสอบในภาคสนามที่มีลักษณะการต่อลงดินทั้งสองปลายและมีการตรวจวัดทั้งแบบออนไลน์และออฟไลน์ด้วยวิธีการตรวจวัดสัญญาณเช่นเดียวกันกับในห้องปฏิบัติการ พบว่า ผลการทดสอบมีความสอดคล้องกับการทดสอบในห้องปฏิบัติการทั้งด้านรูปแบบสัญญาณ ลักษณะพัลส์และระยะจุดเกิด PD แสดงให้เห็นว่าเทคนิคการตรวจวัดและวิเคราะห์ในการวิจัยครั้งนี้สามารถนำไปเป็นตัวอย่างและแนวทางในการวิเคราะห์สัญญาณ PD ที่ตรวจวัดได้จากระบบสายเคเบิลใต้ดินที่หน่วยงานจริงได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	PARTIAL DISCHARGE PULSE PROPAGATION CHARACTERISTICS DIAGNOSIS IN UNDERGROUND CABLE WITH DIFFERENT GROUNDING SYSTEMS
Student	Ms.Woranan Inwanna
Student ID.	62601062
Degree	Master of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2022
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Phop Chancharoensook Assoc. Prof. Dr. Norasage Pattanadech

ABSTRACT

This thesis proposes a study of the Partial Discharge (PD) measurement technique and test result analysis, including PD localization by Time Domain Reflection (TDR) and Time of Arrival (TOA) method in underground cable systems with different grounding. The test is divided into 2 major parts, consisting of the laboratory test and field test. For laboratory testing, 4 cases of grounding simulations were performed, consisting of single-point bonding, middle-point bonding, both-ends bonding and cross-bonding. The measurement method used High Frequency Current Transformer (HFCT) sensors and PD Line sensors installed at different positions to analyze and compare PD pattern and characteristics of PD pulses. As referred to the result, single-point and both-ends bonding can install sensors in the same pattern and have the same result while middle-point and cross-bonding have different method of sensor installation and analysis. In addition, PD localization from reflected pulses or comparing the arrival time of pulses given accurate results. The field test was measured both on-line and off-line using the same laboratory test method with both-ends bonding system. The results were consistent with laboratory test in term of PD pattern, PD pulse characteristics and PD location. This work demonstrates that the proposed measurement techniques and analysis method can be used as an example and guideline for analyzing PD signals measured from underground cable systems on site.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และแจ้งอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความรู้จากอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ. ดร.ภพ จันท์เจริญสุข และ รศ.ดร.นรเศรษฐ พัฒนเดช ที่ได้ให้ความรู้ ประสบการณ์ที่ดี ตลอดจนให้คำปรึกษาและชี้แนะแนวทางการแก้ไขปัญหาให้ผ่านลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ บริษัท พีดีโซลูชั่น จำกัด ที่ได้ให้ความรู้ ความเข้าใจ ประสบการณ์เกี่ยวกับการตรวจวัด Partial discharge (PD) และความอนุเคราะห์ในการใช้พื้นที่ภายในบริษัท อุปกรณ์และเครื่องตรวจวัด PD สำหรับการทดสอบการเคลื่อนที่ของสัญญาณ PD ในสายสัญญาณโดยจำลองเป็นสายเคเบิลใต้ดิน อีกทั้งให้ความสนับสนุนด้านข้อมูลการตรวจวัด PD ในระบบเคเบิลใต้ดินที่หน้างานจริงตลอดการทำวิจัย

สุดท้ายต้องขอขอบคุณครอบครัวของข้าพเจ้า เพื่อน ๆ ที่ช่วยเหลือและเป็นกำลังใจให้ข้าพเจ้าเป็นอย่างดี

สำหรับคุณงามความดีที่พึงมีเกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้แก่บิดามารดาที่เป็นที่เคารพรักยิ่งของข้าพเจ้า ตลอดจนอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้มอบวิชาความรู้และประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

วรรณ อินวรรณ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.5 แผนการปฏิบัติงาน.....	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 สายเคเบิลใต้ดิน.....	5
2.1.1 โครงสร้างของสายเคเบิลใต้ดิน.....	5
2.1.2 อุปกรณ์เสริมของสายเคเบิล.....	7
2.2 การต่อลงดินเพื่อการทำงานของระบบเคเบิลใต้ดิน.....	7
2.2.1 การต่อลงดินสำหรับสายเคเบิลใต้ดินในระบบ 22-33 kV.....	8
2.2.2 การต่อลงดินสำหรับสายเคเบิลใต้ดินในระบบ 115 kV.....	9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ IV ภาษาอังกฤษถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3 การเกิด PD ในสายเคเบิลใต้ดินและอุปกรณ์เสริมของสายเคเบิลใต้ดิน.....	10
2.3.1 ประเภทของ PD.....	10
2.3.2 จุดอ่อนของสายเคเบิลใต้ดิน.....	11
2.4 วิธีการระบุตำแหน่งจุดกำเนิดของ PD.....	11
2.4.1 การเคลื่อนที่และการลดทอนของสัญญาณ.....	11
2.4.2 Time Domain Reflection.....	12
2.4.3 Time of Arrival.....	13
2.4.4 สัญญาณ PD ในระบบการต่อลงดินแบบไขว้.....	13
บทที่ 3 การทดสอบ.....	14
3.1 การทดสอบสัญญาณ PD ในห้องปฏิบัติการ.....	14
3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบในห้องปฏิบัติการ.....	14
3.1.2 การทดสอบระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีการต่อลงดินข้างเดียว.....	16
3.1.3 การทดสอบระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีการต่อลงดินแบบกึ่งกลาง.....	17
3.1.4 การทดสอบระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีการต่อลงดินทั้งสองปลาย.....	19
3.1.5 การทดสอบระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีการต่อลงดินแบบไขว้.....	20
3.2 การทดสอบสัญญาณ PD ในภาคสนาม.....	21
3.2.1 การทดสอบแบบออนไลน์สำหรับระบบสายเคเบิลใต้ดิน 115kV.....	21
3.2.2 การทดสอบแบบออฟไลน์สำหรับระบบสายเคเบิลใต้ดิน 115kV.....	22
บทที่ 4 ผลการทดสอบ.....	24
4.1 ผลการทดสอบสัญญาณ PD ในห้องปฏิบัติการ.....	24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ v ังอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.1.1 ผลการทดสอบระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีการต่อลงดินข้างเดียว.....	24
4.1.2 ผลการทดสอบระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีการต่อลงดินแบบกึ่งกลาง รูปแบบที่ 1.....	32
4.1.3 ผลการทดสอบระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีการต่อลงดินแบบกึ่งกลาง รูปแบบที่ 2.....	38
4.1.4 ผลการทดสอบระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีการต่อลงดินทั้งสองปลาย....	45
4.1.5 ผลการทดสอบระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีการต่อลงดินแบบไขว้.....	50
4.1.6 การวิเคราะห์เพื่อระบุตำแหน่งจุดกำเนิดของ PD.....	54
4.2 ผลการทดสอบสัญญาณ PD ในภาคสนาม.....	56
4.2.1 ผลการทดสอบแบบออนไลน์สำหรับระบบสายเคเบิลใต้ดิน 115kV....	56
4.2.2 ผลการทดสอบแบบออฟไลน์สำหรับระบบสายเคเบิลใต้ดิน 115kV....	61
บทที่ 5 สรุปผลการทดสอบ.....	65
5.1 สรุปผลการทดสอบ.....	66
5.2 ปัญหาที่พบ แนวทางแก้ไขและข้อเสนอแนะ.....	66
บรรณานุกรม.....	67
ภาคผนวก ก วิธีการคำนวณตำแหน่งจุดเกิด PD ด้วยวิธี TDR.....	70
ภาคผนวก ข ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	74
ภาคผนวก ค ข้อมูลอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบในห้องปฏิบัติการ.....	80
ประวัติผู้เขียน.....	92

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 โครงสร้างสายเคเบิลใต้ดิน.....	6
2.2 ประเภทของ PD.....	11
4.1 ผลการตรวจวัดขนาดของพัลส์ที่ถูกจ่ายด้วยเครื่อง PD pulse generator.....	24
4.2 ผลการทดสอบการต่อลงดินข้างเดียวกรณีจ่าย PD ต้นสาย.....	25
4.3 ผลการทดสอบการต่อลงดินข้างเดียวกรณีจ่าย PD กลางสาย.....	27
4.4 ผลการทดสอบการต่อลงดินข้างเดียวกรณีจ่าย PD ปลายสาย.....	28
4.5 ผลการทดสอบการต่อลงดินแบบกึ่งกลางรูปแบบที่ 1 กรณีจ่าย PD ต้นสาย.....	32
4.6 ผลการทดสอบการต่อลงดินแบบกึ่งกลางรูปแบบที่ 1 กรณีจ่าย PD กลางสาย.....	33
4.7 ผลการทดสอบการต่อลงดินแบบกึ่งกลางรูปแบบที่ 1 กรณีจ่าย PD ปลายสาย.....	35
4.8 ผลการทดสอบการต่อลงดินแบบกึ่งกลางรูปแบบที่ 2 กรณีจ่าย PD ต้นสาย.....	38
4.9 ผลการทดสอบการต่อลงดินแบบกึ่งกลางรูปแบบที่ 2 กรณีจ่าย PD กลางสาย.....	40
4.10 ผลการทดสอบการต่อลงดินแบบกึ่งกลางรูปแบบที่ 2 กรณีจ่าย PD ปลายสาย.....	41
4.11 ผลการทดสอบการต่อลงดินทั้งสองปลายกรณีจ่าย PD ต้นสาย.....	45
4.12 ผลการทดสอบการต่อลงดินทั้งสองปลายกรณีจ่าย PD กลางสาย.....	46
4.13 ผลการทดสอบการต่อลงดินทั้งสองปลายกรณีจ่าย PD ปลายสาย.....	48
4.14 ผลการทดสอบการต่อลงดินแบบไขว้.....	50
4.15 ผลการทดสอบแบบออนไลน์สำหรับระบบสายเคเบิลใต้ดิน 115kV จากเซ็นเซอร์ HFCT.....	56
4.16 ผลการทดสอบแบบออนไลน์สำหรับระบบสายเคเบิลใต้ดิน 115kV จากเซ็นเซอร์ PD Line.....	58
4.17 ผลการทดสอบแบบออฟไลน์สำหรับระบบสายเคเบิลใต้ดิน 115kV.....	61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ VIII อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างสายเคเบิลใต้ดินแรงดันปานกลาง 22-33 kV.....	5
2.2 โครงสร้างสายเคเบิลใต้ดินแรงดันสูง 115 kV.....	6
2.3 อุปกรณ์เสริมสายเคเบิลมีรูปแบบดังต่อไปนี้: (a) one-piece termination; (b) composite termination; (c) composite joint; (d) one-piece joint; (e) three-piece join.....	7
2.4 การต่อลงดินทั้งสองปลาย.....	8
2.5 การต่อลงดินแบบหลายจุด.....	8
2.6 การต่อลงดินข้างเดียว.....	9
2.7 การต่อลงดินแบบกึ่งกลาง.....	9
2.8 การต่อลงดินแบบไขว้.....	10
2.9 ประเภทของ PD: (a) Corona discharge; (b) Surface discharge; (c) Internal discharge.....	10
2.10 ขนาดและระยะเวลาของสัญญาณ PD สำหรับความยาวสายดังนี้: (ก) 100 m; (ข) 200 m.....	12
3.1 ชุดเครื่องมือวัดและวิเคราะห์สัญญาณ PD มีอุปกรณ์ดังต่อไปนี้: (ก) เครื่องวัดและวิเคราะห์สัญญาณ PD (PD Analyzer); (ข) เซ็นเซอร์ HFCT; (ค) เซ็นเซอร์ตรวจจับทางคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า; (ง) เครื่อง PD Calibrator.....	15
3.2 ชุดการจำลองระบบสายเคเบิลใต้ดินมีอุปกรณ์ดังต่อไปนี้: (ก) สาย RG58; (ข) สายกราวด์; (ค) ข้อต่อแบบต่าง ๆ.....	15
3.3 ไดอะแกรมวงจรการทดสอบระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีการต่อลงดินข้างเดียว.....	16
3.4 วงจรการทดสอบระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีการต่อลงดินข้างเดียว.....	16
3.5 ไดอะแกรมวงจรการทดสอบระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีการต่อลงดินแบบกึ่งกลางแบบที่ 1.....	17

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.6 วงจรการทดสอบระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีการต่อลงดินแบบกึ่งกลางแบบที่ 1.....	17
3.7 ไดอะแกรมวงจรการทดสอบระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีการต่อลงดินแบบกึ่งกลางแบบที่ 2.....	18
3.8 วงจรการทดสอบระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีการต่อลงดินแบบกึ่งกลางแบบที่ 2.....	18
3.9 ไดอะแกรมวงจรการทดสอบระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีการต่อลงดินทั้งสองปลาย.....	19
3.10 วงจรการทดสอบระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีการต่อลงดินทั้งสองปลาย.....	19
3.11 ไดอะแกรมวงจรการทดสอบระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีการต่อลงดินแบบไขว้.....	20
3.12 วงจรการทดสอบระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีการต่อลงดินแบบไขว้.....	20
3.13 ไดอะแกรมวงจรการทดสอบแบบออนไลน์สำหรับระบบสายเคเบิลใต้ดิน 115kV....	21
3.14 วงจรการทดสอบแบบออนไลน์สำหรับระบบสายเคเบิลใต้ดิน 115kV.....	22
3.15 ไดอะแกรมวงจรการทดสอบแบบออฟไลน์สำหรับระบบสายเคเบิลใต้ดิน 115kV...	22
3.16 วงจรการทดสอบแบบออฟไลน์สำหรับระบบสายเคเบิลใต้ดิน 115kV.....	23
4.1 ไดอะแกรมการตรวจวัดขนาดพัลส์จากเครื่อง PD generator.....	24
4.2 ขนาดพัลส์ที่จ่ายออกจากเครื่อง PD pulse generator.....	25
4.3 ผลการทดสอบการต่อลงดินข้างเดียวกรณีจ่าย PD ต้นสาย.....	27
4.4 ผลการทดสอบการต่อลงดินข้างเดียวกรณีจ่าย PD กลางสาย.....	28
4.5 ผลการทดสอบการต่อลงดินข้างเดียวกรณีจ่าย PD ปลายสาย.....	30
4.6 การเคลื่อนที่ของพัลส์กรณีจ่ายที่ต้นสายสำหรับวงจรต่อลงดินข้างเดียว.....	30
4.7 การเคลื่อนที่ของพัลส์กรณีจ่ายที่กลางและปลายสายสำหรับวงจรต่อลงดินข้างเดียว.	31
4.8 ผลการทดสอบการต่อลงดินแบบกึ่งกลางรูปแบบที่ 1 กรณีจ่าย PD ต้นสาย.....	33
4.9 ผลการทดสอบการต่อลงดินแบบกึ่งกลางรูปแบบที่ 1 กรณีจ่าย PD กลางสาย.....	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ IX อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.10 ผลการทดสอบการต่อลงดินแบบกึ่งกลางรูปแบบที่ 1 กรณีจ่าย PD ปลายสาย.....	36
4.11 การเคลื่อนที่ของพัลส์กรณีจ่ายที่กลางสายสำหรับวงจรต่อลงดินแบบกึ่งกลางรูปแบบที่ 1.....	37
4.12 การเคลื่อนที่ของพัลส์กรณีจ่ายที่ปลายสายสำหรับวงจรต่อลงดินแบบกึ่งกลางรูปแบบที่ 1.....	38
4.13 ผลการทดสอบการต่อลงดินแบบกึ่งกลางรูปแบบที่ 2 กรณีจ่าย PD ต้นสาย.....	39
4.14 ผลการทดสอบการต่อลงดินแบบกึ่งกลางรูปแบบที่ 2 กรณีจ่าย PD กลางสาย.....	41
4.15 ผลการทดสอบการต่อลงดินแบบกึ่งกลางรูปแบบที่ 2 กรณีจ่าย PD ปลายสาย.....	42
4.16 การเคลื่อนที่ของพัลส์กรณีจ่ายที่ต้นสายสำหรับวงจรต่อลงดินแบบกึ่งกลางรูปแบบที่ 2.....	43
4.17 การเคลื่อนที่ของพัลส์กรณีจ่ายที่กลางสายสำหรับวงจรต่อลงดินแบบกึ่งกลางรูปแบบที่ 2.....	44
4.18 การเคลื่อนที่ของพัลส์กรณีจ่ายที่ปลายสายสำหรับวงจรต่อลงดินแบบกึ่งกลางรูปแบบที่ 2.....	44
4.19 ผลการทดสอบการต่อลงดินทั้งสองปลายกรณีจ่าย PD ต้นสาย.....	46
4.20 ผลการทดสอบการต่อลงดินทั้งสองปลายกรณีจ่าย PD กลางสาย.....	48
4.21 ผลการทดสอบการต่อลงดินทั้งสองปลายกรณีจ่าย PD ปลายสาย.....	49
4.22 ผลการทดสอบการต่อลงดินแบบไขว้กรณีจ่าย PD ที่ตำแหน่ง A1.....	50
4.23 ผลการทดสอบการต่อลงดินแบบไขว้กรณีจ่าย PD ที่ตำแหน่ง B1.....	51
4.24 ผลการทดสอบการต่อลงดินแบบไขว้กรณีจ่าย PD ที่ตำแหน่ง C1.....	51
4.25 ผลการทดสอบการต่อลงดินแบบไขว้กรณีจ่าย PD ที่ตำแหน่ง A2.....	52
4.26 ผลการทดสอบการต่อลงดินแบบไขว้กรณีจ่าย PD ที่ตำแหน่ง B2.....	52
4.27 ผลการทดสอบการต่อลงดินแบบไขว้กรณีจ่าย PD ที่ตำแหน่ง C2.....	53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และขังอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.28 ตัวอย่างพัลส์สะท้อนของการต่อลงดินข้างเดียวกรณีจ่าย PD ต้นสายหรือปลายสาย.....	54
4.29 ตัวอย่างพัลส์สะท้อนของการต่อลงดินข้างเดียวกรณีจ่าย PD กลางสาย.....	55
4.30 การเปรียบเทียบระยะเวลาของพัลส์ที่ตรวจวัดจากเซ็นเซอร์ PD Line ทั้งสองตัว.....	56
4.31 ผลการทดสอบแบบออนไลน์สำหรับระบบสายเคเบิลใต้ดิน 115kV จากเซ็นเซอร์ HFCT.....	57
4.32 การเปรียบเทียบระยะเวลาของพัลส์ PD ลูกแรกกับลูกสะท้อนจากเซ็นเซอร์ HFCT.....	58
4.33 ผลการทดสอบแบบออนไลน์สำหรับระบบสายเคเบิลใต้ดิน 115kV จากเซ็นเซอร์ PD Line.....	59
4.34 การเปรียบเทียบระยะเวลาของพัลส์ PD ลูกแรกกับลูกสะท้อนจากเซ็นเซอร์ PD Line.....	59
4.35 การเปรียบเทียบพัลส์ PD ระหว่างเซ็นเซอร์ PD Line No.1 (ชั้น 5) และ PD Line No.2 (ชั้น 3).....	60
4.36 การเปรียบเทียบพัลส์ PD ระหว่างเซ็นเซอร์ PD Line No.1 (ชั้น 5) และ PD Line No.2 (ชั้น 2).....	60
4.37 ผลการทดสอบแบบออฟไลน์สำหรับระบบสายเคเบิลใต้ดิน 115kV.....	61
4.38 การเปรียบเทียบระยะเวลาของพัลส์ PD ลูกแรกกับลูกสะท้อนจากเซ็นเซอร์ PD Line สำหรับการทดสอบแบบออฟไลน์.....	62
4.39 การเปรียบเทียบพัลส์ PD ระหว่างเซ็นเซอร์ PD Line No.1 และ PD Line No.2 สำหรับการทดสอบแบบออฟไลน์.....	63
4.40 ร่องรอยการเกิด PD ที่หัวเทอมิเตอร์ทางฝั่งลานไถ.....	63
4.41 ร่องรอยการเกิด PD ที่หัวเทอมิเตอร์ทางฝั่งเสา Riser.....	64

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ระบบสายเคเบิลใต้ดินในปัจจุบันมีการใช้งานมากขึ้น ซึ่งถือว่าเป็นระบบหนึ่งที่มีความสำคัญต่อการขับเคลื่อนประเทศเป็นอย่างมากไม่ว่าจะในส่วนของภาคอุตสาหกรรมหรือในภาคครัวเรือน หากระบบเกิดความขัดข้องหรือล้มเหลวแน่นอนว่าจะต้องเกิดผลกระทบที่เป็นปัญหาตามมาและส่งผลกระทบต่อความน่าเชื่อถือ โดยปัจจัยหนึ่งที่เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อระบบสายเคเบิลใต้ดินนั้นก็คือ ระบบฉนวน หากฉนวนทั้งของสายเคเบิลและอุปกรณ์ของสายเคเบิลมีการเสื่อมสภาพตามอายุการใช้งานหรือเกิดความผิดปกติจากสาเหตุของผลกระทบจากสิ่งแวดล้อม ความผิดพลาดจากการผลิตหรือสิ่งที่เกิดจากความผิดพลาดของผู้ปฏิบัติงานในการติดตั้งหรือการบำรุงรักษา ฉนวนจะถูกลดความสามารถในการต้านทานไฟฟ้าลง หากปล่อยให้การเสื่อมสภาพและความผิดปกตินี้ดำเนินต่อไปในภายภาคหน้าอาจจะนำไปสู่การเกิดเบรกดาวน์และทำให้เกิดความเสียหายร้ายแรงต่อระบบสายเคเบิลใต้ดินได้ ดังนั้น เพื่อเป็นการป้องกันไม่ให้เกิดเหตุการณ์ดังกล่าวขึ้น การตรวจสอบ วิเคราะห์และประเมินสภาพของฉนวนในระบบจึงมีความสำคัญและจำเป็นอย่างมาก เพื่อใช้เป็นแนวทางในการวางแผนการซ่อมบำรุงรักษาให้ระบบสายเคเบิลใต้ดินมีสภาพที่พร้อมให้ใช้บริการอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด อีกทั้งยังช่วยเพิ่มความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น

การประเมินการเสื่อมสภาพของระบบฉนวนสามารถช่วยในเรื่องการคาดการณ์เหตุการณ์ในอนาคตที่อาจจะเกิดขึ้นได้ ซึ่งเป็นผลดีและเป็นประโยชน์ต่อการวางแผนการบำรุงรักษาระบบสายเคเบิลใต้ดินและช่วยลดค่าใช้จ่ายที่ไม่จำเป็นออกไปได้ ซึ่งในปัจจุบันวิธีการตรวจสอบและวิเคราะห์ฉนวนสามารถทำได้หลายวิธี อาทิเช่น การวัดค่าความต้านทาน การทดสอบความทนทานต่อแรงดันไฟฟ้า การทดสอบ $\tan \delta$ เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีวิธีหนึ่งที่ได้รับการยอมรับและมีการศึกษาค้นคว้าทำวิจัยอย่างแพร่หลายในต่างประเทศนั้นก็คือ การตรวจวัด Partial Discharge (PD) เป็นวิธีที่สามารถดำเนินการได้ในขณะที่ระบบยังเปิดให้ใช้บริการตามปกติได้ ซึ่งผลการตรวจวัดที่ได้รับก็จะสามารถประเมินระบบฉนวนในสภาพการทำงานปกติที่มีปัจจัยในด้านของโหลดต่าง ๆ สภาพแวดล้อม อุณหภูมิตามจริงแต่ก็ยังมีข้อจำกัดในเรื่องของสัญญาณรบกวน นอกจากนี้วิธีการตรวจวัด PD ยังสามารถดำเนินการแบบออฟไลน์หรือการทดสอบระบบในขณะที่หยุดใช้งาน วิธีนี้จะทำให้สามารถเก็บข้อมูลเพิ่มเติมจากกรณีทดสอบแบบออนไลน์ได้ เช่น สามารถปรับระดับแรงดันเพื่อหาแรงดันเริ่มเกิดของ PD หรือ PD Inception (PDIV) และแรงดันสุดท้ายในการเกิด PD หรือ PD Extinction (PDEV) ทั้งนี้การวิเคราะห์สัญญาณ PD ในระบบสายเคเบิลใต้ดินในภาคสนามนั้นมีความซับซ้อนเป็นอย่างมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากปัจจัยของแต่ละระบบมีความแตกต่างกัน อาทิเช่น ระบบการต่อลงดินที่แตกต่างกัน บางระบบมีจุดเชื่อมต่อสายแต่บางระบบไม่มี เป็นต้น ด้วยเหตุผลข้างต้นจึงได้ทำการศึกษาเทคนิคในการตรวจวัดและวิธีการวิเคราะห์ผลการทดสอบที่แตกต่างกันรวมถึงการระบุตำแหน่งจุดเกิด PD จากการจำลองการต่อลงดินของระบบเคเบิลใต้ดินที่แตกต่างกันในห้องปฏิบัติการ เพื่อนำไปเป็นตัวอย่างและแนวทางในการวิเคราะห์สัญญาณ PD ที่ตรวจวัดได้จากระบบสายเคเบิลใต้ดินที่หน้างานจริง

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาทฤษฎีการเกิด PD คุณลักษณะเฉพาะและการเคลื่อนของสัญญาณ PD ที่เกิดขึ้นในระบบฉนวนของระบบเคเบิลใต้ดิน
2. เพื่อศึกษาเทคนิคการตรวจวัดสัญญาณ PD ในระบบเคเบิลใต้ดิน
3. เพื่อศึกษาการวิเคราะห์สัญญาณ PD ที่ตรวจวัดได้จากระบบฉนวนของระบบเคเบิลใต้ดินเพื่อนำมาใช้เป็นแนวทางการประเมินสภาพฉนวนและระบุตำแหน่งจุดกำเนิด PD

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

1. ผลจากการตรวจวัดสัญญาณ PD จากการจำลองระบบเคเบิลใต้ดินและทดสอบภายในห้องปฏิบัติการสามารถนำเทคนิคการตรวจวัดไปประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดสัญญาณ PD ในภาคสนามได้
2. ผลจากการวิเคราะห์สัญญาณ PD จากการจำลองระบบเคเบิลใต้ดินและทดสอบภายในห้องปฏิบัติการสามารถนำไปเปรียบเทียบและวิเคราะห์สัญญาณ PD ของจริงที่ตรวจวัดในภาคสนามได้ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความถูกต้องแม่นยำในการวิเคราะห์ผล
3. ผลจากการวิเคราะห์สัญญาณ PD จากการทดสอบในภาคสนาม สามารถประเมินคุณภาพของฉนวนในระบบเคเบิลใต้ดินได้ เพื่อนำไปสู่การวางแผนการบำรุงรักษาต่อไป

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

การทำงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับทฤษฎีการเกิด PD ภายในระบบฉนวนของระบบสายไฟใต้ดิน พร้อมทั้งศึกษาเทคนิคการตรวจวัดสัญญาณ PD ในระบบเคเบิลใต้ดินและการวิเคราะห์ลักษณะการเกิด และการระบุตำแหน่งจุดกำเนิดของ PD ภายในระบบสายไฟใต้ดินที่เกิดปัญหา โดยงานวิจัยนี้ได้แบ่งการวิเคราะห์ข้อมูลการตรวจวัดออกเป็น 2 ส่วน คือ 1. การวิเคราะห์ผลการทดสอบสัญญาณ PD ในห้องปฏิบัติการ 2. การวิเคราะห์ผลการตรวจวัดสัญญาณ PD ในระบบเคเบิลใต้ดินที่หน้างานจริง สำหรับการทดสอบในห้องปฏิบัติการจะจำลองสายเคเบิลใต้ดินด้วยสายโคแอกเชียล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Coaxial Cable) จำลองสัญญาณ PD ด้วยเครื่อง PD Calibrator และใช้เซ็นเซอร์สำหรับจับสัญญาณทางไฟฟ้าและทางคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า รูปแบบการจำลองระบบเคเบิลใต้ดินจะแบ่งออกเป็น 4 กรณีตามลักษณะการต่อลงดิน คือ 1. การต่อลงดินข้างเดียว (Single-point Bonding) 2. การต่อลงดินแบบกึ่งกลาง (Middle-point Bonding) 3. การต่อลงดินทั้งสองปลาย (Both-Ends Bonding) 4. การต่อลงดินแบบไขว้ (Cross-Bonding) เพื่อศึกษาเทคนิคในการตรวจวัดและวิธีการวิเคราะห์ผลการทดสอบที่ต่างกันรวมถึงการระบุตำแหน่งจุดเกิด PD

สำหรับผลการตรวจวัดสัญญาณ PD ในระบบเคเบิลใต้ดินที่หน่วยงานจริงได้รับความอนุเคราะห์จากทางบริษัท พีดีโซลูชัน จำกัด ที่อนุญาตให้เก็บข้อมูลผลการตรวจวัดทั้งหมด 2 กรณีเพื่อนำมาใช้ทำงานวิจัยนี้ ซึ่งกรณีแรกเป็นการศึกษาในระบบเคเบิลใต้ดิน 115 kV ที่มีการใช้บริการตามปกติ แต่พบว่าสัญญาณ PD เกิดขึ้น จึงมีการตรวจวัดสัญญาณ PD แบบออนไลน์ สำหรับกรณีที่ 2 เป็นการศึกษาระบบเคเบิลใต้ดิน 115 kV มีลักษณะการต่อลงดินข้างเดียว ซึ่งได้เกิดการระเบิดที่หัวเทอร์มินเนเตอร์ 1 หัว หลังจากนั้นจึงมีการตรวจวัดสัญญาณ PD แบบออฟไลน์ โดยทั้ง 2 กรณีจะใช้เซ็นเซอร์ตรวจจับสัญญาณ PD ทางไฟฟ้าและเซ็นเซอร์ตรวจจับทางคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า แล้วทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการตรวจวัดกับข้อมูลที่ได้ศึกษาและทดสอบในห้องปฏิบัติการ เพื่อนำไปสู่การระบุตำแหน่งจุดเกิด PD และการประเมินคุณภาพระบบนวนของระบบเคเบิลใต้ดิน 115 kV นี้

1.5 แผนการปฏิบัติงาน

การดำเนินงาน	พ.ศ.2565								
	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
1. ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยในต่างประเทศเกี่ยวกับลักษณะของสัญญาณ PD เกิดขึ้นในระบบสายเคเบิลใต้ดิน									
2. ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยในต่างประเทศเกี่ยวกับการตรวจวัดและการวิเคราะห์สัญญาณ PD									
3. จำลองการทดสอบระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีการต่อลงดินแตกต่างกันในห้องปฏิบัติการ									

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การดำเนินงาน	พ.ศ.2565								
	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
4. วิเคราะห์ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ									
5. วิเคราะห์ข้อมูลผลการทดสอบออนไลน์ PD และออฟไลน์ PD ในภาคสนาม									
6. เปรียบเทียบผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการและในภาคสนาม									
7. สรุปผลและประเมินผล									
8. จัดทำเอกสารปริญญานิพนธ์และเตรียมตัวนำเสนอ									

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้รับความรู้และความเข้าใจการแพร่กระจายของพัลส์ PD ในระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีรูปแบบการต่อลงกราวด์ที่แตกต่างกัน
2. สามารถวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของรูปแบบสัญญาณและรูปร่างของพัลส์ PD เกิดขึ้นในสายเคเบิลใต้ดิน
3. ได้เทคนิคการใช้เลือกเซ็นเซอร์ตรวจวัดสัญญาณ PD และการติดตั้งเซ็นเซอร์ในตำแหน่งที่เหมาะสม
4. สามารถระบุตำแหน่งจุดเกิด PD ได้จากการวิเคราะห์พัลส์สะท้อนที่เกิดขึ้นหรือจากการเปรียบเทียบเวลาของพัลส์จากเซ็นเซอร์แต่ละตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

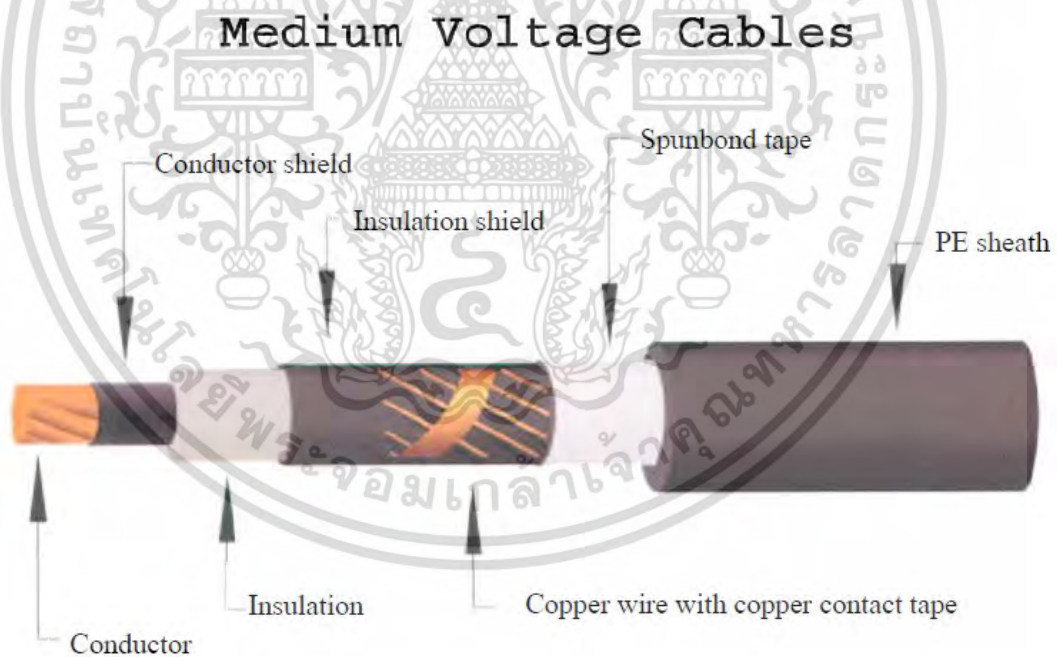
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 สายเคเบิลใต้ดิน [1]

สายเคเบิลใต้ดินในปัจจุบันส่วนใหญ่นิยมใช้สายเคเบิลชนิดฉนวน Cross-linked polyethylene (XLPE) เพราะมีคุณสมบัติสามารถทนอุณหภูมิได้สูงถึง 90 องศาเซลเซียส มีความแข็งแรงทนทานต่อแรงทางกลและมีความต้านทานไฟฟ้าสูง นอกจากนี้ยังสามารถป้องกันการซึมเข้าของน้ำได้ดี

2.1.1 โครงสร้างของสายเคเบิลใต้ดิน

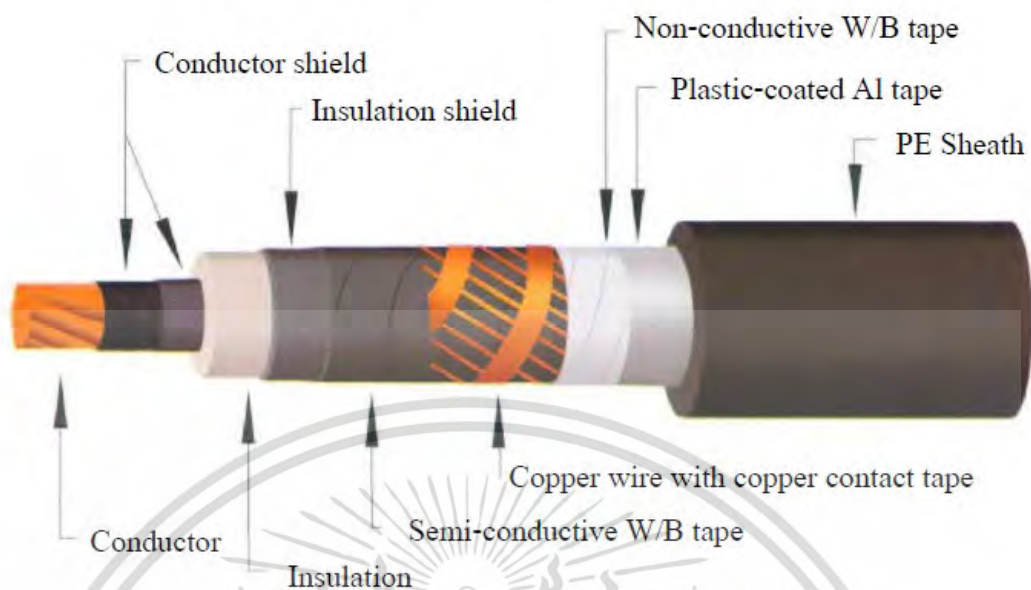
โครงสร้างของสายเคเบิลใต้ดินระดับแรงดันปานกลาง (Medium Voltage) 22-33 kV และระดับแรงดันสูง (High Voltage) 115 kV แสดงดังรูปที่ 2.1 และ 2.2 รายละเอียดส่วนประกอบต่าง ๆ ของสายเคเบิลใต้ดินแสดงดังตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างสายเคเบิลใต้ดินแรงดันปานกลาง 22-33 kV [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

High Voltage Cables



รูปที่ 2.2 โครงสร้างสายเคเบิลใต้ดินแรงดันสูง 115 kV [1]

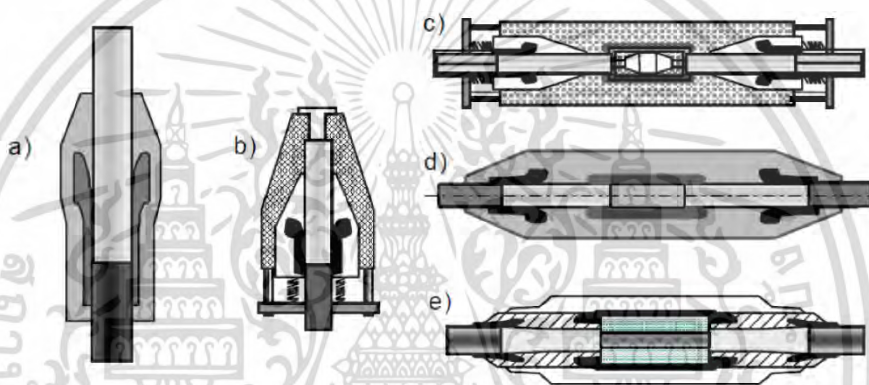
ตารางที่ 2.1 โครงสร้างสายเคเบิลใต้ดิน

ส่วนประกอบ	หน้าที่
1. Conductor	ตัวนำกระแสไฟฟ้า
2. Conductor Screen	ทำให้ผิวของตัวนำกับฉนวนเรียบ ไม่เกิดช่องว่างที่ทำให้มีแรงดันตกคร่อมสูงซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิด PD
3. Insulation	ป้องกันกระแสรั่วไหลหรือลัดวงจร
4. Insulation Screen	ลดแรงดันตกคร่อมบริเวณผิวของฉนวนและ Metallic Screen
5. Metallic Screen	เป็นสายดิน (Ground)
6. Reinforcement หรือ Armour	เสริมเพื่อให้สายเคเบิลมีความทนทานต่อแรงทางกลจากภายนอก
7. Water Blocking Tape	เสริมขึ้นมาในกรณีของสายเคเบิลมีการใช้ในบริเวณที่มีความชื้นและเพื่อป้องกันน้ำไหลเข้า
8. Laminated Sheath	ป้องกันน้ำไหลเข้าไปในสายเคเบิลตามแนวขวาง
9. Non-Metallic Sheath หรือ Jacket	ป้องกันแรงกระแทกเสียดสีต่าง ๆ ขณะติดตั้งสายเคเบิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 อุปกรณ์เสริมของสายเคเบิล (Cable Accessory)

อุปกรณ์เสริมของสายเคเบิลใต้ดินประกอบไปด้วยหัวสายเคเบิล (Cable Termination) และข้อต่อสายเคเบิล (Cable Joint) เนื่องจากในส่วนปลายของสายเคเบิลใต้ดินจะต้องนำไปเชื่อมต่อเข้ากับอุปกรณ์อื่นในระบบ อาทิเช่น สายเคเบิล (สำหรับระบบสายส่งที่มีความยาวมา(ก) สวิตช์เกียร์ หม้อแปลงไฟฟ้า และอื่น ๆ ซึ่งในบริเวณนี้ต้องมีการปกคลุมชั้นฉนวนออกจึงทำให้การกระจายความเครียดของสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเป็นสาเหตุทำให้เกิดความเสียหายแก่ฉนวนและอาจเกิดการลัดวงจรได้ ดังนั้นจึงต้องมีการเข้าหัวสายหรือข้อต่อสายในส่วนปลายของสายเคเบิลใต้ดินแต่ละด้านเพื่อลดความเครียดของสนามไฟฟ้าหรือควบคุมการกระจายให้สม่ำเสมอด้วยอุปกรณ์ควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้า (Stress Relief Control) แสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 อุปกรณ์เสริมสายเคเบิลมีรูปแบบดังต่อไปนี้: (a) one-piece termination; (b) composite termination; (c) composite joint; (d) one-piece joint; (e) three-piece joint [2]

นอกจากนี้ผู้ดำเนินการเข้าหัวสายหรือข้อต่อสายจะต้องมีความชำนาญและความแม่นยำในขั้นตอนการปกคลุมฉนวนแต่ละชั้นให้มีระยะที่เหมาะสมด้วยเช่นกัน หากบริเวณที่มีการปกคลุมหรือขาดฉนวนมีระยะที่ไม่เหมาะสมกับอุปกรณ์เสริมแล้ว ก็จะทำให้เกิดเป็นจุดบกพร่องที่มีความเครียดของสนามไฟฟ้าสูงซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิด PD ได้

2.2 การต่อลงดินเพื่อการทำงานของระบบเคเบิลใต้ดิน [1]

เป็นการต่อลงดินที่สายชีลด์ (shield cable) ของสายเคเบิลใต้ดินเพื่อวัตถุประสงค์ทำให้การกระจายตัวของสนามไฟฟ้าจากสายตัวนำไปยังจุดต่อลงดินมีความสม่ำเสมอ และช่วยป้องกันการเกิดการเบรคดาวน์ที่ฉนวน XLPE จึงทำให้ระบบมีความเสถียรภาพในการทำงานมากขึ้น สำหรับสายเคเบิลใต้ดินจำเป็นต้องมีการต่อลงดินอย่างน้อย 1 จุด ไม่ด้านใดก็ตามด้านหนึ่งของสายเคเบิลใต้ดิน ไม่สามารถปล่อยให้ปลายเปิดของสายชีลด์ทั้ง 2 ด้านได้ การต่อลงดินสำหรับสายเคเบิลใต้ดินจะ

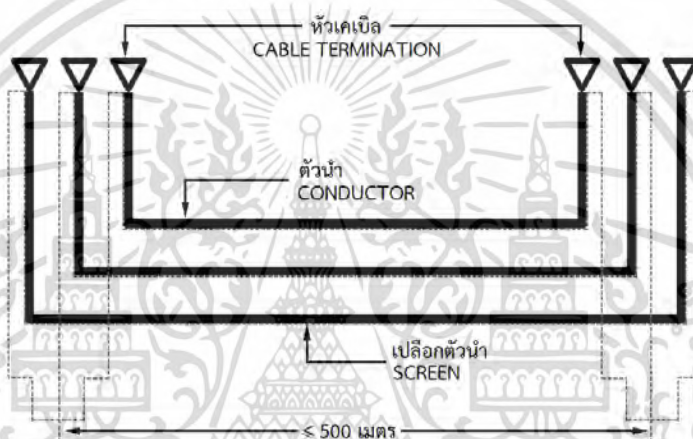
แบ่งออกเป็น 2 ส่วนตามแรงดันระบบดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1 การต่อลงดินสำหรับสายเคเบิลใต้ดินในระบบ 22 -33 kV

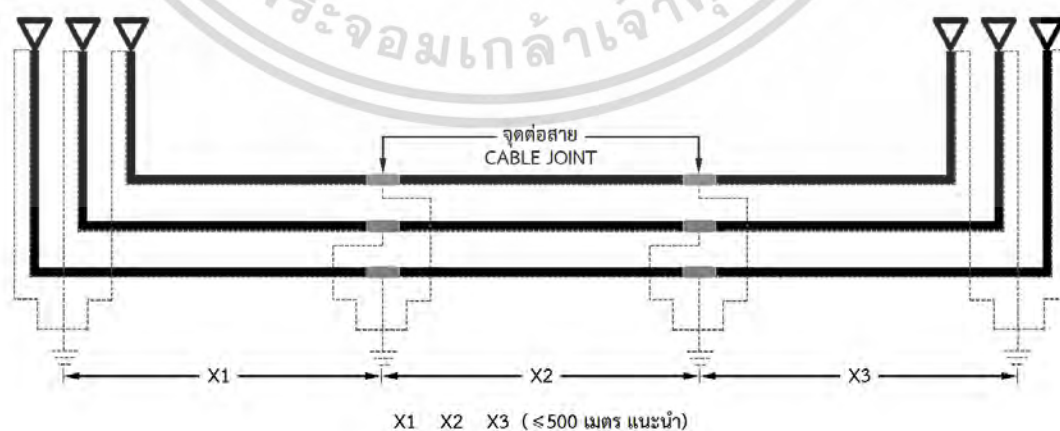
การต่อลงดินของระบบสายเคเบิลใต้ดินระดับ 22-33 kV สามารถแยกรูปแบบตามระยะความยาวสายได้ 2 แบบแสดงดังรูปที่ 2.4 และ 2.5 สำหรับกรณีความยาวสายไม่เกิน 500 เมตร สามารถทำการต่อลงดินแบบข้างเดียวได้ แต่เนื่องจากความสามารถในการนำกระแสจะสูงกว่าการต่อลงดินแบบทั้ง 2 ข้างเล็กน้อย แต่เนื่องจากต้องมองในด้านความปลอดภัยขณะทำงานหรือการบำรุงขาดังนั้นสำหรับกรณีนี้จึงมีการกำหนดให้ต่อลงดินทั้ง 2 ปลาย

2.2.1.1 การต่อลงดินทั้ง 2 ปลาย (Both-Ends Bonding) สำหรับระยะทางไม่เกิน 500 เมตร



รูปที่ 2.4 การต่อลงดินทั้งสองปลาย

2.2.1.1 การต่อลงดินแบบหลายจุด (Multi-points Bonding) สำหรับระยะทางมากกว่า 500 เมตร



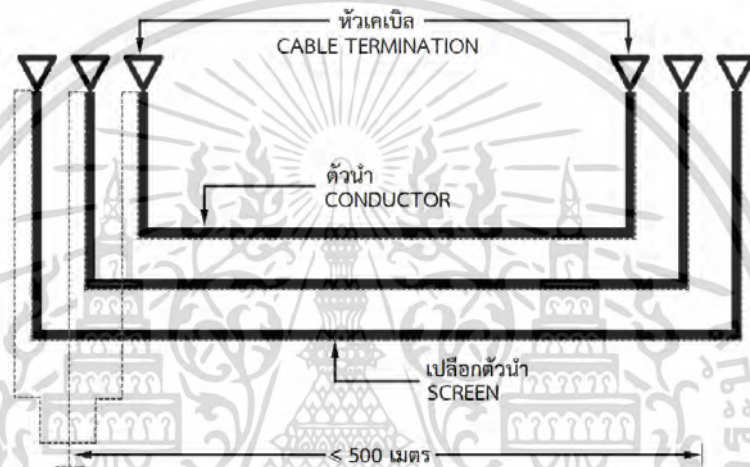
รูปที่ 2.5 การต่อลงดินแบบหลายจุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 การต่อลงดินสำหรับสายเคเบิลใต้ดินในระบบ 115 kV

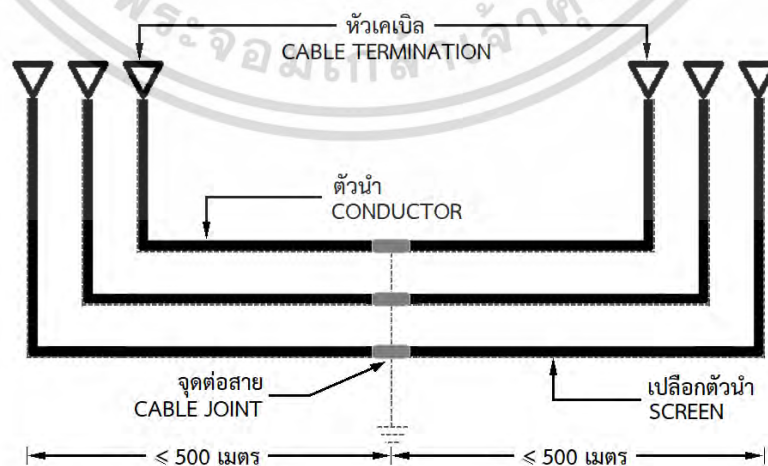
การต่อลงดินของระบบสายเคเบิลใต้ดินระดับ 115 kV สำหรับทุกกรณีไม่ว่าจะมีความยาวสายเป็นเท่าใดก็ตาม ต้องไม่มีการต่อลงดินทั้ง 2 ด้านของปลายสายเคเบิล จะต้องเหลือปลายสายข้างหนึ่งเป็นลักษณะปลายเปิดไว้เสมอ เพื่อป้องกันกระแสไหลวนในสายชีลล์ที่หากมีการสะสมเกิดเป็นความร้อนสูงมากจนเกินไป อาจจะนำไปสู่การระเบิดหรือชำรุดได้ ซึ่งลักษณะการต่อลงดินสามารถแยกรูปแบบตามระยะความยาวสายได้ดังนี้

2.2.2.1 การต่อลงดินข้างเดียว (Single-point Bonding) สำหรับระยะไม่เกิน 500 เมตร



รูปที่ 2.6 การต่อลงดินข้างเดียว

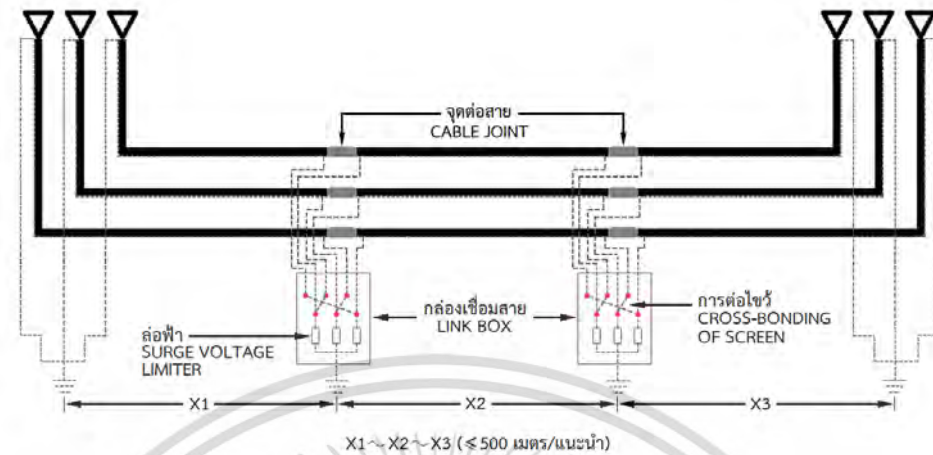
2.2.2.2 การต่อลงดินแบบกึ่งกลาง (Middle-point Bonding) สำหรับระยะทาง 500 – 1,000 เมตร



รูปที่ 2.7 การต่อลงดินแบบกึ่งกลาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2.3 การต่อลงดินแบบไขว้ (Cross-Bonding) สำหรับระยะทางมากกว่า 1,000 เมตร



รูปที่ 2.8 การต่อลงดินแบบไขว้

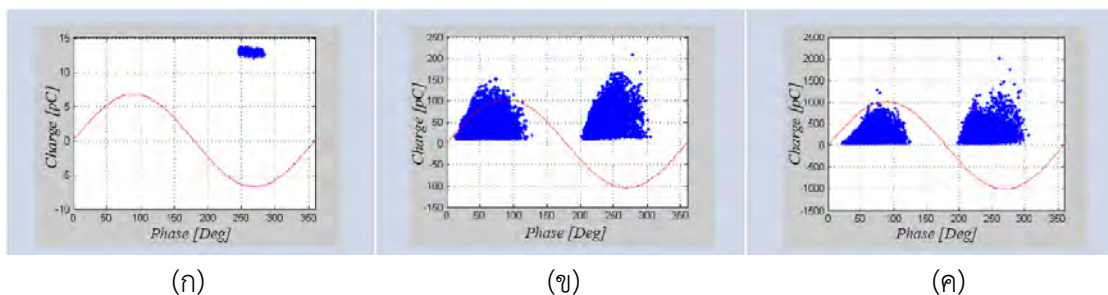
2.3 การเกิด PD ในสายเคเบิลใต้ดินและอุปกรณ์เสริมของสายเคเบิลใต้ดิน

สายเคเบิลชนิดฉนวน XLPE นิยมถูกนำมาใช้ในงานระบบสายส่งไฟฟ้าใต้ดินเป็นอย่างมาก เนื่องจากมีคุณลักษณะที่เหมาะสม แต่ถึงอย่างนั้นสายชนิดนี้ก็มีจุดอ่อนอย่างหนึ่งที่สามารถส่งผลกระทบต่อระบบสายเคเบิลใต้ดินได้นั้นก็คือ การเกิดดีซาร์จบางส่วนหรือ PD นั้นเอง

การเกิดดีซาร์จบางส่วนหรือ PD คือ การที่ระบบฉนวนเกิดความเสียหายการเป็นฉนวนเพียงบางส่วน เป็นการดีซาร์จที่ไม่ได้มีการเชื่อมโยงถึงกันระหว่างตัวนำไฟฟ้า การเกิด PD จะเกิดขึ้นในระบบฉนวนที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอ ไม่เป็นเนื้อเดียวกันหรือมีสิ่งเจือปน ซึ่งจะทำให้เกิดความเครียดสูงในบริเวณที่มีจุดบกพร่องนั้น ๆ [3,4]

2.3.1 ประเภทของ PD [3]

ประเภทของ PD สามารถแยกตามลักษณะการเกิดออกเป็น 3 ประเภท แสดงดังรูปที่ 2.9 และคำอธิบายลักษณะของ PD แต่ละประเภทแสดงในตารางที่ 2.2



รูปที่ 2.9 ประเภทของ PD: (ก) Corona discharge; (ข) Surface discharge; (ค) Internal discharge

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 ประเภทของ PD

ประเภทของ PD	ลักษณะการเกิด
1. โคโรนาดิจชาร์จ (Corona discharge)	เกิดขึ้นที่ตัวนำปลายแหลม ขอบคม หรือบริเวณจุดต่อของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง
2. ดิจชาร์จตามผิว (Surface discharge)	เกิดขึ้นบนพื้นผิวของฉนวนแข็งในบริเวณที่มีความเครียดของสนามไฟฟ้าสูง
3. ดิจชาร์จภายใน (Internal discharge)	เกิดขึ้นภายในเนื้อวัสดุฉนวนในลักษณะช่องว่าง โพรงอากาศ หรือมีการปนเปื้อน หรืออาจเกิดเป็น Electrical Treeing

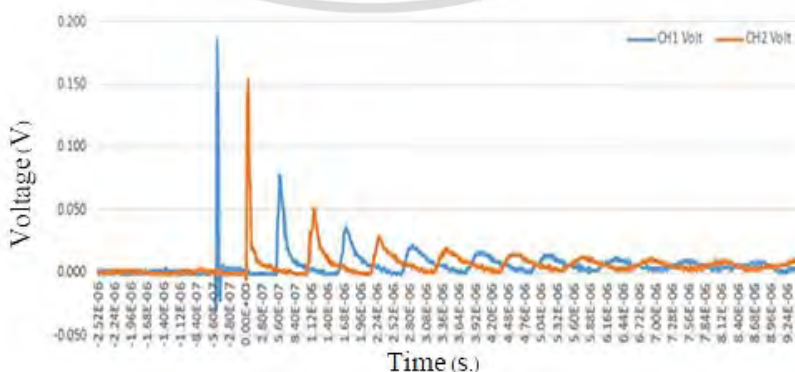
2.3.2 จุดอ่อนของสายเคเบิลใต้ดิน [5]

จุดกำเนิดของ PD ส่วนใหญ่ที่พบในสายเคเบิลใต้ดินทั้งที่เป็นสายเคเบิลใหม่หรือถูกใช้งานมาแล้วจะเกิดขึ้นในบริเวณปลายสายเคเบิลที่มีการติดตั้งเข้าหัวสายเคเบิลหรือบริเวณที่เชื่อมต่อสายเคเบิล กล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นจากความผิดพลาดในการติดตั้งอุปกรณ์เสริมหรือการบำรุงรักษา ในขณะที่ PD ที่เกิดขึ้นภายในเนื้อฉนวนของสายเคเบิลมีโอกาสพบได้น้อยกว่า

2.4 วิธีการระบุตำแหน่งจุดกำเนิดของ PD

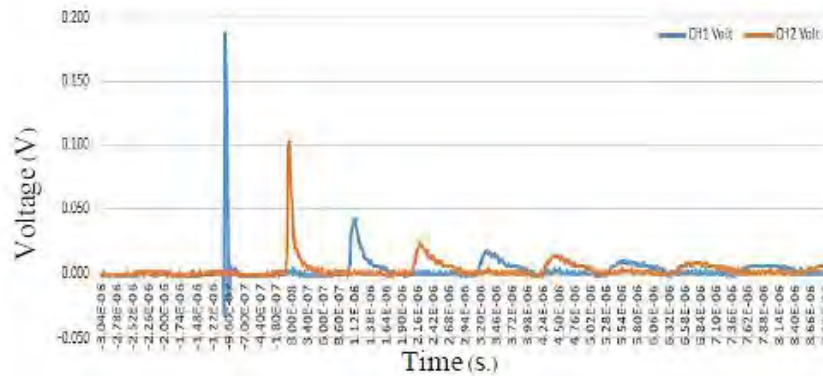
2.4.1 การเคลื่อนที่และการลดทอนของสัญญาณ [6,7,8]

เนื่องจากสัญญาณ PD เป็นสัญญาณประเภทคลื่นสัญญาณ (travelling wave) ซึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงในด้านของขนาดที่ขึ้นกับระยะทางที่คลื่นมีการเคลื่อนที่ไป เนื่องจากสายเคเบิลมีการกรองความถี่สูงที่ส่งผลต่อสัญญาณ PD อย่างมีนัยสำคัญและส่งผลต่อการลดทอนลงอย่างมากเมื่อความยาวสายเคเบิลเพิ่มขึ้นแสดงดังรูปที่ 2.10 ในขณะเดียวกันชั้น semi-conducting ของสายเคเบิลก็มีผลต่อการลดทอน PD เช่นกัน



(ก) ระยะทาง 100 m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) ระยะทาง 200 m

รูปที่ 2.10 ขนาดและระยะเวลาของสัญญาณ PD สำหรับความยาวสายดังนี้; (ก) 100 m; (ข) 200 m

2.3.2 Time Domain Reflection (TDR) [9,10]

การระบุตำแหน่ง PD ด้วยการวิเคราะห์วิธี TDR คือ การหาระยะเวลาที่แตกต่างกันของสัญญาณพัลส์ PD ลูกแรกกับสัญญาณสะท้อนของพัลส์ PD ที่ตรวจวัดได้จากเซ็นเซอร์ตัวเดียวกันไปคำนวณหาระยะของจุดกำเนิด PD ได้ตามสมการที่ 2.1

$$s = \left| L - \frac{v\Delta t}{2} \right| \quad (2.1)$$

เมื่อ s คือ ระยะห่างจากตำแหน่งที่ติดตั้งเซ็นเซอร์ถึงจุดกำเนิด PD

L คือ ความยาวของสายเคเบิลใต้ดิน

v คือ ความเร็วการเคลื่อนที่ของสัญญาณในสายเคเบิล (มีค่า velocity factor แตกต่างกันไปตามประเภทของฉนวน)

Δt คือ ผลต่างระยะเวลาของสัญญาณพัลส์ PD ลูกแรกกับสัญญาณสะท้อนของพัลส์ PD ที่ตรวจวัดได้จากเซ็นเซอร์ตัวเดียวกัน

ข้อจำกัดของการวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้คือ หากระยะสายเคเบิลที่ทำการตรวจวัด PD ยาวมากและสัญญาณ PD ที่เกิดขึ้นนั้นมีขนาดต่ำ เป็นไปได้ว่าสัญญาณสะท้อนจะถูกกลบหนอนขนาดไปตามระยะทางที่เคลื่อนที่กลับมายังจุดติดตั้งเซ็นเซอร์จนหมดไป

2.3.3 Time of Arrival (TOA) [11]

การระบุตำแหน่ง PD ในสายเคเบิลใต้ดินด้วยการวิเคราะห์วิธี TOA คือการเปรียบเทียบความแตกต่างของระยะเวลาที่ตรวจวัดสัญญาณ PD ซึ่งวิธีนี้จำเป็นต้องติดตั้งเซ็นเซอร์ประเภทเดียวกันที่ 2 ตำแหน่งคือที่ปลายทั้งสองด้านของสายเคเบิลหรือต้องเป็นระยะที่ครอบคลุมจุดเกิด PD สำหรับการหาตำแหน่ง PD สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.2 สำหรับการติดตั้งเซ็นเซอร์ครบถ้วนระยะห่างที่เหมาะสม โดยเซ็นเซอร์ทั้งสองตัวจะต้องตรวจพบสัญญาณ PD เดียวกัน

$$s = \left| \frac{L-v\Delta t}{2} \right| \quad (2.2)$$

เมื่อ s คือ ระยะห่างจากตำแหน่งเซ็นเซอร์ตัวแรกถึงจุดกำเนิด PD

L คือ ระยะห่างระหว่างเซ็นเซอร์ตัวที่ 1 และเซ็นเซอร์ตัวที่ 2

v คือ ความเร็วการเคลื่อนที่ของสัญญาณในสายเคเบิล (มีค่า velocity factor แตกต่างกันไปตามประเภทของฉนวน)

Δt คือ ผลต่างระยะเวลาของสัญญาณพัลส์ PD จากเซ็นเซอร์ตัวที่ 1 กับสัญญาณพัลส์ PD จากเซ็นเซอร์ตัวที่ 2

ข้อจำกัดของการวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้คือ หากตำแหน่งที่ติดตั้งเซ็นเซอร์ทั้ง 2 ตัวมีระยะห่างกันมาก จำเป็นจะต้องใช้เครื่องมือการวัดเพิ่มขึ้นมาอีก 1 เครื่องและขณะเก็บผลจะต้องเป็นเวลาเดียวกันทั้งสองเครื่อง แต่ถ้าไม่สามารถทำการตรวจวัดในระยะที่ห่างกันมากได้ ให้ติดตั้งเซ็นเซอร์ในบริเวณใกล้เคียงกัน แต่ต้องมีระยะห่างที่เหมาะสมเพื่อความชัดเจนในการเปรียบเทียบเวลาของสัญญาณพัลส์ PD ที่ได้จากเซ็นเซอร์ตัวแรกและเซ็นเซอร์ตัวที่สอง

สำหรับการวิเคราะห์ผลของงานวิจัยนี้จะไม่สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 2.2 แต่จะพิจารณาจากพัลส์ PD ที่วัดได้ว่าพัลส์ที่มาจากเซ็นเซอร์ตัวใดตัวหนึ่งนำหน้าแสดงว่าจุดกำเนิด PD จะอยู่ใกล้เซ็นเซอร์ตัวนั้นมากกว่านั่นเอง

2.3.4 สัญญาณ PD ในระบบการต่อลงดินแบบไขว้

การเคลื่อนที่ของสัญญาณ PD ในระบบการต่อลงดินแบบไขว้หรือภายในกล่องเชื่อมต่อสายกราวด์มีความซับซ้อนเป็นอย่างมากเพราะมีการไขว้กราวด์ทั้ง 3 เฟส จากงานวิจัย [12,13] ได้มีการศึกษาในเรื่องนี้และพบว่า ขั้วสัญญาณ PD ในเฟสที่มีจุดเกิด PD นั้นจะแตกต่างจากเฟสที่ไม่มี PD นอกจากนี้ขนาดและระยะเวลาการมาถึงของสัญญาณ PD ได้ถูกนำมาเป็นเกณฑ์ในการวิเคราะห์และระบุเฟสที่บกพร่อง คือ เฟสที่มีจุดเกิด PD จะตรวจวัดขนาดของสัญญาณ PD ได้สูงกว่าและมีระยะเวลาที่นำหน้าสัญญาณที่วัดได้จากเฟสที่ปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การทดสอบ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ส่วน คือ 1. การทดสอบในห้องปฏิบัติการ 2. การทดสอบในภาคสนาม สำหรับการทดสอบในห้องปฏิบัติการจะจำลองระบบโดยอ้างอิงตามรูปแบบการต่อลงดินสำหรับสายเคเบิลใต้ดินที่กล่าวถึงในหัวข้อที่ 2.2 เพื่อศึกษาการเคลื่อนที่ของสัญญาณ PD ในกรณีที่ระบบมีการต่อลงดินและการติดตั้งเซ็นเซอร์ที่สายเคเบิลใต้ดินที่แตกต่างกัน อีกทั้งเพื่อศึกษาเทคนิคในการตรวจวัดด้วยและวิธีการวิเคราะห์ผลการทดสอบที่แตกต่างกันรวมถึงวิธีการระบุตำแหน่งจุดเกิด PD และสำหรับการทดสอบในภาคสนาม ได้ทำการตรวจวัดสัญญาณ PD ในระบบเคเบิลใต้ดินที่หน้างานจริงทั้งกรณีที่เป็นการทดสอบแบบออนไลน์และแบบออฟไลน์ จากนั้นนำไปวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการตรวจวัดหน้างานจริงกับข้อมูลที่ได้ทำการศึกษาและทดสอบในห้องปฏิบัติการ เพื่อนำไปสู่การระบุตำแหน่งจุดเกิด PD ที่ถูกต้องและการประเมินคุณภาพระบบฉนวนของระบบเคเบิลใต้ดิน

3.1 การทดสอบสัญญาณ PD ในห้องปฏิบัติการ

สำหรับการทดสอบในห้องปฏิบัติการจะมีการทดสอบการตรวจจับสัญญาณของเซ็นเซอร์ที่ต่างชนิดกันและการติดตั้งในรูปแบบที่ต่างกัน และมีการจำลองระบบเคเบิลใต้ดินโดยแบ่งออกเป็น 4 กรณีตามลักษณะการต่อลงดินที่ต่างกันประกอบไปด้วย 1. การต่อลงดินข้างเดียว (Single-point Bonding) 2. การต่อลงดินแบบกึ่งกลาง (Middle-point Bonding) 3. การต่อลงดินทั้งสองปลาย (Both-Ends Bonding) 4. การต่อลงดินแบบไขว้ (Cross-Bonding) รายละเอียดการทดสอบในแต่ละส่วนมีดังนี้

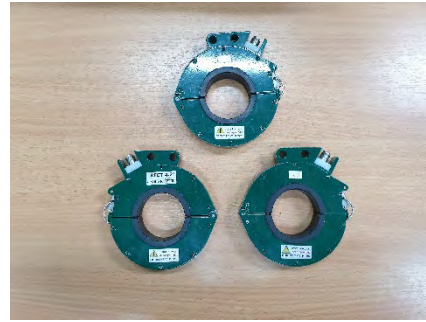
3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบในห้องปฏิบัติการ

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบมีทั้ง 2 ส่วน คือ ส่วนของการตรวจวัดและวิเคราะห์สัญญาณ PD และส่วนของการจำลองระบบสายเคเบิลใต้ดินแสดงดังรูปที่ 3.1 และ 3.2 สำหรับการตรวจจับสัญญาณ PD จะใช้หลักการตรวจจับทางคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic wave) ด้วยเซ็นเซอร์ High Frequency Current Transformer (HFCT) และเซ็นเซอร์ PD Line สำหรับการจำลองระบบสายเคเบิลใต้ดินจะใช้สายโคแอกเชียลชนิด RG58 จำลองเป็นสายเคเบิลใต้ดินมีระยะประมาณ 200 เมตรและใช้เครื่อง PD pulse generator จำลองเป็นแหล่งจ่ายสัญญาณ PD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 3.1 ชุดเครื่องมือวัดและวิเคราะห์สัญญาณ PD มีอุปกรณ์ดังต่อไปนี้: (ก) เครื่องวัดและวิเคราะห์สัญญาณ PD (PD Analyzer); (ข) เซ็นเซอร์ HFCT; (ค) เซ็นเซอร์ PD Line; (ง) เครื่อง PD pulse generator



(ก)



(ข)



(ค)

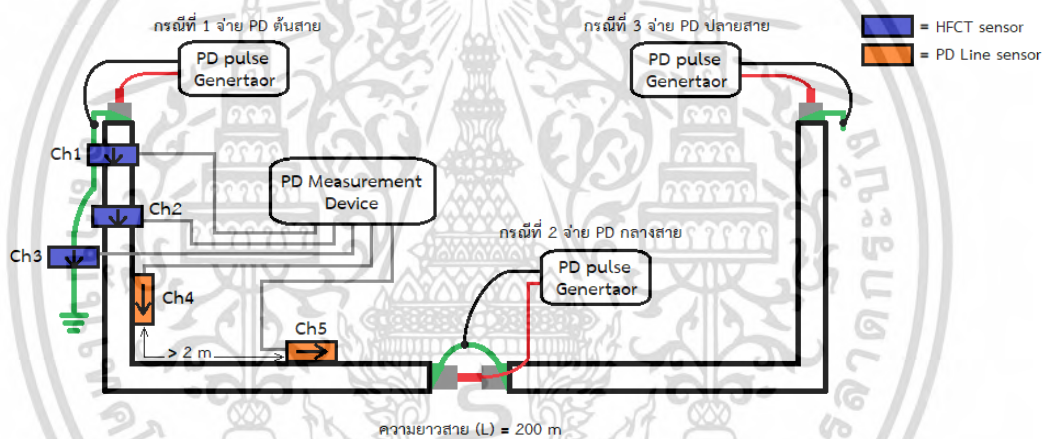
รูปที่ 3.2 ชุดการจำลองระบบสายเคเบิลใต้ดินมีอุปกรณ์ดังต่อไปนี้: (ก) สาย RG58; (ข) สายกราวด์;

(ค) ข้อต่อแบบต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 การทดสอบระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีการต่อลงดินข้างเดียว

การทดสอบนี้จะจำลองวงจรขึ้นมาเพียงเฟสเดียวเท่านั้น สำหรับการตรวจวัดจะทำในฝั่งที่มีการต่อลงดิน โดยรูปแบบการติดตั้งเซ็นเซอร์ชนิด HFCT สามารถคล้องได้ 3 ตำแหน่ง คือ 1. คล้องสายเคเบิลรวมสายกราวด์ในทึคซี่ขึ้น 2. คล้องเฉพาะสายเคเบิลในทึคซี่ขึ้น 3. คล้องเฉพาะสายกราวด์ในทึคซี่ลง ในขณะที่การติดตั้งเซ็นเซอร์ PD Line จะติดตั้งโดยหันทึคซี่เซ็นเซอร์ไปในทางเดียวกันและแปะเข้าที่สายเคเบิลที่ 2 ตำแหน่ง คือ จุดต้นสายด้านบนและเลื่อนออกไปในระยะที่ไม่ต่ำกว่า 2 เมตร เนื่องจากเครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดสอบมีค่า Sampling rate เท่ากับ 100 MS/s และค่าความเร็วในการเคลื่อนที่ของสัญญาณในสาย RG58 อยู่ที่ประมาณ 1.98 m/s ซึ่งการเก็บค่าใน 1 sampling จะต้องมีเวลาที่จับสัญญาณได้ของทั้ง 2 เซ็นเซอร์แตกต่างกัน 10 ns เพื่อให้เครื่องมือวัดสามารถแยกสัญญาณออกได้อย่างชัดเจน สำหรับการทดสอบจะจ่ายสัญญาณ PD ตรงตำแหน่งจุดปลายสายที่ละด้านและตรงจุดกึ่งกลางของสายแสดงดังรูปที่ 3.3 และ 3.4



รูปที่ 3.3 ไดอะแกรมวงจรการทดสอบระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีการต่อลงดินข้างเดียว

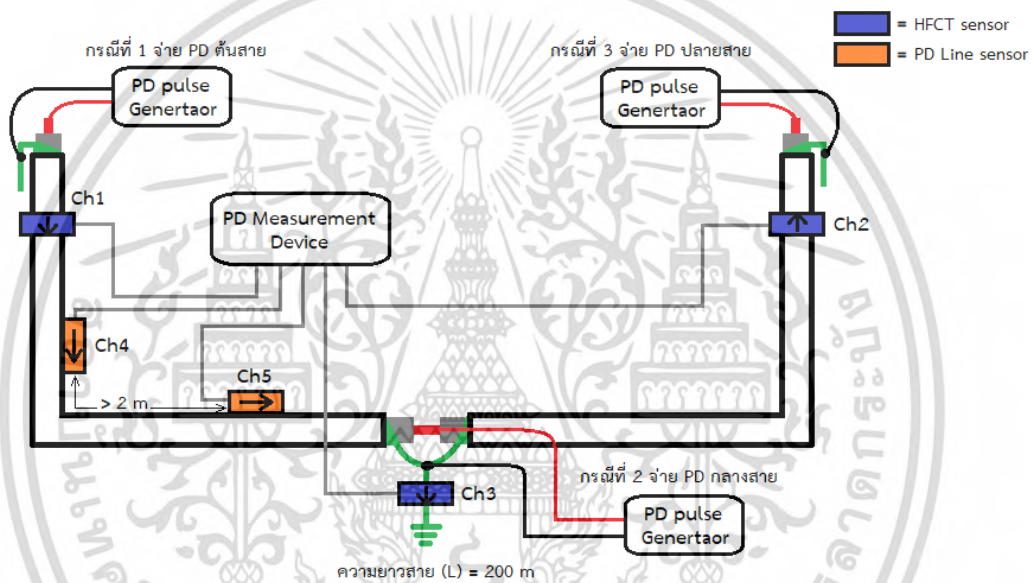


รูปที่ 3.4 วงจรการทดสอบระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีการต่อลงดินข้างเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 การทดสอบระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีการต่อลงดินแบบกึ่งกลาง

การทดสอบนี้จะจำลองวงจรขึ้นมาเพียงเฟสเดียวเท่านั้น สำหรับการตรวจวัดจะแบ่งรูปแบบการติดตั้งเซ็นเซอร์ออกเป็น 2 แบบ คือ 1. ติดตั้งเซ็นเซอร์ที่ปลายสายด้านใดด้านหนึ่ง 2. ติดตั้งเซ็นเซอร์ที่ตรงกลางบริเวณที่มีการต่อลงดิน สำหรับรูปแบบแรกการติดตั้งเซ็นเซอร์ชนิด HFCT จะทำการคล้องที่สายเคเบิลที่ปลายสายทั้ง 2 ด้านโดยหันทิศลูกศรวิ่งไปในทางเดียวกันและคล้องที่สายกราวด์ของสายเคเบิลโดยหันทิศลูกศรลง ในส่วนของเซ็นเซอร์ PD Line จะติดตั้งที่จุดต้นสายด้านบนและเลื่อนออกไปในระยะที่ไม่ต่ำกว่า 2 เมตร สำหรับการทดสอบจะจ่ายสัญญาณ PD ตรงตำแหน่งจุดปลายสายที่ละด้านและตรงจุดกึ่งกลางของสายแสดงดังรูปที่ 3.5 และ 3.6



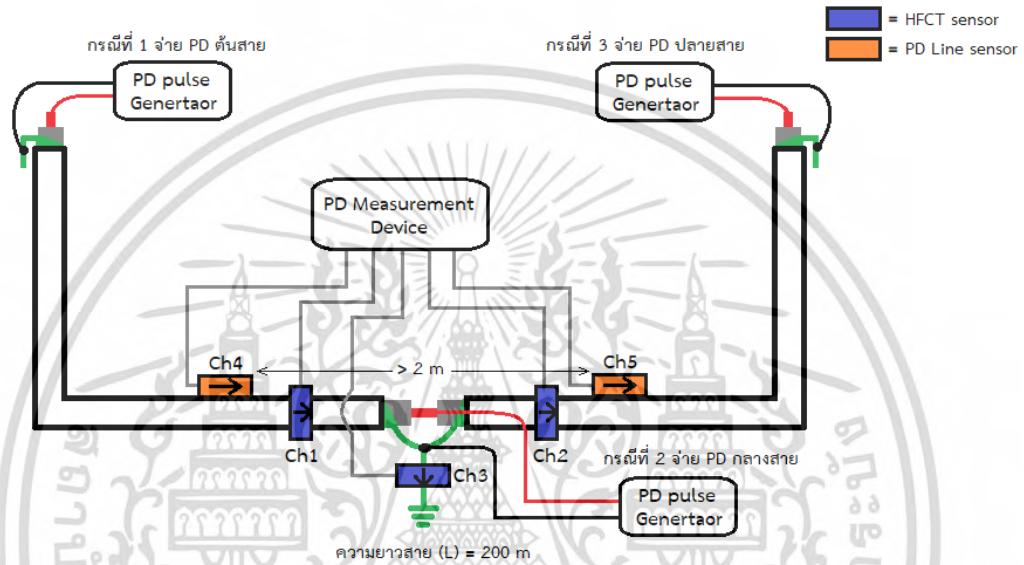
รูปที่ 3.5 ไดอะแกรมวงจรการทดสอบระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีการต่อลงดินแบบกึ่งกลางแบบที่ 1



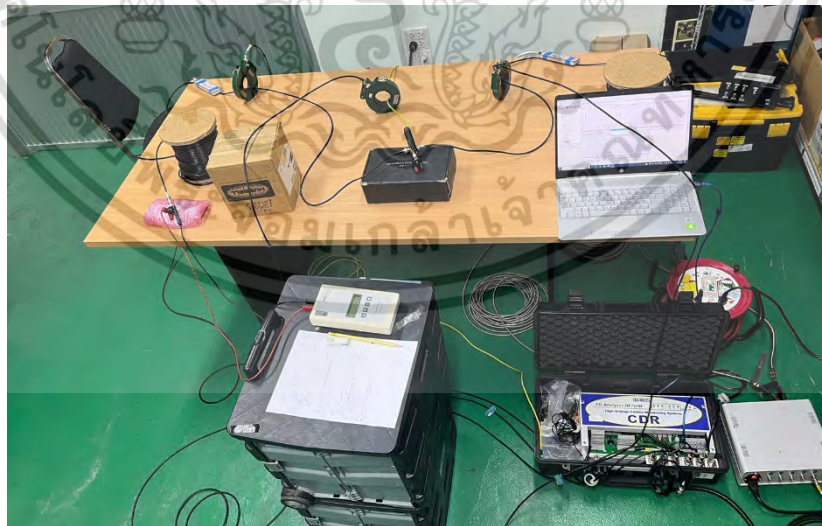
รูปที่ 3.6 วงจรการทดสอบระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีการต่อลงดินแบบกึ่งกลางแบบที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับรูปแบบที่ 2 การติดตั้งเซ็นเซอร์ชนิด HFCT จะทำการคล้องที่สายเคเบิลที่บริเวณตรงกลางที่มีการต่อลงดินโดยคร่อม Cable joint โดยหันทิศลูกศรวิ่งไปในทางเดียวกันและคล้องที่สายกราวด์ของสายเคเบิลโดยหันทิศลูกศรลงและติดตั้งเซ็นเซอร์ PD Line ด้วยการแปะเข้ากับสายเคเบิลโดยคร่อม Cable Joint มีระยะห่างที่ไม่ต่ำกว่า 2 เมตร และหันทิศไปในทางเดียวกัน สำหรับการทดสอบจะจ่ายสัญญาณ PD ตรงตำแหน่งจุดปลายสายที่ละด้านและตรงจุดกึ่งกลางของสายแสดงดังรูปที่ 3.7 และ 3.8



รูปที่ 3.7 ไดอะแกรมวงจรการทดสอบระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีการต่อลงดินแบบกึ่งกลางแบบที่ 2

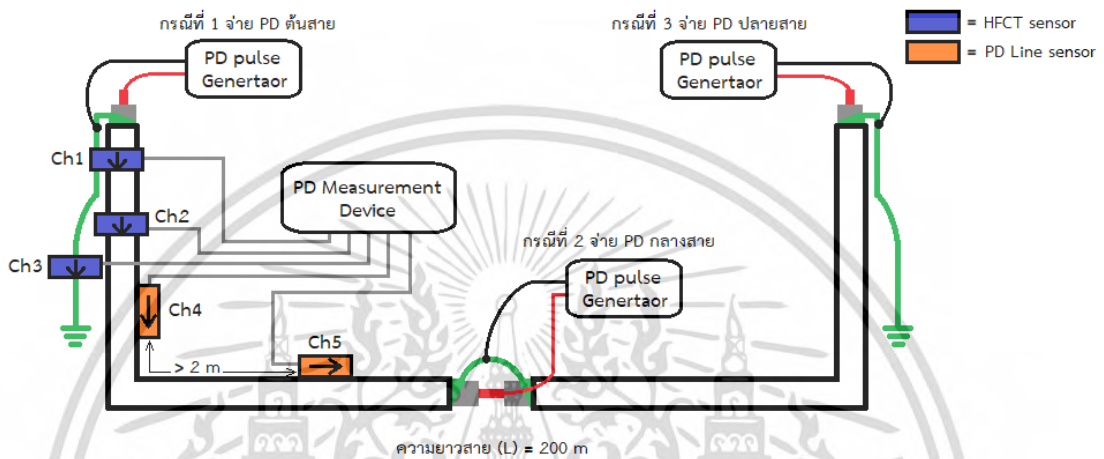


รูปที่ 3.8 วงจรการทดสอบระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีการต่อลงดินแบบกึ่งกลางแบบที่ 2

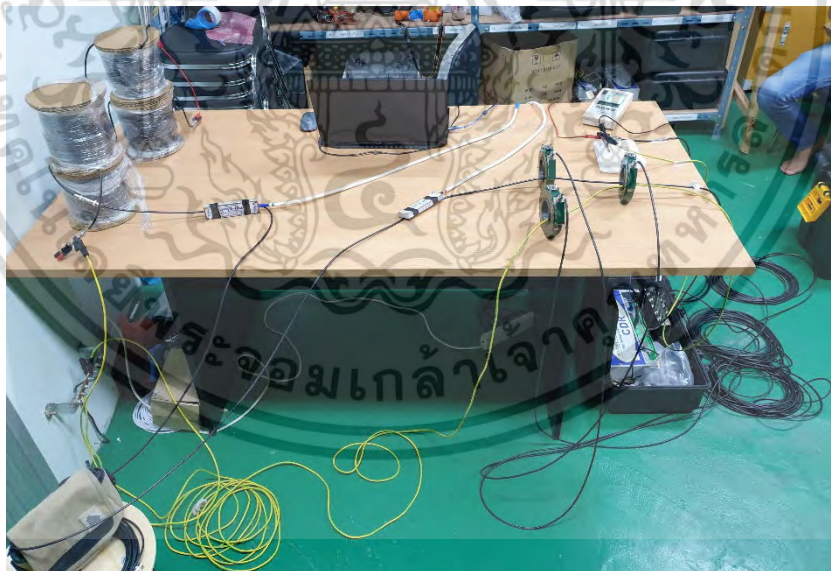
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.4 การทดสอบระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีการต่อลงดินทั้งสองปลาย

การทดสอบนี้จะจำลองวงจรขึ้นมาเพียงเฟสเดียวเท่านั้น สำหรับการตรวจวัดควรจะทำทั้ง 2 ฝั่ง หากในภาคสนามสามารถทำได้ โดยรูปแบบการติดตั้งเซ็นเซอร์ 2 ชนิดจะมีลักษณะแบบเดียวกันกับการจำลองระบบการต่อลงดินข้างเดียวที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 3.1.2 สำหรับการทดสอบจะจ่ายสัญญาณ PD ตรงตำแหน่งจุดปลายสายที่ละด้านและตรงจุดกึ่งกลางของสายแสดงดังรูปที่ 3.9 และ 3.10



รูปที่ 3.9 ไต่อะแกรมวงจรการทดสอบระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีการต่อลงดินทั้งสองปลาย

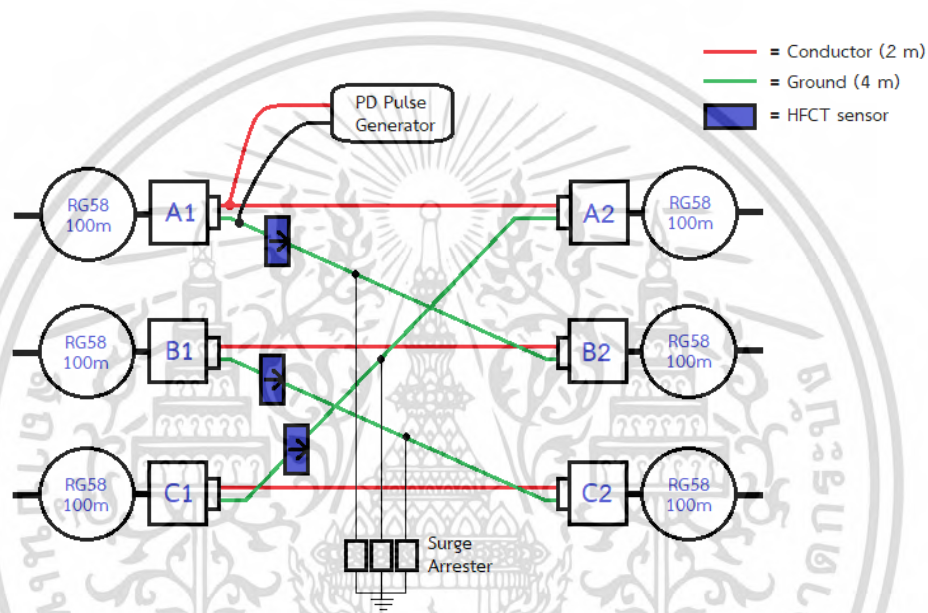


รูปที่ 3.10 วงจรการทดสอบระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีการต่อลงดินทั้งสองปลาย

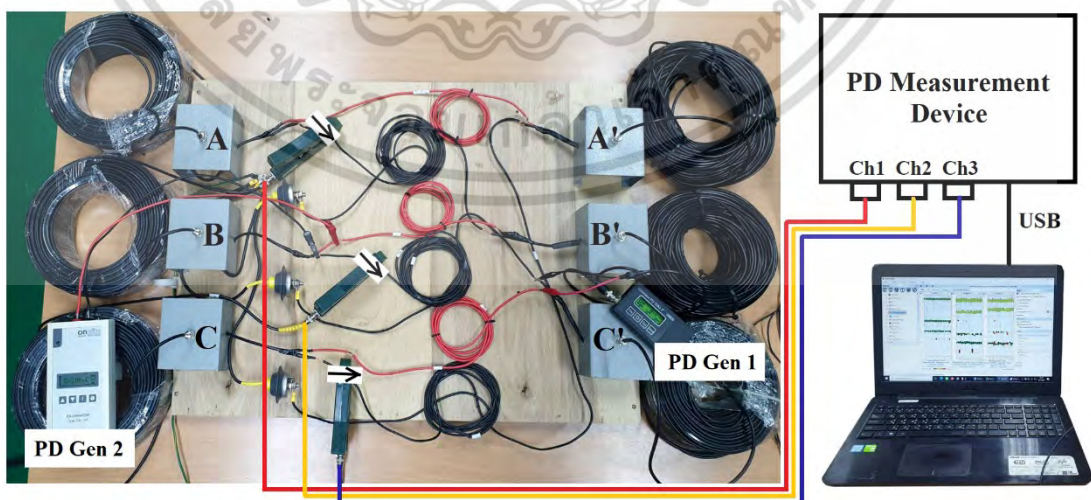
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.5 การทดสอบระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีการต่อลงดินแบบไขว้

การทดสอบนี้จะจำลองวงจรตรงจุดต่อลงดินแบบไขว้ทั้ง 3 เฟส โดยให้จุด A1, A2, B1, B2, C1 และ C2 เป็นจุดต่อของสายกราวด์ก่อนเข้ากล่องเชื่อมสาย สำหรับการติดตั้งเซ็นเซอร์จะใช้เป็นชนิด HFCT 3 ตัวในการตรวจวัดสัญญาณเท่านั้น โดยรูปแบบการติดตั้งสามารถล๊อที่สายกราวด์ทั้ง 3 เฟสในทางด้านใดก็ได้แต่สำหรับการทดสอบนี้จะติดตั้งในทางด้านซ้ายและหันทิศทางของ HFCT เข้าหากกล่องเชื่อมสายทั้งหมด สำหรับการทดสอบจะจ่ายสัญญาณ PD ทั้งหมด 6 ตำแหน่ง แสดงดังรูปที่ 3.11 และ 3.12



รูปที่ 3.11 ไดอะแกรมวงจรการทดสอบระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีการต่อลงดินแบบไขว้



รูปที่ 3.12 วงจรการทดสอบระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีการต่อลงดินแบบไขว้

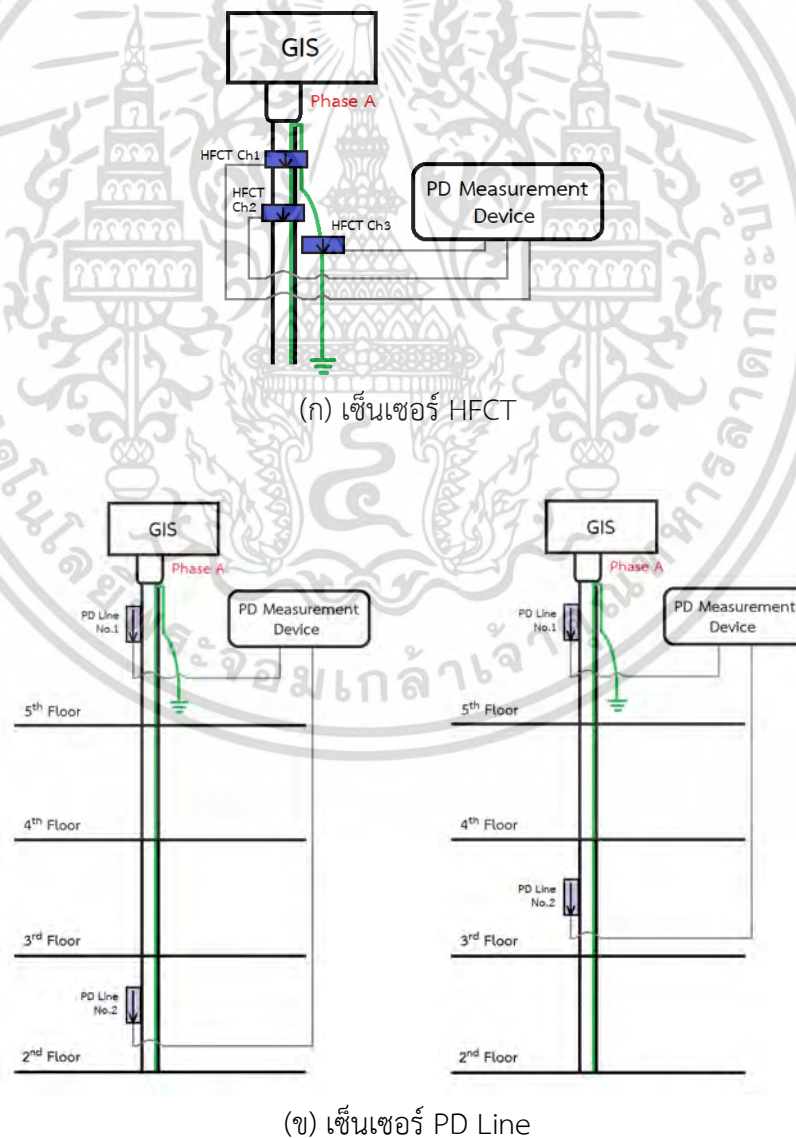
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การทดสอบสัญญาณ PD ในภาคสนาม

สำหรับการทดสอบในภาคสนามจะแบ่งออกเป็น 2 กรณีประกอบไปด้วย 1. การทดสอบแบบออนไลน์ 2. การทดสอบแบบออฟไลน์ รายละเอียดการทดสอบในแต่ละกรณีมีดังนี้

3.2.1 การทดสอบแบบออนไลน์สำหรับระบบสายเคเบิลใต้ดิน 115kV

ระบบสายเคเบิลใต้ดิน 115kV วงจรนี้ยังเปิดให้ใช้บริการปกติแต่มีการตรวจพบสัญญาณ PD เกิดขึ้น จึงได้มีการทดสอบตรวจวัดสัญญาณ PD ที่บริเวณ GIS ของวงจรดังกล่าว โดยวงจรนี้มีความยาวสายประมาณ 630 เมตร สำหรับรูปแบบการติดตั้งเซ็นเซอร์ทั้ง 2 ชนิดจะเป็นรูปแบบเดียวกันกับการทดสอบในห้องปฏิบัติการที่กล่าวไปในหัวข้อที่ 3.1.4 การต่อลงดินทั้งสองปลายแสดงดังรูปที่ 3.13 และ 3.14



รูปที่ 3.13 ไดอะแกรมวงจรการทดสอบแบบออนไลน์สำหรับระบบสายเคเบิลใต้ดิน 115kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่เสียค่าใช้จ่าย
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) เซ็นเซอร์ HFCT (สีดำ)

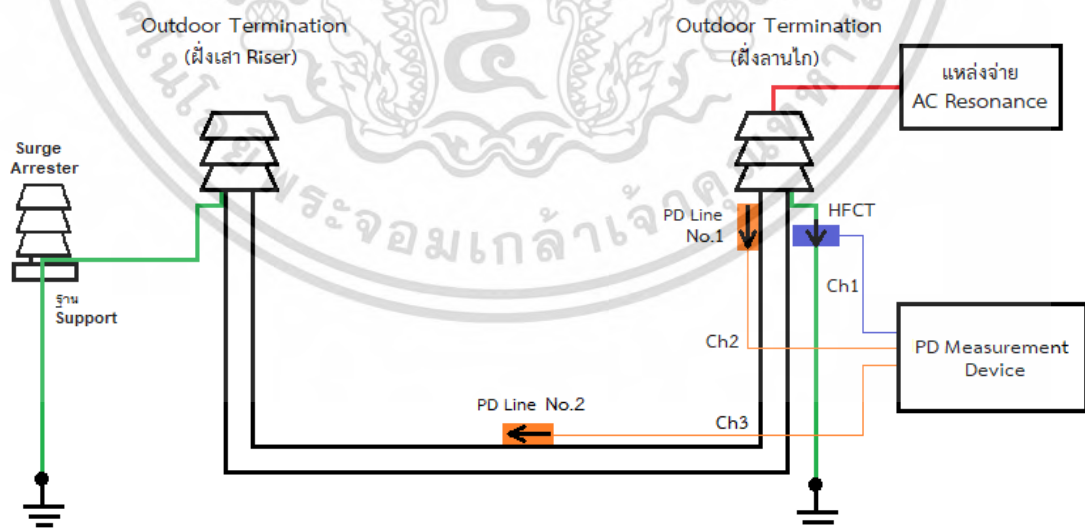


(ข) เซ็นเซอร์ PD Line

รูปที่ 3.14 วงจรการทดสอบแบบออนไลน์สำหรับระบบสายเคเบิลใต้ดิน 115kV

3.2.2 การทดสอบแบบออฟไลน์สำหรับระบบสายเคเบิลใต้ดิน 115kV

สายเคเบิลใต้ดิน 115kV 1 เส้น มีลักษณะการต่อลงดินทั้ง 2 ด้านและมีความยาวสายประมาณ 170 เมตร ซึ่งในระบบเคยเกิดการระเบิดที่หัวเทอร์มินเนชัน 1 หัว การทดสอบสายเคเบิลใต้ดินเส้นนี้จะใช้เซ็นเซอร์ชนิด HFCT และเซ็นเซอร์ PD Line รูปแบบการติดตั้งทั้ง 2 เซ็นเซอร์จะสอดคล้องกับการทดสอบในห้องปฏิบัติการที่กล่าวไปในหัวข้อที่ 3.1.5 การต่อลงดินทั้งสองปลาย สำหรับแหล่งจ่ายไฟฟ้าของการทดสอบนี้จะใช้เป็นแบบ AC Resonance แสดงดังรูปที่ 3.15 และ 3.16



รูปที่ 3.15 ไดอะแกรมวงจรการทดสอบแบบออฟไลน์สำหรับระบบสายเคเบิลใต้ดิน 115kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) เซ็นเซอร์ HFCT



(ข) เซ็นเซอร์ PD Line No.1



(ค) เซ็นเซอร์ PD Line No.2

รูปที่ 3.16 วงจรการทดสอบแบบออฟไลน์สำหรับระบบสายเคเบิลใต้ดิน 115kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดสอบ

ผลการทดสอบทั้งในห้องปฏิบัติการและในภาคสนามจะนำเสนอการเปรียบเทียบลักษณะเฉพาะของสัญญาณ PD ที่ตรวจวัดได้จากเซ็นเซอร์ทุกตัวทั้งในด้านขนาด รูปแบบ PRPD ลักษณะพัลส์และชั่วของสัญญาณ อีกทั้งแสดงการคำนวณเพื่อระบุตำแหน่งจุดกำเนิด PD

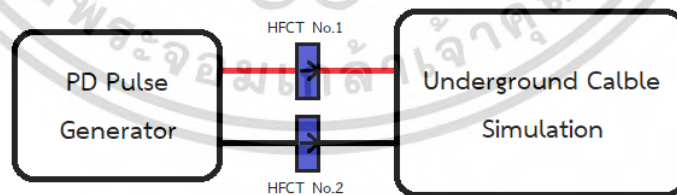
4.1 ผลการทดสอบสัญญาณ PD ในห้องปฏิบัติการ

4.1.1 ผลการทดสอบระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีการต่อลงดินข้างเดียว

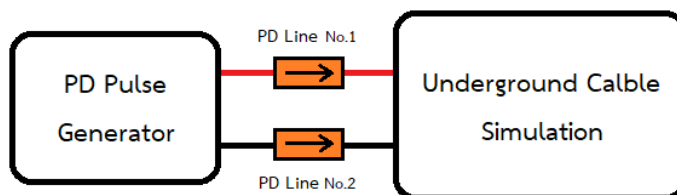
การทดสอบนี้ได้จำลองการจ่ายสัญญาณ PD ทั้งหมด 3 ตำแหน่ง คือที่ต้นสาย กลางสายและปลายสาย จากการวัดขนาดของพัลส์ที่จ่ายออกมาจากเครื่อง PD generator ก่อนจะผ่านเข้าไปในระบบจำลองสายเคเบิลใต้ดินแสดงดังรูปที่ 4.1 เมื่อสังเกตผลการตรวจวัดพัลส์บวกและพัลส์ลบในรูปที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าพัลส์ลบมีขนาดที่สูงกว่าพัลส์บวกเล็กน้อยแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการตรวจวัดขนาดของพัลส์ที่ถูกจ่ายด้วยเครื่อง PD pulse generator

ตำแหน่งที่จ่าย PD	เซ็นเซอร์	ขนาดสัญญาณ (mV)	ชั่วสัญญาณ
ต้นสาย กลางสายและ ปลายสาย	HFCT No.1	4309.7	บวก
	HFCT No.2	4434.7	ลบ
	PD Line No.1	812.8	บวก
	PD Line No.2	864.9	ลบ

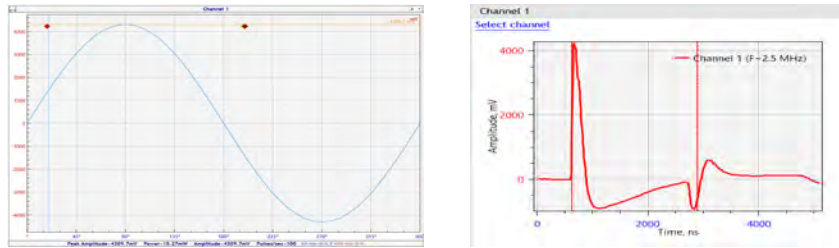


(ก) เซ็นเซอร์ HFCT

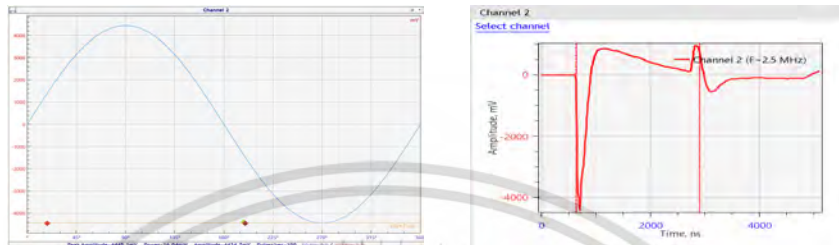


(ข) เซ็นเซอร์ HFCT

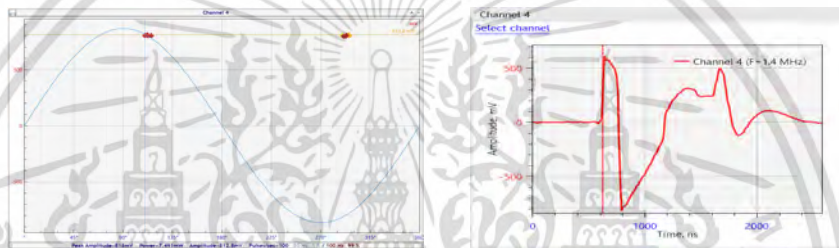
รูปที่ 4.1 โดอะแกรมการตรวจวัดขนาดพัลส์จากเครื่อง PD pulse generator เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่เสียค่าใช้จ่าย
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



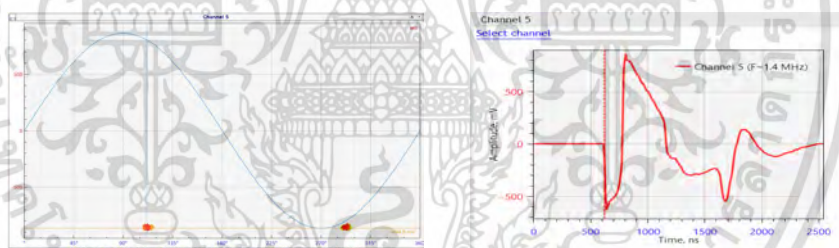
(ก) เซ็นเซอร์ HFCT คล้องที่สายไฟชั่วคราว



(ข) เซ็นเซอร์ HFCT คล้องที่สายไฟชั่วคราว



(ค) เซ็นเซอร์ PD Line คล้องที่สายไฟชั่วคราว



(ง) เซ็นเซอร์ PD Line คล้องที่สายไฟชั่วคราว

รูปที่ 4.2 ขนาดพัลส์ที่จ่ายออกจากเครื่อง PD pulse generator

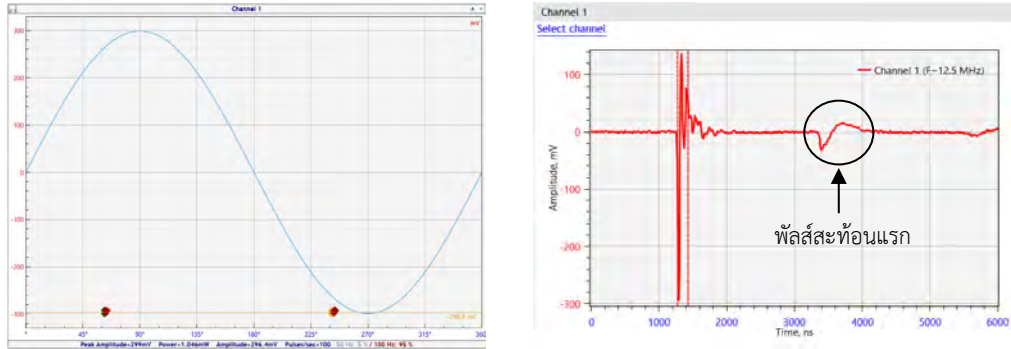
ผลการทดสอบการเกิด PD ในระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีการต่อลงดินข้างเดียวแสดงรายละเอียดในตารางที่ 4.2 - 4.4 และกลุ่มสัญญาณรวมถึงลักษณะพัลส์ที่ตรวจวัดได้แสดงดังรูปที่ 4.3 - 4.5

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบการต่อลงดินข้างเดียวกรณีจ่าย PD ต้นสาย

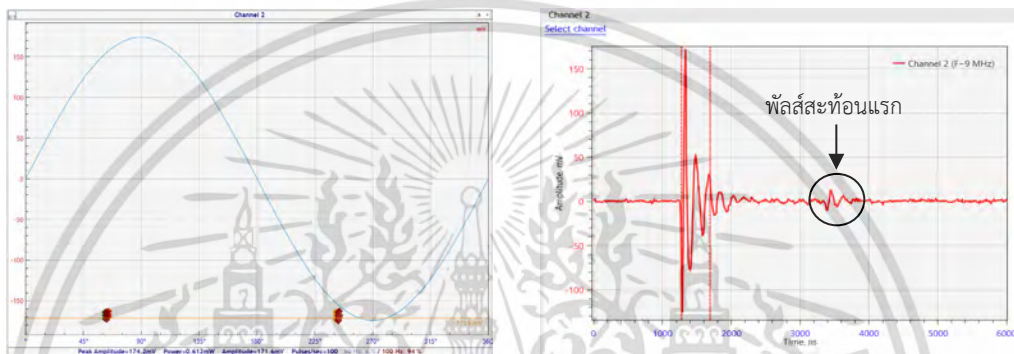
เซ็นเซอร์	ขนาดสัญญาณ (mV)	ชั่วสัญญาณ	พัลส์สะท้อน
HFCT No.1	296.4	ลบ	พบ
HFCT No.2	171.6	ลบ	พบ
HFCT No.3	153.4	ลบ	พบ
PD Line No.1	223.6	ลบ	พบ
PD Line No.2	101.4	ลบ	พบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับครูใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

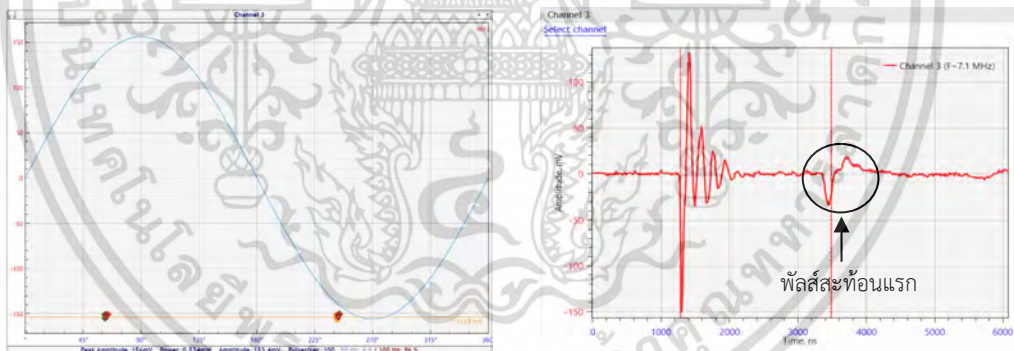
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



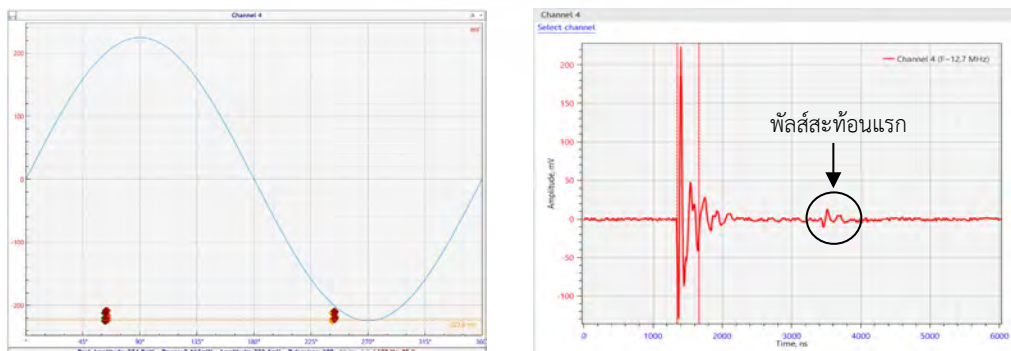
(ก) กลุ่มสัญญาณและลักษณะพัลส์ที่ตรวจวัดได้จากเซ็นเซอร์ HFCT No.1



(ข) กลุ่มสัญญาณและลักษณะพัลส์ที่ตรวจวัดได้จากเซ็นเซอร์ HFCT No.2

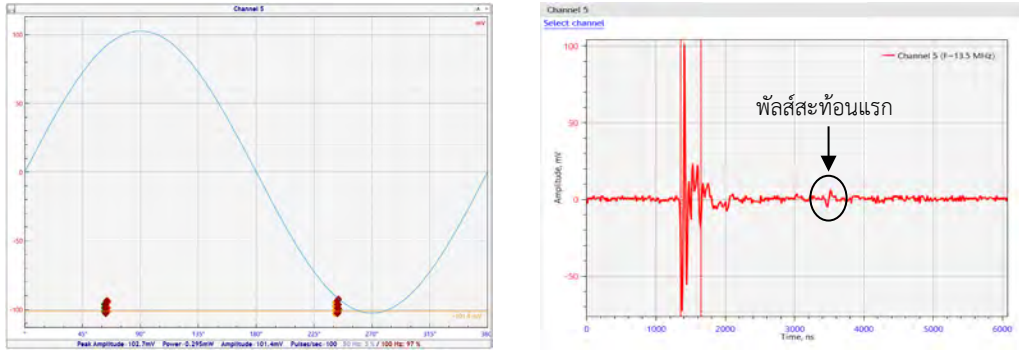


(ค) กลุ่มสัญญาณและลักษณะพัลส์ที่ตรวจวัดได้จากเซ็นเซอร์ HFCT No.3



(ง) กลุ่มสัญญาณและลักษณะพัลส์ที่ตรวจวัดได้จากเซ็นเซอร์ PD Line No.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

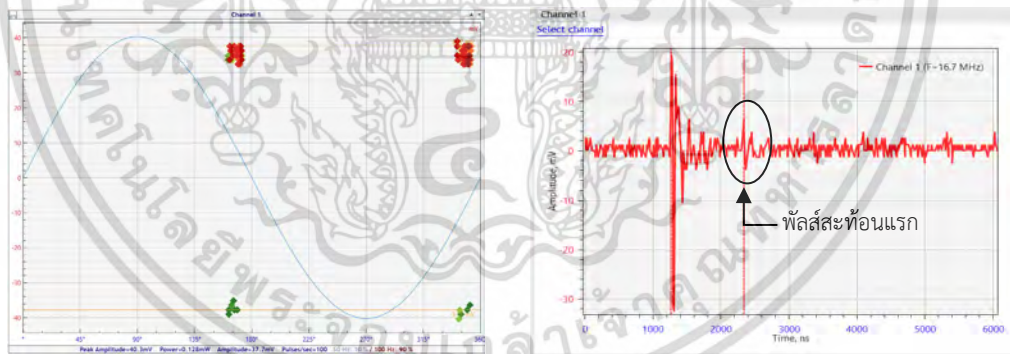


(จ) กลุ่มสัญญาณและลักษณะพัลส์ที่ตรวจวัดได้จากเซ็นเซอร์ PD Line No.2

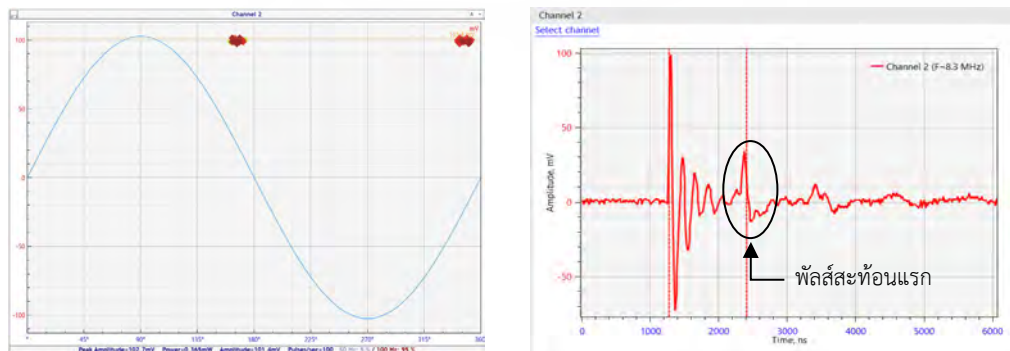
รูปที่ 4.3 ผลการทดสอบการต่อลงดินข้างเดียวกรณีจ่าย PD ต้นสาย

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบการต่อลงดินข้างเดียวกรณีจ่าย PD กลางสาย

เซ็นเซอร์	ขนาดสัญญาณ (mV)	ขั้วสัญญาณ	พัลส์สะท้อน
HFCT No.1	37.7	บวก	พบ
HFCT No.2	101.4	บวก	พบ
HFCT No.3	100.1	ลบ	พบ
PD Line No.1	92.3	บวก	พบ
PD Line No.2	102.7	บวก	พบ

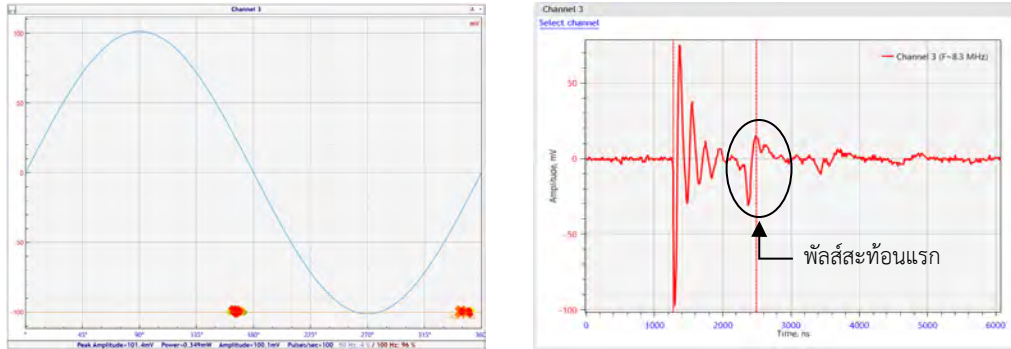


(ก) รูปแบบสัญญาณและลักษณะพัลส์ที่ตรวจวัดได้จากเซ็นเซอร์ HFCT No.1

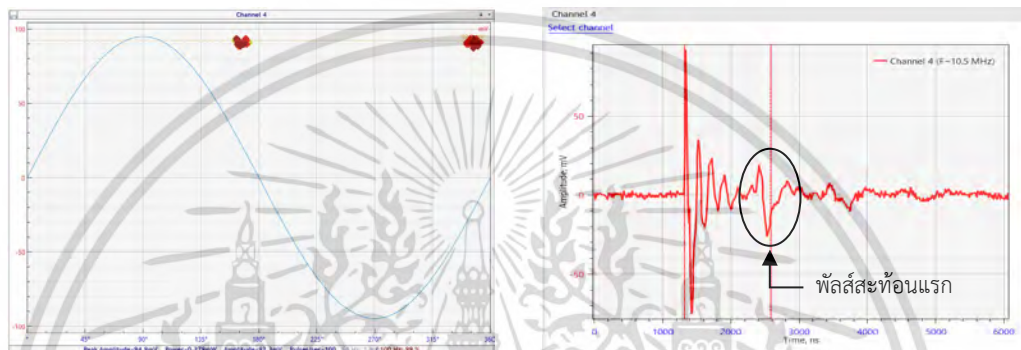


(ข) รูปแบบสัญญาณและลักษณะพัลส์ที่ตรวจวัดได้จากเซ็นเซอร์ HFCT No.2

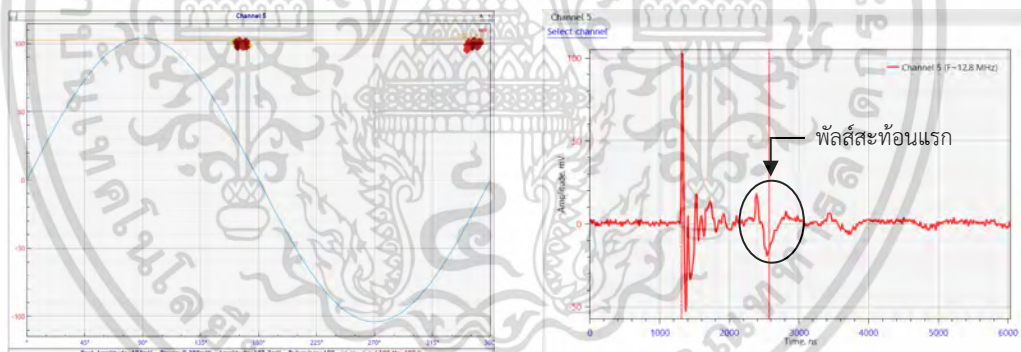
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค) รูปแบบสัญญาณและลักษณะพัลส์ที่ตรวจวัดได้จากเซ็นเซอร์ HFCT No.3



(ง) รูปแบบสัญญาณและลักษณะพัลส์ที่ตรวจวัดได้จากเซ็นเซอร์ PD Line No.1



(จ) รูปแบบสัญญาณและลักษณะพัลส์ที่ตรวจวัดได้จากเซ็นเซอร์ PD Line No.2

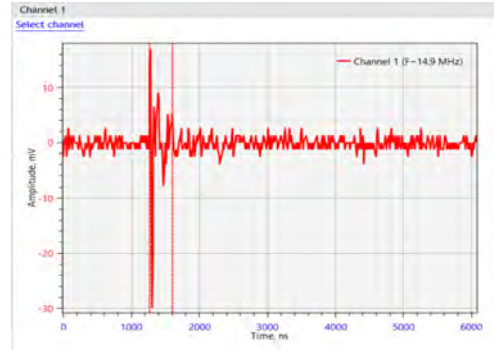
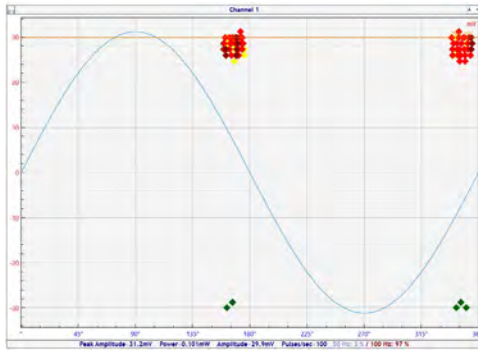
รูปที่ 4.4 ผลการทดสอบการต่อลงดินข้างเดียวกรณีจ่าย PD กลางสาย

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบการต่อลงดินข้างเดียวกรณีจ่าย PD ปลายสาย

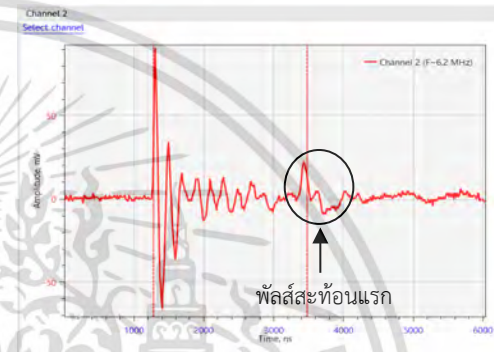
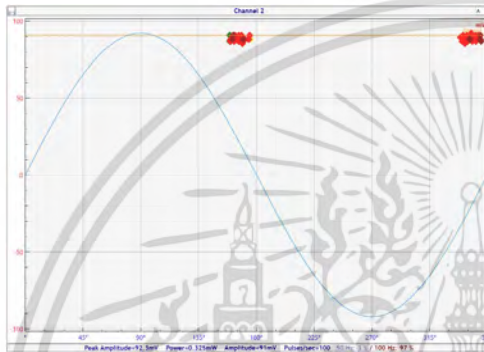
เซ็นเซอร์	ขนาดสัญญาณ (mV)	ชั่วสัญญาณ	พัลส์สะท้อน
HFCT No.1	29.9	บวก	ไม่พบ
HFCT No.2	91.0	บวก	พบ
HFCT No.3	98.8	ลบ	พบ
PD Line No.1	84.5	บวก	พบ
PD Line No.2	85.8	บวก	พบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรณีใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

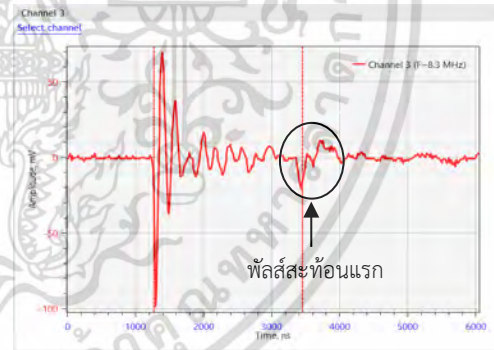
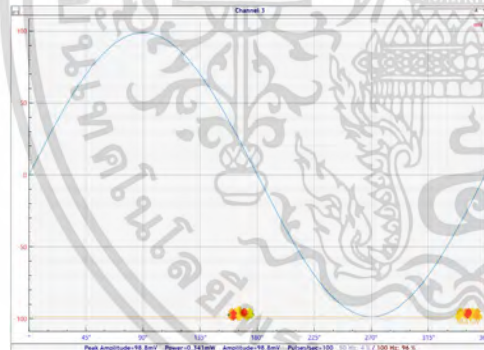
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



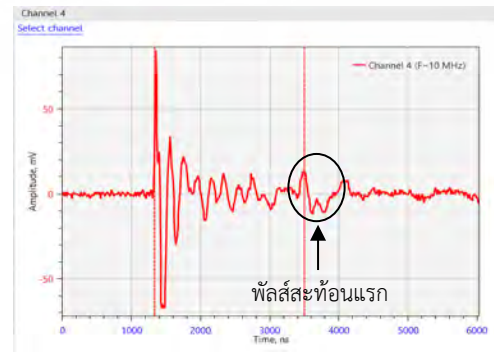
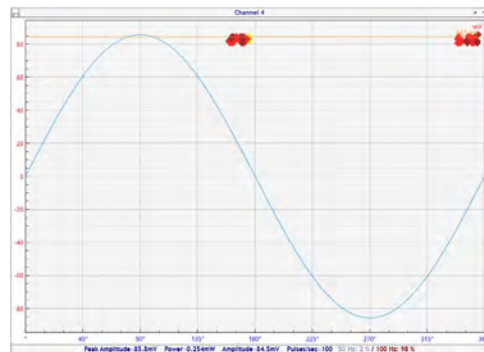
(ก) รูปแบบสัญญาณและลักษณะพัลส์ที่ตรวจวัดได้จากเซ็นเซอร์ HFCT No.1



(ข) รูปแบบสัญญาณและลักษณะพัลส์ที่ตรวจวัดได้จากเซ็นเซอร์ HFCT No.2

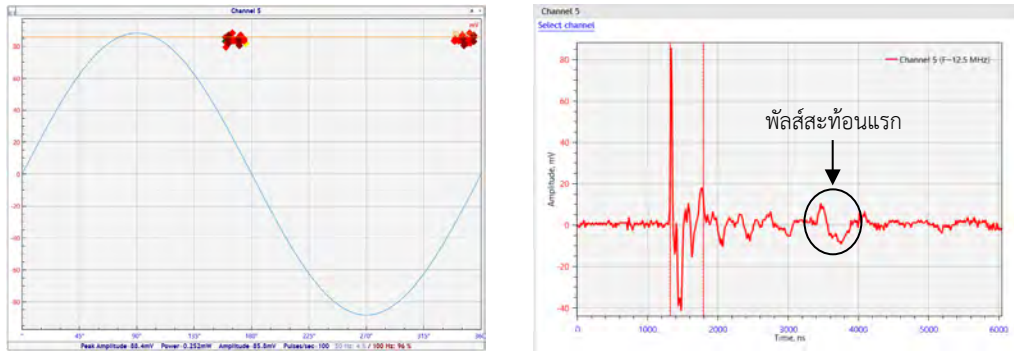


(ค) รูปแบบสัญญาณและลักษณะพัลส์ที่ตรวจวัดได้จากเซ็นเซอร์ HFCT No.3



(ง) รูปแบบสัญญาณและลักษณะพัลส์ที่ตรวจวัดได้จากเซ็นเซอร์ PD Line No.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



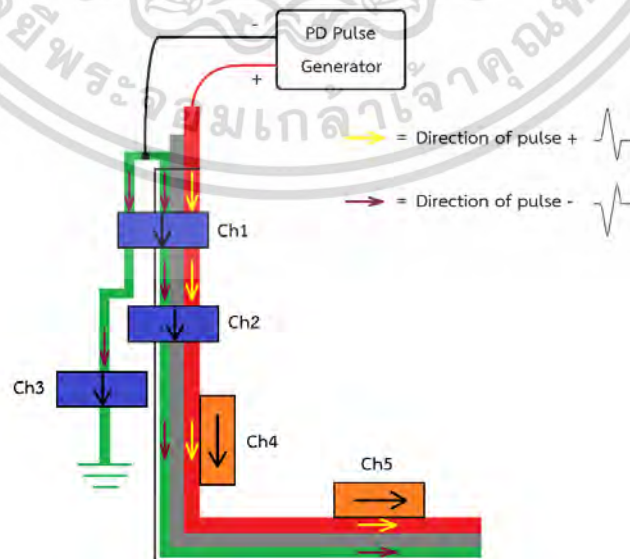
(จ) รูปแบบสัญญาณและลักษณะพัลส์ที่ตรวจวัดได้จากเซ็นเซอร์ PD Line No.2

รูปที่ 4.5 ผลการทดสอบการต่อลงดินข้างเดียวกรณีจ่าย PD ปลายสาย

จากผลการทดสอบที่แสดงไปข้างต้นสามารถสรุปได้ดังนี้

4.1.1.1 กรณีจ่ายพัลส์ PD ที่ต้นสายพบว่ากลุ่มสัญญาณที่เซ็นเซอร์ทุกตัวตรวจวัดได้จะอยู่ในตำแหน่งเดียวกันและมีเป็นขั้วลบทั้งหมด เหตุผลของข้อนี้ที่วัดได้เช่นนี้พิจารณาจากทิศทางการเคลื่อนที่ของพัลส์และการติดตั้งเซ็นเซอร์ดังรูปที่ 4.6 สามารถวิเคราะห์ได้ดังนี้

- HFCT No.1: ผลรวมของพัลส์ลบจะมีค่ามากกว่าพัลส์บวกทำให้เหลือในส่วนของพัลส์ลบและเซ็นเซอร์มีทิศเดียวกันกับการเคลื่อนที่ของพัลส์ลบ
- HFCT No.2: ผลรวมของพัลส์บวกและพัลส์ลบไม่ได้ถูกหักล้างจนเป็น 0 แต่จะเหลือในส่วนของพัลส์ลบนั่นเป็นเพราะการลดทอนของขนาดสัญญาณในตัวนำจะมีค่ามากกว่าในสายซิลด์และเซ็นเซอร์มีทิศเดียวกันกับการเคลื่อนที่ของพัลส์ลบ
- HFCT No.3: มีเพียงพัลส์ขั้วลบและเซ็นเซอร์มีทิศเดียวกันกับการเคลื่อนที่ของพัลส์ลบ
- PD Line No.1 และ No.2: เซ็นเซอร์นี้ตรวจจับพัลส์ที่เคลื่อนที่ในสายซิลด์ซึ่งเป็นขั้วลบและเซ็นเซอร์มีทิศเดียวกันกับการเคลื่อนที่ของพัลส์ลบ

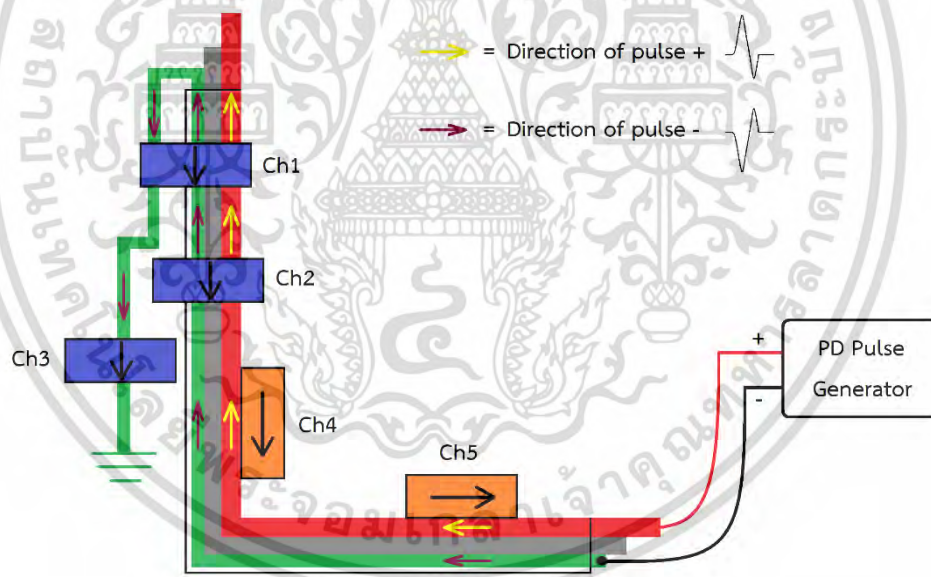


รูปที่ 4.6 การเคลื่อนที่ของพัลส์กรณีจ่ายที่ต้นสายสำหรับวงจรต่อลงดินข้างเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.1.2 กรณีจ่ายพัลส์ PD ที่กลางสายและปลายสายพบว่ากลุ่มสัญญาณที่เซ็นเซอร์ทุกตัวตรวจวัดได้จะอยู่ในตำแหน่งเดียวกันทั้งหมด แต่ช่วงของพัลส์จะมีทิศตรงกันข้ามกับกรณีที่จ่ายต้นสาย ยกเว้นเซ็นเซอร์ HFCT ที่คล้องกราวด์ที่ยังคงเป็นช่วงลบเช่นเดิม เหตุผลของช่วงที่วัดได้เช่นนี้พิจารณาจากทิศทางการเคลื่อนที่ของพัลส์และการติดตั้งเซ็นเซอร์ดังรูปที่ 4.7 สามารถวิเคราะห์ได้ดังนี้

- HFCT No.1: ผลรวมของพัลส์บวกและพัลส์ลบภายในสายเคเบิลและสายกราวด์ไม่ได้ถูกหักล้างจนเป็น 0 แต่จะเหลือในส่วนของพัลส์ลบที่มีขนาดน้อยมากและเซ็นเซอร์มีทิศตรงกันข้ามกับการเคลื่อนที่ของพัลส์ลบ
- HFCT No.2: ผลรวมของพัลส์บวกและพัลส์ลบไม่ได้ถูกหักล้างจนเป็น 0 แต่จะเหลือในส่วนของพัลส์ลบและเซ็นเซอร์มีทิศตรงกันข้ามกับการเคลื่อนที่ของพัลส์ลบ
- HFCT No.3: มีเพียงพัลส์ช่วงลบและเซ็นเซอร์มีทิศเดียวกันกับการเคลื่อนที่ของพัลส์ลบ
- PD Line No.1 และ No.2: เซ็นเซอร์นี้ตรวจจับพัลส์ที่เคลื่อนที่ในสายซิลด์ซึ่งเป็นช่วงลบและเซ็นเซอร์มีทิศตรงกันข้ามกับการเคลื่อนที่ของพัลส์ลบ



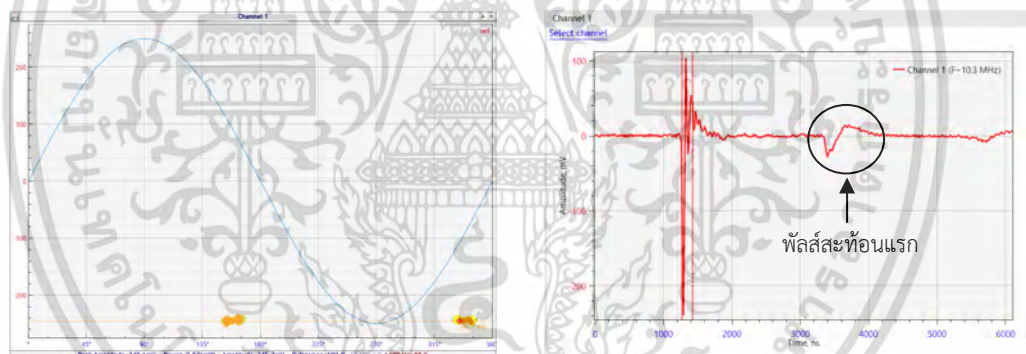
รูปที่ 4.7 การเคลื่อนที่ของพัลส์กรณีจ่ายที่กลางและปลายสายสำหรับวงจรต่อลงดินข้างเดียว

4.1.2 ผลการทดสอบระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีการต่อลงดินแบบกึ่งกลางรูปแบบที่ 1

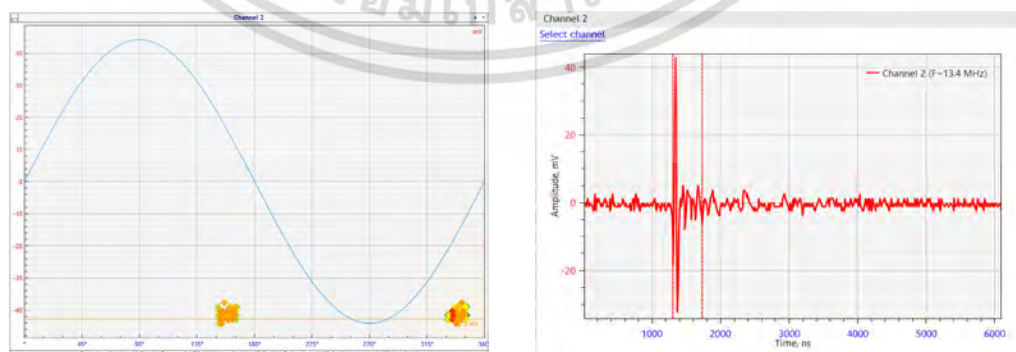
สัญญาณที่จ่ายออกจากเครื่อง PD pulse generator ในแต่ละตำแหน่งของการจ่าย PD จะใช้ขนาดเท่ากันกับการทดสอบระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีการต่อลงดินข้างเดียวที่กล่าวในหัวข้อ 4.1.1 โดยผลการทดสอบการเกิด PD แสดงรายละเอียดในตารางที่ 4.5 – 4.7 และกลุ่มสัญญาณรวมถึงลักษณะพัลส์ที่ตรวจวัดได้แสดงดังรูปที่ 4.8 - 4.10

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบการต่อลงดินแบบกึ่งกลางรูปแบบที่ 1 กรณีจ่าย PD ต้นสาย

เซ็นเซอร์	ขนาดสัญญาณ (mV)	ขั้วสัญญาณ	พัลส์สะท้อน
HFCT No.1	245.7	ลบ	พบ
HFCT No.2	42.9	ลบ	ไม่พบ
HFCT No.3	104.0	ลบ	พบ
PD Line No.1	256.1	ลบ	พบ
PD Line No.2	126.1	ลบ	พบ

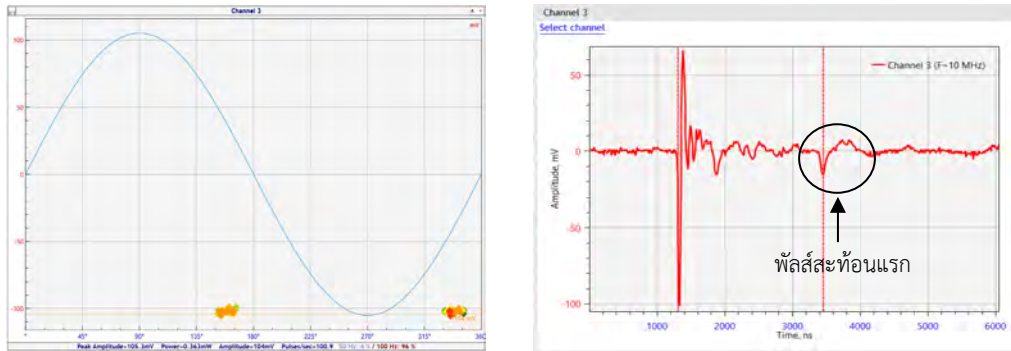


(ก) รูปแบบสัญญาณและลักษณะพัลส์ที่ตรวจวัดได้จากเซ็นเซอร์ HFCT No.1

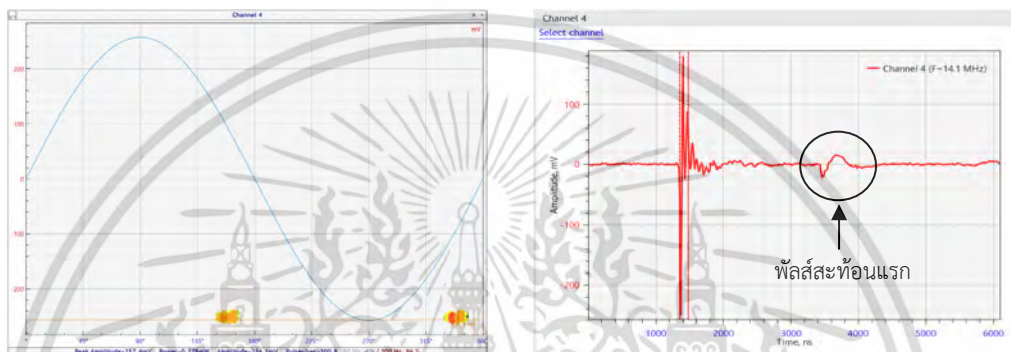


(ข) รูปแบบสัญญาณและลักษณะพัลส์ที่ตรวจวัดได้จากเซ็นเซอร์ HFCT No.2

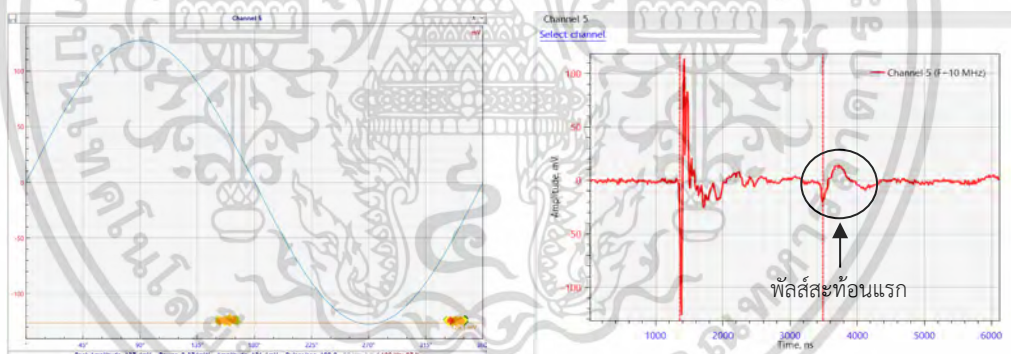
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค) รูปแบบสัญญาณและลักษณะพัลส์ที่ตรวจวัดได้จากเซ็นเซอร์ HFCT No.3



(ง) รูปแบบสัญญาณและลักษณะพัลส์ที่ตรวจวัดได้จากเซ็นเซอร์ PD Line No.1



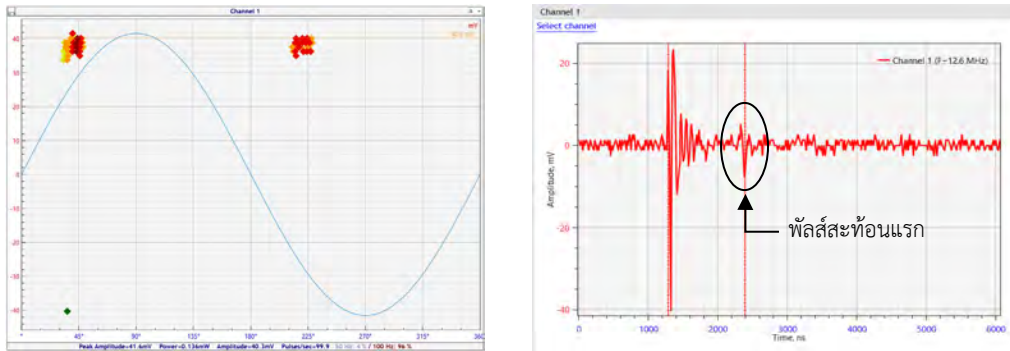
(จ) รูปแบบสัญญาณและลักษณะพัลส์ที่ตรวจวัดได้จากเซ็นเซอร์ PD Line No.2
รูปที่ 4.8 ผลการทดสอบการต่อลงดินแบบกึ่งกลางรูปแบบที่ 1 กรณีจ่าย PD ต้นสาย

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบการต่อลงดินแบบกึ่งกลางรูปแบบที่ 1 กรณีจ่าย PD กลางสาย

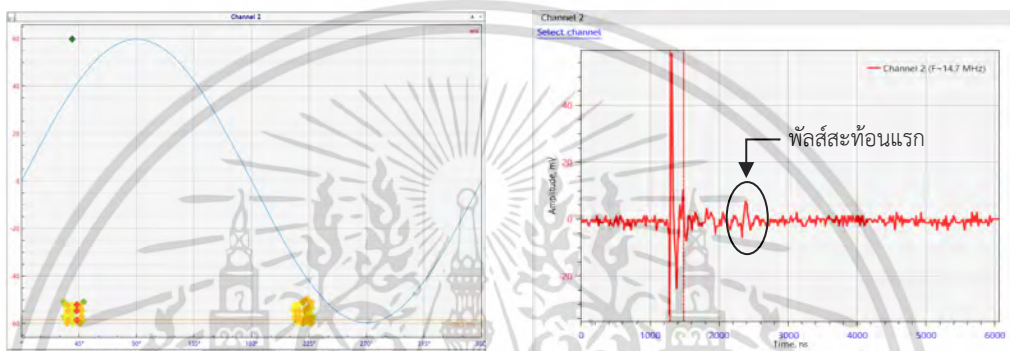
เซ็นเซอร์	ขนาดสัญญาณ (mV)	ชั่วสัญญาณ	พัลส์สะท้อน
HFCT No.1	40.3	บวก	พบ
HFCT No.2	58.5	ลบ	พบ
HFCT No.3	113.1	ลบ	พบ
PD Line No.1	76.7	บวก	พบ
PD Line No.2	83.2	บวก	พบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรณีใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้จำหน่ายไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

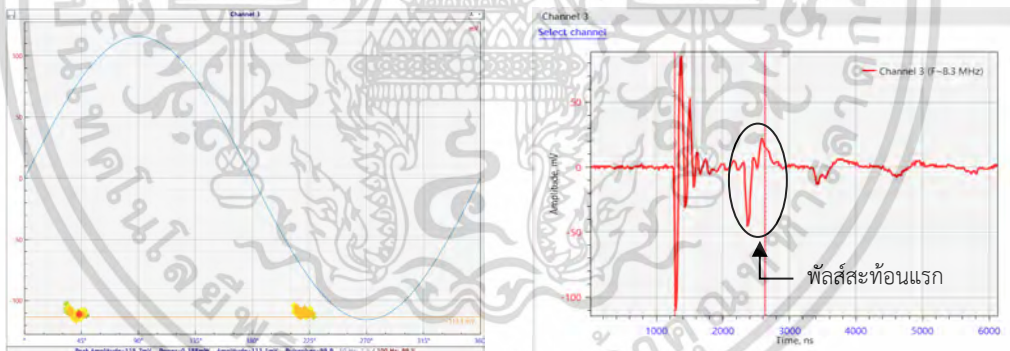
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



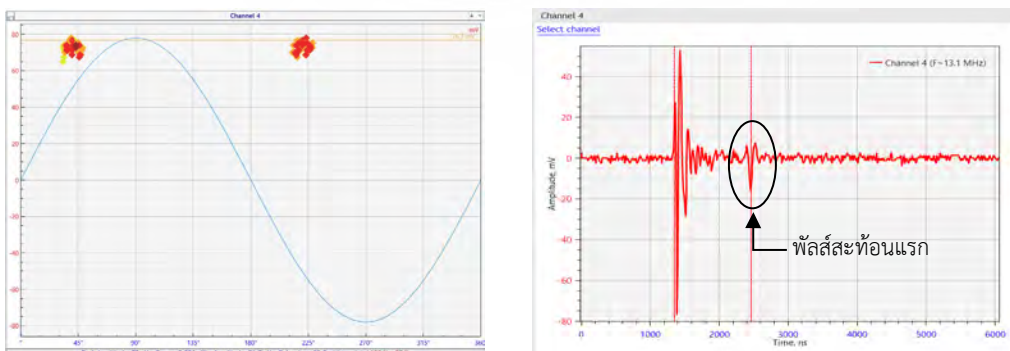
(ก) รูปแบบสัญญาณและลักษณะพัลส์ที่ตรวจวัดได้จากเซ็นเซอร์ HFCT No.1



(ข) รูปแบบสัญญาณและลักษณะพัลส์ที่ตรวจวัดได้จากเซ็นเซอร์ HFCT No.2

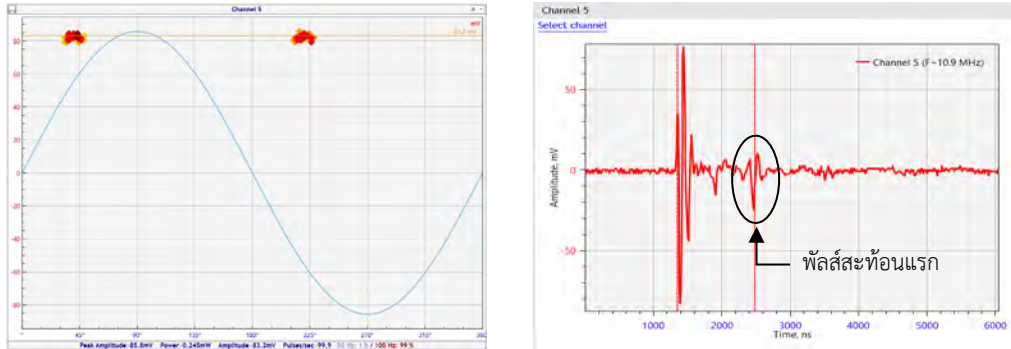


(ค) รูปแบบสัญญาณและลักษณะพัลส์ที่ตรวจวัดได้จากเซ็นเซอร์ HFCT No.3



(ง) รูปแบบสัญญาณและลักษณะพัลส์ที่ตรวจวัดได้จากเซ็นเซอร์ PD Line No.1

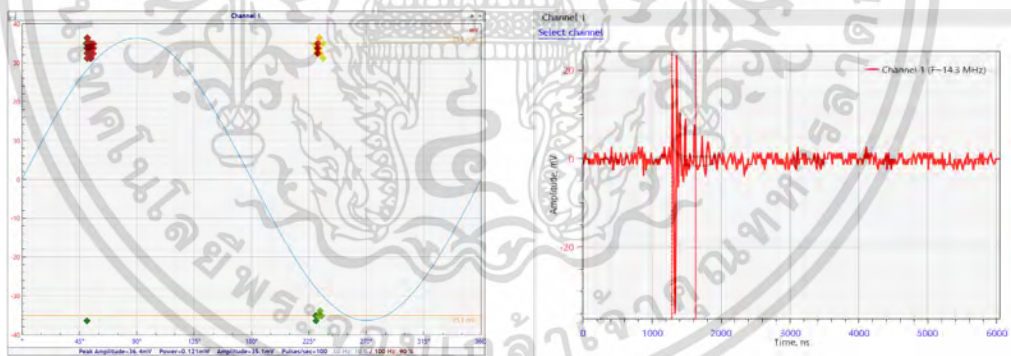
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



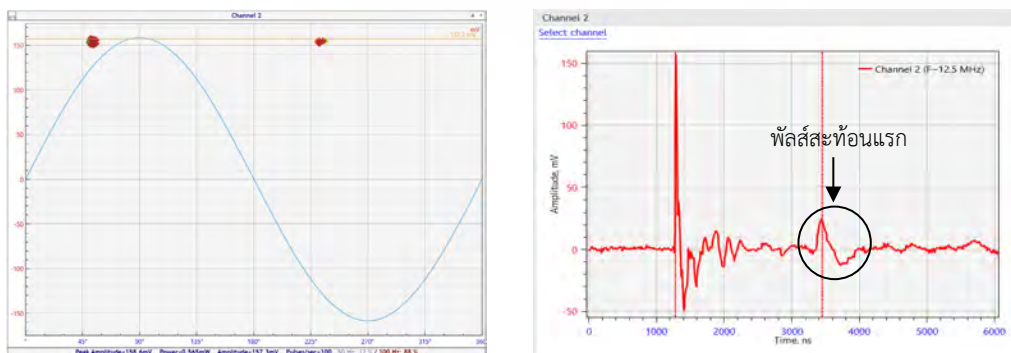
(จ) รูปแบบสัญญาณและลักษณะพัลส์ที่ตรวจวัดได้จากเซ็นเซอร์ PD Line No.2
รูปที่ 4.9 ผลการทดสอบการต่อลงดินแบบกึ่งกลางรูปแบบที่ 1 กรณีจ่าย PD กลางสาย

ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบการต่อลงดินแบบกึ่งกลางรูปแบบที่ 1 กรณีจ่าย PD ปลายสาย

เซ็นเซอร์	ขนาดสัญญาณ (mV)	ชั่วสัญญาณ	พัลส์สะท้อน
HFCT No.1	35.1	บวก	ไม่พบ
HFCT No.2	157.3	บวก	พบ
HFCT No.3	113.1	ลบ	พบ
PD Line No.1	59.8	บวก	ไม่พบ
PD Line No.2	61.1	บวก	ไม่พบ

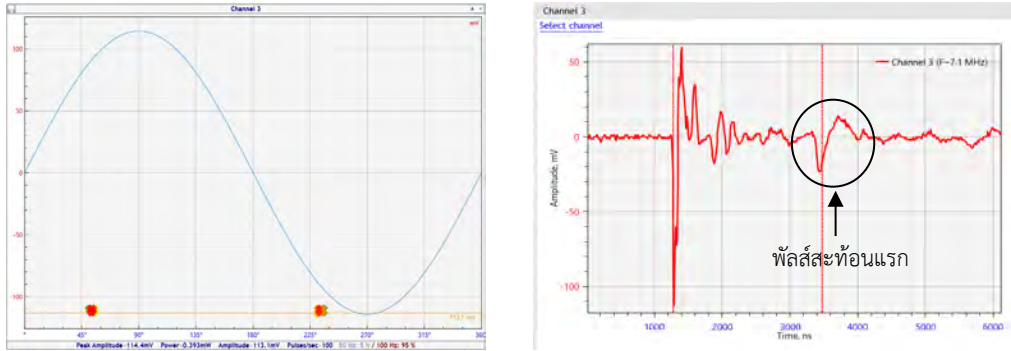


(ก) รูปแบบสัญญาณและลักษณะพัลส์ที่ตรวจวัดได้จากเซ็นเซอร์ HFCT No.1

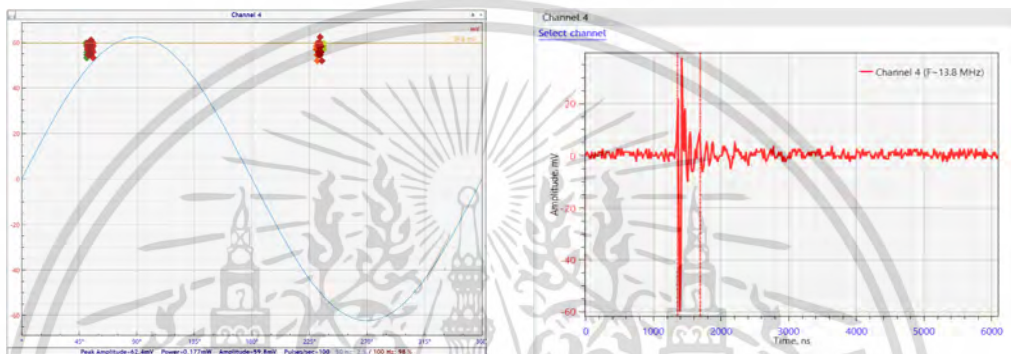


(ข) รูปแบบสัญญาณและลักษณะพัลส์ที่ตรวจวัดได้จากเซ็นเซอร์ HFCT No.2

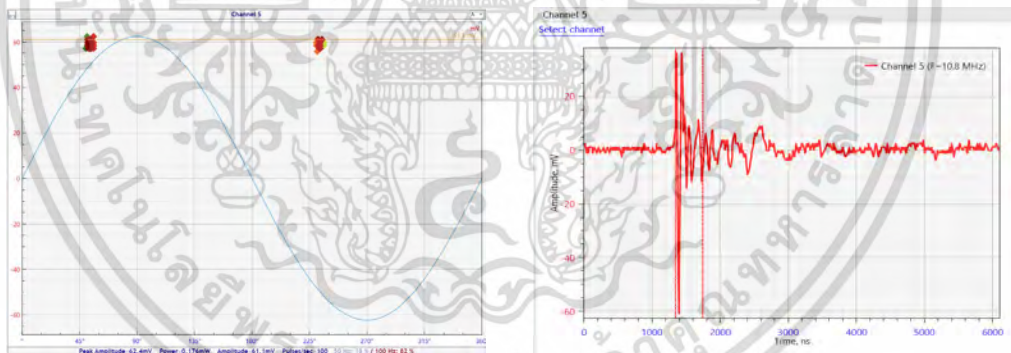
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้ซึ่งการเชิงพาณิชย์เท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เข้าเว็บไซต์เป็นการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค) รูปแบบสัญญาณและลักษณะพัลส์ที่ตรวจวัดได้จากเซ็นเซอร์ HFCT No.3



(ง) รูปแบบสัญญาณและลักษณะพัลส์ที่ตรวจวัดได้จากเซ็นเซอร์ PD Line No.1



(จ) รูปแบบสัญญาณและลักษณะพัลส์ที่ตรวจวัดได้จากเซ็นเซอร์ PD Line No.2

รูปที่ 4.10 ผลการทดสอบการต่อลงดินแบบกึ่งกลางรูปแบบที่ 1 กรณีจ่าย PD ปลายสาย

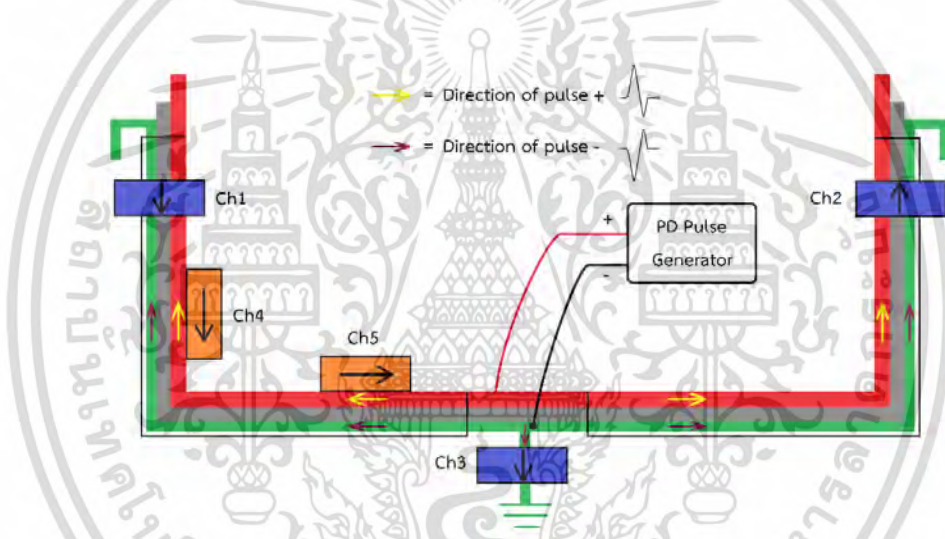
จากผลการทดสอบที่แสดงไปข้างต้นสามารถสรุปได้ดังนี้

4.1.2.1 กรณีจ่ายพัลส์ PD ที่ต้นสายพบว่ากลุ่มสัญญาณที่เซ็นเซอร์ทุกตัวตรวจวัดได้จะอยู่ในตำแหน่งเดียวกันและเป็นขั้วลบทั้งหมดโดยใช้การวิเคราะห์เดียวกันกับการทดลองต่อลงดินข้างเดียวที่กล่าวอยู่ในหัวข้อ 4.1.1.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2.2 กรณีจ่ายพัลส์ PD ที่กลางสายพบว่ากลุ่มสัญญาณที่เซ็นเซอร์ทุกตัวตรวจวัดได้จะอยู่ในตำแหน่งเดียวกันทั้งหมด เช่นเซ็นเซอร์ HFCT No.1 และ PD Line ทั้ง 2 ตัววัดพัลส์ออกมาเป็นขั้วบวก แต่ HFCT No.2 และ No.3 วัดพัลส์ออกมาเป็นขั้วลบ เหตุผลของข้อที่วัดได้เช่นนี้พิจารณาจากทิศทางการเคลื่อนที่ของพัลส์และการติดตั้งเซ็นเซอร์ดังรูปที่ 4.11 สามารถวิเคราะห์ได้ดังนี้

- HFCT No.1: ผลรวมของพัลส์บวกและพัลส์ลบเมื่อหักล้างแล้วจะเหลือในส่วนของพัลส์ลบ และเซ็นเซอร์มีทิศตรงกันข้ามกับการเคลื่อนที่ของพัลส์ลบ
- HFCT No.2: ผลรวมของพัลส์บวกและพัลส์ลบเมื่อหักล้างแล้วจะเหลือในส่วนของพัลส์ลบ และเซ็นเซอร์มีทิศเดียวกันกับการเคลื่อนที่ของพัลส์ลบ
- HFCT No.3: มีเพียงพัลส์ขั้วลบและเซ็นเซอร์มีทิศเดียวกันกับการเคลื่อนที่ของพัลส์ลบ
- PD Line No.1 และ No.2: เซ็นเซอร์นี้ตรวจจับพัลส์ที่เคลื่อนที่ในสายซิลด์ซึ่งเป็นขั้วลบและเซ็นเซอร์มีทิศตรงกันข้ามกับการเคลื่อนที่ของพัลส์ลบ

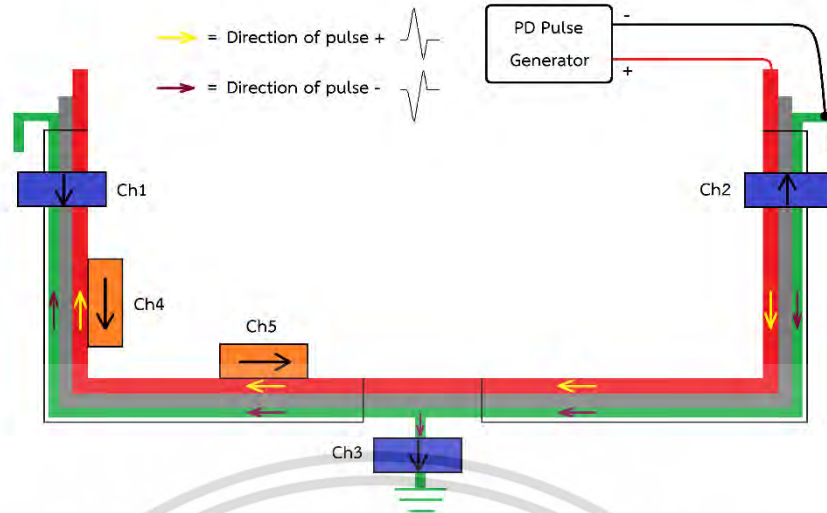


รูปที่ 4.11 การเคลื่อนที่ของพัลส์กรณีจ่ายที่กลางสายสำหรับวงจรต่อลงดินแบบกึ่งกลางรูปแบบที่ 1

4.1.2.3 กรณีจ่ายพัลส์ PD ที่ปลายสายพบว่ากลุ่มสัญญาณที่เซ็นเซอร์ทุกตัวตรวจวัดได้จะอยู่ในตำแหน่งเดียวกันทั้งหมดและของพัลส์จะเป็นขั้วบวก ยกเว้นเซ็นเซอร์ HFCT ที่คล้องกราวด์ตรงกลางสายยังคงเป็นขั้วลบเช่นเดิม เหตุผลของข้อที่วัดได้เช่นนี้พิจารณาจากทิศทางการเคลื่อนที่ของพัลส์และการติดตั้งเซ็นเซอร์ดังรูปที่ 4.12 สามารถวิเคราะห์ได้ดังนี้

- HFCT No.1 และ No.2: ผลรวมของพัลส์บวกและพัลส์ลบเมื่อหักล้างแล้วจะเหลือในส่วนของพัลส์ลบ และเซ็นเซอร์มีทิศตรงกันข้ามกับการเคลื่อนที่ของพัลส์ลบ
- HFCT No.3: มีเพียงพัลส์ขั้วลบและเซ็นเซอร์มีทิศเดียวกันกับการเคลื่อนที่ของพัลส์ลบ
- PD Line No.1 และ No.2: เซ็นเซอร์นี้ตรวจจับพัลส์ที่เคลื่อนที่ในสายซิลด์ซึ่งเป็นขั้วลบและเซ็นเซอร์มีทิศตรงกันข้ามกับการเคลื่อนที่ของพัลส์ลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



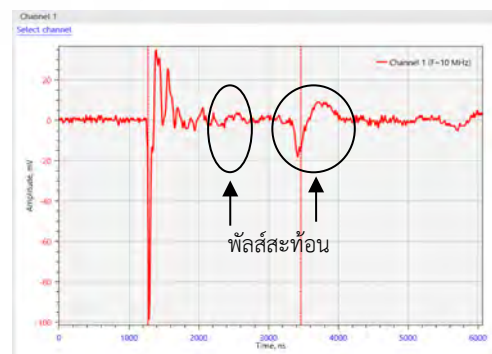
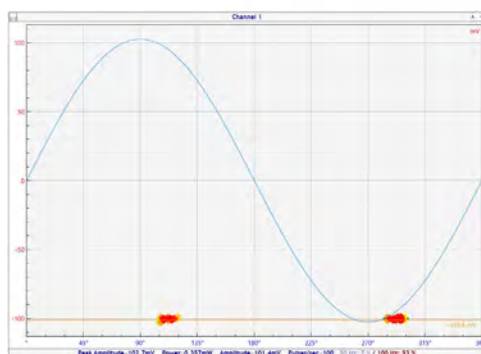
รูปที่ 4.12 การเคลื่อนที่ของพัลส์กรณีจ่ายที่ปลายสายสำหรับวงจรต่อลงดินแบบกึ่งกลางรูปแบบที่ 1

4.1.3 ผลการทดสอบระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีการต่อลงดินแบบกึ่งกลางรูปแบบที่ 2

สัญญาณที่จ่ายออกจากเครื่อง PD pulse generator ในแต่ละตำแหน่งของการจ่าย PD จะใช้ขนาดเท่ากันกับการทดสอบระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีการต่อลงดินข้างเดียวที่กล่าวในหัวข้อ 4.1.1 โดยผลการทดสอบการเกิด PD แสดงรายละเอียดในตารางที่ 4.8 – 4.10 และกลุ่มสัญญาณรวมถึงลักษณะพัลส์ที่ตรวจวัดได้แสดงดังรูปที่ 4.13 - 4.15

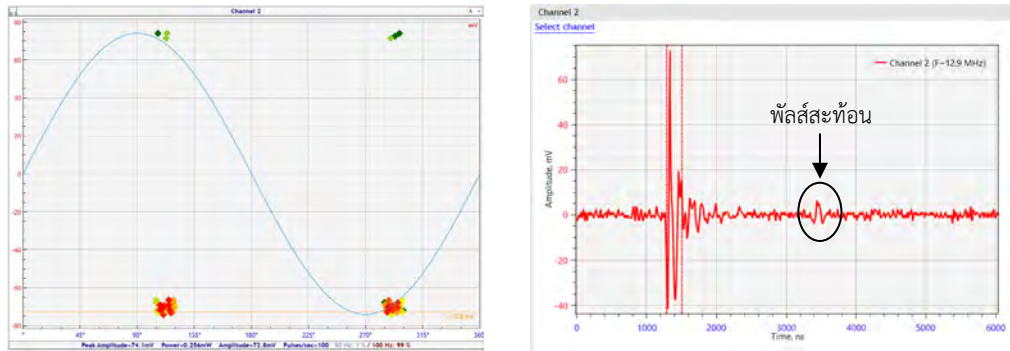
ตารางที่ 4.8 ผลการทดสอบการต่อลงดินแบบกึ่งกลางรูปแบบที่ 2 กรณีจ่าย PD ต้นสาย

เซ็นเซอร์	ขนาดสัญญาณ (mV)	ชั่วสัญญาณ	พัลส์สะท้อน
HFCT No.1	101.4	ลบ	พบ
HFCT No.2	72.8	ลบ	พบ
HFCT No.3	84.5	ลบ	พบ
PD Line No.1	118.3	ลบ	พบ
PD Line No.2	29.9	ลบ	ไม่พบ

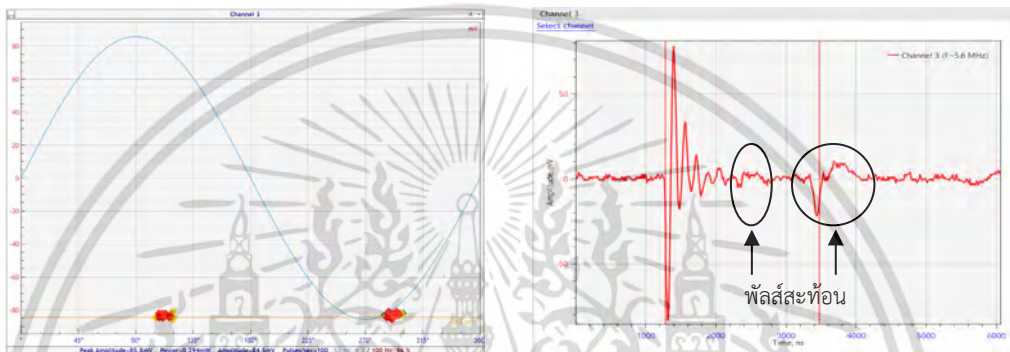


(ก) รูปแบบสัญญาณและลักษณะพัลส์ที่ตรวจวัดได้จากเซ็นเซอร์ HFCT No.1

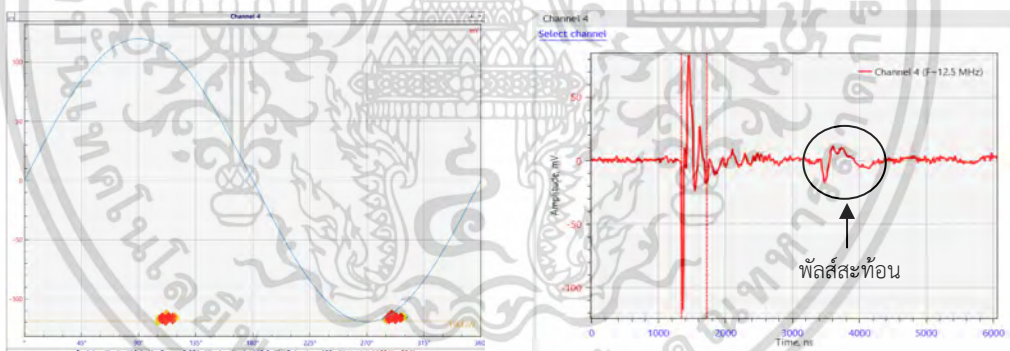
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการวิจัยและพัฒนาเท่านั้น มิใช่เพื่อเผยแพร่ในเชิงพาณิชย์ การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ผ่านการอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



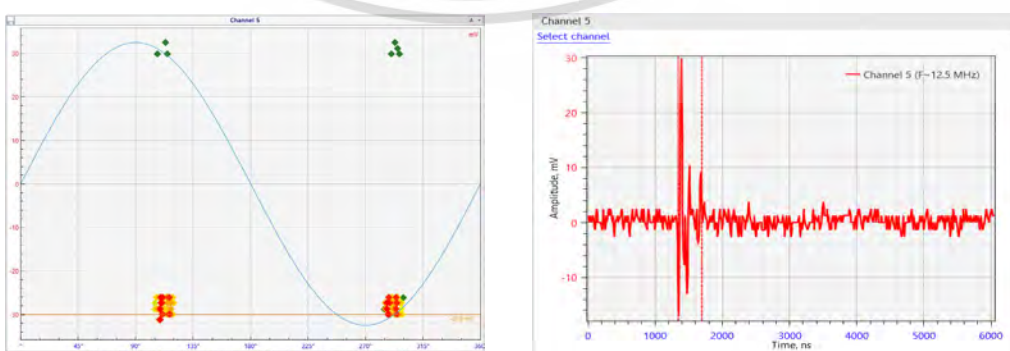
(ข) รูปแบบสัญญาณและลักษณะพัลส์ที่ตรวจวัดได้จากเซ็นเซอร์ HFCT No.2



(ค) รูปแบบสัญญาณและลักษณะพัลส์ที่ตรวจวัดได้จากเซ็นเซอร์ HFCT No.3



(ง) รูปแบบสัญญาณและลักษณะพัลส์ที่ตรวจวัดได้จากเซ็นเซอร์ PD Line No.1



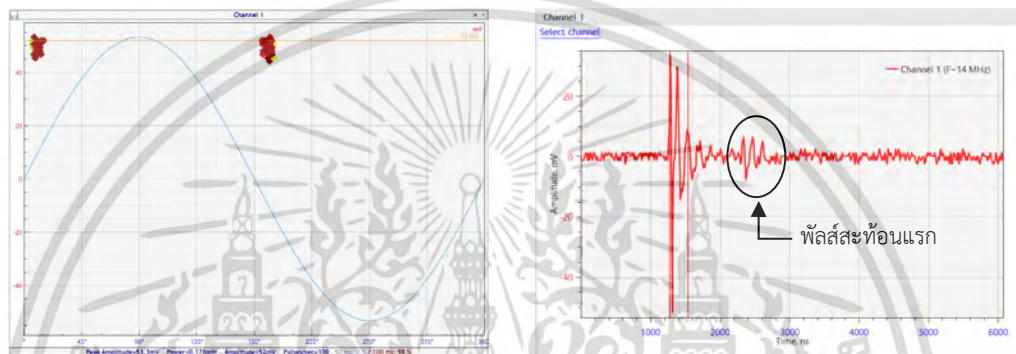
(จ) รูปแบบสัญญาณและลักษณะพัลส์ที่ตรวจวัดได้จากเซ็นเซอร์ PD Line No.2

รูปที่ 4.13 ผลการทดสอบการต่อลงดินแบบกึ่งกลางรูปแบบที่ 2 กรณีจ่าย PD ต้นสาย

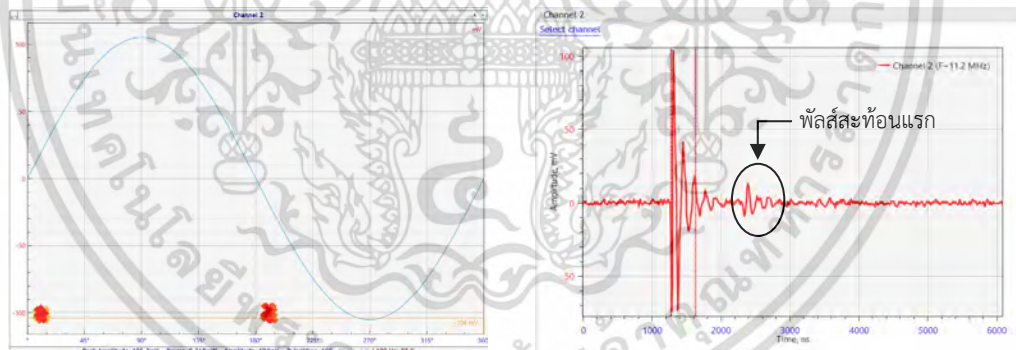
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ ซึ่งการเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตเป็นการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 ผลการทดสอบการต่อลงดินแบบกึ่งกลางรูปแบบที่ 2 กรณีจ่าย PD กลางสาย

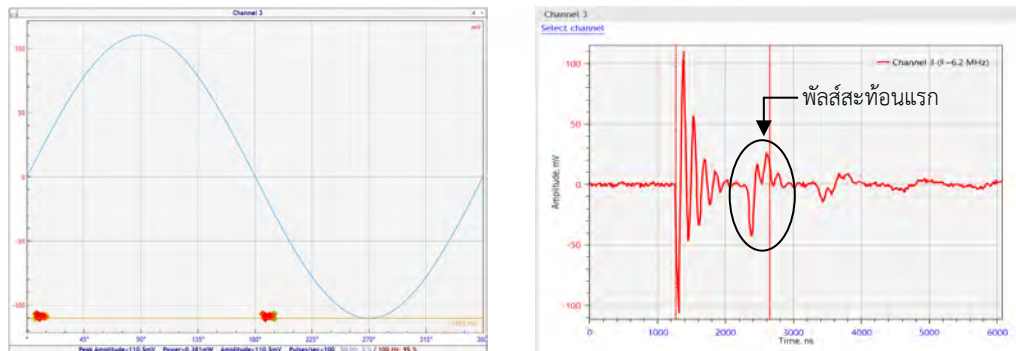
เซ็นเซอร์	ขนาดสัญญาณ (mV)	ชั่วสัญญาณ	พัลส์สะท้อน
HFCT No.1	52.0	บวก	พบ
HFCT No.2	104.0	ลบ	พบ
HFCT No.3	110.5	ลบ	พบ
PD Line No.1	109.2	บวก	พบ
PD Line No.2	50.7	ลบ	พบ



(ก) รูปแบบสัญญาณและลักษณะพัลส์ที่ตรวจวัดได้จากเซ็นเซอร์ HFCT No.1

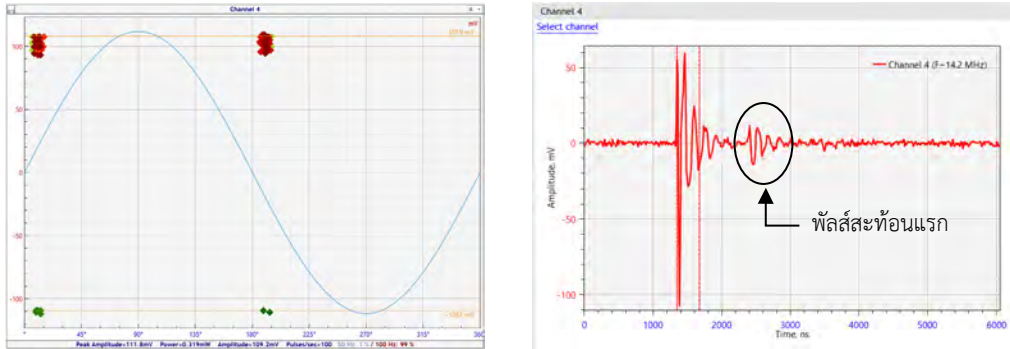


(ข) รูปแบบสัญญาณและลักษณะพัลส์ที่ตรวจวัดได้จากเซ็นเซอร์ HFCT No.2

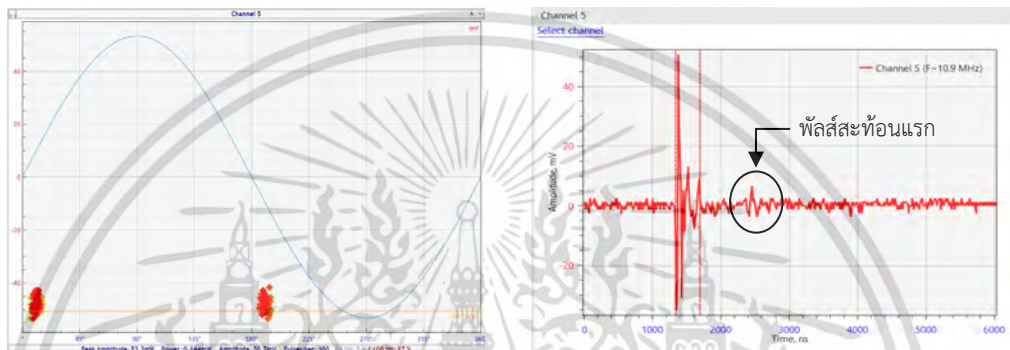


(ค) รูปแบบสัญญาณและลักษณะพัลส์ที่ตรวจวัดได้จากเซ็นเซอร์ HFCT No.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ง) รูปแบบสัญญาณและลักษณะพัลส์ที่ตรวจวัดได้จากเซ็นเซอร์ PD Line No.1

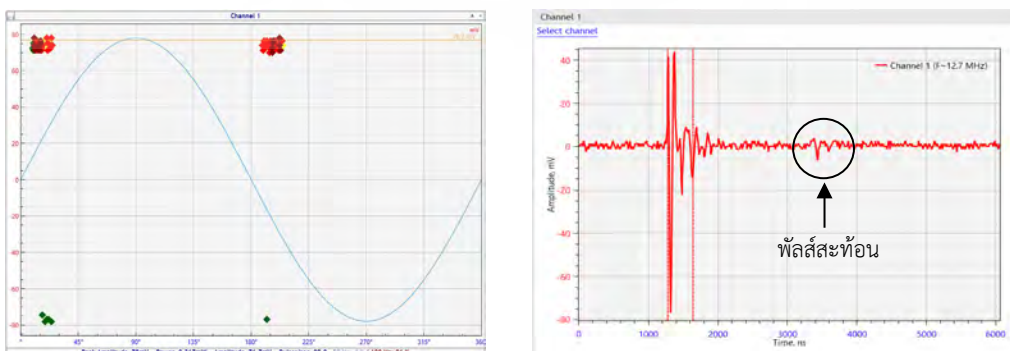


(จ) รูปแบบสัญญาณและลักษณะพัลส์ที่ตรวจวัดได้จากเซ็นเซอร์ PD Line No.2

รูปที่ 4.14 ผลการทดสอบการต่อลงดินแบบกึ่งกลางรูปแบบที่ 2 กรณีจ่าย PD กลางสาย

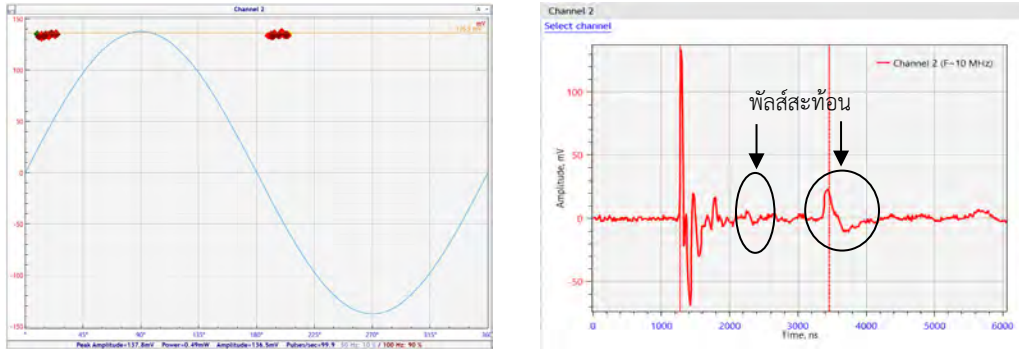
ตารางที่ 4.10 ผลการทดสอบการต่อลงดินแบบกึ่งกลางรูปแบบที่ 2 กรณีจ่าย PD ปลายสาย

เซ็นเซอร์	ขนาดสัญญาณ (mV)	ขั้วสัญญาณ	พัลส์สะท้อน
HFCT No.1	76.7	บวก	พบ
HFCT No.2	136.5	บวก	พบ
HFCT No.3	105.3	ลบ	พบ
PD Line No.1	130.0	บวก	พบ
PD Line No.2	146.9	บวก	พบ

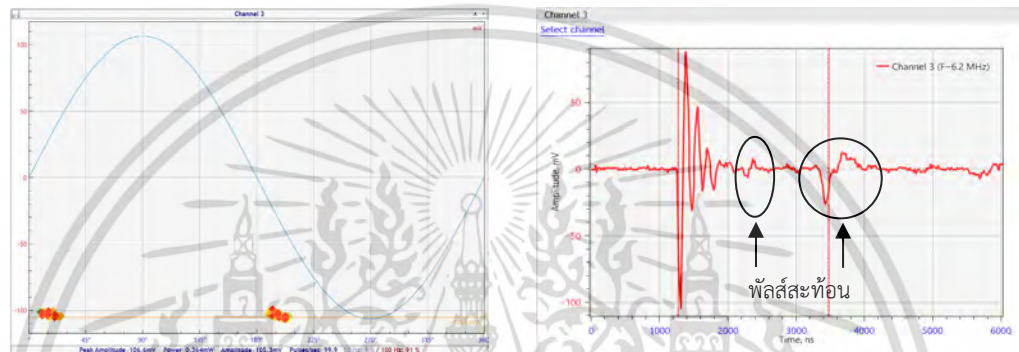


(ก) รูปแบบสัญญาณและลักษณะพัลส์ที่ตรวจวัดได้จากเซ็นเซอร์ HFCT No.1

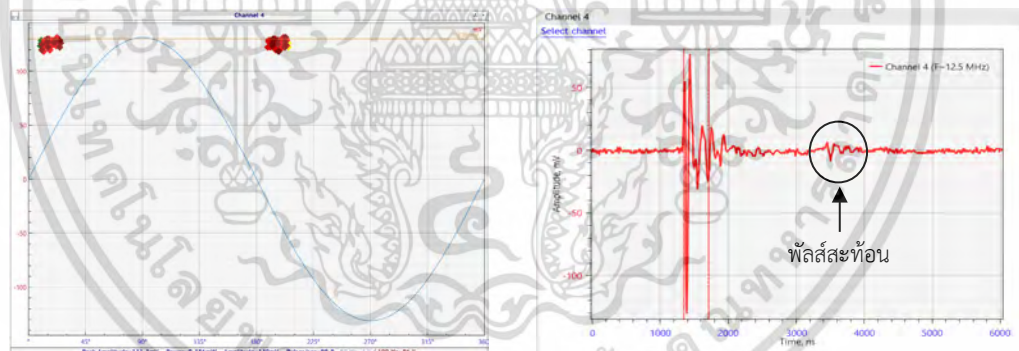
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้ซึ่งการเชิงพาณิชย์เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่ในเชิงวิชาการแล้ว
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



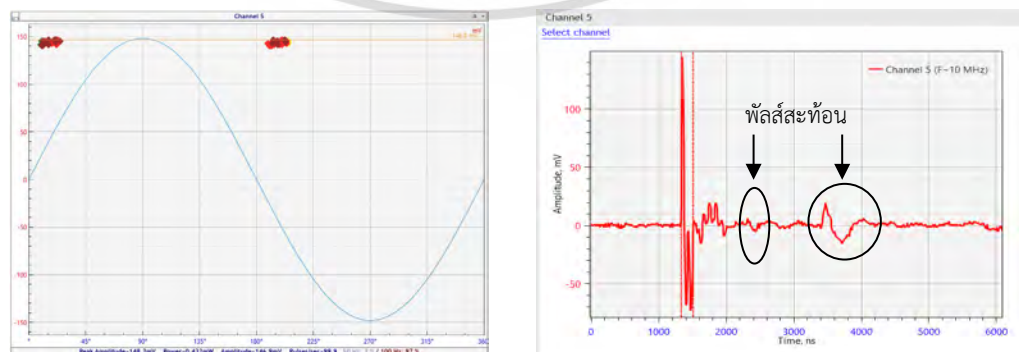
(ข) รูปแบบสัญญาณและลักษณะพัลส์ที่ตรวจวัดได้จากเซ็นเซอร์ HFCT No.2



(ค) รูปแบบสัญญาณและลักษณะพัลส์ที่ตรวจวัดได้จากเซ็นเซอร์ HFCT No.3



(ง) รูปแบบสัญญาณและลักษณะพัลส์ที่ตรวจวัดได้จากเซ็นเซอร์ PD Line No.1



(จ) รูปแบบสัญญาณและลักษณะพัลส์ที่ตรวจวัดได้จากเซ็นเซอร์ PD Line No.2

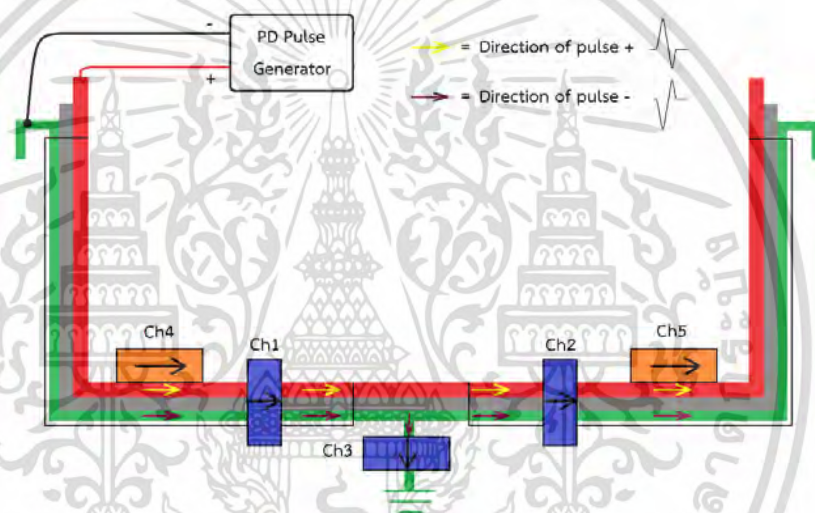
รูปที่ 4.15 ผลการทดสอบการต่อลงดินแบบกึ่งกลางรูปแบบที่ 2 กรณีจ่าย PD ปลายสาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ ซึ่งมีการแก้ไขเพิ่มเติมเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้เผยแพร่เห็นชอบจะออกหนังสือการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดสอบที่แสดงไปข้างต้นสามารถสรุปได้ดังนี้

4.1.3.1 กรณีจ่ายพัลส์ PD ที่ต้นสายพบว่ากลุ่มสัญญาณที่เซ็นเซอร์ทุกตัวตรวจวัดได้จะอยู่ในตำแหน่งเดียวกันและเป็นชั่วลบทั้งหมด เหตุผลของข้อที่วัดได้เช่นนี้พิจารณาจากทิศทางการเคลื่อนที่ของพัลส์และการติดตั้งเซ็นเซอร์ดังรูปที่ 4.16 สามารถวิเคราะห์ได้ดังนี้

- HFCT No.1 และ No.2: ผลรวมของพัลส์บวกและพัลส์ลบเมื่อหักล้างแล้วจะเหลือในส่วนของพัลส์ลบ และเซ็นเซอร์มีทิศเดียวกันกับการเคลื่อนที่ของพัลส์ลบ
- HFCT No.3: มีเพียงพัลส์ชั่วลบและเซ็นเซอร์มีทิศเดียวกันกับการเคลื่อนที่ของพัลส์ลบ
- PD Line No.1 และ No.2: ผลรวมของพัลส์บวกและพัลส์ลบเมื่อหักล้างแล้วจะเหลือในส่วนของพัลส์ลบและเซ็นเซอร์มีทิศเดียวกันกับการเคลื่อนที่ของพัลส์ลบ



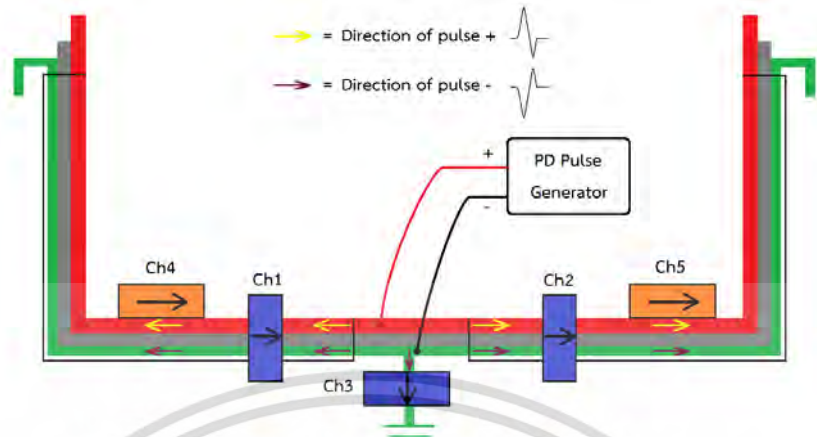
รูปที่ 4.16 การเคลื่อนที่ของพัลส์กรณีจ่ายที่ต้นสายสำหรับวงจรต่อลงดินแบบกึ่งกลางรูปแบบที่ 2

4.1.3.2 กรณีจ่ายพัลส์ PD ที่กลางสายพบว่ากลุ่มสัญญาณที่เซ็นเซอร์ทุกตัวตรวจวัดได้จะอยู่ในตำแหน่งเดียวกันและเป็นชั่วลบทั้งหมด ยกเว้นเซ็นเซอร์ HFCT No.1 และ PD Line No.1 วัดพัลส์ออกมาเป็นชั่วบวก เหตุผลของข้อที่วัดได้เช่นนี้พิจารณาจากทิศทางการเคลื่อนที่ของพัลส์และการติดตั้งเซ็นเซอร์ดังรูปที่ 4.17 สามารถวิเคราะห์ได้ดังนี้

- HFCT No.1 และ No.2: ผลรวมของพัลส์บวกและพัลส์ลบเมื่อหักล้างแล้วจะเหลือในส่วนของพัลส์ลบ โดยเซ็นเซอร์ตัวที่ 1 มีทิศตรงกันข้ามกับการเคลื่อนที่ของพัลส์ลบ ในขณะที่เซ็นเซอร์ตัวที่ 2 มีทิศเดียวกันกับการเคลื่อนที่ของพัลส์ลบ
- PD Line No.1 และ No.2: เซ็นเซอร์นี้ตรวจจับพัลส์ที่เคลื่อนที่ในสายชนิดซึ่งเป็นชั่วลบ โดยเซ็นเซอร์ตัวที่ 1 มีทิศตรงกันข้ามกับการเคลื่อนที่ของพัลส์ลบ ในขณะที่เซ็นเซอร์ตัวที่ 2 มีทิศเดียวกันกับการเคลื่อนที่ของพัลส์ลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

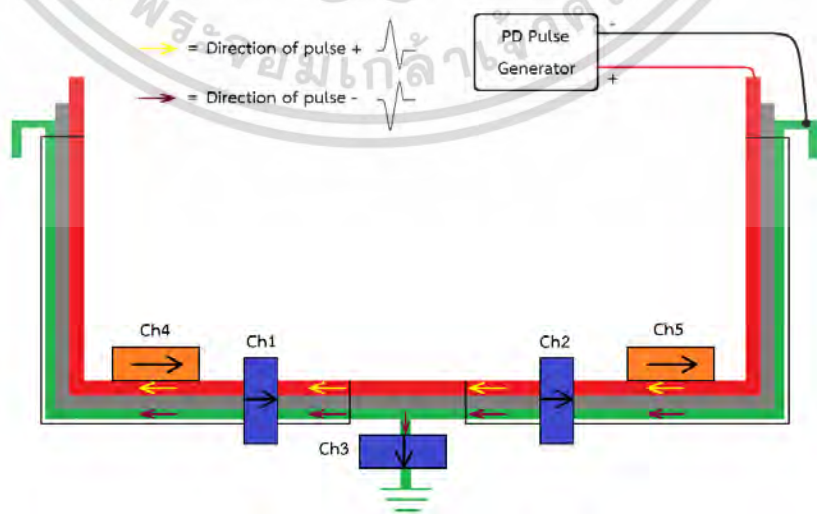
- HFCT No.3: มีเพียงพัลส์ชั่วลบและเซ็นเซอร์มีทิศเดียวกันกับการเคลื่อนที่ของพัลส์ลบ



รูปที่ 4.17 การเคลื่อนที่ของพัลส์กรณีจ่ายที่กลางสายสำหรับวงจรต่อลงดินแบบกึ่งกลางรูปแบบที่ 2

4.1.3.3 กรณีจ่ายพัลส์ PD ที่ปลายสายพบว่ากลุ่มสัญญาณที่เซ็นเซอร์ทุกตัวตรวจวัดได้จะอยู่ในตำแหน่งเดียวกันและเป็นชั่วบวกทั้งหมด ยกเว้นเซ็นเซอร์ HFCT No.3 ที่วัดพัลส์ออกมาเป็นชั่วลบ เหตุผลของชั่วที่วัดได้เช่นนี้พิจารณาจากทิศทางการเคลื่อนที่ของพัลส์และการติดตั้งเซ็นเซอร์ดังรูปที่ 4.18 สามารถวิเคราะห์ได้ดังนี้

- HFCT No.1 และ No.2: ผลรวมของพัลส์บวกและพัลส์ลบเมื่อหักล้างแล้วจะเหลือในส่วนของพัลส์ลบ และเซ็นเซอร์มีทิศตรงกันข้ามกับการเคลื่อนที่ของพัลส์ลบ
- HFCT No.3: มีเพียงพัลส์ชั่วลบและเซ็นเซอร์มีทิศเดียวกันกับการเคลื่อนที่ของพัลส์ลบ
- PD Line No.1 และ No.2: เซ็นเซอร์นี้ตรวจจับพัลส์ที่เคลื่อนที่ในสายชนิดซึ่งเป็นชั่วลบและเซ็นเซอร์มีทิศตรงกันข้ามกับการเคลื่อนที่ของพัลส์ลบ



รูปที่ 4.18 การเคลื่อนที่ของพัลส์กรณีจ่ายที่ปลายสายสำหรับวงจรต่อลงดินแบบกึ่งกลางรูปแบบที่ 2

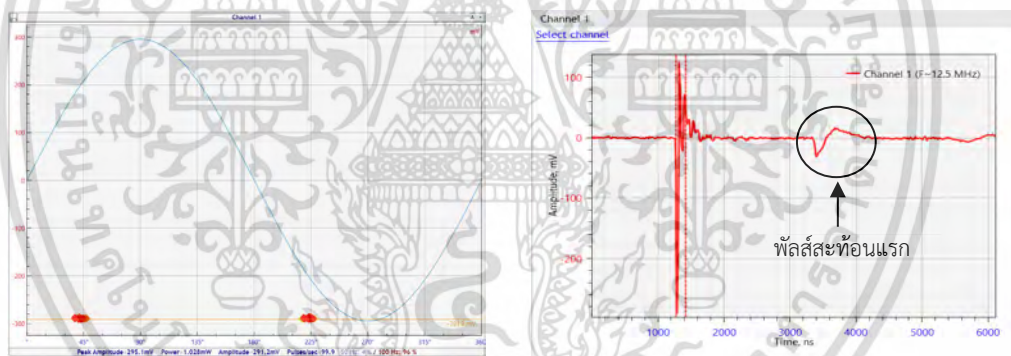
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.4 ผลการทดสอบระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีการต่อลงดินทั้งสองปลาย

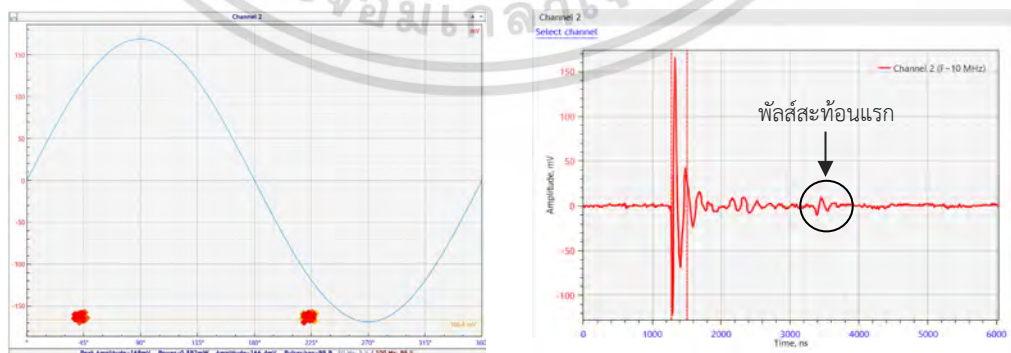
สัญญาณที่จ่ายออกจากเครื่อง PD pulse generator ในแต่ละตำแหน่งของการจ่าย PD จะใช้ขนาดเท่ากันกับการทดสอบระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีการต่อลงดินข้างเดียวที่กล่าวในหัวข้อ 4.4.1 โดยผลการทดสอบการเกิด PD แสดงรายละเอียดในตารางที่ 4.11 – 4.13 และกลุ่มสัญญาณรวมถึงลักษณะพัลส์ที่ตรวจวัดได้แสดงดังรูปที่ 4.19 - 4.21

ตารางที่ 4.11 ผลการทดสอบการต่อลงดินทั้งสองปลายกรณีจ่าย PD ต้นสาย

เซ็นเซอร์	ขนาดสัญญาณ (mV)	ขั้วสัญญาณ	พัลส์สะท้อน
HFCT No.1	291.2	ลบ	พบ
HFCT No.2	166.4	ลบ	พบ
HFCT No.3	149.5	ลบ	พบ
PD Line No.1	214.5	ลบ	พบ
PD Line No.2	102.7	ลบ	พบ

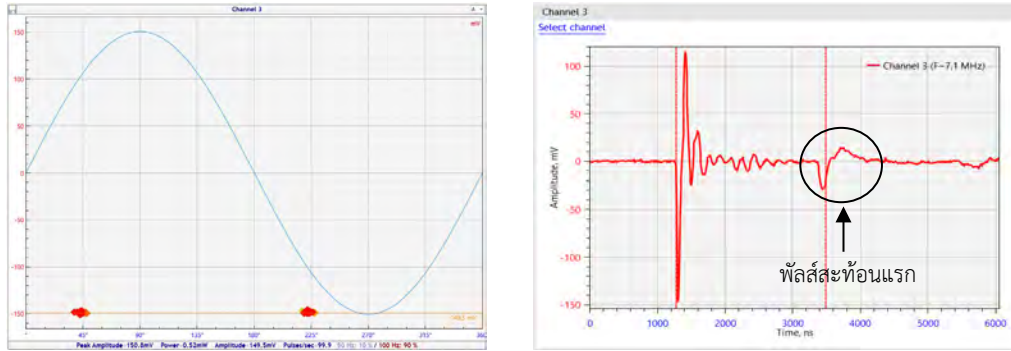


(ก) รูปแบบสัญญาณและลักษณะพัลส์ที่ตรวจวัดได้จากเซ็นเซอร์ HFCT No.1

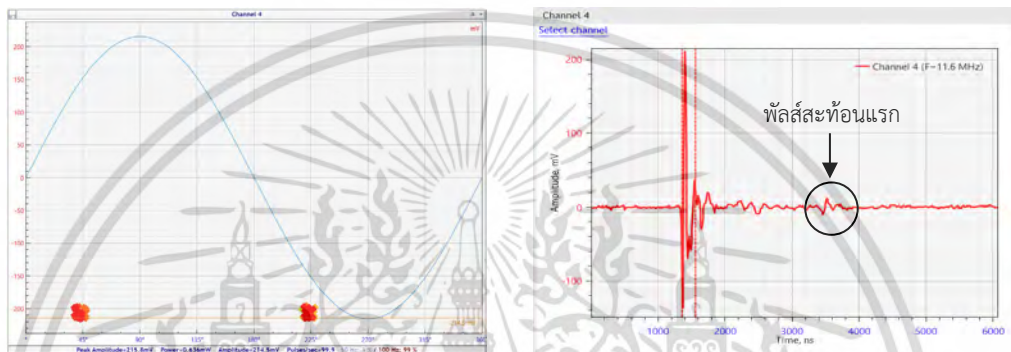


(ข) รูปแบบสัญญาณและลักษณะพัลส์ที่ตรวจวัดได้จากเซ็นเซอร์ HFCT No.2

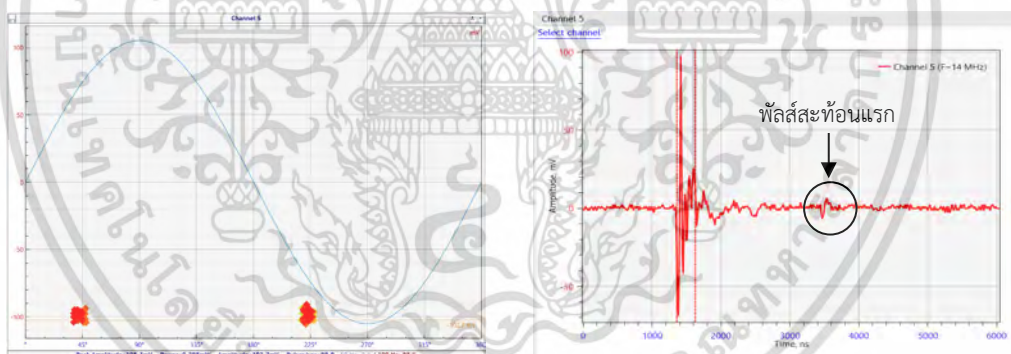
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค) รูปแบบสัญญาณและลักษณะพัลส์ที่ตรวจวัดได้จากเซ็นเซอร์ HFCT No.3



(ง) รูปแบบสัญญาณและลักษณะพัลส์ที่ตรวจวัดได้จากเซ็นเซอร์ PD Line No.1

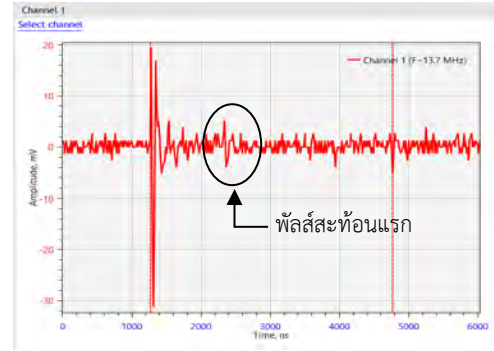
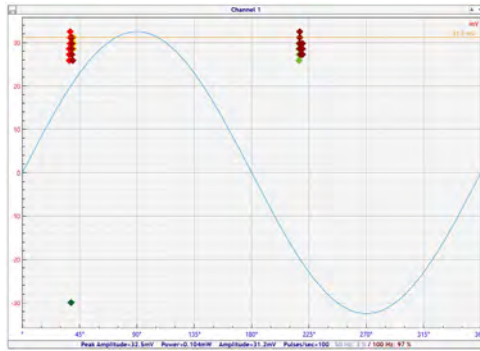


(จ) รูปแบบสัญญาณและลักษณะพัลส์ที่ตรวจวัดได้จากเซ็นเซอร์ PD Line No.2

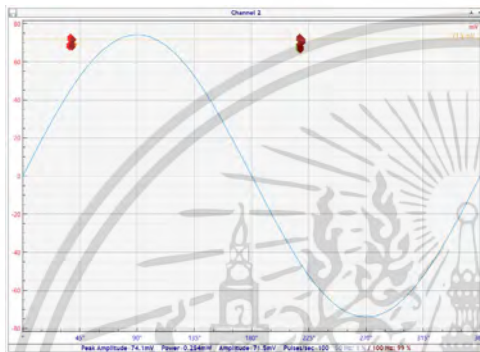
รูปที่ 4.19 ผลการทดสอบการต่อลงดินทั้งสองปลายกรณีจ่าย PD ต้นสาย

ตารางที่ 4.12 ผลการทดสอบการต่อลงดินทั้งสองปลายกรณีจ่าย PD กลางสาย

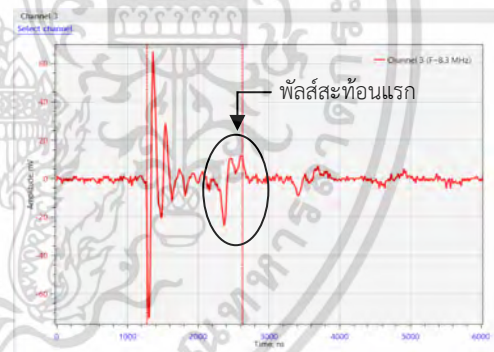
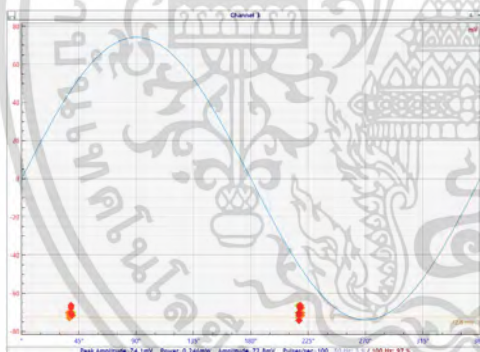
เซ็นเซอร์	ขนาดสัญญาณ (mV)	ชั่วสัญญาณ	พัลส์สะท้อน
HFCT No.1	31.2	บวก	พบ
HFCT No.2	71.5	บวก	พบ
HFCT No.3	72.8	ลบ	พบ
PD Line No.1	74.1	บวก	พบ
PD Line No.2	84.5	บวก	พบ



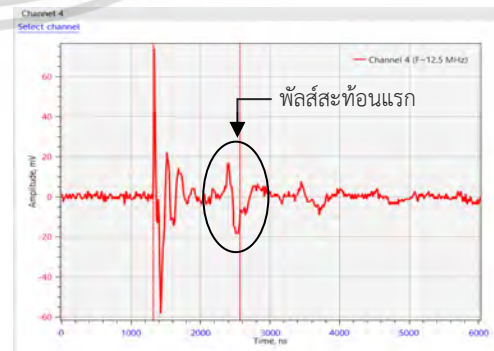
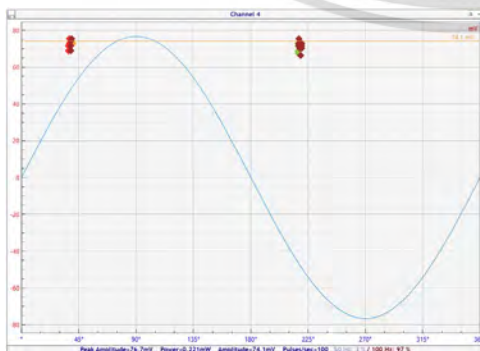
(ก) รูปแบบสัญญาณและลักษณะพัลส์ที่ตรวจวัดได้จากเซ็นเซอร์ HFCT No.1



(ข) รูปแบบสัญญาณและลักษณะพัลส์ที่ตรวจวัดได้จากเซ็นเซอร์ HFCT No.2

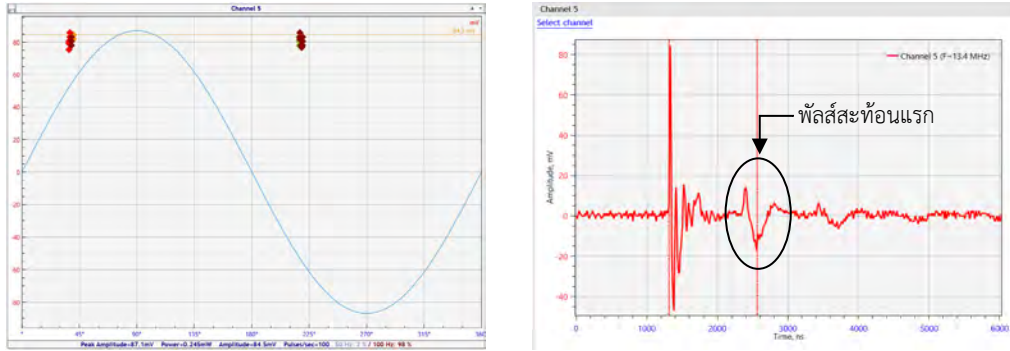


(ค) รูปแบบสัญญาณและลักษณะพัลส์ที่ตรวจวัดได้จากเซ็นเซอร์ HFCT No.3



(ง) รูปแบบสัญญาณและลักษณะพัลส์ที่ตรวจวัดได้จากเซ็นเซอร์ PD Line No.1

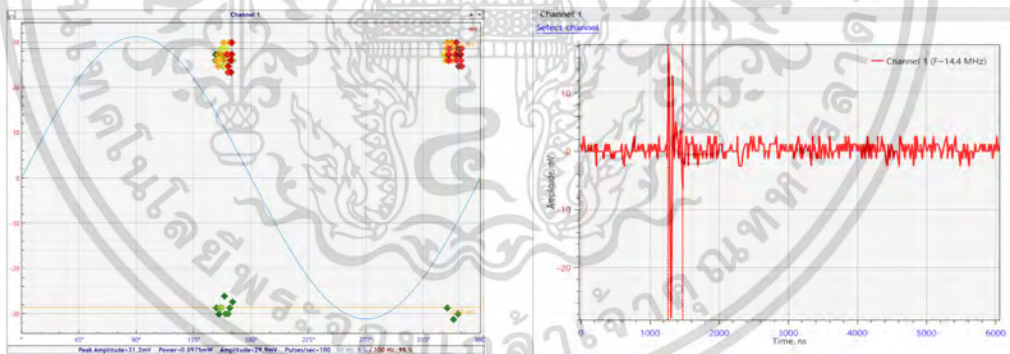
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



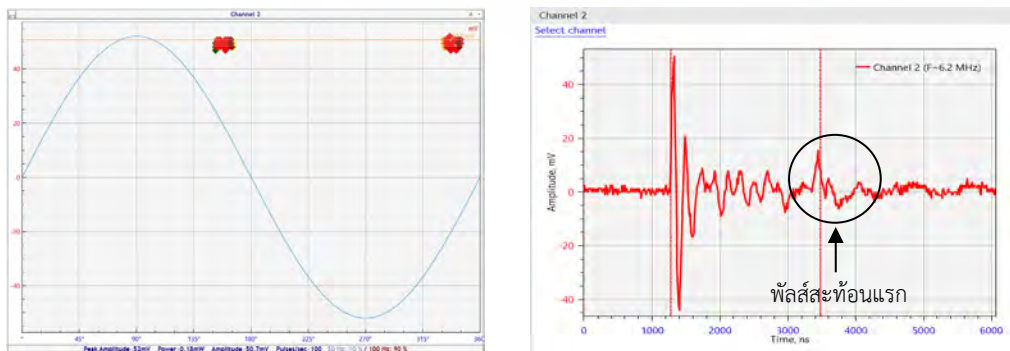
(จ) รูปแบบสัญญาณและลักษณะพัลส์ที่ตรวจวัดได้จากเซ็นเซอร์ PD Line No.2 รูปที่ 4.20 ผลการทดสอบการต่อลงดินทั้งสองปลายกรณีจ่าย PD กลางสาย

ตารางที่ 4.13 ผลการทดสอบการต่อลงดินทั้งสองปลายกรณีจ่าย PD ปลายสาย

เซ็นเซอร์	ขนาดสัญญาณ (mV)	ขั้วสัญญาณ	พัลส์สะท้อน
HFCT No.1	29.9	บวก	ไม่พบ
HFCT No.2	50.7	บวก	พบ
HFCT No.3	59.8	ลบ	พบ
PD Line No.1	52.0	บวก	พบ
PD Line No.2	54.6	บวก	พบ

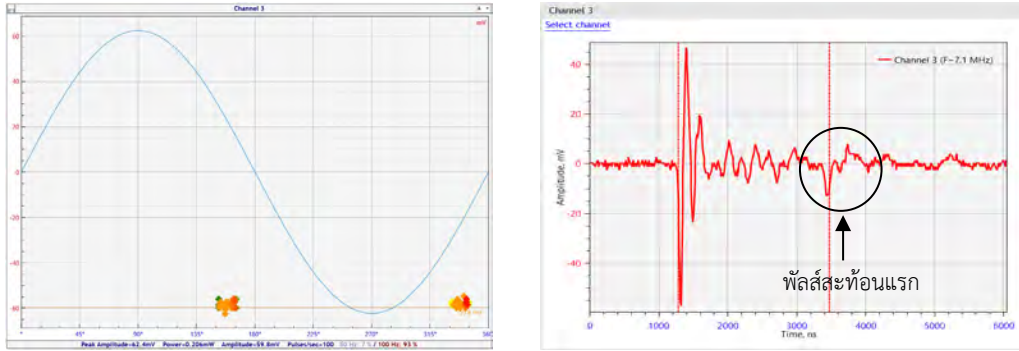


(ก) รูปแบบสัญญาณและลักษณะพัลส์ที่ตรวจวัดได้จากเซ็นเซอร์ HFCT No.1

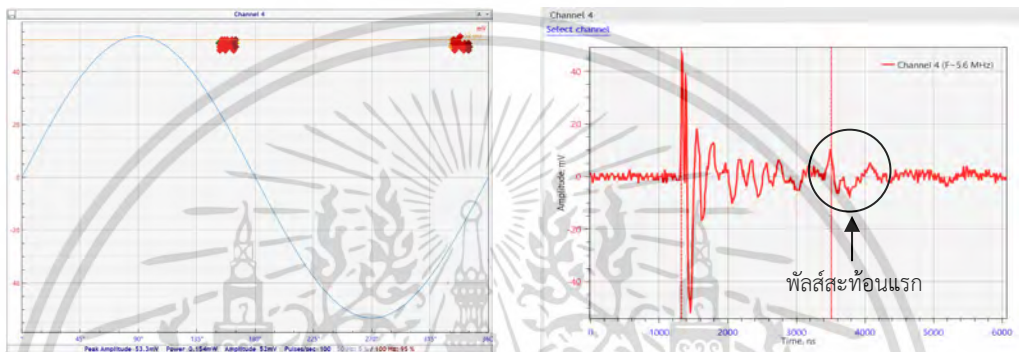


(ข) รูปแบบสัญญาณและลักษณะพัลส์ที่ตรวจวัดได้จากเซ็นเซอร์ HFCT No.2

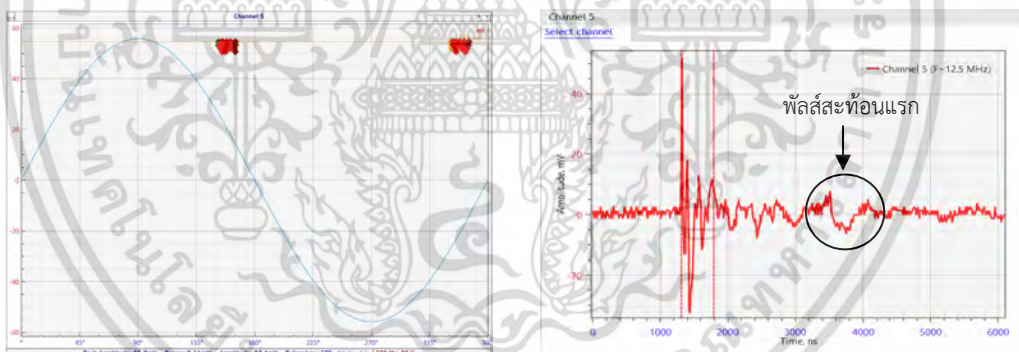
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการใช้งานเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่ภายนอกองค์กร
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค) รูปแบบสัญญาณและลักษณะพัลส์ที่ตรวจวัดได้จากเซ็นเซอร์ HFCT No.3



(ง) รูปแบบสัญญาณและลักษณะพัลส์ที่ตรวจวัดได้จากเซ็นเซอร์ PD Line No.1



(จ) รูปแบบสัญญาณและลักษณะพัลส์ที่ตรวจวัดได้จากเซ็นเซอร์ PD Line No.2

รูปที่ 4.21 ผลการทดสอบการต่อลงดินทั้งสองปลายกรณีจ่าย PD ปลายสาย

จากผลการทดสอบที่แสดงไปข้างต้นทุกตำแหน่งการจ่ายสัญญาณ PD พบว่าผลการตรวจวัดได้ออกมาในลักษณะเดียวกันกับการทดลองต่อลงดินข้างเดียว โดยการวิเคราะห์เหตุผลของข้อสัญญาณได้กล่าวอยู่ในหัวข้อ 4.1.1.1 สามารถสรุปได้ดังนี้

4.1.4.1 กรณีจ่ายพัลส์ PD ที่ต้นสายพบว่ากลุ่มสัญญาณที่เซ็นเซอร์ทุกตัวตรวจวัดได้จะอยู่ในตำแหน่งเดียวกันและเป็นขั้วลบทั้งหมด

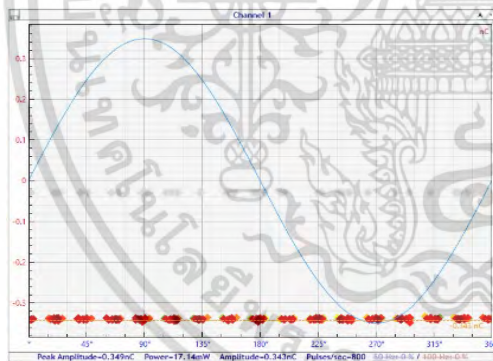
4.1.4.2 กรณีจ่ายพัลส์ PD ที่กลางสายและปลายสายพบว่ากลุ่มสัญญาณที่เซ็นเซอร์ทุกตัวตรวจวัดได้จะอยู่ในตำแหน่งเดียวกันและเป็นขั้วบวกทั้งหมด ยกเว้นเซ็นเซอร์ HFCT ที่คล้องกราวด์ เอกสารนี้เป็นเอกสารวิเคราะหฺ์สัญญาณที่เกิดจากการเชื่อมต่อเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ยูเอได้เห็นใบเซอร์เอชเอ็นทีในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.5 ผลการทดสอบระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีการต่อลงดินแบบไขว้

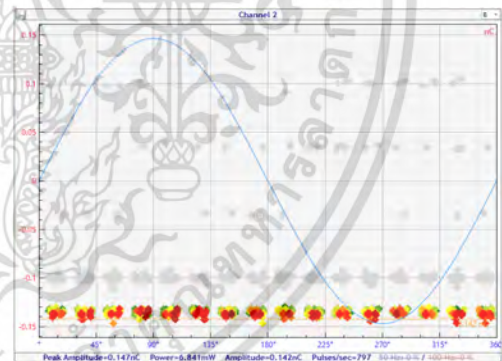
การทดสอบนี้ได้จำลองการจ่ายสัญญาณ PD ทั้งหมด 6 ตำแหน่ง คือ A1-2 B1-2 และ C1-2 แสดงดังรูปที่ 4.27 การทดสอบนี้มีเป้าหมายเพื่อวิเคราะห์ว่าสัญญาณ PD มาจากเฟสอะไรและมาจากทางด้านไหน โดยผลการทดสอบการเกิด PD แสดงรายละเอียดในตารางที่ 4.14 และกลุ่มสัญญาณรวมถึงลักษณะพัลส์ที่ตรวจวัดได้แสดงดังรูปที่ 4.22 - 4.27

ตารางที่ 4.14 ผลการทดสอบการต่อลงดินแบบไขว้

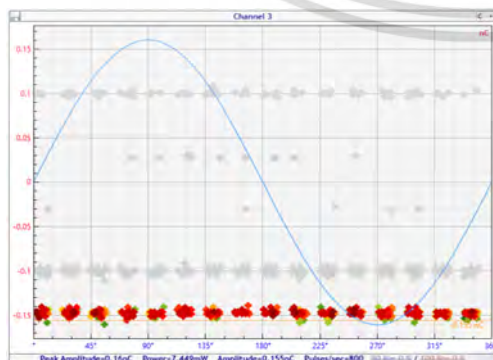
ตำแหน่ง จ่าย PD	ขนาด PD (nC) ที่ตรวจวัดจากเซ็นเซอร์ HFCT			ข้อสัญญาณ
	เฟส A (Ch1)	เฟส B (Ch2)	เฟส C (Ch3)	
A1	0.343	0.142	0.155	ลบ
B1	0.147	0.379	0.175	ลบ
C1	0.168	0.16	0.301	ลบ
A2	0.283	0.125	0.126	บวก
B2	0.126	0.333	0.146	บวก
C2	0.157	0.142	0.318	บวก



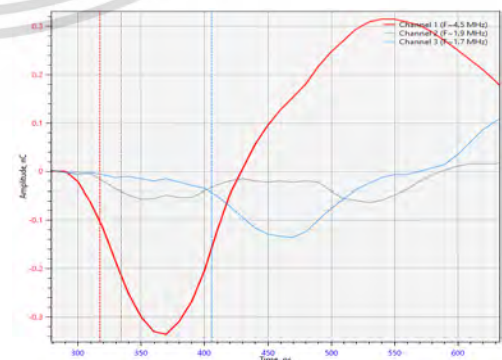
(ก) เฟส A (Ch1)



(ข) เฟส B (Ch2)



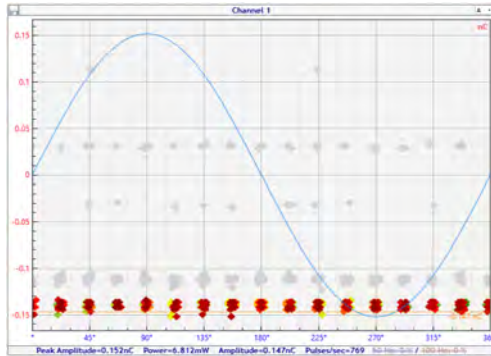
(ค) เฟส C (Ch3)



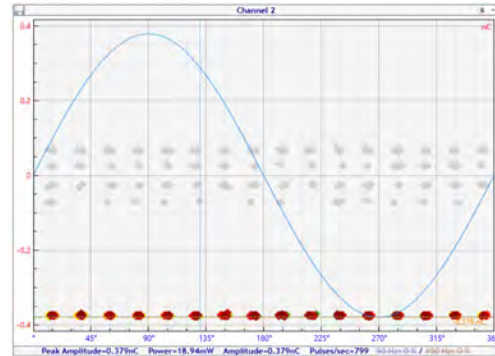
(ง) การเปรียบเทียบพัลส์แต่ละเซ็นเซอร์

รูปที่ 4.22 ผลการทดสอบการต่อลงดินแบบไขว้กรณีจ่าย PD ที่ตำแหน่ง A1

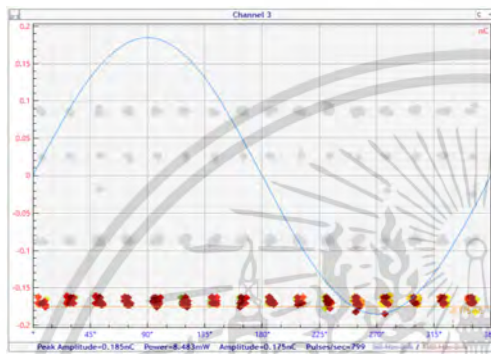
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



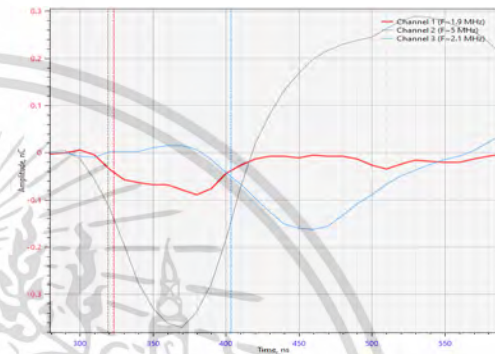
(ก) เฟส A (Ch1)



(ข) เฟส B (Ch2)

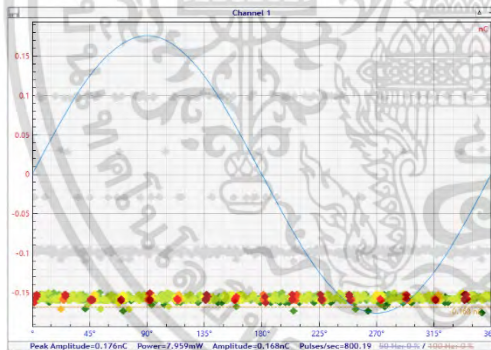


(ค) เฟส C (Ch3)

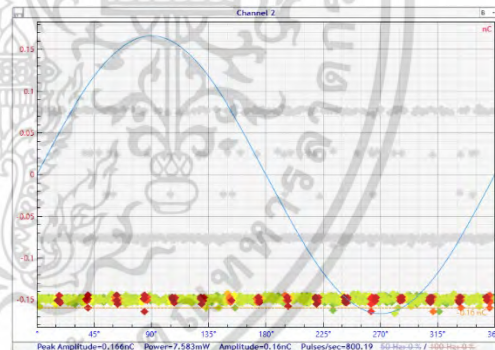


(ง) การเปรียบเทียบพัลส์แต่ละเซ็นเซอร์

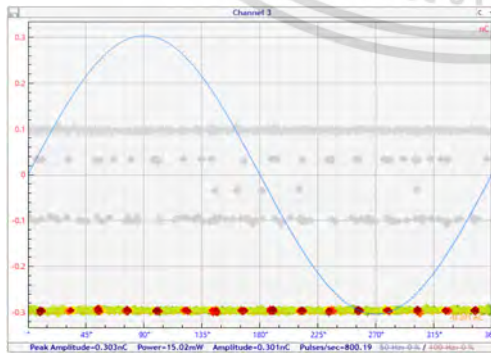
รูปที่ 4.23 ผลการทดสอบการต่อลงดินแบบไขว้กรณีจ่าย PD ที่ตำแหน่ง B1



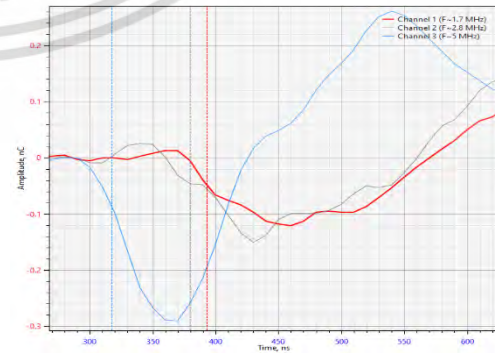
(ก) เฟส A (Ch1)



(ข) เฟส B (Ch2)



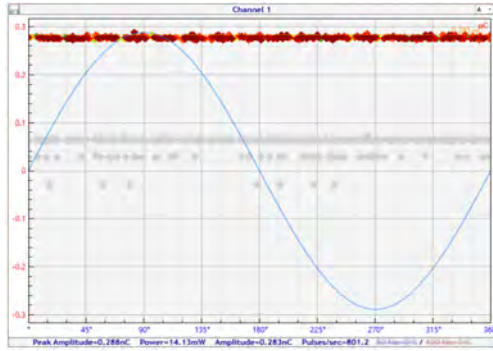
(ค) เฟส C (Ch3)



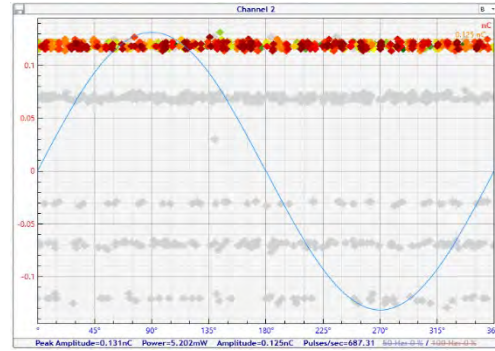
(ง) การเปรียบเทียบพัลส์แต่ละเซ็นเซอร์

รูปที่ 4.24 ผลการทดสอบการต่อลงดินแบบไขว้กรณีจ่าย PD ที่ตำแหน่ง C1

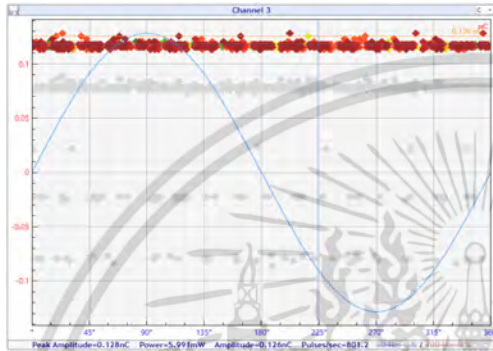
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



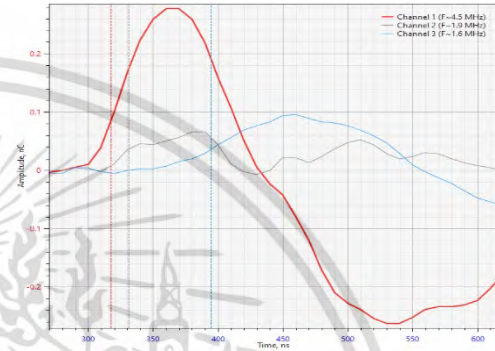
(ก) เฟส A (Ch1)



(ข) เฟส B (Ch2)

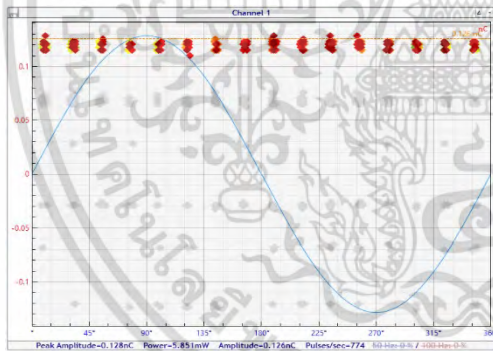


(ค) เฟส C (Ch3)

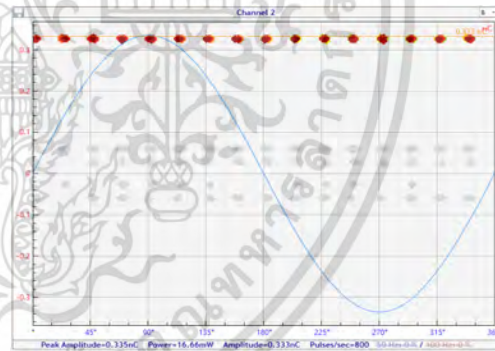


(ง) การเปรียบเทียบพัลส์แต่ละเซ็นเซอร์

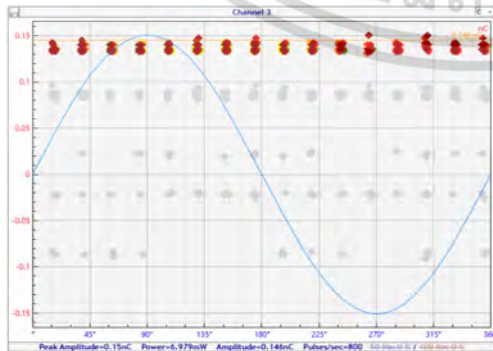
รูปที่ 4.25 ผลการทดสอบการต่อลงดินแบบไขว้กรณีง่าย PD ที่ตำแหน่ง A2



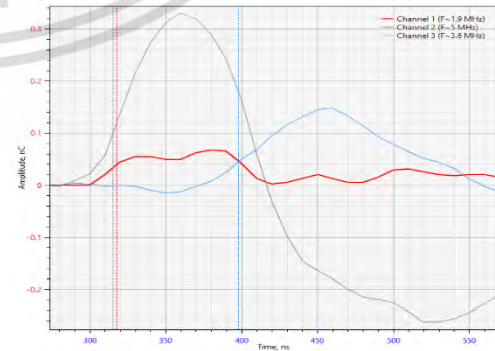
(ก) เฟส A (Ch1)



(ข) เฟส B (Ch2)



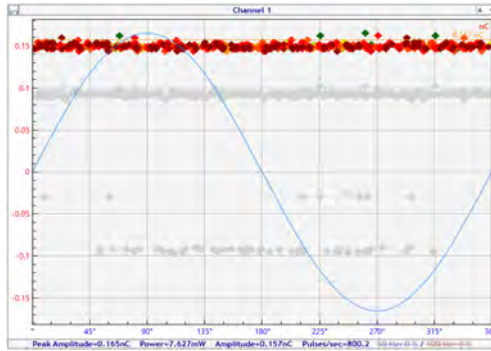
(ค) เฟส C (Ch3)



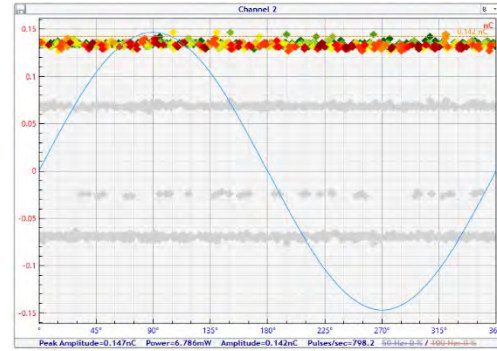
(ง) การเปรียบเทียบพัลส์แต่ละเซ็นเซอร์

รูปที่ 4.26 ผลการทดสอบการต่อลงดินแบบไขว้กรณีง่าย PD ที่ตำแหน่ง B2

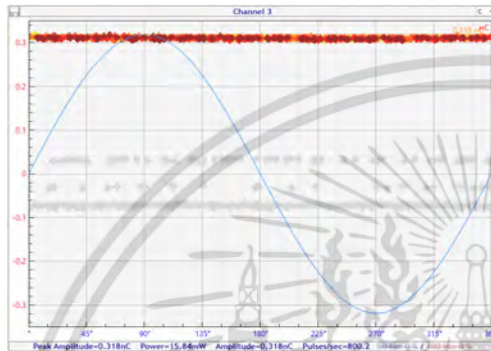
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



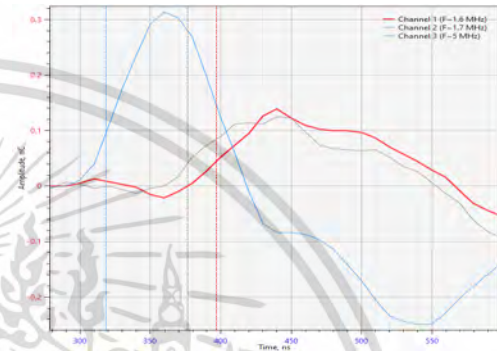
(ก) เฟส A (Ch1)



(ข) เฟส B (Ch2)



(ค) เฟส C (Ch3)



(ง) การเปรียบเทียบพัลส์แต่ละเซ็นเซอร์

รูปที่ 4.27 ผลการทดสอบการต่อลงดินแบบไขว้กรณีง่าย PD ที่ตำแหน่ง C2

จากผลการทดสอบที่แสดงไปข้างต้นสามารถสรุปได้ดังนี้

4.1.5.1 กรณีง่ายพัลส์ PD ที่ด้านซ้ายตำแหน่ง A1 B1 และ C1

- ขั้วของพัลส์จากทุกเซ็นเซอร์จะขึ้นในด้านลบทั้งหมด
- เมื่อจ่าย PD ที่ตำแหน่งใด ๆ เซ็นเซอร์ที่ติดตั้งใกล้ตำแหน่งนั้นจะตรวจวัดสัญญาณ PD ได้ ขนาดสูงที่สุด และมีระยะเวลาของพัลส์นำหน้าเซ็นเซอร์ตัวอื่น ๆ

4.1.5.1 กรณีง่ายพัลส์ PD ที่ด้านขวาตำแหน่ง A2 B2 และ C2

- ขั้วของพัลส์จากทุกเซ็นเซอร์จะขึ้นในด้านบวกทั้งหมด
- เมื่อจ่าย PD ที่ตำแหน่งใด ๆ เซ็นเซอร์ที่ติดตั้งใกล้ตำแหน่งนั้นจะตรวจวัดสัญญาณ PD ได้ ขนาดสูงที่สุด และมีระยะเวลาของพัลส์นำหน้าเซ็นเซอร์ตัวอื่น ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

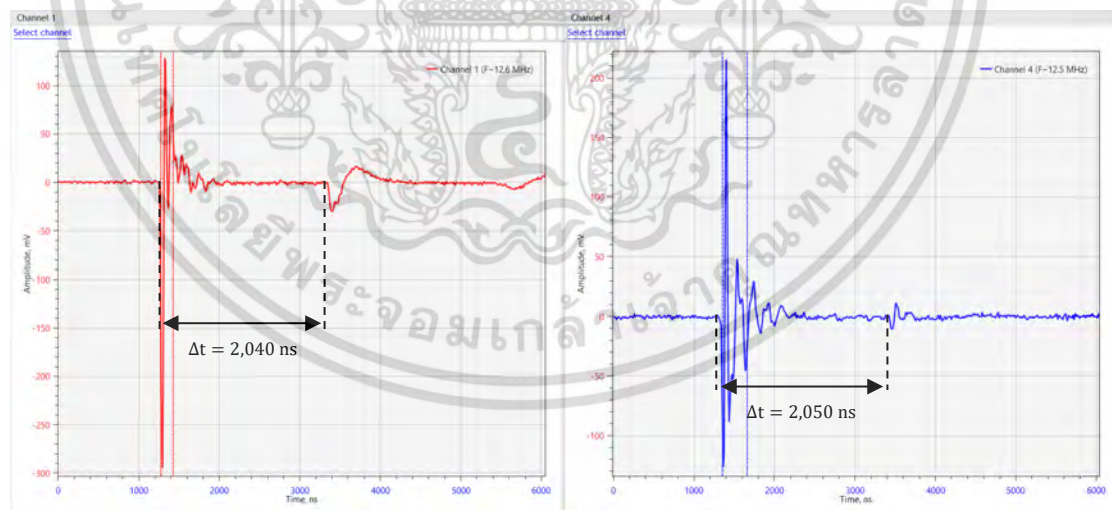
4.1.6 การวิเคราะห์เพื่อระบุตำแหน่งจุดกำเนิดของ PD

สำหรับการวิเคราะห์สัญญาณเพื่อระบุตำแหน่งจุดเกิด PD หากสัญญาณที่วัดจากเซ็นเซอร์ใด ๆ มีลักษณะของพัลส์สะท้อนเกิดขึ้นก็สามารถใช้วิธี TDR ได้ พัลส์สะท้อนจะมีลักษณะที่คล้ายกับพัลส์ต้นแบบแต่จะมีขนาดที่เล็กกว่าและมีความกว้างพัลส์ที่มากกว่า อย่างไรก็ตามควรมีรายละเอียดเกี่ยวกับความยาวของสายโคแอกเซียลหรือสายเคเบิลที่ทดสอบเพื่อนำไปเป็นข้อมูลยืนยันว่าพัลส์ลูกที่สองที่พบนั้นเป็นพัลส์สะท้อนของพัลส์ลูกแรกจริง ๆ

จากรูปที่ 4.28 ค่าผลต่างระยะเวลาของพัลส์ลูกแรกกับพัลส์สะท้อนที่ตรวจวัดได้จากกรณีง่าย PD ที่ต้นสายและปลายสาย โดยภาพรวมผลต่าง Δt อยู่ที่ประมาณ 2,045 ns ซึ่งระยะสาย RG58 ที่ใช้ทดสอบมีความยาวรวมประมาณ 200 เมตร เมื่อนำไปคำนวณตามสมการที่ 2.1 แล้วจะได้ระยะห่างจากตำแหน่งที่ติดตั้งเซ็นเซอร์ถึงจุดกำเนิด PD ประมาณ 2.45 เมตร ซึ่งค่าคลาดเคลื่อนที่มีอาจเป็นผลมาจากการใช้สายสัญญาณที่ต่อเซ็นเซอร์เข้ากับเครื่องวัด PD ที่มีความยาว 5 เมตร จึงอาจจะทำให้เกิดการตีเลยของสัญญาณได้

จากรูปที่ 4.29 ค่าผลต่างระยะเวลาของพัลส์ลูกแรกกับพัลส์สะท้อนที่ตรวจวัดได้จากกรณีง่าย PD ที่กลางสายจะแตกต่างจากกรณีอื่นคือมีค่าประมาณ 1,035 ns เมื่อนำไปคำนวณตามสมการที่ 2.1 แล้วจะได้ระยะห่างจากตำแหน่งที่ติดตั้งเซ็นเซอร์ถึงจุดกำเนิด PD ประมาณ 97.54 เมตร

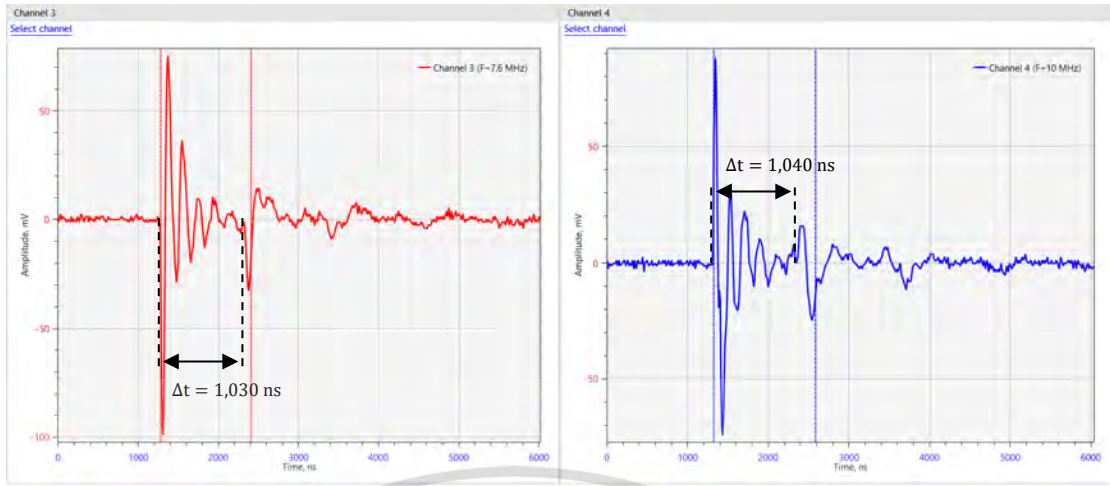
สำหรับการวิเคราะห์ด้วยวิธี TRD จะแสดงวิธีการคำนวณอย่างละเอียดไว้ในภาคผนวก ก



(ก) เซ็นเซอร์ HFCT

(ข) เซ็นเซอร์ PD Line

รูปที่ 4.28 ตัวอย่างพัลส์สะท้อนของการทดลองดินข้างเดียวกรณีง่าย PD ต้นสายหรือปลายสาย

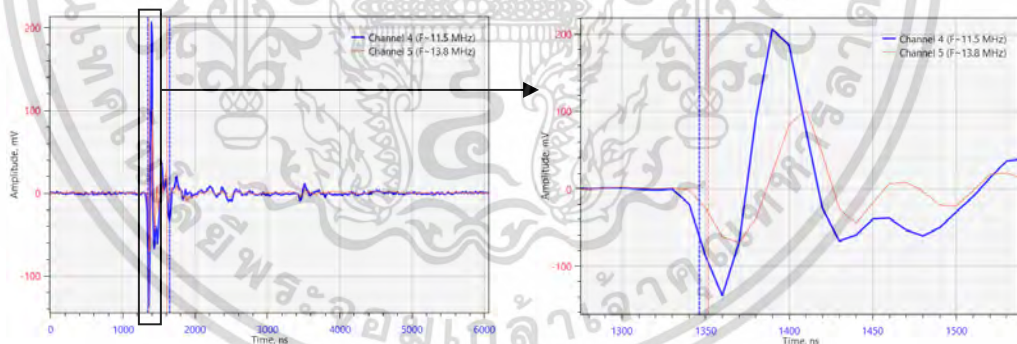


(ก) เซ็นเซอร์ HFCT

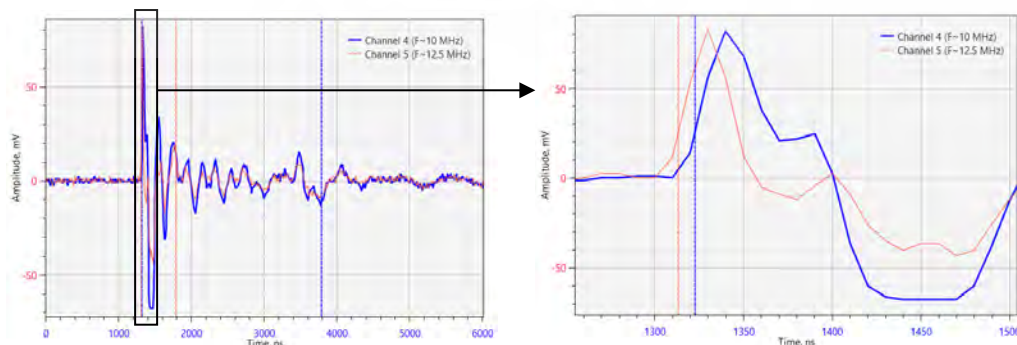
(ข) เซ็นเซอร์ PD Line

รูปที่ 4.29 ตัวอย่างพัลส์สะท้อนของการต่อลงดินข้างเดียวกรณีจ่าย PD กลางสาย

อีกหนึ่งวิธีที่ใช้ระบุตำแหน่งของ PD คือวิธี TOA สำหรับวิธีนี้จะพิจารณาความแตกต่างของระยะเวลาของพัลส์ที่ตรวจวัดจากเซ็นเซอร์ PD Line ทั้งสองตัวที่ติดตั้งในระยะห่างกันไม่ต่ำกว่า 2 เมตร จากรูปที่ 4.30 จะเห็นได้ว่าในกรณีจ่าย PD มาจากทางฝั่ง PD Line No.1 พัลส์ No.1 (กราฟสีน้ำเงิน) จะนำหน้าพัลส์ No.2 (กราฟสีแดง) ที่มาจากเซ็นเซอร์ PD Line No.2 แต่หากจ่าย PD สลับฝั่งผลที่ได้ก็จะตรงกันข้าม ในขณะที่หากจ่าย PD ระหว่างกลางขั้วของสัญญาณที่วัดได้จะตรงกันข้ามกัน

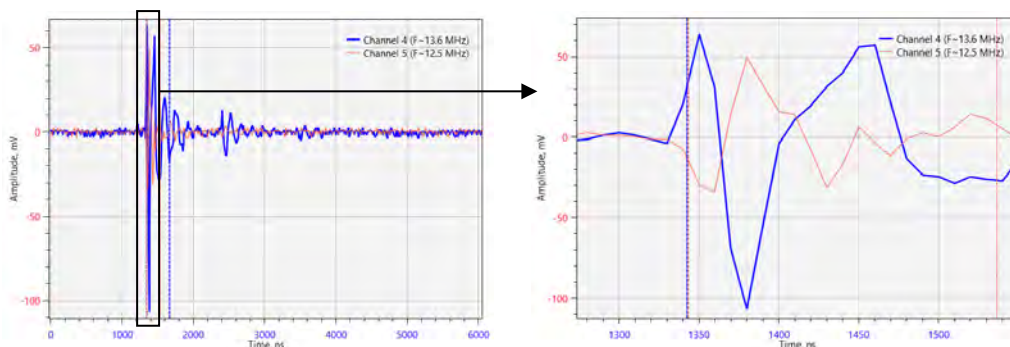


(ก) จ่าย PD ทางฝั่งเซ็นเซอร์ PD Line No.1



(ข) จ่าย PD ทางฝั่งเซ็นเซอร์ PD Line No.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญูญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค) ถ่าย PD ตรงกลางระหว่างเซ็นเซอร์ PD Line No.1 และ No.2

รูปที่ 4.30 การเปรียบเทียบระยะเวลาของพัลส์ที่ตรวจวัดจากเซ็นเซอร์ PD Line ทั้งสองตัว

4.2 ผลการทดสอบสัญญาณ PD ในภาคสนาม

4.2.1 ผลการทดสอบแบบออนไลน์สำหรับระบบสายเคเบิลใต้ดิน 115kV

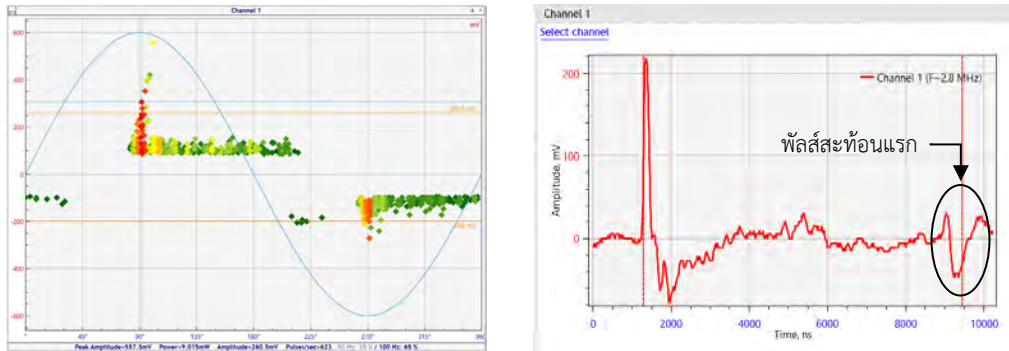
ผลการทดสอบแบบออนไลน์จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ 1. ผลการตรวจวัดจากเซ็นเซอร์ HFCT โดยจะทำการเปรียบเทียบสัญญาณ PD ทั้งรูปแบบและลักษณะของรูปคลื่นพัลส์ PD ที่ได้จากการคล้องเซ็นเซอร์ในแบบที่แตกต่างกันและวิเคราะห์สัญญาณเพื่อระบุตำแหน่งจุดเกิด PD 2. ผลการตรวจวัดจากเซ็นเซอร์ PD Line โดยจะทำการเปรียบเทียบสัญญาณ PD ระหว่างเซ็นเซอร์ทั้ง 2 ตัว และวิเคราะห์สัญญาณเพื่อระบุตำแหน่งจุดเกิด PD

จากผลการทดสอบจากเซ็นเซอร์ HFCT พบว่าเซ็นเซอร์ทั้ง 3 ตัวตรวจวัดสัญญาณ PD ได้ในรูปแบบที่เหมือนกันแต่มีขนาดที่แตกต่างกันแสดงในตารางที่ 4.15 โดยเซ็นเซอร์ HFCT No.1 จะตรวจวัดสัญญาณได้ชัดเจนมากที่สุด เมื่อพิจารณาลักษณะสัญญาณพัลส์ PD พบว่าเซ็นเซอร์ทั้ง 3 ตัวมีลักษณะที่คล้ายคลึงกันและพบพัลส์สะท้อนเช่นกัน แต่สัญญาณพัลส์จากเซ็นเซอร์ HFCT No.2 จะมีความไม่ชัดเจนและพิจารณาได้ยากมากที่สุดแสดงดังรูปที่ 4.31

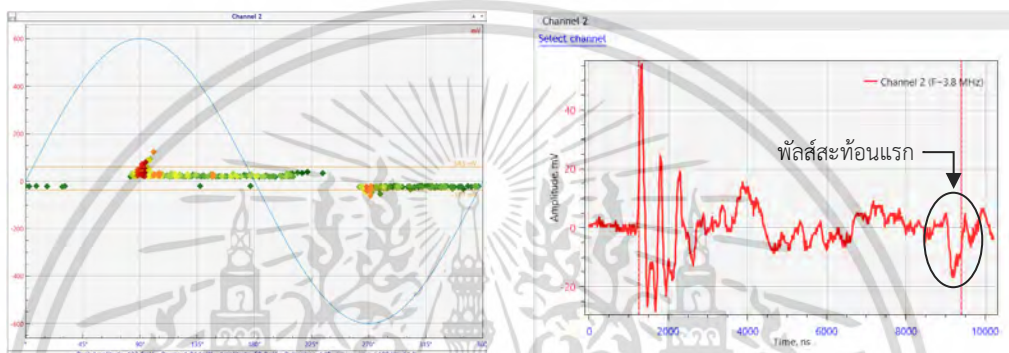
ตารางที่ 4.15 ผลการทดสอบแบบออนไลน์สำหรับระบบสายเคเบิลใต้ดิน 115kV จากเซ็นเซอร์ HFCT

เซ็นเซอร์	การติดตั้งเซ็นเซอร์	ขนาดสัญญาณ (mV)	พัลส์สะท้อน
HFCT No.1	คล้องเคเบิลและสายชิลด์กราวด์	260.5	พบ
HFCT No.2	คล้องเคเบิล	59.8	พบ
HFCT No.3	คล้องสายชิลด์กราวด์	189.8	พบ

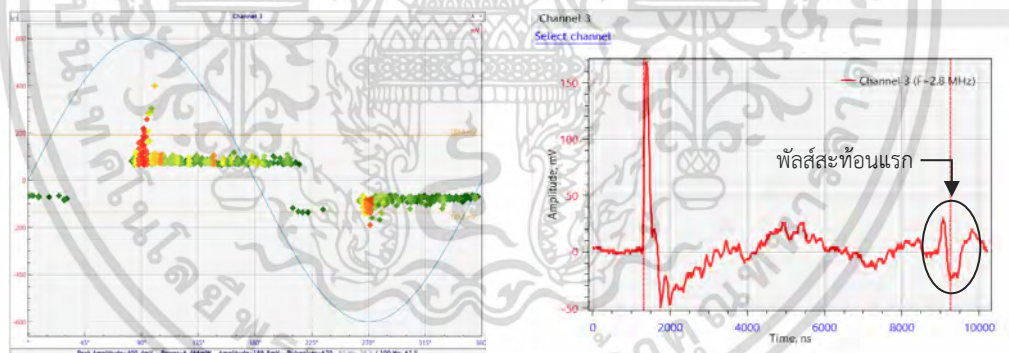
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) HFCT No.1



(ข) HFCT No.2

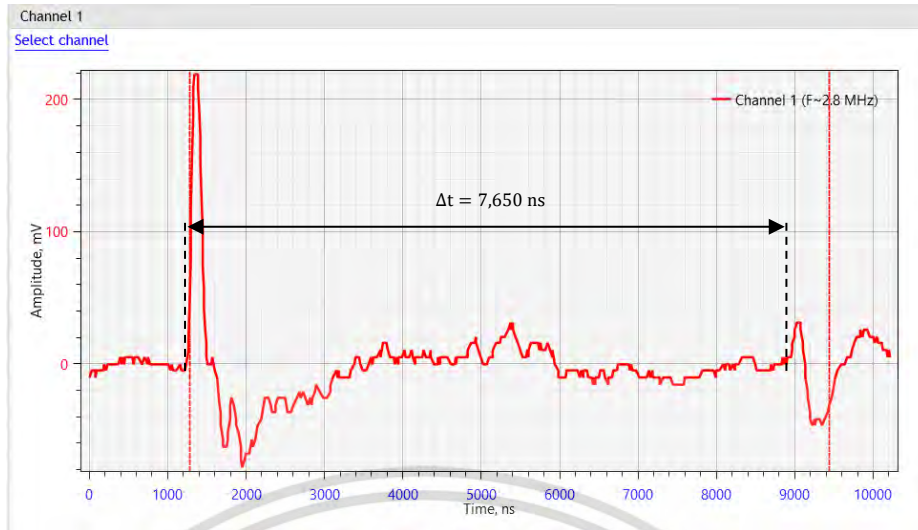


(ค) HFCT No.3

รูปที่ 4.31 ผลการทดสอบแบบออนไลน์สำหรับระบบสายเคเบิลใต้ดิน 115kV จากเซ็นเซอร์ HFCT

สำหรับการวิเคราะห์สัญญาณเพื่อระบุตำแหน่งจุดเกิด PD ในกรณีนี้จะใช้วิธี TDR เนื่องจากพบสัญญาณ PD ที่มีพัลส์สะท้อนเกิดขึ้น จากรูปที่ 4.32 พบว่าผลต่างระยะเวลาของสัญญาณพัลส์ PD ลูกแรกกับสัญญาณสะท้อนของพัลส์ PD มีค่าเท่ากับ 7,650 ns เมื่อนำไปคำนวณตามสมการที่ 2.1 จะได้ระยะจุดกำเนิด PD อยู่ห่างจากตำแหน่งที่ติดตั้งเซ็นเซอร์ประมาณ 1.13 เมตร ซึ่งเป็นบริเวณที่ใกล้เคียงกับหัวเทอมิเนเตอร์ สำหรับวิธีการคำนวณอย่างละเอียดจะแสดงไว้ในภาคผนวก ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

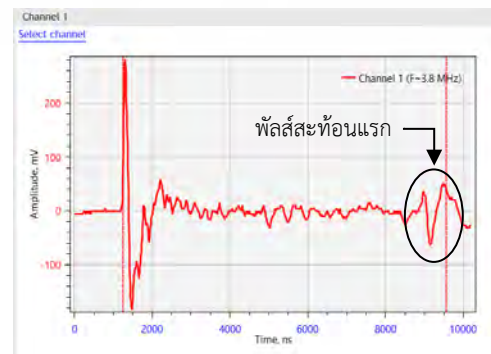
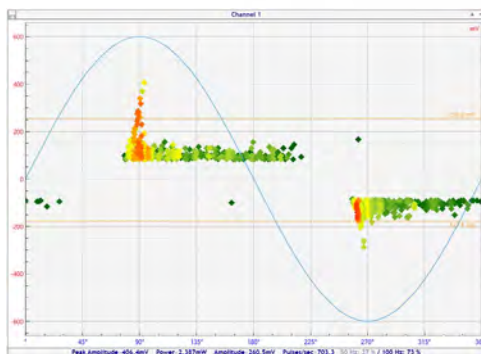


รูปที่ 4.32 การเปรียบเทียบระยะเวลาของพัลส์ PD ลูกแรกกับลูกสะท้อนจากเซ็นเซอร์ HFCT

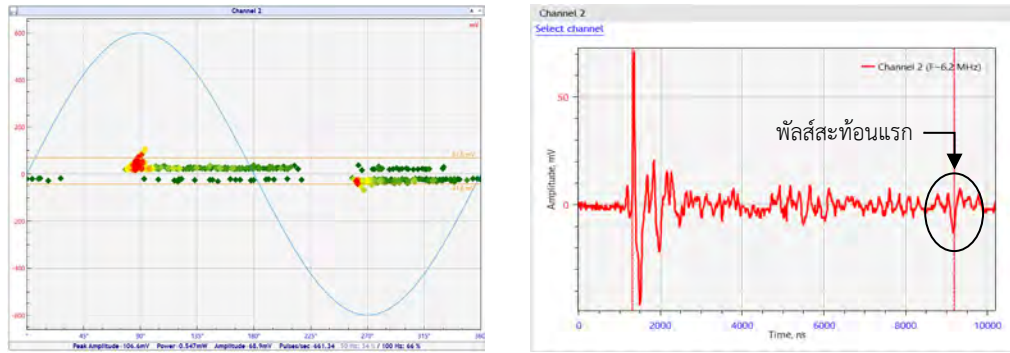
จากผลการทดสอบจากเซ็นเซอร์ PD Line พบว่าเซ็นเซอร์ทั้ง 2 ตัวตรวจวัดสัญญาณ PD ได้ในรูปแบบที่เหมือนกันแต่ขนาดที่ตรวจวัดได้จะลดลงเมื่อมีการเพิ่มระยะเซ็นเซอร์ให้ติดตั้งไกลจากหัวเทอมิเนเตอร์มากขึ้นแสดงในตารางที่ 4.16 เมื่อพิจารณาลักษณะสัญญาณพัลส์ PD พบว่าเซ็นเซอร์ทั้ง 3 ตัวมีลักษณะที่คล้ายคลึงกันและพบพัลส์สะท้อนเช่นกัน โดยเฉพาะเซ็นเซอร์ PD Line No.1 จะมีความชัดเจนที่สุดแสดงดังรูปที่ 4.33

ตารางที่ 4.16 ผลการทดสอบแบบออนไลน์สำหรับระบบสายเคเบิลใต้ดิน 115kV จากเซ็นเซอร์ PD Line

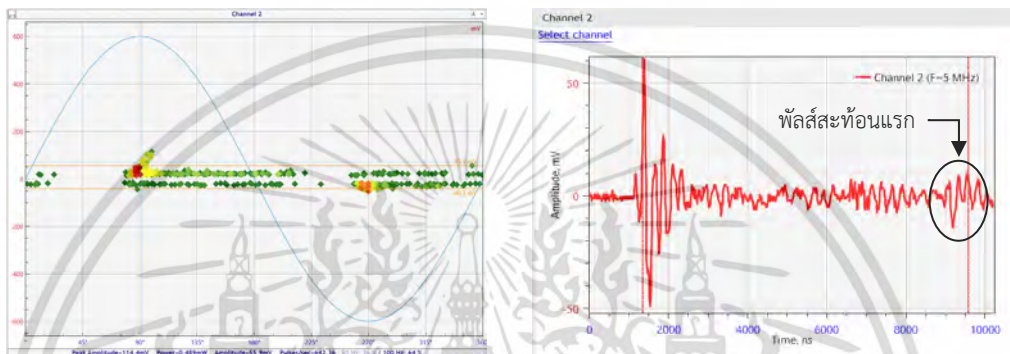
เซ็นเซอร์	การติดตั้งเซ็นเซอร์	ขนาดสัญญาณ (mV)	พัลส์สะท้อน
PD Line No.1	ติดตั้งที่สายเคเบิลชั้น 5	260.5	พบ
PD Line No.2	ติดตั้งที่สายเคเบิลชั้น 3	68.9	พบ
PD Line No.2	ติดตั้งที่สายเคเบิลชั้น 2	55.9	พบ



(ก) PD Line No.1 ติดตั้งชั้น 5
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



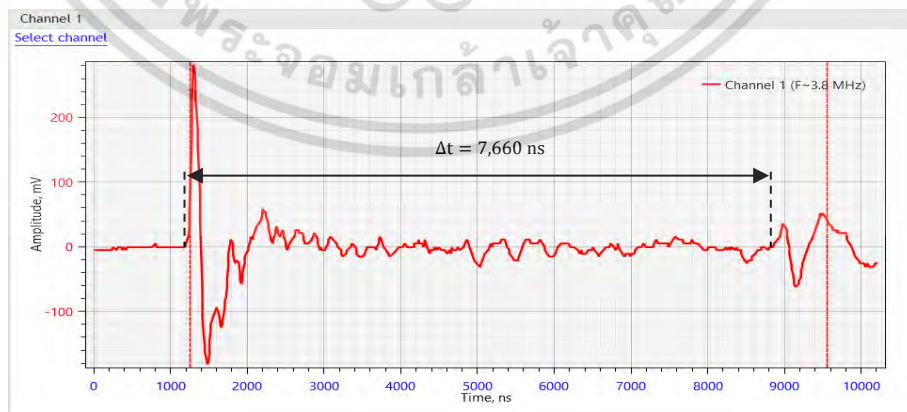
(ข) PD Line No.2 ติดตั้งชั้น 3



(ค) PD Line No.2 ติดตั้งชั้น 2

รูปที่ 4.33 ผลการทดสอบแบบออนไลน์สำหรับระบบสายเคเบิลใต้ดิน 115kV จากเซ็นเซอร์ PD Line

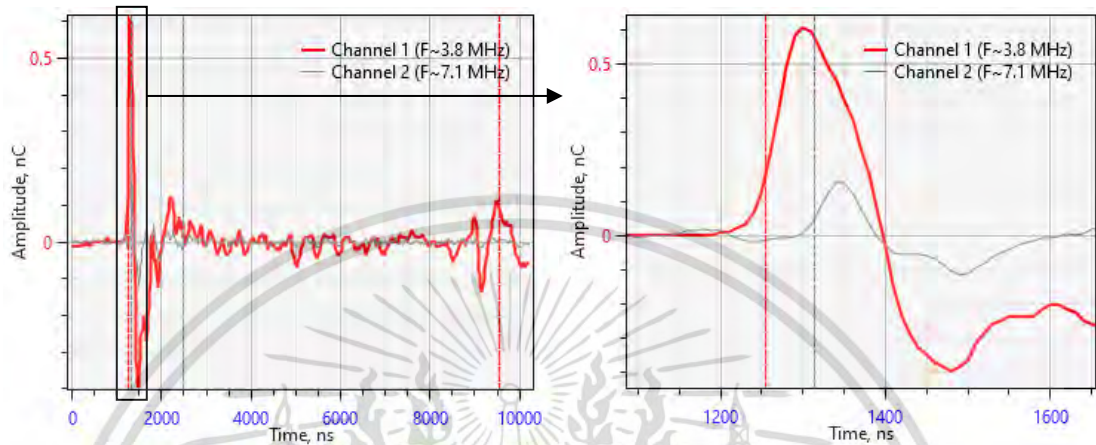
สำหรับการวิเคราะห์สัญญาณเพื่อระบุตำแหน่งจุดเกิด PD ในกรณีนี้สามารถใช้วิธี TDR ได้ เช่นเดียวกับผลจากเซ็นเซอร์ HFCT เนื่องจากพบสัญญาณ PD ที่มีพัลส์สะท้อนเกิดขึ้น จากรูปที่ 4.34 พบว่าผลต่างระยะเวลาของพัลส์ PD ลูกแรกกับพัลส์สะท้อนมีค่าเท่ากับ 7,660 ns เมื่อนำไปคำนวณตามสมการที่ 2.1 จะได้ระยะจุดกำเนิด PD อยู่ห่างจากตำแหน่งที่ติดตั้งเซ็นเซอร์ประมาณ 1.95 เมตร ซึ่งเป็นบริเวณที่ใกล้เคียงกับหัวเทอมิเนเตอร์



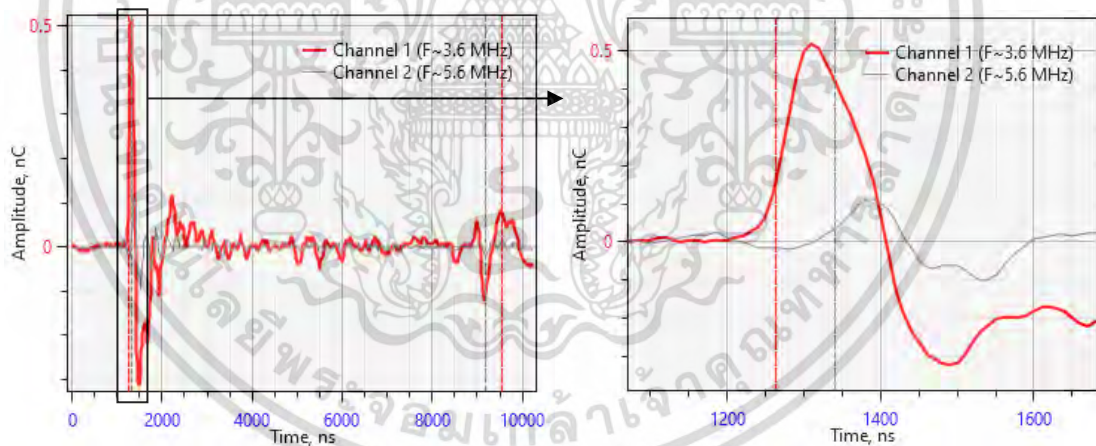
รูปที่ 4.34 การเปรียบเทียบระยะเวลาของพัลส์ PD ลูกแรกกับลูกสะท้อนจากเซ็นเซอร์ PD Line สำหรับการทดสอบแบบออนไลน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ยังสามารถใช้วิธี TOA ได้เช่นกัน โดยเปรียบเทียบจากสัญญาณพัลส์ PD ที่ตรวจวัดได้จากเซ็นเซอร์ PD Line No.1 และ No.2 แสดงดังรูปที่ 4.35 และ 4.36 พบว่าพัลส์ PD จากเซ็นเซอร์ตัวที่ 1 (กราฟเส้นสีแดง) มีเวลานำหน้าพัลส์ PD จากเซ็นเซอร์ตัวที่ 2 (กราฟเส้นสีเทา) จึงสามารถพิจารณาได้ว่าจุดกำเนิด PD จะอยู่ในบริเวณที่ใกล้เคียงกับหัวเทอมิเนเตอร์



รูปที่ 4.35 การเปรียบเทียบพัลส์ PD ระหว่างเซ็นเซอร์ PD Line No.1 (ชั้น 5) และ PD Line No.2 (ชั้น 3)



รูปที่ 4.36 การเปรียบเทียบพัลส์ PD ระหว่างเซ็นเซอร์ PD Line No.1 (ชั้น 5) และ PD Line No.2 (ชั้น 2)

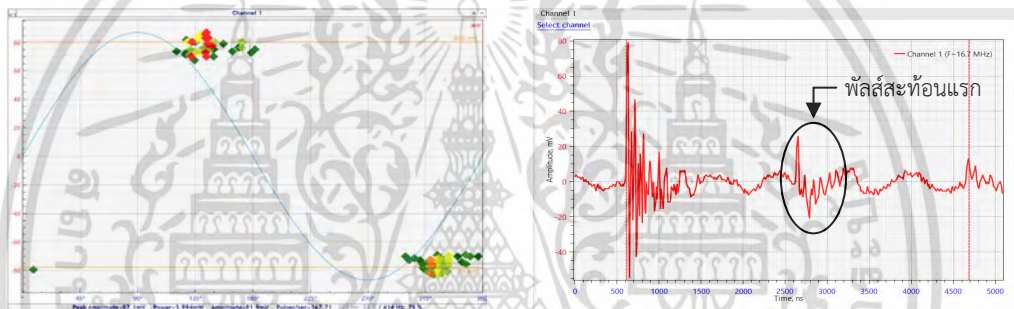
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 ผลการทดสอบแบบออฟไลน์สำหรับระบบสายเคเบิลใต้ดิน 115kV

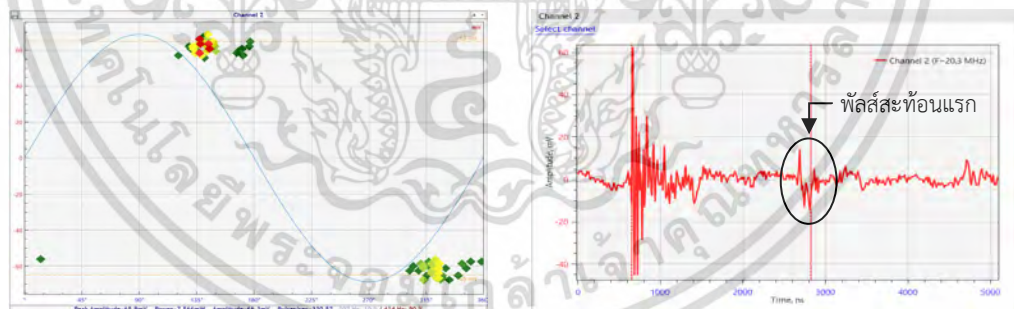
ผลการทดสอบแบบออฟไลน์จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ผลการตรวจวัดจากเซ็นเซอร์ HFCT และเซ็นเซอร์ PD Line ที่ถูกติดตั้งไว้ทางฝั่งลานโกเท่านั้นแสดงในตารางที่ 4.17 ในส่วนของรูปแบบสัญญาณ PD และลักษณะพัลส์ PD แสดงดังรูปที่ 4.37

ตารางที่ 4.17 ผลการทดสอบแบบออฟไลน์สำหรับระบบสายเคเบิลใต้ดิน 115kV

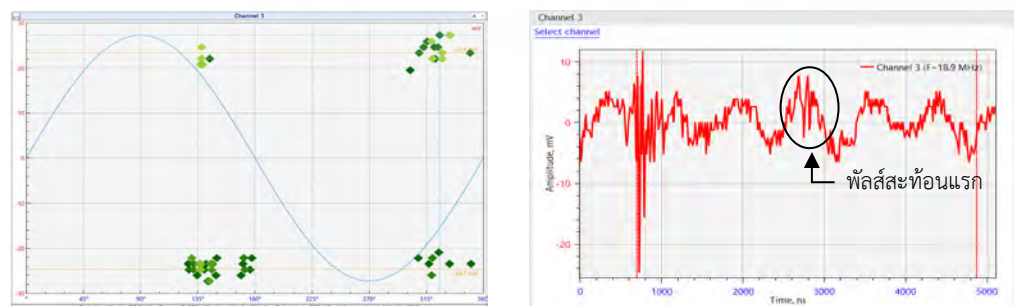
เซ็นเซอร์	ขนาดสัญญาณ (mV)	พัลส์สะท้อน
HFCT	81.9	พบ
PD Line No.1	66.3	พบ
PD Line No.2	26.0	พบ



(ก) เซ็นเซอร์ HFCT



(ข) เซ็นเซอร์ PD Line No.1



(ค) เซ็นเซอร์ PD Line No.2

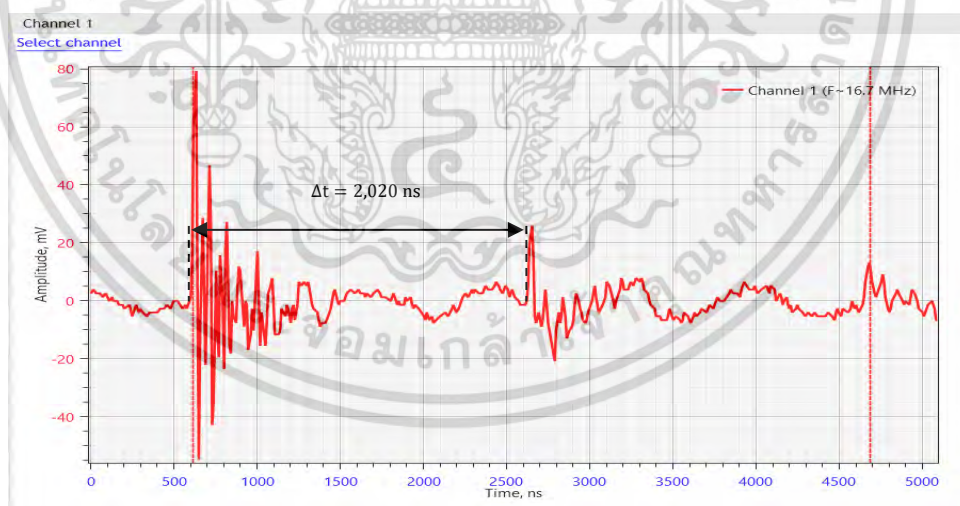
รูปที่ 4.37 ผลการทดสอบแบบออฟไลน์สำหรับระบบสายเคเบิลใต้ดิน 115kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่เสียค่าใช้จ่าย
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

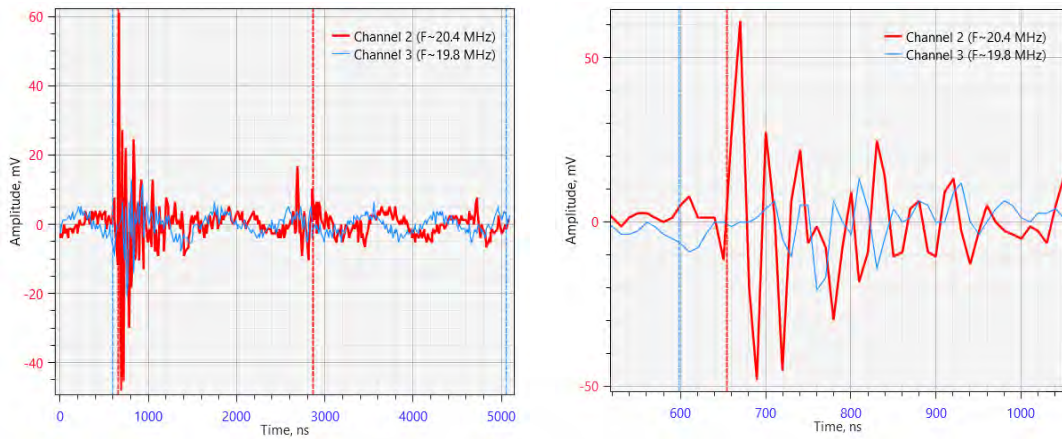
จากผลการทดสอบ พบว่า เซ็นเซอร์ HFCT และ PD Line No.1 ตรวจวัดสัญญาณ PD ได้ในลักษณะที่ไปในทางเดียวกัน แต่เซ็นเซอร์ PD Line No.2 ตรวจวัดได้ในทางตรงกันข้าม อีกทั้งเมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยวิธี TOA ดังรูปที่ 4.39 พบว่า สัญญาณมีทิศทางตรงกันข้ามและการเปรียบเทียบสัญญาณทำได้ยาก

เนื่องจากการตรวจวัดดำเนินการแค่เพียงทางฝั่งลานโกและมีเพียงเซ็นเซอร์ PD Line No.2 ที่ติดตั้งห่างจากบริเวณหัวเทอมิเนเตอร์ฝั่งลานโกมากที่สุดมีรูปแบบของสัญญาณที่แตกต่าง จึงเป็นไปได้ว่าหากที่ปลายสายทางฝั่งเสา Riser มีจุดเกิด PD เช่นกัน พัลส์ที่เคลื่อนที่มาจากทางฝั่งเสา Riser มาจนถึงตำแหน่งที่ติดตั้งเซ็นเซอร์ในฝั่งลานโกจะเกิดการลดทอนของสัญญาณตามระยะของสายเคเบิลจนไม่สามารถตรวจจับด้วยเซ็นเซอร์ HFCT และ PD Line No.1 แต่สำหรับ เซ็นเซอร์ PD Line No.2 ที่มีระยะห่างออกมา ที่บริเวณนี้สัญญาณจากฝั่งเสา Riser อาจะยังคงหลงเหลืออยู่ทำให้เกิดการซ้อนกันของทั้ง 2 พัลส์ PD

สำหรับการระบุตำแหน่งจุดเกิด PD ด้วยวิธี TDR จากเซ็นเซอร์ HFCT หรือ PD Line ที่พบพัลส์สะท้อนเกิดขึ้น จากรูปที่ 4.38 พบว่าผลต่างระยะเวลาของพัลส์ PD ลูกแรกกับพัลส์สะท้อน มีค่าเท่ากับ 2,020 ns เมื่อนำไปคำนวณตามสมการที่ 2.1 จะได้ระยะจุดกำเนิด PD อยู่ห่างจากตำแหน่งที่ติดตั้งเซ็นเซอร์ประมาณ 3.35 เมตร ซึ่งเป็นบริเวณที่ใกล้เคียงกับหัวเทอมิเนเตอร์ สำหรับวิธีการคำนวณอย่างละเอียดจะแสดงไว้ในภาคผนวก ก



รูปที่ 4.38 การเปรียบเทียบระยะเวลาของพัลส์ PD ลูกแรกกับลูกสะท้อนจากเซ็นเซอร์ PD Line สำหรับการทดสอบแบบออฟไลน์



รูปที่ 4.39 การเปรียบเทียบพัลส์ PD ระหว่างเซ็นเซอร์ PD Line No.1 และ PD Line No.2 สำหรับการทดสอบแบบออฟไลน์

หลังจากผ่านขั้นตอนการตรวจวัดแบบออฟไลน์ได้มีการผ่าพิสูจน์หัวเทอมิเตอร์ของสายเคเบิลใต้ดินเส้นนี้ ผลการพิสูจน์พบว่า มีแหล่งกำเนิด PD 2 ตำแหน่ง เกิดขึ้นที่หัวเทอมิเตอร์ทั้งฝั่งลานไก และฝั่งเสา Riser โดยร่องรอยของการเกิด PD ที่หัวเทอมิเตอร์จะอยู่ที่บริเวณฉนวน XLPE ที่ติดกับชั้นด้านบนของ semi-conductive screen ของสายเคเบิลและของ Stress cone แสดงดังรูปที่ 4.40 และ 4.1



รูปที่ 4.40 ร่องรอยการเกิด PD ที่หัวเทอมิเตอร์ทางฝั่งลานไก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.41 ร่องรอยการเกิด PD ที่หัวเทอมิเตอร์ทางฝั่งเสา Riser

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองในห้องปฏิบัติการพบว่าการติดตั้งเซ็นเซอร์ในลักษณะที่แตกต่างกัน อาทิเช่น ประเภทของเซ็นเซอร์ ทิศทางของเซ็นเซอร์ ตำแหน่งการติดตั้ง เป็นต้น สิ่งเหล่านี้ล้วนส่งผลต่อรูปแบบของสัญญาณ PD และลักษณะเฉพาะของพัลส์ PD ที่ถูกตรวจวัด จากการวิเคราะห์และพิจารณาจากผลลัพธ์ในการทดสอบระบบเคเบิลใต้ดินที่มีการต่อลงดินข้างเดียวหรือทั้ง 2 ข้างโดยมีตำแหน่งการติดตั้งเซ็นเซอร์ทั้ง 2 ชนิดแบบเดียวกัน พบว่าหากมีการต่อลงดินทั้งสองแบบจะสามารถตรวจจบบรรยากาศของสัญญาณ PD และลักษณะเฉพาะของพัลส์ PD ที่คล้ายกัน ในขณะที่การต่อลงดินแบบกึ่งกลางจะได้ผลลัพธ์ที่แตกต่างออกไปบางกรณีเนื่องจากรูปแบบการติดตั้งเซ็นเซอร์ แต่สำหรับการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของพัลส์ PD จากแต่ละตำแหน่งจุดเกิดจากการต่อลงดินทั้ง 3 กรณีนี้เป็นไปในทางเดียวกัน นอกจากนี้ยังสรุปได้ว่าหากจุดเกิด PD อยู่ใกล้เซ็นเซอร์จะสามารถตรวจวัดขนาดของสัญญาณ PD ได้ในระดับสูง แต่หากอยู่ไกลมากขึ้นขนาดได้ตรวจวัดได้จะลดลง สำหรับการต่อลงดินแบบไขว้ที่มีเป้าหมายในการวิเคราะห์สัญญาณที่ตรวจวัดได้ตรงจุดต่อลงดินแบบไขว้ พบว่า หากคล่องเซ็นเซอร์ HFCT ที่กราวด์ทั้ง 3 เฟสในทางฝั่งที่สัญญาณ PD เคลื่อนที่มาและหันทิศทางเซ็นเซอร์ไปในทางเดียวกันกับสัญญาณ PD จะตรวจวัดสัญญาณขึ้นทางฝั่งซ้ายลบ แต่หากสัญญาณ PD เคลื่อนที่มาทางฝั่งตรงข้ามจะตรวจวัดสัญญาณขึ้นทางฝั่งขวาลบและหากเซ็นเซอร์ตัวไหนตรวจวัดสัญญาณ PD ได้ขนาดสูงที่สุดและมีระยะเวลาของพัลส์นำหน้าเซ็นเซอร์ตัวอื่น ๆ แสดงว่าเกิด PD ที่เฟสนั้น ๆ

การเกิดพัลส์สะท้อนจะขึ้นอยู่กับระยะห่างจากจุดเกิด PD ตำแหน่งการติดตั้งและความยาวสายเคเบิล ยิ่งระยะการเคลื่อนที่ไปและกลับของพัลส์มายังจุดตำแหน่งเซ็นเซอร์เดิมมากขึ้น การลดทอนของขนาด PD จะยิ่งมากเช่นกัน หากสัญญาณ PD จากจุดเกิดมีค่าที่น้อยอยู่แล้วและระยะทางที่เคลื่อนที่มากด้วย อาจส่งผลทำให้ไม่พบพัลส์สะท้อนได้ สำหรับข้อดีของการเจอพัลส์สะท้อน PD คือ จะทำให้สามารถนำไปวิเคราะห์หาตำแหน่งของจุดเกิด PD ได้ด้วยวิธี TDR อย่างไรก็ตาม วิธี TDR ยังมีข้อจำกัดที่ไม่สามารถระบุตำแหน่ง PD ได้อย่างชัดเจน คือ ในกรณีที่ติดตั้งเซ็นเซอร์ที่ปลายสายและตำแหน่ง PD อยู่ที่จุดปลายสายฝั่งใดฝั่งหนึ่ง หรือทั้ง 2 ฝั่ง จะไม่สามารถพิจารณาได้ว่า PD เกิดขึ้นที่ฝั่งไหนเพราะมีความแตกต่างของเวลาเท่ากัน และอีกกรณีคือการติดตั้งเซ็นเซอร์ที่กึ่งกลางสายหรือในตำแหน่งที่ไม่ใช่จุดปลายสายเพราะจุดอ้างอิงจะอยู่ตรงกลางหรือไม่ใช่ที่ตำแหน่งศูนย์ ซึ่งทำให้ไม่สามารถระบุได้ว่า PD เกิดขึ้นทางฝั่งซ้ายหรือฝั่งขวานั้นเอง

นอกจากนี้ หากไม่พบพัลส์สะท้อนสามารถใช้วิธี TOA ในการคาดการณ์ว่าพัลส์ PD เคลื่อนที่มา จากทางด้านไหนได้แต่จำเป็นต้องใช้เซ็นเซอร์ชนิดเดียวกันติดตั้งในตำแหน่งที่มีระยะห่างกันอย่าง เหมาะสมและมีทิศทางเดียวกันจะทำให้วิเคราะห์สัญญาณได้ง่ายขึ้น

จากการทดลองในภาคสนามที่มีรูปแบบการต่อลงดินสองข้างและเป็นกรณีที่เกิด PD ที่ต้นสาย พบว่าผลลัพธ์และวิธีการวิเคราะห์สัญญาณ PD เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับในห้องปฏิบัติการ และสามารถระบุตำแหน่ง PD ที่เกิดตรงตำแหน่งบริเวณหัวเทอมิเนเตอร์ได้ตามจริง

5.2 ปัญหาที่พบ แนวทางแก้ไขและข้อเสนอแนะ

5.2.1 ปัญหาที่พบ

5.2.1.1 สายโคแอกเชียลที่ใช้ในการทดสอบถูกวางซ้อนทับกันสามารถทำให้สัญญาณที่ตรวจวัด ได้มีความผิดเพี้ยน

5.2.1.2 หากนำเครื่อง PD pulse generator ไปวางในบริเวณใกล้กับสายโคแอกเชียลที่ใช้ใน การทดสอบ จะเกิดสัญญาณรบกวนทำให้สัญญาณที่ตรวจวัดได้มีความผิดเพี้ยน

5.2.2 แนวทางแก้ปัญหา

5.2.2.1 จัดวางสายให้เป็นระเบียบเรียบร้อย

5.2.2.2 ต้องวางเครื่อง PD pulse generator ในตำแหน่งที่จะไม่ไปทำการรบกวนต่อสัญญาณที่ จำยให้ในระบบทดสอบ

5.2.3 ข้อเสนอแนะ

ทั้งนี้งานวิจัยได้ทำการทดสอบสัญญาณ PD ในระบบเคเบิลใต้ดินที่มีการต่อลงดินที่แตกต่างกัน เพียงส่วนหนึ่งเพื่อศึกษาหาเทคนิคในการตรวจวัดและวิธีการวิเคราะห์รูปแบบของสัญญาณ PD และ ลักษณะเฉพาะของพัลส์ PD รวมถึงการระบุตำแหน่งจุดเกิด PD แต่อย่างไรก็ตามในระบบเคเบิลใต้ดิน ที่ทำงานจริงมีองค์ประกอบที่มากกว่าในการทดสอบในห้องปฏิบัติการ และการวิเคราะห์นั้นทำได้ ยากกว่าไม่ว่าจะเป็นปัจจัยที่มาจากสัญญาณรบกวน จุดกำเนิด PD ที่มีมากกว่า 1 ตำแหน่ง มีการต่อ ลงดินจากหลายที่ที่จุดเดียวหรือข้อจำกัดในการติดตั้งเซ็นเซอร์ ดังนั้น ในอนาคตควรมีการทดสอบใน กรณีอื่น ๆ เพิ่มมากขึ้นร่วมกับการเก็บข้อมูลการตรวจวัดในภาคสนามมากยิ่งขึ้นเพื่อจะได้นำมา เปรียบเทียบกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการและเก็บไว้เป็นฐานข้อมูลเพื่อทำการศึกษาและ ปรับปรุงวิธีการวิเคราะห์ผลให้มีประสิทธิภาพและแม่นยำมากยิ่งขึ้น

บรรณานุกรม

- [1] กองมาตรฐานระบบไฟฟ้า ฝ่ายมาตรฐานและความปลอดภัย. ระบบเคเบิลใต้ดิน. 2548.
- [2] Yi Luo, Zhengyi Han, Mingyu Zhou and Haitian Wang, "A Sophisticated Method of the Mechanical Design of Cable Accessories Focusing on Interface Contact Pressure", *Energies* 2020, 13(11), 2976.
- [3] รศ.ดร. นรเศรษฐ์ พัฒนเดช. 2561. Partial Discharge Test: IEC 60270. [สไลด์]. กรุงเทพฯ : รศ.ดร. นรเศรษฐ์ พัฒนเดช.
- [4] IEC 60270. High-voltage test techniques-Partial discharge measurements; 2000.
- [5] B. Rajalakshmi and L. Kalaivani, "Analysis of Partial Discharge in Underground Cable Joints," 015 International Conference on Innovations in Information, Embedded and Communication Systems (ICIIECS), 2015, pp. 1-5.
- [6] Y. Wang, D. Yang, R. Xia and L. Zhou, "Characteristic analysis and experimental research of PD propagation in HV XLPE cables," *IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, 2014, pp. 1-4.
- [7] T. Juntasorn, P. Chanchaoensook and N. Pattanadech, "Partial Discharge Pulse Propagation in Coaxial Cable," 2022 8th International Conference on Engineering, Applied Sciences, and Technology (ICEAST), 2022, pp. 1-5.
- [8] T. Takahashi and T. Okamoto, "Effective partial discharge measurement method for XLPE cables based on propagation characteristics of high frequency signal," *IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis*, 2012, pp. 221-224.
- [9] M. Shafiq, I. Kiitam, P. Taklaja, L. Kütt, K. Kauhaniemi and I. Palu, "Identification and Location of PD Defects in Medium voltage Underground Power Cables Using High Frequency Current Transformer," in *IEEE Access*, vol. 7, 2019, pp. 103608-103618.
- [10] IEEE 400.3. Guide for Partial Discharge Testing of Shielded Power Cable Systems in a Field Environment; 2006.

- [11] A. Babae and S. M. Shahrtash, "On-line partial discharge source location in single-core cables with multi sheath-ground connections," IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 22, no. 2, April 2015, pp. 1031-1040.
- [12] Marina A. Shokry et al, "Detection and localization of defects in cable sheath of cross-bonding configuration by sheath currents," IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, vol. 34, no. 4, pp. 1401-1411.
- [13] A. Babae and S. M. Shahrtash, "On-line partial discharge defected phase selection and localization in cross-bonded single core cables," in IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 22, no. 5, October 2015, pp. 2995-3006.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก

วิธีการคำนวณตำแหน่งจุดเกิด PD ด้วยวิธี TDR

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

วิธีการคำนวณตำแหน่งจุดเกิด PD ด้วยวิธี TDR

หลักการวิเคราะห์ด้วยวิธี TDR คือ การหาระยะเวลาที่แตกต่างกันของสัญญาณพัลส์ PD ลูกแรก กับสัญญาณสะท้อนของพัลส์ PD ที่ตรวจวัดได้จากเซ็นเซอร์ตัวเดียวกันไปคำนวณหาระยะของจุดกำเนิด PD ได้ตามสมการ

$$s = \left| L - \frac{v\Delta t}{2} \right| \quad (ก.1)$$

สำหรับการอธิบายวิธีการคำนวณระยะห่างจากตำแหน่งที่ติดตั้งเซ็นเซอร์ถึงจุดกำเนิด PD (s) จะใช้ข้อมูลจากผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการที่กล่าวถึงในหัวข้อที่ 4.1.6 และผลการทดสอบในภาคสนามทั้งแบบออนไลน์และแบบออฟไลน์ที่กล่าวถึงในหัวข้อ 4.2.1 และ 4.2.2

ก.1 การคำนวณจากผลการทดสอบการต่อลงดินกรณีจ่าย PD ที่ต้นสายและปลายสาย

จากผลการทดสอบการต่อลงดินกรณีจ่าย PD ที่ต้นสายและปลายสาย ข้อมูลที่ทราบประกอบไปด้วย ความยาวสายเคเบิล (L) ประมาณ 200 เมตร ค่า velocity factor ของสาย RG58 อยู่ที่ประมาณ 0.66 จะได้ความเร็วการเคลื่อนที่ของสัญญาณในสายเคเบิล (v) ประมาณ $3 \times 10^8 \times 0.66$ m/s และโดยภาพรวมผลต่างระยะเวลา (Δt) อยู่ที่ประมาณ 2,045 ns เมื่อนำข้อมูลไปแทนค่าให้ตัวแปรในสมการข้างต้นจะสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$s = \left| 200 - \frac{(3 \times 10^8 \times 0.66) \times (2,045 \times 10^{-9})}{2} \right|$$

$$s = \left| 200 - \frac{404.91}{2} \right|$$

$$s = |200 - 202.45|$$

$$s = 2.45$$

ดังนั้น จะได้ระยะห่างจากตำแหน่งที่ติดตั้งเซ็นเซอร์ถึงจุดกำเนิด PD ประมาณ 2.45 เมตร เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.2 การคำนวณจากผลการทดสอบการต่อลงดินกรณีจ่าย PD ที่กลางสาย

จากผลการทดสอบการต่อลงดินกรณีจ่าย PD ที่กลาง ข้อมูลที่ทราบประกอบไปด้วย ความยาวสายเคเบิล (L) ประมาณ 200 เมตร ค่า velocity factor ของสาย RG58 อยู่ที่ประมาณ 0.66 จะได้ความเร็วการเคลื่อนที่ของสัญญาณในสายเคเบิล (v) ประมาณ $3 \times 10^8 \times 0.66$ m/s และโดยภาพรวมผลต่างระยะเวลา (Δt) อยู่ที่ประมาณ 1,035 ns เมื่อนำข้อมูลไปแทนค่าให้ตัวแปรในสมการข้างต้นจะสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$s = \left| 200 - \frac{(3 \times 10^8 \times 0.66) \times (1,035 \times 10^{-9})}{2} \right|$$

$$s = \left| 200 - \frac{204.93}{2} \right|$$

$$s = \left| 200 - 102.46 \right|$$

$$s = 97.54$$

ดังนั้น จะได้ระยะห่างจากตำแหน่งที่ติดตั้งเซ็นเซอร์ถึงจุดกำเนิด PD ประมาณ 97.54 เมตร

ก.3 การคำนวณจากผลการทดสอบแบบออนไลน์

จากผลการทดสอบแบบออนไลน์สำหรับระบบสายเคเบิลใต้ดิน 115kV ที่ตรวจวัดด้วยเซ็นเซอร์ HFCT ข้อมูลที่ทราบประกอบไปด้วย ความยาวสายเคเบิล (L) ประมาณ 630 เมตร ค่า velocity factor ของสาย XLPE อยู่ที่ประมาณ 0.55 จะได้ความเร็วการเคลื่อนที่ของสัญญาณในสายเคเบิล (v) ประมาณ $3 \times 10^8 \times 0.55$ m/s และผลต่างระยะเวลา (Δt) เท่ากับ 7,650 ns เมื่อนำข้อมูลไปแทนค่าให้ตัวแปรในสมการข้างต้นจะสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$s = \left| 630 - \frac{(3 \times 10^8 \times 0.55) \times (7,650 \times 10^{-9})}{2} \right|$$

$$s = \left| 630 - \frac{1,262.25}{2} \right|$$

$$s = \left| 630 - 631.13 \right|$$

$$s = 1.13$$

ดังนั้น จะได้ระยะห่างจากตำแหน่งที่ติดตั้งเซ็นเซอร์ถึงจุดกำเนิด PD เท่ากับ 1.13 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตเป็นการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.4 การคำนวณจากผลการทดสอบแบบออฟไลน์

จากผลการทดสอบแบบออฟไลน์สำหรับระบบสายเคเบิลใต้ดิน 115kV ที่ตรวจวัดด้วยเซ็นเซอร์ HFCT ข้อมูลที่ทราบประกอบไปด้วย ความยาวสายเคเบิล (L) ประมาณ 170 เมตร ค่า velocity factor ของสาย XLPE อยู่ที่ประมาณ 0.55 จะได้ความเร็วการเคลื่อนที่ของสัญญาณในสายเคเบิล (v) ประมาณ $3 \times 10^8 \times 0.55$ m/s และผลต่างระยะเวลา (Δt) เท่ากับ 2,020 ns เมื่อนำข้อมูลไปแทนค่าให้ตัวแปรในสมการข้างต้นจะสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$s = \left| 170 - \frac{(3 \times 10^8 \times 0.55) \times (2,020 \times 10^{-9})}{2} \right|$$

$$s = \left| 170 - \frac{333.30}{2} \right|$$

$$s = \left| 170 - 166.65 \right|$$

$$s = 3.35$$

ดังนั้น จะได้ระยะห่างจากตำแหน่งที่ติดตั้งเซ็นเซอร์ถึงจุดกำเนิด PD เท่ากับ 3.35 เมตร



ภาคผนวก ข

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The 18th International Conference on Electrical Engineering /Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology



ECTI-CON
2021 Chiang Mai
Thailand

May 19-22, 2021

The Empress Hotel, Chiang Mai, Thailand

THE 2nd CALL FOR PAPERS

Steering Committees

Kosin Chamnongthai, KMUTT, Thailand
Tomoaki Sato, Hokusei Gakuen U., Japan
Kou Yamada, Gunma U., Japan
Prayoot Akkarajethalin, KMUTNB, Thailand
Ajchara Charoensook, NIMT, Thailand
Yasumasa Fujisaki, SICE, Japan
Chul Joo Hwnag, ICROS, Korea
Yoshihiro Matsui, TNCT, Japan
David Banjerdpongchai, CU, Thailand
Tuptim Angkaew, CU, Thailand
Uthen Khamnan, RMUTL, Thailand
Pichaya Tandayya, PSU, Thailand
Roungsan Chairsichareon, MFU, Thailand

ECTI Council Chair

Sinchai Kamolphiwong, PSU, Thailand

General Chair

Yuttana Kumsuwan, CMU, Thailand

General Co-chairs

Sermsak Uatrongjit, CMU, Thailand
Sansanee Auephanwiriyakul, CMU, Thailand
Kosin Chamnongthai, KMUTT, Thailand

Technical Program Chairs

Nipon Theera-umpon, CMU, Thailand
Paramet Wirasanti, CMU, Thailand
Kampol Woradit, CMU, Thailand
Peerapol Jirapong, CMU, Thailand
Nattachote Rugthaicharoencheep, RMUTP, Thailand
Krit Angkeaw, KMUTNB, Thailand
Ekkarat Boonchieng, CMU, Thailand
Nattapong Phanthuna, RMUTP, Thailand
Chanon Warisarn, KMUTL, Thailand
Sudchai Boonto, KMUTT, Thailand
Pornchai Phukpattaranont, PSU, Thailand
Akkarat Boonpoonga, KMUTNB, Thailand
Yodchanan Wongsawat, MU, Thailand

Special Session Chair

Thanaphong Thanasaksiri, CMU, Thailand

Publicity Chair

Doldet Tantraviwat, CMU, Thailand

Industry Chair

Kasemsak Uthaichana, CMU, Thailand

Publication Chairs

Tharadol Komolmis, CMU, Thailand
Aziz Nanthaamornphong, PSU, Thailand

Local Co-Chairs

Dhanavich Chulikavit, CMU, Thailand
Kanitpong Pengwon, CMU, Thailand

Registration & Finance Chairs

Paowphattra Kamphikul, CMU, Thailand
Boonsri Kaewkham-ai, CMU, Thailand

Webmaster, media

Kasin Prakobwaitayakit, CMU, Thailand

2021 IEEE 18th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology will be held on May 19-22, 2021 at the Empress Hotel, Chiang Mai, Thailand. The conference is sponsored by ECTI Association and IEEE Thailand section in association with Chiang Mai University. The conference theme is "Smart Electrical System & Technology". The conference focuses on the **latest systems & technologies, strategies, and challenges** that are interfaced by Power Systems, Renewable Energy System, Power Electronics, Electronics, Automatic Control System, including the interconnection and the operation for achieving a better or smarter electrical system & technology.

Conference Topics (Technical Tracks):

TT01: Devices, Circuit and Systems
TT02: Computers
TT03: Information Technology
TT04: Communication Systems
TT05: Controls, Instrumentation and Measurements
TT06: Electrical Power Systems
TT07: Power Electronics
TT08: Signal Processing
TT09: Electromagnetics
TT10: Biomedical Engineering
TT11: Other Related Areas

Call for Special Session Proposals

Special session are planned to be organized on highly specialized topics that are not included in the conference tracks. Prospective organizers of such a session are invited to submit session proposal to the Conference Secretariat for acceptance. They must follow the rules established by the Conference Committee.

Submission of Papers

The working language is English. Prospective participants are requested to electronically submit full papers of their work (up to 4 pages) following the instructions (available soon on the website). All accepted papers are expected to be included in **IEEE Xplore and indexed by EI**.

Important Dates (deadlines):

Special Session Submission:	January 10, 2021
Full Paper Submission:	January 10, 2021
Acceptance Notification:	March 19, 2021
Camera ready papers:	April 5, 2021
Early-bird registration:	April 5, 2021

Conference Secretariat:

ECTI-CON 2021
Department of Electrical Engineering,
Faculty of Engineering, Chiang Mai University
239 Huay Kaew Road, Muang District,
Chiang Mai, Thailand 50200
E-mail: ecticon2021@eng.cmu.ac.th
Website: <https://ecticon2021.ecticon.org/>

Organizer

Cooperation

Hoster



A Locating Diagnosis of Partial Discharge on Cross-bonding Ground System

W. Inwanna
Faculty of Engineering
King Monkut's Institute of
Technology Ladkrabang
Bangkok, Thailand
62601062@kmitl.ac.th

S. Mongkolsatitpong
Manager
Plan Market Gold Co., Ltd
and PD Solution CO., Ltd.
Bangkok, Thailand
suriya0092@gmail.com

P. Chanchaoensook
Faculty of Engineering
King Monkut's Institute of
Technology Ladkrabang
Bangkok, Thailand
kcpshop@kmitl.ac.th

N. Pattanadech
Faculty of Engineering
King Monkut's Institute of
Technology Ladkrabang
Bangkok, Thailand
norasage.pa@kmitl.ac.th

Abstract—At the present, Thailand has turned the attention to Underground Cable (UC) systems and trends to use it more to safety, stability and reliability of electrical system. However, one problem that can affect to this electrical system is the Partial Discharge (PD) problem. Most of PD problems are caused by incomplete installation, maintenance reason and insulation degradation on the weakest part, especially cable joint. This paper proposes a method of analysis to locate the PD source in UC systems with Cross Bonding (CB) focus on cable joints. This work has carried out in laboratory on CB system model using 50ohm R58 coaxial cable instead of underground cable. The PD detection technique according to IEEE 400.3 standard with a RFCT sensor to refer the appropriate signal. This work uses a PD diagnostic device that can filter noise from the PD groups and separate groups of PD for greater analysis accuracy. To determine which cable joint is PD source and to be able to fix it on the spot. The PD signal analysis are performed by using time of arrival method considered together with the characteristics and the polarity of the PD pulse.

Keywords—partial discharge, PD location, cable joint, cross-bonding, underground cable.

I. INTRODUCTION

Partial Discharge (PD) is one of the problems that can affect to this electrical system. It is the occurrence of partial insulation failure of the insulation system which is an unconnected discharge between two electrodes. This problem can be caused by highly uneven electric field surrounding the insulation system or the material of insulation is not homogeneous and contaminated. As a result, the electric field stress at some point is higher than the critical field stress. PD is a random events and very harmful in solid insulated cable. If the PD phenomenon expand the discharge area, it will damage insulation material until unable to withstand electric field stress. Eventually result in a breakdown that cause of the electrical failure. Therefore, PD measurement is essential to the electrical system in order to understand insulation material status of the high-voltage equipment and predict potential risks in the future and fix the problems before the damage occurring. [1, 2]. It is difficult to locate a real PD source in a large Underground Cable (UC) system, thus the measurement data analysis and interpretation are very important. With the aim of accurate locating the PD source, the time of arrival method is considered together with the polarity and characteristics the of the PD pulse.

II. CAUSES OF PARTIAL DISCHARGE IN UNDERGROUND CABLE SYSTEM

As a result of the higher load demands, high induced voltage in cable and circulating currents will be induced in the metallic screen of cable in solidly grounded system. High induced voltage and circulating current can result in high energy losses, potential overheating of cable and lead to breakdown. In order to mitigate the effects of induced circulating current and make the sum of the induced voltages equal to zero, Cross-Bonding (CB) of screen was perform in UC system [3].

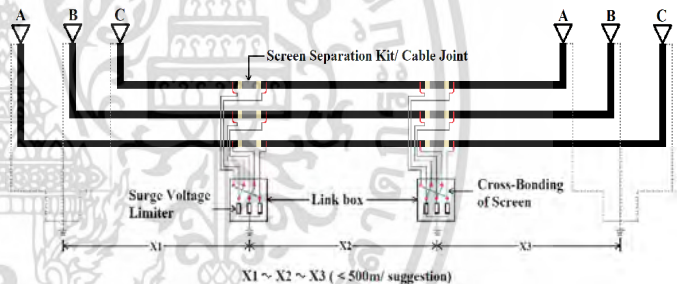


Fig. 1. Cross-bonding connection on UC system [3].

The cable in a long-distance UC system often have limited length, thus they need to be connected to extend the length as required. The cable end management is an important process because it is the weakest part of UC system. Due to cutting the cable, it needs to maintain a sufficient distance between conductor and shield to prevent the flashover. In this case, the conductor is separated by insulation which has a low density. Hence, the electric field in shield stripping part is not controlled by shield and immediately deflected as shown in Figure 2.

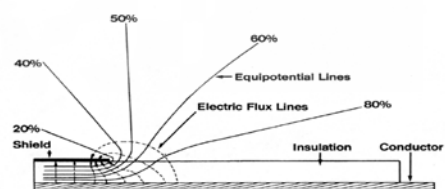


Fig. 2. Electric stress takes place around the ground cutting plane [4].

As a result, there is severe electric field stress in cable insulation under edge of shield which affect dielectric strength resulting in the insulation at that point is easily damaged. Reducing the stress at the end of the wire is required by using stress relief control or the high permittivity material at the end

of the shield. Most of the failures from PD problems at cable joint are caused by incomplete installation, maintenance reason and insulation degradation [5].

The PD problems in UC system can be classified into three types; 1) Internal discharge if it occurs within insulation material in void or contaminate area and possibly electrical treeing. 2) Corona discharge if it occurs at the sharp end, sharp edge or the connection point of high voltage equipment. 3) Surface discharge if it occurs on a rigid insulating surface in high electric field stress area.

III. PD MEASUREMENT ON CB GROUND SYSTEM MODEL

The PD measurement in CB box is more difficult to measure PD in common because the PD signal can flow through the ground wire in each phase independently. Therefore, no matter which phase the sensor is attached, it will detect the same PD signal from one source or more sources. As a reason, a measured data is more complex and making the analysis more difficult.

This experiment has carried out in a laboratory on CB system model. It is a non-conventional PD measurement bases on radio frequency in the high frequency range. The Radio Frequency Current Transformers (RFCT) sensors are used to measure PD signal by electrical detection method. The two important factors for this experiment are detection sensitivity and condition estimation from the data analysis. The time-domain PD detection and location are based on and IEEE 400.3 standard [6]. As the result, three RFCT sensors should be set the sensitivity ratio by the appropriate signal reference. This model using 50ohm RG58 coaxial cable instead of UC all three phases for distance of 100m. The sensors ch1, ch2 and ch3 are installed at ground wire in phase A, B and C on the same side, respectively. The RFCT direction of channel 1-3 is set to flow out of the cable joint as shown in Figure 3.

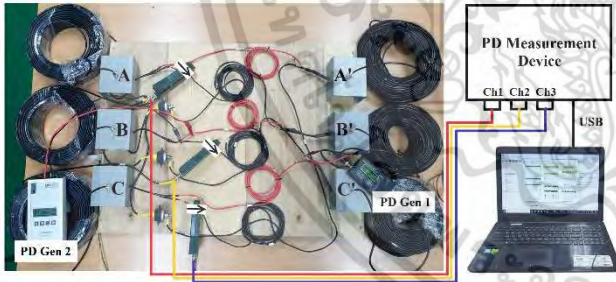


Fig. 3. CB system test model.

The conductor and ground wire on this CB ground system model are replaced by using red and black VSF wire with distance of 2m and 4m, respectively. There are a diagnostic measuring device for analyzing and locating PD signal and using two PD generator brands for simulating PD pulses.

The experiment is divided into two conditions as follow; First condition, one PD source in each cable joint, PD pulse generator injects PD signal at A, B, C, A', B' and C' position. Second condition, two PD sources in cable joints. For this case, there are only three cases examples to compare the differences. Two PD signals are injected at three pairs of cable joint which are B-C, A-A' and A-C' position. In the part of PD generator, a positive PD signal is injected at the conductor wire while the ground wire is received a negative PD signal.

Channel 1

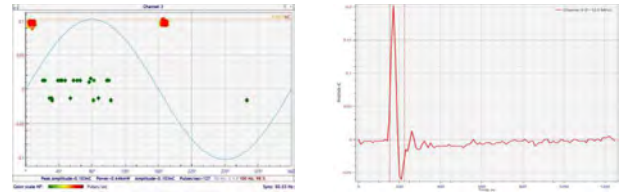


Fig. 4. PD signal and PD pulse from a PD generator.

Since the PD signal cannot be measured in form an electric charge but can measure the voltage and then change it to an assumed electric charge according to the sensitivity ratio (V/nC). Figure 4 illustrate the PD signal which is supplied from a PD generator to adjust the sensitivity of RFCT sensor. The reference electric charge can be adjusted as required and set in a program to match the value. The sensor will memorize the reference value and tuning the sensitivity ratio to match the next reading.

IV. PD MEASUREMENT RESULT

The PD signals are measured by RFCT sensors with a sensitivity approximately 2.7-3.0nC/V and they are connected with an analysis equipment that can separate noise from groups of PD signals. It is useful to analyze PD signal accurately and determine which cable joint is problematic. The experiment results of one PD source and two PD sources condition are presented in the subsections below.

A. One PD Source in Each Cable Joint

Refer to the first condition, the first PD generator is used for injecting the PD signal approximately 3-4nC with frequency 800Hz to cable joint in each position. The values of measured PD signals are shown in the Table I. The maximum value that RFCT sensors able to detect in each case, it can be considered to phase position of the PD source but it cannot be determined which side of the problem cable joint. The analysis for finding the location of PD source will be discussed in section V.

TABLE I. PD AMPLITUDE AT EACH OF CHANNELS FOR ONE PD SOURCE

PD injection position	PD amplitude (nC) at each sensor position			Pulse polarity
	Phase A (ch1)	Phase B (ch2)	Phase C (ch3)	
A	0.343	0.142	0.155	-
B	0.147	0.379	0.175	-
C	0.168	0.16	0.301	-
A'	0.283	0.125	0.126	+
B'	0.126	0.333	0.146	+
C'	0.157	0.142	0.318	+

Figure 5 illustrates the Phase Resolved Partial Discharge (PRPD) when injected PD at A, B and C position. It is found that there is the same pattern on negative side because RFCT sensors are clamped at the ground wires in the same direction as the PD signal. Whereas the PRPD of A', B' and C' position presented on positive side because PD signal flows opposite to the direction of RCFT as shown in Figure 6.

1) PD signals injecting at A, B and C position

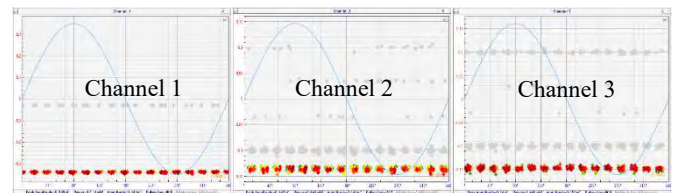


Fig. 5. Negative PD Signals injecting at A, B and C Position.

2) PD signals injecting at A', B' and C' position

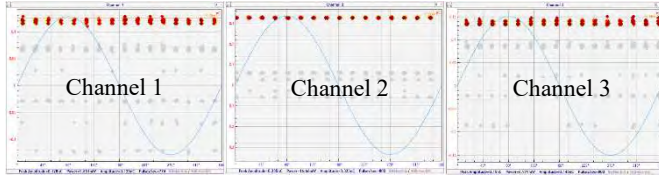


Fig. 6. Positive PD signals injecting at A', B' and C' Position.

B. Two PD Sources in Cable Joints

Refer to the second condition, the first and the second PD generator are used for injecting the PD signals approximately 2-4nC with frequency 100Hz and 800Hz to two cable joints for all three cases. The values of measured PD signals are shown in the Table II. In order to determine the maximum PD amplitude in each phase, these received signals from each PD generator must be separated into two groups before and then compared the values in each group.

TABLE II. PD AMPLITUDE AT EACH OF CHANNELS FOR TWO PD SOURCES

PD position	PD generator	Amplitude (nC)			Pulse polarity
		Phase A	Phase B	Phase C	
B	Second	0.063	0.155	0.074	-
C	First	0.149	0.160	0.299	-
A	Second	0.155	0.109	0.084	-
A'	First	0.330	0.127	0.133	+
A	Second	0.149	0.068	0.069	-
C'	First	0.149	0.131	0.266	+

Figure 7-9 present the PRPD patterns of the both PD signals from each of PD generators. For all three cases, when compared with each other, there is different pattern because of different PD sources. The reason for the polarity mismatch of these patterns is described in the previous subsection.

1) Two PD signals injecting at B-C position

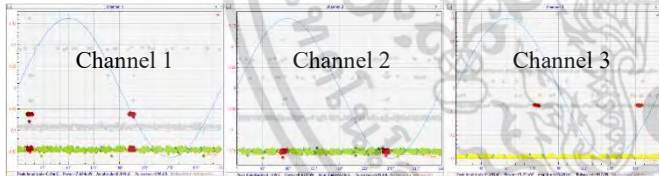


Fig. 7. The both negative PD signals injecting at B-C position.

2) Two PD signals injecting at A-A' position

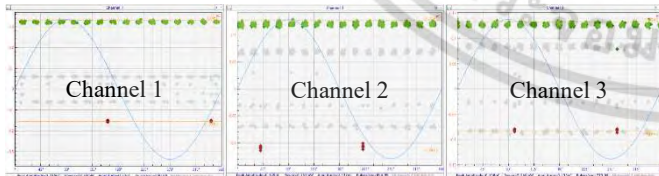


Fig. 8. Negative and positive PD signals injecting at A-A' position.

3) Two PD signals injecting at A-C' position

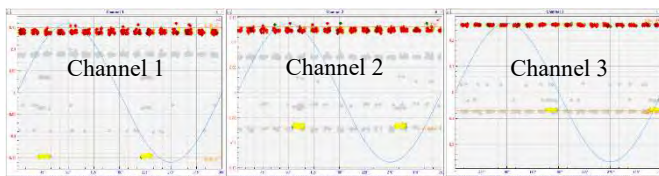


Fig. 9. Negative and positive PD signals injecting at A-C' position.

V. PD ANALYSIS

Noise-filtered data is analyzed through Time of Arrival (TOA) function and considered together with the characteristics and the polarity of the PD pulse in different channels that helps to find the PD origin. The nature of the pulse which near the source, there are a large amplitude, narrow pulse and leading.

A. TOA technique

TOA technique is time different comparison of the first PD pulse between the receive signals from the various sensors. This method is suitable for PD locating identification on branched circuit and long cable lengths [7]. In this test, RFCT sensors are used to detect the PD signal flow into a coaxial cable 200m. The sequence of sensor position has a distance of 100m starting from channel 1. When signals of each sensor are compared, it found that there are different detecting intervals which depend on the distance between the sensor and the PD origin as shown in Figure 10. The green, red and blue line represent the sensors channel 1, 2 and 3, respectively.

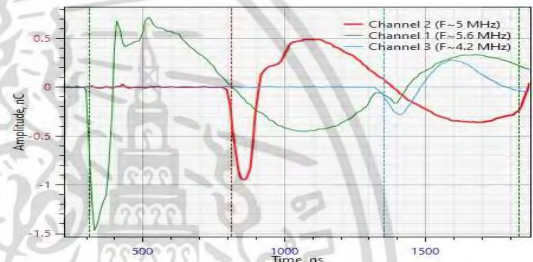


Fig. 10. The time-domain comparison of different PD signal position.

B. PD Location for One PD Source

The first condition, it is observed that the PD pulse polarity related with the PRPD pattern. The pulse characteristic nears PD source at left side is the largest negative pulse and leading other channels whereas PD source at right side is positive pulse which indicate the PD origin as shown in Figure 11.

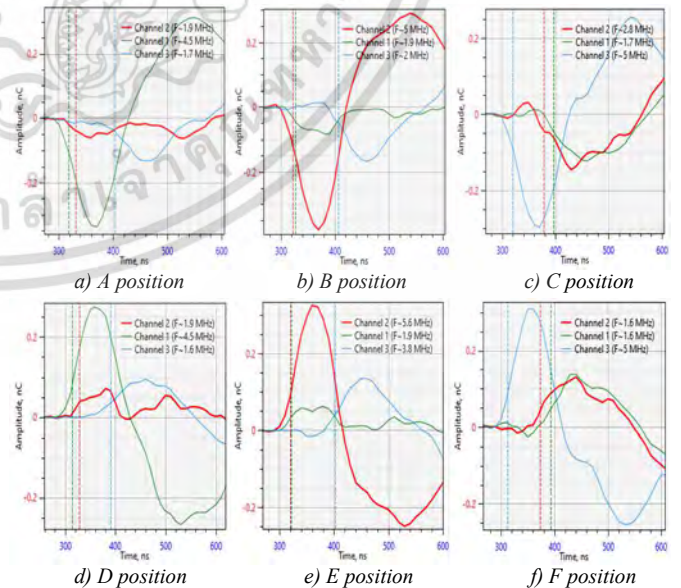


Fig. 11. PD pulse characteristics comparison of all three channels at each PD source position.

C. PD Location for Two PD Sources

The second condition, it is observed that RFCT sensors can detect two PD signals which are clearly different pattern as shown in Figure 7-9 but the both PD pulse characteristics are similar. To separate each of PD groups and specify the PD location from, it must be determined by the amplitude, pulse polarity and TOA method. The first case, the both pulses are negative because the both PD sources are injected on the left side as shown in Figure 12. It found that channel 2 on left graph and channel 3 on right graph have a largest pulse and lead the others. It is the reason to support that the locations of PD sources are B and C position.

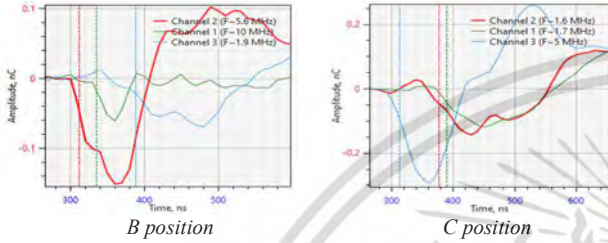


Fig. 12. Two PD pulse characteristics comparison at B-C position.

For the other cases as represent in Figure 13 and 14, it use the same method of locating as in the first case. In addition, when comparing between left graph and right graph, there are PD pulses occurring on the negative and positive side because the PD generators inject on the different side. The Figure 13 indicates channel 1 on left graph and right graph have a largest pulse and lead the others. It is the reason to support that the locations of PD source are A and A' position. The Figure 14 indicates channel 1 on left graph and channel 3 on right graph have a largest pulse and lead the others. It is the reason to support that the locations of PD source are A and C' position.

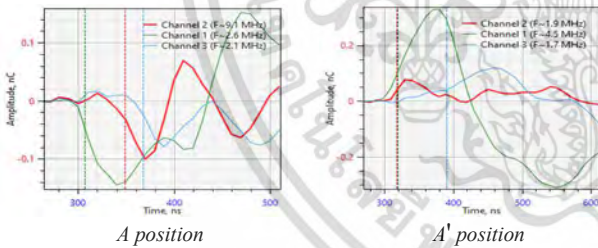


Fig. 13. Two PD pulse characteristics comparison at A-A' position

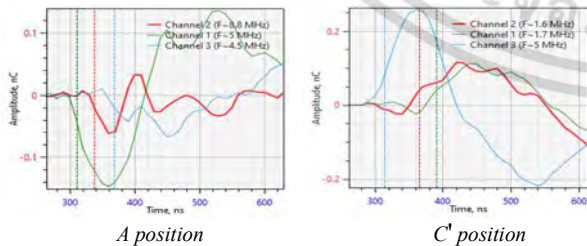


Fig. 14. Two PD pulse characteristics comparison at A-C' position.

Based on the examination results in all cases, it found that the noise filtering is useful to separated clearly group of PD signals. As a result, the measured data can be analyzed more easily, compared differences in PD characteristics clearly and leads to accurate locating the PD sources in the cable joints.

VI. CONCLUSION

The PD measurement is one of the most common methods because this method can perform online measurement in a normally operated system. Since the PD signals measured in CB box are complex and difficult to determine the location of PD sources. The analysis and comparison of difference PD signals should be done thoroughly. The target of this paper is to locate the PD source at cable joint which is the weakest part of UC system on cross-bonding system by using electric charge detection. The three RFCT sensors are clamped on the left side at the ground wires in phase A, B and C of cable joints and in the same direction as the negative PD signal. The received signals from sensors will be analyzed the characteristics together with the TOA method comparison. The sequence of analysis is as follows:

- 1) The pulse polarity consideration, the negative PD pulse indicates that the PD source occurring on the left cable joint which is opposite of the positive PD pulse.
- 2) The pulse amplitude consideration, the largest PD pulse indicates that this pulse is closest to the PD source and the amplitude will reduce as the distance is greater.
- 3) Time of arrival method, the comparison of the duration of each sensor that can detect the first PD pulse. The PD pulse which lead the other will be considered that this pulse is closest to the PD source and the duration will increase as the distance is greater.

The advantage of the sequential analysis is useful in clear analysis from the receive PD signals and lead to the accurate determination of the PD source in the cable joints. Moreover, it can predict the potential for future risks in order to solve the problem in time before the damage is done.

ACKNOWLEDGMENT

This research was supported by PD Solution Company Limited. Research author is grateful for company's support and facilitating laboratory testing.

REFERENCES

- [1] Xue Kai et al, "Development of Partial Discharging Simulation Test Equipment," IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 2017.
- [2] B. Rajalakshmi and L. Kalaivani, "Analysis of Partial Discharge in Underground Cable Joints," ICIIACS, Coimbatore, India, March 2015.
- [3] Ladislaus Kehl et al, "Cross-bonding for MV cable systems: advantages and impact on accessories design," CIRED Conference on Electricity Distribution, Spain, June, 2019.
- [4] W.L. Taylor & J. Whitehouse. An overview of cold applied technology for medium voltage cable accessories. Petroleum and Chemical Industry Technical Conference, 2007. PCIC '07. IEEE. p. 1 – 5.
- [5] Marina A. Shokry et al, "Detection and localization of defects in cable sheath of cross-bonding configuration by sheath currents," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 34, issue: 4, August 2019.
- [6] IEEE Std. 400.3TM – Guide for Partial Discharge Testing of Shielded Power Cable System in a Field Environment; September 2006.
- [7] C. C. Yii et al, "Multi-end Partial Discharge Location Algorithm based on Trimmed Mean Data Filtering Technique for MV Underground Cable," SCORed Conf. Kuala Lumpur, Malaysia, December 2015



ภาคผนวก ค

ข้อมูลอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

«CDR» - High Voltage Cable Monitoring and Diagnostic System

The widespread introduction of the power cables with an operating voltage of 110 kV and above, which are critical components of the distribution network, increasingly raises the questions of effective cable condition diagnostics, especially on-line monitoring.

There are two types of monitoring systems for HV cables: one is based on thermal monitoring and the other is on PD measuring in insulation. The first method is more useful for cables thermal load monitoring; the second way has maximal sensitivity for defect diagnostics. Using a complex monitoring system with both the methods is optimal.



«CDR» (Cables Diagnostics Relay) complex device by DIMRUS meets the requirements. This device is used in monitoring systems for cable condition monitoring and troubleshooting.

«CDR» system has got the following functions:

- Continuous monitoring of HV cable insulation condition based on measuring and analyzing PD level and distribution; identifying the defect type and degree.
- Automatic on-line defect location in the insulation of both joints and cables.
- Continuous temperature measurements of the cable terminations, situated near the measuring device.
- Monitoring the value of the phase currents passing through the cables shield, with a supplementary current sensor. These currents are negative for cable load due to the increased thermal stress on the insulation.

Two types of sensors can be used with «CDR» system in dependence of the cable line design and installation.

1. «CDR-S» sensor. This is a PD and joints temperature sensor installed on the cable surface. «CDR-S» sensor is a flexible metalize ring up to 200 mm wide. «CDR-S» installation is simple – the

sensor is wrapped around the cables near joints and terminals.

The sensor operates in UHF frequency range, so it has the highest sensitivity to the closely located defects. That is, the sensor measures PD in the nearby joint correctly, but has lower sensitivity to remote defects, because of PD damping in cables.



2. «RFCT-7» sensor.

This is a current transformer for measuring high-frequency pulses in the cable shield grounding. «RFCT-7» sensor is a split-core sensor, consisting of two parts, and it is easily installed on the cable shield grounding conductors or joints. So, «RFCT-7» sensor is installed without breaking the ground circuit.

«RFCT-7» sensor operates in high-frequency range, that is why it is sensitive to the defects that may be located at a distance of up to several kilometers. But «RFCT-7» sensor is less sensitive to the closer defects than «CDR-S» sensor.



The features of PD pulses measuring and analyzing by «CDR» system.

«CDR» system has 6-channel device for measuring and analyzing the cables parameters. It is modern and effective device for PD measuring.

The features of «CDR» device are:

- PD pulse measuring in wide frequency range – from 50 kHz to 1 GHz. The frequency range is so wide because the PD pulses reduce in amplitude and grow up in length while moving along the cables.

If a pulse arises near the sensor, then its frequency is very high, up to hundreds of MHz. The frequency of a remote pulse may be several hundreds of kHz "only". The longer are the cables - the lower is the frequency of the measured PD pulses can be.

- «CDR» system has two modern methods of defect location in cable insulation. The first method is based on analyzing the reflectograms of PD pulse distribution in cables; the second method is based on analyzing the time of arrival of the PD

pulses from the defect place to the ends of the monitored cables.

- «CDR» system includes «PD-Expert» expert diagnostics system. It allows identifying the defect type and degree.

«CDR» system has the following specific solutions:

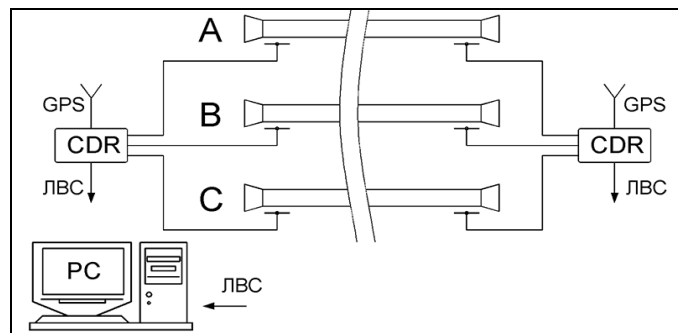
1. PD pulses are measured synchronically in all the 6 measuring channels of «CDR» device. This is a compulsory condition for all the diagnostic algorithms to operate.

2. If there is the need to monitor several cables, then several «CDR» devices should be use in the monitoring system. In this case, the problem of PD measurement synchronization becomes global.

Such synchronization can be achieved in two ways. At the distance of up to 1 km the PD measurements are synchronized by fiber optic: the synchronization pulses are sent through the fiber optic and the information exchange is done through the fiber optic. If the cable is more than 1 km long, or there is no possibility to lay fiber optic, then the measurements can be synchronized by GPS/GLONASS, the GPS receiver is built into «CDR» device.

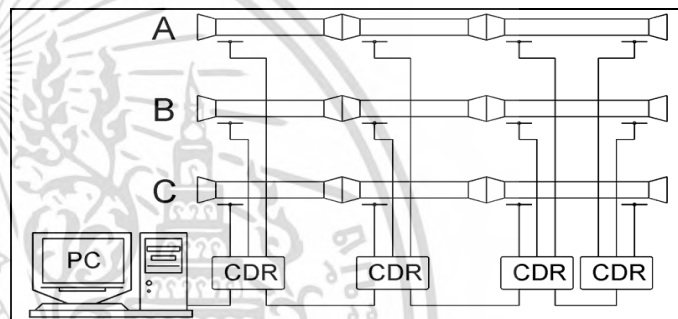
Cable monitoring systems with synchronization by fiber optic.

In the first figure, there is a scheme of the monitoring system for the cable with two joints in each phase. The monitoring system consists of 4 «CDR» devices and a computer with the special software. The cable length is small and the fiber optic can be used for the measurement synchronization.



Cable monitoring system with synchronization by GPS.

In the second figure, there is a scheme of the monitoring system with global synchronization. In this case the information is transmitted through the usual media (local network, global network, etc.), which are not shown in the figure.



«CDR» system can be connected to SCADA in two ways:

- By fiber optic.
- By RS-485 interface.

For monitoring of both one cable or several cables, «INVA» software is supplied together with the devices.

ModBus RTU or IEC 61850 protocols are used for information transmission from monitoring systems to SCADA.

Specifications of «CDR» system

Parameter	Value
Rated voltage of monitored cable line, kV	10 ÷ 500
Insulation condition monitoring method	PD
Cable temperature monitoring method	Pt100
Currents-in-cable-shield monitoring method	CT
The number of the cables (phases) monitored by one device	Up to 6
The length of the cables monitored by one device, m	Up to 6000
PD measuring range, MHz	0.1 ÷ 1000.0
SCADA connection	RS-485 interface, fiber optic
Synchronization of several devices	GPS, fiber optic
Temperature range without heating, °C	-40 ÷ +60
Supply voltage, V	AC/DC 120 ÷ 260
Device dimensions, mm	400 * 230 * 110

เอกสารนี้เป็นเอกสารทรัพย์สินทางปัญญาของบริษัทฯ ขอสงวนสิทธิ์ในเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MV Accessories

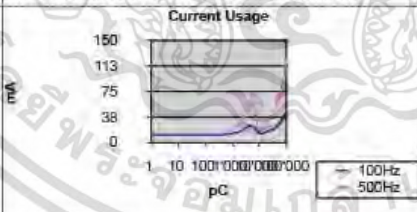
Calibrator CAL141

The Calibrator CAL141 has been developed especially for use with the OWTS-Systems. The Coulomb range matches the range of the OWTS-System and the Calibrator CAL141 is in application with the OWTS-System protected against over-voltages.

The Calibrator CAL141 can be used with other partial discharge measurement equipment without any limitation. The benefits towards other calibrators are the small coupling capacity of 100 pF in the calibration ranges of 1pC up to 5 nC as well as the large available calibration range of 1pC up to 100nC.



Technical Specification:

Adjustment range in Coulomb	1pC .. 100nC
Coupling capacitor 1pC .. 5nC	100pF
Coupling capacitor 10nC .. 100nC	1nF
Pulse frequency	100 Hz 400 Hz Double mains frequency through photo sensor
Accuracy	5%
Automatic switch off	5 minutes
Backlight	LED
Power Supply	4 Mignon Cells AA LR6 MN1500 Recommendation: DURACELL Ultra M3
Current Usage without LED	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Test Certificate

Calibrator type CAL 141

Type : **CAL 141**
 Serial Number : **141.1611.004**

The measurement is performed by comparison with reference standards, standard measuring equipment or on the basis of documented calibration techniques. The reference standards and the standard measuring equipment are traceable to the national measurement standards, according to ISO 9001 / EN 29001.

Tested with the following equipment, according to test procedure No: 141-601-03

Calibrator battery: Type: 4 pieces AA, LR6, 1.5Volt
 Testdevice: Type: TC141 PM/N: 1312-01
 NI-Scope: Type: NI PCI-5113

1. Preparation of calibration

C_{coax}: 93 pF C_{load}: 556pF or 9560pF

2. Calibrated ranges

Q out	C out	C coax + C inp	C load	U peak	
Coulomb	[Farad]	[Farad]	[Farad]	[Voltage]	Tested
1 pC	100 pF	93 pF	- pF	5.18 mV	✓
5 pC	100 pF	93 pF	556 pF	6.68 mV	✓
10 pC	100 pF	93 pF	556 pF	13.35 mV	✓
50 pC	100 pF	93 pF	556 pF	66.76 mV	✓
100 pC	100 pF	93 pF	556 pF	133.51 mV	✓
500 pC	100 pF	93 pF	556 pF	0.67 V	✓
1 nC	100 pF	93 pF	556 pF	1.34 V	✓
5 nC	100 pF	93 pF	556 pF	6.68 V	✓
10 nC	1'000 pF	93 pF	9'560 pF	0.94 V	✓
100 nC	1'000 pF	93 pF	9'560 pF	9.39 V	✓

Coulomb ranges within ± 5%, ± 1pC

Seitz Instruments AG
 Mellingerstrasse 12
 CH-5443 Niederrohrdorf
 Switzerland

Date of test : 04.04.2022

Tested by :

The results refer exclusively to the object. This Test Certificate may not be published or forwarded other than in full.

เอกสารนี้เป็นการรับรองความถูกต้องของผลการวัด Test Certificate 141-600-03 ออกโดยสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ page 1/1

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. Acceptance Certificate

RFCT 4.2 sensor, serial number 2667 is manufactured and recognized as fit for operation in accordance with the requirements of the current technical documentation.

Manufacturing date 02.06.2020

Responsible manufacturer's representative Беляев А.А.



RFCT-4.2 Sensor

8. Packing Certificate

RFCT 4.2 sensor, serial number 2667 is packed on manufacturer site in accordance with the requirements of the current technical documentation.

Packing date 08.06.2020

Packed by Ярушина К.А.



High Frequency Current Transformer for Partial Discharge Pulse Measurements

CERTIFICATE

ВЦ.671258.039 ПС

The Manufacturer:

DIMRUS Ltd.
Suite 403, Permskaya St. 70,
Perm, Russia, 614000
Tel./Fax: (342) 212-84-74
Tel. (342) 212-91-93, 212-23-18
<http://www.dimrus.com>
E-mail: dimrus@dimrus.ru

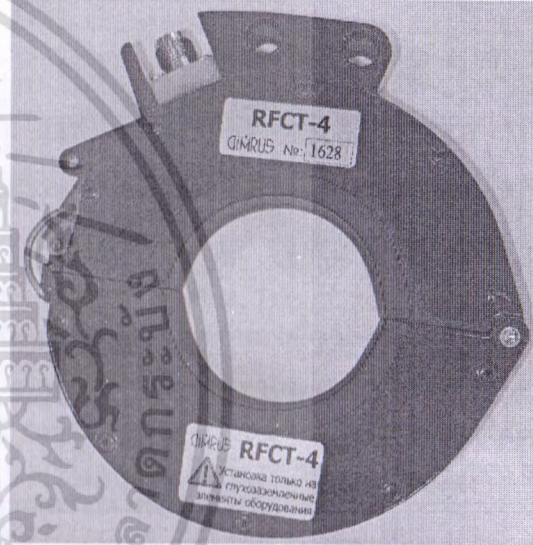
Perm, Russia

1. Application

RFCT-4.2 sensor is used in monitoring systems of the high voltage equipment insulation.

RFCT-4.2 sensor is used for partial discharge pulse measuring in high-voltage circuit breakers, switchgears, cables, in power transformer neutral circuits etc.

Figure 1. RFCT-4.2 Sensor Appearance



The large inner diameter of the sensor allows installing it on the cables of large cross section, which extends the field of the sensor application.

For ease of installation the sensor is made detachable, consisting of two halves. This allows you to quickly mount it on the current-carrying elements.

The RFCT-4.2 sensor is used for installation in the ground circuits of high-voltage equipment only; therefore, its electrical insulation is designed for voltages up to 500 volts.

2. Basic Specifications

The RFCT-4.2 sensor dimensions are shown in Figure 2. The appearance the RFCT-4.2 sensor is shown in Figure 1.

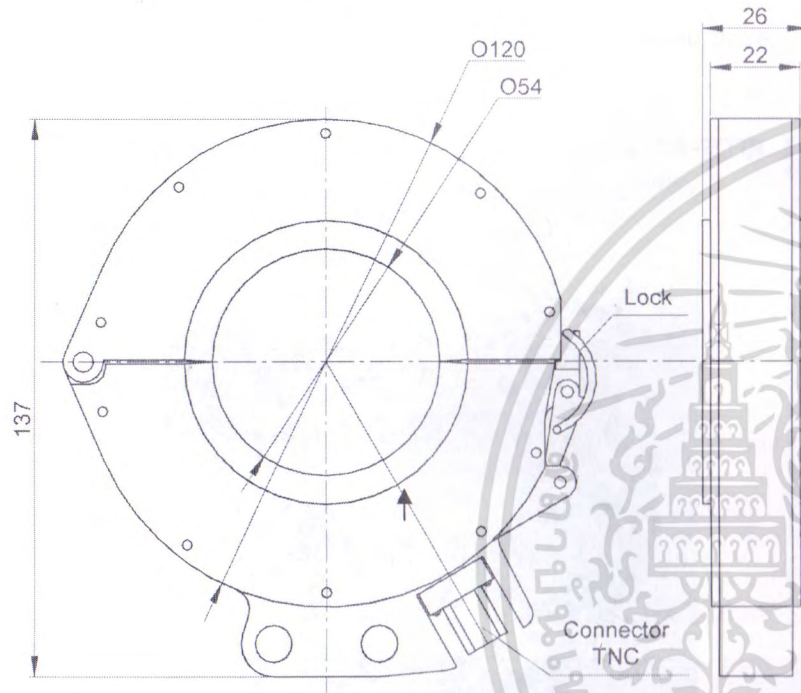


Figure 2. Overall and Mounting Dimensions of the RFCT-4.2 Sensor with an Additional Bracket for Stationary Installation.

RFCT-4.2 is a high-frequency core of large cross section and diameter in a metal case. The entire free internal volume of the RFCT-4.2 is filled with epoxy resin, or with special silicone rubber.

Due to the use of a high-frequency core in the RFCT-4.2 design, there are no industrial frequency currents of 50 hertz in the output signal of the RFCT-4.2, and RFCT-4.2 does not respond to them. The RFCT-4.2 output signal contains only the signals from high-frequency pulses flowing through the monitored ground circuit of a high-voltage device, mainly caused by the partial discharge pulses in the insulation.

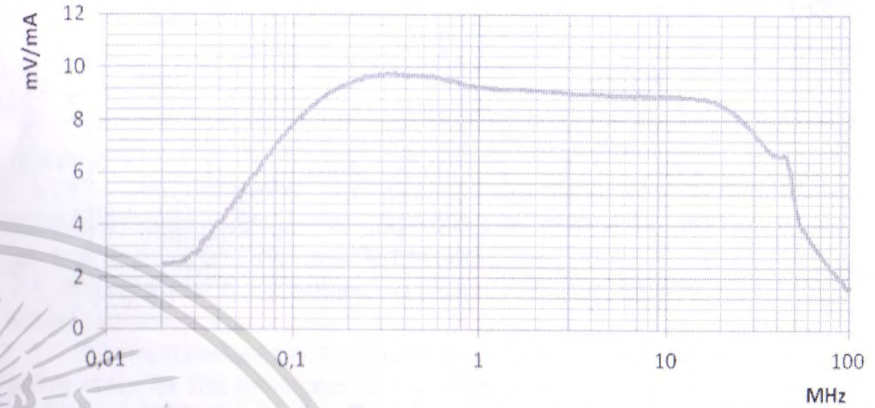


Figure 3. Amplitude-Frequency Response of RFCT-4.2 Sensor.

The standard amplitude-frequency response of RFCT-4.2 sensor is shown in Figure 3.

According to Figure 3, the optimal operating frequency range for RFCT-4.2 sensor is from 0.06 to 20 MHz. This range is quite sufficient for the systems of partial discharge pulse measurement in high-voltage equipment.

RFCT-4.2 Basic Specifications.

1. RFCT-4.2 can be operated at ambient air temperature from -60° to $+80^{\circ}$ C and relative humidity up to 98%, without condensation of moisture.
2. Ingress protection rating is IP65.
3. RFCT-4.2 insulation is designed for operating voltages **up to 500 V**.
4. RFCT-4.2 has built-in protection against pulse currents (switching) with output voltage limiting at 15 V.
5. RFCT-4.2 is mounted on grounding tires, wires, pipes. The direction of the arrow on the RFCT-4.2 body should match the direction of the current flow "to the ground" in the conductor to be monitored.
6. For partial discharge pulse measuring in high-voltage electric motors operating in hazardous production conditions, the RFCT-4.2 modification is issued in 1ExiaIIBCT6 modification.
7. **RFCT-4.2 does not require independent periodic verification and calibration. This is done on site, after installation.**

3. Package Set

#	Name	Quantity
1	RFCT-4.2	1 pc.
2	High Frequency Connector for TNC Cable (solder plug)	1 pc.
3	Safety pin	1 pc.
5	Heat-shrink tubing	50 mm
6	Certificate	1 pc.

4. RFCT-4.2 Installation

RFCT-4.2 is installed on the grounding bus and on the dead-grounded neutral. If the neutral is not dead-grounded, then RFCT-4.2 **installation on it is not allowed!** The exact place of RFCT-4.2 installation depends on the equipment design.

The direction of an arrow on the RFCT-4.2 body should match the direction of current flow in the monitored conductor.

5. Life Cycle, Warranty Liability

Full life cycle of the sensor is 10 years.

MTBF is min 8 years.

The manufacturer guarantees that the product meets the technical requirements when the user observes the operating, transportation and storage.

The warranty period is 36 months from the date of putting the product into operation. The manufacturer undertakes to replace the product, which is found to have defects within the specified period.

The product is not subject to repair. Any attempt to carry out repairs terminates the warranty.

The manufacturer is not liable for defects and breakages caused by non-observance by the consumer of the rules of storage, operation and mechanical damage.

6. Storage

6.1 Storage conditions in terms of the impact of climatic factors of the external environment shall meet the requirements of Group II of GOST 15150-69, storage temperature +5...+40°C, with relative air humidity 80% at temperature +25 °C.

6.2 Vapors of mercury, alkalis and other chemicals that cause corrosion are not allowed in storage places.

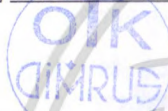
6.3 Storage without packing is not allowed.

7 Acceptance certificate

«PD-Line» sensor, serial # 136 is manufactured and recognized as fit for operation in accordance with the requirements of the current technical documentation.

Manufacturing date: 19. 0 2. 2020

Responsible manufacturer's representative: [Signature] Федосеев Д.А.

**8 Packing Certificate**

«PD-Line» sensor, serial # 136 is packed on manufacturer site in accordance with the requirements of the current technical documentation.

Packing date: 1 8. 0 3. 2020

Packed by: [Signature] Яборов Ю.И.



**«PD-Line»
Sensor**

Cable Lines PD Monitoring

CERTIFICATE

ВЛ.411999.032.021 ПС

Manufacturer:

DIMRUS, Ltd. (Perm, Russia)
Suite 403, Permskaya St., 70,
Perm, Russia, 614000
Tel. /fax: (342) 212-84-74
<http://www.dimrus.com>
E-mail: dimrus@dimrus.com

Perm, Russia

1. Application

"PD-Line" sensor is designed for recording PD parameters and determining the direction of high-frequency pulses in cable lines. For this purpose, two sensors of different types are installed in PD-Line, registering electric and magnetic components of electromagnetic field waves produced by partial discharges.

PD-Line sensor monitors the cable line parameters. Cable line surface temperature is measured using a contact temperature sensor.

A commercial frequency current sensor installed in "PD-Line" generates a signal of measurement process synchronization with the supply network sinusoid, which is necessary for correct diagnostics of a defect type in a cable line or coupling insulation.

The recorded signal is transmitted from PD-Line sensor to a connection block, which is also the power supply of the sensor. The signal is further transmitted to a PD recorder. Up to three PD-Line sensors can be connected to one connection block.

"PD-Line" sensor is installed directly on the surface of a high voltage cable, on one side of end coupling, or on both sides of the coupling.

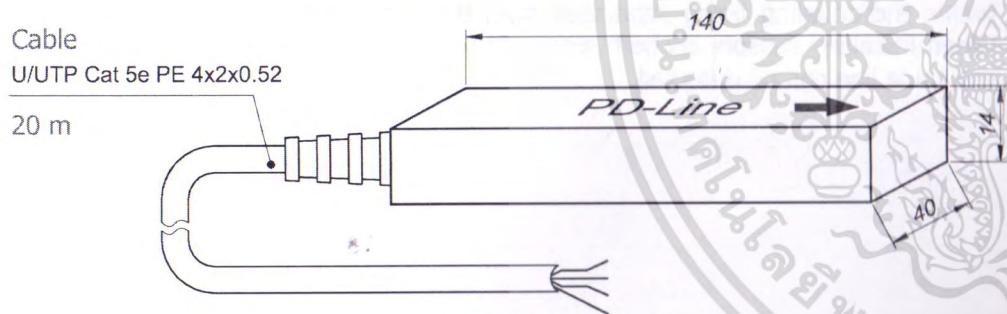
The sensors installation on a coupling allows partial discharges occurring within the coupling being separated from those occurring outside the coupling. When installing sensors on both sides of the coupling, the pulses direction along the cable line can be detected.

2. Basic Specifications.

Table 1 — «PD-Line» basic specifications:

Frequency range of PD field magnetic component signal	0,1 ÷ 30,0 MHz
Frequency range of PD field electric component signal	2 ÷ 100 MHz
Temperature measurement range	-60 ÷ +150 C°
Minimum load current required for timing sensor operation	5 A
Operating temperature range	-60°C ÷ +70 °C;
Relative air humidity up to 95 % at + 25 °C	
«PD-Line» overall dimensions (without cable length)	140×40×14 mm
U/UTP Cat 5e PE 4x2x0.52 Cable in metal hose	20 m

Figure 1. Appearance and overall dimensions.



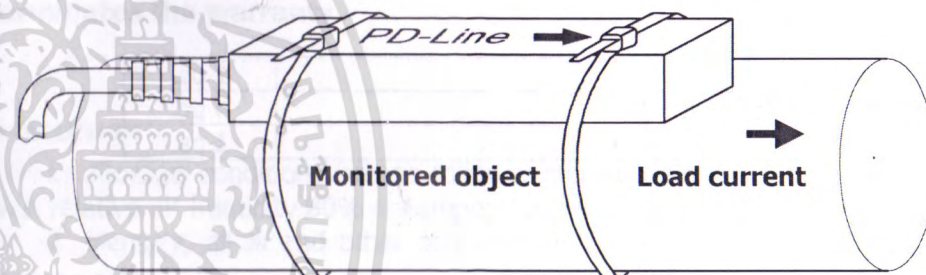
3. «PD-Line» Installation

- Fix the sensor on the controlled object using plastic zip ties (see Figure 2).

The arrow direction on "PD-Line" housing must be the same as the load current direction in the monitored conductor.

Caution! Metal fixing for "PD-Line" sensor installation is not allowed!

Figure 2. «PD-Line» installation.



- Lay a cable in metal hose along the structures from the sensor to the mounting enclosure.

Avoid cable damage; this will cause the sensor to fail.

Caution! There must be a gap (1 m) between the sensor housing and the edge of the metal hose. Metal hose must not contact high-voltage cable.

- Pull the cable through M16x1.5 (PG 9) cable gland seal of the mounting enclosure;
- Press the cable tips on cable cores;
- Connect cable cores to terminations as per identification;
- Fix the sensor cable in the cable gland.

Figure 3. Identification of terminations.



4 Scope of supply.

1	«PD-Line»	1 pc.
2	Plastic zip tie (0.5 m)	4 pc.
3	Certificate	1 ps.

5 Life cycle, Warranty Liability.

Full life cycle is 10 years.

MFTB is min 8 years.

The manufacturer guarantees that the product meets the requirements of the current documentation.

Warranty period is 12 months from the date of commissioning and max 18 months from the date of manufacture. The manufacturer undertakes to replace the product which is found to have defects within the specified period.

Warranty for the product does not apply to in the following cases:

- any defects and breakdowns caused through infringement of storage and operation rules by the consumer;
- any mechanical damages.

The product is not subject to repair. Any repair attempt terminates the warranty.

6 Storage

- 1 Storage conditions are as follows: storage temperature +5...+40°C, with relative air humidity 80% at temperature +25 °C.
- 2 Mercury, alkali and other corrosive chemicals shall not be allowed in storage areas.
- 3 Storage without packing is not allowed.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นางสาวรณัน อินวรรณ
วัน เดือน ปีเกิด	23 เมษายน 2540 ที่แพร่
ที่อยู่	17/5 ม.6 ตำบลเวียงทอง อำเภอสูงเม่น จังหวัดแพร่ 54000
ประวัติการศึกษา	2558 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาพลังงานไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้