

การจำลองการแพร่กระจายของดิสชาร์จบางส่วนในระบบเคเบิลใต้ดินที่มีความ
แตกต่างกันของตำแหน่งการต่อลงดิน

SIMULATION OF PARTIAL DISCHARGE PROPAGATION
IN UNDERGROUND CABLE SYSTEMS WITH DIFFERENT GROUNDING POSITIONS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2565
KMITL-2022-EN-D-xxx-xxx

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SIMULATION OF PARTIAL DISCHARGE PROPAGATION

IN UNDERGROUND CABLE SYSTEMS WITH DIFFERENT GROUNDING POSITIONS



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
KMUTL-2022-EN-D-xxx-xxx

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2022

SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การจำลองการแพร่กระจายของดิสชาร์จบางส่วนในระบบเคเบิลใต้ดินที่มีความแตกต่างของตำแหน่งการต่อลงดิน
นักศึกษา	นายทวีศักดิ์ จันทศร
รหัสประจำตัว	62601063
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2565
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.ภพ จันทร์เจริญสุข รศ.ดร.นรเศรษฐ์ พัฒนเดช

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการจำลองการเคลื่อนที่ของดิสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge หรือ PD) ที่แพร่กระจายในสายโคแอกเซียลของระบบเคเบิลใต้ดินโดยการศึกษาการแพร่กระจาย การเกิดพัลส์สะท้อน การลดของพัลส์และเทคนิคในการตรวจวัดสัญญาณพัลส์และการวิเคราะห์ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการรวมถึงการระบุตำแหน่งจุดเกิดพัลส์ ด้วยวิธี Time Domain Reflection (TDR) ของระบบเคเบิลใต้ดินที่มีการต่อลงดินที่แตกต่างกัน โดยจะแบ่งการวิจัยออกเป็น 2 ส่วน คือ 1. การจำลองในโปรแกรม โดยจะใช้เป็นโปรแกรม PsCAD และ 2. การทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยทั้งสองส่วนจะทำการจำลองการต่อลงดิน 3 รูปแบบ คือ 1. การต่อลงดินข้างเดียว (Single-point Bonding) 2. การต่อลงดินแบบกึ่งกลาง (Middle-point Bonding) 3. การต่อลงดินทั้งสองปลาย (Both-Ends Bonding) โดยในการจำลองจะใช้แหล่งจ่ายพัลส์ที่ถูกกำหนดค่าให้มีการจ่ายสัญญาณออกมาลักษณะเหมือนในการทดสอบ รวมถึงการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆของเคเบิลที่ตรงกับสายที่นำมาใช้ในการทดสอบ โดยในการทดสอบจะใช้วิธีการตรวจวัดสัญญาณพัลส์ PD ด้วยเซนเซอร์ High Frequency Current Transformer (HFCT) ที่ติดตั้งในตำแหน่งที่ต่างกันเพื่อนำมาวิเคราะห์ เปรียบเทียบรูปแบบสัญญาณและลักษณะเฉพาะของพัลส์ PD ที่เกิดขึ้นระหว่างการจำลองและการทดสอบจากการศึกษาวิจัยพบว่า การวิเคราะห์จากผลลัพธ์ในการทดสอบระบบเคเบิลใต้ดินที่มีการต่อลงดินด้านเดียวหรือทั้ง 2 ด้านโดยมีตำแหน่งการติดตั้งเซนเซอร์ที่ตำแหน่งเดียวกัน พบว่าหากมีการต่อลงดินทั้งสองข้างจะมีรูปแบบของพัลส์และลักษณะเฉพาะของพัลส์คล้ายกันแต่จะแตกต่างกันที่ขนาดของพัลส์ที่จะมีค่าน้อยกว่าการต่อลงดินแบบด้านเดียวเล็กน้อย สำหรับการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของพัลส์ PD จากการจำลองและการทดสอบของการต่อลงดินทั้ง 3 รูปแบบเป็นไปในทางเดียวกันทั้งในการจำลองและการทดสอบ แต่เนื่องจากการจำลองนั้นจำลองในสภาวะอุดมคติ ทำให้การนำเทคนิค TDR มาใช้นั้นสามารถระบุระยะทางจุดกำเนิดการดิสชาร์จบางส่วนได้แม่นยำ รวมทั้งการเกิดพัลส์สะท้อนที่ชัดเจนไม่เกิดสัญญาณรบกวนและมีการลดทอนที่แน่นอน ในขณะที่ผลการทดสอบนั้นมีปัจจัยภายนอกมารบกวนเยอะซึ่งส่งผลให้ไม่สามารถจับสัญญาณพัลส์ได้หากไม่มีความชำนาญในการใช้เครื่องมือวัดเพื่อที่จะสามารถวัดสัญญาณและนำมาวิเคราะห์ต่อได้ รวมถึงการเกิดการลดทอนที่มีมากทั้งจากสายเคเบิลและข้อต่อต่างๆ

Thesis	SIMULATION OF PARTIAL DISCHARGE PROPAGATION IN UNDERGROUND CABLE SYSTEMS WITH DIFFERENT GROUNDING POSITIONS
Student	Mr. Taweesak Juntasorn
Student ID.	62601063
Degree	Master of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2022
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Phop Chancharoensook Assoc. Prof. Dr. Norasage Pattanadech

ABSTRACT

This thesis presents a simulation of the partial displacement (Partial Discharge (PD) propagation in the coaxial cable of an underground cable system by studying diffusion, pulse reflection, reduction of pulses, and pulse signal measurement techniques which includes analysis of practical results in the laboratory by the time domain reflection (TDR) method for the determination of PD pulsed in underground cable systems with different grounding position. The research will be divided into 2 parts: 1. Simulation in the PsCAD program and 2. Laboratory testing. Both parts will simulate 3 types of grounding: 1. Single-point Bonding 2. Middle-point Bonding 3. Both-Ends Bonding. The simulation uses a pulse source that is configured to output the same signal as in the test. This includes configuring various cable parameters that match the cables used in the test. In the test, the PD pulse signal is measured with high-frequency current transformer (HFCT) sensors installed in different locations for analysis. Comparison of signal patterns and characteristics of PD pulses produced during simulation and testing of the research study that Analysis of results in testing of underground cable systems with one or both sides earthed with the same sensor mounting location. It was found that if the grounding on both sides has the same pulse pattern and pulse characteristics, the difference is that the amplitude of the pulse will be less than that of the single-point bonding slightly. As for the PD pulse propagation analysis, the simulation and testing of the three grounding models were consistent in both the simulation and the test, but since the simulation was simulated in ideal conditions. This allows the use of TDR techniques to accurately determine the partial discharge origin distance. as well as clear pulse reflection, no noise and exact attenuation. While the test results have a lot of external influences which result in the pulse signal being unable to be measured without proficiency in instrumentation including the occurrence of high attenuation from cables and connectors.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ภพ จันทรเจริญสุข และ รศ.ดร.นรเศรษฐ พัฒนเดช ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

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

สุดท้ายต้องขอขอบคุณครอบครัวของข้าพเจ้า เพื่อนๆ ที่ช่วยเหลือและเป็นเสมือนคู่คิด เป็นกำลังใจที่ดีตลอดมา

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่านทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

ทวีศักดิ์ จันทร

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.5 ขั้นตอนของการศึกษา.....	2
1.6 ประโยชน์ของการทำวิจัย.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 องค์ประกอบสายเคเบิลใต้ดิน.....	5
2.2 การต่อลงดินเพื่อการทำงานของระบบเคเบิลใต้ดิน.....	7
2.2.1 การต่อลงดินสำหรับสายเคเบิลใต้ดิน ในระบบ 22 -33 kV	7
2.2.2 การต่อลงดินสำหรับสายเคเบิลใต้ดินในระบบ 115 kV.....	8
2.3 การเกิดการดิสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิลใต้ดิน.....	9
2.4 การแพร่กระจายของแรงดันพัลส์และความเร็วของคลื่นที่เคลื่อนที่ในสายเคเบิล.....	11
2.5 Time Domain Reflection (TDR).....	12
2.6 คลื่นสะท้อนและคลื่นส่งผ่าน.....	12
2.7 Pulse Calibrator หรือ Pulse generator.....	14
บทที่ 3 การจำลองและการทดสอบ.....	15
3.1 การจำลองสัญญาณการดิสชาร์จบางส่วนในโปรแกรม.....	15
3.1.1 สายเคเบิล.....	15
3.1.2 อุปกรณ์สอบเทียบ PD พัลส์ หรือ เครื่องกำเนิดพัลส์.....	16
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ.....	18
3.3 วงจรการจำลองและการทดสอบระบบเคเบิลใต้ดิน.....	20

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.3.1 ทดสอบระบบเคเบิลใต้ดินที่มีการต่อลงดินข้างเดียว.....	20
3.3.2 ทดสอบระบบเคเบิลใต้ดินที่มีการต่อลงดินตรงกลาง.....	20
3.3.3 ทดสอบระบบเคเบิลใต้ดินที่มีการต่อลงดินที่ต้นสายและปลายสาย....	21
บทที่ 4 ผลการจำลองและการทดสอบ.....	22
4.1 ผลการจำลองระบบเคเบิลใต้ดิน.....	22
4.2.1 ผลจำลองระบบเคเบิลใต้ดินที่ต่อลงดินข้างเดียว (จ่ายพัลส์ต้นเคเบิล)	22
4.2.2 ผลจำลองระบบเคเบิลใต้ดินที่ต่อลงดินข้างเดียว (จ่ายพัลส์กลาง เคเบิล).....	25
4.2.3 ผลจำลองระบบเคเบิลใต้ดินที่ต่อลงดินข้างเดียว (จ่ายพัลส์ปลาย เคเบิล)	26
4.2.4 ผลจำลองระบบเคเบิลใต้ดินที่ต่อลงดินตรงกลาง (จ่ายพัลส์ต้นเคเบิล)	27
4.2.5 ผลจำลองระบบเคเบิลใต้ดินที่ต่อลงดินตรงกลาง โดยจ่ายพัลส์กลาง เคเบิล	29
4.2.6 ผลจำลองระบบเคเบิลใต้ดินที่ต่อลงดินตรงกลาง โดยจ่ายพัลส์ปลาย เคเบิล	30
4.2.7 ผลจำลองระบบเคเบิลใต้ดินที่ต่อลงดินที่ปลายทั้งสองด้าน โดยจ่าย พัลส์ต้นเคเบิล.....	32
4.2.8 ผลจำลองระบบเคเบิลใต้ดินที่ต่อลงดินที่ปลายทั้งสองด้าน โดยจ่าย พัลส์กลางเคเบิล.....	33
4.2.9 ผลจำลองระบบเคเบิลใต้ดินที่ต่อลงดินที่ปลายทั้งสองด้าน โดยจ่าย พัลส์ปลายเคเบิล.....	35
4.2 ผลการทดสอบระบบเคเบิลใต้ดิน.....	37
4.2.1 ผลทดสอบระบบเคเบิลใต้ดินที่ต่อลงดินข้างเดียว โดยจ่ายพัลส์ต้น เคเบิล	37
4.2.2 ผลทดสอบระบบเคเบิลใต้ดินที่ต่อลงดินข้างเดียว โดยจ่ายพัลส์กลาง เคเบิล	39
4.2.3 ผลทดสอบระบบเคเบิลใต้ดินที่ต่อลงดินข้างเดียว โดยจ่ายพัลส์ปลาย เคเบิล	41
4.2.4 ผลทดสอบระบบเคเบิลใต้ดินที่ต่อลงดินตรงกลางที่วางเครื่องมือวัด แบบที่ 1 โดยจ่ายพัลส์ต้นเคเบิล.....	43
4.2.5 ผลทดสอบระบบเคเบิลใต้ดินที่ต่อลงดินตรงกลางที่วางเครื่องมือวัด แบบที่ 1 โดยจ่ายพัลส์กลางเคเบิล.....	44

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.2.6 ผลทดสอบระบบเคเบิลใต้ดินที่ต่อลงดินตรงกลางที่วางเครื่องมือวัด แบบที่ 1 โดยจ่ายพัลส์ปลายเคเบิล.....	45
4.2.7 ผลทดสอบระบบเคเบิลใต้ดินที่ต่อลงดินตรงกลางที่วางเครื่องมือวัด แบบที่ 2 โดยจ่ายพัลส์ต้นเคเบิล.....	47
4.2.8 ผลทดสอบระบบเคเบิลใต้ดินที่ต่อลงดินตรงกลางที่วางเครื่องมือวัด แบบที่ 2 โดยจ่ายพัลส์กลางเคเบิล.....	48
4.2.9 ผลทดสอบระบบเคเบิลใต้ดินที่ต่อลงดินตรงกลางที่วางเครื่องมือวัด แบบที่ 2 โดยจ่ายพัลส์ปลายเคเบิล.....	49
4.2.10 ผลทดสอบระบบเคเบิลใต้ดินที่ต่อลงดินที่ปลายทั้งสองด้าน โดยจ่าย พัลส์ต้นเคเบิล.....	50
4.2.11 ผลทดสอบระบบเคเบิลใต้ดินที่ต่อลงดินที่ปลายทั้งสองด้าน โดยจ่าย พัลส์กลางเคเบิล.....	52
4.2.12 ผลทดสอบระบบเคเบิลใต้ดินที่ต่อลงดินที่ปลายทั้งสองด้าน โดยจ่าย พัลส์ปลายเคเบิล.....	53
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษา.....	56
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	56
5.2 ปัญหาที่พบ แนวทางแก้ไขและข้อเสนอแนะ.....	56
5.2.1 ปัญหาที่พบ.....	56
5.2.2 แนวทางแก้ปัญหา.....	57
5.2.3 ข้อเสนอแนะ.....	57
บรรณานุกรม.....	58
ภาคผนวก ก ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์.....	59
ภาคผนวก ข ข้อมูลสายโคแอกเชียล RG-58.....	65
ภาคผนวก ค ข้อมูลอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบในห้องปฏิบัติการ.....	67
ประวัติผู้เขียน.....	80

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.5 ขั้นตอนของการศึกษา	3
3.1 ค่าพารามิเตอร์ของเคเบิลที่ใช้ในการจำลอง	15
4.1 ผลการวัดพัลส์ที่จ่ายออกจากเครื่องกำเนิดพัลส์ที่ ต้น กลางและปลายเคเบิล	37
4.2 ผลการทดสอบการต่อลงดินข้างเดียว โดยจ่ายพัลส์ต้นเคเบิล	38
4.3 ผลการทดสอบการต่อลงดินข้างเดียว โดยจ่ายพัลส์กลางเคเบิล	40
4.4 ผลการทดสอบการต่อลงดินข้างเดียว โดยจ่ายพัลส์ปลายเคเบิล	42
4.5 ผลการทดสอบการต่อลงดินตรงกลาง แบบที่ 1 โดยจ่ายพัลส์ต้นเคเบิล	44
4.6 ผลการทดสอบการต่อลงดินตรงกลาง แบบที่ 1 โดยจ่ายพัลส์กลางเคเบิล	45
4.7 ผลการทดสอบการต่อลงดินตรงกลาง แบบที่ 1 โดยจ่ายพัลส์ปลายเคเบิล	46
4.8 ผลการทดสอบการต่อลงดินตรงกลาง แบบที่ 2 โดยจ่ายพัลส์ต้นเคเบิล	48
4.9 ผลการทดสอบการต่อลงดินตรงกลาง แบบที่ 2 โดยจ่ายพัลส์กลางเคเบิล	49
4.10 ผลการทดสอบการต่อลงดินตรงกลาง แบบที่ 2 โดยจ่ายพัลส์ปลายเคเบิล	50
4.11 ผลการทดสอบการต่อลงดินที่ปลายทั้งสองด้าน โดยจ่ายพัลส์ต้นเคเบิล	51
4.12 ผลการทดสอบการต่อลงดินที่ปลายทั้งสองด้าน โดยจ่ายพัลส์กลางเคเบิล	53
4.13 ผลการทดสอบการต่อลงดินที่ปลายทั้งสองด้าน โดยจ่ายพัลส์ปลายเคเบิล	54

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 สายเคเบิลใต้ดินแรงดันปานกลาง 22-33 kV	5
2.2 สายเคเบิลใต้ดินแรงดันสูง 115 kV	5
2.3 การต่อลงดินทั้งสองปลาย	7
2.4 การต่อลงดินแบบหลายจุด.....	8
2.5 การต่อลงดินข้างเดียวของระบบ 115 kV	8
2.6 การต่อลงดินแบบกึ่งกลางสายของระบบ 115 kV	9
2.7 การต่อลงดินแบบไขว้ของระบบ 115 kV	9
2.8 ประเภทของดิสชาร์จบางส่วน (a) Corona discharge; (b) Surface discharge; (c) Internal discharge	10
2.9 ภาพตัดขวางของโคแอกเซียลเคเบิลที่มีชั้นของเซมิคอนดักเตอร์เป็นส่วนประกอบ	11
2.10 การสะท้อนและการส่งผลของคลื่นในเคเบิล ณ จุดรอยต่อที่มีค่าอิมพีแดนซ์ ต่างกัน	13
2.11 วงจรการสอบเทียบการดิสชาร์จบางส่วน	14
3.1 การต่ออุปกรณ์สอบเทียบวงจรดิสชาร์จบางส่วน	16
3.2 ผลการวัดแรงดันไฟฟ้าที่ออกจากเครื่องกำเนิดพัลส์ ก) 100 pC ข) 200 pC ค) 500 pC ง) 1nC จ) 2 nC	17
3.3 ผลการจำลองวัดแรงดันไฟฟ้าที่ออกจากเครื่องกำเนิดพัลส์พัลส์จากพารามิเตอร์ที่ กำหนด ก) 100 pC ข) 200 pC ค) 500 pC ง) 1nC จ) 2 nC	18
3.4 อุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบ ก) สายโคแอกเซียล ชนิด RG-58 และสายดิน ข) ข้อต่อชนิด ต่างๆที่ใช้ในการทดสอบ ค) PD Pulse Calibrator	19
3.5 เครื่องมือวัดและวิเคราะห์สัญญาณการดิสชาร์จบางส่วน (PD Analyzer) และ High Frequency Current Transformer (HFCT)	19
3.6 วงจรทดสอบเคเบิลใต้ดินที่มีการต่อลงดินข้างเดียว	20
3.7 วงจรทดสอบเคเบิลใต้ดินที่มีการต่อลงดินตรงกลาง ติดตั้งเครื่องมือวัด แบบที่ 1	20
3.8 วงจรทดสอบเคเบิลใต้ดินที่มีการต่อลงดินตรงกลาง ติดตั้งเครื่องมือวัด แบบที่ 2	21
3.9 วงจรทดสอบเคเบิลใต้ดินที่มีการต่อลงดินที่ปลายทั้งสองข้าง	21
4.1 วงจรจำลองระบบเคเบิลใต้ดินที่ต่อลงดินข้างเดียว (จ่ายพัลส์ต้นเคเบิล)	22
4.2 ผลการจำลองพัลส์กระแสที่ต่อลงดินข้างเดียว (จ่ายพัลส์ต้นเคเบิล)	22
4.3 ภาพสะท้อนของพัลส์กระแสที่ตัวนำและซีลด์ ก) ภาพที่มีพัลส์ลำดับที่ 1 และ 2 ข) ภาพที่มีพัลส์ลำดับที่ 2 และ 3 ค) ภาพขยายพัลส์ลำดับที่ 2 ง) ภาพขยายพัลส์ลำดับที่ 3	23 - 24
4.4 ภาพสะท้อนของพัลส์กระแสที่กราวด์ ก) รูปเต็ม ข) ภาพขยายของพัลส์สะท้อน	24 - 25

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.5 แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้ตามระยะต่างๆของเคเบิลที่ต่อลงดินข้างเดียว (จ่ายพัลส์ต้นเคเบิล)	25
4.6 วงจรจำลองระบบเคเบิลใต้ดินที่ต่อลงดินข้างเดียว (จ่ายพัลส์กลางเคเบิล)	25
4.7 ผลการจำลองพัลส์กระแสของวงจรที่ต่อลงดินข้างเดียว (จ่ายพัลส์กลางเคเบิล)	26
4.8 ผลการจำลองของพัลส์กระแสที่สายดินของวงจรต่อลงดินข้างเดียว (จ่ายพัลส์กลางเคเบิล)	26
4.9 แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้ตามระยะต่างๆของเคเบิลของวงจรต่อลงดินข้างเดียว (จ่ายพัลส์กลางเคเบิล)	26
4.10 วงจรจำลองระบบเคเบิลใต้ดินที่ต่อลงดินข้างเดียว (จ่ายพัลส์ปลายเคเบิล)	26
4.11 ผลการจำลองพัลส์กระแสที่ต่อวงจรจำลองที่ต่อลงดินข้างเดียว (จ่ายพัลส์ปลายเคเบิล)	27
4.12 ผลการจำลองของพัลส์กระแสที่สายดินของการจำลองการต่อลงดินข้างเดียว (จ่ายพัลส์ปลายเคเบิล)	27
4.13 แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้ตามระยะต่างๆของเคเบิลของวงจรต่อลงดินข้างเดียว (จ่ายพัลส์ปลายเคเบิล)	27
4.14 วงจรจำลองระบบเคเบิลใต้ดินที่ต่อลงดินตรงกลาง (จ่ายพัลส์ต้นเคเบิล)	27
4.15 ผลการจำลองพัลส์กระแสที่ต่อวงจรจำลองการต่อลงดินตรงกลาง (จ่ายพัลส์ต้นเคเบิล)	28
4.16 ผลการจำลองของพัลส์กระแสที่สายดินของการจำลองการต่อลงดินตรงกลาง (จ่ายพัลส์ต้นเคเบิล)	28
4.17 แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้ตามระยะต่างๆของเคเบิลของวงจรต่อลงดินตรงกลาง (จ่ายพัลส์ต้นเคเบิล)	28
4.18 วงจรจำลองระบบเคเบิลใต้ดินที่ต่อลงดินตรงกลาง โดยจ่ายพัลส์กลางเคเบิล	29
4.19 ผลการจำลองพัลส์กระแสที่ต่อวงจรจำลองการต่อลงดินตรงกลาง (จ่ายพัลส์กลางเคเบิล)	29
4.20 ผลการจำลองของพัลส์กระแสที่สายดินของการจำลองการต่อลงดินตรงกลาง(จ่ายพัลส์กลางเคเบิล)	30
4.21 แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้ตามระยะต่างๆของเคเบิลของวงจรต่อลงดินตรงกลาง(จ่ายพัลส์กลางเคเบิล)	30
4.22 วงจรจำลองระบบเคเบิลใต้ดินที่ต่อลงดินตรงกลาง โดยจ่ายพัลส์ปลายเคเบิล	30
4.23 ผลการจำลองพัลส์กระแสที่ต่อวงจรจำลองการต่อลงดินตรงกลาง (จ่ายพัลส์ปลายเคเบิล)	31

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.24 ผลการจำลองของพัลส์กระแสที่สายดินของการจำลองการต่อลงดินตรงกลาง(จ่ายพัลส์ปลายเคเบิล)	31
4.25 แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้ตามระยะต่างๆของเคเบิลของวงจรต่อลงดินตรงกลาง	32
4.26 วงจรจำลองระบบเคเบิลใต้ดินที่ต่อลงดินที่ปลายทั้งสองด้าน โดยจ่ายพัลส์ต้นเคเบิล	32
4.27 ผลการจำลองพัลส์กระแสที่ต่อวงจรจำลองการต่อลงดินทั้งสองด้าน (จ่ายพัลส์ต้นเคเบิล)	32
4.28 ผลการจำลองของพัลส์กระแสที่สายดินของการจำลองการต่อลงดินทั้งสองด้าน (จ่ายพัลส์ต้นเคเบิล)	33
4.29 แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้ตามระยะต่างๆของเคเบิลของวงจรต่อลงดินทั้งสองด้าน(จ่ายพัลส์ต้นเคเบิล)	33
4.30 วงจรจำลองระบบเคเบิลใต้ดินที่ต่อลงดินที่ปลายทั้งสองด้าน โดยจ่ายพัลส์กลางเคเบิล	33
4.31 ผลการจำลองพัลส์กระแสที่ต่อวงจรจำลองการต่อลงดินทั้งสองด้าน (จ่ายพัลส์กลางเคเบิล)	34
4.32 ผลการจำลองของพัลส์กระแสที่สายดินของการจำลองการต่อลงดินทั้งสองด้าน	34
4.33 แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้ตามระยะต่างๆของเคเบิลของวงจรต่อลงดินทั้งสองด้าน	35
4.34 วงจรจำลองระบบเคเบิลใต้ดินที่ต่อลงดินที่ปลายทั้งสองด้าน โดยจ่ายพัลส์ปลายเคเบิล	35
4.35 ผลการจำลองพัลส์กระแสที่ต่อวงจรจำลองการต่อลงดินทั้งสองด้าน (จ่ายพัลส์ปลายเคเบิล)	35
4.36 ผลการจำลองของพัลส์กระแสที่สายดินของการจำลองการต่อลงดินทั้งสองด้าน (จ่ายพัลส์ปลายเคเบิล)	36
4.37 แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้ตามระยะต่างๆของเคเบิลของวงจรต่อลงดินทั้งสองด้าน(จ่ายพัลส์ปลายเคเบิล)	36
4.38 วงจรการวัดพัลส์ที่ออกจากเครื่องกำเนิดพัลส์	36
4.39 ผลการวัดพัลส์ที่จ่ายออกจากเครื่องกำเนิดพัลส์ เมื่อกำหนดจ่ายพัลส์ 100 nC ...	37
4.40 วงจรทดสอบระบบเคเบิลใต้ดินที่ต่อลงดินข้างเดียว โดยจ่ายพัลส์ต้นเคเบิล	37
4.41 ผลการทดสอบการต่อลงดินข้างเดียว โดยจ่ายพัลส์ต้นเคเบิล	38
4.42 ภาพการเคลื่อนที่ของพัลส์ที่ต่อลงดินข้างเดียว โดยจ่ายพัลส์ต้นเคเบิล	39
4.43 วงจรทดสอบระบบเคเบิลใต้ดินที่ต่อลงดินข้างเดียว โดยจ่ายพัลส์กลางเคเบิล	39
4.44 ผลการทดสอบการต่อลงดินข้างเดียว โดยจ่ายพัลส์กลางเคเบิล	40

สารบัญญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.45 วงจรทดสอบระบบเคเบิลใต้ดินที่ต่อลงดินข้างเดียว โดยจ่ายพัลส์ปลายเคเบิล	41
4.46 ผลการทดสอบการต่อลงดินข้างเดียว โดยจ่ายพัลส์ปลายเคเบิล	41
4.47 ภาพขยายพัลส์สะท้อนของการทดสอบการต่อลงดินข้างเดียว โดยจ่ายพัลส์ปลายเคเบิล	42
4.48 ภาพการเคลื่อนที่ของพัลส์ที่ต่อลงดินข้างเดียว โดยจ่ายพัลส์ต้นเคเบิล	42
4.49 วงจรทดสอบระบบเคเบิลใต้ดินที่ต่อลงดินตรงกลางที่วางเครื่องมือวัดแบบที่ 1 โดยจ่ายพัลส์ต้นเคเบิล	43
4.50 ผลการทดสอบการต่อลงดินตรงกลาง แบบที่ 1 โดยจ่ายพัลส์ต้นเคเบิล	43
4.51 วงจรทดสอบระบบเคเบิลใต้ดินที่ต่อลงดินตรงกลางที่วางเครื่องมือวัดแบบที่ 1 โดยจ่ายพัลส์กลางเคเบิล	44
4.52 ผลการทดสอบการต่อลงดินตรงกลาง แบบที่ 1 โดยจ่ายพัลส์กลางเคเบิล	44 - 45
4.53 วงจรทดสอบระบบเคเบิลใต้ดินที่ต่อลงดินตรงกลางที่วางเครื่องมือวัดแบบที่ 1 โดยจ่ายพัลส์ปลายเคเบิล	45
4.54 ผลการทดสอบการต่อลงดินตรงกลาง แบบที่ 1 โดยจ่ายพัลส์ปลายเคเบิล	45 - 46
4.55 พัลส์สะท้อนการทดสอบการต่อลงดินตรงกลาง แบบที่ 1 โดยจ่ายพัลส์ปลายเคเบิล	46
4.56 วงจรทดสอบระบบเคเบิลใต้ดินที่ต่อลงดินตรงกลางที่วางเครื่องมือวัดแบบที่ 2 โดยจ่ายพัลส์ต้นเคเบิล	47
4.57 ผลการทดสอบการต่อลงดินตรงกลาง แบบที่ 2 โดยจ่ายพัลส์ต้นเคเบิล	47
4.58 วงจรทดสอบระบบเคเบิลใต้ดินที่ต่อลงดินตรงกลางที่วางเครื่องมือวัดแบบที่ 2 โดยจ่ายพัลส์กลางเคเบิล	48
4.59 ผลการทดสอบการต่อลงดินตรงกลาง แบบที่ 2 โดยจ่ายพัลส์กลางเคเบิล	48 - 49
4.60 วงจรทดสอบระบบเคเบิลใต้ดินที่ต่อลงดินตรงกลางที่วางเครื่องมือวัดแบบที่ 2 โดยจ่ายพัลส์ปลายเคเบิล	49
4.61 ผลการทดสอบการต่อลงดินตรงกลาง แบบที่ 2 โดยจ่ายพัลส์ปลายเคเบิล	49 - 50
4.62 วงจรทดสอบระบบเคเบิลใต้ดินที่ต่อลงดินที่ปลายทั้งสองด้าน โดยจ่ายพัลส์ต้นเคเบิล	50
4.63 ผลการทดสอบการต่อลงดินที่ปลายทั้งสองด้าน โดยจ่ายพัลส์ต้นเคเบิล	51
4.64 พัลส์สะท้อนของการทดสอบการต่อลงดินที่ปลายทั้งสองด้าน โดยจ่ายพัลส์ต้นเคเบิล	52
4.66 ผลการทดสอบการต่อลงดินที่ปลายทั้งสองด้าน โดยจ่ายพัลส์กลางเคเบิล	52 - 53
4.67 พัลส์สะท้อนของการทดสอบการต่อลงดินที่ปลายทั้งสองด้าน โดยจ่ายพัลส์กลางเคเบิล	53

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.68 วงจรทดสอบระบบเคเบิลใต้ดินที่ต่อลงดินที่ปลายทั้งสองด้าน โดยจ่ายพัลส์ปลายเคเบิล.....	53
4.69 ผลการทดสอบการต่อลงดินที่ปลายทั้งสองด้าน โดยจ่ายพัลส์ปลายเคเบิล	54
4.70 พัลส์สะท้อนของการทดสอบการต่อลงดินที่ปลายทั้งสองด้าน โดยจ่ายพัลส์ปลายเคเบิล.....	55



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ระบบสายส่งกำลังเคเบิลใต้ดินในปัจจุบันมีการนำมาใช้งานกันอย่างแพร่หลาย ซึ่งถือว่าเป็นระบบที่มีความสำคัญต่อการขับเคลื่อนประเทศเป็นอย่างมากไม่ว่าจะในส่วนของภาคอุตสาหกรรมหรือในภาคครัวเรือน หากระบบเกิดปัญหาความขัดข้องหรือล้มเหลวจะเกิดผลกระทบที่เป็นปัญหาอย่างมากและส่งผลกระทบต่อความน่าเชื่อถือของผู้เกี่ยวข้องอย่างมาก ซึ่งการล้มเหลวของระบบเคเบิลใต้ดินนั้นมีหลายปัจจัยที่สามารถเกิดขึ้นได้ ไม่ว่าจะเป็นการเกิดความผิดพลาดจากการติดตั้ง หรือการละเลยการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน (Preventive Maintenance : PM) และอีกปัจจัยหนึ่งที่เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อระบบสายเคเบิลใต้ดินนั่นก็คือ ระบบฉนวน หากฉนวนทั้งส่วนของสายเคเบิลหรืออุปกรณ์เชื่อมต่อของสายเคเบิลมีการเสื่อมสภาพตามอายุการใช้งาน, เกิดความผิดปกติจากผลกระทบของสิ่งแวดล้อม, ความผิดพลาดจากการผลิตหรือสิ่งที่เกิดจากความผิดพลาดในการติดตั้งหรือการบำรุงรักษา ฉนวนจะถูกลดความสามารถในการทำหน้าที่ของตัวเอง หากปล่อยให้การเสื่อมสภาพและความผิดปกตินี้ดำเนินต่อไปเรื่อย ๆ อาจนำไปสู่การเกิดเบรกดาวน์โดยสมบูรณ์ซึ่งจะทำให้เกิดความเสียหายร้ายแรงต่อระบบสายเคเบิลใต้ดิน ดังนั้น เพื่อเป็นการป้องกันไม่ให้เกิดเหตุการณ์ดังกล่าวขึ้น การตรวจสอบ วิเคราะห์และประเมินสภาพของฉนวนในระบบจึงมีความสำคัญและจำเป็นอย่างมาก เพื่อเป็นแนวทางในการวางแผนการซ่อมบำรุงรักษาให้ระบบเคเบิลใต้ดินมีสภาพที่พร้อมให้ใช้บริการอยู่ตลอดเวลา และมีประสิทธิภาพสูงที่สุด อีกทั้งยังช่วยเพิ่มความมั่นคงน่าเชื่อถือยิ่งขึ้น

การประเมินการเสื่อมสภาพของระบบฉนวนสามารถช่วยในเรื่องการคาดการณ์เหตุการณ์ในอนาคตที่อาจเกิดขึ้นได้ ซึ่งเป็นผลดีและเป็นประโยชน์ต่อการวางแผนการบำรุงรักษาระบบสายเคเบิลใต้ดินและช่วยลดค่าใช้จ่ายที่ไม่จำเป็นออกไปได้ ปัจจุบันวิธีการตรวจสอบและวิเคราะห์ฉนวนสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การวัดค่าความต้านทาน การทดสอบความทนทานต่อแรงดันไฟฟ้า การทดสอบปัจจัยการกระจาย (tan delta test) เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีอีกวิธีหนึ่งที่มีความนิยมและมีการศึกษาวิจัยอย่างแพร่หลายในต่างประเทศ คือ การตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วน หรือ Partial Discharge (PD) เป็นวิธีที่สามารถดำเนินการได้ในขณะที่ระบบยังสามารถดำเนินการได้ตามปกติ (On-line test) ซึ่งผลการตรวจวัดที่ได้รับก็จะสามารถประเมินระบบฉนวนในสภาพการทำงานปกติที่มีปัจจัยในด้านของโหลดต่าง ๆ (สภาพแวดล้อม อุณหภูมิตามจริง) แต่ก็ยังมีข้อจำกัดในเรื่องของสัญญาณรบกวน นอกจากนี้วิธีการตรวจวัด PD ยังสามารถดำเนินการแบบออฟไลน์หรือการทดสอบระบบในขณะที่หยุดการใช้งานของเคเบิล วิธีนี้จะทำให้สามารถเก็บข้อมูลเพิ่มเติมจากกรณีทดสอบแบบออนไลน์ได้ เช่น สามารถปรับระดับแรงดันเพื่อหาแรงดันเริ่มเกิดของ PD หรือ PD Inception (PDIV) และแรงดันสุดท้ายในการเกิด PD หรือ PD Extinction (PDEV) ทั้งนี้การวิเคราะห์ลักษณะ PD ในระบบเคเบิลใต้ดินในภาคสนามนั้นมีความซับซ้อนเป็นอย่างมาก เนื่องจากปัจจัยของแต่ละระบบมีความแตกต่างกัน เช่น ระบบการต่อลงดินที่แตกต่างกัน บางระบบมีจุดเชื่อมต่อสายแต่บางระบบไม่มี เป็นต้น ด้วยเหตุผลข้างต้นจึงได้ทำการศึกษาจำลองเทคนิคในการตรวจวัดและวิธีการวิเคราะห์ผลการทดสอบที่มีจุดการต่อลงดินที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รวมถึงการวิเคราะห์ตำแหน่งการเกิด PD ซึ่งจากการจำลองการต่อลงดินของระบบเคเบิลใต้ดินที่แตกต่างกันในโปรแกรมการจำลอง เพื่อนำไปเป็นตัวอย่างและแนวทางในการวิเคราะห์สัญญาณ PD ที่ตรวจวัดได้จากการทดสอบระบบเคเบิลใต้ดินในห้องปฏิบัติการ ต่อไป

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาการจำลองการเกิดดิสชาร์จบางส่วนรวมถึงคุณลักษณะเฉพาะและการเคลื่อนของสัญญาณการดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นในฉนวนเคเบิลของระบบเคเบิลใต้ดิน
2. เพื่อศึกษาการตรวจวัดสัญญาณและการสะท้อนของคลื่นดิสชาร์จบางส่วนในระบบเคเบิลใต้ดิน
3. เพื่อศึกษาวิเคราะห์สัญญาณดิสชาร์จบางส่วนที่ตรวจวัดได้จากระบบเคเบิลใต้ดินที่มีความแตกต่างของตำแหน่งการต่อลงดิน

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

1. ผลจากการจำลองการวิเคราะห์คลื่นสะท้อนสามารถนำไปใช้ในการหาจุดกำเนิดพัลส์ดิสชาร์จบางส่วนได้โดยสามารถยืนยันได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ
2. ผลจากการวิเคราะห์สัญญาณพัลส์ดิสชาร์จบางส่วนจากการจำลองระบบเคเบิลใต้ดินและทดสอบภายในห้องปฏิบัติการสามารถนำไปเปรียบเทียบกันได้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความถูกต้องแม่นยำในการวิเคราะห์
3. ผลจากการวัดสัญญาณพัลส์ดิสชาร์จบางส่วนจากการจำลองระบบเคเบิลใต้ดินและทดสอบภายในห้องปฏิบัติการสามารถนำเทคนิคการตรวจวัดไปประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนในภาคสนามได้

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

การทำงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับทฤษฎีการแพร่กระจายของพัลส์ PD ภายในระบบฉนวนของระบบสายไฟใต้ดิน พร้อมทั้งศึกษาเทคนิคการตรวจวัดสัญญาณ PD ในระบบเคเบิลใต้ดินและการวิเคราะห์ลักษณะการเกิด การแพร่กระจาย การสะท้อนและการระบุตำแหน่งจุดกำเนิดของ PD ภายในระบบสายส่งใต้ดินที่เกิดปัญหา โดยงานวิจัยนี้ได้แบ่งการวิเคราะห์ข้อมูลการตรวจวัดออกเป็น 2 ส่วน คือ 1. การจำลองการแพร่กระจายของพัลส์ PD ในโปรแกรมจำลอง 2. การทดสอบการแพร่กระจายของพัลส์ PD ในห้องปฏิบัติการ สำหรับการทดสอบในห้องปฏิบัติการจะจำลองสายเคเบิลใต้ดินด้วยสายโคแอกเซียล (Coaxial Cable) และจำลองสัญญาณพัลส์ PD ด้วยเครื่องจ่ายสัญญาณพัลส์ หรือ PD Calibrator และใช้เครื่องออสซิลอสโคปสำหรับจับสัญญาณ โดยจะเริ่มการทดสอบจากเบื้องต้นด้วยเงื่อนไขที่แตกต่างกันในด้านของระยะความยาวสายและการมีจุดเชื่อมต่อระหว่างสาย เพื่อศึกษาลักษณะของสัญญาณที่แตกต่างกัน การลดทอนของสัญญาณและการเกิดสัญญาณพัลส์สะท้อน จากนั้นทำการจำลองระบบเคเบิลใต้ดินโดยแบ่งออกเป็น 3 กรณีตามลักษณะการต่อลงดิน คือ 1. การต่อลงดินข้างเดียว (Single-point Bonding) 2. การต่อลงดินแบบกึ่งกลาง (Middle-point Bonding) 3. การต่อลงดินทั้งสองปลาย (Both-Ends Bonding) เพื่อศึกษาเทคนิคในการตรวจวัดและวิธีการวิเคราะห์ผลการทดสอบที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ขั้นตอนของการศึกษา

การดำเนินงาน	พ.ศ.2565								
	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.
1. ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยในต่างประเทศเกี่ยวกับลักษณะของสัญญาณ PD เกิดขึ้นในระบบสายเคเบิลใต้ดิน									
2. ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยในต่างประเทศเกี่ยวกับการตรวจวัดและการวิเคราะห์สัญญาณ PD									
3. เรียนรู้การใช้งานโปรแกรมที่ใช้ในการจำลอง									
4. จำลองการทดสอบระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีการต่อลงดินแตกต่างกันในห้องปฏิบัติการ									
การดำเนินงาน	พ.ศ.2565								
	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.
5. เก็บข้อมูลและวิเคราะห์ผลการจำลอง									
6. เก็บข้อมูลและวิเคราะห์ข้อมูลผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ									
7. เปรียบเทียบผลการจำลองและการทดสอบในห้องปฏิบัติการ									
8. สรุปผลและประเมินผล									
9. จัดทำเอกสารปริยญาณิพนธ์ และเตรียมนำเสนอ									

1.6 ประโยชน์ของการทำวิจัย

1. ได้รับความรู้และความเข้าใจการแพร่กระจายของพัลส์ดิสชาร์จบางส่วนในระบบสายเคเบิลใต้ดินที่มีรูปแบบการต่อลงกราวด์ที่แตกต่างกัน
2. สามารถวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของรูปแบบสัญญาณและรูปร่างของพัลส์ดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นในสายเคเบิลใต้ดิน
3. สามารถระบุตำแหน่งจุดเกิดดิสชาร์จบางส่วนได้จากการวิเคราะห์พัลส์สะท้อนที่เกิดขึ้นหรือจากการเปรียบเทียบเวลาของพัลส์จากตำแหน่งและทิศทางเครื่องมือวัดในแต่ละตัว

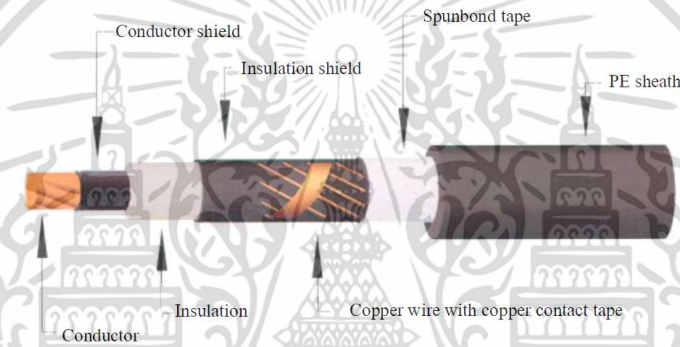
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

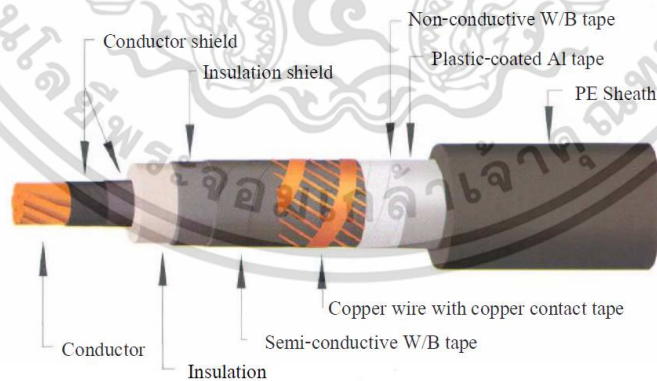
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 องค์ประกอบสายเคเบิลใต้ดิน

สายเคเบิลใต้ดินที่ใช้ในระบบไฟฟ้าต่างๆมีหลากหลายชนิด แต่ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมานิยมใช้สายเคเบิลชนิดฉนวน XLPE (Cross-linked polyethylene) มากขึ้นเนื่องจากการติดตั้งที่ง่ายและบำรุงรักษาไม่ยุ่งยากทั้งยังทนทานต่อสายเคเบิลได้ดี โดยปัจจุบันสายเคเบิลใต้ดินที่ กฟภ. ใช้งานทั้งระดับแรงดันปานกลาง (22-33 kV) และแรงดันสูง (115 kV) โดยตัวอย่างสายเคเบิลที่ใช้งานจะแสดงอยู่ในรูปภาพที่ 2.1 และ 2.2



รูปที่ 2.1 สายเคเบิลใต้ดินแรงดันปานกลาง 22-33 kV



รูปที่ 2.2 สายเคเบิลใต้ดินแรงดันสูง 115 kV

จากรูปที่ 2.1 และ 2.2 จะเห็นว่าเคเบิลมีบางส่วนที่เหมือนกันและบางส่วนที่แตกต่างกัน โดยแต่ละส่วนขององค์ประกอบเคเบิลจะมีหน้าที่แตกต่างกันไป ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ตัวนำ (Conductor) ทำหน้าที่นำกระแสไฟฟ้า โดยตัวนำจะมีหลากหลายลักษณะ
 - a. Solid Conductor
 - b. Round Stand Conductor หรือเรียกว่า ตัวนำตีเกลียว
 - c. Compact strand Conductor หรือเรียกว่า ตัวนำอัดแน่น คือตัวนำตีเกลียวที่ถูกนำมาบีบให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กลงเพื่อลดปริมาณตัวฉนวนหุ้ม
 - d. Segmental Conductor เป็นลักษณะของตัวนำตีเกลียวที่ถูกอัดให้เป็นรูป Segment และแต่ละ Segment จะมีฉนวนหุ้มก่อนนำมารวมกัน
 - e. Hollow Core Conductor เป็นตัวนำของ Oil Fill Cable โดยเป็นลักษณะของตัวนำที่เป็นท่อตรงกลาง ใช้เป็นท่อส่งน้ำมัน
2. Conductor Screen มีหน้าที่ทำให้ผิวสัมผัสของตัวนำและฉนวนเรียบไม่มีช่องว่างที่มีความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงตกคร่อมซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดการดีสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge)
3. ฉนวนไฟฟ้า (Insulation) ทำหน้าที่กันไม่ให้กระแสไฟฟ้ารั่วไหลหรือลัดวงจรจนเกิดการสูญเสียต่อระบบไฟฟ้า
4. Insulation Screen ทำหน้าที่เช่นเดียวกับ Conductor Screen คือลดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมบริเวณผิวสัมผัสของ Insulation และ Metallic Screen
5. Metallic Screen หรือ Sheath ทำหน้าที่เป็นดินและเป็นทางให้กระแสไฟฟ้าไหลกลับในกรณีที่เกิดการลัดวงจร บางครั้งยังทำหน้าที่เป็นชั้นกันน้ำในกรณีของสายเคเบิลใต้น้ำ (Submarine Cable) หรือทำหน้าที่รักษาความดันภายในสำหรับ Oil Fill Cable Metallic Screen อาจเป็นเทปหรือเป็นเส้นก็ได้
6. Reinforcement หรือ Armour เป็นชั้นที่เสริมเพื่อให้สายเคเบิลมีความทนทานแรงทางกลจากภายนอกที่อาจจะทำให้สายเคเบิลชำรุดเสียหาย โดยเฉพาะสายเคเบิลใต้น้ำหรือสายเคเบิลที่ฝังดินโดยตรง บางครั้งยังใช้เป็นตัวรับแรงดึงในการลากสายด้วย
7. Water Blocking Tape เป็นชั้นที่เสริมขึ้นมาในกรณีของสายเคเบิลใต้ดินแรงสูงที่ใช้ในบริเวณที่ชื้นแฉะเพื่อป้องกันน้ำไหลเข้าไปตามแนวสายเคเบิล โดยทั่วไปจะทำจากสารสังเคราะห์และมี Swellable Powder (สารที่ดูดซึมน้ำเข้าไปแล้วขยายตัว มีลักษณะเป็นผงคล้ายแป้ง) โดยทั่วไปจะอยู่ระหว่างชั้น Insulation Screen กับ Jacket
8. Laminated Sheath เป็นชั้นกันน้ำตามแนวขวางในสายเคเบิลแรงสูงมีลักษณะเป็นเทปโลหะหุ้มด้วย Plastic ทั้งสองหน้าจากนั้นนำมาห่อรอบ Ground Screen โดยพลาสติกที่ผิวนอกและผิวในของเทปจะถูกละลายให้ติดกันเป็นเนื้อเดียวทำให้สามารถป้องกันไม่ให้โมเลกุลของน้ำแพร่ผ่านเข้าไปยังฉนวนได้
9. Non-Metallic Sheath หรือที่เรียกกันโดยทั่วไปว่า Jacket ทำหน้าที่ป้องกันแรงกระแทกเสียดสีต่างๆ ขณะติดตั้งสายเคเบิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยสายเคเบิลที่ถูกนำมาใช้ในงานต่างๆ จะถูกออกแบบให้มีความเหมาะสมต่อการใช้งาน ซึ่งจะแตกต่างกันไปตามมาตรฐานของสายเคเบิลและปัจจัยทางการค้าของผู้ผลิตรวมถึงมาตรฐานของการติดตั้งที่ถูกกำหนดหรือถูกอ้างอิงโดยเจ้าของงานนั้นๆ

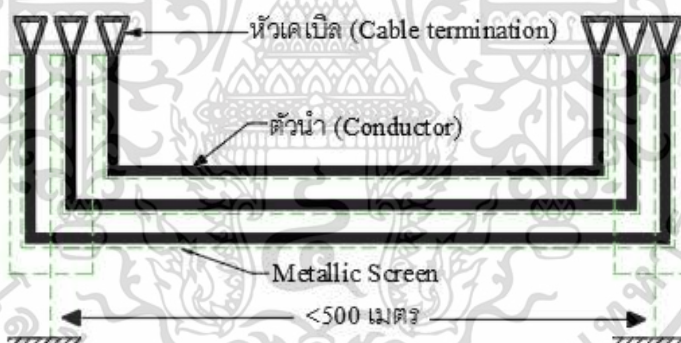
2.2 การต่อลงดินเพื่อการทำงานของระบบเคเบิลใต้ดิน

การต่อลงดิน หรือการต่อดิน จะทำการต่อที่สายชีลด์ (shield cable) หรือส่วนที่เรียกว่า Metallic Screen หรือ Sheath ของสายเคเบิลใต้ดิน เพื่อให้การกระจายตัวของสนามไฟฟ้าจากสายตัวนำไปยังจุดต่อลงดินมีความสม่ำเสมอ และช่วยป้องกันการเกิดเบรกดาวน์ที่ฉนวน ซึ่งจะทำให้ระบบมีเสถียรภาพในการทำงานมากขึ้น สำหรับสายเคเบิลใต้ดินจำเป็นต้องมีการต่อลงดินอย่างน้อย 1 จุด ข้อกำหนดการต่อลงดินสำหรับสายเคเบิลใต้ดินจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนตามระบบแรงดันไฟฟ้า ดังนี้

2.2.1 การต่อลงดินสำหรับสายเคเบิลใต้ดิน ในระบบ 22 -33 kV

การต่อลงดินของระบบสายเคเบิลใต้ดินระดับ 22-33 kV สามารถแยกรูปแบบตามระยะความยาวสายได้ 2 แบบแสดงดังรูปที่ 2.3 และ 2.4

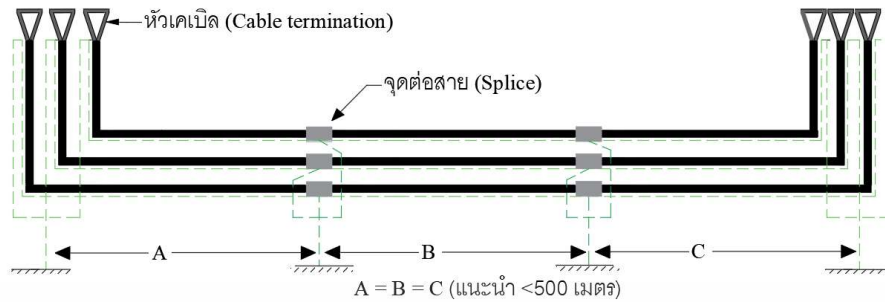
2.2.1.1 การต่อลงดินทั้ง 2 ปลาย (Both-Ends Bonding) สำหรับระยะทางไม่เกิน 500 เมตร



รูปที่ 2.3 การต่อลงดินทั้งสองปลาย

โดยหลักการแล้วระบบ 22-33 kV ถ้าระยะสายไม่เกิน 500 เมตร สามารถทำการต่อลงดินแบบด้านเดียว (Single-point Bonding) ได้ แต่ความสามารถในการนำกระแสของสายเคเบิลจะมีค่าสูงกว่าต่อลงดินทั้ง 2 ด้านเล็กน้อย แต่ความปลอดภัยต่ำกว่า

2.2.1.2 การต่อลงดินแบบหลายจุด (Multi-points Bonding) สำหรับกรณีที่มีระยะสายเคเบิลมากกว่า 500 เมตร

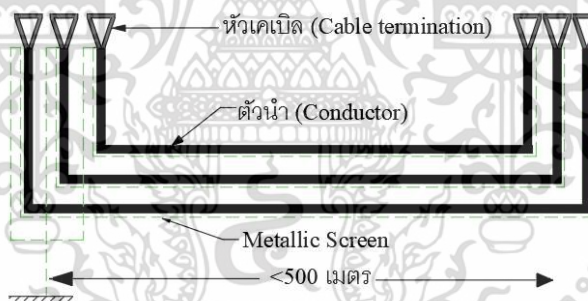


รูปที่ 2.4 การต่อลงดินแบบหลายจุด

2.2.2 การต่อลงดินสำหรับสายเคเบิลใต้ดินในระบบ 115 kV

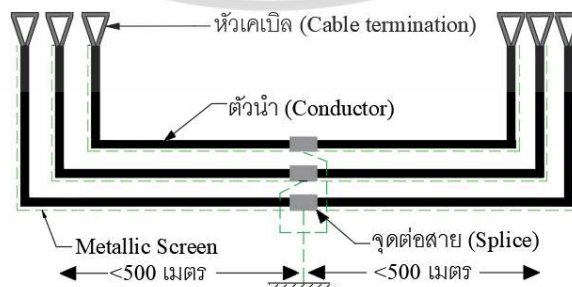
การต่อลงดินของระบบสายเคเบิลใต้ดินระดับ 115 kV สำหรับทุกกรณี (ไม่จำกัดระยะสายเคเบิล) ห้ามต่อลงดินทั้ง 2 ด้านของเคเบิลเด็ดขาด เนื่องจากหากทำการต่อทั้ง 2 ด้าน จะมีโอกาสเกิดกระแสไหลวนในสายชีลด์ได้ซึ่งจะทำให้เกิดความร้อนสะสมมากจนสายเคเบิลชำรุดหรือเกิดความเสียหายจากความร้อน จึงต้องเหลือปลายสายข้างหนึ่งเป็นปลายเปิดไว้เสมอ ถึงแม้จะเกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำก็就会被จำกัดไว้ให้ไม่เกิน 65 V โดยการต่อลงดินของระบบ 115 kV สามารถแบ่งตามระยะความยาวสายได้ ดังนี้

2.2.2.1 การต่อลงดินข้างเดียว (Single-point Bonding) สำหรับระยะไม่เกิน 500 เมตร



รูปที่ 2.5 การต่อลงดินข้างเดียวของระบบ 115 kV

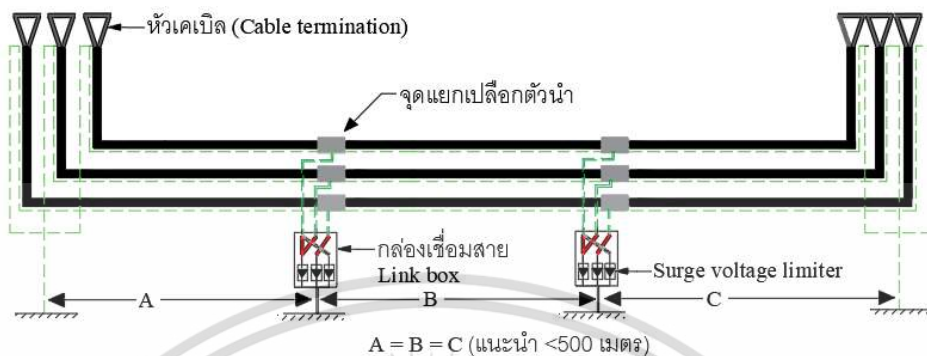
2.2.2.2 การต่อลงดินแบบกึ่งกลาง (Middle-point Bonding) สำหรับระยะทาง 500 - 1,000 เมตร



รูปที่ 2.6 การต่อลงดินแบบกึ่งกลางสายของระบบ 115 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

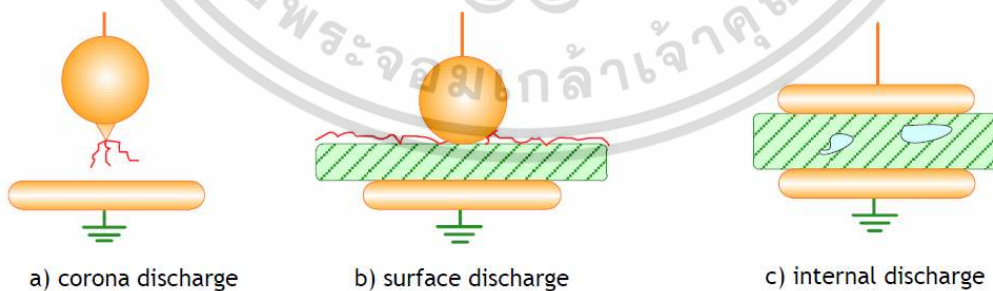


รูปที่ 2.7 การต่อลงดินแบบไขว้ของระบบ 115 kV

2.3 การเกิดการดิสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิลใต้ดิน

สายเคเบิลใต้ดินชนิดฉนวน XLPE นิยมนำมาใช้ในงานระบบสายส่งไฟฟ้าใต้ดินเป็นอย่างมาก เนื่องจากมีคุณลักษณะที่เหมาะสม แต่ถึงอย่างนั้นสายชนิดนี้ก็มีจุดอ่อนอย่างหนึ่งที่สามารถส่งผลกระทบต่อระบบส่งไฟฟ้าใต้ดินได้ เช่น การเกิดการดิสชาร์จบางส่วนหรือ Partial Discharge

การเกิดดิสชาร์จบางส่วนหรือ Partial Discharge คือ การดิสชาร์จแบบไม่สมบูรณ์ พลังงานที่ทำให้เกิดการดิสชาร์จนั้นไม่มากพอทำให้ฉนวนเปลี่ยนสภาพเป็นตัวนำได้ตลอดแนวระหว่างอิเล็กโทรด กล่าวคือ การที่ระบบฉนวนเกิดการเสถียรสภาพการเป็นฉนวนเพียงบางส่วน ซึ่งเป็นการดิสชาร์จที่ไม่ได้มีการเชื่อมโยงถึงกันระหว่างอิเล็กโทรด การเกิดดิสชาร์จบางส่วนจะเกิดขึ้นในระบบฉนวนที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอไม่เป็นเนื้อเดียวกันหรือมีสิ่งเจือปน ซึ่งจะก่อให้เกิดความเครียดสูงกว่าค่าความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤต แต่ไม่อาจทำให้เกิดเบรกดาวน์โดยสมบูรณ์ได้ โดยประเภทของดิสชาร์จบางส่วนสามารถแยกตามลักษณะการเกิดออกเป็น 3 ประเภท แสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.8 ประเภทของดิสชาร์จบางส่วน (a) Corona discharge; (b) Surface discharge; (c) Internal discharge

ประเภทของการดิสชาร์จบางส่วน

1. โคโรนาดิสชาร์จ (Corona discharge) จะเกิดขึ้นที่ตัวนำปลายแหลม ขอบคมหรือบริเวณจุดต่อของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่อยู่ในอากาศหรือก๊าซความดันปกติ จะเริ่มเกิดเมื่อความเครียดสนามไฟฟ้าเกินค่าสนามไฟฟ้าวิกฤตในอากาศ โดยเมื่อเกิดโคโรนาดิสชาร์จในอากาศจะสามารถรับรู้ได้ด้วยร่างกายคนคือ จะได้ยินเสียงฮิสซิ่ง คล้ายเสียงแมลงบิน หรือในตอนที่มีดสนิทจะเห็นแสงเรืองๆ
2. ดิสชาร์จตามผิว (Surface discharge) เกิดขึ้นบนพื้นผิวของฉนวนแข็งในบริเวณที่มีความเครียดของสนามไฟฟ้าสูงถึงค่าวิกฤตจนเกิดการดิสชาร์จในส่วนที่เป็นอากาศ แต่ในส่วนที่เป็นฉนวนแข็งซึ่งมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูงจึงไม่อาจเกิดการเบรกดาวน์ทะลุไปได้ซึ่งจะทำให้ดิสชาร์จไปตามผิวของฉนวนแข็งแทน
3. ดิสชาร์จภายใน (Internal discharge) เกิดขึ้นภายในฉนวนแข็งหรือเหลว ซึ่งลักษณะเนื้อฉนวนมีช่องว่าง โพรงอากาศหรือมีการปนเปื้อน เมื่อความเครียดจากสนามไฟฟ้าของฉนวนเริ่มเกิดขึ้นซึ่งตัวช่องว่างหรือโพรงอากาศจะเป็นจุดที่ทนต่อความเครียดได้น้อยซึ่งจะทำให้นำไปสู่การเบรกดาวน์ในเนื้อฉนวนหรืออาจเกิดเป็น Electrical Treeing

การเกิดดิสชาร์จบางส่วนในแต่ละครั้งจะมีพลังงานถ่ายเทให้กับพื้นผิวฉนวนในลักษณะชนกระแทกเป็นเหตุให้เกิดความร้อนเพิ่มขึ้นเฉพาะจุด เป็นผลให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีทำให้ฉนวนเสียหายเป็นจุด และเกิดการผิวดร้งขยายตัวมากขึ้นจนนำไปสู่การเกิดเบรกดาวน์อย่างสมบูรณ์ได้ ซึ่งจะทำให้ฉนวนเสียหาย อายุการใช้งานสั้นลงหรือบางกรณีอาจนำไปสู่ความเสียหายต่อระบบไฟฟ้าอย่างมาก

2.4 การแพร่กระจายของแรงดันพัลส์และความเร็วของคลื่นที่เคลื่อนที่ในสายเคเบิล

$$V_w = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r \epsilon_0 \mu_r \mu_0}} \quad (2.1)$$

เมื่อ ϵ_0 คือ Permittivity of free space or Vacuum permittivity หรือเรียกว่า ค่าเปอร์มิตติวิตีของสุญญากาศ ซึ่งจะมีค่า 8.854×10^{-12} F/m

ϵ_r คือ ค่าเปอร์มิตติวิตีของวัตถุ

μ_0 คือ Permeability of free space or Vacuum permeability หรือเรียกว่า ค่าเปอร์มิบิลิตีของสุญญากาศ มีค่าเท่ากับ $(4\pi \times 10^{-7})$ H/m

μ_r คือ ค่าเปอร์มิบิลิตีสัมพัทธ์

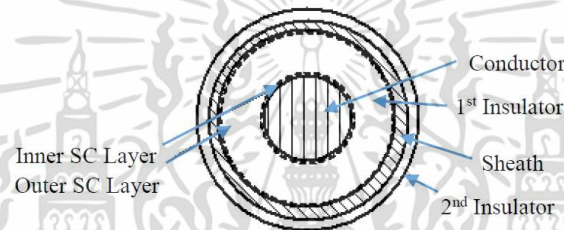
ในกรณีที่ฉนวนของสายเคเบิลเป็นอากาศ(สายเคเบิลแบบเปลือย หรือสายเคเบิลไม่มีฉนวน) ค่าเปอร์มิตติวิตีของวัตถุ(ϵ_r) และค่าเปอร์มิบิลิตีสัมพัทธ์ (μ_r) ของอากาศเป็น 1 ทั้งคู่ ความเร็วของคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พัลส์จะเท่ากับความเร็วของแสงที่เคลื่อนที่ในสุญญากาศ (c) ตามสมการที่ 2.1 อย่างไรก็ตามในสภาพการทำงานจริง อนุพันธ์ของตัวนำในสายเคเบิลไม่ได้มีเฉพาะแบบเปลือยซึ่งส่งผลให้ความเร็วคลื่นลดลงตามปัจจัยความเร็วของอนุพันธ์ Velocity factor (VF) โดยค่าปัจจัยความเร็วของอนุพันธ์สามารถหาได้จากสมการ

$$Velocity\ factor = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}} \quad (2.2)$$

ซึ่งค่า μ_r ของอนุพันธ์ที่ใช้กับสายเคเบิลเท่ากับ 1 เนื่องจากอนุพันธ์ที่ใช้ในสายเคเบิลไม่ใช่วัสดุแม่เหล็ก ดังนั้นปัจจัยความเร็วของคลื่นที่แพร่กระจายในสายเคเบิลจะขึ้นอยู่กับค่า ϵ_r ของอนุพันธ์ ซึ่งตามสมการที่ 2.2 จะสามารถสรุปได้ว่าค่าเปอร์เซ็นต์การบิดเบี้ยวในวัสดุมีอิทธิพลมากที่สุดต่อความเร็วของคลื่นในสายเคเบิล



รูปที่ 2.9 ภาพตัดขวางของโคแอกเซียลเคเบิลที่มีชั้นของเซมิคอนดักเตอร์เป็นส่วนประกอบ

เพื่อปรับเปลี่ยนค่าเปอร์เซ็นต์การบิดเบี้ยวที่มีอิทธิพลต่อความเร็วของพัลส์ในสายเคเบิลทางผู้ผลิตจึงทำการใส่ชั้นของเซมิคอนดักเตอร์ (Semi-Conductor layer : SC layer หรือ Conductor or insulator screen) ซึ่งนอกจากจะทำหน้าที่ตามที่กล่าวไปในหัวข้อองค์ประกอบเคเบิลได้ดินแล้ว ยังจะทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การบิดเบี้ยวเปลี่ยนแปลง โดยค่าเปอร์เซ็นต์การบิดเบี้ยวสามารถคำนวณได้ตามสมการ 2.4 [5]

$$\epsilon_{new} = \epsilon_r \frac{\ln\left(\frac{R_4}{R_1}\right)}{\ln\left(\frac{R_3}{R_2}\right)} \quad (2.3)$$

โดยที่ R_1 คือ รัศมีของตัวนำไฟฟ้า R_2 คือ รัศมีของตัวนำและความหนาของชั้นเซมิคอนดักเตอร์ด้านใน R_3 คือ รัศมีของอนุพันธ์ และ R_4 คือ รัศมีของอนุพันธ์และความหนาของชั้นเซมิคอนดักเตอร์ด้านนอก

2.5 Time Domain Reflection (TDR) [6,7]

การระบุตำแหน่ง PD ด้วยการวิเคราะห์ TDR คือ การหาระยะเวลาที่แตกต่างกันของสัญญาณพัลส์ PD ลูกแรกกับสัญญาณสะท้อนของพัลส์ PD ที่ตรวจวัดได้จากเครื่องมือวัดตัวเดียวกันแล้วนำไปคำนวณหาระยะของต้นกำเนิดของพัลส์ PD ได้ โดยใช้สมการที่ 2.4

$$TDR\ Length = c * VF * \frac{T_d}{2} \quad (2.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ TDR Length คือ ระยะทางของการสะท้อนที่โดเมนเวลา

c คือ ความเร็วแสง มีค่าเท่ากับ 2.9979×10^8 เมตรต่อวินาที

VF คือ Velocity factor แตกต่างกันไปตามประเภทของฉนวนซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ 2.1)

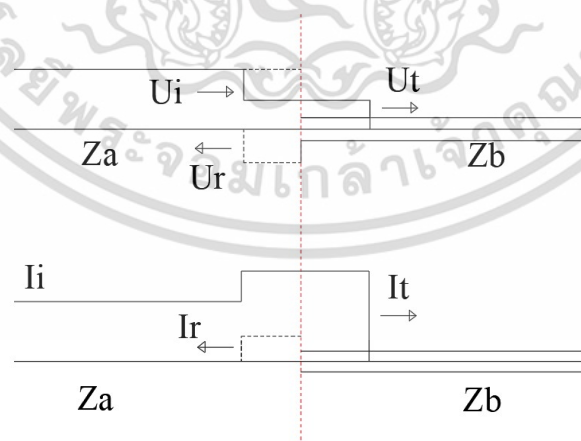
T_d คือ ผลต่างของเวลาระหว่างพัลส์ต้นกำเนิดและพัลส์สะท้อน

ข้อจำกัดของการวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้คือ ปลายสายของสายเคเบิลใต้ดินจะต้องเป็นปลายเปิด 1 ด้านเพื่อให้เกิดการสะท้อนของพัลส์ เช่น หากตรวจวัด PD ด้วยการใช้เซนเซอร์ HFCT คล้องที่สายชีลด์ที่มีการต่อลงดินที่ปลายสายของสายเคเบิลฝั่งหนึ่ง อีกฝั่งของปลายสายจะต้องไม่มีการต่อลงดินจึงจะสามารถตรวจวัดแล้วพบสัญญาณสะท้อน นอกจากนี้หากระยะสายเคเบิลที่ทำการตรวจวัด PD มีระยะทางที่มากและพัลส์ PD ที่เกิดขึ้นมีขนาดต่ำ ซึ่งบางครั้งจะมีขนาดที่ต่ำจนไม่สามารถแยกออกได้ระหว่างพัลส์สะท้อนและสัญญาณรบกวน

2.6 คลื่นสะท้อนและคลื่นส่งผ่าน [1]

รูปแบบของคลื่นแรงดันและคลื่นกระแสไฟฟ้าจะเคลื่อนที่ไปด้วยกัน โดยมีความสัมพันธ์ด้วยค่าเสรีจิมพีแดนซ์ของสายเคเบิลที่เคลื่อนที่อยู่ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าเสรีจิมพีแดนซ์ของเคเบิล(จุดที่เชื่อมต่อเปลี่ยนสายเคเบิล) ที่จุดรอยต่อสายเคเบิลจะเกิดคลื่นลูกใหม่สองคู่ โดยคู่ที่หนึ่งคือ แรงดันและกระแสที่สะท้อนกลับ (Reflected wave) รวมกับคลื่นที่เคลื่อนที่เข้ามาเป็นคลื่นตกกระทบ (Incident wave) ส่วนคู่ที่สองจะเป็นคลื่นคู่แรงดันและกระแสที่วิ่งผ่านจุดเปลี่ยนต่อไป ขนาดของคลื่นสะท้อนกลับและคลื่นวิ่งผ่านจะยังมีสัดส่วนโดยตรงกับค่าค่าเสรีจิมพีแดนซ์ โดยมีหลักว่า คลื่นสะท้อนเมื่อรวมกับคลื่นตกกระทบจะมีค่าเท่ากับคลื่นส่งผ่าน

ตัวอย่างเช่น รอยต่อของสายส่งซึ่งในอากาศที่มีค่าเสรีจิมพีแดนซ์ Z_a กับสายเคเบิลมีค่าเสรีจิมพีแดนซ์ Z_b และ $Z_b > Z_a$ ถ้าแรงดันเสรีจเป็นรูปขั้น ขนาด U_i ส่งผ่านอยู่ในสายซึ่งอากาศเมื่อเจอรอยต่อจะเกิดคลื่นสะท้อนกลับ U_r และส่งผ่านเป็น U_t ดังที่แสดงตามรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.10 การสะท้อนและการส่งผลของคลื่นในเคเบิล ณ จุดรอยต่อที่มีค่าอิมพีแดนซ์ต่างกัน

โดยมีเงื่อนไขว่า
$$U_i + U_r = U_t \tag{2.5}$$

หากกำหนดว่า $U_r = rU_i$ โดย r คือแฟกเตอร์การสะท้อนกลับ

ดังนั้น จะได้กระแสของคลื่นส่งผ่านจากสมการ
$$I_t = \frac{U_t}{Z_b} = \frac{(1+r)U_i}{Z_b} \tag{2.6}$$

$$r = \frac{Z_b - Z_a}{Z_b + Z_a} \tag{2.7}$$

$$U_r = \frac{Z_b - Z_a}{Z_b + Z_a} U_i \tag{2.8}$$

และ
$$U_t = (1+r)U_i = \frac{2Z_b}{Z_b + Z_a} U_i = bU_i \tag{2.9}$$

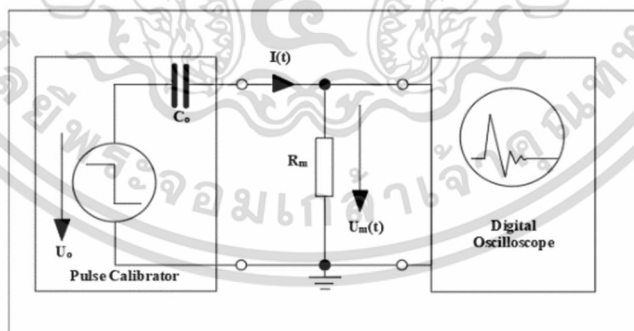
โดยที่ b คือ แฟกเตอร์ส่งผ่านที่สามารถหาได้จาก

$$\frac{2Z_b}{Z_b + Z_a}$$

จากสมการที่ 2.7) ค่าแฟกเตอร์สะท้อนกลับ (r) หากมีค่า 1 เมื่อเป็นวงจรเปิด มีค่า -1 เมื่อลัดวงจร และเป็น 0 หมายถึงว่าไม่มีการสะท้อน

2.7 Pulse Calibrator หรือ Pulse generator

การศึกษากำหนดการทำงานของเครื่องสอบเทียบดิซาร์จบางส่วนโดยใช้ศึกษาจากวงจรการสอบเทียบซึ่งอ้างอิงจากมาตรฐาน IEC 60270 โดยจะมีวงจรการสอบเทียบตามที่แสดงอยู่ในรูปภาพที่ 2.5



รูปที่ 2.11 วงจรการสอบเทียบการดิซาร์จบางส่วน [4]

จากรูปภาพจะเป็นตัวสอบเทียบวงจรพัลส์ที่ทำหน้าที่จ่ายแรงดันพัลส์ออกมาซึ่งต่ออยู่กับโหลด ตัวต้านทาน (R_m) โดยแรงดันพัลส์ที่ตกคร่อมตัวต้านทานจะสามารถวัดได้จากดิจิตอลสโคปที่มีแบนวิทมากกว่า 50 MHz ซึ่งจากภาพจะเห็นว่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของสโคปจะถูกควบคุมโดยโหลดที่ต่อขนานกันอยู่จากรูปภาพที่ 2.5 จะสามารถหาค่าประจุที่ถูกจ่ายออกมาได้จากสมการ

$$q = \int i(t)dt = \frac{1}{R_m} \int U_m(t)dt \quad (2.10)$$

ซึ่ง $i(t)$ คือกระแสพัลส์ที่ถูกจ่ายออกมาจากตัวสอบเทียบ และ $U_m(t)$ คือ แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมโหลดตัวต้านทาน โดยจากสมการจะเห็นได้ว่าค่าประจุที่ออกมา นั้นจะมีความถูกต้องมากขึ้นขึ้นอยู่กับอินทิเกรตและค่าของความต้านทานที่ถูกต้องด้วย จากสมการข้างต้นจะเป็นการหาค่าประจุที่ถูกจ่ายออกมาจากเครื่องกำเนิดพัลส์ ซึ่งเป็นการหาค่าจากที่วัดได้จริงแต่อย่างไรก็ตามหากทราบค่าของตัวเก็บประจุและค่าแรงดันพัลส์ที่ใช้อยู่ในวงจรของตัวสอบเทียบนั้น ก็สามารถหาค่าประจุที่จ่ายออกมาได้โดยใช้สมการที่ 10

$$q_{ref} = U_{ref} \times C_{ref} \quad (2.11)$$

q_{ref} คือ สัญญาณหรือประจุอ้างอิงที่จ่ายออกมาจากแหล่งจ่ายพัลส์ที่รู้ค่าอย่างแน่นอน แต่อย่างไรก็ตามปริมาณประจุที่จ่ายออกมานั้น ยังมีความคลาดเคลื่อนอยู่บ้างจากตัวเก็บประจุ



บทที่ 3

การจำลองและการทดสอบ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ส่วน คือ 1. การจำลองในโปรแกรม PsCAD และ 2. การทดสอบในห้องปฏิบัติการ สำหรับการจำลองในโปรแกรมจำลองจะอ้างอิงข้อมูลพารามิเตอร์ตามที่ให้ไว้ในฐานข้อมูลของสายโคแอกเซียล (Coaxial Cable หรือสาย Coax) เพื่อศึกษาการเคลื่อนที่ของพัลส์ในสายเคเบิล การสะท้อนและการลดทอนของพัลส์ PD ในกรณีที่มีการต่อสายดินที่ตำแหน่งต่างๆของระบบเคเบิลใต้ดิน จากนั้นนำไปวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการกับข้อมูลที่ได้ทำการศึกษาและทดสอบในห้องปฏิบัติการ เพื่อนำไปสู่การระบุตำแหน่งของการเกิดการดิสชาร์จบางส่วนและการศึกษาพัลส์สะท้อนที่ระยะต่างๆ

สำหรับการทดสอบในห้องปฏิบัติการจะมีการทดสอบการตรวจจับสัญญาณของเซนเซอร์ที่ตำแหน่งต่างกัน การติดตั้งในรูปแบบที่แตกต่างกัน และมีการจำลองระบบเคเบิลใต้ดินโดยแบ่งออกเป็น 3 กรณีตามลักษณะการต่อลงดินที่แตกต่างกันโดยที่จะนำมาศึกษานั้นมีดังนี้ 1. การต่อลงดินข้างเดียว (Single-point Bonding) 2. การต่อลงดินแบบกึ่งกลาง (Middle-point Bonding) 3. การต่อลงดินทั้งสองปลาย (Both-Ends Bonding)

3.1 การจำลองสัญญาณการดิสชาร์จบางส่วนในโปรแกรม

สำหรับการจำลองการสะท้อนและการเคลื่อนที่ของการดิสชาร์จบางส่วนนั้น ทางผู้วิจัยจะใช้โปรแกรม PsCAD ในการจำลองโดยเพื่อให้ผลที่ได้สอดคล้องกับในการทดสอบในห้องปฏิบัติการมากที่สุด ทางผู้วิจัยจึงกำหนดค่าที่ใช้ในพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้

3.1.1 สายเคเบิล

เนื่องจากการทดสอบนั้นได้ใช้สาย RG-58 ที่เป็นสายโคแอกเซียล ในการจำลองเป็นสายเคเบิลใต้ดิน โดยทางบริษัทผู้ผลิตได้ให้ข้อมูลซึ่งได้ถูกนำมาใช้กำหนดเป็นค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ซึ่งแสดงอยู่ในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์ของเคเบิลที่ใช้ในการจำลอง

ชื่อ	คุณสมบัติ	หน่วย	ค่าที่กำหนด
ตัวนำ	รัศมี	มิลลิเมตร	0.4065
	Resistivity	โอห์ม*เมตร	1.68e-8
	Relative permeability		1.0
ฉนวนชั้นแรก	รัศมี	มิลลิเมตร	1.475
	Relative permittivity		2.3
	Relative permeability		1.0
Sheath	รัศมี	มิลลิเมตร	1.755
	Resistivity	โอห์ม*เมตร	1.15e-9
	Relative permeability		1.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

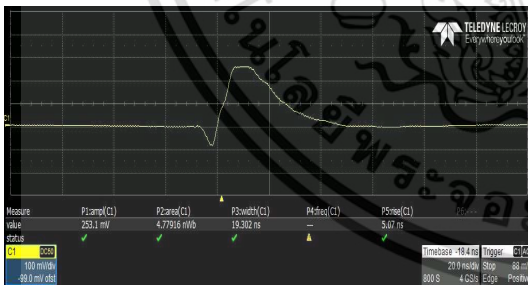
ฉนวนชั้นที่ 2	รัศมี	มิลลิเมตร	2.475
	Relative permittivity		3.0
	Relative permeability		1.0

3.1.2 อุปกรณ์สอบเทียบ PD พัลส์ หรือ เครื่องกำเนิดพัลส์

จากรูปภาพที่ 2.11 จะเห็นได้ว่าวงจรของเครื่องกำเนิดพัลส์แรงดันพัลส์ตามทฤษฎีนั้นมีลักษณะเป็นแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ต่ออนุกรมอยู่กับตัวเก็บประจุซึ่งไม่ได้บอกถึงข้อกำหนดของการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อให้ผลที่ได้ของการจำลองนั้นมีรูปแบบที่สอดคล้องกับการทดสอบจริงทางผู้วิจัยจึงจะทำการกำหนดค่าพารามิเตอร์โดยอ้างอิงจากตัวสอบเทียบที่นำมาใช้ในการทดสอบ โดยจะทำการต่อวงจรทดสอบจริงตามรูปที่ 2.11 และวัดผลทดสอบออกมาแล้วคำนวณย้อนกลับตามสมการที่ 2.10 และ 2.11 เพื่อตรวจสอบการจ่ายประจุและนำค่าต่างๆไปทำการกำหนดเครื่องกำเนิดพัลส์ในการจำลอง โดยการต่อวงจรสอบเทียบและสโคปจะแสดงอยู่ในรูปที่ 3.1 และผลที่ได้จะแสดงอยู่ในรูปที่ 3.2



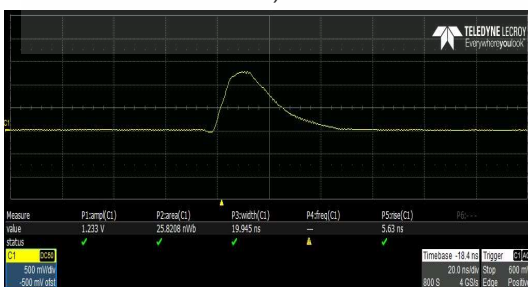
รูปที่ 3.1 การต่ออุปกรณ์สอบเทียบวงจรดิซชาร์จบางส่วน



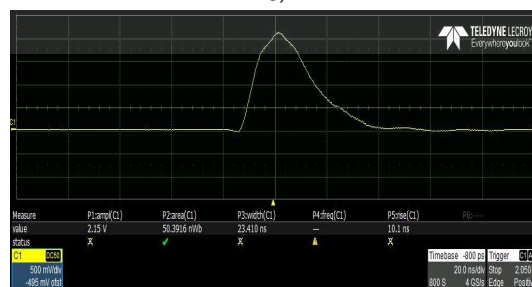
ก)



ข)

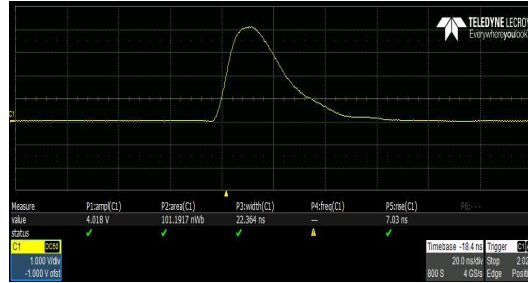


ค)



ง)

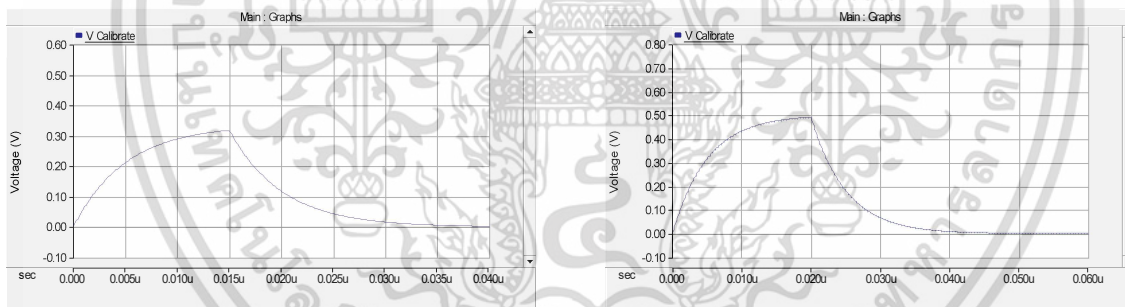
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



จ)

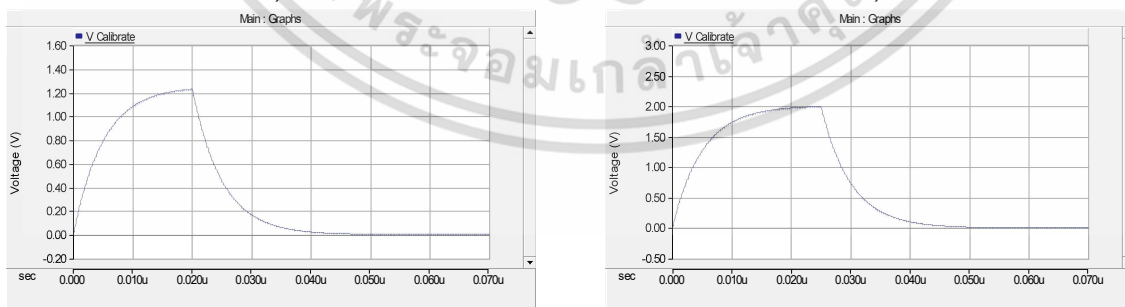
รูปที่ 3.2 ผลการวัดแรงดันไฟฟ้าที่ออกจากเครื่องกำเนิดพัลส์ ก) 100 pC ข) 200 pC
ค) 500 pC ง) 1nC จ) 2 nC

จากการต่อเครื่องกำเนิดพัลส์ตามรูปที่ 4.1 ทางผู้วิจัยได้ใช้สโคปที่มีอินพุตอิมพลีแดนซ์ขนาด 50 โอห์ม ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับรูปภาพที่ 2.11 Rm จะมีขนาดเท่ากับ 50 โอห์มนั่นเอง โดยเมื่อคำนวณย้อนกลับตามสมการที่ 2.10 และ 2.11 แล้วนั้นผลรวมของประจุที่ได้ออกมานั้นมีปริมาณใกล้เคียงกับที่เครื่องกำเนิดพัลส์กำหนด ตามที่คู่มือของเครื่องกำเนิดพัลส์อธิบายไว้ว่า ค่าประจุที่จ่ายออกมาในย่านขนาด 1 pC ถึง 5 nC นั้นใช้ตัวเก็บประจุขนาด 100 pF เท่ากันหมด ซึ่งหากดูตามสมการ 2.10 จึงเป็นเรื่องง่ายในการกำหนดค่าแรงดันไฟฟ้าเพื่อให้ได้ประจุอ้างอิงตามที่เครื่องกำเนิดพัลส์กำหนด โดยผลการจำลองตามรูปที่ 3.1 จะแสดงอยู่ในรูปที่ 3.3



ก)

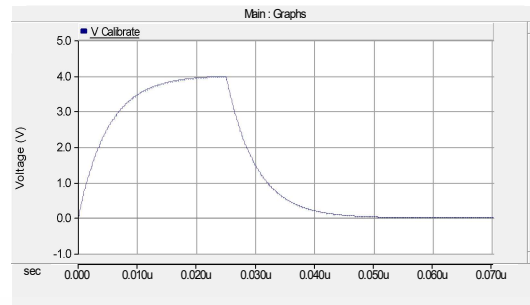
ข)



ค)

ง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



จ)

รูปที่ 3.3 ผลการจำลองวัตต์แรงดันไฟฟ้าที่ออกจากเครื่องกำเนิดพัลส์พัลส์จากพารามิเตอร์ที่กำหนด

ก) 100 pC ข) 200 pC ค) 500 pC ง) 1nC จ) 2 nC

จากผลที่แสดงอยู่ตามรูปที่ 3.3 นั้นแสดงให้เห็นว่าเพื่อให้ได้กราฟที่มีรูปแบบของการจำลองนั้นมีความสอดคล้องกับอุปกรณ์ที่นำมาจ่ายในการทดสอบ เมื่อมีการจ่ายประจุเพิ่มขึ้นแล้ว นอกจากปริมาณแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มมากขึ้นยังมีในเรื่องของ Ramp up time หรือเวลาที่เพิ่มขึ้นของแรงดันไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลงด้วย เนื่องจากหากกำหนดที่เวลาเท่าเดิม เมื่อจ่ายประจุเพิ่มขึ้นโดยการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าอย่างเดียวจะทำให้แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายออกมามีค่าแอมพลิจูดที่มากกว่าผลจากการทดสอบในปริมาณที่สูงมาก

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบมีทั้ง 2 ส่วน คือ ส่วนของการตรวจวัดและวิเคราะห์พัลส์ PD และส่วนของการจำลองระบบสายเคเบิลใต้ดินแสดงดังรูปที่ 3.4 และ 3.5 สำหรับการตรวจจับพัลส์ PD จะใช้เซนเซอร์ตรวจจับพัลส์ PD ทางไฟฟ้าหรือ High Frequency Current Transformer (HFCT) สำหรับการจำลองระบบสายส่งเคเบิลใต้ดินจะใช้สายโคแอกเซียล ชนิด RG58 จำลองเป็นสายเคเบิลใต้ดินและใช้เครื่อง PD Calibrator จำลองเป็นแหล่งจ่ายพัลส์ PD



ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

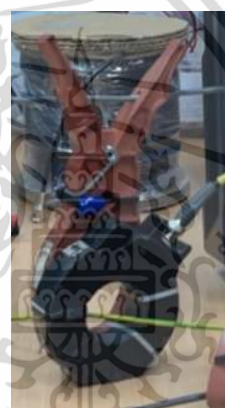


ข)



ค)

รูปที่ 3.4 อุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบ ก) สายโคแอกเซียล ชนิด RG-58 และสายดิน ข) ข้อต่อชนิดต่างๆที่ใช้ในการทดสอบ ค) PD Pulse Calibrator



รูปที่ 3.5 เครื่องมือวัดและวิเคราะห์สัญญาณดิสชาร์จบางส่วน (PD Analyzer) และ High Frequency Current Transformer (HFCT)

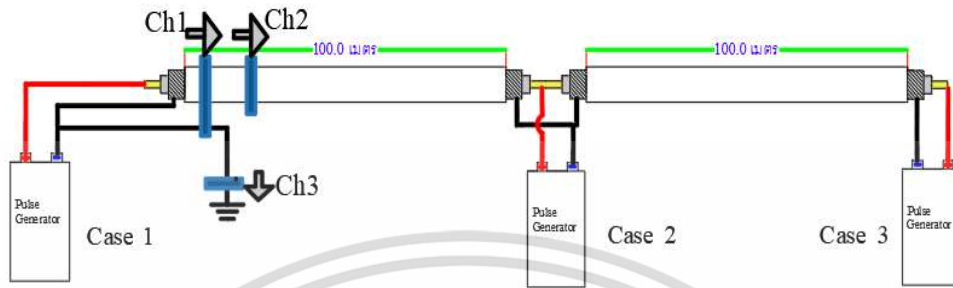
ตามที่แสดงอยู่ในรูปที่ 3.4 ก) จะเห็นว่าสาย RG-58 มีลักษณะเป็นขดม้วนอยู่หลายขด โดยแต่ละขดจะมีความยาวของสายประมาณ 100 เมตร และรูป 3.4 ข) เพื่อไม่ให้เกิดการสะท้อนหรือเกิดการลดทอนช่วงที่สัญญาณเคลื่อนที่ผ่านข้อต่อสายต่างๆ ด้วยเหตุผลความแตกต่างของอิมพีแดนซ์ข้อต่อที่นำมาใช้จะมีขนาด 50 โอห์ม เท่ากันหมดตามพิกัดอินพุตอิมพีแดนซ์ของสาย RG-58

3.3 วงจรการจำลองและการทดสอบระบบเคเบิลใต้ดิน

3.3.1 ทดสอบระบบเคเบิลใต้ดินที่มีการต่อลงดินข้างเดียว

การทดสอบนี้จะจำลองวงจรขึ้นมาเพียงเฟสเดียวที่ระยะเคเบิล 200 เมตร สำหรับการตรวจวัดจะทำในฝั่งที่มีการต่อลงดิน โดยรูปแบบการติดตั้งเซนเซอร์ ชนิด HFCT สามารถคล้องได้ 3 ตำแหน่ง (เนื่องจากเป็นข้อจำกัดของเครื่องมือวัด แต่ในการจำลองจะทำการวัดทุกตำแหน่งที่มีการเคลื่อนที่ของเคเบิล) คือ 1. คล้องสายเคเบิลและสายดินในทิศทางเข้าหาเคเบิล 2. คล้องสายเคเบิลใน

ทิศเข้าหาสายเคเบิล 3. คล้องเฉพาะสายดินในทิศลงดิน สำหรับการทดสอบจะถูกแยกเป็น 3 กรณี โดยการสลับตำแหน่งการจ่ายพัลส์ของเครื่องกำเนิดพัลส์

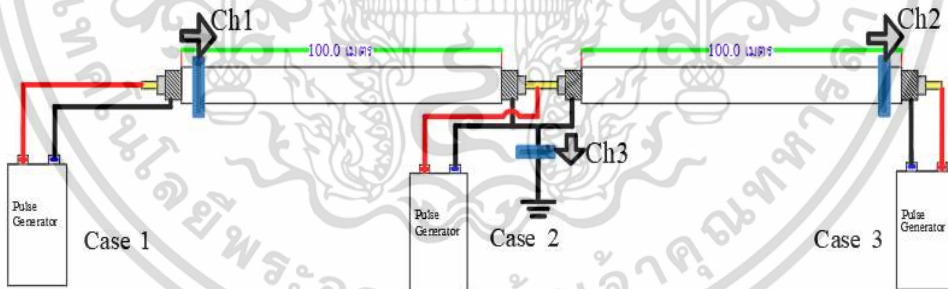


รูปที่ 3.6 วงจรทดสอบเคเบิลใต้ดินที่มีการต่อลงดินข้างเดียว

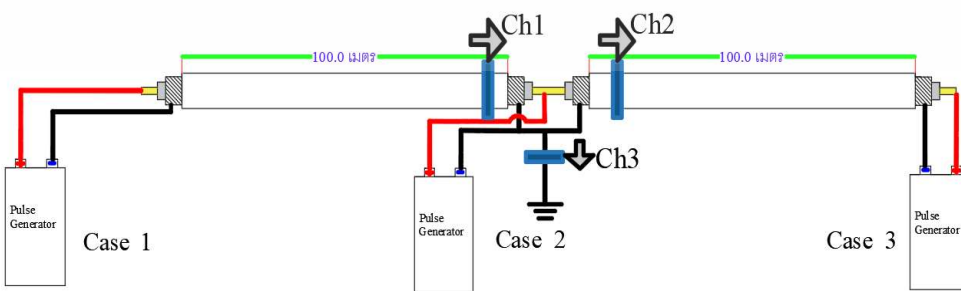
ตามที่แสดงอยู่ในรูปภาพที่ 3.6 การสลับตำแหน่งการจ่ายพัลส์แบ่งเป็น 3 กรณี คือ 1. ต้นสายของเคเบิลที่มีการต่อลงดิน 2. ระยะ 100 เมตร จากต้นสาย หรือที่กึ่งกลางของสายทดสอบ และ 3. ระยะ 200 เมตร หรือปลายสายทดสอบ

3.3.2 ทดสอบระบบเคเบิลใต้ดินที่มีการต่อลงดินตรงกลาง

เนื่องจากข้อจำกัดของเครื่องมือวัดที่สามารถต่อกับ HFCT ได้เพียง 3 ตำแหน่งเท่านั้น ทางผู้วิจัยจึงทำการแบ่งการทดสอบของการต่อลงดินแบบตรงกลางออกเป็น 2 แบบ ตามที่แสดงอยู่ในรูปที่ 3.7 และ 3.8



รูปที่ 3.7 วงจรทดสอบเคเบิลใต้ดินที่มีการต่อลงดินตรงกลาง ติดตั้งเครื่องมือวัด แบบที่ 1



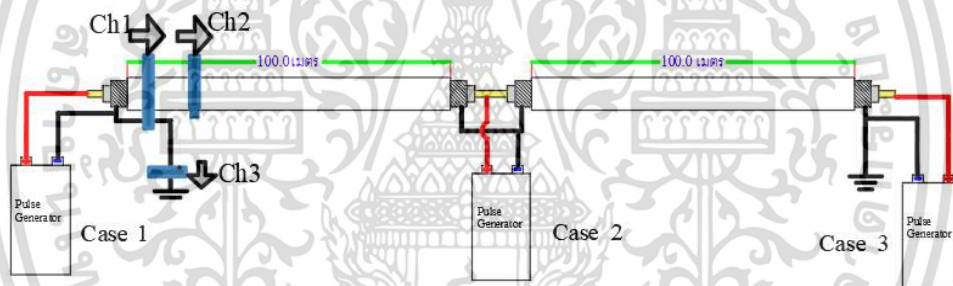
รูปที่ 3.8 วงจรทดสอบเคเบิลใต้ดินที่มีการต่อลงดินตรงกลาง ติดตั้งเครื่องมือวัด แบบที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามที่แสดงในรูปที่ 3.7 และ 3.8 จะเห็นได้ว่าที่เครื่องมือวัดตัวที่ 3 จะมีตำแหน่งและทิศทางที่เหมือนเดิม เพื่อเป็นการยืนยันถึงผลการทดสอบที่เป็นการต่อแบบเดิมแต่เพียงเปลี่ยนตำแหน่งการวัด โดยเครื่องมือวัดตัวที่ 1 และตัวที่ 2 จะใช้ทิศทางที่หันเข้าเคเบิลเหมือนเดิม แต่ทำการเปลี่ยนระยะทดสอบจากที่ทดสอบที่ปลายเคเบิลตามแบบที่ 1 จะทำการขยับเข้ามาที่ตำแหน่งใกล้กับตำแหน่งการต่อลงดินที่กลางสาย

3.3.3 ทดสอบระบบเคเบิลใต้ดินที่มีการต่อลงดินที่ปลายทั้งสองด้าน

ในการทดสอบระบบนี้จะทำการคล้องเครื่องมือทดสอบในตำแหน่งและทิศทางเหมือนการต่อปลายด้านเดียว คือ 1. คล้องสายเคเบิลและสายดินในทิศทางเข้าหาเคเบิล 2. คล้องสายเคเบิลในทิศเข้าหาสายเคเบิล 3. คล้องเฉพาะสายดินในทิศลงดิน และทั้งหมดจะทำในครั้งเดียวไม่แบ่งแบบการต่อลงดินที่กลางสายเนื่องจากการย้ายไปยังจุดอื่นจะไม่สามารถแสดงผลที่แตกต่างไปจากกรณีอื่นมากเท่าที่ควร ซึ่งการทดสอบนี้จะเหมือนการทดสอบระบบเคเบิลใต้ดินที่มีการต่อลงดินด้านเดียว เนื่องจากผลทดสอบที่ได้มานั้นจะสามารถทำการเปรียบเทียบได้ง่ายขึ้นเนื่องจากการที่วางเครื่องมือวัดเหมือนกัน



รูปที่ 3.9 วงจรทดสอบเคเบิลใต้ดินที่มีการต่อลงดินที่ปลายทั้งสองข้าง

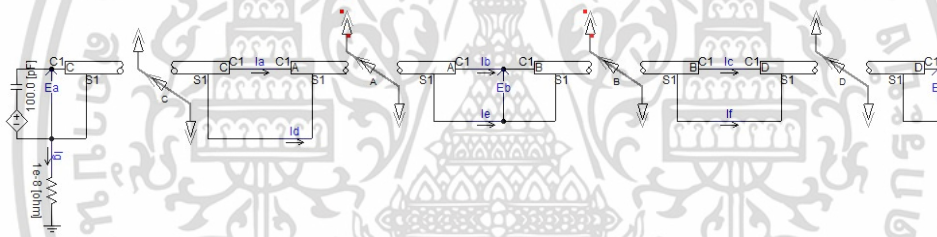
บทที่ 4

ผลการจำลองและทดสอบ

4.1 ผลการจำลองระบบเคเบิลใต้ดิน

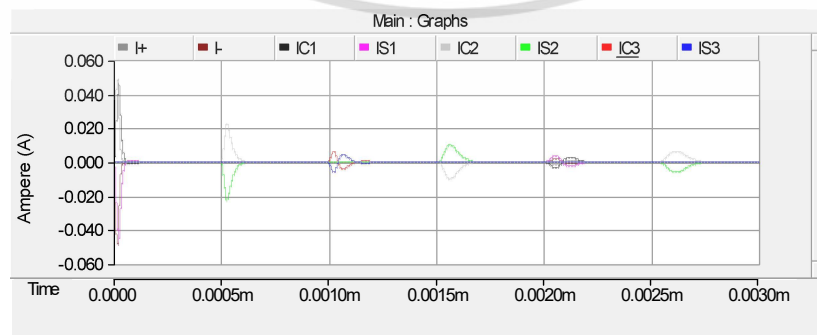
ในการจำลองระบบเคเบิลใต้ดินนั้น ทางผู้วิจัยจะจำลองโดยใช้โปรแกรม PsCAD โดยมีการกำหนดพารามิเตอร์และค่าต่างๆตามที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 3 รวมถึงวงจรในการจำลอง แต่เนื่องจากวงจรในบทที่ 3 นั้นได้วางตำแหน่งของเครื่องมือวัดเพียงวงจรละ 3 ตำแหน่งตามข้อจำกัดของเครื่องมือแต่ในการจำลองในโปรแกรมนั้นไม่มีข้อจำกัดในเรื่องดังกล่าว จึงจะทำการวัดจุดต่างๆ ตามที่แสดงอยู่ในรูปที่ 4.1 เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ในการจำลองจะใช้การจ่ายพัลส์ที่ 1 nC เท่ากันหมด ซึ่งจำใช้แรงดันไฟฟ้า 10 โวลต์ ตัวเก็บประจุขนาด 100 pF และกำหนด Ramp up time ไว้ที่ 20 นาโนวินาที

4.1.1 ผลจำลองระบบเคเบิลใต้ดินที่ต่อลงดินข้างเดียว (จ่ายพัลส์ต้นเคเบิล)



รูปที่ 4.1 วงจรจำลองระบบเคเบิลใต้ดินที่ต่อลงดินข้างเดียว (จ่ายพัลส์ต้นเคเบิล)

จากรูปที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าการวางสโคปวัดแรงดันและกระแสไฟฟ้าไว้ตามจุดต่างๆ โดยจะสังเกตว่าการแบ่งช่วงระยะเคเบิลเป็น 4 ช่วง เนื่องจากเพื่อให้ผลการวัดมีความสอดคล้องกับในการทดสอบ ในโปรแกรมจึงทำการแบ่งเคเบิลช่วงต้นสาย จากระยะสายจาก 100 เมตร จะทำการแบ่งเป็น 50 เซนติเมตรและ 99.5 เมตร เพื่อที่จะสามารถวัดพัลส์ที่ผ่านเคเบิลได้ตามการทดสอบ ที่หากคลื่น HFCT ที่ระยะปลายสายมากเกินไป จะไม่สามารถวัดค่าได้ โดยผลที่ได้จะแสดงอยู่ในรูปภาพที่ 4.2 – 4.6



รูปที่ 4.2 ผลการจำลองพัลส์กระแสที่ต่อลงดินข้างเดียว (จ่ายพัลส์ต้นเคเบิล)

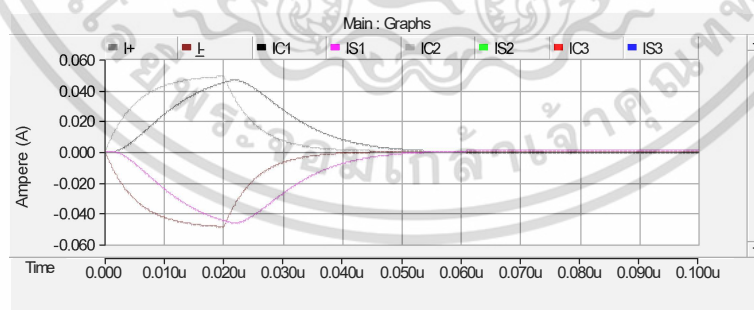
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ผลการจำลองการต่อลงดินข้างเดียว โดยจ่ายพัลส์ต้นเคเบิล

เซนเซอร์	ความหมาย	ขนาด	ขั้ว	ขนาดพัลส์สะท้อน	ขั้ว
I+	พัลส์จากเครื่องกำเนิดฝั่งบวก	0.0488	บวก	0.00181	ลบ
I-	พัลส์จากเครื่องกำเนิดฝั่งลบ	0.0488	ลบ	0.00181	บวก
IC1	วัดที่ตัวนำต้นสาย	0.0464	บวก	0.00368	ลบ
IS1	วัดที่ชิลด์ต้นสาย	0.0464	ลบ	0.00368	บวก
IC2	วัดที่ตัวนำกลางสาย	0.0224	บวก	0.00994	ลบ
IS2	วัดที่ชิลด์กลางสาย	0.0224	ลบ	0.00994	บวก
IC3	วัดที่ตัวนำปลายสาย	0.0063	บวก	0.0000286	ลบ
IS3	วัดที่ชิลด์ปลายสาย	0.0063	ลบ	0.0000286	บวก

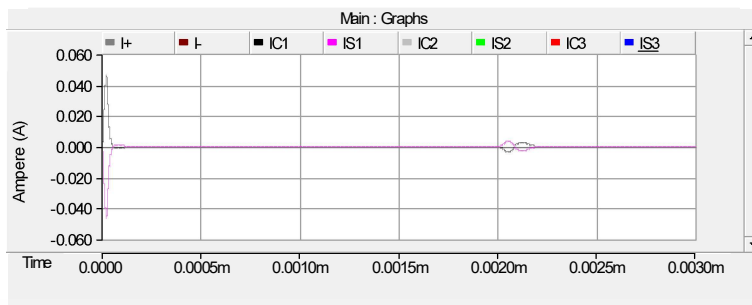
ตามที่แสดงอยู่ในรูปที่ 4.2 กราฟสีดำ-เทา-แดง คือ กระแสไฟฟ้าวัดจากตัวนำที่ตำแหน่งต้น, กลาง และปลายสายตามลำดับ ส่วนสีชมพู-เขียว-น้ำเงิน คือ วัดที่ตำแหน่งชิลด์ที่ต้น, กลางและปลาย ตามลำดับ ซึ่งหากเทียบจากกราฟ พัลส์แรกสุด ที่เป็นสีเทาเข้มและสีน้ำตาล คือพัลส์บวกและลบ ที่ถูกจ่ายออกมาจากเครื่องกำเนิดพัลส์ก่อนจะไหลเข้าเคเบิล

จากกราฟเป็นผลการวัดพัลส์กระแสที่เคลื่อนที่ผ่านสายโคแอกเซียล โดยเป็นแบ่งตำแหน่งการวัดเป็น 3 ช่วง ช่วงต้นสาย(50 ซม. จากเคเบิล) กลางสาย(ระยะ 100 เมตร จากต้นสาย) และปลายสาย (ระยะ 195.50 เมตร จากต้นสาย) โดยผลที่ได้ตามรูปภาพที่ 4.2 นั้นแสดงให้เห็นว่าพัลส์กระแสที่วิ่งในตัวนำและในชิลด์นั้น เกิดที่ตำแหน่งเดียวกันแต่ตรงข้ามกันเสมอในการจำลอง จากสมการ 2.1 เมื่อคำนวณตามค่าพารามิเตอร์ที่ใส่ไปนั้นจะทำให้ได้ค่าความเร็วของคลื่นพัลส์ที่เคลื่อนที่ในเคเบิลมีขนาดเท่ากับ 197.68×10^6 เมตร/วินาที หรือเท่ากับ 66% ของความเร็วแสง เมื่อนำเข้าไปคิดหาเวลา ที่ระยะเคเบิล 100 เมตร จะใช้เวลาประมาณ 505.87 นาโนวินาที ที่ระยะ 200 เมตรจะใช้เวลา 1.011 ไมโครวินาที และที่ 400 เมตร จะใช้เวลา 2.023 ไมโครวินาที

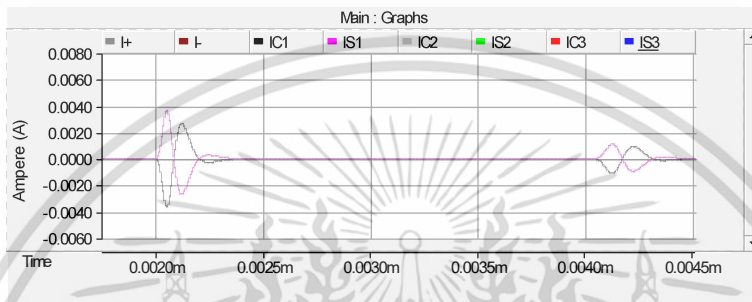


รูปที่ 4.3 ภาพพัลส์ต้นกำเนิดและพัลส์ที่ต้นเคเบิล

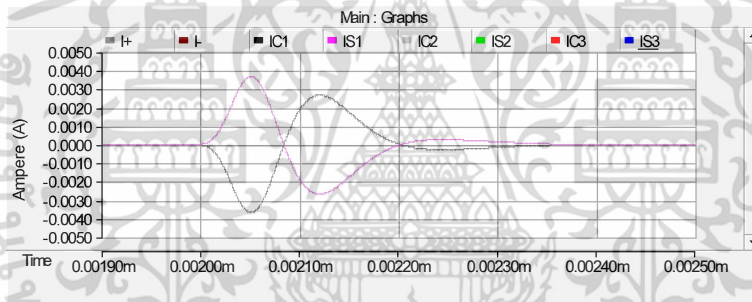
จากรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าเมื่อจ่ายพัลส์จากเครื่องกำเนิดพัลส์ที่เวลา 0 วินาที พัลส์จะใช้เวลา 1.2 นาโนวินาที ในการเคลื่อนที่ไปหาเครื่องมือวัดที่วางไว้ต้นเคเบิล ซึ่งเมื่อนำไปคำนวณตามสมการที่ 2.1 จะได้ระยะทาง ประมาณ 24 ซม. นั่นเอง



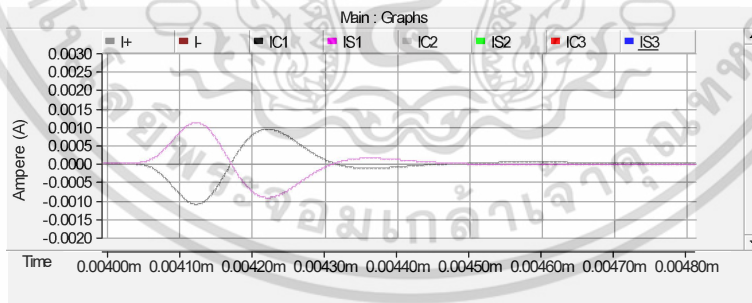
ก) ภาพที่มีพัลส์ลำดับที่ 1 และ 2



ข) ภาพที่มีพัลส์ลำดับที่ 2 และ 3



ค) ภาพขยายพัลส์ลำดับที่ 2



ง) ภาพขยายพัลส์ลำดับที่ 3

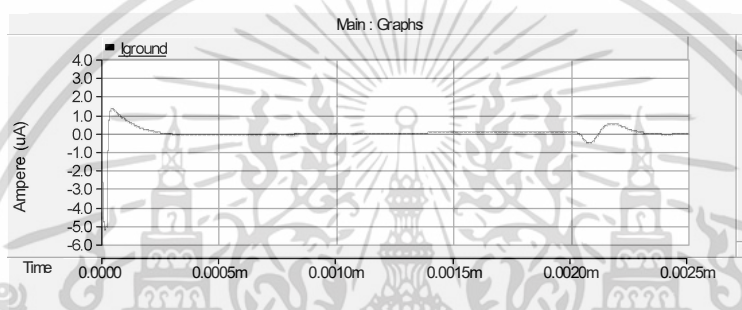
รูปที่ 4.4 ภาพสะท้อนของพัลส์กระแสที่ตัวนำและซีลด์

จากรูปที่ 4.4 แสดงให้เห็นถึงการเกิดการสะท้อนของคลื่นที่เคลื่อนที่ในเคเบิล ซึ่งสะท้อนกลับออกมาที่จุด ๆ เดิม จากเวลาที่คลื่นสะท้อนกลับมานั้นแสดงให้เห็นว่าระยะทางที่คลื่นเคลื่อนที่เท่ากับ 400 เมตร และจากขนาดคลื่นสะท้อนนั้นแสดงให้เห็นว่าเกิดการทดลองอย่างมาก หากเปรียบเทียบกับคลื่นลูกแรกและมีทิศทางที่เปลี่ยนไปในทางตรงกันข้าม(เกิดจากการที่คลื่นพัลส์สะท้อนกลับมาในทิศทางที่ตรงข้ามจากที่วาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

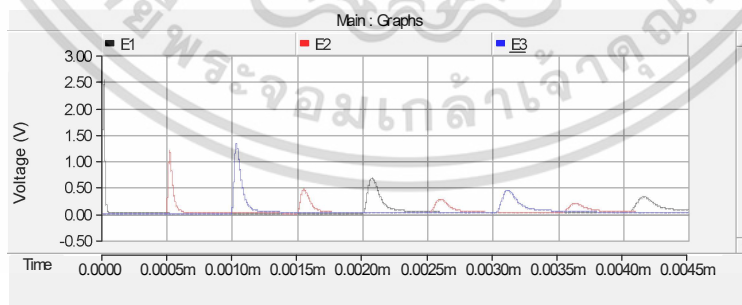
เครื่องมือวัดไว้) พัลส์ถัดลำดับต่อไปจะมีทิศทางเหมือนพัลส์ที่ 2 (ดูได้จากรูปที่ 4.4 ที่แสดงภาพการสะท้อนโดยจับที่ต้นสายเคเบิล) แตกต่างจากกราฟสี่เหลี่ยมและสี่เทาของรูปที่ 4.2 ที่วางเครื่องมือวัดไว้ตรงกลางของสายเคเบิลซึ่งจะเกิดการสลับขั้วคลื่นพัลส์ไปมา เนื่องจากการสะท้อนของพัลส์ที่สะท้อนจากปลาย - ต้นสายเคเบิลกลับมาในทิศทางตรงข้ามกับที่วางเครื่องมือวัดไว้จึงทำให้ผลออกมาเป็นกราฟกลับทิศทางไป-มา และเนื่องจากวางเครื่องมือวัดไว้ตรงกลางจึงสามารถวัดสัญญาณได้มากกว่าจุดอื่นเนื่องจากกราฟมีการสะท้อนกันไปมาที่ต้นเคเบิลและปลายเคเบิล (สังเกตได้จากการที่กราฟมีการแสดงออกมาที่ทุกๆระยะเวลา 0.505 ไมโครวินาที หรือประมาณ 100 เมตร)

ตามที่แสดงอยู่ในรูปที่ 4.4 ค) จะเห็นว่ากราฟมีลักษณะ 2 ขั้ว เนื่องจากเป็นพัลส์ที่อยู่ติดกับปลายเปิดจึงทำให้กราฟออกมาเป็นลักษณะดังกล่าว



รูปที่ 4.5 ภาพสะท้อนของพัลส์กระแสที่กราวด์

ภาพขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าที่ไหลลงดิน ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีกระแสไฟฟ้าที่ไหลลงดินทุกครั้งที่มีการสะท้อนของพัลส์ในตัวนำและซีลด์ โดยจากรูปที่ 4.5 จะเห็นได้ว่ากระแสที่ไหลลงดินนั้นมีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับในตัวนำหรือซีลด์ แต่ยังมีผลลดทอนลงเรื่อย ๆ เมื่อสะท้อนมายังจุดเดิมและพัลส์ที่มีการสะท้อนไม่มีการกลับขั้วไป-มา เนื่องจากการสะท้อนนั้นเกิดขึ้นที่ปลายเคเบิลที่เป็นปลายเปิดจึงเป็นผลให้กราฟของตำแหน่งกราวด์มีทิศทางเดียวกันเสมอ



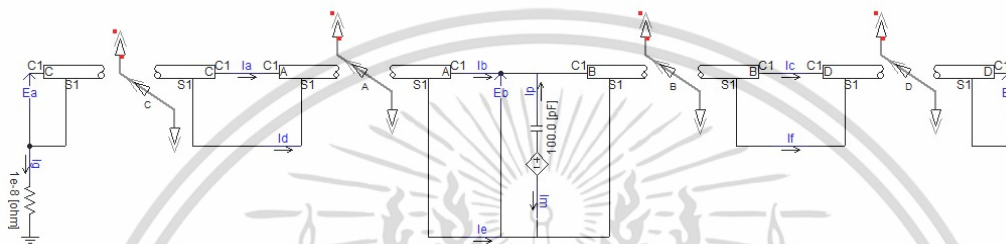
รูปที่ 4.6 แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้ตามระยะต่างๆของเคเบิลที่ต่อลงดินข้างเดียว (จ่ายพัลส์ต้นเคเบิล)

จากรูปที่ 4.6 จะเห็นได้ว่าแรงดันไฟฟ้าแต่ละพัลส์มีตำแหน่งที่คำนวณจาก TDR แล้วห่างกันประมาณ 100 เมตร ซึ่งตรงตามที่จำลองโดยจะเห็นว่าการจัดเรียงพัลส์ที่ระยะต่างๆ แสดงให้เห็นถึงการเคลื่อนที่และการสะท้อนที่ชัดเจน หากทำการเปรียบเทียบแอมพลิจูดของพัลส์ลำดับที่ 3 ที่เป็นปลายเปิดกับลำดับที่

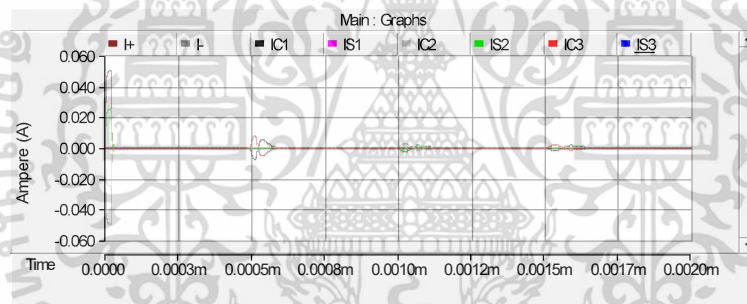
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2 ของกลางเคเบิลจะเห็นได้ว่ากราฟลำดับ 3 มีขนาดที่มากกว่าทั้งที่กราฟมีระยะทางที่ไกลมากกว่า โดยสาเหตุที่พัลส์ปลายสายนั้นมีขนาดที่มากกว่าการที่เกิดการสะท้อนของคลื่นพัลส์ที่ปลายเปิด ตามที่อธิบายไว้ในบทที่ 2 ซึ่งการสะท้อนของคลื่นที่มีแพกเตอร์การสะท้อนเท่ากับ 2 กล่าวคือ แรงแดันไฟฟ้าที่วัดได้นั้นจะมีขนาดเป็น 2 เท่าของแรงแดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจริง จึงเป็นผลให้แอมพลิจูดของกราฟที่ปลายเปิดของเคเบิลมีขนาดที่มากกว่าของกลางสายเสมอ

4.1.2 ผลจำลองระบบเคเบิลใต้ดินที่ต่อลงดินข้างเดียว (จ่ายพัลส์กลางเคเบิล)



รูปที่ 4.7 วงจรจำลองระบบเคเบิลใต้ดินที่ต่อลงดินข้างเดียว (จ่ายพัลส์กลางเคเบิล)



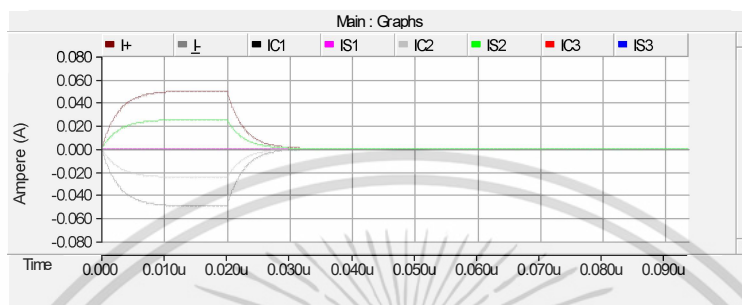
รูปที่ 4.8 ผลการจำลองพัลส์กระแสที่ต่อลงดินข้างเดียว (จ่ายพัลส์ต้นเคเบิล)

ตารางที่ 4.2 ผลการจำลองการต่อลงดินข้างเดียว โดยจ่ายพัลส์กลางเคเบิล

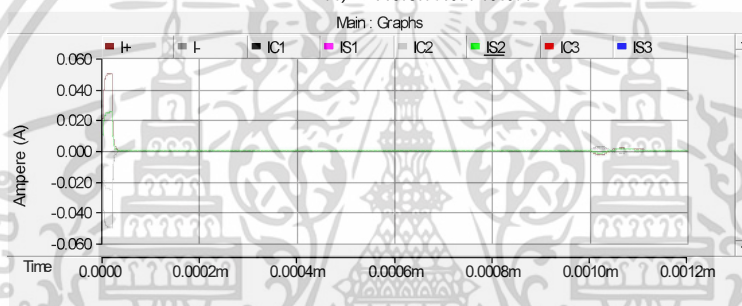
ชื่อกราฟ	ความหมาย	ขนาด	ขั้ว	ขนาดพัลส์สะท้อน	ขั้ว
I+	พัลส์จากเครื่องกำเนิดฝั่งบวก	0.0499	บวก	0.00291	ลบ
I-	พัลส์จากเครื่องกำเนิดฝั่งลบ	0.0499	ลบ	0.00291	บวก
IC1	วัดที่ตัวนำต้นสาย	0.00776	ลบ	0.00174	ลบ
IS1	วัดที่ชิลด์ต้นสาย	0.00776	บวก	0.00174	บวก
IC2	วัดที่ตัวนำกลางสาย	0.0249	ลบ	0.00065	ลบ
IS2	วัดที่ชิลด์กลางสาย	0.0249	บวก	0.00065	บวก
IC3	วัดที่ตัวนำปลายสาย	0.00776	บวก	0.00174	บวก
IS3	วัดที่ชิลด์ปลายสาย	0.00776	ลบ	0.00174	ลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

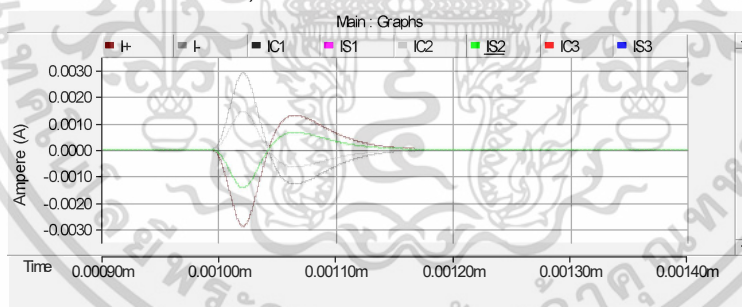
ตามที่แสดงอยู่ในตารางที่ 4.2 จะเห็นได้ว่ากระแสที่ไหลในตัวนำและในซีลด์นั้นมีค่าเท่ากัน เนื่องจากการลวดทองของทั้งสองนั้นมีค่าความต้านทานที่ใกล้เคียงกันในช่วงระยะ 200 เมตร จึงทำให้ไม่เห็นถึงความแตกต่าง และในตำแหน่งกลางสายที่ตัวนำมีค่าเป็นพัลส์ลบ เนื่องจากการวางทิศทางและตำแหน่งของแอมมิเตอร์ทำให้กราฟออกมามีลักษณะดังกล่าว



ก) พัลส์ต้นกำเนิด



ข) พัลส์ต้นกำเนิดและพัลส์สะท้อน

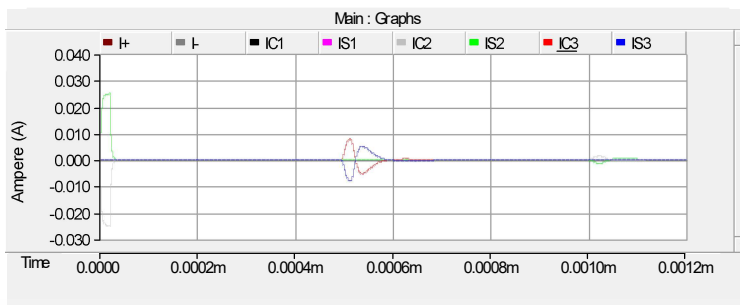


ค) ภาพขยายพัลส์สะท้อน

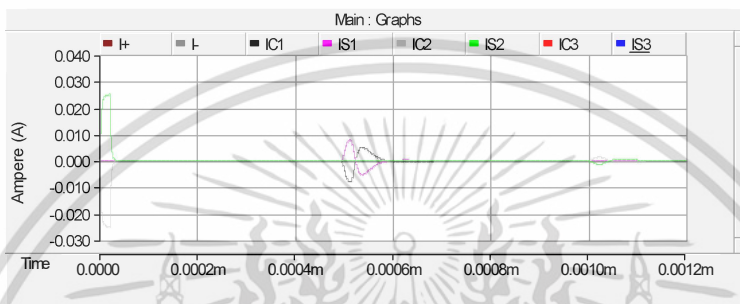
รูปที่ 4.9 ภาพพัลส์ต้นกำเนิดและพัลส์ที่กลางเคเบิล

จากรูปที่ 4.9 จะเห็นได้ว่าลักษณะของพัลส์ที่วัดได้กลางเคเบิลนั้น คล้ายกับพัลส์ที่จ่ายออกมาจากเครื่องกำเนิดพัลส์แต่มีขนาดที่ต่างกัน เนื่องจากการจ่ายพัลส์ที่กลางเคเบิลพัลส์จึงแพร่กระจายไปทางซ้ายและขวาในขนาดที่ใกล้เคียงกัน จึงทำให้ผลที่ได้มีขนาดที่น้อยกว่าและมีทิศทางที่กลับด้านกัน(เนื่องจากทิศทางของเครื่องมือวัดและทิศทางการแพร่กระจายของพัลส์นั้นตรงข้ามกัน) เมื่อทำการเปรียบเทียบพัลส์สะท้อนของพัลส์ต้นกำเนิดและพัลส์ที่วัดได้กลางเคเบิลมีเพียงขนาดที่ต่างกันเช่นเดียวกับพัลส์ที่จ่ายออกไปในตอนแรก (ดูค่าได้จากตารางที่ 4.2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



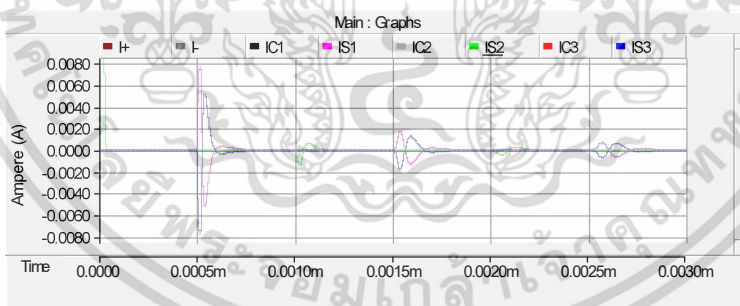
ก) แสดงกราฟที่ปลายเคเบิล



ข) แสดงกราฟที่ต้นเคเบิล

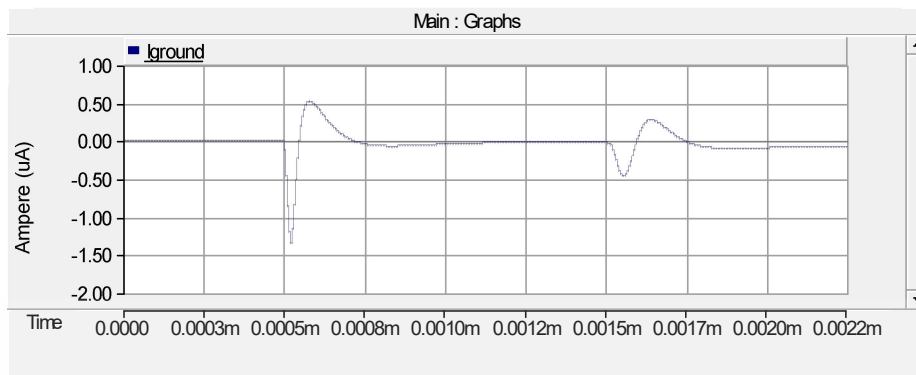
รูปที่ 4.10 ผลการจำลองพัลส์กระแสของวงจรที่ต่อลงดินข้างเดียว (จ่ายพัลส์กลางเคเบิล)

ตามที่แสดงอยู่ในรูปที่ 4.10 จะเห็นได้ว่าเมื่อทำการจ่ายพัลส์ที่ตำแหน่งกลางเคเบิล เมื่อทำการวัดสัญญาณพัลส์ที่ปลายเคเบิลทั้ง 2 ด้าน ที่ตำแหน่งระยะห่างเท่ากันนั้นทำให้ผลที่ได้ออกมาเหมือนกันและที่ระยะเวลาเท่ากัน



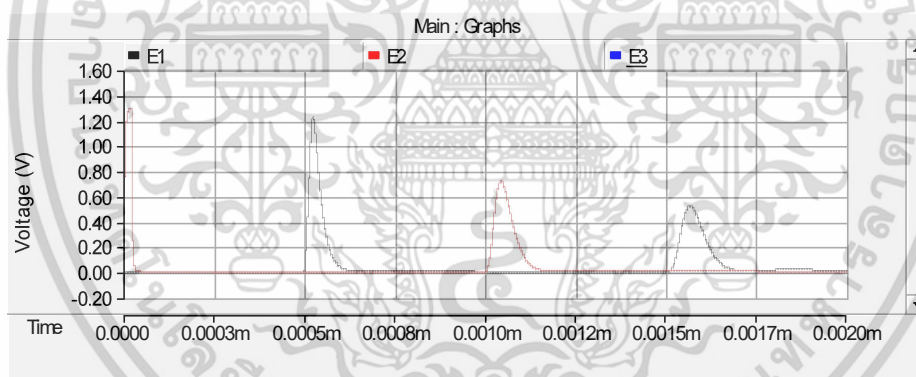
รูปที่ 4.11 ผลการจำลองการวัดกระแสที่สายชีลด์

จากรูปที่ 4.11 สังเกตได้ว่าที่ปลายสายทั้งสองด้านนั้น กราฟมีทิศทางตรงข้ามกันเนื่องจากการวางเครื่องมือวัดตรงข้ามกับทิศทางแพร่กระจายของพัลส์ โดยเมื่อจ่ายพัลส์กลางเคเบิลแล้วนั้น พัลส์มีการแพร่กระจายตัวออกไปทางด้านต้นและปลายพร้อมๆกัน แต่ทิศทางการวางเครื่องมือวัดนั้นต่างกันเมื่อพัลส์แพร่กระจายไปยังเครื่องมือวัดทั้ง 2 ด้านพร้อมกันจึงทำให้พัลส์ที่แสดงออกมามีทิศทางที่ตรงข้ามกัน

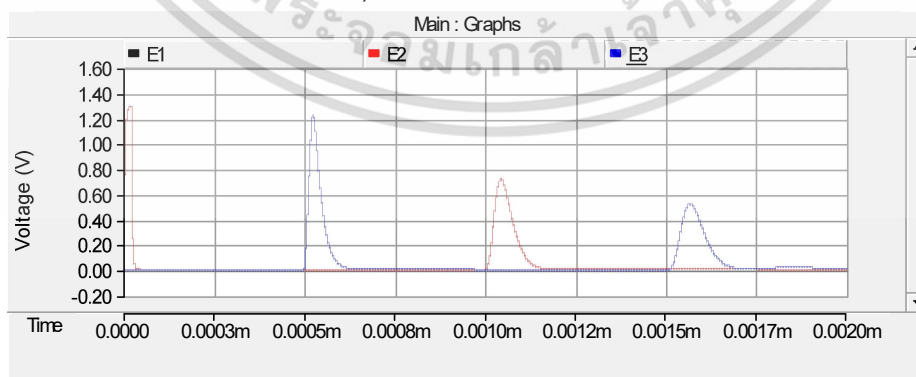


รูปที่ 4.12 ผลการจำลองของพัลส์กระแสที่สายดินของวงจรต่อลงดินข้างเดียว (จ่ายพัลส์กลางเคเบิล)

จากรูปที่ 4.12 ค่ากระแสที่แสดงออกมานั้นจะเริ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาประมาณ 0.505 ไมโครวินาที เนื่องจากการที่จ่ายพัลส์กลางสายแล้วต้องใช้เวลาในการที่กระแสพัลส์จะแพร่กระจายมายังตำแหน่งที่ต้นสาย (ระยะ 100 เมตร) ซึ่งเป็นระยะเวลาที่พัลส์เคลื่อนที่ไปถึงปลายสายเช่นกัน สังเกตจากที่พัลส์ที่ 2 ใช้เวลาเพียง 1.01 ไมโครวินาที (จากพัลส์แรก) หรือการที่พัลส์เคลื่อนที่ได้ 200 เมตร ในการเคลื่อนที่มายังตำแหน่งเครื่องมือวัด เนื่องจากเมื่อทำการจ่ายพัลส์จากแหล่งกำเนิดพัลส์แล้วพัลส์กระจายออกไปทั้ง 2 ด้าน ส่งผลให้กราฟมีระยะสะท้อนมีค่าเพียง 200 เมตร หรือก็คือเป็นการสะท้อนจากปลายเปิดด้านปลายเคเบิลมากกว่าวัดนั่นเอง



ก) แสดงแรงดันต้นเคเบิล



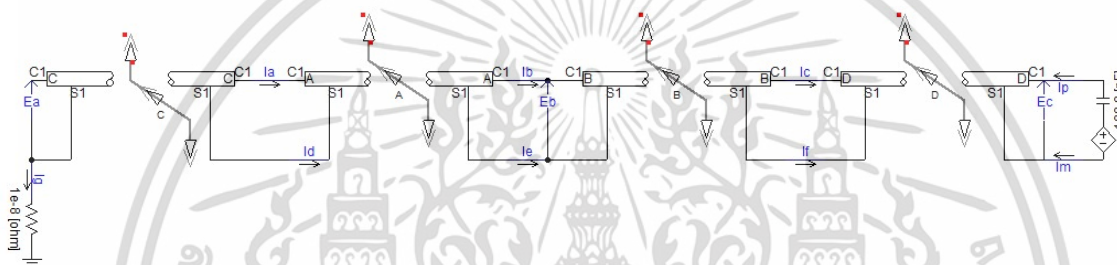
ข) แสดงแรงดันปลายเคเบิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

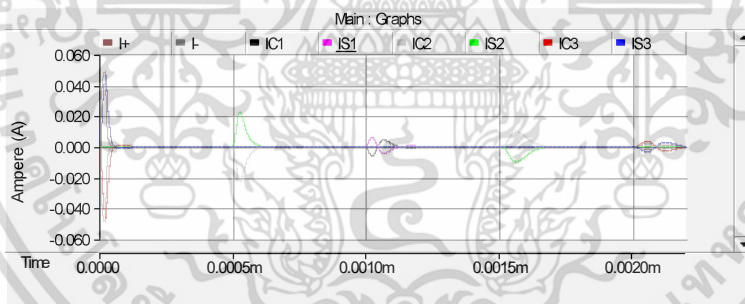
รูปที่ 4.13 แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้ตามระยะต่างๆของเคเบิลของวงจรต่อลงดินข้างเดียว (จ่ายพัลส์กลางเคเบิล)

จากรูปที่ 4.13 จะไม่สามารถสังเกตเห็นแรงดันไฟฟ้าที่วัดตำแหน่งต้นสายในรูป 4.13 ก) และไม่เห็นแรงดันไฟฟ้าที่ปลายสายใน 4.13 ข) เนื่องจากการที่จ่ายพัลส์กลางสาย ระยะสายเคเบิลทั้ง 2 ด้านมีขนาดที่เท่ากันและเป็นสายชนิดเดียวกันในสภาวะอุดมคติจึงส่งผลให้กราฟมีขนาดและระยะเวลาที่เหมือนกัน ส่งผลให้กราฟทับกันได้พอดี

4.1.3 ผลจำลองระบบเคเบิลใต้ดินที่ต่อลงดินข้างเดียว (จ่ายพัลส์ปลายเคเบิล)



รูปที่ 4.14 วงจรจำลองระบบเคเบิลใต้ดินที่ต่อลงดินข้างเดียว (จ่ายพัลส์ปลายเคเบิล)



รูปที่ 4.15 ผลการจำลองพัลส์กระแสที่ต่อวงจรจำลองที่ต่อลงดินข้างเดียว (จ่ายพัลส์ปลายเคเบิล)

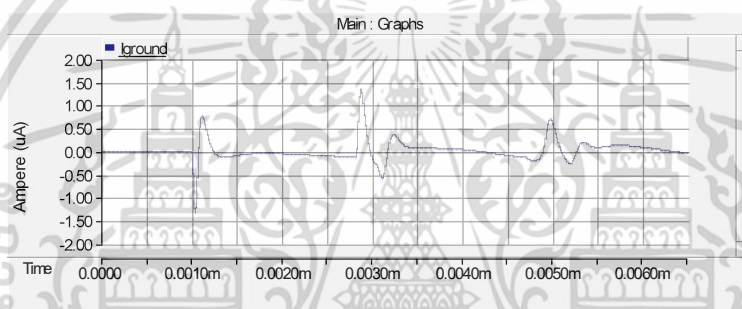
ตารางที่ 4.3 ผลการจำลองการต่อลงดินข้างเดียว โดยจ่ายพัลส์ปลายเคเบิล

เซนเซอร์	ความหมาย	ขนาด	ขั้ว	ขนาดพัลส์สะท้อน	ขั้ว
I+	พัลส์จากเครื่องกำเนิดฝั่งบวก	0.0488	บวก	0.00181	ลบ
I-	พัลส์จากเครื่องกำเนิดฝั่งลบ	0.0488	ลบ	0.00181	บวก
IC1	วัดที่ตัวนำต้นสาย	0.0063	ลบ	0.00035	ลบ
IS1	วัดที่ชิลด์ต้นสาย	0.0063	บวก	0.00035	บวก
IC2	วัดที่ตัวนำกลางสาย	0.0224	ลบ	0.00099	บวก
IS2	วัดที่ชิลด์กลางสาย	0.0224	บวก	0.00099	ลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

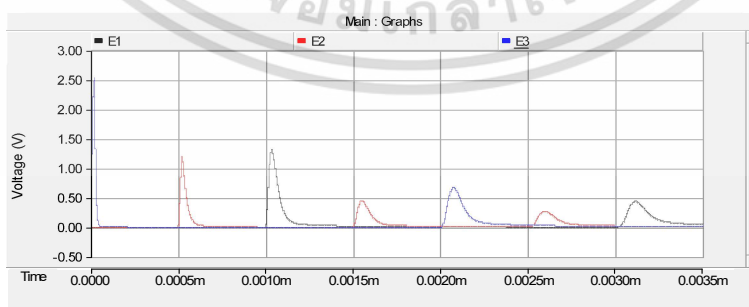
IC3	วัดที่ตัวนำปลายสาย	0.0464	ลบ	0.00036	บวก
IS3	วัดที่ชีลด์ปลายสาย	0.0464	บวก	0.00036	ลบ

จากรูปที่ 4.15 แสดงให้เห็นถึงการเกิดการสะท้อนของคลื่นที่แพร่กระจายในเคเบิล และแสดงคลื่นสะท้อนที่ถูกวัดจากเครื่องมือวัดตำแหน่งเดียวกัน จากรูปแสดงให้เห็นถึงการจ่ายพัลส์ที่ปลายสาย(พัลส์ต้นกำเนิดแสดงจากแอมมิเตอร์ปลายสาย) เมื่อพัลส์แพร่กระจายไปยังตำแหน่งกลางสาย(กราฟสีเขียวและเทา) ซึ่งใช้เวลาประมาณ 0.505 ไมโครวินาที เมื่อคำนวณจากสมการที่ 2.1 จะได้ระยะทาง 100 เมตร และเกิดพัลส์สะท้อนกลับมาที่เวลาประมาณ 1.5 ไมโครวินาที (พัลส์แพร่กระจายและสะท้อนกลับมาที่ระยะทาง 100 เมตร) โดยมีทิศทางตรงข้ามจากพัลส์เดิมซึ่งเกิดจากการที่สะท้อนมาในทิศทางตรงข้ามกับเซ็นเซอร์ และสะท้อนมาที่เซ็นเซอร์ปลายสายที่เวลาประมาณ 2.02 ไมโครวินาที ซึ่งในการจ่ายพัลส์ที่ปลายเคเบิลนั้นจะได้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกับการจ่ายที่ต้นเคเบิล แต่มีทิศทางตรงข้ามกัน เนื่องจากการวางทิศทางของเครื่องมือวัดที่ตรงข้ามกัน



รูปที่ 4.16 ผลการจำลองของพัลส์กระแสที่สายดินของการจำลองการต่อลงดินข้างเดียว (จ่ายพัลส์ปลายเคเบิล)

รูปที่ 4.16 กราฟพัลส์แรกแสดงอยู่ที่ระยะเวลา 1.01 ไมโครวินาที ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อพัลส์ถูกจ่ายออกจากเครื่องกำเนิดแล้วนั้น ต้องใช้เวลา 1.01 ไมโครวินาที เพื่อแพร่กระจายมายังแอมมิเตอร์ตำแหน่งกราวด์(แสดงให้เห็นถึงระยะห่างจากแหล่งจ่ายและสายกราวด์) หรือก็คือพัลส์แพร่กระจายในเคเบิลด้วยระยะทาง 200 เมตรนั่นเอง

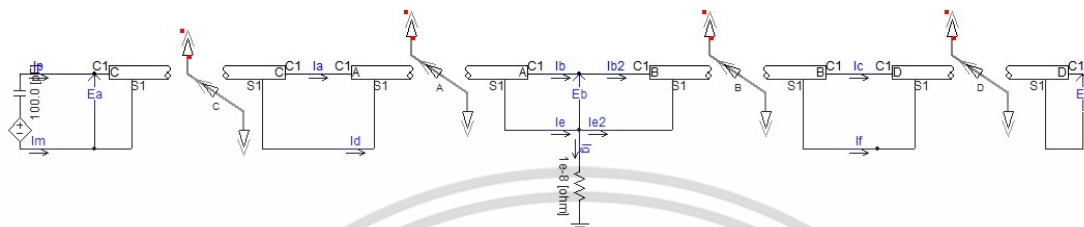


รูปที่ 4.17 แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้ตามระยะต่างๆของเคเบิลของวงจรต่อลงดินข้างเดียว (จ่ายพัลส์ปลายเคเบิล)

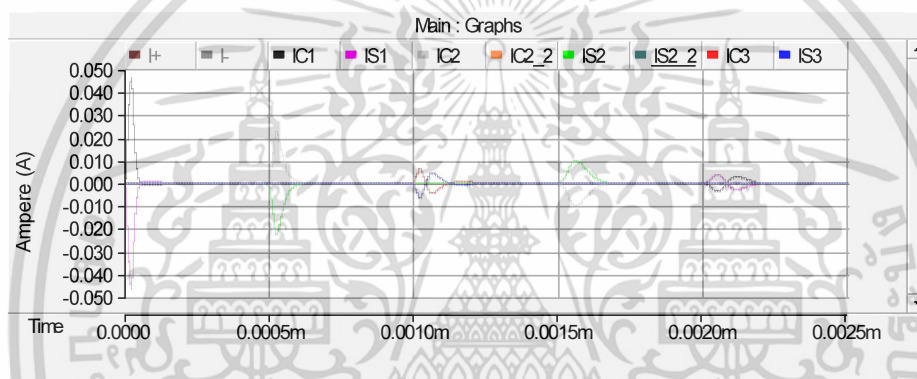
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามที่แสดงอยู่ในรูปที่ 4.17 เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.6 กราฟมีลักษณะที่เหมือนกัน แต่สลับตำแหน่งตามการวางเครื่องกำเนิดพัลส์นั่นเอง

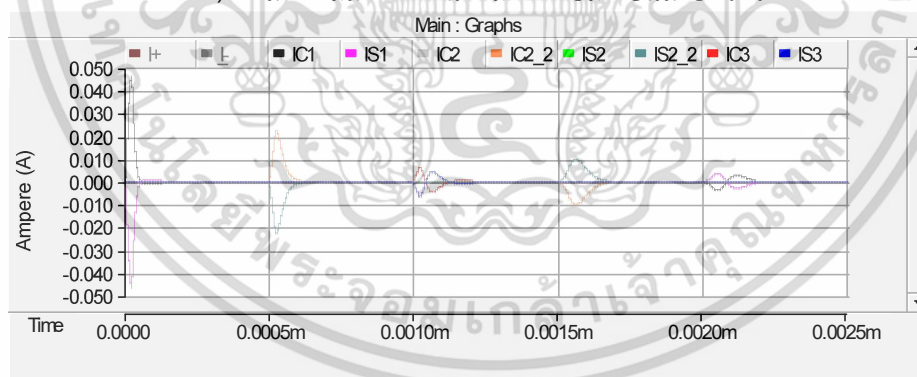
4.1.4 ผลจำลองระบบเคเบิลใต้ดินที่ต่อลงดินตรงกลาง (จ่ายพัลส์ต้นเคเบิล)



รูปที่ 4.18 วงจรจำลองระบบเคเบิลใต้ดินที่ต่อลงดินตรงกลาง (จ่ายพัลส์ต้นเคเบิล)



ก) แสดงพัลส์ที่ตำแหน่งกลางเคเบิล ก่อนสายกราวด์



ข) แสดงพัลส์ที่ตำแหน่งกลางเคเบิล หลังสายกราวด์

รูปที่ 4.19 ผลการจำลองพัลส์กระแสที่ต่อวงจรจำลองการต่อลงดินตรงกลาง (จ่ายพัลส์ต้นเคเบิล)

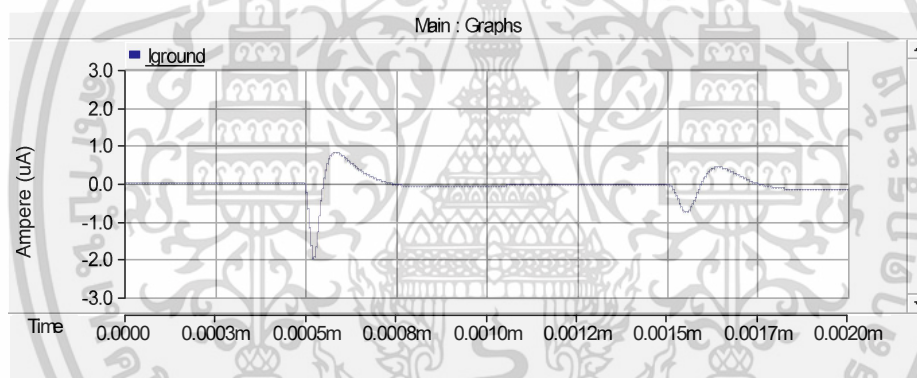
ตารางที่ 4.4 ผลการจำลองการต่อลงดินตรงกลาง โดยจ่ายพัลส์ต้นเคเบิล

เซนเซอร์	ความหมาย	ขนาด	ชั่ว	ขนาดพัลส์สะท้อน	ชั่ว
I+	พัลส์จากเครื่องกำเนิดฝั่งบวก	0.0488	บวก	0.00181	ลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

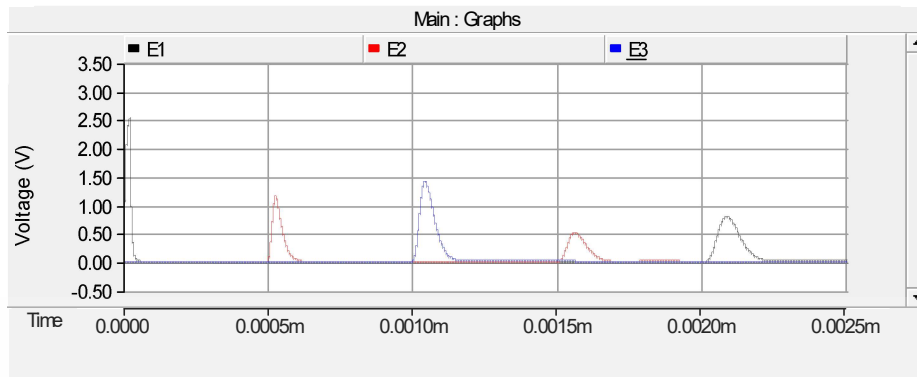
I-	พัลส์จากเครื่องกำเนิดฝั่งลบ	0.0488	ลบ	0.00181	บวก
IC1	วัดที่ตัวนำต้นสาย	0.0464	บวก	0.00368	ลบ
IS1	วัดที่ซิลด์ต้นสาย	0.0464	ลบ	0.00368	บวก
IC2	วัดที่ตัวนำกลางสาย(ก่อนกราวด์)	0.0224	บวก	0.0099	ลบ
IS2	วัดที่ซิลด์กลางสาย(ก่อนกราวด์)	0.0224	ลบ	0.0099	บวก
IC2_2	วัดที่ตัวนำกลางสาย(หลังกราวด์)	0.0224	บวก	0.0099	ลบ
IS2_2	วัดที่ซิลด์กลางสาย(หลังกราวด์)	0.0224	ลบ	0.0099	บวก
IC3	วัดที่ตัวนำปลายสาย	0.0063	บวก	0.00036	ลบ
IS3	วัดที่ซิลด์ปลายสาย	0.0063	ลบ	0.00036	บวก

ตามที่แสดงอยู่ในรูปที่ 4.19 เมื่อทำการจ่ายพัลส์ที่ต้นเคเบิล พัลส์ที่ออกจากเครื่องกำเนิดพัลส์และที่เซนเซอร์ต้นสายจะมีลักษณะรูปที่ 4.3 โดยจากรูปและค่าตามตารางที่ 4.4 นั้นแสดงให้เห็นว่าการแพร่กระจายของพัลส์ที่ก่อนถึงจุดต่อลงดินหลังจุดต่อลงดินนั้น มีค่าเท่ากันและทิศทางที่เหมือนกัน



รูปที่ 4.20 ผลการจำลองของพัลส์กระแสที่สายดินของการจำลองการต่อลงดินตรงกลาง (จ่ายพัลส์ต้นเคเบิล)

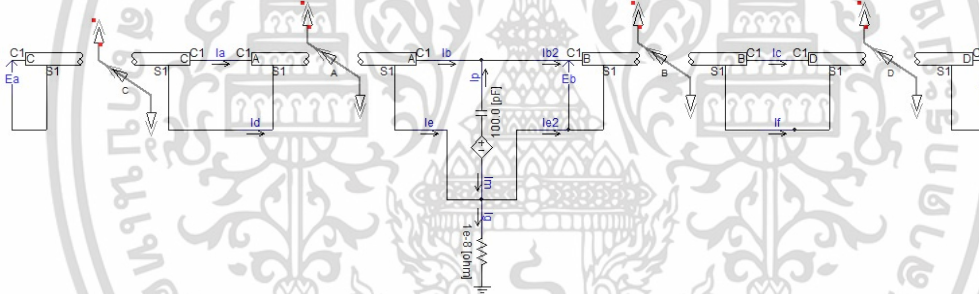
จากรูปที่ 4.20 จะเห็นได้ว่าพัลส์แรกจะเกิดขึ้นที่เวลาประมาณ 5 ไมโครวินาที ซึ่งหากคิดตามระยะเวลาและความเร็วการแพร่กระจายของกราฟแล้วนั้นจะแสดงให้เห็นว่ามีการต่อกราวด์ที่ระยะทาง 100 เมตรจากตำแหน่งการจ่ายพัลส์ และเกิดการสะท้อนกลับมาที่ระยะเวลา 1.5 ไมโครวินาที หรือก็คือมีการสะท้อนที่ระยะเคเบิล 100 เมตร ซึ่งผลที่ได้นั้นสอดคล้องกับโมเดลการจำลองตามที่ยกแบบไว้



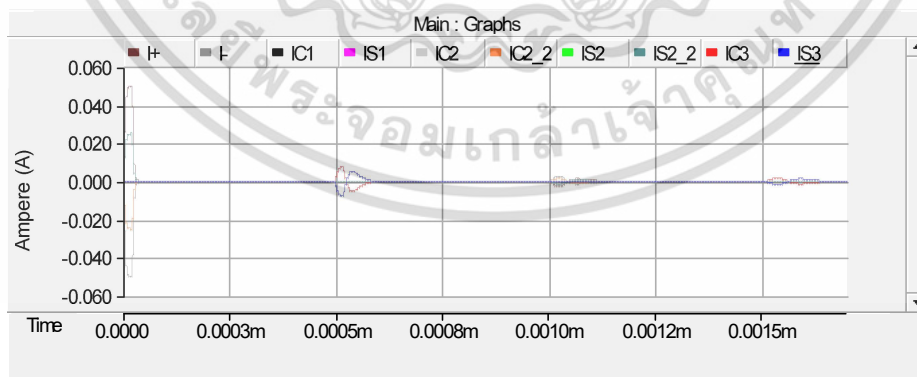
รูปที่ 4.21 แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้ตามระยะต่างๆของเคเบิลของวงจรต่อลงดินตรงกลาง (จ่ายพัลส์ต้นเคเบิล)

เมื่อทำการจ่ายพัลส์ที่ต้นสายนั้นพัลส์ที่ต้นสายจะมีค่ามากที่สุดและลดมอดลงเรื่อย ๆ ตามระยะเคเบิล และที่ปลายเปิดอีกด้านจะมีการสะท้อนของพัลส์กลับมา ตามกรณีก่อนหน้านี้ที่ทดสอบจ่ายพัลส์ต้นเคเบิล

4.1.5 ผลจำลองระบบเคเบิลใต้ดินที่ต่อลงดินตรงกลาง โดยจ่ายพัลส์กลางเคเบิล

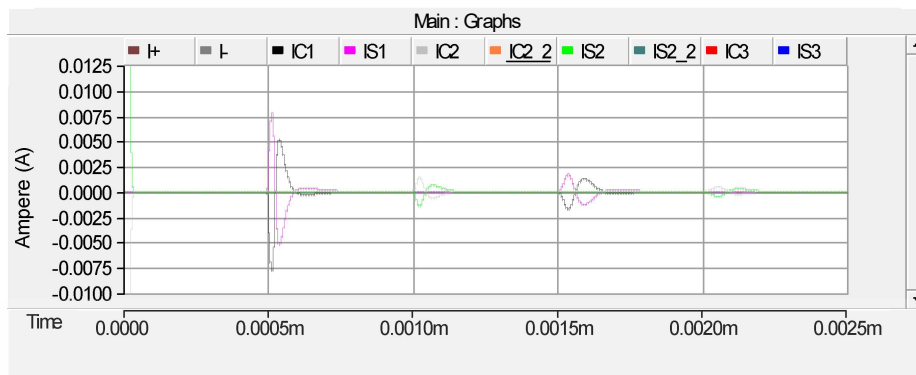


รูปที่ 4.22 วงจรจำลองระบบเคเบิลใต้ดินที่ต่อลงดินตรงกลาง โดยจ่ายพัลส์กลางเคเบิล

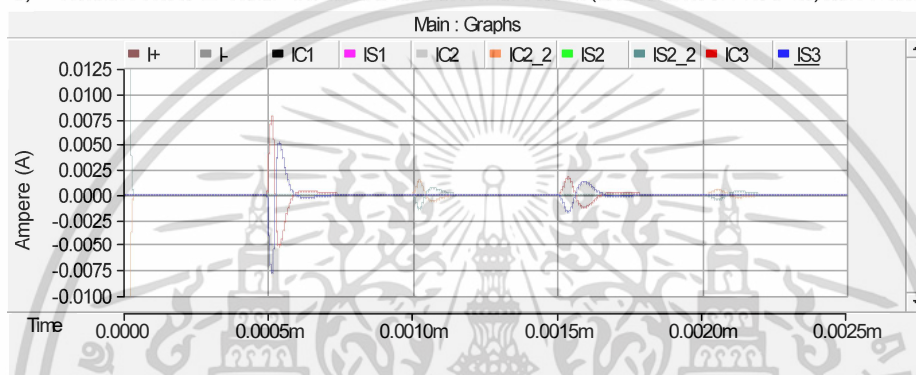


ก) แสดงพัลส์ที่จุดกำเนิดและพัลส์สะท้อนของเครื่องมือวัดที่กลางสาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ข) พัลส์สะท้อน 2 พัลส์ ของเครื่องมือวัดที่กลางสาย(แอมมิเตอร์ด้านซ้าย)และต้นเคเบิล



ค) พัลส์สะท้อน 2 พัลส์ ของเครื่องมือวัดที่กลางสาย(แอมมิเตอร์ด้านขวา)และปลายเคเบิล
รูปที่ 4.23 ผลการจำลองพัลส์กระแสที่ต่อวงจรจำลองการต่อลงดินตรงกลาง (จ่ายพัลส์กลางเคเบิล)

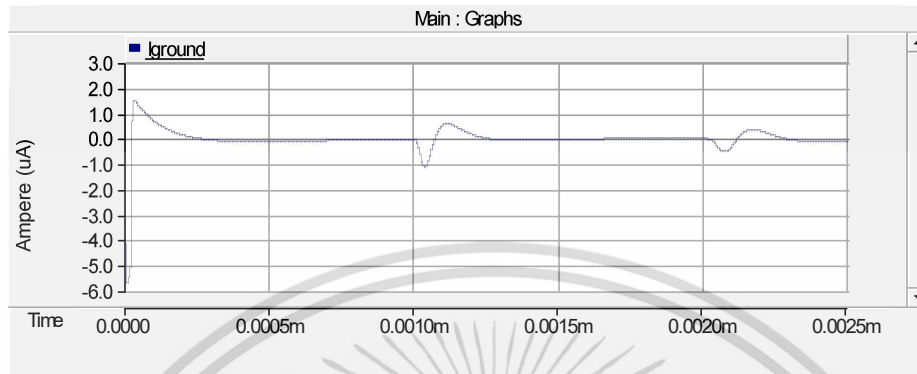
ตารางที่ 4.5 ผลการจำลองการต่อลงดินตรงกลาง โดยจ่ายพัลส์กลางเคเบิล

เซนเซอร์	ความหมาย	ขนาด	ขั้ว	ขนาดพัลส์สะท้อน	ขั้ว
I+	พัลส์จากเครื่องกำเนิดฝั่งบวก	0.0499	บวก	0.0029	ลบ
I-	พัลส์จากเครื่องกำเนิดฝั่งลบ	0.0499	ลบ	0.0029	บวก
IC1	วัดที่ตัวนำต้นสาย	0.00776	ลบ	0.00174	ลบ
IS1	วัดที่ชิลด์ต้นสาย	0.00776	บวก	0.00174	บวก
IC2	วัดที่ตัวนำกลางสาย(ก่อนกราวด์)	0.02497	ลบ	0.00145	บวก
IS2	วัดที่ชิลด์กลางสาย(ก่อนกราวด์)	0.02497	บวก	0.00145	ลบ
IC2_2	วัดที่ตัวนำกลางสาย(หลังกราวด์)	0.02497	บวก	0.00145	ลบ
IS2_2	วัดที่ชิลด์กลางสาย(หลังกราวด์)	0.02497	ลบ	0.00145	บวก
IC3	วัดที่ตัวนำปลายสาย	0.00776	บวก	0.00174	บวก
IS3	วัดที่ชิลด์ปลายสาย	0.00776	ลบ	0.00174	ลบ

ตามที่แสดงอยู่ในรูปที่ 4.23 ข) และ ค) จะสังเกตได้ว่าพัลส์เกิดการสะท้อนที่ตำแหน่งเดียวกันและขนาดเท่ากัน แต่ทิศทางตรงข้ามกันระหว่างพัลส์ซึ่งแพร่กระจายในตัวนำของเคเบิลที่วัดจากแอมมิเตอร์

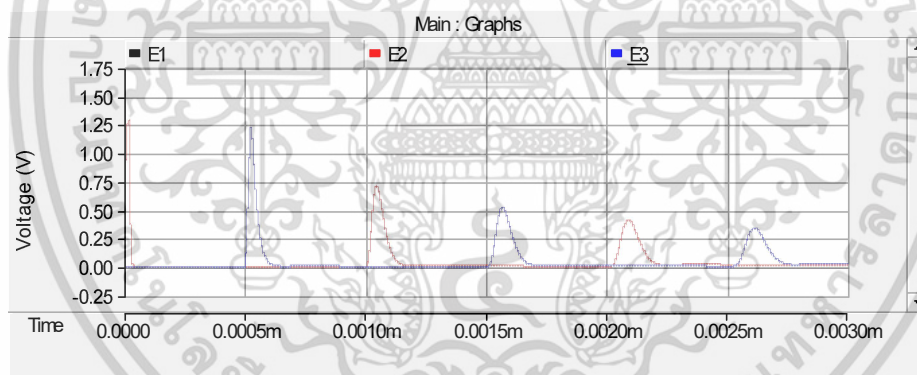
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้านซ้ายและด้านขวา เนื่องจากพัลส์ที่จ่ายออกไปนั้นเคลื่อนที่ไปในทิศทางที่ตรงข้ามและทางเดียวกันกับตำแหน่งแอมมิเตอร์



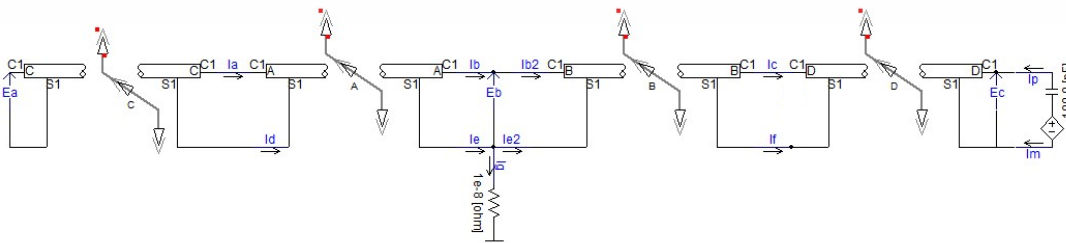
รูปที่ 4.24 ผลการจำลองของพัลส์กระแสที่สายดินของการจำลองการต่อลงดินตรงกลาง (จ่ายพัลส์กลางเคเบิล)

จากรูปกระแสที่กราฟด์แสดงให้เห็นว่าพัลส์มีการสะท้อนที่ระยะ 100 เมตร ตามที่ถูกกำหนดไว้ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบพัลส์สะท้อนลำดับที่ 1 และลำดับที่ 2 นั้น พัลส์ถูกลดทอนน้อยมากเมื่อเทียบกับพัลส์ต้นกำเนิด



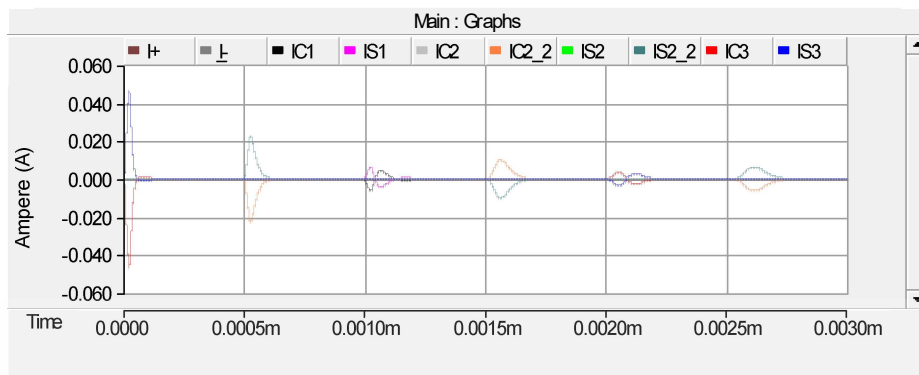
รูปที่ 4.25 แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้ตามระยะต่างๆของเคเบิลของวงจรต่อลงดินตรงกลาง (จ่ายพัลส์กลางเคเบิล)

4.1.6 ผลจำลองระบบเคเบิลใต้ดินที่ต่อลงดินตรงกลาง โดยจ่ายพัลส์ปลายเคเบิล

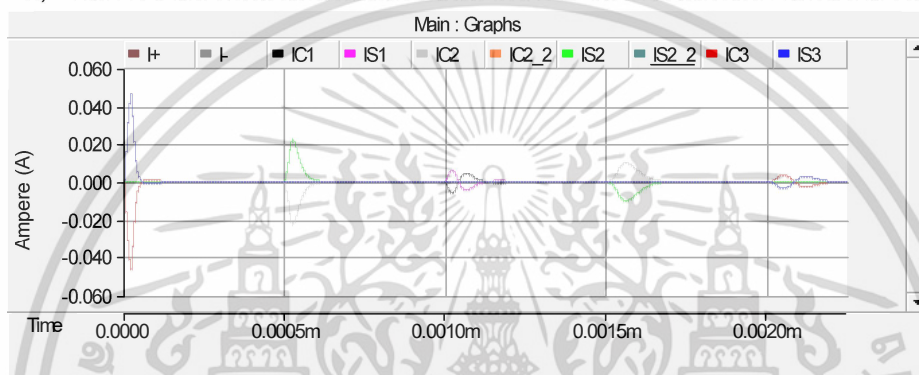


รูปที่ 4.26 วงจรจำลองระบบเคเบิลใต้ดินที่ต่อลงดินตรงกลาง โดยจ่ายพัลส์ปลายเคเบิล

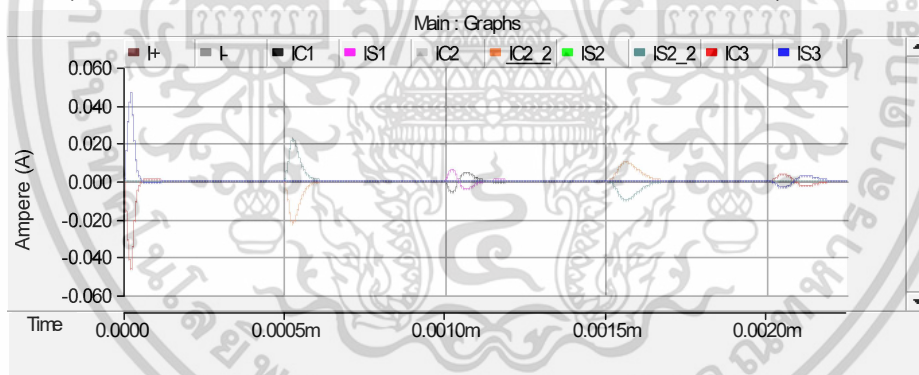
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก) ผลการจำลองที่มองเห็นพัลส์สะท้อนลำดับที่ 2 ของกระแสที่วัดตำแหน่งกลางสาย



ข) ผลจำลองแสดงกระแสของพัลส์กระแสที่วัดตำแหน่งกลางสาย(จากด้านซ้าย)



ค) ผลจำลองแสดงกระแสของพัลส์กระแสที่วัดตำแหน่งกลางสาย(จากด้านขวา)

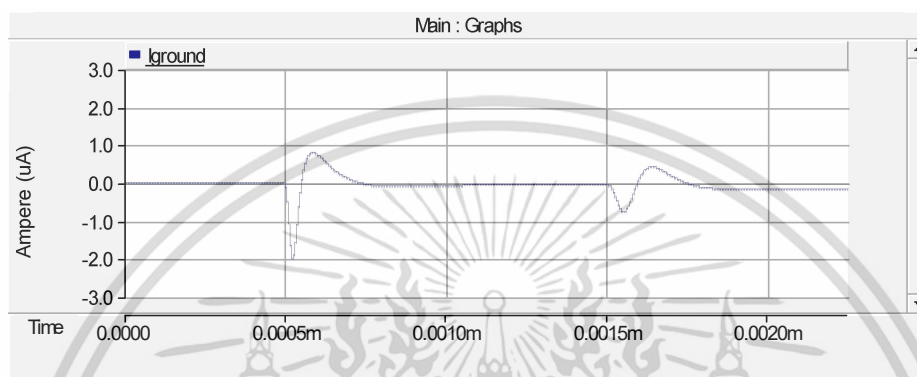
รูปที่ 4.27 ผลการจำลองพัลส์กระแสที่ต่อวงจรจำลองการต่อลงดินตรงกลาง (จ่ายพัลส์ปลายเคเบิล)

ตารางที่ 4.6 ผลการจำลองการต่อลงดินตรงกลาง โดยจ่ายพัลส์ปลายเคเบิล

เซนเซอร์	ความหมาย	ขนาด	ขั้ว	ขนาดพัลส์สะท้อน	ขั้ว
I+	พัลส์จากเครื่องกำเนิดฝั่งบวก	0.0488	บวก	0.00181	ลบ
I-	พัลส์จากเครื่องกำเนิดฝั่งลบ	0.0488	ลบ	0.00181	บวก
IC1	วัดที่ตัวนำต้นสาย	0.00631	ลบ	0.00099	ลบ
IS1	วัดที่ชิลด์ต้นสาย	0.00631	บวก	0.00099	บวก
IC2	วัดที่ตัวนำกลางสาย(ก่อนกราวด์)	0.0224	ลบ	0.0099	บวก

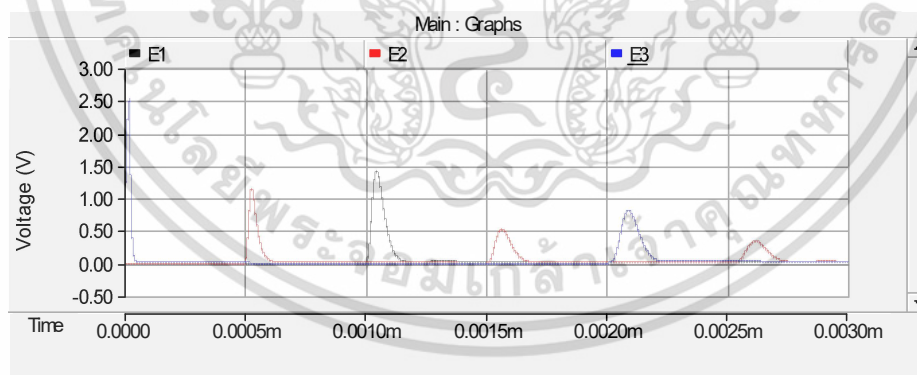
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IS2	วัดที่ชิลด์กลางสาย(ก่อนกราวด์)	0.0224	บวก	0.0099	ลบ
IC2_2	วัดที่ตัวนำกลางสาย(หลังกราวด์)	0.0224	ลบ	0.0099	บวก
IS2_2	วัดที่ชิลด์กลางสาย(หลังกราวด์)	0.0224	บวก	0.0099	ลบ
IC3	วัดที่ตัวนำปลายสาย	0.0464	ลบ	0.00368	บวก
IS3	วัดที่ชิลด์ปลายสาย	0.0464	บวก	0.00368	ลบ



รูปที่ 4.28 ผลการจำลองของพัลส์กระแสที่สายดินของการจำลองการต่อลงดินตรงกลาง (จ่ายพัลส์ปลายเคเบิล)

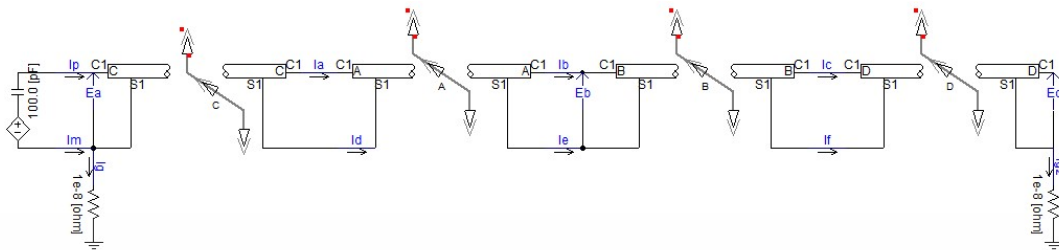
ตามรูปที่ 4.28 นั้น กราฟมีลักษณะเหมือนกันกับรูปที่ 4.20 (กรณีจ่ายพัลส์ต้นเคเบิล) เนื่องจากการสลับตำแหน่งแหล่งจ่ายพัลส์แล้วแต่เงื่อนไขทิศทาง การวางเครื่องมือวัดและระยะเคเบิลที่เท่ากันจึงทำให้กราฟออกมาเหมือนกัน



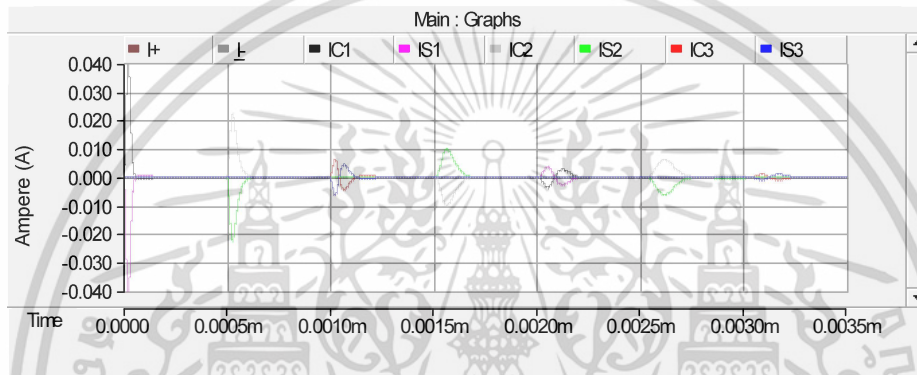
รูปที่ 4.29 แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้ตามระยะต่างๆของเคเบิลของวงจรต่อลงดินตรงกลาง (จ่ายพัลส์ปลายเคเบิล)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

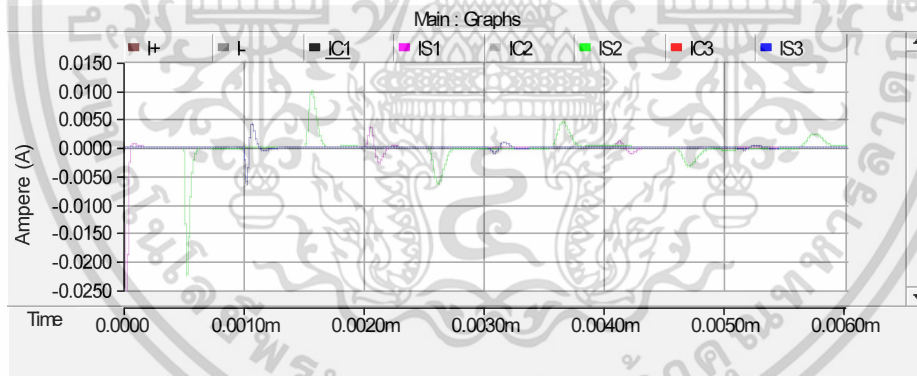
4.1.7 ผลจำลองระบบเคเบิลใต้ดินที่ต่อลงดินที่ปลายทั้งสองด้าน โดยจ่ายพัลส์ต้นเคเบิล



รูปที่ 4.30 วงจรจำลองระบบเคเบิลใต้ดินที่ต่อลงดินที่ปลายทั้งสองด้าน โดยจ่ายพัลส์ต้นเคเบิล



ก) ผลการจำลองที่มองเห็นพัลส์สะท้อนลำดับที่ 2 ของกระแสที่วัดตำแหน่งกลางสาย



ข) ผลการจำลองที่มองเห็นพัลส์กระแสที่วิ่งในสายชีลด์

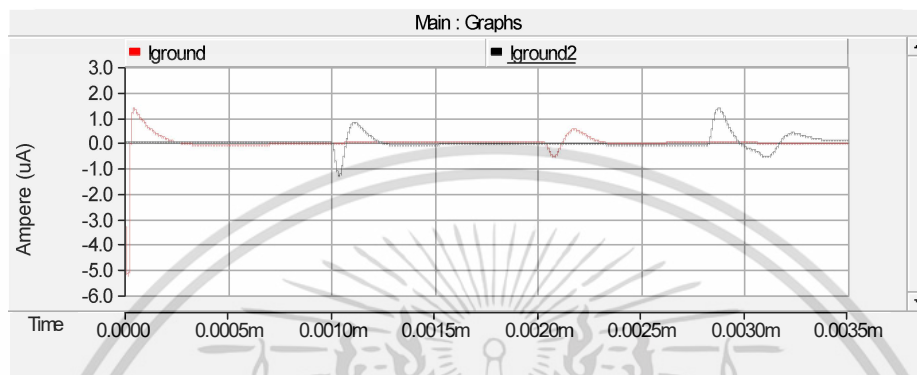
รูปที่ 4.31 ผลการจำลองพัลส์กระแสที่ต่อวงจรจำลองการต่อลงดินทั้งสองด้าน (จ่ายพัลส์ต้นเคเบิล)

ตารางที่ 4.7 ผลการจำลองการต่อลงดินทั้งสองด้าน โดยจ่ายพัลส์ต้นเคเบิล

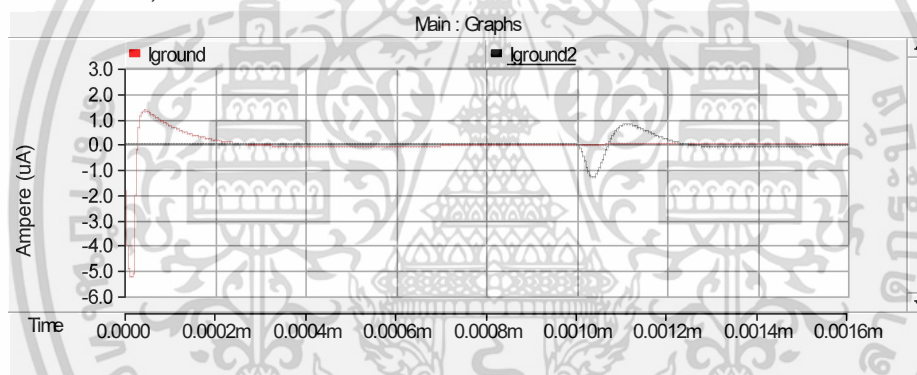
ชื่อกราฟ	ความหมาย	ขนาด	ขั้ว	ขนาดพัลส์สะท้อน	ขั้ว
I+	พัลส์จากเครื่องกำเนิดฝั่งบวก	0.0488	บวก	0.0018	ลบ
I-	พัลส์จากเครื่องกำเนิดฝั่งลบ	0.0488	ลบ	0.0018	บวก
IC1	วัดที่ตัวนำต้นสาย	0.0464	บวก	0.00368	ลบ
IS1	วัดที่ชีลด์ต้นสาย	0.0464	ลบ	0.00368	บวก
IC2	วัดที่ตัวนำกลางสาย	0.0224	บวก	0.0099	ลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IS2	วัดที่ซีลด์กลางสาย	0.0224	ลบ	0.0099	บวก
IC3	วัดที่ตัวนำปลายสาย	0.0063	บวก	0.00099	บวก
IS3	วัดที่ซีลด์ปลายสาย	0.0063	ลบ	0.00099	ลบ



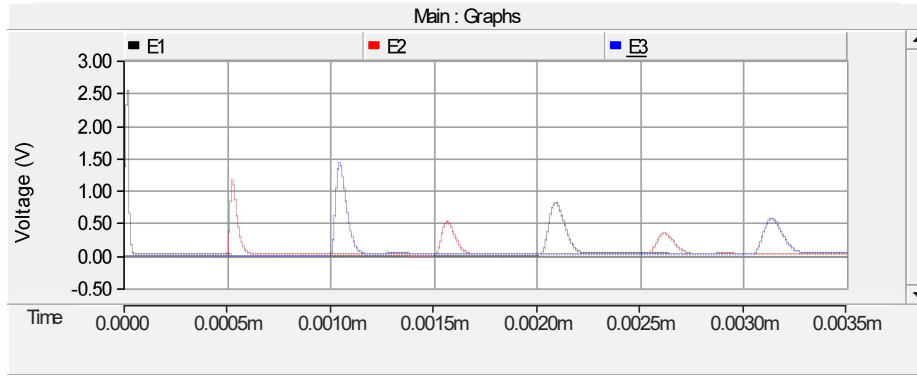
ก) ผลการจำลองที่มองเห็นพัลส์สะท้อนของกราวด์ที่ปลายเคเบิล



ข) ภาพขยาย

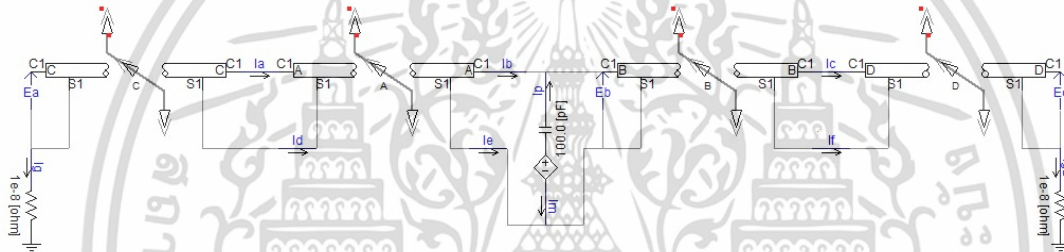
รูปที่ 4.32 ผลการจำลองของพัลส์กระแสที่สายดินของการจำลองการต่อลงดินทั้งสองด้าน (จ่ายพัลส์ต้นเคเบิล)

ตามที่แสดงอยู่ในรูปที่ 4.32 เมื่อพัลส์ที่ปลายเคเบิล หรือก็คือที่ตำแหน่งกราวด์อีกด้านนั้น เกิดขึ้นที่เวลาประมาณ 1 ไมโครวินาที เมื่อทำการคำนวณระยะทางแล้วนั้นจะอยู่ที่ประมาณ 200 เมตร ซึ่งตรงตามกับที่กำหนดไว้ ซึ่งเมื่อทำการกับกรณีต่อกราวด์ลงดินข้างเดียว ที่มีการจ่ายพัลส์ต้นเคเบิล ผลที่ได้ออกมาจะมีลักษณะเหมือนกัน ทั้งในส่วนของพัลส์ต้นกำเนิดและพัลส์สะท้อน

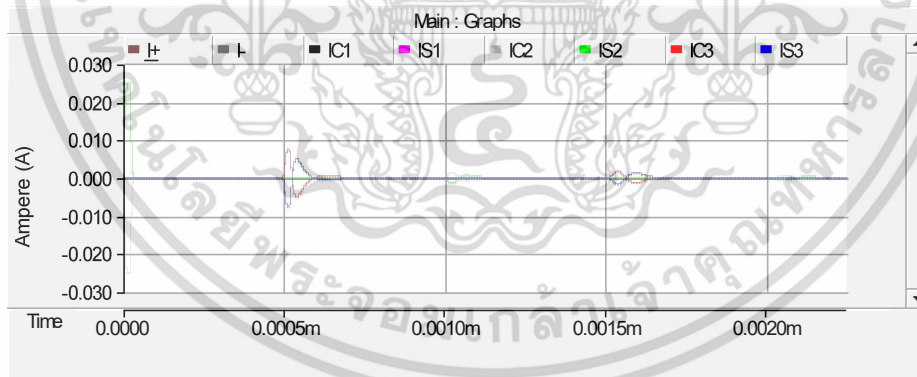


รูปที่ 4.33 แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้ตามระยะต่างๆของเคเบิลของวงจรต่อลงดินทั้งสองด้าน (จ่ายพัลส์ต้นเคเบิล)

4.1.8 ผลจำลองระบบเคเบิลใต้ดินที่ต่อลงดินที่ปลายทั้งสองด้าน โดยจ่ายพัลส์กลางเคเบิล

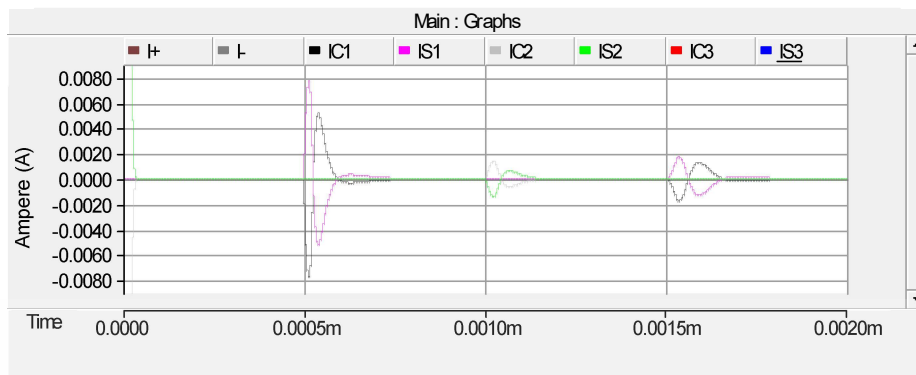


รูปที่ 4.34 วงจรจำลองระบบเคเบิลใต้ดินที่ต่อลงดินที่ปลายทั้งสองด้าน โดยจ่ายพัลส์กลางเคเบิล

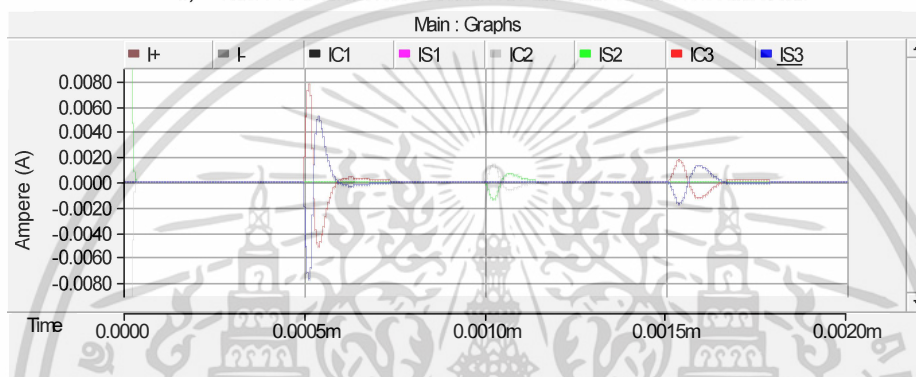


ก) ผลการจำลองที่เห็นพัลส์สะท้อนของปลายเคเบิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ข) ผลการจำลองที่เห็นพัลส์กระแสในสายชีลด์ที่ต้นเคเบิล



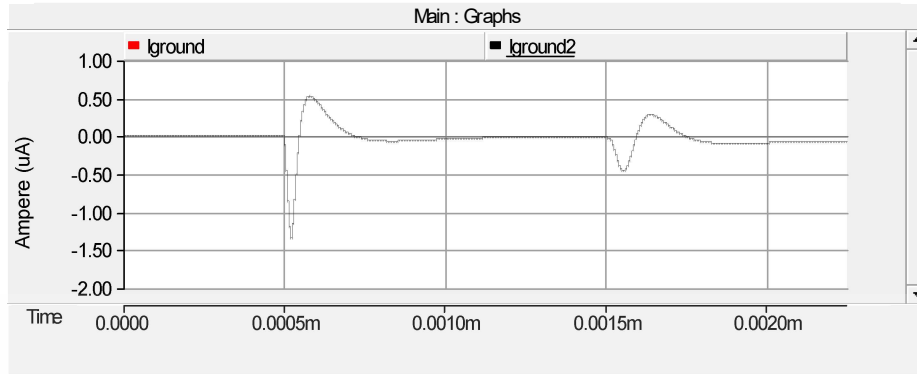
ค) ผลการจำลองที่เห็นพัลส์กระแสในสายชีลด์ที่ปลายเคเบิล

รูปที่ 4.35 ผลการจำลองพัลส์กระแสที่ต่อวงจรจำลองการต่อลงดินทั้งสองด้าน (จ่ายพัลส์กลางเคเบิล)

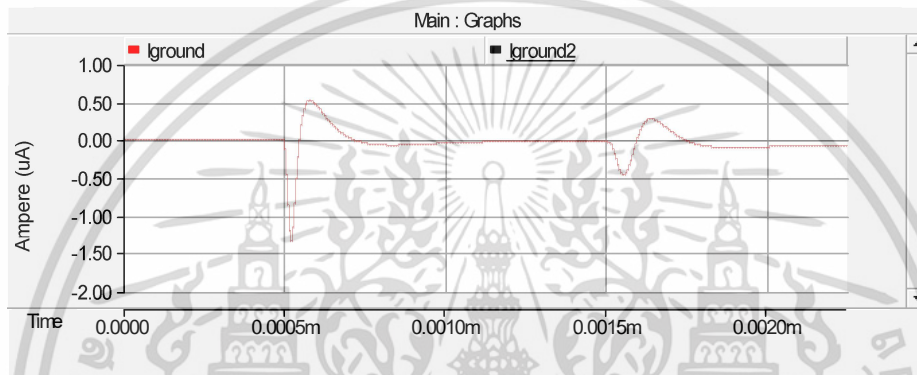
ตารางที่ 4.8 ผลการจำลองการต่อลงดินทั้งสองด้าน โดยจ่ายพัลส์กลางเคเบิล

ชื่อกราฟ	ความหมาย	ขนาด	ขั้ว	ขนาดพัลส์สะท้อน	ขั้ว
I+	พัลส์จากเครื่องกำเนิดฝั่งบวก	0.0499	บวก	0.0029	ลบ
I-	พัลส์จากเครื่องกำเนิดฝั่งลบ	0.0499	ลบ	0.0029	บวก
IC1	วัดที่ตัวนำต้นสาย	0.0078	ลบ	0.0017	ลบ
IS1	วัดที่ชีลด์ต้นสาย	0.0078	บวก	0.0017	บวก
IC2	วัดที่ตัวนำกลางสาย	0.0249	ลบ	0.0015	บวก
IS2	วัดที่ชีลด์กลางสาย	0.0249	บวก	0.0015	ลบ
IC3	วัดที่ตัวนำปลายสาย	0.0078	บวก	0.0078	บวก
IS3	วัดที่ชีลด์ปลายสาย	0.0017	ลบ	0.0017	ลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



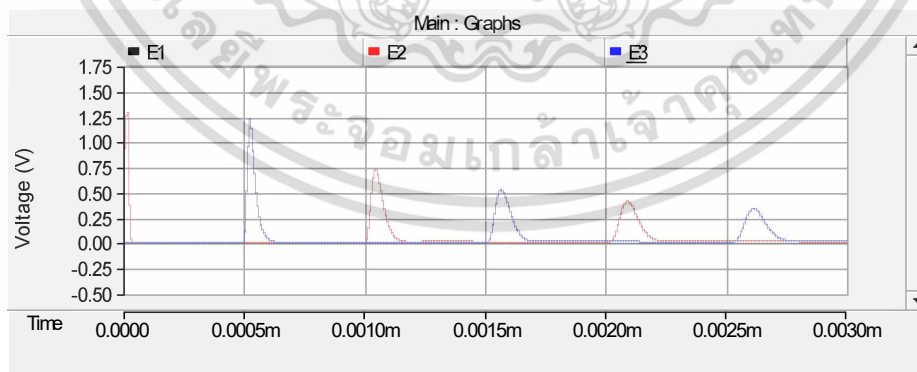
ก) ผลการจำลองพัลส์กระแสที่กราวด์ด้านต้น



ข) ผลการจำลองพัลส์กระแสที่กราวด์ด้านปลาย

รูปที่ 4.36 ผลการจำลองของพัลส์กระแสที่สายดินของการจำลองการต่อลงดินทั้งสองด้าน (จ่ายพัลส์กลางเคเบิล)

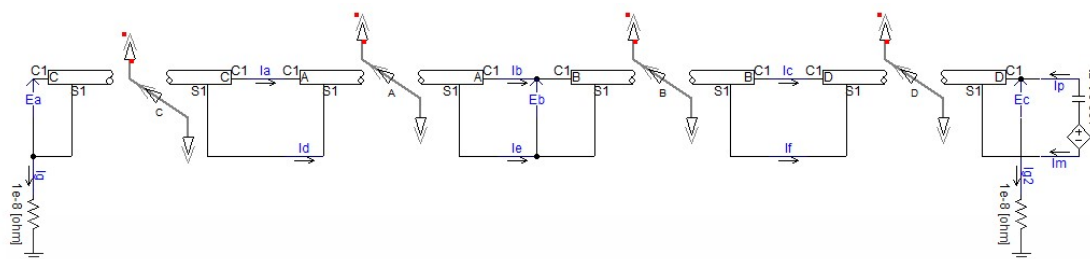
เหมือนกันกับกรณีการจ่ายที่กลางเคเบิลของกรณีก่อนหน้านี้ ที่เมื่อพัลส์แพร่กระจายไปยังตำแหน่ง เครื่องมือวัดที่ระยะเท่ากันและทิศทางเหมือนกัน จะทำให้ผลที่ได้ออกมาเหมือนกันจนกราฟทับกันได้พอดี



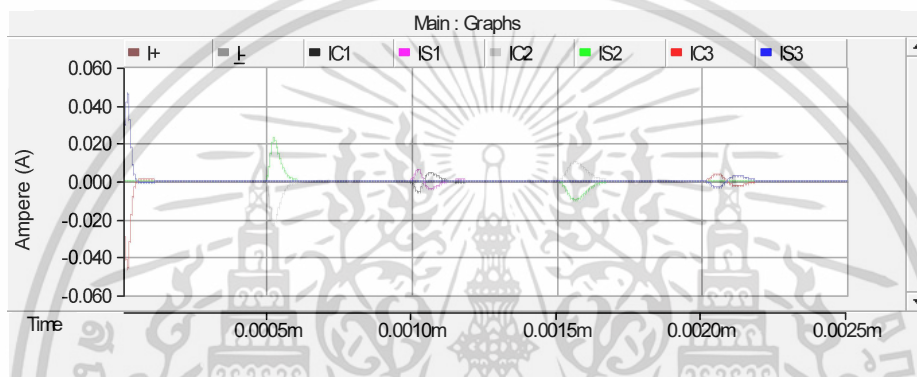
รูปที่ 4.37 แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้ตามระยะต่างๆของเคเบิลของวงจรต่อลงดินทั้งสองด้าน (จ่ายพัลส์กลางเคเบิล)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

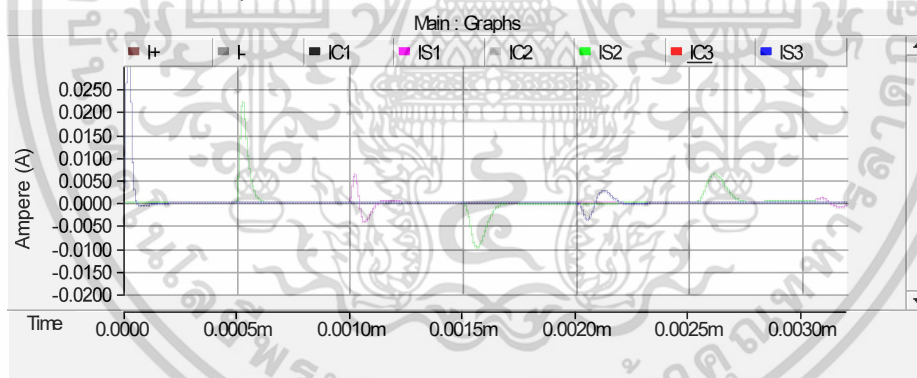
4.1.9 ผลจำลองระบบเคเบิลใต้ดินที่ต่อลงดินที่ปลายทั้งสองด้าน โดยจ่ายพัลส์ปลายเคเบิล



รูปที่ 4.38 วงจรจำลองระบบเคเบิลใต้ดินที่ต่อลงดินที่ปลายทั้งสองด้าน โดยจ่ายพัลส์ปลายเคเบิล



ก) ผลจำลองที่เห็นพัลส์สะท้อนของทีเคเบิลปลายสาย



ข) พัลส์ที่แพร่กระจายในชีลด์

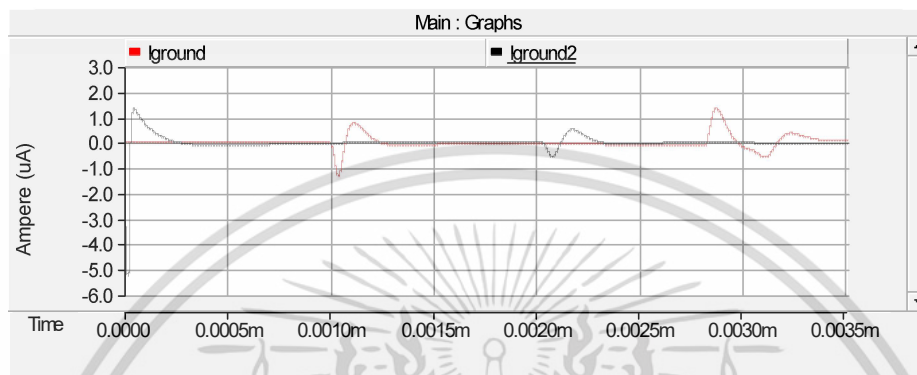
รูปที่ 4.39 ผลการจำลองพัลส์กระแสที่ต่อวงจรจำลองการต่อลงดินทั้งสองด้าน (จ่ายพัลส์ปลายเคเบิล)

ตารางที่ 4.9 ผลการจำลองการต่อลงดินทั้งสองด้าน โดยจ่ายพัลส์ปลายเคเบิล

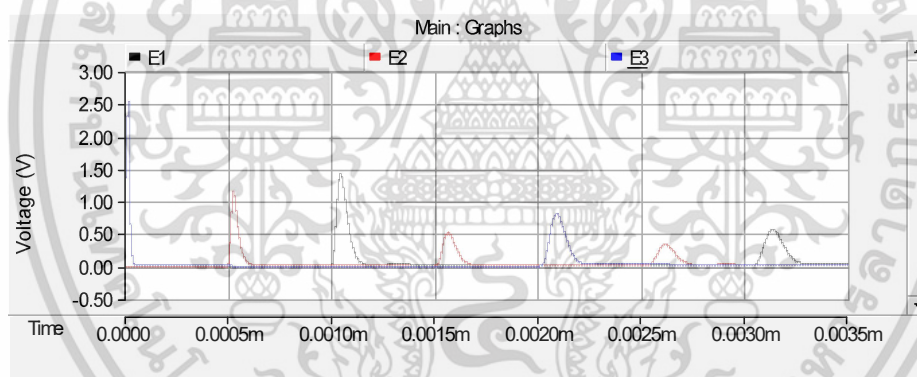
ชื่อกราฟ	ความหมาย	ขนาด	ขั้ว	ขนาดพัลส์สะท้อน	ขั้ว
I+	พัลส์จากเครื่องกำเนิดฝั่งบวก	0.0489	บวก	0.0018	ลบ
I-	พัลส์จากเครื่องกำเนิดฝั่งลบ	0.0489	ลบ	0.0018	บวก
IC1	วัดที่ตัวนำต้นสาย	0.0063	ลบ	0.0010	ลบ
IS1	วัดที่ชีลด์ต้นสาย	0.0063	บวก	0.0010	บวก
IC2	วัดที่ตัวนำกลางสาย	0.0224	ลบ	0.0099	บวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IS2	วัดที่ซีสต์กลางสาย	0.0224	บวก	0.0099	ลบ
IC3	วัดที่ตัวนำปลายสาย	0.0464	ลบ	0.0037	บวก
IS3	วัดที่ซีสต์ปลายสาย	0.0464	บวก	0.0037	ลบ



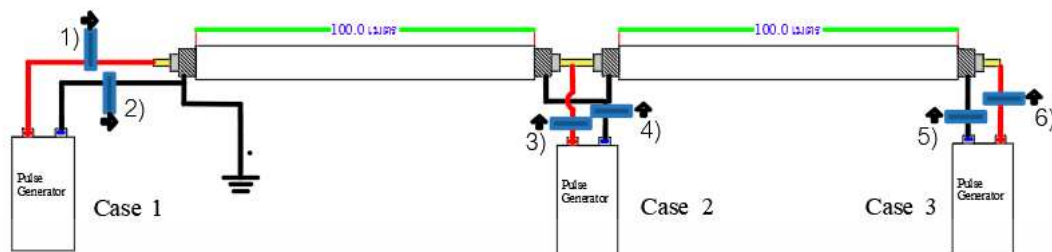
รูปที่ 4.40 ผลการจำลองของพัลส์กระแสที่สายดินของการจำลองการต่อลงดินทั้งสองด้าน (จ่ายพัลส์ปลายเคเบิล)



รูปที่ 4.41 แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้ตามระยะต่างๆของเคเบิลของวงจรต่อลงดินทั้งสองด้าน (จ่ายพัลส์ปลายเคเบิล)

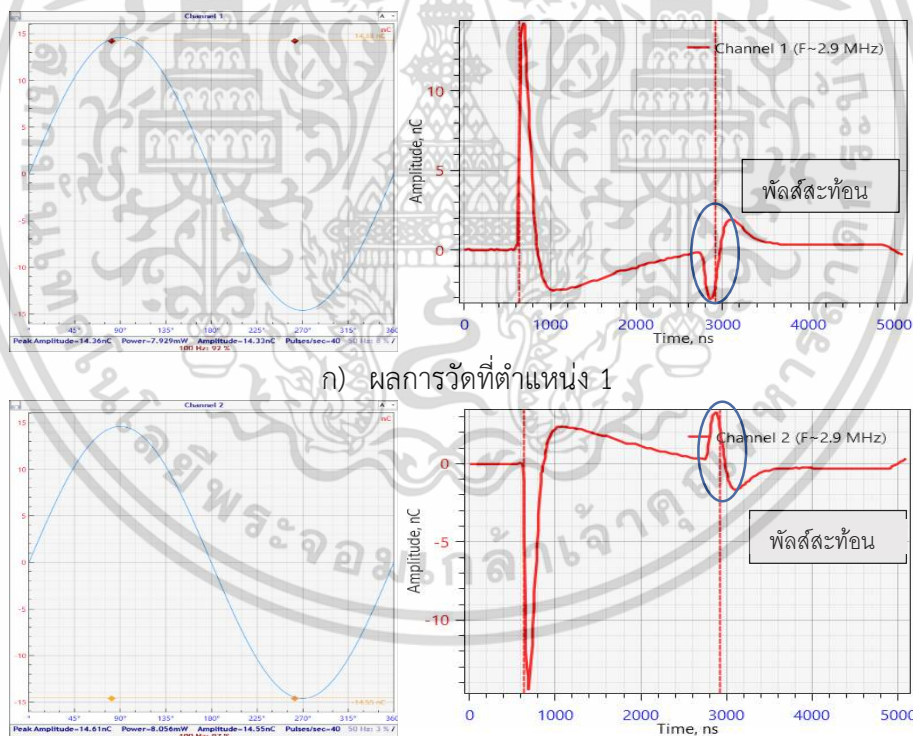
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผลการทดสอบระบบเคเบิลใต้ดิน



รูปที่ 4.42 วงจรการวัดพัลส์ที่ออกจากเครื่องกำเนิดพัลส์

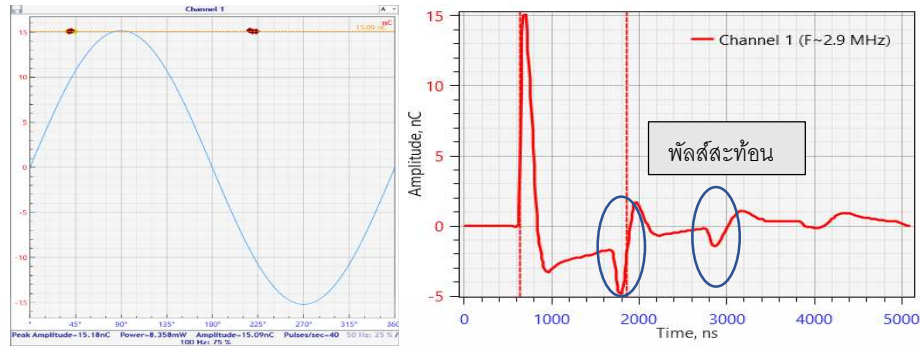
ตามรูปที่ 4.42 ภาพการต่อวงจรการวัดพัลส์ที่ออกจากเครื่องกำเนิดพัลส์ โดยวงจรเคเบิลที่กล่าวถึงคือ วงจรที่มีการต่อสายกราวด์ที่ตำแหน่งต้นสายและทำการจ่ายพัลส์ที่ต้นสายโดยจะทำการติดตั้งเซนเซอร์ที่ ขั้วบวกและลบของเครื่องกำเนิดพัลส์โดยมีทิศทางหันออกจากเครื่อง โดยจะแบ่งออกเป็น 3 ตำแหน่งของการ จ่ายพัลส์เข้าระบบ โดยกราฟผลทดสอบที่วัดค่าได้จะแสดงอยู่ในรูปภาพที่ 4.42 และตารางที่ 4.1 โดยการ เครื่องกำเนิดพัลส์จะจ่ายพัลส์ขนาด 100 nC เพื่อศึกษาการเกิดพัลส์สะท้อนที่สามารถสังเกตได้อย่างชัดเจน



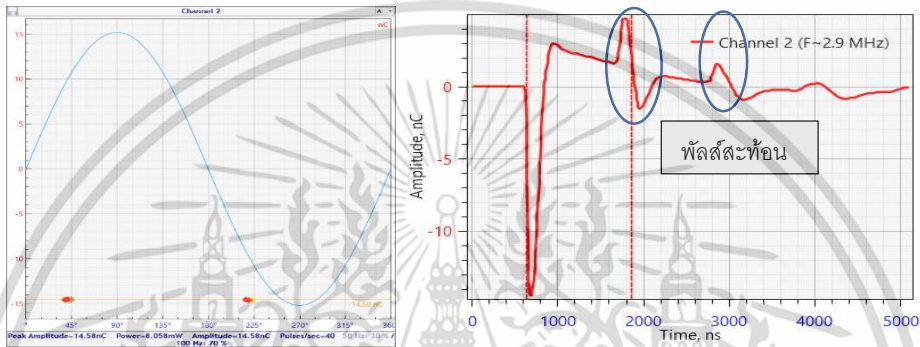
ก) ผลการวัดที่ตำแหน่ง 1

ข) ผลการวัดที่ตำแหน่ง 2

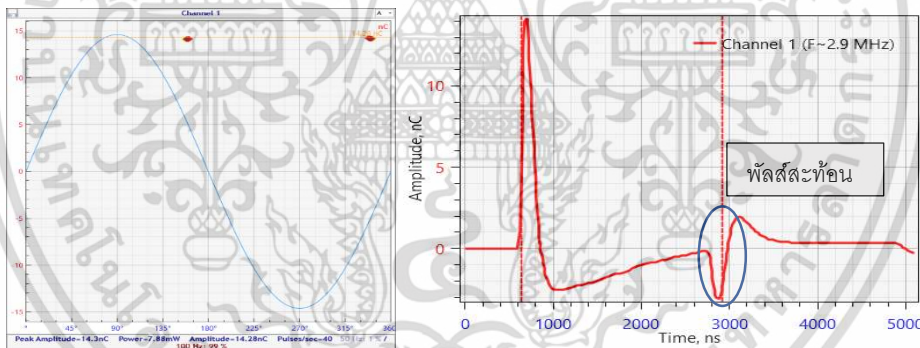
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



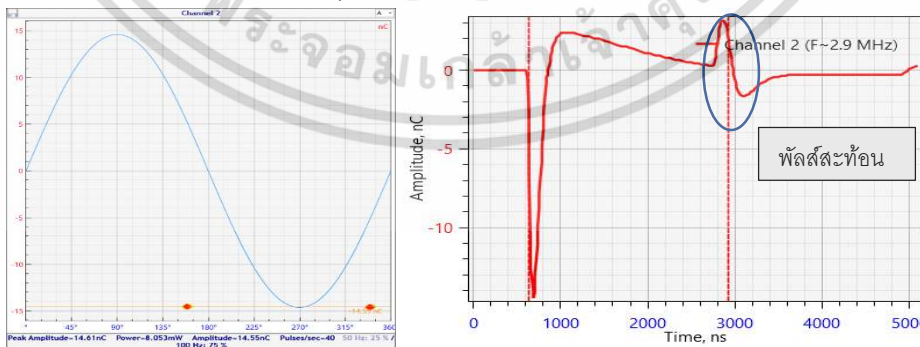
ค) ผลการวัดที่ตำแหน่ง 3



ง) ผลการวัดที่ตำแหน่ง 4



จ) ผลการวัดที่ตำแหน่ง 5



ฉ) ผลการวัดที่ตำแหน่ง 6

รูปที่ 4.43 ผลการวัดพัลส์ที่จ่ายออกจากเครื่องกำเนิดพัลส์ เมื่อกำหนดจ่ายพัลส์ 100 nC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.10 ผลการวัดพัลส์ที่จ่ายออกจากเครื่องกำเนิดพัลส์ที่ต้น กลางและปลายเคเบิล

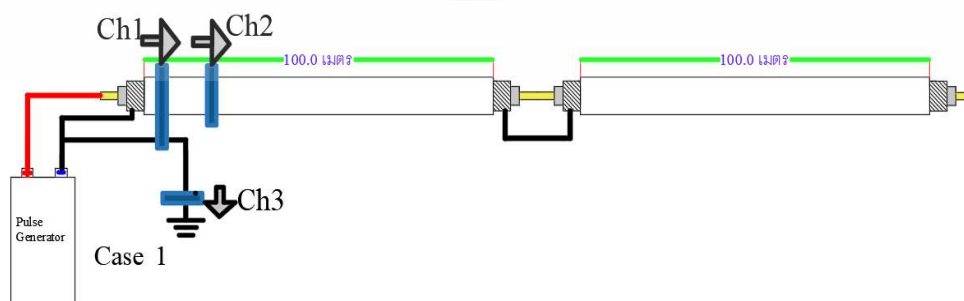
เซนเซอร์	ขนาดพัลส์ (nC)	ขั้ว	ขนาดพัลส์สะท้อน (nC)	ขั้ว
1	~14.28	บวก	~3.10	ลบ
2	~14.55	ลบ	~3.22	บวก
3	~15.09	บวก	~4.9	ลบ
4	~14.58	ลบ	~4.8	บวก
5	~14.28	บวก	~3.1	ลบ
6	~14.55	ลบ	~3.2	บวก

จากผลการวัดตามตารางที่ 4.10 นั้น แสดงให้เห็นว่าเมื่อมีการจ่ายพัลส์ออกมาจากเครื่องกำเนิดพัลส์ที่ขั้วบวกและลบ เมื่อเปรียบเทียบกันแล้วพัลส์ที่จ่ายออกมาจากขั้วลบนั้นมีปริมาณที่มากกว่าด้านบวก (ยกเว้นกรณีที่จ่ายพัลส์ตรงกลาง) ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากการที่สายซิลด์นั้นมีค่าความต้านทานของสายน้อยกว่าที่สายตัวนำจึงทำให้กราฟมีการลดทอนที่น้อยกว่า แต่เมื่อเปรียบเทียบในเรื่องของการเกิดพัลส์สะท้อนแล้วทั้งขั้วบวกและลบมีพัลส์สะท้อนที่สามารถมองเห็นได้อย่างชัดเจนและมีขั้วตรงข้ามกับพัลส์ต้นกำเนิด ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากการที่สะท้อนกลับมาในทิศทางตรงข้ามกับทิศทางของเซนเซอร์ เมื่อทำการนำหลักการของ TDR มาหาระยะทางแล้วนั้น ในกรณีที่จ่ายต้นสายและปลายสายเคเบิล ผลที่ได้ออกมาประมาณ 200 เมตร หรือก็คือพัลส์มีการแพร่กระจายไปยังปลายเคเบิล(ระยะ 200 เมตร) แล้วสะท้อนกลับมา(ระยะสะท้อน 200 เมตร) โดยประมาณ แต่ที่การจ่ายพัลส์ตำแหน่งกลางเคเบิลจะเกิดพัลส์สะท้อนที่ระยะ 100 เมตร ก็คือแพร่กระจายไปที่ปลายเคเบิล ที่มีระยะ 100 เมตรจากแหล่งจ่ายและสะท้อนกลับมาที่ตำแหน่งเซนเซอร์อีก 100 เมตร

เมื่อทำการเปรียบเทียบพัลส์สะท้อนและพัลส์ต้นกำเนิด จะเห็นได้ว่าที่ตำแหน่งของเซนเซอร์ 3 และ 4 พัลส์สะท้อนจะมีขนาดที่มากกว่าตำแหน่งอื่นๆ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการแพร่กระจายของพัลส์เมื่อมีระยะทางที่ไกลขึ้นจะคลื่นพัลส์จะได้รับผลกระทบของการลดทอนและการกระจายตัวของสายเคเบิลซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้จากการจำลองในโปรแกรม

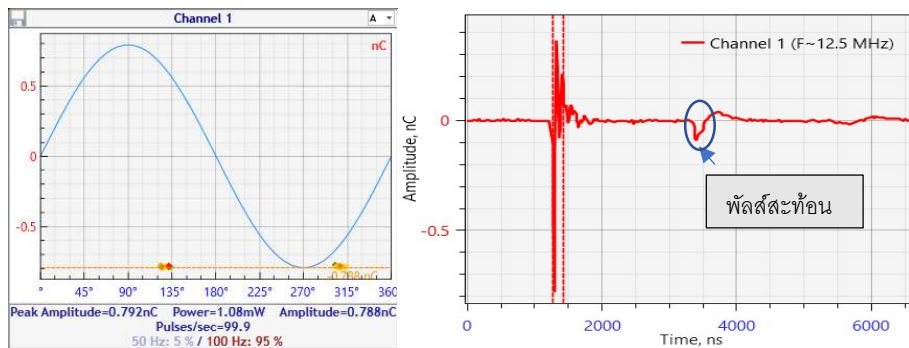
4.2.1 ผลทดสอบระบบเคเบิลใต้ดินที่ต่อลงดินข้างเดียว โดยจ่ายพัลส์ต้นเคเบิล

การทดสอบจะทำการต่อวงจรทดสอบตามรูปที่ 4.44 ซึ่งผลที่วัดได้จะแสดงอยู่ในรูปภาพที่ 4.45 และตารางที่ 4.11 โดยกำหนดเครื่องกำเนิดพัลส์ให้จ่ายพัลส์ขนาด 100 nC

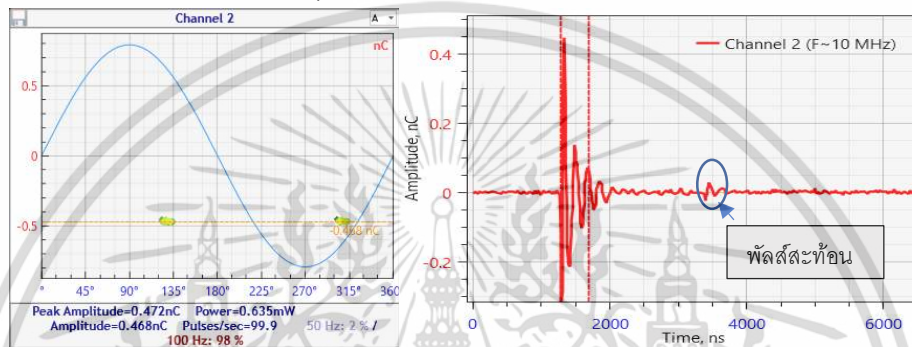


รูปที่ 4.44 วงจรทดสอบระบบเคเบิลใต้ดินที่ต่อลงดินข้างเดียว โดยจ่ายพัลส์ต้นเคเบิล

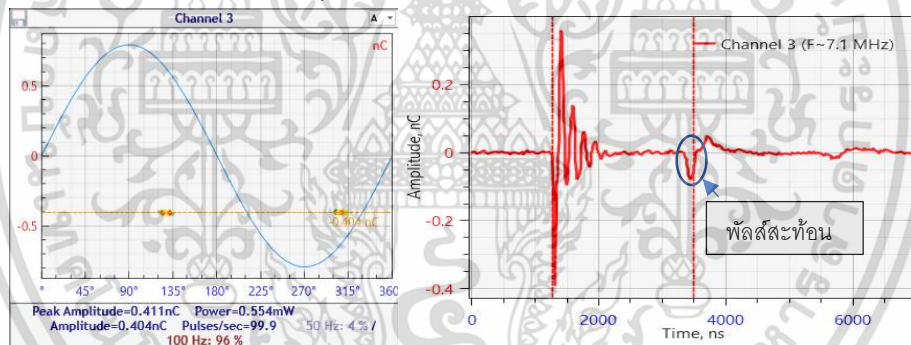
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก) ผลการวัดที่ตำแหน่ง Ch1



ข) ผลการวัดที่ตำแหน่ง Ch2



ค) ผลการวัดที่ตำแหน่ง Ch3

รูปที่ 4.45 ผลการทดสอบการต่อลงดินข้างเดียว โดยจ่ายพัลส์ต้นเคเบิล

ตารางที่ 4.11 ผลการทดสอบการต่อลงดินข้างเดียว โดยจ่ายพัลส์ต้นเคเบิล

เซนเซอร์	ขนาดพัลส์ (nC)	ขั้ว	ขนาดพัลส์สะท้อน (nC)	ขั้ว
Ch1	0.788	ลบ	0.084	ลบ
Ch2	0.468	ลบ	0.030	ลบ
Ch3	0.404	ลบ	0.086	ลบ

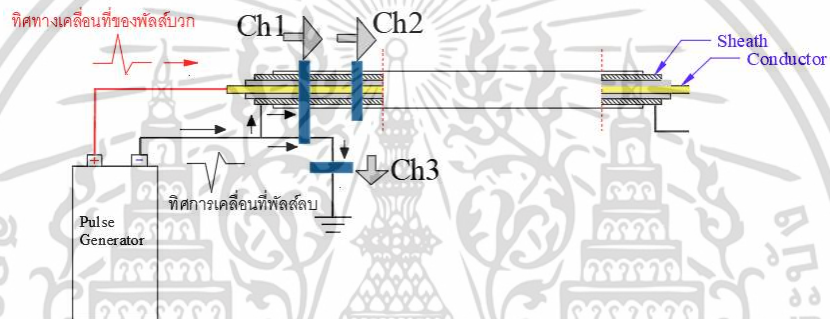
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดสอบสามารถสรุปได้ ดังนี้

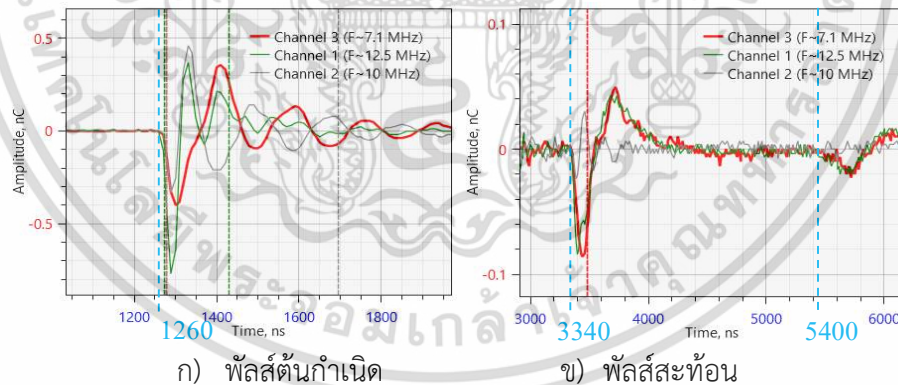
กรณีจ่ายพัลส์ PD ที่ต้นสายพบว่ากลุ่มสัญญาณที่เซนเซอร์ทุกตัวที่วัดได้จะอยู่ในตำแหน่งเดียวกันและเป็นขั้วลบทั้งหมด เนื่องจากขั้วที่วัดได้เช่นนี้พิจารณาจากทิศทางการเคลื่อนที่ของพัลส์และการติดตั้งเซนเซอร์ดังรูปที่ 4.42 สามารถอธิบายได้ว่า

- HFCT Ch1: ผลรวมของพัลส์ลบจะมีค่ามากกว่าพัลส์บวกทำให้เหลือในส่วนของพัลส์ลบและเซนเซอร์มีทิศเดียวกับการเคลื่อนที่ของพัลส์ ทำให้แสดงผลไปในทิศเดียวกัน
- HFCT Ch2: ผลรวมของพัลส์บวกและพัลส์ลบ ไม่ได้ถูกหักล้างจนเป็น 0 แต่จะเหลือในส่วนของพัลส์ลบเนื่องจากการลดทอนของขนาดพัลส์ในตัวนำจะมีค่ามากกว่าในสายซิลด์
- HFCT Ch3: มีเพียงพัลส์ลบและเซนเซอร์มีทิศเดียวกับการเคลื่อนที่ของพัลส์ลบ

โดยทิศทางการเคลื่อนที่ของพัลส์อธิบายอยู่ในรูปภาพที่ 4.45



รูปที่ 4.46 ภาพการเคลื่อนที่ของพัลส์ที่ต่อลงดินข้างเดียว โดยจ่ายพัลส์ต้นเคเบิล



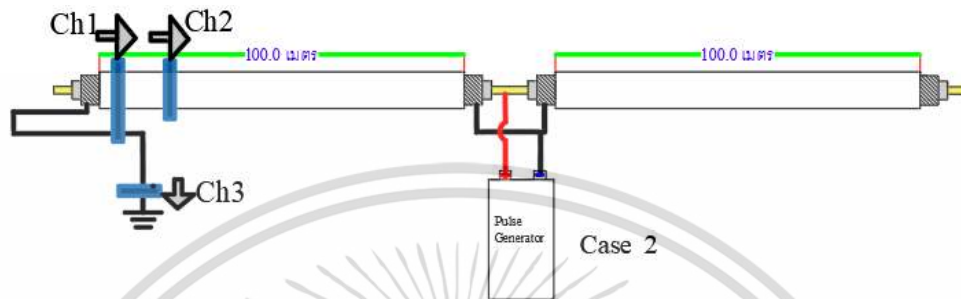
รูปที่ 4.47 ภาพขยายพัลส์สะท้อนของผลทดสอบการต่อลงดินต้นเคเบิล (จ่ายพัลส์ต้นเคเบิล)

จากรูปที่ 4.47 เมื่อทำการคำนวณระยะทางการสะท้อนตาม TDR แล้วนั้นจะแสดงให้เห็นถึงการสะท้อนที่ระยะทางประมาณ 411 เมตร (คลื่นสะท้อนจากปลายเปิดกลับมาที่ตำแหน่งเซนเซอร์ทำให้มีระยะที่ประมาณ 400 เมตร โดยระยะที่เกินมานั้นอาจมีความเกี่ยวข้องมาจากสายกราวด์ที่นำมาทดสอบที่มีระยะที่ยาว)

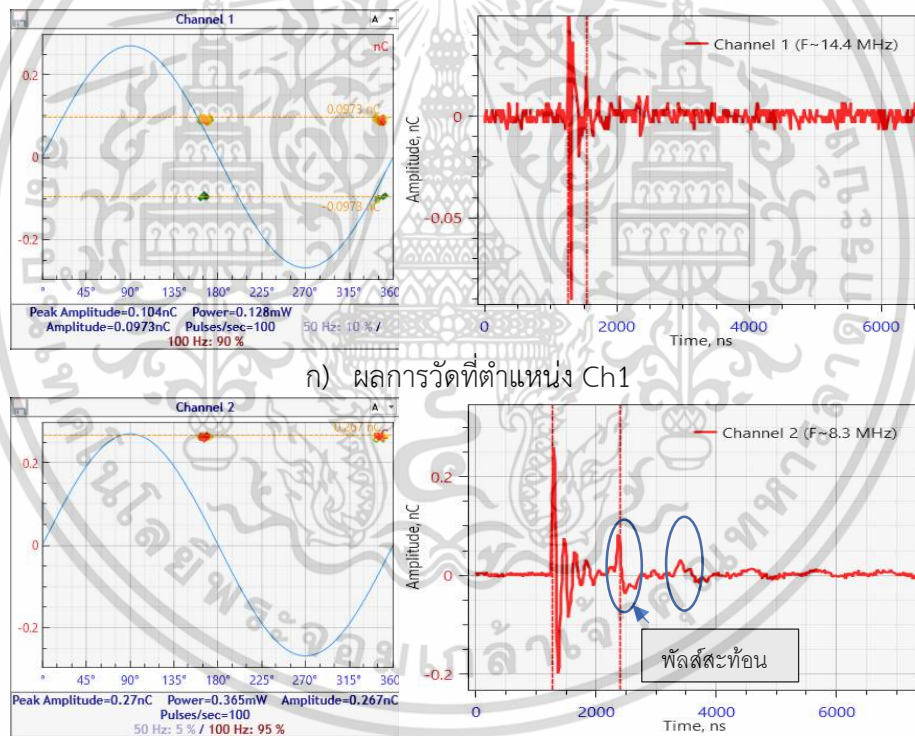
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 ผลทดสอบระบบเคเบิลใต้ดินที่ต่อลงดินข้างเดียว โดยจ่ายพัลส์กลางเคเบิล

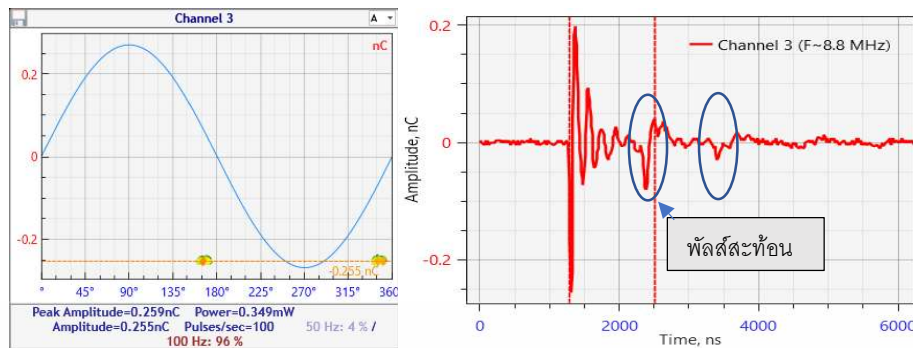
การทดสอบจะทำการต่อวงจรทดสอบตามรูปที่ 4.46 ซึ่งผลที่วัดได้จะแสดงอยู่ในรูปภาพที่ 4.47 และตารางที่ 4.3 โดยกำหนดเครื่องกำเนิดพัลส์ให้จ่ายพัลส์ขนาด 100 nC



รูปที่ 4.48 วงจรทดสอบระบบเคเบิลใต้ดินที่ต่อลงดินข้างเดียว โดยจ่ายพัลส์กลางเคเบิล



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ค) ผลการวัดที่ตำแหน่ง Ch3

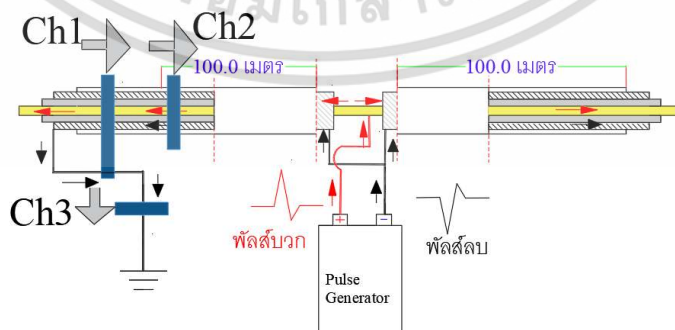
รูปที่ 4.49 ผลการทดสอบการต่อลงดินข้างเดียว โดยจ่ายพัลส์กลางเคเบิล

ตารางที่ 4.12 ผลการทดสอบการต่อลงดินข้างเดียว โดยจ่ายพัลส์กลางเคเบิล

เซนเซอร์	ขนาดพัลส์ (nC)	ขั้ว	ขนาดพัลส์สะท้อน (nC)	ขั้ว
Ch1	0.0973	บวก	ไม่สามารถจับได้	
Ch2	0.2670	บวก	0.0820	บวก
Ch3	0.2550	ลบ	0.0795	ลบ

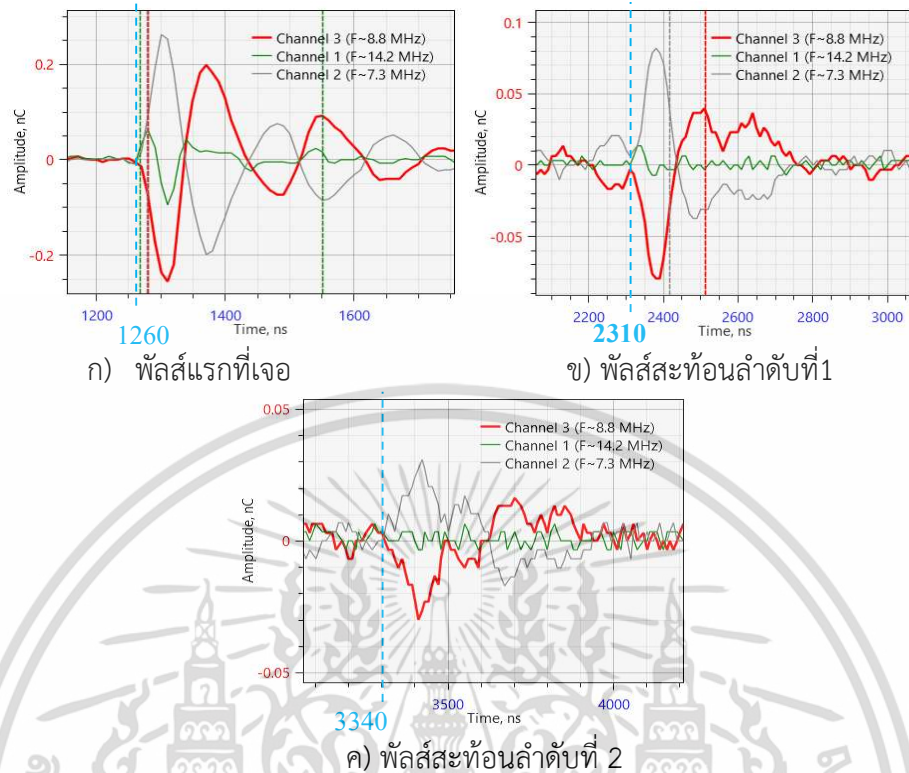
จากผลการทดสอบสามารถสรุปได้ของการจ่ายพัลส์ที่กลางเคเบิล ดังนี้
 กรณีจ่ายพัลส์ PD ที่กลางเคเบิลพบว่ากลุ่มพัลส์ที่เซนเซอร์ทุกตัวที่วัดได้จะอยู่ในตำแหน่งใกล้เคียงกันและ
 ซึ่งผลของ Ch1 และ Ch2 เป็นพัลส์บวก แต่ Ch3 เป็นพัลส์ลบ เนื่องจากขั้วที่วัดได้เช่นนี้พิจารณาจากทิศ
 ทิศทางการเคลื่อนที่ของพัลส์และการติดตั้งเซนเซอร์ดังรูปที่ 4.47 สามารถอธิบายได้ว่า

- HFCT Ch1: ผลรวมของพัลส์บวกและลบจะหักล้างกันมีค่าใกล้เคียง 0 และเคลื่อนที่ในทิศทางตรงข้ามกับทิศทางเซนเซอร์ ทำให้ผลออกมาเป็นค่าบวก
- HFCT Ch2: ผลรวมของพัลส์บวกและพัลส์ลบจะเหลือในส่วนของพัลส์ลบ แต่เนื่องจากการเคลื่อนที่ไปในทิศทางตรงข้ามกับทิศทางของเซนเซอร์ทำให้ผลแสดงเป็นบวก
- HFCT Ch3: มีเพียงพัลส์ลบและเซนเซอร์มีทิศเดียวกันกับการเคลื่อนที่ของพัลส์ลบ



รูปที่ 4.50 ภาพการเคลื่อนที่ของพัลส์ที่ต่อลงดินข้างเดียว โดยจ่ายพัลส์กลางเคเบิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

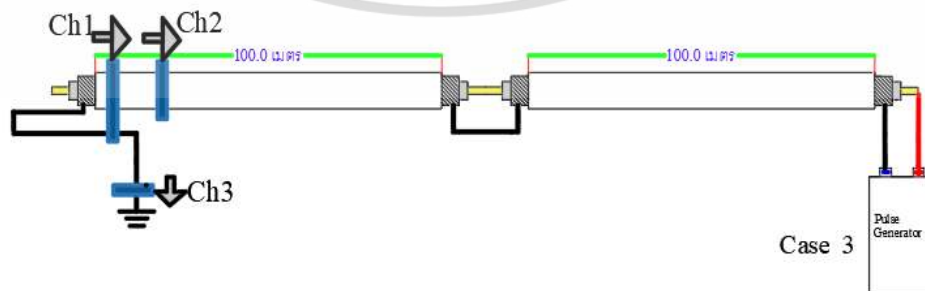


รูปที่ 4.51 ภาพขยายพัลส์สะท้อนของการทดสอบการต่อลงดินข้างเดียว โดยจ่ายพัลส์ปลายเคเบิล

จากรูปที่ 4.51 เมื่อทำการคำนวณระยะทางการสะท้อนตาม TDR แล้วนั้นจะแสดงให้เห็นถึงการสะท้อนที่ระยะทางประมาณ 207 เมตร และ 203.6 เมตร ซึ่งเกิดจากการที่พัลส์เมื่อจ่ายเข้าเคเบิลที่กลางสายจะมีการเคลื่อนที่ออกไปทางต้นและปลายสาย ดังนั้นเมื่อเซนเซอร์สามารถวัดค่าที่ต้นสายได้นั้นก็เป็นเวลาเดียวกันกับที่พัลส์เคลื่อนที่ไปยังปลายสายเช่นกัน ดังนั้นจึงส่งผลให้ระยะสะท้อนมีระยะทาง 200 เมตร

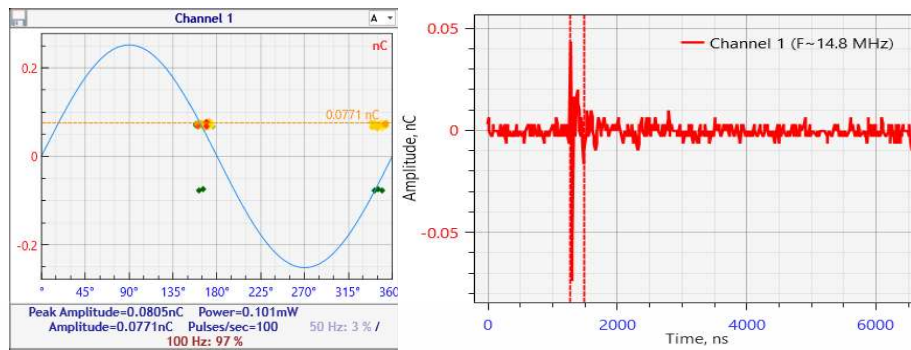
4.2.3 ผลทดสอบระบบเคเบิลใต้ดินที่ต่อลงดินข้างเดียว โดยจ่ายพัลส์ปลายเคเบิล

การทดสอบจะทำการต่อวงจรทดสอบตามรูปที่ 4.48 ซึ่งผลที่วัดได้จะแสดงอยู่ในรูปภาพที่ 4.49 และตารางที่ 4.4 โดยกำหนดเครื่องกำเนิดพัลส์ให้จ่ายพัลส์ขนาด 100 nC

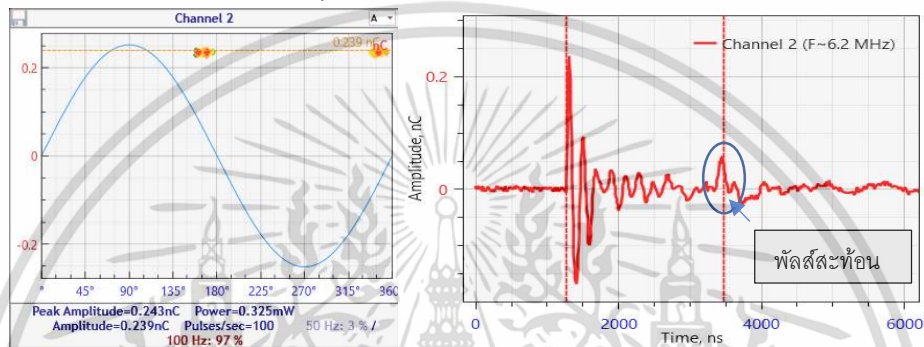


รูปที่ 4.52 วงจรทดสอบระบบเคเบิลใต้ดินที่ต่อลงดินข้างเดียว โดยจ่ายพัลส์ปลายเคเบิล

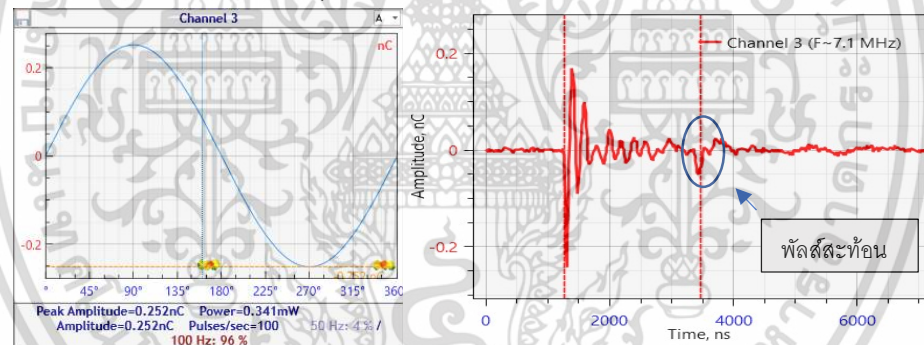
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก) ผลการวัดที่ตำแหน่ง Ch1



ข) ผลการวัดที่ตำแหน่ง Ch2



ค) ผลการวัดที่ตำแหน่ง Ch3

รูปที่ 4.53 ผลการทดสอบการต่อลงดินข้างเดียว โดยจ่ายพัลส์ปลายเคเบิล

ตารางที่ 4.13 ผลการทดสอบการต่อลงดินข้างเดียว โดยจ่ายพัลส์ปลายเคเบิล

เซนเซอร์	ขนาดพัลส์ (nC)	ขั้ว	ขนาดพัลส์สะท้อน (nC)	ขั้ว
Ch1	0.0771	บวก	ไม่สามารถจับได้	
Ch2	0.239	บวก	0.0513	บวก
Ch3	0.252	ลบ	0.0564	ลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

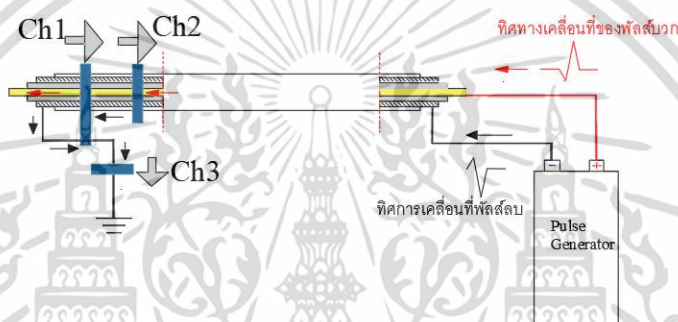
จากผลการทดสอบสามารถสรุปได้ของการจ่ายพัลส์ที่ปลายเคเบิล ดังนี้

กรณีจ่ายพัลส์ PD ที่ปลายเคเบิลพบว่ากลุ่มพัลส์ที่เซนเซอร์ทุกตัวที่วัดได้จะอยู่ในตำแหน่งใกล้เคียงกัน โดย Ch1 และ Ch2 เป็นพัลส์บวก แต่ Ch3 เป็นพัลส์ลบ เนื่องจากข้อที่วัดได้เช่นนี้พิจารณาจากทิศทางการเคลื่อนที่ของพัลส์และการติดตั้งเซนเซอร์ดังรูปที่ 4.53 สามารถอธิบายได้ว่า

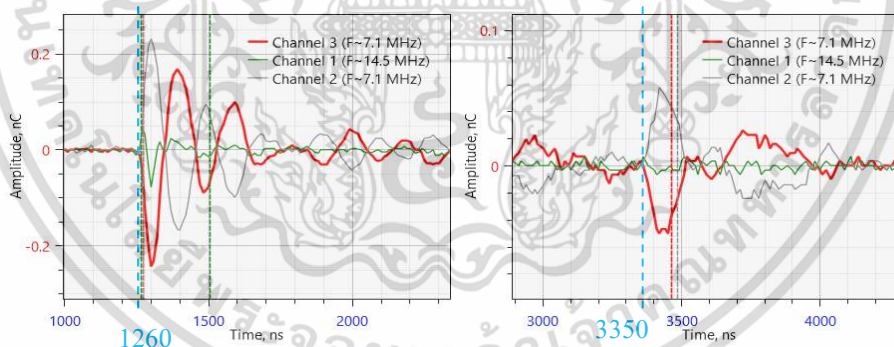
- HFCT Ch1: ผลรวมของพัลส์บวกและลบจะหักล้างกันมีค่าใกล้เคียง 0 และเคลื่อนที่ในทิศทางตรงข้ามกับทิศทางเซนเซอร์ ทำให้ผลออกมาเป็นค่าบวก

- HFCT Ch2: ผลรวมของพัลส์บวกและพัลส์ลบจะเหลือในส่วนของพัลส์ลบ แต่เนื่องจากการเคลื่อนที่ไปในทิศทางตรงข้ามกับทิศทางของเซนเซอร์ทำให้ผลแสดงเป็นบวก

- HFCT Ch3: มีเพียงพัลส์ลบและเซนเซอร์มีทิศเดียวกันกับการเคลื่อนที่ของพัลส์ลบ



รูปที่ 4.54 ภาพการเคลื่อนที่ของพัลส์ที่ต่อลงดินข้างเดียว โดยจ่ายพัลส์ต้นเคเบิล



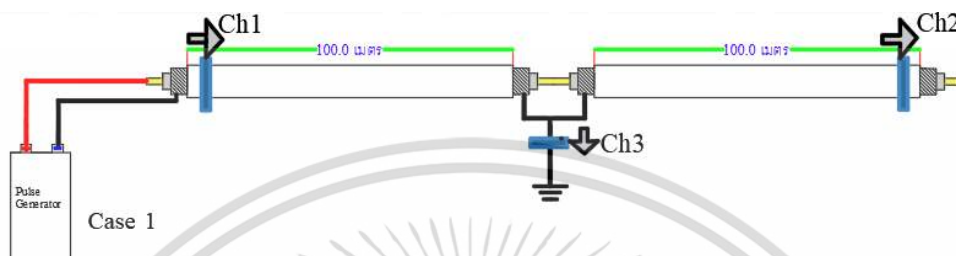
รูปที่ 4.55 ภาพขยายพัลส์สะท้อนของการทดสอบการต่อลงดินข้างเดียว โดยจ่ายพัลส์ปลายเคเบิล

จากรูปที่ 4.55 เมื่อทำการคำนวณระยะทางการสะท้อนตาม TDR แล้วนั้นจะแสดงให้เห็นถึงการสะท้อนที่ระยะทางประมาณ 413 เมตร (คลื่นสะท้อนจากปลายเปิดกลับมาที่ตำแหน่งเซนเซอร์ทำให้มีระยะที่ประมาณ 400 เมตร โดยระยะที่เกินมานั้นอาจมีความเกี่ยวข้องมาจากสายกราวด์ที่นำมาทดสอบที่มีระยะที่ยาว)

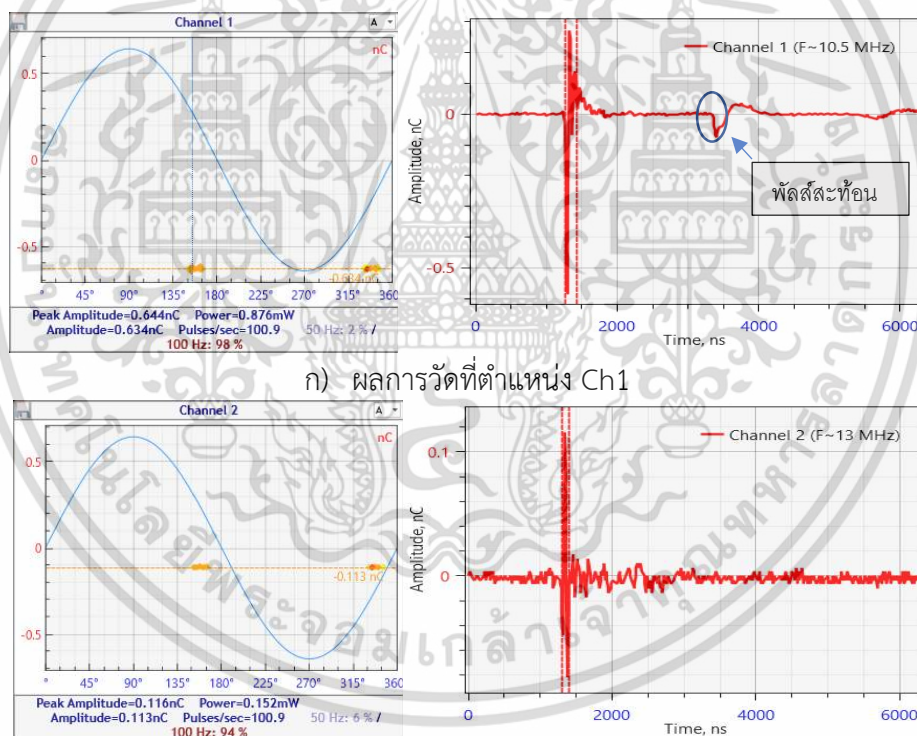
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.4 ผลทดสอบระบบเคเบิลใต้ดินที่ต่อลงดินตรงกลางที่วางเครื่องมือวัดแบบที่ 1 โดยจ่ายพัลส์ต้นเคเบิล

การทดสอบจะทำการต่อวงจรทดสอบตามรูปที่ 4.52 ซึ่งผลที่วัดได้จะแสดงอยู่ในรูปภาพที่ 4.53 และตารางที่ 4.14 โดยกำหนดเครื่องกำเนิดพัลส์ให้จ่ายพัลส์ขนาด 100 nC



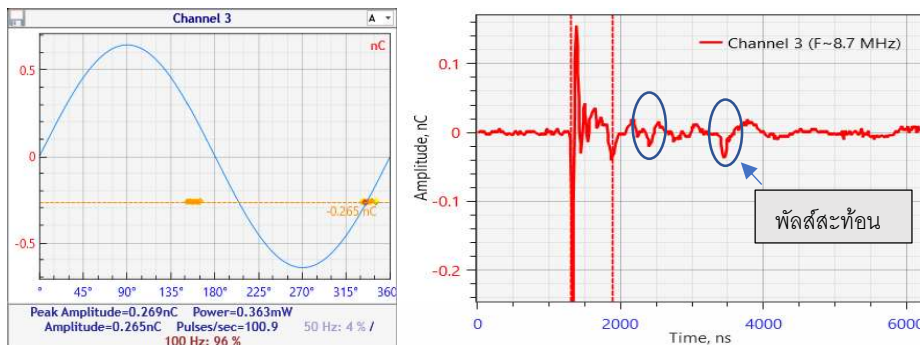
รูปที่ 4.56 วงจรทดสอบระบบเคเบิลใต้ดินที่ต่อลงดินตรงกลางที่วางเครื่องมือวัดแบบที่ 1 โดยจ่ายพัลส์ต้นเคเบิล



ก) ผลการวัดที่ตำแหน่ง Ch1

ข) ผลการวัดที่ตำแหน่ง Ch2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ค) ผลการวัดที่ตำแหน่ง Ch3

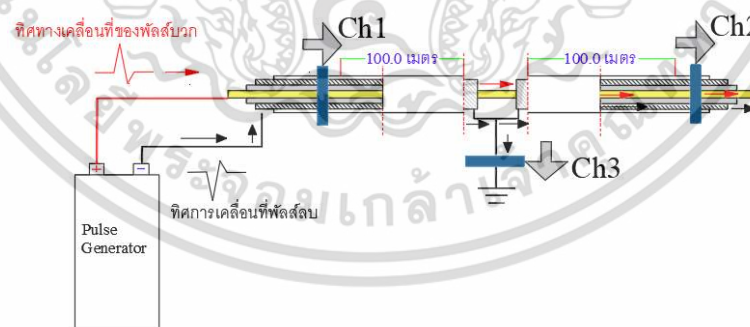
รูปที่ 4.57 ผลการทดสอบการต่อลงดินตรงกลาง แบบที่ 1 โดยจ่ายพัลส์ต้นเคเบิล

ตารางที่ 4.14 ผลการทดสอบการต่อลงดินตรงกลาง แบบที่ 1 โดยจ่ายพัลส์ต้นเคเบิล

เซนเซอร์	ขนาดพัลส์ (nC)	ขั้ว	ขนาดพัลส์สะท้อน (nC)	ขั้ว
Ch1	0.634	ลบ	0.077	ลบ
Ch2	0.113	ลบ	ไม่สามารถจับได้	
Ch3	0.265	ลบ	0.040	ลบ

จากผลการทดสอบสามารถสรุปผลทดสอบการต่อลงดินตรงกลาง แบบที่ 1 ของการจ่ายพัลส์ที่ต้นเคเบิล ดังนี้

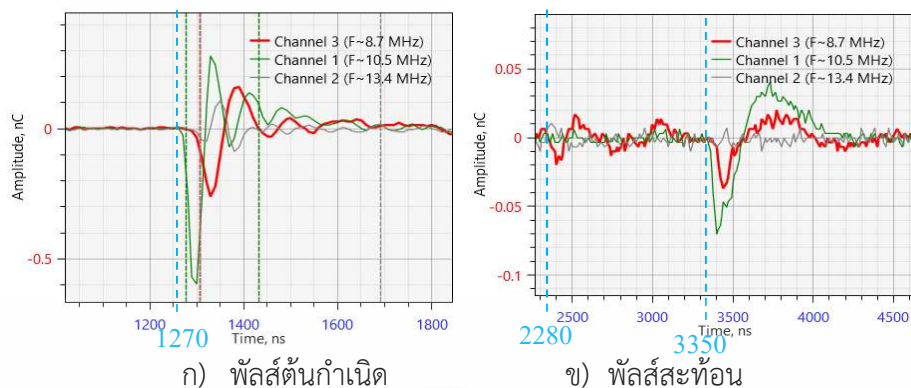
กรณีจ่ายพัลส์ PD ที่ต้นเคเบิลพบว่ากลุ่มพัลส์ที่เซนเซอร์ทุกตัวที่วัดได้จะเป็นพัลส์ลบทั้งหมด เนื่องจากทิศทางการแพร่กระจายของพัลส์และการติดตั้งเซนเซอร์ดังรูปที่ 4.56 (โดยอธิบายการแพร่กระจายของพัลส์ตามรูปที่ 4.58) สามารถอธิบายได้ว่า



รูปที่ 4.58 ทิศทางการแพร่กระจายของการจ่ายพัลส์ที่ต้นเคเบิลที่ต่อลงดินตรงกลาง แบบที่ 1

- HFCT Ch1 & Ch2: ผลรวมของพัลส์บวกและลบจะหักล้างกันบางส่วนจนเหลือเพียงพัลส์ลบและเคลื่อนที่ในทิศทางเดียวกันกับทิศทางเซนเซอร์ ทำให้ผลออกมาเป็นค่าลบ
- HFCT Ch3: มีเพียงพัลส์ลบและเซนเซอร์มีทิศเดียวกันกับการเคลื่อนที่ของพัลส์ลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

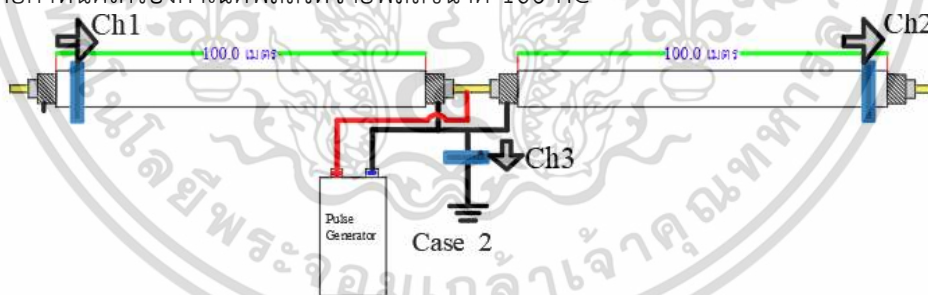


รูปที่ 4.59 ภาพขยายพัลส์สะท้อนของผลทดสอบการต่อลงดินตรงกลาง แบบที่ 1 (จ่ายพัลส์ต้นเคเบิล)

จากรูปที่ 4.59 เมื่อทำการคำนวณระยะทางการสะท้อนตาม TDR แล้วนั้นจะสามารถคำนวณได้ 2 ระยะสะท้อนของเซ็นเซอร์ Ch3 โดยการสะท้อนครั้งแรกจะใช้เวลา 2280 นาโนวินาที จากพัลส์กำเนิด 1270 นาโนวินาที จะได้ระยะทาง 197.68 เมตร และการสะท้อนครั้งที่ 2 จะได้ระยะทาง 213 เมตร ซึ่งเป็นการสะท้อนจากปลายเปิดทั้ง 2 ด้าน ไปยังตำแหน่งเซ็นเซอร์(ซึ่งอยู่ตรงกลาง) แต่ในส่วนของ Ch1 นั้นสะท้อนจากปลายเปิดอีกด้านหนึ่งที่ระยะเคเบิล 200 เมตร ทำให้ผลออกมามีระยะพัลส์ 400 เมตรตามภาพ

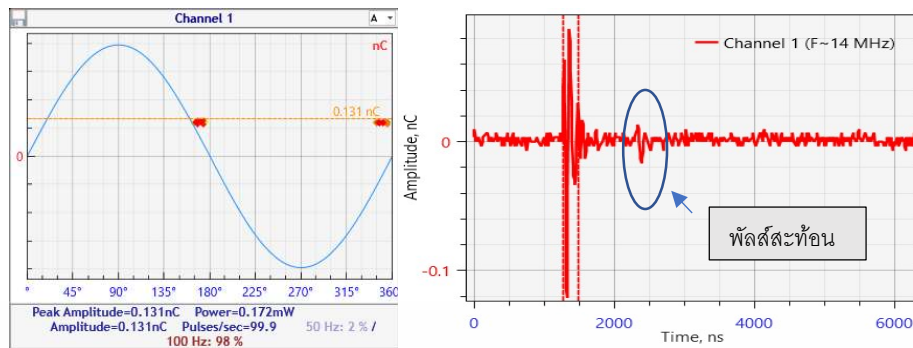
4.2.5 ผลทดสอบระบบเคเบิลใต้ดินที่ต่อลงดินตรงกลางที่วางเครื่องมือวัดแบบที่ 1 โดยจ่ายพัลส์กลางเคเบิล

การทดสอบจะทำการต่อวงจรทดสอบตามรูปที่ 4.60 ซึ่งผลที่วัดได้จะแสดงอยู่ในรูปภาพที่ 4.61 และตารางที่ 4.15 โดยกำหนดเครื่องกำเนิดพัลส์ให้จ่ายพัลส์ขนาด 100 nC

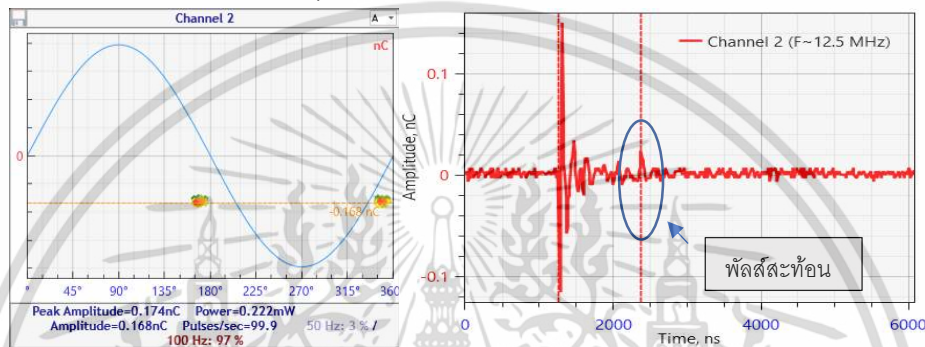


รูปที่ 4.60 วงจรทดสอบระบบเคเบิลใต้ดินที่ต่อลงดินตรงกลางที่วางเครื่องมือวัดแบบที่ 1 โดยจ่ายพัลส์กลางเคเบิล

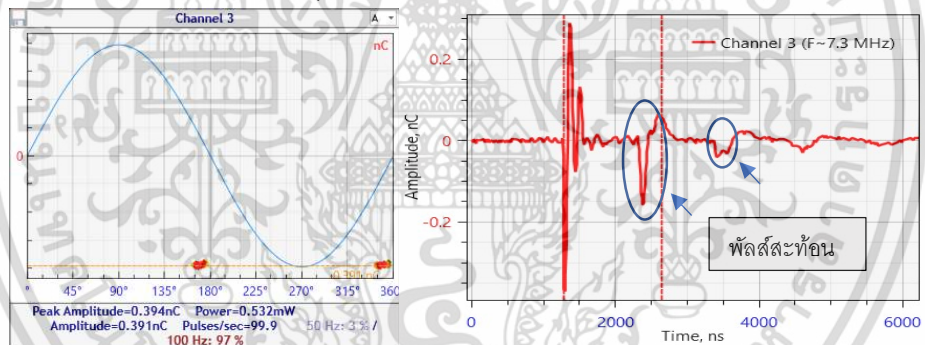
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก) ผลการวัดที่ตำแหน่ง Ch1



ข) ผลการวัดที่ตำแหน่ง Ch2



ค) ผลการวัดที่ตำแหน่ง Ch3

รูปที่ 4.61 ผลการทดสอบการต่อลงดินตรงกลาง แบบที่ 1 โดยจ่ายพัลส์กลางเคเบิล

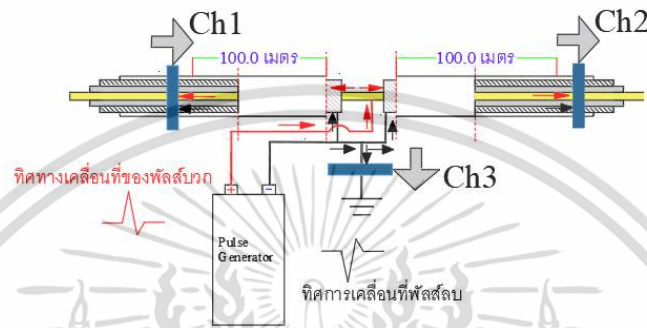
ตารางที่ 4.15 ผลการทดสอบการต่อลงดินตรงกลาง แบบที่ 1 โดยจ่ายพัลส์กลางเคเบิล

เซนเซอร์	ขนาดพัลส์ (nC)	ขั้ว	ขนาดพัลส์สะท้อน (nC)	ขั้ว
Ch1	0.0555	บวก	0.0135	บวก
Ch2	0.0625	ลบ	0.0136	ลบ
Ch3	0.206	ลบ	0.1590	ลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

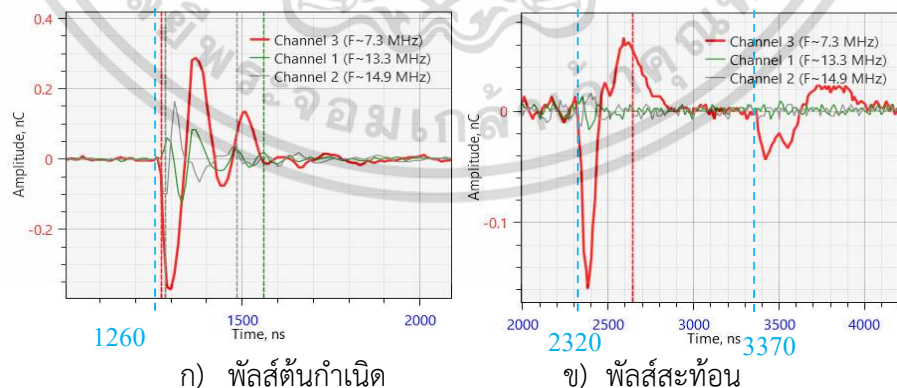
จากผลการทดสอบสามารถสรุปผลทดสอบการต่อลงดินตรงกลาง แบบที่ 1 ของการจ่ายพัลส์ที่กลางเคเบิล ดังนี้

กรณีจ่ายพัลส์ PD ที่กลางเคเบิลพบว่ากลุ่มพัลส์ที่เซนเซอร์ Ch 1 วัดได้เป็นพัลส์บวก แต่ Ch2 กับ Ch3 เป็นลบ ซึ่งมีเพียง Ch3 ที่มองเห็นพัลส์สะท้อนอย่างชัดเจน จากทิศทางการแพร่กระจายของพัลส์และการติดตั้งเซนเซอร์ดังรูปที่ 4.60 (โดยอธิบายการแพร่กระจายของพัลส์ตามรูปที่ 4.62) สามารถอธิบายได้ว่า



รูปที่ 4.62 ทิศทางการแพร่กระจายของการจ่ายพัลส์ที่กลางเคเบิลที่ต่อลงดินตรงกลาง แบบที่ 1

- HFCT Ch1 : ผลรวมของพัลส์บวกและลบจะหักล้างกันบางส่วนจนเหลือเพียงพัลส์ลบและเคลื่อนที่ในทิศทางตรงข้ามกับทิศทางเซนเซอร์ ทำให้ผลออกมาเป็นค่าบวก
 - HFCT Ch2: ผลรวมของพัลส์บวกและลบจะหักล้างกันบางส่วนจนเหลือเพียงพัลส์ลบและเคลื่อนที่ในทิศทางเดียวกันกับทิศทางเซนเซอร์ ทำให้ผลออกมาเป็นค่าลบ
 - HFCT Ch3: มีเพียงพัลส์ลบและเซนเซอร์มีทิศเดียวกันกับการเคลื่อนที่ของพัลส์
- สังเกตจากรูปที่ 4.59 ระยะห่างของ Ch1 และ Ch2 นั้นเมื่อวัดจากแหล่งจ่ายพัลส์แล้วมีระยะห่างที่ใกล้เคียงกัน จึงส่งผลให้ผลที่วัดได้นั้นมีค่าใกล้เคียงกันแต่มีขั้วที่ตรงข้ามกันเนื่องจากทิศทางของเซนเซอร์ที่ติดตั้ง



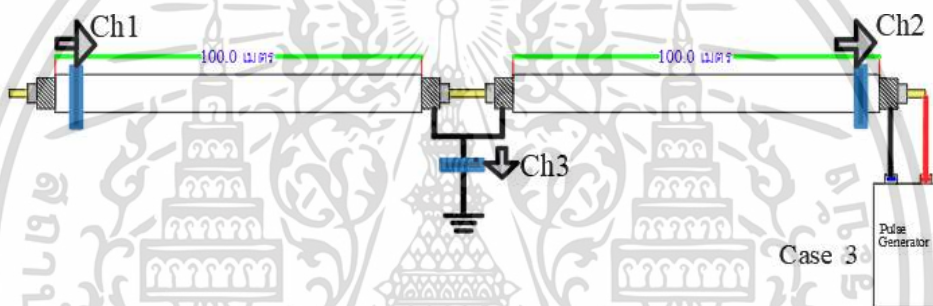
รูปที่ 4.63 ภาพขยายพัลส์สะท้อนของผลทดสอบการต่อลงดินตรงกลาง แบบที่ 1 (จ่ายพัลส์กลางเคเบิล)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

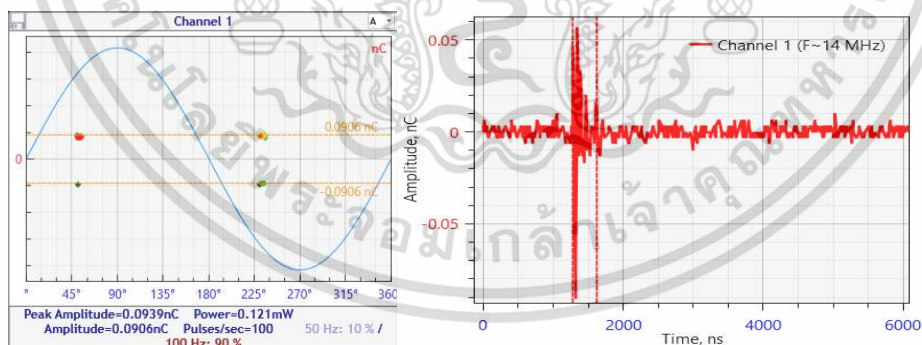
จากรูปที่ 4.63 เมื่อทำการคำนวณระยะทางการสะท้อนตาม TDR แล้วนั้นจะสามารถคำนวณได้ 2 ระยะสะท้อนของเซ็นเซอร์ Ch3 โดยการสะท้อนครั้งแรกจะใช้เวลา 2320 นาโนวินาที จากพัลส์กำเนิด 1260 นาโนวินาที จะได้ระยะทาง 209.5 เมตร และการสะท้อนครั้งที่ 2 จะได้ระยะทาง 207.5 เมตร ซึ่งเกิดจากการสะท้อนของพัลส์ที่ปลายเปิดของเคเบิลทั้ง 2 ด้าน (ต้นและปลาย) กลับมาที่ตำแหน่งเซ็นเซอร์ กลับกันเมื่อเซ็นเซอร์ Ch1 และ Ch2 เมื่อวัดค่าไปพัลส์แรกนั้น แล้วสะท้อนกลับมาหากันนั้น จะใช้ระยะทางที่ 200 เมตร เนื่องจากการเป็นการสะท้อนจากปลายเปิดด้านหนึ่งไปยังปลายเปิดอีกด้านหนึ่ง

4.2.6 ผลทดสอบระบบเคเบิลใต้ดินที่ต่อลงดินตรงกลางที่วางเครื่องมือวัดแบบที่ 1 โดยจ่ายพัลส์ปลายเคเบิล

การทดสอบจะทำการต่อวงจรทดสอบตามรูปที่ 4.64 ซึ่งผลที่วัดได้จะแสดงอยู่ในรูปภาพที่ 4.65 และตารางที่ 4.16 โดยกำหนดเครื่องกำเนิดพัลส์ให้จ่ายพัลส์ขนาด 100 nC

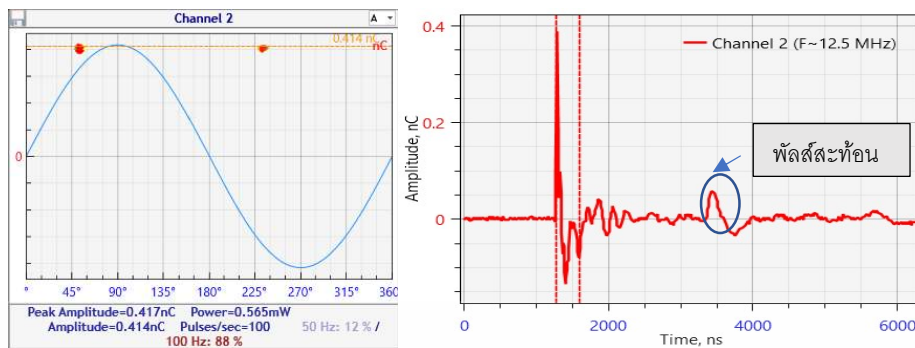


รูปที่ 4.64 วงจรทดสอบระบบเคเบิลใต้ดินที่ต่อลงดินตรงกลางที่วางเครื่องมือวัดแบบที่ 1 โดยจ่ายพัลส์ปลายเคเบิล

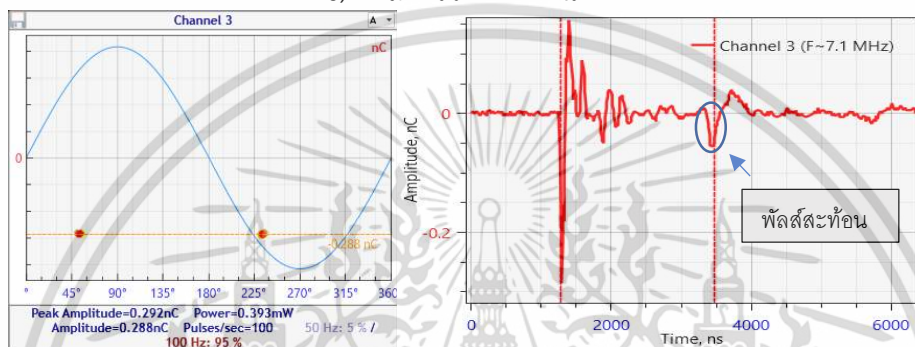


ก) ผลการวัดที่ตำแหน่ง Ch1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ข) ผลการวัดที่ตำแหน่ง Ch2



ค) ผลการวัดที่ตำแหน่ง Ch3

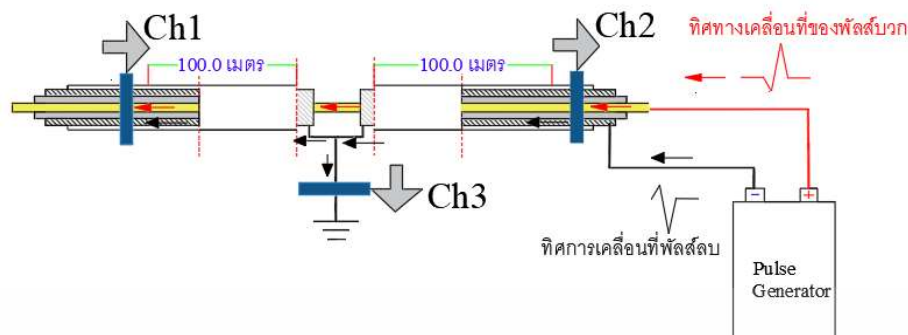
รูปที่ 4.65 ผลการทดสอบการต่อลงดินตรงกลาง แบบที่ 1 โดยจ่ายพัลส์ปลายเคเบิล

ตารางที่ 4.16 ผลการทดสอบการต่อลงดินตรงกลาง แบบที่ 1 โดยจ่ายพัลส์ปลายเคเบิล

เซนเซอร์	ขนาดพัลส์ (nC)	ขั้ว	ขนาดพัลส์สะท้อน (nC)	ขั้ว
Ch1	0.0906	บวก	ไม่สามารถจับได้	
Ch2	0.4140	บวก	0.0580	บวก
Ch3	0.2880	ลบ	0.0564	ลบ

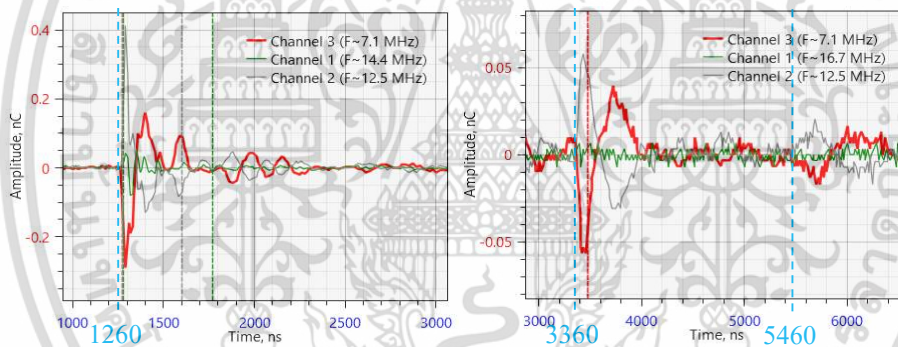
จากผลการทดสอบสามารถสรุปผลทดสอบการต่อลงดินตรงกลาง แบบที่ 1 ของการจ่ายพัลส์ที่ปลายเคเบิล ดังนี้

กรณีจ่ายพัลส์ PD ที่กลางเคเบิลพบว่ากลุ่มพัลส์ที่เซนเซอร์ Ch 1 วัดได้เป็นพัลส์บวก แต่ Ch2 กับ Ch 3 เป็นลบ ซึ่งมีเพียง Ch 3 ที่มองเห็นพัลส์สะท้อนอย่างชัดเจน จากทิศทางการแพร่กระจายของพัลส์และการติดตั้งเซนเซอร์ดังรูปที่ 4.64 (โดยอธิบายการแพร่กระจายของพัลส์ตามรูปที่ 4.66) สามารถอธิบายได้ว่า



รูปที่ 4.66 ทิศทางการแพร่กระจายของการจ่ายพัลส์ที่ปลายเคเบิลที่ต่อลงดินตรงกลาง แบบที่ 1

- HFCT Ch1 & Ch 2 : ผลรวมของพัลส์บวกและลบจะหักล้างกันบางส่วนจนเหลือเพียงพัลส์ลบ(ที่มีขนาดมากกว่า) และเคลื่อนที่ในทิศทางตรงข้ามกับทิศทางเซนเซอร์ ทำให้ผลออกมาเป็นค่าบวกทั้งคู่
 - HFCT Ch3 : มีเพียงพัลส์ลบและเซนเซอร์มีทิศเดียวกันกับการเคลื่อนที่ของพัลส์
- สังเกตจากรูปที่ 4.61 ระยะห่างของ Ch1 นั้นห่างจาก Ch2 เป็นระยะประมาณ 200 เมตร และ Ch2 ที่ติดตั้งอยู่หน้าแหล่งจ่าย จึงส่งผลให้ผลที่วัดได้ค่าของ Ch2 มีขนาดที่สูงมากเมื่อเทียบกับ Ch1



ก) พัลส์ต้นกำเนิด

ข) พัลส์สะท้อน

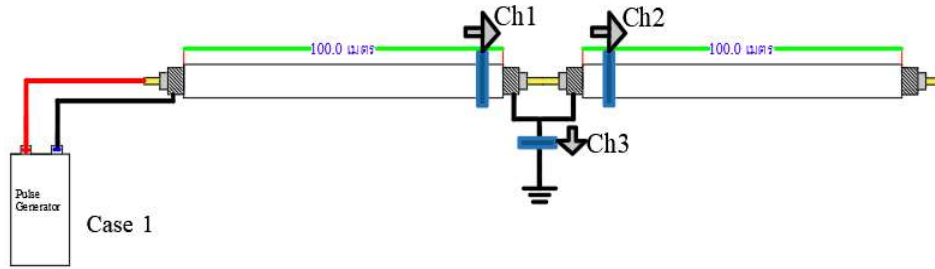
รูปที่ 4.67 ภาพขยายพัลส์สะท้อนของผลทดสอบการต่อลงดินตรงกลาง แบบที่ 1 (จ่ายปลายเคเบิล)

จากรูปที่ 4.62 เมื่อทำการคำนวณระยะทางการสะท้อนตาม TDR แล้วนั้นจะแสดงให้เห็นถึงการสะท้อนที่ระยะทางประมาณ 405 เมตร ทั้งของเซนเซอร์ตัวที่ 1 และ ตัวที่ 3 ซึ่งในส่วนของ Ch1 นั้น เกิดจากการสะท้อนจากปลายเปิดของอีกด้านเคเบิล

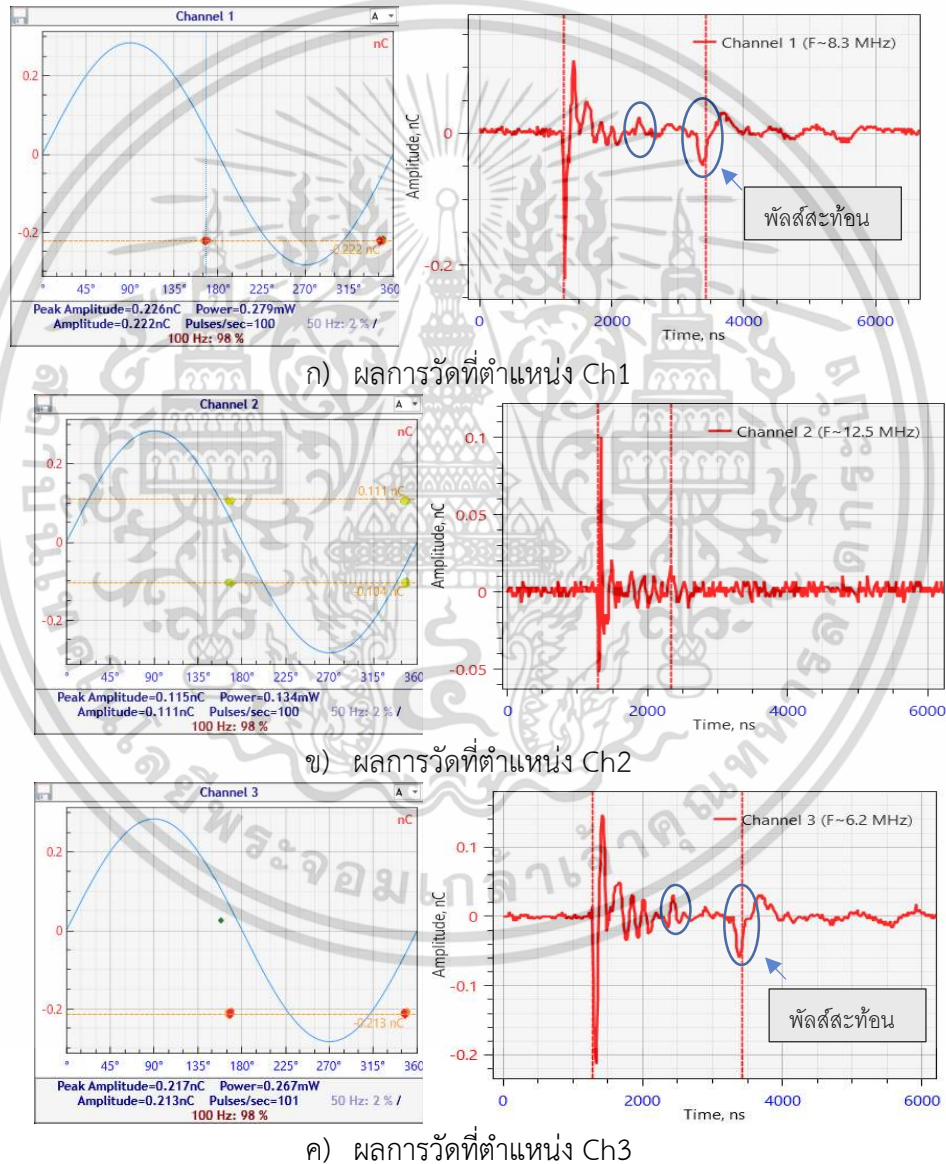
4.2.7 ผลทดสอบระบบเคเบิลใต้ดินที่ต่อลงดินตรงกลางที่วางเครื่องมือวัดแบบที่ 2 โดยจ่ายพัลส์ต้นเคเบิล

การทดสอบจะทำการต่อวงจรทดสอบตามรูปที่ 4.68 ซึ่งผลที่วัดได้จะแสดงอยู่ในรูปภาพที่ 4.69 และตารางที่ 4.17 โดยกำหนดเครื่องกำเนิดพัลส์ให้จ่ายพัลส์ขนาด 100 nC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.68 วงจรทดสอบระบบเคเบิลใต้ดินที่ต่อลงดินตรงกลางที่วางเครื่องมือวัดแบบที่ 2 โดยจ่ายพัลส์ต้นเคเบิล (ระยะห่างของ Ch1 และ Ch2 ประมาณ 2 เมตร)



รูปที่ 4.69 ผลการทดสอบการต่อลงดินตรงกลาง แบบที่ 2 โดยจ่ายพัลส์ต้นเคเบิล

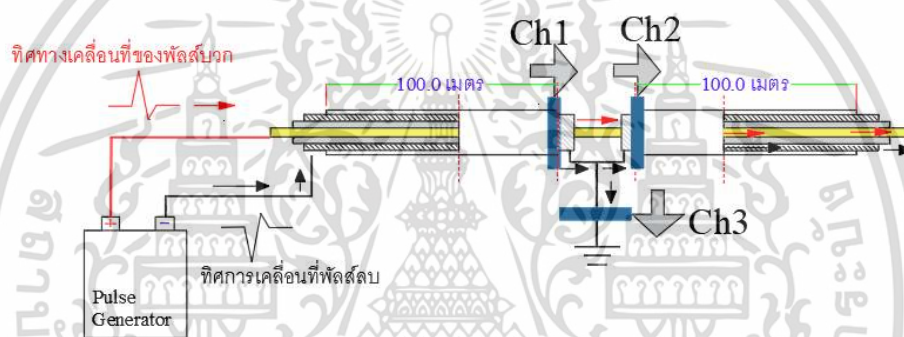
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.17 ผลการทดสอบการต่อลงดินตรงกลาง แบบที่ 2 โดยจ่ายพัลส์ต้นเคเบิล

เซนเซอร์	ขนาดพัลส์ (nC)	ขั้ว	ขนาดพัลส์สะท้อน (nC)	ขั้ว
Ch1	0.222	ลบ	0.021	บวก
Ch2	0.111	บวก	ไม่สามารถจับได้	
Ch3	0.213	ลบ	0.014	ลบ

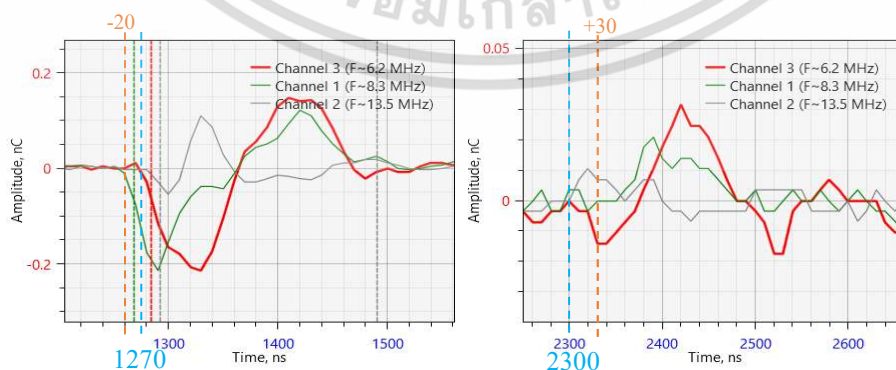
จากผลการทดสอบสามารถสรุปผลทดสอบการต่อลงดินตรงกลาง แบบที่ 2 ของการจ่ายพัลส์ที่ต้นเคเบิล ดังนี้

กรณีจ่ายพัลส์ PD ที่กลางเคเบิลพบว่ากลุ่มพัลส์ที่เซนเซอร์ทั้งหมดวัดได้เป็นพัลส์ลบ แต่มีเพียง Ch1 และ Ch3 ที่มองเห็นพัลส์สะท้อนอย่างชัดเจน จากทิศทางการแพร่กระจายของพัลส์และการติดตั้งเซนเซอร์ดังรูปที่ 4.68 (โดยอธิบายการแพร่กระจายของพัลส์ตามรูปที่ 4.70) สามารถอธิบายได้ว่า



รูปที่ 4.70 ทิศทางการแพร่กระจายของการจ่ายพัลส์ที่ต้นเคเบิลที่ต่อลงดินตรงกลาง แบบที่ 2

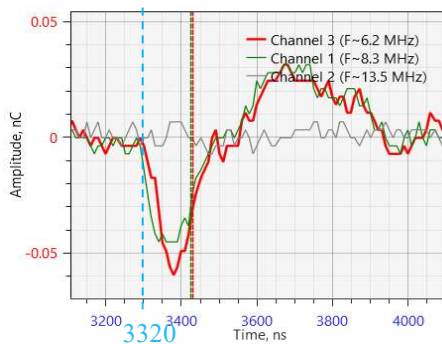
- HFCT Ch1 : ผลรวมของพัลส์บวกและลบจะหักล้างกันบางส่วนจนเหลือเพียงพัลส์ลบ (ที่มีขนาดมากกว่า) และเคลื่อนที่ในทิศทางเดียวกันกับทิศทางเซนเซอร์ ทำให้ผลออกมาเป็นค่าลบ
- HFCT Ch2 : ผลออกมาเป็นบวกเนื่องจากพัลส์ลบบางส่วนได้ไหลลงกราวด์ทำให้พัลส์ที่เหลืออยู่ในเคเบิล เมื่อหักล้างกันจะได้ผลออกมาเป็นบวก
- HFCT Ch3 : มีเพียงพัลส์ลบและเซนเซอร์มีทิศเดียวกันกับการเคลื่อนที่ของพัลส์



ก) พัลส์ต้นกำเนิด

ข) พัลส์สะท้อน พัลส์แรก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



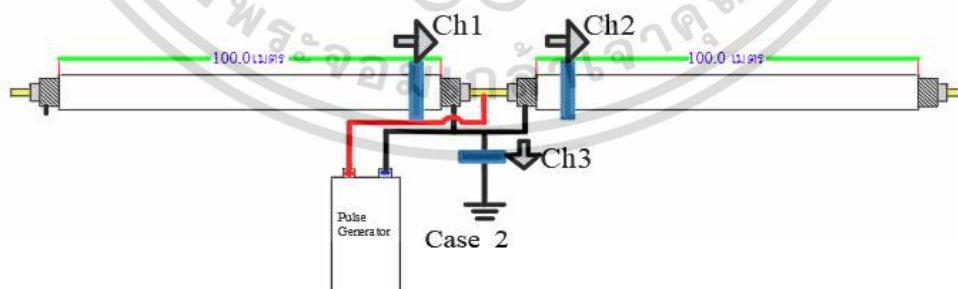
ค) พัลส์สะท้อน พัลส์สอง

รูปที่ 4.71 ภาพขยายพัลส์สะท้อนของผลทดสอบการต่อลงดินตรงกลาง แบบที่ 2 (จ่ายพัลส์ต้นเคเบิล)

จากรูปที่ 4.71 เมื่อทำการคำนวณระยะทางการสะท้อนตาม TDR แล้วนั้นจะสามารถคำนวณระยะสะท้อนของเซ็นเซอร์ Ch1 และ Ch3 โดยสามารถวัดพัลส์แรกได้ที่เวลา 1270 นาโนวินาที (Ch3) พัลส์สะท้อนแรกที่เวลา 2300 นาโนวินาที ซึ่งเป็นระยะทางประมาณ 203.6 เมตร (ระยะเคเบิลประมาณ 101.8 เมตร) และพัลส์สะท้อนพัลส์สองที่เวลา 3320 นาโนวินาที คิดเป็นระยะการสะท้อนที่ 201.6 เมตร (ระยะเคเบิลประมาณ 100.8 เมตร) ซึ่งการสะท้อนทั้ง 2 ครั้งนั้นเป็นการสะท้อนจากปลายเปิดทั้ง 2 ด้าน โดยการสะท้อนพัลส์แรกจะสังเกตได้ว่า Ch3 นำหน้า Ch1 ซึ่งเกิดจากการสะท้อนที่ปลายเคเบิล ที่กลับมาเจอตำแหน่งของ Ch3 ก่อนกลับกันที่พัลส์สะท้อน 2 จะได้ Ch1 นำหน้า Ch3 เหมือนตอนพัลส์ต้นกำเนิด ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการสะท้อนจากต้นเคเบิล

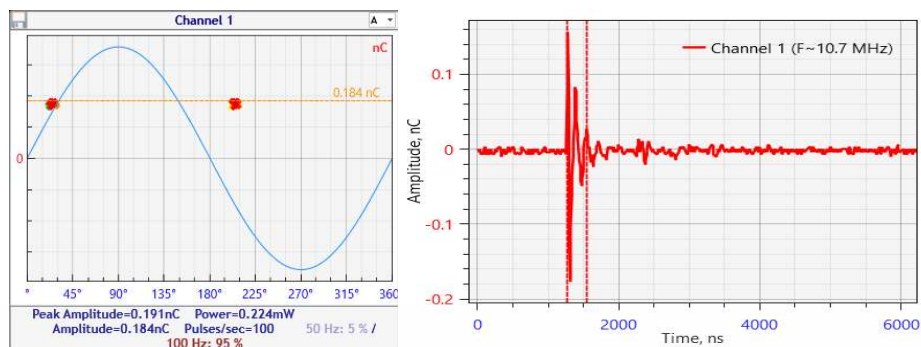
4.2.8 ผลทดสอบระบบเคเบิลใต้ดินที่ต่อลงดินตรงกลางที่วางเครื่องมือวัดแบบที่ 2 โดยจ่ายพัลส์กลางเคเบิล

การทดสอบจะทำการต่อวงจรทดสอบตามรูปที่ 4.72 ซึ่งผลที่วัดได้จะแสดงอยู่ในรูปภาพที่ 4.73 และตารางที่ 4.18 โดยกำหนดเครื่องกำเนิดพัลส์ให้จ่ายพัลส์ขนาด 100 nC

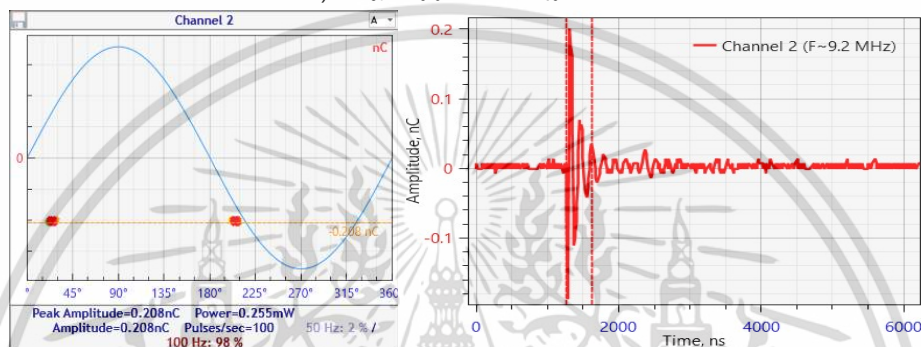


รูปที่ 4.72 วงจรทดสอบระบบเคเบิลใต้ดินที่ต่อลงดินตรงกลางที่วางเครื่องมือวัดแบบที่ 2 โดยจ่ายพัลส์กลางเคเบิล

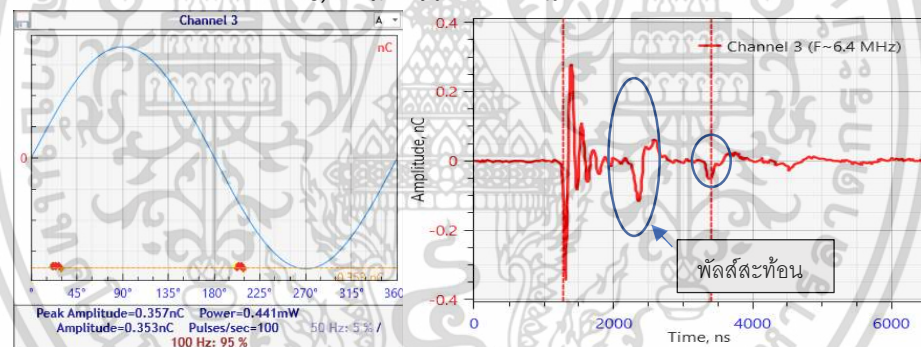
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก) ผลการวัดที่ตำแหน่ง Ch1



ข) ผลการวัดที่ตำแหน่ง Ch2



ค) ผลการวัดที่ตำแหน่ง Ch3

รูปที่ 4.73 ผลการทดสอบการต่อลงดินตรงกลาง แบบที่ 2 โดยจ่ายพัลส์กลางเคเบิล

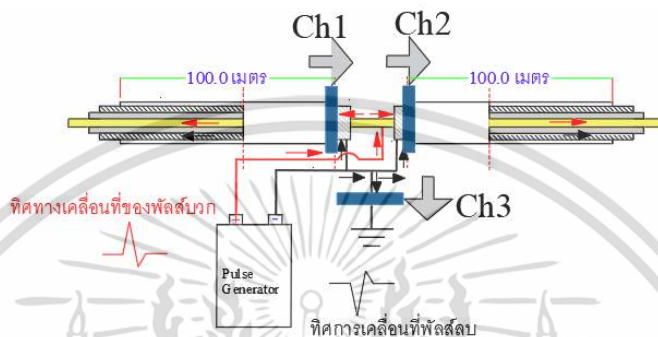
ตารางที่ 4.18 ผลการทดสอบการต่อลงดินตรงกลาง แบบที่ 2 โดยจ่ายพัลส์กลางเคเบิล

เซนเซอร์	ขนาดพัลส์ (nC)	ขั้ว	ขนาดพัลส์สะท้อน (nC)	ขั้ว
Ch1	0.184	บวก	ไม่สามารถจับได้	
Ch2	0.208	ลบ	ไม่สามารถจับได้	
Ch3	0.353	ลบ	0.1189	ลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

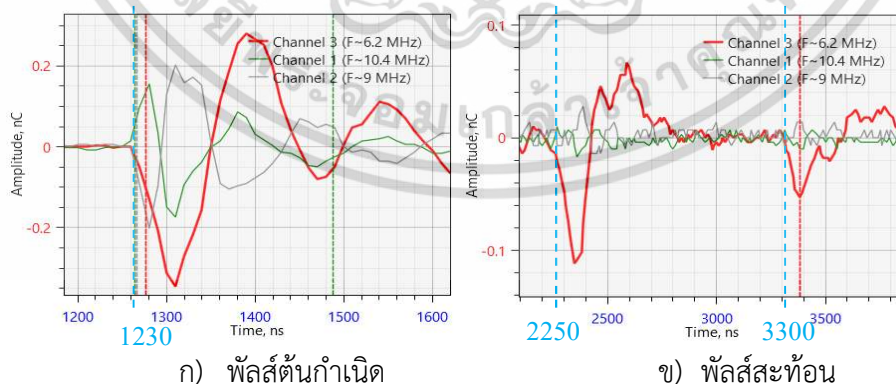
จากผลการทดสอบสามารถสรุปผลทดสอบการต่อลงดินตรงกลาง แบบที่ 2 ของการจ่ายพัลส์ที่กลางเคเบิล ดังนี้

กรณีจ่ายพัลส์ PD ที่กลางเคเบิลพบว่ากลุ่มพัลส์ที่เซนเซอร์ Ch 1 วัดได้เป็นพัลส์บวก แต่ Ch2 กับ Ch3 เป็นลบ ซึ่งมีเพียง Ch 3 ที่มองเห็นพัลส์สะท้อนอย่างชัดเจน จากทิศทางการแพร่กระจายของพัลส์และการติดตั้งเซนเซอร์ดังรูปที่ 4.55 (โดยอธิบายการแพร่กระจายของพัลส์ตามรูปที่ 4.57) สามารถอธิบายได้ว่า



รูปที่ 4.74 ทิศทางการแพร่กระจายของการจ่ายพัลส์ที่ต้นเคเบิลที่ต่อลงดินตรงกลาง แบบที่ 2

- HFCT Ch1 : ผลรวมของพัลส์บวกและลบจะหักล้างกันบางส่วนจนเหลือเพียงพัลส์ลบและเคลื่อนที่ในทิศทางตรงข้ามกับทิศทางเซนเซอร์ ทำให้ผลออกมาเป็นค่าบวก
 - HFCT Ch2: ผลรวมของพัลส์บวกและลบจะหักล้างกันบางส่วนจนเหลือเพียงพัลส์ลบและเคลื่อนที่ในทิศทางเดียวกันกับทิศทางเซนเซอร์ ทำให้ผลออกมาเป็นค่าลบ
 - HFCT Ch3: มีเพียงพัลส์ลบและเซนเซอร์มีทิศเดียวกันกับการเคลื่อนที่ของพัลส์
- สังเกตจากรูปที่ 4.73 ระยะห่างของ Ch1 และ Ch2 นั้นเมื่อวัดจากแหล่งจ่ายพัลส์แล้วมีระยะห่างที่ใกล้เคียงกัน จึงส่งผลให้ผลที่วัดได้นั้นมีค่าใกล้เคียงกันแต่มีขั้วที่ตรงข้ามกันเนื่องจากทิศทางของเซนเซอร์ที่ติดตั้ง



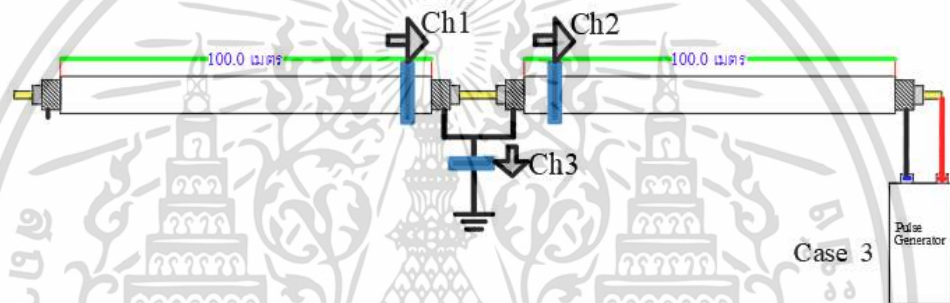
รูปที่ 4.75 ภาพขยายพัลส์สะท้อนของผลทดสอบการต่อลงดินตรงกลาง แบบที่ 2 (จ่ายพัลส์กลางเคเบิล)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

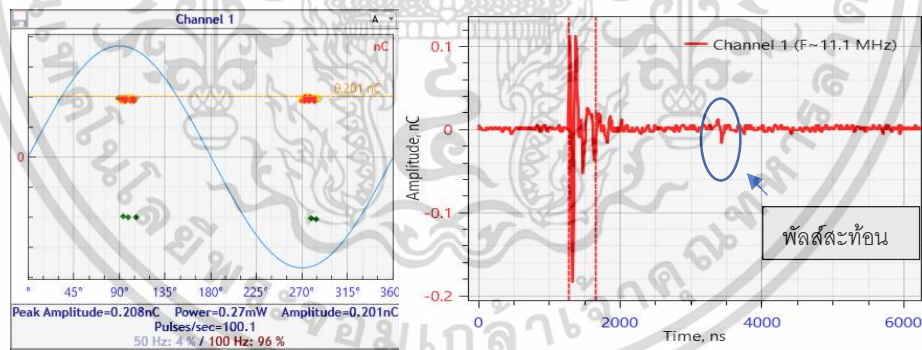
จากรูปที่ 4.75 เมื่อทำการคำนวณระยะทางการสะท้อนตาม TDR แล้วนั้นจะสามารถคำนวณได้ 2 ระยะสะท้อนของเซ็นเซอร์ Ch3 โดยการสะท้อนครั้งแรกจะใช้เวลา 2250 นาโนวินาที จากพัลส์กำเนิด 1230 นาโนวินาที จะได้ระยะทางที่พัลส์แพร่กระจาย 201.6 เมตร และการสะท้อนครั้งที่ 2 จะได้ระยะทาง 207.5 เมตร (ที่เวลา 3300 นาโนวินาที) ซึ่งการสะท้อนทั้งสองครั้งเกิดจากการสะท้อนจากปลายเปิดทั้ง 2 ด้าน ทำให้มีระยะสะท้อนที่ประมาณ 200 เมตร

4.2.9 ผลทดสอบระบบเคเบิลใต้ดินที่ต่อลงดินตรงกลางที่วางเครื่องมือวัดแบบที่ 2 โดยจ่ายพัลส์ปลายเคเบิล

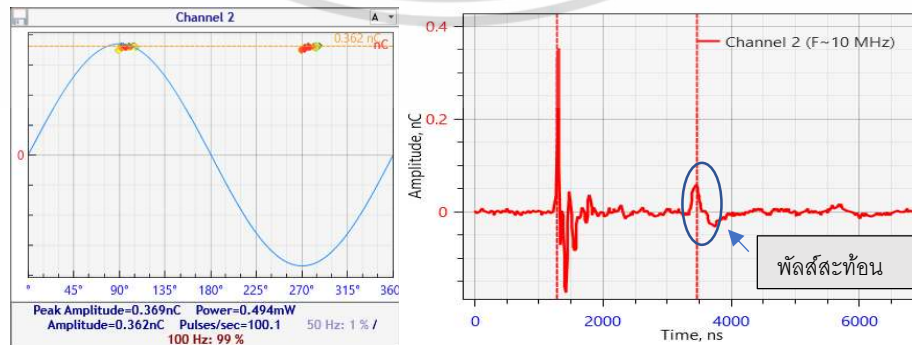
การทดสอบจะทำการต่อวงจรทดสอบตามรูปที่ 4.76 ซึ่งผลที่วัดได้จะแสดงอยู่ในรูปภาพที่ 4.77 และตารางที่ 4.19 โดยกำหนดเครื่องกำเนิดพัลส์ให้จ่ายพัลส์ขนาด 100 nC



รูปที่ 4.76 วงจรทดสอบระบบเคเบิลใต้ดินที่ต่อลงดินตรงกลางที่วางเครื่องมือวัดแบบที่ 2 โดยจ่ายพัลส์ปลายเคเบิล

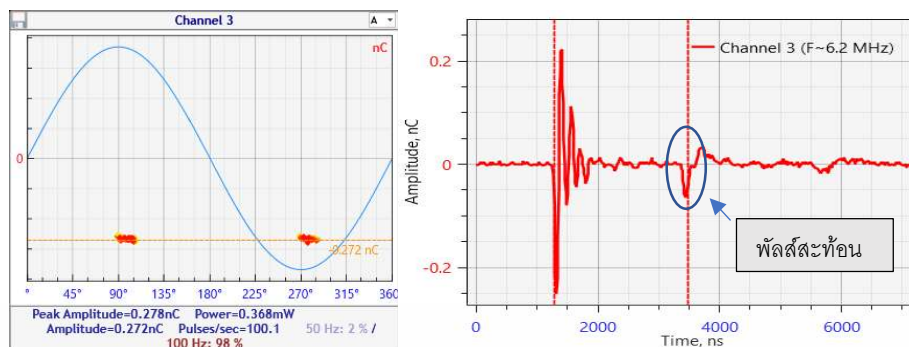


ก) ผลการวัดที่ตำแหน่ง Ch1



ข) ผลการวัดที่ตำแหน่ง Ch2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ค) ผลการวัดที่ตำแหน่ง Ch3

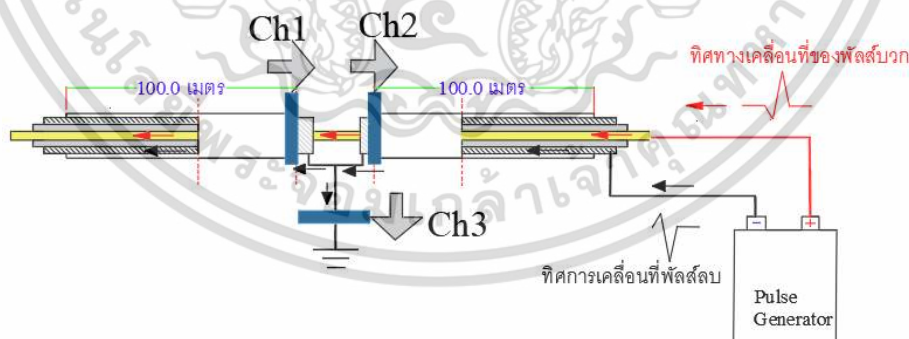
รูปที่ 4.77 ผลการทดสอบการต่อลงดินตรงกลาง แบบที่ 2 โดยจ่ายพัลส์ปลายเคเบิล

ตารางที่ 4.19 ผลการทดสอบการต่อลงดินตรงกลาง แบบที่ 2 โดยจ่ายพัลส์ปลายเคเบิล

เซนเซอร์	ขนาดพัลส์ (nC)	ขั้ว	ขนาดพัลส์สะท้อน (nC)	ขั้ว
Ch1	0.201	บวก	0.01	บวก
Ch2	0.362	บวก	0.0615	บวก
Ch3	0.272	ลบ	0.0630	ลบ

จากผลการทดสอบสามารถสรุปผลทดสอบการต่อลงดินตรงกลาง แบบที่ 1 ของการจ่ายพัลส์ที่ปลายเคเบิล ดังนี้

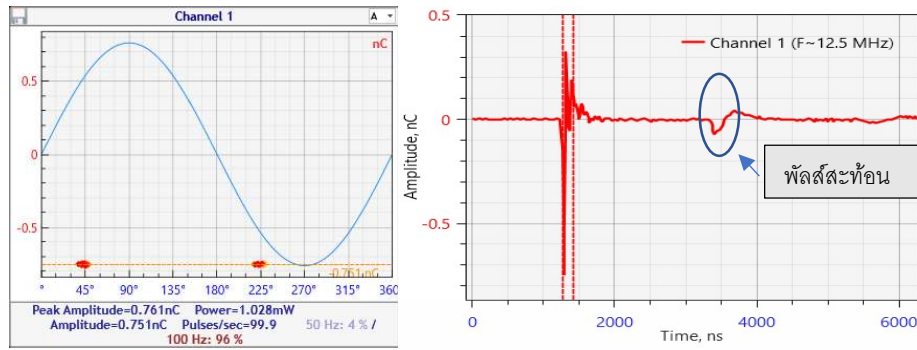
กรณีจ่ายพัลส์ PD ที่ปลายเคเบิลพบว่ากลุ่มพัลส์ที่เซนเซอร์ Ch 1 และ Ch2 วัดได้เป็นพัลส์บวก แต่ Ch 3 เป็นลบ จากทิศทางการแพร่กระจายของพัลส์และการติดตั้งเซนเซอร์ดังรูปที่ 4.76 (โดยอธิบายการแพร่กระจายของพัลส์ตามรูปที่ 4.78) สามารถอธิบายได้ว่า



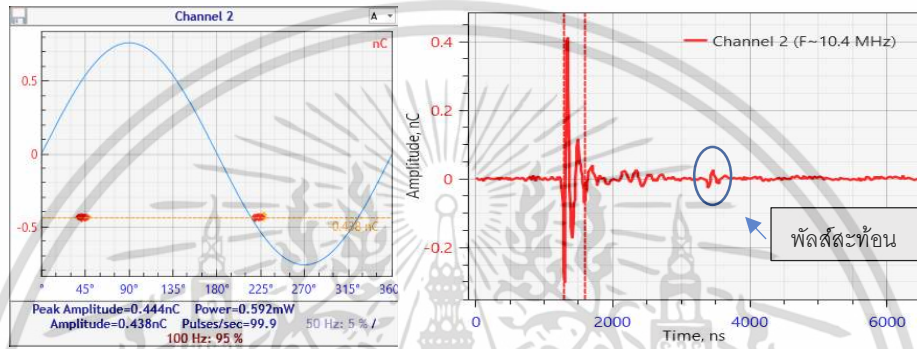
รูปที่ 4.78 ทิศทางการแพร่กระจายของการจ่ายพัลส์ที่ปลายเคเบิลที่ต่อลงดินตรงกลาง แบบที่ 1

- HFCT Ch1 & Ch 2 : ผลรวมของพัลส์บวกและลบจะหักล้างกันบางส่วนจนเหลือเพียงพัลส์ลบ(ที่มีขนาดมากกว่า) แต่เคลื่อนที่ในทิศทางตรงข้ามกับทิศทางเซนเซอร์ ทำให้ผลออกมาเป็นค่าบวกทั้งคู่
- HFCT Ch3 : มีเพียงพัลส์ลบและเซนเซอร์มีทิศเดียวกันกับการเคลื่อนที่ของพัลส์

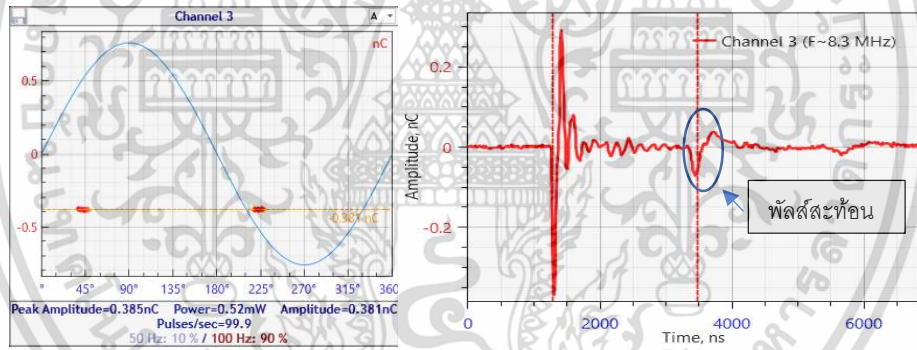
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก) ผลการวัดที่ตำแหน่ง Ch1



ข) ผลการวัดที่ตำแหน่ง Ch2



ค) ผลการวัดที่ตำแหน่ง Ch3

รูปที่ 4.81 ผลการทดสอบการต่อลงดินที่ปลายทั้งสองด้าน โดยจ่ายพัลส์ต้นเคเบิล

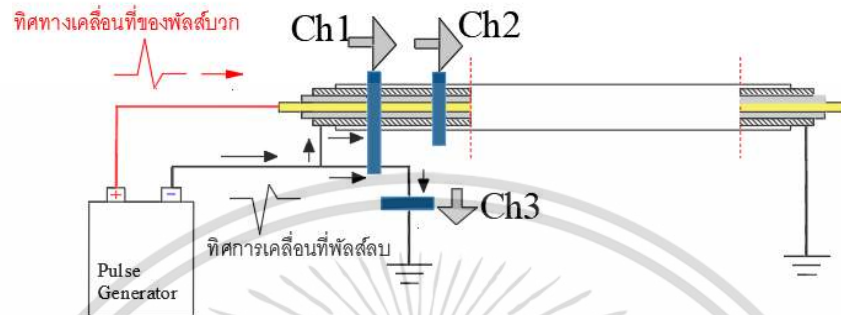
ตารางที่ 4.20 ผลการทดสอบการต่อลงดินที่ปลายทั้งสองด้าน โดยจ่ายพัลส์ต้นเคเบิล

เซนเซอร์	ขนาดพัลส์ (nC)	ขั้ว	ขนาดพัลส์สะท้อน (nC)	ขั้ว
Ch1	0.751	ลบ	0.0805	ลบ
Ch2	0.438	ลบ	0.0239	ลบ
Ch3	0.381	ลบ	0.0762	ลบ

จากผลการทดสอบสามารถสรุปผลทดสอบการต่อลงดิน 2 ด้านของการจ่ายพัลส์ที่ต้นเคเบิล ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

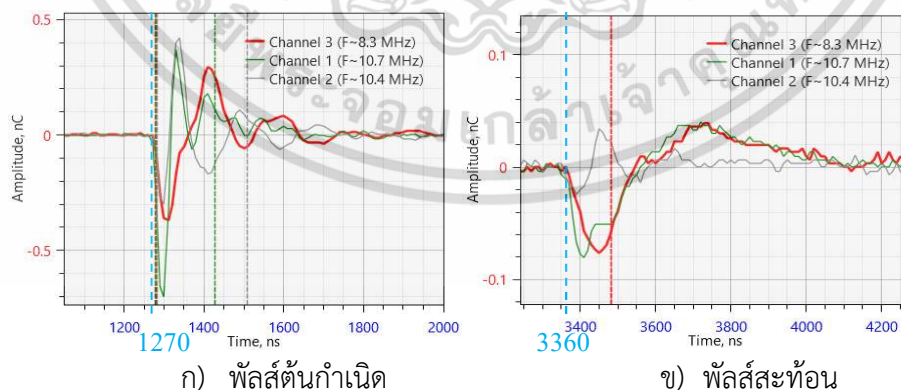
กรณีจ่ายพัลส์ PD ที่ต้นเคเบิลพบว่ากลุ่มพัลส์ที่เซนเซอร์ทั้งหมดวัดได้เป็นพัลส์ขั้วลบ จากทิศทางการแพร่กระจายของพัลส์และการติดตั้งเซนเซอร์ดังรูปที่ 4.80 (โดยอธิบายการแพร่กระจายของพัลส์ตามรูปที่ 4.82) สามารถอธิบายได้ว่า



รูปที่ 4.82 ทิศทางการแพร่กระจายของการจ่ายพัลส์ที่ต้นเคเบิลของระบบที่ต่อลงดิน 2 ด้าน

- HFCT Ch1: ผลรวมของพัลส์ลบจะมีค่ามากกว่าพัลส์บวกทำให้เหลือในส่วนของพัลส์ลบและเซนเซอร์มีทิศเดียวกับการเคลื่อนที่ของพัลส์ ทำให้แสดงผลไปในทิศเดียวกัน
- HFCT Ch2: ผลรวมของพัลส์บวกและพัลส์ลบ ไม่ได้ถูกหักล้างจนเป็น 0 แต่จะเหลือในส่วนของพัลส์ลบเนื่องจากการลดทอนของขนาดพัลส์ในตัวนำมีค่ามากกว่าในสายซิลด์ และเซนเซอร์มีทิศเดียวกับการเคลื่อนที่ของพัลส์ ทำให้แสดงผลไปในทิศเดียวกัน
- HFCT Ch3: มีเพียงพัลส์ลบและเซนเซอร์มีทิศเดียวกันกับการเคลื่อนที่ของพัลส์ลบ

จากรูปที่ 4.82 จากการติดตั้งเซนเซอร์และการแพร่กระจายของพัลส์จะสามารถสรุปได้ว่าค่าของเซนเซอร์ Ch1, Ch2 และ Ch3 จะมีค่า $Ch1 > Ch2 > Ch3$ เนื่องจากการเคลื่อนที่ของพัลส์บางส่วนของพัลส์ลบที่ไหลลงสายดิน ทั้งยังมีการลดทอนที่มากในตัวนำของเคเบิลและความเพี้ยนของระยะการวางตำแหน่งเซนเซอร์จากระยะเคเบิล



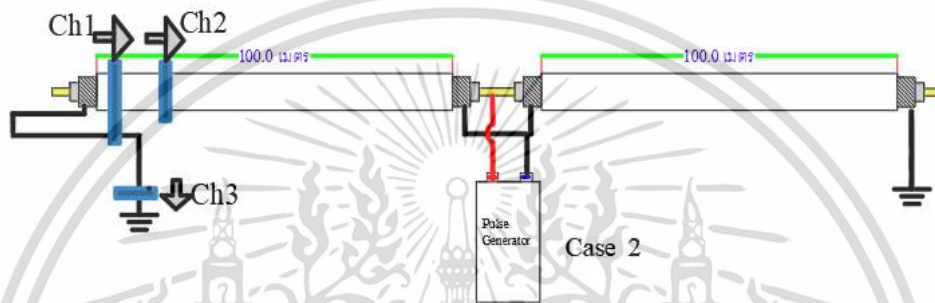
รูปที่ 4.83 ภาพขยายพัลส์สะท้อนของผลทดสอบการต่อลงดินทั้ง 2 ด้าน (จ่ายพัลส์ต้นเคเบิล)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

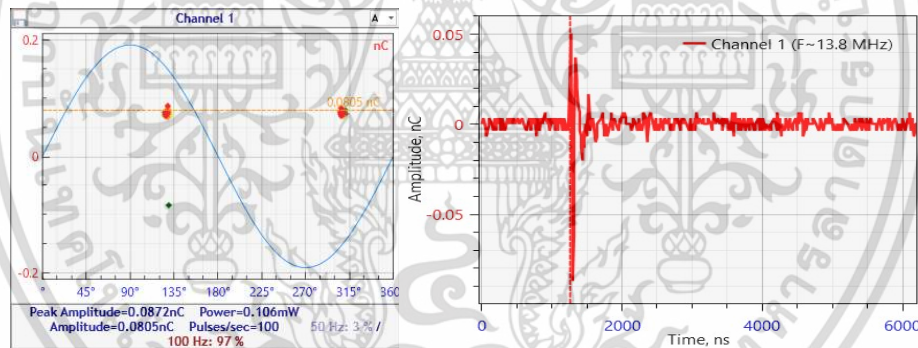
จากรูปที่ 4.83 เมื่อทำการคำนวณระยะทางการสะท้อนตาม TDR แล้วนั้นจะสามารถคำนวณระยะสะท้อนของพัลส์ที่วัดได้จากเซ็นเซอร์ จะได้ระยะทางเคลื่อนที่ 413.15 เมตร ซึ่งหมายความว่าเกิดการสะท้อนที่ปลายเคเบิลที่ทำการต่อสายดินไว้

4.2.11 ผลทดสอบระบบเคเบิลใต้ดินที่ต่อลงดินที่ปลายทั้งสองด้าน โดยจ่ายพัลส์กลางเคเบิล

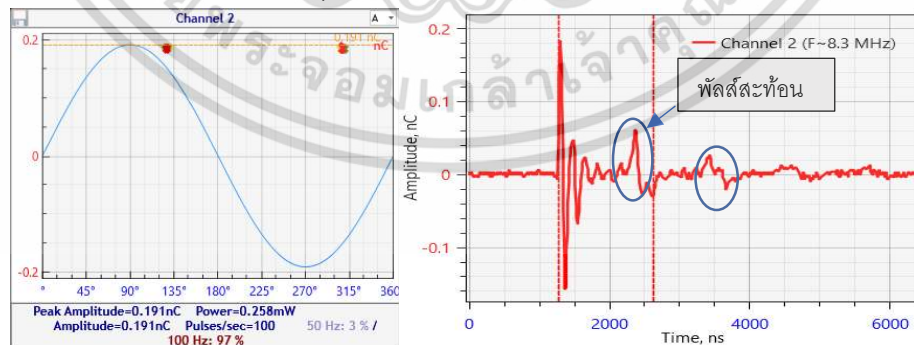
การทดสอบจะทำการต่อวงจรทดสอบตามรูปที่ 4.84 ซึ่งผลที่วัดได้จะแสดงอยู่ในรูปภาพที่ 4.85 และตารางที่ 4.21 โดยกำหนดเครื่องกำเนิดพัลส์ให้จ่ายพัลส์ขนาด 100 nC



รูปที่ 4.84 วงจรทดสอบระบบเคเบิลใต้ดินที่ต่อลงดินที่ปลายทั้งสองด้าน โดยจ่ายพัลส์กลางเคเบิล

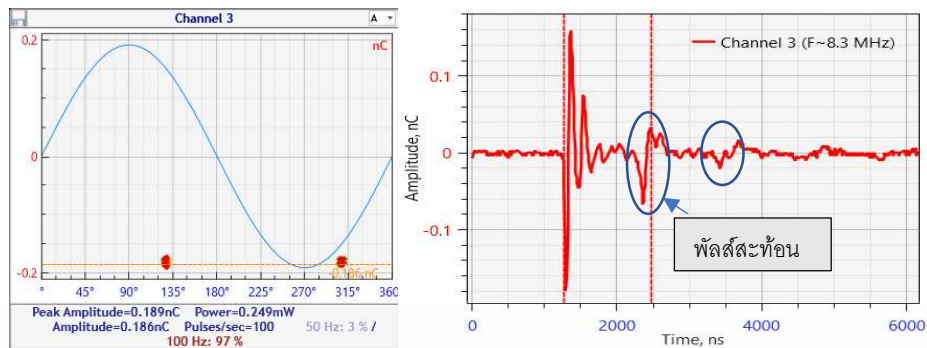


ก) ผลการวัดที่ตำแหน่ง Ch1



ข) ผลการวัดที่ตำแหน่ง Ch2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



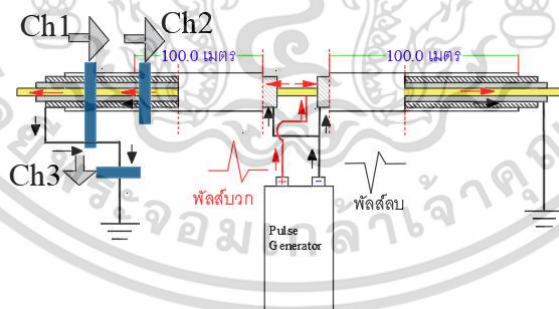
ค) ผลการวัดที่ตำแหน่ง Ch3

รูปที่ 4.85 ผลการทดสอบการต่อลงดินที่ปลายทั้งสองด้าน โดยจ่ายพัลส์กลางเคเบิล

ตารางที่ 4.21 ผลการทดสอบการต่อลงดินที่ปลายทั้งสองด้าน โดยจ่ายพัลส์กลางเคเบิล

เซนเซอร์	ขนาดพัลส์ (nC)	ขั้ว	ขนาดพัลส์สะท้อน (nC)	ขั้ว
Ch1	0.0805	บวก	ไม่สามารถระบุได้	
Ch2	0.191	บวก	0.0215	บวก
Ch3	0.186	ลบ	0.0250	ลบ

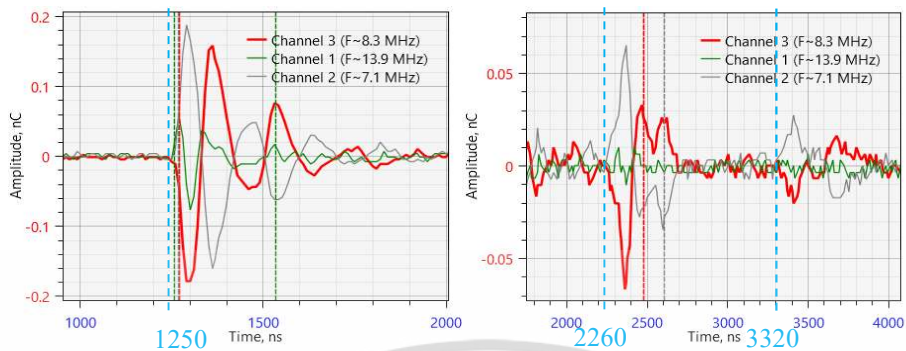
จากผลการทดสอบสามารถสรุปได้ของการจ่ายพัลส์ที่กลางเคเบิล ดังนี้
 กรณีจ่ายพัลส์ PD ที่กลางเคเบิลพบว่ากลุ่มพัลส์ที่เซนเซอร์ทุกตัวที่วัดได้จะอยู่ในตำแหน่งใกล้เคียงกันและ
 ซึ่งผลของ Ch1 และ Ch2 เป็นพัลส์บวก แต่ Ch3 เป็นพัลส์ลบ เนื่องจากขั้วที่วัดได้เช่นนี้พิจารณาจากทิศ
 ทิศทางการเคลื่อนที่ของพัลส์และการติดตั้งเซนเซอร์ดังรูปที่ 4.84 สามารถอธิบายได้ว่า



รูปที่ 4.86 ทิศทางการแพร่กระจายของผลทดสอบการต่อลงดินทั้ง 2 ด้าน (จ่ายพัลส์กลางเคเบิล)

- HFCT Ch1: ผลรวมของพัลส์บวกและลบจะหักล้างกันมีค่าใกล้เคียง 0 และเคลื่อนที่ในทิศทางตรงข้ามกับทิศทางเซนเซอร์ ทำให้ผลออกมาเป็นค่าบวก
- HFCT Ch2: ผลรวมของพัลส์บวกและพัลส์ลบจะเหลือในส่วนของพัลส์ลบ แต่เนื่องจากการเคลื่อนที่ไปในทิศทางตรงข้ามกับทิศทางของเซนเซอร์ทำให้ผลแสดงเป็นบวก
- HFCT Ch3: มีเพียงพัลส์ลบและเซนเซอร์มีทิศเดียวกันกับการเคลื่อนที่ของพัลส์ลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก) พัลส์ต้นกำเนิด

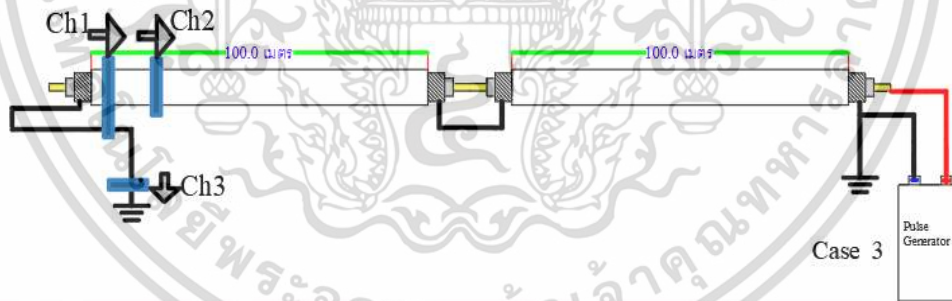
ข) พัลส์สะท้อน

รูปที่ 4.87 ภาพขยายพัลส์สะท้อนของผลทดสอบการต่อลงดินทั้ง 2 ด้าน (จ่ายพัลส์กลางเคเบิล)

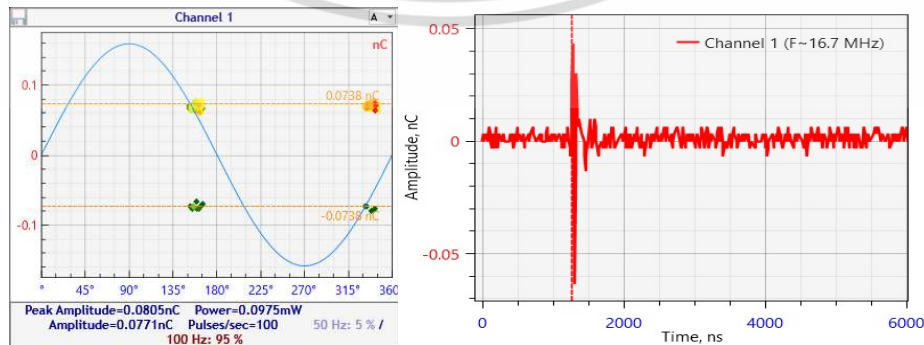
จากรูปที่ 4.87 เมื่อทำการคำนวณระยะทางการสะท้อนตาม TDR แล้วนั้นจะสามารถคำนวณระยะสะท้อนของเซ็นเซอร์ ตำแหน่ง Ch2 และ Ch3 จะได้ระยะทาง 199.6 เมตร และ 209.5 เมตร ตามลำดับ (เนื่องจากมีพัลส์สะท้อน 2 ครั้ง ที่สามารถวัดได้)

4.2.12 ผลทดสอบระบบเคเบิลใต้ดินที่ต่อลงดินที่ปลายทั้งสองด้าน โดยจ่ายพัลส์ปลายเคเบิล

การทดสอบจะทำการต่อวงจรทดสอบตามรูปที่ 4.88 ซึ่งผลที่วัดได้จะแสดงอยู่ในรูปภาพที่ 4.89 และตารางที่ 4.22 โดยกำหนดเครื่องกำเนิดพัลส์ให้จ่ายพัลส์ขนาด 100 nC

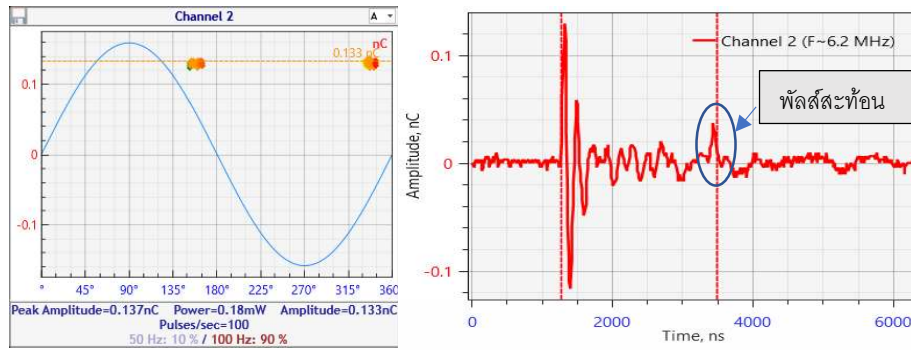


รูปที่ 4.88 วงจรทดสอบระบบเคเบิลใต้ดินที่ต่อลงดินที่ปลายทั้งสองด้าน โดยจ่ายพัลส์ปลายเคเบิล

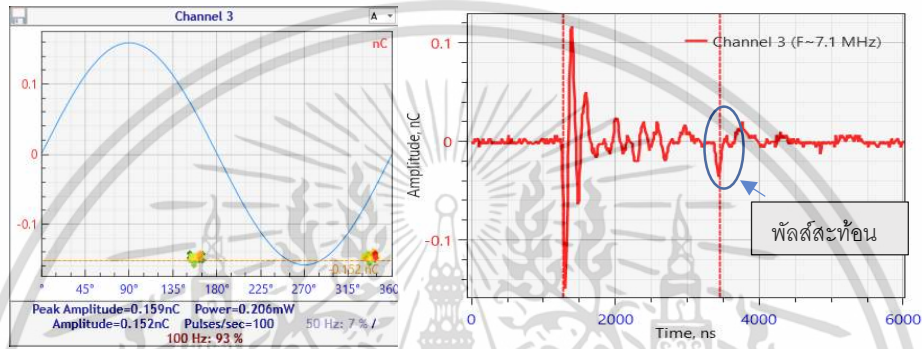


ก) ผลการวัดที่ตำแหน่ง Ch1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ข) ผลการวัดที่ตำแหน่ง Ch2



ค) ผลการวัดที่ตำแหน่ง Ch3

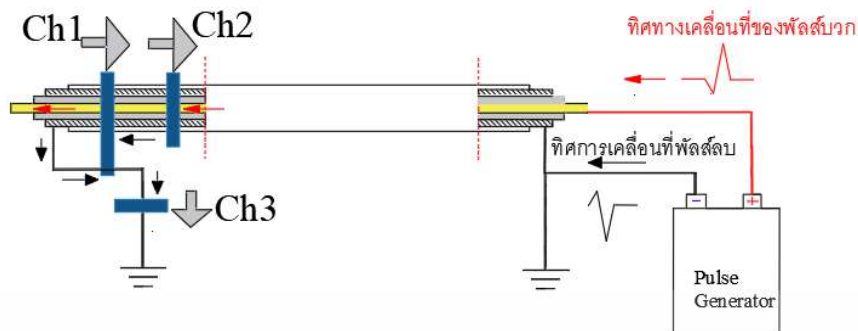
รูปที่ 4.89 ผลการทดสอบการต่อลงดินที่ปลายทั้งสองด้าน โดยจ่ายพัลส์ปลายเคเบิล

ตารางที่ 4.22 ผลการทดสอบการต่อลงดินที่ปลายทั้งสองด้าน โดยจ่ายพัลส์ปลายเคเบิล

เซนเซอร์	ขนาดพัลส์ (nC)	ขั้ว	ขนาดพัลส์สะท้อน (nC)	ขั้ว
Ch1	0.0975	บวก	ไม่สามารถระบุได้	
Ch2	0.133	บวก	0.0342	บวก
Ch3	0.152	ลบ	0.0365	ลบ

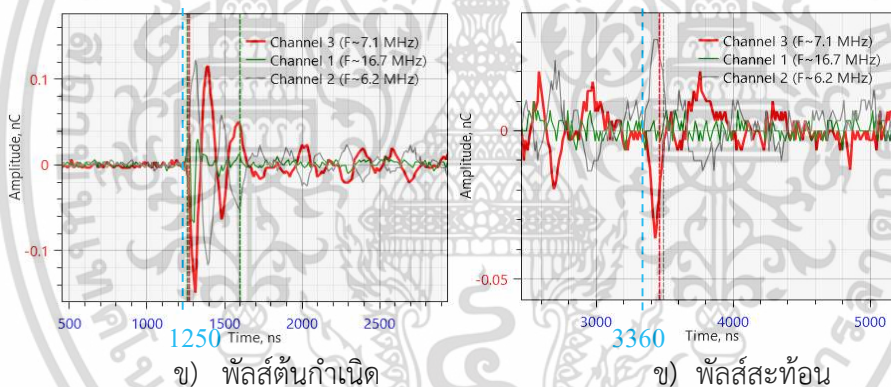
จากผลการทดสอบสามารถสรุปได้ของการจ่ายพัลส์ที่กลางเคเบิลและปลายเคเบิลของระบบที่ต่อลงดินทั้ง 2 ด้าน ดังนี้

กรณีจ่ายพัลส์ PD ที่กลางและปลายเคเบิลพบว่า กลุ่มพัลส์ที่เซนเซอร์ Ch 1 และ Ch2 วัดได้เป็นพัลส์บวก แต่ Ch 3 เป็นลบ จากทิศทางการแพร่กระจายของพัลส์และการติดตั้งเซนเซอร์ดังรูปที่ 4.88 (โดยอธิบายการแพร่กระจายของพัลส์ตามรูปที่ 4.90) สามารถอธิบายได้ว่า



รูปที่ 4.90 ทิศทางการแพร่กระจายของผลทดสอบการต่อลงดินทั้ง 2 ด้าน (จ่ายพัลส์ปลายเคเบิล)

- HFCT Ch1: ผลรวมของพัลส์บวกและลบจะหักล้างกันมีค่าใกล้เคียง 0 และเคลื่อนที่ในทิศทางตรงข้ามกับทิศทางเซนเซอร์ ทำให้ผลออกมาเป็นค่าบวก
- HFCT Ch2: ผลรวมของพัลส์บวกและพัลส์ลบจะเหลือในส่วนของพัลส์ลบ แต่เนื่องจากการเคลื่อนที่ไปในทิศทางตรงข้ามกับทิศทางของเซนเซอร์ทำให้ผลแสดงเป็นบวก
- HFCT Ch3: มีเพียงพัลส์ลบและเซนเซอร์มีทิศเดียวกันกับการเคลื่อนที่ของพัลส์ลบ



รูปที่ 4.91 ภาพขยายพัลส์สะท้อนของผลทดสอบการต่อลงดินทั้ง 2 ด้าน (จ่ายพัลส์ปลายเคเบิล)

จากรูปที่ 4.91 เมื่อทำการคำนวณระยะทางการสะท้อนตาม TDR แล้วนั้นจะสามารถคำนวณระยะสะท้อนของเซนเซอร์ ตำแหน่ง Ch2 และ Ch3 จะได้ระยะทาง 417.10 เมตร

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษา

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการจำลองในโปรแกรมนั้น เนื่องจากการจำลองในสถานะอุดมคติ ทำให้การนำเทคนิค TDR มาใช้นั้นสามารถระบุระยะทางจุดกำเนิดการดิซชาร์จบางส่วนได้แม่นยำ รวมทั้งการเกิดพัลส์สะท้อนที่ชัดเจน ไม่เกิดสัญญาณรบกวนและมีการลดทอนที่แน่นอน (เนื่องจากการเป็นสถานะอุดมคติ) แต่ในการทดสอบในห้องปฏิบัติการพบว่าการวัดสัญญาณจากการติดตั้งเซนเซอร์(HFCT) นั้นมีความยากต้องอาศัยความชำนาญ เนื่องจากมีปัจจัยภายนอกมารบกวนเยอะซึ่งส่งผลให้ไม่สามารถจับสัญญาณพัลส์ได้ หรืออาจจะสามารถวัดได้ แต่เป็นสัญญาณที่ผิดเพี้ยนจนไม่สามารถนำมาวิเคราะห์ได้ บางครั้งสัญญาณที่วัดมาได้นั้นโดนสัญญาณรบกวนที่เยอะเกินจนไม่สามารถแยกแยะพัลส์สะท้อนได้และในการทดสอบมีความแตกต่างจากการจำลองอย่างชัดเจนนั่นคือ การลดทอนของสัญญาณพัลส์ ที่นอกจากจะมีปัจจัยการรบกวนภายนอกจากข้อต่อต่างๆที่นำมาใช้ยังส่งผลต่อการลดทอนและการสะท้อนของกราวด์ด้วยรวมถึงปัญหาด้านการวัดสัญญาณที่มีข้อจำกัดเรื่องของสายเคเบิลทำให้ไม่สามารถทำการแยกจุดวัดสัญญาณการดิซชาร์จที่จะสามารถนำมาวิเคราะห์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ แตกต่างจากโปรแกรมที่จะไม่มีเรื่องการต่อสายและระยะสายที่ไม่แน่นอนมาเกี่ยวข้อง

การวิเคราะห์จากผลลัพธ์ในการทดสอบระบบเคเบิลใต้ดินที่มีการต่อลงดินข้างเดียวหรือทั้ง 2 ข้างโดยมีตำแหน่งการติดตั้งเซนเซอร์ที่ตำแหน่งเดียวกัน พบว่าหากมีการต่อลงดินทั้งสองข้างจะมีรูปแบบของพัลส์ PD และลักษณะเฉพาะของพัลส์ PD ที่คล้ายกัน แต่จะแตกต่างกันที่ขนาดของพัลส์ PD จะมีค่าน้อยกว่าการต่อลงดินแบบข้างเดียวเล็กน้อย ในขณะที่การต่อลงดินแบบกึ่งกลางจะมีรูปแบบการติดตั้งเซนเซอร์ที่เฉพาะ แต่สำหรับการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของพัลส์ PD จากแต่ละตำแหน่งจุดเกิดจากการต่อลงดินทั้ง 3 กรณีนี้เป็นไปในทางเดียวกันทั้งในการจำลองและการทดสอบ (ยกเว้นในการทดสอบบางกรณีที่ไม่ได้สอดคล้องกันทั้งหมด แต่ก็ไม่ขัดแย้งกัน)

การเกิดพัลส์สะท้อนจะขึ้นอยู่กับระยะห่างจากจุดกำเนิด PD ตำแหน่งเครื่องมือวัดและระยะของสายเคเบิล หากระยะการเคลื่อนที่ของพัลส์ที่มีการสะท้อนมายังตำแหน่งเซนเซอร์มีระยะมากขึ้น การลดทอนของพัลส์ PD จะมากขึ้นเช่นกัน (ระยะทางยิ่งที่มากจะส่งผลให้การลดทอนมากตาม) ซึ่งถ้าพัลส์ PD ที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยจะส่งผลทำให้ไม่สามารถวัดพัลส์สะท้อนได้ ซึ่งหากไม่สามารถแยกพัลส์สะท้อนจากสัญญาณรบกวนได้จะเป็นการยากที่จะใช้วิธี TDR ในการหาแหล่งกำเนิดของพัลส์

5.2 ปัญหาที่พบ แนวทางแก้ไขและข้อเสนอแนะ

5.2.1 ปัญหาที่พบ

1. อุปกรณ์ที่นำมาใช้ในการจำลอง เช่น คอมพิวเตอร์ มีความไม่เหมาะสมทำให้ไม่สามารถทำงานให้ผลการจำลองออกมามีความเรียบเนียนของกราฟได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. สายโคแอกเซียลที่ใช้ในการทดสอบถูกวางซ้อนทับกันหรือมีการม้วนขดสามารถทำให้สัญญาณที่ตรวจวัดได้มีความผิดเพี้ยนของพัลส์
3. เนื่องจากไม่ทราบค่าความต้านทานของกราวด์ที่ใช้ในการทดสอบจึงทำให้ไม่สามารถกำหนดให้สอดคล้องกันได้

5.2.2 แนวทางแก้ปัญหา

1. เพิ่มประสิทธิภาพหรือเปลี่ยนไปใช้อุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้นเพื่อให้เพียงพอต่อการประมวลผลข้อมูลจำนวนมาก เช่น การเพิ่มประสิทธิภาพของ RAM หรือ CPU
2. จัดวางสายให้เป็นระเบียบเรียบร้อย
3. ต้องจัดหาเครื่องมือวัดมาทำการวัดค่าเก็บผล

5.2.3 ข้อเสนอแนะ

ทั้งนี้งานวิจัยได้ทำการจำลองและทดสอบการเกิดพัลส์ PD ในระบบเคเบิลใต้ดินที่มีการต่อลงดินที่แตกต่างกันเพียงส่วนหนึ่งเพื่อศึกษาการวิเคราะห์การแพร่กระจายของพัลส์ PD รูปแบบของพัลส์ PD และลักษณะเฉพาะของพัลส์ PD รวมถึงการสะท้อนของพัลส์ที่จะระบุตำแหน่งจุดกำเนิดของ PD แต่อย่างไรก็ตามในระบบเคเบิลใต้ดินที่หน่วยงานจริงมีองค์ประกอบที่มากกว่าในการจำลองในโปรแกรมและการทดสอบในห้องปฏิบัติการ รวมถึงการวิเคราะห์นั้นทำได้ยากยิ่งกว่าเนื่องจากปัจจัยอื่นๆ ที่เข้ามาเกี่ยวข้องไม่ว่าจะเป็นที่การวัดสัญญาณ PD ที่เกิดขึ้นให้มีความถูกต้องให้ตรงกับที่เกิดขึ้นจริง รวมถึงการที่วัดสัญญาณมาแล้วสามารถนำข้อมูลมาใช้ได้และจุดกำเนิด PD ที่มีมากกว่า 1 ตำแหน่ง มีการต่อลงดินจากหลายที่จุดเดียวหรือข้อจำกัดในการติดตั้งเซนเซอร์ ดังนั้น ในอนาคตควรมีการทดสอบและเทคนิคการระบุตำแหน่งอื่น ๆ เพิ่มมากขึ้นเพื่อทำการศึกษาและปรับปรุงวิธีการวิเคราะห์ผลให้มีประสิทธิภาพและแม่นยำมากยิ่งขึ้น

บรรณานุกรม

- [1] สำรวย สังข์สะอาด “วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง” March 2021
- [2] กองมาตรฐานระบบไฟฟ้า ฝ่ายมาตรฐานและความปลอดภัย “ระบบเคเบิลใต้ดิน” December 2005
- [3] รศ.ดร. นรเศรษฐ์ พัฒนเดช. 2561. **Partial Discharge Test: IEC 60270**. [สไลด์]. กรุงเทพฯ : รศ.ดร. นรเศรษฐ์ พัฒนเดช.
- [4] IEC Standard 60270:2000, **High Voltage Testing: Partial Discharge Measurement**.
- [5] B. Gustavsen “Panel Session on Data for Modeling Insulated Cables”, Conference Proceedings (Cat. No.01CH37194) IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, February 2001
- [6] 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.
- [7] IEEE 400.3. **Guide for Partial Discharge Testing of Shielded Power Cable Systems in a Field Environment**; 2006.
- [8] การไฟฟ้านครหลวง. “การปรับปรุงค่า Power Factor.” [Online]. Available: <https://www.mea.or.th/profile/110/269>. 2021.
- [9] J. De Silva, L. Kothalawala “Modelling Cables and Transmission Lines with PSCAD™/EMTDC™”,
- [10] IEC Standard 62478:2016, **High Voltage Test Techniques: Measurement of partial discharge by electromagnetic and acoustic methods**.
- [11] IEEE Std. 400.3TM – **Guide for Partial Discharge Testing of Shielded Power Cable System in a Field Environment**; September 2006
- [12] J. R. Lucas, **High Voltage Engineering**, third edition 2001
- [13] Hugh M. Ryan, **High-Voltage Engineering and Testing**, 3rd Edition 2013
- [14] L. W. Van Veen, **Comparison of measurement methods for partial discharge measurement in power cables**, April 2014
- [15] S. Yang, L. Wang, X. Yue and H. Li, “A High Efficient Time-domain Modeling Method for Partial Discharge Propagation in XLPE Cables with Large Length”, International Conference on Electrical Materials and Power Equipment (ICEMPE), April 2021
- [16] R. A. Zingarelli, S. A. Chin-Bing, M. D. Collins, “Optimizations for Fourier synthesized time domain pulse propagation calculations”, OCEANS, October 2009.
- [17] P. C. J. M. van der Wielen, ‘On-line Detection and Location of Partial Discharges in Medium-Voltage Cables.’, PhD thesis, Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven, 2005



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The 8th International Conference on Engineering, Applied Sciences and Technology

June 8 - 10, 2022, at Chiang Mai, Thailand

The International Conference on Engineering, Applied Sciences and Technology (ICEAST) was inaugurated in 2007 to provide opportunities for enhancing collaboration and exploring current interdisciplinary topics. This year is the 8th event and being held in Chiang Mai, Thailand, a prime location in northern Thailand which has overfull of things to see and things to do.



Honorary Chair

- Anuwat Jangwanitlert (KMITL, Thailand)
- Somyot Kaitwanidvilai (KMITL, Thailand)
- Khamphoui Southisombat (NUOL, Lao PDR)
- Pitak Thumwarin (KMITL, Thailand)
- Anantawat Kunakorn (KMITL, Thailand)
- Pongsakorn Yuthagovit (IEEE, Thailand)

General Chairs

- Sathaporn Promwong (KMITL & IEEE, Thailand)

Organizing-Chairs

- Chanin Bunlaksananusorn (KMITL, Thailand)

International Advisory Committee (IAC)

- Yoshikazu Miyataka (Hokkaido University, Japan)
- Takao Onoye (Osaka University, Japan)
- Kazuhiko Hamamoto (Tokai University, Japan)
- Rajeev Prasad (River Publishers, Denmark)
- Kyung Sup Kwak (Inha University, South Korea)
- Dusit Niyato (NTU, Singapore)
- Tadashi Ariga (Tokai University, Japan)
- Tomotaka Homae (NIT Toyama College, Japan)
- Nobutaka Ito (CMU, Thailand)
- Satoru Seto (NIT Ishikawa College, Japan)
- Kuniaki Yajima (NIT Sendai, Japan)
- Phonekeo Chanthamaly (NUOL, Lao PDR)
- Sengpasong Phrakonekham (NUOL, Lao PDR)
- Eryk Dutkiewicz (UTS, Australia)
- Myo Myint Maw (MTU, Myanmar)

ICEAST Steering Committee

- Wipoo Sriseubsai (KMITL, Thailand)
- Uma Seeboonruang (KMITL, Thailand)
- Chaowalit Hamontree (KMITL, Thailand)
- Worapong Tangsrirat (KMITL, Thailand)
- Chuwong Phongcharoenpanich (KMITL, Thailand)
- Sathaporn Promwong (KMITL & IEEE, Thailand)
- Wiboon Promphanich (KMITL, Thailand)
- Chanin Bunlaksananusorn (KMITL, Thailand)
- Norasage Pattanadech (KMITL, Thailand)
- Theerayod Wiangtong (KMITL, Thailand)
- Chayapol Khamyod (MFU, Thailand)
- Khamphoui Southisombat (NUOL, Lao PDR)
- Somsanouk Pathoumvanh (NUOL, Lao PDR)
- Khanthanou Luangxaysana (NUOL, Lao PDR)
- Myint Thein (YTU, Myanmar)
- Sint Soe (MTU, Myanmar)

Technical Program Chairs

- Norasage Pattanadech (KMITL, Thailand)
- Aditep Chaisang (RBRU, Thailand)

Technical Committee

- Phacharaphon Tunthawiroon (KMITL, Thailand)
- Monsak Pimsarn (KMITL, Thailand)
- Pornsawan Assawasaengrat (KMITL, Thailand)
- Pichaya Supanakorn (KMITL, Thailand)
- Nachanant Chitanont (KMITL, Thailand)
- Yoothana Suansook (DTI, Thailand)

Special Session Chairs

- Sawai Pongswatd (KMITL, Thailand)
- Suchada Sitjongsataporn (MUT, Thailand)
- Rachen Kanahna (PBRU, Thailand)
- Krittika Kantawong (UP, Thailand)

Publication Chair

- Kriangkrai Sooksood (KMITL, Thailand)
- Unnat Pinsopol (KMITL, Thailand)
- Chayapol Khamyod (MFU, Thailand)
- Thanadol Tiengthong (KMITL, Thailand)

Information System Chair/ Performance Publicity/ Public Relation Chairs

- Sarun Duanguwan (KMITL, Thailand)
- Nattapan Suwansukho (KMITL, Thailand)
- Wipassorn Vinicchayakul (CATC, Thailand)

Financial Chair

- Wiboon Promphanich (KMITL, Thailand)
- Vidhya Rugpong (IEEE, Thailand)

Registration Chair

- Siripan Trakuldit (NSTRU, Thailand)
- Sanit Teawchim (KOSEN-KMITL, Thailand)
- Kittisak Thungsook (RMUTR, Thailand)

Sponsor & Exhibition Chair

- Suthee Suwannaprapha (MCOT, Thailand)
- Sakda Maneerot (TESLA POWER, Thailand)
- Thanadon Mankong (N&N, Thailand)

Local Arrangements Chairs

- Jirapat Sangthong (MUT, Thailand)
- Bundit Ruckveratham (MCOT, Thailand)
- Virot Wuti (KMITL, Thailand)
- Ammata Lhuangphon (KMITL, Thailand)

General Secretary

- Theerayod Wiangtong (KMITL, Thailand)

Hosted by



CALL FOR PAPERS

Track 1 - Industrial Engineering, Materials and Manufacturing

Track 2 - Mechanical, Mechatronics and Civil Engineering

Track 3 - Food, Chemical and Agricultural Engineering

Track 4 - Telecommunications, Computer Science, Instrumentation and Control, Electrical and Electronic Engineering

Track 5 - Acoustic and music engineering, The science and applications of music technology, and other related fields

Track 6 - Virtual Reality and Augmented Reality Engineering

Post-conference Publication

- The accepted papers in Track 1 - 3 will be submitted for inclusion into River Publishers indexed in Scopus.
- The accepted papers in Track 4 - 6 will be submitted for inclusion into IEEE Xplore. (Prospective authors in tracks 4 - 6 are invited to submit original full papers WITHOUT authors' names and affiliations, in English, of 4 pages in standard IEEE two-column format only, reporting their original work and results, applications, and/or implementation in one or more of the listed areas. Papers must be submitted online only through the submission system of the conference website)

IMPORTANT DATES

Online Submission Open	January 14, 2022
Paper Submission Deadline	March 18, 2022
	March 25, 2022
	April 5, 2022
Notification of Acceptance	April 15, 2022
	April 22, 2022
Camera Ready Deadline	April 30, 2022
	May 6, 2022
Author Registration Deadline	April 30, 2022
	May 6, 2022
Conference Date	June 8-10, 2022

Partial Discharge Pulse Propagation in Coaxial Cable

T. Juntasorn
School of Engineering, King
Mongkut's Institute of Technology
Ladkrabang, Bangkok, Thailand,
62601062@kmitl.ac.th

P. Chancharoensook
School of Engineering, King
Mongkut's Institute of Technology
Ladkrabang, Bangkok, Thailand,
kcphop@kmitl.ac.th

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

Abstract— In the past, Coaxial cable was the signal cable used to transfer computer data. However, coaxial cables are now being modified for use in the high voltage coaxial cables to increase the security of power transmission in various areas. In addition to increased security, there is also an issue of stability maintenance and many perspectives as well. Because the cable that used to be utilized is still insulated. Therefore, Partial Discharge (PD) can still happen in the electrical system. This paper presents the PD propagation within the coaxial cable simulated via PSCAD/EMTDC program and carried out with RG-58 coaxial cable in a laboratory by testing the propagation of the PD pulse according to the conditions of different cable distances. From the experiment, the calculations will be reversed by considering on the differences of the time manner that PD pulse flows on the cable. The time reference point that the research studied has 2 points which are Peak to peak and Time of arrival(TOA). The comparison between simulation and experiment indicated the similar results with slight discrepancies caused by factors that can be accepted. TOA has smaller errors comparing with the peak to peak point showing that PD pulse flowing on the cable is attenuation and dispersion to the tailing wave part. That's the reason using Peak to Peak is a time reference point that has more errors. A thorough study of PD propagation is useful for in-depth analysis to locate the PD source accurately. As a result, the defect will be resolved on the spot.

Keywords—: Partial Discharge, PD Propagation, Coaxial Cable, PSCAD.

I. INTRODUCTION

Partial Discharge(PD) is an electric discharge or spark that creates a bridge between two conductors in some areas of the insulator. PD can occur both in the insulator and outside the insulator. Partial Discharge in the Insulator is caused by charge flowing through the tiny void in the insulator. Because these voids typically absorb less voltage than the insulation surrounding them, when the voltage is higher until it can withstand, damage was caused. Whenever the damage is severe sufficient, it will be a short circuit causing extensive destruction to the electrical system.

PD was classified into three types: 1. Corona discharge occurring at the connection point of high voltage equipment. It is usually not dangerous, but that can be noisy in the surroundings and light can reflect off the insulator. 2. Surface discharge occurring along the surface of the insulator at high electrical stress often causes the damages to the insulator which causes breakdown, and 3. Internal discharge occur within the gap material when it happens in a long period of time, it will cause the breakdown voltage. When an internal PD is generated at the insulating layer of a cable, the PD wave will travel into the conductor of the cable. As a result, some companies monitor PD values along with manufacturing cables regularly to prevent additional damage.

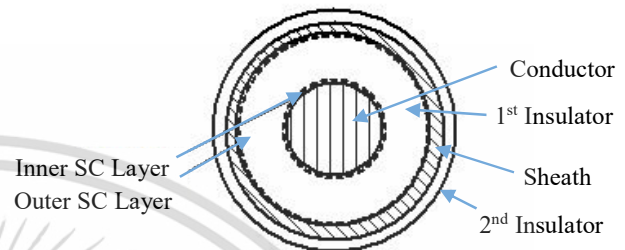


Fig.1. Cross section of Coaxial cable with a semi-conductor layer

In an underground cable system, a cross-section of coaxial cable is employed as a power transmission line, as shown in Fig. 1. In this figure, there are six layers: 1. Conductor is used to transmit the electrical energy or electrical signal which is often made of Copper or Aluminum 2. the Conductor screen The inner semi-conductor (SC) layer is a tape-like thin layer of metal coils that is in charge of reducing interference signals or protecting electromagnetic radiation emitted by the conductor. 3. The first insulator or the main insulator is also used as a name of the cable for example EPR, XLPE. The first insulator will protect the electricity from the other parts that can cause damage. 4. Insulation screen or outer SC layer work as the conductor screen 5. The sheath or metallic screen normally works as the ground. In a high voltage system, it also lets the electricity flows backward when occurring short circuit and sometimes also work as mechanical protection which protects the cable from crashing and bending. 6. Non-Metallic Sheath or Jacket as a second insulator work as a scratching protector including prevent the water flowing into the inner part of the cable. Normally, it is made of PE(polyethylene) or PVC (polyvinyl chloride). In this research, authors will discuss the internal PD of the discharge that occurs within the coaxial cable.

II. PULSE PROPAGATION

The velocity of a pulse wave traveling within a cable can be calculated using

$$V_W = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r \epsilon_0 \mu_r \mu_0}} \quad (1)$$

ϵ_0 : Permittivity of free space or Vacuum permittivity (8.854×10^{-12} F/m)
 μ_0 : Permeability of free space or Vacuum permeability ($4\pi \times 10^{-7}$ H/m)

If the cable insulation is air (uncover cable), where the relative permittivity (ϵ_r) and relative permeability (μ_r) of air are both 1, the velocity of the pulse wave is equal to the speed of light moving in a vacuum(C_0), according to (1) [1]. However, the insulation of conductors in cables is not entirely made of air in actual operating conditions. As a result, the

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
978-1-6654-5919-8/22/\$31.00 ©2022 IEEE
ไม่วารสารใดๆ หงสน อักทงหามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

wave velocity is reduced according to the insulator's velocity factor. Velocity factor can be obtained from

$$Velocity\ factor = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}} \quad (2)$$

The μ_r of the insulators is 1 because the insulators used in the cable are not magnetic materials, then the velocity factor depends on the ϵ_r of the insulator. According to (3), the relative permittivity has the greatest influence on wave velocity.

$$Vw = C_0 * Velocity\ factor = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r \epsilon_0 \mu_r \mu_0}} \quad (3)$$

If the cable length is fixed, then the relative permittivity of the insulation affects the velocity of the pulse wave. Moreover, the thickness of the semiconductor layer as shown in

Fig. 1. Also influences cable velocity which changes the insulator's relative permittivity. The new relative permittivity can be calculated according to (4). [2]-[4],[8]

$$\epsilon_{new\ ins} = \epsilon_r \frac{\ln\left(\frac{R_4}{R_1}\right)}{\ln\left(\frac{R_3}{R_2}\right)} \quad (4)$$

- R1: Radius of core
- R2: Radius of core and thickness of inner semi-conductor screen
- R3: Radius of the insulator
- R4: Radius of the insulator and thickness of outer semi-conductor screen

III. PD CALIBRATOR

A PD Calibrator is a PD source that can be used with pulse signal output characteristics. The measurement system of PD calibrator is as following in Fig. 2.

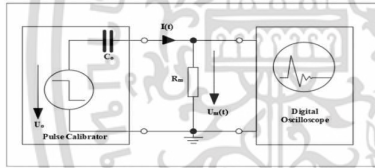


Fig.2. Pulse calibrator measuring circuit

The PD resource is a voltage pulse connected to the capacitor. The resistance depicted in the Fig. causes the capacitor to discharge energy (in Coulombs(C) units). The charge q generated by the PD calibrator can be calculated by using this equation

$$q = \int i(t)dt = \frac{1}{R_m} \int U_m(t)dt \quad (5)$$

To simulate the program that the result will be matched the real experiment. The research will use the PD calibrator as in Fig. 2 to record the results. The PD calibrator generated as follows 100 pC, 500 pC and 1 nC. To detect the correlation pattern for setting the parameter of PD resources in the program. The PD calibrator will be attached to the Rm 50 ohm. The graph will be as follows.

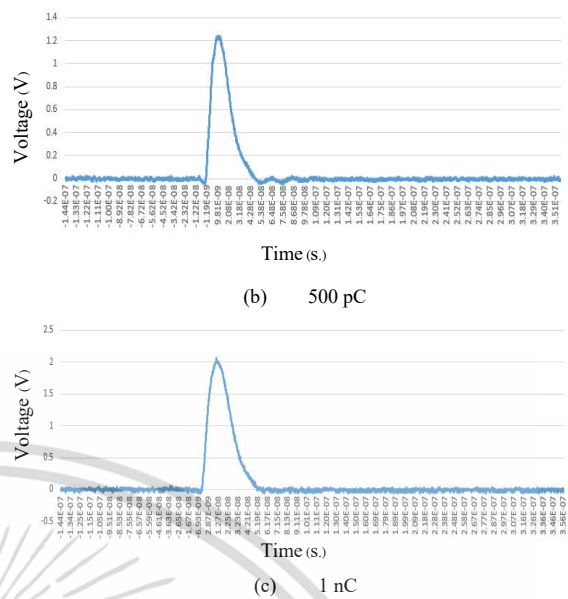
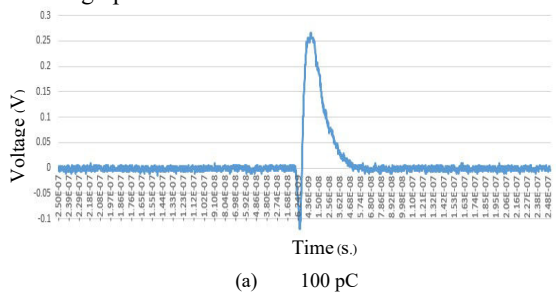


Fig.3. Time and voltage of discharging the signal pulse graph that emitted from the PD calibrator

As shown in Fig. 3, the Voltage and timing from pulse measure used to calculate in (5). The result will be the q value, that will match the value set in the PD calibrator. According the (5) is a summation of the area under the curve divided by the resistant value. From Fig. 3(a), the graph has the area under the curve in negative area. If we calculate using the (5), it must be calculated in negative value (difference of positive area and negative area.). According to research, the capacitor was always the same 100 pF when the PD calibrator was supplied to all three q values. When optimizing higher q values, PD calibrator will change the electrical voltage amplitude higher as well as shown in the equation below.

$$q_{ref} = U_{ref} \times C_{ref} \quad (6)$$

The size of capacitor value and the amplitude of the voltage pulse value will be simulating in the PSCAD program. The result will match the experiment. As the calibrator supply q increased, in addition to the changed voltage pulse amplitude, the rising time of the voltage pulse was adjusted. As shown in Fig. 3(a), (b) and (c) have higher slope.

IV. SIMULATION

In this paper, the program PSCAD/EMTDC is used to simulate. The RG-58 cable is used to simulate the internal PD propagation. The RG-58 is a coaxial cable that resembles an XLPE cable but does not include a semiconductor layer. The cable thickness data (given in Table I) was obtained from the RG-58 cable manufacturer's datasheet that is used in the practical test.

Table.I Parameter of RG-58 Coaxial cable

Name	Qualification	Unit	Values
Conductor	Inner Radius	m.	0.0
	Outer Radius	m.	0.0004065
	Resistivity	$\Omega \cdot m$	1.68e-8
	μ_r		1.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Name	Qualification	Unit	Values
1 st Insulation	Radius	m.	0.001475
	ϵ_r		2.3
	μ_r		1.0
Sheath	Radius	m.	0.001755
	Resistivity	Ω^*m	115e-9
	μ_r		1.0
2 nd Insulation	Radius	m.	0.002475
	ϵ_r		3.0
	μ_r		1.0

As shown in Table I, the simulated RG-58 cable contains a copper conductor, 1st layer insulation is polyethylene(PE), the sheath is tin, and layer 2nd insulation is polyvinyl chloride(PVC). The circuit model will be shown in Fig. 4.

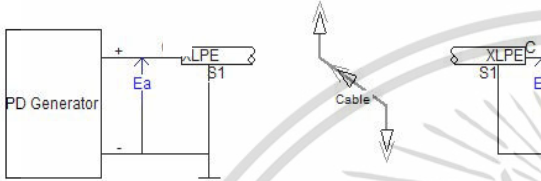
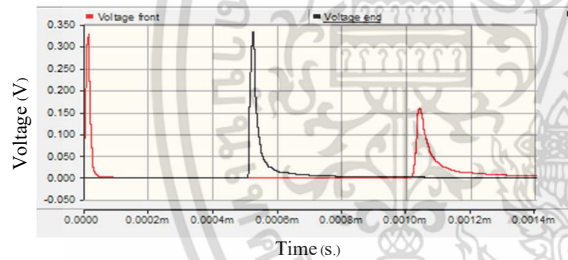
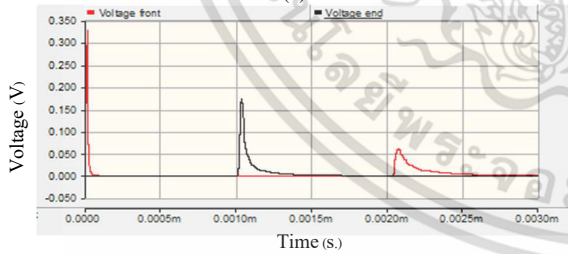


Fig.4. The cable circuit simulation in PSCAD

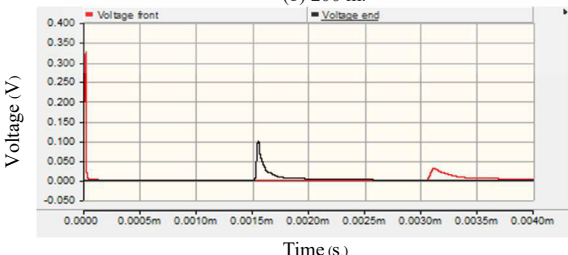
The components in the model include the PD generator which injected signal output 100 pC into the cable. Moreover, the voltage pulse detectors are set to measure at the start and end point of cable. In the simulation, it is divided into 4 cases according to different cable lengths: 100 m., 200 m., 300 m. and 400 m. The simulation results are demonstrated in Fig. 5.



(a) 100 m.



(b) 200 m.



(c) 300 m.

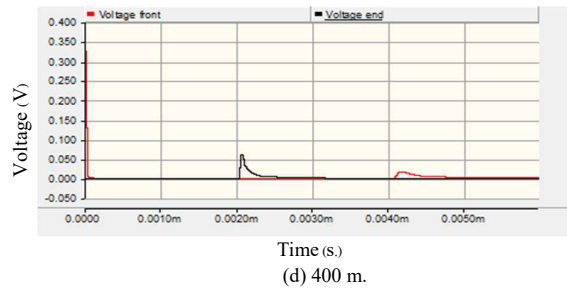


Fig.5. PD magnitude versus PD duration for simulation test.

As shown in Fig. 5, PD pulse that discharged will be transmitted and the pulse will be attenuation and dispersion causing the pulse changes from the pulse supply. If the pulse is attenuation, the graph will have a constant pulse width and the energy will be decreased causing the smaller graph area. On the other hand, the dispersion pulse causes a constant graph energy with higher pulse width. [1], [10]-[12]

PD position or the distance that PD pulse will be transmitted in cable as equation shown the distance will be equal the multiplication of wave velocity and time. The pulse velocity can be calculated by using (3). For the time manner, since the PD propagation in cable was changed from the effect of attenuation and dispersion, in research has studied the graph reference point to measure the time difference for the most correct and accurate data. By studying two reference points which are 1. Peak to peak is the time between the first and second peak amplitude of the pulse voltage. 2. Time of arrival (TOA) is the time from the beginning of the first pulse to the arrival of the second pulse. As Fig. 6 shown, the peak position of each pulse and the beginning of each pulse have been shown in table II and III, respectively.

Table.II TIME AND VOLTAGE OF SIMULATION AT PEAK POINT.

Cable length	1 st Pulse		2 nd Pulse		3 rd Pulse	
	Time (s.)	Voltage (mV)	Time (s.)	Voltage (mV)	Time (s.)	Voltage (mV)
100 m.	1.50E-8	326.6	5.24E-07	333.6	1.04E-06	157.2
200 m.	1.50E-8	326.6	1.03E-06	174.9	2.07E-06	60.4
300 m.	1.50E-8	326.6	1.55E-06	99.7	3.11E-06	29.6
400 m.	1.50E-8	326.6	2.07E-06	61.9	4.17E-06	17.4

Table.III TIME AND VOLTAGE OF SIMULATION AT TOA

Cable length	1 st Pulse		2 nd Pulse		3 rd Pulse	
	Time (s.)	Voltage (mV)	Time (s.)	Voltage (mV)	Time (s.)	Voltage (mV)
100 m.	5.00E-11	3.317	5.07E-07	1.043	1.02E-06	1.004
200 m.	5.00E-11	3.317	1.02E-06	1.074	2.04E-06	1.007
300 m.	5.00E-11	3.317	1.52E-06	1.031	3.06E-06	1.003
400 m.	5.00E-11	3.317	2.03E-06	1.016	4.08E-06	1.001

From the simulation results based on the parameters above, time of the first pulse in each case has the same duration because the rise time of the PD generator in this paper is fixed at 15 ns. (nano-second). Fig. 5(d) and Table II were compared, it's completely obvious that the mismatch in the peak voltage of the first pulse is because the graph is being zoomed in to reflect the value of the third pulse. From the Table II, as you can see the third pulse value in 100-meter length has the value near the second pulse in 200 meters length and the second pulse value in 200 meters length has

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

the value near the second pulse of 400 meters length. The reason why it has a similar value is that the cable is simulated in one cable cause PD pulse to be constantly attenuated and dispersion. In consequence, the PD value will not be the same value.

The PD pulse velocity of the cable is calculated by (3) with parameters in Table I, which is 197.7×10^6 m/s, or about 66 percent the speed of light. The multiplication between velocity and time difference is the distance traveled by PD pulse. The result of the calculations using simulation result from Table II. and Table III. indicated in Table IV.

Table.IV CALCULATION RESULT AND PERCENT ERROR IN PSCAD SIMULATION

Cable length	Position to calculate	$P_1 \rightarrow P_2$		$P_2 \rightarrow P_3$		$P_1 \rightarrow P_3$	
		Length	%error	Length	%error	Length	%error
100 m.	Peak	100.52	0.52	102.32	2.32	202.84	1.42
	TOA	100.28	0.28	100.84	0.84	201.12	0.56
200 m.	Peak	201.61	0.81	205.09	2.55	406.70	1.68
	TOA	200.73	0.37	201.75	0.88	402.48	0.62
300 m.	Peak	303.18	1.06	309.53	3.18	612.71	2.12
	TOA	301.30	0.43	303.10	1.03	604.40	0.73
400 m.	Peak	405.28	1.32	416.09	4.02	821.38	2.67
	TOA	402.05	0.51	404.87	1.22	806.92	0.86

Note : P_1 : First Pulse P_2 : Second Pulse P_3 : Third Pulse

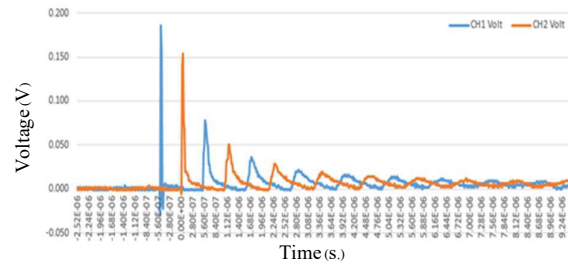
As shown in Table IV, TOA's percent error value is obviously less than the peak point. This demonstrates that the TOA is more accurate than the peak. The percent error will be high shows the graph is dispersion when the distance is increased. All the data are from the simulation tests that used the program to simulate the ideal environment. To confirm the hypothesis, the research has tested the practical experiment.

V. PRACTICAL TEST

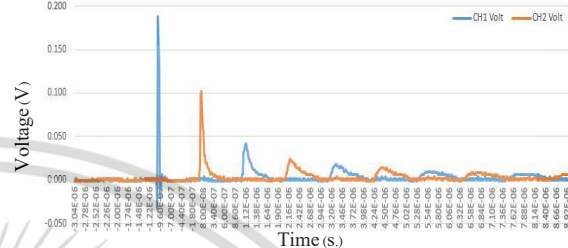
The test circuit was connected towards the simulation model. The cable length was extended in accordance with the simulation distance but note that there is slight discrepancy in the cable distance from the specified distance. The experiment is used to confirm the simulation. The research has built the model as in Fig. 4 by using PD calibrator supply the PD to RG-58 in each distance and used the scope that the input impedance is 1 Mega-ohm to detect the pulse as shown in Fig. 6 and the experiment result shown in Fig. 7.



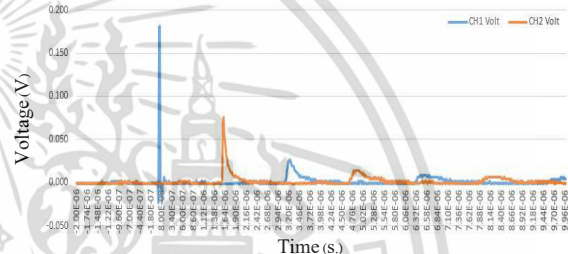
Fig.6. The practical overview in laboratory.



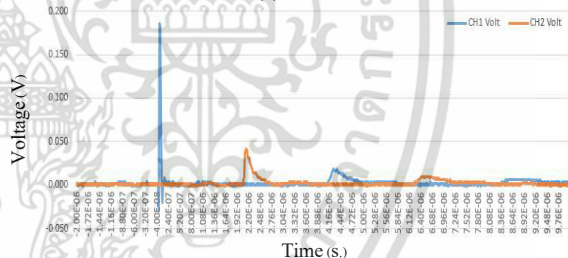
(a) 100 m.



(b) 200 m.



(c) 300 m.



(d) 400 m.

Fig.7. PD magnitude versus PD duration for practical test.

As shown in Fig. 7. When compared with Fig. 5. the graph is relevant and the result is the same but in Fig. 7, the experiment has interfered from outer pulse causes the graph to fluctuate which is different from the graph in the simulation test. The peak position of each pulse and the TOA of each pulse are shown in Tables V and VI, respectively.

Table.V TIME AND VOLTAGE OF PRACTICAL AT PEAK POINT

Cable length	1 st Pulse		2 nd Pulse		3 rd Pulse	
	Time (s.)	Voltage (mV)	Time (s.)	Voltage (mV)	Time (s.)	Voltage (mV)
100 m.	-5.00E-07	186.0	2.0E-08	154.0	5.8E-07	78.0
200 m.	-1.02E-06	188.0	0.00E+00	102.0	1.02E-06	42.0
300 m.	2.00E-08	182.0	1.560E-06	76.0	3.14E-06	26.0
400 m.	2.00E-08	186.0	2.14E-06	42.0	4.26E-06	18.0

Table.VI TIME AND VOLTAGE OF PRACTICAL AT TOA

Cable length	1 st Pulse		2 nd Pulse		3 rd Pulse	
	Time (s.)	Voltage (mV)	Time (s.)	Voltage (mV)	Time (s.)	Voltage (mV)
100 m.	-5.20E-07	-30.0	0.0E-00	6.0	5.2E-07	-2.0
200 m.	-1.04E-06	-32.0	-2.00E-08	6.0	1.00E-06	-2.0
300 m.	-2.00E-08	-2.0	1.520E-06	-2.0	3.06E-06	-2.0
400 m.	-2.00E-08	0.0	2.04E-06	0.0	4.12E-06	0.0

According to Table V and Table VI, Because the experiment is performed under practical applications, the time is different at 1st pulse because the time trigger was adjusted. To determine the precision of the data, the value from tables V and VI was computed in (3). The calculated results are shown in table VII.

Table.VII CALCULATION RESULT AND PERCENT ERROR IN PRACTICAL

Cable length	Position to calculate	P ₁ → P ₂		P ₂ → P ₃		P ₁ → P ₃	
		Length	%error	Length	%error	Length	%error
100 m.	Peak	106.75	6.75	106.75	6.75	213.49	6.75
	TOA	102.79	2.79	102.79	2.79	205.59	2.79
200 m.	Peak	209.54	4.77	209.54	4.77	419.08	4.77
	TOA	201.63	0.82	201.63	0.82	403.27	0.82
300 m.	Peak	308.38	2.79	316.29	5.43	624.67	4.11
	TOA	304.43	1.48	304.43	1.48	608.85	1.48
400 m.	Peak	419.08	4.77	419.08	4.77	838.16	4.77
	TOA	407.22	1.80	411.17	2.79	818.39	2.30

Note : P₁ : First Pulse P₂ : Second Pulse P₃ : Third Pulse

As shown in Table VII, TOA value always has smaller percent error than the Peak. reason using TOA value in calculation will be more accurate than using the Peak (The percent error of using peak time in calculation is very high). In practical testing, if the distance calculation for PD has high error, it could be to mismanagement.

The outcomes of the simulation and the practical test were compared. The end result is the same. There is no contradiction between the two results and both fulfill the concept of pulse propagation. Both simulated results in the PSCAD and a laboratory experiment confirmed the findings. The results demonstrate that using the time method from TOA produces more exact and accurate results than using the technique from Peak to Peak.

VI.CONCLUSION

This paper presented the PD pulse propagation simulation test on the Coaxial cable and has been tested in the laboratory using RG-58 cable. The results are identical between the experiment and the simulation test. The result that uses TOA has less error compared with peak to peak. It has shown that PD pulse flowed on the cable has been attenuated and dispersion to the tailing wave part. That's the reason using Peak to Peak is a time reference point that has more errors. The results from the experiment have more errors than the simulation test may be caused by one of the factors that can be accepted such as time delay manner of the measurement instrument or the scope sensitivity that has small scale but when analyzing the output together with the simulation test,

It can be concluded that the insulator material plays an important role in the propagation of the PD pulse on the coaxial cable (permittivity value of the insulator is the key feature that provides the velocity to the PD pulse) and using TOA as a time reference point can calculate PD point close to the exact point the most.

REFERENCES

- [1] J. Perkel, J. C. Hernandez-Mejia "Medium Voltage Cable System Partial Discharge", Cable Diagnostic Focused Initiative(CDFI), February 2016.
- [2] B. Gustavsen "Panel Session on Data for Modeling Insulated Cables", Conference Proceedings (Cat. No.01CH37194) IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, February 2001
- [3] PSCAD/EMTDC V4.2 User's Guide. Winnipeg, Canada: Manitoba HVDC
- [4] Research Centre Inc., April 2005
- [5] J. De Silva, L. Kothalawala "Modelling Cables and Transmission Lines with PSCAD™/EMTDC™",
- [6] IEC Standard 60270:2000, High Voltage Testing: Partial Discharge Measurement.
- [7] IEC Standard 62478:2016, High Voltage Test Techniques: Measurement of partial discharge by electromagnetic and acoustic methods.
- [8] N. Pattanadech "Partial Discharge Test: IEC 60270" unpublished.
- [9] IEEE Std. 400.3TM – Guide for Partial Discharge Testing of Shielded Power Cable System in a Field Environment; September 2006
- [10] J. R. Lucas, High Voltage Engineering, third edition 2001
- [11] สรราย สังข์อรอด "วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง" March 2021
- [12] Hugh M. Ryan, High-Voltage Engineering and Testing, 3rd Edition 2013
- [13] L. W. Van Veen, Comparison of measurement methods for partial discharge measurement in power cables, April 2014
- [14] S. Yang, L. Wang, X. Yue and H. Li, "A High Efficient Time-domain Modeling Method for Partial Discharge Propagation in XLPE Cables with Large Length", 2021 International Conference on Electrical Materials and Power Equipment (ICEMPE), April 2021
- [15] R. A. Zingarelli, S. A. Chin-Bing, M. D. Collins, "Optimizations for Fourier synthesized time domain pulse propagation calculations", OCEANS, October 2009.
- [16] P. C. J. M. Wielen, "On-line Detection and Location of Partial Discharges in Medium-Voltage Cables.", phdthesis, Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven, 2005

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



RG58 COAXIAL CABLE

MILITARY GRADE, SHIELD 95%



PART NUMBER	CB-0102
CONDUCTOR	Stranded Tinned Copper
DIAMETER	0.18 mm x 19 Wire (20AWG)
DIELECTRIC	Solid Polyethylene
DIAMETER	2.95 mm
BRAID WIRE	Tinned Copper
DIAMETER	0.11 mm x 144 wire
COVERAGE	95%
JACKET	Black PVC
DIAMETER	4.95 mm
SCREENING	1 - 1000MHz
FACTOR AT	55 dB

APPLICATION CCTV, CATV, MATV, HDTV, TV Cable, RF Signal Transmission : **STANDARD** MIL-C-17E, MIL-C-17G, ANSI | TIA-568-C.4

Frequency MHz	Attenuation dB/100m	Return Loss	
1	2.11	5 - 470 MHz	>20.00 dB
5	3.51	470 - 1000 MHz	>18.00 dB
10	5.08	Impedance	50 Ohm
50	14.91	Capacitance	100 pF/m
100	16.08	Velocity Ratio	66%
200	29.81	DCR Inner Conductor	33.3 Ohm/km
300	33.14	DCR Shields	13.5 Ohm/km
400	37.73	Minimum Bending Radius	
460	40.18	Loaded (Installation)	10 x Cable OD
700	55.73	Unloaded (Operation)	4 x Cable OD
870	65.23	Tensile Strength	
1000	70.52	Maximum Pulling Tension	245 N
		Temperature	
		Storage/Operation	-20 °C to 75 °C
		Installation	0 °C to 60 °C
		Jacket Sparker	4000 VAC
		Dielectric Strength	2500 VAC

ORDERING INFORMATION

PART NO.	DESCRIPTION	PAGKAGE	JACKET COLOR
CB-0102	RG58 CABLE, MILITARY GRADE, SHIELD 95%, Indoor	500m / Reel in Box	BLACK PVC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

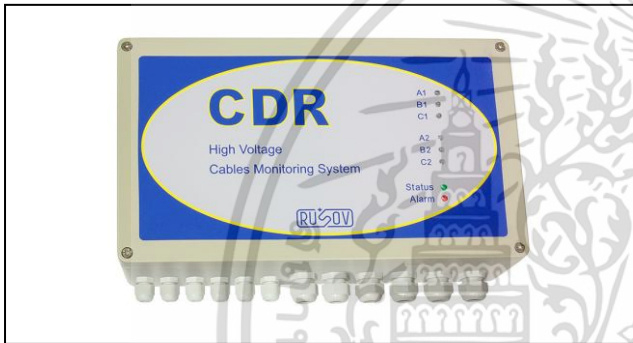


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

«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:

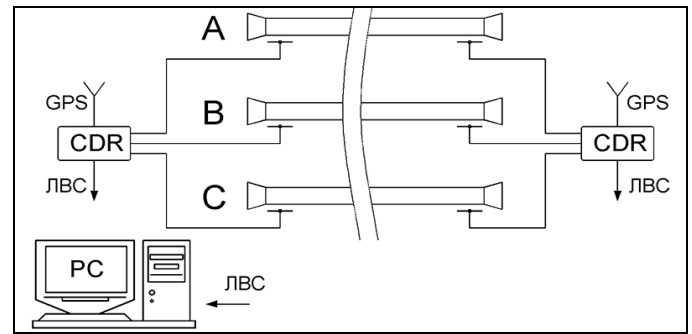
1. PD pulses are measured synchronically in all the 6 measuring channels of «CDR» device. This is a compulsory condition for all the diagnostic algorithms to operate.

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.

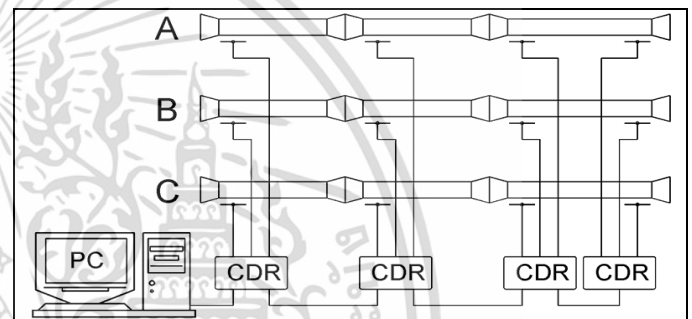
Cable monitoring systems with synchronization by fiber optic.

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

เอกสารนี้เป็นเอกสาร รหัสสงวนลิขสิทธิ์ของบริษัทฯ ระวังเนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MV Accessories

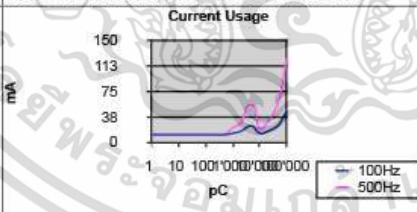
Calibrator CAL141

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 Coulomb	C out [Farad]	C coax + C inp [Farad]	C load [Farad]	U peak [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.

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินทางปัญญาของ Seitz Instruments AG. การคัดลอกหรือการเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจะถือว่าผิดกฎหมาย. **Type CAL 141 Test Certificate 141-600-03 page 1/1**

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา 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.



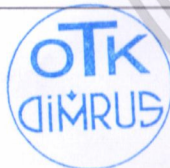
RFCT-4.2 Sensor

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

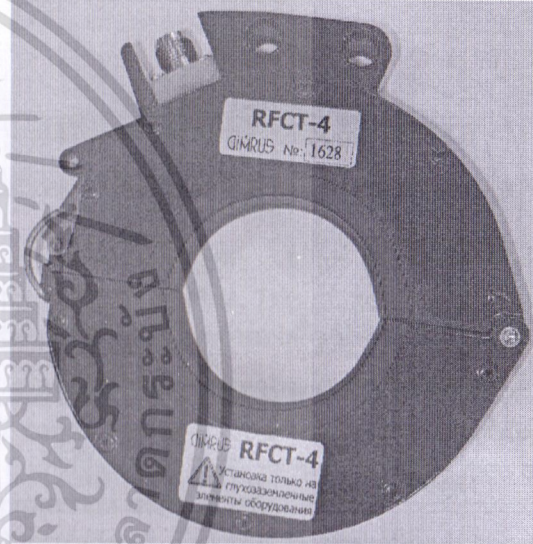
Perm, Russia

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.

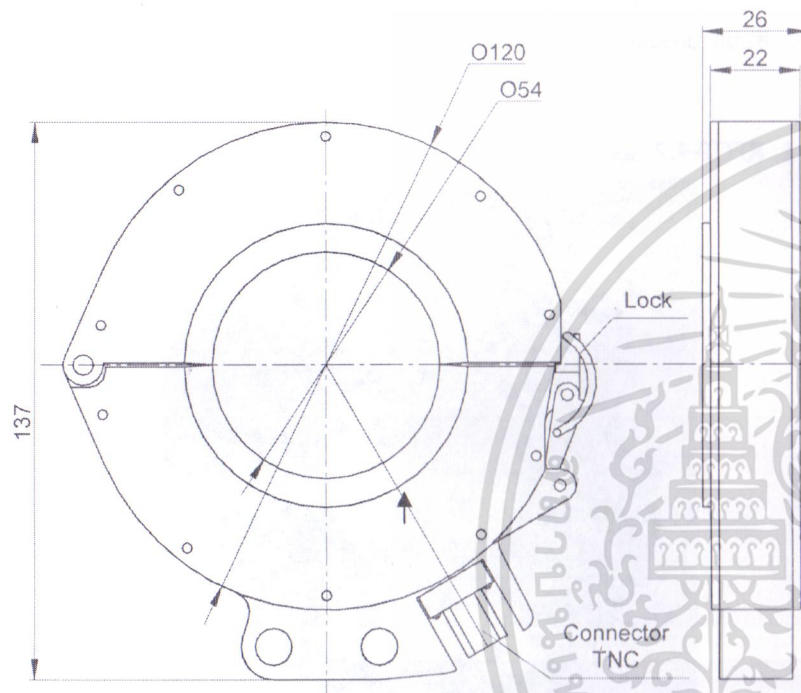


Figure 2. Overall and Mounting Dimensions of the RFCT-4.2 Sensor with an Additional Bracket for Stationary Installation.

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.

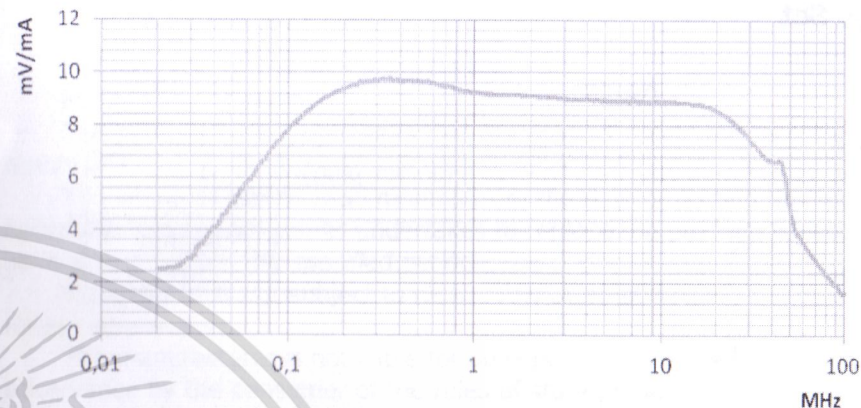


Figure 3. Amplitude-Frequency Response of RFCT-4.2 Sensor.

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 1ExIIBCT6 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

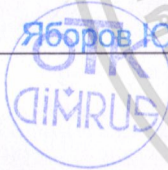
Responsible manufacturer's representative: [Signature] Федосеев Д.А.

**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: 18. 0 3. 2020

Packed by: [Signature] Яборов Ю.И.

**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

**«PD-Line»
Sensor**

Cable Lines PD Monitoring

CERTIFICATE

BL.411999.032.021 ПС

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.

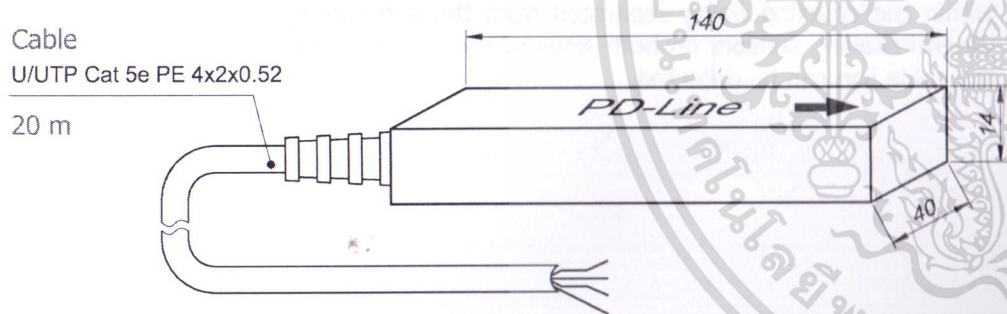
The sensors installation on a coupling allows partial discharges occurring within the coupling being separated from those occurring outside the coupling. When installing sensors on both sides of the coupling, the pulses direction along the cable line can be detected.

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.



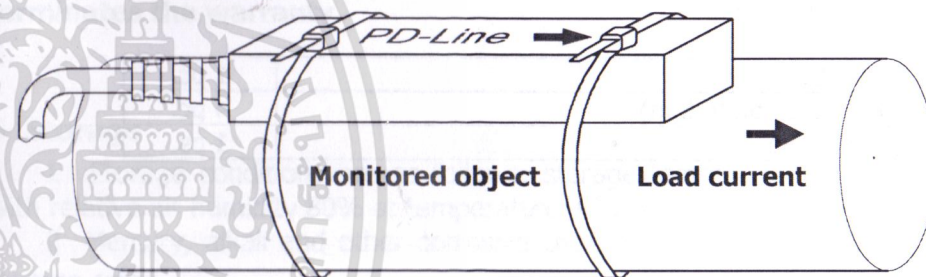
3. «PD-Line» Installation

- 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 นายวิศักดิ์ จันทสร
วัน เดือน ปีเกิด 14 ธันวาคม 2539 ที่ราชบุรี
ที่อยู่ คอนโด12 ชั้น สจล. ช.ฉลองกรุง 1
แขวง ลาดกระบัง เขต ลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 โทร.0986-154514
ประวัติการศึกษา 2558 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชา พลังงานไฟฟ้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้