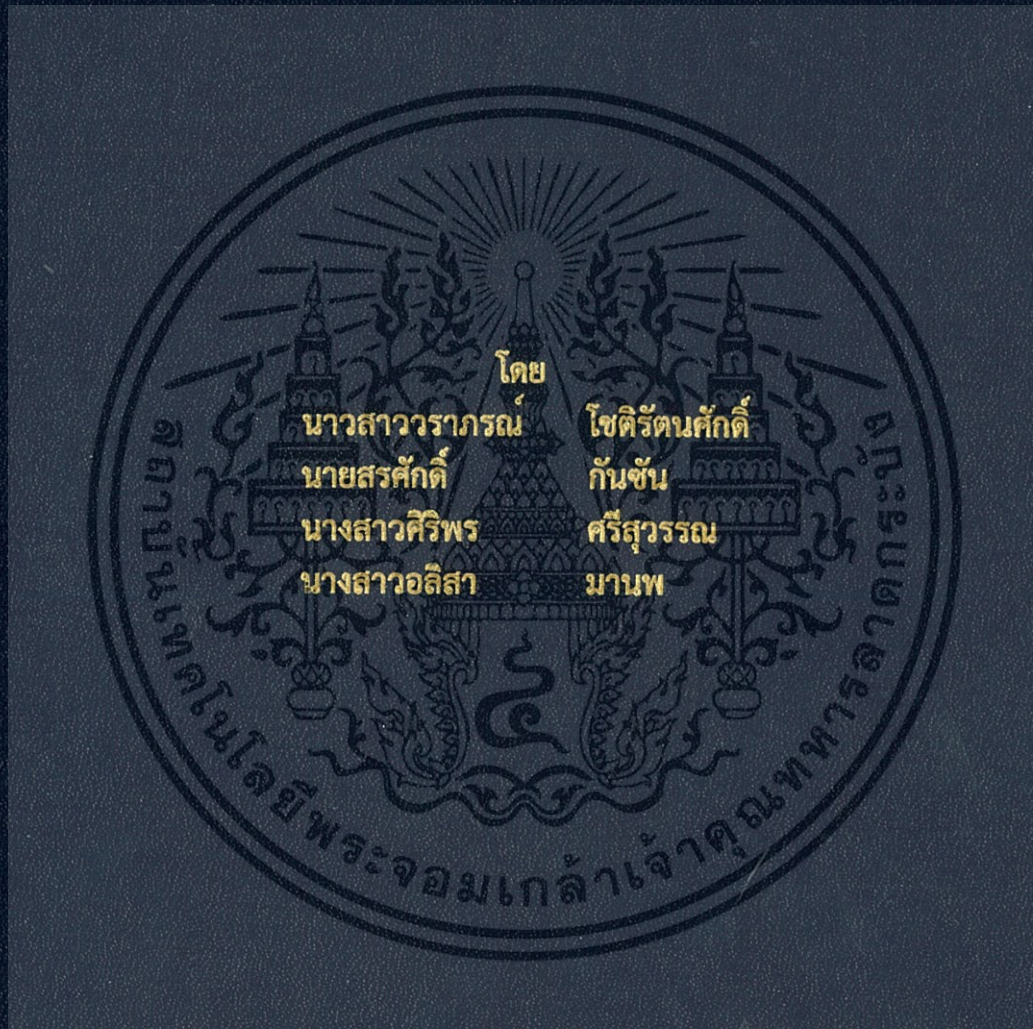


การศึกษาปัญหาของการใช้งานสายเคเบิลใต้ดิน
THE STUDY OF USING UNDERGROUND CABLE



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

การศึกษาปัญหาของการใช้งานสายเคเบิลใต้ดิน
THE STUDY OF USING UNDERGROUND CABLE



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THE STUDY OF USING UNDERGROUND CABLE



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

2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2559

การศึกษาปัญหาของการใช้งานสายเคเบิลใต้ดิน
THE STUDY OF USING UNDERGROUND CABLE



อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร.อานันท์วัฒน์ คุณากร

รศ.ดร.นรเศรษฐ์ พัฒนเดช

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2559

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาปัญหาของการใช้งานสายเคเบิลใต้ดิน

ผู้จัดทำ

- 
1. นางสาววารภรณ์ โชติรัตนศักดิ์
 2. นายสรศักดิ์ กั้นชั้น
 3. นางสาวศิริพร ศรีสุวรรณ
 4. นางสาวอสิสา มานพ


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร.อนันท์วัฒน์ คุณากร)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษา (รองศาสตราจารย์ ดร.นรเศรษฐ์ พัฒนเดช)
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาปัญหาของการใช้งานสายเคเบิลใต้ดิน

นางสาววารภรณ์ โชติรัตน์ศักดิ์

นายสรศักดิ์ กันชน

นางสาวศิริพร ศรีสุวรรณ

นางสาวอลิสสา มานพ

รศ.ดร.อานันท์วัฒน์ คุณากร อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร.นรเศรษฐ์ พัฒนเดช อาจารย์ที่ปรึกษา

บทคัดย่อ

บทความฉบับนี้นำเสนอการศึกษาปัญหาการใช้งานสายเคเบิลใต้ดิน ซึ่งมุ่งเน้นศึกษาปัญหาที่เกิดจากการเสื่อมสภาพของตัวอุปกรณ์เสริมที่ใช้ในระบบเคเบิลใต้ดิน เช่น ข้อต่อ (Joint), หัวต่อ (Terminator) เป็นต้น โดยทำการทดลองตรวจจับสัญญาณความบกพร่องในสายเคเบิล RG-58 เพื่อศึกษาและวิเคราะห์พฤติกรรมของคลื่นเดินทางเมื่อเกิดการปล่อยประจุบางส่วน (Partial Discharge) ตลอดจนการศึกษาและวิเคราะห์ลักษณะของคลื่นสะท้อนเมื่อเกิดความบกพร่องในสายเคเบิล RG-58 ที่มีการต่อลงดินแตกต่างกัน จากการทดลองพบว่าระยะห่างระหว่างจุดที่เกิดความบกพร่องและตำแหน่งที่ติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณมีผลต่อขนาดของคลื่นสะท้อนที่วัดได้ ขณะที่ความยาวของสายเคเบิลจะส่งผลต่อทั้งขนาดและเวลาที่คลื่นใช้ในการเดินทาง ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการจำลองสามารถนำไปวิเคราะห์และทำการคาดการณ์ตำแหน่งที่เกิดความบกพร่องของสายเคเบิลใต้ดิน อีกทั้งยังสามารถนำองค์ความรู้ที่ได้นี้ไปประยุกต์ใช้ในการปฏิบัติงานจริงในการซ่อมบำรุงรักษาและดูแลระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THE STUDY OF USING UNDERGROUND CABLE

Ms. WARAPORN CHOTRATTANASAK

Mr. SORASAK GUNSUN

Ms. SIRIPORN SRISUWAN

Ms. ALISA MANOP

Assos.Prof.Dr.Anantawat Kunakorn (Advisor)

Assoc.Prof.Dr.techn. Norasage Pattanadech (Advisor)

ABSTRACT

This paper presents the study of underground cable problems focusing on the deterioration accessory such as joint, terminators and etc. The experiments were performed with RG-58 coaxial cables to investigate the traveling wave behavior when partial discharge occurred at the cable accessories. Besides, the effect of the configuration of the grounding connection of the underground cable circuit was investigated. From the test usually, it was found that the amplitude of detected PD signal depended on the failure site and the position. Moreover, the length of cable affects the amplitude and traveling time of the traveling wave. The data from the simulation can be used to analyze and predict the position of the defect in underground cable which are useful for the field operation both cable maintenance and monitoring.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยการช่วยจากหลายท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ต้องขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.นรเศรษฐ พัฒนเดช และ รองศาสตราจารย์ ดร.อานันท์วัฒน์ คุณากร อาจารย์ที่ปรึกษา รวมไปถึงคุณบุญยวีร์ ฉายศิริ ที่ได้กรุณาให้ข้อเสนอแนะและข้อคิดเห็น ต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อโครงการมาด้วยดีตลอด และได้กรุณาตรวจแก้ไข ปริญญานิพนธ์จนสำเร็จเรียบร้อย เป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ บริษัท Meidensha ที่ให้ความอนุเคราะห์ด้านการสนับสนุนค่าอุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินงาน ตลอดจนให้ความรู้และคำแนะนำอีกด้วย

ขอขอบคุณ บริษัท พีดีโซลูชันส์จำกัด (บริษัทในกลุ่มของ บริษัท แพลน มาร์เก็ตโกลด์จำกัด) ที่ให้ความอนุเคราะห์ด้านอุปกรณ์เครื่องมือและเครื่องวัด สำหรับระบบไฟฟ้าแรงสูง รวมไปถึงการสนับสนุนค่าอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบและคอยให้คำปรึกษาอยู่เสมอ

ขอขอบคุณ พี่ๆ ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงทุกคนที่คอยให้ความช่วยเหลือในการทดสอบ และคำแนะนำมาโดยตลอด ขอขอบคุณเพื่อนๆ น้องๆ และเจ้าหน้าที่ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงทุกคนที่คอยให้คำแนะนำและคอยให้กำลังใจคณะผู้จัดทำมาโดยตลอด นอกจากนี้ผู้จัดทำต้องขอขอบคุณ คุณนครศักดิ์ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการที่ให้ เบิกใช้เครื่องมือ ตลอดจนคุณกมลวรรณ เจ้าหน้าที่ห้องธุรการที่ให้คำแนะนำเกี่ยวกับการเบิก ใบเสร็จของโครงการ

ท้ายนี้คณะผู้จัดทำ ขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดา และครอบครัวซึ่งให้การ สนับสนุนในด้านการเงินและให้กำลังใจอีกทั้งเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านการ จัดหาอุปกรณ์ต่างๆ ในการทำโครงการครั้งนี้จนสำเร็จได้ด้วยดี จึงขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

คณะผู้จัดทำ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VII
สารบัญตาราง	XII
บทที่ 1 บทนำ	
1.1ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ	3
1.4วิธีการที่ใช้ในโครงการ	3
1.5แผนการดำเนินโครงการ	3
1.6ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
2.1สายเคเบิลไฟฟ้า	6
2.2ประวัติความเป็นมาของสายเคเบิลไฟฟ้า	6
2.3มาตรฐานสายเคเบิลแรงสูงในระบบจำหน่าย	7
2.4เคเบิลใต้ดิน	8
2.4.1 โครงสร้างสายเคเบิล	8
2.5 ฉนวนของสายเคเบิลใต้ดิน	10
2.5.1 วัสดุพอลิเมอร์	10
2.5.2 พอลิเอทิลีน	11
2.5.3 ฉนวนพอลิเอทิลีนแบบเชื่อมขวาง	12
2.5.4 ฉนวนเอทิลีนพรอพิลีน	12
2.6 การออกแบบและผลิตสายเคเบิล	14
2.6.1 ทฤษฎีในการออกแบบ	14

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.7 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบสายเคเบิลแรงสูง	18
2.7.2 การจำแนกชนิดของดิสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิล	19
2.7.3 สนามไฟฟ้าในสายเคเบิลใต้ดิน	21
2.7.4 ความเครียดสนามไฟฟ้า (Electrical field stress)	24
2.7.5 การควบคุมสนามไฟฟ้าของสายเคเบิล	25
2.8 การต่อลงดินของสายเคเบิล (Grounding)	27
2.8.1 ประเภทของการต่อลงดิน	28
2.8.2 ปฏิกิริยาการที่ผิวเปลือก	30
2.8.3 ความสูญเสียของเปลือกผิวและอาร์มเมอร์	31
2.8.4 การคำนวณหาความสูญเสียของเปลือกผิวและอาร์มเมอร์	31
2.9 การเดินทางของคลื่นในสายเคเบิลใต้ดิน	36
2.9.1 การคำนวณหาตำแหน่งเมื่อตรวจจบบึงด้านเดียว	37
2.9.2 การคำนวณหาตำแหน่งเมื่อตรวจจบบึงสองด้าน	38
บทที่ 3 การออกแบบการทดลอง	
3.1 การวิเคราะห์รูปแบบสนามไฟฟ้าของสายเคเบิลใต้ดิน	39
3.1.1 โครงสร้างพื้นฐาน	40
3.1.2 โครงสร้างที่ใช้ในการจำลองสนามไฟฟ้า	41
3.2 การทดลองในห้องปฏิบัติการ	46
3.3 การปฏิบัติการนอกสถานที่	53
3.4 การศึกษาดูงานนอกสถานที่	56
บทที่ 4 การวิเคราะห์ผลการทดลอง	
4.1 ผลการจำลองและการวิเคราะห์ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าของสายเคเบิลใต้ดิน	57
4.2 ผลและการวิเคราะห์ผลการทดลองในห้องปฏิบัติการ	70
4.2.1 ศึกษาพฤติกรรมของคลื่นเดินทางเมื่อไม่ต่อลงดิน	70
4.2.2 ศึกษาพฤติกรรมของคลื่นเดินทางเมื่อต่อลงดิน	76

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3 ผลการปฏิบัติการนอกสถานที่	96
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการทดลอง	100
5.2 ข้อเสนอแนะ	101
5.2.1 อุปสรรคและปัญหาที่พบจากการทดลอง	101
5.2.2 ข้อเสนอแนะ	101
เอกสารอ้างอิง	
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก บทความทางวิชาการ	107
ภาคผนวก ข อุปกรณ์การทดลอง	112
ประวัติผู้เขียน	



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างสายเคเบิล	8
2.2 โครงสร้างพอลิเอทิลีน	12
2.3 ทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม	14
2.4 การเปรียบเทียบสนามไฟฟ้ากระจาย และความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด	16
2.5 กราฟความสัมพันธ์ U_b และ E_{r1} ในเทอม R_1/R_2	18
2.6 เส้นสนามไฟฟ้าและเส้นศักย์เท่าที่อเล็กโตรดทรงกลม	22
2.7 เปรียบเทียบสนามไฟฟ้าสำหรับอเล็กโตรดที่มีรูปทรงต่างกัน	23
2.8 ค่าคาปาซิแตนซ์ของสายเคเบิล	25
2.9 สนามไฟฟ้าที่ไม่มีการแก้ไข	26
2.10 การแก้ไขสนามไฟฟ้าแบบ REFLECTIVE STRESS CONTROL	26
2.11 การแก้ไขสนามไฟฟ้าแบบ CAPACITIVE STRESS CONTROL	27
2.12 การต่อลงดินทั้งสองด้าน (BOTH-ENDS BONDING)	28
2.13 การต่อลงดินแบบหลายจุด (MULTI-POINTS BONDING)	28
2.14 การต่อลงดินข้างเดียว (SINGLE-POINT BONDING)	29
2.15 การต่อลงดินแบบกึ่งกลาง (MIDDLE-POINT BONDING)	29
2.16 การต่อลงดินแบบไขว้ (CROSS-BONDING)	30
2.17 การตรวจจับสัญญาณการเดินทางของคลื่นในสายเคเบิล (ด้านเดียว)	37
2.18 การตรวจจับสัญญาณการเดินทางของคลื่นในสายเคเบิล (สองด้าน)	38
3.1 โครงสร้างของสายเคเบิลใต้ดินแบบปกติ	7
3.2 โครงสร้างของสายเคเบิลใต้ดินแบบมีฟองอากาศ	7
3.3 โครงสร้างของขั้วต่อสายเคเบิลใต้ดิน	40
3.4 โครงสร้างของขั้วต่อสายเคเบิลใต้ดินแบบ REFLECTIVE STRESS CONTROL	40
3.5 โครงสร้างหัวต่อของหม้อแปลงในฉนวนน้ำมันและน้ำ	40
3.6 โครงสร้างที่ใช้ในการจำลองสนามไฟฟ้าของสายเคเบิลใต้ดินแบบปกติ	41
3.7 โครงสร้างที่ใช้ในการจำลองสนามไฟฟ้าของสายเคเบิลใต้ดินแบบมีฟองอากาศในฉนวน	42
3.8 โครงสร้างที่ใช้ในการจำลองสนามไฟฟ้าของขั้วต่อสายเคเบิลใต้ดิน	43
3.9 โครงสร้างที่ใช้ในการจำลองสนามไฟฟ้าของขั้วต่อสายเคเบิลใต้ดิน	44
3.10 โครงสร้างที่ใช้ในการจำลองสนามไฟฟ้าของหัวต่อของหม้อแปลงในฉนวนน้ำมันและน้ำ	45
3.11 เครื่องตรวจจับดิสชาร์จบางส่วน (PD ANALYZER)	46

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.12 คอมพิวเตอร์ที่มีโปรแกรมของเครื่อง PD ANALYZER	47
3.13 สายนำสัญญาณ RG-58	47
3.14 เครื่องกำเนิดสัญญาณ PD (GKI-2)	48
3.15 HFCT SENSOR	48
3.16 HVPD LONGSHOT™ DIAGNOSTIC OLPD TEST UNIT	49
3.17 วงจรการทดลองของสาย RG-58 ระยะ 300 เมตร ตำแหน่งความบกพร่องที่ต้นสาย	50
3.18 การทดลองของสาย RG-58 ระยะ 300 เมตร ตำแหน่งความบกพร่องที่ต้นสาย	50
3.19 รูปวงจรการทดลองของสายเคเบิล RG-58 กรณีเปลี่ยนตำแหน่งความบกพร่อง	50
3.20 รูปวงจรการทดลองของสายเคเบิล RG-58 กรณีเปลี่ยนตำแหน่งความบกพร่อง	51
3.21 รูปวงจรการทดลองกรณีต่อลงดินสองด้าน (BOTH END BONDING SYSTEM)	51
3.22 รูปวงจรการทดลองกรณีต่อลงดิน 2 ด้าน (BOTH END BONDING SYSTEM)	52
3.23 รูปวงจรการทดลองกรณีต่อลงดินแบบไขว้ (CROSS BONDING SYSTEM)	52
3.24 รูปวงจรการทดลองกรณีต่อลงดินแบบไขว้	52
3.25 องค์ประกอบของอุปกรณ์ CPDA-60 และตัวควบคุม	53
3.26 PROCESSING UNIT	54
3.27 HIGH VOLTAGE DIVIDER	54
3.28 HIGH VOLTAGE SOURCE	54
3.29 ภายในสถานีการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคบ้านโป่ง	55
3.30 วงจรที่ใช้ในการทดสอบ	55
4.1 การจำลองสนามไฟฟ้าของสายเคเบิลใต้ดินแบบปกติ	57
4.2 กราฟจากการจำลองสนามไฟฟ้าของสายเคเบิลใต้ดินแบบปกติ	57
4.3 การจำลองสนามไฟฟ้าของสายเคเบิลใต้ดินแบบมีฟองอากาศในฉนวน	58
4.4 กราฟจากการจำลองสนามไฟฟ้าของสายเคเบิลใต้ดินแบบมีฟองอากาศในฉนวน	58
4.5 การจำลองสนามไฟฟ้าของข้อต่อเคเบิลใต้ดิน (JOINT)	59
4.6 บริเวณที่เกิดสนามไฟฟ้าสูงสุดของข้อต่อเคเบิลใต้ดิน (JOINT)	59
4.7 การจำลองสนามไฟฟ้าของข้อต่อเคเบิลใต้ดิน (JOINT)	60
4.8 บริเวณที่เกิดสนามไฟฟ้าสูงสุดของข้อต่อเคเบิลใต้ดิน (JOINT)	60
4.9 ผลการกระจายตัวเส้นสนามไฟฟ้า กรณีไม่มี STRESS CONTROL TUBE	61
4.10 ผลการจำลองสนามไฟฟ้าหัวต่อ กรณีไม่มี STRESS CONTROL TUBE	61

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.11 กราฟสนามไฟฟ้าที่ได้จากการจำลองกรณีไม่มี STRESS CONTROL TUBE	62
4.12 การกระจายตัวเส้นสนามไฟฟ้ากรณีมี STRESS CONTROL TUBE ที่ $\epsilon_r = 5$	62
4.13 ผลการจำลองกรณีมี STRESS CONTROL TUBE ที่ $\epsilon_r = 5$	63
4.14 กราฟสนามไฟฟ้าที่ได้จากการจำลองกรณีมี STRESS CONTROL TUBE ที่ $\epsilon_r = 5$	63
4.15 การกระจายตัวเส้นสนามไฟฟ้า กรณีมี STRESS CONTROL TUBE ที่ $\epsilon_r = 35$	64
4.16 ผลการจำลองสนามไฟฟ้ากรณีมี STRESS CONTROL TUBE ที่ $\epsilon_r = 35$	64
4.17 กราฟสนามไฟฟ้าที่ได้จากการจำลอง กรณีมี STRESS CONTROL TUBE ที่ $\epsilon_r = 35$	65
4.18 การกระจายตัวเส้นสนามไฟฟ้า กรณีมี STRESS CONTROL TUBE ที่ $\epsilon_r = 100$	65
4.19 ผลการจำลองสนามไฟฟ้ากรณีมี STRESS CONTROL TUBE ที่ $\epsilon_r = 100$	66
4.20 กราฟสนามไฟฟ้าที่ได้จากการจำลองหัวต่อของสายเคเบิลใต้ดิน	66
4.21 การกระจายตัวเส้นสนามไฟฟ้ากรณีมี STRESS CONTROL TUBE ที่ $\epsilon_r = 500$	66
4.22 ผลการจำลองสนามไฟฟ้า กรณีมี STRESS CONTROL TUBE ที่ $\epsilon_r = 500$	67
4.23 กราฟสนามไฟฟ้าที่ได้จากการจำลอง กรณีมี STRESS CONTROL TUBE ที่ $\epsilon_r = 500$	67
4.24 การกระจายตัวเส้นสนามไฟฟ้าภายในหัวต่อสายเคเบิลสำหรับการทดสอบ PD (AIR)	67
4.25 ผลการจำลองสนามไฟฟ้าภายในหัวต่อสายเคเบิลสำหรับการทดสอบ PD (AIR)	68
4.26 การกระจายตัวเส้นสนามไฟฟ้าภายในหัวต่อสายเคเบิลสำหรับการทดสอบ PD (OIL)	68
4.27 ผลการจำลองสนามไฟฟ้าภายในหัวต่อสายเคเบิลสำหรับการทดสอบ PD (OIL)	69
4.28 การกระจายตัวเส้นสนามไฟฟ้าภายในหัวต่อสายเคเบิลสำหรับการทดสอบ PD (WATER)	69
4.29 ผลการจำลองสนามไฟฟ้าภายในหัวต่อสายเคเบิลสำหรับการทดสอบ PD (WATER)	70
4.30 ลักษณะการเดินทางของคลื่นเมื่อเปิดวงจร	70
4.31 กราฟแสดงระยะเวลาที่คลื่นเดินทางมายังต้นสาย (ความยาวสาย 100 เมตร)	71
4.32 กราฟแสดงระยะเวลาที่คลื่นเดินทางไปยังปลายสายและสะท้อนกลับมายังอุปกรณ์ตรวจจับ	72
4.33 กราฟแสดงการเดินทางของคลื่นเมื่อลัดวงจร (ความยาวสาย 100 เมตร)	74
4.34 กราฟแสดงระยะเวลาที่คลื่นเดินทางมายังต้นสาย เมื่อลัดวงจร	75
4.35 กราฟแสดงระยะเวลาที่คลื่นเดินทางเมื่อลัดวงจร โดยเดินทางไปยังปลายสาย	75
4.36 วงจรการทดลองความบกพร่อง 100 เมตร	76
4.37 กราฟผลการทดลอง เนื่องจากการต่อลงดินด้านเดียว	77
4.38 ลักษณะการเดินทางของคลื่นที่ความยาวสายต่างกัน	78
4.39 วงจรจำลองการทดลอง เมื่อต่อลงดินด้านเดียวที่ความยาวสาย 300 เมตร	78

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.40 กราฟผลการทดลองเมื่อเปลี่ยนตำแหน่งความบกพร่อง ความยาวสาย 300 เมตร	79
4.41 ลักษณะคลื่นเดินทางเมื่อจุดที่เกิดความบกพร่องเปลี่ยนแปลง	80
4.42 วงจรจำลองการทดลองการต่อลงดินแบบ BOTH END BONDING	81
4.43 กราฟผลการทดลองที่ความบกพร่องต้นสายและตรวจจับสัญญาณ ณ จุดต่อลงดิน	81
4.44 ลักษณะคลื่นเดินทาง เมื่อเกิดความบกพร่องที่ 0 เมตร	82
4.45 กราฟแสดงผลการทดลอง เมื่อเกิดความบกพร่องที่ 100 เมตรของสาย	83
4.46 ลักษณะคลื่นเดินทาง เมื่อเกิดความบกพร่องที่ 100 เมตร	83
4.47 กราฟผลการทดลองเมื่อเกิดความบกพร่อง ที่ 200 เมตร	84
4.48 ลักษณะคลื่นเดินทาง เมื่อเกิดความบกพร่องที่ 200 เมตร	84
4.49 กราฟแสดงผลเมื่อเกิดความบกพร่องปลายสาย	85
4.50 ลักษณะคลื่นเดินทาง เมื่อเกิดความบกพร่องที่ 300 เมตร	86
4.51 วงจรจำลองการทดลอง เมื่อต่อลงดินแบบ CROSS BONDING	87
4.52 กราฟผลการทดลองจากการต่อลงดินแบบไขว้บ่อนสัญญาณที่ต้นสาย	88
4.53 เมื่อเกิดความบกพร่องที่ 0 เมตร ตรวจจับสัญญาณ 0 และ 100 เมตร	89
4.54 เมื่อเกิดความบกพร่องที่ 0 เมตร ตรวจจับสัญญาณ 0 และ 200 เมตร	89
4.55 เมื่อเกิดความบกพร่องที่ 0 เมตร ตรวจจับสัญญาณ 0 และ 300 เมตร	90
4.56 กราฟผลการทดลองเมื่อเกิดความบกพร่องที่ 100 เมตร	91
4.57 กราฟผลการทดลองเมื่อเกิดความบกพร่องที่ 200 เมตร	93
4.58 กราฟผลการทดลองเมื่อเกิดความบกพร่องที่ 200 เมตร	94
4.59 ผลการทดลองตรวจสอบความบกพร่องของ เฟส A	96
4.60 ผลการทดลองการสุมเพื่อตรวจความบกพร่องของ เฟส A	97
4.61 ผลการทดลองการสุมเพื่อตรวจความบกพร่องของ เฟส B	97
4.62 ผลการทดลองการสุมเพื่อตรวจความบกพร่องของ เฟส C	98
ข.1 สาย Coaxial RG-58	113
ข.2 สายเคเบิล RG-58 ที่ใช้ในกาทดลอง	113
ข.3 เครื่องกำเนิด PD (PULSE GENERATOR)	114
ข.4 รูปคลื่นพัลส์ของเครื่อง Generator PD (GKI-2)	114
ข.5 เครื่อง PD Analyzer	115
ข.6 เครื่อง HFCT Sensor	116

ข.7 Transfer impedance for HFCT 50/100	116
ข.8 Notebook (ที่มี HVPD's Software)	117
ข.9 เครื่อง HVPD Longshot™ Diagnostic OLPD Test Unit	117
ข.10 ชุดการทดสอบความบกพร่องของสายเคเบิลใต้ดิน (CPDA)	119
ข.11 วงจรโมเดล	121



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แผนการดำเนินงาน	4
2.1 คุณสมบัติของ EPR	13
2.2 คุณสมบัติ EPR เมื่อผ่านการวัลคาไนซ์	13
2.3 อธิบายตัวแปรในการคำนวณในสมการที่ 2.25 ถึง 2.39	34
3.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองเคเบิลแบบปกติ	41
3.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองเคเบิลแบบมีฟองอากาศในฉนวน	42
3.3 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองข้อต่อเคเบิลใต้ดิน	43
3.4 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองหัวต่อเคเบิลใต้ดิน มี stress control tube	44
3.5 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองสนามไฟฟ้า	45
3.6 ตารางแสดงค่าที่ควรศึกษาก่อนทำการทดสอบ	55
3.7 ตารางการออกแบบการวัดผลการปฏิบัติการนอกสถานที่	56
4.1 ผลการทดลอง เมื่อต่อลงดินด้านเดียว เกิดความบกพร่องที่ 100 เมตร	80
4.2 ผลการทดลองเมื่อต่อลงดินด้านเดียว ความยาวสาย 300 เมตร	81
4.3 ผลการทดลองเมื่อต่อลงดินทั้งสองด้าน	84
4.4 ผลการทดลองเมื่อต่อลงดินแบบไขว้ (Cross bonding)	89
4.5 ผลการทดลองการสุ่มเพื่อตรวจความบกพร่องของเคเบิล	92
ข.1 คุณสมบัติทั่วไปของสาย Coaxial RG 58	112
ข.2 หัวเชื่อมต่อที่ใช้กับสายโคแอกซ์	113
ข.3 พารามิเตอร์ทางเทคนิคที่สำคัญของอุปกรณ์ PD Analyzer	114
ข.4 พารามิเตอร์ทางเทคนิคที่สำคัญของอุปกรณ์ CPDA	116
ข.5 เปรียบเทียบผลการคำนวณระบบไฟฟ้าที่ระดับแตกต่างกัน	128

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ในยุคปัจจุบันการเติบโตและการแข่งขันทางด้านเศรษฐกิจได้เพิ่มมากขึ้น ความต้องการของมนุษย์ในสังคมที่มีอยู่อย่างไม่จำกัดเป็นเสมือนแรงขับเคลื่อนให้เกิดการเรียนรู้เพื่อสร้างองค์ความรู้ใหม่และนำไปสู่การพัฒนาเทคโนโลยีด้านต่างๆ อยู่ตลอดเวลา การเติบโตทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ต่างก็มีพื้นฐานมาจากความต้องการของมนุษย์ทั้งสิ้น ความต้องการความสะดวกสบาย ความเจริญ ความศิวิไลซ์ได้กลายเป็นจุดเริ่มต้นของการศึกษาค้นคว้าและการทำวิจัยเพื่อพัฒนาองค์ความรู้ใหม่ๆ การขยายตัวทางด้านเศรษฐกิจและอุตสาหกรรมการผลิต อุตสาหกรรมการท่องเที่ยว การคมนาคมขนส่ง หรือแม้แต่การดำเนินชีวิตในยุคปัจจุบัน ทุกกระบวนการล้วนต้องพึ่งพาอาศัยทรัพยากรทางด้านพลังงานในการดำเนินการ การเติบโตและการพัฒนาต่างๆ รวมไปถึงความต้องการปัจจัยพื้นฐานของมนุษย์มีมากขึ้น ส่งผลให้มีความต้องการใช้ทรัพยากรทางด้านพลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นการคำนึงถึงการพัฒนาาระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าระดับแรงดันสูงเพื่อที่จะทำให้ระบบส่งจ่ายมีความน่าเชื่อถือสูง มีความปลอดภัย มีการจัดการที่เป็นระบบและสามารถสร้างทัศนียภาพให้มีความสวยงามจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง สำหรับประเทศไทยการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าแรงดันสูงนิยมส่งจ่ายแบบเหนือดิน (Overhead Line) เนื่องจากมีค่าใช้จ่ายในการลงทุนไม่สูงมากนัก หากแต่มีผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมซึ่งรวมถึงการไปดบังทัศนียภาพที่สวยงาม ดังนั้นเพื่อให้อันเนื่องมาจากปัจจัยเหล่านี้หมดไป รวมไปถึงการสร้างภาพลักษณ์ทางด้านทัศนียภาพของเมืองใหญ่ๆ หรือสถานที่ท่องเที่ยวที่สำคัญให้สวยงามจึงมีการเปลี่ยนมาใช้ระบบสายเคเบิลใต้ดิน (Underground Cable) แทนการใช้ระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าแบบเหนือดิน อย่างไรก็ตามการใช้สายเคเบิลใต้ดินสำหรับระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าระดับแรงดันสูง มักจะพบปัญหาเกี่ยวกับความบกพร่องของสายเคเบิลใต้ดิน ได้แก่ การเกิดความบกพร่องของเคเบิลใต้ดินขณะทำการผลิต ขณะขนส่ง ขณะติดตั้งและหลังการติดตั้ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในขั้นตอนหลังการติดตั้งซึ่งเป็นปัญหาที่พบมากในปัจจุบัน ความบกพร่องของเคเบิลใต้ดินที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่มักเกิดจากการเสื่อมสภาพของฉนวนของสายเคเบิลใต้ดิน การเกิดความเครียดสนามไฟฟ้าสูงอันเนื่องมาจากฉนวนมีความบกพร่อง ซึ่งจะนำไปสู่การเกิดเบรกดาว์น และอาจจะเบ็ดได้ ส่งผลให้อายุการใช้งานของเคเบิลใต้ดินลดลง และยังรวมถึงค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงรักษาสายเคเบิล

การเสื่อมสภาพของสายเคเบิลใต้ดินเมื่อมีการใช้งานมักเกิดจากปัจจัยทางด้านสภาพแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ความชื้น ความดัน ความเป็นกรด-เบส ซึ่งส่งผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างทางเคมีของตัวฉนวน รวมไปถึงปัจจัยที่มีสาเหตุมาจากขั้นตอนการติดตั้ง เช่น การเชื่อมต่อระหว่างสายเคเบิลใต้ดิน การใช้ขั้วต่อที่ไม่เหมาะสม นำไปสู่การเกิดความเครียดทางสนามไฟฟ้าสูง ซึ่งเป็นส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนึ่งที่ทำให้เกิดการเบรกดาวนในที่สุด นอกเหนือจากปัจจัยข้างต้น อายุการใช้งานของเคเบิลใต้ดินก็ส่งผลให้เกิดความบกพร่องของเคเบิลใต้ดินได้ ดังนั้นการศึกษาและทำความเข้าใจถึงปัญหาที่เกิดขึ้นเกี่ยวกับความบกพร่องของเคเบิลใต้ดิน จะนำไปสู่การวิเคราะห์ถึงแนวทางในการตรวจสอบถึงสาเหตุและปัจจัยที่เป็นตัวกระตุ้นให้เกิดความบกพร่องของสายเคเบิลใต้ดินได้ การศึกษาความบกพร่องของสายเคเบิลใต้ดิน จะมุ่งเน้นไปที่วิธีการตรวจสอบเพื่อที่จะได้เข้าใจและสามารถป้องกันหรือแก้ไข เพื่อหลีกเลี่ยงความบกพร่องของสายเคเบิลใต้ดินที่อาจส่งผลความรุนแรงต่อระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าและอาจส่งผลต่อความน่าเชื่อถือของระบบอีกด้วย ในขั้นตอนการติดตั้งการหลีกเลี่ยงการเชื่อมต่อระหว่างสายเคเบิลใต้ดินเป็นเรื่องที่ทำได้ยาก เพราะในกระบวนการผลิต ผู้ผลิตไม่สามารถทำการผลิตสายเคเบิลที่มีความยาวมากๆ ได้ด้วยข้อจำกัดหลายๆ อย่าง ดังนั้นการทดสอบเป็นการตรวจจับปัญหาที่เกิดขึ้นจากการเชื่อมต่อระหว่างสายเคเบิลใต้ดินได้ จุดระหว่างรอยต่อของสายเคเบิลใต้ดินมักจะเป็นจุดที่มีความเครียดของสนามไฟฟ้าสูง เนื่องจากบริเวณดังกล่าวมีจุดที่ฉนวนของเคเบิลใต้ดินฉีกขาด หรืออาจถูกกระทำด้านกายภาพส่งผลให้โครงสร้างภายในฉนวนของตัวเคเบิลมีความบกพร่อง ทำให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าสูงได้ หากบริเวณนั้นมีฝุ่น หรือสิ่งสกปรกเจือปนอยู่รวมไปถึงความชื้นเนื่องจากบริเวณติดตั้ง อุณหภูมิ หรือภาวะความดันสูง ก็อาจเป็นปัจจัยกระตุ้นที่นำไปสู่การเกิดเบรกดาวนของเคเบิลใต้ดินได้ การทดสอบสายเคเบิลใต้ดินจะช่วยให้ทราบถึงบริเวณที่มีความบกพร่องหรือทำให้ทราบสาเหตุและปัจจัยที่ทำให้เกิดความบกพร่องของสายเคเบิลใต้ดินได้ นำไปสู่การวิเคราะห์เพื่อเตรียมพร้อมรับมือและการหาแนวทางแก้ปัญหาต่อไปเพื่อเป็นการป้องกันไม่ให้เกิดความเสียหายตามมา

ปริญญาณิพนธ์นี้ได้ทำการจำลองความบกพร่องของเคเบิลแรงสูงใต้ดินฉนวนพอลิเอทิลีนแบบเชื่อมขวาง (Cross-Linked Polyethylene: XLPE) ที่เกิดจากการเชื่อมต่อสายเคเบิลขณะทำการติดตั้ง โดยจำลองและศึกษาพฤติกรรมของคลื่นเดินทางเมื่อเกิดความบกพร่องในสายเคเบิล RG-58 ภายใต้สภาวะที่เอื้อต่อการจำลองที่เหมาะสม

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อทำการศึกษารูปแบบปัญหาที่เกิดขึ้นจากการเชื่อมต่อของสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินฉนวน XLPE สำหรับระบบจำหน่าย 22 กิโลโวลต์
2. เพื่อทำการศึกษาพฤติกรรมของคลื่นเดินทางเมื่อเกิดความบกพร่องของสายเคเบิลใต้ดิน
3. เพื่อทำการจำลองคลื่นเดินทางเมื่อเกิดความบกพร่องจากการเชื่อมต่อของสายเคเบิลใต้ดิน จำลองคลื่นเดินทางโดยการใช้สายเคเบิล RG-58
4. สามารถทำการวิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อให้เกิดความรู้ความเข้าใจมากขึ้น ตลอดจนสามารถนำความรู้และผลการทดลองที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในอนาคต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการงาน

1. ศึกษาทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเกิดความบกพร่องในสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินฉนวน XLPE สำหรับระบบจำหน่าย กิโลโวลต์
2. ทำการศึกษาพฤติกรรมของคลื่นเดินทางเมื่อเกิดความบกพร่องของสายเคเบิลใต้ดิน
3. ทำการจำลองคลื่นเดินทางเมื่อเกิดความบกพร่องจากการเชื่อมต่อของสายเคเบิลใต้ดินโดยใช้สายเคเบิล RG-58

1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงการงาน

1. ทำการศึกษาค้นคว้าข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับเคเบิลแรงสูงใต้ดินฉนวน XLPE ทั้งในส่วนของคุณสมบัติโครงสร้างตัวเคเบิล โครงสร้างพื้นฐานของฉนวน ตลอดจนคุณลักษณะพิเศษต่างๆ
2. ทำการศึกษาค้นคว้าปัญหาที่เกิดขึ้นในระบบเคเบิลแรงสูงใต้ดินที่ส่งผลกระทบต่อความเสียหายต่อระบบไฟฟ้า
3. ทำการศึกษาระเบียบการต่อลงดินของเคเบิลใต้ดินและปรากฏการณ์ของผิวเปลือก
4. ทำการศึกษาค้นคว้าพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับคลื่นเดินทางเมื่อเกิดความบกพร่องของสายเคเบิลใต้ดิน
5. ทำการออกแบบและวิเคราะห์ผลของสนามไฟฟ้าเมื่อเกิดความบกพร่องจากการเชื่อมต่อของสายเคเบิลใต้ดิน
6. ทำการจำลองและศึกษาพฤติกรรมของคลื่นเดินทางเมื่อเกิดความบกพร่องจากการเชื่อมต่อของสายเคเบิลใต้ดิน จำลองโดยใช้สายเคเบิล RG-58
7. ทำการวิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้จากการจำลองพฤติกรรมของคลื่นเดินทางเมื่อเกิดความบกพร่องจากการเชื่อมต่อของสายเคเบิล RG-58
8. สรุปผลการทดลอง
9. รวบรวมข้อมูลที่ได้จากการทดลอง จัดทำรูปเล่มปริญญานิพนธ์

1.5 แผนการดำเนินโครงการงาน

ทางคณะผู้จัดทำได้ทำการศึกษาค้นคว้าทั้งจากการทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ศึกษาปัญหาที่ส่งผลให้เกิดความบกพร่องของสายเคเบิลใต้ดิน ตลอดจนทำการจำลองและศึกษาพฤติกรรมของคลื่นเดินทางที่เกิดขึ้นขณะสายเคเบิลเกิดความบกพร่อง โดยมีระยะเวลาการดำเนินการตั้งแต่เดือนสิงหาคม พ.ศ. 2559 ถึง เดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2560 รวมเป็นระยะเวลาในการดำเนินการทั้งสิ้น 10 เดือน โดยมีแผนการดำเนินโครงการงานดัง ตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินโครงการ

ขั้นตอนการ ดำเนินการ	ภาคเรียนที่ 1					ภาคเรียนที่ 2				
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย	พ.ค.
1. ศึกษาค้นคว้า ข้อมูลและทฤษฎีที่ เกี่ยวข้อง										
2. ศึกษาปัญหาที่ เกิดขึ้นในระบบ เคเบิลแรงสูงใต้ดิน										
3. ศึกษาประเภท การต่อลงดินของ เคเบิลใต้ดิน										
4. ศึกษาทฤษฎี พื้นฐานของคลื่น เดินทาง										
5. ออกแบบและ วิเคราะห์ผลของ สนามไฟฟ้า										
6. ทำการทดลอง จำลองคลื่น เดินทาง										
7. ทำการ วิเคราะห์ผลการ ทดลอง										
8. สรุปผลการ ทดลอง										

หมายเหตุ : \longleftrightarrow : แทนการทำงานเสร็จสิ้น
: \dashleftarrow : แทนการที่ยังทำงานเสร็จสิ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เกิดความรู้ความเข้าใจปัญหาที่ส่งผลให้เกิดความบกพร่องของสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินฉนวน XLPE สำหรับระบบจำหน่าย 22 กิโลโวลต์
2. ได้รับความรู้และเข้าใจพฤติกรรมของคลื่นเดินทางเมื่อเกิดความบกพร่องจากการเชื่อมต่อของสายเคเบิลใต้ดิน
3. ได้ทำการจำลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมของคลื่นเดินทางเมื่อเกิดความบกพร่องของสายเคเบิลใต้ดิน
4. ได้ทำการทดลองและเรียนรู้การแก้ปัญหา รวมไปถึงการฝึกการทำงานเป็นทีม
5. ได้นำองค์ความรู้ที่ได้ไปเผยแพร่เพื่อเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจทั่วไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

สายเคเบิลได้ถูกนำมาใช้ในการส่งจ่ายและจำหน่ายตั้งแต่ในยุคแรกของอุตสาหกรรมพลังงานไฟฟ้า โดยทั่วไปการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าในระยะทางไกลจะใช้สายส่งเหนือนดิน อย่างไรก็ตามการส่งและการจัดจำหน่ายในพื้นที่ที่มีประชากรหนาแน่นในเมืองส่วนใหญ่จะใช้สายเคเบิลใต้ดิน แม้ว่าจะมีราคาค่าใช้จ่ายแพงกว่าสายส่งเหนือนดิน สายเคเบิลใต้ดินเป็นที่ต้องการในพื้นที่เขตเมือง เนื่องจากความปลอดภัยและความน่าเชื่อถือตลอดจนส่งผลให้ทัศนียภาพสวยงาม ส่งผลให้เกิดการพัฒนาในด้านวัสดุและเทคนิคการผลิตฉนวนเคเบิล การปรับปรุงเทคโนโลยีด้านไฟฟ้าแรงสูงจึงมีความสำคัญในยุคปัจจุบันมีการเพิ่มการขยายโครงข่ายเคเบิลอย่างต่อเนื่องการพิจารณาปัญหาการเกิดความล้มเหลวของสายเคเบิลใต้ดินจะช่วยสร้างความน่าเชื่อถือ ความปลอดภัย และหลีกเลี่ยงความเสียหายที่จะส่งผลกระทบต่อระบบ

2.1 สายเคเบิลไฟฟ้า [1]

สายเคเบิลไฟฟ้าถูกออกแบบมาเพื่อนำกระแสไฟฟ้าและทนต่อแรงดันไฟฟ้าในขณะที่ทำงานที่สถานะต่างๆ การใช้งานของสายเคเบิลไฟฟ้าในระบบจำหน่ายจะมีการใช้งานที่ครอบคลุมหลากหลาย รวมถึงการใช้งานในระบบจำหน่ายเหนือนดิน ระบบไฟฟ้าใต้ดิน ระบบไฟฟ้าใต้น้ำและในเครื่องจักรกลไฟฟ้า ปัจจุบันการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าด้วยระบบสายเคเบิลใต้ดินเป็นที่นิยมและแพร่หลายไปทั่วโลก อาจกล่าวได้ว่าสายเคเบิลใต้ดินเป็นส่วนประกอบที่สำคัญอย่างยิ่งต่อระบบไฟฟ้ากำลัง ในช่วง 2 ศตวรรษที่ผ่านมา ได้มีนักวิจัยเป็นจำนวนมากได้ค้นคว้าและวิจัยเกี่ยวกับการพัฒนาสายเคเบิลใหม่เพื่อให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้นทั้งทางด้านการประยุกต์ใช้งาน การพัฒนาเทคโนโลยีต่างๆ ในการผลิตสายเคเบิลการเลือกวัสดุ พอลิเมอร์มาเป็นฉนวนในสายเคเบิลและการออกแบบสายเคเบิล

2.2 ประวัติความเป็นมาของสายเคเบิลไฟฟ้า [1]

สายเคเบิลไฟฟ้ามีต้นกำเนิดขึ้นในปี ค.ศ.1880 หลังจากที่มีการประดิษฐ์หลอดไฟฟ้า ความต้องการใช้สายเคเบิลในการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าก็เพิ่มมากขึ้นเมื่อพื้นที่ชุมชนเมืองมีการขยายตัวและมีการขึ้นความต้องสายเคเบิลจึงมีมากขึ้นตามไปด้วยในปี ค.ศ.1884 เป็นครั้งแรกที่ได้มีการผลิตสายเคเบิลฉนวนกระดาษชุบน้ำมัน (PILC) ในเชิงพาณิชย์โดยบริษัท Callender Cables สายเคเบิล PILC แรงดันระดับปานกลางจะยังคงมีการใช้งานอยู่จนถึงปัจจุบันเนื่องจากมีความทนทานและความน่าเชื่อถือ

สำหรับบางสาธารณูปโภคสายเคเบิล PILC ยังเป็นส่วนหนึ่งของเครือข่ายระบบจำหน่ายใต้ดิน ตั้งแต่ปี ค.ศ.1800 จนถึงปัจจุบันได้มีการพัฒนาด้านเทคโนโลยีที่เต็มรูปแบบด้วยการประดิษฐ์วัสดุชนิดใหม่ๆ การออกแบบและกระบวนการผลิตในปี ค.ศ.1950 ได้มีการออกแบบสายเคเบิลที่มีความยืดหยุ่นและง่ายต่อการจัดการสำหรับการติดตั้งเมื่อเปรียบเทียบกับสายเคเบิล PILC จะเห็นได้ชัดว่ามีวัสดุประเภทยางหลากหลายรูปแบบถูกนำมาใช้เพื่อผลิตเป็นสายเคเบิล อย่างไรก็ตามในปี ค.ศ.1933 เมื่อพอลิเอทิลีน (Polyethylene, PE) ถูกค้นพบและเริ่มได้รับการยอมรับสำหรับการใช้งานในสายเคเบิลไฟฟ้าสำหรับระบบจำหน่าย โดยในปี ค.ศ.1950 พอลิเอทิลีน ได้รับการยอมรับและเข้ามาแทนที่สายเคเบิลที่ออกแบบมาจากวัสดุประเภทยางในก่อนหน้านี้เกือบทั้งหมด ต่อมาสหรัฐอเมริกาได้มีการผลิตสายเคเบิลพลาสติกที่ทำจาก High Molecular Weight Polyethylene (HMWPE) ขึ้นมาใช้งานสายเคเบิลฉนวนพอลิเอทิลีน (PE) ได้มีการเริ่มใช้งานตั้งแต่ปี ค.ศ.1951 สำหรับระบบจำหน่ายแรงดัน 35 กิโลโวลต์ และมีการนำเสนอใช้สำหรับสายเคเบิลระบบจำหน่ายใต้ดินเป็นครั้งแรกในช่วงปลายทศวรรษ 1960 ต่อมาในปี ค.ศ.1963 ได้มีการประดิษฐ์สายเคเบิลฉนวนพอลิเอทิลีนแบบเชื่อมขวาง (XLPE) ขึ้นมาใช้งานเป็นครั้งแรก สายเคเบิล HMWPE จึงไม่ค่อยมีการนำมาใช้งานเมื่อสายเคเบิลฉนวน XLPE สามารถทำงานในอุณหภูมิที่สูงกว่าสายเคเบิล HMWPE ในปี ค.ศ.1960 สายเคเบิลฉนวนยางเอทิลีนพรอพิลีน (Ethylene Propylene Rubber, EPR) ถูกนำมาใช้สำหรับที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 60 กิโลโวลต์ สายเคเบิลฉนวน EPR จะมีความยืดหยุ่นดีกว่าสายเคเบิลฉนวน PE แต่ยังมีความเสี่ยงต่อการเกิดวอเตอร์ทรีนิง (Water treeing) นอกจากนี้การสูญเสียความเป็นฉนวนของสายเคเบิลฉนวน EPR จะสูงกว่าหรือเทียบเท่ากับสายเคเบิลฉนวน XLPE หรือสายเคเบิลฉนวน Tree Resistant XLPE (Tree-Retardant Cross-Linked Polyethylene, TR XLPEX) ดังนั้นการใช้สายเคเบิลฉนวน EPR ในการติดตั้งใหม่ๆ จะเป็นที่ต้องการน้อยลงจึงเป็นเหตุผลว่าทำไมสายเคเบิลฉนวน EPR ไม่ถูกใช้สำหรับการใช้งานในระบบจำหน่ายไฟฟ้า สายเคเบิลฉนวน EPR จะถูกใช้อย่างกว้างขวางโดยเฉพาะในสหรัฐอเมริกา, อเมริกาใต้และอิตาลี

2.3 มาตรฐานสายเคเบิลแรงสูงในระบบจำหน่าย [1]

มาตรฐานของสายเคเบิลมีการก่อตั้งขึ้นโดยหลายองค์กรโดยเฉพาะในประเทศสหรัฐอเมริกา และแคนาดาที่มีมาตรฐาน Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Association of Edison Illuminating Companies (AEIC), American Society of Testing and Materials (ASTM), Canadian Standards Association (CSA), Canadian Electricity Association (CEA) และ Insulated Cable Engineers Association (ICEA) มาตรฐานที่มีความโดดเด่นที่สุดในระดับนานาชาติ คือ International Electro technical Commission (IEC)

นอกจากนี้ในระบบสาธารณูปโภคจำนวนมากได้เขียนมาตรฐานของตัวเองขึ้นและได้รับการยอมรับระหว่างประเทศ มาตรฐานที่มีอยู่จากหน่วยงานเหล่านี้จะครอบคลุมประเภทของสายเคเบิล

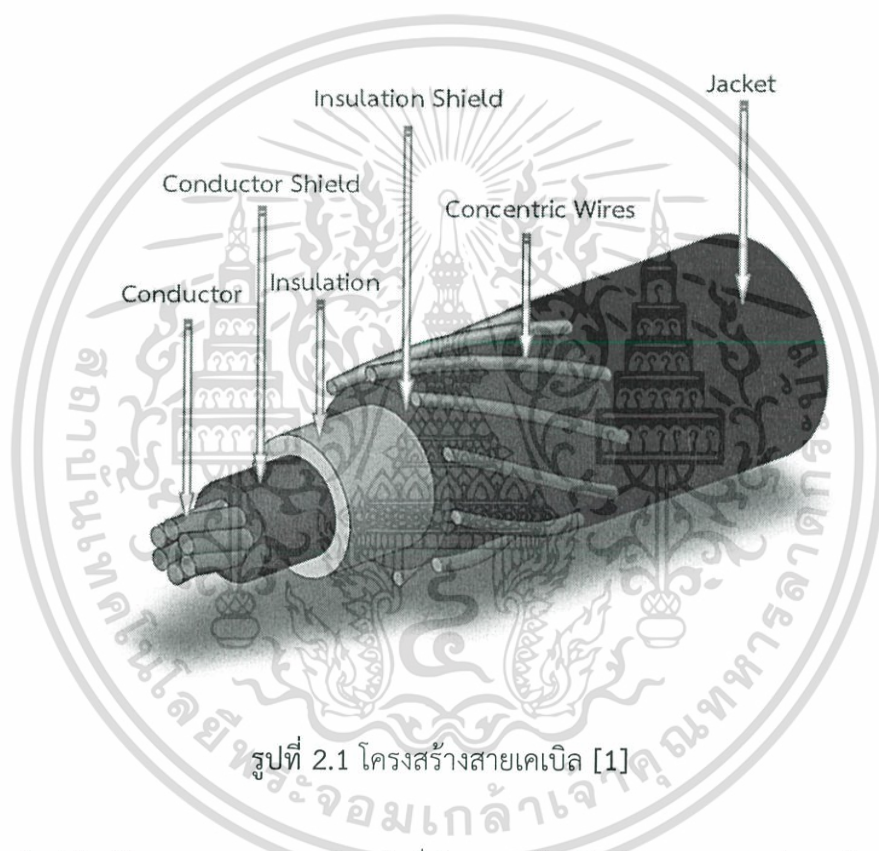
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตลอดจนการออกแบบสายเคเบิลวัสดุสายเคเบิลอุปกรณ์เสริมการติดตั้งการทำงาน และการทดสอบสายเคเบิลรวมถึงตัวชี้วัดบางอย่างสำหรับการตรวจวิเคราะห์

2.4 เคเบิลใต้ดิน [1]

2.4.1 โครงสร้างสายเคเบิล

โครงสร้างพื้นฐานของสายเคเบิลใต้ดินแรงสูงจะประกอบไปด้วยตัวนำ ฉนวน และส่วนห่อหุ้ม ซึ่งรายละเอียดของส่วนต่างๆ จะอธิบายได้ดังนี้



รูปที่ 2.1 โครงสร้างสายเคเบิล [1]

1. ตัวนำไฟฟ้า (Conductor) ทำหน้าที่นำกระแสไฟฟ้าทำจากอะลูมิเนียมหรือทองแดงมีหลายลักษณะดังนี้

1.1 ตัวนำ (Solid Conductor) ใช้เป็นตัวนำของสายไฟฟ้าขนาดเล็ก ไม่นิยมใช้ในสายขนาดใหญ่เนื่องจากการดัดงอทำได้ยาก

1.2 ตัวนำตีเกลียว (Round Strand Conductor) ใช้เป็นตัวนำของสายไฟฟ้าทั่วไปและสายเปลือย

1.3 ตัวนำอัดแน่น (Compact Strand Conductor) ใช้เป็นตัวนำของสายไฟฟ้าหุ้มฉนวนทั่วไปโดยการนำตัวนำตีเกลียวมาบีบอัดให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กลง เมื่อนำไปใช้ในสายหุ้มจะช่วยลดวัสดุที่นำมาหุ้มได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ข้อตัวนำ (Segmental Conductor) ใช้ในสายเคเบิลใต้ดินขนาดใหญ่ที่ต้องการให้มี Current-Carrying Capacity สูง แต่ละชั้นจะประกอบด้วยตัวนำทีละเกลียวแล้วอัดให้เป็นรูปข้อโดยแต่ละข้อจะหุ้มด้วยฉนวน ข้อดีของตัวนำชนิดนี้ก็คือมี ตัวต้านทานกระแสสลับ (AC Resistance) ต่ำ เนื่องจากการพันสายในแต่ละข้อมีการไขว้เข้าออกระหว่างส่วนนอกและส่วนในของตัวนำทำให้ผลกระทบบที่ผิววัสดุมีค่าต่ำ

1.5 ท่อกลางตัวนำ (Hollow Core Conductor) ใช้เป็นตัวนำของเคเบิลที่ระบายความร้อน โดยใช้น้ำมัน (Oil Fill Cable) โดยใช้ท่อกลางตัวนำในการส่งน้ำมัน ปัจจุบันมีการนำมาใช้กับสายเคเบิลใต้ดินที่ใช้ Solid Dielectric ที่ต้องการนำกระแสสูงๆ โดยใช้น้ำหรืออากาศผ่านเข้าไปในท่อกลางตัวนำเพื่อระบายความร้อน

2. ชั้นห่อหุ้มตัวนำ (Conductor Screen) ทำจากวัสดุกึ่งตัวนำซึ่งอาจเป็นผ้าอาบคาร์บอนหรือเป็นชั้นอัดแน่นของสารสังเคราะห์พวกพลาสติกผสมกับตัวนำ มีหน้าที่ทำให้ผิวสัมผัสของตัวนำกับฉนวนเรียบไม่มีช่องว่างที่มีศักดาไฟฟ้าสูงตกคร่อม ซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดการดีสชาร์จบางส่วน

3. ฉนวน (Insulation) เป็นส่วนที่สำคัญที่สุดของสายเคเบิลใต้ดินมีหน้าที่กันไม่ให้กระแสไฟฟ้าเกิดการรั่วไหลหรือลัดวงจรจนเกิดการสูญเสียต่อระบบไฟฟ้าและอาจเกิดอันตรายต่อบุคคลที่สัมผัสได้ คุณภาพของสายเคเบิลจะขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ทำฉนวนซึ่งมีอยู่ด้วยกันหลายชนิดเช่น Polyvinyl Chloride (PVC) หรือ Polyethylene (PE) ซึ่งนิยมใช้ในระบบแรงต่ำ, Oil Impregnated Paper, Cross Linked Polyethylene (XLPE) และ Ethylene Propylene Rubber (EPR) ซึ่งนิยมใช้ในระบบแรงสูง

4. เปลือกหุ้มฉนวน (Insulation Screen) ทำหน้าที่เช่นเดียวกับคือช่วยลดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมบริเวณผิวสัมผัสของฉนวนและเปลือกหุ้มโลหะ วัสดุที่ใช้ทำเปลือกหุ้มฉนวน จะเหมือนกับเปลือกหุ้มตัวนำ

5. Metallic Screen ทำหน้าที่เป็นกราวด์สำหรับสายไฟฟ้าแรงสูงและเป็นทางให้กระแสไฟฟ้าไหลกลับในกรณีที่เกิดการลัดวงจรบางครั้ง Metallic ยังทำหน้าที่เป็นตัวช่วยป้องกันแรงทางกลหรือทำหน้าที่เป็นชั้นกันน้ำในกรณีของสายเคเบิลใต้น้ำ (Submarine Cable) หรือทำหน้าที่รักษาความดันภายในสำหรับเคเบิลที่ใช้น้ำมันระบายความร้อน Metallic Screen อาจเป็นแถบหรือพันด้วยทองแดงหรืออะลูมิเนียมหรืออาจจะเป็นปลอกตะกั่ว (Lead Sheath) หรือ ปลอกอะลูมิเนียมลูกฟูก (Corrugate Aluminum Sheath)

6. Reinforcement หรือ Armor เป็นชั้นที่เสริมเพื่อให้สายเคเบิลมีความทนทานต่อแรงทางกลจากภายนอกที่อาจจะทำให้สายเคเบิลชำรุดเสียหาย โดยเฉพาะสายเคเบิลใต้น้ำหรือสายเคเบิลที่ฝังดินโดยตรง บางครั้งยังใช้เป็นตัวรับแรงดึงในการลากสายด้วยวัสดุที่ใช้ทำ ได้แก่ แถบเหล็ก พันด้วยเหล็กหรือพันด้วยอะลูมิเนียม

7. Water Blocking Tape เป็นชั้นที่เสริมขึ้นมาในกรณีของสายเคเบิลใต้ดินแรงสูงที่ใช้ในบริเวณที่ชื้นและเพื่อป้องกันน้ำไหลเข้าไปตามแนวสายเคเบิลในกรณีที่ปลอกหุ้มของสายเคเบิลมีการชำรุดจากการลากสาย ทำให้ส่วนที่เป็นฉนวนสัมผัสกับน้ำเป็นระยะทางยาว สายเคเบิลจึงมีโอกาสชำรุดสูง Water Blocking Tape นี้ทำจากสารสังเคราะห์และมี สารที่ดูดซึมน้ำเข้าไปแล้วขยายตัว มีลักษณะเป็นผงคล้ายแป้ง (Swell able powder) โดยทั่วไปจะอยู่ระหว่างชั้นหุ้มฉนวนกับปลอกหุ้มของสายเคเบิล

8. Laminated Sheath เป็นชั้นกันน้ำตามแนวขวางในสายเคเบิลแรงสูงมีลักษณะเป็นแถบโลหะหุ้มด้วยพลาสติกทั้งสองหน้า จากนั้นนำมาห่อรอบ Ground Screen โดยพลาสติกที่ผิวนอกและผิวในของแถบจะถูกละลายให้ติดกันเป็นเนื้อเดียวทำให้สามารถป้องกันไม่ให้โมเลกุลของน้ำแพร่ผ่านเข้าไปยังฉนวนได้

9. Non Metallic Sheath หรือที่เรียกกันโดยทั่วไปว่าปลอกหุ้มทำหน้าที่ป้องกันแรงกระแทกเสียดสีต่างๆ ขณะติดตั้งสายเคเบิลวัสดุที่ใช้ทำมี PVE, PE เป็นต้น

2.5 ฉนวนของสายเคเบิลใต้ดิน [2]

อุปกรณ์ต่างๆ ในระบบไฟฟ้าแรงสูงส่วนใหญ่จะมีจุดที่ต้องมุ่งเน้นให้ความสำคัญมากที่สุดก็คือ ฉนวน เพราะหากฉนวนของอุปกรณ์เหล่านั้นมีความบกพร่องก็จะทำให้เกิดความเสียหายต่อตัวอุปกรณ์ตลอดจนต่อระบบไฟฟ้าแรงสูง ดังนั้นการทำความเข้าใจพื้นฐานของวัสดุที่นำมาใช้ผลิตฉนวนนั้นจึงเป็นสิ่งจำเป็น ฉนวนของสายเคเบิลใต้ดินแรงดันสูงนิยมผลิตมาจากวัสดุดังต่อไปนี้

2.5.1 วัสดุพอลิเมอร์

พอลิเมอร์หรือมาโครโมเลกุล (Macromolecule) หมายถึงโมเลกุลขนาดใหญ่ที่ประกอบด้วยหน่วยของโมเลกุลซ้ำๆ กันมาต่อกันเป็นสายโซ่ยาวและกรรมวิธีที่ทำให้หน่วยย่อยต่างๆ มาต่อกันเรียกว่าการเกิดพอลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization) หน่วยย่อยที่เล็กที่สุดของพอลิเมอร์คือโมโนเมอร์ (Monomer) ซึ่งทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันจนทำให้เกิดเป็นพันธะโควาเลนต์ไปเชื่อมหน่วยย่อยๆ โมโนเมอร์เข้าด้วยกันและเกิดเป็นพอลิเมอร์ ตัวกำหนดความคงทนความแข็งแรงและแรงยึดระหว่างโมเลกุลของวัสดุพอลิเมอร์คือโมโนเมอร์ที่ซ้ำๆ กันอยู่ในห่วงโซ่โมเลกุลชนิดของโมโนเมอร์และความยาวของสายโซ่โมเลกุล วัสดุพอลิเมอร์ส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์ซึ่งมีธาตุคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบหลักแต่มีพอลิเมอร์บางประเภทที่เป็นสารอนินทรีย์ตัวอย่างเช่น ซิลิโคน (Silicone) ซึ่งประกอบไปด้วยธาตุซิลิกอนและออกซิเจน เป็นต้น ในธรรมชาติมีสารหลายชนิดที่มีลักษณะเป็นพอลิเมอร์เช่น โปรตีน, ดีเอ็นเอ, เซลลูโลสหรืออำพัน เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถสังเคราะห์พอลิเมอร์ได้ทั้งจากวัสดุธรรมชาติและจากสารเคมี เช่น ยางไนลอนและพลาสติกประเภทต่างๆ เป็นต้น พอลิเมอร์ทั้งสองชนิดนี้ได้เข้ามามีบทบาทมากมายในชีวิตประจำวันและมีการใช้ประโยชน์อย่างหลากหลาย พอลิเมอร์สามารถแบ่งตามลักษณะที่ตอบสนองต่ออุณหภูมิได้เป็นสองประเภทคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) คือพอลิเมอร์ที่สามารถหลอมเหลวหรือเปลี่ยนรูปร่างได้เมื่อได้รับความร้อนและแข็งตัวเมื่อเย็นตัวลง พอลิเมอร์ประเภทนี้สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้โดยที่คุณสมบัติไม่เปลี่ยนแปลง โดยทั่วไปแล้วเทอร์โมพลาสติกประกอบไปด้วยสายโซ่ยาวของคาร์บอน บางครั้งอาจมีไนโตรเจน ออกซิเจนหรือซัลเฟอร์ ตัวอย่างของเทอร์โมพลาสติก เช่น พอลิเอทิลีน (PE), พอลิสไตรีน (PS), พอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC), อะคริลิกพอลิคาร์บอเนต (Acrylic polycarbonate) และไนลอน (Nylon) เป็นต้น

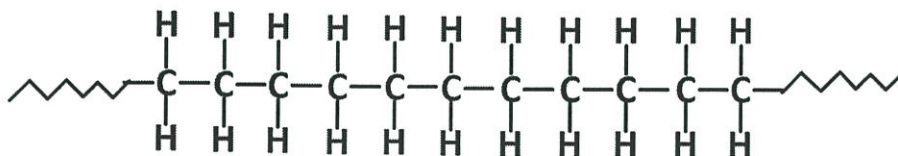
2. เทอร์โมเซต (Thermoset) คือพอลิเมอร์ที่สามารถคงรูปร่างถาวรจากการบ่ม (Sector Cured) ด้วยปฏิกิริยาเคมีหรือด้วยความร้อน เป็นพลาสติกที่ไม่สามารถทำให้หลอมเหลวได้ด้วยความร้อน เมื่อได้รับความร้อนจะสลายตัวหรือไหม้ โครงสร้างโดยทั่วไปจะประกอบด้วยอะตอมของคาร์บอนบางครั้งอาจมีไนโตรเจน ออกซิเจนหรือซัลเฟอร์ที่เกิดพันธะโควาเลนต์แบบโครงข่าย หรือเกิดการเชื่อมขวาง (Cross-Linked) แล้วทำให้เกิดเป็นของแข็งซึ่งสามารถทนความร้อนได้ดี ตัวอย่างของเทอร์โมเซต เช่น อีพอกซี (Epoxy), พอลิเอสเตอ์ (Polyester) เป็นต้น

2.5.2 พอลิเอทิลีน

พอลิเอทิลีน เป็นวัสดุพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่ได้รับความนิยมมากเนื่องจากมีเสถียรภาพผลิตง่ายเป็นฉนวนไฟฟ้าได้ดี และมีความคงทนในสภาวะใช้งานภายใต้อุณหภูมิปกติ ต่อมาในปี ค.ศ. 1933 ได้มีการพัฒนาวัสดุพอลิเอทิลีนให้เป็นวัสดุหลักในการผลิตเป็นฉนวนของสายเคเบิลสำหรับการใช้งานที่ความถี่สูง นอกจากนี้คุณสมบัติทางกลของวัสดุพอลิเอทิลีนก็ยังขึ้นอยู่กับองค์ประกอบต่างๆ ของโมเลกุล ได้แก่ น้ำหนักโมเลกุลขอบเขตความยาวของสายโซ่พอลิเมอร์โครงสร้างของผลึก ในปัจจุบันสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภทดังนี้

1. พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (Low Density Polyethylene: LDPE)
2. พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene: HDPE)
3. พอลิเอทิลีนเชิงเส้นความหนาแน่นต่ำ (Linear Low-Density Polyethylene: LLDPE)

พอลิเอทิลีนแต่ละประเภทถูกนำไปใช้งานแตกต่างกันตามความเหมาะสมของงานและขึ้นอยู่กับความต้องการของผู้ใช้ วัสดุพอลิเอทิลีนนิยมนำไปใช้เป็นฉนวนในสายเคเบิลอย่างกว้างขวางมากที่สุดคือพอลิเอทิลีนแบบเชื่อมขวาง พื้นฐานทางโมเลกุลของพอลิเอทิลีนโดยปกติอยู่ในรูปของห่วงโซ่โมเลกุลที่ประกอบด้วยโมโนเมอร์ของคาร์บอนหนึ่งอะตอม และโมโนเมอร์ของไฮโดรเจนสองอะตอมเชื่อมต่อกันเป็นสายโซ่ยาว วัสดุประกอบเอทิลีนมีรูปแบบทางโมเลกุลคือ C_2H_4 หรือ $CH_2=CH_2$ โดยผ่านกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชันซึ่งเป็นกระบวนการเกิดพอลิเมอร์จากการรวมตัวกันของโมโนเมอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 โครงสร้างพอลิเอทิลีน [2]

2.5.3 ฉนวนพอลิเอทิลีนแบบเชื่อมขวาง (Cross-Linked Polyethylene, XLPE)

ฉนวน XLPE เป็นการปรับปรุงคุณสมบัติพื้นฐานของพอลิเมอร์ ให้มีความแข็งแรงต่ออุณหภูมิ 120-150 องศาเซลเซียส ทนต่อสารเคมีเพิ่มขึ้น สามารถทำงานที่อุณหภูมิต่ำได้ ทนต่อผลกระทบจากแรงดึง รอยขีดข่วนและทนต่อการแตกหักเพิ่มขึ้น ฉนวน XLPE เกือบทั้งหมดมีการใช้งานสำหรับสายไฟและสายเคเบิลฉนวน XLPE มีอุณหภูมิตัวนำสูงสุดถึง 90 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิที่สามารถทนได้มากที่สุดที่ 140 องศาเซลเซียส ขึ้นอยู่กับมาตรฐานที่ใช้ ฉนวน XLPE มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ดีเยี่ยม ทำให้มีประโยชน์สำหรับการใช้งานในระดับแรงดันไฟฟ้าปานกลาง 1-69 กิโลโวลต์ สายไฟฟ้าแรงสูงได้ถึง 380 กิโลโวลต์ และอีกหลายร้อยกิโลโวลต์ดีซี การปรับเปลี่ยนโครงสร้างพอลิเมอร์ทำในระหว่างกระบวนการผลิต ส่งผลที่ดียิ่งขึ้นสำหรับการใช้งานแรงดันปานกลางและสายที่ต้องการความเร็วสูง ในกรณีที่มีข้อจำกัดในการบำรุงรักษาหรือกระบวนการระบายความร้อนภายใน ฉนวน XLPE สามารถแก้ไขข้อจำกัด โดยผลการแพร่ของก๊าซที่เกิดระหว่างกระบวนการเชื่อมขวาง มีประโยชน์อย่างยิ่งโดยเฉพาะสายไฟฟ้าแรงสูงและแรงดันไฟฟ้าสูงมาก

2.5.4 ฉนวนเอทิลีนพรอพิลีน (Ethylene Propylene Rubber, EPR)

ฉนวน EPR คือยางสังเคราะห์ที่ใกล้เคียงกับยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน (Ethylene-Propylene Diene Rubber, EPDM) โดยที่ยางเอทิลีนโพรพิลีน (Ethylene propylene rubber, EPM) เป็นพอลิเอทิลีนและโพรพิลีนขณะที่ยาง EPDM เป็นเทอร์โพลิเมอร์ (terpolymer) ของเอทิลีนโพรพิลีนและสารประกอบ (ที่มีสองพันธะเป็นองค์ประกอบ) นับตั้งแต่เริ่มมีการผลิตในปี ค.ศ.1960 ได้มีการผลิตเพิ่มมากขึ้นถึง 870 ตันต่อปี เนื่องจากการพัฒนาเทคโนโลยีที่ช่วยให้พอลิเมอร์และตัวเร่งปฏิกิริยาพอลิเมอร์มีคุณสมบัติที่ดีขึ้นเพื่อการใช้งานเฉพาะที่เหมาะสม

ฉนวน EPR มีประโยชน์มากเนื่องจากทนต่อความร้อน ปฏิกิริยาออกซิเดชัน ความดัน และอายุที่คงที่ เนื่องจากสภาพอากาศและฉนวน EPR ไม่มีขั้วทำให้เป็นตัวต้านทานไฟฟ้าที่ดี โครงสร้างทางเคมีเป็นแบบการจัดเรียงเรียงอะตอมไม่เป็นระเบียบ (Amorphous) หรือเป็นผลึกคุณภาพต่ำที่มีความยืดหยุ่นที่อุณหภูมิต่ำ มีจุดเยือกแข็งประมาณ -60 องศาเซลเซียส สามารถทนต่อความร้อนได้ถึง 130 องศาเซลเซียสได้เมื่อผสมตัวเร่งกำมะถัน และทนต่อความร้อนที่ 160 องศาเซลเซียสได้เมื่อผสม

สารประกอบเปอร์ออกไซด์ ทนต่อการบิบัติโดยเฉพาะเมื่ออุณหภูมิสูงถ้าผสมกำมะถันหรือเปอร์ออกไซด์

ฉนวน EPR ตอบสนองดีต่อ Filler (สารที่เติมเพื่อปรับปรุงยางหรือเพื่อลดต้นทุนการผลิต) สูง และ Plasticizer (สารที่เติมในยางเพื่อลดความแข็งเปราะเพิ่มสมบัติการใช้งานที่อุณหภูมิทำให้ดีขึ้น) สามารถพัฒนาให้ทนต่อแรงดึงสูงและการฉีกขาด ทนต่อการกัดกร่อนที่ดีเยี่ยม ตลอดจนมีการปรับปรุงให้คงทนเมื่อน้ำมันมีปริมาณมากขึ้นและไม่ไวไฟ สรุปคุณสมบัติทั่วไปของฉนวน EPR แสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของ EPR [2]

Property Type	EPR Property
1. ความเหนียว ที่ 125 °C	-200
2. เปอร์เซ็นต์ Ethylene ต่อน้ำหนัก	5-80
3. เปอร์เซ็นต์สารประกอบต่อน้ำหนัก	-15
4. ความถ่วงจำเพาะ	0.855-0.880

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติ EPR เมื่อผ่านการวัลคาไนซ์ [2]

Property type	EPR Property
1 ความแข็ง	30-95
2 ความทนแรงดึง (MPa)	7-21
3 การยืด	100-600%
4 การบิบัติ	20-60%
5 อุณหภูมิใช้งาน (°C)	-50 to +160
6 การทนต่อการฉีกขาด	พอใช้ -ดี
7 ทนต่อรอยขีดข่วน	พอใช้ -ดี
8 ความยืดหยุ่น	พอใช้ -ดี
9 คุณสมบัติทางไฟฟ้า	ฉนวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 การออกแบบและผลิตสายเคเบิล [3]

2.6.1 ทฤษฎีในการออกแบบ

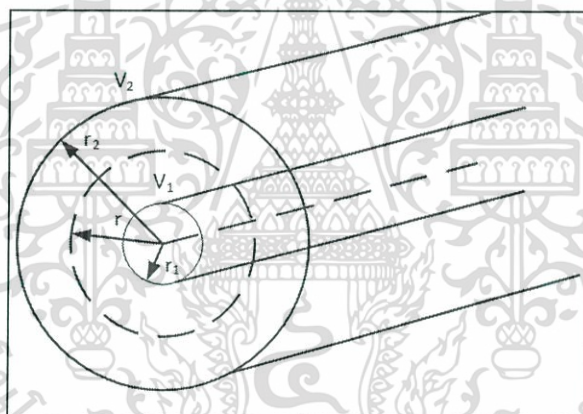
ในการออกแบบและผลิตสายเคเบิลจะต้องทำการศึกษาทฤษฎีพื้นฐาน เพื่อในการออกแบบประกอบด้วย ซึ่งทฤษฎีที่ใช้ในการออกแบบสายเคเบิล มีดังต่อไปนี้

1. ทรงกระบอกซ้อนกันแนบร่วม

เมื่ออิเล็กโตรดมีลักษณะเป็นทรงกระบอกซ้อนกันแนบร่วม เส้นฟลักซ์ไฟฟ้าจะอยู่ในแนวแกนรัศมีและพื้นผิวของทรงกระบอกก็คือพื้นผิวดักยไฟฟ้าเท่า ดังนั้นอ้างอิงจากสมการที่หนึ่งของแมกซ์เวลล์

$$Q = \oint D dA \quad (2.1)$$

สำหรับทรงกระบอกซ้อนกันแนบร่วมมีความยาวคือ l รัศมีคือ r ($r_1 \leq r \leq r_2$) ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ทรงกระบอกแนบร่วม [4]

จากสมการที่ (2.1) เมื่อ $E = D/\epsilon$ จะได้

$$E_r = \frac{Q}{2\pi\epsilon l} \cdot \frac{1}{r} \quad (2.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันที่ป้อนระหว่างทรงกระบอกทั้งสอง

$$U = \int_{r_1}^{r_2} E_r dr = \frac{Q}{2\pi\epsilon l} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r} \quad (2.3)$$

$$U = \frac{Q}{2\pi\epsilon l} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (2.4)$$

จะได้ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ $r_1 \leq r \leq r_2$

$$E_r = \frac{U}{r \ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (2.5)$$

ดังนั้นความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด E_{\max} จะเกิดขึ้นที่ผิวของทรงกระบอกภายใน กล่าวคือ

$$E_{\max} = E_{r_1} = \frac{U}{r_1 \ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (2.6)$$

จากนิยามแฟกเตอร์สนาม $\eta^* = \frac{E_{av}}{E_{\max}}$ โดย $E_{av} = \frac{U}{r_2 - r_1}$

จะได้

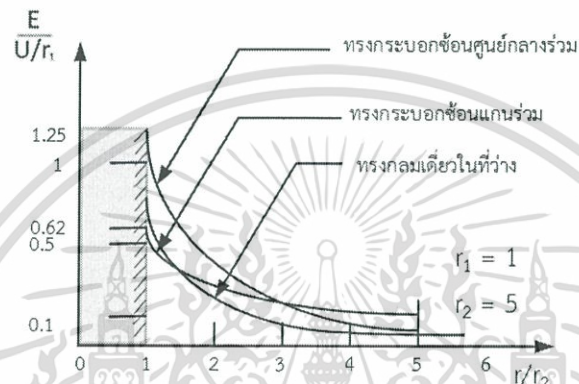
$$\eta^* = \frac{r_1 \ln \frac{r_2}{r_1}}{r_2 - r_1} \quad (2.7)$$

ความจุไฟฟ้าทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม คำนวณจาก $Q = CU$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$C = \frac{2\pi\epsilon}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (2.8)$$

ความเครียดสนามไฟฟ้ากระจาย และความเครียดสนามไฟฟ้าของอเล็กโตรดทั้ง 3 แบบ เปรียบเทียบกับความเครียดสนามไฟฟ้าของทรงกลมเดี่ยวดังรูป 2.4



รูปที่ 2.4 การเปรียบเทียบสนามไฟฟ้ากระจาย และความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดของอเล็กโตรดทั้ง 3 แบบเปรียบเทียบกับความเครียดสนามไฟฟ้าของทรงกลมเดี่ยว [4]

จากการเปรียบเทียบสนามไฟฟ้าสูงสุด ซึ่งเป็นตัวกำหนดมิติของระบบระหว่างอเล็กโตรดทรงกลมกับอเล็กโตรดทรงกระบอก จะพบว่าอเล็กโตรดแบบทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม มีค่า E_{\max} ต่ำกว่า จึงเหมาะกับการใช้งานในระบบไฟแรงสูง เช่น สวิตช์เกียร์ที่ใช้ก๊าซเป็นฉนวนเคเบิล เป็นต้น

2. มิติที่เหมาะสม (Optimum Dimension)

มิติที่เหมาะสมของทรงกลมซ้อนและทรงกระบอกซ้อนการออกแบบใช้มิติที่เหมาะสมหมายถึง มิติที่เล็กที่สุดแต่สามารถทนแรงดันได้สูงสุด ตัวอย่างอเล็กโตรดทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม หรือทรงกลมซ้อนศูนย์กลางร่วม ถ้ากำหนดขนาดอเล็กโตรดภายนอกให้ กล่าวคือกำหนดรัศมี r_2 หากอเล็กโตรดทรงกระบอกหรือทรงกลมภายในมีรัศมีใกล้เคียงกับอเล็กโตรดภายนอก ระยะห่างระหว่างอเล็กโตรดภายนอกกับภายใน คือ $d = r_2 - r_1$ มีค่าน้อยทำให้เกิดการเบรกดาวน์ได้ง่าย แต่ถ้าลดขนาดรัศมีให้มีขนาดเล็กลงเพื่อให้ได้ระยะช่องแคบมากขึ้น การลดรัศมีอเล็กโตรดภายในมากๆ ย่อมทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิวตัวนำอันในสูงขึ้น จนความเครียดสนามไฟฟ้าถึงค่าวิกฤต ทำให้เกิดโคโรน่าได้ง่าย แสดงว่าต้องมีระยะช่องแคบที่พอเหมาะค่าหนึ่ง คือรัศมีอยู่ระหว่าง 0 กับ r_2 ที่ทำให้ทน

แรงดันเบรกดาวนั้ได้สูงสุดโดยไม่เกิดโคโรนาก่อน ทรงกระบอกซ้อนแกนร่วมที่พอเหมาะแรงดันเบรกดาวนั้ คือ

$$U_b = E_b r_1 \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (2.9)$$

มิติที่เหมาะสมของ r_1 เมื่อกำหนดให้ r_2 คงที่ คำนวณโดย

$$\frac{dU_b}{dr_1} = 0, r_2 \text{ คงตัว} \quad (2.10)$$

$$\frac{dU_b}{dr_1} = E_b \ln \frac{r_2}{r_1} = 0 \quad (2.11)$$

มิติที่เหมาะสมของทรงกระบอกซ้อนแกนร่วมคือ

$$\ln \frac{r_2}{r_1} = e \quad (2.12)$$

และ

$$E_{r_1, \text{opt}} = E_{r_1, \text{max}} = \frac{U}{r_1} \quad (2.13)$$

แสดงว่า

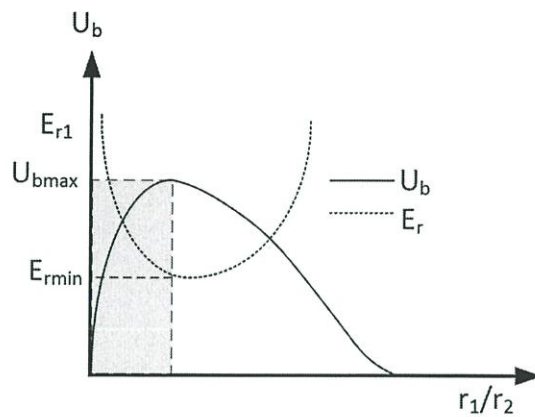
$$U_{b, \text{max}} = E_b r_1 \quad (2.14)$$

ความสัมพันธ์ U_b และ U_{r_1} ในเทอม r_1/r_2 ของทรงกระบอกซ้อนแกนร่วมจะเห็นได้ว่า

$$\frac{r_1}{r_2} = \frac{1}{e} = 0.368 \quad (2.15)$$

ดังนั้นค่ามิติที่พอเหมาะจะได้ว่า ค่าแรงดันเบรกดาวนั้ U_b มีค่าสูงสุด หรือความเครียดสนามไฟฟ้า E_{r_1} มีค่าต่ำสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 กราฟความสัมพันธ์ U_b และ E_r ในเทอม r_1/r_2 [4]

จากรูปแสดงค่า U_b และ E_r ในเทอม r_1/r_2 โดยสมมติให้ E_b มีค่าคงตัวในทางปฏิบัติจริง E_b ยังขึ้นกับ r_1 ด้วย คือ E_b ของ r_1 เล็กจะมีค่าสูงกว่า E_b ของ r_2 มีค่าโตกว่า ดังนั้นยอดสูงสุด $E_b = f(r_1)$ จะเลื่อนไปทาง r_1 เล็กลง

2.7 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบสายเคเบิลแรงสูง [4]

เมื่อทำการศึกษาทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการออกแบบเคเบิลแล้ว สิ่งที่ต้องคำนึงถึงต่อมาก็คือ ทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบเคเบิล เพื่อช่วยตรวจสอบ ยืนยันและสร้างความมั่นใจให้กับผู้ใช้เคเบิล ดังนั้นจึงควรมีความรู้ความเข้าใจในทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบสำหรับเคเบิลแรงสูง ซึ่งสามารถแบ่งออกได้ ดังต่อไปนี้

2.7.1 การเบรกดาวน์ (Breakdown)

การเบรกดาวน์ในทางไฟฟ้านั้น หมายถึงการที่บ่อนแรงดันไฟฟ้าที่ค่าๆ หนึ่งให้กับฉนวน ซึ่งมีค่าเกินความสามารถของฉนวนที่สามารถทนแรงดันไฟฟ้า หรือทนต่อสนามไฟฟ้านั้นได้ จึงเกิดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านฉนวนอย่างรุนแรงจนกระทั่งฉนวนนั้นไหม้ไหมว จึงเกิดการเบรกดาวน์ไปในที่สุด การเบรกดาวน์นั้นขึ้นอยู่กับชนิดหรือฉนวนที่ใช้ทำเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้า ดังนั้นถ้าแบ่งการเบรกดาวน์ตามลักษณะการเกิดจะสามารถแบ่งได้ ดังต่อไปนี้

1. การเบรกดาวน์สมบูรณ์ (Completely Breakdown)

การเบรกดาวน์สมบูรณ์ หมายถึงการเกิดเบรกดาวน์ตลอดแถบเชื่อมโยงระหว่างอิเล็กโตรด ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อวัสดุฉนวนสิ้นสภาพการเป็นฉนวน หลังจากเบรกดาวน์เกิดขึ้นในฉนวนแล้วแรงดันจะเหลือน้อยมาก ทำให้มีกระแสไหลมากตามแนวที่เกิดเบรกดาวน์ กระแสเบรกดาวน์นี้จะจำกัดด้วยความต้านทานภายในของตัวจ่ายแรงดันชั่วขณะที่เกิดเบรกดาวน์ขึ้น จะเป็นเวลาเดียวกันกับอาร์คเริ่มเกิด

2. เบรกดาวนึ่งเพียงบางส่วน (Partial Breakdown)

เบรกดาวนึ่งเพียงบางส่วน หรือดิสชาร์จบางส่วนจะเกิดขึ้นในระบบฉนวนที่มีลักษณะไม่สม่ำเสมอสูง ฉนวนที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน หรือมีสิ่งเจือปน ซึ่งทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าบางจุดในบริเวณดังกล่าวของเนื้อฉนวนมีค่าสูงกว่าค่าความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤติ แต่ไม่อาจทำให้เกิดเบรกดาวนึ่งโดยสมบูรณ์ได้หากแต่เกิดเพียงบางส่วนเท่านั้น และยังสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งในสนามไฟฟ้ากระแสสลับและสนามไฟฟ้ากระแสตรง ภายใต้สนามไฟฟ้ากระแสสลับการดิสชาร์จจะเกิดขึ้นซ้ำทุกๆ ไซเคิลของแรงดันโดยปกติจะเกิดขึ้นขณะที่ป้อนแรงดันเพิ่มขึ้นจากศูนย์ไปสู่ค่ายอด ดังนั้นดิสชาร์จบางส่วนอาจแบ่งตามลักษณะการเกิดออกได้เป็น 3 แบบ คือ

2.1 โครนาดิสชาร์จ (Corona Discharge) เกิดจากการที่สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ บนตัวนำที่มีลักษณะแหลมคมหรือมีขอบคมที่อยู่ในอากาศหรือก๊าซที่มีความดันปกติ เมื่อความเครียดของสนามไฟฟ้ามีค่าสูงเกินค่าวิกฤติ (Critical)

2.2 ดิสชาร์จตามผิว (Surface Discharge) เกิดขึ้นระหว่างผิวของตัวนำไฟฟ้ากับผิวของวัสดุฉนวนและเกิดได้เมื่อค่าคาปาซิแตนซ์ตามผิวมีค่าสูงและแรงดันที่ป้อนมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ดังนั้นการดิสชาร์จประเภทนี้จึงเกิดกับไฟฟ้ากระแสสลับในกรณีแรงดันกระชอก (Impulse voltage) เท่านั้น ตัวอย่างบริเวณการเกิดดิสชาร์จตามผิว เช่น ปลายเคเบิลบริเวณที่ปกฉนวนออก

2.3 ดิสชาร์จภายใน (Internal Discharge) เกิดขึ้นได้ภายในวัสดุทั้งที่เป็นของแข็งและของเหลวที่มีฟองอากาศอยู่ภายใน ฉนวนที่มีสิ่งเจือปนอยู่จะเป็นเหตุให้เกิดก๊าซขึ้น หลังจากการเกิดเบรกดาวนึ่งครั้งแรก ฉนวนที่มีฟองอากาศหรือมีสิ่งเจือปนอยู่ภายในก็จะเกิดดิสชาร์จขึ้นได้ดังกล่าว และจะเป็นเหตุให้อายุการใช้งานของฉนวนสั้นลง

2.7.2 การจำแนกชนิดของดิสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิล

การจำแนกชนิดของดิสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิลสามารถแยกออกเป็นชนิดต่างๆ ได้ดังต่อไปนี้

1. การดิสชาร์จที่เกิดจากโพรงอากาศ (Cavity)

การดิสชาร์จที่เกิดจากโพรงอากาศมักจะพบในฉนวนแข็งมีสาเหตุมาจากกระบวนการผลิต เช่น การหล่อ การหุ้ม การดิสชาร์จชนิดนี้จะเกิดขึ้นก่อนค่าแรงดันสูงสุด (Voltage Peak) และจะหยุดการดิสชาร์จเมื่อถึงค่าแรงดันสูงสุดทั้งไซเคิลบวกและลบของแรงดันรูปไซน์ ตำแหน่งของการดิสชาร์จที่แสดงโดยออสซิลโลสโคปมีลักษณะเป็นเส้นตั้งฉากบนรูปวงรีในช่วงที่แสดงผลของการดิสชาร์จบางส่วน ขนาดของการดิสชาร์จจะขึ้นอยู่กับขนาดและจำนวนของโพรงอากาศ การดิสชาร์จชนิดนี้มีผลกระทบจากแรงดันและช่วงเวลาน้อยมาก กล่าวคือเมื่อแรงดันและช่วงเวลาเพิ่มขึ้น ขนาดของการดิสชาร์จบางส่วนจะไม่เปลี่ยนไปมาก

2. การดิสชาร์จที่เกิดจากรอยแตก (Fissure)

การดิสชาร์จชนิดนี้โดยมากจะพบมากในไดอิเล็กตริกที่มีความยืดหยุ่น เช่น เทอร์โมพลาสติก รอยแตกที่เกิดขึ้นจะมีทิศทางเดียวกันกับสนามไฟฟ้า สาเหตุโดยทั่วไปจะเกิดจากสิ่งสกปรกเกิดขึ้นใน ไดอิเล็กตริกและฟองหรือโพรงอากาศที่เกิดใกล้ๆกันปรากฏการณ์นี้จะพบบ่อยในสายเคเบิลที่ใช้งานไป ระยะหนึ่งแล้ว การดิสชาร์จชนิดนี้จะเกิดขึ้นระหว่างค่า แรงดันสูงสุด โดยจะเกิดขึ้นก่อนและหลังค่า แรงดันสูงสุดเล็กน้อย ทั้งไซเคิลบวกและลบของแรงดันรูปคลื่นไซน์ ค่าของการดิสชาร์จบางส่วน นอกจากจะขึ้นอยู่กับแรงดันแล้วยังขึ้นอยู่กับขนาดของรอยแตกด้วย ถ้าหากรอยแตกมีขนาดใหญ่ ขนาดของการดิสชาร์จจะมีมากแต่เมื่อแรงดันสูงมากขึ้นในช่วงเวลาประมาณ 30 นาที ขนาดของการ ดิสชาร์จจะค่อยๆ ลดลง

3. การดิสชาร์จที่เกิดจากเศษวัสดุและสิ่งเจือปน (Resin and contaminants)

เศษวัสดุและสิ่งเจือปนนี้โดยมากจะมีสาเหตุมาจากกระบวนการผลิต เศษวัสดุ (Resin) จะ หมายถึง เศษวัสดุที่ใช้ทำฉนวนที่เกิดการไหม้และตกต่างจากกระบวนการผลิต เช่น วัสดุจำพวกเคมี คอนดักเตอร์ที่ไหม้หรือเศษใยไฟเบอร์ ส่วนสิ่งเจือปน (Contaminants) จะหมายถึงสิ่งเจือปน ภายนอก ได้แก่ ผุ่นละออง เศษผงต่างๆ เศษวัสดุและสิ่งเจือปนจะเข้าไปแทรกอยู่ในไดอิเล็กตริก การ ดิสชาร์จชนิดนี้ยังรวมไปถึงส่วนที่ขรุขระและตำหนิของไดอิเล็กตริกด้วย การดิสชาร์จชนิดนี้จะเกิดขึ้น ในระหว่างค่าแรงดันสูงสุดคล้ายกับชนิดที่ 2 แต่จะเกิดหลังค่าแรงดันสูงสุดไปเล็กน้อยจะมีการ ดิสชาร์จเพิ่มมากขึ้น การดิสชาร์จจะเกิดทั้งไซเคิลบวกและลบของแรงดันรูปคลื่น โดยก่อนที่จะถึงค่า แรงดันสูงสุดของการดิสชาร์จจะน้อยกว่าหลังค่าแรงดันสูงสุด

4. การดิสชาร์จที่เกิดจากการขยายตัวของคาร์บอนแทรค (Carbon Track)

การดิสชาร์จชนิดนี้จะเกิดในสารอินทรีย์ (Organic) ที่มีคาร์บอนและองค์ประกอบของวัสดุที่ใช้ทำฉนวน เช่น คาร์บอนฟิล์มที่ฉีกและฟิล์มเมอร์ต่างๆ สาเหตุโดยทั่วไปเกิดจากการที่ไดอิเล็กตริก มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงมากทำให้เกิดรอยแตกเป็นเส้นเล็กๆ (Treeing) ภายในไดอิเล็กตริก การ ดิสชาร์จชนิดนี้จะเกิดขึ้นที่แรงดันต่ำจนถึงแรงดันสูง โดยเฉพาะก่อนที่จะถึงค่าสูงสุด ขนาดของการ ดิสชาร์จจะมีปริมาณมากทั้งไซเคิลบวกและลบของแรงดันรูปคลื่นไซน์ การดิสชาร์จจะขึ้นอยู่กับขนาด ของคาร์บอนแทรค โดยทั่วไปการดิสชาร์จชนิดนี้จะเกิดขึ้นทุกค่าของแรงดันยกเว้นค่าแรงดันเท่ากับ ศูนย์หรือไม่มีการดิสชาร์จ ขนาดของการดิสชาร์จจะมีขนาดใหญ่และเกือบจะเท่ากันในทุกๆตำแหน่ง แรงดันและช่วงเวลามีผลต่อการขยายตัวของรอยแตกและขนาดของการดิสชาร์จที่แรงดันสูงมากๆ จะ ทำใหขนาดของการดิสชาร์จเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วโดยที่ขนาดของการดิสชาร์จจะไม่คงที่ การทดสอบที่ ช้ำๆ จะทำให้ขนาดของคาร์บอนแทรคขยายตัวใหญ่ขึ้น

จากการจำแนกชนิดของการดิสชาร์จบางส่วน จากความบกพร่องของไดอิเล็กตริกในสาย เคเบิลสามารถใช้เป็นพื้นฐานในการตั้งข้อสันนิษฐานเกี่ยวกับการดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นว่ามีสาเหตุ มาจากอะไร แต่ในทางปฏิบัติจะพบว่า การแสดงผลของการดิสชาร์จบางส่วนจะประกอบด้วยบกพร่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของไดอิเล็กทริกตลอดจนสัญญาณรบกวนจากภายใน ดังนั้นจึงต้องมีวงจรกรอง (Filter) เข้ามาช่วยทำหน้าที่กรองความถี่เพื่อที่จะแสดงขนาดของการดิสชาร์จบางส่วนได้อย่างถูกต้อง

2.7.3 สนามไฟฟ้าในสายเคเบิลใต้ดิน

สนามไฟฟ้า หมายถึง ความเข้มของสนามไฟฟ้าที่เกิดจากอำนาจของประจุที่มีอยู่ในรูปแบบต่างๆ กันในลักษณะสนามไฟฟ้าที่ต่างกัน การวิเคราะห์ผลของสนามไฟฟ้าต่อพฤติกรรมของวัสดุไดอิเล็กทริก (Dielectric materials) เป็นประโยชน์มากเพื่อนำมาออกแบบอุปกรณ์ เครื่องมือให้ใช้งานอย่างถูกต้องปลอดภัย

สนามไฟฟ้าสามารถแบ่งออกได้ 3 ประเภท โดยแบ่งเป็น

1. สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (uniform field)
2. สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย (slightly non-uniform field)
3. สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง (highly non-uniform field)

สำหรับสนามไฟฟ้าที่สม่ำเสมอเมื่อทำการป้อนแรงดันให้กับอิล็กโตรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอจะเกิดการเบรกดาวน หรือ สปาร์คทันทีที่ความเครียดสนามไฟฟ้าระหว่างอิล็กโตรด (ซึ่งเท่ากันทุกจุด) ถึงค่าที่กำหนดค่าหนึ่งโดยประมาณ และจะเกิดการกระแสปะทะเพิ่มขึ้นอย่างมากในทันทีทันใด ส่วนสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ อิล็กโตรดแบบนี้จะความเครียดสนามไฟฟ้าแต่ละจุดไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของจุดนั้นความแตกต่างกัน ณ จุดต่างๆ จะมากหรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับลักษณะของรูปทรงเรขาคณิตของอิล็กโตรดที่ ซึ่งสามารถเขียนเส้นสนามไฟฟ้าและเส้นศักย์ไฟฟ้าได้ดังรูปที่ 2.6 จะเห็นได้ว่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะเกิดขึ้นที่ผิวของอิล็กโตรดทรงกลม ซึ่งอาจจะคำนวณได้จากสมการที่

$$E_{\max} = \frac{U}{d\eta^*} \quad (2.16)$$

โดยที่

η^* คือ แฟกเตอร์สนามไฟฟ้า (field utilization factor) มีค่านิยามว่า

$$\eta^* = \frac{E_{av}}{E_{\max}} \leq 1 \quad (2.17)$$



รูปที่ 2.6 เส้นสนามไฟฟ้าและเส้นศักย์เท่าที่อิเล็กโตรดทรงกลม [4]

จากรูปที่ 2.6 แสดงอิเล็กโตรดทรงกลม ถึงแม้ว่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะมีค่าถึงค่าวิกฤตแล้วก็ตาม แต่จะไม่เกิดการเบรกดาวนหากแต่จะเกิดโคโรนาในบริเวณที่ใกล้ๆ ผิวอิเล็กโตรดซึ่งทำให้บริเวณนี้มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูง ส่วนบริเวณอื่นๆ ยังมีความเครียดสนามไฟฟ้าต่ำทำให้ไม่เกิดโคโรนา ฉะนั้นในบริเวณช่องว่างระหว่างอิเล็กโตรดจะเกิดการดีสชาร์จที่ไม่สมบูรณ์ (คือไม่เกิดตลอดแนวระหว่างอิเล็กโตรด) เรียกว่าการดีสชาร์จบางส่วน (Partial discharge) ปรากฏการณ์นี้อาจจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องหรือเป็นช่วงๆ จึงทำให้มีกระแสไหลในวงจรที่ป้อนแรงดันให้อิเล็กโตรด กระแสนี้จะเกิดขึ้นและวัดได้ก่อนเกิดการเบรกดาวนเรียกว่า กระแสโคโรนา (Corona current) หรือ กระแสดีสชาร์จ การเกิดโคโรนาจะทำให้สนามไฟฟ้าเปลี่ยนไปเพราะมีประจุต่าง (Space charge) ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดยังคำนวณได้จากสมการ 2.16 แต่ η^* จะเปลี่ยนไป ดังนั้นค่าความเครียดเบรกดาวนของฉนวนจะคำนวณจากสมการ 2.16 ไม่ได้ อย่างไรก็ตามสมการ 2.16 อาจใช้ในการคำนวณหาค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่แรงดันโคโรนาเริ่มเกิดได้ดังสมการ

$$E_{\max} = \frac{U_i}{d\eta^*} \quad (2.18)$$

โดยที่

E_{\max} คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าโคโรนาเริ่มเกิด

U_i คือ แรงดันป้อนที่โคโรนาเริ่มเกิด (Corona inception voltage)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ E_{\max} และ U_i เป็นค่าความเครียดสนามไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่โคโรนาเริ่มเกิดตามลำดับ ฉะนั้นสมการ 2.18 จึงใช้ได้เฉพาะกรณีที่ไม่มีประจุค้างระหว่างอิเล็กโทรด (Free of space charge) หรือกล่าวง่าย ๆ ก็คือสมการที่ 2.18 นี้ใช้สำหรับการคำนวณหาความเครียดสนามไฟฟ้าหรือแรงดันเริ่มต้น (Starting voltage , threshold voltage, inception voltage) ซึ่งหมายถึงแรงดันที่ทำให้เริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงในช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรด อาจจะมีการเบรกดาวน (ในกรณีที่มีอิเล็กโทรดเป็นแบบสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ หรือไม่สม่ำเสมอเพียงเล็กน้อย) หรือเป็นแรงดันที่โคโรนาเริ่มเกิด (ในกรณีที่มีอิเล็กโทรดเป็นแบบสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง ค่าแรงดันเบรกดาวนจะมีค่าสูงกว่าค่าแรงดันเริ่มต้น) ค่าแรงดันเริ่มต้นจึงสามารถเขียนในรูปสมการทั่วไปได้ว่า

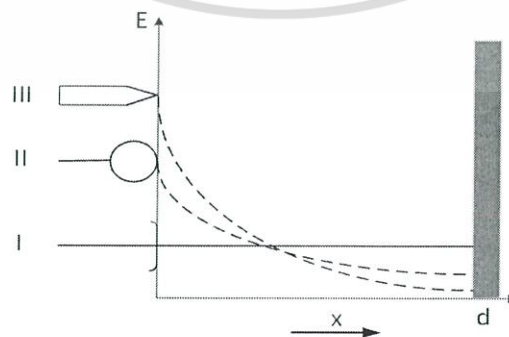
$$U_i = E_i \cdot d\eta^* \quad (2.19)$$

โดยที่

U_i คือ แรงดันเริ่มต้น

E_i คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดจากแรงดันเริ่มต้น U_i

ในกรณีที่อิเล็กโทรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ หรือสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย ค่า U_i คือ U_b และ E_i คือ E_b ถ้าเป็นอิเล็กโทรดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงค่า $U_b > U_i$ ค่าแรงดันเบรกดาวนนี้อาจจะคำนวณได้ง่าย ทั้งนี้เพราะไม่ทราบถึงการกระจายของประจุค้างว่าเป็นอย่างไร ฉะนั้นการคำนวณความคงทนต่อแรงดันทางไฟฟ้าของการฉนวนที่อิเล็กโทรดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงมักจะกำหนดด้วยค่าแรงดันเริ่มต้น หรือความเครียดสนามไฟฟ้าเริ่มต้นเป็นตัวบอกถึงค่าความคงทนการฉนวนต่อแรงดันทางไฟฟ้า อย่างไรก็ตามความคงทนการฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้านั้นนอกจากจะขึ้นอยู่กับลักษณะแห่งรูปทรงเรขาคณิตของอิเล็กโทรด เช่น ระยะห่างของอิเล็กโทรด รัศมีความโค้งของอิเล็กโทรด ลักษณะพื้นผิวของอิเล็กโทรด ตลอดจนขึ้นอยู่กับค่าแฟคเตอร์อื่นๆ อีก



รูปที่ 2.7 เปรียบเทียบสนามไฟฟ้าสำหรับอิเล็กโทรดที่มีรูปทรงต่างกัน [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.4 ความเครียดสนามไฟฟ้า (Electrical field stress) [4]

ความเครียดสนามไฟฟ้ามีความสำคัญมากในการช่วยออกแบบและผลิตเคเบิลใต้ดิน สามารถทำการคำนวณหาค่าความเครียดของสนามไฟฟ้าได้ดังนี้

จากกฎของคูลอมบ์จะได้ว่า

$$F = \frac{Q_1}{4\pi r^2} \cdot \frac{1}{\epsilon} Q_2 \hat{r} \quad (2.20)$$

จากนิยามความหนาแน่นของฟลักซ์ไฟฟ้า เขียนสมการได้ว่า

$$F = \frac{D}{\epsilon} Q_2 \quad (2.21)$$

จากสมการ 2.21 จะเห็นได้ว่า แรงกระทำบนประจุ Q_2 เป็นสัดส่วนโดยตรงกับ D/ϵ ซึ่งมีหน่วยเป็นนิวตันต่อคูลอมบ์ (N/C) กล่าวคือ เป็นค่าแรงต่อหนึ่งหน่วยประจุเป็นแรงในสนามไฟฟ้าหรือเรียกว่าความเครียดสนามไฟฟ้า (Electrical field stress) ซึ่งนิยามด้วยความสัมพันธ์ดังสมการ

$$F = \frac{D}{\epsilon} \quad (2.22)$$

จากกฎของคูลอมบ์จึงเขียนเป็นสมการทั่วไปได้ว่า

$$F = QE \quad (2.23)$$

จะเห็นได้ว่าแรงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเครียดสนามไฟฟ้าในบางกรณีความเข้มสนามไฟฟ้ามีหน่วยเป็น V/mm, kV/cm, kV/m เป็นต้น ในทำนองเดียวกันความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าในตัวนำไอโซโทริกเชิงเส้นจึงเป็นสัดส่วนกับสนามไฟฟ้าสามารถเขียนสมการได้ว่า

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (2.24)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ

J คือ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า เป็นเวกเตอร์ มีหน่วยเป็น A/m^2

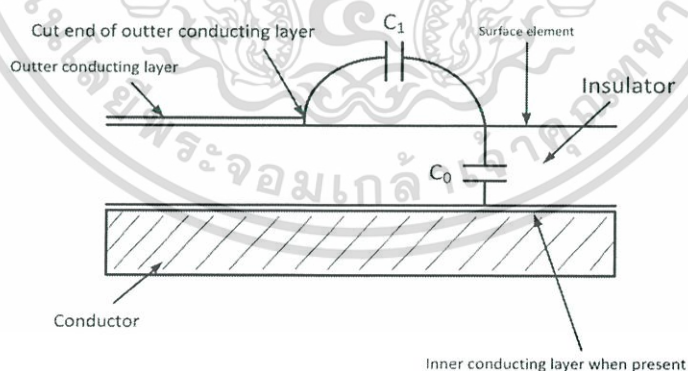
σ คือ สภาพนำของตัวนำ มีหน่วยเป็น $S/m = \text{Siemens/meter} = 1/\rho$

ρ คือ สภาพต้านทาน เป็น $\Omega \cdot m$

ความเครียดสนามไฟฟ้าถือเป็นพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญ ต่อการฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้า หรือระบบไฟฟ้าแรงสูง ความผิดพร่องที่เกิดขึ้นในระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าส่วนใหญ่จะเนื่องมาจาก ความล้มเหลวของฉนวน อันเนื่องมาจากความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนนั่นเอง

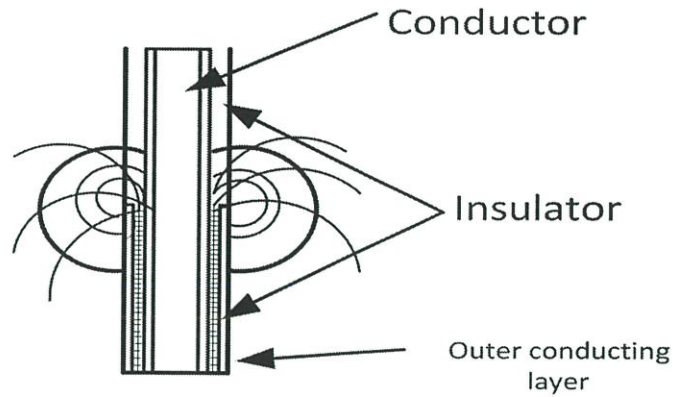
2.7.5 การควบคุมสนามไฟฟ้าของสายเคเบิล [5]

ในการทดสอบฉนวนของสายเคเบิล จะทำการป้อนแรงดันทดสอบ ระหว่างตัวนำ และชั้นกึ่งตัวนำนอก โดยป้อนแรงดันสูงเข้าที่ตัวนำ และชั้นกึ่งตัวนำนอกจากเป็นกราวด์ ในการทดสอบสายเคเบิลที่ไม่มีขั้วต่อที่พิเศษ ถ้าทำการทดสอบดังกล่าวจะเกิดการรวบไฟตามผิวขึ้น เนื่องจากระยะห่างระหว่างแรงดันสูงกับกราวด์น้อยมาก ปัญหาที่เกิดขึ้นนี้สามารถแก้ไขได้ โดยการเพิ่มระยะห่างระหว่างแรงดันกับกราวด์ โดยการตัดชั้นกึ่งตัวนำนอกบางส่วนออก แต่ปัญหาที่เกิดขึ้นตามมาก็คือสนามไฟฟ้าที่ขอบของชั้นกึ่งกระแสตัวนำนอกจะเกิดความไม่สม่ำเสมอสูง ดังรูปที่ 2.8 (ในสายเคเบิลปกติสนามไฟฟ้าจะกระจายอยู่อย่างสม่ำเสมอในฉนวน ระหว่างตัวนำและชั้นกึ่งตัวนำนอก) ซึ่งจะนำไปสู่การเกิดเบรกดาวน์ในฉนวนได้ จึงจำเป็นต้องควบคุมสนามไฟฟ้าบริเวณนั้น ให้เกิดความไม่สม่ำเสมอให้น้อยที่สุด



รูปที่ 2.8 ค่าคาปาซิแตนซ์ของสายเคเบิล [5]

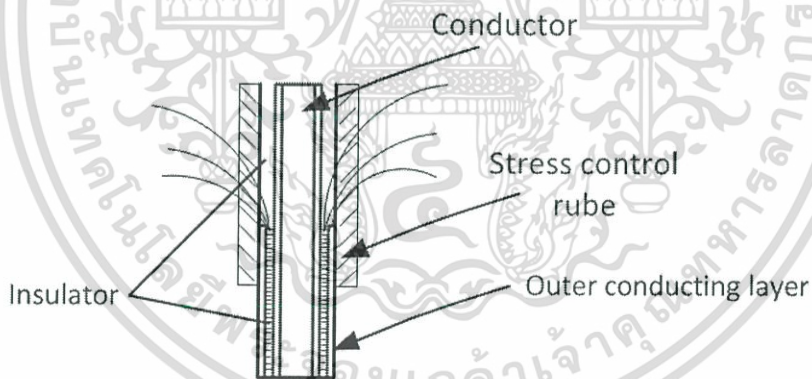
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 สนามไฟฟ้าที่ไม่มีการแก้ไข [5]

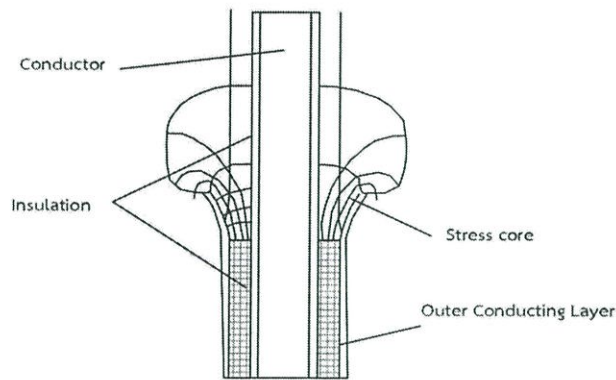
ถ้ารอบๆ สายเคเบิลเป็นอากาศค่า C_1 จะน้อยมากเมื่อเทียบกับค่า C_0 จะทำให้แรงดันเริ่มต้นของการเบรกดาวนมีค่าต่ำ ทำให้เบรกดาวนเกิดขึ้นได้ง่าย ในการควบคุมจึงต้องทำให้อัตราส่วนระหว่าง C_1 ต่อ C_0 มีค่ามาก นั่นคือทำให้ C_1 เพิ่มขึ้นหรือ C_0 ลดลง

สำหรับการเพิ่ม C_1 จะใช้วิธีที่เรียกว่า Reflective Stress Control ทำได้โดยการเติมชั้นฉนวนให้มีค่าไดอิเล็กตริกสูงๆ ไว้รอบๆ สายเคเบิล ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 การแก้ไขสนามไฟฟ้าแบบ Reflective Stress Control [5]

สำหรับการเพิ่ม C_0 จะใช้วิธีที่เรียกว่า Capacitive Stress Control ทำได้โดยการเติมเพิ่มรัศมีของชั้นตัวนำด้านนอกที่ถูกตัดออกโดยใช้ Stress Cone ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 การแก้ไขสนามไฟฟ้าแบบ Capacitive Stress Control [5]

2.8 การต่อลงดินของสายเคเบิล (Grounding) [6]

การต่อลงดินของระบบไฟฟ้ากำลัง หมายถึง การฝังแท่งสายดินไว้ใต้ดินที่ตำแหน่งต่างๆ และต่อเชื่อมเข้ากับอุปกรณ์ไฟฟ้าด้วยสายตัวนำที่เรียกว่า สายดิน หรือสายป้องกัน ในตำแหน่งที่เป็นส่วนหนึ่งของวงจรไฟฟ้า ซึ่งการต่อลงดินในระบบเคเบิลใต้ดินสามารถแบ่งลักษณะของการต่อลงดินได้เป็น 2 ลักษณะด้วยกัน คือ

1. การต่อลงดินเพื่อป้องกัน

ส่วนต่างๆ ของอุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบเคเบิลใต้ดิน โดยปกติจะไม่ใช่เป็นส่วนหนึ่งของวงจรกระแสไฟฟ้า แต่เนื่องจากเกิดการเสื่อมสภาพของฉนวนไฟฟ้าเนื่องจากเมื่อมีแรงดันไฟฟ้าสูงเกิน (Surge Voltage) และเกิดการเบรคดาวน์ผ่านหรือฉนวนไฟฟ้าทะลุ ทำให้ส่วนที่เป็นโลหะของอุปกรณ์ไฟฟ้านั้นอยู่ภายใต้แรงดันไฟฟ้า ที่มีขนาดพอที่ทำให้เกิดอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงานได้ เช่น เคเบิลแร็ค (Cable Rack) เสารับเคเบิลแรงสูง (H.T. Cable Racking pole) ที่อยู่ภายในบ่อพักสาย Manhole หรือ Handhole หรือ ที่สายต่อลงดิน (Shield Wire) ของสายเคเบิลใต้ดิน เนื่องจากสายเคเบิลใต้ดินเมื่อมีกระแสไหลผ่าน จะทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำขึ้นที่สายต่อลงดิน (Shield Wire) ซึ่งในหลักการจะออกแบบกำหนดให้แรงดันไฟฟ้าสัมผัสเกิดที่สายต่อลงดิน มีค่าไม่เกิน 65 V ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการป้องกันอันตรายที่จะเกิดกับผู้ปฏิบัติงานจากแรงดันไฟฟ้าสูงเกินไป ด้วยการต่อสายดินให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ โดยเรียกการต่อลงดินนี้ว่า “การต่อลงดินเพื่อป้องกัน”

2. การต่อลงดินเพื่อการทำงานของระบบ

เป็นการต่อลงดินของอุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบ เพื่อวัตถุประสงค์ให้ระบบมีเสถียรภาพในการทำงานยิ่งขึ้น สำหรับระบบเคเบิลใต้ดิน จะเป็นการต่อลงดินของสายต่อลงดิน (Shield Wire) ของสายเคเบิลใต้ดิน เช่นเดียวกับการต่อลงดินเพื่อป้องกัน เนื่องจากว่าสายเคเบิลใต้ดินจำเป็นต้องมีการต่อลง

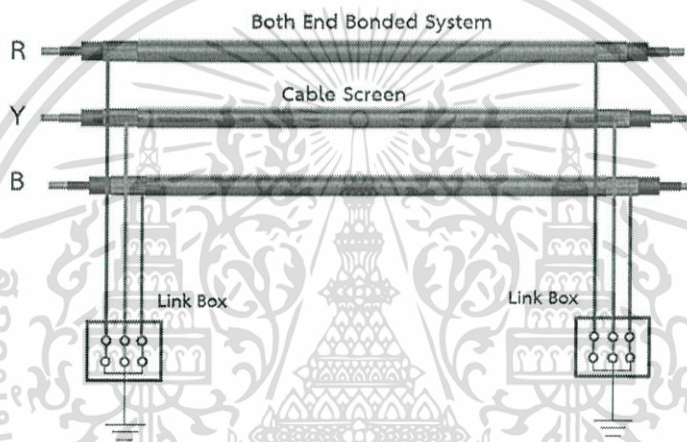
ดินด้านใดด้านหนึ่งของสายเคเบิลใต้ดินเสมอ (สายต่อลงดิน (Shield Wire) ห้ามปล่อยลอยทั้งสองด้าน เพื่อให้สนามไฟฟ้าจากสายตัวนำกระจายไปยังสายต่อลงดิน (Shield Wire) อย่างสม่ำเสมอ ป้องกันการเกิดเบรคดาวน์ที่ฉนวน XLPE ของสายเคเบิลใต้ดิน

2.8.1 ประเภทของการต่อลงดิน (Type of grounding) [7]

ประเภทของการต่อลงดินเพื่อการทำงานของระบบสามารถแบ่งตามระดับแรงดันของระบบ และระยะความยาวสายเคเบิลได้ดังต่อไปนี้

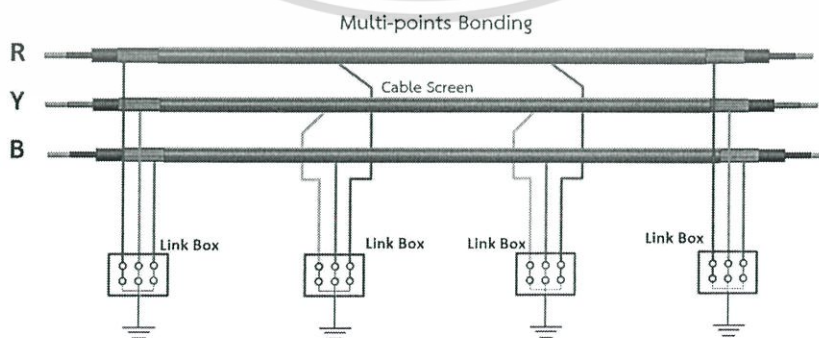
1. ข้อกำหนดการต่อลงดินสำหรับสายเคเบิลใต้ดินระบบ 22 ถึง 33 กิโลโวลต์

1.1 การต่อลงดินทั้งสองด้าน (Both-Ends Bonding) สำหรับเคเบิลที่มีความยาวไม่เกิน 500 เมตร



รูปที่ 2.12 การต่อลงดินทั้งสองด้าน (Both-Ends Bonding) [7]

1.2 การต่อลงดินแบบหลายจุด (Multi-points Bonding) สำหรับเคเบิลที่มีความยาวมากกว่า 500 เมตร



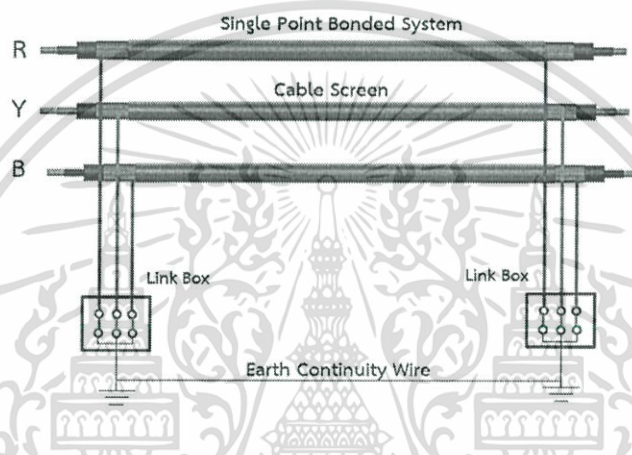
รูปที่ 2.13 การต่อลงดินแบบหลายจุด (Multi-points Bonding) [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การต่อลงดินของระบบ 22 ถึง 33 กิโลโวลต์ กรณีเคเบิลที่มีความยาวไม่เกิน 500 เมตร จะสามารถต่อลงดินเป็นแบบข้างเดียวได้ด้วย แต่เนื่องจากเมื่อต่อลงดินแบบข้างเดียวแล้วค่าความสามารถในการนำกระแสของสายเคเบิลใต้ดิน จะมีค่าสูงกว่าการต่อลงดินแบบทั้งสองด้านเพียงเล็กน้อย แต่เพื่อความปลอดภัยแก่ผู้ปฏิบัติงานที่จะต้องทำการบำรุงรักษา จึงกำหนดให้ต่อลงดินเป็นแบบทั้งสองด้านแทน (ยอมให้สายเคเบิลใต้ดินจ่ายกระแสได้น้อยกว่า) ซึ่งก็จะไปสอดคล้องกับการต่อลงดินเพื่อป้องกันบุคคลอีกด้วย

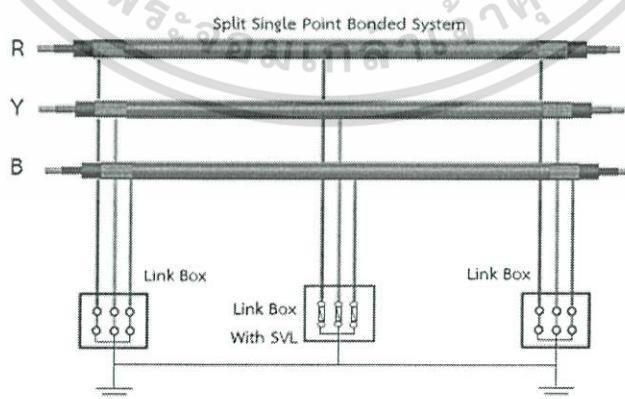
2. ข้อกำหนดการต่อลงดินสำหรับสายเคเบิลใต้ดินระบบ 115 กิโลโวลต์

2.1 การต่อลงดินข้างเดียว (Single-point Bonding) สำหรับเคเบิลที่มีความยาวไม่เกิน 500 เมตร



รูปที่ 2.14 การต่อลงดินข้างเดียว (Single-point Bonding) [7]

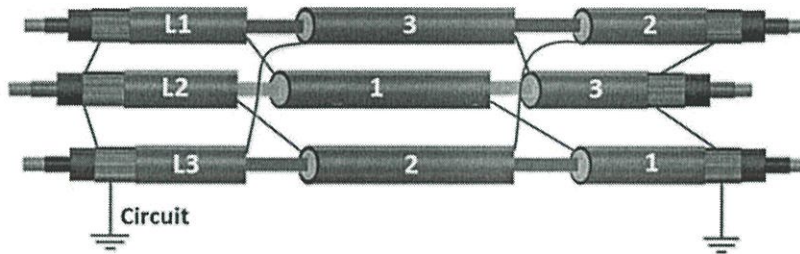
2.2 การต่อลงดินแบบกึ่งกลาง (Middle-point Bonding) สำหรับเคเบิลที่มีความยาวระหว่าง 500 ถึง 1,000 เมตร



รูปที่ 2.15 การต่อลงดินแบบกึ่งกลาง (Middle-point Bonding) [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 การต่อลงดินแบบไขว้ (Cross-Bonding) สำหรับระยะทางมากกว่า 1,000 ม.



รูปที่ 2.16 การต่อลงดินแบบไขว้ (Cross-Bonding) [7]

สายเคเบิลใต้ดินระบบ 115 กิโลโวลต์ ในทุกกรณีไม่ว่าระยะทางจะเป็นเท่าใดก็ตาม ให้ต่อลงดินเป็นลักษณะปล่อยปลายข้างหนึ่งไว้เสมอ ห้ามต่อทั้งสองปลายสายเคเบิลใต้ดินลงดินอย่างเด็ดขาด เนื่องจากจะมีกระแสไหลวนภายในสายต่อลงดิน (Shield Wire) ได้ เมื่อมีกระแสไหลวน ก็จะทำให้เกิดความร้อนขึ้นภายในสายเคเบิลใต้ดิน และสะสมมากจนสายเคเบิลใต้ดินระเบิดหรือชำรุดได้ ดังนั้นเมื่อจำเป็นต้องต่อสายต่อลงดินเป็นลักษณะปล่อยปลายข้างหนึ่งไว้ สายเคเบิลใต้ดินเมื่อนำกระแส จะทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำขึ้นที่ปลายสายต่อลงดิน แต่ก็ถูกจำกัดให้มีค่าไม่เกิน 65 โวลต์ (UB : แรงดันสัมผัส) เพื่อความปลอดภัยแก่ผู้ปฏิบัติงานที่จะต้องทำการบำรุงรักษา

2.8.2 ปรากฏการณ์ที่ผิวเปลือก [7]

เมื่อสายเคเบิลแกนเดี่ยวถูกใช้ในระบบไฟฟ้ากระแสสลับ ชั้นเปลือกโลหะรอบๆ ของแต่ละตัวนำนั้น จะเป็นสาเหตุทำให้เกิดปัญหา 2 ประการดังต่อไปนี้

1. ปรากฏการณ์ของแรงดันไฟฟ้าที่เปลือกฉนวน

บริเวณเปลือกของสายเคเบิลแกนเดี่ยวจะทำหน้าที่เสมือนหม้อแปลงด้านทุติยภูมิ เมื่อกระแสไหลในตัวนำไฟฟ้าก่อให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำในเปลือกฉนวนของสายเคเบิล ซึ่งแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนั้นไม่ได้ขึ้นอยู่กับวัสดุของเปลือกฉนวน แต่ค่าแรงดันที่เปลือกฉนวนนั้นจะขึ้นอยู่กับเส้นสนามไฟฟ้าที่เชื่อมโยงกันระหว่างเปลือกฉนวนโลหะ และค่าแรงดันจะเพิ่มเมื่อระยะห่างของแกนภายในของสายเคเบิลเพิ่มขึ้นค่าแรงดันไฟฟ้านี้จะยังคงมีค่าสูงอยู่ ถ้าสายเคเบิลนั้นถูกวางไว้ในท่อที่แยกออกจากกัน โดยในตอนแรกนั้นพบว่าไม่มีการผลิตเปลือกหุ้มฉนวนของสายเคเบิล ดังนั้นภายใต้สภาวะในการปฏิบัติงานนั้นการหุ้มเปลือกที่ฉนวน จึงเป็นสิ่งจำเป็นในการจำกัดระดับแรงดันไฟฟ้าที่เปลือกให้อยู่ในระดับที่สามารถยอมรับได้ (อยู่ในช่วง 12 ถึง 15 โวลต์) เพื่อที่จะหลีกเลี่ยงการเกิดกระแสไฟฟ้าลัดวงจรกับผู้ที่มาปฏิบัติงาน และเป็นการหลีกเลี่ยงการเสื่อมสภาพฉนวนของสายเคเบิล หลังจากมีแฉกเกิดซึ่งทำจากฉนวนพอลิเอทิลีนขึ้นมา ปัญหาทั้ง 2 แบบที่เกิดขึ้นก็ได้รับการแก้ไขอย่างมาก โดยทำให้ไม่มีการเสื่อมสภาพของฉนวนเกิดขึ้น และการปฏิบัติงานของผู้ที่เกี่ยวข้องกับสายเคเบิลนั้น ก็มีความปลอดภัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มากขึ้นจากแต่ก่อน ด้วยเหตุนี้ค่าที่ยอมรับได้ในปัจจุบันของแรงดันไฟฟ้าที่เปลือกผิวของฉนวนคือ 100 โวลต์ ถึง 400 โวลต์ สำหรับสภาวะโหลดปกติ เนื่องจากกระแสสูญเสียมีค่ามากกว่ากระแสของโหลด เป็นปกติที่จะต้องพิจารณาถึงแรงดันไฟฟ้าที่เปลือกขณะเกิดความบกพร่องนั้น จะสามารถเกิดแรงดันได้ประมาณ 1,000 โวลต์ โดยแรงดันไฟฟ้าขณะเกิดความบกพร่อง จะถูกควบคุมโดยการใช้ตัวจำกัดแรงดันที่เปลือกผิวของสายเคเบิล ซึ่งเป็นประเภทหนึ่งของกับังอุปกรณ์ป้องกันกระแสกรรโชก (Surge Arrester) ข้อจำกัดของแรงดันไฟฟ้านี้จะอยู่ในช่วงค่าที่มากกว่าของแรงดันเหนี่ยวนำที่ได้รับอนุญาต แต่ในช่วงค่าที่อยู่ในระดับที่สูงกว่านั้น จะมีข้อจำกัดคือ

1. แรงดันวาบไฟตามผิวของแจ็คเกตที่หุ้มฉนวนภายใต้สภาวะที่มีข้อบกพร่อง
2. แรงดันวาบไฟตามผิวของข้อต่อฉนวน
3. ปรากฏการณ์ของกระแสที่เปลือกผิวฉนวน

ถ้าบริเวณเปลือกผิวฉนวนของสายเคเบิลตัวนำเดี่ยว มีการเชื่อมต่อกันที่มีมากกว่าหนึ่งจุดซึ่งเป็นเรื่องโดยทั่วๆ ไปสำหรับสายเคเบิลสามตัวนำ แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำเป็นสาเหตุของการเกิดกระแสไหลในวงจรอย่างสมบูรณ์ ค่ากระแสไฟฟ้าไหลวนอาจไหลวนครบวงจรเช่นเดียวกับการไหลเวียนของกระแสที่พันรอบแกน หนึ่งในแนวคิดที่สำคัญอื่นๆ เกี่ยวกับการต่อกราวด์หลายจุดคือ ระยะห่างระหว่างกราวด์ที่ไม่มีผลกระทบต่อขนาดของกระแส การไหลเวียนของกระแสไฟฟ้าจะนำไปสู่การสูญเสียพลังงานและการลดลงของประสิทธิภาพการส่งผ่านพลังงาน ในทางตรงกันข้าม กระแสที่เกิดการไหลเวียนจะทำให้อุณหภูมิของสายเคเบิลเพิ่มขึ้นมีผลต่อสายเคเบิลคือ "ระยะเวลาการใช้งานของสายเคเบิลและประสิทธิภาพของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจะลดลง"

2.8.3 ความสูญเสียของเปลือกผิวและอาร์มเมอร์ (Cable Sheath and Armour Loss)

เมื่อทำการปรับขนาดสายเคเบิลต้องมีการประเมินค่าความสูญเสียภายในเปลือกผิวหรืออาร์มเมอร์ที่เกิดจากความร้อน ซึ่งความร้อนถือว่าเป็นตัวแปรสำคัญของการพิจารณาขนาดของสายเคเบิล ความเข้าใจเรื่องการสูญเสียของเปลือกผิวและอาร์มเมอร์นั้น จะสามารถส่งผลต่อการปรับขนาดสายเคเบิล อย่างไรก็ตามสามารถศึกษาได้จากมาตรฐาน IEC 60287 (ขนาดความจุของสายเคเบิลและกระแสที่พิกัด) เป็นการหาตัวแปรการสูญเสียที่สำคัญสำหรับการใช้ในการคำนวณ ตามมาตรฐาน IEC 60287 นอกจากนี้ค่าปัจจัยการสูญเสียเป็นอัตราส่วนของความสูญเสียภายในเปลือกผิวกับความสูญเสียทั้งหมดที่เกิดจากตัวนำทุกตัวซึ่งจะมีการประยุกต์ใช้มาตรฐาน IEC 60287 เพิ่มในรายละเอียดต่อไป

2.8.4 การคำนวณหาความสูญเสียของเปลือกผิวและอาร์มเมอร์

ที่บริเวณเปลือกผิวใดๆของสายเคเบิลนั้นจะมีความสูญเสียเกิดขึ้น (λ_1) ประกอบไปด้วย 2 ส่วนใหญ่ๆ คือ

$$\lambda_1 = \lambda_1' + \lambda_1'' \quad (2.25)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

λ_1' คือความสูญเสียเนื่องจากกระแสไฟวน ความสูญเสียนี้จะเกิดขึ้นในสายเคเบิลแกนเดี่ยว และสำหรับกระแสไหลวนใดๆ ที่เกิดขึ้นนั้น เปลือกผิวของสายเคเบิลแต่ละเส้นจำเป็นที่จะทำการเชื่อมต่อที่ 2 หรือ 3 จุดตามความยาวของสาย

λ_1'' คือความสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน (Eddy Currents Losses) เป็นกระแสไหลวนเล็กๆในบริเวณเปลือกผิว เนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

ในส่วนการคำนวณหาความสูญเสียในอาร์มเมอร์นั้นจะพิจารณาที่องค์ประกอบเดียวคือ ความสูญเสียของเปลือกผิวและอาร์มเมอร์ของสายเคเบิลนั้น (λ_2) จะเกิดขึ้นเมื่อนำไปใช้งานกับไฟฟ้า กระแสสลับ สูตรการคำนวณของเปลือกผิวและอาร์มเมอร์นั้นกระแสสลับ สูตรการคำนวณของเปลือกผิวและอาร์มเมอร์นั้นขึ้นอยู่กับ การติดตั้งและการลำดับการเรียงของสาย

1. การคำนวณความสูญเสียบริเวณเปลือกผิวในสายเคเบิลแกนเดี่ยวการติดตั้งสำหรับการเชื่อมต่อที่จุดๆ เดียวนั้น กระแสไหลวนนั้นจะไม่มีทางเกิดขึ้นได้และทำให้ความสูญเสียเป็นศูนย์ ยกเว้นในบางกรณีที่ตัวนำเป็นที่มีขนาดใหญ่ สำหรับสายเคเบิลตัวนำเดี่ยวนั้นสามารถไม่คิดความสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน (λ_1') สายเคเบิลแกนเดี่ยว (Single core cables)

1.1 สายเคเบิลแกนเดี่ยวแบบทรีพอยด์ เชื่อมต่อทั้ง 2 ด้านและเชื่อมต่อปลายทั้ง 2 ด้าน ความสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนบริเวณเปลือกผิว (λ_1') หาได้จากสมการ

$$\lambda_1' = \frac{R_s}{R} \cdot \frac{1}{1 + \left(\frac{R_s}{X}\right)^2} \quad (2.26)$$

2.2 สายเคเบิลแกนเดี่ยวแบบฟลัดที่ไม่มีการทำทรานโพสิชัน (Cable Transposition) และเชื่อมต่อปลายทั้ง 2 ด้าน (λ_{11}') ตัวแปรความสูญเสียด้านนอกของสายเคเบิลที่มีความสูญเสียสูง

$$\lambda_{11}' = \frac{R_s}{R} \left[\frac{0.75P^2}{R_s^2 + P^2} + \frac{0.25Q^2}{R_s^2 + Q^2} + \frac{2R_sPQX_m}{\sqrt{3}(R_s^2 + P^2)(R_s^2 + Q^2)} \right] \quad (2.27)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\lambda_{12}' = \frac{R_s}{R} \left[\frac{0.75P^2}{R_s^2 + P^2} + \frac{0.25Q^2}{R_s^2 + Q^2} + \frac{2R_s P Q X_m}{\sqrt{3}(R_s^2 + P^2)(R_s^2 + Q^2)} \right]$$

(2.28)

โดยที่

λ_{12}'' คือ ตัวแปรความสูญเสียด้านนอกของสายเคเบิลที่มีความสูญเสียเล็กน้อย

λ_{1m}' คือ ตัวแปรความสูญเสียสำหรับสายเคเบิลกลาง

จะได้

$$\lambda_{1m}' = \frac{R_s}{R} \cdot \frac{Q^2}{R_s^2 + Q^2} \quad (2.29)$$

ซึ่ง

$$P = X + X_m \quad (2.30)$$

$$Q = X + \frac{X_m}{3} \quad (2.31)$$

2. การคำนวณการคำนวณความสูญเสียบริเวณเปลือกผิวในสายเคเบิลหลายแกน
เนื่องจากมีเปลือกผิวหุ้มบริเวณรอบๆ ตัวนำ จึงเป็นไปได้ว่าจะไม่เกิดกระแสไหลวนขึ้น ดังนั้นความ
สูญเสียของ (λ_1) ไม่จำเป็นต้องสนใจก็ได้ แต่ความสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน ควรนำมาพิจารณา

2.1 สายเคเบิล 2 แกนที่มีเปลือกหุ้มทั่วไปแบบมีอาร์มเมอร์ สำหรับตัวนำรูปทรงกลม (Round
Conductors)

$$\lambda_1'' = \frac{16\omega^2 10^{-14}}{R R_s} \cdot \left(\frac{c}{d}\right) \cdot \left[1 + \left(\frac{c}{d}\right)^2\right] \quad (2.32)$$

2.2 สายเคเบิล 2 แกนที่มีเปลือกหุ้มทั่วไปแบบมีอาร์มเมอร์ สำหรับตัวนำที่มีการแยกเป็น
ส่วนๆ (Sector Shaped Conductors) ความสูญเสียเนื่องมาจากกระแสไหลวน บริเวณเปลือกผิว
 λ_1'' หาได้จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\lambda_1'' = \frac{10.8\omega^2 10^{-16}}{RR_s} \cdot \left(\frac{1.48r_1 + t}{d} \right) \cdot \left[12.2 + \left(\frac{1.48r_1 + t}{d} \right)^2 \right] \quad (2.33)$$

3. สายเคเบิล 3 แกนที่มีเปลือกหุ้มทั่วไปแบบไม่มีอาร์มเมอร์

3.1 สายเคเบิล 3 แกนที่มีเปลือกหุ้มทั่วไปแบบไม่มีอาร์มเมอร์ สำหรับตัวนำทรงกลมหรือรูป

ไข่ $R_s \leq 100 \mu\Omega \cdot m^{-1}$

$$\lambda_1'' = \frac{3R_s}{R} \left[\left(\frac{2c}{d} \right)^2 \frac{1}{1 + \left(\frac{R_s 10^7}{\omega} \right)^2} + \left(\frac{2c}{d} \right)^4 \frac{1}{1 + 4 \left(\frac{R_s 10^7}{\omega} \right)^2} \right] \quad (2.34)$$

3.2 สายเคเบิล 3 แกนที่มีเปลือกหุ้มทั่วไปแบบไม่มีอาร์มเมอร์ สำหรับตัวนำทรงกลมหรือรูป

ไข่ $R_s \geq 100 \mu\Omega \cdot m^{-1}$

$$\lambda_1'' = \frac{3.2\omega^2}{RR_s} \cdot \left(\frac{2c}{d} \right)^2 \cdot 10^{-14} \quad (2.35)$$

3.3 สายเคเบิล 3 แกนที่มีเปลือกหุ้มทั่วไปแบบไม่มีอาร์มเมอร์ สำหรับตัวนำที่มีรูปร่างเป็น

ส่วนๆ (ที่ R_s ใดๆ)

$$\lambda_1'' = 0.94 \cdot \frac{R_s}{R} \left(\frac{2r_1 + t}{d} \right)^2 \cdot \frac{1}{1 + \left(\frac{R_s 10^7}{\omega} \right)^2} \quad (2.36)$$

4. สายเคเบิล 2 ถึง 3 แกนที่มีอาร์มเมอร์เป็นสตีลเทป

4.1 ตัวคูณของเคเบิลที่ไม่มีอาร์มเมอร์

$$\left[1 + \left(\frac{d}{d_A} \right)^2 \frac{1}{1 + \frac{d_A}{\mu\delta}} \right]^2 \quad (2.37)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 สายเคเบิลที่มีเปลือกหุ้มแต่ละตัวนำแยกออกจากกันหรือสายเคเบิลชนิดท่อ

$$\lambda_1'' = \frac{R_s}{R} \frac{1.5}{1 + \left(\frac{R_s}{X_{SL}} \right)} \quad (2.38)$$

เมื่อ

$$X_{SL} = 2\omega 10^{-7} \ln \left(\frac{2c}{d} \right) \quad (2.39)$$

ตารางที่ 2.3 อธิบายตัวแปรในการคำนวณในสมการที่ 2.25 ถึงสมการที่ 2.39 [7]

สัญลักษณ์	ความหมาย
A	พื้นที่หน้าตัดของชั้น armour (mm^2)
R	ความต้านทานของตัวนำ a.c. (Ωm^{-1})
R_A	ความต้านทานสูงสุดในช่วงอุณหภูมิการทำงาน (Ωm^{-1})
R_{A20}	ค่าความต้านทานที่อุณหภูมิ 20 °C (Ωm^{-1})
R_s	ความต้านทานที่ผิว (Sheath) ในช่วงอุณหภูมิการทำงาน (Ωm^{-1})
X	ค่าความต้านทานที่ผิว (Sheath) (Ωm^{-1})
X_m	ค่าความต้านทานรวม (ระหว่างผิวเคเบิลหนึ่งกับตัวนำของเคเบิลอื่นๆ) Ωm^{-1}
λ_1	อัตราส่วนระหว่างการสูญเสียบนผิว (Sheath) กับการสูญเสียในตัวนำ
λ_2	อัตราส่วนของการสูญเสียใน armour กับตัวนำ
λ_1'	การสูญเสียที่เกิดจากกระแสไหลเวียนที่ผิว (Sheath)
λ_1''	การสูญเสียที่เกิดจากเอ็ดดี้เคอร์เรนต์ (Eddy Current) บนผิว (Sheath)
C	ระยะทางระหว่างแกนของตัวนำ (mm)
d	ค่าศูนย์กลางเฉลี่ยของผิว (Sheath) (mm)
d_A	ค่าศูนย์กลางเฉลี่ยของชั้น armour (mm)
r_1	วงรัศมีของตัวนำแบบเซ็กเตอร์เซป (mm)
S	ระยะการแบ่งแกนของตัวนำ (mm)
T_1	ค่าความต้านทานความร้อนระหว่างตัวนำกับเปลือก (Sheath) (K.m.W^{-1})
T_2	ค่าความต้านทานความร้อนระหว่างเปลือก (Sheath) กับ armour (K.m.W^{-1})
θ	อุณหภูมิสูงสุดของตัวนำ ($^{\circ}\text{C}$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์	ความหมาย
θ_{ar}	อุณหภูมิในช่วงการทำงานสูงสุดที่ armour ($^{\circ}C$)
θ_{sc}	อุณหภูมิในช่วงการทำงานสูงสุด ที่ผิว (Sheath) ($^{\circ}C$)
ω	ความถี่เชิงมุม, ($2\pi f$)
μ	ความสัมพันธ์ของการซึมผ่านแม่เหล็กของ armour
δ	ความหนาเทียบเท่าของ armour (mm)

กำลังสูญเสียในสายเคเบิล เมื่อเคเบิลจ่ายกระแสให้โหลดจะเกิดกำลังสูญเสียในรูปความร้อนขึ้น ความร้อนที่เกิดจากตัวนำและจากเนื้อฉนวนเองจะระบายผ่านฉนวนออกไปยังเปลือกโลหะและที่เปลือกโลหะเองก็มีความร้อนเกิดขึ้น เนื่องจากกระแสเหนี่ยวนำและกระแสไหลวนในเปลือกโลหะ ความร้อนทั้งหมดจะไหลผ่านเปลือกนอกของเคเบิลสู่สภาพแวดล้อมภายนอกของเคเบิล ดังนั้นความร้อนที่เกิดขึ้นเป็นตัวกำหนดความสามารถในการจ่ายกระแสของเคเบิลใต้ดิน

กำลังสูญเสียในเปลือกโลหะ เมื่อมีกระแสผ่านตัวนำจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้นเสมอในกรณีของสายเคเบิล จะทำให้เกิดกำลังสูญเสียในเปลือกหุ้ม อยู่ 2 ประเภท คือ ความสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน และความสูญเสียที่เกิดจากกระแสเหนี่ยวนำ สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากกระแสที่ไหลผ่านตัวนำตัดผ่านเนื้อโลหะที่ใช้ทำเป็นเปลือกหุ้ม ทำให้เกิดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำขึ้น จึงเกิดความสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนในเนื้อโลหะถึง แม้ว่าในเนื้อโลหะจะมีความต้านทานน้อยมากก็ตาม แต่ก็มีค่าความต้านทานอยู่ดี ดังนั้นจึงเกิดกำลังสูญเสียขึ้น

ปรากฏการณ์กระแสเหนี่ยวนำเกิดขึ้นเพราะเปลือกโลหะต่อกับกราวด์มากกว่า 1 จุดขึ้นไป หรือมีการต่อเปลือกโลหะของสายเคเบิลสองเส้นถึงกันสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากกระแสที่ไหลผ่านตัวนำจะตัดผ่านวงรอบปิดที่เป็นตัวนำ จึงเกิดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำตามกฎฟาราเดย์ ซึ่งบางครั้งเกิดกระแสเหนี่ยวนำไหลในวงรอบปิด และเกิดกำลังสูญเสียในเนื้อโลหะที่ทำเป็นเปลือกหุ้ม

2.9 การเดินทางของคลื่นในสายเคเบิลใต้ดิน [8]

การเดินทางของคลื่นในสายส่งนั้น มีปัจจัยหลายสิ่งส่งผลต่อความเร็วของคลื่นที่เดินทาง เช่น อิมพีแดนซ์ของสายซึ่งเป็นผลมาจากค่าความจุสายส่งและระยะทางหรือความยาวสาย ซึ่งค่าความจุสายแปรผันตรงกับความยาวสาย และแปรผกผันกับความถี่ของคลื่นที่เดินทางในสาย นอกจากนี้ค่าเปอร์มิตติวิตี (Relative permittivity) ของฉนวนในสายเคเบิลนั้นส่งผลต่อความจุของสายเคเบิลอีกด้วย กล่าวคือฉนวนต่างกันความเร็วคลื่นในสายเคเบิลก็ต่างกัน

$$v_p = \frac{v_c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.40)$$

เมื่อ

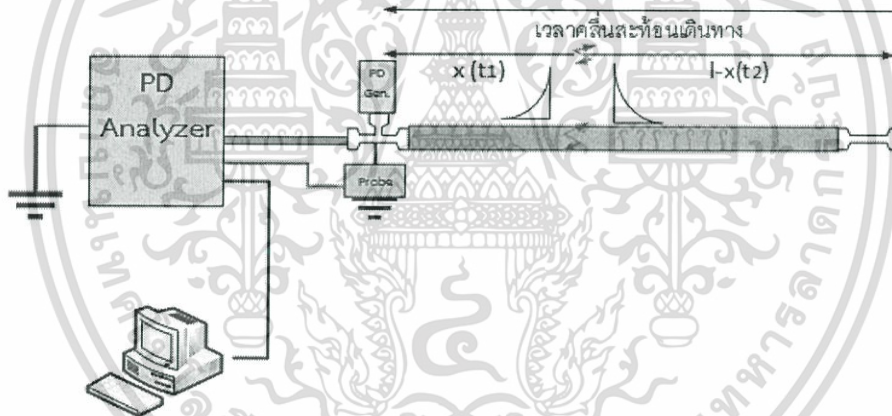
v_c คือ ความเร็วแสง 3×10^8 m/s²

v_p คือ ความเร็วสาย

ϵ_r คือ ค่าเปอร์มิติวิตี

ในกรณีการจำลองการทดลองนี้เราใช้สายส่งสัญญาณ RG58 เนื่องจากมีโครงสร้างสาย คล้ายคลึงสายเคเบิลใต้ดิน มีฉนวนเป็น โพลีเอทิลีนที่มีความคงทนของฉนวนใกล้เคียงครอสลิงก์พอลิเอทิลีนคือ 2.25 เมื่อคำนวณจากสูตรข้างต้นจะได้ค่าความเร็วสาย 66.67% (ของความเร็วแสง)

2.9.1 การคำนวณหาตำแหน่งที่เกิดการดิซชาร์จบางส่วนเมื่อตรวจจับเพียงด้านเดียว



รูปที่ 2.17 การตรวจจับสัญญาณการเดินทางของคลื่นในสายเคเบิล (ด้านเดียว)

สมการหาตำแหน่งที่เกิดการดิซชาร์จบางส่วนเมื่อตรวจจับเพียงด้านเดียว

$$t_1 = \frac{x}{v} \quad (2.41)$$

$$t_2 = \frac{2l - x}{v} \quad (2.42)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น

$$\Delta t = t_2 - t_1 \quad (2.43)$$

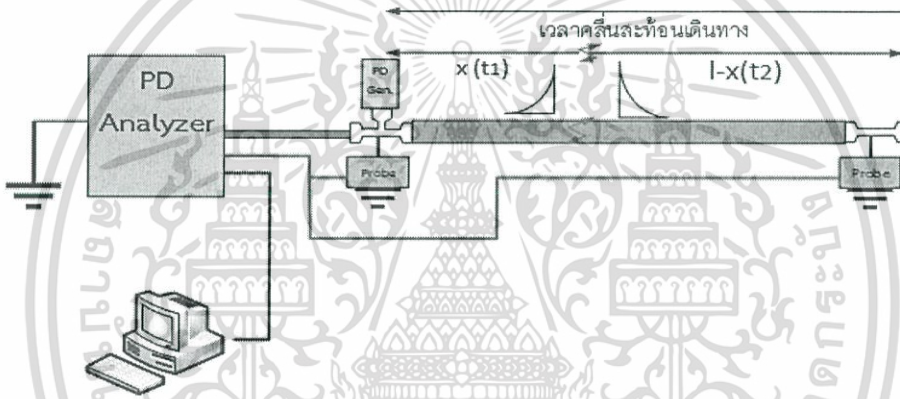
แทนค่า t_1 และ t_2 จะได้

$$\Delta t = \frac{2l-x}{v} - \frac{x}{v} \quad \text{หรือว่า} \quad \Delta t = \frac{2(l-x)}{v} \quad (2.44)$$

ดังนั้น

$$x = l - \frac{v\Delta t}{2} \quad (2.45)$$

2.9.2 การคำนวณหาตำแหน่งที่เกิดการดิสรจางส่วนเมื่อตรวจจับเพียงสองเดี่ยว



รูปที่ 2.18 การตรวจจับสัญญาณการเดินทางของคลื่นในสายเคเบิล (สองด้าน)

สมการหาตำแหน่งที่เกิดการดิสรจางส่วนเมื่อตรวจจับสองด้าน

$$t_1 = \frac{x}{v} \quad \text{และ} \quad t_2 = \frac{l-x}{v} \quad (2.46)$$

จะได้

$$\Delta t = \frac{l-2x}{v} \quad \text{หรือ} \quad x = \frac{l-v\Delta t}{2} \quad (2.47)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

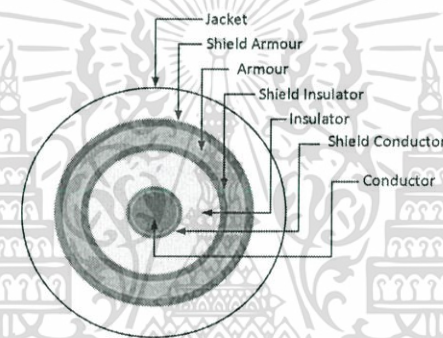
การออกแบบการทดลอง

3.1 การวิเคราะห์รูปแบบสนามไฟฟ้าของสายเคเบิลใต้ดิน

ในการออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาความล้มเหลวของสายเคเบิลใต้ดิน จำเป็นที่จะต้องเข้าใจถึงพฤติกรรมตลอดจนแนวโน้มของค่าสนามไฟฟ้าในสายเคเบิลใต้ดิน และอุปกรณ์เสริมที่ใช้ในระบบ และการใช้วิธีการคำนวณเพื่อตรวจสอบค่าสนามไฟฟ้าที่ได้เพื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการจำลองผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์

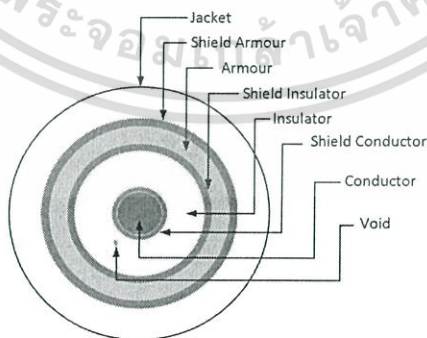
3.1.1 โครงสร้างพื้นฐาน

1. โครงสร้างของสายเคเบิลใต้ดินแบบปกติ



รูปที่ 3.1 โครงสร้างของสายเคเบิลใต้ดินแบบปกติ [1]

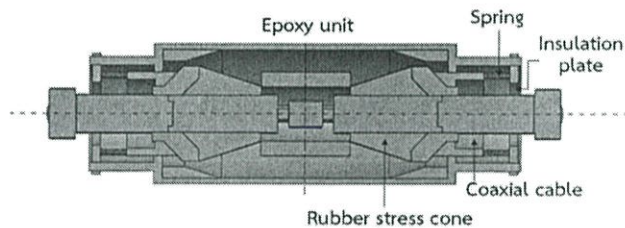
2. โครงสร้างของสายเคเบิลใต้ดินแบบมีฟองอากาศ



รูปที่ 3.2 โครงสร้างของสายเคเบิลใต้ดินแบบมีฟองอากาศ [1]

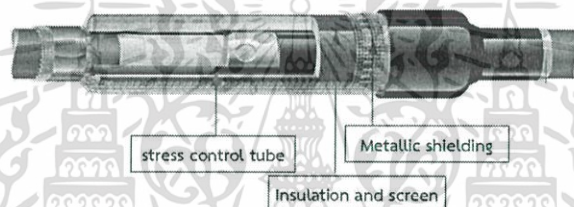
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. โครงสร้างของขั้วต่อสายเคเบิลใต้ดินแบบ Capacitive Stress Control



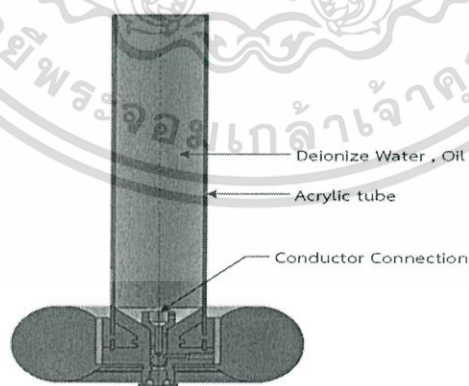
รูปที่ 3.3 โครงสร้างของขั้วต่อสายเคเบิลใต้ดิน [9]

4. โครงสร้างของขั้วต่อสายเคเบิลใต้ดินแบบ Reflective Stress Control



รูปที่ 3.4 โครงสร้างของขั้วต่อสายเคเบิลใต้ดินแบบ Reflective Stress Control [9]

5. โครงสร้างของหัวต่อของหม้อแปลงในฉนวนน้ำมันและน้ำ

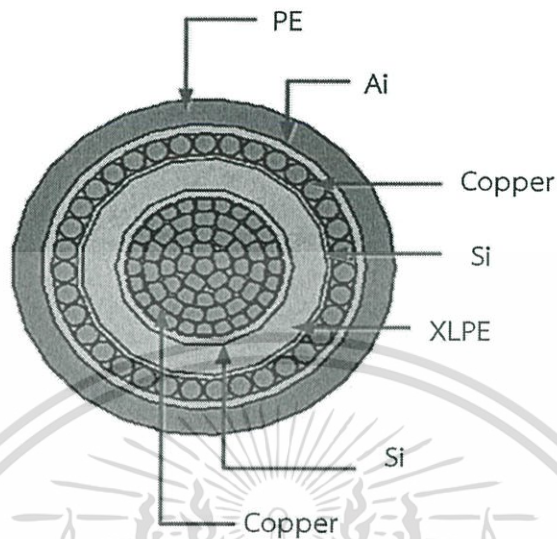


รูปที่ 3.5 โครงสร้างหัวต่อของหม้อแปลงในฉนวนน้ำมันและน้ำ [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 โครงสร้างที่ใช้ในการจำลองสนามไฟฟ้า

1. โครงสร้างที่ใช้ในการจำลองสนามไฟฟ้าของสายเคเบิลใต้ดินแบบปกติ



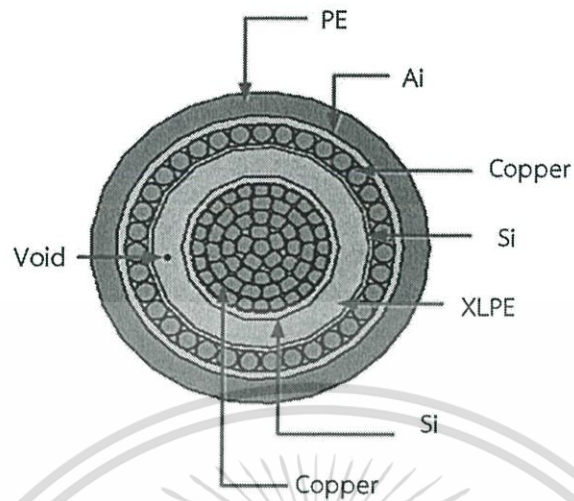
รูปที่ 3.6 โครงสร้างที่ใช้ในการจำลองสนามไฟฟ้าของสายเคเบิลใต้ดินแบบปกติ

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองเคเบิลแบบปกติ [9]

ชั้นส่วน	วัสดุ	ϵ_r
Conductor	Copper	1
Shield conductor	SiC	10
Insulator	XLPE	2.3
Shield insulator	SiC	10
Armour	Copper	1
Shield armour	SiC	10
Jacket	PE	2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. โครงสร้างที่ใช้ในการจำลองสนามไฟฟ้าของสายเคเบิลใต้ดินแบบมีฟองอากาศในฉนวน



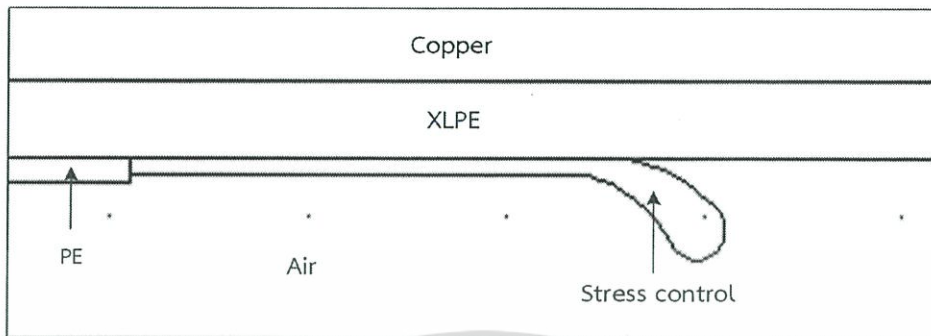
รูปที่ 3.7 โครงสร้างที่ใช้ในการจำลองสนามไฟฟ้าของสายเคเบิลใต้ดินแบบมีฟองอากาศในฉนวน

ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองเคเบิลแบบมีฟองอากาศในฉนวน [9]

ชั้นส่วน	วัสดุ	ϵ_r
Conductor	Copper	1
Shield conductor	SiC	10
Insulator	XLPE	2.3
Shield insulator	SiC	10
Armour	Copper	1
Shield armour	SiC	10
Jacket	PE	2.3
Void	Air	1.00059

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. โครงสร้างที่ใช้ในการจำลองสนามไฟฟ้าของขั้วต่อสายเคเบิลใต้ดินแบบ Capacitive Stress Control



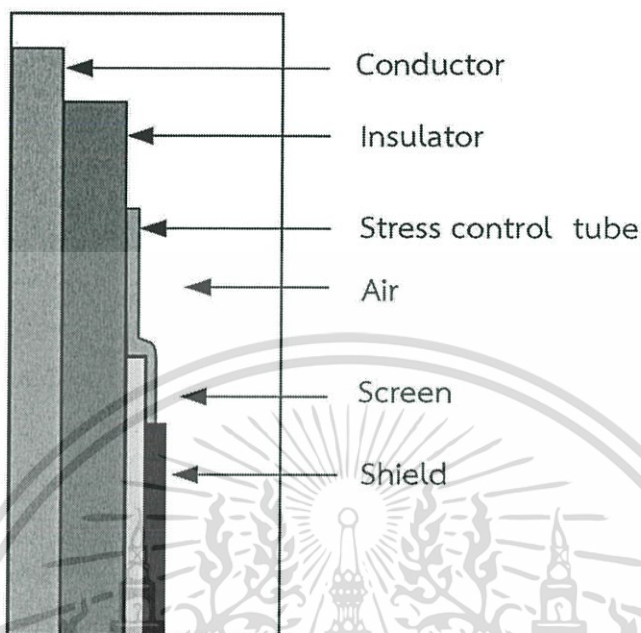
รูปที่ 3.8 โครงสร้างที่ใช้ในการจำลองสนามไฟฟ้าของขั้วต่อสายเคเบิลใต้ดิน [9]

ตารางที่ 3.3 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองขั้วต่อเคเบิลใต้ดิน [9]

ชั้นส่วน	วัสดุ	ϵ_r
Conductor	Copper	1
Insulator	XLPE	2.3
Stress control	Silicone	15
Insulator joint	PE	3.5
Mechanical protection	PE	3
Copper braid	Copper	1
Outer jacket	Silicone rubber	15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. โครงสร้างที่ใช้ในการจำลองสนามไฟฟ้าของขั้วต่อสายเคเบิลใต้ดินแบบ Reflective Stress Control



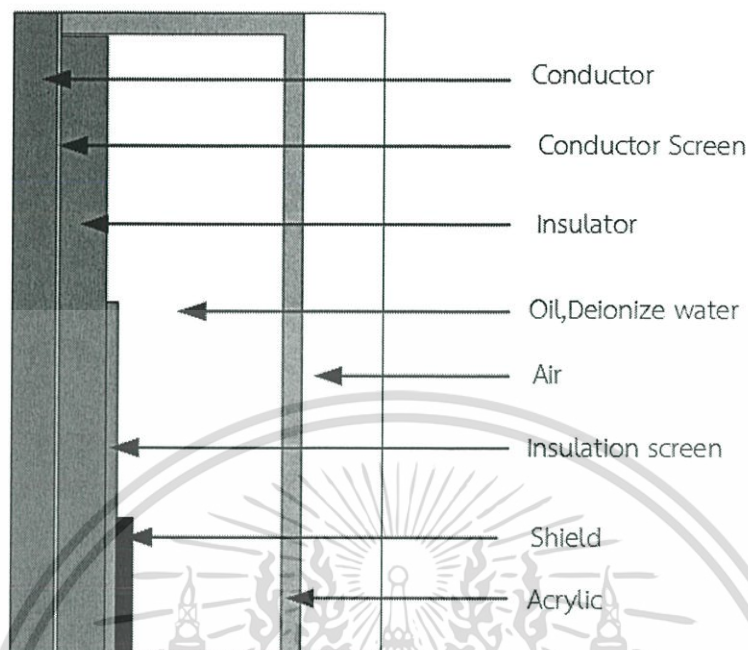
รูปที่ 3.9 โครงสร้างที่ใช้ในการจำลองสนามไฟฟ้าของขั้วต่อสายเคเบิลใต้ดิน

ตารางที่ 3.4 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองหัวต่อเคเบิลใต้ดินกรณีมี stress control tube [9]

ชั้นส่วนวัสดุ	วัสดุที่ใช้	ค่า conductivity (σ)	ค่า Permittivity (ϵ_r)
Conductor	Copper	5.998E7	1
Insulator	XLPE	1E-15	2.3
Screen	Semi-conductor	100	0.1
Shield	Polyethylene	0.1	2.3
Stress control tube	polymeric materials	1E-7	35-40
outer	Air	1E-15	1.00054

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. การจำลองโครงสร้างภายในขั้วต่อสายเคเบิลสำหรับการทดสอบ PD



รูปที่ 3.10 โครงสร้างที่ใช้ในการจำลองสนามไฟฟ้าของขั้วต่อของหม้อแปลงในฉนวนน้ำมันและน้ำ

ตารางที่ 3.5 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองสนามไฟฟ้า [9]

ชั้นส่วน	วัสดุ	ค่า Permittivity (ϵ_r)
Conductor	Copper	1
Conductor Screen	Semi-conductor	100
Insulator	XLPE	2.3
Insulator Screen	Semi-conductor	100
Shield	Polymer	2.3
Acrylic tube	Acrylic	3
Outer jacket	Air	1.00054
Oil	Transformer oil	2.2
Deionize Water	Deionize Water	80.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การทดลองในห้องปฏิบัติการ

การจำลองการเกิดความบกพร่องในสายเคเบิลใต้ดิน ในการจำลองการเกิดความบกพร่องในสายเคเบิลใต้ดินนั้นจะทำการศึกษาพฤติกรรมของคลื่นเดินทางภายในสายเคเบิลใต้ดินโดยในการลองนั้นจะใช้สาย RG-58 ในการจำลองการทดสอบเนื่องมาจากสาย RG-58 นั้นมีชั้นองค์ประกอบภายในที่ใกล้เคียงกับสายเคเบิลใต้ดินชนิด XLPE และความบกพร่องที่จำลองขึ้นภายในห้องปฏิบัติการนั้นเป็นการจำลองการเกิดความบกพร่องที่เรียกว่าการเกิดดิสชาร์จบางส่วนภายในฉนวนของสาย RG-58 โดยจะมีอุปกรณ์และวงจรการทดลองดังนี้

1. อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1.1 เครื่องตรวจจับดิสชาร์จบางส่วน (PD Analyzer)

เครื่อง PD Analyzer นั้นเป็นเครื่องมือที่มีไว้ตรวจจับความบกพร่องที่เกิดขึ้นภายในสายเคเบิลใต้ดินโดยความบกพร่องนั้นจะต้องเกิดมาจากการดิสชาร์จบางส่วนในรูปแบบใดๆ และสามารถตรวจจับสัญญาณของการดิสชาร์จบางส่วนได้ที่คลื่นสัญญาณย่าน HF-UHF เท่านั้นและจำเป็นต้องใช้ร่วมกับ Software ของเครื่อง

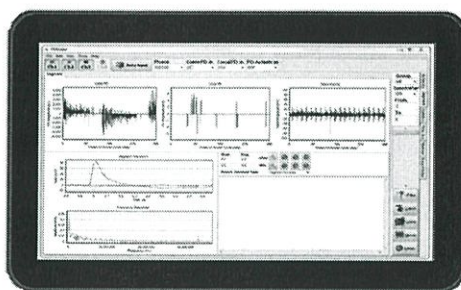


รูปที่ 3.11 เครื่องตรวจจับดิสชาร์จบางส่วน (PD Analyzer)

1.2 คอมพิวเตอร์ที่มีโปรแกรมของเครื่อง PD Analyzer (PD Reader© software)

สำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลและการวิเคราะห์ข้อมูลวินิจฉัย PD ซอฟต์แวร์นี้ช่วยให้สามารถวิเคราะห์ข้อมูลจากเครื่อง PD Analyzer ได้เร็วขึ้นและเพิ่มพื้นที่ในการจัดเก็บข้อมูล ยังมีการกรองสัญญาณรบกวนที่มีประสิทธิภาพมากขึ้นและคุณสมบัติที่เป็นประโยชน์อื่น ๆ และยังสร้างไฟล์ในรูปแบบรายงานเพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์ข้อมูล

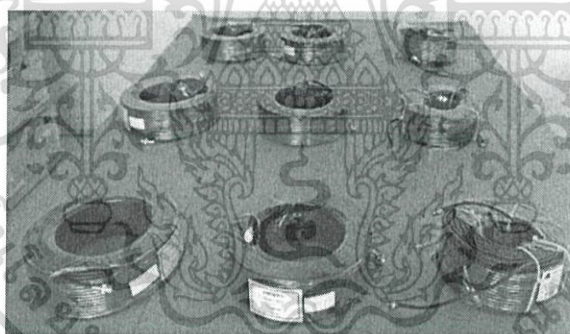
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 คอมพิวเตอร์ที่มีโปรแกรมของเครื่อง PD Analyzer

1.3 สายนำสัญญาณ RG-58

สาย RG-58/ U คือประเภทของ คู่สาย มักจะใช้สำหรับการใช้พลังงานต่ำของสัญญาณ เส้นผ่าศูนย์กลางด้านนอกของ RG-58 ประมาณ 0.2 นิ้ว (5 มม.) สามารถทนต่อสูงสุดไม่เกิน 300 V (1800 วัตต์) RG-58 ธรรมดา สายส่วนใหญ่มีตัวนำเป็นทองแดงมากที่สุด RG-58 สายมักจะใช้เป็นผู้ให้บริการทั่วไปของสัญญาณในห้องปฏิบัติการร่วมกับ การเชื่อมต่อ BNC ที่ใช้กันทั่วไปในการทดสอบ และอุปกรณ์การวัดเช่น Oscilloscope สายสามารถใช้สำหรับความถี่สูงปานกลาง การลดทอนสัญญาณขึ้นอยู่กับความถี่ในการเช่นจาก 0.11 dB / m ที่ 50 MHz ถึง 1.4 dB / m ที่ 2 GHz



รูปที่ 3.13 สายนำสัญญาณ RG-58

1.4 เครื่องกำเนิดสัญญาณ PD (GKI-2)

GKI-2 ใช้สำหรับการทดสอบวงจรตรวจจับ PD สามารถใช้ในห้องปฏิบัติการและในภาคสนาม อุปกรณ์สามารถแสดงข้อมูลที่จอ LCD เครื่องกำเนิดใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ «AA» สองก้อน หรือแบตเตอรี่ที่มีขนาดเท่ากัน ในการทำงานในช่วงไม่น้อยกว่า 10 ชั่วโมง เครื่องชาร์จยังสามารถใช้งานได้กับเครื่องกำเนิดสัญญาณ PD เพื่อป้อนไฟให้กับเครื่องกำเนิดสัญญาณ PD ในระหว่างการทำงาน เครื่องกำเนิดสัญญาณ PD แบบ GKI-2 สามารถจ่ายประจุได้มากถึง 3000 pC ลงในวัสดุควบคุมและวงจรการวัด ให้โอกาสในการสอบเทียบวงจรวัดก่อนที่จะทำการวัดเพื่อพิจารณาการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สลายตัวของสัญญาณในวัตถุ นอกจากนี้เรายังผลิตเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีหน้าที่ควบคุมการประจุไฟฟ้า ในกรณีนี้ผู้ใช้สามารถเลือกค่าประจุที่ฉีดได้ในช่วง 2000-5000 pC



รูปที่ 3.14 เครื่องกำเนิดสัญญาณ PD (GKI-2)

1.5 HFCT Sensor

เซ็นเซอร์ HFCT ใช้ในการวัด PD ในสายเคเบิล HV, เครื่องหมุน (ถึง 20 MVA) และหม้อแปลงไฟฟ้าแบบสายเคเบิล เรามีเซ็นเซอร์ HFCT ที่กว้างที่สุดสำหรับการวัด OLPD ในห้องตลาดรวมถึงรุ่นที่ได้รับการตรวจสอบจาก EMC อย่างเต็มที่รุ่นที่มีการปกป้องสภาพอากาศภายนอกที่มึนที่มีกระแสสูง (1000 A) และรุ่นที่ได้รับการรับรอง Ex / ATEX



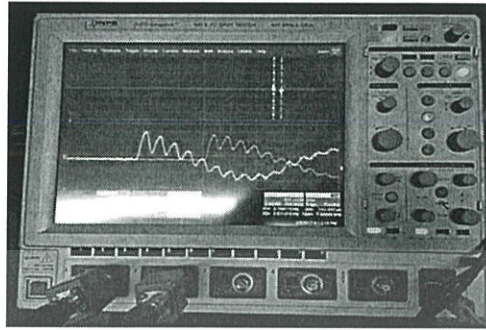
รูปที่ 3.15 HFCT Sensor

1.6 HVPD Longshot™ Diagnostic OLPD Test Unit

ออกแบบมาเพื่อการทดสอบ OLPD ในการวินิจฉัยของแหล่งจ่ายไฟขนาดกลางและสูง HVPD Longshot™ ได้รับการออกแบบมาเพื่อใช้สำหรับการทดสอบทั้งแบบ on-line (ในบริการ) และออฟไลน์ (โรงงาน / ห้องปฏิบัติการ) สามารถใช้กับเครื่องตรวจจับและอุปกรณ์เสริมต่างๆสำหรับการใช้งานหลายประเภทเครื่องทดสอบนี้สามารถใช้ทดสอบ MV, HV และ EHV ซึ่งเป็นเครื่องทดสอบ PD ที่หลากหลายที่สุดในปัจจุบันในห้องตลาด การเก็บข้อมูลแบบซิงโครนัสและไวด์สปีด (200 MHz) จะวัดขนาดของคลื่นและรูปร่างของคลื่นสัญญาณได้อย่างแม่นยำและรวดเร็ว หน่วยแสงและแบบพกพานี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีเวลาในการทดสอบเฉพาะจุด 5-10 นาทีต่อรายการของโรงงาน นอกจากนี้ยังสามารถติดตามระยะ OLPD ระยะสั้นได้ถึง 48 ชั่วโมง



รูปที่ 3.16 HVPD Longshot™ Diagnostic OLPD Test Unit

2. วงจรการทดลอง

การออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาการเดินทางของคลื่นในสายเคเบิล RG-58 เมื่อเกิดความบกพร่องขึ้นในสายที่ระยะแตกต่างกัน การทำความเข้าใจลักษณะของคลื่นสะท้อน เวลาการเดินทางของคลื่น ตลอดจนลักษณะของคลื่นที่เดินทางในสายเคเบิล RG-58 เมื่อทำการต่อกราวด์สายเคเบิล RG-58 ชนิดแตกต่างกัน การออกแบบการทดลองสามารถแบ่งได้ดังนี้

2.1 ศึกษาพฤติกรรมของคลื่นเดินทางเมื่อเกิดความบกพร่องในสายเคเบิล RG-58 กรณีไม่ต่อลงดินโดยจำลองการทดลอง 2 กรณี ดังนี้

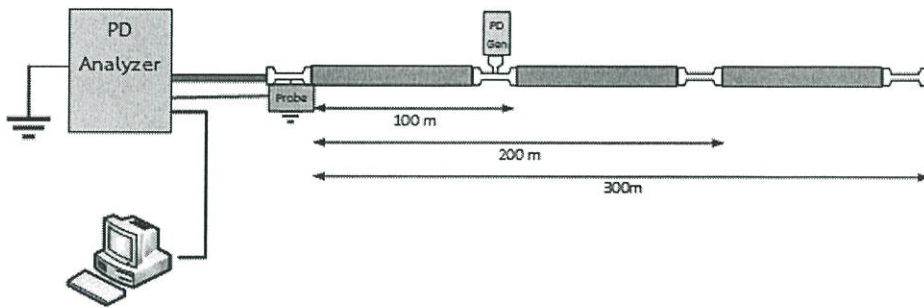
1. กรณีเปิดวงจร (Open Circuit)
2. กรณีลัดวงจร (Short Circuit)

2.2 ศึกษาพฤติกรรมของคลื่นเดินทางเมื่อเกิดความบกพร่องในสายเคเบิล RG-58 กรณีต่อลงดิน 3 ลักษณะดังต่อไปนี้

1. ต่อลงดินแบบด้านเดียว (One end bonding system) จำลองการทดลองเป็น 2 กรณี ดังนี้

- 1.1 เปลี่ยนแปลงค่าความยาวสายเคเบิล RG-58 ณ ตำแหน่งความบกพร่องที่ต้นสาย (ระยะ 100 เมตร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

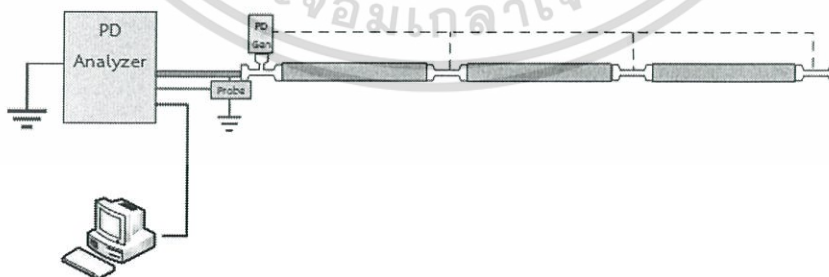


รูปที่ 3.17 วงจรการทดลองของสาย RG-58 ระยะ 300 เมตร ตำแหน่งความบกพร่องที่ต้นสาย (ระยะ 100 เมตร)



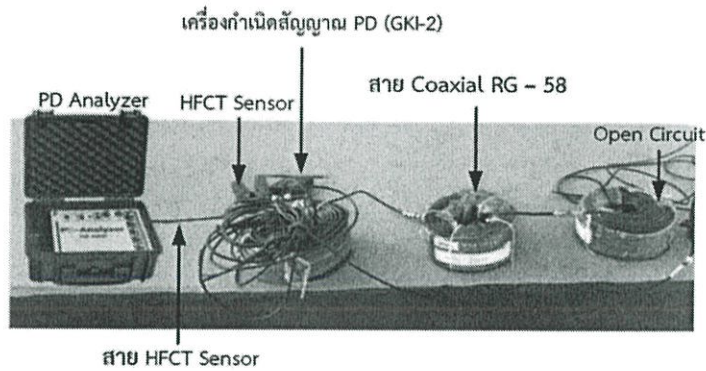
รูปที่ 3.18 วงจรการทดลองของสาย RG-58 ระยะ 300 เมตร ตำแหน่งความบกพร่องที่ต้นสาย (ระยะ 100 เมตร)

1.2 เปลี่ยนแปลงตำแหน่งความบกพร่องของสายเคเบิล RG-58 ณ ความยาวสายที่ 300 เมตร วงจรทดลองดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 รูปวงจรการทดลองของสายเคเบิล RG-58 ณ ความยาวสายที่ 300 เมตร กรณีเปลี่ยนตำแหน่งความบกพร่อง

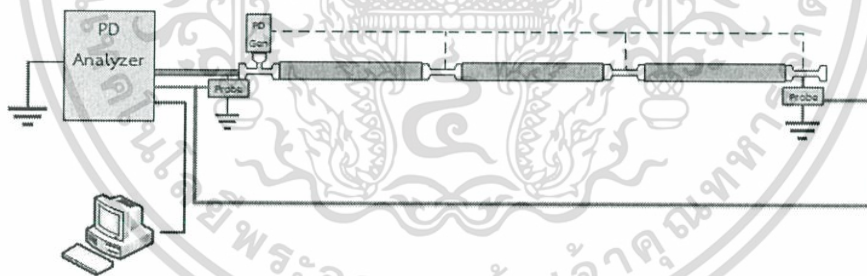
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.20 รูปวงจรการทดลองของสายเคเบิล RG-58 ณ ความยาวสายที่ 300 เมตร กรณีเปลี่ยนตำแหน่งความบกพร่อง

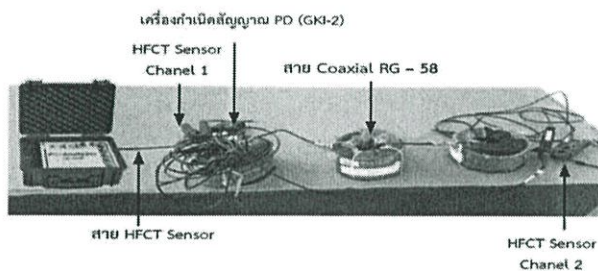
2. กรณีต่อลงดินสองด้าน (Both end bonding system) ความยาวสาย 300 เมตร จำลองการทดลองโดยการป้อนสัญญาณ 4 ตำแหน่ง ดังนี้

- 2.1 ตำแหน่งความบกพร่องระยะ 0 เมตร
- 2.2 ตำแหน่งความบกพร่องระยะ 100 เมตร
- 2.3 ตำแหน่งความบกพร่องระยะ 200 เมตร
- 2.4 ตำแหน่งความบกพร่องระยะ 300 เมตร



รูปที่ 3.21 รูปวงจรการทดลองกรณีต่อลงดินสองด้าน (Both end bonding system) ความยาวสาย 300 เมตร

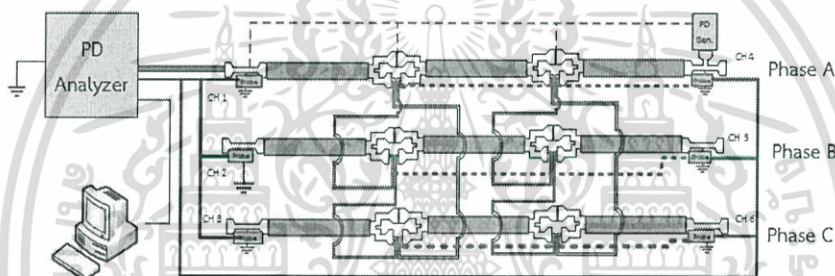
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.22 รูปวงจรการทดลองกรณีต่อลงดิน 2 ด้าน (Both end bonding system)

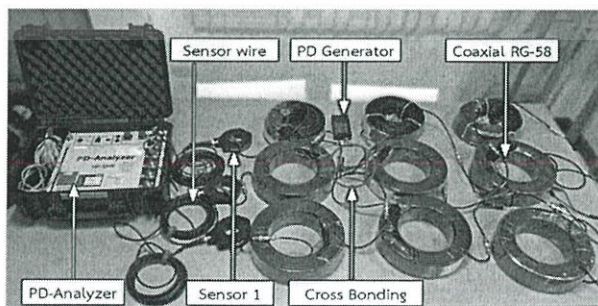
ความยาวสาย 300 เมตร

3. กรณีต่อลงดินแบบไขว้ (Cross bonding system) ทดสอบความยาวสาย 300 เมตร และ บ่อนสัญญาณความบกพร่องต่างกัน 4 ตำแหน่ง ดังนี้



รูปที่ 3.23 รูปวงจรการทดลองกรณีต่อลงดินแบบไขว้ (Cross bonding system)

- 3.1 ตำแหน่งความบกพร่องระยะ 0 เมตร
- 3.2 ตำแหน่งความบกพร่องระยะ 100 เมตร
- 3.3 ตำแหน่งความบกพร่องระยะ 200 เมตร
- 3.4 ตำแหน่งความบกพร่องระยะ 300 เมตร



รูปที่ 3.24 รูปวงจรการทดลองกรณีต่อลงดินแบบไขว้

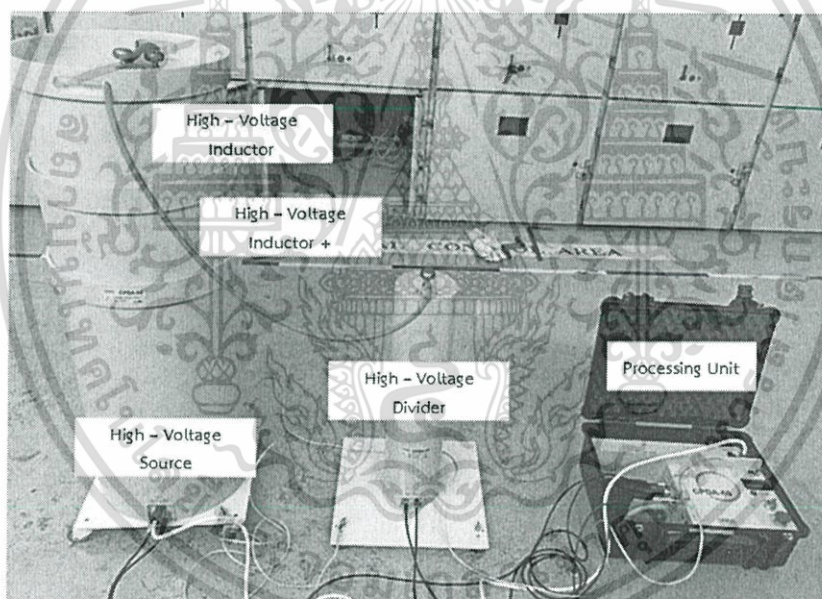
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การปฏิบัติการนอกสถานที่

การปฏิบัติการนอกสถานที่ในครั้งนี้เป็นการปฏิบัติการในพื้นที่ใช้งานจริงคือที่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคบ้านโป่ง จังหวัดราชบุรี ในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า 22 kV ที่ความยาว 1246 เมตร (ต่อ1เฟส) ในการปฏิบัติการนอกสถานที่ครั้งนี้จะเป็นการปฏิบัติการแบบระบบปิด (Offline Test) จึงจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ที่แตกต่างไปจากการทดลองในห้องปฏิบัติการ ซึ่งในการปฏิบัติการนอกสถานที่ในครั้งนี้จะใช้เครื่องมือเพื่อการวิเคราะห์หาตำแหน่งความบกพร่องในสายส่งที่ชำรุด และหาสาเหตุที่ชำรุดว่าเป็นเหตุมาจากการเกิดดิสชาร์จบางส่วนหรือไม่ด้วยเครื่องมือที่เรียกว่า CPDA โดยมีอุปกรณ์และส่วนประกอบดังต่อไปนี้

1. อุปกรณ์การทดลอง

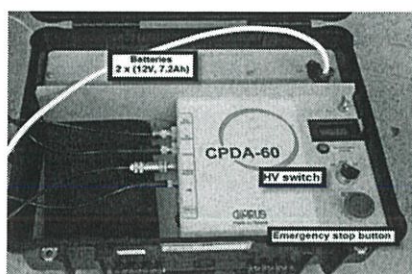
อุปกรณ์ CPDA-60 ตั้งอยู่ในกระเป๋าเดินทางแบบพกพา อุปกรณ์ประกอบไปด้วยแหล่งจ่ายไฟแรงดันไฟฟ้า 2 ตัวแรงดันไฟฟ้าสูงหน่วยประมวลผลข้อมูลลวดที่มีสายเชื่อมต่อกับวัตถุทดสอบ เครื่องสอบเทียบ GKI-1 และชุด Processing Unit



รูปที่ 3.25 องค์ประกอบของอุปกรณ์ CPDA-60 และตัวควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.1 Processing Unit



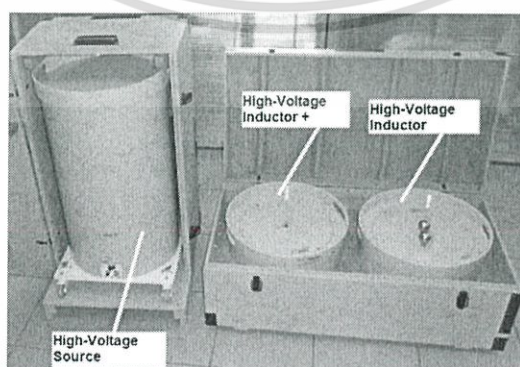
รูปที่ 3.26 Processing Unit

1.2 High voltage Divider



รูปที่ 3.27 High voltage Divider

1.3 High voltage source



รูปที่ 3.28 High voltage source

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. วงจรและตารางการออกแบบการทดลอง

ในการไปปฏิบัติงานทุกครั้งผู้ปฏิบัติจำเป็นต้องศึกษาข้อมูลและวงจรทดสอบของระบบและอุปกรณ์ที่จะใช้ในการทดสอบ

2.1 ตารางแสดงค่าที่ควรศึกษาก่อนทำการทดสอบ

ตารางที่ 3.6 ตารางแสดงค่าที่ควรศึกษาก่อนทำการทดสอบ

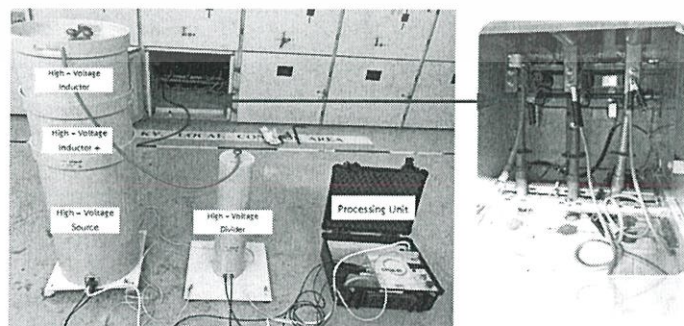
ความยาวสายที่จะทดสอบ	แรงดันในระบบ	แรงดันที่ใช้ในการทดสอบ	สถานะของระบบ	การต่อลงดินที่ปลายสาย
1246 เมตร	22 kV	30 kV	Offline	ไม่ทำการต่อลงดิน



รูปที่ 3.29 ภายในสถานีการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคบ้านโป่ง

2.2 วงจรจากอุปกรณ์จริงที่ใช้ในการทดสอบ

ในการทดสอบจริงนั้นมีการต่ออุปกรณ์เครื่องมือวัดกับวงจรสายส่งที่ต้องการทดสอบ โดยจะต่ออุปกรณ์ไปที่เฟสที่ต้องการจะตรวจสอบ และทำการ Short circuit อีก 2 เฟสที่เหลือ



รูปที่ 3.30 วงจรที่ใช้ในการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.7 ตารางการออกแบบการวัดผลการปฏิบัติการนอกสถานที่

	เกิดการชำรุด			สุ่มจากระบบ		
	A	B	C	A	B	C
ตรวจเจอความบกพร่องหรือไม่						
เป็นความบกพร่องที่เกิดจาก PD หรือไม่						
PD-level (Maximum)						

3.4 การศึกษาดูงานนอกสถานที่

เมื่อวันที่ 25 มกราคม 2560 คุณ ศุภกฤต หัวหน้าผู้ควบคุมและดูแลการติดตั้งและบำรุงรักษาระบบสายเคเบิลใต้ดินของการไฟฟ้านครหลวง เขต วัดเลียบ ได้มีการชักชวนกลุ่มของนักศึกษาทางโทรศัพท์ให้ไปดูการเชื่อมต่อสายเคเบิลใต้ดินระบบ 12 kV เข้าด้วยกัน (Joint ตรง) ด้วยความสนใจและอยากเข้าใจในวิธีการของการเชื่อมต่อสายเคเบิลใต้ดินเข้าด้วยกันจึงตอบตกลงที่จะตามคุณศุภกฤตไปดูและศึกษาการเชื่อมต่อสายเคเบิลใต้ดินเข้าด้วยกัน

ในการไปดูการปฏิบัติงานนอกสถานที่ครั้งนี้คาดว่าจะสามารถสร้างประโยชน์และองค์ความรู้เพิ่มเติมให้แก่กลุ่มของนักศึกษาได้ไม่มากนักน้อย อาทิเช่น

- การที่จะได้เห็นระบบส่งจ่ายแรงดันใต้ดินของจริง
- การที่ได้ไปเห็นการทำงานของมืออาชีพว่าเป็นอย่างไร
- การที่จะสามารถเข้าใจขั้นตอนของการเชื่อมต่อสายเคเบิลเข้าด้วยกันได้อย่างชัดเจน
- การที่จะได้ไปสัมผัสและรู้จักการทำงานของวัสดุภายใน Joint ว่าเป็นอย่างไรตรงตามที่ได้ศึกษามากน้อยแค่ไหน
- คาดว่าจะได้รับความรู้ในเรื่องต่างๆที่ไม่เคยรู้จากการไฟฟ้านครหลวง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การวิเคราะห์ผลการทดลอง

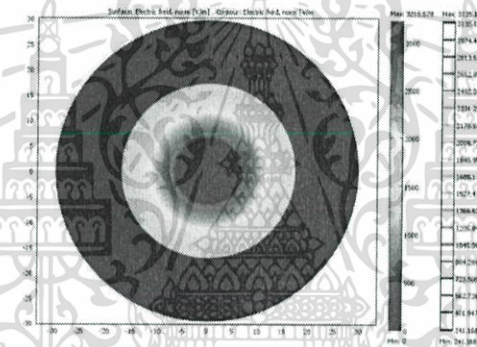
4.1 ผลการจำลองและการวิเคราะห์ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าของสายเคเบิลใต้ดิน

จากการออกแบบการจำลองค่าความเครียดสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในบทที่ 3 จะได้ผลการจำลองเป็นค่าและตำแหน่งของความเครียดสูงสุดที่เกิดขึ้นภายในอุปกรณ์ของสายเคเบิลใต้ดินที่ได้นำมาทำการจำลอง

โดยการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าของสายเคเบิลใต้ดิน สามารถแบ่งได้ดังนี้

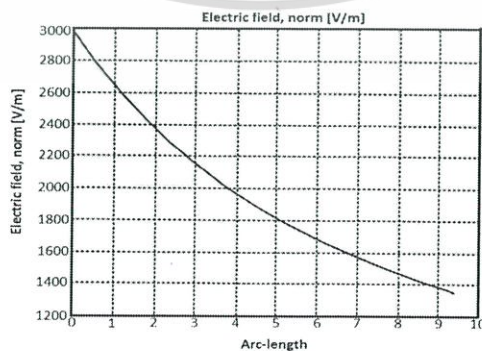
1. การจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าของสายเคเบิลแบบปกติ

ในการจำลองจะเป็นการจำลองที่แรงดัน 22 kV โดยมีการป้อนแรงดันเข้าไปที่ตัวนำของหน้าตัดสายเคเบิลใต้ดินและทำการศึกษาการสะสมความเครียดภายในของสายเคเบิล



รูปที่ 4.1 การจำลองสนามไฟฟ้าของสายเคเบิลใต้ดินแบบปกติ

จากรูปการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าของสายเคเบิลแบบปกติ จะพบว่าค่าความเครียดสะสมสูงสุดนั้นจะกระจายตัวรอบๆตัวนำอย่างสม่ำเสมอ



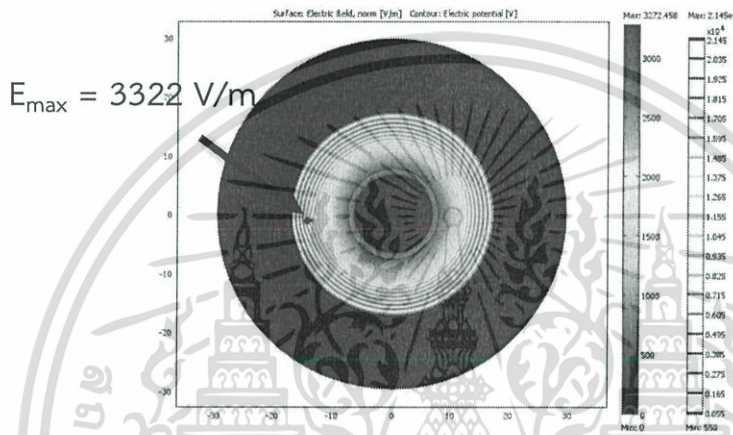
รูปที่ 4.2 กราฟจากการจำลองสนามไฟฟ้าของสายเคเบิลใต้ดินแบบปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟรูปที่ 4.2 จะได้ค่าความเครียดสูงสุดที่กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอรอบๆตัวนำ เท่ากับ 3000 v/m และจะมีค่าลดลงเรื่อยๆ อย่างต่อเนื่องเมื่อระยะของเนื้อฉนวนกับตัวนำมีมากขึ้น

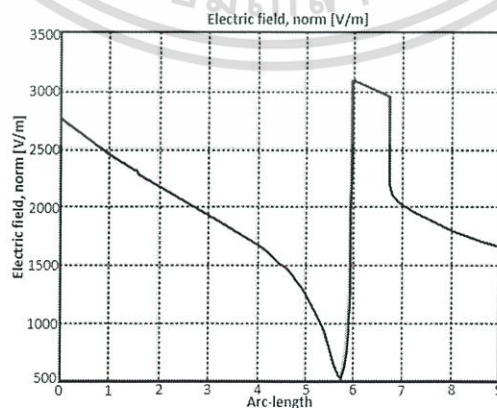
2. การจำลองสนามไฟฟ้าของสายเคเบิลใต้ดินแบบมีฟองอากาศในฉนวน

ในกรณีการจำลองสนามไฟฟ้าของสายเคเบิลใต้ดินแบบมีฟองอากาศในฉนวนนี้ จะทำการจำลองด้วยหน้าตัดสายเคเบิลที่มีขนาดเท่ากับกรณีสายเคเบิลใต้ดินแบบปกติ แต่จะทำการสร้างจุดบกพร่องเป็นฟองอากาศขึ้นภายในเนื้อฉนวน โดยกรณีนี้จะทำการป้อนแรงดันขนาด 22 kV ที่ตัวนำและฟองอากาศในเนื้อฉนวน



รูปที่ 4.3 การจำลองสนามไฟฟ้าของสายเคเบิลใต้ดินแบบมีฟองอากาศในฉนวน

จากรูปผลการจำลองที่ 4.3 นั้นจะพบว่าค่าความเครียดสะสมสูงสุดภายในเนื้อฉนวนนั้นมีค่าเพิ่มมากขึ้นจากกรณีที่ 1 โดยเพิ่มขึ้นจาก $E_{\max} = 3000 \text{ V/m}$ ที่ตำแหน่งรอบตัวนำ มาเป็น $E_{\max} = 3322 \text{ V/m}$ ที่ตำแหน่งรอบจุดบกพร่อง



รูปที่ 4.4 กราฟจากการจำลองสนามไฟฟ้าของสายเคเบิลใต้ดินแบบมีฟองอากาศในฉนวน

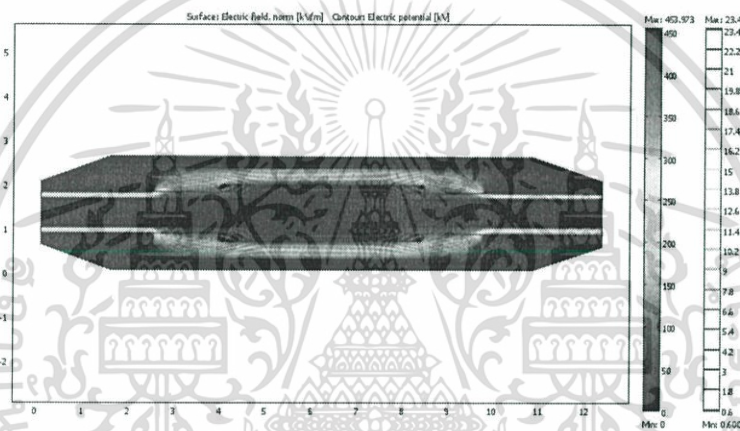
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟรูปที่ 4.3 พบว่าสนามไฟฟ้าสะสมมากบริเวณที่เป็นฟองอากาศทำให้สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงถึง 3,322 โวลต์ต่อเมตร ซึ่งมีค่ามากขึ้นจากกรณีการจำลองสนามไฟฟ้าของสายเคเบิลใต้ดินแบบปกติถึง 10% เมื่อเวลาผ่านไปจะทำให้เกิดความเสียหายกับอุปกรณ์ได้

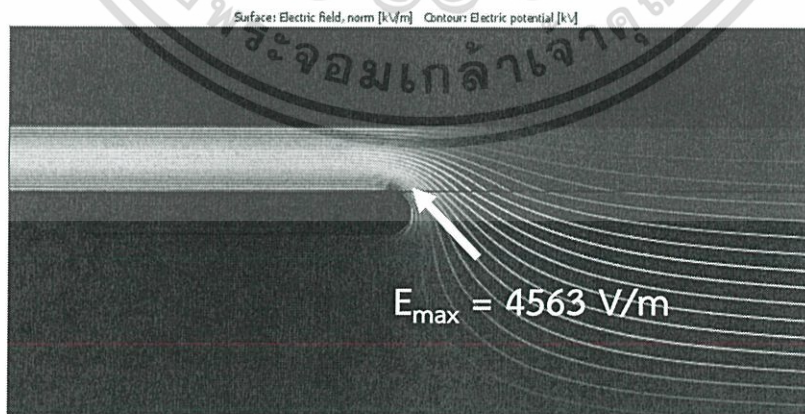
3. การจำลองสนามไฟฟ้าของข้อต่อเคเบิลใต้ดิน (Joint)

ในการจำลองการจำลองสนามไฟฟ้าของข้อต่อเคเบิลใต้ดินแบบ C จะทำการป้อนแรงดันทดสอบลงไปที่โปรแกรมการจำลองขนาด 23 kV ที่ตัวนำภายในข้อต่อจากนั้นศึกษาผลจากความเครียดสะสมสูงสุด และระยะห่างระหว่างเส้นศักย์ไฟฟ้าแต่ละเส้นที่แผ่ออกมาเมื่อ stress cone มีการทำมุมที่เปลี่ยนไปกับเนื้อฉนวน โดยจะศึกษาที่ 2 กรณีดังนี้

3.1 กรณี Stress control ทำมุม 0 องศา



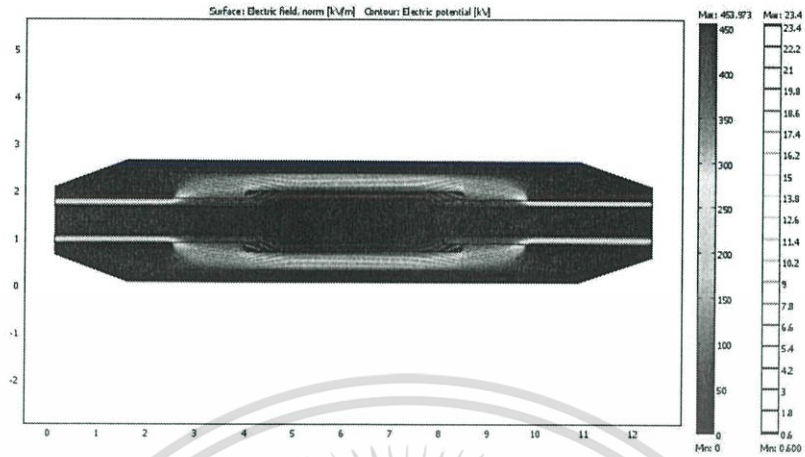
รูปที่ 4.5 การจำลองสนามไฟฟ้าของข้อต่อเคเบิลใต้ดิน (Joint)
กรณี Stress control ทำมุม 0 องศา



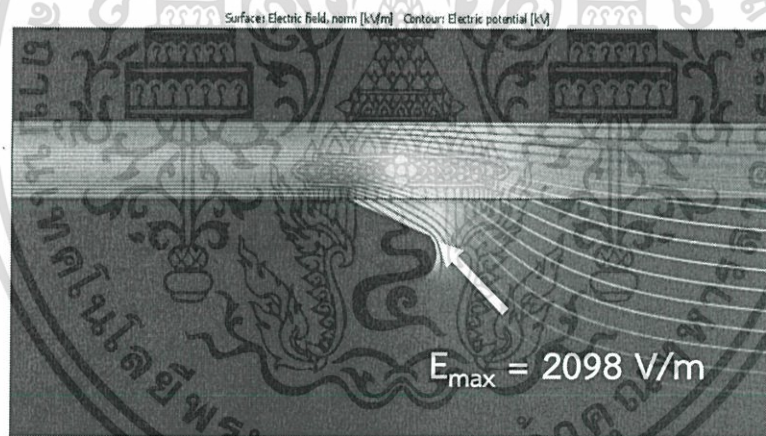
รูปที่ 4.6 บริเวณที่เกิดสนามไฟฟ้าสูงสุดของข้อต่อเคเบิลใต้ดิน (Joint)
กรณี Stress control ทำมุม 0 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 กรณี Stress control ทำมุม 20 องศา



รูปที่ 4.7 การจำลองสนามไฟฟ้าของข้อต่อเคเบิลใต้ดิน (Joint)
กรณี Stress control ทำมุม 20 องศา



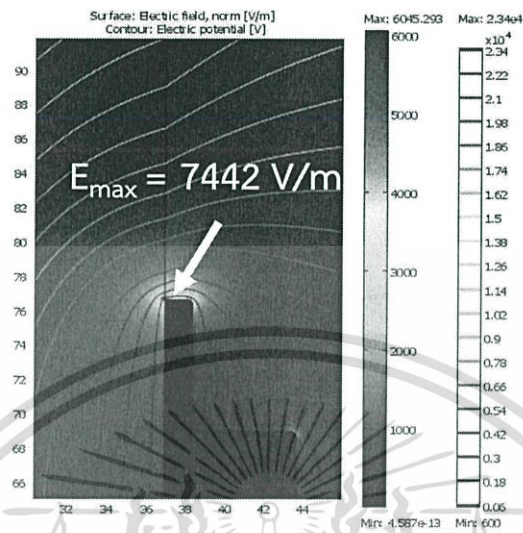
รูปที่ 4.8 บริเวณที่เกิดสนามไฟฟ้าสูงสุดของข้อต่อเคเบิลใต้ดิน (Joint)

จากรูปที่ 4.8 จะพบระยะห่างของเส้นศักย์ไฟฟ้าที่ออกมาจะมีขนาดที่เท่าๆกัน ทำให้ไม่ก่อให้เกิดการรวมตัวของศักย์ไฟฟ้าที่จุดใดจุดหนึ่ง เมื่อศักย์ไฟฟ้ามีการกระจายตัวด้วยระยะห่างที่สม่ำเสมอแล้วจึงทำให้อุปกรณ์ไม่เกิดการสะสมของความเครียดสนามไฟฟ้าจำนวนมาก ค่าความเครียดสูงสุดที่ได้จึงมีค่าลดลงจากกรณีที่ Stress cone ทำมุมกับฉนวน 0 องศา ซึ่งมีค่าความเครียดสะสมสูงสุดลดลงถึง 54.02%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

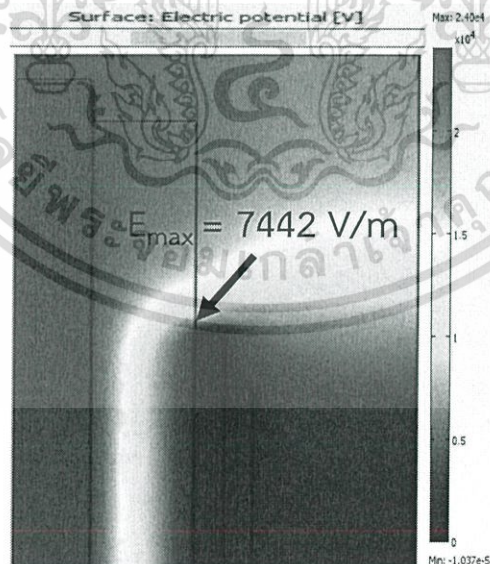
4. การจำลองสนามไฟฟ้าของหัวต่อเคเบิลใต้ดิน

4.1 กรณีที่ไม่มี Stress control tube



รูปที่ 4.9 ผลการกระจายตัวเส้นสนามไฟฟ้าของหัวต่อสายเคเบิล กรณีไม่มี Stress control tube

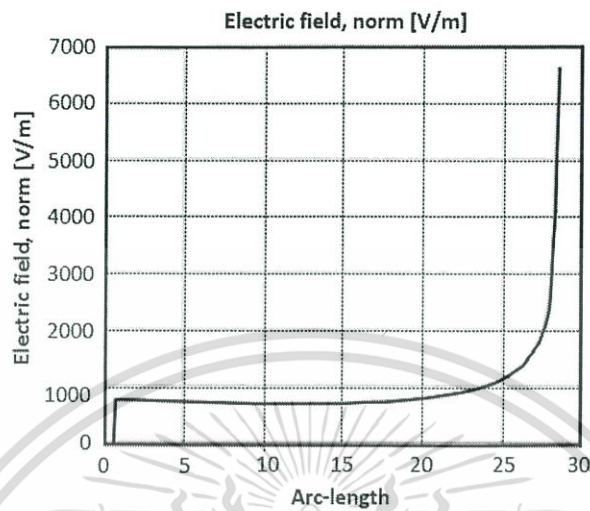
จากรูปที่ 4.9 จะพบว่ากรณีที่ไม่มี Stress control tube หุ้มอยู่ที่ชั้นภายนอกฉนวนนั้นทำให้เกิดการสะสมของค่าศักย์ไฟฟ้าที่ Shield สูงมากก่อให้เกิดค่าความเครียดสะสมภายในอุปกรณ์ขึ้น



รูปที่ 4.10 ผลการจำลองสนามไฟฟ้าหัวต่อของสายเคเบิลใต้ดิน กรณีไม่มี Stress control tube

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

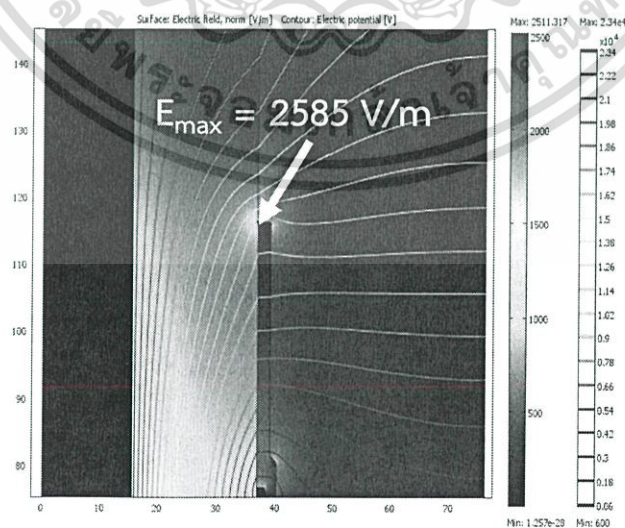
จากรูปที่ 4.10 จะพบว่าศักย์ไฟฟ้าที่ออกจากเนื้องานนั้นมีการกระจายตัวที่ไม่เป็นระเบียบ ระยะห่างระหว่างเส้นศักย์ไฟฟ้ามีความห่างไม่เท่ากันและเกิดการสะสมความเครียดขึ้นที่ Shield



รูปที่ 4.11 กราฟสนามไฟฟ้าที่ได้จากการจำลองกรณีไม่มี Stress control tube

จากรูปที่ 4.11 จะพบได้ว่าจากกราฟจะมีการสะสมความเครียดของสนามไฟฟ้าที่จุดใดจุดหนึ่งเมื่อป้อนแรงดันที่ 24 kV ในการปฏิบัติงานจริงค่าความเครียดนี้อาจส่งผลทำให้อุปกรณ์และระบบเกิดความเสียหายได้

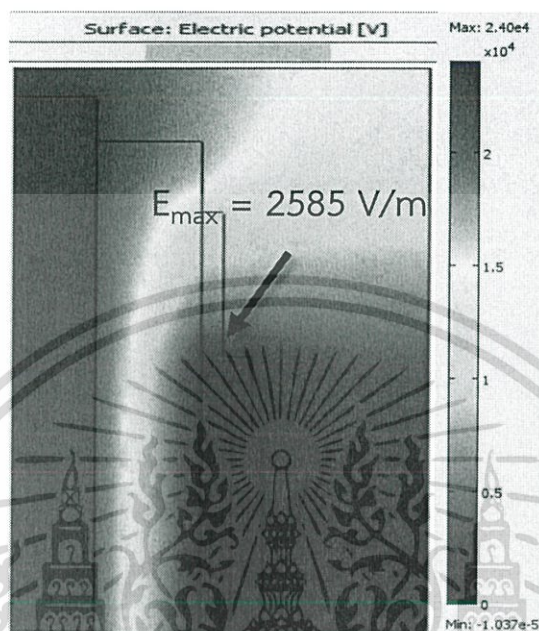
4.2 กรณีมี Stress control tube ($\epsilon_r = 5$)



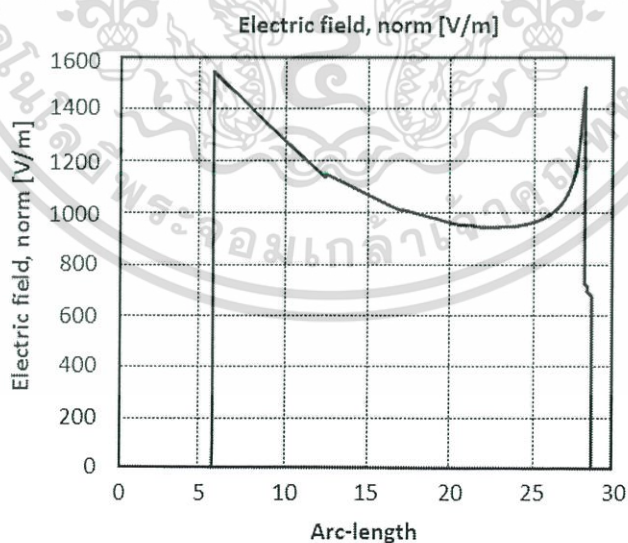
รูปที่ 4.12 การกระจายตัวเส้นสนามไฟฟ้ากรณีมี Stress control tube ที่ $\epsilon_r = 5$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.12 จะพบว่าเส้นศักย์ไฟฟ้านั้นมีระยะห่างเริ่มที่จะเรียงตัวกันอย่างมีระเบียบ การเรียงตัวอย่างมีระเบียบของเส้นศักย์ไฟฟ้านั้นส่งผลให้เกิดความเครียดสะสมที่ผิวของ Stress control tube มีค่าน้อยกว่าการสะสมความเครียดที่ผิวของ Shield ถึง 65.24%



รูปที่ 4.13 ผลการจำลองกรณีมี Stress control tube ที่ $\epsilon_r = 5$

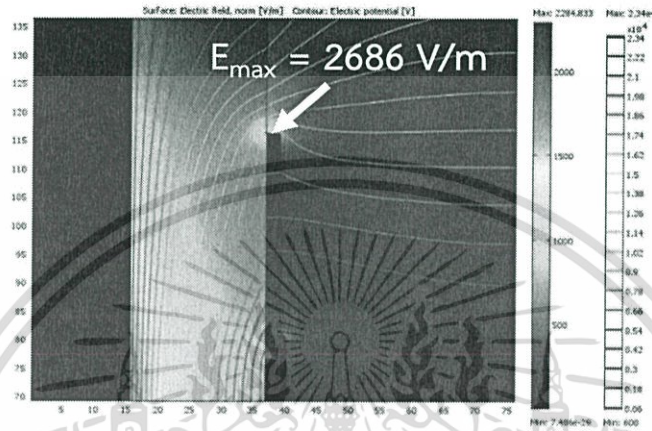


รูปที่ 4.14 กราฟสนามไฟฟ้าที่ได้จากการจำลองกรณีมี Stress control tube ที่ $\epsilon_r = 5$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

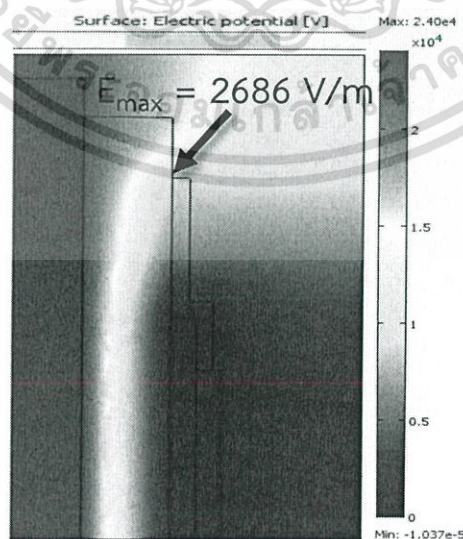
จากรูปที่ 4.14 จะพบว่าค่าความเครียดสนามไฟฟ้านั้นเริ่มมีความสม่ำเสมอมากขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่มีการหุ้มเนื้อฉนวนด้วย Stress control tube การสะสมของความเครียดสนามไฟฟ้านั้นลดลงถึง 65.24%

4.3 กรณีมี Stress control tube ($\epsilon_r = 35$)



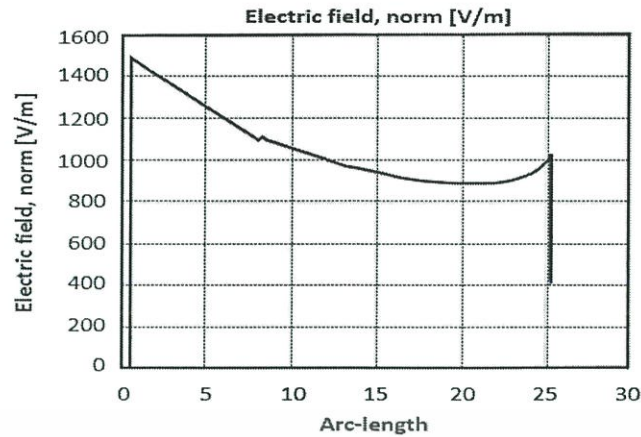
รูปที่ 4.15 การกระจายตัวเส้นสนามไฟฟ้า กรณีมี Stress control tube ที่ $\epsilon_r = 35$

จากรูปที่ 4.15 จะพบว่าเส้นศักย์ไฟฟ้าที่ออกมาจากเนื้อฉนวนนั้นมีการกระจายที่สม่ำเสมอ ทำให้เกิดระยะห่างระหว่างเส้นศักย์ไฟฟ้าที่เป็นระเบียบมากจึงไม่ก่อให้เกิดค่าความเครียดสะสมที่ผิวของ Shield



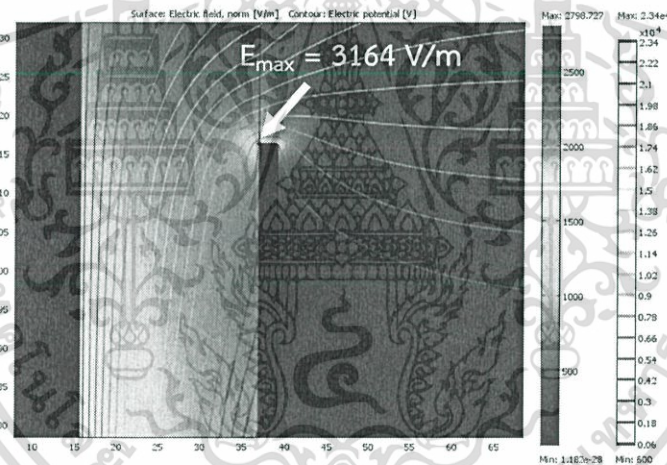
รูปที่ 4.16 ผลการจำลองสนามไฟฟ้ากรณีมี Stress control tube ที่ $\epsilon_r = 35$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 กราฟสนามไฟฟ้าที่ได้จากการจำลอง กรณีมี Stress control tube ที่ $\epsilon_r = 35$

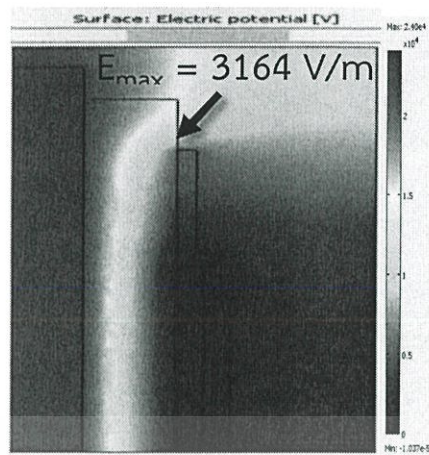
4.4 กรณีมี Stress control tube ($\epsilon_r = 100$)



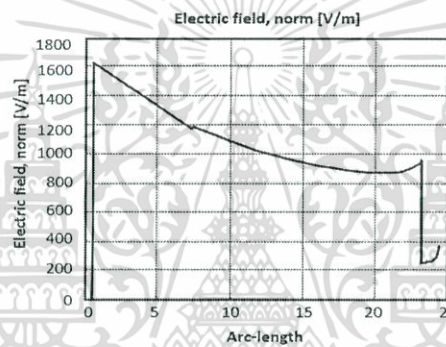
รูปที่ 4.18 การกระจายตัวเส้นสนามไฟฟ้า กรณีมี Stress control tube ที่ $\epsilon_r = 100$

จากรูปที่ 4.18 จะพบว่าระยะห่างระหว่างเส้นศักย์ไฟฟ้านั้นมีระยะห่างกันมากขึ้นทำให้ไม่ก่อให้เกิดการสะสมศักย์ไฟฟ้าไปที่ตำแหน่งของผิว Shield แต่จะก่อให้เกิดความความเครียดสะสมของสนามไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นที่ผิวของ Stress control tube แทน เนื่องจากการจำลองนี้ตัดขนาดของ Stress control tube ลงทำให้เกิดมุมและเกิดความเครียดสะสม แต่ในการใช้งานจริงจะเป็นการหุ้ม Stress control tube ไปตลอดแนวสายจึงจะไม่ก่อให้เกิดความเครียดสะสมที่ขอบผิวของ Stress control tube

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

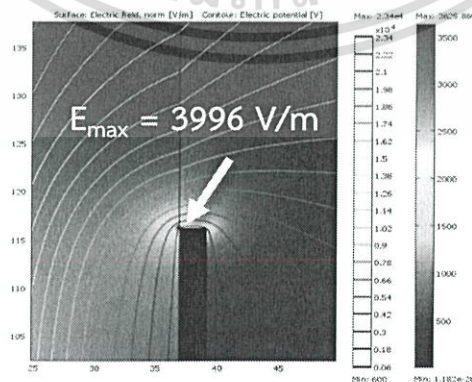


รูปที่ 4.19 ผลการจำลองสนามไฟฟ้ากรณีมี Stress control tube ที่ $\epsilon_r = 100$



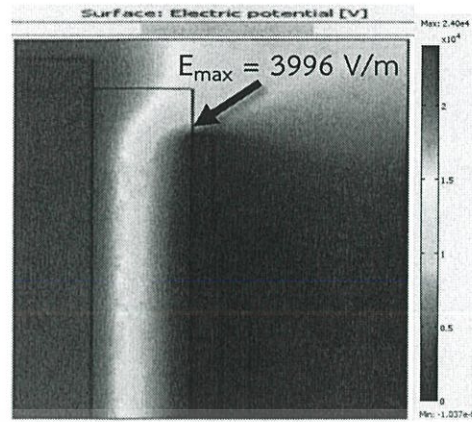
รูปที่ 4.20 กราฟสนามไฟฟ้าที่ได้จากการจำลองหัวต่อของสายเคเบิลใต้ดินกรณีมี Stress control tube ที่ $\epsilon_r = 100$

4.5 กรณีมี Stress control tube ($\epsilon_r = 500$)

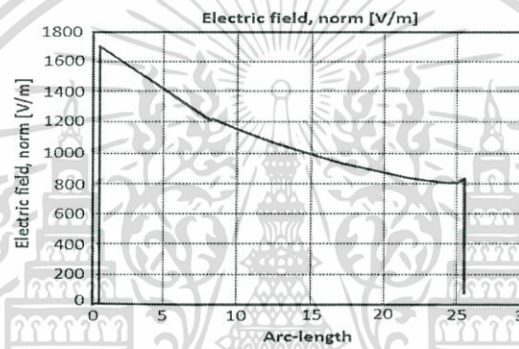


รูปที่ 4.21 การกระจายตัวเส้นสนามไฟฟ้ากรณีมี Stress control tube ที่ $\epsilon_r = 500$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



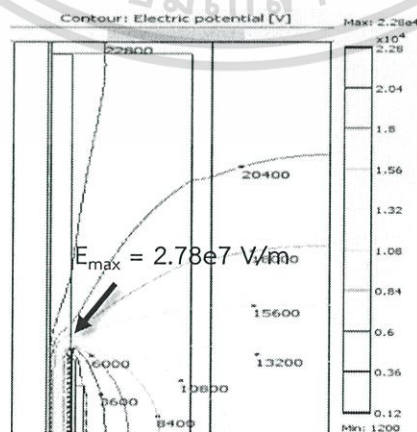
รูปที่ 4.22 ผลการจำลองสนามไฟฟ้า กรณีมี Stress control tube ที่ $\epsilon_r = 500$



รูปที่ 4.23 กราฟสนามไฟฟ้าที่ได้จากการจำลอง กรณีมี Stress control tube ที่ $\epsilon_r = 500$

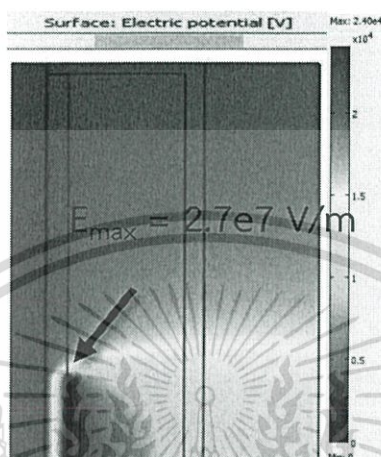
5. การจำลองภายในหัวต่อสายเคเบิลสำหรับการทดสอบ PD

5.1 ฉนวนอากาศ



รูปที่ 4.24 การกระจายตัวเส้นสนามไฟฟ้าภายในหัวต่อสายเคเบิลสำหรับการทดสอบ PD (Air) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

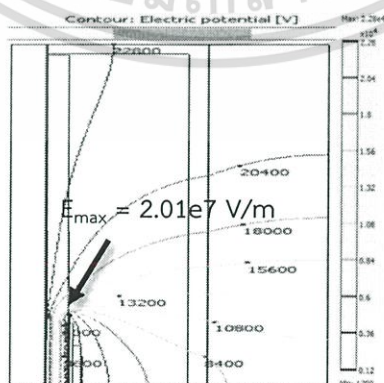
จากรูปที่ 4.24 เป็นการจำลองภายในหัวต่อสายเคเบิลสำหรับการทดสอบ PD ซึ่งจากรูปข้างต้น จำลองโดยการใส่อากาศลงไปภายในท่ออคลิกแทนน้ำมัน จะเห็นได้ว่าเส้นสนามไฟฟ้านั้นมีการหักเห จากผิวของฉนวนมาก ทำให้เกิดความเครียดสะสมที่จุดที่เกิดการหักเหของสนามไฟฟ้าซึ่งจุดจุดนั้นเป็น จุดที่จะเกิดการเบรคดาวน์ได้ง่ายที่สุด



รูปที่ 4.25 ผลการจำลองสนามไฟฟ้าภายในหัวต่อสายเคเบิลสำหรับการทดสอบ PD (Air)

จากรูปที่ 4.25 เป็นการจำลองภายในหัวต่อสายเคเบิลสำหรับการทดสอบ PD ซึ่งจากรูป ข้างต้นจำลองโดยการใส่อากาศลงไปภายในท่ออคลิกแทนน้ำมัน จะพบได้ว่าค่าความเครียดสูงสุดได้ ไปกองอยู่ที่ผิวของฉนวนโดยมีค่าเท่ากับ 2.7×10^7 V/m ซึ่งจุดที่เกิดความเครียดสูงสุดนั้นมีโอกาสที่จะ เกิดการเบรคดาวน์ได้สูง

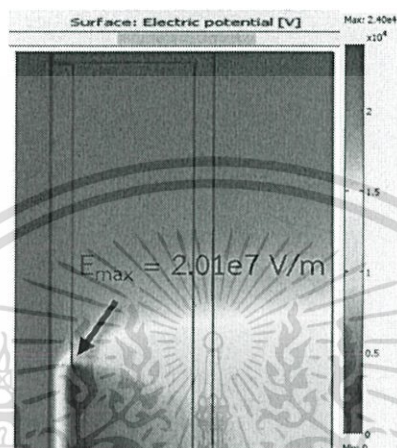
5.2 ฉนวนน้ำมัน



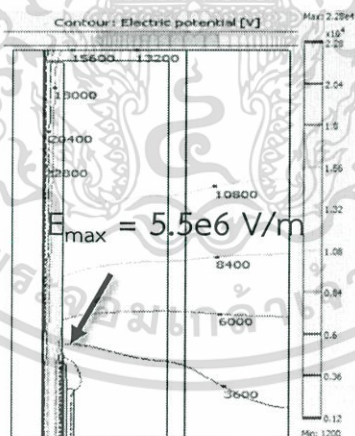
รูปที่ 4.26 การกระจายตัวเส้นสนามไฟฟ้าภายในหัวต่อสายเคเบิลสำหรับการทดสอบ PD (Oil)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.26 เป็นการจำลองภายในหัวต่อสายเคเบิลสำหรับการทดสอบ PD ซึ่งจากรูปจะจำลองโดยการใส่น้ำมัน(Oil) ลงไปในท่ออคลิกซึ่งถ้านำไปเปรียบเทียบกับกรใส่อากาศลงไปนั้น จะเห็นได้ว่าสนามไฟฟ้านั้นมีการหักเหไม่ต่างจากอากาศซักเท่าไรตำแหน่งและค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดก็แตกต่างเพียงเล็กน้อย โดยการเติมน้ำมันลงไปมีค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดลดลงจาก 2.7×10^7 เป็น 2.01×10^7 V/m

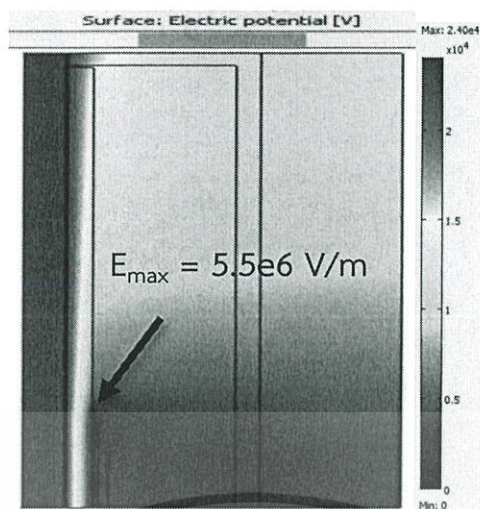


รูปที่ 4.27 ผลการจำลองสนามไฟฟ้าภายในหัวต่อสายเคเบิลสำหรับการทดสอบ PD (Oil)



รูปที่ 4.28 การกระจายตัวเส้นสนามไฟฟ้าภายในหัวต่อสายเคเบิลสำหรับการทดสอบ PD (Water)

จากรูปที่ 4.28 เป็นการจำลองภายในหัวต่อสายเคเบิลสำหรับการทดสอบ PD ซึ่งจากรูปจะจำลองโดยการใส่น้ำบริสุทธิ์(Deionize water) ลงไปในท่ออคลิกเมื่อนำเส้นสนามไฟฟ้าไปเปรียบเทียบกับภาพที่เติมอากาศลงไปนั้น ท่อที่เติมน้ำบริสุทธิ์มีการหักเหของสนามไฟฟ้าที่น้อยกว่าทำให้ความเครียดมีการสะสมน้อยลงที่ระหว่างผิวฉนวนกับฉนวน XLPE เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.29 ผลการจำลองสนามไฟฟ้าภายในหัวต่อสายเคเบิลสำหรับการทดสอบ PD (Water)

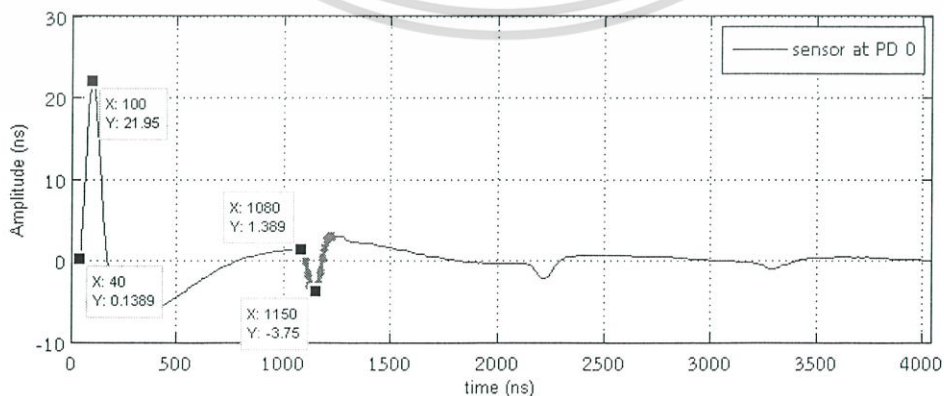
จากรูปที่ 4.29 เป็นการจำลองภายในหัวต่อสายเคเบิลสำหรับการทดสอบ PD ซึ่งจากรูปจะจำลองโดยการใส่น้ำบริสุทธิ์(Deionize water) ลงในท่อคลิกจากรูปจะมีตำแหน่งของความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เปลี่ยนไปและมีค่าความเครียดที่ลดลง จาก 2.7×10^7 เป็น 5.5×10^6

4.2 ผลและการวิเคราะห์ผลการทดลองในห้องปฏิบัติการ

การทดลองในห้องปฏิบัติการโดยการจำลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมคลื่นเดินทางในสายเคเบิล RG-58 ซึ่งแบ่งเป็น 2 กรณี

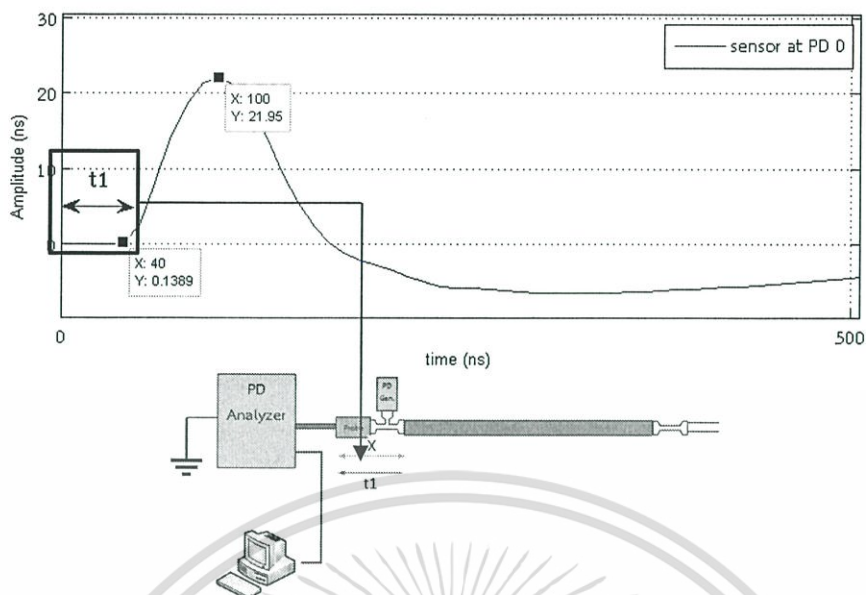
4.2.1 ศึกษาพฤติกรรมของคลื่นเดินทางเมื่อเกิดความบกพร่องในสายเคเบิล RG-58 กรณีไม่ต่อลงดิน แบ่งเป็น 2 กรณี ดังนี้

1. กรณีเปิดวงจร (Open Circuit)



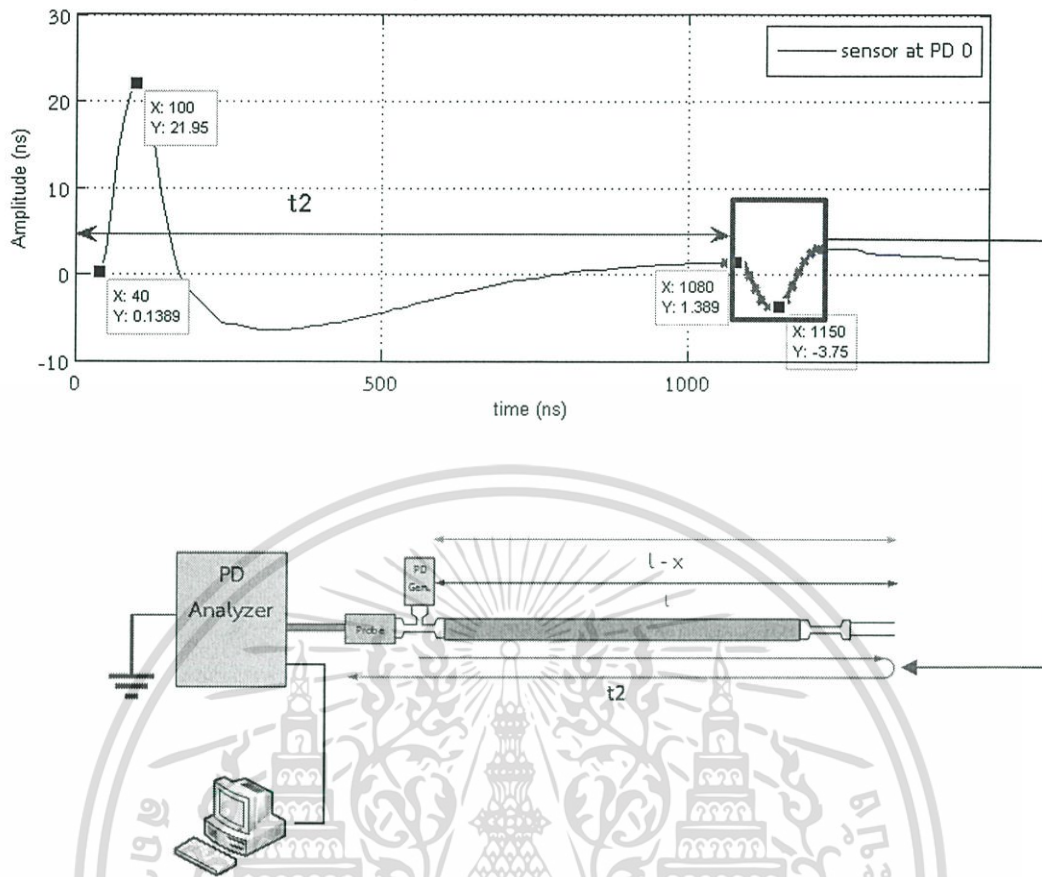
รูปที่ 4.30 ลักษณะการเดินทางของคลื่นเมื่อเปิดวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.31 แสดงระยะเวลาที่คลื่นเดินทางมายังต้นสาย (ความยาวสาย 100 เมตร)

จากรูปที่ 4.31 คลื่นลูกแรกที่ถูกตรวจจับได้ นั่นคือ คลื่นที่เดินทางออกจากจุดที่ป้อนสัญญาณไปยังต้นสาย เพราะว่าคลื่นมีการเดินทางแยกไปที่ปลายสายทั้งสองด้าน ดังนั้น ระยะห่างจากจุดที่ป้อนสัญญาณ (เกิดความบกพร่อง) ไปยังจุดที่ตรวจจับสัญญาณ กำหนดให้เป็นระยะ X และใช้ระยะเวลาที่คลื่นเดินทางเป็น t_1 ดังรูปที่ 4.32



รูปที่ 4.32 แสดงระยะเวลาที่คลื่นเดินทางไปยังปลายสายและสะท้อนกลับมายังอุปกรณ์ตรวจจับ

จากรูปที่ 4.32 ลักษณะลูกคลื่นที่สองเกิดจากคลื่นที่เดินทางแยกจากจุดที่ป้อนสัญญาณความบกพร่องไปยังปลายสายแล้วมีการเดินทางกลับหรือสะท้อนกลับ (Reflected) มายังต้นสายทำให้ อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณได้อีกครั้งหนึ่ง ดังนั้นสัญญาณที่ตรวจจับได้นี้ใช้ระยะทางในการเดินทางทั้งหมดเป็น $2L-x$ โดย x คือ ระยะทางระหว่างจุดที่เกิดความบกพร่องและอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณ ซึ่งกรณีนี้ป้อนสัญญาณจำลองความบกพร่องที่ต้นสายหรือระยะสาย 0 เมตร ทำให้ระยะทางที่คลื่นเดินทางเท่ากับ $2L$ ซึ่งตรวจจับได้ ณ เวลา t_2 ดังรูปที่ 4.3 ด้วยระยะเวลาที่คลื่นเดินทางต่างกันนี้ทำให้สามารถไปประยุกต์หาตำแหน่งหรือระยะที่เกิดความบกพร่องจากการปล่อยประจุบางส่วนได้หากไม่ทราบ เช่น จากผลการทดลองข้างต้น ความเร็วคลื่นที่เดินทางในสายเคเบิล RG-58 เท่ากับ 66.67% ของความเร็วแสง (คุณสมบัติของสาย RG-58)

จะได้

$$t_1 = \frac{x}{v} \quad (4.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$t_2 = \frac{2l - x}{v} \quad (4.2)$$

ดังนั้น ระยะเวลาที่คลื่นทั้งสองเดินทางต่างกัน $\Delta t = t_2 - t_1$

แสดงว่า

$$\Delta t = \frac{2l - x - x}{v} = \frac{2(l - x)}{v} \quad (4.3)$$

ดังนั้น จุดที่เกิดความบกพร่องห่างจากจุดที่ติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณจะได้ว่า

$$x = l - \frac{v\Delta t}{2} \quad (4.4)$$

โดย

- t_1 คือ ระยะเวลาที่คลื่นเดินทางจากจุดที่เกิดความบกพร่อง
- t_2 คือ ระยะเวลาที่คลื่นเดินทางจากจุดที่เกิดความบกพร่องไปยังปลายสายและสะท้อนกลับมายังอุปกรณ์ตรวจจับ
- l คือ ความยาวสาย
- x คือ ระยะห่างจากจุดที่เกิดความบกพร่องมายังอุปกรณ์ตรวจจับ
- v คือ ความเร็วที่คลื่นเดินทางในสาย

จากการทดลองข้างต้นนั้นสมมติว่าไม่ทราบตำแหน่งที่เกิดความบกพร่อง

$$x = 100 - \frac{66.67\% \times 3 \times 10^6 \times 1080 \times 10^{-9}}{2}$$

$$x = -4.0052 \text{ เมตร}$$

จากค่าที่ได้ใกล้เคียงกับความเป็นจริงที่ทำการทดลองแต่ยังคงมีความคลาดเคลื่อน ทั้งนี้ ความเร็วที่นำมาคำนวณนั้นมีใช้ความเร็วของสาย ณ ขณะทำการทดลอง ดังนั้น เพื่อความแม่นยำมากขึ้น ต้องพิสูจน์หาความเร็วสาย ณ ขณะทำการทดลองด้วย

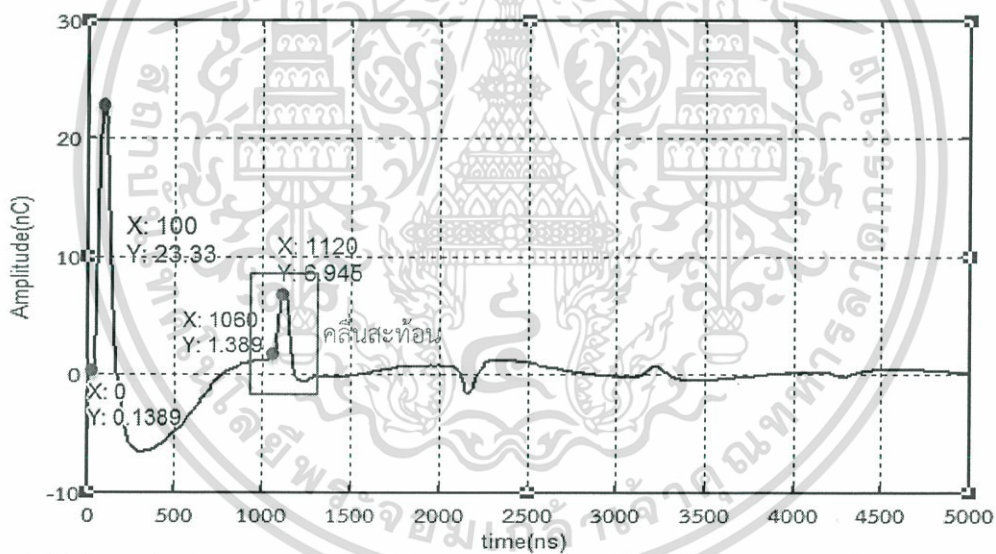
จากสมการที่ 4.3 ทำการจัดรูปเพื่อหาความเร็วสาย จะได้ว่า

$$v = \frac{2(l - x)}{\Delta t} \quad (4.5)$$

$$v = \frac{2(100 - 0)}{1080 \times 10^{-9}} = 1.852 \times 10^8 \text{ เมตรต่อวินาที}$$

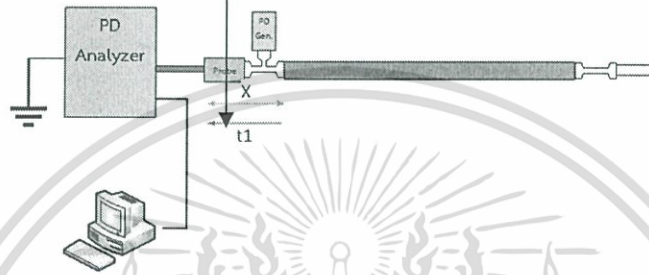
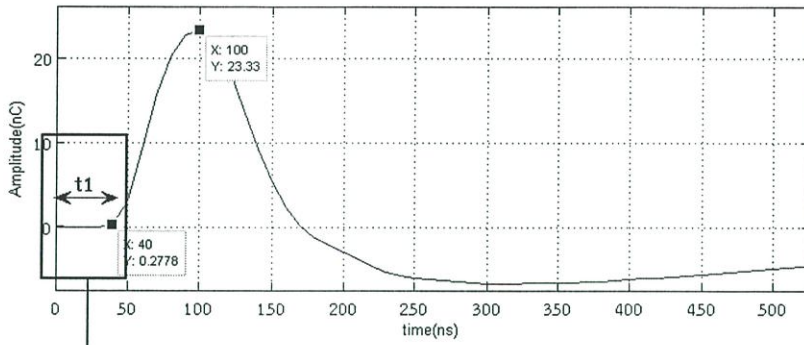
คิดเป็นเปอร์เซ็นต์เท่าของแสงเท่ากับ 61.73% ของความเร็วแสง

2. กรณีลัดวงจร (Short Circuit)

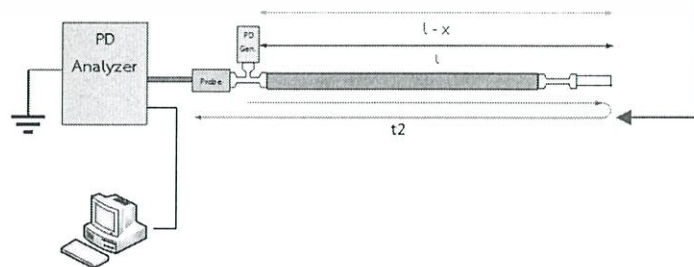
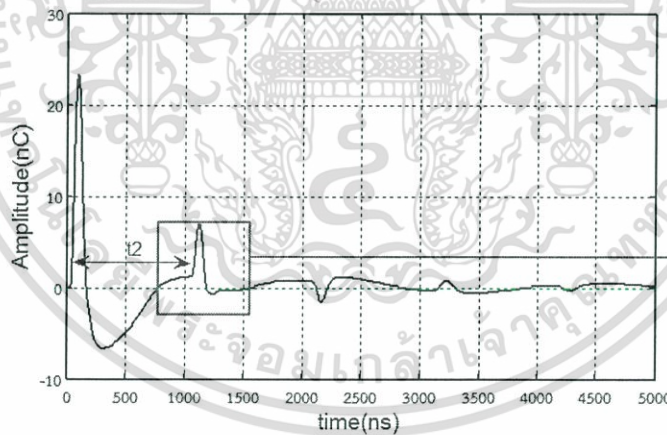


รูปที่ 4.33 แสดงการเดินทางของคลื่นเมื่อลัดวงจร (ความยาวสาย 100 เมตร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.34 แสดงระยะเวลาที่คลื่นเดินทางมายังต้นสาย เมื่อลัดวงจร (ความยาวสาย 100 เมตร)



รูปที่ 4.35 แสดงระยะเวลาที่คลื่นเดินทางเมื่อลัดวงจร โดยเดินทางไปยังปลายสาย

และสะท้อนกลับมายังอุปกรณ์ตรวจจับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.33 ลูกคลื่นแรกตรวจจับได้ที่เวลา 40 วินาที มีขนาดสัญญาณ 23.33 นาโนคูลอมบ์ ขณะที่สัญญาณของคลื่นลูกที่สองตรวจจับที่เวลา 1060 วินาที มีขนาด 6.945 นาโนคูลอมบ์ น้อยกว่าคลื่นลูกแรกเกือบ 4 เท่า

$$x = l - \frac{v\Delta t}{2}$$

$$x = 100 - \frac{61.73\% \times 3 \times 10^6 \times 1060 \times 10^{-9}}{2}$$

$$x = 1.849 \text{ เมตร}$$

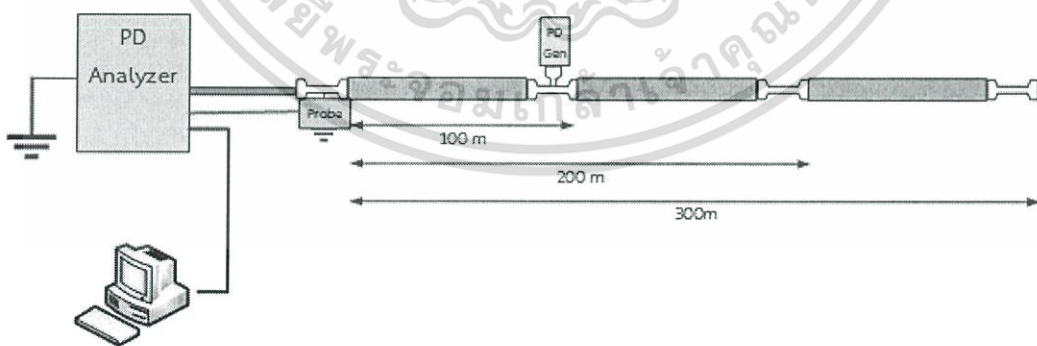
เมื่อพิจารณาระหว่างการตรวจจับทั้งแบบเปิดและปิดวงจรพบว่าขนาดคลื่นลูกที่สองที่ตรวจจับเมื่อเปิดวงจรมีขนาดติดลบ คือ -3.75 นาโนคูลอมบ์ ที่เวลาหน้าคลื่น 1080 วินาที ซึ่งนานกว่าคลื่นที่พบเมื่อปิดวงจรเพราะอิมพีแดนซ์สาย

4.2.2 ศึกษาพฤติกรรมของคลื่นเดินทางเมื่อเกิดความบกพร่องในสายเคเบิล RG-58

กรณีต่อลงดิน

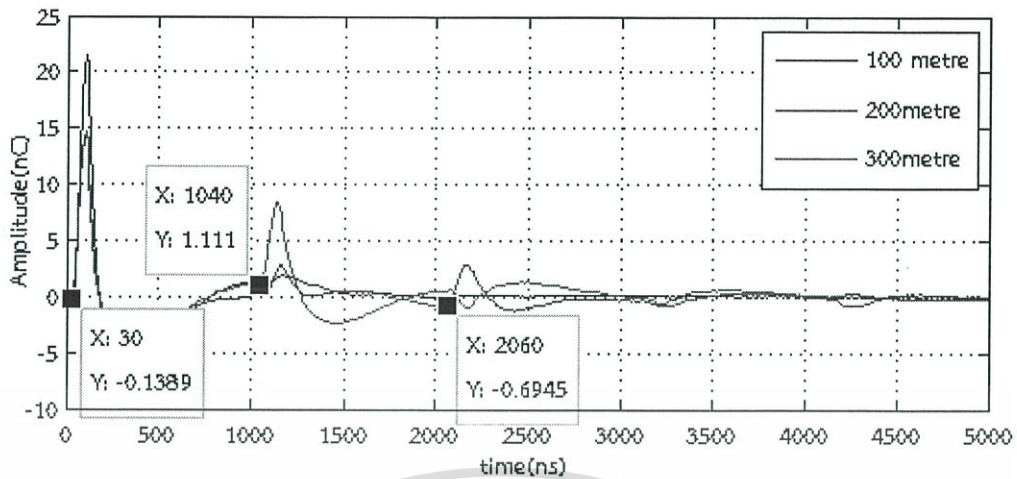
1. กรณีต่อลงดินด้านเดียว (One end bonding system)

1.1 เปลี่ยนแปลงค่าความยาวสายเคเบิล RG-58 ณ ตำแหน่งความบกพร่องที่ต้นสาย (ระยะ 0 เมตร)



รูปที่ 4.36 วงจรการทดลองความบกพร่อง 100 เมตร
เปลี่ยนแปลงความยาวสายและต่อลงดินแบบ One end bonding

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

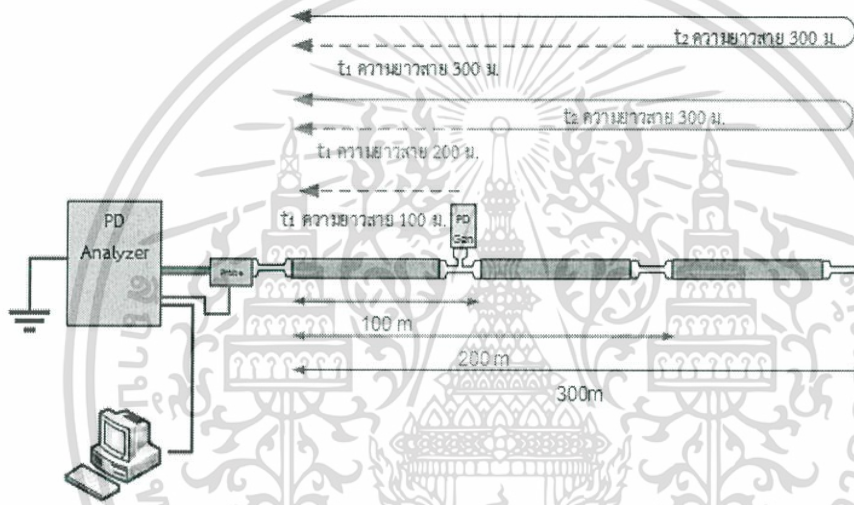
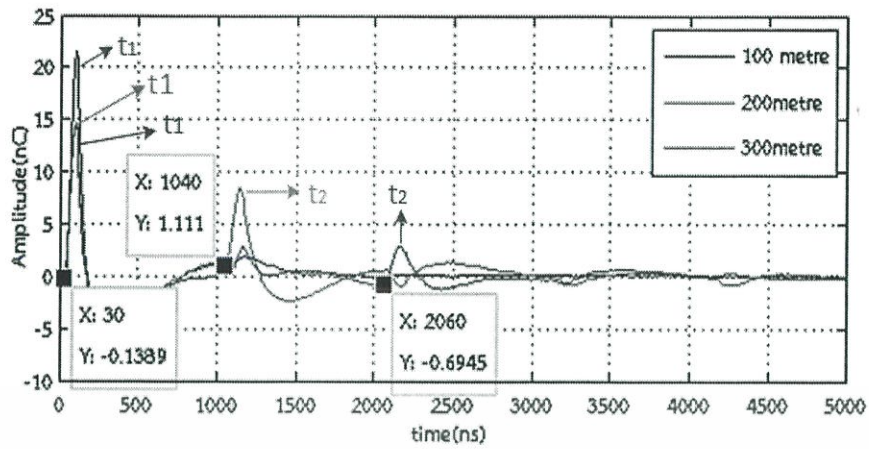


รูปที่ 4.37 ผลการทดลองเนื่องจากการต่อลงดินด้านเดียว
ตรวจจับสัญญาณที่ต้นสายความยาวสายเปลี่ยนแปลง

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลอง เมื่อต่อลงดินด้านเดียว เกิดความบกพร่องที่ 100 เมตร

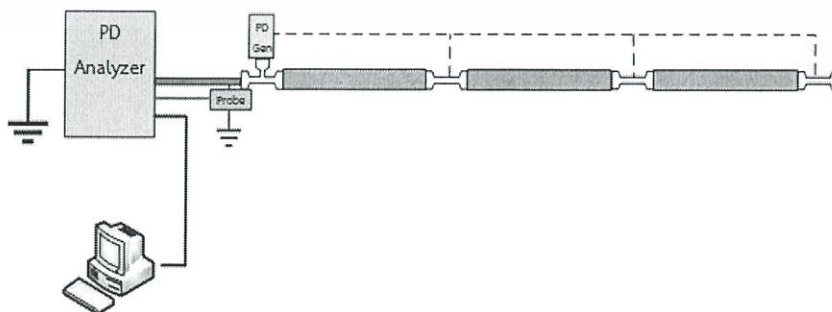
ความยาว สาย (เมตร)	ค่าจากคำนวณ		ค่าจากการทดลอง	
	เวลาที่เปลี่ยนแปลง (Δt) (ns)	ขนาดคลื่น สะท้อน (nC)	เวลาที่เปลี่ยนแปลง (Δt) (ns)	ตำแหน่งที่เกิด (เมตร)
100	0	0	0	ระบุไม่ได้
200	1013.325	8.473	1040	97.363
300	2026.504	2.778	2060	96.7089

จากผลการทดลอง เมื่อความยาวสายเพิ่มขึ้นหรืออิมพีแดนซ์มากขึ้นขนาดคลื่นสะท้อนจะมีขนาดน้อยลง เนื่องจากคลื่นเดินทางใช้ระยะทางมากขึ้นทำให้ความยาวคลื่นมากขึ้นขณะที่ความเร็วคลื่นเท่าเดิมส่งผลให้คลื่นมีแอมพลิจูดลดลง พิจารณาคลื่นลูกแรก พบว่า ขนาดคลื่นที่สาย 200 เมตร และ 300 เมตร มีขนาดเท่ากัน ขณะที่คลื่นลูกที่สอง (คลื่นสะท้อน) มีขนาดน้อยลงเมื่อความยาวสายเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.38

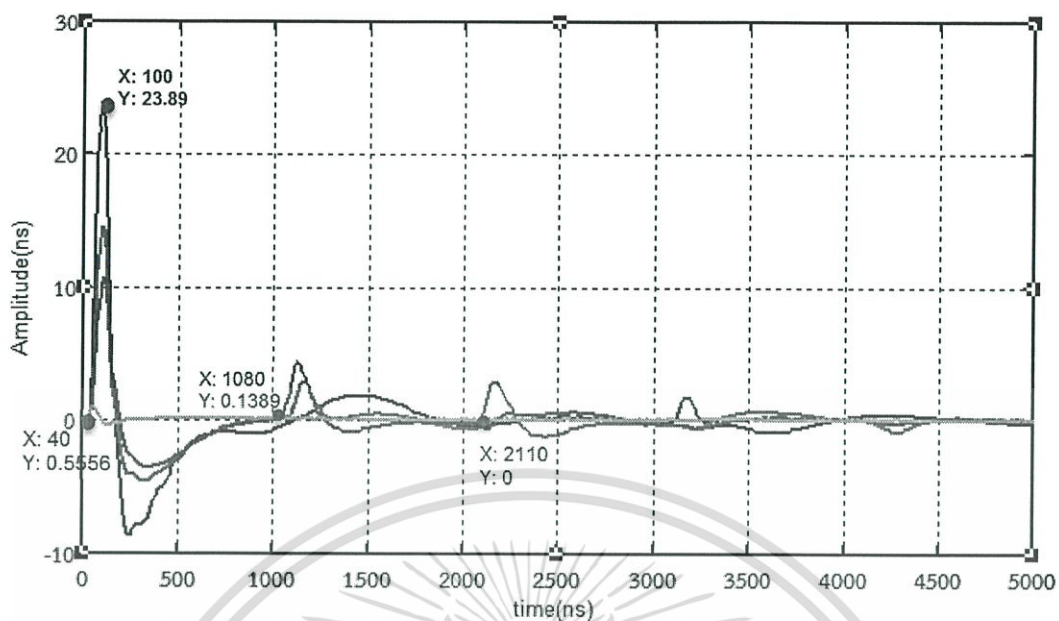


รูปที่ 4.38 ลักษณะการเดินทางของคลื่นที่ความยาวสายต่างกัน

1.2 เปลี่ยนแปลงตำแหน่งความบกพร่องของสายเคเบิล RG-58 ณ ความยาวสายที่ 300 เมตร



รูปที่ 4.39 วงจรจำลองการทดลอง เมื่อต่อลงดินด้านเดียวที่ความยาวสาย 300 เมตร เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



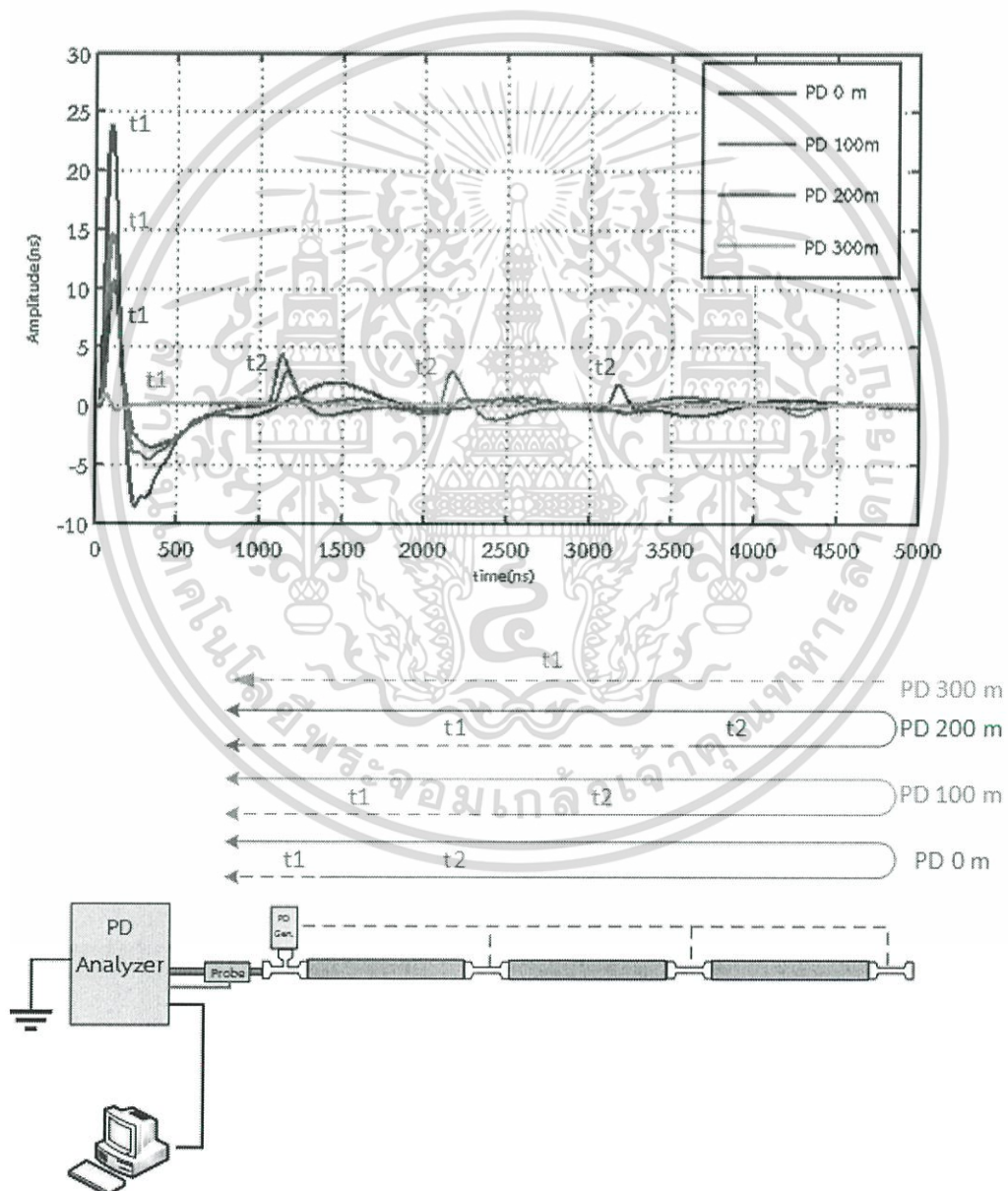
รูปที่ 4.40 ผลการทดลองเมื่อเปลี่ยนตำแหน่งความบกพร่อง ความยาวสาย 300 เมตร

ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองเมื่อต่อลงดินด้านเดียว ความยาวสาย 300 เมตร

ระยะที่ป้อน สัญญาณ	ค่าจากคำนวณ	ค่าจากการทดลอง		
	เวลาที่เปลี่ยนแปลง (Δt) (ns)	ขนาดคลื่น สะท้อน (nC)	เวลาที่ เปลี่ยนแปลง (Δt) (ns)	ตำแหน่งที่เกิด (เมตร)
ต้นสาย	3039.97	1.806	3080	-3.948
100	2026.65	2.778	2070	95.722
200	1013.32	4.306	1030	198.354
300	0	0	0	ระบุไม่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

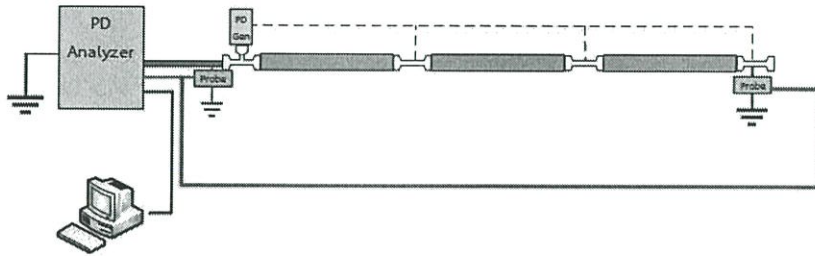
จากตารางที่ 4.2 ขนาดสัญญาณคลื่นสะท้อนเมื่อเกิดความบกพร่องห่างจากอุปกรณ์ตรวจจับมากขึ้นขนาดจะเพิ่มขึ้น เพราะคลื่นเดินทางจากจุดที่เกิดความบกพร่องไปยังปลายสายและเดินทางสะท้อนกลับ แสดงว่าหากระยะทางจากจุดบกพร่องมายังปลายสายรวมกับระยะทางจากปลายสายไปยังอุปกรณ์ตรวจจับลดลง คลื่นลูกที่สองจะมีขนาดเพิ่มขึ้น อย่างเช่น การเกิดความบกพร่องที่ 100 เมตร ความยาวสาย 300 เมตร ระยะทางจากจุดบกพร่องไปปลายสายคือ 200 เมตร รวมกับความยาวสาย 300 เมตร เป็น 500 เมตร ขณะที่เกิดความบกพร่อง ณ 200 เมตร ความยาวสายเดียวกัน ระยะทางที่คลื่นเดินทางกลับรวม 400 เมตร ขนาดคลื่นเดินทางจึงเพิ่มขึ้นนั่นเอง พิจารณารูปที่ 4.41 ประกอบ



รูปที่ 4.41 ลักษณะคลื่นเดินทางเมื่อจุดที่เกิดความบกพร่องเปลี่ยนแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

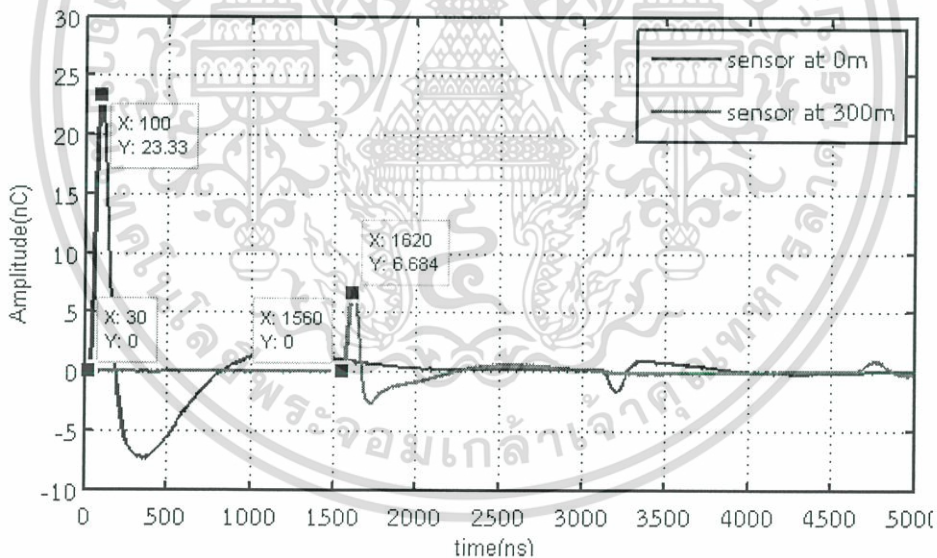
2. กรณีต่อลงดิน 2 ด้าน (Both end bonding system) ความยาวสาย 300 เมตร



รูปที่ 4.42 วงจรจำลองการทดลองการต่อลงดินแบบ Both end bonding

การทดลองการต่อลงดินทั้งสองด้านจะต้องทำการตรวจจับสัญญาณที่จุดต่อลงดินทั้งสอง สัญญาณที่ตรวจจับได้ต้องพิจารณาเวลาและตำแหน่งจุดบกพร่อง ลักษณะคลื่นเดินทางจะไม่ตรวจพบสัญญาณสะท้อน

2.1 ตำแหน่งความบกพร่องระยะ 0 เมตร

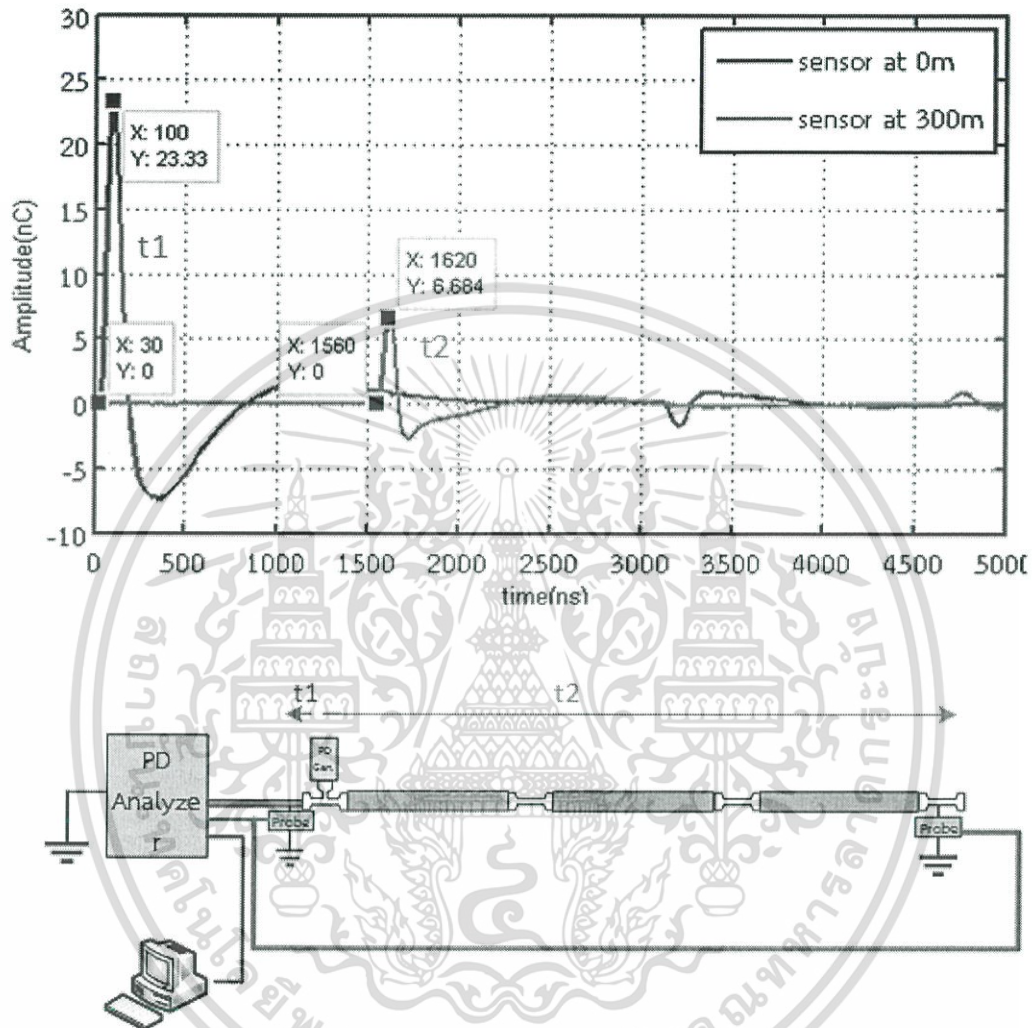


รูปที่ 4.43 ผลการทดลองที่ความบกพร่องต้นสายและตรวจจับสัญญาณ ณ จุดต่อลงดิน

จากกราฟผลการทดลอง คลื่นลูกแรกเกิดจากคลื่นเดินทางจากจุดที่เกิดความบกพร่องมายังอุปกรณ์ตรวจจับต้นสาย ตรวจจับพบเมื่อเวลา 30 นาโนวินาที เนื่องจากเกิดความบกพร่องบริเวณต้นสายขนาดสัญญาณที่ตรวจจับจึงมีขนาด 23.3 นาโนคูลอมบ์ ซึ่งมากกว่าสัญญาณที่อุปกรณ์ตรวจจับปลายสายพบสัญญาณ ที่เวลา 1560 นาโนวินาที มีขนาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณ 6.684 นาโนคูลอมบ์ น้อยกว่าเกือบ 4 เท่า วิเคราะห์ทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นเดินทาง ดังรูปที่ 4.44

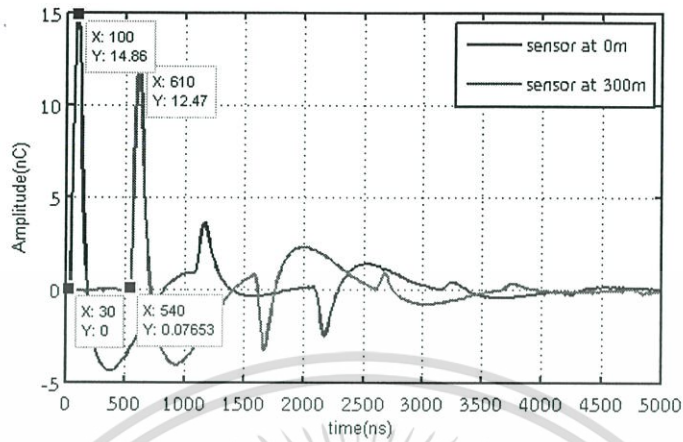


รูปที่ 4.44 ลักษณะคลื่นเดินทาง เมื่อเกิดความบกพร่องที่ 0 เมตร

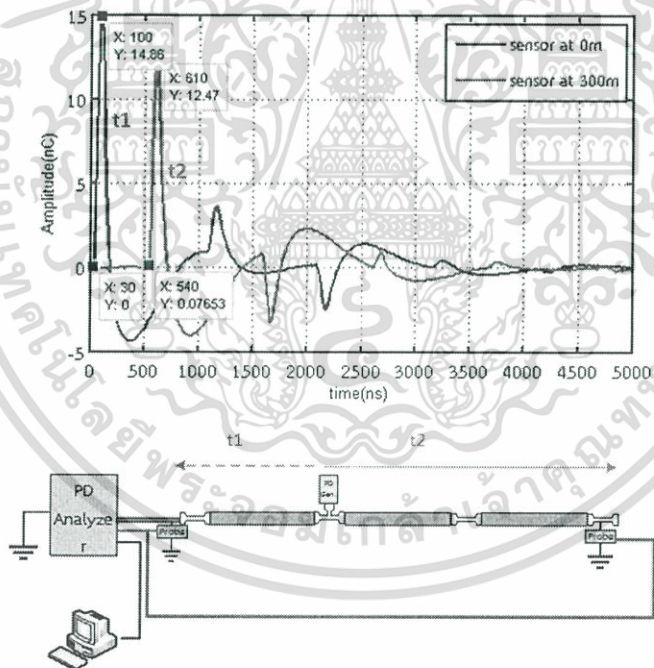
จากรูปที่ 4.44 เวลา t_1 คือเวลาที่คลื่นเดินทางจากจุดที่เกิดความบกพร่องมายังอุปกรณ์ตรวจจับต้นทางและ t_2 คือเวลาที่คลื่นเดินทางจากจุดบกพร่องมายังอุปกรณ์ตรวจจับปลายทาง ระยะทางคลื่นที่เวลา t_2 มีระยะห่างกว่าระยะทางที่ t_1 300 เมตร ขนาดแอมป์จูดลดลง ความถี่สัญญาณที่ปลายทางตรวจพบจึงน้อยกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 ตำแหน่งความบกพร่องระยะ 100 เมตร



รูปที่ 4.45 แสดงผลการทดลอง เมื่อเกิดความบกพร่องที่ 100 เมตรของสาย

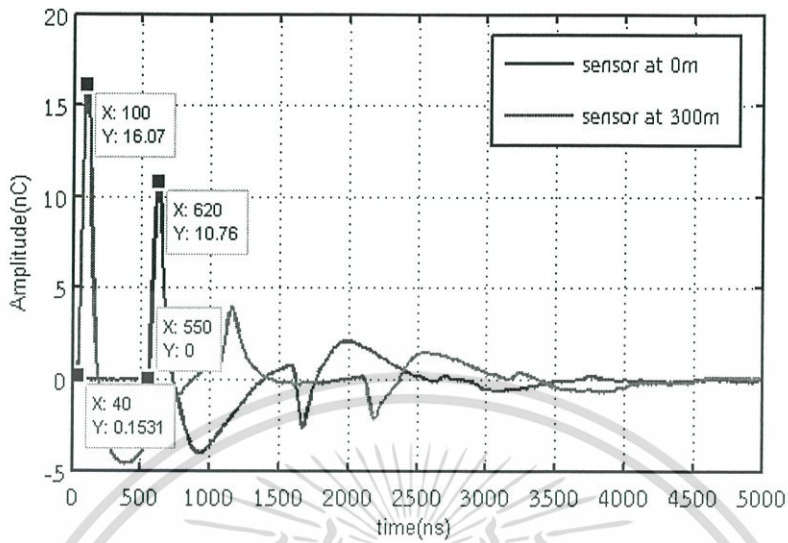


รูปที่ 4.46 ลักษณะคลื่นเดินทาง เมื่อเกิดความบกพร่องที่ 100 เมตร

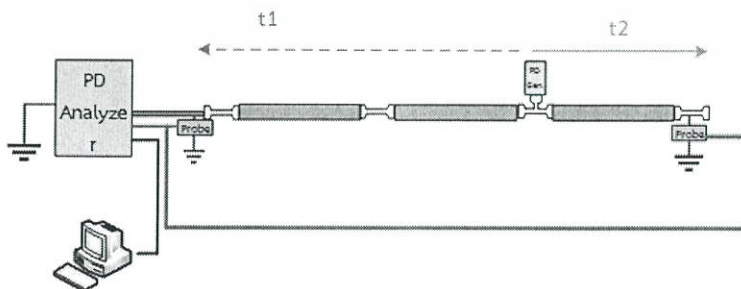
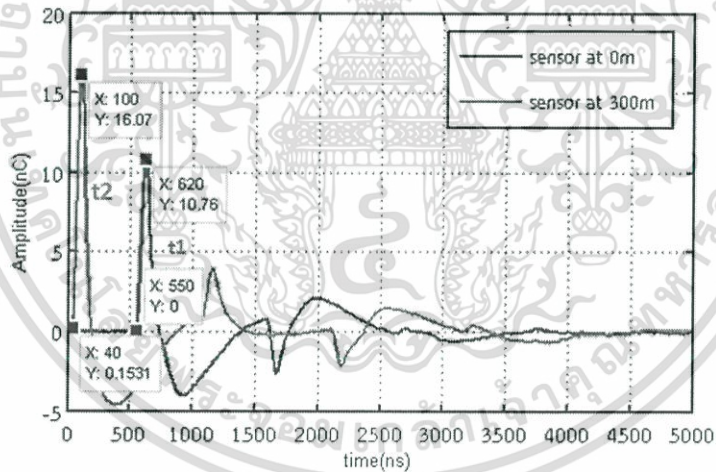
จากผลการทดลอง พบว่าคลื่นลูกแรกที่อุปกรณ์ตรวจจับต้นสายจะมีขนาดสัญญาณมากกว่าคลื่นลูกแรกที่อุปกรณ์ตรวจจับปลายสายวัดได้เนื่องจากระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ตรวจจับต้นสายมีระยะห่างกับจุดความบกพร่องน้อยกว่า เท่ากับ 100 เมตร ขณะที่ห่างจากอุปกรณ์ตรวจจับปลายสาย 200 เมตร ดังรูปที่ 4.46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 ตำแหน่งความบกพร่องระยะ 200 เมตร



รูปที่ 4.47 ผลการทดลองเมื่อเกิดความบกพร่องที่ 200 เมตร

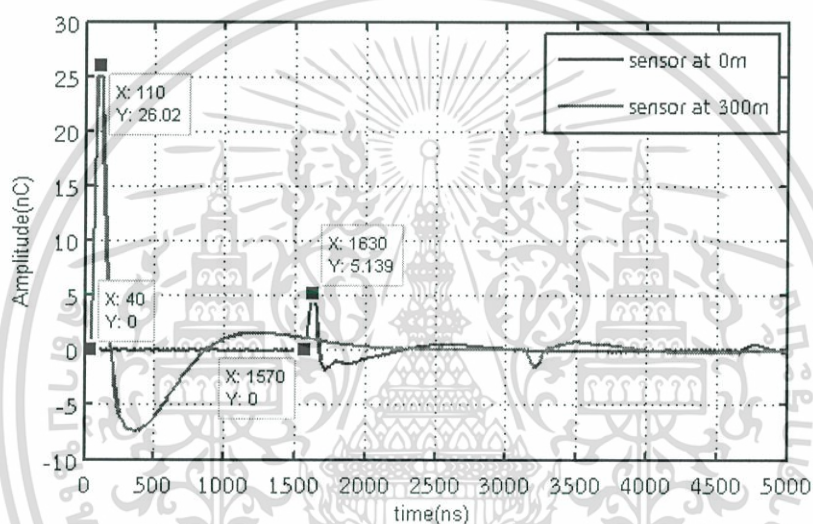


รูปที่ 4.48 ลักษณะคลื่นเดินทาง เมื่อเกิดความบกพร่องที่ 200 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

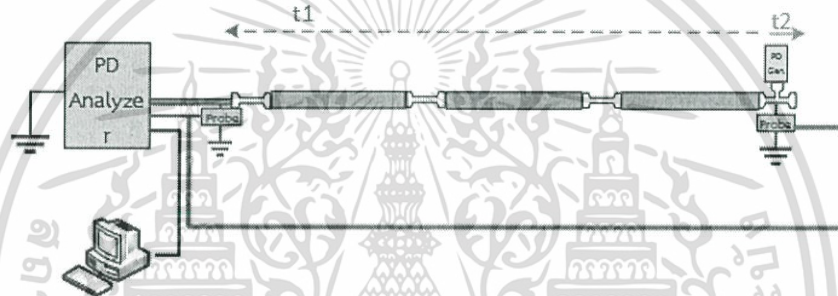
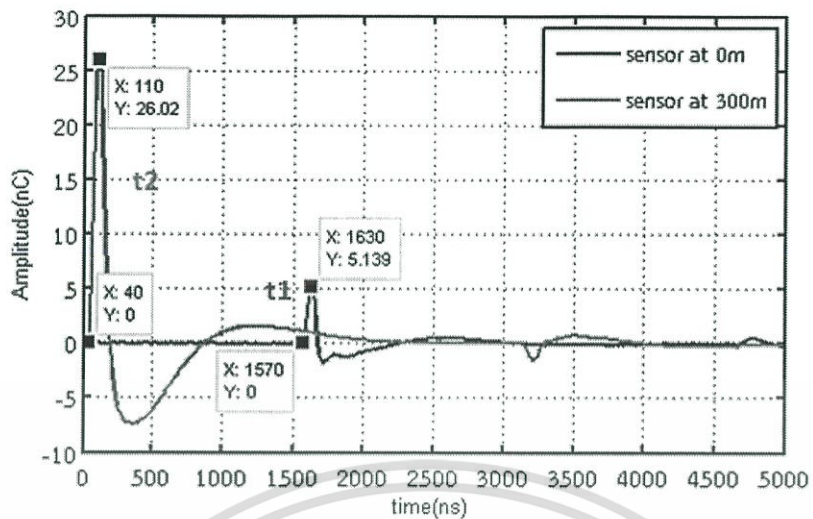
จากกราฟผลการทดลอง พบว่าขนาดคลื่นที่อุปกรณ์ตรวจจับต้นสายวัดได้จะมีขนาด 10.76 นาโนคูลอมบ์ ซึ่งมากกว่าอุปกรณ์ที่ต้นสายตรวจจับคือ 550 นาโนวินาที ขนาดที่ปลายสายตรวจพบเท่ากับ 16.07 นาโนคูลอมบ์ ที่เวลา 40 วินาที นาโนคูลอมบ์ ขนาดปลายสายมากกว่าต้นสายเกือบ 1.5 เท่า ของขนาดต้นสาย และระยะจากจุดบกพร่องห่างจากอุปกรณ์ตรวจจับต้นทางมากกว่า 2 เท่า ของอุปกรณ์ตรวจจับต้นทาง เนื่องจากมีระยะห่างจากจุดบกพร่องกับอุปกรณ์ตรวจจับปลายสายน้อยกว่าเมื่อเทียบกับอุปกรณ์ตรวจจับต้นสาย

2.4 ตำแหน่งความบกพร่องระยะ 300 เมตร



รูปที่ 4.49 แสดงผลเมื่อเกิดความบกพร่องปลายสาย

จากผลการทดลองพบว่ามีขนาดสัญญาณคลื่นลูกแรกที่ตรวจจับได้ที่เวลา 40 นาโนวินาที คือสัญญาณที่พบ ณ อุปกรณ์ตรวจจับปลายสาย ขนาดสัญญาณ 26.02 นาโนคูลอมบ์ ขณะที่อุปกรณ์ตรวจจับต้นสายตรวจพบสัญญาณที่เวลา 1570 นาโนวินาที ขนาด 5.139 นาโนคูลอมบ์ น้อยกว่าสัญญาณที่พบในตำแหน่งปลายสายถึง 5 เท่า ดังรูปที่ 4.50



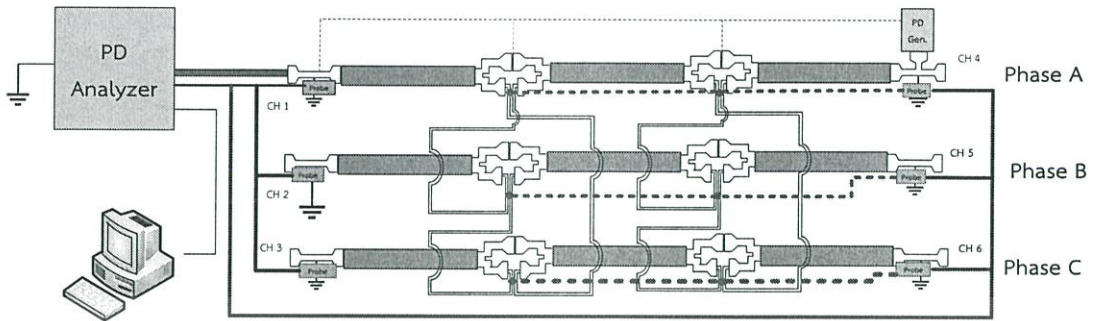
รูปที่ 4.50 ลักษณะคลื่นเดินทาง เมื่อเกิดความบกพร่องที่ 300 เมตร

ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองเมื่อลงดินทั้งสองด้าน

ระยะที่ป้อนสัญญาณ	ค่าจากคำนวณ	ค่าจากการทดลอง		
	เวลาที่เปลี่ยนแปลง (Δt) (ns)	ขนาดคลื่น ลูกที่สอง (nC)	เวลาที่เปลี่ยนแปลง (Δt) (ns)	ตำแหน่งที่เกิด (เมตร)
ต้นสาย	1519.98	6.684	1530	-0.9880
100	506.66	12.47	510	99.6706
200	-506.66	10.76	-510	200.3293
300	-1.519.98	5.139	-1530	300.9880

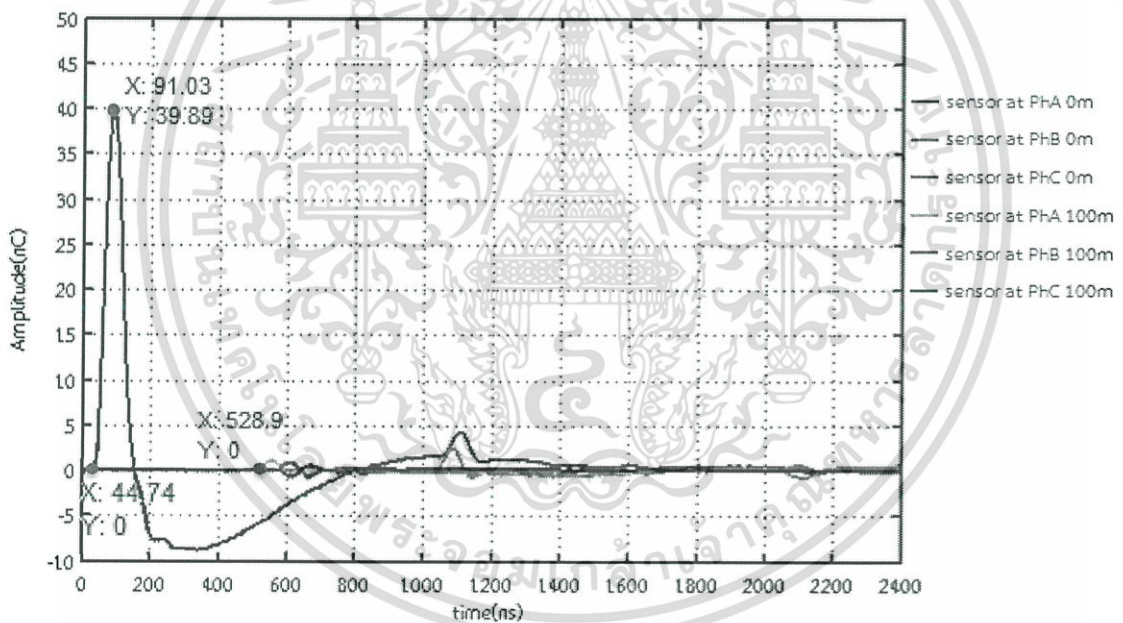
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. กรณีต่อลงดินแบบไขว้ (Cross bonding system) ทดสอบความยาวสาย 300 เมตร



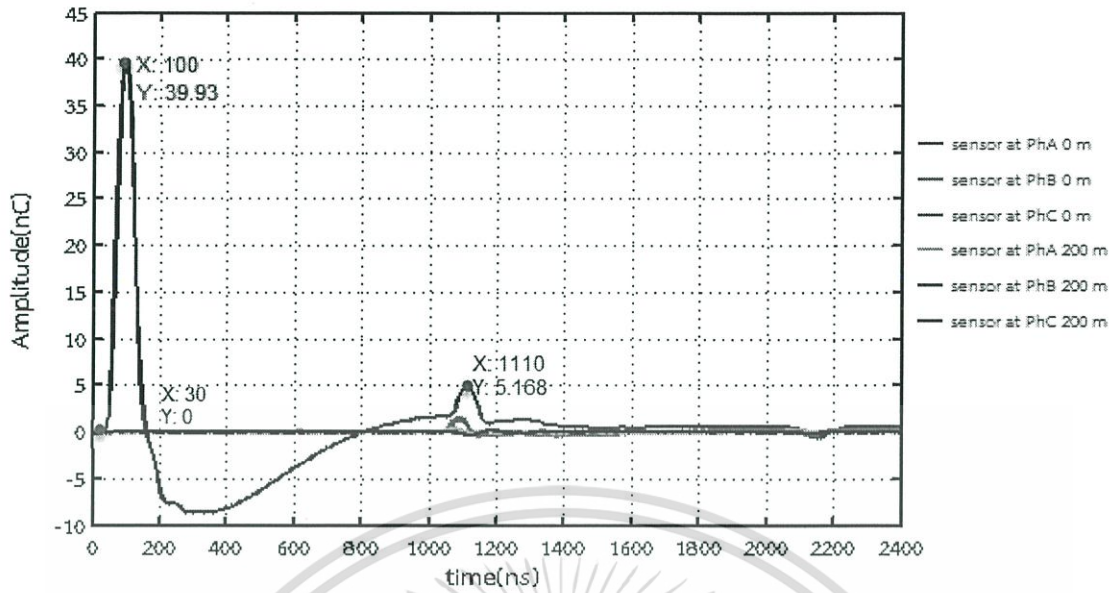
รูปที่ 4.51 วงจรจำลองการทดลอง เมื่อต่อลงดินแบบ Cross bonding

3.1 ตำแหน่งความบกพร่องระยะ 0 เมตร

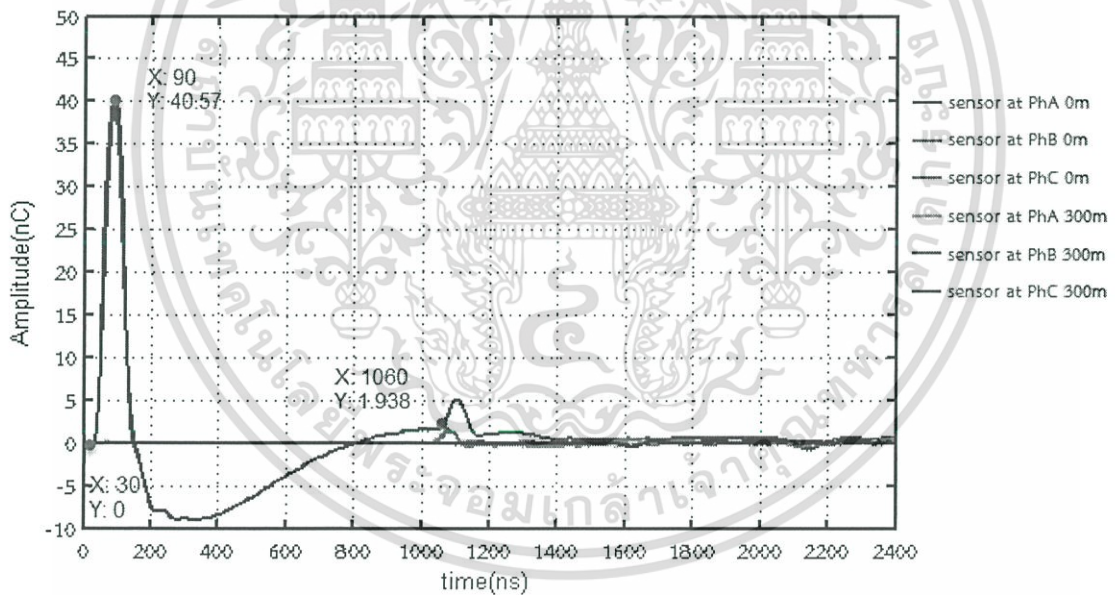


รูปที่ ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข)



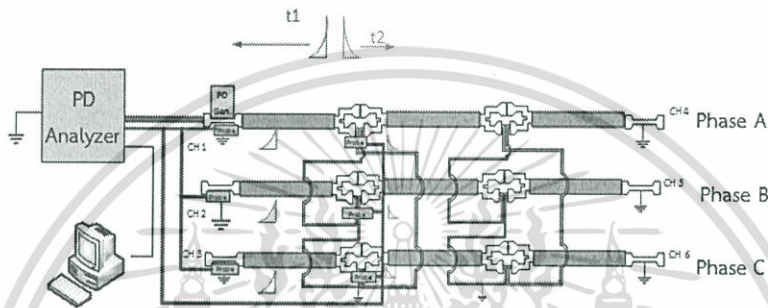
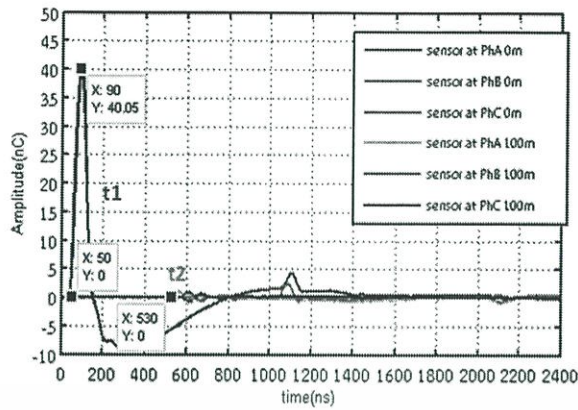
รูปที่ ค)

รูปที่ 4.52 ผลการทดลองจากการทดลองดินแบบไขว้ป้อนสัญญาณที่ต้นสาย

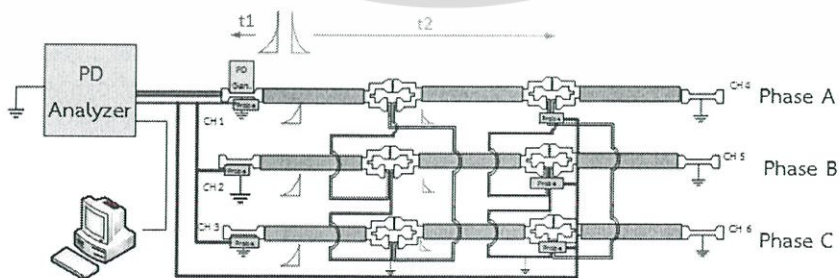
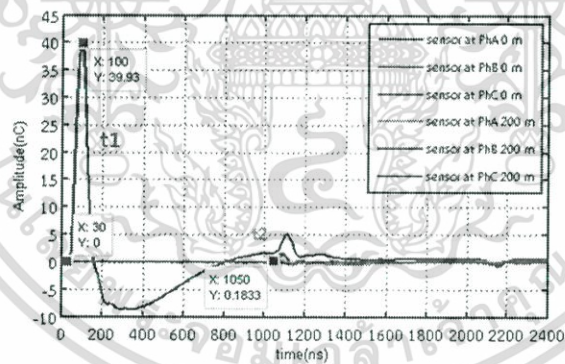
โดย

- ก) ตรวจจับสัญญาณที่ต้นสายและ 100 เมตร
- ข) ตรวจจับสัญญาณที่ต้นสายและ 200 เมตร
- ค) ตรวจจับสัญญาณที่ต้นสายและ 300 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

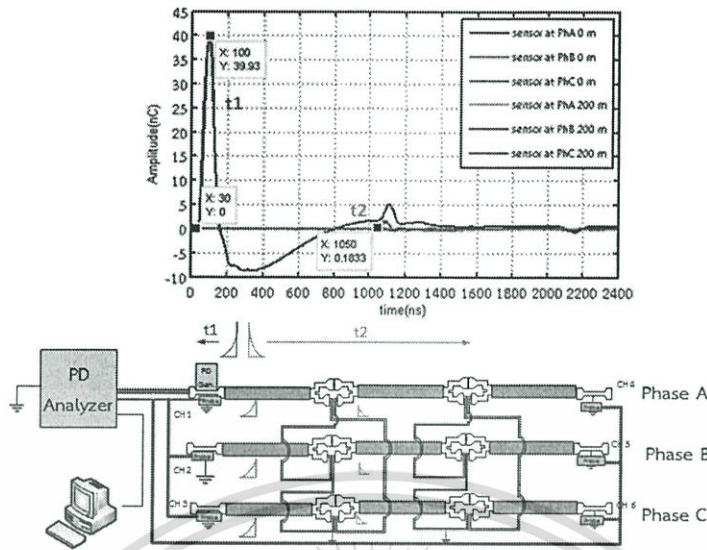


รูปที่ 4.53 เมื่อเกิดความบกพร่องที่ 0 เมตร ตรวจจับสัญญาณ 0 และ 100 เมตร



รูปที่ 4.54 เมื่อเกิดความบกพร่องที่ 0 เมตร ตรวจจับสัญญาณ 0 และ 200 เมตร

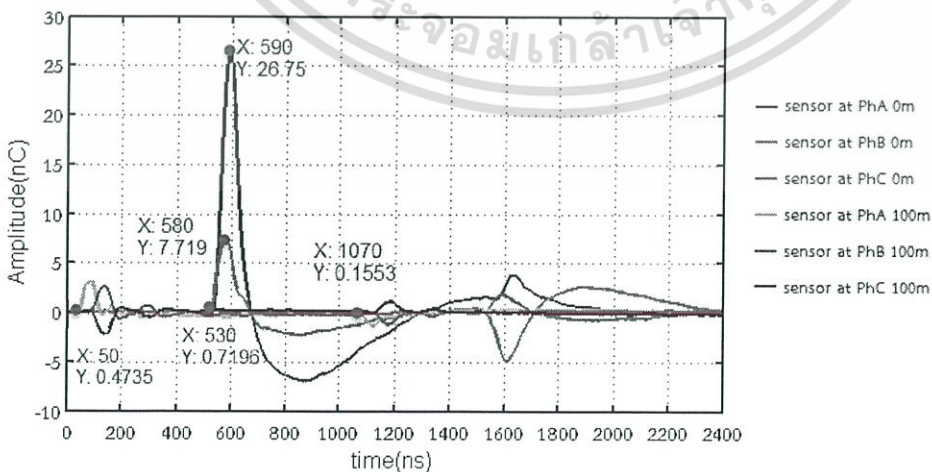
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.55 เมื่อเกิดความบกพร่องที่ 0 เมตร ตรวจจับสัญญาณ 0 และ 300 เมตร

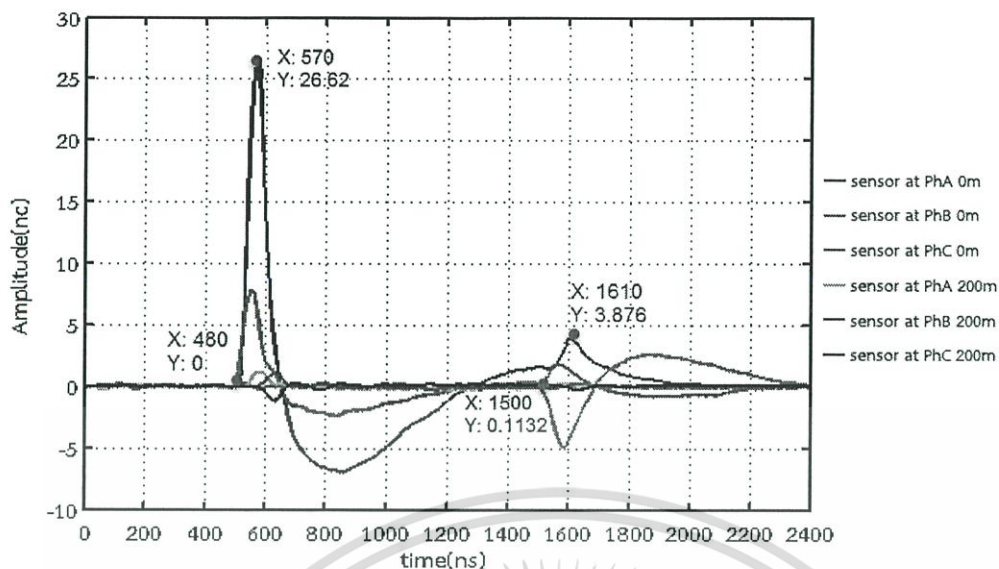
จากผลการทดลองพบว่าสัญญาณสามารถตรวจพบทุกเฟสเนื่องจากการต่อลงดินที่ต่อเนื่องกัน รูปที่ 4.53 ขนาดสัญญาณของคลื่นลูกแรก คือ 40.05 นาโนคูลอมบ์ มีเวลาหน้าคลื่น 50 นาโนวินาที เส้นกราฟที่มีขนาดมากกว่าเส้นกราฟอื่นคือกราฟสีน้ำเงิน สามารถสันนิษฐานว่าเกิดความบกพร่องใกล้อุปกรณ์ตรวจจับตำแหน่งนี้ คือ เฟส A ที่ 0 เมตร และเมื่อพิจารณาการขยับหรือเปลี่ยนแปลงอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณไปยังจุดต่อลงดินทุกๆจุด พบว่าสัญญาณที่สังเกตเห็นลักษณะการเดินทางคลื่นได้ชัดเจนที่สุด คือสัญญาณที่ตรวจจับที่ระยะ 0 และ 100 เมตร ของสายเคเบิล คาดการณ์ได้ว่าเกิดความบกพร่องที่ต้นสายของเฟส A

3.2 ตำแหน่งความบกพร่องระยะ 100 เมตร

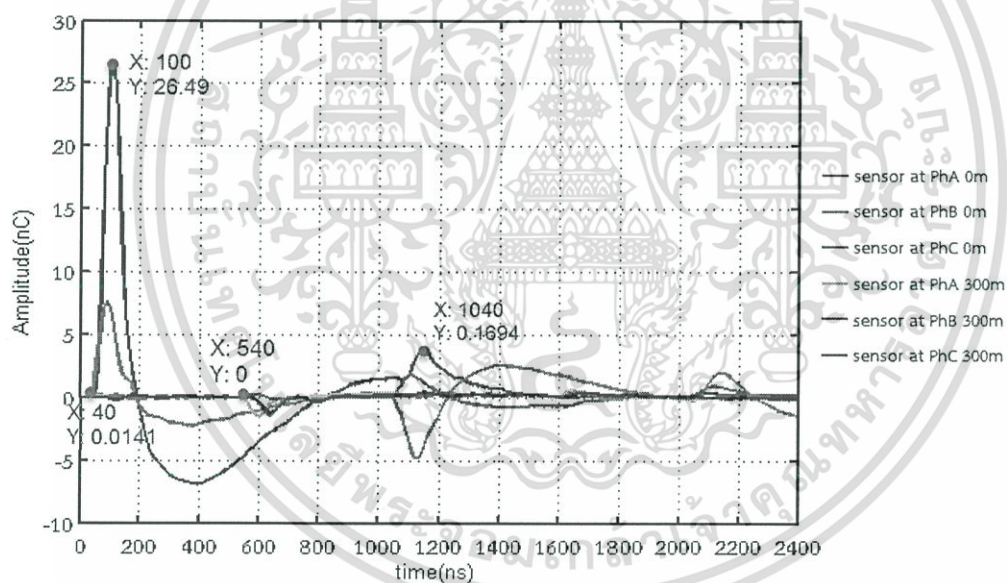


รูปที่ ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข)



รูปที่ ค)

รูปที่ 4.56 ผลการทดลองเมื่อเกิดความบกพร่องที่ 100 เมตร

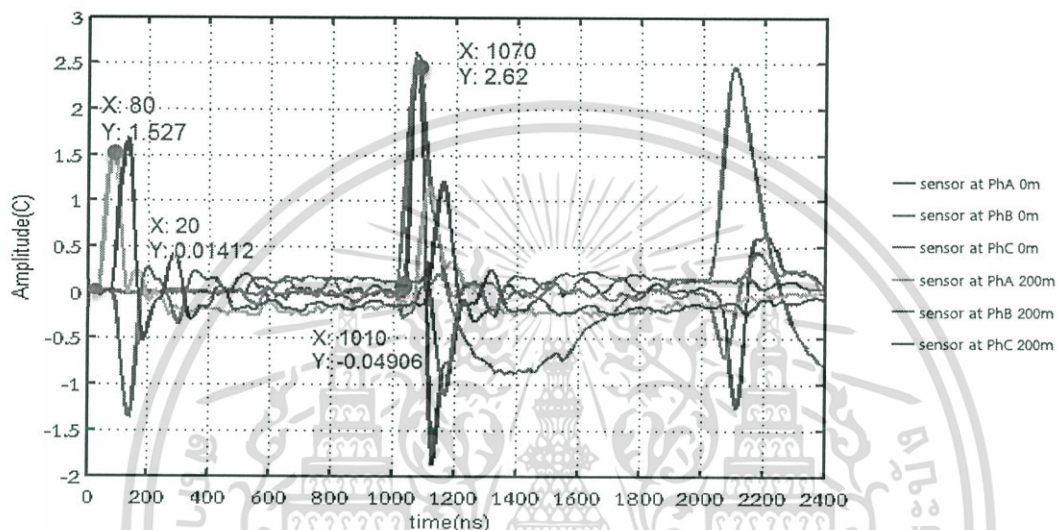
โดย

- ก) ตรวจจับสัญญาณที่ต้นสายและ 100 เมตร
- ข) ตรวจจับสัญญาณที่ต้นสายและ 200 เมตร
- ค) ตรวจจับสัญญาณที่ต้นสายและ 300 เมตร

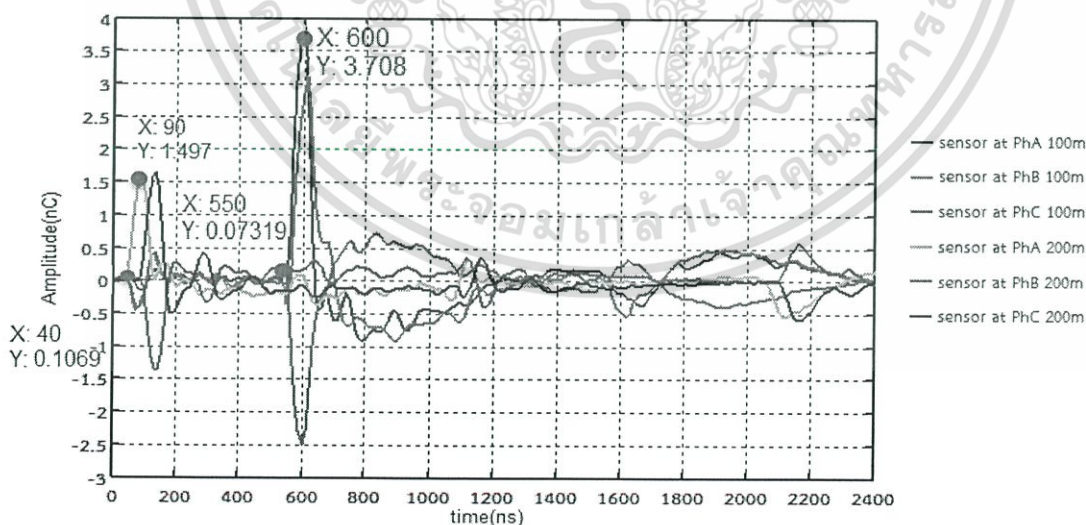
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลอง พบว่าสัญญาณที่อุปกรณ์ตรวจจับที่ตำแหน่งต้นสายและตำแหน่ง 200 เมตรของสาย เวลาที่ตรวจพบสัญญาณความบกพร่องจากอุปกรณ์ตรวจจับทั้งสองจะใกล้เคียงกันมีค่าประมาณ 490 นาโนวินาที จากรูปที่ 4.56 ก) ขนาดสัญญาณสามารถตรวจพบสัญญาณที่ ระยะ 100 เมตร ขณะที่รูปที่ ข) สัญญาณที่ 200 เมตร มีขนาดน้อย แต่มากกว่าสัญญาณที่ตรวจพบที่ 300 เมตร

3.3 ตำแหน่งความบกพร่องระยะ 200 เมตร

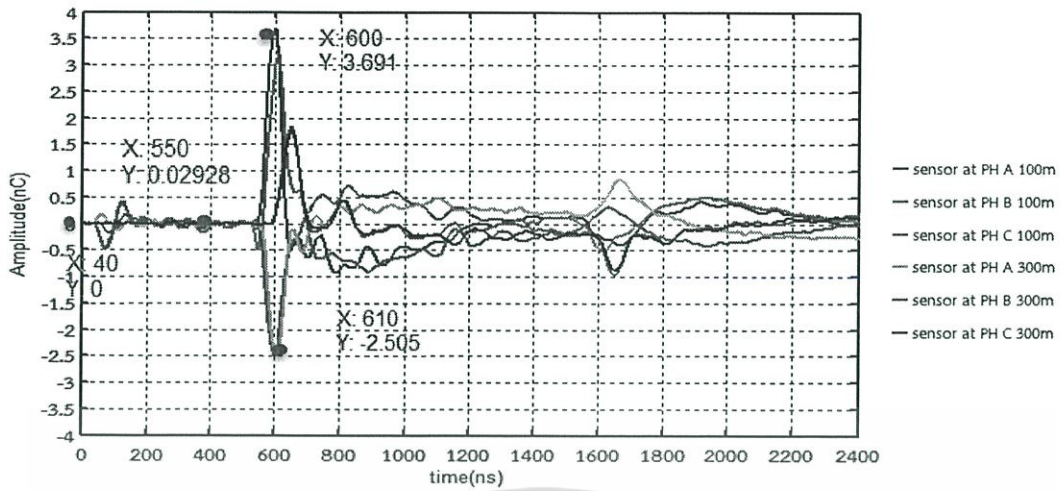


รูปที่ ก)



รูปที่ ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่วารณใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค)

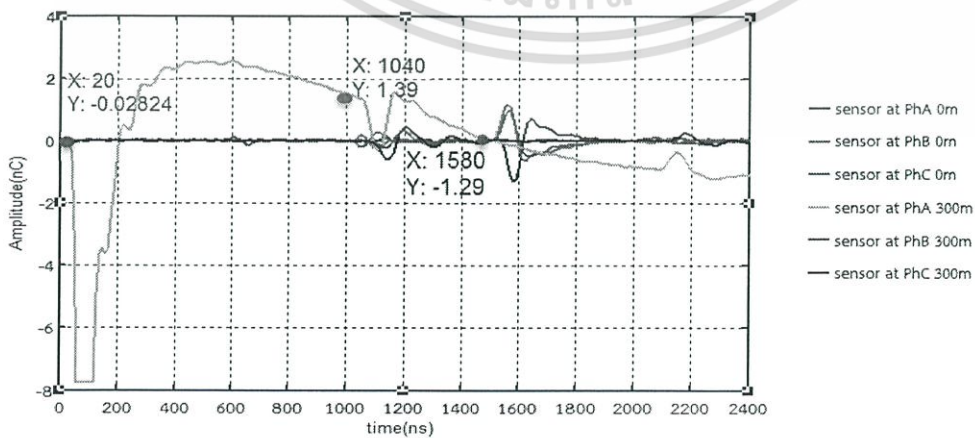
รูปที่ 4.57 ผลการทดลองเมื่อเกิดความบกพร่องที่ 200 เมตร

โดย

- ก) ตรวจจับสนสัญญาณที่ 100 และ 200 เมตร
- ข) ตรวจจับสนสัญญาณที่ต้นสายและ 200 เมตร
- ค) ตรวจจับสนสัญญาณที่ 100 และ 300 เมตร

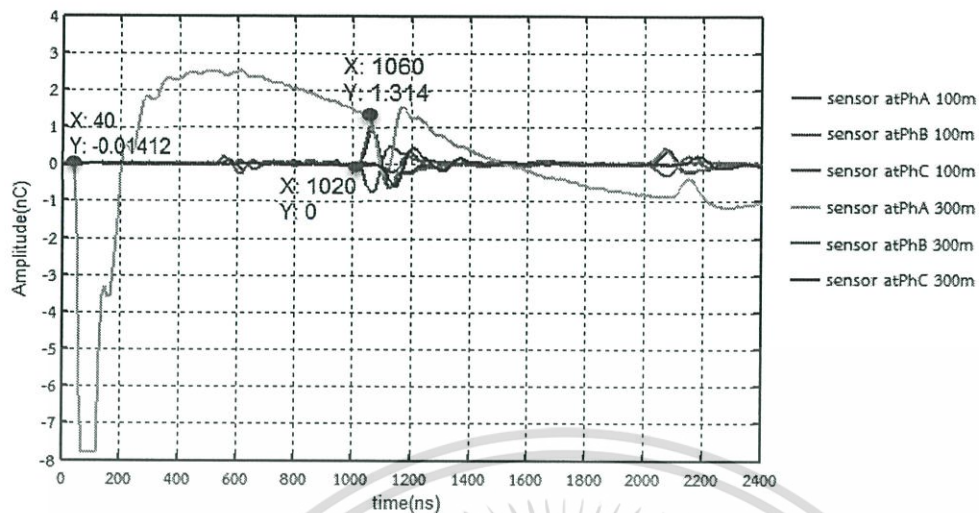
จากผลการทดลองสัญญาณที่ตรวจจับได้ที่อุปกรณ์ตรวจจับปลายสายจะตรวจพบสัญญาณก่อนแต่มีขนาดมีค่า 80 นาโนคูลอมบ์ น้อยกว่าสัญญาณที่ต้นสายตรวจจับได้ ทั้งนี้จากกราฟสัญญาณที่เฟส C มีขนาดมากกว่าที่เฟส A หรือเฟสที่จำลองอันเนื่องมาจากสายเคเบิลที่เฟส C มีปลอกฉนวนแบบทองแดง

3.4 ตำแหน่งความบกพร่องระยะ 300 เมตร

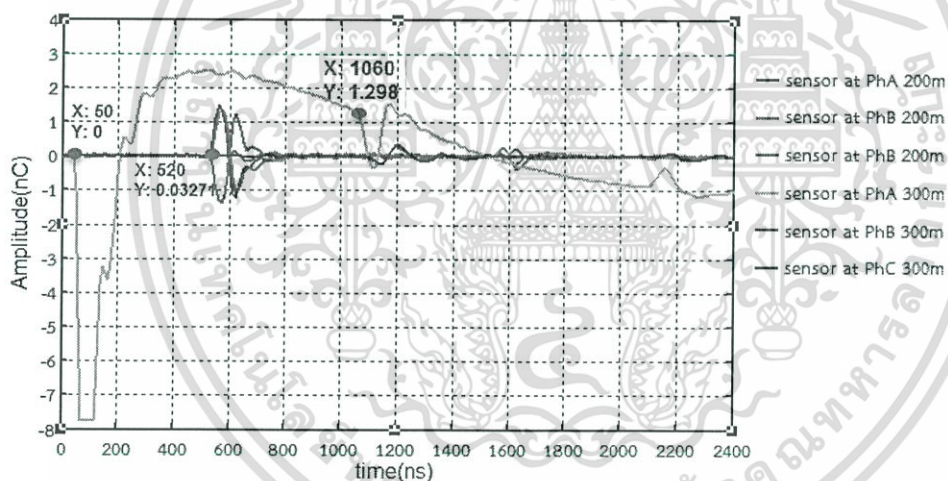


รูปที่ ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข)



รูปที่ ค)

รูปที่ 4.58 ผลการทดลองเมื่อเกิดความบกพร่องที่ 200 เมตร

โดย

- ก) ตรวจจับสัญญาณที่ 100 และ 200 เมตร
- ข) ตรวจจับสัญญาณที่ต้นสายและ 200 เมตร
- ค) ตรวจจับสัญญาณที่ต้นสายและ 300 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองสัญญาณที่ตรวจจับได้ที่อุปกรณ์ตรวจจับปลายสายจะตรวจพบสัญญาณที่เวลา 40 นาโนวินาที ขณะที่อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณที่ปลายสายตรวจพบเวลา 540 นาโนวินาที และมีขนาดสัญญาณที่ปลายสายของเฟส A มากกว่าเฟสปรกติ สัญญาณที่ตรวจพบมีลักษณะติดลบ เนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์ปลายสายเคเบิล

ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองเมื่อต่อลงดินแบบไขว้ (Cross bonding)

ระยะที่บ่อน สัญญาณ	ระยะที่ ตรวจจับ สัญญาณ	ค่าจากคำนวณ	ค่าจากการทดลอง		
		เวลาที่ เปลี่ยนแปลง (Δt) (ns)	ขนาด คลื่นลูกที่ สอง (nC)	เวลาที่ เปลี่ยนแปลง (Δt) (ns)	ตำแหน่งที่ เกิด(เมตร)
ต้นสาย	0,300	1520	0.4583	1510	0.9856
	0,200	1013.325	0.3971	1000	1.315
	0,100	506.6	1.008	520	1.3162
100	0,300	506.6	1.527	500	100.6575
	0,200	0	1.207	-40	103.9474
	0,100	-506.6	3.066	-490	98.355
200	0,300	-506.6	2.505	-480	197.3688
	0,200	-1013.325	1.527	-1010	199.6718
	100,200	-506.6	1.558	-520	201.3162
300	0,300	-1519.98	8.36	-1490	297.0406
	100,300	-1013.25	8.39	-980	296.7113
	200,300	-506.6	8.37	-510	300.329

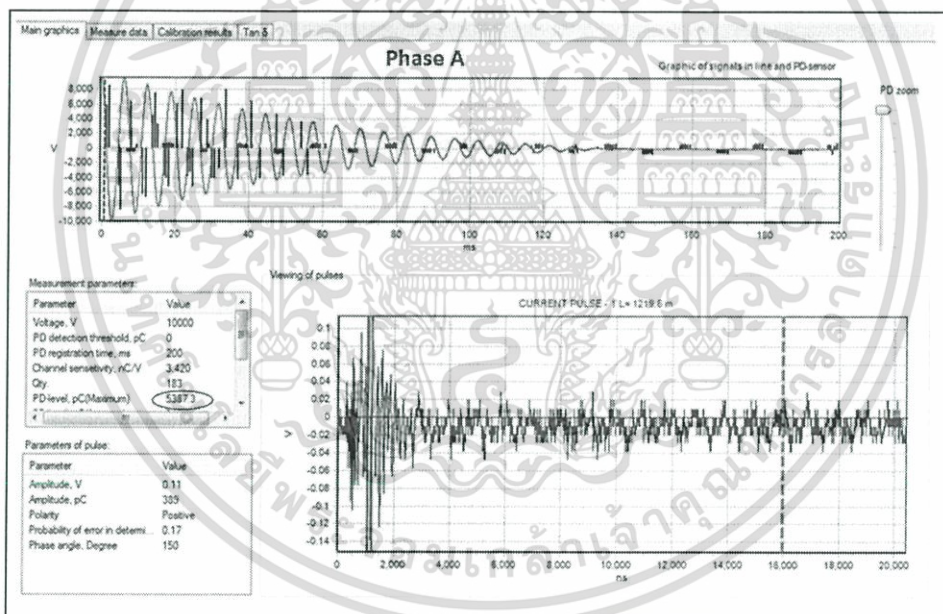
จากตารางการทดลอง พบว่าสัญญาณที่ตรวจจับได้ เมื่อระยะห่างจากจุดที่เกิดความบกพร่อง และอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณมีระยะห่างกัน 100 เมตร เวลาที่สัญญาณตรวจจับได้จะใกล้เคียงกัน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประมาณ 506.6 นาโนวินาที เมื่อห่างกัน 200 และ 300 เมตร เวลาตรวจจับได้ประมาณ 1,013 และ 1520 นาโนวินาที ตามลำดับ ขนาดของสัญญาณจะขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ตรวจจับกับจุดที่เกิดความบกพร่อง

4.3 ผลการปฏิบัติการนอกสถานที่

ในการปฏิบัติการนอกสถานที่ครั้งนี้ได้ทำการทดสอบสายเคเบิลจำนวน 2 วงจรด้วยกัน โดยวงจรแรกนั้นมีการชำรุดของสายเคเบิลที่ เฟส B และ เฟส C จึงได้มีการทดสอบสายเคเบิลที่เฟส A ว่าเกิดความเสียหายภายในสายหรือไม่ เพื่อจะได้นำสายเคเบิลของเฟส A ที่ไม่ชำรุดไปใช้งานต่อ และวงจรที่ 2 ที่ทำการทดสอบนั้นเป็นวงจรที่ทำการสุ่มขึ้นมาจากวงจรที่ใช้งานทั้งหมด เนื่องจากต้องการตรวจสอบคุณภาพของสายเคเบิลว่าเกิดความบกพร่องภายในสายมากน้อยเพียงใด

1. ผลการทดลองของเพื่อตรวจสอบความบกพร่องของสายเคเบิลระบบ 22 กิโลโวลต์



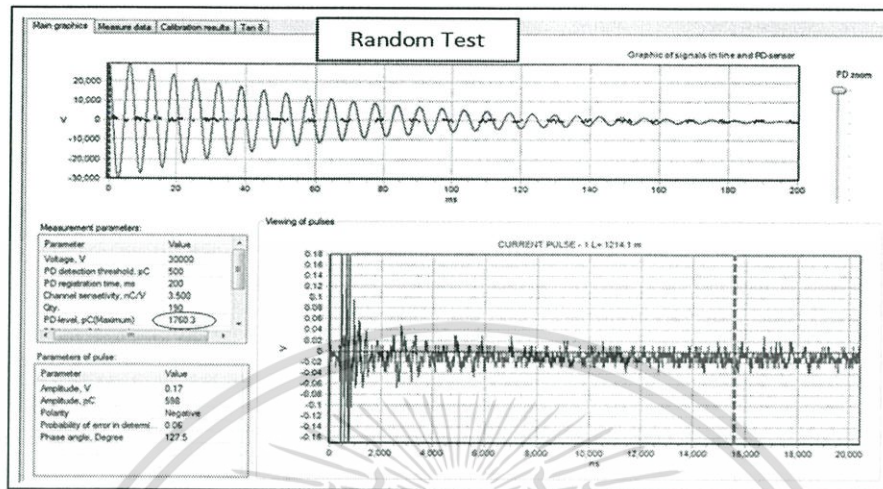
รูปที่ 4.59 ผลการทดลองตรวจสอบความบกพร่องของ เฟส A

จากรูปที่ 4.59 จะพบว่าในวงจรที่เกิดความชำรุดของสายเคเบิลนั้น เฟส A ที่ไม่เกิดการชำรุดก็ตรวจพบความบกพร่องภายในสายเคเบิลเช่นกัน ซึ่งความบกพร่องภายในสายที่เกิดขึ้น นั้นก็เป็นผลมาจากการเกิด PD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ผลการทดลองการสุมเพื่อตรวจความบกพร่องของสายเคเบิลระบบ 22 กิโลโวลต์

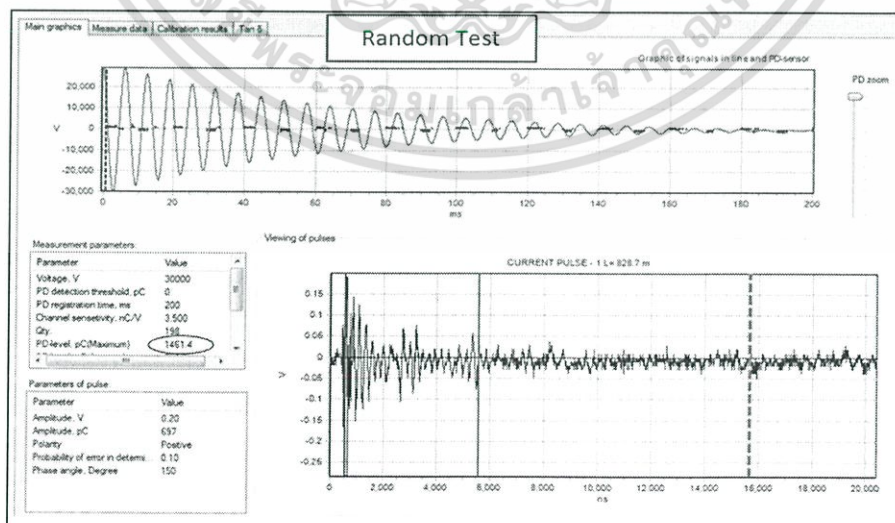
2.1 เฟส A



รูปที่ 4.60 ผลการทดลองการสุมเพื่อตรวจความบกพร่องของ เฟส A

จากรูปที่ 4.60 จะพบได้ว่าวงจรที่เกิดจากการสุมตรวจนั้นเจอความบกพร่องภายในสายเคเบิล แต่ความบกพร่องที่เกิดขึ้นนั้นมีค่า PD level ที่ก่อให้เกิดค่าความเสียหายได้ จึงสันนิษฐานว่าค่าความบกพร่องที่แสดงขึ้นมาเป็นผลมาจากข้อต่อสายเคเบิล

2.2 เฟส B

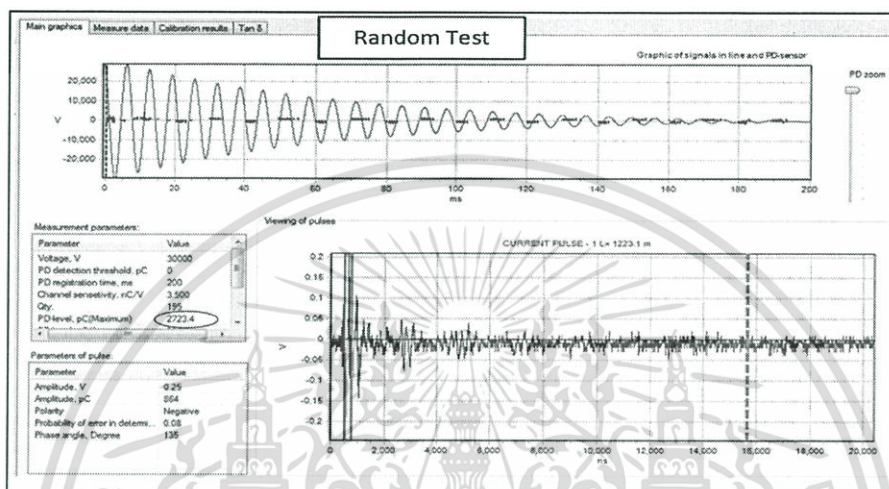


รูปที่ 4.61 ผลการทดลองการสุมเพื่อตรวจความบกพร่องของ เฟส B

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.61 จะพบได้ว่าวงจรที่เกิดจากการสุ่มตรวจนั้นเจอความบกพร่องภายในสายเคเบิล แต่ความบกพร่องที่เกิดขึ้นนั้นมีค่า PD level ที่ก่อให้เกิดค่าความเสียหายได้ จึงสันนิษฐานว่าค่าความบกพร่องที่แสดงขึ้นมาเป็นผลมาจากข้อต่อสายเคเบิล

2.3 เฟส C



รูปที่ 4.62 ผลการทดลองการสุ่มเพื่อตรวจความบกพร่องของ เฟส C

จากรูปที่ 4.62 จะพบได้ว่าวงจรที่เกิดจากการสุ่มตรวจนั้นเจอความบกพร่องภายในสายเคเบิล แต่ความบกพร่องที่เกิดขึ้นนั้นมีค่า PD level ที่ก่อให้เกิดค่าความเสียหายได้ จึงสันนิษฐานว่าค่าความบกพร่องที่แสดงขึ้นมาเป็นผลมาจากข้อต่อสายของระบบ

ตารางที่ 4.5 ผลการทดลองการสุ่มเพื่อตรวจความบกพร่องของเคเบิล

ข้อมูล	ผลการทดลองเพื่อตรวจสอบความบกพร่องของเคเบิล			ผลการทดลองการสุ่มเพื่อตรวจสอบความบกพร่องของเคเบิล		
	A	B	C	A	B	C
ตรวจจับความบกพร่อง	√	x	x	√	√	√
เกิดความบกพร่อง	√	-	-	√	√	√
PD-level (Maximum) (pC)	5387.3	-	-	2858.3	3454.1	1928.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.5 จะพบว่าวงจรที่มีการชำรุดของสายเคเบิล ผลการทดสอบที่เฟส A มีค่าระดับความรุนแรงที่เกิดจากการปล่อยประจุบางส่วนมากที่สุด จากการทดสอบเมื่อเทียบกับอีกสองเฟส และทางโปรแกรมของเครื่องตรวจจับก็ระบุว่าค่า PD-level ที่ได้ นั้นเป็นค่าที่เกิดจากความเสียหายภายในสายเคเบิล ส่วนวงจรที่ทำการสุ่มตรวจนั้นค่า PD-level ยังไม่สูงพอที่จะเป็นความบกพร่องที่ก่อให้เกิดความเสียหายในระบบ ทางโปรแกรมของอุปกรณ์ตรวจสอบจึงจัดค่าที่วัดได้เป็นเพียงสัญญาณรบกวนในระบบเท่านั้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

การจำลองสนามไฟฟ้าภายในสายเคเบิล พบว่าสนามไฟฟ้าจะมีความเครียดสะสม เมื่อมีสิ่งเจือปนภายในเนื้อฉนวน เช่น โพรงอากาศขนาดเล็กเพราะอากาศมีค่าเปอร์มิตติวิตีต่างกับเนื้อฉนวนจึงมีความเครียดสะสมรอบๆ บริเวณนี้ นอกจากนี้ทำการจำลองการควบคุมสนามไฟฟ้าของอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง เช่น ข้อต่อ โดยจำลองการควบคุมสนามไฟฟ้า โดยใช้ Stress control tube เพื่อกระจายสนามไฟฟ้าที่สะสมระหว่างชั้นเนื้อฉนวนและเปลือกฉนวน พบว่าเมื่อค่าเปอร์มิตติวิตีมีค่าต่างกัน ส่งผลต่อความเครียดสนามไฟฟ้า หากค่าเปอร์มิตติวิตีของเนื้อฉนวนต่างกับค่าเปอร์มิตติวิตีของ stress control มากนักจะสามารถกระจายความต่างศักย์ไฟฟ้าได้ ทำให้สนามไฟฟ้าสะสมมีค่าลดลง

จากการศึกษาปัญหาที่ข้อต่อสาย (Joint) ของเคเบิลที่ใช้งาน พบว่าเมื่อเกิดการปล่อยประจุบางส่วนจะต้องมีการตรวจจับหาตำแหน่งที่เกิดความบกพร่อง เพื่อทำการแก้ไขจุดที่เกิดความบกพร่องได้อย่างแม่นยำ นำมาสู่การจำลองตรวจจับหาตำแหน่งที่เกิดการปล่อยประจุบางส่วนโดยการสังเกตพฤติกรรมคลื่นเดินทางในสายเคเบิลที่มีการต่อลงดิน 3 ลักษณะ คือ ต่อลงดินแบบด้านเดียว ต่อลงดินแบบสองด้านและต่อลงดินแบบไขว้ จากผลการจำลองพบว่าเมื่อเกิดความบกพร่องในสาย ขนาดสัญญาณคลื่นแปรผกผันกับระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ตรวจจับกับตำแหน่งที่เกิดความบกพร่อง เมื่อต่อลงดินด้านเดียวคลื่นเดินทางจะมีการสะท้อนกลับมายังอุปกรณ์ตรวจจับจึงสามารถหาตำแหน่งที่เกิดความบกพร่องได้แต่เมื่อเกิดความบกพร่องที่ปลายสายจะไม่สามารถหาตำแหน่งความบกพร่องได้ ขณะเดียวกันเมื่อต่อลงดินสองด้านและตรวจจับสัญญาณที่จุดต่อลงดินพบว่าสามารถหาตำแหน่งที่เกิดความบกพร่องได้ หากมีความบกพร่องเกิดขึ้นที่ปลายสายเพราะคลื่นเดินทางจะเคลื่อนที่จากจุดที่เกิดความบกพร่องไปยังอุปกรณ์ตรวจจับทั้งสองด้านโดยใช้เวลาในการตรวจจับต่างกันทำให้สามารถคำนวณหาตำแหน่งที่เกิดความบกพร่องได้ และเมื่อต่อลงดินแบบไขว้พบว่าอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณสามารถตรวจวัดสัญญาณได้ทุกเฟสแต่เฟสที่จำลองให้เกิดความบกพร่องจะมีขนาดสัญญาณมากกว่าเฟสปกติและเมื่ออุปกรณ์ตรวจจับมีระยะห่างจากจุดบกพร่องมาก สัญญาณที่วัดได้จะน้อยเนื่องจากคลื่นเดินทางเคลื่อนที่จากจุดที่เกิดบกพร่องมายังปลายสายแต่ระหว่างทางมีข้อต่อสายที่ต่อลงดินแบบไขว้ทำให้คลื่นเดินทางแยกออกไปยังเปลือกซิลด์และตัวนำของเฟสอื่นขนาดสัญญาณจึงเล็กลงและเฟสอื่นสามารถตรวจพบสัญญาณได้แต่จะมีขนาดน้อยกว่าเฟสที่เกิดความบกพร่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 อุปสรรคและปัญหาที่พบจากการทดลอง

1. ขณะทำการทดลองจะเกิดสัญญาณรบกวนขึ้นภายในระบบ ทำให้ยากต่อการศึกษาและวิเคราะห์ผล

2. ในการจำลองความบกพร่องของสายเคเบิล จะต้องใช้สายเคเบิล RG-58 จำนวนมากและต้องมีคุณสมบัติพื้นฐานที่เหมือนกัน

3. ภายในห้องปฏิบัติงานไม่มีอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง ผู้จัดทำจึงต้องเดินทางไปทำการทดลองนอกสถานที่ ซึ่งมีความลำบากในการเดินทางตลอดจนค่าใช้จ่ายในการเดินทาง

5.2.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการวางแผนและตรวจสอบอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองทุกครั้งอย่างละเอียดก่อนจะทำการซื้อ

2. เมื่อทำการทดลองควรตรวจสอบบริเวณข้อต่อทุกครั้ง ก่อนทำการบ่อนสัญญาณความบกพร่องไปที่ตำแหน่งข้อต่อ

3. ควรทำการตรวจสอบอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณทุกครั้ง ก่อนทำการทดลองในหัวข้อถัดไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] กฤษณะ หวังสอาด, การศึกษาคุณลักษณะการเกิดอิเล็กทรอนิกส์แอลพีไอที่ใช้เป็นฉนวนของสายเคเบิล, ปรินญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [2] กองมาตรฐานระบบไฟฟ้า, ระบบเคเบิลใต้ดิน Underground cable system, 2548.
- [3] ทง ลานธารทอง, การออกแบบและสร้างขั้วต่อสายเคเบิลใต้ดิน XLPE แรงดันสูงพิกัด 24kV เพื่อทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนโดยใช้ก๊าซ SF₆ เป็นฉนวน, ปรินญาณิชวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2553.
- [4] นายธีระพงษ์ บุญรักษา, ลักษณะจำเพาะของวอเตอร์ทรีอิงในสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินฉนวนพอลิเอทิลีนแบบเชื่อมขวางสำหรับระบบจำหน่าย 22kV, ปรินญาณิชวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2557.
- [5] พร้อมศักดิ์ อภิรติกุล, การออกแบบขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงเพื่อใช้ทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วน และพลังงานสูญเสียเปล่าได้อิเล็กตริกของสายเคเบิล XLPE ขนาดแรงดัน 24kV, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, ธันวาคม 2545.
- [6] สำรวัย สังข์สะอาด, วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง, คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, มกราคม 2549.
- [7] สุภาสินี ลิ้มปานภาพ, วัสดุศาสตร์, 2554.
- [8] อรรถพล ตะระะ, คุณสมบัติและการทดสอบวัสดุ, 2551.
- [9] GÖKÇEN BAS, ELECTRIC FIELD ANALYSIS IN STRESS CONTROLLED HIGH VOLTAGE CABLES, a thesis submitted to the graduate Scholl of natural and applied sciences of middle east technical University, 2005.
- [10] IEC Standard Publication No.60270, Third edition, “High- Voltage test techniques Partial Discharge Measurements” 2000.
- [11] IEC Standard Publication No.60287, “Calculation of the Continuous Current Rating of Cables (100% load factor)” Second edition 2001.
- [12] IEC Standard Publication No.60502-2, Second edition, “Partial Discharge Measurements” 2004.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [13] Mahmoud Gilany, **Traveling-Wave-Base Fault-Location Scheme for Underground Cable System**, January 2007.
- [14] R. Bartinikas, K. D. Srivastava, **Power and Communication Cables Theory and Applications**, A John Wiley & Sons, 2000.
- [15] WORKING GROUP 21.16 Cigre', **Partial Discharge detection in installed HV extruded cable systems**, April 2001.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาปัญหาของการใช้งานสายเคเบิลใต้ดิน

THE STUDY OF USING UNDERGROUND CABLE

วารภรณ์ โชติรัตนศักดิ์, สรศักดิ์ กันช่น, ศิริพร ศรีสุวรรณ และอลิสา มานพ

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ชอย 1 ฉลองกรุง เลาดกระบังกรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์ 02-329-8000 ต่อ3925 E-Mail: alias_manop@hotmail.co.th

บทคัดย่อ

บทความฉบับนี้นำเสนอการศึกษาปัญหาการใช้งานสายเคเบิลใต้ดิน ซึ่งมุ่งเน้นศึกษาปัญหาที่เกิดจากการเสื่อมสภาพของตัวอุปกรณ์เสริมที่ใช้ในระบบเคเบิลใต้ดิน เช่น ข้อต่อ (Joint), หัวต่อ (Terminator) เป็นต้น โดยทำการทดลองตรวจจับสัญญาณความบกพร่องในสายเคเบิล RG-58 เพื่อศึกษาและวิเคราะห์พฤติกรรมของคลื่นเดินทางเมื่อเกิดการปล่อยประจุบางส่วน (Partial Discharge) ตลอดจนการศึกษาและวิเคราะห์ลักษณะของคลื่นสะท้อนเมื่อเกิดความบกพร่องในสายเคเบิล RG-58 ที่มีการต่อลงดินแตกต่างกัน จากการทดลองพบว่าระยะห่างระหว่างจุดที่เกิดความบกพร่องและตำแหน่งที่ติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณมีผลต่อขนาดของคลื่นสะท้อนที่วัดได้ ขณะที่ความยาวของสายเคเบิลจะส่งผลกระทบต่อทั้งขนาดและเวลาที่คลื่นใช้ในการเดินทาง ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการจำลองสามารถนำไปวิเคราะห์และทำการคาดการณ์ตำแหน่งที่เกิดความบกพร่องของสายเคเบิลใต้ดิน อีกทั้งยังสามารถนำองค์ความรู้ที่ได้นี้ไปประยุกต์ใช้ในการปฏิบัติงานจริงในการซ่อมบำรุงรักษาและดูแลระบบ คำสำคัญ: การปล่อยประจุบางส่วน, คลื่นเดินทาง, การสะท้อนของคลื่น, ข้อต่อ, การต่อลงดิน

ABSTRACT

This paper presents the study of underground cable problems focusing on the deterioration accessory such as joint, terminators and etc. The experiments were performed with RG-58 coaxial cables to investigate the traveling wave behavior when partial discharge occurred at the cable accessories. Besides, the effect of the configuration of the grounding connection of the underground cable circuit was investigated. From the test usually, it was found that the amplitude of detected PD signal depended on the failure site and the position. Moreover, the length of cable affects the amplitude and traveling time of the traveling wave. The data

from the simulation can be used to analyze and predict the position of the defect in underground cable which are useful for the field operation both cable maintenance and monitoring.

Keyword: Partial Discharge, Traveling Wave, Reflect pulse, Joint, Grounding

1. บทนำ

ประเทศไทยนิยมส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าแรงดันสูง นิยมส่งจ่ายแบบเหนือดิน (Overhead Line) เนื่องจากมีค่าใช้จ่ายในการลงทุนไม่สูงมากนัก หากแต่มีผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมซึ่งรวมไปถึงการไปบดบังทัศนียภาพที่สวยงาม ดังนั้นเพื่อให้ปัญหาอันเนื่องมาจากสภาพแวดล้อมเหล่านี้หมดไปรวมไปถึงการสร้างภาพลักษณ์ทางด้านทัศนียภาพของเมืองใหญ่ๆ หรือสถานที่ท่องเที่ยวที่สำคัญให้สวยงามจึงมีการเปลี่ยนมาใช้ระบบสายเคเบิลใต้ดิน (Underground Cable) สำหรับแรงดันสูง แทนการใช้แบบสายเหนือดินในการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า อย่างไรก็ตามการใช้สายเคเบิลใต้ดินสำหรับระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าแรงดันสูง มักจะพบปัญหาเกี่ยวกับความบกพร่องของสายเคเบิลใต้ดิน ได้แก่ การเกิดความบกพร่องของเคเบิลใต้ดินขณะทำการผลิต ขณะขนส่ง ขณะติดตั้งและหลังการติดตั้ง

การเสื่อมสภาพของสายเคเบิลใต้ดินเมื่อมีการใช้งานมักเกิดจากปัจจัยทางด้านสภาพแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ความชื้น ความดัน ความเป็นกรด-เบส ซึ่งส่งผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างทางเคมีของตัวฉนวน รวมไปถึงปัจจัยที่มีสาเหตุมาจากขั้นตอนการติดตั้ง เช่น การเชื่อมต่อระหว่างสายเคเบิลใต้ดิน การใช้หัวต่อที่ไม่เหมาะสมนำไปสู่การเกิดความเครียดทางสนามไฟฟ้าสูง ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งที่ทำให้เกิดการเบรกดาวน์ในที่สุด

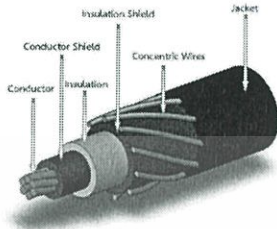
การศึกษาและทำความเข้าใจตลอดจนสามารถวิเคราะห์และประเมินคาดการณ์ความเสียหายของปัญหาที่เกิดขึ้นหรือการคาดคะเนโอกาสและบริเวณที่เกิดความบกพร่องของสายเคเบิลใต้ดิน ได้จึงเป็นเรื่องที่สำคัญ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง

2.1 โครงสร้างพื้นฐานของเคเบิลใต้ดินชนิด XLPE

โครงสร้างพื้นฐานของสายเคเบิลใต้ดินประกอบด้วยของตัวนำ ฉนวน และส่วนของเปลือกหุ้ม ซึ่งรายละเอียดของส่วนประกอบต่างๆ ได้แสดงไว้ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 โครงสร้างเคเบิลใต้ดินชนิด XLPE

2.2 การต่อลงดินของสายเคเบิล (Grounding)

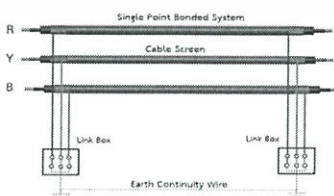
การต่อลงดินของระบบไฟฟ้ากำลัง หมายถึง การฝังแท่งสายดินไว้ใต้ดินที่ตำแหน่งต่างๆ และต่อเชื่อมเข้ากับอุปกรณ์ไฟฟ้าด้วยสายตัวนำที่เรียกว่า สายดิน หรือสายป้องกัน ในตำแหน่งที่เป็นส่วนหนึ่งของวงจรไฟฟ้า ซึ่งการต่อลงดินในระบบเคเบิลใต้ดินสามารถแบ่งลักษณะของการต่อลงดินได้เป็น 2 ลักษณะด้วยกัน คือ

1. การต่อลงดินเพื่อป้องกันส่วนต่างๆ ของอุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบเคเบิลใต้ดิน
2. การต่อลงดินเพื่อการทำงานของระบบ เป็นการต่อลงดินของอุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบ เพื่อวัตถุประสงค์ให้ระบบมีเสถียรภาพในการทำงานยิ่งขึ้น

ประเภทของการต่อลงดินเพื่อการทำงานของระบบสามารถแบ่งได้ดังนี้

2.1 การต่อลงดินข้างเดียว (Single-point Bonding)

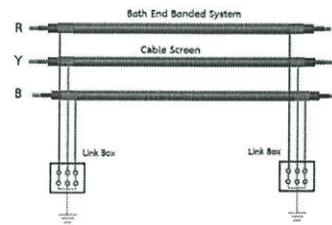
สำหรับสายเคเบิลความยาวไม่เกิน 500 เมตร



รูปที่ 2 การต่อลงดินข้างเดียว (Single-point Bonding)

2.2 การต่อลงดินทั้งสองปลาย (Both-Ends Bonding)

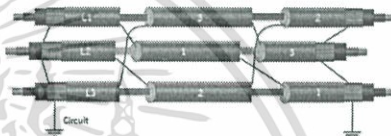
สำหรับสายเคเบิลความยาวไม่เกิน 500 เมตร



รูปที่ 3 การต่อลงดินทั้งสองด้าน (Both-Ends Bonding)

2.3 การต่อลงดินแบบไขว้ (Cross-Bonding)

สำหรับสายเคเบิลความยาวมากกว่า 1,000 เมตร

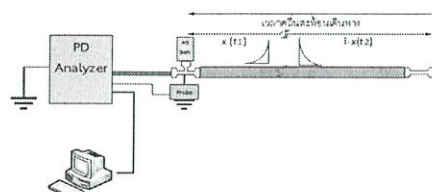


รูปที่ 4 การต่อลงดินแบบไขว้ (Cross-Bonding)

2.3 การเดินทางของคลื่นในสายเคเบิลใต้ดิน

การเดินทางของคลื่นในสายส่งนั้น มีปัจจัยหลายสิ่งที่มีผลต่อความเร็วของคลื่นที่เดินทาง เช่น อิมพีแดนซ์ของสายซึ่งเป็นผลจากค่าความจุสายส่งและระยะทางหรือความยาวสาย ซึ่งค่าความจุสายแปรผันตรงกับความยาวสาย และแปรผกผันกับกำลังของคลื่นที่เดินทางในสายนอกจากนี้ค่าเปอร์มิตติวิตี (Relative permittivity) ของฉนวนในสายเคเบิลนั้นส่งผลต่อความจุของสายเคเบิลอีกด้วย กล่าวคือฉนวนต่างกันความเร็วคลื่นในสายเคเบิลก็ต่างกัน สำหรับการการคำนวณหาตำแหน่งที่เกิดการปล่อยประจุสามารถตรวจสอบได้ดังนี้

1. การคำนวณหาตำแหน่งที่เกิดการปล่อยประจุบางส่วนเมื่อตรวจจับเพียงด้านเดียว



รูปที่ 5 วงจรตรวจจับสัญญาณการเดินทางของคลื่นในสายเคเบิล (ด้านเดียว)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

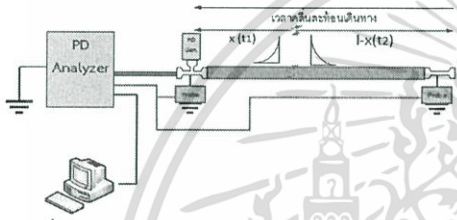
สมการหาตำแหน่งที่เกิดการคิซหาร์จบางส่วน เมื่อตรวจจับเพียงด้านเดียว คือ

$$x = l - \frac{v\Delta t}{2} \quad (1)$$

เมื่อ $\Delta t = t_2 - t_1$

โดยที่ $t_1 = \frac{x}{v}$ และ $t_2 = \frac{2l-x}{v}$

2. การคำนวณหาตำแหน่งที่เกิดการปล่อยประจุบางส่วนเมื่อตรวจจับสองด้าน



รูปที่ 6 วงจรตรวจจับสัญญาณการเดินทางของคลื่นในสายเคเบิล (สองทาง)

สมการหาตำแหน่งที่เกิดการปล่อยประจุบางส่วนเมื่อตรวจจับสองด้าน คือ

$$x = \frac{l - v\Delta t}{2} \quad (2)$$

โดยที่ $t_1 = \frac{x}{v}$ และ $t_2 = \frac{l-x}{v}$

3. การออกแบบการทดลอง

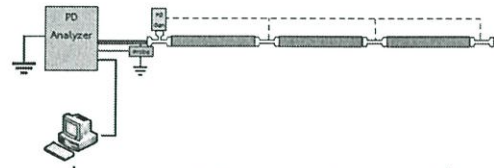
3.1 การออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมของคลื่นเดินทางในสายเคเบิล RG-58 เมื่อเกิดความบกพร่องในสายที่มีการต่อลงดิน

ในการออกแบบเพื่อทำการจำลองศึกษาพฤติกรรมของคลื่นเดินทางเมื่อเกิดความบกพร่องของสายเคเบิลสามารถแบ่งเป็นกรณีได้ ดังต่อไปนี้

3.2.1 กรณีต่อดินแบบด้านเดียว (One end bonding system)

สำหรับกรณีต่อแบบด้านเดียว ใช้สายเคเบิล RG-58 ยาว 300 เมตร ใช้อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณหนึ่งจุดคือ ที่ตำแหน่ง 0 เมตร ทำการป้อนสัญญาณความบกพร่องที่

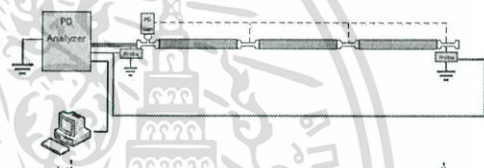
ตำแหน่ง 0, 100, 200 และ 300 เมตร แสดงภาพวงจรการทดลองดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 วงจรตรวจจับสัญญาณการเดินทางของคลื่นในสายเคเบิล กรณี One end bonding system

3.2.2 กรณีต่อดินแบบสองด้าน (Both end bonding system)

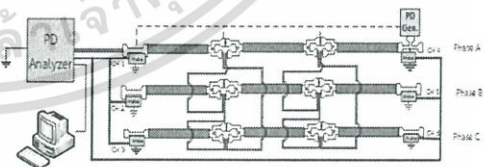
สำหรับกรณีต่อทั้งสองด้าน ใช้สายเคเบิล RG-58 ยาว 300 เมตร ใช้อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณสองจุดคือ ที่ตำแหน่ง 0 และ 300 เมตร จากนั้นทำการเปลี่ยนตำแหน่งป้อนสัญญาณความบกพร่องเป็น 0, 100, 200 และ 300 เมตร ตามลำดับ แสดงภาพวงจรการทดลองดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 วงจรตรวจจับสัญญาณการเดินทางของคลื่นในสายเคเบิล กรณี Both end bonding system

3.2.3 กรณี Cross bonding system

สำหรับกรณีต่อแบบไขว้ใช้สายเคเบิล RG-58 ยาว 300 เมตร ใช้อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณหกจุดคือ ที่ตำแหน่ง 0 และ 300 เมตร ทำการป้อนสัญญาณความบกพร่องที่ตำแหน่ง 100 เมตร 200 เมตร แสดงภาพวงจรการทดลองดังรูปที่ 9

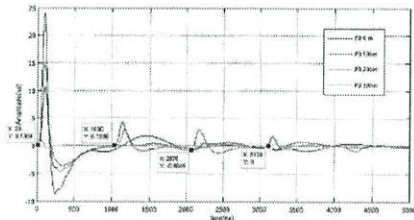


รูปที่ 9 วงจรตรวจจับสัญญาณการเดินทางของคลื่นในสายเคเบิล กรณี Cross bonding system

4. การวิเคราะห์ผลการทดลอง

1. ผลการจำลองพฤติกรรมของคลื่นเดินทางเมื่อเกิดความบกพร่องของสายเคเบิล RG-58 กรณีต่อดินแบบด้านเดียว (One end bonding system)

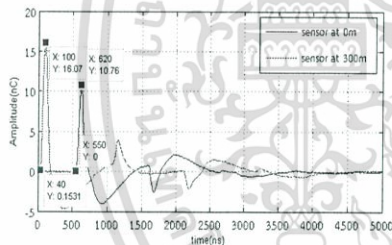
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 10 ผลการจำลองกรณี One end bonding system

จากการทดลอง เมื่อตรวจจับสัญญาณความบกพร่องของสายเคเบิล โดยใช้อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณที่ตำแหน่งต้นสาย พบว่า เมื่อเกิดการปล่อยประจุบางส่วนที่ปลายสาย จะสามารถตรวจจับได้ แต่ไม่สามารถทำการระบุตำแหน่งได้ เนื่องจากไม่มีผลของคลื่นสะท้อน จึงไม่สามารถทำการคำนวณเพื่อระบุจุดที่เกิดความบกพร่องได้ และขนาดของสัญญาณที่ตรวจจับได้จะมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อระยะห่างระหว่างจุดที่ปล่อยสัญญาณความบกพร่องกับจุดที่ติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณอยู่ใกล้กัน

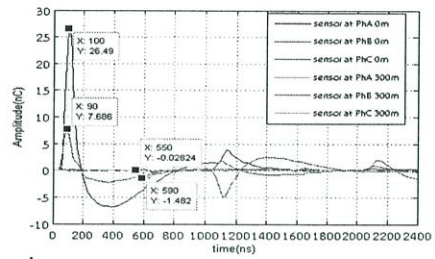
2. ผลการจำลองพฤติกรรมของคลื่นเดินทางเมื่อเกิดความบกพร่องของสายเคเบิล RG-58 กรณีต่อดินแบบสองด้าน (Both end bonding system)



รูปที่ 11 ผลการจำลองกรณี Both end bonding system

จากการทดลองเมื่อตรวจจับสัญญาณความบกพร่องของสายเคเบิล โดยใช้อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณที่ตำแหน่งต้นสายและปลายสาย โดยทำการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งที่ปล่อยสัญญาณความบกพร่อง จะพบว่าตำแหน่งที่อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณด้านใดด้านหนึ่ง อยู่ใกล้กับบริเวณที่เกิดความบกพร่อง จะทำให้อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณนั้นสามารถตรวจจับสัญญาณที่มีขนาดและความถี่ได้มากกว่าอุปกรณ์ตรวจจับอีกด้านหนึ่ง

3. ผลการจำลองพฤติกรรมของคลื่นเดินทางเมื่อเกิดความบกพร่องของสายเคเบิล RG-58 กรณีต่อดินแบบไขว้ (Both end bonding system)



รูปที่ 12 ผลการจำลองการกรณี Cross bonding system

จากการทดลองเมื่อตรวจจับสัญญาณความบกพร่องของสายเคเบิล โดยใช้อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณที่ตำแหน่งต้นสายและปลายสายของทุกๆ เฟส เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณเข้าใกล้จุดที่เกิดความบกพร่องมากขึ้น จะพบว่าขนาดสัญญาณที่ตรวจจับได้จะมีขนาดเพิ่มขึ้น ขณะที่เฟส A จะพบว่ามีความมากกว่าเฟสอื่น เนื่องจากทำการจำลองปล่อยสัญญาณความบกพร่องบนเฟส A

5. สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมของคลื่นเดินทางเมื่อเกิดความบกพร่องที่จุดเชื่อมต่อสายของเคเบิล สัญญาณที่ตรวจจับได้จะมีขนาดและความถี่มากขึ้นหากระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ตรวจจับและจุดที่เกิดการดิสรจประจุบางส่วนน้อยลง

การตรวจจับคลื่นที่เดินทางในสายเคเบิลเมื่อทำการต่อลงดิน หากคำนึงถึงความคุ้มค่าในการตรวจจับสัญญาณความบกพร่อง พบว่าการตรวจจับกรณีต่อดินด้านเดียว (One end bonding) สามารถหาตำแหน่งที่เกิดความบกพร่องได้ หากทว่าเมื่อเกิดความบกพร่องที่ปลายสายเคเบิลจะไม่สามารถหาตำแหน่งที่เกิดความบกพร่องได้ ขณะการตรวจจับที่จุดต่อดินแบบสองด้าน (Both end bonding) สามารถหาตำแหน่งที่เกิดความบกพร่องได้ แต่จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ในการตรวจจับสัญญาณมากขึ้น ซึ่งทำให้ค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้น และกรณีตรวจจับสัญญาณเมื่อต่อดินแบบไขว้ (Cross bonding) สามารถตรวจพบความบกพร่องทุกเฟส โดยเฟสที่เกิดความบกพร่อง จะมีขนาดของสัญญาณมากกว่าเฟสที่ปรกติ เมื่อจุดติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณมีระยะห่างจากจุดที่เกิดความบกพร่องมาก จะทำให้ขนาดของสัญญาณมีค่าน้อย จนไม่สามารถสังเกตความแตกต่างจากเฟสปรกติได้ ดังนั้น หากต้องการความแม่นยำในการหาตำแหน่งที่เกิดความบกพร่อง จึงจำเป็นที่จะต้องเคลื่อนย้ายอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณ ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อระยะเวลาในการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปฏิบัติงานทำให้เสียเวลามากขึ้น ตลอดจนค่าสิ้นเปลืองที่ใช้
ในการดำเนินงาน

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.นรเศรษฐ พัฒน
เดช และ รองศาสตราจารย์ ดร.อนันต์วัฒน์ คุณากร อาจารย์
ที่ปรึกษา ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็น
ประโยชน์ต่อโครงการมาด้วยดีตลอด และขอขอบคุณบริษัท
Meidensha ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการสนับสนุน
ทุนการศึกษาในการดำเนินงาน ขอขอบคุณบริษัท พีดีโซลู
ชันส์จำกัด (บริษัทในเครือกลุ่มของ บริษัทแพลน มาร์เก็ต
โกลด์ จำกัด) ที่ให้ความอนุเคราะห์ด้านอุปกรณ์เครื่องมือ
และเครื่องวัด รวมไปถึงการสนับสนุนค่าอุปกรณ์ที่ใช้ในการ
ทดลองและคอยให้คำปรึกษาอยู่เสมอ

เอกสารอ้างอิง

- [1] Mahmoud Gilany, **Traveling-Wave-Base Fault-
Location Scheme for Underground Cable System**,
January 2007.
- [2] WORKING GROUP 21.16 Cigre', **Partial Discharge
detection in installed HV extruded cable systems**, April
2001.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. รายชื่ออุปกรณ์

ในการทดลองเพื่อศึกษาการเดินทางของคลื่นขณะที่เกิดความบกพร่องในสายเคเบิล RG-58 มีอุปกรณ์และเครื่องมือวัดดังต่อไปนี้

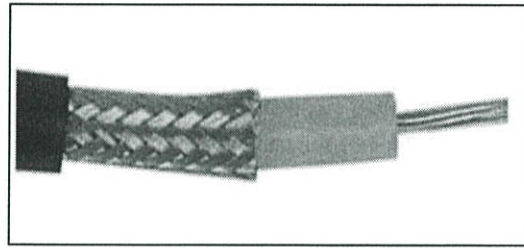
- 1.1 สาย Coaxial RG – 58
- 1.2 หัวเชื่อมต่อที่ใช้กับสายโคแอกซ์
- 1.3 เครื่องกำเนิด PD
- 1.4 เครื่อง PD Analyzer
- 1.5 HFCT Sensor
- 1.6 Notebook (ที่มี HVPD's Software)
- 1.7 HVPD Longshot™ Diagnostic OLPD Test Unit
- 1.8 ชุดการทดสอบ CPDA

1.1 สาย Coaxial RG-58

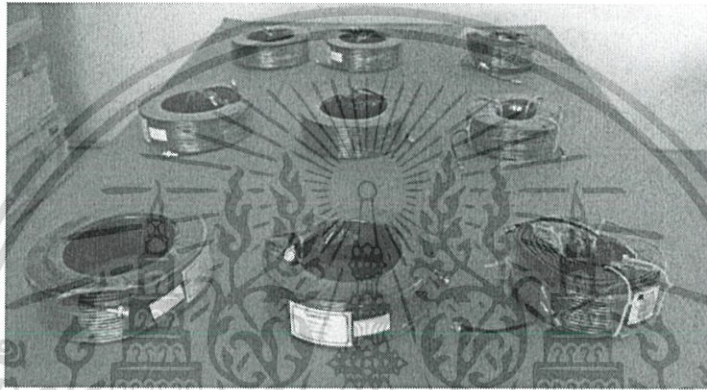
ตารางที่ ข.1 คุณสมบัติทั่วไปของสาย Coaxial RG – 58

วัสดุส่วนที่นำสัญญาณ	สายทองแดงเส้นเดี่ยวและแบบที่เป็นใยโลหะหลายเส้น
วัสดุส่วนที่นำสัญญาณกราวด์	ทองแดง(เส้นใยโลหะฉกเปียกหุ้ม)
วัสดุส่วนฉนวน	Polyethylene ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก = 2.3
ค่าความต้านทานภายในสาย	50 โอห์ม
ค่าความเร็วคลื่นภายในสายสัญญาณ	0.66 X (3X10 ⁸) หรือเท่ากับ 1.98 X 10 ⁸ เมตร/วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




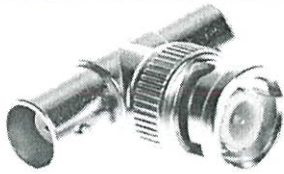

รูปที่ ข.1 สาย Coaxial RG-58



รูปที่ ข.2 สายเคเบิล RG-58 ที่ใช้ในภาทดลอง

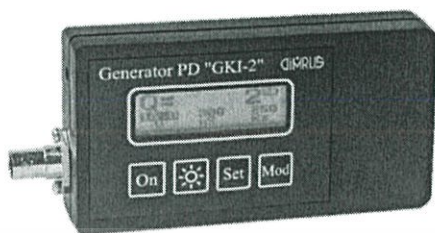
- 1.2 หัวเชื่อมต่อที่ใช้กับสายโคแอกซ์
1. หัวเชื่อมสาย BNC (BNC Cable Connector)
2. หัวเชื่อมสายรูปตัว T (BNC T-Connector)
3. หัวเชื่อมสายแบบ Barrel (BNC Barrel Connector)

ตารางที่ ข.2 หัวเชื่อมต่อที่ใช้กับสายโคแอกซ์

BNC Cable Connector	BNC T-Connector	BNC Barrel Connector
		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

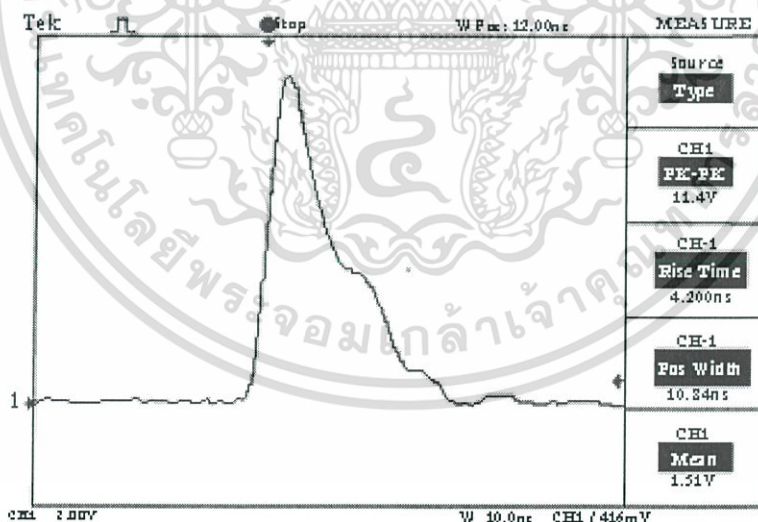
1.3 เครื่องกำเนิด PD (Pulse Generator)



รูปที่ ข.3 เครื่องกำเนิด PD (Pulse Generator)

ตารางที่ ข.3 เครื่องกำเนิด PD (Pulse Generator)

Parameter	Value
Working Temperature	Ambient temperature - (-20) °C
Operation Powered	Two AA batteries
Injects The Charge	2000 - 5000 pC
Work During In 1 Cycle	Less than 10 hours



รูปที่ ข.4 รูปคลื่นพัลส์ของเครื่อง Generator PD (GKI-2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 เครื่อง PD Analyzer

ตารางที่ ข.4 พารามิเตอร์ทางเทคนิคที่สำคัญของอุปกรณ์ PD Analyzer

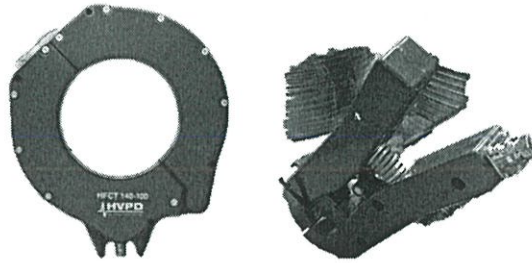
พารามิเตอร์ทางเทคนิค	ขนาด
1. Number of measuring channels	6
2. Operating voltage, kV	>3
3. Discharge pulse frequency, MHz	0,5 ÷ 1500,0
4. Discharge amplitude, pC	20 ÷ 100000
5. Computer connection	USB
6. Supply voltage, V, AC/DC	90 ÷ 260
7. Operating temperature range, °C	0 ÷ 60
8. Case size, mm	520 x 435 x 230



รูปที่ ข.5 เครื่อง PD Analyzer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

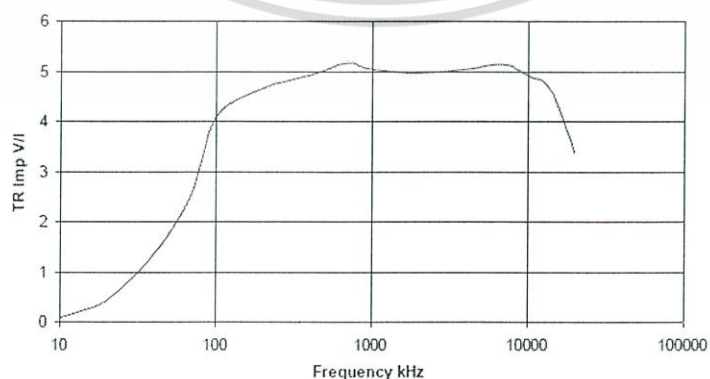
1.5 HFCT Sensor



รูปที่ ข.6 เครื่อง HFCT Sensor

ตารางที่ ข.5 พารามิเตอร์ทางเทคนิคที่สำคัญของเครื่อง (HFCT) Sensor

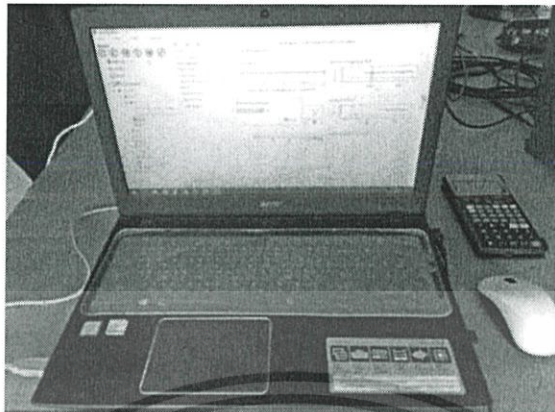
Parameter	Value
Transfer Function	5.0 V/A
Frequency Response	50 kHz – 20 MHz
Internal Diameter	48 mm
Environmental	110 mm
Dimensions	50 Ω
Power	BNC female
Weight	0.4 Kg



รูปที่ ข.7 Transfer impedance for HFCT 50/100

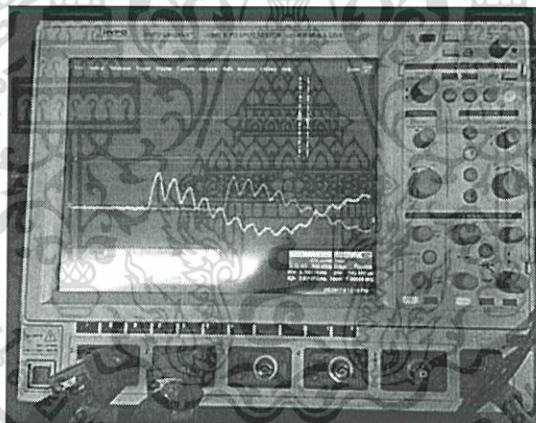
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.6 Notebook (ที่มี HVPD's Software)



รูปที่ ข.8 Notebook (ที่มี HVPD's Software)

1.7 HVPD Longshot™ Diagnostic OLPD Test Unit



รูปที่ ข.9 เครื่อง HVPD Longshot™ Diagnostic OLPD Test Unit

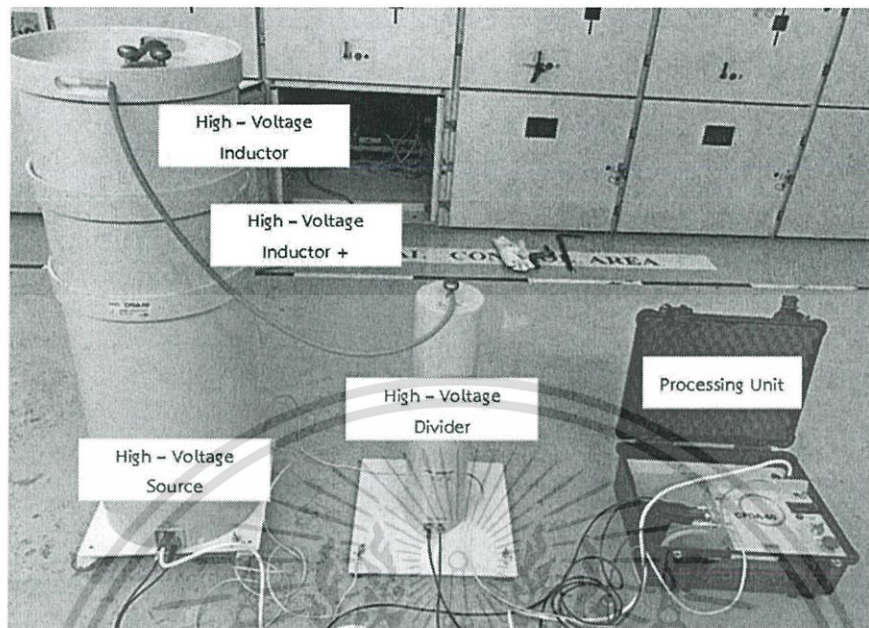
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.6 พารามิเตอร์ทางเทคนิคที่สำคัญของเครื่อง HVPD

Parameter	Value
Vertical Resolution (Non-Repetitive Sampling Mode)	12 bits
Maximum Sample Rate for 20 ms Waveform	500 MS/s
Detection Frequency Range	0 - 200 MHz
Display Size (Diagonal)	12.1 inch
Display Resolution	1280 x 800 pixels
RAM	4 GB
Software Version	PD Gold© v7
Operating System	Windows 7 (64-bit)
Weight (Without Case)	5.9 kg
Dimensions (Without Case)	H: 291.7 mm W: 399.4 mm D: 131.31 mm
Power Supply	90 - 264 VAC 45 - 66 Hz
Non - Operating Humidity	95% RH
Operating Humidity	80% RH, +31°C 50% RH, +40°C
Operating Temperature	5°C - 40°C
Non - operating Temperature	-20°C - 60°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.8 ชุดการทดสอบความบกพร่องของสายเคเบิลใต้ดิน (CPDA)



รูปที่ ข.10 ชุดการทดสอบความบกพร่องของสายเคเบิลใต้ดิน (CPDA)

ตารางที่ ข.7 พารามิเตอร์ทางเทคนิคที่สำคัญของอุปกรณ์ CPDA

No.	Parameter	Value
1	The number of PD measurement channels	1
2	Maximum peak voltage of CPDA-15 high-voltage source	18 kV
3	Maximum peak voltage of CPDA-30 high-voltage source	28 kV
4	Maximum peak voltage of CPDA-60 high-voltage source	56 kV
5	Frequency range of registered PD pulse	0,15 ÷ 50,0 MHz
6	Discharge quantity range of registered PD pulse	10pC – 100nC
7	The DAC frequency range	20-1000 Hz
8	Range of capacitance of testing cable line	0,05 μ F...10 μ F
9	Dynamic range of the registered PD pulses	70 dB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

No.	Parameter	Value
10	Phase accuracy of determination of appearance moment of the pulse, concerning a sine curve of industrial frequency	7,5 degree
11	Error of PD location by means of the built-in reflectometer	±2 m no more than 1% of line length
12	Operating time with the built-in accumulator	at least 8 hours
13	Supply voltage from external power source	AC/DC, 110-240V
14	Range of admissible external working temperatures	-20 ÷ +50 C
15	Warranty period of the device and sensors	12 month
16	The service life of the device	at least 10 years
17	Interfaces of connection with the computer	USB 1.0, Wi-Fi

2. สายส่งสัญญาณ

สายส่งสัญญาณคือ สายหรือตัวกลางที่ใช้ในการส่งพลังงานไฟฟ้าและสัญญาณจากแหล่งกำเนิดไปถึงปลายทางหรือส่งสัญญาณจากจุดหนึ่งไปสู่จุดหนึ่ง ซึ่งอาจรวมถึงการเชื่อมต่อระหว่างเครื่องส่งสัญญาณถึงเสาอากาศ หรือระหว่างแหล่งผลิตพลังงานไฟฟ้าถึงสถานีย่อยที่ โดยในวิธีการวิเคราะห์ห้วงจรเบื้องต้นนั้นจะเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์นั้นจะไม่สนใจเรื่องระยะทาง เช่น เมื่อมีความต่างศักย์เคลื่อนที่ผ่านตัวต้านทาน ซึ่งเป็นเฟสเดียวกับแหล่งกำเนิดความต่างศักย์ซึ่งอยู่อีกด้านหนึ่ง หรือเวลาที่วัดจากแหล่งกำเนิดนั้นจะเท่ากับเวลาที่วัดได้จากทั้งวงจร เมื่อระยะทางระหว่างแหล่งกำเนิดกับตัวรับสัญญาณมีค่ามากพอจึงจะสามารถสังเกตความแตกต่างของเวลาได้ ซึ่งคล้ายกับการถ่ายทอดพลังงานแบบจุดต่อจุดในไดโอดีลทริก

อุปกรณ์เบื้องต้นในวงจร เช่น R, C, L การเชื่อมต่อระหว่างกันจะถูกพิจารณาจากทั้งระบบจะไม่สนใจความล่าช้าของสัญญาณอีกด้านหนึ่ง ถ้าอุปกรณ์มีขนาดใหญ่จึงจำเป็นที่จะต้องพิจารณาออกเป็นส่วนๆ นั้นหมายความว่า R, C, L จะถูกนำมาพิจารณาที่ละชิ้นสายส่งสัญญาณนั้นมีคุณสมบัติกลายเป็นอุปกรณ์ชิ้นหนึ่งในวงจรโดยมีกฎเบื้องต้น คือต้องพิจารณาอุปกรณ์แยกชิ้น ตัวการส่งถ่ายเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำลังขอให้พิจารณาช่วงเวลาสนใจที่สั้นที่สุด ในฮาร์โมนิคช่วงเวลาต้องพิจารณาว่าการเปลี่ยนไปของเฟสของแต่ละอุปกรณ์

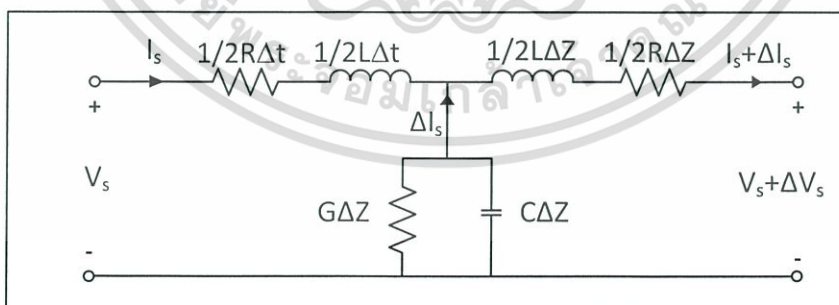
2.1 วัตถุประสงค์ของปรากฏการณ์คลื่นในสายส่งสัญญาณ

1. ให้เข้าใจวิธีการมองสายส่งสัญญาณเป็นอุปกรณ์ในวงจรที่มีคุณสมบัติเป็นตัวต้านทานในวงจรกระแสสลับที่ซับซ้อนขึ้นอยู่กับความยาวและความถี่สาย
2. เข้าใจคุณสมบัติของสายส่งสัญญาณชนิดต่างๆ
3. ศึกษาวิธีใช้สายส่งสัญญาณที่แตกต่างกัน

2.2 สมการของสายส่งสัญญาณ

สมการอนุพันธ์ของแรงดันหรือกระแสในนั้นต้องนำมาพิจารณา ซึ่งสามารถกระทำได้หลายวิธี เช่น สมการของแมกซ์เวลล์ (Maxwell's Equation) ซึ่งเราสามารถอธิบายแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าได้ และสามารถแก้ไขปัญหาของคลื่น TEM (Transverse Electromagnetic) และสายส่งสัญญาณที่มี 2 ตัวนำ จะมีการสูญเสียเกิดขึ้น วงจรโมเดลจะประกอบไปด้วยตัวเหนี่ยวนำ (L), ตัวเก็บประจุ (C), Shunt conductance และตัวต้านทาน (R) อนุกรมกันซึ่งสัมพันธ์กับการเพิ่มของสายส่งสัญญาณในเทอมของสายส่งสัญญาณโคแอกเซียล (Coaxial) ซึ่งประกอบด้วย Dielectric Of Permeability μ (ปกติ μ_0), Permittivity ϵ' และ Conductivity σ ภายในและภายนอกของตัว

โดยเราสมมติการถ่ายเทตามแนวแกน a_z เราตัดส่วนความยาว ΔZ ที่บรรจุกความต้านทาน $R\Delta Z$ และตัวเหนี่ยวนำ $L\Delta Z$ และตัวนำ $G\Delta Z$ และตัวเก็บประจุ $C\Delta Z$ ดังรูป ข.11



รูปที่ ข.11 วงจรโมเดล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V(z,t) = V_0 \cos(\omega t - \beta z + \psi) \quad (\text{ข.1})$$

ใช้ Euler's Theorem เพื่อแสดงสมการให้อยู่ในรูปของเชิงซ้อน จะได้

$$V(z,t) = \text{Re} \{ V_0 e^{j(\omega t - \beta z + \psi)} \} = \text{Re} \{ V_0 e^{j\psi} e^{-j\beta z} e^{j\omega t} \} \quad (\text{ข.2})$$

โดยทำการลด R_e และ $e^{j\omega t}$ เปลี่ยนแรงดันให้อยู่ในรูปเฟสเซอร์ ได้ดังนี้ จะได้

$$V_s(z) = V_0 e^{j\psi} e^{-j\beta z} \quad (\text{ข.3})$$

สามารถเขียนสมการแรงดันไฟฟ้าของวงจรรูปที่ ข.11 ดังนี้

$$V_s(z) = \left(\frac{1}{2} R \Delta z + j \frac{1}{2} \omega L \Delta z\right) I_s + \left(\frac{1}{2} R \Delta z + j \frac{1}{2} \omega L \Delta z\right) (I_s + \Delta I_s) + V_s + \Delta V_s \quad (\text{ข.4})$$

$$\frac{\Delta V_s}{\Delta z} = -(R + j\omega L) I_s - \left(\frac{1}{2} R + j \frac{1}{2} \omega L\right) \Delta I_s \quad (\text{ข.5})$$

เมื่อให้ Δz มีค่าเข้าใกล้ 0 ส่งผลให้ ΔI_s นั้นมีค่าเข้าใกล้ 0 ด้วย และเทอมที่สองทางด้านขวาจะหายไป

$$\frac{dV_s}{dz} = -(R + j\omega L) I_s \quad (\text{ข.6})$$

สามารถประมาณค่าแรงดันกึ่งกลางเป็น V_s จะได้สมการ

$$\frac{\Delta I_s}{\Delta z} = -(G + j\omega C) V_s \quad (\text{ข.7})$$

$$\frac{dI_s}{dz} = -(G + j\omega C) V_s \quad (\text{ข.8})$$

ใช้สมการเคิร์ลของแมกซ์เวลล์ (Maxwell's Equation) สำหรับคลื่นระนาบเอก

ในสายส่งตัวนำสี่เหลี่ยม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\nabla \times E_s = -j\omega\mu H_s \quad (\text{ข.9})$$

กำหนดให้ $E_s = E_{xs} a_x$ และ $H_s = H_{ys} a_y$ โดยที่ E_{xs} และ H_{ys} เป็นฟังก์ชันของ z เท่านั้น ซึ่งจะได้สมการสเกลาร์คล้ายคลึงกับสมการที่ (ข.6)

$$\frac{dE_{xs}}{dz} = -j\omega\mu H_{ys} \quad (\text{ข.10})$$

จาก

$$\nabla \times H_s = (\sigma + j\omega\epsilon')E_s \quad (\text{ข.11})$$

เมื่อเทียบจากสมการที่ (ข.8) จะได้

$$\frac{dH_{ys}}{dz} = -(\sigma + j\omega\epsilon')E_{xs} \quad (\text{ข.12})$$

เงื่อนไขของ V_s และ E_{xs} นั้นมีลักษณะเหมือนกัน สำหรับ I_s และ H_{ys} ดังนั้นวิธีการแก้สมการอาจใช้ความรู้จากสมการของสนามไฟฟ้า จะได้

$$E_{xs} = E_{x0} e^{-jkz} \quad (\text{ข.13})$$

และ

$$V_s = V_0 e^{-\gamma z} \quad (\text{ข.14})$$

ทำการแทนค่า jk ด้วย γ ซึ่งอยู่ในรูปเชิงซ้อนของสายส่งแรงสูง โดยคลื่นเคลื่อนที่ไปตามทิศทาง $+z$ ด้วยขนาดค่าคงที่ของคลื่นระนาบเอก จาก

$$jk = \sqrt{j\omega\mu(\sigma + j\omega\epsilon')}$$

จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีความยาวคลื่นเป็น

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta} \quad (\text{ข.15})$$

ความเร็วเฟสคือ

$$V_p = \frac{\omega}{\beta} \quad (\text{ข.16})$$

สมการนี้สามารถใช้ได้ทั้งคลื่นระนาบเอก และสายส่งสัญญาณ สำหรับความสูญเสีย (Lossless Line) จะมีค่า $R = G = 0$ จะได้ว่า

ดังนั้น

$$\gamma = j\beta = j\omega\sqrt{LC}$$

$$V_p = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

(ข.17)

จากสมการความเข้มสนามแม่เหล็ก

$$H_{ys} = \frac{E_{x0}}{\eta} e^{-jkz}$$

(ข.18)

สมการของกระแสไฟฟ้า

$$I_s = \frac{V_0}{Z_0} e^{jz}$$

(ข.19)

ซึ่งสัมพันธ์กับทิศการเดินทางของแรงดันไฟฟ้า โดยมีค่า Characteristic Impedance Z_0 ซึ่งคล้ายกับ η ใน Conduction Medium

$$\eta = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma + j\omega\epsilon'}} \quad (\text{ข.20})$$

จะได้

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{\sigma + j\omega C}} \quad (\text{ข.21})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อคลื่นระนาบเอกใน Conduction Medium 1 ตกกระทบบน Conduction Medium 2 เศษส่วนของคลื่นตกกระทบที่ถูกสะท้อนกลับ เรียกว่า สัมประสิทธิ์การสะท้อน, Γ

$$\Gamma = \frac{E_{x0}^-}{E_{x0}^+} = \frac{\eta_1 - \eta_2}{\eta_2 + \eta_1} \quad (\text{ข.22})$$

ดังนั้น ค่าเศษส่วนของแรงดันคลื่นตกกระทบที่สะท้อน โดยที่มีค่า Characteristic Impedance, Z_{02} คือ

$$\Gamma = |\Gamma|e^{j\phi} = \frac{V_0^-}{V_0^+} = \frac{Z_{02} - Z_{01}}{Z_{02} + Z_{01}} \quad (\text{ข.23})$$

จากค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน สามารถหาอัตราส่วนคลื่นนิ่งได้จาก

$$S = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (\text{ข.24})$$

เมื่อ $\eta = \eta_3$ สำหรับ $Z > 0$ และ $\eta = \eta_2$ สำหรับ $Z < 0$ อัตราส่วน E_{ms} ต่อ H_{ms} ที่ $Z = -1$ คือ

$$\eta_{in} = \eta_2 \frac{\eta_3 \cos \beta_2 l + jZ_0 \sin \beta l}{\eta_2 \cos \beta_2 l + j\eta_3 \sin \beta_2 l} \quad (\text{ข.25})$$

ค่า Input Impedance คือ

$$Z_{in} = Z_{02} \frac{Z_{03} \cos \beta_2 l + jZ_{02} \sin \beta_2 l}{Z_{02} \cos \beta_2 l + jZ_{03} \sin \beta_2 l} \quad (\text{ข.26})$$

คืออัตราส่วนของ

$$Z_{in} = Z_0 \frac{Z_L \cos \beta l + jZ_0 \sin \beta l}{Z_0 \cos \beta l + jZ_L \sin \beta l} \quad (\text{ข.27})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 สายโคแอกเชียล (Coaxial) ความถี่สูง

สายโคแอกเชียลมีฉนวนในส่วนระหว่างรัศมีภายใน a และรัศมีภายนอก b ดังรูป ค่าประจูดต่อหน่วยความยาว คือ

$$C = \frac{2\pi \epsilon'}{\ln(b/a)} \quad (\text{ข.28})$$

ค่าความนำต่อหน่วยความยาว

$$G = \frac{2\pi\sigma}{\ln(b/a)} \quad (\text{ข.29})$$

โดยที่ σ คือ ค่าความนำของฉนวนระหว่างตัวนำที่ความถี่ทำงาน ค่าความเหนี่ยวนำต่อหน่วยความยาว

$$L_{ext} = \frac{\mu}{2\pi} \ln(b/a) \quad (\text{ข.30})$$

โดยที่ μ คือ Permeability ของฉนวนระหว่างตัวนำ (โดยปกติจะเป็น μ_0 คือค่าความเหนี่ยวนำภายนอก โดยไม่พิจารณาถึงปลั๊กภายในตัวนำอื่น ซึ่งสมการที่ 17 จะใช้ได้ดีกับการประมาณค่าความเหนี่ยวนำทั้งหมดในสายส่งสัญญาณความถี่สูง เราสามารถประมาณค่าความเหนี่ยวนำภายนอกของสายส่งสัญญาณใดๆ เมื่อรู้ค่าประจุและคุณสมบัติฉนวน

พารามิเตอร์สุดท้ายคือความต้านทาน R ต่อหน่วยความยาวถ้าความถี่สูงมากและคาสคินเดพทมีค่าน้อยมาก ซึ่งจะประมาณค่า R โดยการกระจายกระแสทั้งหมดตลอดสคินเดพท δ

$$R_{inner} = \frac{1}{2\pi a \delta \sigma_c} \quad (\text{ข.31})$$

ความต้านทานของตัวนำภายนอก ซึ่งมีรัศมี b

$$R_{outer} = \frac{1}{2\pi b \delta \sigma_c} \quad (\text{ข.32})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้ความต้านทานรวมคือ

$$R = \frac{1}{2\pi\delta\sigma_c} \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right) \quad (\text{ข.33})$$

ดังนั้น

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L_{ext}}{C}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon'}} \ln \frac{b}{a} \quad (\text{ข.34})$$

2.4 สายโคแอกเชียล (Coaxial) ความถี่ต่ำ

สายโคแอกเชียลความถี่ต่ำจะไม่มีผลของ Skin Effect เนื่องจากกระแสถูกประมาณให้กระจายอย่างเปนรูปแบบสม่ำเสมอ

การกระจายของกระแสในตัวนำไม่มีผลต่อค่าประจุหรือค่าประจุต่อหน่วยความยาวดังนี้

$$C = \frac{2\pi\epsilon'}{\ln(b/a)} \quad (\text{ข.35})$$

และ

$$G = \frac{2\pi\sigma}{\ln(b/a)} \quad (\text{ข.36})$$

ความต้านทานต่อหน่วยความยาวอาจคำนวณโดยใช้ $R = \frac{1}{(\sigma_c S)}$, ค่าความนำ ของตัวนำ ภายนอกและภายใน พื้นที่ตรงกลางตัวนำคือ πa^2 และพื้นที่ด้านนอกคือ $\pi(c^2 - b^2)$

เมื่อเพิ่มค่าความต้านทานอีก 2 ค่าจะได้

$$R = \frac{1}{\sigma_c \pi} \left(\frac{1}{a^2} + \frac{1}{c^2 - b^2} \right) \quad (\text{ข.37})$$

พารามิเตอร์ที่ยังคงมีอยู่คือความเหนี่ยวนำต่อความยาว ซึ่งความเหนี่ยวนำด้านนอกที่ค่าความถี่สูง จะมีค่ามากที่สุดของค่าความเหนี่ยวนำรวม ค่าความเหนี่ยวนำภายในของตัวนำภายในและภายนอกจะมีขนาดเล็ก ความถี่ต่ำมากๆ โดยที่การกระจายกระแสเป็นรูปแบบค่าความเหนี่ยวนำด้านในของตัวนำตรงกลาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$L_{a,int} = \frac{\mu}{8\pi} \quad (\text{ข.38})$$

$$W_H = \frac{\mu I^2}{16\pi(c^2 - b^2)} (b^2 - 3c^2 + \frac{4c^2}{c^2 - b^2} \ln \frac{c}{b}) \quad (\text{ข.39})$$

$$L_{a,int} = \frac{\mu}{8\pi(c^2 - b^2)} (b^2 - 3c^2 + \frac{4c^2}{c^2 - b^2} \ln \frac{c}{b}) \quad (\text{ข.40})$$

$$L_{a,int} = \frac{\mu}{2\pi} [\ln \frac{b}{a} + \frac{1}{4} + \frac{\mu}{4(c^2 - b^2)} (b^2 - 3c^2 + \frac{4c^2}{c^2 - b^2} \ln \frac{c}{b})] \quad (\text{ข.41})$$

2.5 สายโคแอกเชียล (Coaxial) ความถี่ปานกลาง

สายโคแอกเชียล (Coaxial) ความถี่ปานกลางจะมีการกระจายกระแสไฟฟ้าถูกควบคุมโดยฟังก์ชัน Bessel ทั้งค่าความต้านทานและค่าความเหนี่ยวนำ จำเป็นที่จะใช้สำหรับขนาดความนำขนาดเล็กที่มีความถี่สูง และสำหรับสายโคแอกเชียล (Coaxial) ขนาดใหญ่กว่า ถูกใช้ในสายส่งที่มีความถี่ต่ำ

3. การคำนวณของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ในสายเคเบิลใต้ดินนั้นขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานเหนี่ยวนำระหว่างแกนตัวนำกับผิวเปลือก, กระแสที่อยู่ภายในตัวนำ และ ความยาวของสายเคเบิล จะได้สูตรการคำนวณว่า

$$U_i = X_M \bullet I \bullet L \quad (\text{ข.42})$$

โดยที่ X_M = ความต้านทานเหนี่ยวนำร่วมระหว่างแกนตัวนำกับเปลือกผิว

I = กระแสในตัวนำต่อหนึ่งเฟส (A)

L = ความยาวสายเคเบิล

ค่าความต้านทานไฟฟ้าเหนี่ยวนำระหว่างแกนตัวนำและผิวเปลือกสามารถคำนวณได้จากสูตรดังต่อไปนี้

$$X_M = \omega \bullet L_M (\Omega/km) \quad (\text{ข.43})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ ω คือ ความถี่เชิงมุม (1/s)

L_M คือ ค่าความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างแกนตัวนำและผิว (H/km) โดยหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$d_M = L_M = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \ln\left(\frac{2a}{d_m}\right) \quad (\text{ข.44})$$

โดยที่

d_M = ค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางที่เปลือกผิว (mm)

a = พื้นที่หน้าตัดของตัวนำ (mm)

3.1 Cases study

การศึกษาจะดำเนินการโดยใช้สายเคเบิลแบบ single-core ที่ตัวนำทำจากทองแดง พื้นที่หน้าตัด 800 ตารางมิลลิเมตร โดยมีฉนวน XLPE และปกคลุมที่ความถี่เท่ากับ 50 เฮิร์ตซ์ที่มีระดับแรงดันไฟฟ้าต่างๆ ที่จะได้รับความหลากหลายของค่าของตัวแปรเหล่านี้ ซึ่งพารามิเตอร์มีการระบุไว้ในตาราง

ตารางที่ ข.8 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณ

Cable parameters	Voltage level (kV)					
	11	22	66	132	220	500
พื้นที่หน้าตัดของตัวนำ (mm ²)	800	800	800	800	800	800
เส้นผ่านศูนย์กลางตัวนำ (mm)	34	34	34	34	34	34
Mean sheath diameter (mm)	46	50.4	62.6	74.5	89.1	115.3
Outer diameter of cable (mm)	53	58	80	93	108	136
Current rating (A) for copper conductor	1189	1154	995	949	940	900
Copper electrical resistivity at 20°C $\Omega \cdot m$	1.7241 x 10 ⁻⁸					
Temperature coefficient of copper per K at 20°C	3.93 x 10 ⁻³					

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยกตัวอย่างการคำนวณที่ระบบแรงดันไฟฟ้า 22kV

จากสูตร

$$U_i = \omega \cdot X_M \cdot I = 2 \cdot 10^{-7} \omega \cdot I \cdot \ln\left(\frac{2a}{d_m}\right) \quad (\text{ข.45})$$

จากตารางที่แรงดัน 22 kV จะได้ค่าดังนี้

$$a = 58 \text{ mm.}$$

$$d_M = 50.4 \text{ mm.}$$

$$I = 1154 \text{ A.}$$

แทนค่าลงในสมการ จะได้

$$U_i = 2 \times 10^{-7} 2\pi \times 50 \times 1154 \cdot \ln\left(\frac{2 \times 58}{50.4}\right) \quad (\text{ข.46})$$

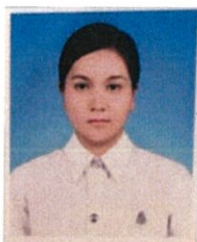
ผลลัพธ์ที่ได้มีค่าเท่ากับ 60.442 V/m

ตารางที่ ข.9 เปรียบเทียบผลการคำนวณระบบไฟฟ้าที่ระดับแตกต่างกัน

Voltage levels	Sheath bonding arrangement				
	bonding-touch trefoil				
	λ_{CS} %	I_{CS} (A) A	λ_{SE} %	I_{SE} (A) A	V_s (V/km)
11 kV	0	0	0.90	14.5 A	61.8
22 kV	0	0	1.07	17.1 A	60.4
66 kV	0	0	2.82	42.1 A	58.7
132 kV	0	0	3.96	57.4 A	57.2
220 kV	0	0	6.10	85.2 A	55.4
500 kV	0	0	10.32	139.2 A	53.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน



ชื่อ-นามสกุล น.ส.วราภรณ์ โชติรัตนศักดิ์
รหัสนักศึกษา 56011080
วัน เดือน ปีเกิด 12 เมษายน 2538
ที่อยู่ 89/954 ซอย นวมินทร์81 แยก3-18 คลองกุ่ม
บึงกุ่ม กรุงเทพมหานคร 10240



ชื่อ-นามสกุล น.ส.ศิริพร ศรีสุวรรณ
รหัสนักศึกษา 56011217
วัน เดือน ปีเกิด 21 พฤศจิกายน 2537
ที่อยู่ 34/6 หมู่ที่ 6 แขวงคูฝั่งเหนือ เขตหนองจอก
กรุงเทพมหานคร 10530



ชื่อ-นามสกุล นาย สรศักดิ์ กันชัน
รหัสนักศึกษา 56011268
วัน เดือน ปีเกิด 8 ตุลาคม 2536
ที่อยู่ 15 ซอยพระรามเก้า 30 แขวงหัวหมาก
เขตบางกะปิ กรุงเทพมหานคร 10240



ชื่อ-นามสกุล น.ส.อลิสา มานพ
รหัสนักศึกษา 56011436
วัน เดือน ปีเกิด 11 มกราคม 2537
ที่อยู่ 232/1 ม.หมู่ม่น ต.หมู่ม่น อ.สมเด็จ
กาฬสินธุ์ 46150

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้