

การศึกษาหาค่าเพอร์มิททีวิตีสัมพัทธ์ของฉนวนสายเคเบิล
โดยใช้เทคนิคของคลื่นเดินทาง

STUDYING RELATIVE PERMITTIVITY OF CABLE INSULATORS
USING TRAVELLING WAVE TECHNIQUE



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2546

ISBN 974-324-949-4

การศึกษาหาค่าเพอร์มิททิวิตี้สัมพัทธ์ของฉนวนสายเคเบิล
โดยใช้เทคนิคของคลื่นเดินทาง

STUDYING RELATIVE PERMITTIVITY OF CABLE INSULATORS
USING TRAVELLING WAVE TECHNIQUE



รุ่งโรจน์ สมบูรณ์ทรัพย์
RUNGROJ SOMBOONSUB

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

วพ.

ร 676 ก

๕๕๔๖

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน **50947**

วัน,เดือน,ปี **2 6 พ.ค. 2547**

พ.ศ.2546

ISBN 974 - 324 - 949 - 4

.b.....
.i.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้ง *พิมพ์*

**STUDYING RELATIVE PERMITTIVITY OF CABLE INSULATORS
USING TRAVELLING WAVE TECHNIQUE**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2003

ISBN 974 – 324 – 949 – 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2003

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาหาค่าเพอร์มิททิวิตีสัมพัทธ์ของฉนวนสายเคเบิล โดยใช้เทคนิคของคลื่นเดินทาง
นักศึกษา	นายรุ่งโรจน์ สมบูรณ์ทรัพย์
รหัสประจำตัว	43061176
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2546
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอถึงการศึกษาหาค่าเพอร์มิททิวิตีสัมพัทธ์ของฉนวนสายเคเบิล โดยใช้เทคนิคของคลื่นเดินทาง ซึ่งอาศัยทฤษฎีของคลื่นเดินทางและการเกิดคลื่นสะท้อน โดยวิธีการส่งสัญญาณพัลส์แรงดันต่ำเข้าไปในสายเคเบิลที่ต้องการทดสอบหาค่าเพอร์มิททิวิตีสัมพัทธ์ (ϵ_r) ของวัสดุฉนวน แล้วทำการตรวจวัดช่วงเวลาเดินทางของคลื่นที่สะท้อนกลับจากออสซิลโลสโคป ซึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงตามคุณสมบัติของฉนวนแต่ละชนิด โดยในการศึกษานี้จะออกแบบและจัดสร้างให้เป็นเครื่องมือวัดต้นแบบที่สามารถทำการหาค่าเพอร์มิททิวิตีสัมพัทธ์ของฉนวน PVC และ XLPE ของตัวอย่างสายเคเบิลตัวนำคู่และสายเคเบิลได้ดินพิกัดไม่เกิน 24 kV ขนาด 1 - 400 ตารางมิลลิเมตร ที่ระยะความยาวสายในช่วงทดสอบ 10-250 เมตร ซึ่งเครื่องวัดนั้นจะประกอบด้วยวงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์ วงจรตรวจจับคลื่นสะท้อน และวงจรรับ โดยสามารถกำหนดระยะความยาวสายที่ทดสอบได้จากคีย์แพด และแสดงผลออกหน้าจอ LCD จากการประมวลผลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งสามารถเลือกใช้ได้ทั้งแหล่งจ่ายไฟที่กระแสตรงและกระแสสลับ เพื่อนำไปใช้งานตามสถานที่ต่างๆ ได้สะดวก และไม่มีขั้นตอนในการทดสอบที่ยุ่งยาก รวมทั้งค่าที่วัดได้มีความคลาดเคลื่อนต่ำ เมื่อทำการเปรียบเทียบกับตารางแสดงค่าเพอร์มิททิวิตีสัมพัทธ์ของวัสดุโพลีเมอร์ [1-2] และค่าที่คำนวณจากผลการทดสอบโดยวิธีการวัดหาค่าคาปาซิแตนซ์และค่าแฟลคเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกของตัวอย่างสายเคเบิลตามมาตรฐาน IEC 60502-2 (1998) และ ICEA S-66-524 (Revision No.1 1992) [3-4] ซึ่งเป็นรายงานผลการศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าเพอร์มิททิวิตีสัมพัทธ์ของฉนวนสายเคเบิลทั้ง PVC และ XLPE ด้วยการศึกษาดังกล่าวของมิติและโครงสร้างการฉนวน ผลของอุณหภูมิ โดยใช้เทคนิควิธีการเร่งอายุการใช้งานของฉนวนในลักษณะต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดี โดยได้รับคำแนะนำและแนวทางในการดำเนินงานวิจัย รวมทั้งโอกาสที่ดีในการทำงานและประสบการณ์ที่เป็นประโยชน์ ตลอดระยะเวลาที่ผ่านมาจากท่าน รองศาสตราจารย์ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง ตลอดจนคณาจารย์และเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่านที่ได้ให้ความสนับสนุนในด้านต่างๆ

ขอขอบคุณ บริษัทจุงไทยไวร์แอนด์เคเบิล จำกัด บริษัทสายไฟฟ้าไทย-ยาซากิ จำกัด ศูนย์บริการและพัฒนามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ห้องปฏิบัติการวิจัยวัสดุวิศวกรรมไฟฟ้า ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง และภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สจล. ที่เอื้อเฟื้ออุปกรณ์ ข้อมูลและสถานที่ทดสอบ รวมทั้งคำแนะนำด้านมาตรฐานการทดสอบ

ขอขอบคุณนักศึกษาปริญญาตรีและนักศึกษาปริญญาโททุกท่าน รุ่นพี่และรุ่นน้องที่ได้ให้ความช่วยเหลือและสนับสนุนอุปกรณ์ต่างๆ รวมทั้งข้อเสนอแนะต่างๆ สำหรับแนวทางการทำวิจัย

ขอขอบคุณกำลังใจและโอกาสจากผู้มีพระคุณทุกท่าน ซึ่งเป็นแรงบันดาลใจของความสำเร็จในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวสมบุญทรัพย์ ที่ได้ให้ความรักและให้กำลังใจที่เต็มมาตลอดชีวิต และให้ความช่วยเหลือในทุกๆ ด้านต่อการศึกษาและการทำวิจัย

รุ่งโรจน์ สมบุญทรัพย์

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.8.5 Copper Wire Shield ทำด้วยแถบโลหะแบนหรือเส้นโลหะกลม.....	21
2.8.6 Separator Tape หรือเรียกว่า Bedding Type.....	21
2.8.7 Sheath หรือเปลือกนอกทำด้วยวัสดุที่เป็นฉนวน.....	21
2.9 โพลาริเซชัน P (Polarization) และเพอร์มิททีวิตี (permittivity).....	22
2.10 บทสรุป.....	25

บทที่ 3 มาตรฐานและวิธีการทดสอบฉนวนของสายเคเบิลและปัจจัยที่มีผลต่อ

ค่าเพอร์มิททีวิตีสัมพัทธ์.....	26
3.1 บทนำ.....	26
3.2 การทดสอบหาค่าคาปาซิแตนซ์ (Capacitance) ของสายเคเบิล.....	26
3.3 พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก (Dielectric Loss).....	29
3.4 มาตรฐานและหัวข้อการทดสอบ.....	31
3.4.1 การทดสอบตามมาตรฐาน ICEA S-66-524.....	31
3.4.1.1 การทดสอบในหัวข้อ Capacity and Power Factor.....	31
3.4.1.2 การทดสอบในหัวข้อ Accelerated Water Absorption.....	31
3.4.2 การทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60502-2.....	32
3.4.2.1 การทดสอบในหัวข้อ Tan δ Measurement ตามมาตรฐาน IEC 60502-2 (1998).....	33
3.4.2.2 การทดสอบในหัวข้อ Tan δ Measurement ตามมาตรฐาน IEC 502 (1994).....	33
3.4.3 การทดสอบฉนวน PVC ของสายเคเบิลแรงต่ำ.....	34
3.4.3 การทดสอบเร่งอายุการใช้งานของฉนวนสายเคเบิลในลักษณะต่างๆ.....	34
3.5 ข้อมูลในการทดสอบต่างๆ ของฉนวนสายเคเบิล.....	35
3.5.1 การตรวจวัดโครงสร้าง.....	35
3.4.2 การทดสอบทางด้านฟิสิกส์.....	36
3.6 อุปกรณ์และการควบคุมการทดสอบ.....	36
3.6.1 แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ.....	36
3.6.2 เครื่องวัดค่าคาปาซิแตนซ์และพลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก.....	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.6.3 คาปาซิเตอร์มาตรฐาน.....	38
3.6.4 การควบคุมการทดสอบ.....	38
3.7 วิธีและขั้นตอนการทดสอบ.....	39
3.8 การทดสอบและผลการทดสอบ.....	41
3.8.1 ผลการทดสอบในหัวข้อ Capacity and Power Factor.....	41
3.8.2 ผลการทดสอบในหัวข้อ Accelerated Water Absorption Tests.....	42
3.8.3 ผลการทดสอบในหัวข้อ Tan δ Measurement (IEC 60502-2).....	44
3.8.4 ผลการทดสอบในหัวข้อ Tan δ Measurement (IEC 502).....	47
3.8.5 การทดสอบฉนวน PVC ของสายเคเบิลแรงดันต่ำ.....	49
3.8.6 การศึกษาการเร่งอายุการใช้งานในลักษณะต่างๆ.....	51
3.9 วิเคราะห์ผลของปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อค่าเพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์ ของฉนวนสายเคเบิล.....	54
3.9.1 ค่าของเพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์กับ โครงสร้างของสายเคเบิล.....	54
3.9.2 ค่าของเพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์กับอุณหภูมิ.....	55
3.9.3 ค่าของ เพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์กับแรงดัน.....	55
3.9.4 ค่าของ เพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์กับความดันบรรยากาศ.....	55
3.9.5 ค่าของเพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์กับความถี่.....	55
3.9.6 ค่าของ เพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์กับความชื้น.....	56
3.10 บทสรุป.....	56
บทที่ 4 การศึกษาหาค่าเพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์ของฉนวนสายเคเบิล โดยใช้เทคนิคของคลื่นเดินทาง.....	57
4.1 บทนำ.....	57
4.2 การหาค่าเพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์ของฉนวนสายเคเบิล โดยใช้คลื่นเดินทาง.....	57
4.3 การออกแบบและสร้างเครื่องวัดค่า ϵ_r ของฉนวนสายเคเบิล.....	59
4.4 การออกแบบส่วนวงจรรวม.....	59
4.4.1 แหล่งจ่ายไฟ.....	59
4.4.2 วงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์.....	60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.4.3 วงจรตรวจจับการสะท้อนกลับของคลื่น.....	62
4.4.4 การทดลองหาค่าเพอร์มิททีวิตีสัมพัทธ์ของฉนวน PVC และ XLPE.....	63
4.4.5 การพิจารณาความกว้างของสัญญาณเพื่อใช้ในการปรับตั้งค่าการวัด เพอร์มิททีวิตีสัมพัทธ์ที่ระยะความยาวต่างๆ ของสายเคเบิล.....	65
4.4.6 วงจรนับ.....	66
4.5 การออกแบบส่วนประมวลผลและแสดงผล.....	67
4.5.1 ส่วนประมวลผล.....	67
4.5.2 คีย์แพด.....	69
4.5.3 ส่วนประมวลผล.....	69
4.6 บทสรุป.....	73
บทที่ 5 ผลการทดสอบและเปรียบเทียบเครื่องมือวัดค่าเพอร์มิททีวิตีสัมพัทธ์ ของฉนวนสายเคเบิล.....	74
5.1 บทนำ.....	74
5.2 วิธีและขั้นตอนการทดสอบ.....	74
5.3 การทดสอบหาค่าเพอร์มิททีวิตีสัมพัทธ์ของฉนวนสายเคเบิล ที่ระยะความยาวต่างๆ.....	77
5.3.1 ผลการทดสอบหาค่าเพอร์มิททีวิตีสัมพัทธ์ของสาย 300 V 2-core PVC Insulated and Sheathed, Flat Type ที่ระยะความยาวสายต่างๆ.....	77
5.3.2 ผลการทดสอบหาค่าเพอร์มิททีวิตีสัมพัทธ์ของสาย 0.6/1 kV- CE Copper Twin Conductor ที่ระยะความยาวสายต่างๆ.....	87
5.3.3 ผลการทดสอบหาค่าเพอร์มิททีวิตีสัมพัทธ์ของสาย 12/20 kV. Underground Cable ที่ระยะความยาวสายต่างๆ.....	97
5.4 การทดสอบหาค่าเพอร์มิททีวิตีสัมพัทธ์ของฉนวนสายเคเบิลขนาดต่างๆ.....	103
5.4.1 ผลการทดสอบหาค่าเพอร์มิททีวิตีสัมพัทธ์ของสาย 300 V 2-core PVC Insulated and Sheathed, Flat Type ขนาดต่างๆ.....	103
5.4.2 ผลการทดสอบหาค่าเพอร์มิททีวิตีสัมพัทธ์ของสาย 0.6/1 kV. Copper Cable Twin Conductor ขนาดต่างๆ.....	105

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.4.3 ผลการทดสอบหาค่าเพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์ของสาย 12/20 kV. Underground Cable ขนาดต่างๆ.....	107
5.5 การทดสอบหาค่าเพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์ของฉนวนสายเคเบิล อุณหภูมิต่างๆ.....	109
5.5.1 ผลการทดสอบหาค่าเพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์ของสาย 300 V 2-core PVC Insulated and Sheathed. Flat Type ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	109
5.5.2 ผลการทดสอบหาค่าเพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์ของสาย 0.6/1 kV. Copper Cable Twin Conductor ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	112
5.5.3 ผลการทดสอบหาค่าเพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์ของสาย 12/20 kV. Underground Cable ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	116
5.6 ผลการทดสอบเทียบตารางแสดงค่าเพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์สัมพัทธ์ ของวัสดุโพลีเมอร์.....	120
5.7 ผลการทดสอบเทียบกับผลการคำนวณจากการทดสอบ โดยวิธีการหาค่าคาปาซิแตนซ์และแฟลคเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก.....	121
5.8 วิเคราะห์ผลการทดสอบ	
5.8.1 ค่าเพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์ต่อระยะความยาว.....	124
5.8.2 ค่าเพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์ต่อขนาดสายเคเบิล.....	126
5.8.3 ค่าเพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์ต่ออุณหภูมิของฉนวนสายเคเบิล.....	127
5.8.4 รูปสัญญาณที่ตรวจวัดได้จากออกซิลโลสโคป.....	128
5.9 บทสรุป.....	129
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	130
6.1 การทดสอบฉนวนสายเคเบิลตามมาตรฐาน.....	130
6.2 การศึกษาหาค่าเพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์ของฉนวนสายเคเบิลโดยใช้คลื่นเดินทาง.....	131
6.3 การออกแบบสร้างเครื่องวัดค่าเพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์ของฉนวนสายเคเบิล.....	131
6.4 การทดสอบเครื่องมือวัดที่ออกแบบสร้างเทียบ ตารางแสดงค่าเพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์และการทดสอบตามมาตรฐาน.....	132
6.5 ข้อเสนอแนะ.....	133

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
6.6 งานวิจัยที่พัฒนาต่อไป.....	134
เอกสารอ้างอิง.....	135
ภาคผนวก.....	137
ภาคผนวก ก. ข้อมูลของการทดสอบจนวนสายเคเบิลตามมาตรฐาน.....	138
ภาคผนวก ข. ข้อมูลการทดสอบจนวนสายเคเบิล โดยใช้เทคนิคของคลื่นเดินทาง.....	153
ภาคผนวก ค. เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ.....	162
ภาคผนวก ง. ข้อมูลทางด้านเทคนิคของเครื่องมือวัด.....	168
ภาคผนวก จ. ข้อมูลทางทางไดอิเล็กตริกของวัสดุจนวน.....	170
ภาคผนวก ฉ. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์.....	173
ประวัติผู้เขียน.....	181

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่

หน้า

5.4 ผลการทดสอบหาค่า E_c ของสาย 300 V 2-core PVC Insulated and Sheathed. Flat Type ขนาดต่างๆ.....	104
5.5 ผลการทดสอบหาค่า E_c ของสาย 0.6/1 kV. Copper Cable Twin Conductor Cross-linked Polyethylene Insulated and Polyethylene Sheathed ขนาดต่างๆ.....	106
5.6 ผลการทดสอบหาค่า E_c ของสาย 12/20 kV. Underground Cable Copper Stranded Conductor XLPE Insulated and PE Sheathed ขนาดต่างๆ.....	108
5.7 ผลการทดสอบหาค่า E_c ของสาย 300 V 2-core PVC Insulated and Sheathed. Flat Type ขนาด 1 mm ² ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	112
5.8 ผลการทดสอบหาค่า E_c ของสาย 0.6/1 kV. Copper Cable Twin Conductor Cross-linked Polyethylene Insulated and Polyethylene Sheathed ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	115
5.9 ผลการทดสอบหาค่า E_c ของสาย 12/20 kV. Underground Cable Copper Stranded Conductor XLPE Insulated and PE Sheathed ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	119
5.10 ค่าเพอร์มิทวิตีส์สัมพัทธ์สัมพัทธ์ของสาย 300 V 2-core PVC Insulated and Sheathed. Flat Type ขนาดต่างๆ 100 เมตร.....	120
5.11 ค่าเพอร์มิทวิตีส์สัมพัทธ์ของสาย 0.6/1 kV. Copper Cable Twin Conductor Cross-linked Polyethylene Insulated and Polyethylene Sheathed ขนาดต่างๆ 100 เมตร.....	120
5.12 ค่าเพอร์มิทวิตีส์สัมพัทธ์ของสาย 12/20 kV. Underground Cable Copper Stranded Conductor XLPE Insulated and PE Sheathed ขนาดต่างๆ 50 เมตร.....	120
5.13 ค่าเฉลี่ยเพอร์มิทวิตีส์สัมพัทธ์ที่ระยะความยาวต่างๆ ของฉนวน PVC และ XLPE เปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณจากการทดสอบ C&TAN δ	121
5.14 ค่าเพอร์มิทวิตีส์สัมพัทธ์ที่ระยะความยาว 15 เมตร ของฉนวน PVC และ XLPE เปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณจากการทดสอบ C&TAN δ	122
5.15 ค่าเพอร์มิทวิตีส์สัมพัทธ์สัมพัทธ์ของสาย 300 V 2-core (PVC) ที่อุณหภูมิต่างๆ เปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณจากการทดสอบ C&TAN δ	122
5.16 ค่าเพอร์มิทวิตีส์สัมพัทธ์ของสาย 0.6/1 kV. Copper Cable Twin Conductor (XLPE) ที่อุณหภูมิต่างๆ เปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณจากการทดสอบ C&TAN δ	122

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่

หน้า

5.17 ค่าเพอร์มิทิวิตีที่สัมพันธ์ของสาย 12/20 kV. Underground (XLPE) ที่อุณหภูมิต่างๆ เปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณจากการทดสอบ C&TAND.....	123
6.1 ปัจจัยที่มีผลต่อค่าเพอร์มิทิวิตีที่สัมพันธ์ของฉนวนสายเคเบิล.....	131
6.2 การเปรียบเทียบผลที่ได้ของเครื่องมือวัดกับตารางและผลการทดสอบตามมาตรฐาน.....	133
6.3 การเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนของวิธีที่นำเสนอกับผลการทดสอบตามมาตรฐาน.....	133
ผ.1 ค่าไดอิเล็กตริกของวัสดุฉนวน (Relative Dielectric Conatant).....	171
ผ.2 ค่าเพอร์มิทิวิตีที่สัมพันธ์ (ϵ_r) ของฉนวนกับอุณหภูมิและความถี่.....	172



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 วงจรสมมูลสายส่งไฟฟ้า.....	6
2.2 ตัวอย่างการเพิ่มขึ้นของแต่ละส่วนบนสายส่ง ณ เฟสใดๆ ในเทอมของคลื่นเดินทาง.....	7
2.3 ตัวอย่างการจำลองส่วนย่อยบนสายส่ง ณ เฟสใดๆ (โดย v และ i เป็นฟังก์ชันของ x และ t).....	8
2.4 คลื่นของแรงดันซึ่งเป็นฟังก์ชันของ $x - vt$ คือที่เวลา t มีค่าเท่ากับ t_1 และ t_2	11
2.5 การสะท้อนกลับเมื่อ Z_c เป็นอิมพีแดนซ์ของปลายด้านส่งและ Z_R เป็นอิมพีแดนซ์ปลายด้านรับ.....	14
2.6 การสะท้อนกลับเมื่อต่อปลายสายแบบปิด (Short Circuit).....	15
2.7 การสะท้อนกลับเมื่อต่อปลายสายแบบเปิด (Open Circuit).....	16
2.8 วัสดุของสารฉนวนที่นำมาผลิตเป็นฉนวนสายเคเบิล.....	18
2.9 ส่วนต่างๆของสายเคเบิลแรงต่ำฉนวน PVC.....	19
2.10 ส่วนต่างๆของสายเคเบิลแรงสูงฉนวน XLPE.....	19
2.11 วัสดุไดอิเล็กตริกเขตประจุบวกและประจุลบที่ซ้อนกันและ เคลื่อนที่ไปตามทิศทางสนามไฟฟ้า.....	22
2.12 การโพลาริเซชันในสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรดแผ่นระนาบ.....	22
2.13 หลักการพื้นฐานของฉนวน.....	23
2.14 ค่าเพอร์มิททิวิตีต่ออุณหภูมิ.....	24
3.1 วงจร Schering bridge.....	26
3.2 แรงดันสลับและกระแสในคาปาซิเตอร์ในไดอิเล็กตริก.....	29
3.3 วงจรสมมูลของไดอิเล็กตริกแบบขนาน.....	30
3.4 สาย 25 kV Spaced Aerial Cable Aluminum Stranded Conductor XLPE Insulated and Sheathed (25 kV-CC).....	32
3.5 สาย 12/20 kV. Underground Cable Copper Stranded Conductor XLPE Insulated and PE Sheathed (12/20 kV-CE).....	33
3.6 สาย 300 V 2-core PVC Insulated and Sheathed. Flat Type.....	34
3.7 สาย 0.6/1 kV. Copper Cable Twin Conductor Cross-linked Polyethylene Insulated and Polyethylene Sheathed.....	35
3.8 เครื่องตรวจวัดโครงสร้างของฉนวนสายเคเบิล.....	35
3.9 การทดสอบฉนวน XLPE ของสายเคเบิลในหัวข้อ Water Absorption Test.....	36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.10 แหล่งจ่ายแรงดันกระแสสลับ 100 kV และชุดควบคุมแรงดันในการทดสอบ.....	37
3.11 เครื่องวัดค่าคาปาซิแตนซ์และพลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก Tetex AG รุ่น 2805.....	37
3.12 การทดสอบเทียบเครื่องวัดค่าคาปาซิแตนซ์และพลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก.....	37
3.13 คาปาซิเตอร์มาตรฐาน.....	38
3.14 การควบคุมอุณหภูมิของฉนวนที่ทดสอบโดยวิธีการจ่ายกระแส.....	39
3.15 วงจรทดสอบหาค่าคาปาซิแตนซ์และค่าพลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก.....	39
3.16 วงจรเพอร์มิทิวิตีและคาปาซิแตนซ์.....	40
3.17 การทดสอบหาค่า ϵ_r ของฉนวน XLPE ในหัวข้อ Capacity and Power Factor Tests.....	42
3.18 การทดสอบหาค่า ϵ_r ของฉนวน XLPE ในหัวข้อ Accelerated Water Absorption Tests.....	43
3.19 การทดสอบหาค่า ϵ_r ของฉนวน XLPE ในหัวข้อ Tan δ Measurement ตามมาตรฐาน IEC 60502-2 โดยวิธีการจ่ายกระแส.....	45
3.20 ผลการเปลี่ยนแปลงของค่า ϵ_r ของฉนวน XLPE ของสายเคเบิลใต้ดิน ขนาด 35 mm ² , 70 mm ² และ 400 mm ² ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	47
3.21 การทดสอบหาค่า ϵ_r ของฉนวน XLPE ในหัวข้อ Tan δ Measurement ตามมาตรฐาน IEC 502 ที่แรงดันต่างๆ.....	47
3.22 ผลการเปลี่ยนแปลงของค่า ϵ_r ของฉนวน XLPE ของสายเคเบิลใต้ดิน ขนาด 35 mm ² , 70 mm ² และ 400 mm ² ที่แรงดันต่างๆ.....	48
3.23 การทดสอบหาค่า ϵ_r ของฉนวน PVC ของสายแรงต่ำที่อุณหภูมิต่างๆ.....	49
3.24 ผลการเปลี่ยนแปลงของค่า ϵ_r ของฉนวน PVC ของสายแรงต่ำ ขนาด 1 mm ² ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	50
3.25 การทดสอบหาค่า ϵ_r ของฉนวน XLPE ของสายแรงต่ำขนาด 6 mm ² ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	51
3.26 ผลการเปลี่ยนแปลงของค่า ϵ_r ของฉนวน XLPE ของสายแรงต่ำ ขนาด 6 mm ² ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	52
3.27 ผลของความแตกต่างของค่า ϵ_r ของฉนวน XLPE จากการเร่งอายุการใช้งานในลักษณะต่างๆ.....	53
4.1 สัญญาณพัลส์ที่ป้อนเข้าไปในสายเคเบิล และสัญญาณพัลส์ที่สะท้อนกลับ.....	58
4.2 เปลือกไดอะแกรมของเครื่องวัดค่า ϵ_r ของสายเคเบิล.....	59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.3 บล็อกไดอะแกรมของแหล่งจ่ายไฟ	59
4.4 วงจรกำเนิดพัลส์แบบพัลส์.....	60
4.5 สัญญาณที่วัดได้จากวงจรถูกกำเนิดพัลส์แบบโมโนสเตเบิลขนาด 1 μ s.....	60
4.6 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับในกรณีความกว้างของสัญญาณมากกว่าระยะความยาวสาย.....	61
4.7 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับในกรณีความกว้างของสัญญาณน้อยกว่าระยะความยาวสาย.....	61
4.8 วงจรตรวจจับคลื่นสะท้อน.....	62
4.9 หลักการทำงานของวงจรตรวจจับคลื่นสะท้อน.....	62
4.10 สัญญาณที่วัดได้จากวงจรตรวจจับการสะท้อนกลับของคลื่น.....	63
4.11 วงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์ต่อกับวงจรตรวจจับการสะท้อนกลับของคลื่น.....	64
4.12 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 300 V 2-core PVC Insulated and Sheathed. Flat Type ขนาด 1 mm ² ที่ระยะความยาว 10 m	64
4.13 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 0.6/1 kV. Copper Cable Twin Conductor XLPE Insulated and Polyethylene Sheathed ขนาด 6 mm ² ที่ระยะความยาว 10 เมตร.....	64
4.14 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 300 V 2-core PVC Insulated and Sheathed. Flat Type ขนาด 1 mm ² ที่ระยะความยาว 250 m	65
4.15 เปรียบเทียบช่วงเวลาการสะท้อนกลับของคลื่นและจำนวนของสัญญาณที่ได้จากวงจรมับ.....	65
4.16 วงจรมับ.....	66
4.17 การทำงานของวงจรมับในส่วนของ Counter Synchronous.....	67
4.18 วงจรไมโครคอนโทรลเลอร์.....	68
4.19 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของส่วนประมวลผล.....	68
4.20 การทำงานของคีย์แพด.....	69
4.21 วงจรแสดงผล 2 Line \times 16 Character LCD Display.....	69
4.22 โฟลว์ชาร์ตการทำงานของโปรแกรม.....	70
4.23 วงจรรวม.....	71
4.24 วงจรส่วนประมวลผลและส่วนแสดงผล.....	72
4.25 ภายนอกและภายในเครื่องมือวัดค่าเพอร์มิททีวิตีสัมพัทธ์.....	73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
5.1 วงจรทดสอบหาค่าเพอร์มิทวิตีส์สัมพัทธ์.....	74
5.2 หน้าจอแสดงความพร้อมการทำงาน.....	75
5.3 หน้าจอแสดงการเลือกชนิดฉนวนที่ต้องการทดสอบ.....	75
5.4 หน้าจอแสดงการป้อนค่าระยะความยาวทดสอบ.....	75
5.5 ตัวอย่างการป้อนค่าระยะทางทดสอบ.....	75
5.6 แป้นพิมพ์ลีย์แพดสำหรับป้อนค่าระยะทางและการเริ่มต้นทำงานของเครื่องมือวัด.....	76
5.7 ผลการทดสอบของเครื่องมือวัดแสดงออกหน้าจอ LCD Module.....	76
5.8 การทดสอบหาค่า ϵ_r ของฉนวน PVC และ XLPE ของสายเคเบิลที่ระยะความยาวสายต่างๆ...77	
5.9 การทดสอบหาค่า ϵ_r ของสาย 300 V 2-core PVC Insulated and Sheathed, Flat Type ขนาด 1 mm ² ที่ระยะความยาวต่างๆ.....	77
5.10 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 300 V 2-core PVC Insulated and Sheathed, Flat Type ขนาด 1 mm ² ที่ระยะความยาว 10 เมตร.....	78
5.11 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 300 V 2-core PVC Insulated and Sheathed, Flat Type ขนาด 1 mm ² ที่ระยะความยาว 20 เมตร.....	78
5.12 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 300 V 2-core PVC Insulated and Sheathed, Flat Type ขนาด 1 mm ² ที่ระยะความยาว 30 เมตร.....	78
5.13 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 300 V 2-core PVC Insulated and Sheathed, Flat Type ขนาด 1 mm ² ที่ระยะความยาว 40 เมตร.....	79
5.14 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 300 V 2-core PVC Insulated and Sheathed, Flat Type ขนาด 1 mm ² ที่ระยะความยาว 50 เมตร.....	79
5.15 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 300 V 2-core PVC Insulated and Sheathed, Flat Type ขนาด 1 mm ² ที่ระยะความยาว 60 เมตร.....	79
5.16 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 300 V 2-core PVC Insulated and Sheathed, Flat Type ขนาด 1 mm ² ที่ระยะความยาว 70 เมตร.....	80
5.17 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 300 V 2-core PVC Insulated and Sheathed, Flat Type ขนาด 1 mm ² ที่ระยะความยาว 80 เมตร.....	80
5.18 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 300 V 2-core PVC Insulated and Sheathed, Flat Type ขนาด 1 mm ² ที่ระยะความยาว 90 เมตร.....	80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
5.19 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 300 V 2-core PVC Insulated and Sheathed. Flat Type ขนาด 1 mm ² ที่ระยะความยาว 100 เมตร.....	81
5.20 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 300 V 2-core PVC Insulated and Sheathed. Flat Type ขนาด 1 mm ² ที่ระยะความยาว 110 เมตร.....	81
5.21 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 300 V 2-core PVC Insulated and Sheathed. Flat Type ขนาด 1 mm ² ที่ระยะความยาว 120 เมตร.....	81
5.22 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 300 V 2-core PVC Insulated and Sheathed. Flat Type ขนาด 1 mm ² ที่ระยะความยาว 130 เมตร.....	82
5.23 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 300 V 2-core PVC Insulated and Sheathed. Flat Type ขนาด 1 mm ² ที่ระยะความยาว 140 เมตร.....	82
5.24 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 300 V 2-core PVC Insulated and Sheathed. Flat Type ขนาด 1 mm ² ที่ระยะความยาว 150 เมตร.....	82
5.25 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 300 V 2-core PVC Insulated and Sheathed. Flat Type ขนาด 1 mm ² ที่ระยะความยาว 160 เมตร.....	83
5.26 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 300 V 2-core PVC Insulated and Sheathed. Flat Type ขนาด 1 mm ² ที่ระยะความยาว 170 เมตร.....	83
5.27 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 300 V 2-core PVC Insulated and Sheathed. Flat Type ขนาด 1 mm ² ที่ระยะความยาว 180 เมตร.....	83
5.28 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 300 V 2-core PVC Insulated and Sheathed. Flat Type ขนาด 1 mm ² ที่ระยะความยาว 190 เมตร.....	84
5.29 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 300 V 2-core PVC Insulated and Sheathed. Flat Type ขนาด 1 mm ² ที่ระยะความยาว 200 เมตร.....	84
5.30 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 300 V 2-core PVC Insulated and Sheathed. Flat Type ขนาด 1 mm ² ที่ระยะความยาว 210 เมตร.....	84
5.31 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 300 V 2-core PVC Insulated and Sheathed. Flat Type ขนาด 1 mm ² ที่ระยะความยาว 220 เมตร.....	85
5.32 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 300 V 2-core PVC Insulated and Sheathed. Flat Type ขนาด 1 mm ² ที่ระยะความยาว 230 เมตร.....	85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
5.33 สัญลักษณ์คลื่นสะท้อนกลับของสาย 300 V 2-core PVC Insulated and Sheathed. Flat Type ขนาด 1 mm ² ที่ระยะความยาว 240 เมตร.....	85
5.34 สัญลักษณ์คลื่นสะท้อนกลับของสาย 300 V 2-core PVC Insulated and Sheathed. Flat Type ขนาด 1 mm ² ที่ระยะความยาว 250 เมตร.....	86
5.35 การทดสอบหาค่าเพอร์มิทิวิตีที่สัมผัสของสาย 0.6/1 kV. Copper Cable Twin Conductor Cross-linked Polyethylene Insulated and Polyethylene Sheathed ที่ระยะความยาวสายต่างๆ.....	87
5.36 สัญลักษณ์คลื่นสะท้อนกลับของสาย 0.6/1 kV. Copper Cable Twin Conductor XLPE Insulated and Polyethylene Sheathed ขนาด 6 mm ² ที่ระยะความยาว 10 เมตร.....	88
5.37 สัญลักษณ์คลื่นสะท้อนกลับของสาย 0.6/1 kV. Copper Cable Twin Conductor XLPE Insulated and Polyethylene Sheathed ขนาด 6 mm ² ที่ระยะความยาว 20 เมตร.....	88
5.38 สัญลักษณ์คลื่นสะท้อนกลับของสาย 0.6/1 kV. Copper Cable Twin Conductor XLPE Insulated and Polyethylene Sheathed ขนาด 6 mm ² ที่ระยะความยาว 30 เมตร.....	88
5.39 สัญลักษณ์คลื่นสะท้อนกลับของสาย 0.6/1 kV. Copper Cable Twin Conductor XLPE Insulated and Polyethylene Sheathed ขนาด 6 mm ² ที่ระยะความยาว 40 เมตร.....	89
5.40 สัญลักษณ์คลื่นสะท้อนกลับของสาย 0.6/1 kV. Copper Cable Twin Conductor XLPE Insulated and Polyethylene Sheathed ขนาด 6 mm ² ที่ระยะความยาว 50 เมตร.....	89
5.41 สัญลักษณ์คลื่นสะท้อนกลับของสาย 0.6/1 kV. Copper Cable Twin Conductor XLPE Insulated and Polyethylene Sheathed ขนาด 6 mm ² ที่ระยะความยาว 60 เมตร.....	89
5.42 สัญลักษณ์คลื่นสะท้อนกลับของสาย 0.6/1 kV. Copper Cable Twin Conductor XLPE Insulated and Polyethylene Sheathed ขนาด 6 mm ² ที่ระยะความยาว 70 เมตร.....	90
5.43 สัญลักษณ์คลื่นสะท้อนกลับของสาย 0.6/1 kV. Copper Cable Twin Conductor XLPE Insulated and Polyethylene Sheathed ขนาด 6 mm ² ที่ระยะความยาว 80 เมตร.....	90
5.44 สัญลักษณ์คลื่นสะท้อนกลับของสาย 0.6/1 kV. Copper Cable Twin Conductor XLPE Insulated and Polyethylene Sheathed ขนาด 6 mm ² ที่ระยะความยาว 90 เมตร.....	90
5.45 สัญลักษณ์คลื่นสะท้อนกลับของสาย 0.6/1 kV. Copper Cable Twin Conductor XLPE Insulated and Polyethylene Sheathed ขนาด 6 mm ² ที่ระยะความยาว 100 เมตร.....	91

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
5.46 สัญญานคลิ้นสะท้อนกลับของสาย 0.6/1 kV. Copper Cable Twin Conductor XLPE Insulated and Polyethylene Sheathed ขนาด 6 mm ² ที่ระยะความยาว 110 เมตร.....	91
5.47 สัญญานคลิ้นสะท้อนกลับของสาย 0.6/1 kV. Copper Cable Twin Conductor XLPE Insulated and Polyethylene Sheathed ขนาด 6 mm ² ที่ระยะความยาว 120 เมตร.....	91
5.48 สัญญานคลิ้นสะท้อนกลับของสาย 0.6/1 kV. Copper Cable Twin Conductor XLPE Insulated and Polyethylene Sheathed ขนาด 6 mm ² ที่ระยะความยาว 130 เมตร.....	92
5.49 สัญญานคลิ้นสะท้อนกลับของสาย 0.6/1 kV. Copper Cable Twin Conductor XLPE Insulated and Polyethylene Sheathed ขนาด 6 mm ² ที่ระยะความยาว 140 เมตร.....	92
5.50 สัญญานคลิ้นสะท้อนกลับของสาย 0.6/1 kV. Copper Cable Twin Conductor XLPE Insulated and Polyethylene Sheathed ขนาด 6 mm ² ที่ระยะความยาว 150 เมตร.....	92
5.51 สัญญานคลิ้นสะท้อนกลับของสาย 0.6/1 kV. Copper Cable Twin Conductor XLPE Insulated and Polyethylene Sheathed ขนาด 6 mm ² ที่ระยะความยาว 160 เมตร.....	93
5.52 สัญญานคลิ้นสะท้อนกลับของสาย 0.6/1 kV. Copper Cable Twin Conductor XLPE Insulated and Polyethylene Sheathed ขนาด 6 mm ² ที่ระยะความยาว 170 เมตร.....	93
5.53 สัญญานคลิ้นสะท้อนกลับของสาย 0.6/1 kV. Copper Cable Twin Conductor XLPE Insulated and Polyethylene Sheathed ขนาด 6 mm ² ที่ระยะความยาว 180 เมตร.....	93
5.54 สัญญานคลิ้นสะท้อนกลับของสาย 0.6/1 kV. Copper Cable Twin Conductor XLPE Insulated and Polyethylene Sheathed ขนาด 6 mm ² ที่ระยะความยาว 190 เมตร.....	94
5.55 สัญญานคลิ้นสะท้อนกลับของสาย 0.6/1 kV. Copper Cable Twin Conductor XLPE Insulated and Polyethylene Sheathed ขนาด 6 mm ² ที่ระยะความยาว 200 เมตร.....	94
5.56 สัญญานคลิ้นสะท้อนกลับของสาย 0.6/1 kV. Copper Cable Twin Conductor XLPE Insulated and Polyethylene Sheathed ขนาด 6 mm ² ที่ระยะความยาว 210 เมตร.....	94
5.57 สัญญานคลิ้นสะท้อนกลับของสาย 0.6/1 kV. Copper Cable Twin Conductor XLPE Insulated and Polyethylene Sheathed ขนาด 6 mm ² ที่ระยะความยาว 220 เมตร.....	95
5.58 สัญญานคลิ้นสะท้อนกลับของสาย 0.6/1 kV. Copper Cable Twin Conductor XLPE Insulated and Polyethylene Sheathed ขนาด 6 mm ² ที่ระยะความยาว 230 เมตร.....	95
5.59 สัญญานคลิ้นสะท้อนกลับของสาย 0.6/1 kV. Copper Cable Twin Conductor XLPE Insulated and Polyethylene Sheathed ขนาด 6 mm ² ที่ระยะความยาว 240 เมตร.....	95

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
5.60 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 0.6/1 kV. Copper Cable Twin Conductor XLPE Insulated and Polyethylene Sheathed ขนาด 6 mm ² ที่ระยะความยาว 250 เมตร.....	96
5.61 การทดสอบหาค่าเพอร์มิททีวิตีส์สัมพัทธ์ของสาย 12/20 kV. Underground Cable Copper Stranded Conductor XLPE Insulated and PE Sheathed ที่ระยะความยาวสายต่างๆ.....	97
5.62 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 12/20 kV. Underground Cable Copper Stranded Conductor XLPE Insulated and PE Sheathed ขนาด 35 mm ² ที่ระยะความยาว 10 เมตร.....	98
5.63 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 12/20 kV. Underground Cable Copper Stranded Conductor XLPE Insulated and PE Sheathed ขนาด 35 mm ² ที่ระยะความยาว 20 เมตร.....	98
5.64 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 12/20 kV. Underground Cable Copper Stranded Conductor XLPE Insulated and PE Sheathed ขนาด 35 mm ² ที่ระยะความยาว 30 เมตร.....	98
5.65 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 12/20 kV. Underground Cable Copper Stranded Conductor XLPE Insulated and PE Sheathed ขนาด 35 mm ² ที่ระยะความยาว 40 เมตร.....	99
5.66 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 12/20 kV. Underground Cable Copper Stranded Conductor XLPE Insulated and PE Sheathed ขนาด 35 mm ² ที่ระยะความยาว 50 เมตร.....	99
5.67 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 12/20 kV. Underground Cable Copper Stranded Conductor XLPE Insulated and PE Sheathed ขนาด 35 mm ² ที่ระยะความยาว 100 เมตร.....	99
5.68 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 12/20 kV. Underground Cable Copper Stranded Conductor XLPE Insulated and PE Sheathed ขนาด 35 mm ² ที่ระยะความยาว 150 เมตร.....	100
5.69 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 12/20 kV. Underground Cable Copper Stranded Conductor XLPE Insulated and PE Sheathed ขนาด 35 mm ² ที่ระยะความยาว 200 เมตร.....	100
5.70 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 12/20 kV. Underground Cable Copper Stranded Conductor XLPE Insulated and PE Sheathed ขนาด 35 mm ² ที่ระยะความยาว 250 เมตร.....	100
5.71 ค่าเพอร์มิททีวิตีส์สัมพัทธ์ที่ระยะความยาวสายต่างๆ ของสาย 300 V 2-core PVC Insulated and Sheathed. Flat Type.....	101
5.72 ค่าเพอร์มิททีวิตีส์สัมพัทธ์ที่ระยะความยาวสายต่างๆ ของสาย 0.6/1 kV. Copper Cable Twin Conductor XLPE Insulated and Polyethylene Sheathed.....	102
5.73 ค่าเพอร์มิททีวิตีส์สัมพัทธ์ที่ระยะความยาวต่างๆ ของสาย 12/20 kV. Underground Cable Copper Stranded Conductor XLPE Insulated and PE Sheathed.....	102

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
5.74 การทดสอบหาค่าเพอร์มิททิวิตีสัมพัทธ์ของสาย 300 V 2-core PVC Insulated and Sheathed. Flat Type ขนาดต่างๆ.....	103
5.75 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 300 V 2-core PVC Insulated and Sheathed. Flat Type ขนาด 1 mm ² ที่ระยะความยาว 100 เมตร.....	103
5.76 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 300 V 2-core PVC Insulated and Sheathed. Flat Type ขนาด 1.5 mm ² ที่ระยะความยาว 100 เมตร.....	104
5.77 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 300 V 2-core PVC Insulated and Sheathed. Flat Type ขนาด 2.5 mm ² ที่ระยะความยาว 100 เมตร.....	104
5.78 การทดสอบหาค่าเพอร์มิททิวิตีสัมพัทธ์ของสาย 0.6/1 kV. Copper Cable Twin Conductor Cross-linked Polyethylene Insulated and Polyethylene Sheathed ขนาดต่างๆ.....	105
5.79 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 0.6/1 kV. Copper Cable Twin Conductor Cross-linked Polyethylene Insulated and Polyethylene Sheathed ขนาด 6 mm ² ที่ระยะความยาว 100 เมตร.....	105
5.80 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 0.6/1 kV. Copper Cable Twin Conductor Cross-linked Polyethylene Insulated and Polyethylene Sheathed ขนาด 10 mm ² ที่ระยะความยาว 100 เมตร.....	106
5.81 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 0.6/1 kV. Copper Cable Twin Conductor Cross-linked Polyethylene Insulated and Polyethylene Sheathed ขนาด 16 mm ² ที่ระยะความยาว 100 เมตร.....	106
5.82 การทดสอบหาค่าเพอร์มิททิวิตีสัมพัทธ์ของสาย 12/20 kV. Underground Cable Copper Stranded Conductor XLPE Insulated and PE Sheathed ขนาดต่างๆ.....	107
5.83 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 12/20 kV. Underground Cable Copper Stranded Conductor XLPE Insulated and PE Sheathed ขนาด 35 mm ² ที่ระยะความยาว 50 เมตร.....	107
5.84 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 12/20 kV. Underground Cable Copper Stranded Conductor XLPE Insulated and PE Sheathed ขนาด 70 mm ² ที่ระยะความยาว 50 เมตร.....	108
5.85 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 12/20 kV. Underground Cable Copper Stranded Conductor XLPE Insulated and PE Sheathed ขนาด 400 mm ² ที่ระยะความยาว 50 เมตร.....	108

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
5.86 การทดสอบหาค่าเพอร์มิทวิตีวี่ดีส์ัมพัทธ์ของสาย 300 V 2-core PVC Insulated and Sheathed. Flat Type ขนาด 1 mm ² ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	109
5.87 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 300 V 2-core PVC Insulated and Sheathed. Flat Type ขนาด 1 mm ² ที่อุณหภูมิ 30 °C.....	109
5.88 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 300 V 2-core PVC Insulated and Sheathed. Flat Type ขนาด 1 mm ² ที่อุณหภูมิ 40 °C.....	110
5.89 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 300 V 2-core PVC Insulated and Sheathed. Flat Type ขนาด 1 mm ² ที่อุณหภูมิ 50 °C.....	110
5.90 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 300 V 2-core PVC Insulated and Sheathed. Flat Type ขนาด 1 mm ² ที่อุณหภูมิ 60 °C.....	110
5.91 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 300 V 2-core PVC Insulated and Sheathed. Flat Type ขนาด 1 mm ² ที่อุณหภูมิ 70 °C.....	111
5.92 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 300 V 2-core PVC Insulated and Sheathed. Flat Type ขนาด 1 mm ² ที่อุณหภูมิ 80 °C.....	111
5.93 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 300 V 2-core PVC Insulated and Sheathed. Flat Type ขนาด 1 mm ² ที่อุณหภูมิ 90 °C.....	111
5.94 การทดสอบหาค่าเพอร์มิทวิตีวี่ดีส์ัมพัทธ์ของสาย 0.6/1 kV. Copper Cable Twin Conductor Cross-linked Polyethylene Insulated and Polyethylene Sheathed ขนาด 6 mm ² ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	112
5.95 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 0.6/1 kV. Copper Cable Twin Conductor Cross-linked Polyethylene Insulated and Polyethylene Sheathed ขนาด 6 mm ² ที่อุณหภูมิ 30 °C.....	113
5.96 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 0.6/1 kV. Copper Cable Twin Conductor Cross-linked Polyethylene Insulated and Polyethylene Sheathed ขนาด 6 mm ² ที่อุณหภูมิ 40 °C.....	113
5.97 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 0.6/1 kV. Copper Cable Twin Conductor Cross-linked Polyethylene Insulated and Polyethylene Sheathed ขนาด 6 mm ² ที่อุณหภูมิ 50 °C.....	113
5.98 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 0.6/1 kV. Copper Cable Twin Conductor Cross-linked Polyethylene Insulated and Polyethylene Sheathed ขนาด 6 mm ² ที่อุณหภูมิ 60 °C.....	114

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
5.99 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 0.6/1 kV. Copper Cable Twin Conductor Cross-linked Polyethylene Insulated and Polyethylene Sheathed ขนาด 6 mm ² ที่อุณหภูมิ 70 °C.....	114
5.100 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 0.6/1 kV. Copper Cable Twin Conductor Cross-linked Polyethylene Insulated and Polyethylene Sheathed ขนาด 6 mm ² ที่อุณหภูมิ 75 °C.....	114
5.101 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 0.6/1 kV. Copper Cable Twin Conductor Cross-linked Polyethylene Insulated and Polyethylene Sheathed ขนาด 6 mm ² ที่อุณหภูมิ 80 °C.....	115
5.102 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 0.6/1 kV. Copper Cable Twin Conductor Cross-linked Polyethylene Insulated and Polyethylene Sheathed ขนาด 6 mm ² ที่อุณหภูมิ 90 °C.....	115
5.103 การทดสอบหาค่าเพอร์มิทิวิตีที่สัมพัทธ์ของสาย 12/20 kV. Underground Cable Copper Stranded Conductor XLPE Insulated and PE Sheathed ขนาด 35 mm ² ที่อุณหภูมิต่างๆ...	116
5.104 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 12/20 kV. Underground Cable Copper Stranded Conductor XLPE Insulated and PE Sheathed ขนาด 35 mm ² ที่อุณหภูมิ 30 °C.....	116
5.105 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 12/20 kV. Underground Cable Copper Stranded Conductor XLPE Insulated and PE Sheathed ขนาด 35 mm ² ที่อุณหภูมิ 40 °C.....	117
5.106 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 12/20 kV. Underground Cable Copper Stranded Conductor XLPE Insulated and PE Sheathed ขนาด 35 mm ² ที่อุณหภูมิ 50 °C.....	117
5.107 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 12/20 kV. Underground Cable Copper Stranded Conductor XLPE Insulated and PE Sheathed ขนาด 35 mm ² ที่อุณหภูมิ 60 °C.....	117
5.108 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 12/20 kV. Underground Cable Copper Stranded Conductor XLPE Insulated and PE Sheathed ขนาด 35 mm ² ที่อุณหภูมิ 70 °C.....	118
5.109 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 12/20 kV. Underground Cable Copper Stranded Conductor XLPE Insulated and PE Sheathed ขนาด 35 mm ² ที่อุณหภูมิ 80 °C.....	118
5.110 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 12/20 kV. Underground Cable Copper Stranded Conductor XLPE Insulated and PE Sheathed ขนาด 35 mm ² ที่อุณหภูมิ 90 °C.....	118
5.111 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 12/20 kV. Underground Cable Copper Stranded Conductor XLPE Insulated and PE Sheathed ขนาด 35 mm ² ที่อุณหภูมิ 95 °C.....	119

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
5.112 การทดสอบเทคนิคที่นำเสนอเทียบกับค่าที่คำนวณจากการทดสอบ โดยวิธีการหาค่าคาปาซิแตนซ์และพลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกตามมาตรฐาน.....	121
5.113 การเทียบค่าเพอร์มิทิวติวีตีสัมพัทธ์ที่อุณหภูมิต่างๆ ของสาย 300 V 2-core PVC Insulated and Sheathed, Flat Type.....	123
5.114 การเทียบค่าเพอร์มิทิวติวีตีสัมพัทธ์ที่อุณหภูมิต่างๆ ของสาย 0.6/1 kV. Copper Cable Twin Conductor XLPE Insulated and Polyethylene Sheathed.....	124
5.115 การเทียบค่าเพอร์มิทิวติวีตีสัมพัทธ์ที่อุณหภูมิต่างๆ ของสาย 12/20 kV. Underground Cable Copper Stranded Conductor XLPE Insulated and PE Sheathed.....	124
5.116 ช่วงเวลาคลื่นสะท้อนกลับที่ระยะความยาวสายต่างๆ ของฉนวน PVC และ XLPE.....	125
5.117 เปอร์เซนต์ความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัดเทียบกับการคำนวณ ช่วงเวลาการสะท้อนกลับจากออสซิลโลสโคปของสาย 300 V 2-core (PVC).....	125
5.118 เปอร์เซนต์ความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัดเทียบกับการคำนวณ ช่วงเวลาการสะท้อนกลับจากออสซิลโลสโคปของ สาย 0.6/1 kV. Copper Cable Twin Conductor (XLPE).....	126
5.119 เปอร์เซนต์ความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัดเทียบกับการคำนวณ ช่วงเวลาการสะท้อนกลับจากออสซิลโลสโคปของ สาย 12/20 kV. Underground Cable (XLPE).....	126
5.120 เปอร์เซนต์ความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัดเทียบกับค่าจากผลการทดสอบ ตามมาตรฐานที่อุณหภูมิต่างๆ ของสาย 300 V 2-core (PVC).....	127
5.121 เปอร์เซนต์ความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัดเทียบกับค่าจากผลการทดสอบตามมาตรฐาน ที่อุณหภูมิต่างๆ ของสาย 0.6/1 kV. Copper Cable Twin Conductor (XLPE).....	127
5.122 เปอร์เซนต์ความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัดเทียบกับค่าจากผลการทดสอบ ตามมาตรฐานที่อุณหภูมิต่างๆ ของสาย 12/20 kV. Underground Cable (XLPE).....	128
ผ.1 การเปลี่ยนแปลงของค่าเพอร์มิทิวติวีตีสัมพัทธ์ (ϵ_r) ของฉนวน Polyvinyl chloride (PVC) กับอุณหภูมิและความถี่.....	172

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

พลังงานไฟฟ้าเป็นสิ่งจำเป็นและมีบทบาทสำคัญในการดำรงชีวิตของมนุษย์ เนื่องจากเทคโนโลยีทางด้านอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าได้ถูกพัฒนาไปอย่างรวดเร็วและแพร่ขยายไปทั่วประเทศ ทำให้มีความต้องการของการใช้พลังงานเป็นจำนวนมาก ดังนั้นในส่วนของระบบการผลิตไฟฟ้าให้ได้พลังงานไฟฟ้าที่เพียงพอต่อผู้บริโภคนับว่าเป็นส่วนสำคัญ ซึ่งจะต้องมีการตรวจสอบและดูแลรักษาเป็นอย่างดี เพื่อรักษาความมีเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าและปัญหาต่างๆ ที่จะเกิดขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเรื่องของความปลอดภัย ดังนั้นฉนวนไฟฟ้าจึงมีบทบาทสำคัญที่จะต้องตรวจสอบคุณภาพของฉนวนก่อนนำไปใช้งานและทดสอบสภาพหลังการใช้งานตามสถานะต่างๆ เช่น อุณหภูมิที่เกิดขึ้นเนื่องจากความร้อนตามธรรมชาติหรือจากสภาวะการใช้งานในลักษณะต่างๆ ซึ่งคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่สำคัญอันหนึ่งที่จะเป็นตัวบอกระดับคุณภาพของฉนวนที่ใช้ในการฉนวนสายเคเบิลก็คือค่าเพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์ (Relative Permittivity) หรือค่าคงตัวไดอิเล็กตริก ซึ่งค่าของตัวแปรนี้จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติเฉพาะของสารวัสดุแต่ละชนิด และมีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากปัจจัยต่างๆ เช่น อุณหภูมิ ความชื้น หรือจากปัจจัยอื่นๆ ซึ่งจะทำให้ฉนวนไม่สามารถรักษาสภาพของการเป็นฉนวนและเสื่อมสภาพของการเป็นฉนวนลง จนไม่สามารถทนต่อระดับแรงดันที่ใช้งานได้และจะเกิดการเบรกดาวน์ในที่สุด

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันการหาค่าเพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์ (ϵ_r) ของฉนวนสายเคเบิลในระบบไฟฟ้ากำลัง โดยทั่วไปจะคำนวณจากค่าคาปาซิแตนซ์ โดยวิธีการวัดค่าคาปาซิแตนซ์และค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียค่าไดอิเล็กตริก (Capacitance and Dissipation factor ($\tan\delta$)) ซึ่งเป็นหัวข้อหนึ่งของการทดสอบฉนวนของภาคอุตสาหกรรมที่จะต้องทำการตรวจวัด ซึ่งจะทำการทดสอบอยู่ 2 มาตรฐานคือมาตรฐาน ICEA S-66-524 และมาตรฐาน IEC 60502-2 [3-4] โดยจะทำการทดสอบตามมาตรฐานและหัวข้อใดนั้นก็ขึ้นอยู่กับประเภทของสายเคเบิลนั้นๆ ในการทดสอบหัวข้อต่างๆ ของแต่ละมาตรฐานจะมีขั้นตอนและวิธีการทดสอบที่แตกต่างกันไป ซึ่งต้องอาศัยอุปกรณ์และเครื่องมือวัดต่างๆ ก่อนข้างมากในการทดสอบ จึงทำให้เกิดความยุ่งยากและต้องอาศัยผู้ที่มีประสบการณ์ในการทดสอบเพื่อควบคุมการทดสอบให้เป็นไปตามมาตรฐาน โดยในการทดสอบส่วนใหญ่จะทำการทดสอบเฉพาะในห้องปฏิบัติการเท่านั้น ซึ่งปัญหาที่เกิดขึ้นในภาคอุตสาหกรรมพบว่า อุปกรณ์และสถานที่ในการทดสอบไม่มีความเหมาะสมในบางหัวข้อของการทดสอบ อีกทั้งยังพบปัญหาในเรื่องเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของระบบกราวด์และและสัญญาณรบกวนจากภายนอก อันเนื่องมาจากเครื่องจักรที่กำลังทำงานอยู่ภายในโรงงาน ซึ่งปัญหาต่างๆ เหล่านี้จะมีผลกระทบต่อเครื่องมือวัดจึงทำให้ผลการทดสอบได้ค่าที่ไม่ถูกต้อง รวมทั้งผู้ทดสอบนั้นยังขาดความเข้าใจเกี่ยวกับคุณสมบัติเฉพาะของสารวัสดุแต่ละชนิดของฉนวนสายเคเบิลที่นำมาทดสอบว่าค่าที่ทำการทดสอบอยู่นั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยอะไรบ้าง จึงทำให้ไม่ทราบว่าค่าที่ได้นั้นมีความถูกต้องหรือไม่ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาดังปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าเพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์ของฉนวนสายเคเบิล รวมทั้งการศึกษาทฤษฎีของคลื่นเดินทางและการคลื่นสะท้อน เพื่อนำมาออกแบบและจัดสร้างเครื่องมือวัดค่าเพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์ของฉนวนสายเคเบิล (โดยใช้แรงดันต่ำ) ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อแนวทางการทดสอบให้กับภาคอุตสาหกรรมต่อไปในอนาคต

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

จุดมุ่งหมายในการทำวิทยานิพนธ์นี้ เป็นการศึกษาหาค่าเพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์ของฉนวนสายเคเบิลและการศึกษาคลื่นเดินทางเพื่อนำมาประยุกต์ใช้ โดยมีวัตถุประสงค์หลักๆ ดังต่อไปนี้

1. เพื่อศึกษารูปแบบและวิธีการทดสอบหาค่าค่าพาสซีแต้นซ์และค่าแพลเตอร์พลังงานสูญเสียค่าไดอิเล็กตริกตามมาตรฐาน ICEA S-66-524 และมาตรฐาน IEC 60502-2 รวมทั้งศึกษาปัญหาและเทคนิคต่างๆ และการควบคุมการทดสอบให้เป็นไปตามมาตรฐาน
2. เพื่อศึกษาถึงปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อค่าเพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์ของฉนวนสายเคเบิล
3. เพื่อประยุกต์ใช้ทฤษฎีของคลื่นเดินทางในการหาค่า ϵ_r รวมทั้งการออกแบบและจัดสร้างเป็นเครื่องมือวัด

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ตั้งสมมติฐานของการศึกษาโดยจะแบ่งออกเป็น 3 หัวข้อ คือ

1. การศึกษาค่าเพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์ของฉนวนสายเคเบิล ได้ทำการทดสอบภายใต้สภาวะการทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60502-2, ICEA S 66-524 และข้อกำหนดของ MEA. โดยมีการควบคุมเงื่อนไขและอุปกรณ์ในการทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน
2. การทดสอบผลทางด้านโครงสร้าง ฟิสิกส์ และการเร่งอายุการใช้งานในลักษณะต่างๆ เพื่อใช้เป็นแนวทางในการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าเพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์ของฉนวนสายเคเบิล
3. ทฤษฎีของคลื่นเดินทางและการเกิดคลื่นสะท้อน สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการหาค่าเพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์ของฉนวนสายเคเบิลได้ โดยอาศัยการคำนวณจากช่วงเวลาการสะท้อนกลับของคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

การหาค่าเพอร์มิททิวิตีสัมพัทธ์ในงานวิจัยนี้ จะใช้วิธีการของคลื่นเดินทางโดยอาศัยหลักการของคลื่นเดินทางและการเกิดคลื่นสะท้อนโดยความเร็วของคลื่นเคลื่อนที่ในอากาศจะมีค่าโดยประมาณเท่ากับความเร็วแสงคือ $v_s = 3 \times 10^8$ m/s เมื่อให้ v เป็นความเร็วของคลื่นเคลื่อนที่ในสายเคเบิลที่มีตัวนำหุ้มด้วยฉนวนที่มีค่าเพอร์มิททิวิตีสัมพัทธ์ (ϵ_r) จะได้ความเร็วคลื่นเคลื่อนที่ในสายเคเบิล ดังนั้นเมื่อคลื่นเคลื่อนที่ในสายเคเบิลที่มีค่า ϵ_r ของวัสดุฉนวนที่แตกต่างกันก็จะมีความเร็วในการเคลื่อนที่แตกต่างกันด้วย ซึ่งถ้าเราทราบระยะความยาวของสายที่นำมาทดสอบก็จะสามารถคำนวณหาค่าเพอร์มิททิวิตีสัมพัทธ์ได้จากการวัดช่วงเวลาระหว่างคลื่นเดินทางไปและกลับโดยการส่งสัญญาณพัลส์เข้าไปในสายเคเบิลที่ทดสอบ ฉะนั้นถ้าเวลา t ที่ได้จะเป็นตัวกำหนดค่า ϵ_r ของวัสดุฉนวนสายเคเบิลว่ามีค่าเท่าใด

1.5 ขอบเขตการวิจัย

ในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้แบ่งขอบเขตของงานวิจัยเป็นส่วนต่างๆ ดังนี้

1. ศึกษาและทำการทดสอบหาค่าเพอร์มิททิวิตีสัมพัทธ์ (ϵ_r) ตามมาตรฐาน IEC 60502-2 ICEA S-66-524 และตามข้อกำหนดของ MEA. เพื่อใช้ในการศึกษาถึงผลการเปลี่ยนแปลงค่าเพอร์มิททิวิตีสัมพัทธ์ (ϵ_r) ของฉนวน PVC และ XLPE รวมทั้งผลของโครงสร้างสายเคเบิล เช่น ขนาด ความยาว และผลจากปัจจัยภายนอก เช่น ผลของอุณหภูมิหรือการเร่งอายุการใช้งานของฉนวนในลักษณะต่างๆ
2. ศึกษาการหาค่าเพอร์มิททิวิตีสัมพัทธ์ของฉนวนสายเคเบิลโดยใช้เทคนิคของคลื่นเดินทาง รวมทั้งออกแบบและจัดสร้างเป็นเครื่องวัด โดยสามารถหาค่าเพอร์มิททิวิตีสัมพัทธ์ (ϵ_r) ของฉนวน PVC และ XLPE ของตัวอย่างสายเคเบิลที่ระยะความยาวสายในช่วง 10 – 250 เมตร ของสายสองตัวนำและสายเคเบิลได้ดินพิกัดไม่เกิน 24 kV ขนาด 1-400 ตารางมิลลิเมตร
3. โดยในผลของการทดสอบจะทำการเปรียบเทียบกับตารางแสดงค่าเพอร์มิททิวิตีสัมพัทธ์ของวัสดุโพลีเมอร์และผลจากการคำนวณค่าคาปาซิแตนซ์ที่ได้จากการทดสอบ โดยวิธีการวัดค่าคาปาซิแตนซ์และแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียค่าไดอิเล็กตริกตามมาตรฐาน IEC 60502-2 และ ICEA S-66-524 ของตัวอย่างสายเคเบิลนั้นๆ โดยค่าที่วัดได้มีความคลาดเคลื่อนน้อย

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

สำหรับขั้นตอนของการศึกษางานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีดังนี้

1. ศึกษาทฤษฎีและพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย โดยมุ่งเน้นในส่วนของฉนวนสายเคเบิลและความสำคัญของค่าเพอร์มิททิวิตีสัมพัทธ์
2. ศึกษามาตรฐานการทดสอบของฉนวนสายเคเบิลตามมาตรฐาน IEC 60502-2 และ ICEA S-66-524 รวมทั้งข้อกำหนดของ MEA. ทั้งด้านโครงสร้าง ฟิสิกส์ และไฟฟ้า โดยมุ่งเน้นในหัวข้อการทดสอบหาค่าคาปาซิแตนซ์และค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไปไดอิเล็กตริก เพื่อนำมาคำนวณหาค่าเพอร์มิททิวิตีสัมพัทธ์ (ϵ_r)
3. ศึกษาปัญหา แนวทางการแก้ไขและเทคนิคต่างๆ เพื่อควบคุมการทดสอบให้มีความถูกต้องและน่าเชื่อถือ
4. ศึกษาทฤษฎีของคลื่นเดินทางและการคลื่นสะท้อน รวมทั้งวงจรส่วนต่างๆ เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบและสร้างเครื่องมือวัดค่าเพอร์มิททิวิตีสัมพัทธ์
5. ศึกษาการเชื่อมต่ออุปกรณ์ระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์ กับอุปกรณ์ภายนอก

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

1. ทราบถึงมาตรฐาน ขั้นตอนและวิธีการทดสอบของฉนวนสายเคเบิลในปัจจุบัน
2. ทราบถึงปัญหา และเทคนิคต่างๆ ในการทดสอบและแนวทางการแก้ไข
3. พัฒนาและสร้างอุปกรณ์การตรวจวัด ให้มีราคาถูก และสะดวกต่อการนำไปใช้งาน และสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางการทดสอบให้ภาคอุตสาหกรรม
4. ข้อมูลต่างๆ คาดว่านำมาใช้เป็นแนวทางในการศึกษาอายุการใช้งานของฉนวนสายเคเบิลต่อไปในอนาคต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎี

2.1 บทนำ

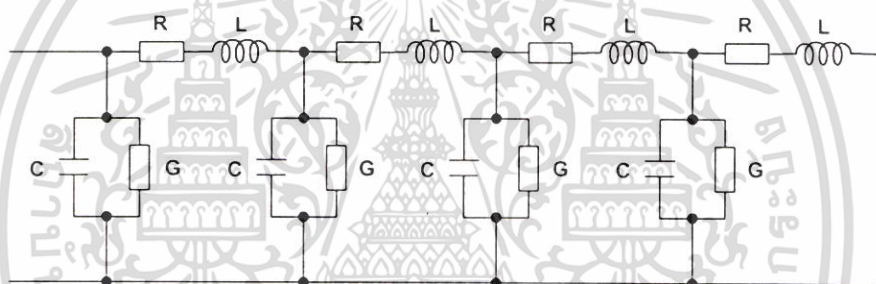
การฉนวนเคเบิลเป็นสิ่งจำเป็นของระบบไฟฟ้า โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับไฟฟ้าแรงสูง เพื่อป้องกันมิให้เกิดอันตรายแก่สิ่งมีชีวิตที่เข้าไปใกล้หรือสัมผัสเข้า หรือป้องกันมิให้เกิดการลัดวงจรระหว่างสายไฟกับสายไฟ หรือสายไฟกับดิน การออกแบบการฉนวนให้ดีและประหยัดจำเป็นต้องใช้ความรู้เทคนิคการฉนวน ซึ่งเกี่ยวข้องกับแรงดัน ความเครียดสนามไฟฟ้าและลักษณะคุณสมบัติของฉนวน รวมทั้งพิกัดความคงทนของฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้า ความคงทนของการฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้า หมายถึงค่าความเครียดสนามไฟฟ้า (Electric field stress) สูงสุดที่ฉนวนนั้นสามารถทนอยู่ได้ โดยไม่เกิดความเสียหายหรือเกิดเบรกดาวน์ หรือทำให้การฉนวนเสื่อมสภาพซึ่งมีหน่วยเป็น V/cm หรือ kV/cm คือ มีหน่วยเป็นค่าแรงดันต่อหน่วยความหนาของฉนวนหรือระยะห่างของอิเล็กโตรด ความเครียดสนามไฟฟ้านั้นเป็นตัวกำหนดค่าความคงทนของการฉนวนทางไฟฟ้า ซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่าเพอร์มิททิวิตีสัมพัทธ์หรือค่าคงตัวไดอิเล็กตริก [5] ดังนั้นจึงต้องมีการตรวจวัดและการศึกษาข้อมูลทางไดอิเล็กตริกที่ถูกต้อง เพื่อสามารถควบคุมระบบการฉนวนให้มีความน่าเชื่อถือ และหลีกเลี่ยงค่าใช้จ่ายที่เกิดจากการเบรกดาวน์ การซ่อมแซม และควมมีเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า

2.2 คุณสมบัติเบื้องต้นของสายส่งไฟฟ้า

ลักษณะทางอิมพีแดนซ์ของสายส่งโดยทั่วไป (Characteristic Impedance) เป็นคุณสมบัติเฉพาะของสายที่ผลิตจากโรงงาน ความแตกต่างของค่าอิมพีแดนซ์ ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของสาย เช่น โลหะที่นำมาเป็นตัวนำ ระยะห่างระหว่างตัวนำทั้งสองหรือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ แต่ค่าอิมพีแดนซ์จะเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อความถี่ที่ใช้งานเปลี่ยนแปลง และค่าอิมพีแดนซ์จะคงที่ตลอดความยาวของสายส่งดังรูปที่ 2.1 เป็นจำนวนมากติดต่อกันไป หมายความว่าสายไฟฟ้าคู่นี้ถูกแบ่งย่อยออกเป็นช่วงสั้นๆ ซึ่งจะมีตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำของเส้นนั้นต่ออนุกรมกันอยู่ และระหว่างแต่ละเส้นที่อยู่ตรงข้ามกันของคู่สั้นๆ นั้น จะมีผลทำให้เกิดเป็นตัวเก็บประจุ ซึ่งจะต่อขนานกับตัวนำไฟฟ้าแต่ละคู่ต่อเรียงกันดังรูปที่ 2.1 นั่นคือพารามิเตอร์แบบกระจาย (distributed parameter) ของสายส่งไฟฟ้า ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ (parameter) ที่ใช้บอกถึงคุณสมบัติเชิงไฟฟ้าในด้านต่างๆ ของสายส่งไฟฟ้า

จะเห็นว่าคุณสมบัติเฉพาะตัวของตัวนำต่างๆ มีส่วนเข้ามาเกี่ยวข้องกับเรื่องของการสายส่ง เมื่อตัวนำไฟฟ้าใดๆ ก็ตามที่มีกระแสไหลจะมีเส้นแรงแม่เหล็กสถิตย์อยู่รอบๆ ตัวนำนั้นๆ และถ้ากระแสมีการเปลี่ยนแปลงจะทำให้เส้นแรงแม่เหล็กนี้เปลี่ยนแปลงด้วย และผลนี้ทำให้เกิด Back e.m.f. ขึ้น และเป็นคุณสมบัติของอินดักแตนซ์ นั่นคือสายส่งเส้นหนึ่งย่อมมีอินดักแตนซ์และคาปาซิแตนซ์ ประกอบด้วยตัวนำสองอันวางแยกจากกันโดยมีฉนวนกัน ดังนั้นสายส่งกำลังจึงอยู่ในคำจำกัดความของคาปาซิเตอร์ และภายในตัวนำก็มีความต้านทานประกอบด้วย ซึ่งค่าความต้านทานขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุนั้นๆ ความยาว และพื้นที่หน้าตัดของสายส่งด้วย

โครงสร้างของตัวนำ เมื่อวิเคราะห์ในทางไฟฟ้า พบว่ามีสัมประสิทธิ์ 2 ค่า ด้วยกัน [เราเรียกว่า สัมประสิทธิ์ขั้นต้น (primary coefficient)] ถ้านำมาเขียนวงจรสมมูลของสายนำสัญญาณว่า แทนด้วยค่าทางไฟฟ้า แล้วทั้ง 2 ค่า จะมีกระจายตลอดตามสายไป โดยค่า R และ L ต่ออนุกรมกัน และค่า C และ G ต่อขนานกัน[6]



รูปที่ 2.1 วงจรสมมูลสายส่งไฟฟ้า

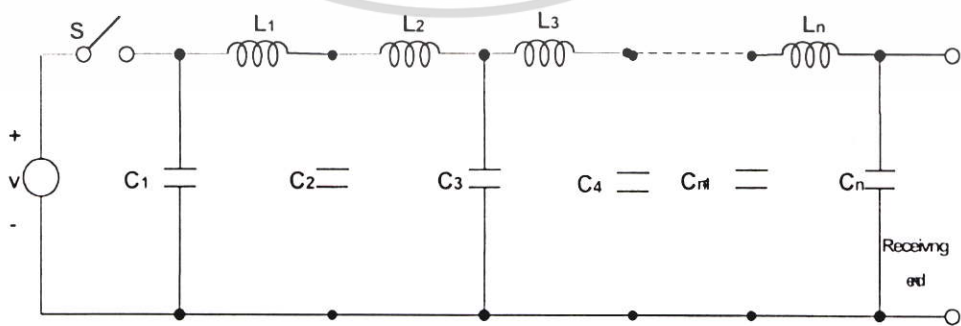
1. รีซิสแตนซ์ หรือความต้านทาน (Resistance) แทนด้วยสัญลักษณ์ R เป็นค่าความต้านทานของตัวนำ และมักใช้เป็นการรวมของทั้งสองเส้น จะขึ้นอยู่กับชนิดและขนาดของตัวนำ อุณหภูมิขณะใช้งาน และความถี่ของแรงดันไฟฟ้าเป็นสำคัญ
2. อินดักแตนซ์ หรือความเหนี่ยวนำไฟฟ้า (Inductance) แทนด้วยสัญลักษณ์ L มีค่าขึ้นอยู่กับพื้นที่ตัดขวางของตัวนำ และสามารถคำนวณหาจากแรงดันไฟฟ้าที่เหนี่ยวนำอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็ก ซึ่งเป็นผลมาจากอัตราการเปลี่ยนแปลงรูปคลื่นของกระแสไฟฟ้า
3. คาปาซิแตนซ์ หรือความจุไฟฟ้า (Capacitance) แทนด้วยสัญลักษณ์ C เป็นของทั้งฉนวนและตัวนำ
4. คอนดักแตนซ์ หรือค่าความนำไฟฟ้า (Conductance) แทนด้วยสัญลักษณ์ G เป็นค่าความต้านทานของฉนวนเนื่องจากมีกระแสบางส่วนรั่วไหลระหว่างตัวนำสองเส้น หรือเนื่องมาจากการเสื่อมสภาพของฉนวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 ทฤษฎีของคลื่นเดินทาง (Travelling wave theory)

ในการศึกษาปัญหาทรานเซียนบนสายส่งในเทอมของคลื่นเดินทางสายส่งสามารถแสดงการเพิ่มขึ้นของแต่ละส่วนดังรูป 2.2 คือแสดงเป็นสายส่ง 2 เส้นโดยเส้นหนึ่งเป็นเฟสและเส้นหนึ่งเป็นนิวตรอล โดยมีพารามิเตอร์ L เป็นตัวเหนี่ยวนำและ C เป็นตัวเก็บประจุต่อความยาวสายเคเบิลตามลำดับ ในการวิเคราะห์เพื่อให้เข้าใจโดยง่ายโดยสมมติว่าเป็นสายส่งที่มีความสูญเสียต่ำ นั่นคือค่าความต้านทาน R และค่าความนำไฟฟ้า G เป็นศูนย์

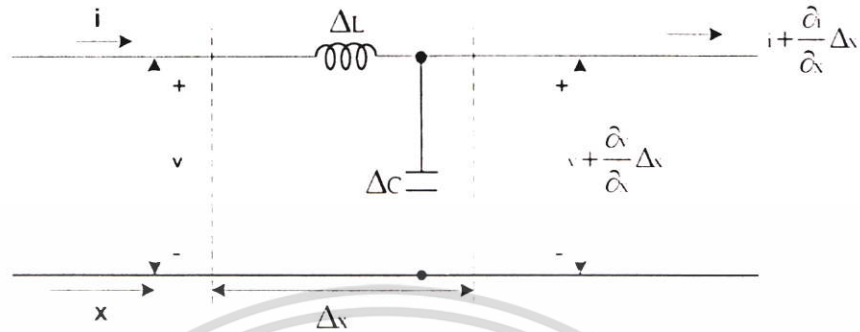
การรบกวนทั้งหมดบนสายส่งสามารถแสดงโดยการปิดเปิดสวิตช์ S ดังแสดงในรูปที่ 2.2 สำหรับตัวอย่างเมื่อสายส่งถูกต่อกับแรงดันในทันทีทันทีที่สายส่งจะยังไม่ได้รับพลังงานที่สมบูรณ์ในทันที ถ้าแรงดัน V ที่จ่ายถูกส่งไปยังปลายสายส่งโดยการปิดสวิตช์แรงดันจะยังไม่ปรากฏโดยจับพลันที่ปลายด้านรับของสายส่ง เมื่อสวิตช์ S ถูกปิดลงตัวเก็บประจุตัวแรกจะทำการอัดประจุทันทีเมื่อได้รับแรงดันที่แหล่งจ่าย อย่างไรก็ตามเพราะตัวเหนี่ยวนำตัวแรกที่ต่ออนุกรมอยู่จะกระทำตัวเหมือนการเปิดวงจร (open circuit) ดังนั้นตัวเก็บประจุตัวที่สองจะยังไม่มีการตอบสนองในทันทีแต่จะมีการหน่วงเวลา ซึ่งจะเหมือนกับตัวเก็บประจุตัวที่สามที่จะมีการหน่วงเวลามากกว่าจากตัวเหนี่ยวนำที่สองที่ต่ออยู่ เพราะฉะนั้นถ้าไกลออกไปจากจุดส่งถึงปลายของสายส่งการหน่วงเวลาก็จะยิ่งมากขึ้น เช่นนี้จะเป็นการค่อยๆ สะสมแรงดัน โดยสามารถพิจารณาได้จากตัวนำบนสายส่งคลื่นแรงดันจะเดินทางจากปลายจุดหนึ่งไปยังปลายอีกจุดหนึ่งและตัวเก็บประจุจะค่อยๆ อัดประจุเนื่องจากความสัมพันธ์ของคลื่นกระแส เป็นธรรมชาติแรงดันที่ถูกจ่ายในรูปร่างของเสิร์จ (Surge) จะเริ่มต้นจากศูนย์และกลับคืนสู่ศูนย์อีกครั้ง ซึ่งจะสามารถมองเห็นแรงดันบนระหว่างกลางตัวเก็บประจุที่มีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุดและการกลับคืนสู่ศูนย์อีกครั้ง เพราะฉะนั้นการแพร่ของเสิร์จที่รบกวนบนสายส่งจะอยู่ในรูปร่างของคลื่น ด้วยเหตุนี้การแพร่ของเสิร์จในเงื่อนไขของแรงดันและกระแสจากจุดส่งไปยังปลายระหว่างสายส่งนี้เรียกว่า คลื่นเดินทาง เพราะฉะนั้นแรงดันและกระแสจึงเป็นฟังก์ชันของ x และ t



รูปที่ 2.2 ตัวอย่างการเพิ่มขึ้นของแต่ละส่วนบนสายส่ง ณ ใดก็ได้ ในเทอมของคลื่นเดินทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการพิสูจน์ความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสสำหรับสายส่งที่มีระยะความยาวด้วยการกระจายแบบคงที่ ซึ่งจะทำการวัดระยะทาง x ตามความยาวของสายส่งจากปลายด้านส่งไปยังส่วนย่อยของความยาวที่แตกต่างกัน Δx ดังรูปที่ 2.3 [7-8]



รูปที่ 2.3 ตัวอย่างการจำลองส่วนย่อยบนสายส่ง ณ เฟสใดๆ (โดย r และ i เป็นฟังก์ชันของ x และ t)

จากรูปที่ 2.3 แรงดัน v และกระแส i เป็นฟังก์ชันของ x และ t ดังนั้นต้องใช้การหาอนุพันธ์บางส่วน (partial derivative) โดยแรงดันที่ตกคร่อมส่วนย่อยของความยาวคือ

$$i(R\Delta x) + (L\Delta x) \frac{\partial i}{\partial t}$$

และสามารถเขียนได้เป็น

$$\frac{\partial v}{\partial x} \Delta x = -(Ri + L \frac{\partial i}{\partial t}) \Delta x \quad 2.1$$

เครื่องหมายลบมีความจำเป็นเพราะค่าของ $v + (\partial v/\partial x) \Delta x$ ต้องมีค่าน้อยกว่า v สำหรับค่าบวกของ i และ $\partial i/\partial t$ ในลักษณะเดียวกันจะได้ว่า

$$\frac{\partial i}{\partial x} \Delta x = -(Gi + C \frac{\partial v}{\partial t}) \Delta x \quad 2.2$$

เมื่อหารสมการที่ 2.1 และ 2.2 ด้วย Δx โดยสมมติว่าเป็นสายส่งที่ไม่มี ความสูญเสียจึงกำหนดให้ค่า R และ G มีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนั้นสมการที่ 2.1 และ 2.2 จึงมีค่าเป็น

$$\frac{\partial v}{\partial x} = -L \frac{\partial i}{\partial t}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ

$$\frac{\partial}{\partial x} = -C \frac{\partial}{\partial t} \quad 2.4$$

โดยสามารถกำจัดเทอมของ i ด้วยการหาอนุพันธ์บางส่วนของทั้งสองเทอมในสมการที่ 2.3 ด้วยตัวแปร x และสมการที่ 2.4 ด้วยตัวแปร t

$$\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = -L \frac{\partial^2 i}{\partial x \partial t} \quad 2.5$$

$$\frac{\partial^2 i}{\partial x \partial t} = -C \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \quad 2.6$$

จากขั้นตอนนี้จะได้เทอมของ $\partial^2 i / \partial x \partial t$ ซึ่งมีอยู่ทั้ง 2 ข้างของสมการจะถูกกำจัดออก ดังนั้นจะได้สมการใหม่เป็น

$$1 - LC \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \quad 2.7$$

ซึ่งสมการที่ 2.7 นั้นเรียกว่า “สมการคลื่นเดินทางของสายส่งที่ไม่มีการสูญเสีย” ซึ่งผลลัพธ์ของสมการจะเป็นฟังก์ชันของ $x - vt$ ซึ่งจะแสดงในเทอมของแรงดันดังเทอมต่อไปนี้

$$v = f(x - vt) \quad 2.8$$

ในฟังก์ชันนี้ไม่ได้มีการอธิบายความหมายแต่ต้องมีค่าเดียวโดยที่ค่าคงที่ v ต้องมีหน่วยเป็นเมตรต่อวินาที ถ้า x มีหน่วยเป็นเมตรและเวลา t มีหน่วยเป็นวินาที ซึ่งเราสามารถพิสูจน์คำตอบของสมการนี้ได้โดยแทนที่อนุพันธ์บางส่วนลำดับสองของ v ลงในสมการที่ 2.7 ในการหาค่า v ในขั้นแรกนั้นจะต้องทำการเปลี่ยนค่าตัวแปรซึ่งจะได้

$$u = x - vt \quad 2.9$$

และเขียนได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$v(x,t) = f(u) \quad 2.10$$

ดังนั้น

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} &= \frac{\partial f(u)}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial t} \\ &= -v \frac{\partial f(u)}{\partial u} \end{aligned} \quad 2.11$$

และ

$$\frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = v^2 \frac{\partial^2 f(u)}{\partial u^2} \quad 2.12$$

ในลักษณะเดียวกันจะได้ว่า

$$\frac{\partial^3 v}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 f(u)}{\partial u^2} \quad 2.13$$

แทนค่าอนุพันธ์บางส่วนอันดับ 2 ของ v ในสมการที่ 2.7 ซึ่งจะได้

$$\frac{1}{LC} \frac{\partial^2 v}{\partial u^2} = v^2 \frac{\partial^2 f(u)}{\partial u^2} \quad 2.14$$

และเมื่อพิจารณาจะพบว่าสมการที่ 2.8 เป็นคำตอบของสมการที่ 2.7 ถ้า

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad 2.15$$

เทอมของแรงดันในสมการที่ 2.8 คือคลื่นเดินทางในทิศทาง x บวก จากรูปที่ 2.4 แสดงฟังก์ชันของ $(x - vt)$ ซึ่งเป็นลักษณะของคลื่นเคลื่อนที่เดินทางไปตามความยาวของสายส่งซึ่งเกิดจากฟ้าผ่า โดยฟังก์ชันนี้จะแสดงค่า 2 ค่าของเวลาคือ t_1 และ t_2 ซึ่ง $t_2 > t_1$ และพบว่ารูปร่างของคลื่นเดินทางนี้จะยังคงรูปร่างเหมือนเดิมตามสมการที่ 2.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$x - vt = \text{a constant} \quad 2.16$$

ซึ่งจะเป็นไปตามสมการที่ 2.17 คือ

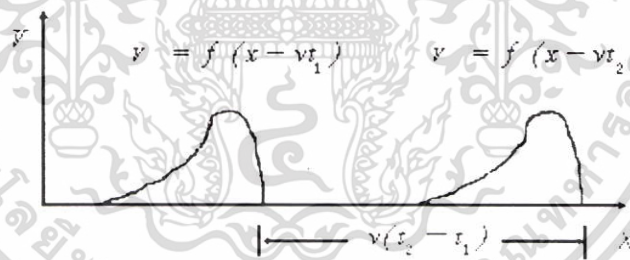
$$\frac{dx}{dt} = v = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad \text{m/s} \quad 2.17$$

เมื่อ L และ C มีหน่วยเป็น เฮนรี่ต่อเมตร (H/m) และฟารัดต่อเมตร (F/m) ตามลำดับดังนั้นคลื่นของแรงดันที่เดินทางในทิศทางบวก x ด้วยความเร็ว v

ฟังก์ชันของ $(x + vt)$ สามารถแสดงเป็นคำตอบของสมการที่ 2.8 และด้วยเหตุผลเดียวกันนี้สามารถแปลงคลื่นเดินทางในทิศทางลบ x โดยมีสมการคำตอบเป็น

$$v = f_1(x - vt) + f_2(x + vt) \quad 2.18$$

ซึ่งสมการคำตอบนี้เป็นสิ่งที่เกิดขึ้นพร้อมกันทั้งส่วนที่เดินทางไปด้านหน้า และส่วนที่เดินทางไปด้านหลังของสายส่ง โดยกำหนดค่าเริ่มต้นและค่าขอบเขตเฉพาะสำหรับส่วนประกอบแต่ละส่วนไว้



รูปที่ 2.4 คลื่นของแรงดันซึ่งเป็นฟังก์ชันของ $x - vt$ คือที่เวลา t มีค่าเท่ากับ t_1 และ t_2

ถ้าเราแสดงคลื่นที่ไปข้างหน้า (Forward travelling wave) ซึ่งเรียกว่า คลื่นอินซิเดนซ์ (incident wave) ดังสมการที่ 2.19

$$v^+ = f_1(x - vt) \quad 2.19$$

คลื่นที่เกิดขึ้นนี้เป็นผลจากการเคลื่อนที่ของประจุและสามารถนิยามได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$i^+ = \frac{1}{\sqrt{LC}} f_1(x-vt) \quad 2.20$$

ซึ่งสามารถพิสูจน์ได้โดยแทนค่าของแรงดันและกระแสในสมการที่ 2.3 โดยให้ v เท่ากับ $\frac{1}{\sqrt{LC}}$ ในลักษณะเดียวกันคลื่นที่เคลื่อนที่ไปข้างหลัง (backward travelling wave) ของแรงดันจะมีสมการดังนี้

$$v^- = f_2(x+vt) \quad 2.21$$

และลักษณะของกระแสคือ

$$i^- = -\frac{1}{\sqrt{LC}} f_2(x+vt) \quad 2.22$$

จากสมการที่ 2.19 และ 2.20 จะได้ว่า

$$\frac{v^+}{i^+} = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad 2.23$$

และจากสมการที่ 2.21 และ 2.22 จะได้ว่า

$$\frac{v^-}{i^-} = -\sqrt{\frac{L}{C}} \quad 2.24$$

ถ้าสมมติให้กระแสในทิศทางบวกของ i^- อยู่ในทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นเดินทางที่ถอยหลัง และเครื่องหมายลบจะเปลี่ยนเป็นเครื่องหมายบวกในสมการที่ 2.22 และ 2.23 เพื่อเลือกที่จะรักษาทิศทางของตำแหน่ง x ให้เป็นกระแสบวกทั้งคลื่นที่เคลื่อนที่ไปข้างหน้าและคลื่นที่เคลื่อนที่ถอยหลัง

อัตราส่วนของ v^+ และ i^+ เราเรียกว่า อิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายส่ง (Characteristic Impedance: Z_c) ซึ่งพบว่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะในสภาวะคงตัว (steady - state) ของความยาวสายส่ง โดย Z_c จะกำหนดเป็น $\sqrt{z/v}$ ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ $\sqrt{L/C}$ เมื่อ R และ G มีค่าเป็นศูนย์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 สัมประสิทธิ์การสะท้อน (Reflection Coefficient)

ในตอนนี้เราจะพิจารณาว่าเกิดอะไรขึ้น เมื่อแรงดันถูกจ่ายจากปลายด้านส่งไปจนถึงสุดของปลายสายส่งที่มีค่าอิมพีแดนซ์ Z_R ซึ่งในทางปฏิบัติจะพิจารณา Z_R เป็นค่าความต้านทานจริง ถ้าด้านปลายของสายส่งมีค่าความต้านทานจริงมากกว่าจุดอื่นๆ ซึ่งเราจะอาศัยการแปลงรูปของลาปลาซ (Laplace transform) ในการเปลี่ยนรูปของแรงดัน กระแส และอิมพีแดนซ์ โดยอาศัยการแปลงรูปของตัวแปร s ในฟังก์ชันของลาปลาซ [8]

เมื่อสวิตช์ถูกปิดแรงดันจะถูกจ่ายไปยังสายส่ง คลื่นของแรงดัน v^+ จะเริ่มต้นเดินทางมา ระหว่างสายส่งพร้อมกับคลื่นของกระแส i^+ อัตราส่วนของแรงดัน v_R^+ กับกระแส i_R^+ ที่ปลายสายส่ง ณ เวลาใดๆ จะต้องมีค่าเท่ากับค่าความต้านทาน Z_R ที่ปลายสุดของสายส่งนั้น เพราะฉะนั้นค่าของ v^+ และ i^+ จะปรากฏที่ปลายด้านรับ ซึ่งจะมีค่าเป็น v_R^+ และ i_R^+ โดยผลลัพธ์จะอยู่ในรูปของคลื่นเดินทางไปข้างหน้า (Backward travelling wave) หรือคลื่นสะท้อน (Reflected wave) โดย v^- และ i^- จะมีค่าเป็น v_R^- และ i_R^- ที่ปลายด้านรับ เช่นนั้น

$$\frac{v_R^-}{i_R^-} = \frac{v_R^+ + v_R^-}{i_R^+ + i_R^-} = Z_R \quad 2.25$$

ซึ่ง v_R^- และ i_R^- จะเป็นคลื่นสะท้อน จากการวัด v^- และ i^- ที่ปลายด้านรับ ถ้าเราให้ $Z_C = \sqrt{L/C}$ จะหาได้จากสมการที่ 2.23 และ 2.22

$$i_R^+ = \frac{v_R^+}{Z_C} \quad 2.26$$

และ

$$i_R^- = -\frac{v_R^-}{Z_C} \quad 2.27$$

จากนั้นแทนค่าของ i_R^+ และ i_R^- นี้ลงในสมการที่ 2.25 ได้เป็น

$$v_R^- = \frac{Z_R - Z_C}{Z_R + Z_C} v_R^+ \quad 2.28$$

แรงดันของ i_R^- ที่ปลายด้านรับจะเหมือนกับฟังก์ชันของ i_R^+ ที่เวลา t (แต่จะมีขนาดลดน้อยลง นอกจาก Z_R จะเป็นศูนย์หรือมีค่านันต์) สัมประสิทธิ์การสะท้อน ρ_R ของแรงดันที่ปลายด้านรับของสายส่ง โดยกำหนดเป็น i_R^- / i_R^+ ดังนั้น

$$\rho_R = \frac{Z_R - Z_C}{Z_R + Z_C} \tag{2.29}$$

จากสมการที่ 2.26 และ 2.27 นั้น

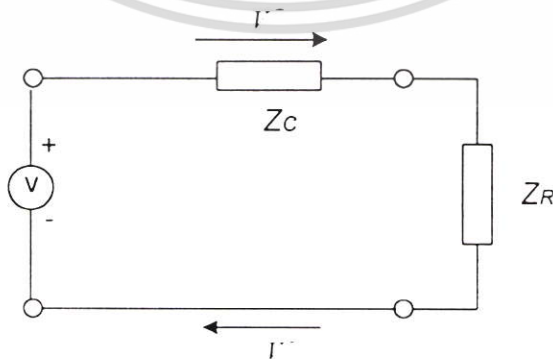
$$\frac{i_R^+}{i_R^-} = - \frac{i_R^+}{i_R^-} \tag{2.30}$$

เพราะฉะนั้นสัมประสิทธิ์การสะท้อนของกระแส จะเป็นสัมประสิทธิ์การสะท้อนของแรงดันที่เป็นลบเสมอ

เมื่อ

- i_R^+ = แรงดันที่เดินทางไปสู่โหลด
- i_R^- = แรงดันที่เดินทางไปสู่แหล่งกำเนิด
- i^+ = กระแสที่เดินทางไปสู่โหลด
- i^- = กระแสที่เดินทางจากโหลดไปสู่แหล่งกำเนิด

ถ้าในปลายสายส่งมีอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ Z_C เราจะเห็นสัมประสิทธิ์การสะท้อนของแรงดันและกระแสทั้งคู่เป็นศูนย์ และในทางปฏิบัติถ้าสายส่งมีความยาวอนันต์ นั่นก็จะไม่เกิดคลื่นสะท้อน เว้นแต่เมื่อมีคลื่นสะท้อนกลับมายังแหล่งจ่ายที่ปลายของจุดส่งนั้นคือสายส่งไม่ได้มีความยาวเป็นอนันต์หรือที่ปลายสายส่งไม่ใช่ Z_C ดังตัวอย่างรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การสะท้อนกลับเมื่อ Z_C เป็นอิมพีแดนซ์ของปลายด้านส่งและ Z_R เป็นอิมพีแดนซ์ปลายด้านรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อสายส่งเป็นลักษณะปลายเปิด (Short Circuit) ผลลัพธ์ของ $\rho_R = -1$ เนื่องจากค่า $Z_R = 0$

$$\rho_R = \frac{0 - Z_c}{0 + Z_c}$$

ดังนั้น

$$\rho_R = -\frac{Z_c}{Z_c} = -1$$

เพราะฉะนั้น

เมื่อ ρ_R เท่ากับ -1 ก็เหมือนกับว่าคลื่นที่สะท้อนกลับมาจะเป็นค่าลบ เมื่อส่ง E_i เป็นค่าบวก



รูปที่ 2.6 การสะท้อนกลับเมื่อต่อปลายสายแบบปิด (Short Circuit)

ถ้าสายส่งเป็นลักษณะปลายเปิด (Open Circuit) ผลลัพธ์ของ $\rho_R = 1$ เนื่องจากค่า $Z_R = \alpha$

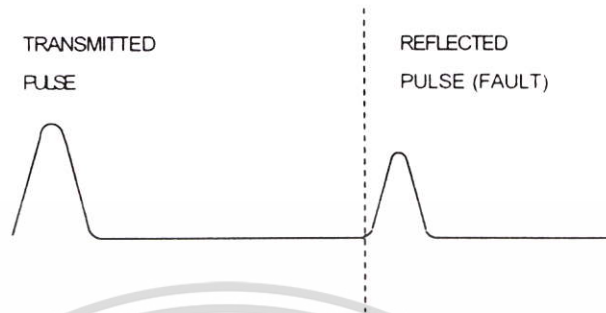
$$\rho_R = \frac{\alpha - Z_c}{\alpha + Z_c}$$

ดังนั้น

$$\rho_R = \frac{\alpha}{\alpha} = 1$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นว่า ρ_R เท่ากับ 1 นั้นหมายความว่าแรงดันที่สะท้อนกลับมาที่ปลายสายส่งกำลังปลายเปิด (Open Circuit) อยู่ในเฟสเดียวกันกับ V_i ; ย่อหมายความว่าคลื่นที่สะท้อนกลับมาจะเป็นค่าบวกเมื่อส่ง V_i เป็นค่าบวก



รูปที่ 2.7 การสะท้อนกลับเมื่อต่อปลายสายแบบเปิด (Open Circuit)

2.5 การลดทอนเนื่องจากการสะท้อนกลับ

ตามที่ได้กล่าวมาแล้วว่าถ้าโหลดอิมพีแดนซ์ $Z_R = Z_C$ แล้วศักดาและกระแสก็จะเคลื่อนที่ไปอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งกรณีนี้เรียกว่าอิมพีแดนซ์แมชชิง แต่ถ้า $Z_R \neq Z_C$ แล้วจะทำให้คลื่นเกิดการสะท้อนกลับขึ้น ยิ่งไปกว่านั้นถ้าโหลดไม่ใช่เป็นแต่เพียง Z_R เช่นถ้าเป็นสายเคเบิลต่างๆ ที่ต่อกันไปแล้ว คลื่นที่เหลือจากการกระทบ ซึ่งเรียกว่า Transmission wave จะผ่านเลยไป การลดทอนของสัญญาณ ซึ่งเกิดจากการสะท้อนนี้เรียกว่า Reflection Loss ดังสมการ [9]

$$\text{Reflection Loss} = -\frac{1}{2} \ln |1 - \rho_R|^2 \quad (\text{Nep})$$

$$= -\log |1 - \rho_R|^2 \quad (\text{db}) \quad 2.31$$

2.6 การฉนวนเก็บล

สายหุ้มฉนวน หมายถึงสายไฟที่ทำด้วยทองแดงหรืออลูมิเนียม และหุ้มฉนวนด้วยฉนวนไฟฟ้า สายไฟหุ้มฉนวนนั้นมีหลายชนิดด้วยกัน ทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับงานที่จะนำไปใช้ ฉนวนที่หุ้มสายไฟแต่ละชนิดไม่เหมือนกัน บางชนิดเหมาะสำหรับติดตั้งในบ้านพัก บางชนิดเหมาะสำหรับติดตั้งภายนอกอาคาร บางชนิดเหมาะกับการติดตั้งที่อุณหภูมิสูงๆ หรือในที่ที่มีสภาพเปียกชื้น ดังนั้นสายไฟแต่ละชนิดจึงแบ่งตามชนิดของฉนวนที่นำมาหุ้มเพื่อให้เหมาะสมกับงานที่ใช้ [5]

ลักษณะคุณสมบัติของการฉนวนเคเบิลขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งาน ฉนวนควรจะมียืดหยุ่นได้ดี ทนต่อแรงดึงสูง เหนียว เพื่อให้ทนต่อสภาวะการใช้งาน ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกควรมีค่าต่ำ พาวเวอร์แฟกเตอร์ต่ำ แต่มีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าได้สูง มีความต้านทานการฉนวนสูง ทนต่อความร้อนได้ดีเพื่อใช้งานในกรณีที่โหลดเกิน ทนต่อแสงแดดและปฏิกิริยาทางเคมี ดูดซึมความชื้นได้น้อยมาก เมื่อนำไปใช้งานเคเบิลผ่านไดน้ำ (แม่น้ำและทะเล) ถ้าใช้กับอุณหภูมิค่าฉนวนไม่ควรจะมีสภาพแข็งและเปราะ การปราศจากดิสชาร์จบางส่วน (PD)

ฉนวนที่ใช้สำหรับการฉนวนเคเบิลอุตสาหกรรม คือ กระจก ยาง พลาสติก และกาซอัดเคเบิลชนิดฉนวนกระดากยังนิยมใช้อยู่ เพราะเคเบิลชนิดนี้มีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าได้ดี มีพลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกต่ำ อายุการใช้งานยาวนาน การฉนวนเคเบิลแรงต่ำและแรงดันสูงขึ้นต้น คือถึง 3.300 V มักใช้ฉนวนพีวีซี (PVC) พีอี (PE) และพีอีครอสลิง (XLPE) แต่ฉนวนพีวีซีไม่เหมาะสำหรับการฉนวนเคเบิลแรงดันสูง เพราะว่ามีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสูง และพลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกมีค่าสูงด้วย ส่วนฉนวนพีอีจะมีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกต่ำ พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกต่ำทนต่อแรงดันได้สูง ฉะนั้นฉนวนพีอีจึงเหมาะสำหรับการฉนวนสายเคเบิลแรงสูง

โพลีไวนิลคลอไรด์ (Polyvinyl Chloride = PVC)

โพลีไวนิลคลอไรด์หรือพีวีซีใช้กันหลายรูปแบบในเชิงการค้า มีแบบที่ไม่เป็นพลาสติก แต่เหนียวทำเป็นรูปต่างๆ ตามต้องการได้ง่าย ทนต่อปฏิกิริยาทางเคมี กรดและด่าง และไม่ละลายน้ำ แอลกอฮอล์และน้ำยาสารละลายอินทรีย์ ชีตจำกัดอุณหภูมิใช้ได้ไม่เกิน 60 °C มีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูง ความต้านทานเฉพาะเชิงผิวและปริมาตรมีค่าสูง ϵ_r ประมาณ 3.8 – 4.3 ที่ 50 Hz และ $\tan \delta = 0.012$ ถึง 0.15 ที่ 50 Hz และ 0.006 ถึง 0.1 ที่ 1 MHz ส่วนพีวีซีที่อ่อนตัวเป็นพลาสติกได้ จะใช้สำหรับหุ้มสายไฟ ปลอกฉนวน และเปลือกนอกของเคเบิลนิยมใช้พีวีซีมากกว่ายางเพราะทนต่อแสงแดด ออกซิเจนและไม่ดูดซึมน้ำหรือความชื้น

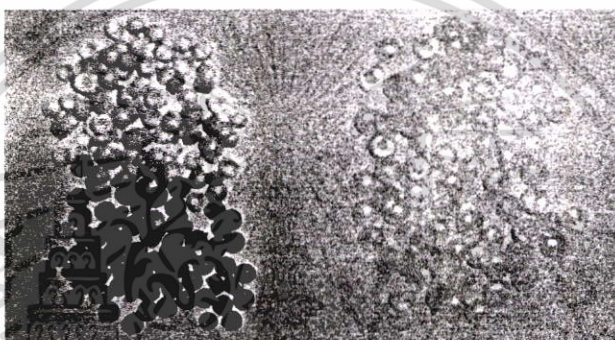
โพลีเอทิลีน (Polyethylene = PE)

โพลีเอทิลีน (PE) เป็นสารเทอร์โมพลาสติกที่มีคุณสมบัติพิเศษทางไฟฟ้า ทนต่อความชื้นและปฏิกิริยาทางเคมีได้สูง มีความต้านทานจำเพาะและความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูง แม้แต่ที่ความถี่สูง กระบวนการทำง่ายและราคาไม่แพง ฉะนั้น PE จึงมีที่ใช้งานได้กว้างขวาง โดยเฉพาะใช้ในการฉนวนของสายเคเบิลแกนร่วม (Coaxial Cable) ทั้งงานไฟฟ้ากำลังและงานสื่อสาร โดยเหตุที่กระบวนการผลิต PE มีแตกต่างกัน ซึ่งอาจจะทำขึ้นเพื่อเฉพาะกิจ จึงแบ่งออกเป็นประเภทตามความหนาแน่นมากน้อย แบบเบา แบบกลาง และแบบหนัก และยังสามารถใช้กรรมวิธีผ่านรังสีแกมมาและนิวตรอน เพื่อเพิ่มคุณสมบัติบางประการ อย่างไรก็ตามทุกชนิดมีความต้านทานจำเพาะสูงกว่า 10¹⁶ โอห์ม-เซนติเมตร ϵ_r (50 Hz – 1 MHz) เท่ากับ 2.3 และ $\tan \delta$ เท่ากับ 2×10^{-4} มีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ 200 ถึง 200 kV/cm ทนอุณหภูมิได้สูงถึง 90 °C ถ้าผ่านรังสีแกมมาและนิวตรอนมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าเป็น 700 – 1000 kV/cm แต่จะมีค่า $\tan \delta$ เท่ากับ 5×10^{-4}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ สงวนลิขสิทธิ์ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พียูครอสลิง (Cross – linked Polyethylene = XLPE)

พียูครอสลิง (XLPE) ผลิตขึ้นจาก Ethylene Gas ซึ่งได้เปลี่ยนแปลงจาก Low Density Polyethylene ทำให้ส่วนเล็กภายใต้แรงกดดันประมาณ 50,000 psi XLPE เป็น Homo Polymer ชนิดหนึ่งที่มีโครงสร้างเป็นส่วนเล็กๆ เชื่อมโยงทางเคมีโดยโมเลกุลคาร์บอนของ Polyethylene โดยค่า 1 โมเลกุลจะมีคาร์บอนอะตอมประมาณ 1.000 – 2.000 อะตอม ทำการเชื่อมโยกันเป็นลูกโซ่ XLPE มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าเหมือน PE ทุกประการ เมื่อทำการ Bonding ระหว่างโมเลกุลของ PE แล้วทำให้ XLPE มีคุณสมบัติทางกล ทางกายภาพและความร้อน มีค่า Tensile Strength ดีกว่า PE เดิม ที่อุณหภูมิสูงจนวน XLPE จะผลิตขึ้นโดยกระบวนการที่ต่อเนื่องที่รวมทั้งการ Extrusion จนวนและ Screening Layer ตั้งแต่ต้นไปจนจบกระบวนการจนวน XLPE



(ก)

(ข)

รูปที่ 2.8 วัสดุของสารจนวนที่นำมาผลิตเป็นจนวนสายเคเบิล

(ก) วัสดุจนวน PVC

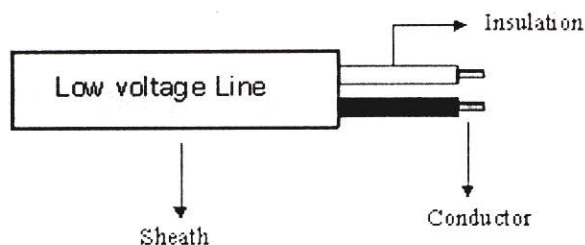
(ข) วัสดุจนวน XLPE

2.7 โครงสร้างของสายเคเบิลแรงดันต่ำจนวน PVC

การออกแบบโครงสร้างของ PVC Cable มีทั้งประเภท armour และไม่ใช่ armour หรือ unarmour ถ้าเป็นประเภท unarmour จะประกอบไปด้วย extruded PVC sheath ที่หุ้ม core เดี่ยวหรือหลายๆ core ถ้าเป็นแบบ armour ประกอบไปด้วย plastic tape, extruded PVC sheath Insulation ในช่วง 1-3 kV โดยจะกำหนดความหนาของจนวนเคเบิลตามคุณสมบัติทาง mechanic เช่น น้ำหนักสายและการทนต่อแรงดึง เป็นต้น แต่ถ้าระดับแรงดันเพิ่มขึ้นมากกว่านี้ จะพิจารณาผลทางด้านไฟฟ้าเป็นเกณฑ์ ซึ่งคุณสมบัติทั่วไปของ PVC insulation นั้นจะต้องป้องกันการตีไฟและการเกิดสารพิษ

สำหรับ High Voltage แล้วการทดสอบ Insulation Resistance และการเพิ่มขึ้นของ dielectric power factor ในช่วงอุณหภูมิที่ใช้งานนั้นมีความสำคัญมากต่อการหลีกเลี่ยงเสถียรภาพตามมาตรฐาน IEC 502 ซึ่งกำหนดให้ PVC/A ใช้กับไฟไม่เกิน 3 kV และ PVC/B ใช้สำหรับระดับ

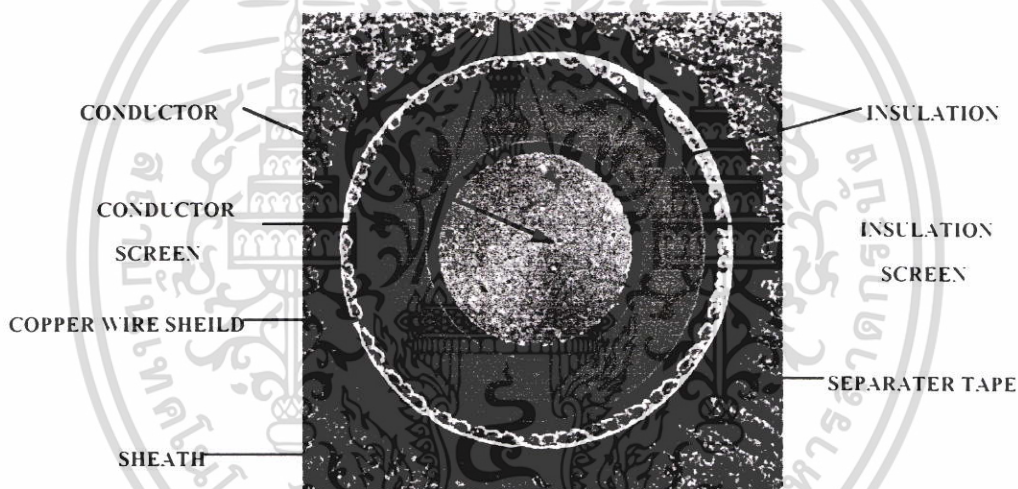
เอกสารนี้แรงดันที่สูงกว่า ซึ่งจะต้องมีค่า permittivity และ power factor ไม่เกิน 0.75 ในช่วงอุณหภูมิ 85 C การคำนวณว่ากรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 ส่วนต่างๆของสายเคเบิลแรงต่ำฉนวน PVC

2.8 โครงสร้างของสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวน XLPE

สายเคเบิลใต้ดินที่นำมาใช้กับแรงดันต่ำ แรงดันปานกลาง และแรงดันสูง จะมีโครงสร้างที่ประกอบด้วยจำนวนชั้นแตกต่างกัน แต่ละชั้นจะมีหน้าที่พิเศษสำหรับการใช้งานเป็นของตัวเอง



รูปที่ 2.10 ส่วนต่างๆของสายเคเบิลแรงสูงฉนวน XLPE

2.8.1 ตัวนำ (Conductor)

อาจเป็นได้ทั้งทองแดงหรืออลูมิเนียม แต่โดยส่วนมากใช้ตัวนำทองแดง ตัวนำจะทำหน้าที่นำกระแสไฟฟ้า เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวนำก็จะเกิดความร้อน (I^2R) ถ้ามีกระแสไหลมากหรือสายมีความต้านทานสูง ก็จะเกิดความร้อนสูง ความร้อนนี้จะกระจายผ่านส่วนต่างๆ ของสายไฟฟ้าส่วนที่ห่อหุ้มตัวนำ การระบายความร้อนนี้จะเร็วหรือช้าขึ้นอยู่กับความสามารถในการนำความร้อนของวัสดุที่ใช้หุ้มสายและอุณหภูมิของอากาศโดยรอบ

2.8.2 Conductor Screen

เป็นวัสดุที่ทนทานทำหน้าที่คล้าย Stress control คือกระจายสนามไฟฟ้าไม่ให้หนาแน่น ณ จุดใดจุดหนึ่ง และยังทำหน้าที่ลดช่องว่างระหว่างสายตัวนำกับฉนวนอีกด้วย ในเคเบิลที่มีขนาด 10 kV ขึ้นไป ผิวสายตัวนำต้องเรียบและจับยึดกับฉนวนเป็นอย่างดี ดังนั้นจึงต้องทำการเคลือบผิวของสายตัวนำด้วยสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) ระหว่างผิวสายตัวนำกับฉนวน เพื่อควบคุมเส้นแรงไฟฟ้าบนผิวสายตัวนำและไม่ให้เกิดมีโพรงอากาศใดๆ บนผิวตัวนำกับฉนวนขณะที่สายตัวนำมีการโค้งงอหรือเปลี่ยนรูปร่างเนื่องจากความร้อน นอกจากนั้นเนื้อผิวนอกของฉนวน XLPE ระหว่าง Screen ต้องเคลือบผิวด้วย Semi conductor เพื่อป้องกันการเกิด Partial Discharge การเคลือบผิวสายตัวนำนอกและผิวนอกของฉนวน XLPE ด้วย Semiconductor จะกระทำในระหว่างกระบวนการหลอมละลาย (Extruding Process)

2.8.3 Insulation คือวัสดุที่ทำหน้าที่เป็นฉนวนไฟฟ้า

มีอยู่หลายชนิดด้วยกัน เช่น PVC, Silicone Rubber, Polyethylene and Cross-link polyethylene (XLPE) เป็นต้น ความหนาแน่นของฉนวนจะเหมาะสมกับระดับแรงดันที่ใช้ คุณสมบัติของฉนวนที่ดีควรเป็นดังนี้คือ

2.8.3.1 High Dielectric Strength คือมีค่าความต้านทานสูงต่อแรงดันไฟฟ้า

2.8.3.2 Low Dielectric Constant หรือ Specific Inductive Capacitance ถ้ามีค่าต่ำ จะให้เกิดค่า Capacitance ระหว่างสายตัวนำกับ Shield ต่ำด้วย เนื่องจากถ้า Capacitance มีค่าสูง ค่าสูญเสียก็จะสูงตามไปด้วย

2.8.3.3 Low Power Factor เนื่องจากกระแสลับจะทำให้เกิดค่า Leakage Current ในฉนวนเป็นผลให้เกิดค่าสูญเสียในรูปของความร้อนซึ่งเรียกว่า Dielectric Loss อัตราของ Dielectric Loss ต่อ Apparent Loss คือ Power Factor เนื่องจากค่า Dielectric Loss เป็นค่าที่ไม่ต้องการให้เกิดขึ้นในระบบ ถ้ามีค่านี้นี้ต่ำจะเป็นผลทำให้ Power factor ต่ำด้วย เราจึงอาจดูค่าของ Dielectric Loss ได้จากค่า Power factor

2.8.3.4 Moisture Resistance ต้องมีค่าสูงหรือค่าความต้านทานต่อความชื้นสูง เพราะถ้าความต้านทานต่อความชื้นต่ำ วัสดุก็จะดูดซึมความชื้นได้มาก จะเป็นผลให้คุณสมบัติในการเป็นฉนวนไฟฟ้าลดลงและเสื่อมสภาพในที่สุด

2.8.3.5 High Resistance to Heat ฉนวนควรทนต่อความร้อนที่อุณหภูมิสูงๆได้ เมื่อสายตัวนำมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านจะเกิดความร้อนได้ดังกล่าวแล้วในตอนต้น ถ้าฉนวนทนความร้อนได้สูง สายไฟฟ้านั้นก็จะนำกระแสได้มากด้วย

2.8.3.6 High Resistance to Corona Damage ดังที่ได้กล่าวไว้ในตอนต้นว่า ระหว่างสายตัวนำกับ Shield จะมีลักษณะเป็น Capacitance และจะมีความต่างศักย์ระหว่างสายตัวนำกับ Shield ในกรณีที่เกิดมีช่องอากาศขึ้นในฉนวน (Void) จะเกิดความต่างศักย์ระหว่างผนังของช่องอากาศด้านที่อยู่ใกล้กับ Shield กับด้านที่อยู่ใกล้ตัวนำจะทำให้อากาศใน Void นั้นเกิด Corona Discharge ทำให้เกิดพลังงานไฟฟ้าสูญเสียอีกด้วย ฉนวนบริเวณนั้นจะเกิดความร้อนและไหม้กลายเป็น Carbon และ Void นี้ก็จะโตขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งฉนวนเกิด Breakdown และใช้ไม่ได้อีกต่อไป แต่อาการแบบนี้จะเกิดขึ้นและขยายตัวไปได้ค่อนข้างช้าในระยะแรกที่ทำให้การติดตั้งใหม่ๆ จึงไม่เกิดสภาพเช่นนี้ ในการผลิตและการใช้งานควรมีการทดสอบค่า Corona Discharge ไม่ให้มีค่ามากจนอาจเกิดอันตรายได้ในช่วงระยะเวลาการใช้งานของสายไฟฟ้า

2.8.4 Insulation Screen

เป็นชั้นบางๆหุ้มฉนวนอีกทีหนึ่งมีคุณสมบัติเป็นตัวนำ (Conductive Material) อาจเป็นสารจำพวก Carbon Impregnated Cloth Tape or Conducting Extruded Plastic ทำหน้าที่คล้ายกับ Conductor Screen โดยมีหน้าที่หลักอยู่ 3 ประการ คือ ลดการเกิด Discharge ระหว่างผิวของฉนวนกับ Ground ลดค่า Radio Frequency Interference และเพื่อความปลอดภัยต่อบุคคลอื่นอาจสัมผัสถูกสายไฟฟ้า

2.8.5 Copper Wire Shield ทำด้วยแถบโลหะแบนหรือเส้นโลหะกลม

ส่วนมากทำด้วยทองแดง อาจทำด้วย Metal Tape, Corrugated Metal, Metal Drain Wire หรือ Lead Sheath

1. ทำหน้าที่ปล่อย (Drain) กระแส Discharge ต่างๆลงดิน และยังทำหน้าที่ปรับ
2. ระดับความต่างศักย์ของ Insulating Screen ให้เท่ากับดินอีกด้วย
3. ช่วยลดความเสียหายของสายอันเนื่องมาจาก Surge Voltage
4. สามารถออกแบบให้นำกระแสอันเนื่องมาจาก Fault ได้ถ้าต้องการ

2.8.6 Separator Tape หรือเรียกว่า Bedding Type

ปกติทำด้วยวัสดุจำพวกผ้า ทำหน้าที่เพิ่มความแข็งแรงของเปลือกนอกและยังช่วยเพิ่มความถี่ระหว่างเปลือกนอกกับ Metal Tape กรณีที่มีสายคัดโค้งหรืองอ

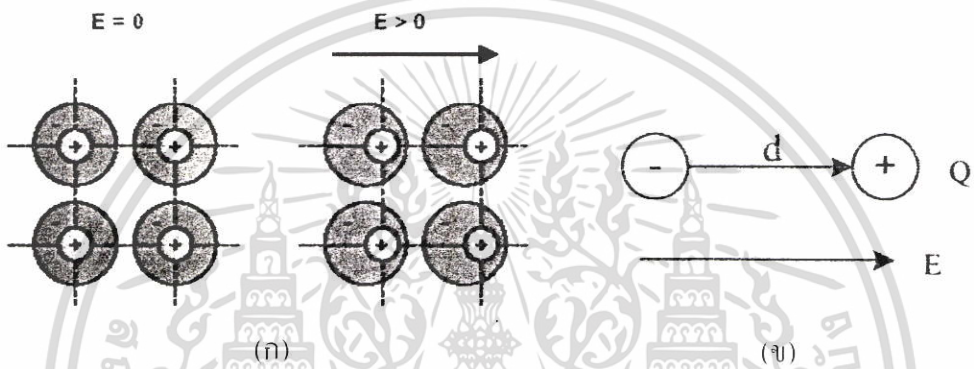
2.8.7 Sheath หรือเปลือกนอกทำด้วยวัสดุที่เป็นฉนวน

ส่วนมากเป็น PVC หรือ PE เพื่อลดความเสียหายอันเนื่องจากการกระแทกหรือเสียดสี ถ้าเป็นกรณีของ Lead Sheath อาจไม่ต้องมี Sheath เลยก็ได้ หรือถ้ามีก็จะมีไว้ป้องกันการหุกร่อนของ

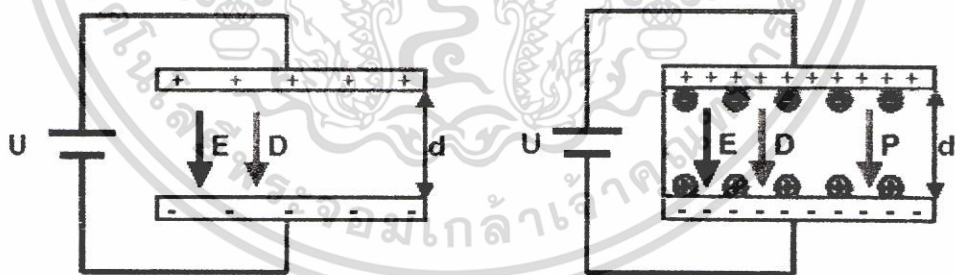
เอกสารนี้จัดทำขึ้นเพื่อเป็นเอกสารอ้างอิงเท่านั้น ไม่สามารถนำข้อมูลไปใช้ในการค้า หรือบริการใดๆ ได้ หากต้องการข้อมูลเพิ่มเติม กรุณาติดต่อฝ่ายวิชาการของบริษัทฯ

2.9 โพลาริเซชัน P (Polarization) และเพอร์มิททิวิตี (permittivity)

วัสดุไดอิเล็กตริกถูกโพลาริเซชันในสนามไฟฟ้า (Electric field) E เนื่องจากความหนาแน่นฟลักซ์ไฟฟ้า (Electric Flux Density) D มีค่ามากกว่าที่เกิดขึ้นในอากาศว่างภายใต้ความเข้มสนามไฟฟ้าเดียวกัน ทฤษฎีที่ง่ายต่อการทำความเข้าใจถึงการโพลาริเซชัน(Polarization) P ได้ คือ การพิจารณาอะตอมของวัสดุไดอิเล็กตริกเขตประจุบวกและประจุลบที่ซ้อนกันอยู่ดังรูปที่ 2.8 (ก) ภายใต้สนามไฟฟ้า E เขตประจุบวกจะเคลื่อนไปทางทิศทางของสนามไฟฟ้า และเขตประจุลบจะเคลื่อนที่ไปในทิศตรงกันข้าม การกระจัดสามารถถูกแทนโดยไดโพลโมเมนต์ไฟฟ้า (Electric Dipole Moment) $P = Qd$ ดังรูปที่ 2.8 (ข) [10]



รูปที่ 2.11 วัสดุไดอิเล็กตริกเขตประจุบวกและประจุลบที่ซ้อนกันและเคลื่อนที่ไปตามทิศทางสนามไฟฟ้า



รูปที่ 2.12 การโพลาริเซชันในสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดแผ่นระนาบ

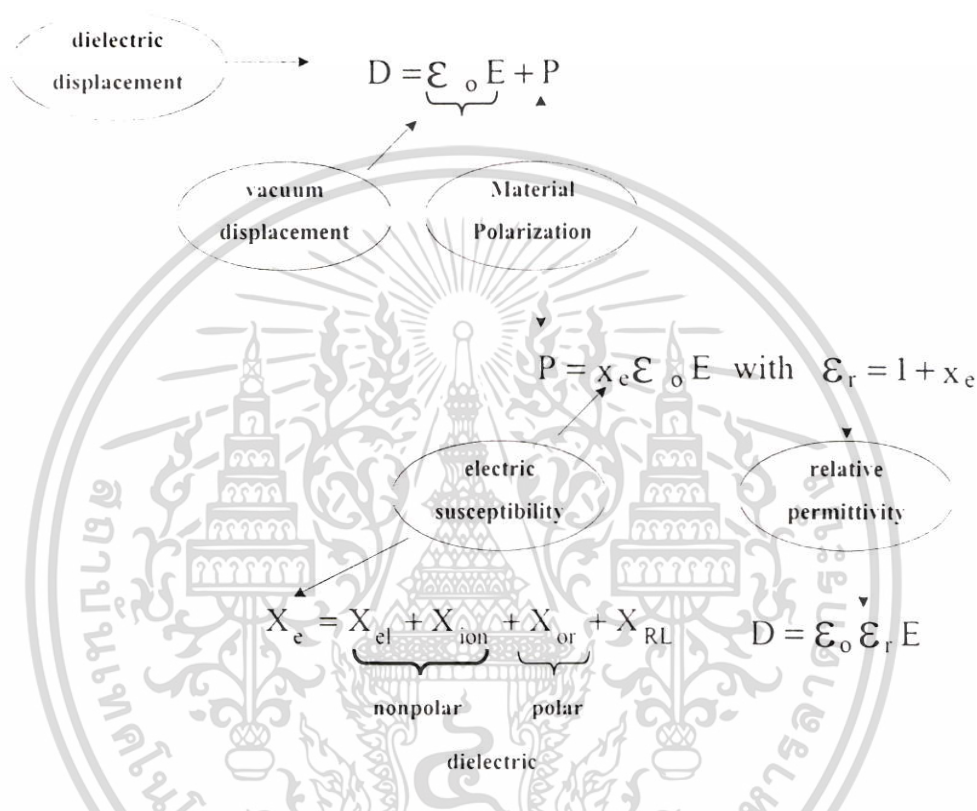
บริเวณ Δv ของไดอิเล็กตริกที่ถูกโพลาริเซชันประกอบด้วยไดโพลโมเมนต์ P เป็นจำนวน N ไดโพล โพลาริเซชัน P ถูกนิยามว่าเป็นไดโพลโมเมนต์ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร

$$P = \lim_{\Delta v \rightarrow 0} \frac{Np}{\Delta v} \tag{2.32}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงว่าการกระจายของไดโพลโมเมนต์ไฟฟ้า มีการกระจายแบบต่อเนื่องและสม่ำเสมอตลอดทั้งปริมาตร แต่อย่างไรก็ตามในการมองแบบมหภาค โพลาริเซชัน P สามารถหาได้จากการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นสนามไฟฟ้า ดังสมการ

$$D = \epsilon_0 E + P \tag{2.33}$$



รูปที่ 2.13 หลักการพื้นฐานของฉนวน

สมการนี้สามารถให้ E และ P มีทิศทางตรงกันข้ามได้ ในขณะที่เกิดขึ้นในไดอิเล็กตริกที่เป็นโครงสร้างที่มีระเบียบ ในวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นไอโซทรอปิกแบบเชิงเส้น E และ P จะขนานกันซึ่งสามารถแสดงได้ โดย

$$P = \chi_e \epsilon_0 E \text{ (วัสดุไอโซทรอปิก)} \tag{2.34}$$

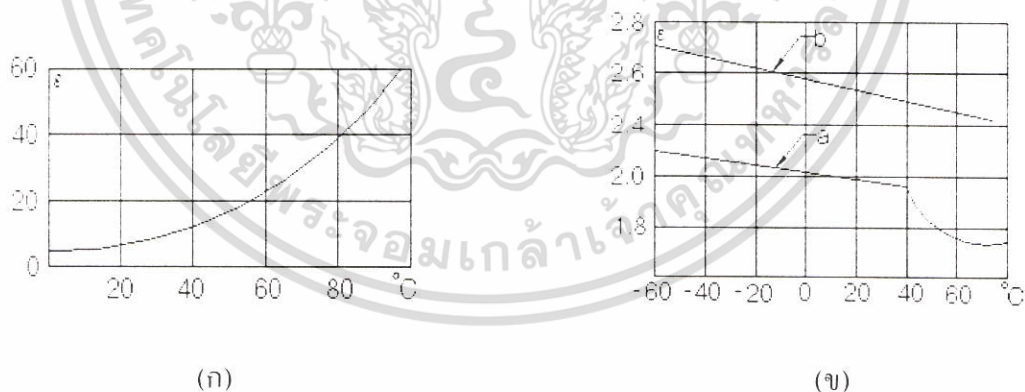
ค่าสัมประสิทธิ์ไฟฟ้า (Electric Susceptibility) χ_e ไม่มีหน่วย ดังนั้น

$$D = \epsilon_0 (1 + \chi_e) E = \epsilon_0 \epsilon_r E \text{ (วัสดุไอโซทรอปิก)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\epsilon_r = 1 + \chi_e$ เป็นจำนวนบริสุทธิ์ ซึ่ง ϵ_r ถูกเรียกว่าเพอร์มิททิวิตีสัมพัทธ์ (Relative Permittivity) หรือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริก (Dielectric Constant) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญประการหนึ่ง ไม่มีมิติ และเป็นตัวบ่งบอกลักษณะของไดอิเล็กตริกหรือสารฉนวนไฟฟ้าเป็นพารามิเตอร์ที่กำหนดความสามารถของการสร้างคาปาซิเตนซ์ หรือกล่าวง่าย ๆ ϵ_r คือค่าตัวเลขที่บอกให้ทราบว่าคาปาซิเตนซ์จะเพิ่มขึ้นกี่เท่าของคาปาซิเตนซ์สูญญากาศ เมื่อใส่ไดอิเล็กตริกที่มีค่าเพอร์มิททิวิตี ϵ_r เข้าไปแทนที่

ไดอิเล็กตริกสามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ โพลาร์ไดอิเล็กตริก (polar dielectric) และนอนโพลาร์ไดอิเล็กตริก (nonpolar dielectric) [11] โดยพิจารณาจากคุณสมบัติทางด้านไฟฟ้า ฟิสิกส์และเคมีของวัสดุ โดยโมเลกุลหนึ่งของวัสดุจะประกอบกันโดยแยกเป็นส่วนต่างๆ เช่น อีออน อะตอมหรือกลุ่มของอะตอมเป็นต้น ซึ่งจะมีทั้งประจุบวกและประจุลบ โดยจะมีผลต่อการกำหนดแรงระหว่างประจุและความสามารถทางกลของวัสดุ ในสารจะประกอบด้วยโมเลกุลที่แตกต่างกันทั้งโพลาร์และนอนโพลาร์ เช่น สารของโพลาร์จะพิจารณาได้จากจำนวนประจุไฟฟ้าบวกหรือลบของหนึ่งโมเลกุลหรือระยะความยาวของไดโพลเป็นต้น ซึ่งค่า ϵ_r ของไดอิเล็กตริกในสารแต่ละชนิดจะมีการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากผลของปัจจัยต่างๆ เช่น ความถี่ของแรงดันที่ใช้ ความชื้น ความดันบรรยากาศ หรือผลของอุณหภูมิเป็นต้น ทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติเฉพาะของแต่ละสารนั้นๆ เช่น ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.14 ผลของอุณหภูมิต่อค่า ϵ_r ของฉนวนพอร์ซเลน (เป็นสารโพลาร์ไดอิเล็กตริก) ที่มีค่า ϵ_r เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น และฉนวนพาราฟินและโพลิสทีรีน (เป็นสารนอนโพลาร์ไดอิเล็กตริก) ที่มีค่า ϵ_r ลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.14 ค่าเพอร์มิททิวิตีต่ออุณหภูมิ

(ก) ฉนวนพอร์ซเลน (สารโพลาร์ไดอิเล็กตริก)

(ข) a-ฉนวนพาราฟินและb-โพลิสทีรีน (สารนอนโพลาร์ไดอิเล็กตริก)

2.10 บทสรุป

ในการศึกษาค่าเพอร์มิททิวิตีสัมพัทธ์ของฉนวนสายเคเบิล จะต้องทำความเข้าใจในทฤษฎีเบื้องต้นของสายส่งไฟฟ้า หลักการฉนวนเคเบิล คุณสมบัติต่างๆ ของฉนวนสายเคเบิลและโครงสร้างของสายเคเบิล ซึ่งค่าเพอร์มิททิวิตีสัมพัทธ์นั้นมีส่วนสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงหรือหักเหของเส้นทางสนามไฟฟ้าและความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนต่างๆ ซึ่งใช้เป็นตัวกำหนดค่าความคงทนของการฉนวนทางไฟฟ้าสูงสุดที่ฉนวนนั้นสามารถทนอยู่ได้ โดยไม่เกิดความเสียหายหรือเกิดการเบรกดาวน์ และทำให้การฉนวนเสื่อมสภาพ ปัจจุบันการผลิตสายเคเบิลแต่ละโรงงานก็มีขั้นตอนและขบวนการผลิตที่แตกต่างกันไป รวมถึงคุณภาพของวัสดุที่นำมาทำเป็นฉนวน ซึ่งอาจมีส่วนประกอบที่ไม่เหมือนกัน ดังนั้นจึงต้องมีการตรวจสอบคุณภาพของวัสดุฉนวนดังกล่าว เมื่อผ่านขบวนการผลิตแล้วว่าเป็นไปตามมาตรฐานหรือไม่ ซึ่งในบทนี้ได้นำเสนอทฤษฎีและสมการที่เกี่ยวข้องกับวิชานีพนธ์ โดยทำการรวบรวมมาจากแหล่งอ้างอิงต่างๆ และเรียงลำดับเรื่องราวของเนื้อหาตามความเหมาะสมในอันที่จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจหรือนักวิจัยรุ่นหลังได้ทำการศึกษาต่อไป สำหรับรายละเอียดเฉพาะเรื่องจะกล่าวถึงในบทต่อไป



บทที่ 3

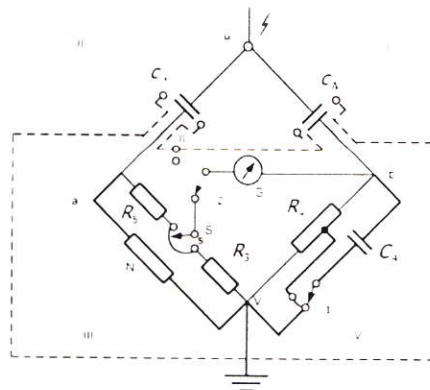
มาตรฐานและวิธีการทดสอบฉนวนของสายเคเบิลและปัจจัยที่มีผลต่อค่าพอร์มีทวิตีสัมพัทธ์

3.1 บทนำ

ในวิทยานิพนธ์บทนี้เป็นการศึกษาถึงมาตรฐานและวิธีการทดสอบฉนวนสายเคเบิลในปัจจุบัน เพื่อใช้ในการศึกษาถึงปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อค่าพอร์มีทวิตีสัมพัทธ์ของฉนวนสายเคเบิล ซึ่งจะทำการทดสอบภายใต้สภาวะการทดสอบมาตรฐาน ซึ่งจะเป็วิธีการหาค่าพอร์มีทวิตีสัมพัทธ์ โดยการทดสอบหาค่าคาปาซิแตนซ์และแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก โดยจะทำการศึกษาและทดสอบตัวอย่างสายเคเบิลของฉนวน XLPE ตามมาตรฐาน ICEA S-66-524 และ IEC 60502-2 [3-4] รวมทั้งการศึกษาและทดสอบหาค่าพอร์มีทวิตีสัมพัทธ์ของฉนวน PVC และการศึกษาถึงผลของการเร่งอายุการใช้งานของฉนวนสายเคเบิลจากการทดสอบในลักษณะต่างๆ

3.2 การทดสอบหาค่าคาปาซิแตนซ์ (Capacitance) ของสายเคเบิล

เทคนิคการวัดค่าพลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก ในวัสดุฉนวนหรือในอุปกรณ์อาจหาได้โดยการวัดค่า $\tan\delta$ และค่าคาปาซิแตนซ์ วิธีวัดค่าทั้งสองนี้ทั่วๆ ไปที่ใช้กันมี 2 วิธี คือ วิธีวัตต์มิเตอร์และวิธีบริดจ์ ในที่นี้จะกล่าวแต่เฉพาะวิธีบริดจ์ ซึ่งเหมาะที่จะใช้กับความถี่ในย่านปานกลาง คือ 10 ถึง 10^6 Hz บริดจ์ที่ใช้กันทั่วไปก็คือ Schering bridge ที่ใช้กับความถี่พลังงานตั้งแต่ 50 Hz ถึง 100 kHz Schering bridge วัดคาปาซิแตนซ์และมุมพลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก δ ของคาปาซิเตอร์โดยการเปรียบเทียบกับคาปาซิเตอร์มาตรฐาน ซึ่งเป็นแบบอากาศหรือก๊าซอัด (compressed gas standard capacitor) มีพลังงานสูญเสียเปล่าต่ำที่ความถี่พลังงานหรือความถี่อื่นๆ วงจรของ Schering bridge ดังแสดงในรูปที่ 3.1 [5]



เอกสารรูปที่ 3.1 วงจร Schering bridge ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 3.1

C_1	คือ	คาปาซิแตนซ์ของวัสดุทดสอบหรือที่ต้องการวัด
R_1	คือ	ความต้านทานสมมูลย์กับกำลังสูญเสียเปล่าใน ไดอิเล็กตริก
C_3	คือ	คาปาซิแตนซ์มาตรฐาน
R_3	คือ	ความต้านทานไร้ความเหนี่ยวนำและปรับค่าได้
R_4	คือ	ความต้านทานไร้ความเหนี่ยวนำ
C_4	คือ	คาปาซิแตนซ์ปรับค่าได้
G	คือ	กัลวานอมิเตอร์ความไวสูง

การปรับบริดจ์ให้สมดุลย์ทำได้โดยการปรับค่า R_3 และ R_4 จนกระทั่งเข็มของกัลวานอมิเตอร์ชี้ศูนย์ เมื่อบริดจ์สมดุลย์แล้วจึงเขียนสมการได้ว่า

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{Z_3}{Z_4} \quad (3.1)$$

เมื่อ Z_1 , Z_2 , Z_3 และ Z_4 เป็นอิมพีแดนซ์ของส่วนวงจรแขน I, II, III และ IV ตามลำดับ คือ

$$Z_1 = \frac{R_1}{1 + j\omega C_1 R_1} \quad (3.2)$$

$$Z_2 = \frac{-j}{\omega C_1} \quad (3.3)$$

$$Z_3 = R_3 \quad (3.4)$$

$$Z_4 = \frac{R_4}{1 + j\omega C_4 R_4} \quad (3.5)$$

นั่นคือ
$$\frac{R_1}{R_3(1 + j\omega C_1 R_1)} = \frac{-j}{\omega C_4 R_4} (1 + j\omega C_4 R_4) \quad (3.6)$$

โดยการเทียบค่าจริงจะได้

$$\frac{R_1}{R_3} = \frac{C_4 R_4}{C_1 R_1} \quad (3.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไดอิเล็กตริกคือ ฉนวนไฟฟ้าที่ใช้กันระหว่างอิเล็กโทรดที่มีความต่างศักย์หรือมีแรงดันไม่เท่ากันแฟกเตอร์สูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก $\tan\delta$ ถือเป็นลักษณะสมบัติที่สำคัญประการหนึ่งใน 3 ประการ ไดอิเล็กตริก คือ ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า (dielectric strength) ค่าเพอร์มิทิวิตี (Permittivity, ϵ) และค่าแฟกเตอร์สูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก $\tan\delta$

การตรวจสอบการฉนวนของอุปกรณ์หรือของระบบ ค่าแรงดันเบรกควาน์ถือว่าเป็นขีดจำกัดบน แต่การประเมินผลด้วยวิธีนี้ย่อมทำไม่ได้ เพราะการเกิดเบรกควาน์โดยเฉพาะอย่างยิ่งฉนวนแข็งย่อมหมายถึงความสูญเสียสภาพการฉนวนอย่างสมบูรณ์ ฉนวนจะถูกทำลาย ฉนวนนั้นจะต้องหลีกเลี่ยงการตรวจสอบที่ทำให้เกิดเบรกควาน์แต่จะใช้วิธีการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย (Non destructive test) ไดอิเล็กตริก ที่สมบูรณ์ตามอุดมการณ์นั้นจะต้องไม่มีกำลังไฟฟ้าสูญเสียและค่าคงตัวไดอิเล็กตริก ค่าจริงอาจเขียนได้ว่า

$$\epsilon = \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \quad (3.8)$$

เมื่อ ϵ_r = ค่าเพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์
 ϵ_0 = ค่าเพอร์มิทิวิตีของสุญญากาศ = 8.854×10^{-12} F/m

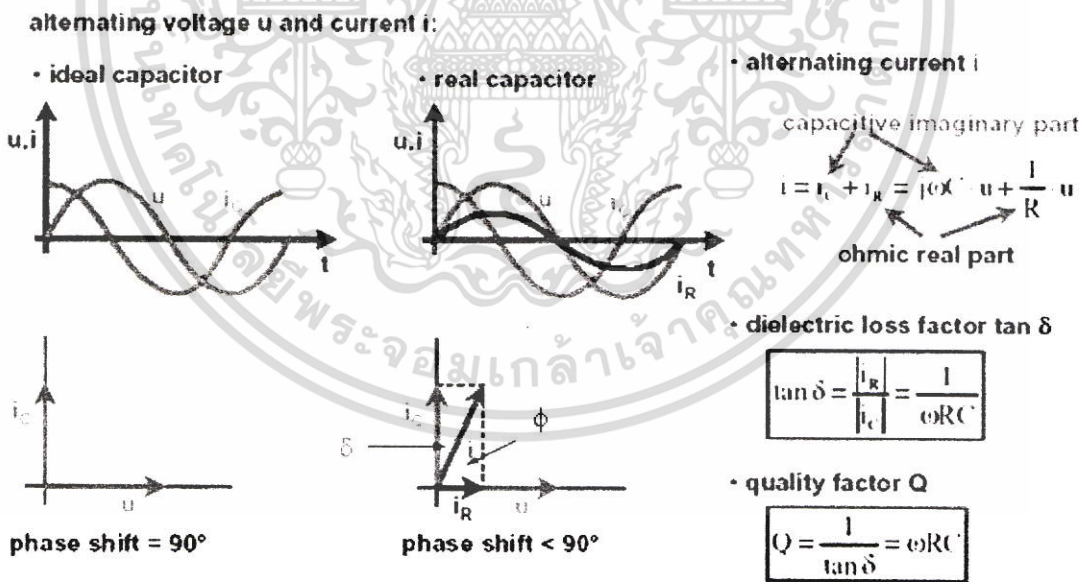
ในทางปฏิบัติฉนวนหรือไดอิเล็กตริก ย่อมมีพลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 3 รูปแบบคือ

- พลังงานสูญเสียเปล่าเนื่องจากสภาพนำไฟฟ้า (condition loss)
- พลังงานสูญเสียเปล่าเนื่องจากโพลาไรเซชัน (polarization loss)
- พลังงานสูญเสียเปล่าเนื่องจากไอโอไนเซชัน (ionization) ในลักษณะของคิสซาร์จบางส่วน (PD : partial discharge)

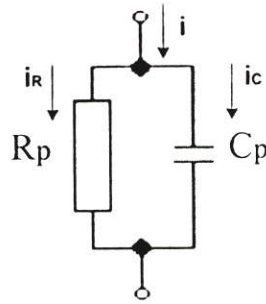
พลังงานสูญเสียเหล่านี้เกิดขึ้นได้ในฉนวนเมื่อป้อนแรงดันเข้าไปและจะแปรสภาพเป็นความร้อนขึ้นภายในฉนวนและจะนำความร้อนได้ดี ดังนั้นความร้อนที่เกิดขึ้นจะระบายออกไปได้ยากและเมื่อพลังงานสูญเสียเพิ่มขึ้นความร้อนก็จะยิ่งเพิ่มขึ้น ถ้าอัตราการระบายความร้อนออกยังสูงกว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของความร้อนก็จะยังอยู่ในสภาพสมดุลไม่เกิดความเสียหายต่อฉนวน แต่ถ้าระบายความร้อนที่เกิดขึ้นออกไปไม่ทัน ความร้อนเพิ่มขึ้นอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึงค่าหนึ่งก็จะทำให้เกิดเบรกควาน์ได้ ฉะนั้นการตรวจสอบคุณภาพของการฉนวนจึงจำเป็นต้องมีการทดสอบหรือวัดพลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก ซึ่งสามารถประเมินผลได้โดยไม่เกิดการทำลายต่อวัสดุทดสอบ

3.3 พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก(Dielectric Loss)

พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก ของฉนวนขึ้นอยู่กับขนาดแรงดันและสภาพแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ เวลาและคุณสมบัติของไดอิเล็กตริกเอง ในฉนวนนอกจากพลังงานสูญเสียเนื่องจากสภาพนำไฟฟ้าแล้วยังมีพลังงานสูญเสียเนื่องจากโพลาไรเซชันและไอออนไนเซชัน จัดเป็นพลังงานสูญเสียทางกลไฟฟ้าเพราะโมเลกุลของไดอิเล็กตริกต้องกลับเข้าไปมาตามการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้า ฉะนั้นค่าคงตัวไดอิเล็กตริกจะมีใช้แต่ค่าจริงอย่างเดียวหากแต่มีจินตภาพด้วย ถ้าป้อนแรงดันในรูปคลื่นไซน์ให้กับคาปาซิเตอร์ที่สมบูรณ์ กระแสที่ไหลผ่านคาปาซิเตอร์จะมีเฟสนำหน้าแรงดันเป็นมุม 90 องศา ซึ่งในทางปฏิบัติกระแสที่ไหลจะนำหน้าแรงดันน้อยกว่า 90 องศา เพราะมีพลังงานสูญเสียที่สูญเสียไปในรูปของค่าความต้านทาน ซึ่ง ϕ จะเป็นมุมเฟสของคาปาซิเตอร์ เพราะฉะนั้น δ จึงเป็นมุมพลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกหรือ $\delta = 90^\circ - \phi$ (loss angle) ดังนั้นพาวเวอร์แฟกเตอร์เท่ากับ $\cos \phi$ หรืออีกทางหนึ่งเท่ากับ $\sin \delta$ ฉะนั้นแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกจึงเป็น $\tan \delta$ (loss tangent) ซึ่งกระแส I จะแบ่งเป็นสองส่วนคือกระแสแอคทีฟ (i_R) ไหลผ่าน R และกระแสรีแอคทีฟ (i_C) ไหลผ่าน C จึงเขียนแทนด้วยวงจรมูลได้ดังรูปที่ 3.3 ซึ่งมักจะพบว่าวงจรเสมือนของไดอิเล็กตริกที่มีความสูญเสียอยู่ในรูปวงจรมูล โดยค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกสำหรับวงจรมูลจะได้ $\tan \delta = 1 / \omega C_p R_p$ [5]



รูปที่ 3.2 แรงดันสลับและกระแสในคาปาซิเตอร์ในไดอิเล็กตริก



รูปที่ 3.3 วงจรสมมูลของไดอิเล็กตริกแบบขนาน

ซึ่งพลังงานสูญเสียประกอบด้วยองค์ประกอบทั้ง 3 ส่วนตามที่กล่าวแล้วคือ

$$P_{\text{loss}} = P_{\sigma} + P_r + P_c \quad (3.9)$$

เมื่อ P_r = พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก
 P_{σ} = พลังงานสูญเสียเปล่าเนื่องจากสภาพนำไฟฟ้าของฉนวน
 P_c = พลังงานสูญเสียเปล่าเนื่องจากโพลาไรเซชัน
 P_i = พลังงานสูญเสียเปล่าเนื่องจากไอออนไนเซชัน

δ เป็นมุมระหว่างกระแสรวมผ่านไดอิเล็กตริกกับกระแสเอกทิฟ ฉะนั้นพลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก จะเขียนได้ว่า

$$P_i = \omega * C * U^2 * \tan \delta \quad (3.10)$$

เมื่อ C = คือค่าความจุไฟฟ้าของวัสดุทดสอบ

U = คือแรงดันที่ป้อนที่ความถี่

กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก ของวัสดุหรืออุปกรณ์ใดๆ ที่ใช้งานกับแรงดันกระแสสลับสามารถ คำนวณหรือประมาณค่าที่แรงดันใช้งาน U ใดๆ ได้จากสมการ $P_i = \omega * C * U^2 * \tan \delta$ ซึ่งจำเป็นต้องทราบค่าความจุไฟฟ้า C และแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่า $\tan \delta$ ทั้งสองค่านี้ สามารถวัดได้ด้วยอุปกรณ์ที่เรียกว่า Schering Bridge

3.4 มาตรฐานและหัวข้อการทดสอบ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาและทดสอบฉนวน XLPE ของสายส่งและสายเคเบิลใต้ดินขนาดต่างๆ โดยทำการทดสอบตามมาตรฐานของประเภทสายเคเบิลนั้นๆ รวมทั้งการทดสอบตามข้อกำหนดของการไฟฟ้า (MEA.) เพื่อใช้ในการศึกษาถึงปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อค่าเพอร์มิทิวตี้สัมพัทธ์ของฉนวนสายเคเบิล ซึ่งจะทำการทดสอบภายใต้สภาวะการทดสอบตามมาตรฐาน โดยจะเป็นวิธีการคำนวณหาค่าเพอร์มิทิวตี้สัมพัทธ์ จากการทดสอบวัดหาค่าคาปาซิแตนซ์และแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก ซึ่งจะทำการศึกษาและทดสอบตัวอย่างของฉนวน XLPE ของสายส่งขนาดต่างๆ ตามมาตรฐาน ICEA S-66-524 และสายเคเบิลใต้ดินขนาดต่างๆ ตามมาตรฐาน IEC 60502-2 รวมทั้งการศึกษาค่าเพอร์มิทิวตี้สัมพัทธ์ของฉนวน PVC และการศึกษาถึงผลของการเร่งอายุการใช้งานของฉนวนสายเคเบิลจากการทดสอบในลักษณะต่างๆ โดยมีมาตรฐานและรายละเอียดในแต่ละหัวข้อของการทดสอบดังต่อไปนี้

3.4.1 การทดสอบตามมาตรฐาน ICEA S-66-524

ในวิทยานิพนธ์นี้จะเป็นการทดสอบตัวอย่างของสาย 25 kV Spaced Aerial Cable Aluminum Stranded Conductor XLPE Insulated and Sheathed (25 kV-CC) ซึ่งในการทดสอบของสายเคเบิลประเภทนี้ ตามมาตรฐานจะมีการทดสอบอยู่สองหัวข้อคือ

3.4.1.1 การทดสอบในหัวข้อ Capacity and Power Factor

หัวข้อนี้จะเป็นการทดสอบหาค่าคาปาซิแตนซ์และพลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก ที่อุณหภูมิสถานะปรกติ โดยแรงดันและระยะเวลาขั้วสายที่ทำการทดสอบจะขึ้นอยู่กับพิกัดแรงดันของสายเคเบิลที่นำมาทดสอบ โดยสายเคเบิลที่นำมาทดสอบนั้นต้องมีพิกัดแรงดันของสายไม่ต่ำกว่า 5001 โวลท์ ซึ่งระยะเวลาขั้วสายที่นำมาทดสอบเท่ากับ 13 ฟุต (3.96 เมตร) และถ้าสายที่นำมาทดสอบมีพิกัดแรงดันตั้งแต่ 15,000 โวลท์ขึ้นไปจะต้องใช้สายในการทดสอบ 17 ฟุต (5.18 เมตร) โดยสายที่นำมาทดสอบนั้นต้องทำการแช่ไว้ในน้ำเป็นเวลา 1 วัน ก่อนทำการทดสอบ เพื่อให้หน้าเป็นสื่อนำกระแสที่ไหลผ่านฉนวนไปยังเครื่องมือทดสอบ และปลายสายจะต้องอยู่เหนือระดับน้ำข้างละ $2\frac{1}{2}$ ฟุต (0.76 เมตร) ตามมาตรฐานเพื่อป้องกันการเกิดลิกเกต (leakage) โดยผลของการทดสอบนั้นค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก ($\tan \delta$) ต้องมีค่าไม่เกิน 2 % และค่าเพอร์มิทิวตี้สัมพัทธ์ของฉนวนสายเคเบิลจะต้องมีค่าไม่เกิน 3.5 ตามมาตรฐานที่กำหนดไว้ [3]

3.4.1.2 การทดสอบในหัวข้อ Accelerated Water Absorption

ในหัวข้อนี้เป็นการทดสอบในลักษณะของการเร่งอายุการใช้งาน โดยวิธีการต้มสายเคเบิล โดยจะทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 75 ± 1 °C เป็นระยะเวลา 14 วัน โดยสายเคเบิลที่นำมาทดสอบต้องมีความหนาของฉนวนไม่น้อยกว่า 1.14 mm (ประมาณ 45 mils) โดยระยะเวลาขั้วสายในการ

ทดสอบที่ 15 ฟุต (4.57 เมตร) ตามมาตรฐาน ซึ่งจะต้องทำการดัมสายทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 1 วัน ก่อนทำการทดสอบ เพื่อให้หน้าเป็นสื่อนำกระแสที่ไหลผ่านจนวนไปยังเครื่องมือทดสอบ และปลายสายจะต้องอยู่เหนือระดับน้ำข้างละ $2\frac{1}{2}$ ฟุต (0.76 เมตร) ตามมาตรฐานเพื่อป้องกันการเกิดลิกเกต (leakage) ดังนั้นระยะในการทดสอบจริงจะเป็นที่ระยะความยาว 10 ฟุต (3.05 เมตร) และในการทดสอบนี้ต้องมีโพลลอยหรือภาชนะปิดเพื่อป้องกันไอน้ำขึ้นมาจับบริเวณสายที่ไม่ได้ทำการทดสอบ ซึ่งอาจจะทำให้เกิดความชื้นและทำให้ค่าที่ทดสอบนั้นเกิดความผิดพลาด สำหรับแรงดันที่ใช้ในการทดสอบจะทำการทดสอบที่แรงดัน 40 V/mil และ 80 V/mil ซึ่งจะทำการทดสอบในวันที่ 1, 7 และ 14 โดยผลของการทดสอบที่ได้นั้นเปอร์เซ็นต์ในการเพิ่มขึ้นของค่าคาปาซิแตนซ์ในวันที่ 7-14 จะต้องมีค่าไม่เกินกว่า 1.5 % และเปอร์เซ็นต์ในการเพิ่มขึ้นของค่าคาปาซิแตนซ์ในวันที่ 1-14 จะต้องมีค่าไม่เกินกว่า 3 % และค่าเพอร์มิทวิตีตีสัมพัทธ์ของฉนวนสายเคเบิลจะต้องมีค่าไม่เกิน 3.5 ตามมาตรฐานที่กำหนดไว้ [3]

ข้อควรทราบ สาย 25 kV Spaced Aerial Cable Aluminum Stranded Conductor XLPE Insulated and Sheathed (25 kV-CC) รัศมี r_1 คือ รัศมีของตัวนำ (รวม conductor shield) r_2 คือ รัศมีของฉนวนรวมเปลือกชั้นนอกเนื่องจากเป็นวัสดุชนิดเดียวกันและผ่านขั้นตอนการผลิตจนเป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งในทางปฏิบัติจะถือว่าเป็นชั้นของฉนวนด้วย



รูปที่ 3.4 สาย 25 kV Spaced Aerial Cable Aluminum Stranded Conductor XLPE Insulated and Sheathed (25 kV-CC)

3.4.2 การทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60502-2

ในวิทยานิพนธ์นี้จะเป็นการทดสอบตัวอย่างของสาย 12/20 kV. Underground Cable Copper Stranded Conductor XLPE Insulated and PE Sheathed (12/20 kV-CE) ซึ่งในการทดสอบของสายเคเบิลประเภทนี้ ในปัจจุบันจะทำการทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60502-2 (1998) ซึ่งในการทดสอบของตัวอย่างสายนี้จะมีการทดสอบตามข้อกำหนดของการไฟฟ้านครหลวงด้วย โดยกำหนดให้จะต้องทำการทดสอบตาม MEA's Specification No.418 ซึ่งจะต้องทำการทดสอบตามมาตรฐานเอกสาร IEC 502 (1994) งามไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

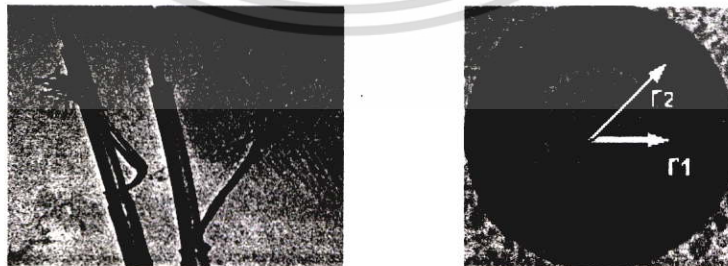
3.4.2.1 การทดสอบในหัวข้อ Tan δ Measurement ตามมาตรฐาน IEC 60502-2 (1998)

ในการทดสอบหัวข้อ tan δ Measurement ตามมาตรฐาน IEC 60502-2 สายเคเบิลที่นำมาทดสอบจะต้องมีพิกัดแรงดันของสายไม่ต่ำกว่า 6/10 (12) kV โดยระยะความยาวสายที่นำมาทดสอบจะต้องอยู่ในช่วง 10 – 15 เมตร ซึ่งตามมาตรฐานนั้นจะมีวิธีการทดสอบอยู่ 3 วิธี คือ วิธีการต้ม (A Tank of Liquid), วิธีการอบ (Air Oven) และวิธีการจ่ายกระแส (Heating Current) โดยการทดสอบที่อุณหภูมิสูงกว่าสภาวะการทำงานปกติ 5 °C – 10 °C หรือประมาณ 95 °C – 100 °C (จนวน XLPE อุณหภูมิการใช้งานตามพิกัดของสายเท่ากับ 90 °C) โดยทำการทดสอบที่แรงดันไม่ต่ำกว่า 2 kV โดยผลของการทดสอบที่ได้นั้นค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก (tan δ) จะต้องมีค่าไม่เกินกว่า 80×10^{-4} [4]

3.4.2.2 การทดสอบในหัวข้อ Tan δ Measurement ตามมาตรฐาน IEC 502 (1994)

สำหรับในการทดสอบนี้ตัวอย่างของสายที่นำมาทดสอบจะมีพิกัดแรงดันและระยะความรวมทั้งวิธีการทดสอบเป็นไปตามหัวข้อ 3.4.2.1 แต่จะแตกต่างกันในสภาวะของการทดสอบซึ่งจะทำการทดสอบในอุณหภูมิสภาวะปกติ โดยทำการทดสอบที่แรงดัน 2 kV, 0.5U_o, U_o, และ 2U_o โดยผลของการทดสอบที่ได้นั้นค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก (tan δ) ที่แรงดันทดสอบ 2 kV และ U_o จะต้องมีค่าไม่เกินกว่า 40×10^{-4} และเปอร์เซ็นต์ในการเพิ่มขึ้นของค่า tan δ ที่แรงดันทดสอบ 0.5U_o และ 2U_o จะต้องมีค่าไม่เกินกว่า 20×10^{-4}

ข้อควรทราบ สาย 12/20 kV, Underground Cable Copper Stranded Conductor XLPE Insulated and PE Sheathed (12/20 kV-CE) รัศมี r_1 คือ รัศมีของตัวนำ (รวม conductor shield) r_2 คือ รัศมีของฉนวน (ไม่รวม insulation shield)



รูปที่ 3.5 สาย 12/20 kV, Underground Cable Copper Stranded Conductor XLPE Insulated and PE Sheathed (12/20 kV-CE)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.3 การทดสอบฉนวน PVC ของสายเคเบิลแรงต่ำ

ในการทดสอบฉนวน PVC ของสายเคเบิล โดยวิธีการทดสอบหาค่าคาปาซิแตนซ์และค่าแฟลคเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกตามมาตรฐานนั้น จะเป็นการทดสอบฉนวน PVC ของสายเคเบิลแรงสูง โดยทำการทดสอบตามมาตรฐาน IEC 502 (1994) ซึ่งปัจจุบันในการทดสอบนั้นจะใช้มาตรฐาน IEC 60502-2 ซึ่งจะไม่มีการทดสอบในหัวข้อดังกล่าว รวมทั้งภาคอุตสาหกรรมต่างๆ ก็ไม่มีการผลิตสายเคเบิลแรงสูงที่หุ้มด้วยฉนวน PVC โดยในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการทดสอบฉนวน PVC ของสายเคเบิลแรงต่ำ เพื่อใช้เป็นแนวทางในการศึกษาถึงผลของฉนวน PVC ว่ามีผลต่อค่าเพอร์มิททิวิตีสัมพัทธ์อย่างไรเมื่อทำการเปรียบเทียบกับฉนวน XLPE เมื่อทำการทดสอบที่อุณหภูมิต่างๆ ซึ่งตัวอย่างสายในการทดสอบของงานวิจัยนี้จะเป็นสาย 300 V 2-core PVC Insulated and Sheathed, Flat Type โดยวิธีการทดสอบนั้นจะทำการทดสอบ โดยอ้างอิงวิธีการทดสอบตามมาตรฐาน ICEA S 66-524

ข้อควรทราบ สาย 300 V 2-core PVC Insulated and Sheathed, Flat Type ซึ่งเป็นสายสองตัวนำ(Twin Conductor) ซึ่งในทางปฏิบัติจะต้องทำการลอกเปลือกที่หุ้มฉนวน (Sheath) ออกก่อนนำมาทดสอบ และจึงทดสอบฉนวนที่หุ้มในแต่ละตัวนำนั้นๆ ซึ่งจะเป็นวิธีการทดสอบโดยทั่วไปของสายที่มีฉนวนและเปลือกหุ้มเป็นวัสดุชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดกัน แต่ไม่ได้ผ่านขบวนการหุ้มสายเป็นเนื้อเดียวกัน (เหมือนตัวอย่างสายในหัวข้อ 3.4.4)



รูปที่ 3.6 สาย 300 V 2-core PVC Insulated and Sheathed, Flat Type

3.4.4 การทดสอบเร่งอายุการใช้งานของฉนวนสายเคเบิลในลักษณะต่างๆ

เป็นการทดสอบเพื่อศึกษาลักษณะการเร่งอายุการใช้งานของฉนวนสายเคเบิลในลักษณะต่างๆ เพื่อตรวจสอบคุณภาพของฉนวนก่อนนำไปใช้งานและทดสอบสภาพหลังการใช้งานตามสภาวะสิ่งแวดล้อมและอายุการใช้งาน เช่น อุณหภูมิที่เกิดขึ้นเนื่องจากความร้อนตามธรรมชาติหรือจากสภาวะการใช้งาน ซึ่งในมาตรฐานจะมีวิธีการทดสอบอยู่ 3 วิธี คือ วิธีการต้ม (A Tank of Liquid) วิธีการอบ (Air Oven) และวิธีการจ่ายกระแส (Heating Current) ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาและทดสอบตัวอย่างสาย 0.6/1 kV, Copper Cable Twin Conductor Cross-linked Polyethylene Insulated and Polyethylene Sheathed ในลักษณะของ 3 วิธี ดังกล่าว เพื่อศึกษาผลจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 สาย 0.6/1 kV. Copper Cable Twin Conductor Cross-linked Polyethylene Insulated and Polyethylene Sheathed

3.5 ข้อมูลในการทดสอบต่างๆ ของฉนวนสายเคเบิล

ในการทดสอบให้ได้ผลการทดสอบที่ถูกต้องนั้น จำเป็นต้องทำการศึกษาและเก็บข้อมูลในส่วนต่างๆ ทั้งในด้าน โครงสร้างและฟิสิกส์ของฉนวนสายเคเบิลที่นำมาทดสอบ ซึ่งในการทราบข้อมูลต่างๆ เหล่านี้ สามารถนำมาช่วยในการหาค่าและวิเคราะห์ผลการทดสอบให้ได้ค่าที่ถูกต้อง

3.5.1 การตรวจวัดโครงสร้าง

ในการตรวจวัดทางด้าน โครงสร้างเป็นสิ่งจำเป็นในการทดสอบหาค่าเพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์ของฉนวนสายเคเบิล เนื่องจากเป็นตัวแปรหนึ่งที่ใช้ในการคำนวณหาค่าเพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในชั้นของฉนวนซึ่งจะเป็นตัวกำหนดแรงดันในการทดสอบ ถึงแม้ความหนาของฉนวนในแต่ละขนาดของสายเคเบิล จะถูกออกแบบให้สามารถทนแรงดันได้เท่ากันแต่ในส่วนของ การผลิตนั้นจะต้องเผื่อค่าต่างๆ ให้มีค่าไม่ต่ำกว่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ ดังนั้นเพื่อให้การทดสอบ และผลของการทดสอบ ได้ค่าที่ถูกต้อง จะต้องทำการตรวจวัดส่วนต่างๆ ทั้งหมด ตั้งแต่ในส่วนของตัวนำ ชั้นของวัสดุกึ่งตัวนำ ฉนวนจนกระทั่งถึงเปลือกหุ้มชั้นนอกสุด ซึ่งก็ขึ้นอยู่กับลักษณะของสายเคเบิลแต่ละประเภท และเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดนั้นต้องเป็นเครื่องมือที่ผ่านการตรวจสอบมาตรฐานว่ามีความถูกต้องแม่นยำและมีความละเอียดสูง



เอกสารรูปที่ 3.8 เครื่องตรวจวัดโครงสร้างของฉนวนสายเคเบิลนั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.2 การทดสอบทางด้านฟิสิกส์

ในการทดสอบทางด้านฟิสิกส์เพื่อศึกษาและเก็บข้อมูล ทางด้านคุณสมบัติต่างๆ ของฉนวนที่นำมาทดสอบ ซึ่งข้อมูลในการทดสอบทางด้านฟิสิกส์นั้นจะมีความสัมพันธ์กับการทดสอบทางด้านไฟฟ้า เพราะจะเป็นแนวทางในการวิเคราะห์ถึงผลการทดสอบให้มีความถูกต้องและน่าเชื่อถือ ซึ่งในการทดสอบทางด้านฟิสิกส์ก็จะมีหัวข้อการทดสอบต่างๆ ที่มีความสอดคล้องในงานวิจัยนี้ เช่น การทดสอบในหัวข้อ Water Absorption Test ซึ่งเป็นการทดสอบของชิ้นตัวอย่างฉนวน เพื่อดูการดูดซึมน้ำของฉนวนว่ามวลที่เพิ่มขึ้นนั้นมีค่าเกินกว่ามาตรฐานหรือไม่และมากน้อยอย่างไร ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับการทดสอบในหัวข้อ 3.4.1.2 ซึ่งในการทดสอบต่างๆ ทางด้านฟิสิกส์ตามหัวข้อใดบ้างนั้นก็ขึ้นอยู่กับสายเคเบิลที่นำมาทดสอบตามมาตรฐานนั้นๆ



รูปที่ 3.9 การทดสอบฉนวน XLPE ของสายเคเบิลในหัวข้อ Water Absorption Test

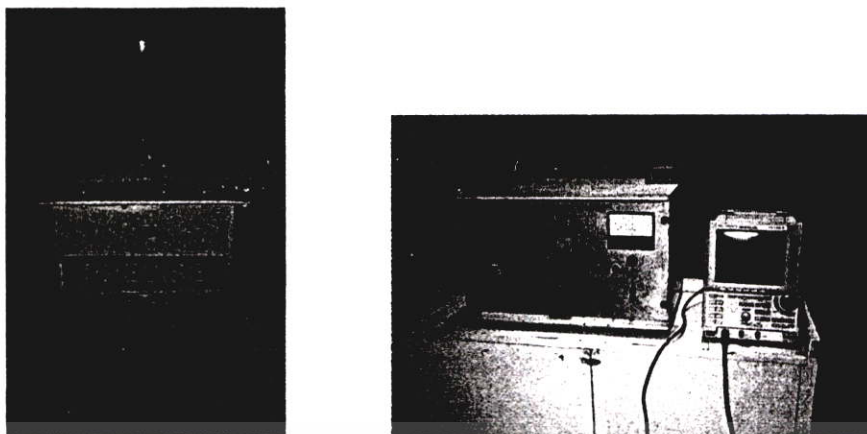
3.6 อุปกรณ์และการควบคุมการทดสอบ

การทดสอบหาค่าเพอร์มิทิวตี้สัมพัทธ์ตามมาตรฐาน ICEA S-66-524 และ IEC 60502-2 นอกจากการทราบข้อมูลต่างๆ ของสายเคเบิลที่นำมาทดสอบแล้ว เครื่องมือที่นำมาทดสอบต้องได้มาตรฐานและมีการศึกษาการใช้งานของอุปกรณ์ต่างๆ ให้ถูกต้อง อีกทั้งต้องควบคุมเงื่อนไขต่างๆ ให้เป็นไปตามข้อกำหนดของมาตรฐาน เพื่อให้ได้ผลการทดสอบที่ถูกต้องและน่าเชื่อถือ

3.6.1 แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

เพื่อหลีกเลี่ยงความผิดพลาดในการวัด การวัดแรงดันจะต้องไม่มีฮาร์โมนิกส์ใดๆ ทั้งสิ้น ดังนั้นรูปร่างของสัญญาณจะต้องไม่มีฮาร์โมนิกส์ปนเข้ามาด้วย ถ้าหากแหล่งจ่ายแรงดันมีฮาร์โมนิกส์อยู่ซึ่งจะมีผลต่อค่าความจุของวัสดุฉนวนและค่าความจุมาตรฐาน ซึ่งตัวนี้จะขึ้นอยู่กับ order ของฮาร์โมนิกส์ของแหล่งจ่ายแรงดัน เพื่อป้องกันวัสดุทดสอบจากฮาร์โมนิกส์ที่ไม่ต้องการ ก็ควรจะเลือกใช้วงจรรีโซแนนซ์สำหรับแหล่งจ่ายแรงดัน

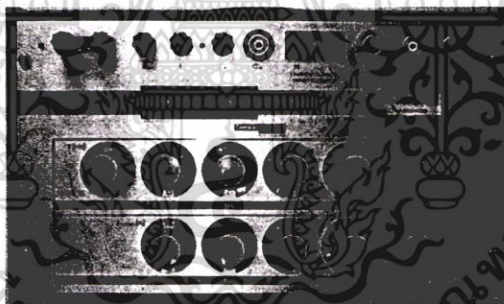
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 แหล่งจ่ายแรงดันกระแสสลับ 100 kV และชุดควบคุมแรงดันในการทดสอบ

3.6.2 เครื่องวัดค่าคาปาซิแตนซ์และแฟคเตอร์พลังงานสูญเปล่าไดอิเล็กตริก

การทดสอบหาค่าเพอร์มิทิวทิวิตีสัมพัทธ์ในงานวิจัยนี้ ได้ใช้เครื่องวัดค่าคาปาซิแตนซ์และพลังงานสูญเปล่าไดอิเล็กตริก Tettex AG รุ่น 2805 ในการทดสอบซึ่งเป็นรุ่นที่สามารถนำไปทดสอบตามสถานที่ต่างๆ ได้สะดวก และง่ายต่อการใช้งาน และเป็นเครื่องมือที่ผ่านการตรวจสอบมาตรฐาน



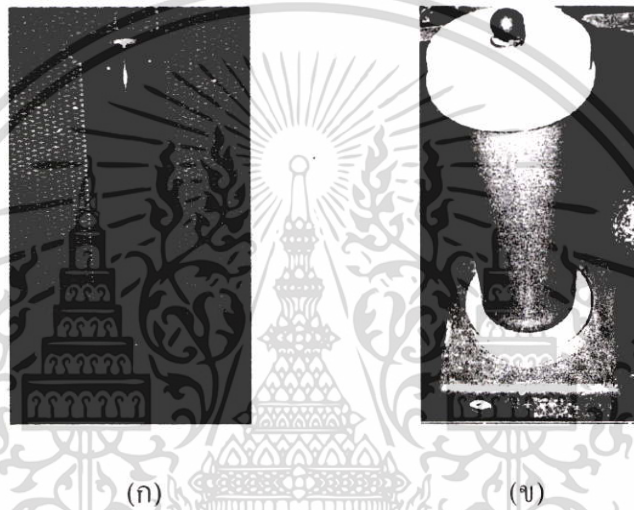
รูปที่ 3.11 เครื่องวัดค่าคาปาซิแตนซ์และพลังงานสูญเปล่าไดอิเล็กตริก Tettex AG รุ่น 2805



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้เพื่อใช้ในการวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถนำไปเผยแพร่หรือใช้เพื่อวัตถุประสงค์อื่นใดได้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์
รูปที่ 3.12 การทดสอบเทียบเครื่องวัดค่าคาปาซิแตนซ์และแฟคเตอร์พลังงานสูญเปล่าไดอิเล็กตริก
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6.3 คาปาซิเตอร์มาตรฐาน

คาปาซิเตอร์มาตรฐานซึ่งเป็นแบบอากาศหรือก๊าซเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการเปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดคาปาซิแตนซ์และพลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก ดังนั้นจำเป็นต้องทราบถึงค่าความจุของคาปาซิเตอร์มาตรฐานในรุ่นที่นำมาใช้งาน ซึ่งการทดสอบของงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการของภาควิชาไฟฟ้าและตามภาคอุตสาหกรรมต่างๆ โดยคาปาซิเตอร์มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบนั้นมีอยู่สองรุ่น คือ คาปาซิเตอร์มาตรฐานของ Tettex รุ่น 3370 ชนิดอ็อกซิเจนซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ขนาด 99.91 pF และคาปาซิเตอร์มาตรฐานของ Tettex รุ่น 3380 ชนิดอ็อกซิเจนซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ขนาด 100 pF



รูปที่ 3.13 คาปาซิเตอร์มาตรฐาน

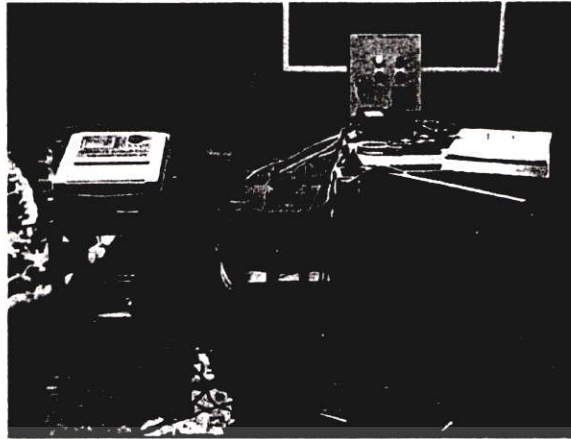
(ก) คาปาซิเตอร์มาตรฐานของ Tettex รุ่น 3370 ขนาดความจุ 99.91 pF

(ข) คาปาซิเตอร์มาตรฐานของ Tettex รุ่น 3380 ขนาดความจุ 100 pF

3.6.4 การควบคุมการทดสอบ

ในการควบคุมเงื่อนไขต่างๆ ในการทดสอบให้ได้ผลการทดสอบที่ถูกต้องนั้น นอกจากการตรวจสอบทางด้านโครงสร้าง ฟิสิกส์ และอุปกรณ์ต่างๆ ห้องที่ทำการทดสอบนั้นต้องปราศจากสัญญาณรบกวน ความชื้นสัมพัทธ์ที่มีค่าสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งการควบคุมอุณหภูมิของฉนวนขณะทดสอบให้ได้ค่าที่ถูกต้อง ซึ่งต้องอาศัยเทคนิคและอุปกรณ์ต่างๆ ในการควบคุมการทดสอบ เช่น เครื่องตรวจวัดอุณหภูมิชนิดต่างๆ เครื่องบันทึกอุณหภูมิทั้งแบบอนาล็อกและดิจิทัล การควบคุมกระแสหรือการหุ้มใยแก้วเพื่อรักษาอุณหภูมิของฉนวนขณะทดสอบ ซึ่งเทคนิคในการควบคุมต่างๆ ขึ้นอยู่กับลักษณะของการทดสอบในแต่ละวิธี

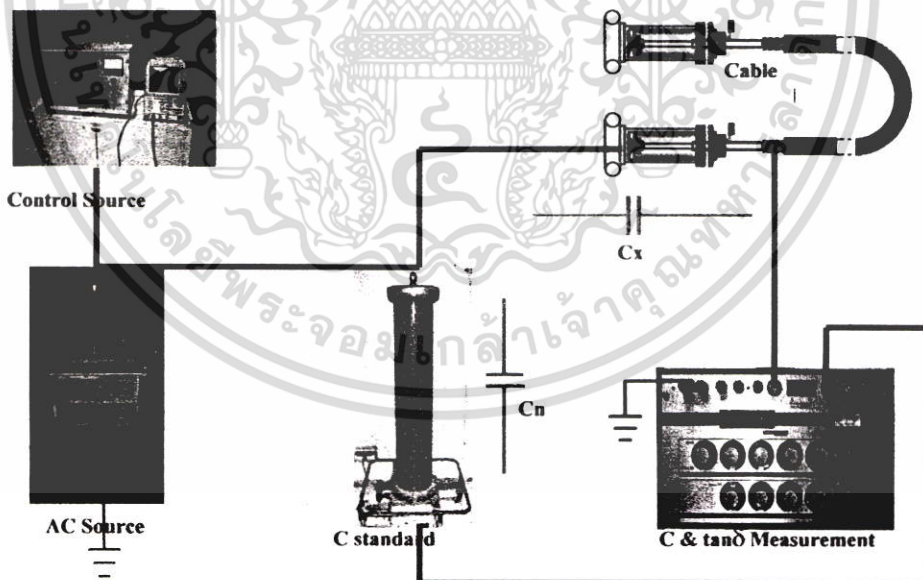
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.14 การควบคุมอุณหภูมิของฉนวนที่ทดสอบโดยวิธีการจ่ายกระแส

3.7 วิธีและขั้นตอนการทดสอบ

1. ตรวจสอบไฟเลี้ยงเครื่องมือวัดค่าคาปาซิแตนซ์และค่าพลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกของ Tetex AG รุ่น 2805 ว่ามีหรือไม่โดยปรับไปที่สวิตช์ปรับค่าความแม่นยำการวัด โดยหมุนไปที่ตำแหน่งเซ็คเบตเตอร์ ถ้ามีไฟเลี้ยงพอ เข็มบนหน้าปัดนิวคลอนดิเคเตอร์จะเคลื่อนไปที่ค่า 100
2. ต่อวงจรดังรูปที่



รูปที่ 3.15 วงจรทดสอบหาค่าคาปาซิแตนซ์และค่าพลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก

3. ปรับสวิตช์ค่าแฟคเตอร์ผลคูณของค่าคาปาซิแตนซ์ของวัสดุทดสอบให้อยู่ที่ค่า $I_{max} = 50 \text{ A}$ (ค่ากระแสสูงสุดที่เครื่องมือวัดสามารถทนได้โดยไม่ทำความเสียหายแก่เครื่องมือวัด) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ปรับสวิตช์ค่าความแม่นยำการวัดให้มาอยู่ที่สแต็ปแรกซึ่งมีระดับความแม่นยำต่ำสุด (สแต็ปค่าความแม่นยำมี 7 สแต็ป)
5. ป้อนโวลต์เดจเข้าวงจรที่ทดสอบ
6. ปรับสวิตช์เฟคเตอร์ตัวคูณค่าคาปาซิแตนซ์ของวัสดุทดสอบและสวิตช์ปรับค่าคาปาซิแตนซ์ของวัสดุทดสอบ รวมทั้งปรับสวิตช์เฟคเตอร์ตัวคูณของแฟคเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกและสวิตช์ปรับค่าแฟคเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก โดยปรับเข็มnulอินดิเคเตอร์ชี้ที่ 0
7. เพิ่มระดับความแม่นยำในการวัดไปสแต็ปที่ 2 และปรับค่าคาปาซิแตนซ์และค่าพลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกตามข้อ 6 จนถึงระดับความแม่นยำในการวัดสแต็ปสุดท้าย (สแต็ปที่ 7)
8. บันทึกค่าคาปาซิแตนซ์และค่าพลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกที่อ่านได้จากผลการปรับข้อ 7 ไปคำนวณหาค่าคาปาซิแตนซ์และค่าพลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกของวัสดุทดสอบ และบันทึกผลลงในตาราง

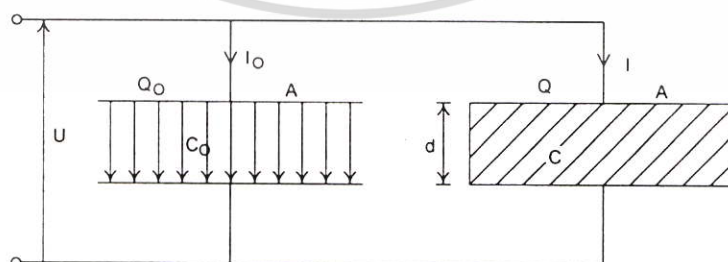
ค่าคาปาซิแตนซ์ = ค่าคาปาซิแตนซ์มาตรฐาน \times ค่าที่อ่านได้จากการปรับ

$$C_X = C_N \cdot F_{CN} \cdot C_X \text{ (ที่อ่านได้จากการปรับ)}$$

ค่าแฟคเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกของวัสดุทดสอบ = ค่าที่อ่านได้จากการปรับ

$$\tan \delta = F \tan \delta \cdot \tan \delta \text{ (ที่อ่านได้จากการปรับ)}$$

9. นำค่าคาปาซิแตนซ์ที่ได้ไปคำนวณหาค่าเพอร์มิททิวิตีสัมพัทธ์และบันทึกผลลงในตาราง โดยสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ของคาปาซิแตนซ์ $C = \frac{Q}{U}$ ตามวงจรเพอร์มิททิวิตีและคาปาซิแตนซ์ เมื่ออิเล็กโตรดมีลักษณะเป็นทรงกระบอกซ้อนกันและมีแกนร่วม จะสามารถคำนวณหาค่าคาปาซิแตนซ์ระหว่างทรงกระบอกซ้อนกันแกนร่วมได้จาก [5]



รูปที่ 3.16 วงจรเพอร์มิททิวิตีและคาปาซิแตนซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0 \epsilon_r l}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (3.11)$$

และค่าเพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์ของฉนวนเคเบิลได้จาก

$$\epsilon_r = \frac{C \times \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right)}{2\pi\epsilon_0 l} \quad (3.12)$$

เมื่อ

ϵ_r คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกหรือเพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์ของฉนวน

ϵ_0 คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของสุญญากาศมีค่าเท่ากับ 8.854×10^{-12} F/m

r_1 คือ รัศมีของตัวนำ (รวม conductor shield ถ้ามี)

r_2 คือ รัศมีของฉนวน (ไม่รวม insulation shield)

l คือ ระยะความยาวสายเคเบิล (เมตร)

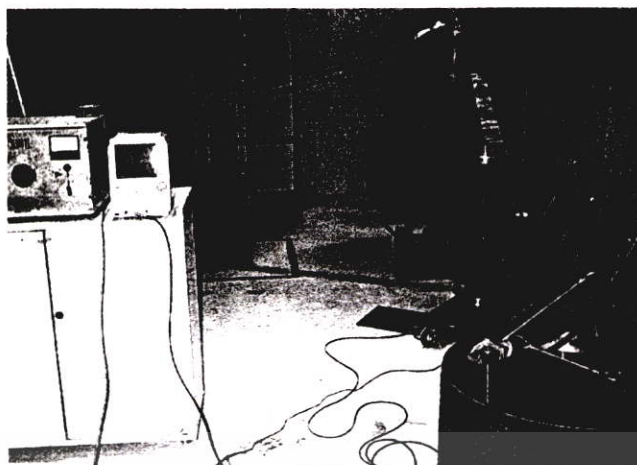
3.8 การทดสอบและผลการทดสอบ

ผลการทดสอบหาค่าเพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์ของตัวอย่างฉนวน XLPE ของสายส่งขนาดต่างๆ ตามมาตรฐาน ICEA S-66-524 และสายเคเบิลใต้ดินขนาดต่างๆ ตามมาตรฐาน IEC 60502-2 รวมทั้งการศึกษาและทดสอบตัวอย่างฉนวน PVC ของสายแรงต่ำและผลจากการเร่งอายุการใช้งานของฉนวน XLPE ในลักษณะต่างๆ โดยทำการทดสอบในหัวข้อต่างๆ ตามมาตรฐานในหัวข้อ 3.4

3.8.1 ผลการทดสอบในหัวข้อ Capacity and Power Factor (ICEA S-66-524)

ผลการทดสอบตัวอย่างสาย 25 kV Spaced Aerial Cable Aluminum Stranded Conductor XLPE Insulated and Sheathed (25 kV-CC) ขนาด 35 mm^2 70 mm^2 185 mm^2 และ 240 mm^2 ที่ระยะความยาวสายในการทดสอบ 17 ฟุต (5.18 เมตร) ตามพิกัดแรงดัน ระยะความยาวสายที่เข้าน้ำขณะทดสอบ 12 ฟุต (3.66 เมตร) ที่อุณหภูมิห้องทดสอบ $32 \text{ }^\circ\text{C}$ และอุณหภูมิน้ำขณะทดสอบ $28 \pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ โดยใช้คาปาซิเตอร์มาตรฐานของ Tetex รุ่น 3370 ขนาด 99.91 pF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.17 การทดสอบหาค่า ϵ_r ของฉนวน XLPE ในหัวข้อ Capacity and Power Factor Tests

ตารางที่ 3.1 ผลการทดสอบหาค่า ϵ_r ของฉนวน XLPE ในหัวข้อ Capacity and Power Factor Tests

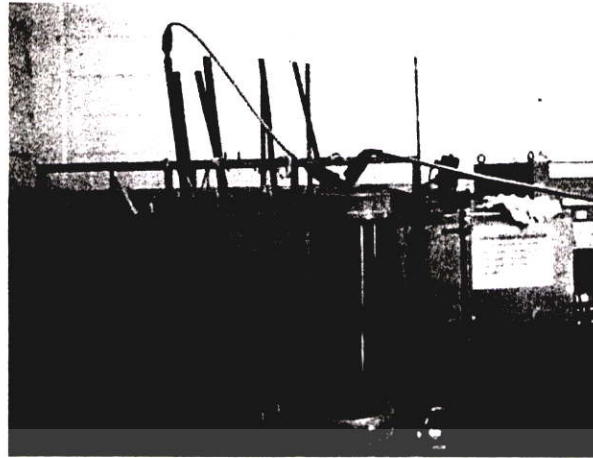
Size (mm ²)	Test Voltage (kV)	r_1 (mm.)	r_2 (mm.)	Cx (pF)	Tan δ	ϵ_r
35	25	3.980	10.620	477.57	2.3×10^{-4}	2.303
70	25	5.315	12.370	554.50	2.35×10^{-4}	2.302
185	25	8.595	14.890	852.23	2.2×10^{-4}	2.304
240	25	9.705	16.425	890.20	2.3×10^{-4}	2.301

จากผลการทดสอบสาย 25 kV Spaced Aerial Cable Aluminum Stranded Conductor XLPE Insulated and Sheathed (25 kV-CC) ขนาดต่างๆ ตามตารางที่ 3.1 พบว่าค่าเพอร์มิทิวตี้สัมพัทธ์ของฉนวนสายเคเบิลที่นำมาทดสอบมีค่าเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด [3] ซึ่งตรงกับตารางแสดงค่าเพอร์มิทิวตี้สัมพัทธ์ของวัสดุโพลีเมอร์ [1-2] เมื่อพิจารณาถึงขนาดของสายเคเบิลที่นำมาทดสอบจะพบว่าขนาดของสายนั้นไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าเพอร์มิทิวตี้สัมพัทธ์

3.8.2 ผลการทดสอบในหัวข้อ Accelerated Water Absorption Tests (ICEA S-66-524)

ผลการทดสอบตัวอย่างสาย 25 kV Spaced Aerial Cable Aluminum Stranded Conductor XLPE Insulated and Sheathed (25 kV-CC) ขนาด 35 mm² 70 mm² 185 mm² และ 240 mm² โดยระยะเวลาขยวสายในการทดสอบที่ 15 ฟุต (4.57 เมตร) ระยะเวลาขยวสายที่แช่น้ำขณะทดสอบ 10 ฟุต (3.05 เมตร) ที่อุณหภูมิห้องทดสอบ 32 °C และอุณหภูมิน้ำขณะทดสอบ 75 ± 0.8 °C โดยทำการวัดค่าในวันที่ 1, 7 และ 14 โดยใช้คาปาซิเตอร์มาตรฐานของ Tetex รุ่น 3380 ขนาดความจุ 100 pF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.18 การทดสอบหาค่า ϵ_r ของฉนวน XLPE ในหัวข้อ Accelerated Water Absorption Tests

ตารางที่ 3.2 ผลทดสอบหาค่า ϵ_r ของฉนวน XLPE ในหัวข้อ Accelerated Water Absorption วันที่ 1

Size (mm ²)	Test Voltage (kV)	r_1 (mm.)	r_2 (mm.)	C_x (pF)	Tan δ	ϵ_r
35	10.5	3.980	10.620	275.0	19×10^{-4}	1.594
	21.0			275.5	22×10^{-4}	1.597
70	11.2	5.315	12.370	302.0	14×10^{-4}	1.507
	22.4			305.0	15×10^{-4}	1.521
185	10.3	8.595	14.890	473.2	11×10^{-4}	1.537
	20.6			475.5	14×10^{-4}	1.545
240	10.6	9.705	16.425	482.0	7×10^{-4}	1.497
	21.2			485.0	9×10^{-4}	1.507

ตารางที่ 3.3 ผลทดสอบหาค่า ϵ_r ของฉนวน XLPE ในหัวข้อ Accelerated Water Absorption วันที่ 7

Size (mm ²)	Test Voltage (kV)	r_1 (mm.)	r_2 (mm.)	C_x (pF)	Tan δ	ϵ_r
35	10.5	3.980	10.620	276.0	22×10^{-4}	1.600
	21.0			276.55	30×10^{-4}	1.603
70	11.2	5.315	12.370	305.5	18×10^{-4}	1.524
	22.4			305.8	25×10^{-4}	1.525
185	10.3	8.595	14.890	475.0	16×10^{-4}	1.543
	20.6			476.5	19×10^{-4}	1.546

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 (ต่อ)

240	10.6	9.705	16.425	483.0	10×10^{-4}	1.501
	21.2			486.8	13×10^{-4}	1.510

ตารางที่ 3.4 ผลทดสอบหาค่า ϵ_r ของฉนวน XLPE ในหัวข้อ Accelerated Water Absorption
วันที่ 14

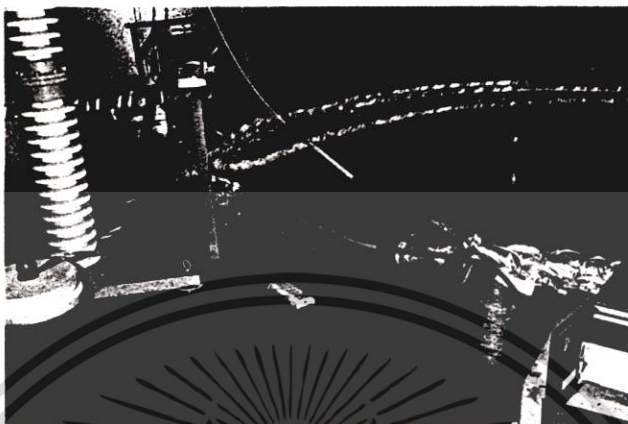
Size (mm ²)	Test Voltage (kV)	r_1 (mm.)	r_2 (mm.)	Cx (pF)	Tan δ	ϵ_r
35	10.5	3.980	10.620	276.5	29×10^{-4}	1.603
	21.0			277.0	39×10^{-4}	1.606
70	11.2	5.315	12.370	306.5	27×10^{-4}	1.529
	22.4			307.7	34×10^{-4}	1.535
185	10.3	8.595	14.890	476.5	22×10^{-4}	1.548
	20.6			478.0	31×10^{-4}	1.553
240	10.6	9.705	16.425	485.2	17×10^{-4}	1.507
	21.2			487.5	24×10^{-4}	1.515

จากผลการทดสอบตามตารางที่ 3.2 – 3.4 จะพบว่าค่าเพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์ของฉนวนสายเคเบิลจะมีค่าลดลง เมื่อเทียบกับอุณหภูมิที่ทำการทดสอบตามตารางที่ 1 เนื่องจากฉนวน XLPE ของสาย 25 kV Spaced Aerial Cable Aluminum Stranded Conductor XLPE Insulated and Sheathed ที่นำมาทดสอบนั้นมีคุณสมบัติเป็นสารชนิดนอนโพลาร์ไดอิเล็กตริก (Nonpolar Dielectric) [11] และจากการทดสอบวัดค่าคาปาซิแตนซ์ของฉนวนในวันที่ 1, 7 และ 14 จะพบว่าค่าคาปาซิแตนซ์นั้นมีค่าที่เพิ่มขึ้นจากเดิมเล็กน้อยและไม่เกินกว่ามาตรฐานที่กำหนด [3] รวมทั้งค่าเพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์และแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียต่อไดอิเล็กตริกของฉนวนก็มีค่าไม่เกินกว่ามาตรฐานเช่นกัน

3.8.3 ผลการทดสอบในหัวข้อ Tan δ Measurement ตามมาตรฐาน IEC 60502-2 (1998)

ผลการทดสอบตัวอย่างสาย 12/20 kV. Underground Cable Copper Stranded Conductor XLPE Insulated and PE Sheathed (12/20 kV-CE) ขนาด 35 mm² 70 mm² 400 mm² ที่ระยะความยาวสาย 15 เมตร ที่อุณหภูมิห้องทดสอบ 28 °C โดยจะใช้วิธีการจ่ายกระแส เนื่องจากสายเคเบิลที่นำมาทดสอบนั้นมีขนาดใหญ่และความยาวมาก ซึ่งตามภาคอุตสาหกรรมส่วนใหญ่จะไม่มีหม้อต้มหรือตู้อบที่สามารถรองรับการทดสอบสายประเภทนี้ได้ รวมทั้งการควบคุมอุณหภูมิของฉนวนที่ทำการทดสอบนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบนั้นก็เป็นไปได้ยากกว่า ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบตั้งแต่อุณหภูมิ 30 °C ถึง 95 °C เพื่อศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพอร์มิตีฟิตีส์สัมพัทธ์ที่อุณหภูมิต่างๆ โดยใช้คาปาซิเตอร์มาตรฐานของ Tettex รุ่น 3380 ขนาดความจุ 100 pF



รูปที่ 3.19 การทดสอบหาค่า ϵ_r ของฉนวน XLPE ในหัวข้อ Tan δ Measurement ตามมาตรฐาน IEC 60502-2 โดยวิธีการจ่ายกระแส

ตารางที่ 3.5 ผลการทดสอบหาค่า ϵ_r ของฉนวน XLPE ของสายขนาด 35 mm² ในหัวข้อ Tan δ Measurement (IEC 60502-2) โดยวิธีการจ่ายกระแส ที่อุณหภูมิต่างๆ

Temperature (°C)	Test Voltage (kV)	r_1 (mm.)	r_2 (mm.)	C_x (pF)	Tan δ	ϵ_r
30	2	4.06	9.883	2128.5	1.5×10^{-4}	2.299
40	2	4.06	9.883	1893.0	1.8×10^{-4}	2.045
50	2	4.06	9.883	1710.0	2.1×10^{-4}	1.847
60	2	4.06	9.883	1600.0	2.4×10^{-4}	1.729
70	2	4.06	9.883	1531.0	2.9×10^{-4}	1.654
80	2	4.06	9.883	1490.0	3.5×10^{-4}	1.610
90	2	4.06	9.883	1460.0	3.9×10^{-4}	1.577
95	2	4.06	9.883	1345.0	4.5×10^{-4}	1.453

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.6 ผลการทดสอบหาค่า ϵ_r ของฉนวน XLPE ของสายขนาด 70 mm² ในหัวข้อ Tan δ

Measurement (IEC 60502-2) โดยวิธีการจ่ายกระแส ที่อุณหภูมิต่างๆ

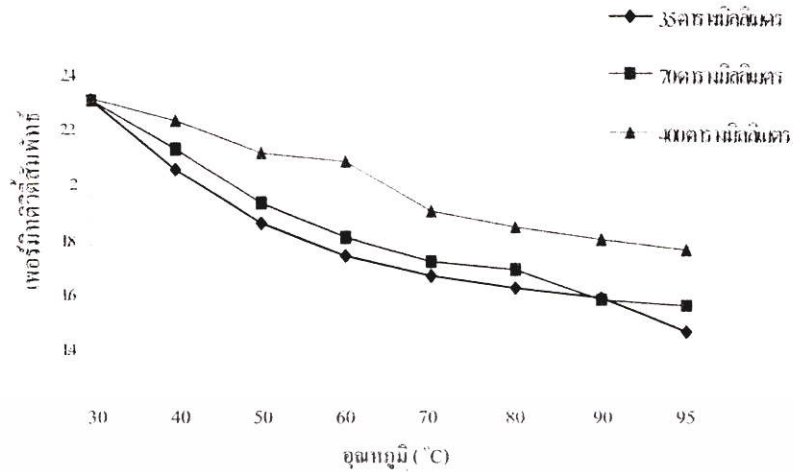
Temperature (°C)	Test Voltage (kV)	r ₁ (mm.)	r ₂ (mm.)	C _x (pF)	Tan δ	ϵ_r
30	2	5.421	11.116	2635.0	1.5×10^{-4}	2.298
40	2	5.421	11.116	2432.0	1.7×10^{-4}	2.121
50	2	5.421	11.116	2205.0	2.0×10^{-4}	1.923
60	2	5.421	11.116	2060.0	2.4×10^{-4}	1.797
70	2	5.421	11.116	1962.0	2.8×10^{-4}	1.711
80	2	5.421	11.116	1928.0	3.3×10^{-4}	1.681
90	2	5.421	11.116	1800.0	3.6×10^{-4}	1.570
95	2	5.421	11.116	1776.0	4×10^{-4}	1.549

ตารางที่ 3.7 ผลการทดสอบหาค่า ϵ_r ของฉนวน XLPE ของสายขนาด 400 mm² ในหัวข้อ Tan δ

Measurement (IEC 60502-2) โดยวิธีการจ่ายกระแส ที่อุณหภูมิต่างๆ

Temperature (°C)	Test Voltage (kV)	r ₁ (mm.)	r ₂ (mm.)	C _x (pF)	Tan δ	ϵ_r
30	2	12.324	17.974	5022.0	1.6×10^{-4}	2.301
40	2	12.324	17.974	4850.0	1.7×10^{-4}	2.222
50	2	12.324	17.974	4600.0	1.9×10^{-4}	2.108
60	2	12.324	17.974	4540.0	2.2×10^{-4}	2.080
70	2	12.324	17.974	4126.0	2.3×10^{-4}	1.891
80	2	12.324	17.974	4000.0	2.7×10^{-4}	1.833
90	2	12.324	17.974	3901.0	2.8×10^{-4}	1.788
95	2	12.324	17.974	3821.0	3×10^{-4}	1.751

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

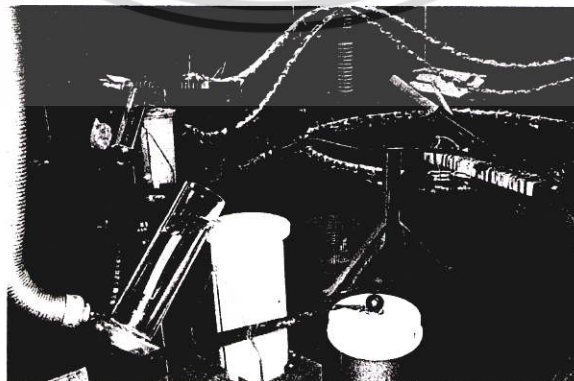


รูปที่ 3.20 ผลการเปลี่ยนแปลงของค่า ϵ_r ของฉนวน XLPE ของสายเคเบิลใต้ดินขนาด 35 mm² 70 mm² และ 400 mm² ที่อุณหภูมิต่างๆ

จากผลการทดสอบตามตารางที่ 3.5 – 3.7 เป็นการศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงของค่าเพอร์มิทิวตี้สัมพัทธ์ที่อุณหภูมิต่างๆ โดยทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 30°C - 95°C จะเห็นว่าค่าเพอร์มิทิวตี้สัมพัทธ์ของฉนวนสายเคเบิลจะมีค่าลดลงตามผลของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากคุณสมบัติของสารฉนวน XLPE ของสายเคเบิลใต้ดินที่นำมาทดสอบนั้นเป็นสารชนิดนอนโพลาร์ไดอิเล็กตริก (Nonpolar Dielectric) [8] และผลจากการวัดค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกของฉนวนก็มีค่าไม่เกินกว่ามาตรฐาน [4]

3.8.4 ผลการทดสอบในหัวข้อ Tan δ Measurement ตามมาตรฐาน IEC 502 (1994)

ผลการทดสอบตัวอย่างสาย 12/20 kV. Underground Cable Copper Stranded Conductor XLPE Insulated and PE Sheathed (12/20 kV-CE) ขนาด 35 mm² 70 mm² 400 mm² ที่ระยะความยาวสาย 15 เมตร ที่อุณหภูมิห้องทดสอบ 28 °C pF โดยทำการทดสอบในอุณหภูมิปรกติที่แรงดัน 2 kV 0.5U₀ U₀ และ 2U₀ โดยใช้คาปาซิเตอร์มาตรฐานของ Tettex รุ่น 3380 ขนาดความจุ 100 pF



รูปที่ 3.21 การทดสอบหาค่า ϵ_r ของฉนวน XLPE ในหัวข้อ Tan δ Measurement ตามมาตรฐาน IEC

เอกสารนี้เป็นเอกสาร 502 ที่แรงดันต่างๆ ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.8 ผลการทดสอบหาค่า ϵ_r ของฉนวน XLPE ของสายเคเบิลใต้ดินขนาด 35 mm^2 70 mm^2 และ 400 mm^2 ที่แรงดันต่างๆ

Size (mm ²)	Test Voltage (kV)	r ₁ (mm.)	r ₂ (mm.)	Cx (pF)	Tan δ	ϵ_r
35	2 kV	4.06	9.883	2128.5	1.5×10^{-4}	2.299
	6 kV			2128.7	1.6×10^{-4}	2.300
	12 kV			2129.0	1.8×10^{-4}	2.300
	24 kV			2129.0	1.9×10^{-4}	2.300
70	2 kV	5.421	11.116	2635.0	1.5×10^{-4}	2.298
	6 kV			2636.0	1.7×10^{-4}	2.299
	12 kV			2637.5	1.9×10^{-4}	2.300
	24 kV			2638.0	2×10^{-4}	2.301
400	2 kV	12.324	17.974	5022.0	1.6×10^{-4}	2.301
	6 kV			5024.0	1.8×10^{-4}	2.302
	12 kV			5026.5	2×10^{-4}	2.303
	24 kV			5026.5	2.1×10^{-4}	2.303



รูปที่ 3.22 ผลการเปลี่ยนแปลงของค่า ϵ_r ของฉนวน XLPE ของสายเคเบิลใต้ดินขนาด 35 mm^2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และ 400 มม.² ที่แรงดันต่างๆ ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดสอบตามตารางที่ 3.8 เป็นการศึกษาค่าของแรงดันต่างๆ ว่ามีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าเพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์หรือไม่ ซึ่งพบว่าขนาดแรงดันจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าเพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์นั้นน้อยมาก ทั้งนี้เนื่องจากว่าค่าเพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์นั้นเป็นอิสระต่อแรงดัน [11] และผลจากการวัดค่าแฟคเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกของฉนวนก็มีความไม่เกินกว่ามาตรฐานที่กำหนด และเปอร์เซ็นต์ในการเพิ่มขึ้นของค่าแฟคเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก ($\tan \delta$) ที่แรงดันทดสอบ $0.5U_0$ และ $2U_0$ ก็มีความไม่เกินกว่ามาตรฐานเช่นกัน (ภาคผนวก)

3.8.5 การทดสอบฉนวน PVC ของสายเคเบิลแรงดันต่ำ

ผลการทดสอบตัวอย่างสาย 300 V 2-core PVC Insulated and Sheathed. Flat Type ขนาด 1 mm^2 เพื่อศึกษาค่าเพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์ของฉนวน PVC ที่อุณหภูมิต่างๆ โดยอ้างอิงการทดสอบตามมาตรฐาน ICEA S-66-524 ที่ระยะความยาวสายในการทดสอบ 15 ฟุต (4.57 เมตร) ระยะความยาวสายที่แช่น้ำขณะทดสอบ 10 ฟุต (3.05 เมตร) โดยทำการทดสอบที่แรงดัน 300 V ตามพิกัดแรงดันของสาย โดยอุณหภูมิห้องขณะทดสอบ 30°C และอุณหภูมิน้ำขณะทดสอบ $30^\circ\text{C} - 90^\circ\text{C}$ โดยใช้ค่าปาริเตอร์มาตรฐานของ Tettex รุ่น 3370 ขนาด 99.91 pF



รูปที่ 3.23 การทดสอบหาค่า ϵ_r ของฉนวน PVC ของสายแรงต่ำที่อุณหภูมิต่างๆ

ตารางที่ 3.9 ผลการทดสอบหาค่า ϵ_r ของฉนวน PVC ของสายแรงต่ำที่อุณหภูมิต่างๆ (Core # 1)

Temperature ($^\circ\text{C}$)	r_1 (mm.)	r_2 (mm.)	C_x (pF)	$\tan\delta$	ϵ_r
30	0.89	1.590	1218.9	1.1×10^{-2}	3.346
40	0.89	1.590	1328.8	1.6×10^{-2}	3.517
50	0.89	1.590	1598.6	2.0×10^{-2}	3.759
60	0.89	1.590	1628.5	2.5×10^{-2}	3.944

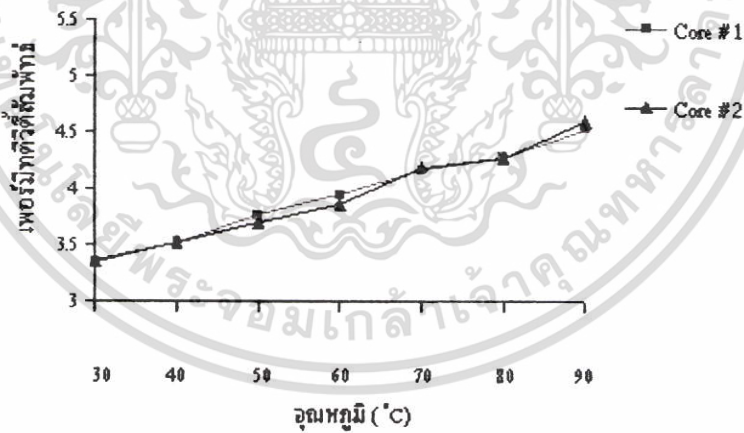
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.9 (ต่อ)

70	0.89	1.590	1808.4	6.2×10^{-2}	4.157
80	0.89	1.590	1960.2	12.5×10^{-2}	4.259
90	0.89	1.590	2112.1	14.0×10^{-2}	4.523

ตารางที่ 3.10 ผลการทดสอบหาค่า ϵ_r ของฉนวน PVC ของสายแรงต่ำที่อุณหภูมิต่างๆ (Core # 2)

Temperature (°C)	r_1 (mm.)	r_2 (mm.)	Cx (pF)	Tan δ	ϵ_r
30	0.89	1.590	1228.9	1.1×10^{-2}	3.350
40	0.89	1.590	1338.8	1.5×10^{-2}	3.515
50	0.89	1.590	1618.5	2.15×10^{-2}	3.696
60	0.89	1.590	1633.5	2.5×10^{-2}	3.858
70	0.89	1.590	1819.4	6.1×10^{-2}	4.188
80	0.89	1.590	1951.24	12.0×10^{-2}	4.264
90	0.89	1.590	2098.1	13.0×10^{-2}	4.583

รูปที่ 3.24 ผลการเปลี่ยนแปลงของค่า ϵ_r ของฉนวน PVC ของสายแรงต่ำขนาด 1 mm^2 ที่อุณหภูมิต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดสอบตามตารางที่ 3.9 – 3.10 ค่าเพอร์มิททิวิตีสัมพัทธ์ของฉนวน PVC ที่ตัวนำ Core # 1 และ Core # 2 จะมีค่าไม่แตกต่างกันมากเนื่องจากเป็นฉนวนของตัวนำจากสายเคเบิลเดียวกัน และเมื่อทำการทดสอบที่อุณหภูมิสูงขึ้น จะเห็นว่าค่าเพอร์มิททิวิตีสัมพัทธ์ของฉนวน PVC จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 3.24 ทั้งนี้เนื่องจากฉนวน PVC เป็นสารชนิดนอนโพลาร์ไดอิเล็กตริก (Nonpolar Dielectric) และค่าแฟคเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก ($\tan \delta$) ก็มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น เนื่องจากผลของอุณหภูมิที่เพิ่มมากขึ้นด้วย [11]

3.8.6 การศึกษาการเร่งอายุการใช้งานในลักษณะต่างๆ

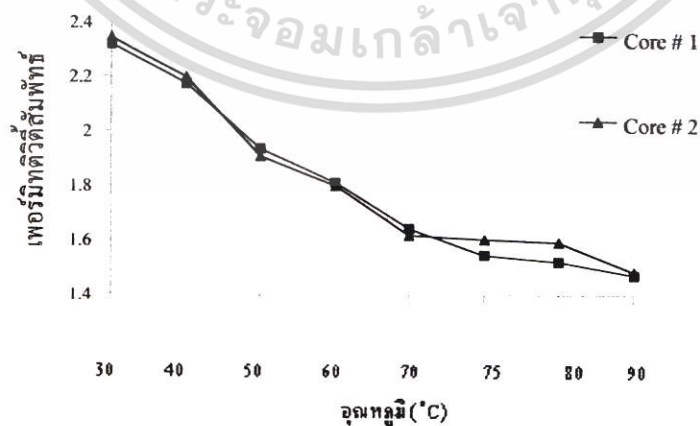
โดยจุดประสงค์ของการทดสอบหัวข้อนี้ แสดงให้เห็นว่าสภาวะการทดสอบที่แตกต่างกัน ถึงแม้จะเพียงช่วงระยะเวลาสั้นๆ แต่ก็มีผลต่อค่าเพอร์มิททิวิตีสัมพัทธ์ ดังนั้นในสภาวะแวดล้อมที่ใช้งานจริงน่าจะมีผลต่อค่าเพอร์มิททิวิตีสัมพัทธ์ของฉนวนสายเคเบิล ซึ่งอาจจะนำมาใช้เป็นแนวทางในการศึกษาถึงอายุการใช้งานของฉนวนต่อไปในอนาคตได้ โดยผลการทดสอบตัวอย่างสาย 0.6/1 kV. Copper Cable Twin Conductor Cross-linked Polyethylene Insulated and Polyethylene Sheathed ขนาด 6 mm^2 ได้ทำการทดสอบสายที่ผ่านการเร่งอายุการใช้งาน โดยการต้ม การอบ และการจ่ายกระแสที่อุณหภูมิ 75°C เป็นระยะเวลา 14 วัน และนำสายกลับมาทดสอบเทียบกับสายที่ยังไม่ผ่านการเร่งอายุการใช้งาน โดยทำการทดสอบที่สภาวะเดียวกัน โดยอ้างอิงวิธีการทดสอบตามมาตรฐาน ICEA S-66-524 ในหัวข้อ Capacity and Power Factor โดยทำการทดสอบที่แรงดัน 1 kV ตามพิกัดแรงดันของสาย ที่อุณหภูมิห้องขณะทดสอบ 30°C อุณหภูมินี้ขณะทดสอบ $30 \pm 1^\circ\text{C}$ และทำการทดสอบเก็บผลที่อุณหภูมิต่างๆ ของสายที่ยังไม่ได้ผ่านการเร่งอายุการใช้งาน เพื่อใช้เทียบกับผลการทดลองของบทที่ 5 ต่อไป โดยในการทดสอบนี้ใช้คาปาซิเตอร์มาตรฐานของ Tettex รุ่น 3370 ขนาด 99.91 pF



รูปที่ 3.25 การทดสอบหาค่า ϵ_r ของฉนวน XLPE ของสายแรงต่ำขนาด 6 mm^2 ที่อุณหภูมิต่างๆ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.11 ผลการทดสอบหาค่า ϵ_r ของฉนวน XLPE (ที่ยังไม่ผ่านการเร่งอายุการใช้งาน) โดยทำการทดสอบที่อุณหภูมิต่างๆ

Size (mm ²)	Temperature (°C)	r ₁ (mm.)	r ₂ (mm.)	Cx (pF)	Tanδ	ε _r
Core # 1	30	1.570	2.568	959.136	10 × 10 ⁻⁴	2.319
	40			899.190	10.5 × 10 ⁻⁴	2.174
	50			799.280	11 × 10 ⁻⁴	1.933
	60			749.325	13 × 10 ⁻⁴	1.812
	70			679.388	13.5 × 10 ⁻⁴	1.643
	75			639.424	14 × 10 ⁻⁴	1.546
	80			629.433	17 × 10 ⁻⁴	1.522
	90			609.451	20 × 10 ⁻⁴	1.474
Core # 2	30	1.570	2.568	969.127	10.5 × 10 ⁻⁴	2.343
	40			909.181	11 × 10 ⁻⁴	2.198
	50			789.289	12 × 10 ⁻⁴	1.908
	60			744.330	13.5 × 10 ⁻⁴	1.800
	70			669.397	14 × 10 ⁻⁴	1.619
	75			664.402	15 × 10 ⁻⁴	1.606
	80			659.406	17 × 10 ⁻⁴	1.594
	90			614.447	21 × 10 ⁻⁴	1.486



รูปที่ 3.26 ผลการเปลี่ยนแปลงของค่า ϵ_r ของฉนวน XLPE ของสายแรงต่ำขนาด 6 mm² ที่อุณหภูมิเอกสารนี้เป็นเอกสารที่ฐานไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.12 ผลการทดสอบหาค่า ϵ_r ของฉนวน XLPE ที่ผ่านการเร่งอายุการใช้งาน โดยวิธีการดัด

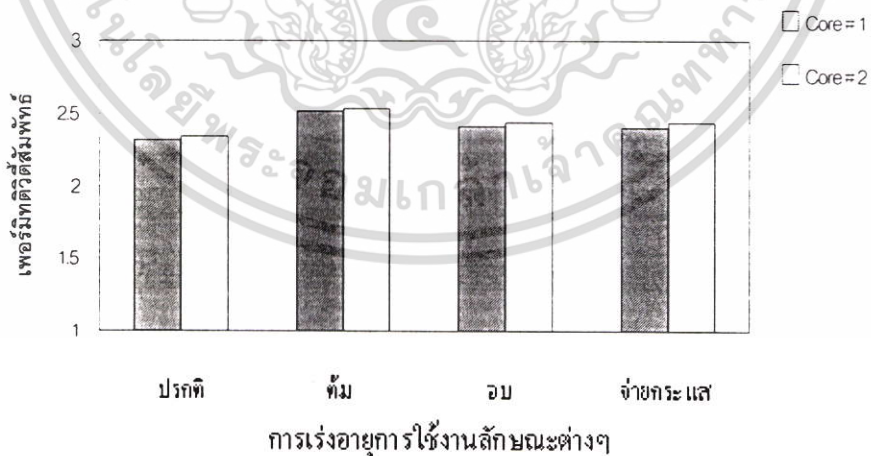
Conductor	Size (mm ²)	Temperature (°C)	r ₁ (mm.)	r ₂ (mm.)	Cx (pF)	Tanδ	ϵ_r
Core # 1	6	30	1.570	2.568	1039.064	19.5×10^{-4}	2.512
Core # 2					1049.055	19.8×10^{-4}	2.536

ตารางที่ 3.13 ผลการทดสอบหาค่า ϵ_r ของฉนวน XLPE ที่ผ่านการเร่งอายุการใช้งาน โดยวิธีการอบ

Conductor	Size (mm ²)	Temperature (°C)	r ₁ (mm.)	r ₂ (mm.)	Cx (pF)	Tanδ	ϵ_r
Core # 1	6	30	1.570	2.568	999.100	14×10^{-4}	2.416
Core # 2					1009.091	15×10^{-4}	2.440

ตารางที่ 3.14 ผลการทดสอบหาค่า ϵ_r ของฉนวน XLPE ที่ผ่านการเร่งอายุการใช้งาน โดยวิธีการ
จ่ายกระแส

Conductor	Size (mm ²)	Temperature (°C)	r ₁ (mm.)	r ₂ (mm.)	Cx (pF)	Tanδ	ϵ_r
Core # 1	6	30	1.570	2.568	994.105	14×10^{-4}	2.404
Core # 2					1009.091	16×10^{-4}	2.440



รูปที่ 3.27 ผลของความแตกต่างของค่า ϵ_r ของฉนวน XLPE จากการเร่งอายุการใช้งานในลักษณะ
ต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดสอบตามตารางที่ 3.11 – 3.14 ของตัวอย่างฉนวน XLPE ของสายเคเบิลที่ทำการทดสอบตามลักษณะของการเร่งอายุการใช้งานทั้ง 3 วิธี ตามมาตรฐาน จากผลการทดสอบเมื่อนำมาเปรียบเทียบกันจะพบว่าค่าเพอร์มิทิวิตีตีสัมพัทธ์นั้นจะมีผลการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยต่างกัน ซึ่งสายเคเบิลที่ผ่านการเร่งอายุการใช้งาน โดยวิธีการอบและวิธีการจ่ายกระแสจะมีค่าเพอร์มิทิวิตีตีสัมพัทธ์ที่ใกล้เคียงกันและยังมีผลการเปลี่ยนแปลงไม่มากเมื่อเทียบกับสายเคเบิลที่ไม่ได้ผ่านการเร่งอายุการใช้งาน แต่สำหรับสายเคเบิลที่ผ่านการเร่งอายุการใช้งาน โดยวิธีการต้ม จะมีค่าเพอร์มิทิวิตีตีสัมพัทธ์ที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน เนื่องจากการทดสอบนี้จะมีผลจากปัจจัยของความชื้นและน้ำเข้ามาเกี่ยวข้อง จึงทำให้ฉนวนนั้นเกิดการสูญเสียความเป็นฉนวนมากกว่า และรวมถึงค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก ($\tan \delta$) ที่มีค่าเพิ่มมากกว่าอีกด้วย

3.9 วิเคราะห์ปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อค่าเพอร์มิทิวิตีตีสัมพัทธ์ของฉนวนสายเคเบิล

ค่าเพอร์มิทิวิตีตีสัมพัทธ์จะขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงจากปัจจัยภายนอกและตัวแปรต่างๆ ทางไฟฟ้า เช่น ความถี่ อุณหภูมิ ความดันบรรยากาศ และความชื้น เป็นต้น ในที่นี้จะกล่าวถึงกรณีที่เกิดขึ้นอยู่กับความสำคัญในทางปฏิบัติ จากผลการทดสอบตัวอย่างของสายเคเบิลที่นำมาทดสอบจะมีความแตกต่างกันทางด้านโครงสร้างและชนิดของฉนวน ซึ่งในการทดสอบตามมาตรฐานในทางปฏิบัติจะเป็นการทดสอบทางด้านไฟฟ้าของสายที่สมบูรณ์ (Complete Cable) ซึ่งในสภาวะการทดสอบจริงตัวแปรบางอย่างไม่สามารถควบคุมเพื่อนำมาใช้เป็นกรณีศึกษาได้ แต่ได้มีการรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้อง ซึ่งจะสามารถอธิบายถึงสาเหตุต่างๆ ของปัจจัยที่ทำให้ค่าเพอร์มิทิวิตีตีสัมพัทธ์เกิดการเปลี่ยนแปลง โดยได้สรุปเป็นหัวข้อต่างๆ ดังนี้ [11-12]

3.9.1 ค่าของเพอร์มิทิวิตีตีสัมพัทธ์กับโครงสร้างของสายเคเบิล

จากการทดสอบตัวอย่างของสายเคเบิลในงานวิจัยนี้ ในแต่ละหัวข้อของการทดสอบตามมาตรฐาน สายเคเบิลที่นำมาทดสอบจะมีความแตกต่างกัน ทั้งขนาดตัวนำ ขนาดฉนวน และระยะความยาวที่ทำการทดสอบรวมถึงความแตกต่างของชนิดตัวนำ จะเห็นได้ว่าปัจจัยทางด้านโครงสร้างเหล่านี้จะไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าเพอร์มิทิวิตีตีสัมพัทธ์ ทั้งนี้สามารถพิจารณาได้จากสมการที่ 3.11 ที่ใช้ในการคำนวณจะเห็นได้ว่าเมื่อระยะความยาวและขนาดของสายที่เพิ่มขึ้นค่าความจุไฟฟ้าก็เพิ่มขึ้น โดยจะเห็นว่ารัศมีของตัวนำและรัศมีของฉนวนที่เพิ่มขึ้นจะสัมพันธ์กันกับค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้ และในส่วนความแตกต่างระหว่างตัวนำของอลูมิเนียมและทองแดง ก็ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าเพอร์มิทิวิตีตีสัมพัทธ์ในทางปฏิบัติ

3.9.2 ค่าของเพอร์มิทิวิตีที่สัมพันธ์กับอุณหภูมิ

ในการทดสอบหัวข้อต่างๆ ที่มีความเกี่ยวข้องกับอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงของค่าเพอร์มิทิวิตีที่สัมพันธ์จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของสสารที่นำมาทำเป็นฉนวน ที่จะมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงมากน้อยต่างกันเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไป ซึ่งอุณหภูมินั้นจะไม่มีผลต่อขบวนการของ Electronic polarization และความสามารถของ Electronic polarization แต่อย่างไรก็ตามปริมาณความร้อนจะทำให้สสารขยายตัว อัตราส่วนของจำนวนโมเลกุลเป็นผลทำให้ความยาวของไดโพลอิเล็กทริกลดลง เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ด้วยเหตุนี้ค่า ϵ_r ของฉนวนจึงเปลี่ยนไป ซึ่งสามารถเชื่อได้ว่ามีการเปลี่ยนแปลงของสสารจากสภาวะของแข็งไปสู่ของเหลว (สภาวะเย็นตัว) เป็นผลให้ปริมาณของสสารมีการเปลี่ยนแปลงมากพอสมควร เมื่อความร้อนถูกส่งผ่านต่อไปของเหลวก็จะเกิดการระเหยค่าของ ϵ_r จะไปอยู่ในสภาวะของอากาศของสสาร ซึ่งแนวทางการเปลี่ยนแปลงของ ϵ_r ของสสารบางชนิดในตอนหลังจะอยู่ในขอบเขตที่จำกัด ซึ่งสันนิษฐานว่าสสารจะไม่มีมีการเปลี่ยนแปลงในรูปของเคมี ซึ่งโดยธรรมชาติค่าเพอร์มิทิวิตีที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิจะมีค่าแตกต่างกันมากใน solid ionic dielectrics โดยส่วนมากโครงสร้าง ionic ของโพลาริไซเซชัน ค่า ϵ_r จะเพิ่มมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิมากขึ้น ซึ่งจะอยู่ในสสารที่เป็นโพลาริไดอิเล็กทริก (polar dielectric) คือเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นการหักเหของ dipolar จะง่ายขึ้นจึงส่งผลให้ค่าเพอร์มิทิวิตีที่สัมพันธ์เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ เพราะฉะนั้นอุณหภูมิที่เกิดจากความร้อนจะทำให้โมเลกุลมีความหนาแน่นขึ้น และมุมของโมเลกุลจะมีทิศทางหักเหลดลง (ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางเคมีของสสาร โพลาริไซเซชันแต่ละตัว)

3.9.3 ค่าของ เพอร์มิทิวิตีที่สัมพันธ์กับแรงดัน

จากการทดสอบจะเห็นว่าในทางปฏิบัติค่า ϵ_r จะมีผลน้อยมากต่อค่าเพอร์มิทิวิตีที่สัมพันธ์ นั่นคือค่า ϵ_r จะไม่ขึ้นอยู่กับแรงดันนั่นเอง

3.9.4 ค่าของ เพอร์มิทิวิตีที่สัมพันธ์กับความดันบรรยากาศ

เมื่อความดันเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่า ϵ_r ของสสารเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากทำให้จำนวนของโมเลกุลในปริมาตรมีความหนาแน่นมากขึ้น

3.9.5 ค่าของเพอร์มิทิวิตีที่สัมพันธ์กับความถี่

ค่าของเพอร์มิทิวิตีที่สัมพันธ์กับความถี่ที่เปลี่ยนแปลงจะเกิดจากผลของขบวนการโพลาริไซเซชัน โดยการพิจารณาโพลาริไซเซชันของฉนวนสามารถแยกจากโครงสร้างของการโพลาริไซเซชันที่สมบูรณ์ ซึ่งโดยทั่วไปสสารประเภทอนโพลาริไดอิเล็กทริกจะไม่ขึ้นอยู่กับความถี่ และในทางปฏิบัติพบว่าสามารถใช้ได้ดีที่ความถี่สูง

3.9.6 ค่าของ เพอร์มิททิวิตีสัมพันธ์กับความชื้น

ในตัวอย่างการทดสอบสายส่งตามมาตรฐาน ICEA S-66-524 จะเห็นว่าน่าเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่เข้ามาเกี่ยวข้อง ซึ่งจากผลการทดสอบจะเห็นว่ามีเพิ่มขึ้นของค่าคาปาซิแตนซ์และแฟลคเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก ทั้งนี้เนื่องจากการเกิดโพลาริเซชันในฉนวนที่รวมกับน้ำจะมีลักษณะไม่ได้มาตรฐาน คือมีการสะสมประจุบนบริเวณที่ติดต่อกับรอยแยกของฉนวน เนื่องจากผลของแรงดันสูง การสอดแทรกและปริมาตรโพลาริเซชัน ซึ่งในกรณีของความชื้นที่เกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวที่มีน้ำ วิธีการโพลาริเซชันจะเป็นไปอย่างช้าๆ ซึ่งสามารถเกิดขึ้นเป็นนาทีหรือชั่วโมงอย่างสม่ำเสมอ ด้วยเหตุนี้ที่ความถี่ต่ำของแรงดันไฟสลับ ฉนวนนั้นจะใหญ่ขึ้นและมีค่าคาปาซิแตนซ์ของฉนวนเพิ่มขึ้นเนื่องจากผลของความชื้น ซึ่งค่า ϵ_r ในความชื้นของฉนวนจะมีค่าน้อยกว่า ϵ_r ของน้ำ ค่าเพอร์มิททิวิตีสัมพันธ์จะเพิ่มขึ้นเนื่องจากความชื้น ซึ่งในคาปาซิแตนซ์ของฉนวนภายใต้ความชื้นจะทำให้ตัวแปรที่สำคัญของฉนวนมีค่าเสื่อมลง เป็นต้น การลดลงของค่าความต้านทาน การเพิ่มขึ้นของมุมสูญเสียไดอิเล็กตริกและความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าลดน้อยลง

3.10 บทสรุป

จากผลการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าเพอร์มิททิวิตีสัมพันธ์ของฉนวนสายเคเบิลในงานวิจัยนี้ โดยวิธีการทดสอบตามมาตรฐานของตัวอย่างสายเคเบิลในปัจจุบัน พบว่าผลของอุณหภูมิเป็นปัจจัยที่มีผลต่อค่าเพอร์มิททิวิตีสัมพันธ์ของฉนวนมากที่สุด ซึ่งจะมากหรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับสภาวะแวดล้อมและการใช้งานของสายเคเบิลแต่ละประเภท รวมทั้งคุณภาพของวัสดุฉนวนและขบวนการผลิตในแต่ละโรงงาน ในการทดสอบให้ได้ผลการทดสอบที่มีค่าที่ถูกต้องที่สุดนั้น สายเคเบิลที่นำมาทดสอบจะต้องผ่านการตรวจวัดทั้งทางด้าน โครงสร้างและฟิสิกส์ รวมทั้งเครื่องมือในการทดสอบจะต้องได้มาตรฐาน ผู้ทดสอบนั้นต้องมีความรู้เกี่ยวกับคุณสมบัติต่างๆ ของฉนวนและประสบการณ์ในการใช้อุปกรณ์และควบคุมการทดสอบให้เป็นไปตามมาตรฐาน เพราะในการทดสอบนั้นจะต้องอาศัยอุปกรณ์และขั้นตอนต่างๆ ค่อนข้างมากและต้องทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการเท่านั้น ซึ่งอาจจะพบปัญหาในเรื่องของอุปกรณ์หรือสถานที่ที่ไม่เหมาะสมกับการทดสอบ ไม่ว่าจะเป็นในส่วนขอระบบกราวด์ สัญญาณรบกวน หรืออื่นๆ ซึ่งประโยชน์จากวิทยานิพนธ์ในบทนี้จะทำให้ผู้ทดสอบได้เข้าใจถึงมาตรฐานและผลของการทดสอบที่ได้ รวมทั้งปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อค่าเพอร์มิททิวิตีสัมพันธ์ของฉนวนสายเคเบิล ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการศึกษาเกี่ยวกับอายุการใช้งานของฉนวนต่อไปในอนาคต และจากปัญหาที่ได้กล่าวมาข้างต้นในบทต่อไปของงานวิจัยนี้จะเป็นการศึกษาถึงทฤษฎีของคลื่นเดินทางเพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการหาค่าเพอร์มิททิวิตีสัมพันธ์ของฉนวนสายเคเบิล เพื่อช่วยเข้ามาเป็นแนวทางในการตรวจสอบให้กับภาคอุตสาหกรรม ซึ่งได้ออกแบบและสร้างเป็นเครื่องมือวัดที่สามารถนำไปใช้งานตามสถานที่ต่างๆ ได้สะดวกและ

เอกสารนี้ไม่มีขึ้นตอนที่ยุ่งยากสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การศึกษาหาค่าเพอร์มิททิวิตีสัมพัทธ์ของฉนวนสายเคเบิล โดยใช้เทคนิคของคลื่นเดินทาง

4.1 บทนำ

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการศึกษาและออกแบบสร้างเครื่องวัดค่าเพอร์มิททิวิตีสัมพัทธ์ของฉนวนสายเคเบิล (ϵ_r) โดยอาศัยทฤษฎีของคลื่นเดินทาง (Travelling Wave) [7] จากการเคลื่อนที่ของคลื่นและการเกิดคลื่นสะท้อน โดยวิธีการส่งสัญญาณพัลส์แรงดันต่ำเข้าไปในสายเคเบิลที่ต้องการทดสอบหาค่า ϵ_r ของวัสดุฉนวน โดยคลื่นที่เดินทางไปและสะท้อนกลับจะถูกตรวจจับด้วยวงจรตรวจจับคลื่นสะท้อนส่งมายังวงจรนับเพื่อหาช่วงเวลาเดินทางของคลื่นที่สะท้อน ซึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงตามคุณสมบัติของฉนวนแต่ละชนิด โดยสามารถกำหนดระยะเวลาความยาวสายที่ทดสอบได้จากกี๊แพค และแสดงผลการทดสอบออกหน้าจอ LCD จากการประมวลผลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งทั้งหมดนี้จะเป็นเครื่องมือขนาดเล็กและสามารถนำไปใช้งานตามสถานที่ต่างๆ ได้สะดวก

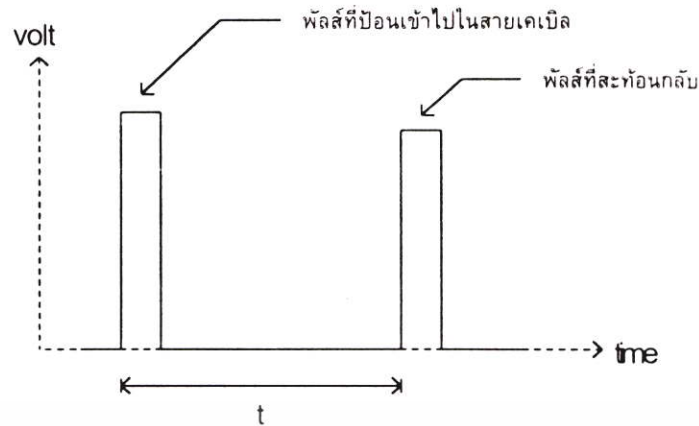
4.2 การหาค่าเพอร์มิททิวิตีสัมพัทธ์ของฉนวนสายเคเบิลโดยใช้คลื่นเดินทาง

การหาค่าเพอร์มิททิวิตีสัมพัทธ์ในงานวิจัยนี้ จะใช้วิธีการของคลื่นเดินทางซึ่งอาศัยหลักการของคลื่นเดินทางและการเกิดคลื่นสะท้อนดังทฤษฎีข้างต้นของบทที่ 2 ในกรณีที่เป็นการวัดวิทยุจะเป็นฉนวนอากาศ (air dielectric) โดยความเร็วของคลื่นเคลื่อนที่ในอากาศจะมีค่าโดยประมาณเท่ากับความเร็วแสงคือ $v_s = 3 \times 10^8$ m/s เมื่อให้ v เป็นความเร็วของคลื่นเคลื่อนที่ในสายเคเบิลที่มีตัวนำหุ้มด้วยฉนวนที่มีค่าเพอร์มิททิวิตีสัมพัทธ์ (ϵ_r) จะได้ความเร็วคลื่นเคลื่อนที่ในสายเคเบิลคือ [13]

$$v = \frac{v_s}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad 4.1$$

ในส่วนของการหาค่า ϵ_r ของสายเคเบิลจะใช้วิธีการสะท้อนกลับของคลื่นในสายเคเบิล โดยจะสร้างเครื่องกำเนิดสัญญาณพัลส์แบบ โมโนสเตเบิลป้อนสัญญาณพัลส์เข้าไปในสายเคเบิลจำนวน 1 ลูก ซึ่งเมื่อป้อนสัญญาณพัลส์เข้าไปในสายเคเบิลแล้วก็จะเกิดสัญญาณพัลส์ที่สะท้อนกลับมาอีก 1 ลูก ดังแสดงในรูปที่ 4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 สัญญาณพัลส์ที่ป้อนเข้าไปในสายเคเบิลและสัญญาณพัลส์ที่สะท้อนกลับ

เมื่อคลื่นเคลื่อนที่ในสายเคเบิลที่มีค่า ϵ_r ของวัสดุฉนวนต่างกันก็จะมีความเร็วในการเคลื่อนที่ที่แตกต่างกันด้วย ซึ่งระยะทางของการเคลื่อนที่หาได้จาก [13-14]

$$D = \frac{rv}{2} \quad 4.2$$

ดังนั้น

$$D = \frac{rv_s}{2\sqrt{\epsilon_r}} \quad 4.3$$

โดยการหาค่า ϵ_r ของฉนวนสายเคเบิลที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้เทคนิคการวัดช่วงเวลาระหว่างคลื่นเดินทางไปและกลับโดยการส่งสัญญาณพัลส์เข้าไปในสายเคเบิลที่ทดสอบ ซึ่งถ้าทราบค่าของระยะความยาวสายเคเบิล (D) ที่นำมาทดสอบ ดังนั้นจะสามารถคำนวณหาค่า ϵ_r ของฉนวนสายเคเบิลได้จากการตรวจวัดช่วงเวลาการสะท้อนกลับของคลื่น ฉะนั้นค่าเวลา t ที่ได้จะเป็นตัวกำหนดค่า ϵ_r ของฉนวนสายเคเบิลว่ามีค่าเท่าใด โดยสามารถคำนวณหาได้จาก [15-16]

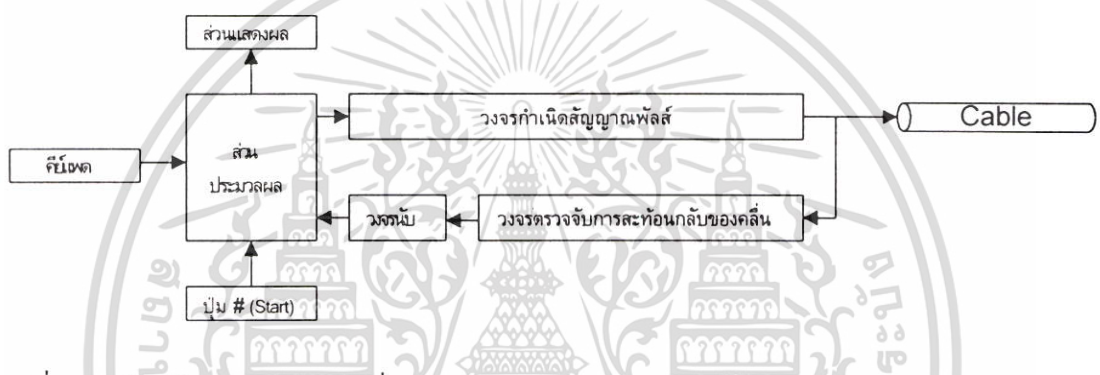
$$\epsilon_r = \left[\frac{rv_s}{2D} \right]^2 \quad 4.4$$

- เมื่อ ϵ_r เป็นค่า relative permittivity ของวัสดุฉนวน
 t เป็นช่วงเวลาของคลื่นเดินทางไปและกลับ(sec)
 v_s เป็นค่าความเร็วแสงมีค่าเท่ากับ 3×10^8 m/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การออกแบบและสร้างเครื่องวัดค่า E_r ของฉนวนสายเคเบิล

ในการออกแบบและสร้างเครื่องวัดค่า E_r ของฉนวนสายเคเบิลแบ่งเป็น 2 ส่วนหลักๆ คือ ในส่วนของวงจรรวมและในส่วนของการประมวลผล โดยส่วนของวงจรรวมจะประกอบด้วยวงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์ วงจรตรวจจับการสะท้อนกลับของคลื่นและวงจรรับ ซึ่งจะเป็นตัวออกแบบคาบเวลาของสัญญาณพัลส์ที่สามารถทำการส่งสัญญาณและสามารถตรวจจับการสะท้อนกลับได้ในช่วงระยะเวลาความยาวสายที่เมตร ซึ่งในช่วงระยะเวลาความยาวสายที่ทดสอบจะต้องมีความเหมาะสมกับขนาดสัญญาณพัลส์ที่ส่ง และในส่วนของการประมวลผลจะใช้ชุดไมโครคอนโทรลเลอร์มาร่วมกับคีย์แพดในการกำหนดระยะทางที่ทดสอบและเริ่มต้นการทำงาน ซึ่งตัวเครื่องจะประกอบไปด้วยส่วนต่างๆ และการออกแบบดังนี้ [17]

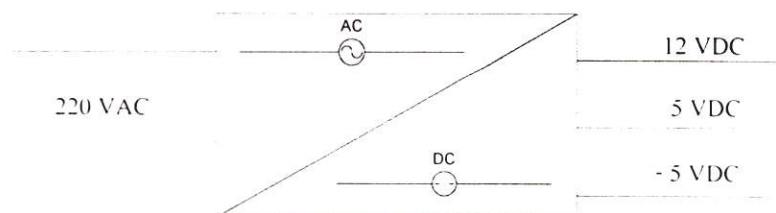


รูปที่ 4.2 บล็อกไดอะแกรมของเครื่องวัดค่า E_r ของสายเคเบิล

4.4 การออกแบบส่วนวงจรรวม

4.4.1 แหล่งจ่ายไฟ

แหล่งจ่ายไฟที่ใช้สำหรับวงจรส่วนต่างๆ ของเครื่องมือวัด โดยสามารถเลือกใช้ได้ทั้งแรงดันไฟ 220 VAC หรือจากแบตเตอรี่ขนาด 9 VDC (3 ก้อน) ที่อยู่ในตัวเครื่องเป็นแหล่งจ่ายไฟหลักผ่านไปยังไอซีเรกกูเลเตอร์เบอร์ต่างๆ ซึ่งทำหน้าที่ลดระดับแรงดันไฟลงมาให้ได้ ± 5 โวลท์ และ 12 โวลท์ เพื่อนำไปเป็นไฟเลี้ยงให้กับวงจรส่วนต่างๆ

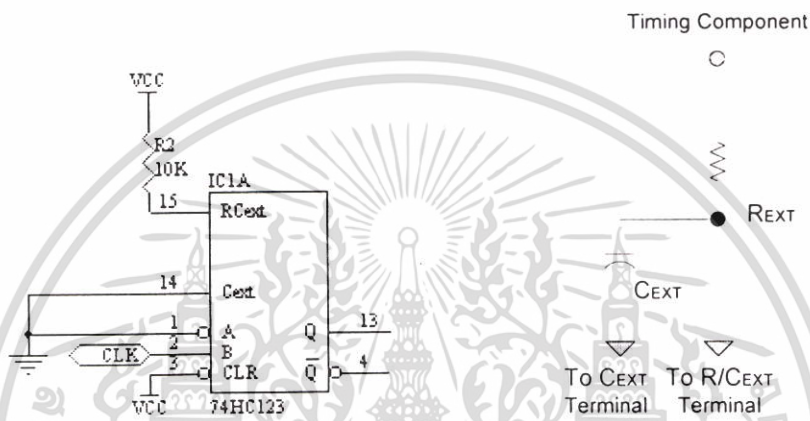


รูปที่ 4.3 บล็อกไดอะแกรมของแหล่งจ่ายไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.2 วงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์

วงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์จะใช้ IC เบอร์ 74HC123A ซึ่งเป็นวงจรแบบ Dual Retriggerable Monostable Multivibrator (one shots) เป็นส่วนสำคัญหลัก โดยมีคุณลักษณะที่ป้องกันสัญญาณรบกวนได้สูงและสามารถหลีกเลี่ยงความเสียหายจากไฟฟ้าสถิตย์โดยการต่อไดโอดที่ขา 1 ลงกราวด์ อีกทั้งยังสามารถทำการปรับความกว้างของสัญญาณพัลส์ให้มีค่ามากหรือน้อยได้ โดยการปรับค่าความต้านทานที่ต่อกับขา 15 ของ IC เบอร์ 74HC123A กับแหล่งจ่าย VCC ซึ่งคาบเวลาของสัญญาณพัลส์ที่ต้องการสามารถหาได้จาก $PW = (R_{EXT}) (C_{EXT})$ โดยวงจรได้แสดงไว้ดังรูปที่ 4.4



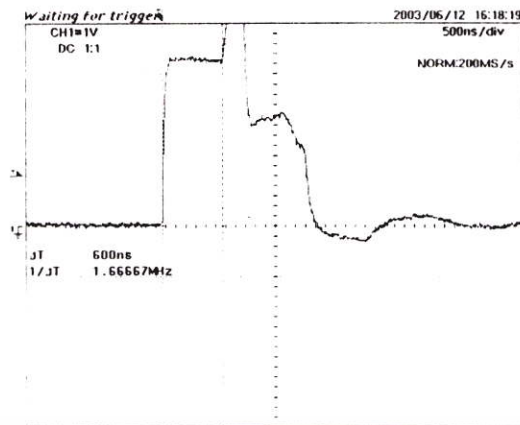
รูปที่ 4.4 วงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์แบบ โมโนสเตเบิล



รูปที่ 4.5 สัญญาณที่วัดได้จากวงจรกำเนิดพัลส์แบบ โมโนสเตเบิลขนาด 1 μs

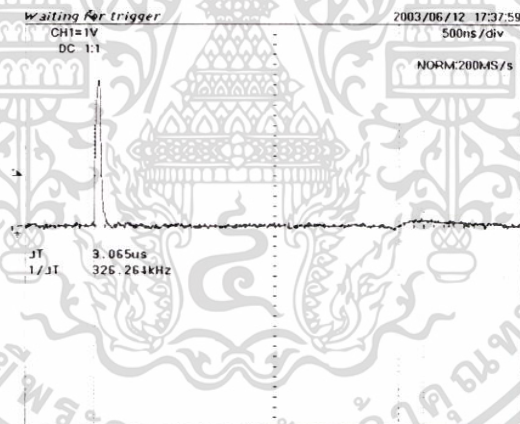
การออกแบบขนาดสัญญาณพัลส์ที่นำมาใช้ในการทดสอบ จะต้องคำนึงถึงระยะเวลาขยาสายที่ทดสอบเพราะในกรณีสายทดสอบที่มีระยะเวลาขยาสายสั้นมากจะไม่เห็นช่วงเวลาการสะท้อนกลับ เนื่องจากคลื่นที่สะท้อนจะเดินทางกลับมาเร็วในขณะที่คลื่นส่งยังเดินทางไปไม่หมด จึงทำให้เกิดการซ้อนกันจนไม่สามารถแยกช่วงเวลาการสะท้อนกลับได้ดังรูปที่ 4.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับในกรณีความกว้างของสัญญาณมากกว่าระยะเวลาความยาวสาย

ในกรณีทดสอบสายที่มีระยะเวลาความยาวมากขึ้น การลดทอนของคลื่นสะท้อนจะเพิ่มมากขึ้นตามระยะเวลาความยาวสายที่ทดสอบจนไม่สามารถเห็นช่วงเวลาของคลื่นที่สะท้อนกลับดังรูปที่ 4.7 เนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์ที่เพิ่มมากขึ้นตามระยะเวลาความยาวสายนั่นเอง ดังนั้นจึงต้องทำการขยายความกว้างของสัญญาณเพื่อให้สามารถทำการทดสอบในกรณีที่สายเคเบิลมีความยาวมากขึ้นได้

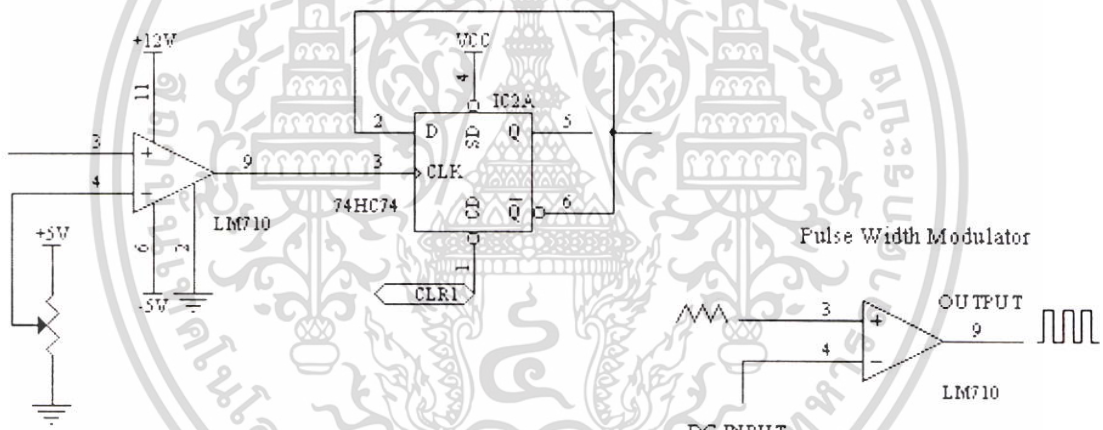


รูปที่ 4.7 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับในกรณีความกว้างของสัญญาณน้อยกว่าระยะเวลาความยาวสาย

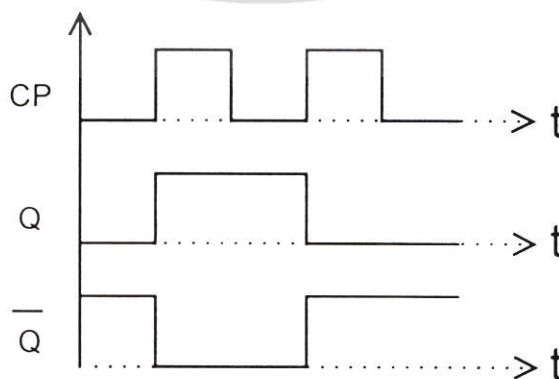
ซึ่งขอบเขตของวิทยานิพนธ์นี้จะทำการออกแบบสร้างเครื่องมือวัดให้สามารถทดสอบสายในช่วงระยะเวลาความยาว 10 – 250 เมตร ขนาดสายไม่เกิน 400 ตารางมิลลิเมตร โดยการออกแบบจะกำหนดแรงดันที่ป้อนเข้าให้คงที่ที่ 5 V เพื่อเป็นไฟเลี้ยงให้กับวงจรส่วนต่างๆ และเลือกทำการปรับความกว้างของสัญญาณพัลส์ให้อยู่ในช่วงของระยะเวลาความยาวที่ต้องการทดสอบ โดยค่าเริ่มต้นของสัญญาณพัลส์ที่ต้องการจะเป็นค่าต่ำสุดที่ได้จากการปรับค่าจากวงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์ ซึ่งค่าที่ได้ต่ำสุดจากการปรับจะอยู่ประมาณ 70 ns จากผลการทดลองสามารถทำการตรวจวัดช่วงเวลาการสะท้อนกลับได้ที่ระยะเวลาความยาวประมาณ 10 – 120 เมตร (ภาคผนวก ข.) ดังนั้นจึงต้องมีการขยายสัญญาณเพื่อให้ได้ระยะเวลาความยาวในการทดสอบมากขึ้น ไม่นุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.3 วงจรตรวจจับการสะท้อนกลับของคลื่น

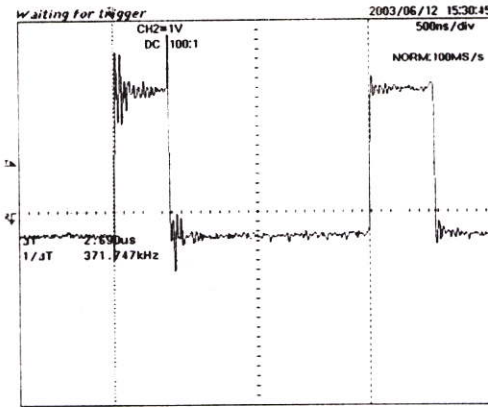
วงจรตรวจจับคลื่นสะท้อนของสายเคเบิลจะใช้ LM 710 ซึ่งเป็น Voltage Comparator เป็นตัวตัดสัญญาณรบกวนที่เข้ามาให้มีแต่แรงดันที่สะท้อนกลับ และเพื่อกำจัดสัญญาณรบกวนความถี่สูงที่อาจเกิดจากตัวอุปกรณ์หรือจากไอซีของวงจรส่วนต่างๆ โดยทำงานคู่ร่วมกับ IC เบอร์ 74HC74A ซึ่งเป็นวงจร Dual D Type Flip Flop with Preset and Clear เป็นตัวตรวจจับช่วงเวลาการสะท้อนกลับของคลื่น ซึ่งจะทำงานตามขอบขาขึ้นของสัญญาณที่ป้อนให้กับขา clock โดยที่ขา clock จะมีสัญญาณพัลส์เข้ามา 2 ลูก คือสัญญาณพัลส์ที่ป้อนเข้าไปในสายเคเบิล และสัญญาณพัลส์ที่สะท้อนกลับมา โดยขณะยังไม่มีสัญญาณ ที่ขา Q จะมีสถานะเป็น 0 และ \bar{Q} มีสถานะเป็น 1 และเมื่อสัญญาณ clock ลูกที่ 1 เข้ามาจะทำให้ที่ขา Q มีสถานะเป็น High และ \bar{Q} มีสถานะเป็น Low และจะค้างค่าสถานะนี้ไว้จนกว่าจะเจอขอบขาขึ้นของ clock ลูกที่ 2 Q จึงกลับสถานะเป็น Low และ \bar{Q} จะกลับสถานะเป็น High ซึ่ง Output ที่ขา \bar{Q} ก็จะได้สัญญาณพัลส์ 1 ลูก และช่วงความกว้างของสัญญาณพัลส์ที่ได้ก็คือระยะเวลาของการสะท้อนกลับของคลื่นนั่นเอง



รูปที่ 4.8 วงจรตรวจจับคลื่นสะท้อน



เอกสารรูปที่ 4.9 หลักการทำงานของวงจรตรวจจับคลื่นสะท้อนนั้น ไม่นิยามให้เข้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



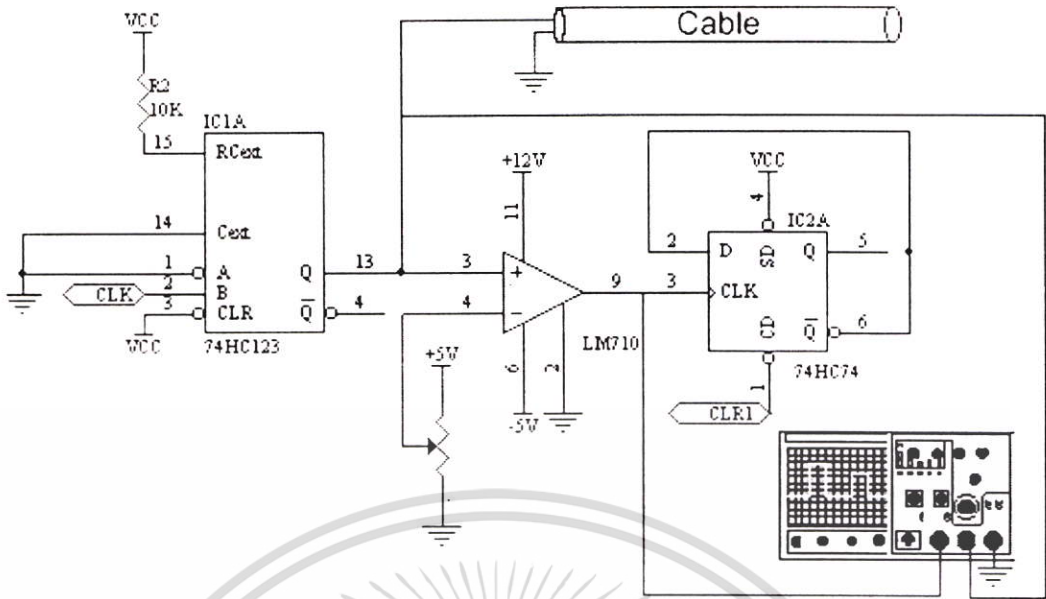
รูปที่ 4.10 สัญญาณที่วัดได้จากวงจรตรวจจับการสะท้อนกลับของคลื่น

จากสัมประสิทธิ์การสะท้อน [8] $\rho_R = \frac{Z_R - Z_C}{Z_R + Z_C}$ ถ้าสายเคเบิลที่นำมาทดสอบเป็นลักษณะ

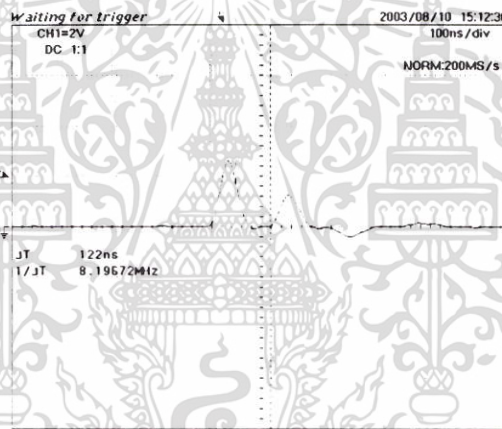
ปลายเปิด (Open Circuit) ผลลัพธ์ของสัมประสิทธิ์การสะท้อน (ρ_R) จะมีค่าเป็นหนึ่ง หมายความว่าแรงดันที่สะท้อนกลับมาที่ปลายสายจะอยู่ในเฟสเดียวกันกับคลื่นที่ส่ง ซึ่งการลดทอนของแรงดันนั้นจะมากหรือน้อยซึ่งจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของสายที่นำมาทดสอบ เช่น โลหะที่นำมาเป็นตัวนำ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำหรือระยะความยาวสายที่ทดสอบ ซึ่งจะทำให้เกิดความแตกต่างของค่าอิมพีแดนซ์ตามประเภทของสายเคเบิลที่นำมาทดสอบ

4.4.4 การทดลองหาค่าเพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์ของฉนวน PVC และ XLPE

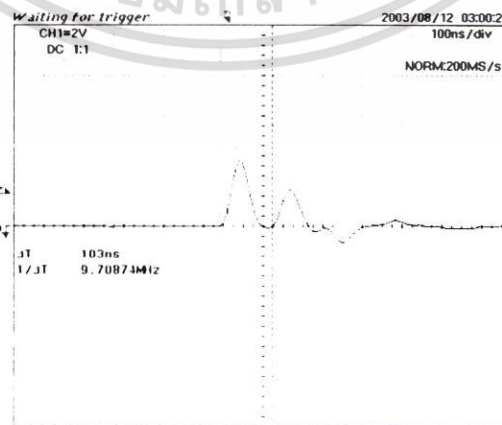
ในขั้นแรกจะทำการป้อนสัญญาณพัลส์ขนาด 5 V ความกว้าง 70 - 1200 ns จากวงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์เข้าไปในฉนวน PVC ของสาย 300 V 2-core PVC Insulated and Sheathed. Flat Type ขนาด 1 mm² และฉนวน XLPE ของสาย 0.6/1 kV. Copper Cable Twin Conductor XLPE Insulated and Polyethylene Sheathed ขนาด 6 mm² ที่ระยะความยาวต่างๆ และทำการปรับความกว้างของสัญญาณพัลส์ เพื่อทำการตรวจวัดช่วงเวลาการสะท้อนกลับจากออสซิลโลสโคปก่อนและหลังวงจรตรวจจับคลื่นสะท้อนดังวงจรรูปที่ 4.11 และนำช่วงเวลาที่ได้ออกมาคำนวณหาค่า ϵ_r ตามสมการที่ 4.4 ซึ่งจะนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับค่าเพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์ของฉนวนโพลีไวนิลคลอไรด์และฉนวนพีอีครอสลิงค์ ตามตารางแสดงค่าเพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์ของวัสดุโพลีเมอร์ [1-2]



รูปที่ 4.11 วงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์ต่อกับวงจรตรวจจับการสะท้อนกลับของคลื่น

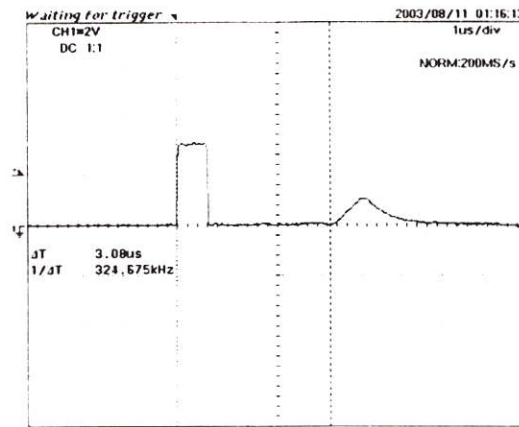


รูปที่ 4.12 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 300 V 2-core PVC Insulated and Sheathed, Flat Type ขนาด 1 mm² ที่ระยะความยาว 10 เมตร



รูปที่ 4.13 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 0.6/1 kV, Copper Cable Twin Conductor XLPE Insulated and Polyethylene Sheathed ขนาด 6 mm² ที่ระยะความยาว 10 เมตร

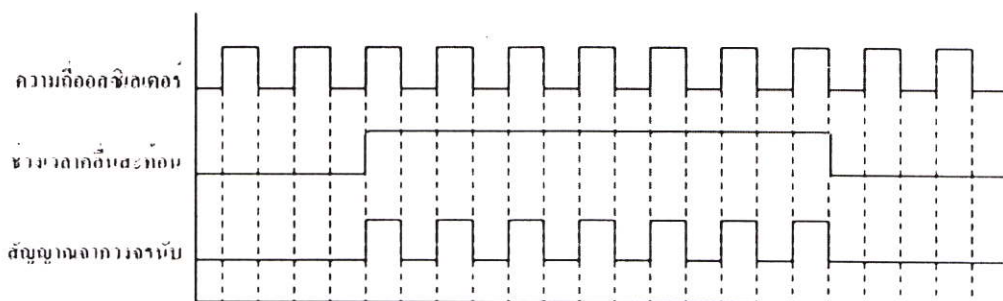
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่ว่ากรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 300 V 2-core PVC Insulated and Sheathed, Flat Type ขนาด 1 mm^2 ที่ระยะความยาว 250 เมตร

4.4.5 การพิจารณาความกว้างของสัญญาณเพื่อใช้ในการปรับตั้งค่าการวัดเพอร์มิทิวตี้สัมพัทธ์ที่ระยะความยาวต่างๆ ของสายเคเบิล

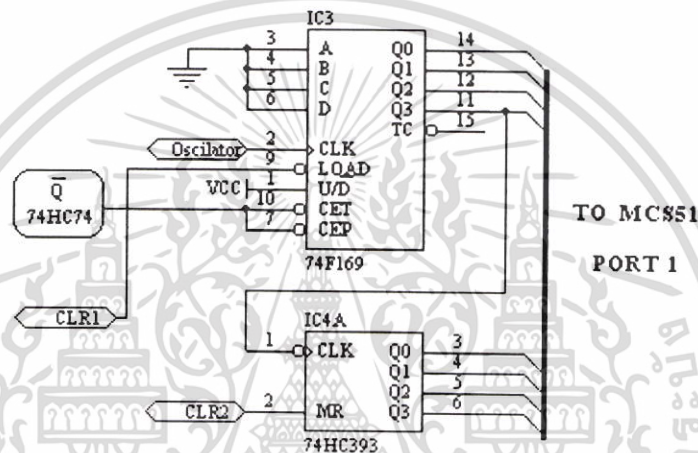
ในการออกแบบภาพเวลาของสัญญาณพัลส์ นอกจากจะสามารถทำการส่งสัญญาณและสามารถตรวจจับการสะท้อนกลับในช่วงระยะความยาวต่างๆ ได้แล้ว ยังจะต้องพิจารณาว่าช่วงเวลาที่ได้ก่อนและหลังวงจรตรวจจับคลื่นสะท้อนจากออสซิลโลสโคปว่ามีค่าตรงกันหรือไม่ เพื่อให้ครอบคลุมทุกระยะการทดสอบและมีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดตามขอบเขตของวิทยานิพนธ์ ดังนั้นในการเลือกความกว้างของสัญญาณที่นำมาใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ จะพิจารณาว่าในแต่ละระยะความยาวที่ทดสอบนั้น ในช่วงเวลาของขอบขาขึ้นของลูกคลื่นที่ส่งและลูกคลื่นที่สะท้อน เมื่อทำการ and กับความถี่ของออสซิลเลเตอร์แล้วจะต้องพอดีกับช่วงเวลาการสะท้อนกลับของคลื่น ซึ่งในกรณีที่มีเศษของลูกคลื่น ไม่ตรงกับช่วงเวลาการสะท้อนกลับจะทำให้ส่วนของการประมวลผลเกิดความคลาดเคลื่อน ซึ่งถ้าความถี่ของออสซิลเลเตอร์ที่นำมาใช้มีความถี่สูงมากจะมีความคลาดเคลื่อนน้อยในกรณีที่พอดีกับช่วงเวลาการสะท้อนกลับ แต่ถ้าในกรณีที่ช่วงเวลาไม่พอดีกับความถี่ของออสซิลเลเตอร์ความคลาดเคลื่อนนี้จะสูงขึ้นตามความถี่ของออสซิลเลเตอร์เช่นกัน ซึ่งช่วงเวลาการสะท้อนกลับของคลื่นสามารถคำนวณได้จากจำนวนพัลส์ที่นับได้หารด้วยความถี่ของออสซิลเลเตอร์



รูปที่ 4.15 เปรียบเทียบช่วงเวลาการสะท้อนกลับของคลื่นและจำนวนของสัญญาณที่ได้จากวงจรนับ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนักผู้ใดเห็นชอบใช้ประโยชน์จากเอกสารนี้ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

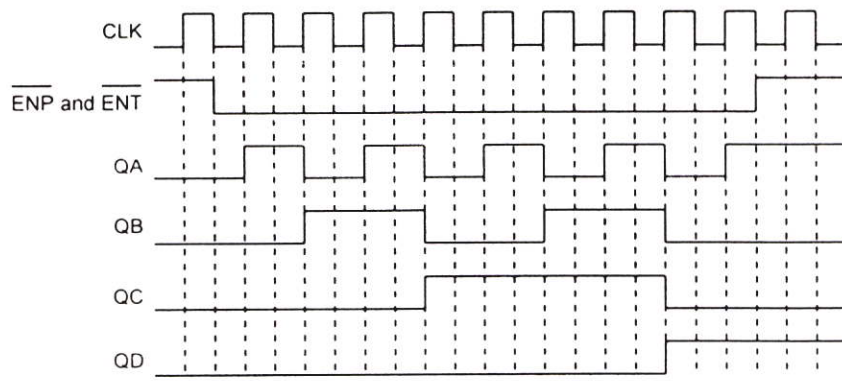
4.4.6 วงจรนับ

วงจรมานับจะประกอบด้วย Counter Synchronous และ Counter Asynchronous ทำงานร่วมกัน ซึ่งเป็นวงจรมานับแบบ Dual 4 Bit Binary Counter ต่อกัน 2 ตัว โดยตัวที่ 1 สามารถนับได้ $2^4 = 16$ ลูก ถ้าสัญญาณเกิน 16 ลูก จะนำสัญญาณที่เกินไปป้อนเป็น Clock ให้กับตัวที่ 2 ซึ่งจะนับได้ถึง $2^4 \times 2^4 = 256$ ลูก โดยการทำงานของวงจรมานับจะรับเอา Output ที่ขา \bar{Q} ของ IC เบอร์ 74HC74A ที่ผ่านการ and กับคริสตอลที่ความถี่ 80 MHz (เป็นความถี่ที่ใช้งาน) ซึ่งจะได้เป็นคาบเวลาของ t จากนั้นจะนำเอาคาบเวลานี้ไปทำการนับและจะส่งข้อมูลจากวงจรมานับ Counter ของสัญญาณทั้ง 8 bit นี้ไปเป็น Input ให้ Microcontroller ทำการประมวลผลเพื่อคำนวณค่า E_x ของสายเคเบิลต่อไป



รูปที่ 4.16 วงจรมานับ

การทำงานของวงจรมานับ จะเริ่มนับเมื่อมีการป้อนสัญญาณพัลส์เข้าไปในสายเคเบิล และจะหยุดนับเมื่อตรวจจับสัญญาณพัลส์ที่สะท้อนกลับมา โดยสัญญาณที่ส่งให้ Counter ทำงานและหยุดทำงานนั้นรับมาจากขา \bar{Q} ของ IC เบอร์ 74HC74A และต่อไปยังขา Count-enable (CEP, CET) ของ IC เบอร์ SN74F169 ซึ่งการทำงานเป็นไปดังรูปที่ 4.15 (ถ้าใช้ความถี่คริสตอลสูงสุดที่ 80 MHz) จะสามารถหาช่วงเวลาการสะท้อนกลับสูงสุดได้เท่ากับ 3200 ns โดยคิดเป็นระยะความยาวสายเท่ากับ 250 เมตร ค่าเพอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์สูงสุดเท่ากับ 3.686 ซึ่งจะสามารถทำการทดสอบกับฉนวนพีอีครอสลิงค์ตามมาตรฐานจะอยู่ที่ไม่เกิน 3.5 และฉนวนโพลีไวนิลคลอไรด์ตามตารางแสดงค่าเพอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ของวัสดุโพลีเมอร์สูงสุดที่ 3.6



รูปที่ 4.17 การทำงานของวงจรรนับในส่วนของ Counter Synchronous

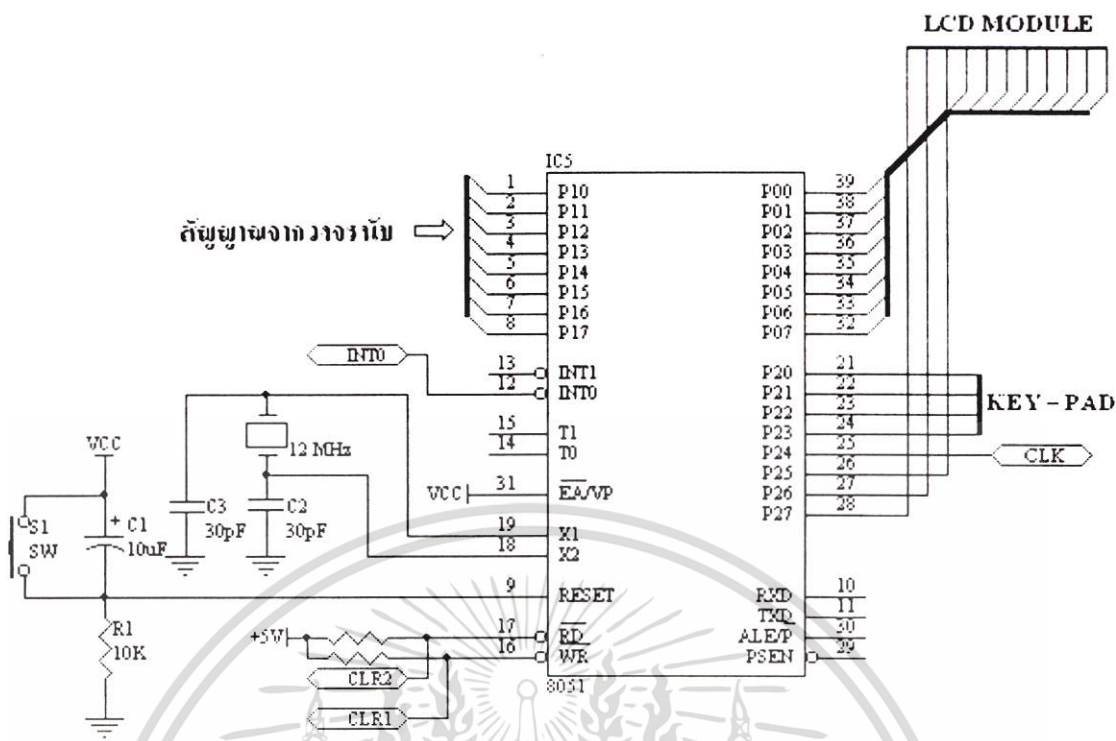
จากผลการทดสอบโดยรวมวงจรรส่วนต่างๆ ที่ได้สร้างขึ้นในวิทยานิพนธ์นี้ สามารถนำไปทดสอบกับฉนวนสายเคเบิลตั้งแต่ในช่วงระยะความยาว 10 – 250 เมตร ตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ โดยได้แบ่งความกว้างของสัญญาณพัลส์ที่นำมาใช้ในช่วงระยะการทดสอบทั้งหมดไว้ 5 สเต็ป ตามขนาดสัญญาณที่ได้จากการทดลองและวงจรที่ออกแบบไว้ เพื่อให้เหมาะสมกับช่วงระยะความยาวของฉนวนสายเคเบิลประเภทต่างๆ และผลที่ได้ให้มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด โดยสามารถเลือกช่วงของระยะความยาวการทดสอบได้จาก SELECTOR บนเครื่องมือวัด ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่าเพอร์มิททิวิตีสัมพัทธ์ของฉนวน โพลีไวนิลคลอไรด์และฉนวนพียอโรสลิคส์ ตามตารางแสดงค่าเพอร์มิททิวิตีสัมพัทธ์ของวัสดุโพลีเมอร์ [1-2] แล้วค่าที่ได้อยู่ในช่วงดังกล่าว ในส่วนของผลการทดสอบต่างๆ จะแสดงอยู่ในบทที่ 5

4.5 การออกแบบส่วนประมวลผลและแสดงผล

4.5.1 ส่วนประมวลผล

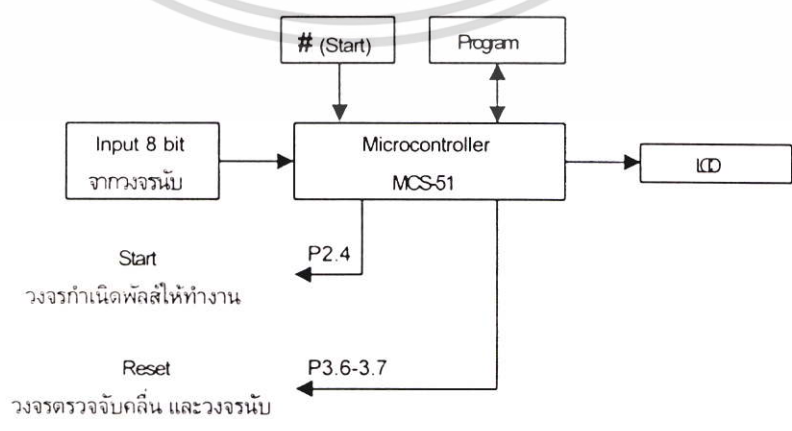
ในส่วนประมวลผลของเครื่องมือวัดจะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) ตระกูล MCS 51 เบอร์ 8051 ขนาด 40 ขา เป็นส่วนประมวลผล โดยมีพอร์ตสำหรับรับ - ส่งข้อมูลซึ่งเป็นสัญญาณดิจิทัลเข้าหรือออกจากตัว MCS 51 ทั้งหมด 4 พอร์ต โดยแต่ละพอร์ตจะรับส่งข้อมูลได้ 8 บิต [18] โดยมีพอร์ต P2.0 ถึง P2.3 ของไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำหน้าที่รับข้อมูลและเก็บข้อมูลของระยะทางที่จะทำการทดสอบ โดยมีคีย์แพดเป็นตัวเริ่มต้นการทำงานโดยสัญญาณจากโค้ด # ถูกส่งมายัง IC MM74C922 ให้ทำหน้าที่กระตุ้นสัญญาณเพื่อมาทริกวงจรถูกกำเนิดสัญญาณพัลส์ตัวที่ 2 ให้ส่งสัญญาณมายังไมโครคอนโทรลเลอร์ เมื่อ CPU รับสัญญาณกระตุ้นแล้วจะทำการส่งสัญญาณไปเคลียร์ข้อมูลของวงจรถววจับคลื่นสะท้อนและวงจรรนับ และส่งสัญญาณไปสั่ง Start ให้วงจรถูกกำเนิดสัญญาณพัลส์ IC เบอร์ 74HC123A #1 ส่งสัญญาณเข้าไปยังสายเคเบิลที่ทำการทดสอบ จากนั้นจึงหน่วงเวลาเพื่อรอรับข้อมูลของสัญญาณทั้ง 8 bit จากวงจรรนับมายังพอร์ต P1 ของไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อทำการประมวลผล โดยมีพอร์ต P0 และพอร์ต P2.5 ถึง P2.7 จะทำหน้าที่ส่งค่า

เอกสารสิ่งข้อมูลไปยังส่วนแสดงผลออกหน้าจอ LCD ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 วงจรไมโครคอนโทรเลอร์

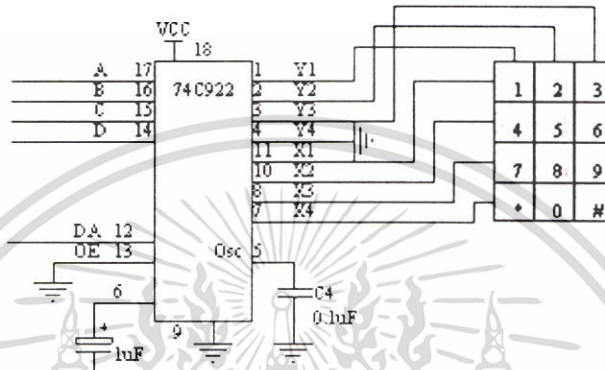
จากรูปที่ 4.19 เมื่อกดปุ่ม # (Start) IC MM74C922 จะทำการส่งโค้ด # และสัญญาณกระตุ้นให้กับ IC เบอร์ 74HC123A #2 เพื่อสร้างสัญญาณขอบขาลงให้กับ CPU เมื่อ CPU รับสัญญาณกระตุ้นแล้วจะทำการส่งสัญญาณเคลียร์ส่วนต่างๆ ของวงจร และส่งสัญญาณไปตั้ง Start ให้วงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์ IC เบอร์ 74HC123A #1 ทำการส่งสัญญาณพัลส์เข้าไปในสายเคเบิล และหน่วยเวลาเพื่อรอรับค่าจากวงจรมับ เพื่อนำค่ามาคำนวณหาค่า ϵ , ของฉนวนสายเคเบิล พร้อมทั้งสั่งให้แสดงผลออกหน้าจอ LCD



เอกสารรูปที่ 4.19 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของส่วนประมวลผล ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.2 คีย์แพด

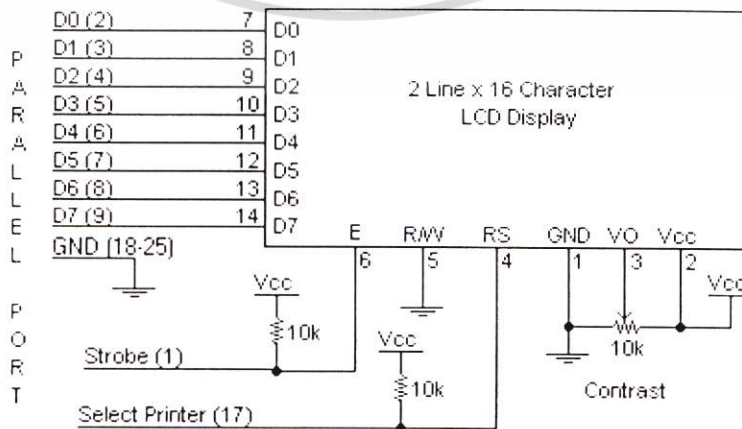
ในส่วนการทำงานของคีย์แพดจะใช้งานโดยต่อร่วมกับ IC MM74C922 (16-Key Encoder) ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นตัวป้อนค่าระยะความยาวของสายเคเบิลที่ทดสอบ โดยจะส่งข้อมูลเป็น Data Output ให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์ทำการเก็บข้อมูลของระยะทางที่ป้อนและทำหน้าที่เป็นตัวทริกวงจรถูกกำเนิดสัญญาณพัลส์ให้เริ่มการทำงาน เพื่อรอช่วงเวลาการสะท้อนกลับของสัญญาณก่อนจะนำไปประมวลผลตามสมการที่ได้โปรแกรมไว้จอหน้าจอล CD



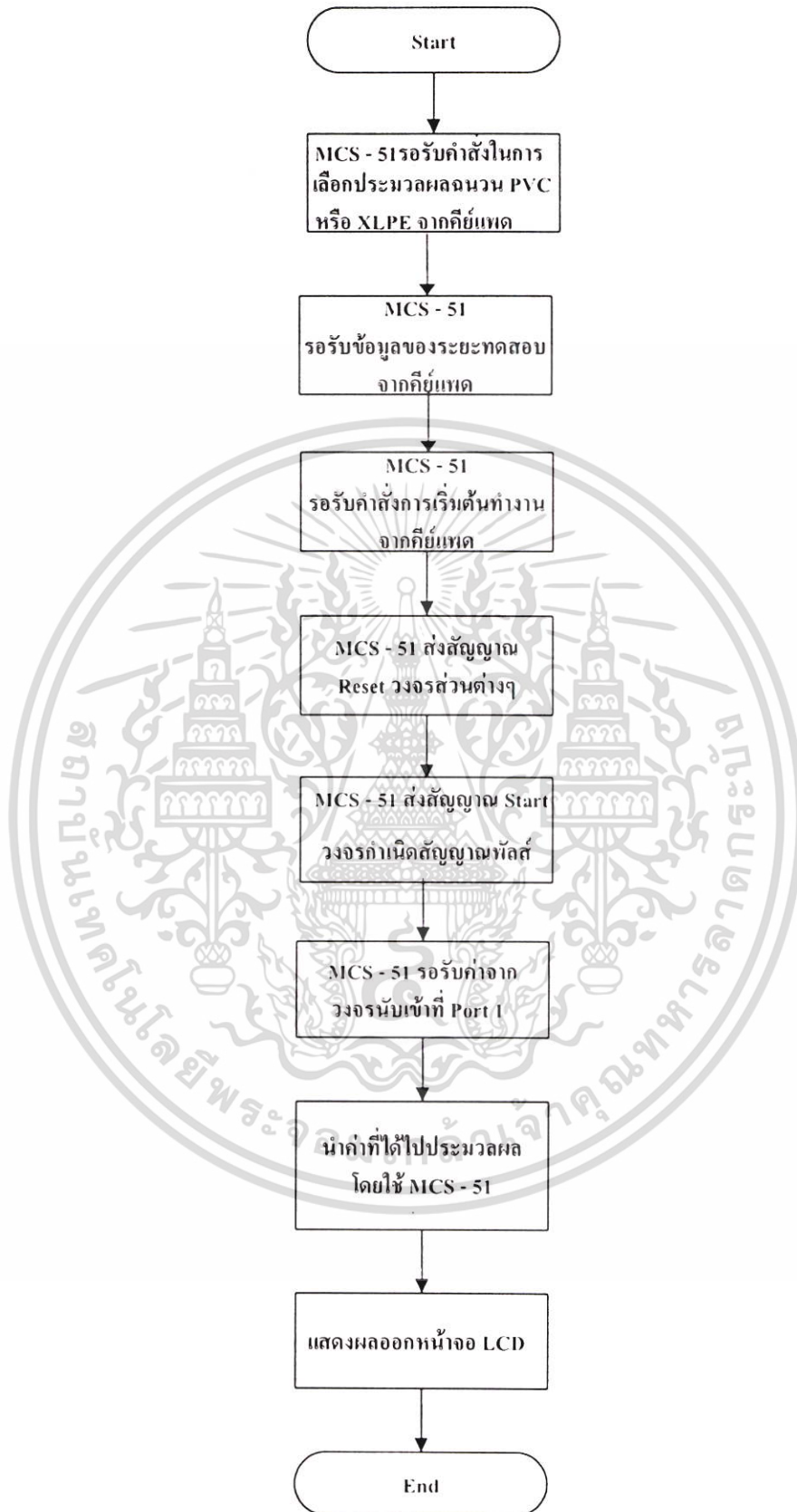
รูปที่ 4.20 การทำงานของคีย์แพด

4.5.3 ส่วนแสดงผล

สำหรับเครื่องมือวัดนี้จะใช้ตัวแสดงแบบ LCD 2 บรรทัด ขนาด 16 ตัวอักษร/บรรทัด อินเทอร์เฟซเฟสกับ 8051 ตามวงจรถูกอินเทอร์เฟซดังรูปที่ 4.17 โดยตัว Display จะประกอบด้วยวีรจิสเตอร์ 2 ตัว โดยตัวหนึ่งทำหน้าที่สำหรับรับคำสั่ง (RS = 0) สำหรับพื้นที่หน่วยความจำที่ใช้งานสามารถโปรแกรมให้แสดงผลตามที่ต้องการ โดยใช้รูปแบบของ Dot matrix และอีกตัวหนึ่งสำหรับรูปที่ต้องการแสดงบนดิสเพลย์ (RS = 1) โดยที่ขา 7 - 14 จะถูกใช้ในการส่งคำสั่ง/ข้อมูลไปยังพอร์ต 0 ของไมโครคอนโทรลเลอร์และที่ขา 4 - 6 จะถูกส่งไปยังพอร์ต 2.5 ถึง 2.7 ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดค่า RS และ R/W

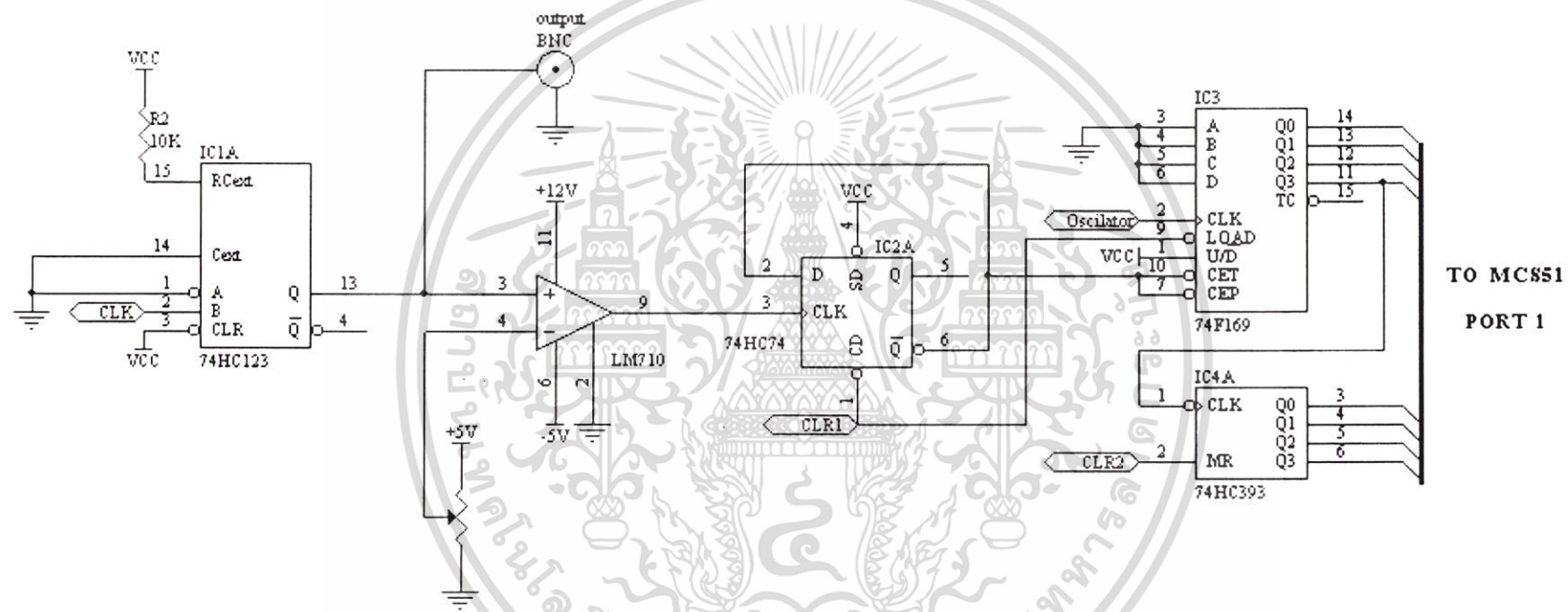


เอกสารรูปที่ 4.21 วงจรแสดงผล 2-Line x 16 Character LCD Display ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

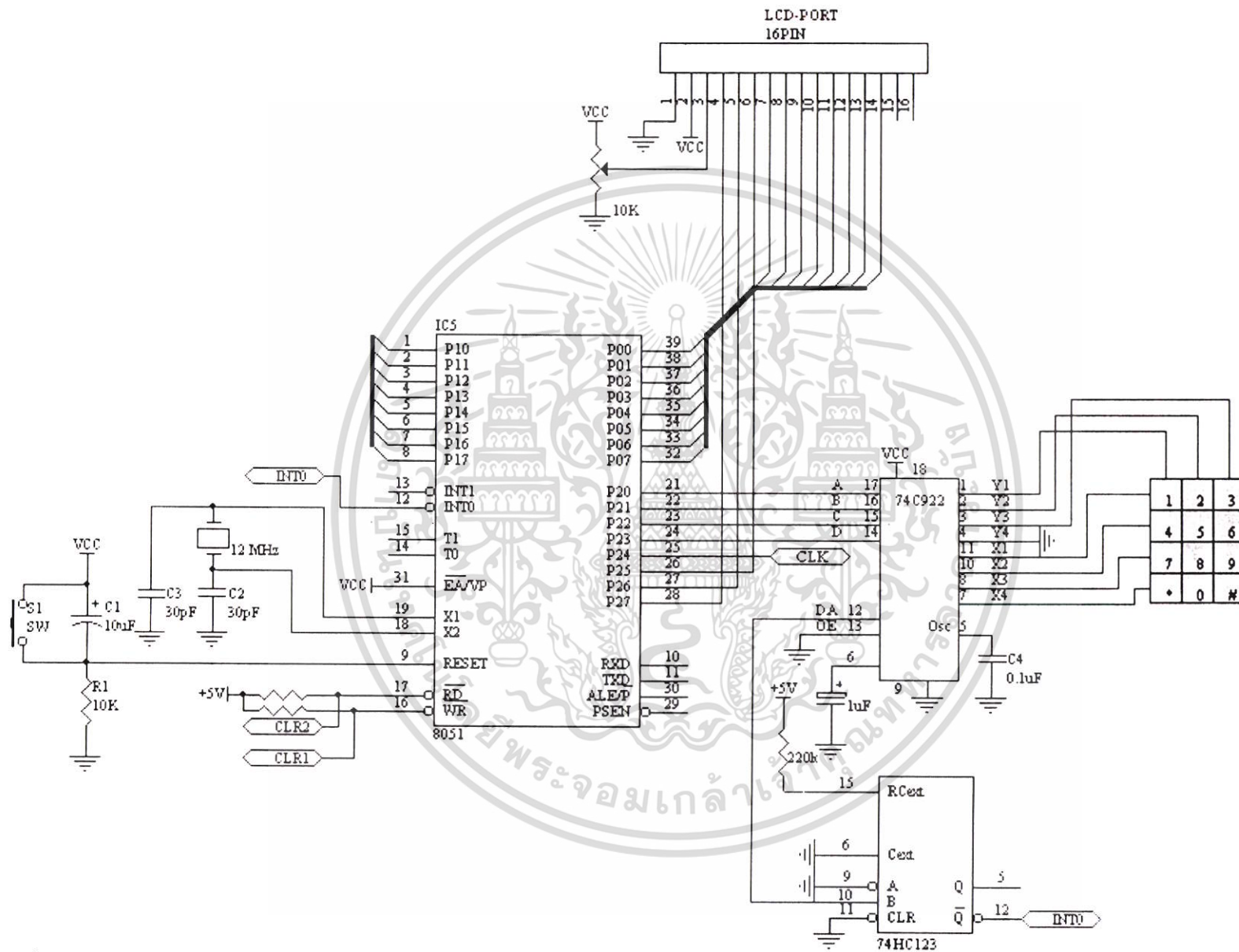


รูปที่ 4.22 โฟลว์ชาร์ตการทำงานของโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.23 วงจรรวม



รูปที่ 4.24 วงจรส่วนประมวลผลและส่วนแสดงผล

4.6 บทสรุป

จากเครื่องมือวัดค่าเพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์ที่ทำการออกแบบสร้าง สามารถนำไปใช้งานตามสถานที่ต่างๆ ได้สะดวก โดยสามารถเลือกใช้แหล่งจ่ายไฟกระแสสลับ 220 Vac หรือจากแบตเตอรี่ขนาด 9 Vdc ป้อนให้กับเครื่องมือวัด โดยเครื่องมือวัดที่จัดสร้างขึ้นนี้มีขนาดเล็กกระทัดรัด เพื่อสะดวกต่อการเคลื่อนย้ายและง่ายต่อการนำไปใช้งานอีกทั้งไม่มีขั้นตอนที่ยุ่งยาก และสามารถหาค่าค่าเพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์ของฉนวน PVC และ XLPE ของสายเคเบิลแรงต่ำและสายเคเบิลแรงสูงได้ ในช่วงของระยะความยาวตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ ในส่วนความถูกต้องของผลการทดสอบจากเครื่องมือวัดและเทคนิคที่นำเสนอจะแสดงในส่วนของบทต่อไป โดยการนำไปเปรียบเทียบตามตารางแสดงค่าเพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์ของวัสดุโพลีเมอร์[1-2] และผลที่ได้จากการคำนวณ โดยวิธีการวัดหาค่าคาปาซิแตนซ์และแฟกเตอร์ล้งงานสูญเสียค่าไดอิเล็กตริกตามมาตรฐาน [3-4]



รูปที่ 4.25 ภายนอกและภายในเครื่องมือวัดค่าเพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์

บทที่ 5

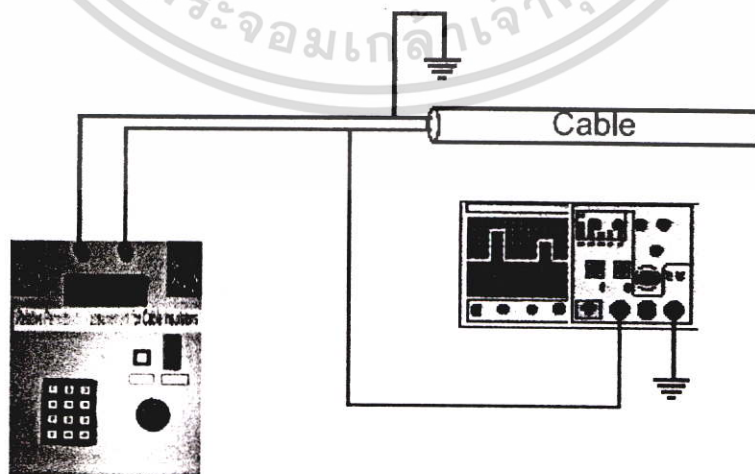
ผลการทดสอบและเปรียบเทียบเครื่องมือวัดค่าเพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์ของฉนวนสายเคเบิล สัมพัทธ์ของฉนวนสายเคเบิล

5.1 บทนำ

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการทดสอบเครื่องวัดค่าเพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์ของฉนวนสายเคเบิล โดยใช้เทคนิคของคลื่นเดินทางจากเครื่องมือวัดที่ทำการออกแบบสร้าง โดยทำการทดสอบฉนวน PVC และ XLPE ของตัวอย่างสายเคเบิลแรงต่ำประเภท 2 ตัวนำ (Twin Conductors) และสายเคเบิลใต้ดินขนาดพิกัด 24 kV (Underground Cable) โดยทำการทดสอบผลของระยะความยาว ขนาด และ อุณหภูมิ รวมทั้งความถูกต้องของเครื่องมือวัด และทำการตรวจวัดช่วงเวลาการสะท้อนกลับของสัญญาณจากออสซิลโลสโคป เพื่อคำนวณหาค่าเพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์จากช่วงเวลาการสะท้อนกลับของสัญญาณมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากเครื่องมือวัดที่ทำการออกแบบ และการทดสอบเทียบกับตารางแสดงค่าเพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์ของวัสดุโพลีเมอร์ [1-2] รวมทั้งค่าที่คำนวณจากวิธีการทดสอบวัดหาค่าคาปาซิแตนซ์และแฟลคเตอร์พลังงานสูญเสียลาไดอิเล็กตริกตามมาตรฐาน (บทที่ 3) [3-4]

5.2 วิธีและขั้นตอนการทดสอบ

1. จ่ายไฟให้กับเครื่องมือวัดโดยสามารถใช้กับแหล่งจ่ายไฟกระแสสลับหรือจากแบตเตอรี่ขนาด 9 Vdc
2. ต่อวงจรดังรูป



รูปที่ 5.1 วงจรทดสอบหาค่าเพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งมอบให้กับการใช้งานเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เปิดสวิตช์ของเครื่องมือวัด หน้าจอจะแสดง KMITL 2003 R. PERMITTIVITY



รูปที่ 5.2 หน้าจอแสดงความพร้อมการทำงาน

4. หน้าจอแสดง 1. PVC INSULATOR และ 2. XLPE INSULATOR กดหมายเลข 1 หรือ 2 เพื่อเลือกชนิดฉนวนที่ต้องการทดสอบ



รูปที่ 5.3 หน้าจอแสดงการเลือกชนิดฉนวนที่ต้องการทดสอบ

5. ป้อนระยะความยาวที่ทำการทดสอบจากคีย์แพด ซึ่งสามารถป้อนความละเอียดของระยะทางที่ทดสอบในทศนิยม 3 ตำแหน่ง โดยมีหน่วยความยาวเป็นเมตร พร้อมทั้งปรับ SELECTOR ไปยังตำแหน่งของช่วงระยะความยาวสายที่ทดสอบ (ภาคผนวก ง.)



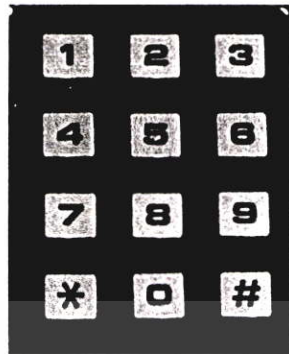
รูปที่ 5.4 หน้าจอแสดงการป้อนค่าระยะทางทดสอบ



รูปที่ 5.5 ตัวอย่างการป้อนค่าระยะทางทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. กดปุ่ม # เริ่มต้นการทำงานของเครื่องมือวัด



รูปที่ 5.6 แป้นพิมพ์คีย์แพดสำหรับป้อนค่าระยะทางและการเริ่มต้นทำงานของเครื่องมือวัด

7. หน้าจอแสดงค่า D คือ ระยะความยาวของสายที่ทดสอบ และ E_r คือ ค่าเพอร์มิททิวิตีสัมพัทธ์ของฉนวนสายเคเบิลที่ทดสอบ



รูปที่ 5.7 ผลการทดสอบของเครื่องมือวัดแสดงออกหน้าจอ LCD Module

8. บันทึกรูปสัญญาณที่วัดจากออสซิลโลสโคป และนำช่วงเวลาที่สะท้อนกลับของคลื่นมาคำนวณหาค่าเพอร์มิททิวิตีสัมพัทธ์ตามสมการที่ 4.4
9. บันทึกผลการคำนวณและค่าที่แสดงออกหน้าจอของเครื่องมือวัดลงในตาราง
10. กดปุ่ม RESET เพื่อเคลียร์วงจรส่วนต่างๆ ของเครื่องมือวัด เพื่อความพร้อมในการทดสอบต่อไป
11. ในการทดสอบหัวข้อต่างๆ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะทำการทดสอบเพื่อศึกษาถึงผลของระยะความยาว อุณหภูมิ ขนาดของสายทดสอบ โดยจะทำการทดสอบหาค่า E_r ของสายเคเบิลแรงต่ำและแรงสูง ของตัวอย่างสาย 300 V 2-core PVC Insulated and Sheathed, Flat Type (VAF) ฉนวน PVC และสาย 0.6/1 kV, Copper Cable Twin Conductor Cross-linked Polyethylene Insulated and Polyethylene Sheathed และสาย 12/20 kV, Underground Cable Copper Stranded Conductor XLPE Insulated and PE Sheathed ฉนวน XLPE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 การทดสอบหาค่าเพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์ของฉนวนสายเคเบิลที่ระยะความยาวต่างๆ

ทำการทดสอบตามขั้นตอนการทดสอบในหัวข้อ 5.2 โดยใช้สายเคเบิลแรงต่ำ (VAF) ขนาด 1 mm^2 สาย 0.6/1 kV. Copper Cable Twin Conductor ขนาด 6 mm^2 และสายเคเบิลใต้ดินขนาด 35 mm^2 ที่ระยะความยาวต่างๆ จากนั้นทำการตรวจวัดช่วงเวลาการสะท้อนกลับด้วยออสซิลโลสโคป และนำช่วงเวลาที่ได้อ่านหาค่า ϵ_r ในสมการที่ 4.4 โดยจะนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับค่าจากเครื่องมือวัดที่จัดสร้างขึ้น เพื่อหาค่าความคลาดเคลื่อนในแต่ละระยะความยาวที่ทำการทดสอบ รวมทั้งศึกษาถึงผลของระยะทางต่อช่วงเวลาการสะท้อนกลับของคลื่นจากค่าที่ทำการตรวจวัดได้ในระยะความยาวสายต่างๆ

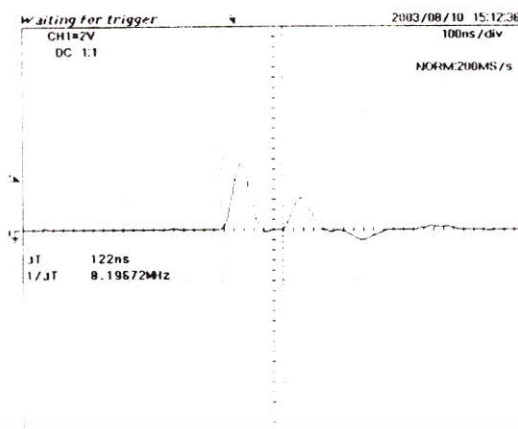


รูปที่ 5.8 การทดสอบหาค่า ϵ_r ของฉนวน PVC และ XLPE ของสายเคเบิลที่ระยะความยาวสายต่างๆ

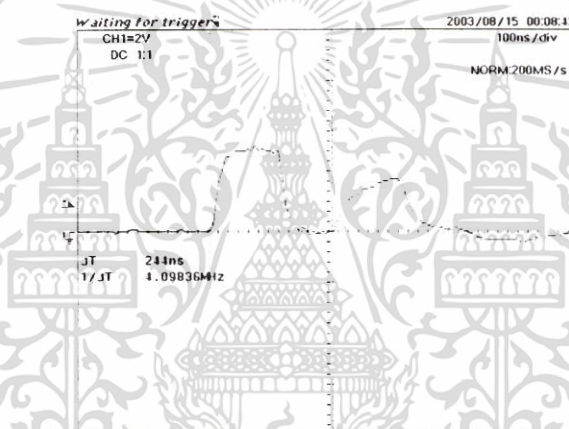
5.3.1 ผลการทดสอบหาค่าเพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์ของสาย 300 V 2-core PVC Insulated and Sheathed, Flat Type ที่ระยะความยาวสายต่างๆ



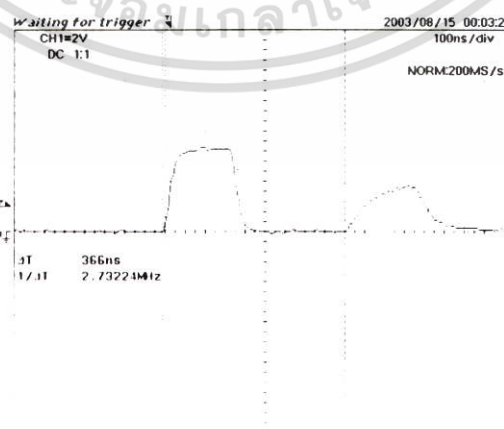
รูปที่ 5.9 การทดสอบหาค่า ϵ_r ของสาย 300 V 2-core PVC Insulated and Sheathed. Flat Type เอกสารนี้เป็นเอกสารขนาด 1 mm^2 ที่ระยะความยาวต่างๆ ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



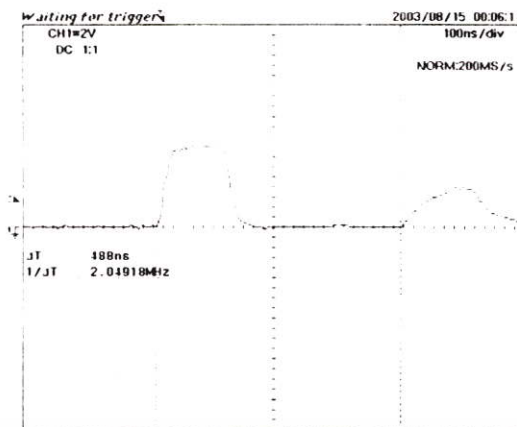
รูปที่ 5.10 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 300 V 2-core PVC Insulated and Sheathed. Flat Type ขนาด 1 mm² ที่ระยะความยาว 10 เมตร



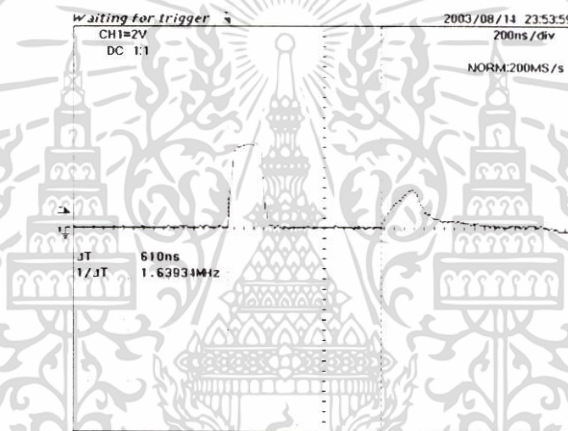
รูปที่ 5.11 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 300 V 2-core PVC Insulated and Sheathed. Flat Type ขนาด 1 mm² ที่ระยะความยาว 20 เมตร



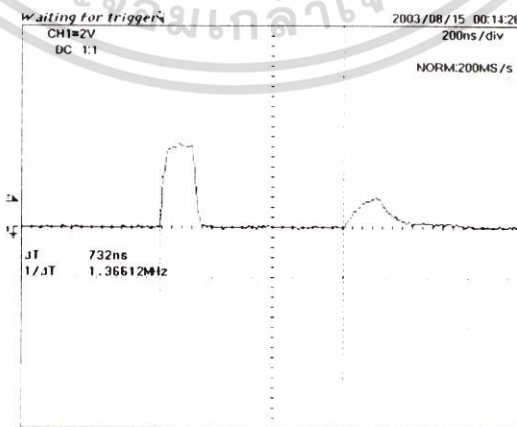
รูปที่ 5.12 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 300 V 2-core PVC Insulated and Sheathed. Flat เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับวงการศึกษาเพื่อตรวจสอบเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.13 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 300 V 2-core PVC Insulated and Sheathed, Flat Type ขนาด 1 mm² ที่ระยะความยาว 40 เมตร

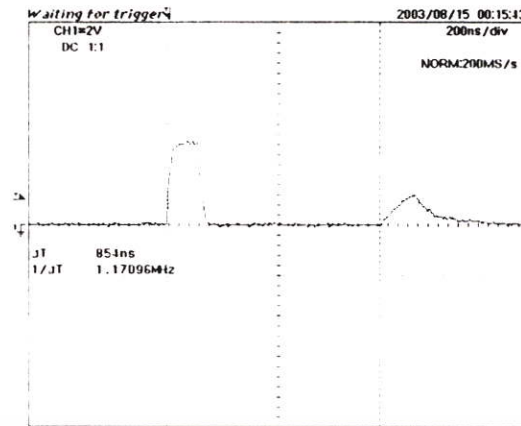


รูปที่ 5.14 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 300 V 2-core PVC Insulated and Sheathed, Flat Type ขนาด 1 mm² ที่ระยะความยาว 50 เมตร

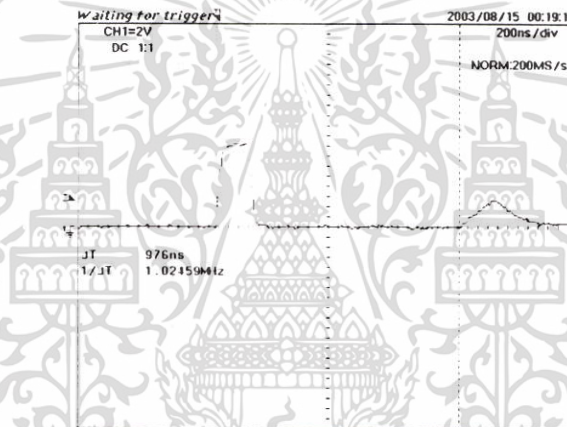


รูปที่ 5.15 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 300 V 2-core PVC Insulated and Sheathed, Flat

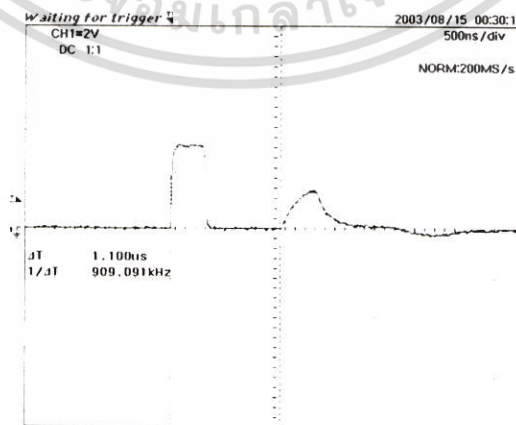
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้ที่ระยะความยาว 60 เมตรนั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.16 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 300 V 2-core PVC Insulated and Sheathed, Flat Type ขนาด 1 mm² ที่ระยะความยาว 70 เมตร

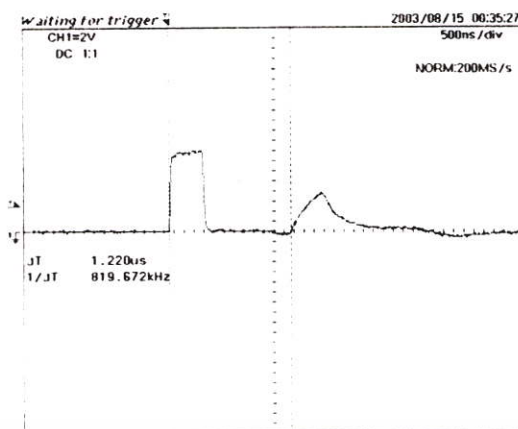


รูปที่ 5.17 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 300 V 2-core PVC Insulated and Sheathed, Flat Type ขนาด 1 mm² ที่ระยะความยาว 80 เมตร

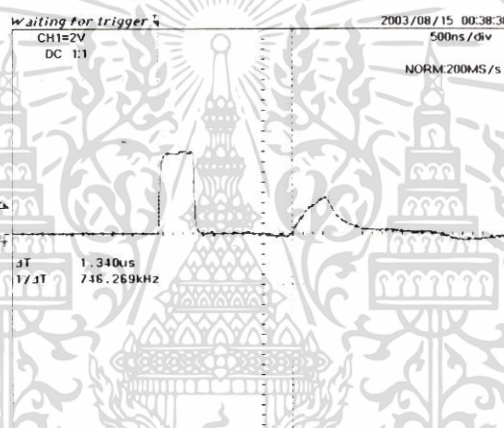


รูปที่ 5.18 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 300 V 2-core PVC Insulated and Sheathed, Flat Type ขนาด 1 mm² ที่ระยะความยาว 90 เมตร

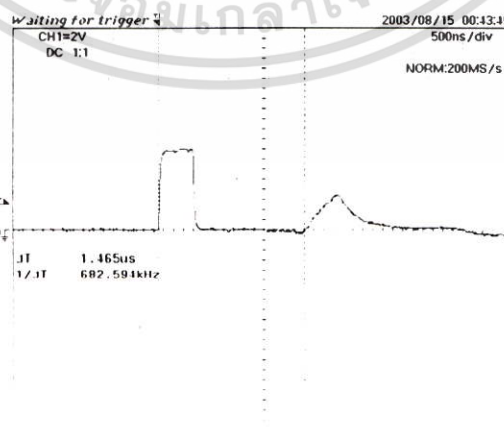
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในวงที่อาคารสื่อฯ เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



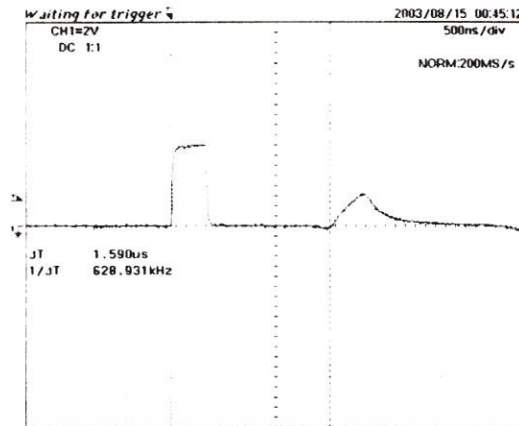
รูปที่ 5.19 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 300 V 2-core PVC Insulated and Sheathed. Flat Type ขนาด 1 mm² ที่ระยะความยาว 100 เมตร



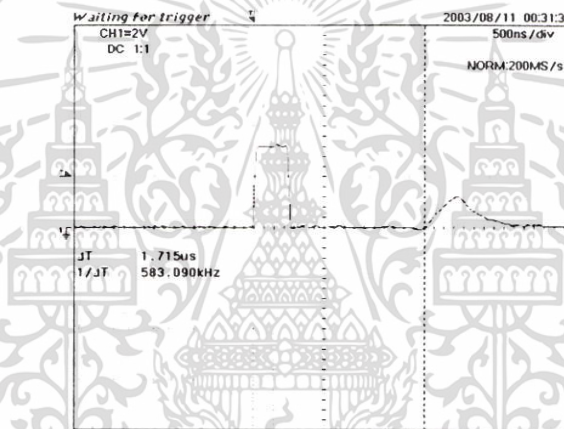
รูปที่ 5.20 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 300 V 2-core PVC Insulated and Sheathed. Flat Type ขนาด 1 mm² ที่ระยะความยาว 110 เมตร



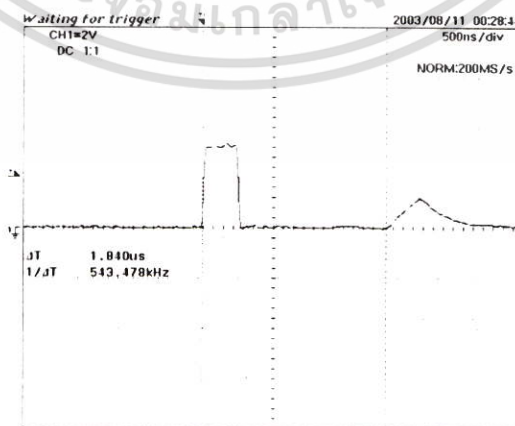
รูปที่ 5.21 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 300 V 2-core PVC Insulated and Sheathed. Flat
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับวงการศึกษาเพื่อวัตถุประสงค์ของเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
Type ขนาด 1 mm² ที่ระยะความยาว 120 เมตร
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.22 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 300 V 2-core PVC Insulated and Sheathed. Flat Type ขนาด 1 mm² ที่ระยะความยาว 130 เมตร

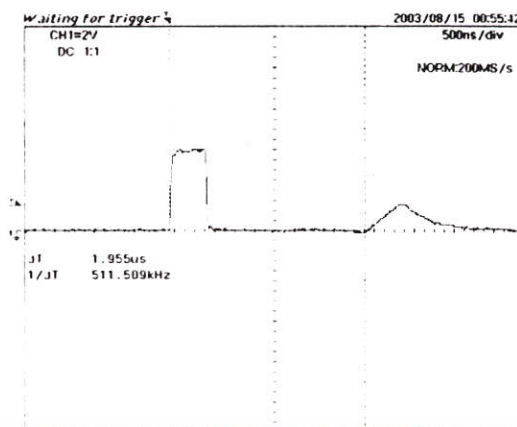


รูปที่ 5.23 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 300 V 2-core PVC Insulated and Sheathed. Flat Type ขนาด 1 mm² ที่ระยะความยาว 140 เมตร

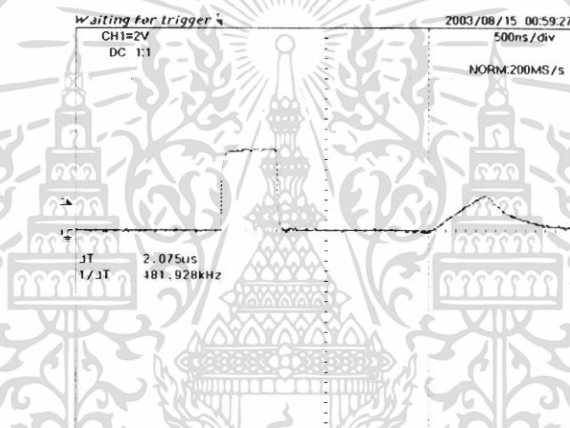


รูปที่ 5.24 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 300 V 2-core PVC Insulated and Sheathed. Flat

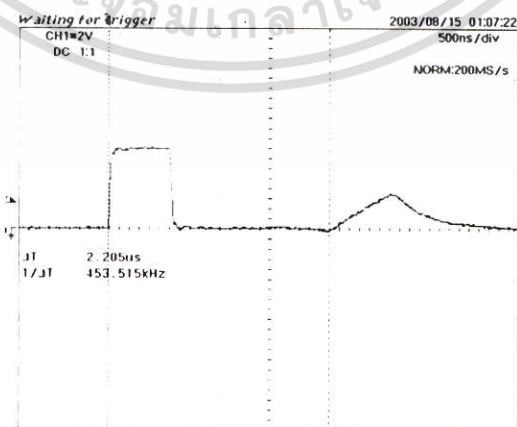
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เฉพาะของหน่วยงานนั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.25 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 300 V 2-core PVC Insulated and Sheathed, Flat Type ขนาด 1 mm² ที่ระยะความยาว 160 เมตร

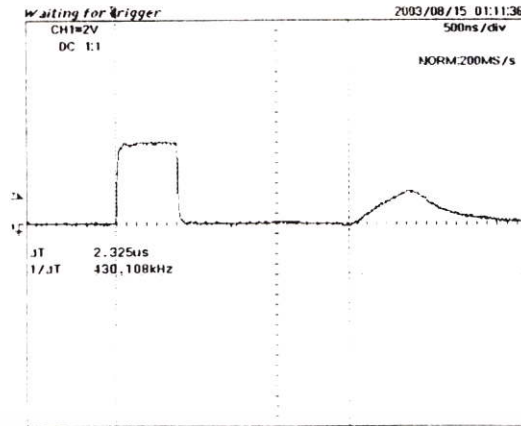


รูปที่ 5.26 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 300 V 2-core PVC Insulated and Sheathed, Flat Type ขนาด 1 mm² ที่ระยะความยาว 170 เมตร

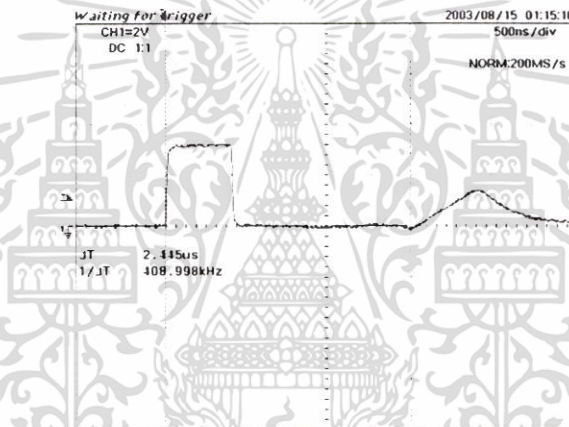


รูปที่ 5.27 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 300 V 2-core PVC Insulated and Sheathed, Flat Type ขนาด 1 mm² ที่ระยะความยาว 180 เมตร

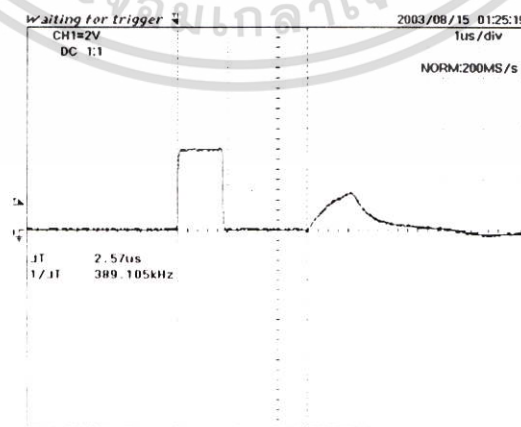
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



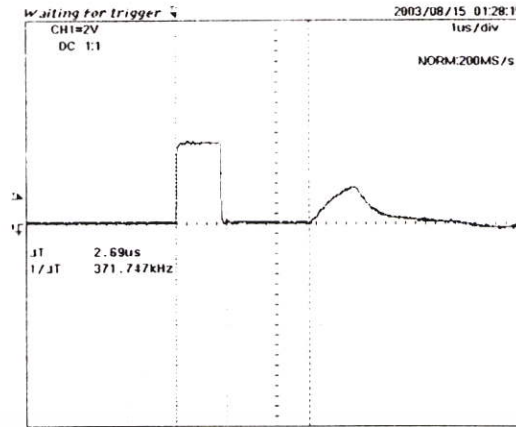
รูปที่ 5.28 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 300 V 2-core PVC Insulated and Sheathed, Flat Type ขนาด 1 mm² ที่ระยะความยาว 190 เมตร



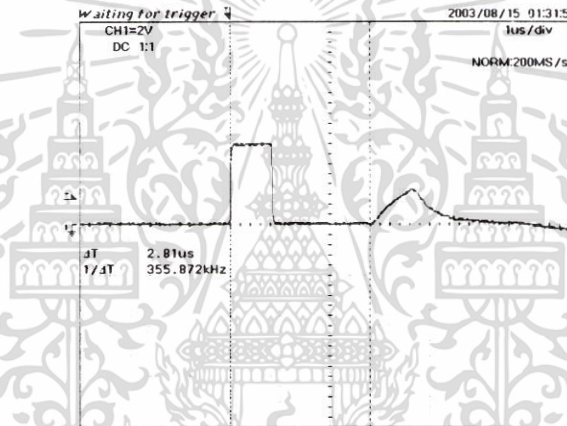
รูปที่ 5.29 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 300 V 2-core PVC Insulated and Sheathed, Flat Type ขนาด 1 mm² ที่ระยะความยาว 200 เมตร



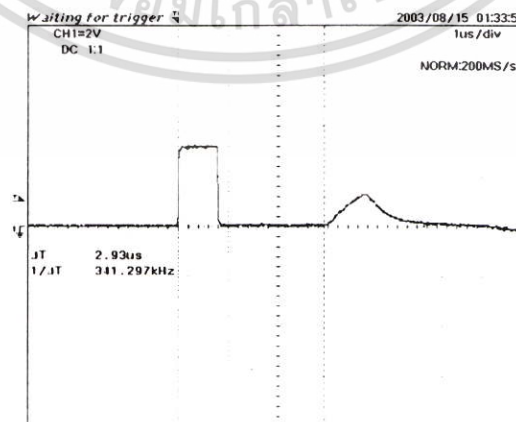
รูปที่ 5.30 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 300 V 2-core PVC Insulated and Sheathed, Flat
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานวิจัยเฉพาะของหน่วยงาน ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 Type ขนาด 1 mm² ที่ระยะความยาว 210 เมตร
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



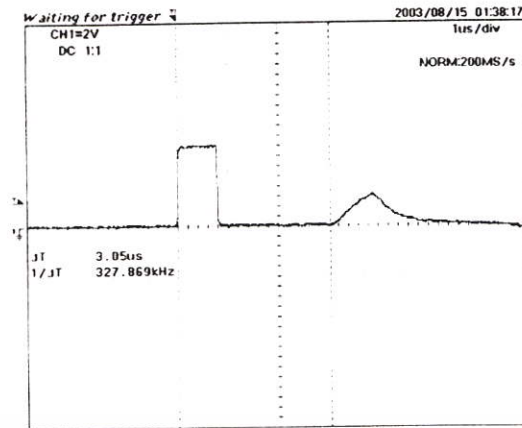
รูปที่ 5.31 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 300 V 2-core PVC Insulated and Sheathed, Flat Type ขนาด 1 mm² ที่ระยะความยาว 220 เมตร



รูปที่ 5.32 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 300 V 2-core PVC Insulated and Sheathed, Flat Type ขนาด 1 mm² ที่ระยะความยาว 230 เมตร



รูปที่ 5.33 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 300 V 2-core PVC Insulated and Sheathed, Flat
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรณีใช้งานเพื่อตรวจสอบเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
Type ขนาด 1 mm² ที่ระยะความยาว 240 เมตร
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.34 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 300 V 2-core PVC Insulated and Sheathed, Flat Type ขนาด 1 mm^2 ที่ระยะความยาว 250 เมตร

ตารางที่ 5.1 ผลการทดสอบหาค่า ϵ_r ของสาย 300 V 2-core PVC Insulated and Sheathed, Flat Type ที่ระยะความยาวสายต่างๆ

สแต็ปที่	ระยะความยาว	ช่วงเวลา (ns)	ค่า ϵ_r ที่คำนวณได้จากสัญญาณ	ค่า ϵ_r จากเครื่องมือวัด	ความคลาดเคลื่อน (%)
1	10	122	3.349	3.356	0.209
2	20	244	3.349	3.326	-0.687
2	30	366	3.349	3.352	0.089
2	40	488	3.349	3.326	-0.687
2	50	610	3.349	3.374	0.746
2	60	732	3.349	3.366	0.507
2	70	854	3.349	3.327	-0.657
3	80	976	3.349	3.323	-0.776
3	90	1100	3.361	3.313	-1.430
3	100	1220	3.349	3.366	0.537
3	110	1340	3.339	3.356	0.509
3	120	1465	3.354	3.379	0.745
3	130	1590	3.366	3.320	-1.367
3	140	1710	3.357	3.342	-0.298
3	150	1830	3.349	3.334	-0.448
3	160	1955	3.359	3.343	-0.476

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.1 (ต่อ)

4	170	2075	3.352	3.379	0.805
4	180	2205	3.376	3.348	-0.829
4	190	2325	3.369	3.352	-0.505
4	200	2440	3.349	3.366	0.508
4	210	2570	3.370	3.345	-0.742
4	220	2690	3.364	3.348	-0.476
4	230	2810	3.359	3.337	-0.655
4	240	2930	3.354	3.366	0.358
4	250	3050	3.349	3.358	0.269
ค่าเฉลี่ย			3.355	3.348	0.613

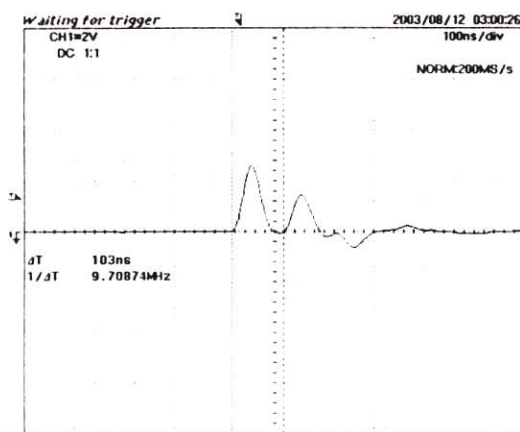
หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยในตารางหาได้จาก $|\%error|$

5.3.2 ผลการทดสอบหาค่าเพอร์มิททิวิตีสัมพัทธ์ของสาย 0.6/1 kV. Copper Cable Twin Conductor Cross-linked Polyethylene Insulated and Polyethylene Sheathed ที่ระยะความยาวสายต่างๆ

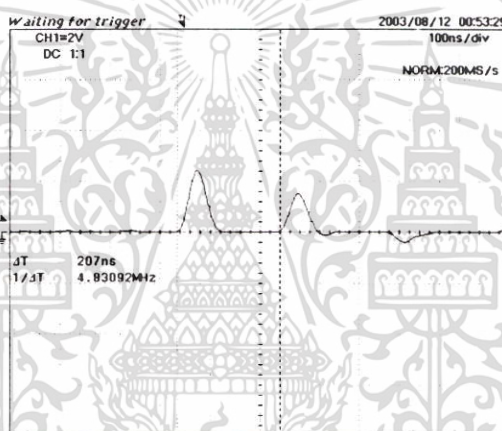


รูปที่ 5.35 การทดสอบหาค่าเพอร์มิททิวิตีสัมพัทธ์ของสาย 0.6/1 kV. Copper Cable Twin Conductor Cross-linked Polyethylene Insulated and Polyethylene Sheathed ที่ระยะความยาวสายต่างๆ

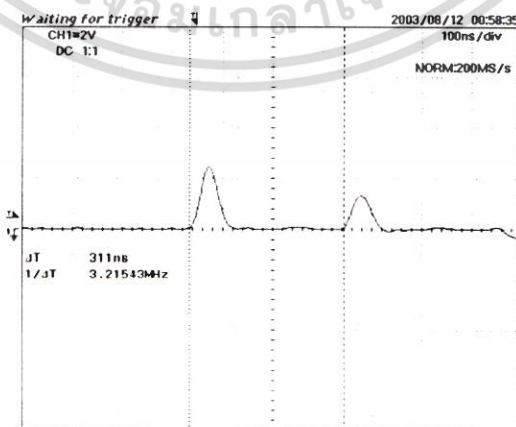
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.36 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 0.6/1 kV. Copper Cable Twin Conductor XLPE Insulated and Polyethylene Sheathed ขนาด 6 mm² ที่ระยะความยาว 10 เมตร

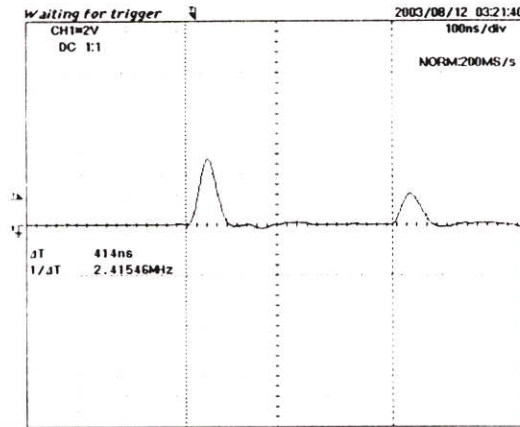


รูปที่ 5.37 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 0.6/1 kV. Copper Cable Twin Conductor XLPE Insulated and Polyethylene Sheathed ขนาด 6 mm² ที่ระยะความยาว 20 เมตร

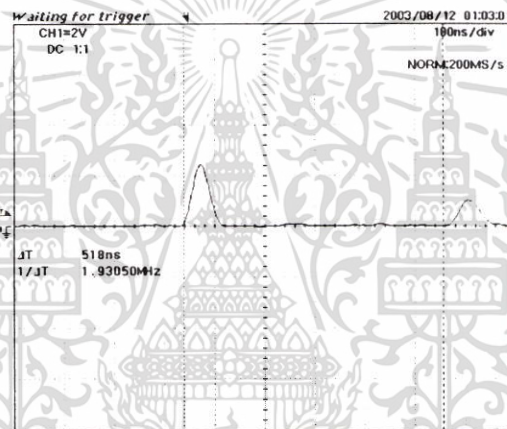


รูปที่ 5.38 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 0.6/1 kV. Copper Cable Twin Conductor XLPE Insulated and Polyethylene Sheathed ขนาด 6 mm² ที่ระยะความยาว 30 เมตร

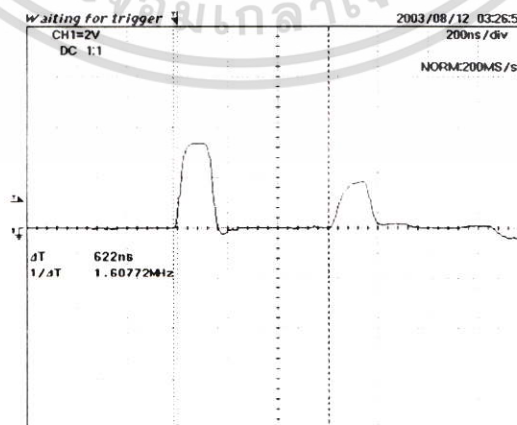
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สามารถนำข้อมูลไปใช้ประโยชน์ได้ตามสมควรที่ปรากฏอยู่ข้างต้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.39 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 0.6/1 kV. Copper Cable Twin Conductor XLPE Insulated and Polyethylene Sheathed ขนาด 6 mm² ที่ระยะความยาว 40 เมตร

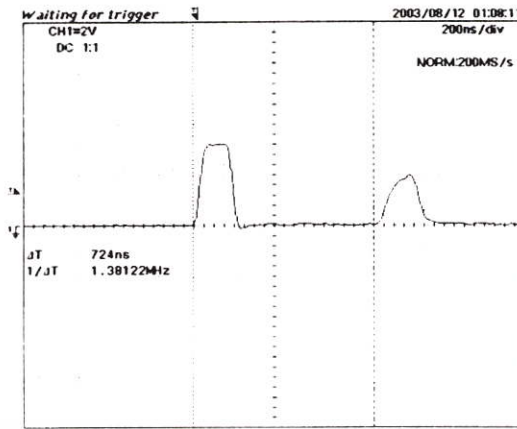


รูปที่ 5.40 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 0.6/1 kV. Copper Cable Twin Conductor XLPE Insulated and Polyethylene Sheathed ขนาด 6 mm² ที่ระยะความยาว 50 เมตร

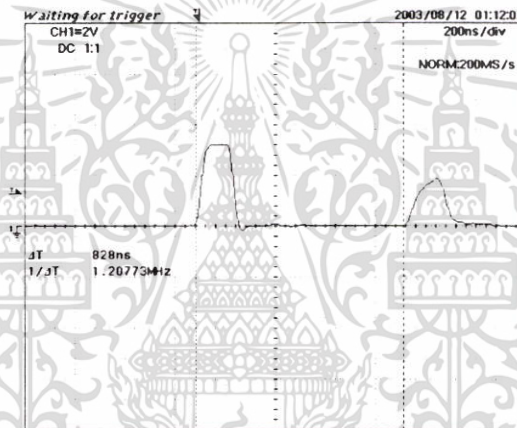


รูปที่ 5.41 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 0.6/1 kV. Copper Cable Twin Conductor XLPE Insulated and Polyethylene Sheathed ขนาด 6 mm² ที่ระยะความยาว 60 เมตร

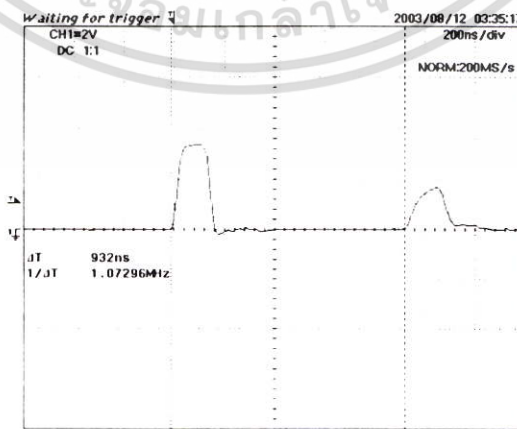
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับอาจารย์ผู้สอนที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.42 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 0.6/1 kV. Copper Cable Twin Conductor XLPE Insulated and Polyethylene Sheathed ขนาด 6 mm² ที่ระยะความยาว 70 เมตร

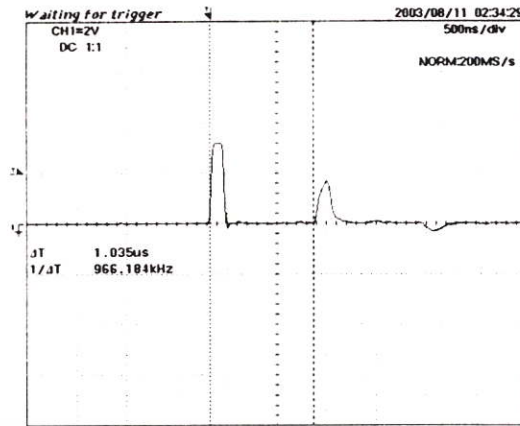


รูปที่ 5.43 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 0.6/1 kV. Copper Cable Twin Conductor XLPE Insulated and Polyethylene Sheathed ขนาด 6 mm² ที่ระยะความยาว 80 เมตร

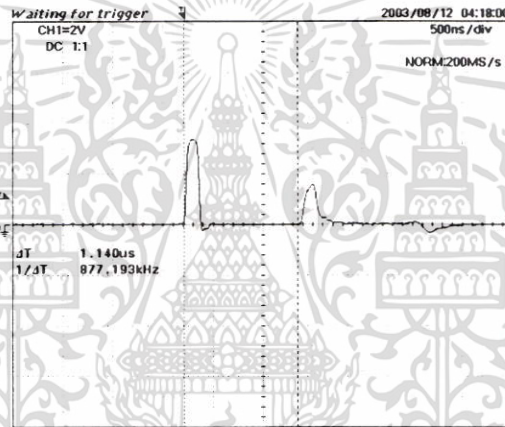


รูปที่ 5.44 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 0.6/1 kV. Copper Cable Twin Conductor XLPE Insulated and Polyethylene Sheathed ขนาด 6 mm² ที่ระยะความยาว 90 เมตร

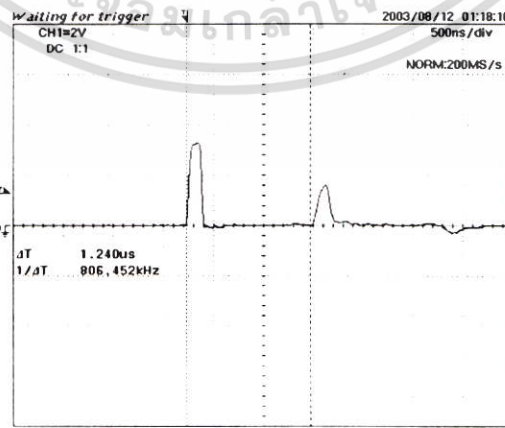
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของใช้ขงกรมการไฟฟ้าในไปซึ่งออกให้เพื่อใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.45 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 0.6/1 kV. Copper Cable Twin Conductor XLPE Insulated and Polyethylene Sheathed ขนาด 6 mm² ที่ระยะความยาว 100 เมตร

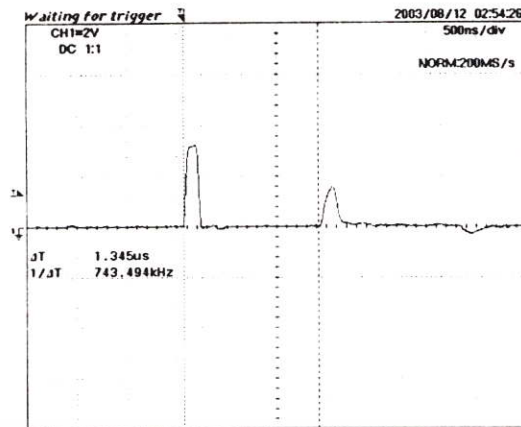


รูปที่ 5.46 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 0.6/1 kV. Copper Cable Twin Conductor XLPE Insulated and Polyethylene Sheathed ขนาด 6 mm² ที่ระยะความยาว 110 เมตร

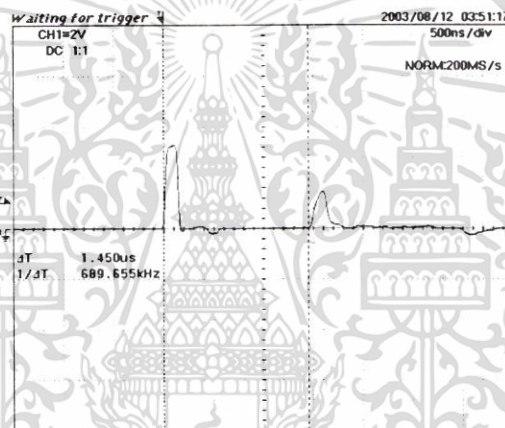


รูปที่ 5.47 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 0.6/1 kV. Copper Cable Twin Conductor XLPE Insulated and Polyethylene Sheathed ขนาด 6 mm² ที่ระยะความยาว 120 เมตร

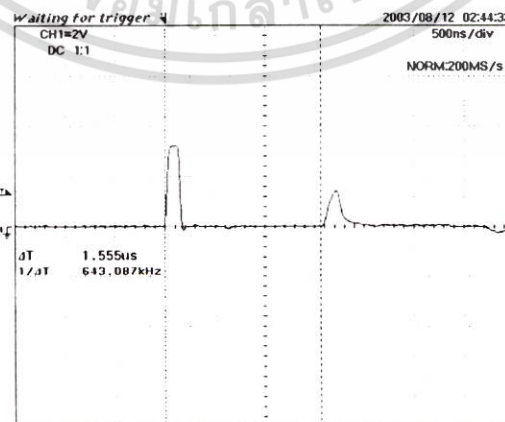
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของฝ่ายวิจัยและพัฒนาของกรมการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.48 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 0.6/1 kV. Copper Cable Twin Conductor XLPE Insulated and Polyethylene Sheathed ขนาด 6 mm² ที่ระยะความยาว 130 เมตร

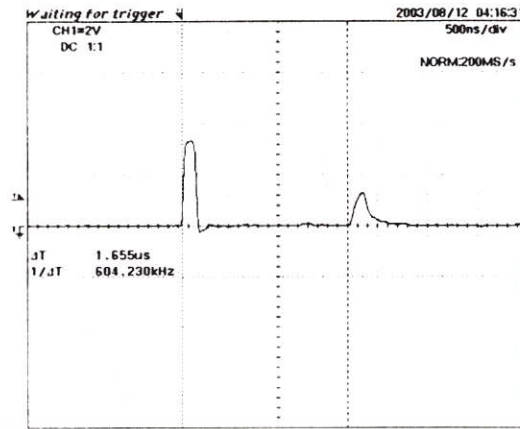


รูปที่ 5.49 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 0.6/1 kV. Copper Cable Twin Conductor XLPE Insulated and Polyethylene Sheathed ขนาด 6 mm² ที่ระยะความยาว 140 เมตร

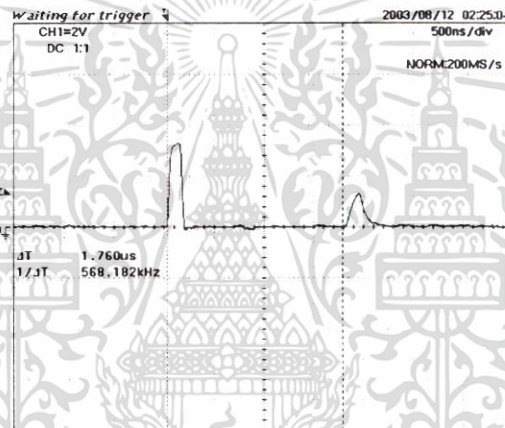


รูปที่ 5.50 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 0.6/1 kV. Copper Cable Twin Conductor XLPE Insulated and Polyethylene Sheathed ขนาด 6 mm² ที่ระยะความยาว 150 เมตร

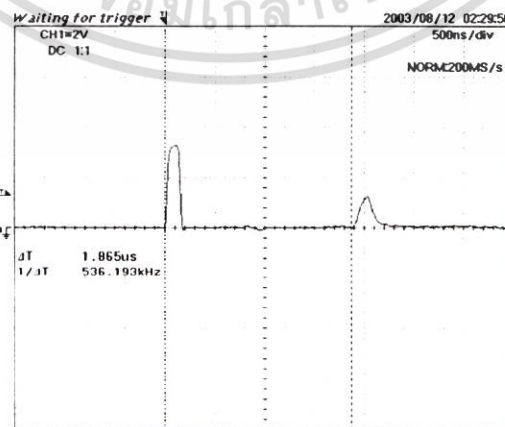
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับวงการใช้เฉพาะเพื่อการศึกษาระหว่างนั้น ไปขอเอาผิดให้วงใช้ไปจะขอโทษด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.51 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 0.6/1 kV. Copper Cable Twin Conductor XLPE Insulated and Polyethylene Sheathed ขนาด 6 mm² ที่ระยะความยาว 160 เมตร

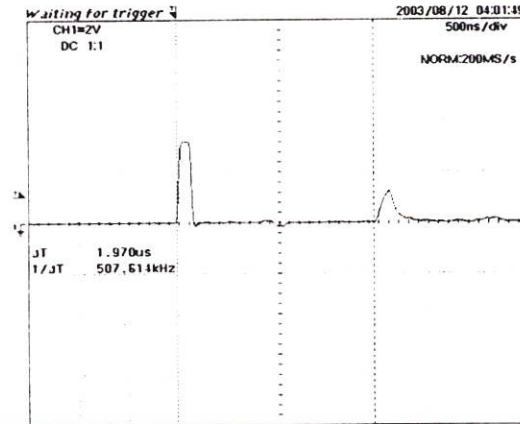


รูปที่ 5.52 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 0.6/1 kV. Copper Cable Twin Conductor XLPE Insulated and Polyethylene Sheathed ขนาด 6 mm² ที่ระยะความยาว 170 เมตร

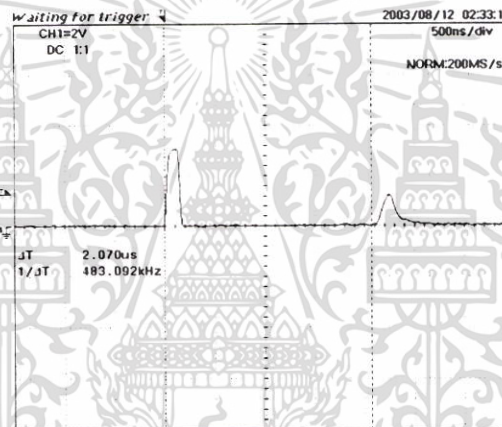


รูปที่ 5.53 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 0.6/1 kV. Copper Cable Twin Conductor XLPE Insulated and Polyethylene Sheathed ขนาด 6 mm² ที่ระยะความยาว 180 เมตร

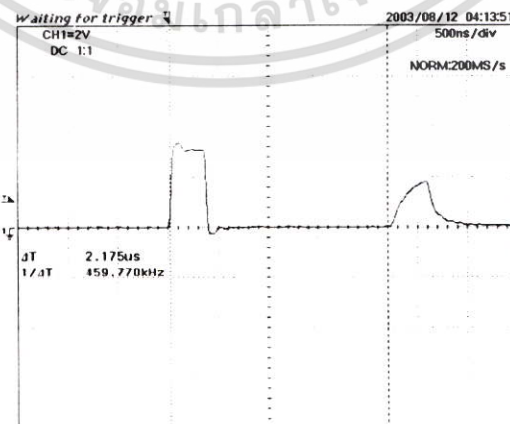
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับอาจารย์เท่านั้น ไม่สามารถเผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.54 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 0.6/1 kV. Copper Cable Twin Conductor XLPE Insulated and Polyethylene Sheathed ขนาด 6 mm² ที่ระยะความยาว 190 เมตร

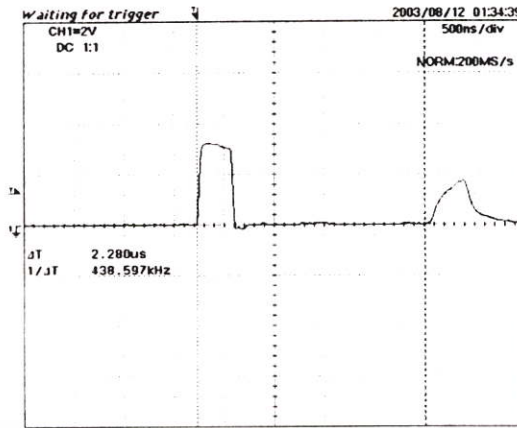


รูปที่ 5.55 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 0.6/1 kV. Copper Cable Twin Conductor XLPE Insulated and Polyethylene Sheathed ขนาด 6 mm² ที่ระยะความยาว 200 เมตร

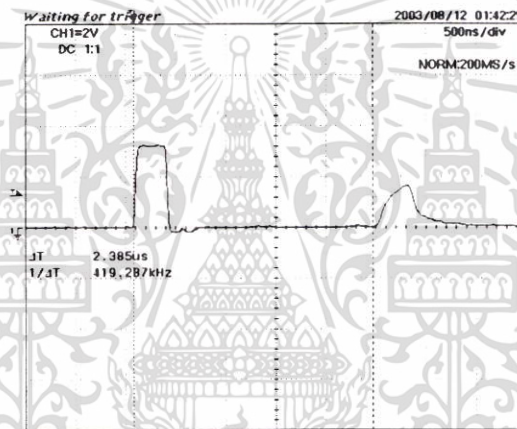


รูปที่ 5.56 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 0.6/1 kV. Copper Cable Twin Conductor XLPE Insulated and Polyethylene Sheathed ขนาด 6 mm² ที่ระยะความยาว 210 เมตร

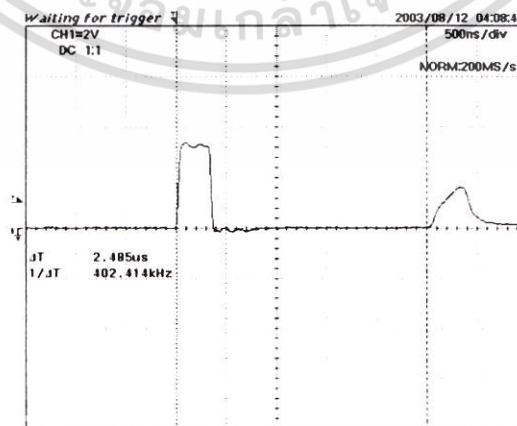
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.57 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 0.6/1 kV. Copper Cable Twin Conductor XLPE Insulated and Polyethylene Sheathed ขนาด 6 mm² ที่ระยะความยาว 220 เมตร

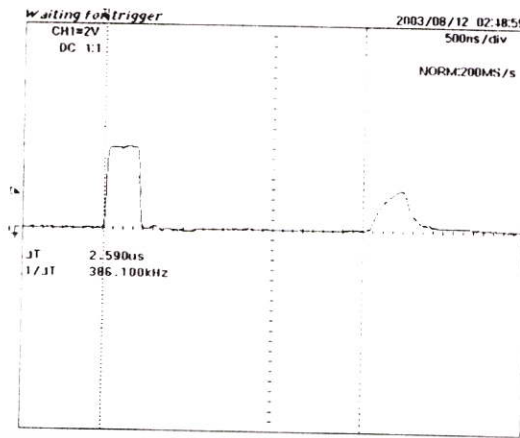


รูปที่ 5.58 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 0.6/1 kV. Copper Cable Twin Conductor XLPE Insulated and Polyethylene Sheathed ขนาด 6 mm² ที่ระยะความยาว 230 เมตร



รูปที่ 5.59 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 0.6/1 kV. Copper Cable Twin Conductor XLPE Insulated and Polyethylene Sheathed ขนาด 6 mm² ที่ระยะความยาว 240 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของกรมการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ซึ่งหากมีผู้ใดนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากกรมการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค หรือมีการนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากกรมการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค จะถือว่าผิดกฎหมาย และต้องรับผิดชอบต่อเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.60 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 0.6/1 kV. Copper Cable Twin Conductor XLPE Insulated and Polyethylene Sheathed ขนาด 6 mm^2 ที่ระยะความยาว 250 เมตร

ตารางที่ 5.2 ผลการทดสอบหาค่า ϵ_r ของสาย 0.6/1 kV. Copper Cable Twin Conductor ที่ระยะความยาวสายต่างๆ

สแต็ปที่	ระยะความยาว	ช่วงเวลา (ns)	ค่า ϵ_r ที่คำนวณได้จากสัญญาณ	ค่า ϵ_r จากเครื่องมือวัด	ความคลาดเคลื่อน (%)
1	10	103	2.387	2.368	-0.796
1	20	207	2.410	2.415	0.207
1	30	311	2.418	2.415	-0.124
1	40	414	2.410	2.418	0.332
1	50	518	2.415	2.411	-0.166
2	60	622	2.418	2.413	-0.207
2	70	724	2.407	2.412	0.208
2	80	828	2.410	2.387	0.954
2	90	932	2.413	2.403	-0.414
2	100	1035	2.410	2.416	0.249
2	110	1140	2.417	2.391	1.076
2	120	1240	2.403	2.411	0.333
2	130	1345	2.409	2.415	0.249
2	140	1450	2.414	2.418	0.166
2	150	1555	2.418	2.406	-0.496
2	160	1655	2.407	2.412	0.208

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.2 (ต่อ)

2	170	1760	2.412	2.414	0.083
2	180	1865	2.415	2.401	-0.580
2	190	1970	2.419	2.413	-0.248
2	200	2070	2.410	2.411	0.041
3	210	2175	2.414	2.413	-0.041
3	220	2280	2.417	2.419	0.083
3	230	2385	2.419	2.413	-0.248
3	240	2485	2.412	2.411	-0.041
3	250	2590	2.415	2.413	-0.083
ค่าเฉลี่ย			2.412	2.409	0.305

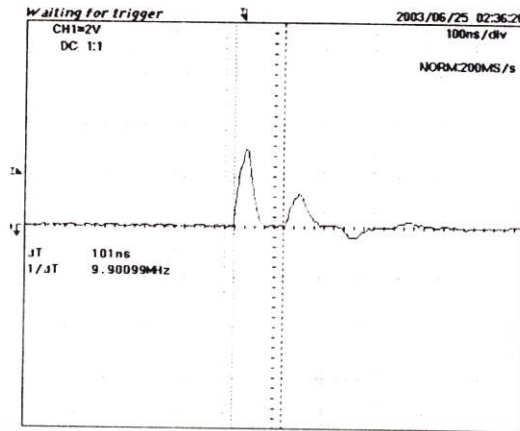
หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยในตารางหาได้จาก $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |error_i|$

5.3.3 ผลการทดสอบหาค่าเพอร์มิททิวิตีสัมพัทธ์ของสาย 12/20 kV. Underground Cable Copper Stranded Conductor XLPE Insulated and PE Sheathed ที่ระยะความยาวสายต่างๆ

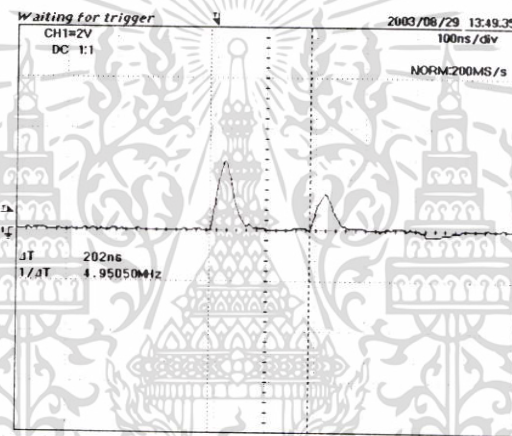


รูปที่ 5.61 การทดสอบหาค่าเพอร์มิททิวิตีสัมพัทธ์ของสาย 12/20 kV. Underground Cable Copper Stranded Conductor XLPE Insulated and PE Sheathed ที่ระยะความยาวสายต่างๆ

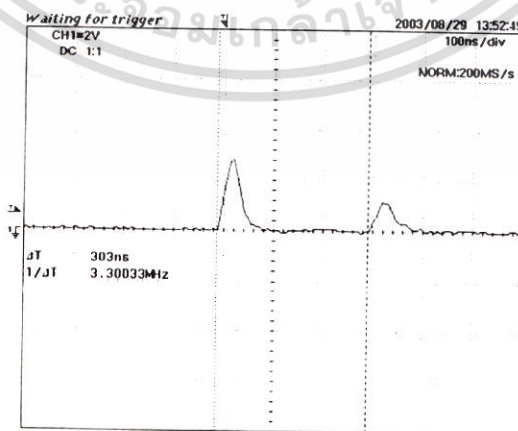
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.62 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 12/20 kV. Underground Cable Copper Stranded Conductor XLPE Insulated and PE Sheathed ขนาด 35 mm² ที่ระยะความยาว 10 เมตร

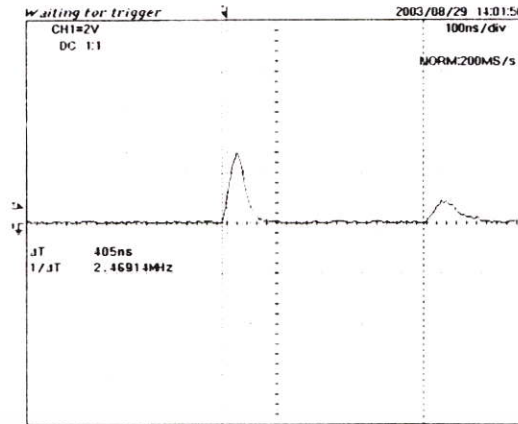


รูปที่ 5.63 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 12/20 kV. Underground Cable Copper Stranded Conductor XLPE Insulated and PE Sheathed ขนาด 35 mm² ที่ระยะความยาว 20 เมตร

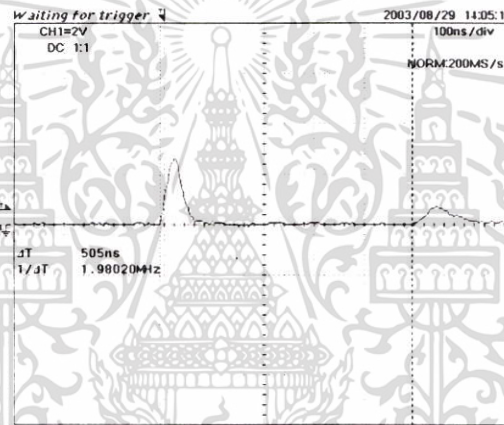


รูปที่ 5.64 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 12/20 kV. Underground Cable Copper Stranded

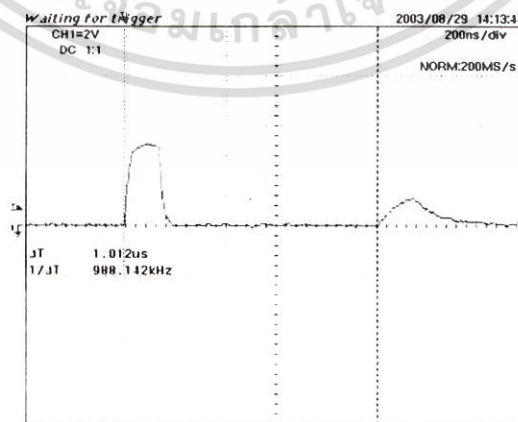
Conductor XLPE Insulated and PE Sheathed ขนาด 35 mm² ที่ระยะความยาว 30 เมตร
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่โดยกรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศ กระทรวงพาณิชย์
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.65 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 12/20 kV. Underground Cable Copper Stranded Conductor XLPE Insulated and PE Sheathed ขนาด 35 mm² ที่ระยะความยาว 40 เมตร

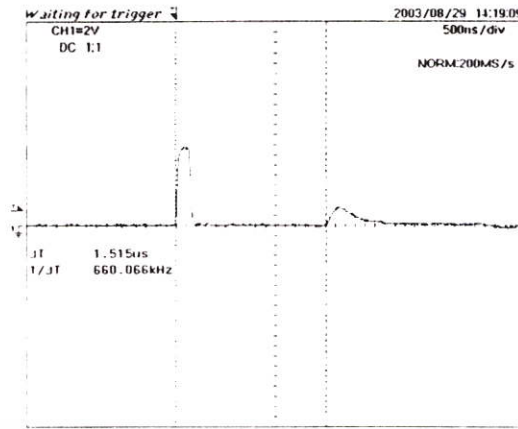


รูปที่ 5.66 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 12/20 kV. Underground Cable Copper Stranded Conductor XLPE Insulated and PE Sheathed ขนาด 35 mm² ที่ระยะความยาว 50 เมตร

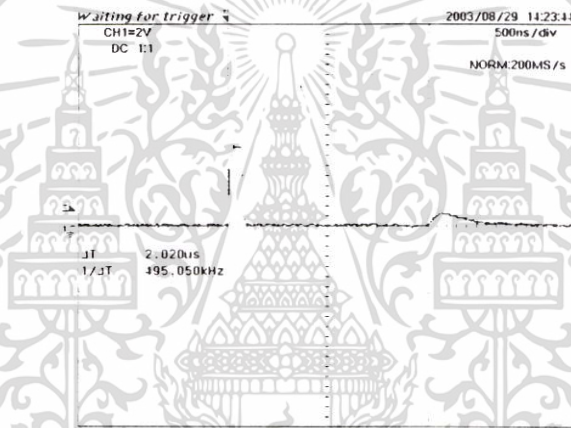


รูปที่ 5.67 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 12/20 kV. Underground Cable Copper Stranded Conductor XLPE Insulated and PE Sheathed ขนาด 35 mm² ที่ระยะความยาว 100 เมตร

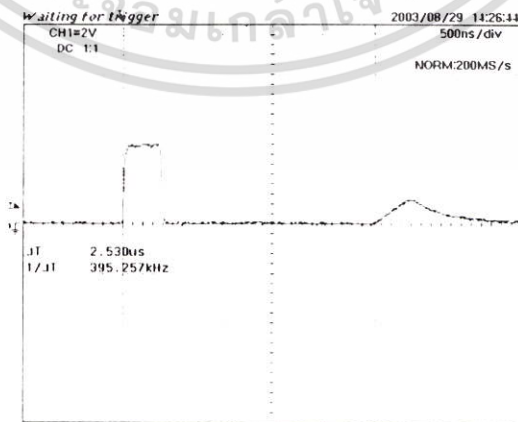
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถนำข้อมูลไปใช้ในการค้าหรือการบริการอื่น ๆ ได้ หากต้องการข้อมูลเพิ่มเติม กรุณาติดต่อฝ่ายประชาสัมพันธ์ โทร. 0-2916-1111 หรือ 0-2916-1112



รูปที่ 5.68 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 12/20 kV. Underground Cable Copper Stranded Conductor XLPE Insulated and PE Sheathed ขนาด 35 mm² ที่ระยะความยาว 150 เมตร



รูปที่ 5.69 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 12/20 kV. Underground Cable Copper Stranded Conductor XLPE Insulated and PE Sheathed ขนาด 35 mm² ที่ระยะความยาว 200 เมตร

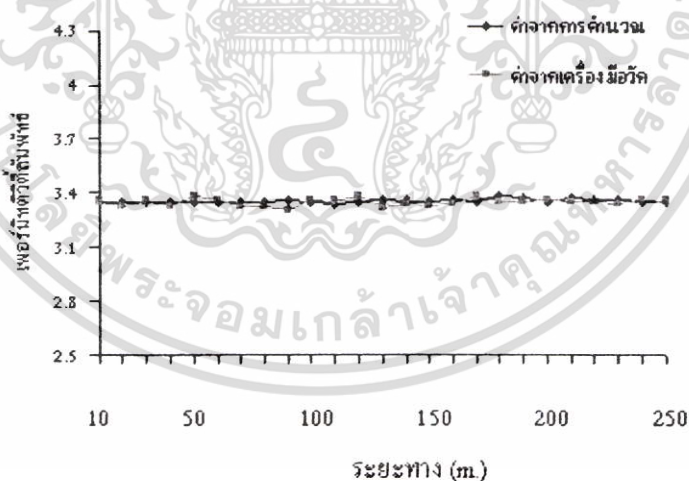


รูปที่ 5.70 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 12/20 kV. Underground Cable Copper Stranded Conductor XLPE Insulated and PE Sheathed ขนาด 35 mm² ที่ระยะความยาว 250 เมตร
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้เฉพาะในโครงการวิจัยนี้ หากมีผู้ใดคัดลอกหรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจะถือว่าผิดกฎหมาย ผู้ที่นำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจะถือว่าผิดกฎหมาย ผู้ที่นำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจะถือว่าผิดกฎหมาย

ตารางที่ 5.3 ผลการทดสอบค่า ϵ_r ของสาย 12/20 kV. Underground Cable Copper Stranded Conductor XLPE Insulated and PE Sheathed ที่ระยะความยาวสายต่างๆ

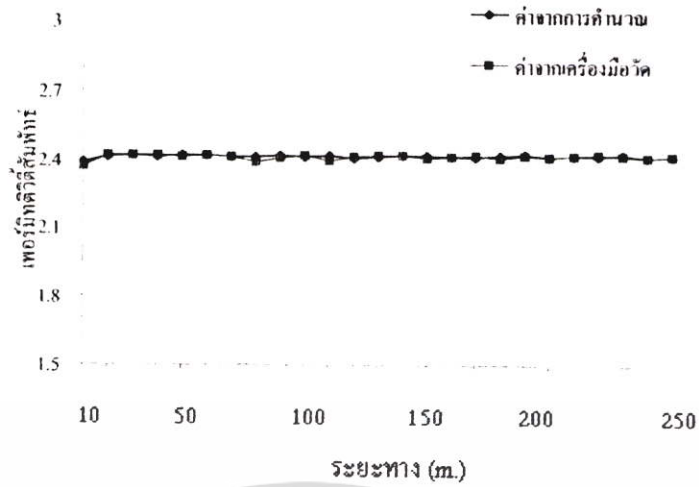
สตีปที่	ระยะความยาว	ช่วงเวลา (ns)	ค่า ϵ_r ที่คำนวณได้จากสัญญาณ	ค่า ϵ_r จากเครื่องมือวัด	ความคลาดเคลื่อน (%)
1	10	101	2.295	2.320	1.089
1	20	202	2.295	2.320	1.089
1	30	303	2.295	2.315	0.871
1	40	405	2.307	2.325	0.780
1	50	505	2.295	2.275	-0.871
2	100	1012	2.304	2.330	1.128
2	150	1515	2.295	2.275	-0.871
2	200	2020	2.295	2.320	1.089
3	250	2530	2.304	2.320	0.694
ค่าเฉลี่ย			2.298	2.311	0.983

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยในตารางหาได้จาก $|\%error|$

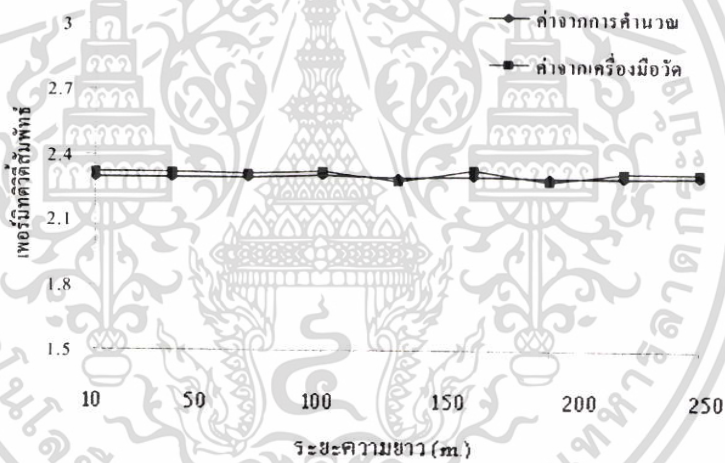


รูปที่ 5.71 ค่าเพอร์มิททิวิตีสัมพัทธ์ที่ระยะความยาวสายต่างๆ ของสาย 300 V 2-core PVC Insulated and Sheathed. Flat Type

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.72 ค่าเพอร์เซ็นต์วีลต์ดีส์สัมพันธ์ที่ระยะความยาวสายต่างๆ ของสาย 0.6/1 kV. Copper Cable Twin Conductor XLPE Insulated and Polyethylene Sheathed



รูปที่ 5.73 ค่าเพอร์เซ็นต์วีลต์ดีส์สัมพันธ์ที่ระยะความยาวต่างๆ ของสาย 12/20 kV. Underground Cable Copper Stranded Conductor XLPE Insulated and PE Sheathed

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

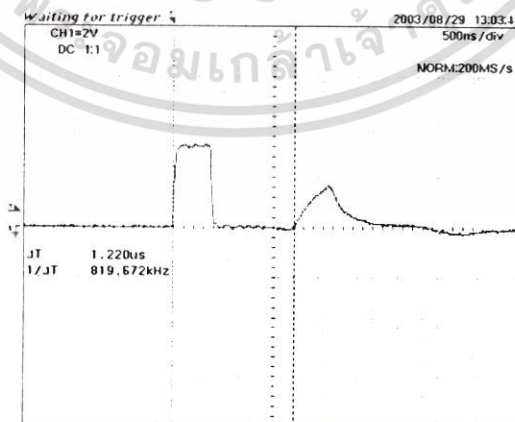
5.4 การทดสอบหาค่าเพอร์มิททิวิตี้สัมพัทธ์ของฉนวนสายเคเบิลขนาดต่างๆ

ทำการทดสอบตามขั้นตอนการทดสอบในหัวข้อ 5.2 โดยใช้สายเคเบิลแรงต่ำ (VAF) และสาย 0.6/1 kV. Copper Cable Twin Conductor ความยาว 100 เมตร และสายเคเบิลใต้ดินขนาดต่างๆ ระยะความยาวสาย 50 เมตร จากนั้นทำการตรวจวัดช่วงเวลาการสะท้อนกลับด้วยออสซิลโลสโคป และนำช่วงเวลาที่ได้มาคำนวณหาค่า ϵ_r ในสมการที่ 4.4 เพื่อศึกษาผลของขนาดสายว่ามีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าเพอร์มิททิวิตี้สัมพัทธ์และช่วงเวลาการสะท้อนกลับของสัญญาณหรือไม่

5.4.1 ผลการทดสอบหาค่าเพอร์มิททิวิตี้สัมพัทธ์ของสาย 300 V 2-core PVC Insulated and Sheathed, Flat Type ขนาดต่างๆ

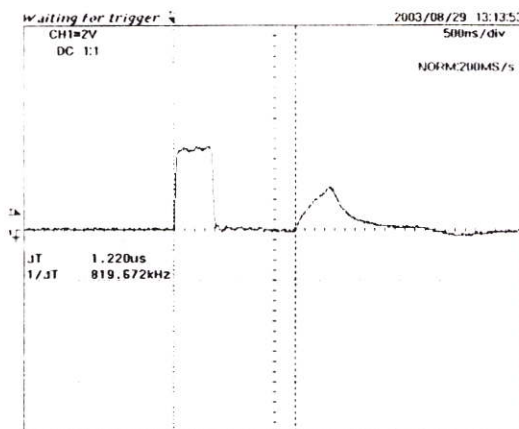


รูปที่ 5.74 การทดสอบหาค่าเพอร์มิททิวิตี้สัมพัทธ์ของสาย 300 V 2-core PVC Insulated and Sheathed, Flat Type ขนาดต่างๆ

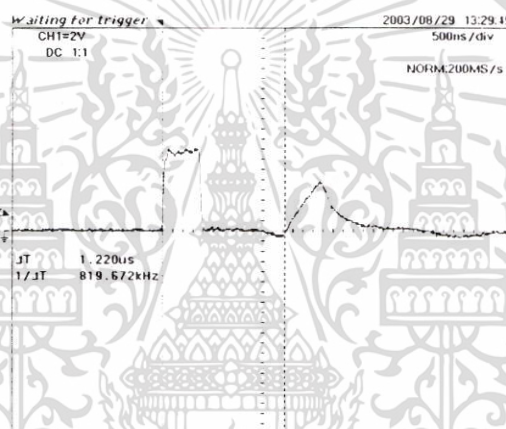


รูปที่ 5.75 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 300 V 2-core PVC Insulated and Sheathed, Flat Type ขนาด 1 mm² ที่ระยะความยาว 100 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.76 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 300 V 2-core PVC Insulated and Sheathed, Flat Type ขนาด 1.5 mm² ที่ระยะความยาว 100 เมตร



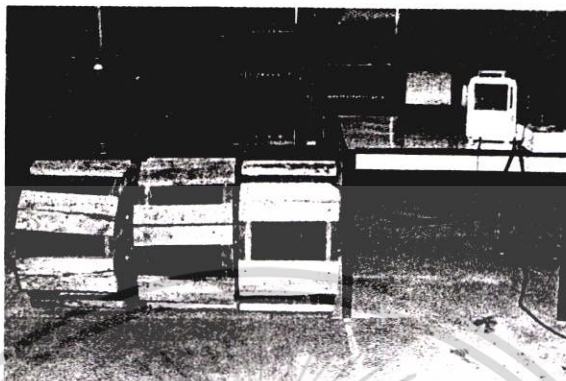
รูปที่ 5.77 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 300 V 2-core PVC Insulated and Sheathed, Flat Type ขนาด 2.5 mm² ที่ระยะความยาว 100 เมตร

ตารางที่ 5.4 ผลการทดสอบหาค่า ϵ_r ของสาย 300 V 2-core PVC Insulated and Sheathed, Flat Type ขนาดต่างๆ

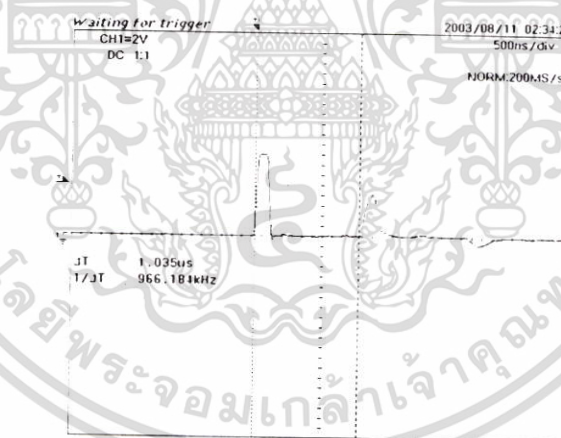
ขนาด (mm ²)	ช่วงเวลา (ns)	ค่า ϵ_r จาก การคำนวณ	ค่า ϵ_r จาก เครื่องมือวัด	ความคลาดเคลื่อน (%)
1	1220	3.349	3.366	0.537
1.5	1220	3.349	3.366	0.537
2.5	1220	3.349	3.366	0.537

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4.2 ผลการทดสอบหาค่าเพอร์มิททิวิตีสัมพัทธ์ของสาย 0.6/1 kV. Copper Cable Twin Conductor Cross-linked Polyethylene Insulated and Polyethylene Sheathed ขนาดต่างๆ

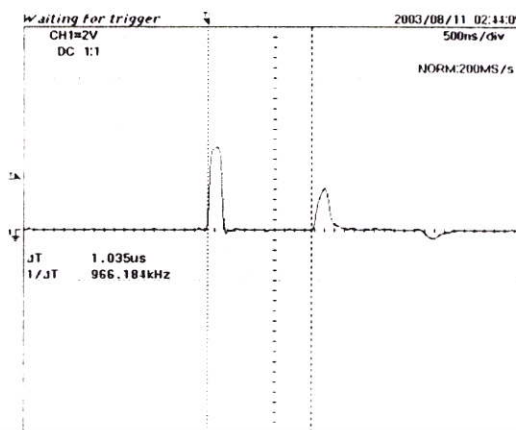


รูปที่ 5.78 การทดสอบหาค่าเพอร์มิททิวิตีสัมพัทธ์ของสาย 0.6/1 kV. Copper Cable Twin Conductor Cross-linked Polyethylene Insulated and Polyethylene Sheathed ขนาดต่างๆ

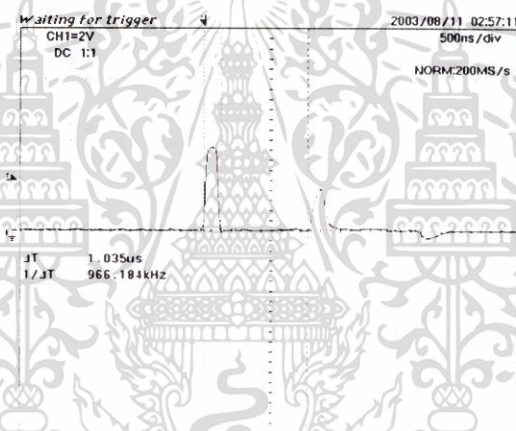


รูปที่ 5.79 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 0.6/1 kV. Copper Cable Twin Conductor Cross-linked Polyethylene Insulated and Polyethylene Sheathed ขนาด 6 mm^2 ที่ระยะความยาว 100 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.80 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 0.6/1 kV. Copper Cable Twin Conductor Cross-linked Polyethylene Insulated and Polyethylene Sheathed ขนาด 10 mm² ที่ระยะความยาว 100 เมตร



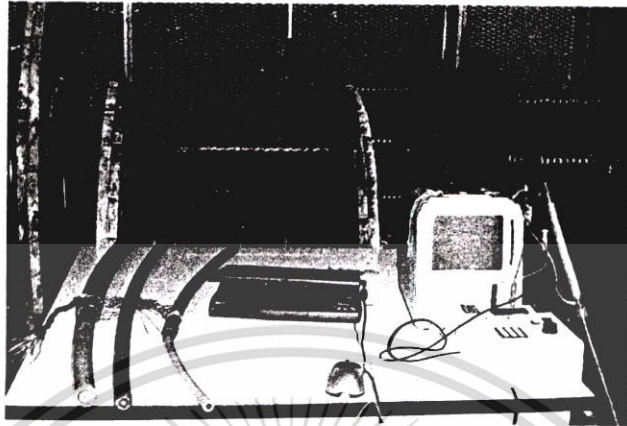
รูปที่ 5.81 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 0.6/1 kV. Copper Cable Twin Conductor Cross-linked Polyethylene Insulated and Polyethylene Sheathed ขนาด 16 mm² ที่ระยะความยาว 100 เมตร

ตารางที่ 5.5 ผลการทดสอบหาค่า ϵ_r ของสาย 0.6/1 kV. Copper Cable Twin Conductor Cross-linked Polyethylene Insulated and Polyethylene Sheathed ขนาดต่างๆ

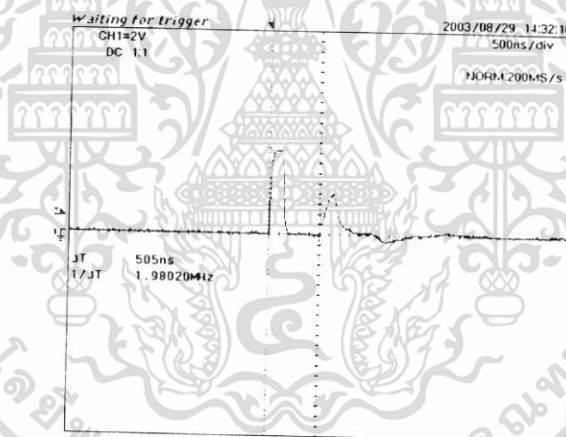
ขนาด (mm ²)	ช่วงเวลา (ns)	ค่า ϵ_r จาก การคำนวณ	ค่า ϵ_r จาก เครื่องมือวัด	ความคลาดเคลื่อน (%)
6	1035	2.410	2.416	0.249
10	1035	2.410	2.416	0.249
16	1035	2.410	2.416	0.249

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4.3 ผลการทดสอบหาค่าเพอร์มิททิวิตีสัมพัทธ์ของสาย 12/20 kV. Underground Cable Copper Stranded Conductor XLPE Insulated and PE Sheathed ขนาดต่างๆ

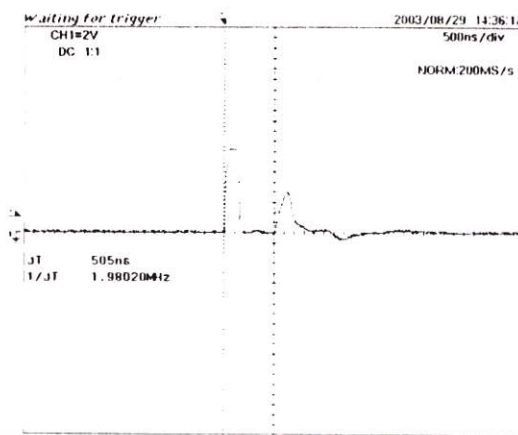


รูปที่ 5.82 การทดสอบหาค่าเพอร์มิททิวิตีสัมพัทธ์ของสาย 12/20 kV. Underground Cable Copper Stranded Conductor XLPE Insulated and PE Sheathed ขนาดต่างๆ

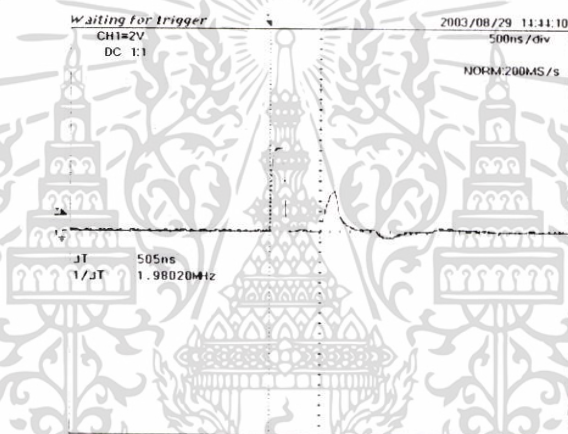


รูปที่ 5.83 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 12/20 kV. Underground Cable Copper Stranded Conductor XLPE Insulated and PE Sheathed ขนาด 35 mm² ที่ระยะความยาว 50 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.84 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 12/20 kV, Underground Cable Copper Stranded Conductor XLPE Insulated and PE Sheathed ขนาด 70 mm² ที่ระยะความยาว 50 เมตร



รูปที่ 5.85 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 12/20 kV, Underground Cable Copper Stranded Conductor XLPE Insulated and PE Sheathed ขนาด 400 mm² ที่ระยะความยาว 50 เมตร

ตารางที่ 5.6 ผลการทดสอบหาค่า ϵ_r ของสาย 12/20 kV, Underground Cable Copper Stranded Conductor XLPE Insulated and PE Sheathed ขนาดต่างๆ

ขนาด (mm ²)	ช่วงเวลา (ns)	ค่า ϵ_r จาก การคำนวณ	ค่า ϵ_r จาก เครื่องมือวัด	ความคลาดเคลื่อน (%)
35	505	2.295	2.275	0.87
70	505	2.295	2.275	0.87
400	505	2.295	2.275	0.87

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

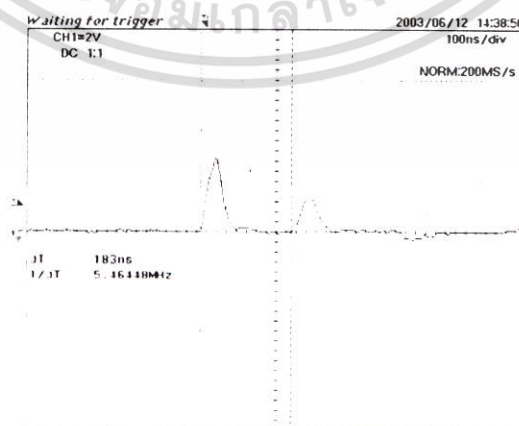
5.5 การทดสอบหาค่าเพอร์มิททิวิตีสัมพัทธ์ของฉนวนสายเคเบิลที่อุณหภูมิต่างๆ

ทำการทดสอบตามขั้นตอนการทดสอบในหัวข้อ 5.2 โดยใช้สายเคเบิลแรงต่ำ (VAF) ขนาด 1 mm^2 สาย 0.6/1 kV. Copper Cable Twin Conductor ขนาด 6 mm^2 และสายเคเบิลใต้ดินขนาด 35 mm^2 ที่ระยะความยาวสาย 15 เมตร มาทำการทดสอบที่อุณหภูมิ $30 \text{ }^{\circ}\text{C} - 95 \text{ }^{\circ}\text{C}$ จากนั้นทำการตรวจวัดช่วงเวลาการสะท้อนกลับด้วยออสซิลโลสโคปและนำช่วงเวลาที่ได้มากำหนดค่า ϵ_r ในสมการที่ 4.4 เพื่อหาค่า ϵ_r ของฉนวน PVC และ XLPE ที่อุณหภูมิต่างๆ เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าเพอร์มิททิวิตีสัมพัทธ์และช่วงเวลาการสะท้อนกลับของสัญญาณของฉนวน PVC และ XLPE หรือไม่ เนื่องจากค่า ϵ_r ของวัสดุสารฉนวนแต่ละชนิดจะมีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากผลของอุณหภูมิ [11-12]

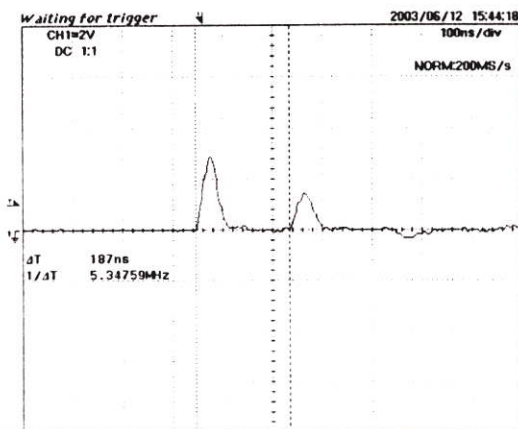
5.5.1 ผลการทดสอบหาค่าเพอร์มิททิวิตีสัมพัทธ์ของสาย 300 V 2-core PVC Insulated and Sheathed, Flat Type ที่อุณหภูมิต่างๆ



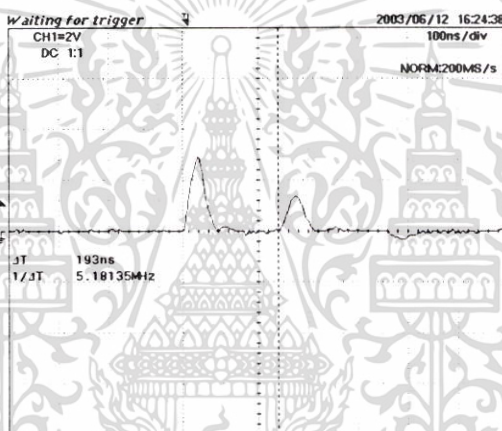
รูปที่ 5.86 การทดสอบหาค่าเพอร์มิททิวิตีสัมพัทธ์ของสาย 300 V 2-core PVC Insulated and Sheathed, Flat Type ขนาด 1 mm^2 ที่อุณหภูมิต่างๆ



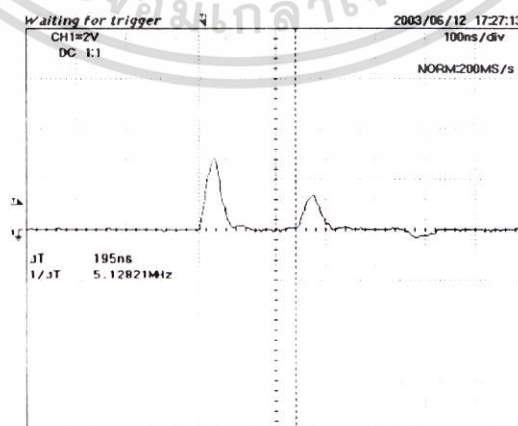
รูปที่ 5.87 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 300 V 2-core PVC Insulated and Sheathed, Flat เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ที่อุณหภูมิ $30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.88 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 300 V 2-core PVC Insulated and Sheathed, Flat Type ขนาด 1 mm^2 ที่อุณหภูมิ 40°C

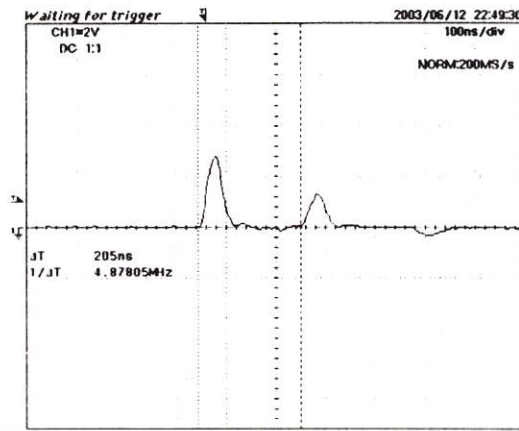


รูปที่ 5.89 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 300 V 2-core PVC Insulated and Sheathed, Flat Type ขนาด 1 mm^2 ที่อุณหภูมิ 50°C

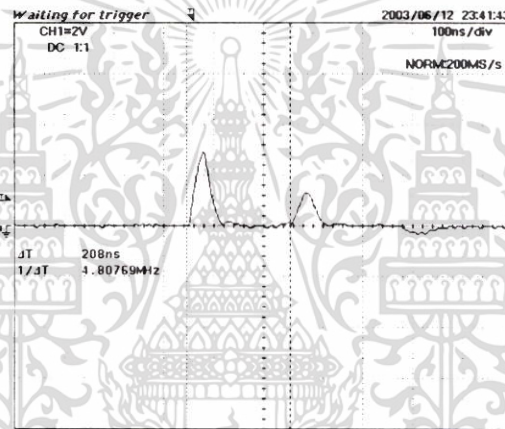


รูปที่ 5.90 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 300 V 2-core PVC Insulated and Sheathed, Flat

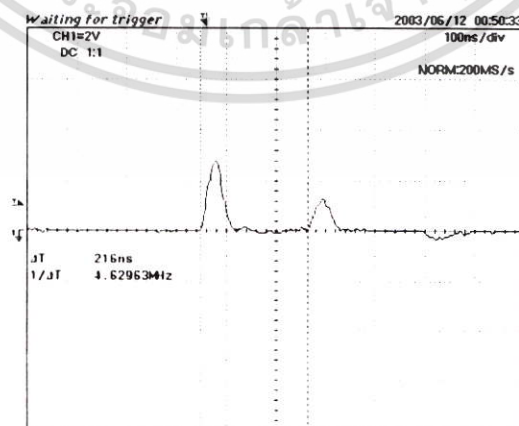
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับภาคใต้ของโรงเรียนที่ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.91 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 300 V 2-core PVC Insulated and Sheathed, Flat Type ขนาด 1 mm^2 ที่อุณหภูมิ 70°C



รูปที่ 5.92 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 300 V 2-core PVC Insulated and Sheathed, Flat Type ขนาด 1 mm^2 ที่อุณหภูมิ 80°C



รูปที่ 5.93 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 300 V 2-core PVC Insulated and Sheathed, Flat เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของสถาบันวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีพระเครื่องเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.7 ผลการทดสอบหาค่า ϵ_r ของสาย 300 V 2-core PVC Insulated and Sheathed, Flat Type ขนาด 1 mm^2 ที่อุณหภูมิต่างๆ

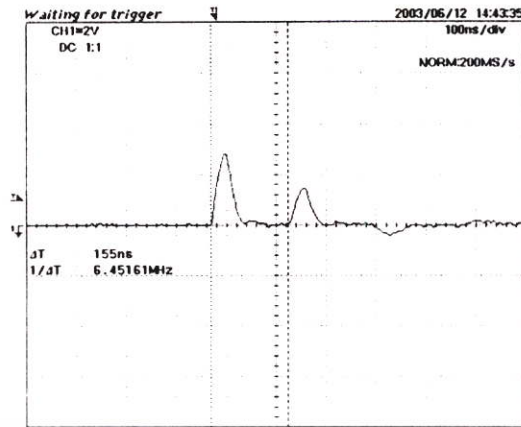
อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	ช่วงเวลา (ns)	ค่า ϵ_r จาก การคำนวณ	ค่า ϵ_r จาก เครื่องมือวัด	ความคลาดเคลื่อน (%)
30	183	3.349	3.359	0.299
40	187	3.499	3.477	-0.629
50	193	3.725	3.705	-0.534
60	195	3.802	3.816	0.368
70	205	4.203	4.229	0.619
80	208	4.326	4.344	0.416
90	216	4.666	4.683	0.364

5.5.2 ผลการทดสอบหาค่าเพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์ของสาย 0.6/1 kV. Copper Cable Twin Conductor Cross-linked Polyethylene Insulated and Polyethylene Sheathed ที่อุณหภูมิต่างๆ

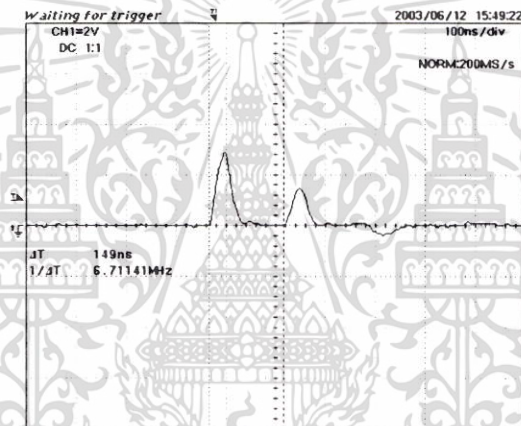


รูปที่ 5.94 การทดสอบหาค่าเพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์ของสาย 0.6/1 kV. Copper Cable Twin Conductor Cross-linked Polyethylene Insulated and Polyethylene Sheathed ขนาด 6 mm^2 ที่อุณหภูมิต่างๆ

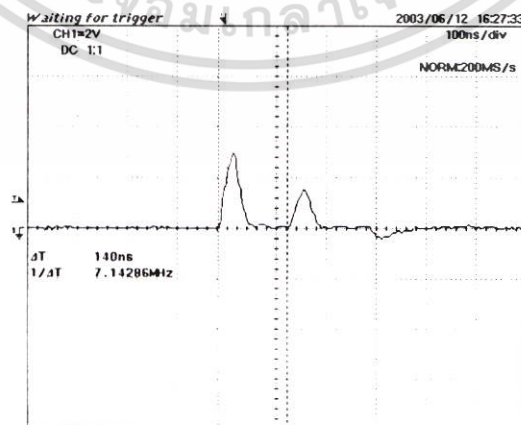
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.95 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 0.6/1 kV. Copper Cable Twin Conductor Cross-linked Polyethylene Insulated and Polyethylene Sheathed ขนาด 6 mm² ที่อุณหภูมิ 30 °C

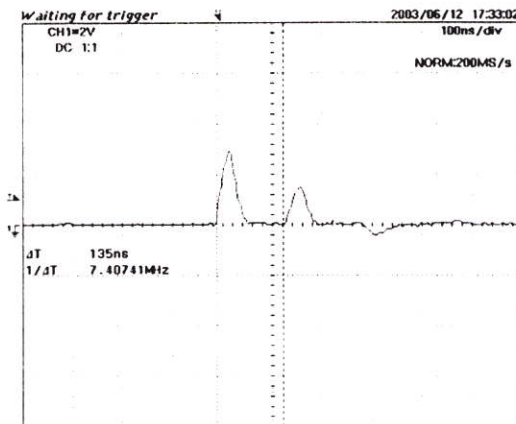


รูปที่ 5.96 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 0.6/1 kV. Copper Cable Twin Conductor Cross-linked Polyethylene Insulated and Polyethylene Sheathed ขนาด 6 mm² ที่อุณหภูมิ 40 °C

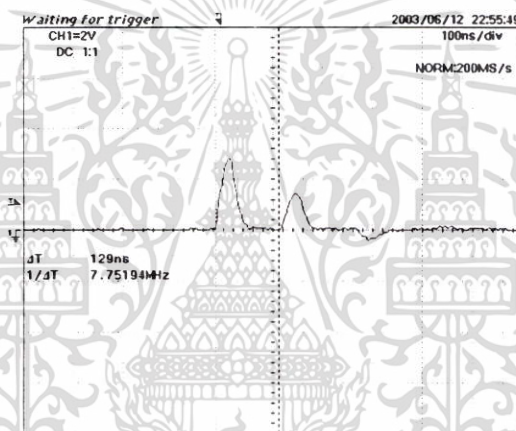


รูปที่ 5.97 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 0.6/1 kV. Copper Cable Twin Conductor Cross-linked Polyethylene Insulated and Polyethylene Sheathed ขนาด 6 mm² ที่อุณหภูมิ 50 °C

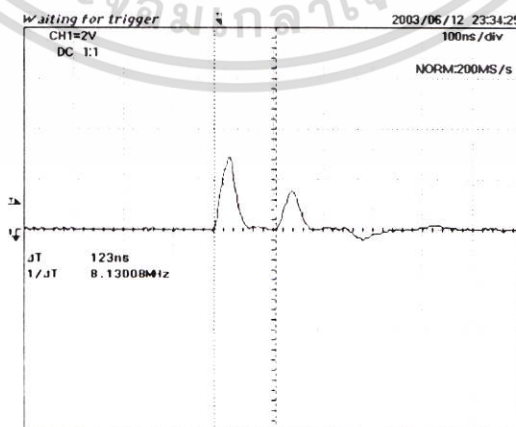
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สร้างไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่ในที่สาธารณะโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสาร หากมีการนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสาร จะถือว่าผิดกฎหมาย



รูปที่ 5.98 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 0.6/1 kV. Copper Cable Twin Conductor Cross-linked Polyethylene Insulated and Polyethylene Sheathed ขนาด 6 mm² ที่อุณหภูมิ 60 °C

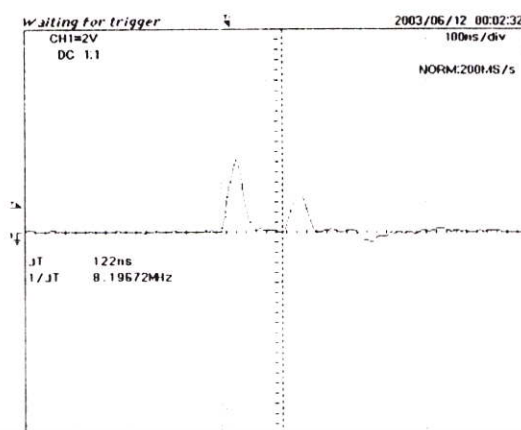


รูปที่ 5.99 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 0.6/1 kV. Copper Cable Twin Conductor Cross-linked Polyethylene Insulated and Polyethylene Sheathed ขนาด 6 mm² ที่อุณหภูมิ 70 °C

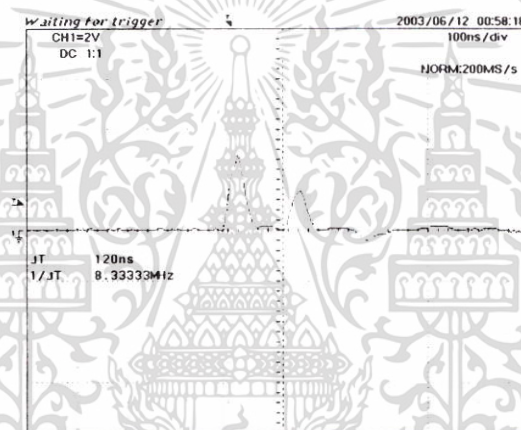


รูปที่ 5.100 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 0.6/1 kV. Copper Cable Twin Conductor Cross-linked Polyethylene Insulated and Polyethylene Sheathed ขนาด 6 mm² ที่อุณหภูมิ 75 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ห้ามการนำข้อมูลหรือข้อความไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.101 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 0.6/1 kV. Copper Cable Twin Conductor Cross-linked Polyethylene Insulated and Polyethylene Sheathed ขนาด 6 mm² ที่อุณหภูมิ 80 °C



รูปที่ 5.102 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 0.6/1 kV. Copper Cable Twin Conductor Cross-linked Polyethylene Insulated and Polyethylene Sheathed ขนาด 6 mm² ที่อุณหภูมิ 90 °C

ตารางที่ 5.8 ผลการทดสอบหาค่า ϵ_r ของสาย 0.6/1 kV. Copper Cable Twin Conductor Cross-linked Polyethylene Insulated and Polyethylene Sheathed ขนาด 6 mm² ที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ (°C)	ช่วงเวลา (ns)	ค่า ϵ_r จาก การคำนวณ	ค่า ϵ_r จาก เครื่องมือวัด	ความคลาดเคลื่อน (%)
30	155	2.403	2.413	0.416
40	149	2.220	2.215	-0.225
50	140	1.960	1.948	-1.200
60	135	1.823	1.873	2.472

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

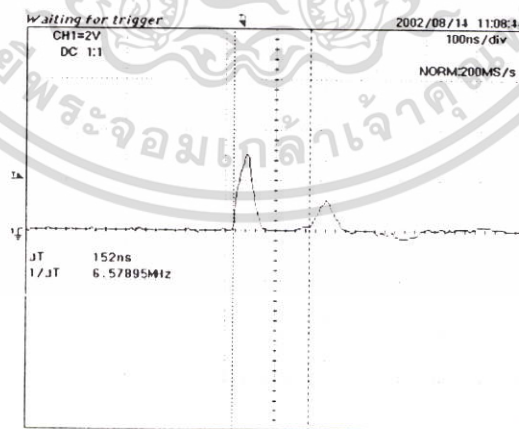
ตารางที่ 5.8 (ต่อ)

70	129	1.664	1.656	-0.481
75	123	1.513	1.540	1.785
80	122	1.488	1.469	-1.277
90	120	1.440	1.422	-1.250

5.5.3 ผลการทดสอบหาค่าเพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์ของสาย 12/20 kV. Underground Cable Copper Stranded Conductor XLPE Insulated and PE Sheathed ที่อุณหภูมิต่างๆ

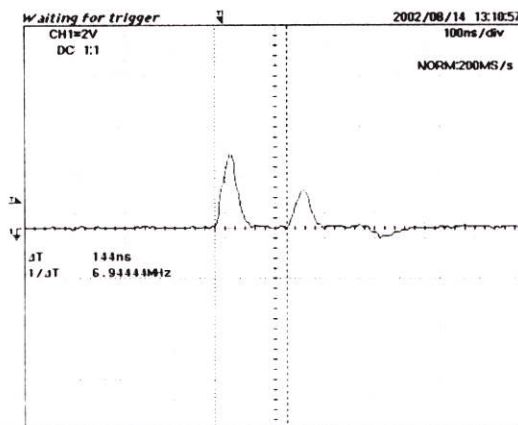


รูปที่ 5.103 การทดสอบหาค่าเพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์ของสาย 12/20 kV. Underground Cable Copper Stranded Conductor XLPE Insulated and PE Sheathed ขนาด 35 mm² ที่อุณหภูมิต่างๆ

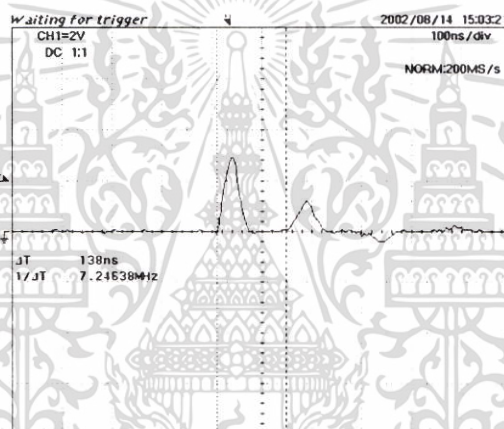


รูปที่ 5.104 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 12/20 kV. Underground Cable Copper Stranded Conductor XLPE Insulated and PE Sheathed ขนาด 35 mm² ที่อุณหภูมิ 30 °C

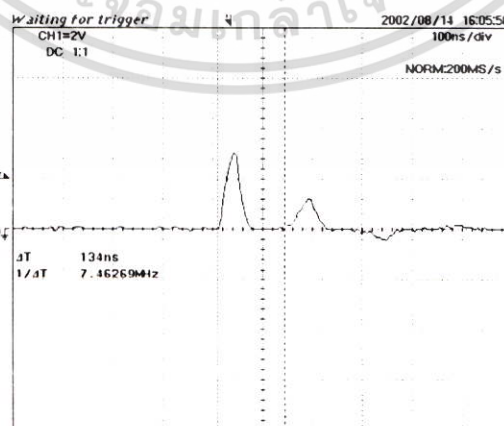
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.105 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 12/20 kV. Underground Cable Copper Stranded Conductor XLPE Insulated and PE Sheathed ขนาด 35 mm^2 ที่อุณหภูมิ 40° C

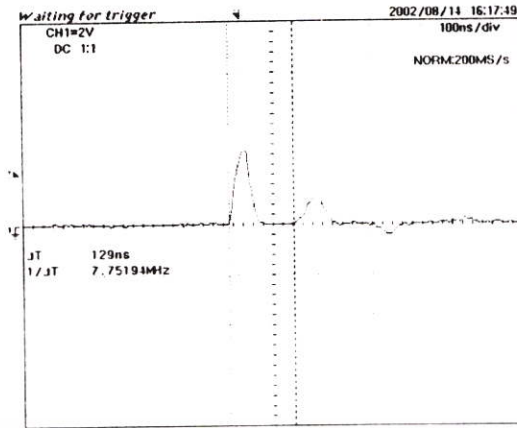


รูปที่ 5.106 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 12/20 kV. Underground Cable Copper Stranded Conductor XLPE Insulated and PE Sheathed ขนาด 35 mm^2 ที่อุณหภูมิ 50° C

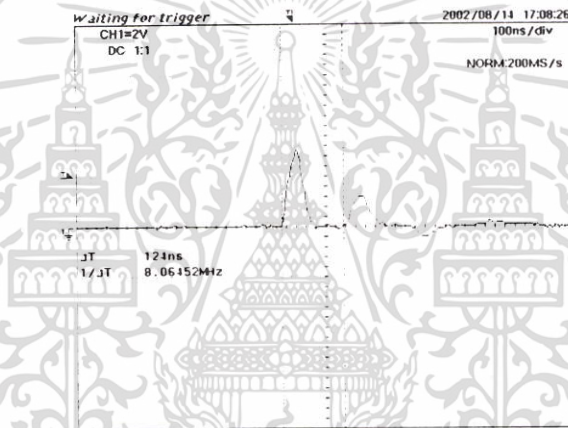


รูปที่ 5.107 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 12/20 kV. Underground Cable Copper Stranded Conductor XLPE Insulated and PE Sheathed ขนาด 35 mm^2 ที่อุณหภูมิ 60° C

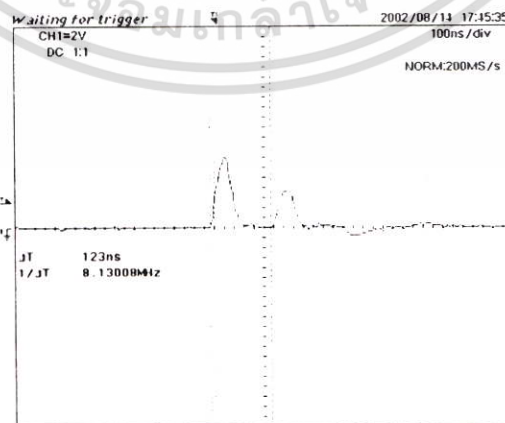
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้เฉพาะงานวิจัยเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่ไปยังบุคคลอื่นโดยไม่ขออนุญาตจากเจ้าของโครงการ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



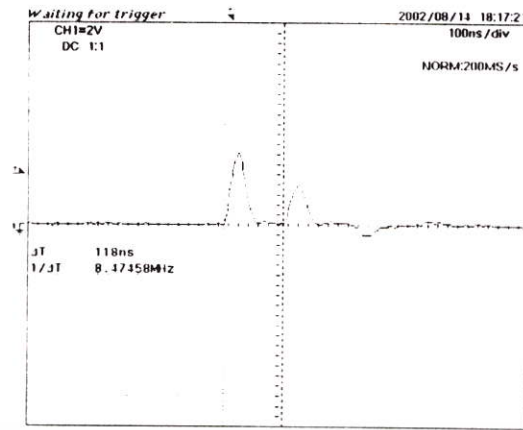
รูปที่ 5.108 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 12/20 kV. Underground Cable Copper Stranded Conductor XLPE Insulated and PE Sheathed ขนาด 35 mm² ที่อุณหภูมิ 70 °C



รูปที่ 5.109 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 12/20 kV. Underground Cable Copper Stranded Conductor XLPE Insulated and PE Sheathed ขนาด 35 mm² ที่อุณหภูมิ 80 °C



รูปที่ 5.110 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 12/20 kV. Underground Cable Copper Stranded Conductor XLPE Insulated and PE Sheathed ขนาด 35 mm² ที่อุณหภูมิ 90 °C ด้านการค้า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และข้อมูลเป็นข้อมูลเฉพาะที่จัดทำขึ้นเพื่อการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.111 สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับของสาย 12/20 kV. Underground Cable Copper Stranded Conductor XLPE Insulated and PE Sheathed ขนาด 35 mm² ที่อุณหภูมิ 95 °C

ตารางที่ 5.9 ผลการทดสอบหาค่า ϵ_r ของสาย 12/20 kV. Underground Cable Copper Stranded Conductor XLPE Insulated and PE Sheathed ขนาด 35 mm² ที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ (°C)	ช่วงเวลา (ns)	ค่า ϵ_r จาก การคำนวณ	ค่า ϵ_r จาก เครื่องมือวัด	ความคลาดเคลื่อน (%)
30	152	2.310	2.320	0.433
40	144	2.074	2.107	1.591
50	138	1.904	1.920	0.840
60	134	1.796	1.779	-0.947
70	129	1.664	1.655	-0.541
80	124	1.538	1.556	1.170
90	123	1.513	1.505	-0.529
95	118	1.392	1.415	1.652

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.6 ผลการทดสอบเทียบตารางแสดงค่าเพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์สัมพัทธ์ของวัสดุโพลีเมอร์

จากผลการคำนวณหาค่าเพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์จากช่วงเวลาการสะท้อนกลับของสัญญาณ จากออสซิลโลสโคปและผลที่ได้จากเครื่องมือวัดที่ทำการออกแบบ นำมาเปรียบเทียบกับตารางแสดงค่าเพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์สัมพัทธ์ของวัสดุโพลีเมอร์ของตัวอย่างฉนวน PVC และ XLPE ของสายเคเบิลที่ทดสอบ เพื่อเปรียบเทียบค่าความถูกต้องว่าอยู่ในช่วงของค่า ϵ_r ตามมาตรฐานหรือไม่

ตารางที่ 5.10 ค่าเพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์สัมพัทธ์ของสาย 300 V 2-core PVC Insulated and Sheathed.

Flat Type ขนาดต่างๆ 100 เมตร

ขนาด (mm ²)	ค่า ϵ_r จากตารางแสดงค่า Relative Permittivity	ค่า ϵ_r จากการคำนวณ	ค่า ϵ_r จากเครื่องมือวัด	ความคลาดเคลื่อนจากการคำนวณ (%)	ความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัด (%)
1	3.2 – 3.6	3.349	3.366	-	-
1.5	3.2 – 3.6	3.349	3.366	-	-
2.5	3.2 – 3.6	3.349	3.366	-	-

ตารางที่ 5.11 ค่าเพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์ของสาย 0.6/1 kV. Copper Cable Twin Conductor Cross-linked Polyethylene Insulated and Polyethylene Sheathed ขนาดต่างๆ 100 เมตร

ขนาด (mm ²)	ค่า ϵ_r จากตารางแสดงค่า Relative Permittivity	ค่า ϵ_r จากการคำนวณ	ค่า ϵ_r จากเครื่องมือวัด	ความคลาดเคลื่อนจากการคำนวณ (%)	ความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัด (%)
6	2.3 – 5.2	2.410	2.416	-	-
10	2.3 – 5.2	2.410	2.416	-	-
16	2.3 – 5.2	2.410	2.416	-	-

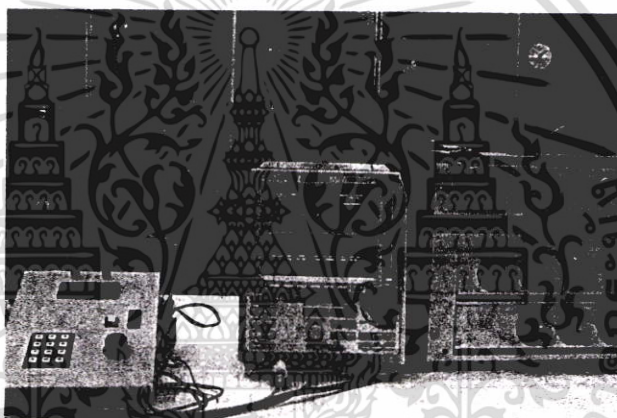
ตารางที่ 5.12 ค่าเพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์ของสาย 12/20 kV. Underground Cable Copper Stranded Conductor XLPE Insulated and PE Sheathed ขนาดต่างๆ 50 เมตร

ขนาด (mm ²)	ค่า ϵ_r จากตารางแสดงค่า Relative Permittivity	ค่า ϵ_r จากการคำนวณ	ค่า ϵ_r จากเครื่องมือวัด	ความคลาดเคลื่อนจากการคำนวณ (%)	ความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัด (%)
35	2.3 – 5.2	2.299	2.320	-	-
70	2.3 – 5.2	2.298	2.320	-	-
400	2.3 – 5.2	2.301	2.320	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.7 ผลการทดสอบเทียบกับผลการคำนวณจากการทดสอบโดยวิธีการหาค่าคาปาซิแตนซ์ และแฟคเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก

จากผลการคำนวณค่าเพอร์มิททิวิตีสัมพัทธ์จากช่วงเวลาการสะท้อนกลับของสัญญาณ จากออสซิลโลสโคปและผลที่ได้จากเครื่องมือวัดที่ทำการออกแบบ นำมาเปรียบเทียบกับผลการคำนวณจากการทดสอบโดยวิธีการวัดค่าคาปาซิแตนซ์และพลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกตามมาตรฐาน(บทที่ 3) ของตัวอย่างฉนวน PVC และ XLPE ของสายเคเบิลที่นำมาทดสอบ เพื่อเปรียบเทียบค่าความถูกต้องที่ได้จากรูปสัญญาณและเครื่องมือวัดที่ทำการออกแบบสร้าง โดยผลการทดสอบของสายประเภท สองตัวจะนำเอาผลการทดสอบในบทที่ 3 ของแต่ละตัวนำมาหาค่าเฉลี่ย ซึ่งจะนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยของระยะทางต่างๆ ของตัวอย่างสายที่ทำการทดสอบ และที่ระยะความยาวสาย 15 เมตร จะทำการเปรียบเทียบความถูกต้องที่อุณหภูมิต่างๆ



รูปที่ 5.112 การทดสอบเทคนิคที่นำเสนอเทียบกับค่าที่คำนวณจากการทดสอบ โดยวิธีการหาค่าคาปาซิแตนซ์และพลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกตามมาตรฐาน

ตารางที่ 5.13 ค่าเฉลี่ยเพอร์มิททิวิตีสัมพัทธ์ที่ระยะความยาวต่างๆ ของฉนวน PVC และ XLPE เปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณจากการทดสอบ C&TANδ

ขนาด (mm ²)	ค่า ϵ_r จาก การคำนวณ C&TANδ	ค่า ϵ_r จาก การคำนวณ (ค่าเฉลี่ย)	ค่า ϵ_r จาก เครื่องมือวัด (ค่าเฉลี่ย)	ความคลาดเคลื่อน จากการคำนวณ (%)	ความคลาดเคลื่อน จากเครื่องมือวัด (%)
1	3.348	3.355	3.348	-0.209	-
6	2.331	2.412	2.409	-3.475	-3.346
35	2.299	2.298	2.311	0.043	0.522

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.14 ค่าเพอร์มิททิวิตีสัมพัทธ์ที่ระยะความยาว 15 เมตร ของฉนวน PVC และ XLPE เปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณจากการทดสอบ C&TANδ

ขนาด (mm ²)	ค่า ϵ_r จากการคำนวณ C&TANδ	ค่า ϵ_r จากการคำนวณ	ค่า ϵ_r จากเครื่องมือวัด	ความคลาดเคลื่อนจากการคำนวณ (%)	ความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัด (%)
1	3.348	3.349	3.359	-0.030	0.329
6	2.331	2.403	2.413	-3.089	-3.518
35	2.299	2.310	2.320	-0.478	-0.913

ตารางที่ 5.15 ค่าเพอร์มิททิวิตีสัมพัทธ์สัมพัทธ์ของสาย 300 V 2-core (PVC) ที่อุณหภูมิต่างๆ เปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณจากการทดสอบ C&TANδ

อุณหภูมิ (°C)	ค่า ϵ_r จากการคำนวณ C&TANδ	ค่า ϵ_r จากการคำนวณ	ค่า ϵ_r จากเครื่องมือวัด	ความคลาดเคลื่อนจากการคำนวณ (%)	ความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัด (%)
30	3.348	3.349	3.359	-0.030	0.329
40	3.516	3.499	3.477	0.484	1.109
50	3.728	3.725	3.705	0.080	0.617
60	3.901	3.802	3.816	2.538	2.179
70	4.173	4.203	4.229	-0.719	-1.342
80	4.262	4.326	4.344	-1.502	-1.924
90	4.553	4.666	4.683	-2.481	-2.855
ค่าเฉลี่ย				1.119	1.479

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยในตารางหาได้จาก $|\%error|$

ตารางที่ 5.16 ค่าเพอร์มิททิวิตีสัมพัทธ์ของสาย 0.6/1 kV. Copper Cable Twin Conductor (XLPE) ที่อุณหภูมิต่างๆ เปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณจากการทดสอบ C&TANδ

อุณหภูมิ (°C)	ค่า ϵ_r จากการคำนวณ C&TANδ	ค่า ϵ_r จากการคำนวณ	ค่า ϵ_r จากเครื่องมือวัด	ความคลาดเคลื่อนจากการคำนวณ (%)	ความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัด (%)
30	2.331	2.403	2.413	-3.089	-3.518
40	2.186	2.220	2.215	-1.555	-1.327
50	1.921	1.960	1.948	-2.030	-1.405
60	1.806	1.823	1.873	-0.941	-3.710
70	1.631	1.664	1.656	-2.023	-1.533

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษายกเว้น ไม่นานจนเกินไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.16 (ต่อ)

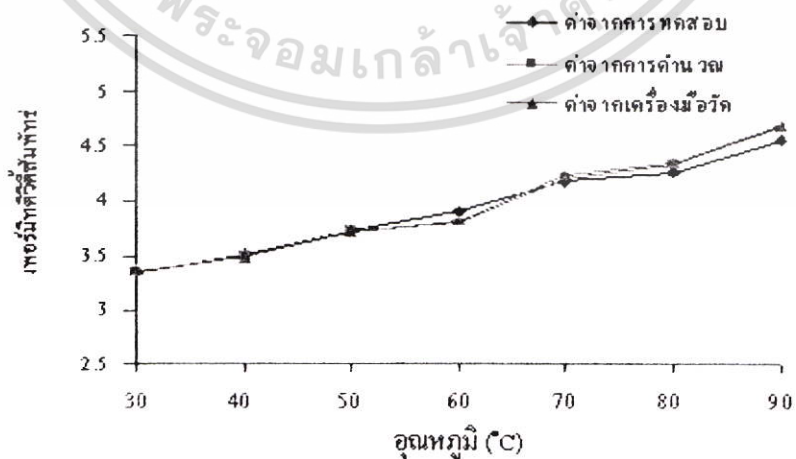
75	1.576	1.513	1.540	3.997	2.284
80	1.558	1.488	1.469	4.493	5.712
90	1.480	1.440	1.422	2.703	3.919
ค่าเฉลี่ย				2.590	2.784

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยในตารางหาได้จาก $|\%error|$

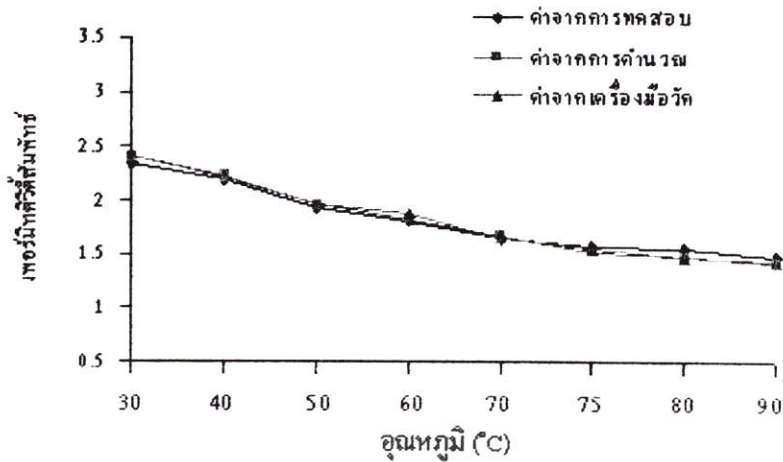
ตารางที่ 5.17 ค่าเพอร์มิททิวิตีสัมพัทธ์ของสาย 12/20 kV. Underground (XLPE) ที่อุณหภูมิต่างๆ เปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณจากการทดสอบ C&TANδ

อุณหภูมิ (°C)	ค่า ϵ_r จาก การคำนวณ C&TANδ	ค่า ϵ_r จาก การคำนวณ	ค่า ϵ_r จาก เครื่องมือวัด	ความคลาดเคลื่อน จากการคำนวณ (%)	ความคลาดเคลื่อน จากเครื่องมือวัด (%)
30	2.299	2.310	2.320	-0.478	-0.913
40	2.045	2.074	2.107	-1.418	-3.032
50	1.847	1.904	1.920	-3.086	-3.952
60	1.729	1.796	1.779	-3.875	-2.892
70	1.654	1.664	1.655	-0.605	-0.060
80	1.610	1.538	1.556	4.472	3.354
90	1.577	1.513	1.505	4.058	4.566
95	1.453	1.392	1.415	4.198	2.615
ค่าเฉลี่ย				3.170	3.055

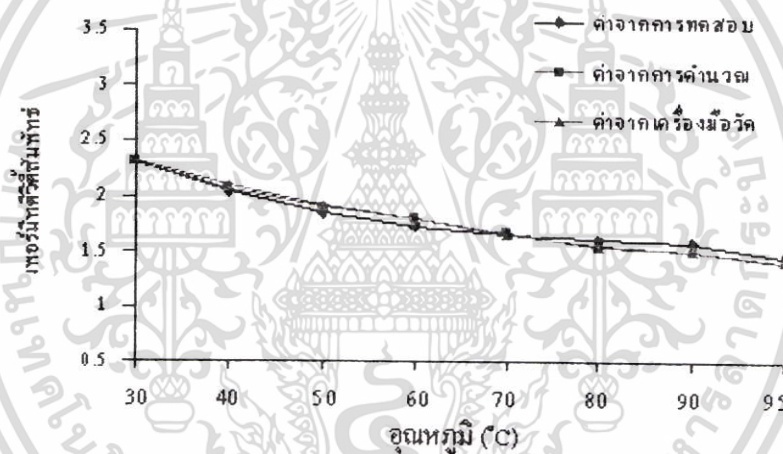
หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยในตารางหาได้จาก $|\%error|$



รูปที่ 5.113 การเทียบค่าเพอร์มิททิวิตีสัมพัทธ์ที่อุณหภูมิต่างๆ ของสาย 300 V 2-core PVC Insulated เอกสารนี้เป็นเอกสาร and Sheathed Flat Type งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.114 การเทียบค่าเพอร์มิทิวตีตี้สัมพัทธ์ที่อุณหภูมิต่างๆ ของสาย 0.6/1 kV. Copper Cable Twin Conductor XLPE Insulated and Polyethylene Sheathed



รูปที่ 5.115 การเทียบค่าเพอร์มิทิวตีตี้สัมพัทธ์ที่อุณหภูมิต่างๆ ของสาย 12/20 kV. Underground Cable Copper Stranded Conductor XLPE Insulated and PE Sheathed

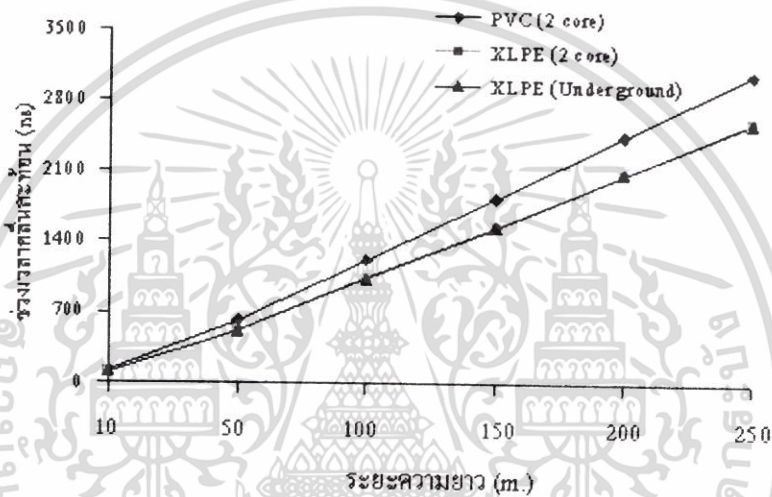
5.8 วิเคราะห์ผลการทดสอบ

5.8.1 ค่าเพอร์มิทิวตีตี้สัมพัทธ์ต่อระยะความยาว

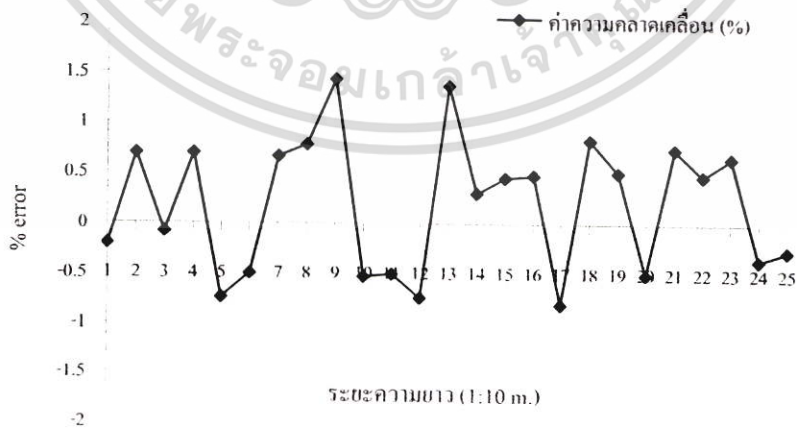
จากผลการทดลองพบว่าค่า ϵ_r นั้นเป็นค่าคงที่ของวัสดุฉนวนแต่ละชนิดซึ่งไม่ขึ้นกับระยะความยาว [15-16] โดยจะเห็นว่าช่วงเวลาการสะท้อนกลับของคลื่นจะแปรตามระยะความยาวสายในลักษณะเชิงเส้นทั้งฉนวน PVC และ XLPE ดังรูปที่ 5.116 โดยจะมีค่าเท่ากันหรือใกล้เคียงกันมาก ซึ่งค่าที่คลาดเคลื่อนนั้นเกิดจากความผิดพลาดในการอ่านช่วงเวลาคลื่นสะท้อนกลับจากออสซิลโลสโคป ดังนั้นจึงถือได้ว่าค่า ϵ_r เป็นค่าคงที่โดยไม่ขึ้นกับระยะความยาว ไม่สำคัญของขนาด

เอกสารนี้สำคัญานี้ที่มีการลดทอนตามระยะความยาวของสายที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากผลของอิมพีแดนซ์สายที่มากไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขึ้น จนทำให้แอมปริจูดของสัญญาณมีขนาดลดลงจนไม่เห็นช่วงเวลากลับสะท้อนกลับ จึงต้องทำการขยายความกว้างของสัญญาณ ซึ่งจากผลการทดลองนั้นการลดทอนของสัญญาณและความกว้างของสัญญาณที่เพิ่มขึ้นไม่มีผลต่อค่าเพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์ของฉนวนสายเคเบิล และในส่วนการทดสอบเครื่องมือวัดนั้นค่าที่ได้อยู่ในช่วงตารางแสดงค่าเพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์ของวัสดุโพลีเมอร์ และเมื่อทำการเปรียบเทียบกับผลการคำนวณช่วงเวลากลับจากรูปสัญญาณ ทั้งฉนวน PVC และ XLPE ของตัวอย่างสายที่นำมาทดสอบพบว่าค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุด โดยเฉลี่ยมีค่าไม่เกิน 1.5 % และมีค่าไม่เกิน 4 % เมื่อเปรียบเทียบกับผลการคำนวณจากการทดสอบโดยวิธีการหาค่าคาปาซิแตนซ์และแฟลคเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก



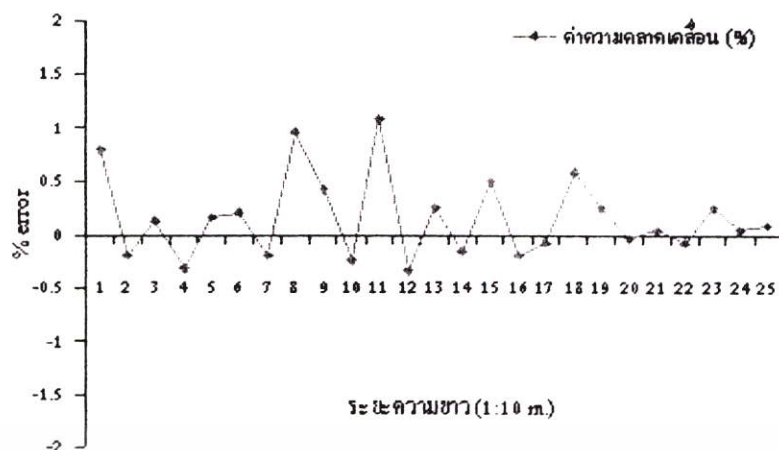
รูปที่ 5.116 ช่วงเวลากลับสะท้อนกลับที่ระยะความยาวสายต่างๆ ของฉนวน PVC และ XLPE



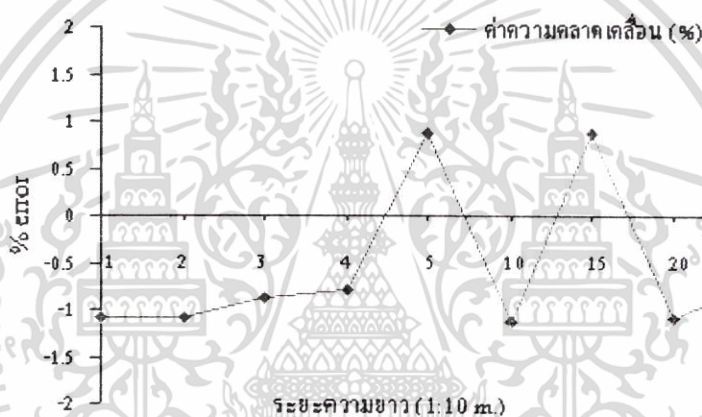
รูปที่ 5.117 เปรอ์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัดเทียบกับการคำนวณช่วงเวลากลับ

กลับจากออสซิลโลสโคปของสาย 300 V 2-core (PVC)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.118 เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัดเทียบกับการคำนวณช่วงเวลาการสะท้อนกลับจากออสซิลโลสโคปของสาย 0.6/1 kV, Copper Cable Twin Conductor (XLPE)



รูปที่ 5.119 เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัดเทียบกับการคำนวณช่วงเวลาการสะท้อนกลับจากออสซิลโลสโคปของสาย 12/20 kV, Underground Cable (XLPE)

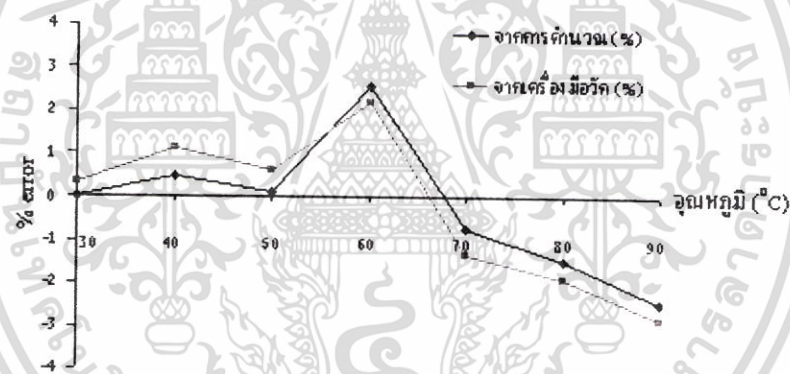
5.8.2 ค่าเพอร์มิทิวิตีที่สัมพันธ์ต่อขนาดสายเคเบิล

จากผลการทดลองพบว่าขนาดของสายที่นำมาทดสอบจะมีค่า ϵ , เท่ากันหรือใกล้เคียงกันมาก ซึ่งค่าที่คลาดเคลื่อนนั้นอาจเกิดจากความผิดพลาดในการอ่านช่วงเวลาคลื่นสะท้อนกลับจากออสซิลโลสโคป โดยขนาดของสายนั้นจะไม่มีผลต่อช่วงเวลาการสะท้อนกลับและค่าคงตัวการลดทอน ทั้งนี้เนื่องจากพื้นที่หน้าตัดของสายส่งจะทำให้ค่าความต้านทานไฟฟ้านั้นมีค่าลดลง [8] จึงไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า ϵ , [15] ทั้งนี้สามารถเปรียบเทียบได้จากการทดสอบวิธีการวัดค่าคาปาซิแตนซ์และแฟลคเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก ซึ่งค่าคาปาซิแตนซ์จะเพิ่มขึ้นตามขนาดของสายโดยจะสัมพันธ์กับรัศมีของตัวนำและรัศมีของฉนวนเมื่อทำการคำนวณตามสมการที่ 3.12 จะเห็นว่าไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าเพอร์มิทิวิตีที่สัมพันธ์และในส่วนการทดสอบเครื่องมือวัดนั้นค่าที่ได้อยู่ในช่วงตารางแสดงค่าเพอร์มิทิวิตีที่สัมพันธ์ของวัสดุโพลีเมอร์ และเมื่อทำการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนักผู้ใดเห็นหน้าใบเซปรีเซชันต้นการค่าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

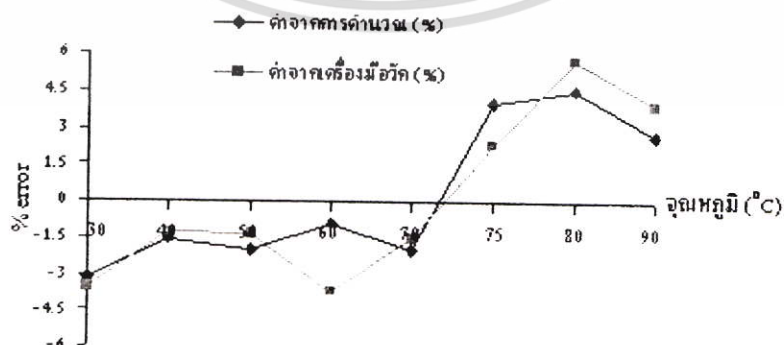
เปรียบเทียบกับผลการคำนวณช่วงเวลาการสะท้อนกลับจากรูปสัญญาณ ทั้งฉนวน PVC และ XLPE ของตัวอย่างสายที่นำมาทดสอบพบว่าค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุด โดยเฉลี่ยมีค่าไม่เกิน 1 % และมีค่าไม่เกิน 4 % เมื่อเปรียบเทียบกับผลการคำนวณจากการทดสอบโดยวิธีการหาค่าคาปาซิแตนซ์และแฟลคเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก

5.8.3 ค่าเพอร์มิททิวิตีสัมพันธ์ต่ออุณหภูมิของฉนวนสายเคเบิล

จากผลการทดลองพบว่าค่า ϵ_r ของวัสดุฉนวนจะมีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากผลของอุณหภูมิตามคุณสมบัติทางเคมีของวัสดุ [10] ซึ่งอุณหภูมิจะมีผลทำให้ค่า ϵ_r ของฉนวน PVC เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงมากขึ้น และมีผลทำให้ค่า ϵ_r ของฉนวน XLPE ลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากคุณสมบัติของสารฉนวน PVC เป็นสาร Polar Dielectric และ XLPE เป็นสาร Nonpolar Dielectric [8-9] โดยช่วงเวลาการสะท้อนกลับของคลื่นจะมีการเดินทางเปลี่ยนแปลงตามวัสดุฉนวนแต่ละชนิดเนื่องจากผลของอุณหภูมิ และมีผลต่อค่าคงตัวการลดทอนเนื่องจากค่าความต้านทานจะมีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากผลของอุณหภูมิและคุณสมบัติของสารตัวนำไฟฟ้าแต่ละชนิด [19]

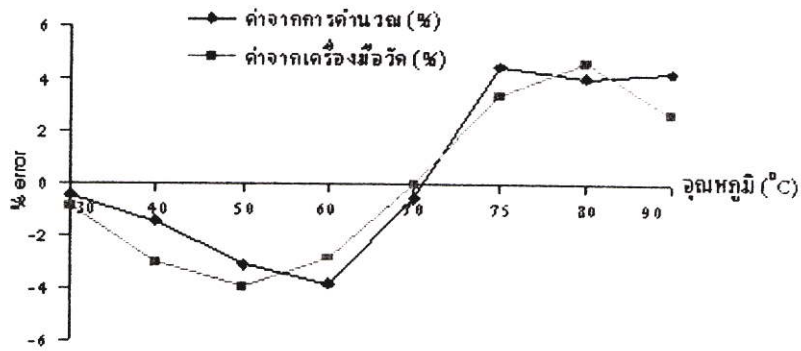


รูปที่ 5.120 เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัดเทียบกับค่าจากการทดสอบตามมาตรฐานที่อุณหภูมิต่างๆ ของสาย 300 V 2-core (PVC)



รูปที่ 5.121 เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัดเทียบกับค่าจากการทดสอบตามมาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สืบที่อุณหภูมิต่างๆ ของสาย 0.6/1 kV, Copper Cable Twin Conductor (XLPE) ในการคำนวณค่าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.122 เปรอ์เซนตึความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัดเทียบกับค่าจากผลการทดสอบตามมาตรฐานที่อุณหภูมิต่างๆ ของสาย 12/20 kV. Underground Cable (XLPE)

5.8.4 รูปสัญญาณที่ตรวจวัดได้จากออสซิลโลสโคป

จากผลการทดลองจะเห็นว่ารูปสัญญาณที่ตรวจวัดได้จากออสซิลโลสโคป ในกรณีทดสอบสายระยะความยาวสั้นๆ แรงดันที่ใกล้กับจุดส่งจะประกอบด้วยลูกคลื่นที่ตกกระทบบวกกับลูกคลื่นที่สะท้อนแรกเริ่ม (ซึ่งจะเป็นครึ่งหนึ่งของลูกคลื่นตกกระทบบวกกับลูกคลื่นที่สะท้อนใหม่ (ซึ่งจะเป็นครึ่งหนึ่งของลูกคลื่นที่ตกกระทบบวก) ในการทดสอบในสายที่มีการสูญเสีย จะพิจารณาให้ $Z_R = \frac{Z_0}{2}$ ดังนั้นสัมประสิทธิ์การสะท้อน (ρ_R) จะมีค่าเท่ากับ $-\frac{1}{3}$ ในตอนแรกแรงดันที่ส่งจะมีค่าเท่ากับ E และจะมีค่าเท่ากับ $\frac{2E}{3}$ จากปลายข้างหนึ่งไปยังปลายอีกข้างหนึ่งของสาย ในขณะที่คลื่นเดินทางไปในระยะความยาวหนึ่งของสาย โดยแรงดันทั้งหมดที่เวลา t บวกกันจะมีค่าเท่ากับแรงดันทั้งหมดที่ปรากฏขึ้นที่ปลายสาย โดยแรงดันที่สะท้อนจะมีแนวโน้มเท่ากับ $\frac{E}{2}$ และจะลดทอนลงไปเรื่อยๆ ตามระยะความยาวของสายเคเบิล เนื่องจากผลของค่าอิมพีแดนซ์ที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งรูปสัญญาณที่ปรากฏขึ้นทั้งหมดนี้จะเป็นธรรมชาติของคลื่นเดินทาง (Travelling Wave) [7]

ดังได้กล่าวข้างต้นแล้วว่าในการเลือกใช้ความกว้างของสัญญาณพัลส์ในช่วงต่างๆ ของระยะความยาวสายที่ทำการทดสอบนั้น จะต้องสามารถทำการตรวจจับช่วงเวลาการสะท้อนกลับของคลื่นได้และความกว้างสัญญาณที่ใช้ในการสร้างเป็นเครื่องวัดนั้น ค่าที่ได้จะต้องมีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับค่าที่คำนวณจากช่วงเวลาการสะท้อนกลับของสัญญาณจากออสซิลโลสโคป เพราะต้องนำไปเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณโดยวิธีการทดสอบตามมาตรฐาน นอกจากนี้ยังต้องสามารถทำการทดสอบกับสายที่มีระยะความยาวสั้นๆ ไม่ต่ำกว่า 10 เมตร ได้ ดังนั้นจึงต้องมีการบีบความกว้างของสัญญาณพัลส์ลงมาซึ่งจะต่ำกว่าสเปคของไอซีที่กำหนดไว้ จึงทำให้รูปสัญญาณพัลส์มีการผิดเพี้ยนไปบ้าง แต่จากผลการทดลองจะไม่มีผลต่อช่วงเวลาการสะท้อนกลับของคลื่น (ภาคผนวก ข.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.9 บทสรุป

จากเทคนิคที่นำเสนอสามารถนำมาออกแบบและสร้างเป็นเครื่องมือวัดที่สามารถทำการวัดหาค่าเพอร์มิททิวิตีสัมพัทธ์ได้รวดเร็วและไม่มีขั้นตอนที่ยุ่งยาก และสามารถนำไปใช้งานตามสถานที่ต่างๆ ได้สะดวก รวมทั้งผลจากเครื่องมือวัดก็มีความคลาดเคลื่อนน้อยเมื่อเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณช่วงเวลาการสะท้อนกลับ โดยผลการทดสอบเครื่องมือวัดที่ออกแบบสร้างนั้นสามารถวัดหาค่า ϵ_r ของฉนวน PVC และ XLPE ของสายเคเบิลแรงต่ำและสายเคเบิลแรงสูงได้ ซึ่งตรงกับช่วงของตารางแสดงค่าเพอร์มิททิวิตีสัมพัทธ์ของวัสดุโพลีเมอร์ [1-2] โดยสามารถตรวจวัดขนาดสายสูงสุด 400 mm^2 ระหว่างความยาวในช่วง 10 – 250 เมตร และมีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 4 % เมื่อเปรียบเทียบกับผลการคำนวณโดยวิธีการวัดหาค่าคาปาซิแตนซ์และค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไปไดอิเล็กตริกตามมาตรฐาน ซึ่งประโยชน์จากงานวิจัยนี้สามารถใช้เป็นแนวทางในการพัฒนางานทดสอบให้กับภาคอุตสาหกรรมในปัจจุบันได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากจุดมุ่งหมายที่ได้กำหนดไว้สำหรับการทำวิทยานิพนธ์นี้ ได้นำเสนอถึงการศึกษาค่าเพอร์มิทวิตีตีสัมพัทธ์ของฉนวนสายเคเบิลโดยใช้เทคนิคของคลื่นเดินทาง โดยเริ่มทำการศึกษาค้นคว้าในส่วนทฤษฎีพื้นฐานทางด้านโครงสร้างของสายเคเบิล ประเภทของฉนวน ความสำคัญของค่าเพอร์มิทวิตีตีสัมพัทธ์ที่มีผลต่อค่าสนามไฟฟ้าและความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของค่าเพอร์มิทวิตีตีสัมพัทธ์ของวัสดุสารฉนวนแต่ละชนิดจากผลของปัจจัยต่างๆ การศึกษามาตรฐานและวิธีการทดสอบของสายเคเบิลแต่ละประเภทรวมถึงปัญหาและวิธีการแก้ปัญหาในการทดสอบ และสำหรับการศึกษานำเสนอในเรื่องของ การออกแบบและสร้างเครื่องมือวัดโดยใช้เทคนิคของคลื่นเดินทางเพื่อนำมาใช้เป็นแนวทางในการทดสอบ เพื่อแก้ไขปัญหาค่าความผิดพลาดจากการทดสอบอันเนื่องมาจากสาเหตุต่างๆ และสามารถนำไปใช้ในการพัฒนาให้เป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นและสามารถนำไปตรวจวัดสายเคเบิลที่มีการติดตั้งจริงต่อไปในอนาคตได้ โดยทั้งหมดนี้สามารถสรุปผลของการศึกษาและวิเคราะห์ผลการทดสอบ รวมทั้งการออกแบบสร้างเครื่องมือวัดและการทดสอบความถูกต้องของเครื่องมือวัด ได้ดังนี้

6.1 การทดสอบฉนวนสายเคเบิลตามมาตรฐาน

ในขั้นต้นได้ทำการศึกษารายละเอียดโครงสร้างของสายเคเบิล ประเภทของฉนวน และขนาดพิกัดแรงดันของสายที่นำมาทดสอบ และศึกษาถึงหัวข้อและวิธีการทดสอบของแต่ละมาตรฐานของตัวอย่างสายที่นำมาทดสอบ ทั้งการทดสอบทางด้านโครงสร้าง ฟิสิกส์ และทางด้านไฟฟ้า ซึ่งต้องอาศัยอุปกรณ์และขั้นตอนต่างๆ ในควบคุมการทดสอบ โดยเครื่องมือที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้จะผ่านการตรวจสอบหรือมีใบรับรองมาตรฐาน เพื่อป้องกันความผิดพลาดเนื่องจากอุปกรณ์การทดสอบและควบคุมการทดสอบให้เป็นไปตามมาตรฐาน เนื่องจากในการทดสอบนั้นอาจพบปัญหามากมายเช่น สัญญาณรบกวน หรือระบบกราวด์ จากการทดสอบในวิทยานิพนธ์นี้จะชี้ให้เห็นถึงวิธีการทดสอบในแต่ละวิธีการตามมาตรฐาน และจากการทดสอบได้นำตัวอย่างสายเคเบิลแรงต่ำและแรงสูง ทั้งประเภทสายสองตัวนำ สายส่ง และสายเคเบิลใต้ดินขนาดต่างๆ มาทำการทดสอบเพื่อศึกษาถึงผลของลักษณะทางโครงสร้าง ชนิดของฉนวน ผลของอุณหภูมิ และปัจจัยทางด้านอื่นๆ รวมทั้งการทดสอบโดยการเร่งอายุการใช้งานในลักษณะต่างๆ ซึ่งทำการทดสอบตามวิธีการมาตรฐาน จากข้อมูลที่ได้ในการทดสอบและการศึกษาทฤษฎี สามารถสรุปปัจจัยที่มีผลต่อค่าเพอร์มิทวิตีตีสัมพัทธ์ได้ตามตารางที่ 6.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.1 ปัจจัยที่มีผลต่อค่าเพอร์มิทิวิตีตีสัมพัทธ์ของฉนวนสายเคเบิล

ปัจจัยที่มีผลต่อค่าเพอร์มิทิวิตีตีสัมพัทธ์	มีผล	มีผลเล็กน้อย	ไม่มีผล	หมายเหตุ
ผลของแรงดัน		✓		
ผลของขนาดตัวนำและฉนวน			✓	
ผลของชนิดตัวนำ			✓	
ผลของระยะความยาว			✓	
ผลของชนิดฉนวน	✓			
ผลของอุณหภูมิ	✓			
ผลจากการเร่งอายุการใช้งาน	✓			
ความชื้น	✓			
ความถี่		✓		
ความดันบรรยากาศ		✓		

6.2 การศึกษาหาค่าเพอร์มิทิวิตีตีสัมพัทธ์ของฉนวนสายเคเบิลโดยใช้คลื่นเดินทาง

ในขั้นต้นได้ทำการศึกษาทฤษฎีคลื่นเดินทางในสายเคเบิล เพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานในการออกแบบสร้างเครื่องวัดค่าเพอร์มิทิวิตีตีสัมพัทธ์ (ϵ_r) ของสายเคเบิล โดยอาศัยหลักการเคลื่อนที่ของคลื่นและการเกิดคลื่นสะท้อน โดยวิธีการส่งสัญญาณพัลส์แรงดันต่ำเข้าไปในสายเคเบิลที่ต้องการทดสอบหาค่า ϵ_r ของวัสดุฉนวน แล้วทำการตรวจวัดช่วงเวลาเดินทางของคลื่นที่สะท้อนกลับมาจากออสซิลโลสโคป ซึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงตามคุณสมบัติของฉนวนแต่ละชนิด โดยนำช่วงเวลาที่ได้ออกมาหาค่าเพอร์มิทิวิตีตีสัมพัทธ์ (ϵ_r) ของฉนวนสายเคเบิลตามสมการที่ 4.4 จากการทดสอบวัดค่า ϵ_r ของตัวอย่างฉนวน PVC ของสาย 300 V 2-core PVC Insulated and Sheathed, Flat Type และฉนวน XLPE ของสาย 0.6/1 kV, Copper Cable Twin Conductor Cross-linked Polyethylene Insulated and Polyethylene Sheathed และ 12/20 kV, Underground Cable Copper Stranded Conductor XLPE Insulated and PE Sheathed ค่าที่วัดได้ตรงกับค่า ϵ_r ของวัสดุฉนวนในตารางแสดงค่าเพอร์มิทิวิตีตีสัมพัทธ์ของวัสดุโพลีเมอร์ ซึ่งค่าที่ได้ตรงกับวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้

6.3 การออกแบบสร้างเครื่องวัดค่าเพอร์มิทิวิตีตีสัมพัทธ์ของฉนวนสายเคเบิล

ในการออกแบบสร้างเครื่องวัดค่า ϵ_r ของสายเคเบิลโดยจะสร้างเครื่องกำเนิดสัญญาณพัลส์แบบโมโนสเตเบิลป้อนสัญญาณพัลส์เข้าไปในสายเคเบิลจำนวน 1 ลูก และเมื่อป้อนพัลส์เข้าไปในสายเคเบิลแล้วก็จะเกิดสัญญาณพัลส์ที่สะท้อนกลับมาอีก 1 ลูก โดยในส่วนของวงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์จะใช้ IC เบอร์ 74HC123 ซึ่งสามารถทำการปรับความกว้างของสัญญาณพัลส์ให้มีค่ามากหรือน้อยได้ โดยการปรับค่าความต้านทานที่ต่อกับขา 15 ของ IC เบอร์ 74HC123 กับแหล่งจ่าย VCC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อศึกษาช่วงระยะเวลาการสะท้อนกลับและการลดทอนของสัญญาณให้สามารถทำการทดสอบหาค่าในช่วงระยะทางตั้งแต่ 10 – 250 เมตร หรือมากกว่าได้ตามขอบเขตของวิทยานิพนธ์

ส่วนที่ 2 วงจรตรวจจับคลื่นสะท้อนของสายเคเบิลจะใช้ LM เป็นตัวตัดสัญญาณรบกวนที่เข้ามาให้มีแต่แรงดันที่สะท้อนกลับ โดยต่อร่วมกับ IC เบอร์ 74HC74 เป็นตัวตรวจจับช่วงระยะเวลาการสะท้อนกลับของคลื่น แล้วทำการตรวจวัดช่วงเวลาเดินทางของคลื่นที่สะท้อนกลับมาจากออสซิลโลสโคป ว่าช่วงเวลาของคลื่นที่สะท้อนกลับมีค่าเท่ากันหลังจากผ่านวงจรในส่วนที่ 2

ส่วนที่ 3 วงจรนับจะวงจรแบบ Dual 4 Bit Binary Counter ต่อกัน 2 ตัว เพื่อให้สามารถรองรับจำนวนสัญญาณพัลส์ของช่วงระยะเวลาการสะท้อนกลับของสายที่มีระยะความยาวมากๆ ได้ โดยการทำงานของวงจรถับ จะเริ่มนับเมื่อมีการป้อนสัญญาณพัลส์เข้าไปในสายเคเบิล และจะหยุดนับเมื่อตรวจจับสัญญาณพัลส์ที่สะท้อนกลับมา จากนั้นก็จะส่งข้อมูลจากวงจร Counter ไปเป็น Input ให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ทำการประมวลผลเพื่อคำนวณหาค่า E_r ของฉนวนสายเคเบิลต่อไป

ส่วนที่ 4 ส่วนควบคุมและการประมวลผล โดยเริ่มทำการศึกษาไมโครคอนโทรลเลอร์และโครงสร้างหลักของ CPU และการเชื่อมต่อวงจรในส่วนประกอบหลักของเครื่องวัดค่าเพอร์มิททิวิตีสัมพัทธ์ (E_r) ของฉนวนสายเคเบิล เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในงานออกแบบและควบคุมการตรวจจับเวลาที่คลื่นเคลื่อนที่ในสายเคเบิล โดยต่อร่วมกับคีย์แพดในการกำหนดระยะทางที่ทดสอบและเริ่มต้นการทำงานของวงจร เพื่อนำช่วงเวลาที่ได้ไปประมวลผลหาค่าเพอร์มิททิวิตีสัมพัทธ์ (E_r) ของฉนวนสายเคเบิล และแสดงผลของส่วนต่างๆ ตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้

6.4 การทดสอบเครื่องมือวัดที่ออกแบบสร้างเทียบตารางแสดงค่าเพอร์มิททิวิตีสัมพัทธ์ และการทดสอบตามมาตรฐาน

จากผลการทดลองที่ได้จะเห็นว่าค่าเพอร์มิททิวิตีสัมพัทธ์นั้นเป็นค่าคงที่ของวัสดุฉนวนแต่ละชนิดซึ่งไม่ขึ้นกับขนาดและระยะความยาว[16] แต่จะมีการเปลี่ยนแปลงตามผลของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นทั้งนี้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางเคมีของวัสดุฉนวนแต่ละชนิด [11] และส่วนความกว้างของสัญญาณพัลส์ขนาดต่างๆ ที่ใช้ในการทดสอบก็ไม่มีผลต่อค่าเพอร์มิททิวิตีสัมพัทธ์ แต่จำเป็นต้องปรับให้เหมาะสมเพื่อลดความคลาดเคลื่อนของช่วงเวลาที่สะท้อนกลับ ซึ่งในการทดสอบดังกล่าวได้ทำการทดสอบความถูกต้องโดยเทียบกับค่าที่ได้ตามตารางแสดงค่าเพอร์มิททิวิตีสัมพัทธ์ของวัสดุโพลียูรีเทนและหนังสือต่างๆ ตามเอกสารอ้างอิง รวมทั้งผลที่ได้จากการคำนวณโดยวิธีการวัดหาค่าคาปาซิแตนซ์และแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียค่าไดอิเล็กตริกตามมาตรฐาน

ตารางที่ 6.2 การเปรียบเทียบผลที่ได้ของเครื่องมือวัดกับตารางและผลการทดสอบตามมาตรฐาน

ประเภทสาย	ค่าที่ได้จาก ตารางมาตรฐาน	ค่าที่คำนวณจากการ ทดสอบ C&TANδ	ค่าที่คำนวณจาก รูปสัญญาณ	ค่าที่ได้จาก เครื่องมือวัด
PVC Twin Conductors	3.2 – 3.6	3.348	3.355	3.348
XLPE Twin Conductors	2.3 – 5.2	2.331	2.412	2.409
XLPE Under Ground Cable	2.3 – 5.2	2.299	2.298	2.311

ตารางที่ 6.3 การเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนของวิธีที่นำเสนอกับผลการทดสอบตามมาตรฐาน

ประเภทสาย	ความคลาดเคลื่อนจากการคำนวณ (%)			ความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัด (%)		
	ความยาว	ขนาด	อุณหภูมิ	ความยาว	ขนาด	อุณหภูมิ
PVC Twin Conductors	-0.209	-0.030	1.119	-	0.329	1.479
XLPE Twin Conductors	-3.475	-3.089	2.590	-3.346	-3.518	2.784
XLPE Under Ground Cable	0.043	-0.478	3.170	0.522	-0.913	3.055

6.5 ข้อเสนอแนะ

ในการศึกษาหาค่าเพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์ของฉนวนสายเคเบิล โดยใช้เทคนิคของคลื่นเดินทาง รวมทั้งการออกแบบและพัฒนาเครื่องมือวัดค่าเพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์ (ϵ_r) ของสายเคเบิล ควรทำการศึกษาลักษณะของคลื่นเคลื่อนที่และการเกิดคลื่นสะท้อนในสายเคเบิล เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการพัฒนาสร้างเครื่องมือวัดให้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นต่อไป และควรมีการศึกษาในส่วนของการออกแบบวงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์ให้สามารถทดสอบกับสายที่มีระยะความยาวสั้นๆ ได้ และรูปของสัญญาณพัลส์ที่นำมาใช้ในการทดสอบควรมีรูปร่างที่คงที่ ซึ่งถ้านำมาพัฒนาเป็นเครื่องมือวัดมาตรฐานก็ควรมีการใส่วงจรกรองเพิ่มเติมด้วย อีกทั้งควรมีการศึกษาในส่วนของวงจรม้าเพื่อให้สามารถรองรับจำนวนสัญญาณพัลส์ของช่วงเวลาการสะท้อนกลับของสายที่มีระยะความยาวมากๆ และควรเก็บผลในส่วนในช่วงเวลาการสะท้อนกลับที่ความกว้างสัญญาณพัลส์ขนาดต่างๆ ตามระยะความยาวสายที่ใช้ในการทดสอบ เพื่อให้ในส่วนของการประมวลผลมีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดจากการกำหนดช่วงเวลา เพื่อเป็นการพัฒนาและส่งเสริมงานวิจัยต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.6 งานวิจัยที่พัฒนาต่อไป

จากผลของการศึกษาหาค่าเพอร์มิทวิตีตีสัมพัทธ์ของฉนวนสายเคเบิลโดยใช้เทคนิคของคลื่นเดินทาง รวมทั้งการออกแบบสร้างเครื่องมือวัดและการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าเพอร์มิทวิตีตีสัมพัทธ์ ควรศึกษาและพัฒนางานวิจัยในหัวข้อต่างๆ ดังนี้

6.6.1 พัฒนาเครื่องมือวัดให้สามารถหาค่าเพอร์มิทวิตีตีสัมพัทธ์ (ϵ_r) ของฉนวนสายเคเบิลให้มีความถูกต้องมากขึ้น โดยการพัฒนางจรส่วนต่างๆ และซึ่งอาจจะใช้การประมวลผลด้วย DSP

6.6.2 พัฒนาเครื่องมือวัดให้มีความหลากหลาย โดยสามารถวัดหาค่าเพอร์มิทวิตีตีสัมพัทธ์ (ϵ_r) รวมทั้งการหาตำแหน่งการเกิดฟลัดหรือค่าคาปาซิแตนซ์ได้ภายในเครื่องเดียวกัน ซึ่งจะช่วยให้เกิดการพัฒนางานวิจัยได้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

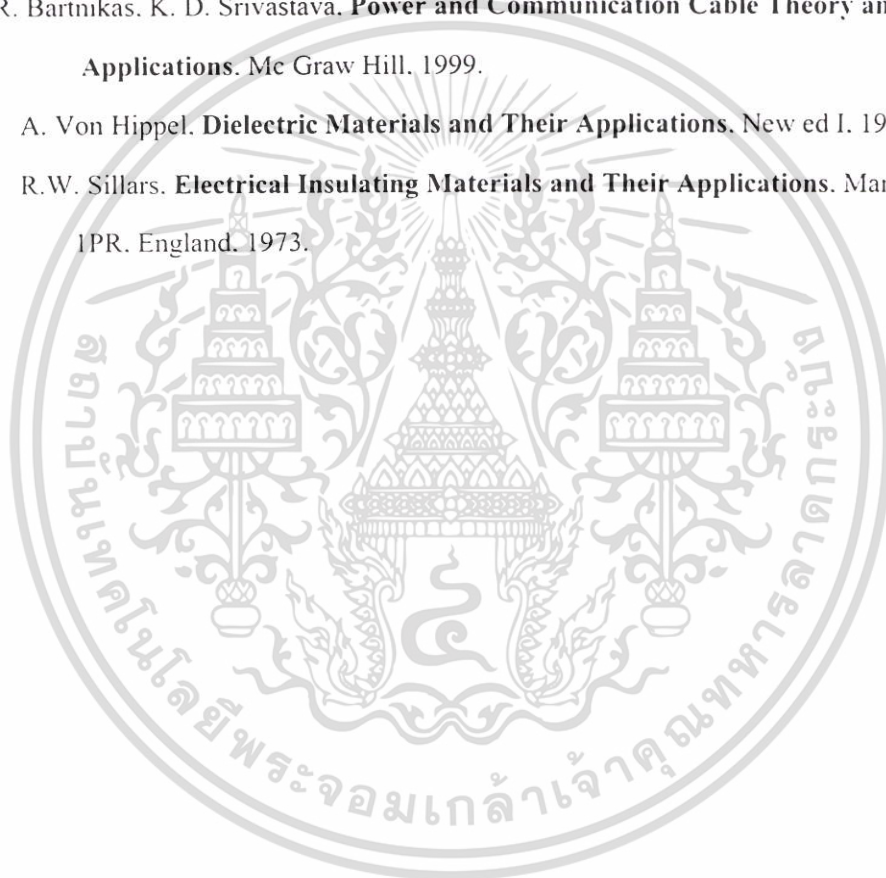
6.6.3 สำหรับการศึกษปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าเพอร์มิทวิตีตีสัมพัทธ์ ควรนำมาใช้เป็นแนวทางในการศึกษาอายุการใช้งานของฉนวนสายเคเบิล โดยการศึกษาและเก็บข้อมูลจำเพาะของฉนวนสายเคเบิลชนิดต่างๆ รวมทั้งการทดสอบทางด้านไฟฟ้าและระยะเวลาการเร่งอายุการใช้งานตามสภาวะการทดสอบแบบต่างๆ เพื่อเก็บผลของค่า ϵ_r ซึ่งอาจนำมาจำลองในโปรแกรมไฟไนท์อีลิเมนต์ เพื่อดูแนวทางการหักเหของสนามไฟฟ้าและความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในชั้นฉนวนหรือบริเวณช่องว่าง (void) ในชั้นฉนวนจากการทดสอบดิสชาร์จบางส่วน และนำมาคำนวณหาค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า จากนั้นจึงนำมาทดสอบจริงว่าฉนวนนั้นสามารถทนต่อแรงดันไฟฟ้าตามมาตรฐานได้หรือไม่ โดยการจ่ายแรงดันไฟตรง ไฟสลับและอิมพัลส์ ที่พิกัดแรงดันต่างๆ ถ้าฉนวนนั้นเกิดการเบรคควาน์จริงตามสมมติฐานที่ตั้งไว้ก็กลับมาดูเรื่องของระยะเวลาที่ใช้ในการทดสอบ ซึ่งคาดว่าจะสามารถทำนายอายุการใช้งานของฉนวนสายเคเบิลจากการตรวจวัดค่า ϵ_r ได้ในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

- [1] G.F. Moore. **Electric Cables Handbook**. BSP Professional Books. 1997.
- [2] H. Wa Beaty, **Electrical Engineering Materials Reference guide**. McGraw-Hill. 1990.
- [3] ICEA Publication No.S-66-524 (Cross-Linked Thermosetting Polyethylene Insulated Wire and Cable for the Transmission and Distribution of Electrical Energy)
- [4] IEC No. 60502 – 2 (Power cable with extruded insulation and their accessories for rated voltages from 1 kV ($U_m = 1.2 \text{ kV}$) up to 30 kV ($U_m = 36 \text{ kV}$))
- [5] ตำราวย สังข์สะอาด. “วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง” ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. มกราคม 2528.
- [6] W.C. Johnos. **Transmission Line and networks**. McGraw-Hill. 1950.
- [7] R.K. Moore. **Traveling-Wave Engineering**. McGraw-Hill. 1960.
- [8] William. D. Stevenson Jr., **Elements of Power System Analysis**. Forth Edition. McGraw – Hill. Inc. Singapore. 1982.
- [9] ถวิล กิ่งทอง, “ทฤษฎีโครงข่ายไฟฟ้าและสายส่ง” ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม. คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2538.
- [10] Joseph A. Edminister. **Theory and Problems of Electromagnetics 2/ED**. McGraw-Hill. 1979.
- [11] B. Tareev. **Physics of Dielectric Materials**. MIR PUBLISHERS MOSCOW. 1979.
- [12] สิริวัฒน์ โปธิเวชกุล. “เอกสารประกอบคำสอนวิชา **Electrical Engineering Materials**” ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า. คณะวิศวกรรมศาสตร์. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2543.
- [13] B. Clegg. **Underground Cable Fault Location**. McGraw-Hill. 1993.
- [14] S. Potivejkul, P.Kerdonfag, S. Jamnian and V.Kinnares, “Design of A Low Voltage Cable Fault Detector,” IEEE Conf. On PES Winter Meeting, 2000 vol. 1. 2000. pp. 724-769.
- [15] P.Kerdonfag, S. Potivejkul, S. Jamnian and V.Kinnares, “Relative Permittivity Detector for Cable Insulators.” IEEE Conf. On PES Winter Meeting, 2000 vol. 1. 2000. pp. 1203-1206.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [16] พงษ์เทพ เกิดดอนแฝก, รุ่งโรจน์ สมบูรณ์ทรัพย์, สาธิต จำเนียร และ ศิริวัฒน์ โทธิเวชกุล “เทคนิคการวัดค่าเพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์ของฉนวนสายเคเบิลโดยใช้คลื่นเดินทาง”. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 23, 2543, หน้า 29-32.
- [17] รุ่งโรจน์ สมบูรณ์ทรัพย์ และ ศิริวัฒน์ โทธิเวชกุล “เครื่องวัดค่าเพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์ของฉนวนสายเคเบิลไฟฟ้าแรงสูงโดยใช้เทคนิคของคลื่นเดินทาง”. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 26, 2546, หน้า 471-476.
- [18] สุเจตน์ จันทรัมย์ “ไมโครคอนโทรลเลอร์ชิพเดี่ยว 8051” มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร. 2535
- [19] R. Bartnikas, K. D. Srivastava. **Power and Communication Cable Theory and Applications**. Mc Graw Hill, 1999.
- [20] A. Von Hippel. **Dielectric Materials and Their Applications**. New ed I. 1995.
- [21] R.W. Sillars. **Electrical Insulating Materials and Their Applications**. Manchester M17 1PR. England. 1973.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Item of Capacity and Power Factor Tests

Test Procedure

The test method was made at ambient temperature in accordance with sub-clause 6.5 of ICEA Publication No.S-66-524 (1988). Preparing the test specimen with the gross length of 5.18 meters. Immerse the middle 3.66 meters of test specimen in tap water at room temperature for at least 24 hours, keeping the 0.76 meters portion of each end above water as leakage insulation.

The capacitance and power factor were measured at the rated voltage to ground of the cable under test at a frequency of approximately 50 Hz.

Specimen

25 kV. Spaced Aerial Cable Aluminum Stranded Conductor XLPE Insulated and Sheathed.

Test Result

The test result according to the specification requirements.


KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
Data of Capacity and Power Factor Tests

Specimen	: 25 kV. 35 sq.mm. Spaced Aerial Cable Aluminum Stranded Conductor XLPE Insulated and Sheathed.				
Ambient Temperature	: 32 °C				
Reference Standard	: ICEA Publication No.S-66-524, MEA's Specification No.406				
Description	Specification		Result		Remark
Diameter over the insulation : D	-	mm.	21.24	mm.	-
Diameter under the insulation : d	-	mm.	7.96	mm.	-
Length of test specimen	5.18	m.	5.18	m.	-
Length of test specimen (immersed in water)	3.66	m.	3.66	m.	-
Water temperature	-	°C	28 ± 0.5	°C	-
Immersion period	1	day	1	day	-
Test voltage (at rated voltage)	25	kV.	25	kV.	-
Test frequency	60	Hz.	50	Hz.	Frequency of Thailand
The measured capacitance (C)	-	pF.	477.570	pF.	-
The measured power factor (tan δ)	≤ 2	%	0.023	%	-
Specific inductive capacity (Dielectric constant) (Calculation)	≤ 3.5	-	2.303	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ลึกทั้งห้ามิให้อัดแปลงเนื้อหาก และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Studying Relative Permittivity of Cable Insulators Using Travelling Wave Technique


KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LARDKRABANG
Data of Capacity and Power Factor Tests

Specimen	: 25 kV. 70 sq.mm. Spaced Aerial Cable Aluminum Stranded Conductor XLPE Insulated and Sheathed.				
Ambient Temperature	: 32 °C				
Reference Standard	: ICEA Publication No.S-66-524, MEA's Specification No.406				
Description	Specification		Result		Remark
Diameter over the insulation : D	-	mm.	24.74	mm.	-
Diameter under the insulation : d	-	mm.	10.63	mm.	-
Length of test specimen	5.18	m.	5.18	m.	-
Length of test specimen (immersed in water)	3.66	m.	3.66	m.	-
Water temperature	-	°C	28 ± 0.5	°C	-
Immersion period	1	day	1	day	-
Test voltage (at rated voltage)	25	kV.	25	kV.	-
Test frequency	60	Hz.	50	Hz.	Frequency of Thailand
The measured capacitance (C)	-	pF.	554.501	pF.	-
The measured power factor (tan δ)	≤ 2	%	0.0235	%	-
Specific inductive capacity (Dielectric constant) (Calculation)	≤ 3.5	-	2.302	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ถือว่าห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Studying Relative Permittivity of Cable Insulators Using Travelling Wave Technique

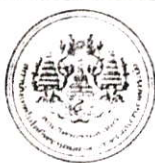

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
Data of Capacity and Power Factor Tests

Specimen	: 25 kV. 185 sq.mm. Spaced Aerial Cable Aluminum Stranded Conductor XLPE Insulated and Seathed.				
Ambient Temperature	: 32 °C				
Reference Standard	: ICEA Publication No.S-66-524, MEA's Specification No.406				
Description	Specification		Result		Remark
Diameter over the insulation : D	-	mm.	29.79	mm.	-
Diameter under the insulation : d	-	mm.	17.19	mm.	-
Length of test specimen	5.18	m.	5.18	m.	-
Length of test specimen (immersed in water)	3.66	m.	3.66	m.	-
Water temperature	-	°C	28 ± 0.5	°C	-
Immersion period	1	day	1	day	-
Test voltage (at rated voltage)	25	kV.	25	kV.	-
Test frequency	60	Hz.	50	Hz.	Frequency of Thailand
The measured capacitance (C)	-	pF.	852.232	pF.	-
The measured power factor (tan δ)	≤ 2	%	0.022	%	-
Specific inductive capacity (Dielectric constant) (Calculation)	≤ 3.5	-	2.304	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ลีดทั้งห้าเพื่อให้ฉบับลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Studying Relative Permittivity of Cable Insulators Using Travelling Wave Technique


KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
Data of Capacity and Power Factor Tests

Specimen	: 25 kV. 240 sq.mm. Spaced Aerial Cable Aluminum Stranded Conductor XLPE Insulated and Sheathed.				
Ambient Temperature	: 32 °C				
Reference Standard	: ICEA Publication No.S-66-524, MEA's Specification No.406				
Description	Specification		Result		Remark
Diameter over the insulation : D	-	mm.	32.85	mm.	-
Diameter under the insulation : d	-	mm.	19.41	mm.	-
Length of test specimen	5.18	m.	5.18	m.	-
Length of test specimen (immersed in water)	3.66	m.	3.66	m.	-
Water temperature	-	°C	28 ± 0.5	°C	-
Immersion period	1	day	1	day	-
Test voltage (at rated voltage)	25	kV.	25	kV.	-
Test frequency	60	Hz.	50	Hz.	Frequency of Thailand
The measured capacitance (C)	-	pF.	890.198	pF.	-
The measured power factor (tan δ)	≤ 2	%	0.033	%	-
Specific inductive capacity (Dielectric constant) (Calculation)	≤ 3.5	-	2.301	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ลิดทั้งห้ามิให้อัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Studying Relative Permittivity of Cable Insulators Using Travelling Wave Technique



Item of Accelerated Water Absorption Test

Test Procedure

Preparing the test specimen with the gross length of 4.57 meters. Immerse the middle 3.05 meters of test specimen in tap water that maintained at 75 ± 1 °C and the water level shall be kept constant for a period of 14 days, keeping the 0.76 meter portion of each end above water as leakage insulation.

The capacitance of the insulation was determined at an average stress of 80 volts per mil at a frequency of approximately 50 Hz. after 1, 7 and 14 day's immersion. The power factor of the insulation at average stresses of 40 and 80 volts per mil were determined after 1 and 14 days immersion.

Specimen

25 kV. Spaced Aerial Cable Aluminum Stranded Conductor XLPE Insulated and Sheathed.

Test Result

The value are within those state in the ICEA Publication No.S-66-524 sub-clause 3.7.3.3 requirements.


KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LARDKRABANG
Data of Accelerated Water Absorption Test

Specimen	: 25 kV. 35 sq.mm. Spaced Aerial Cable Aluminum Stranded Conductor XLPE Insulated and Sheathed.						
Ambient Temperature	: 32 °C						
Reference Standard	: ICEA Publication No.S-66-524, MEA's Specification No.406						
Description		Specification			Result		Remark
Thickness of insulation	Nom./Min	3.175	2.8575	mm.	3.318	3.2195	mm.
Diameter over the cable	Avg.	-	-	mm.	21.24	-	mm.
Diameter under the insulation	Avg.	-	-	mm.	7.96	-	mm.
Length of test specimen		4.57	-	m.	4.57	-	m.
Length of test specimen (immersed in water)		3.05	-	m.	3.05	-	m.
Water temperature		75 ± 1	-	°C	74.8 ± 0.5	-	°C
Test voltage		At 40 V./mil			10.5		kV.
		At 80 V./mil			20.9		kV.
Test frequency		60		Hz.	50		Hz.
The Capacitance of the insulation shall be determined at an average stress of 80 V./mil at 50 Hz.		After 1 day			275.50		pF.
		After 7 days			276.55		
		After 14 days			277.00		
The power factor of the insulation shall be determined after 1 day at 50 Hz.		At 40 V./mil			0.00190		-
		At 80 V./mil			0.00220		
The power factor of the insulation shall be determined after 14 days at 50 Hz.		At 40 V./mil			0.00290		-
		At 80 V./mil			0.00390		
Dielectric constant after 1 day		≤ 3.5		-	1.597		-
% Increase in capacitance 1-14 days		≤ 3.0		%	0.5444		%
% Increase in capacitance 7-14 days		≤ 1.5		%	0.3796		%
Stability Factor after 1 day		-		-	0.03		-
Stability Factor after 14 days		≤ 1.0		-	0.10		-
Alternate to stability factor 1-14 days		≤ 0.5		-	0.07		-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ก็ยังห้ามมิให้คัดลอกและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีโอกาสเป็นไปได้

Studying Relative Permittivity of Cable Insulators Using Travelling Wave Technique


KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
Data of Accelerated Water Absorption Test

Specimen	: 25 kV. 185 sq.mm. Spaced Aerial Cable Aluminum Stranded Conductor XLPE Insulated and Sheathed.							
Ambient Temperature	: 32 °C							
Reference Standard	: ICEA Publication No.S-66-524, MEA's Specification No.406							
Description		Specification			Result			Remark
Thickness of insulation	Nom./Min	3.175	2.8575	mm.	3.193	2.8805	mm.	-
Diameter over the cable	Avg.	-	-	mm.	29.79	-	mm.	-
Diameter under the insulation	Avg.	-	-	mm.	17.19	-	mm.	-
Length of test specimen		4.57	-	m.	4.57	-	m.	-
Length of test specimen (immersed in water)		3.05	-	m.	3.05	-	m.	-
Water temperature		75 ± 1	-	°C	74.8 ± 0.5	-	°C	-
Test voltage		At 40 V./mil			10.3	-	kV.	-
		At 80 V./mil			20.7	-	kV.	
Test frequency		60	-	Hz.	50	-	Hz.	Frequency of Thailand
The Capacitance of the insulation shall be determined at an average stress of 80 V./mil at 50 Hz.		After 1 day			475.50	-	pF.	-
		After 7 days			476.50	-		
		After 14 days			478.00	-		
The power factor of the insulation shall be determined after 1 day at 50 Hz.		At 40 V./mil			0.00110	-	-	-
		At 80 V./mil			0.00140	-		
The power factor of the insulation shall be determined after 14 days at 50 Hz.		At 40 V./mil			0.00220	-	-	-
		At 80 V./mil			0.00310	-		
Dielectric constant after 1 day		≤ 3.5	-	-	1.545	-	-	-
% Increase in capacitance 1-14 days		≤ 3.0	-	%	0.5257	-	%	-
% Increase in capacitance 7-14 days		≤ 1.5	-	%	0.2098	-	%	-
Stability Factor after 1 day		-	-	-	0.03	-	-	-
Stability Factor after 14 day		≤ 1.0	-	-	0.09	-	-	-
Alternate to stability factor 1-14 days		≤ 0.5	-	-	0.06	-	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่จำกัดสิทธิ์ในสิ่งที่ปรากฏในเอกสารฉบับนี้ และต้องอ้างถึงถึงเจ้าของเอกสารฉบับนี้ที่มีการนำไปใช้

Studying Relative Permittivity of Cable Insulators Using Travelling Wave Technique


KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
Data of Accelerated Water Absorption Test

Specimen	: 25 kV. 240 sq.mm. Spaced Aerial Cable Aluminum Stranded Conductor XLPE Insulated and Sheathed.							
Ambient Temperature	: 32 °C							
Reference Standard	: ICEA Publication No.S-66-524, MEA's Specification No.406							
Description		Specification			Result			Remark
Thickness of insulation	Nom./Min	3.175	2.8575	mm.	3.486	3.2405	mm.	
Diameter over the cable	Avg.	-	-	mm.	32.85	-	mm.	-
Diameter under the insulation	Avg.	-	-	mm.	19.41	-	mm.	-
Length of test specimen		4.57		m.	4.57		m.	-
Length of test specimen (immersed in water)		3.05		m.	3.05		m.	-
Water temperature		75 ± 1		°C	74.8 ± 0.5		°C	-
Test voltage		At 40 V./mil			10.6		kV.	-
		At 80 V./mil			21.2		kV.	
Test frequency		60		Hz.	50		Hz.	Frequency of Thailand
The Capacitance of the insulation shall be determined at an average stress of 80 V./mil at 50 Hz.		After 1 day			485.00		pF.	-
		After 7 days			486.80			
		After 14 days			487.50			
The power factor of the insulation shall be determined after 1 day at 50 Hz.		At 40 V./mil			0.00070		-	-
		At 80 V./mil			0.00090			
The power factor of the insulation shall be determined after 14 days at 50 Hz.		At 40 V./mil			0.00170		-	-
		At 80 V./mil			0.00240			
Dielectric constant after 1 day		≤ 3.5		-	1.507		-	-
% Increase in capacitance 1-14 days		≤ 3.0		%	0.5154		%	-
% Increase in capacitance 7-14 days		≤ 1.5		%	0.2057		%	-
Stability Factor after 1 day		-		-	0.02		-	-
Stability Factor after 14 days		≤ 1.0		-	0.07		-	-
Alternate to stability factor 1-14 days		≤ 0.5		-	0.05		-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ถือว่าท่านได้ตกลงมอบเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Studying Relative Permittivity of Cable Insulators Using Travelling Wave Technique



Item of Tan δ Measurement

Test Procedure

The test sample was performed in accordance with sub- clauses 16.1.5 and 16.1.6 of IEC Publication No. 502 (1994)

Tan δ measurement as a function of the voltage, the test sample will be bent in accordance with sub- clauses 16.1.4 of IEC Publication No. 502 (1994). The tan δ of the test sample was measured at ambient temperature, with in alternating voltage of 2 kV, 0.5 U_0 , U_0 , and 2 U_0 at the power frequency.

Tan δ measurement as a function of the temperature, the test sample will be heated at 5°C to 10°C above the maximum rated temperature of conductor, i.e 95 – 100 °C. The tan δ of the test sample was measured with an alternating voltage of 2 kV at the power frequency.

Specimen

12/20(24) kV. Underground Cable Copper Stranded Conductor XLPE Insulated and PE Sheathed.

Test Result

The test result according to the specification requirement.


KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LARDKRABANG
Data of Tan δ Measurement

Specimen	: 12/20(24) kV. 35 sq.mm. Underground Cable Copper Stranded Conductor XLPE Insulated and PE Sheathed.				
Ambient Temperature	: 28°C				
Reference Standard	: IEC Publication No. 60502-2 (1998), MEA's Specification No 418				
Description	Specification		Result		Remark
Length of test sample	10 – 15	m.	15	m.	
Diameter under the insulation (mm.)	-	mm.	8.1208	mm.	
Diameter over the insulation (mm.)	-	mm.	19.765	mm.	
Test frequency	60	Hz	50	Hz	Frequency of Thailand
Tan δ measurement as a function of the voltage at ambient temperature.	2	kV	2	kV	
- at 2 kV	$\leq 40 \times 10^{-4}$	-	1.5×10^{-4}	-	
- at 6 kV (or 0.5 U ₀)	-	-	1.6×10^{-4}	-	
- at 12 kV (or U ₀)	$\leq 40 \times 10^{-4}$	-	1.8×10^{-4}	-	
- at 24 kV (or 2 U ₀)	-	-	1.9×10^{-4}	-	
% Increase in tan δ 0.5 U ₀ and 2 U ₀	$\leq 20 \times 10^{-4}$	-	0.3×10^{-4}	-	
Tan δ measurement as a function of the temperature.	2	kV	2	kV	
- Test temperature	95 – 100	°C	96 ~ 98	°C	
- Test voltage	2	kV	2	kV	
- Measured value	$\leq 80 \times 10^{-4}$	-	4.5×10^{-4}	-	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น คือทั้งห้ามิให้อัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Studying Relative Permittivity of Cable Insulators Using Travelling Wave Technique


KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LARDKRABANG
Data of Tan δ Measurement

Specimen	: 12/20(24) kV. 70 sq.mm. Underground Cable Copper Stranded Conductor XLPE Insulated and PE Sheathed.				
Ambient Temperature	: 28°C				
Reference Standard	: IEC Publication No. 60502-2 (1998), MEA's Specification No 418				
Description	Specification		Result		Remark
Length of test sample	10 – 15	m.	15	m.	
Diameter under the insulation (mm.)	-	mm.	10.8425	mm.	
Diameter over the insulation (mm.)	-	mm.	22.2261	mm.	
Test frequency	60	Hz	50	Hz	Frequency of Thailand
Tan δ measurement as a function of the voltage at ambient temperature.	2	kV	2	kV	
- at 2 kV	$\leq 40 \times 10^{-4}$	-	1.5×10^{-4}	-	
- at 6 kV (or 0.5 U ₀)	-	-	1.7×10^{-4}	-	
- at 12 kV (or U ₀)	$\leq 40 \times 10^{-4}$	-	1.9×10^{-4}	-	
- at 24 kV (or 2 U ₀)	-	-	2×10^{-4}	-	
% Increase in tan δ 0.5 U ₀ and 2 U ₀	$\leq 20 \times 10^{-4}$	-	0.3×10^{-4}	-	
Tan δ measurement as a function of the temperature.	2	kV	2	kV	
- Test temperature	95 – 100	°C	96 ~ 98	°C	
- Test voltage	2	kV	2	kV	
- Measured value	$\leq 80 \times 10^{-4}$	-	4×10^{-4}	-	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ถือทั้งห้ามิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Studying Relative Permittivity of Cable Insulators Using Travelling Wave Technique


KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
Data of Tan δ Measurement

Specimen	: 12/20(24) kV. 400 sq.mm. Underground Cable Copper Stranded Conductor XLPE Insulated and PE Sheathed.				
Ambient Temperature	: 28°C				
Reference Standard	: IEC Publication No. 60502-2 (1998), MEA's Specification No 418				
Description	Specification		Result		Remark
Length of test sample	10 – 15	m.	15	m.	
Diameter under the insulation (mm.)	-	mm.	24.6496	mm.	
Diameter over the insulation (mm.)	-	mm.	35.9159	mm.	
Test frequency	60	Hz	50	Hz	Frequency of Thailand
Tan δ measurement as a function of the voltage at ambient temperature.	2	kV	2	kV	
- at 2 kV	$\leq 40 \times 10^{-4}$	-	1.6×10^{-4}	-	
- at 6 kV (or 0.5 U ₀)	-	-	1.8×10^{-4}	-	
- at 12 kV (or U ₀)	$\leq 40 \times 10^{-4}$	-	2×10^{-4}	-	
- at 24 kV (or 2 U ₀)	-	-	2.1×10^{-4}	-	
% Increase in tan δ 0.5 U ₀ and 2 U ₀	$\leq 20 \times 10^{-4}$	-	0.3×10^{-4}	-	
Tan δ measurement as a function of the temperature.	2	kV	2	kV	
- Test temperature	95 – 100	°C	96 ~ 98	°C	
- Test voltage	2	kV	2	kV	
- Measured value	$\leq 80 \times 10^{-4}$	-	3×10^{-4}	-	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ถือว่าให้ข้อมูลเบื้องต้นเท่านั้น และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Studying Relative Permittivity of Cable Insulators Using Travelling Wave Technique

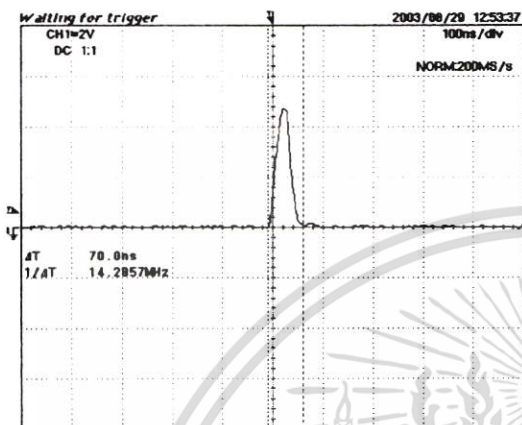


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

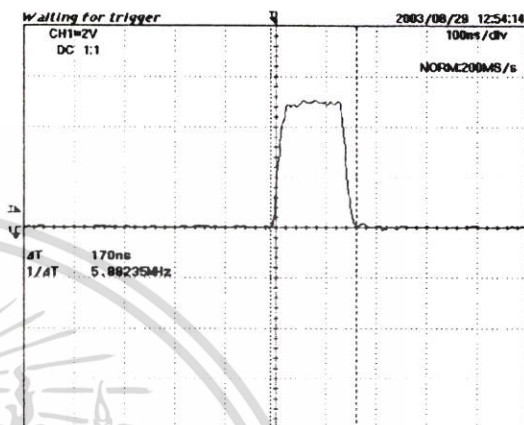


KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

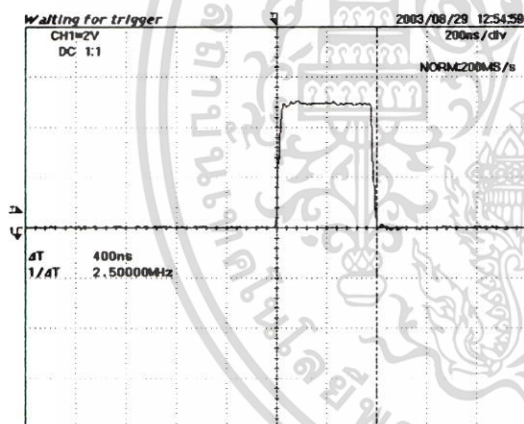
ความกว้างพัลส์ขนาดต่างๆ ที่ใช้ในการทดสอบ



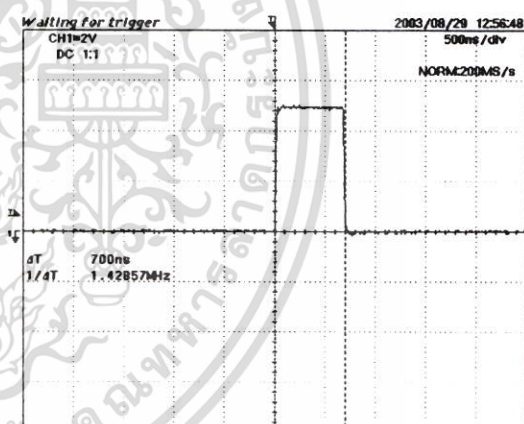
ความกว้างสัญญาณ 70 ns (สแต็ปที่ 1)



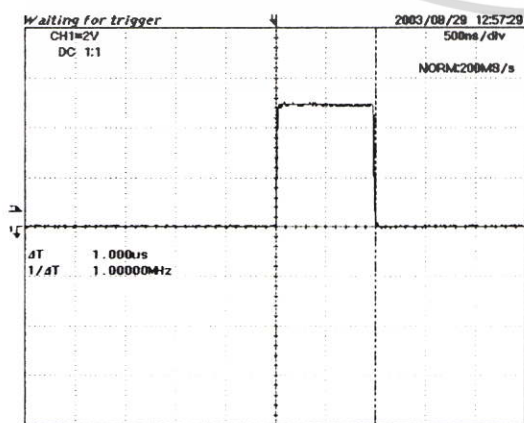
ความกว้างสัญญาณ 170 ns (สแต็ปที่ 2)



ความกว้างสัญญาณ 400 ns (สแต็ปที่ 3)



ความกว้างสัญญาณ 700 ns (สแต็ปที่ 4)



ความกว้างสัญญาณ 1000 ns (สแต็ปที่ 5)

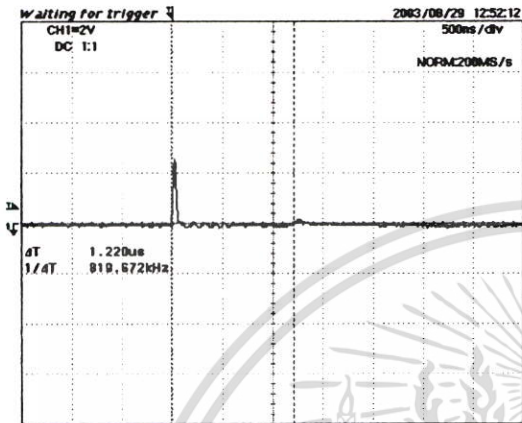
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่าการใด ๆ ทั้งสิ้น ผู้จัดทำนี้ให้ข้อมูลนี้ฟรีๆ เพราะยังต้องอิงถึงข้อมูลเอกสารฉบับอื่นที่การวางใจ

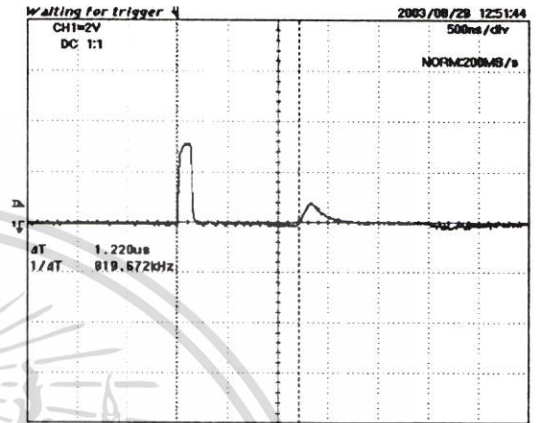


KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

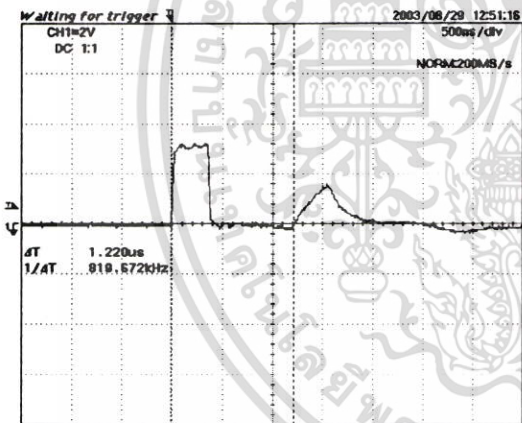
การทดสอบฉนวน PVC ความยาว 100 เมตร ที่ความกว้างพัลส์ขนาดต่างๆ



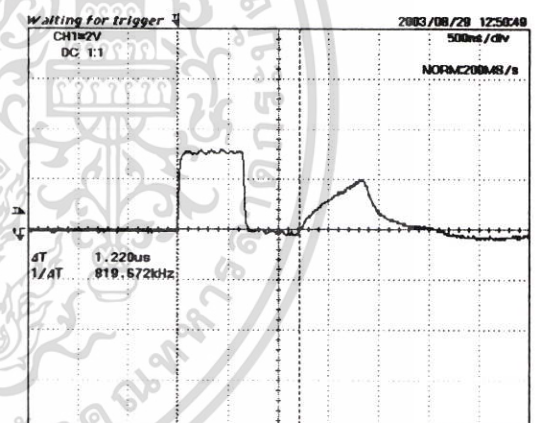
ความยาวสาย 100 เมตร ที่ความกว้างสัญญาณ 70 ns



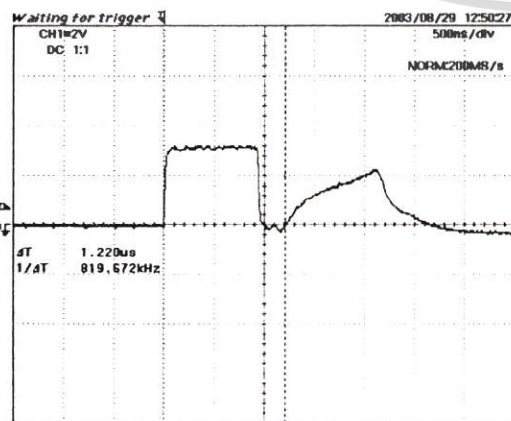
ความยาวสาย 100 เมตร ที่ความกว้างสัญญาณ 170 ns



ความยาวสาย 100 เมตร ที่ความกว้างสัญญาณ 400 ns



ความยาวสาย 100 เมตร ที่ความกว้างสัญญาณ 700 ns



ความยาวสาย 100 เมตร ที่ความกว้างสัญญาณ 1000 ns

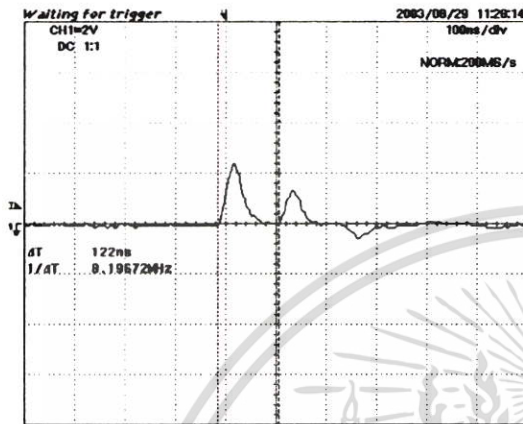
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่าการติดต่อทั้งสิ้น คือหนังสือพิมพ์ให้อัปโหลดนี้ด้วยและต้องอ้างอิงถึงชื่อของเอกสารฉบับนี้ที่ภาควิชาฯ ให้

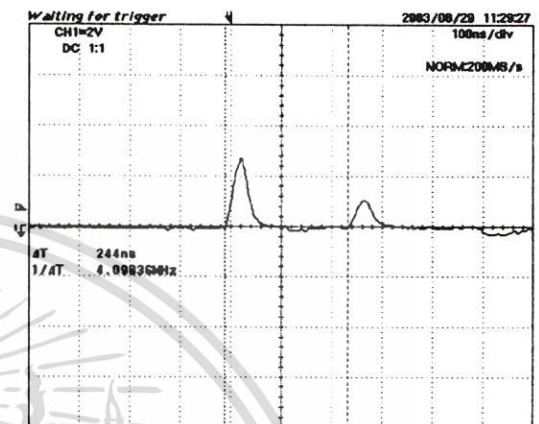


KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LARDKRABANG

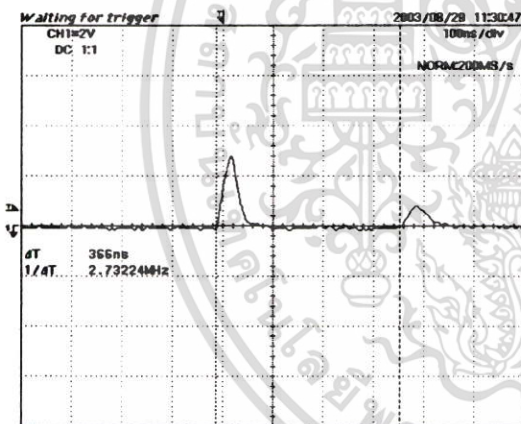
ระยะความยาวสายต่างๆ ที่ความกว้างพัลส์ 70 ns



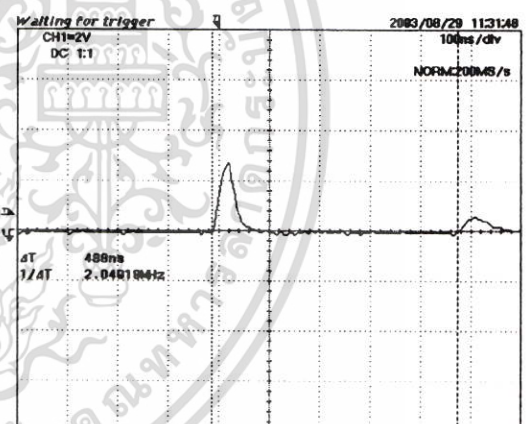
ความยาว 10 เมตร



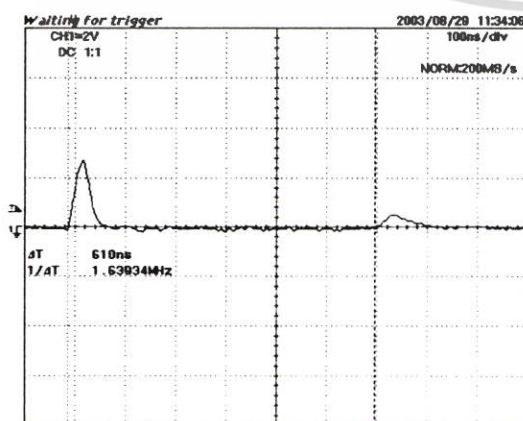
ความยาว 20 เมตร



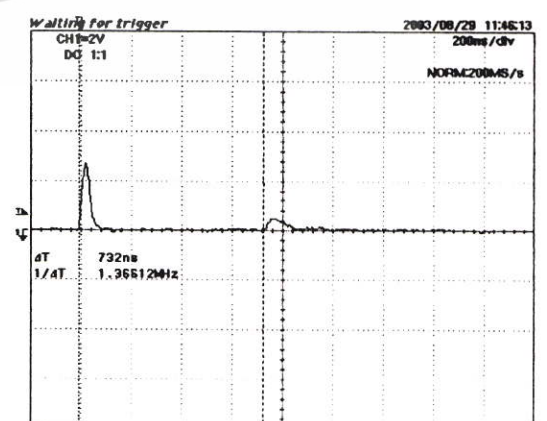
ความยาว 30 เมตร



ความยาว 40 เมตร



ความยาว 50 เมตร



ความยาว 60 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนเว็บไซต์ทางการค้า

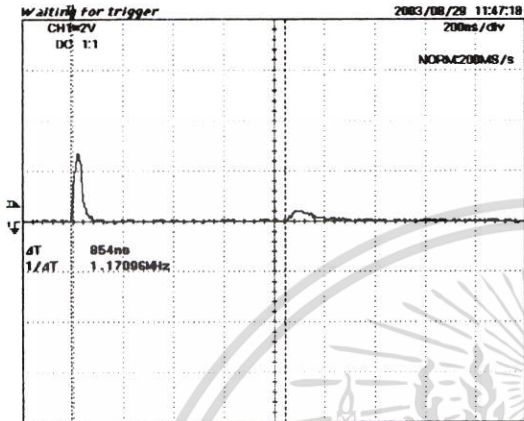
ไม่ว่าคุณคือผู้ที่ซื้อหรือผู้ที่ขายให้ข้อมูลนี้ คุณจะต้องแจ้งถึงข้อจำกัดของเอกสารฉบับนี้ไว้ก่อนเสมอ

Studying Relative Permittivity of Cable Insulators Using Travelling Wave Technique

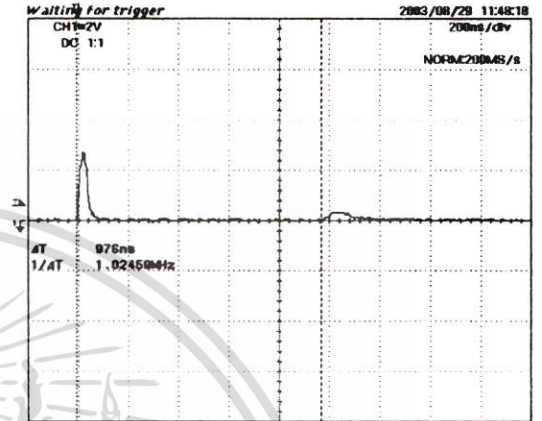


KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

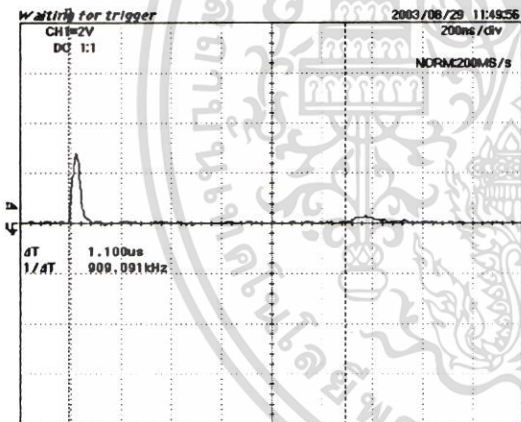
ระยะความยาวสายต่างๆ ที่ความกว้างพัลส์ 70 ns



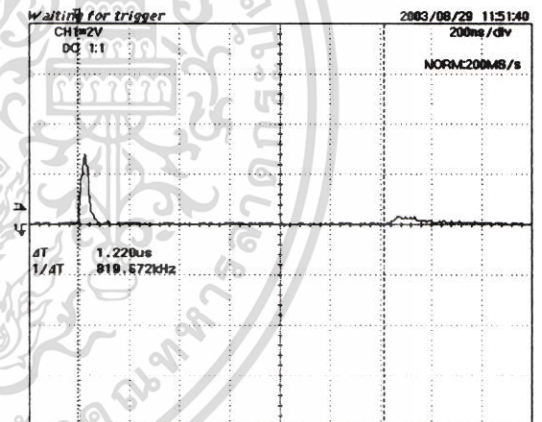
ความยาว 70 เมตร



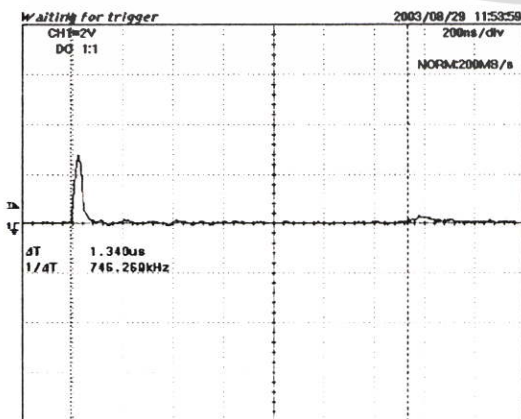
ความยาว 80 เมตร



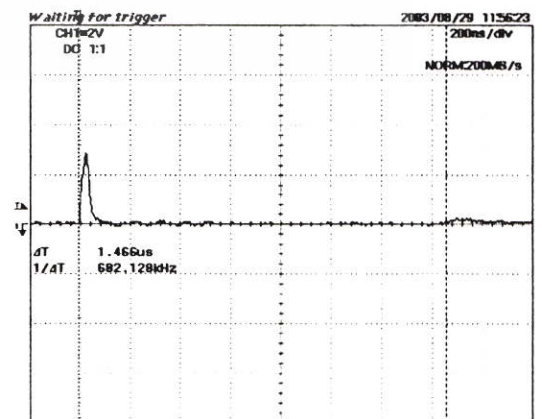
ความยาว 90 เมตร



ความยาว 100 เมตร



ความยาว 110 เมตร



ความยาว 120 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่หรือนำไปใช้ในการค้า

ไม่ทำการติดต่อ anything... Studying Relative Permittivity of Cable Insulators Using Travelling Wave Technique


KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
Data of PVC Insulation Test for Cable Twin Conductors

D	T	T	C	T*C	2D	(T*C/2D)	$Er=(T*C/2D)^2$
10	122	0.000000122	300000000	36.6	20	1.83	3.3489
20	244	0.000000244	300000000	73.2	40	1.830	3.3489
30	366	0.000000366	300000000	109.8	60	1.830	3.3489
40	488	0.000000488	300000000	146.4	80	1.830	3.3489
50	610	0.00000061	300000000	183	100	1.830	3.3489
60	732	0.000000732	300000000	219.6	120	1.830	3.3489
70	854	0.000000854	300000000	256.2	140	1.830	3.3489
80	976	0.000000976	300000000	292.8	160	1.830	3.3489
90	1100	0.0000011	300000000	330	180	1.833	3.3611
100	1220	0.00000122	300000000	366	200	1.830	3.3489
110	1340	0.00000134	300000000	402	220	1.827	3.3389
120	1465	0.000001465	300000000	439.5	240	1.831	3.3535
130	1590	0.00000159	300000000	477	260	1.835	3.3658
140	1710	0.00000171	300000000	513	280	1.832	3.3567
150	1830	0.00000183	300000000	549	300	1.830	3.3489
160	1955	0.000001955	300000000	586.5	320	1.833	3.3592
170	2075	0.000002075	300000000	622.5	340	1.831	3.3521
180	2205	0.000002205	300000000	661.5	360	1.838	3.3764
190	2325	0.000002325	300000000	697.5	380	1.836	3.3692
200	2445	0.000002445	300000000	733.5	400	1.834	3.3626
210	2570	0.00000257	300000000	771	420	1.836	3.3698
220	2690	0.00000269	300000000	807	440	1.834	3.3639
230	2810	0.00000281	300000000	843	460	1.833	3.3585
240	2930	0.00000293	300000000	879	480	1.831	3.3535
250	3050	0.00000305	300000000	915	500	1.830	3.3489

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่าการคัดลอก หรือการนำข้อมูลไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารหรือผู้ที่มีการนำไปใช้

Studying Relative Permittivity of Cable Insulators Using Travelling Wave Technique


KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
Data of XLPE Insulation Test for Cable Twin Conductors

D	T	T	C	T*C	2D	(T*C/2D)	$Er=(T*C/2D)^2$
10	103	0.000000103	3E+08	30.9	20	1.545	2.3870
20	207	0.000000207	3E+08	62.1	40	1.553	2.4103
30	311	0.000000311	3E+08	93.3	60	1.555	2.4180
40	414	0.000000414	3E+08	124.2	80	1.553	2.4103
50	518	0.000000518	3E+08	155.4	100	1.554	2.4149
60	622	0.000000622	3E+08	186.6	120	1.555	2.4180
70	724	0.000000724	3E+08	217.2	140	1.551	2.4069
80	828	0.000000828	3E+08	248.4	160	1.553	2.4103
90	932	0.000000932	3E+08	279.6	180	1.553	2.4128
100	1035	0.000001035	3E+08	310.5	200	1.553	2.4103
110	1140	0.00000114	3E+08	342	220	1.555	2.4166
120	1240	0.00000124	3E+08	372	240	1.550	2.4025
130	1345	0.000001345	3E+08	403.5	260	1.552	2.4085
140	1450	0.00000145	3E+08	435	280	1.554	2.4136
150	1555	0.000001555	3E+08	466.5	300	1.555	2.4180
160	1655	0.000001655	3E+08	496.5	320	1.552	2.4073
170	1760	0.00000176	3E+08	528	340	1.553	2.4116
180	1865	0.000001865	3E+08	559.5	360	1.554	2.4154
190	1970	0.00000197	3E+08	591	380	1.555	2.4188
200	2070	0.00000207	3E+08	621	400	1.553	2.4103
210	2175	0.000002175	3E+08	652.5	420	1.554	2.4136
220	2280	0.00000228	3E+08	684	440	1.555	2.4166
230	2385	0.000002385	3E+08	715.5	460	1.555	2.4194
240	2485	0.000002485	3E+08	745.5	480	1.553	2.4122
250	2590	0.00000259	3E+08	777	500	1.554	2.4149

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ผู้ใช้ต้องรับผิดชอบต่อการใช้งานเอกสารฉบับนี้

Studying Relative Permittivity of Cable Insulators Using Travelling Wave Technique


KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
Data of XLPE Insulation Test for Underground Cable

D	T	T	C	T*C	2D	(T*C/2D)	$\epsilon_r=(T*C/2D)^2$
10	101	0.000000101	3E+08	30.3	20	1.515	2.2952
20	202	0.000000202	3E+08	60.6	40	1.515	2.2952
30	303	0.000000303	3E+08	90.9	60	1.515	2.2952
40	405	0.000000405	3E+08	121.5	80	1.519	2.3066
50	505	0.000000505	3E+08	151.5	100	1.515	2.2952
100	1012	0.000001012	3E+08	303.6	200	1.518	2.3043
150	1515	0.000001515	3E+08	454.5	300	1.515	2.2952
200	2020	0.00000202	3E+08	606	400	1.515	2.2952
250	2530	0.00000253	3E+08	759	500	1.518	2.3043

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ถือว่าห้ามมิให้ดัดแปลงแก้ไขข้อมูลอันเป็นสาระสำคัญของเอกสารฉบับนี้โดยมิชอบ
Studying Relative Permittivity of Cable Insulators Using Travelling Wave Technique


KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LARDKRABANG
Data of PVC and XLPE Insulation Test at the Temperature
PVC Insulation Test for Cable Twin Conductors

TEMP	D	T	T	C	T*C	2D	(T*C/2D)	$Er=(T*C/2D)^2$
30	15	183	0.000000183	3E+08	54.9	30	1.83	3.3489
40	15	187	0.000000187	3E+08	56.1	30	1.87	3.4969
50	15	193	0.000000193	3E+08	57.9	30	1.93	3.7249
60	15	195	0.000000195	3E+08	58.5	30	1.95	3.8025
70	15	205	0.000000205	3E+08	61.5	30	2.05	4.2025
80	15	208	0.000000208	3E+08	62.4	30	2.08	4.3264
90	15	216	0.000000216	3E+08	64.8	30	2.16	4.6656

XLPE Insulation Test for Cable Twin Conductors

TEMP	D	T	T	C	T*C	2D	(T*C/2D)	$Er=(T*C/2D)^2$
30	15	155	0.000000155	3E+08	46.5	30	1.55	2.4025
40	15	149	0.000000149	3E+08	44.7	30	1.49	2.2201
50	15	140	0.00000014	3E+08	42	30	1.4	1.96
60	15	135	0.000000135	3E+08	40.5	30	1.35	1.8225
70	15	129	0.000000129	3E+08	38.7	30	1.29	1.6641
75	15	123	0.000000123	3E+08	36.9	30	1.23	1.5129
80	15	122	0.000000122	3E+08	36.6	30	1.22	1.4884
90	15	120	0.00000012	3E+08	36	30	1.2	1.44

XLPE Insulation Test for Underground Cable

TEMP	D	T	T	C	T*C	2D	(T*C/2D)	$Er=(T*C/2D)^2$
30	15	152	0.000000152	3E+08	45.6	30	1.52	2.3104
40	15	144	0.000000144	3E+08	43.2	30	1.44	2.0736
50	15	138	0.000000138	3E+08	41.4	30	1.38	1.9044
60	15	134	0.000000134	3E+08	40.2	30	1.34	1.7956
70	15	129	0.000000129	3E+08	38.7	30	1.29	1.6641
80	15	124	0.000000124	3E+08	37.2	30	1.24	1.5376
90	15	123	0.000000123	3E+08	36.9	30	1.23	1.5129
95	15	118	0.000000118	3E+08	35.4	30	1.18	1.3924

ไม่ว่าการนี้คือ... Studying Relative Permittivity of Cable Insulators Using Travelling Wave Technique



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

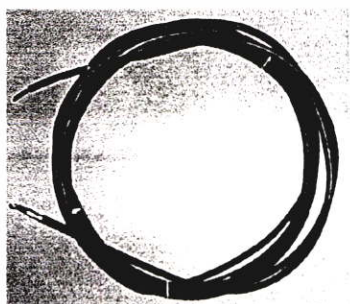
Equipments of Test



12/20 kV. Underground Cable Copper Stranded Conductor XLPE Insulated and PE Sheathed (12/20 kV-CE)



25 kV Spaced Aerial Cable Aluminum Stranded Conductor (25 kV-CC)

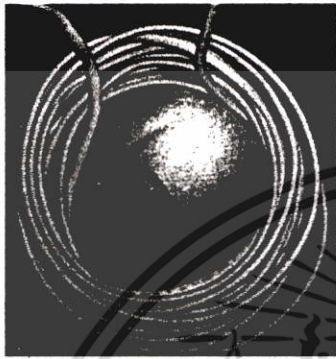


0.6/1 kV. Copper Cable Twin Conductor Cross-linked Polyethylene Insulated and Polyethylene Sheathed

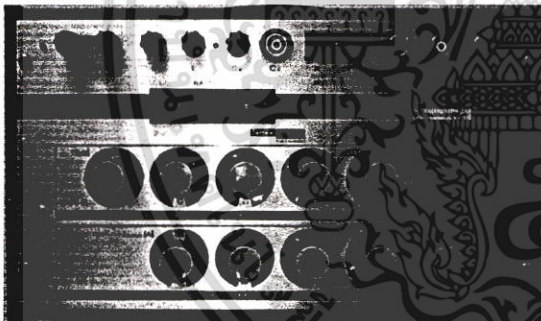
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น สิ่งนี้ห้ามนำไปตีพิมพ์ลงนิตยสารใดๆ หรือแจ้งถึงเจ้าของเอกสารหรือผู้ที่มีการนำไปใช้

Studying Relative Permittivity of Cable Insulators Using Travelling Wave Technique


KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
Equipments of Test


300 V 2-core PVC Insulated and Sheathed, Flat Type



C Tan δ Bridge Tettex Instruments Type 2805 QK



Standard Capacitor Tettex Instruments 99.91 pF.
3370/100/200

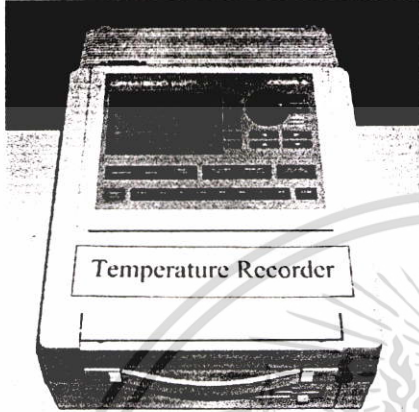
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ห้ามทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารฉบับนี้ที่วางไว้ให้
Studying Relative Permittivity of Cable Insulators Using Travelling Wave Technique



KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LARDKRABANG

Equipments of Test



Oscillographic Recorder YOKOGAWA ORM 1300



Testing Transformer Foster Transformer Ltd.
100 kV, 5kVA, 50Hz.



AC. Voltage Generator Control Unit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

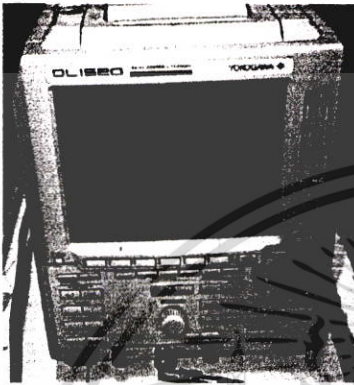
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ถือว่าห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Studying Relative Permittivity of Cable Insulators Using Travelling Wave Technique



KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

Equipments of Test



Digital Oscilloscope YOKOKAWA OL 1520



AC. Voltage Divider



Probe H.V. \times 1000 LeCroy Model PMK20KVDC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่าการศึกษานี้จะเกี่ยวข้องกับการวิจัยหรือไม่ก็ตาม การวิจัยนี้เป็นงานวิจัยที่ดำเนินการโดย

Studying Relative Permittivity of Cable Insulators Using Travelling Wave Technique



ภาคผนวก ง.

ข้อมูลทางด้านเทคนิคของเครื่องมือวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

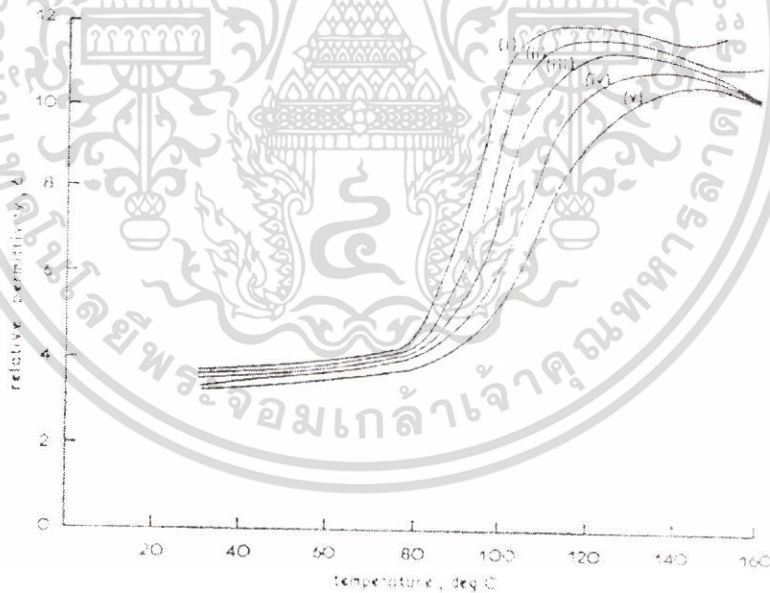
ตารางที่ ผ.1 ค่าไดอิเล็กตริกของวัสดุฉนวน (Relative Dielectric Conatant) [1-2]

Polymer resins	Material	Relative permittivity (ϵ_r)
Nonpolar resins :	Polyethylene	2.3
	Polystyrene	2.5-2.6
	Polypropylene	2.2
	Polytetrafluoroethylene	2.0
	Crosslinked polyethylene	2.3 – 5.2
polar resins :	Polyvinyl chloride (rigid)	3.2 – 3.6
	Polyvinyl acetate	3.2
	Polyvinyl fluoride	8.5
	Nylon	4.0 – 4.6
	Polyethylene terephthalate	3.25
	Cellulose cotton fiber (dry)	5.4
	Cellulose kraft fiber (dry)	5.9
	Cellulose cellophane (dry)	6.6
	Cellulose triacetate (dry)	4.7
	Tricyanoethyl cellulose	15.2
	Epoxy resins unfilled	3.0 – 4.5
	Methylmethacrylate	3.6
	Polyvinyl acetatae	3.7 – 3.8
	Polycarbonate	2.9 – 3.0
	Phenolics (cellulose – filled)	4 – 15
	Phenolica (glass – filled)	5 – 7
	Phenolics (mica – filled)	4.7 – 7.5
	Silicones (glass – filled)	3.1 – 4.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผ.2 ค่าเพอร์มิททิวิตี้สัมพัทธ์ (ϵ_r) ของฉนวนกับอุณหภูมิและความถี่ [20]

Material	T °C		1×10 ²	1×10 ³	1×10 ⁴	1×10 ⁵	1×10 ⁶	1×10 ⁷	1×10 ⁸
			ϵ / ϵ_0	ϵ / ϵ_0	ϵ / ϵ_0	ϵ / ϵ_0	ϵ / ϵ_0	ϵ / ϵ_0	ϵ / ϵ_0
Polyethylene	23	ϵ / ϵ_0	2.25	2.25	2.25	2.25	2.25	2.25	2.25
		Tan δ	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2
Polyvinyl chloride acetate	20	ϵ / ϵ_0	3.18	3.10	3.02	2.96	2.88	2.87	2.85
		Tan δ	130	185	225	210	160	115	81
	47	ϵ / ϵ_0	3.60	3.52	3.41	3.28	3.14	3.02	2.92
		Tan δ	100	166	240	261	228	162	110
	76	ϵ / ϵ_0	3.92	3.83	3.68	3.30	3.00	2.87	2.80
		Tan δ	180	220	320	400	350	270	190
	96	ϵ / ϵ_0	6.60	5.30	4.40	3.70	3.30	2.80	2.70
		Tan δ	1500	1400	1200	980	740	500	280
	110	ϵ / ϵ_0	9.9	8.6	6.8	5.60			
		Tan δ	1030	1330	1780	1900			



รูปที่ ผ.1 การเปลี่ยนแปลงของค่าเพอร์มิททิวิตี้สัมพัทธ์ (ϵ_r) ของฉนวน Polyvinyl chloride (PVC) กับอุณหภูมิและความถี่ [21]

- (i) 32 Hz
- (ii) 178 Hz
- (iii) 1000 Hz
- (iv) 5620 Hz
- (v) 31600 Hz

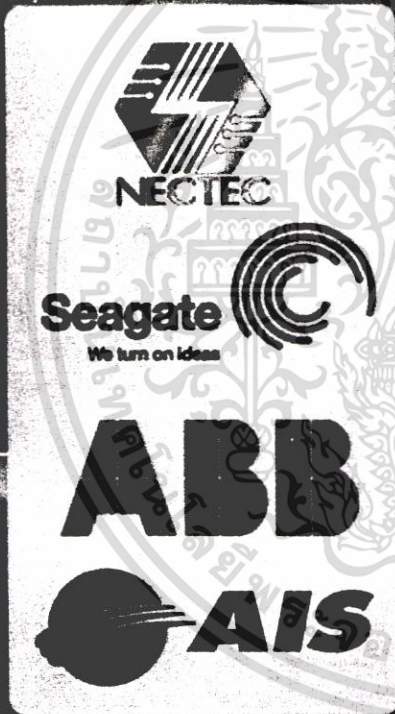
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก จ.
บทความที่ได้รับการตีพิมพ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 26
26th Electrical Engineering Conference



6-7 พฤศจิกายน 2546

โรงแรมโกลเด้นแลนด์ ชะอำ จ.เพชรบุรี

จัดโดย ชมรมวิศวกรรมไฟฟ้าแห่งประเทศไทย (IEEE) ร่วมกับ
ชมรมวิศวกรรมไฟฟ้าภาคใต้ (IEEE) และ ชมรมวิศวกรรมไฟฟ้าภาคใต้ (IEEE)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องวัดค่าเพอร์มิทิวตี้สัมพัทธ์ของฉนวนสายเคเบิลไฟฟ้าแรงสูงโดยใช้เทคนิคของคลื่นเดินทาง

An Instrument for Measuring the Relative Permittivity of Cable Insulation by Using Travelling Wave Technique

รุ่งโรจน์ สมบูรณ์ทรัพย์ และ ศิริวัฒน์ โทธิเวชกุล

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

โทร (226) 3269902 Email: srungroj@lemononline.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบและสร้างเครื่องวัดค่าเพอร์มิทิวตี้สัมพัทธ์ (ϵ_r) ของฉนวนสายเคเบิล โดยอาศัยทฤษฎีคลื่นเดินทางและการเกิดคลื่นสะท้อน โดยวิธีการส่งสัญญาณพัลส์แรงดันต่ำเข้าไปในสายเคเบิลที่ต้องการทดสอบหาค่า ϵ_r ของวัสดุฉนวน โดยคลื่นที่เดินทางไปและสะท้อนกลับจะถูกตรวจจับด้วยวงจรตรวจจับคลื่นสะท้อน ส่งมายังวงจรมับเพื่อหาช่วงเวลาเดินทางของคลื่นที่สะท้อน ซึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงตามคุณสมบัติของฉนวนแต่ละชนิด โดยสามารถกำหนดระยะเวลาขบวนการทดสอบได้จากคีย์แพด และแสดงผลออกหน้าจอ LCD จากการประมวลผลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งทั้งหมดนี้จะเป็นเครื่องมือขนาดเล็กสามารถนำไปใช้งานได้สะดวก จากการทดสอบวัดค่า ϵ_r ของตัวอย่างฉนวน PVC และฉนวน XLPE ของสายเคเบิลที่นำมาทดสอบค่าที่วัดได้ตรงกับค่า ϵ_r ของวัสดุฉนวนที่ทดสอบในตารางแสดงค่าเพอร์มิทิวตี้สัมพัทธ์ของวัสดุ Polymer [1-2] และมีค่าใกล้เคียงกับวิธีการคำนวณโดยการวัดหาค่าคาปาซิแตนซ์และค่าแฟคเตอร์พลังงานสูญเสียค่าไดอิเล็กตริกของตัวอย่างสายเคเบิลตามมาตรฐาน [3-4]

คำสำคัญ: เพอร์มิทิวตี้สัมพัทธ์, คลื่นเดินทาง, ฉนวนสายเคเบิล

Abstract

This paper presents a design and construction of Relative Permittivity (ϵ_r) measurement for cable insulators. The Travelling wave and Reflection wave theory are applied to generate low voltage pulse signal into cable lines that need to know ϵ_r of insulators. The interval of travelling wave and reflected wave will be detected by wave detection circuit through the time counter circuit at the rising edge of the waves. The interval time can be varied to changing any types of cable line. The microcontroller allowed user input the cable distance via keypad and showed the ϵ_r value on LCD module. All are assembled in a small compact size. Also, the portable measurement is suitable for outdoors. From the test result ϵ_r example of PVC insulator and XLPE insulator of cable lines are in good agreement with those in table of

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Relative Permittivity of Polymer material and the values of vicinity test method by capacitance and dissipation factor of example cable lines refer to standard.

Keywords: Relative Permittivity, Travelling Wave, Cable Insulator

1. บทนำ

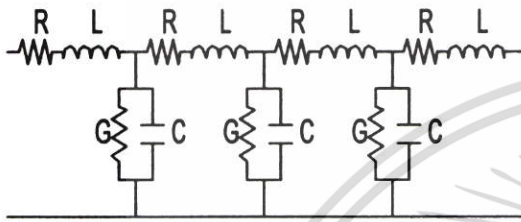
คุณสมบัติทางไฟฟ้าที่สำคัญอันหนึ่งที่จะเป็นตัวบ่งชี้คุณภาพของฉนวนที่ใช้ในการฉนวนสายเคเบิลก็คือค่าเพอร์มิทิวตี้สัมพัทธ์ (ϵ_r) หรือค่าคงตัวไดอิเล็กตริก ซึ่งในปัจจุบันการหาค่าเพอร์มิทิวตี้สัมพัทธ์ (ϵ_r) ของฉนวนสายเคเบิลในระบบไฟฟ้ากำลัง จะทำการคำนวณจากผลการทดสอบโดยวิธีวัดหาค่าคาปาซิแตนซ์และค่าแฟคเตอร์พลังงานสูญเสียค่าไดอิเล็กตริก (C & tan δ) [3-4] ซึ่งในการทดสอบหัวข้อต่างๆ จะมีวิธีการทดสอบที่แตกต่างกันรวมทั้งต้องอาศัยอุปกรณ์และเครื่องมือวัดต่างๆ ก่อนข้างมาก จึงต้องอาศัยผู้ที่มีประสบการณ์เพื่อควบคุมการทดสอบให้เป็นไปตามมาตรฐานและจะต้องทำการทดสอบเฉพาะในห้องปฏิบัติการเท่านั้น อีกทั้งยังพบปัญหาในเรื่องของระบบกราวด์และแหล่งจ่ายแรงดันกระแสสลับที่ทดสอบนั้นมีฮาร์มอนิกส์และสัญญาณรบกวนจากภายนอก อันเนื่องมาจากเครื่องจักรที่กำลังทำงานอยู่ภายในโรงงาน ซึ่งปัญหาต่างๆ เหล่านี้จะมีผลกระทบต่อเครื่องมือวัดจึงทำให้ผลการทดสอบที่ได้มีความคลาดเคลื่อน รวมทั้งผู้ทดสอบนั้นยังขาดความเข้าใจเกี่ยวกับคุณสมบัติเฉพาะของสารวัสดุแต่ละชนิดของฉนวนสายเคเบิลที่นำมาทดสอบว่าค่าที่ทำการทดสอบอยู่นั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยอะไรบ้างเช่นผลของอุณหภูมิ จึงทำให้ไม่ทราบว่าค่าที่ได้นั้นมีความถูกต้องหรือไม่

จากปัญหาดังกล่าวนี้ในบทความนี้จะนำทฤษฎีของความเร็วคลื่นเดินทางและการเกิดคลื่นสะท้อนบนสายส่งไฟฟ้า [5] มาประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุที่นำมาทำเป็นฉนวนของสายเคเบิล โดยการพัฒนาจากเทคนิคที่เคยมานเสนอ [9] มาทำการออกแบบและสร้างเป็นเครื่องมือวัดที่สามารถทำการตรวจวัดหาค่าเพอร์มิทิวตี้สัมพัทธ์ทั้งสายเคเบิลตัวนำคู่และสายเคเบิลได้คืนที่ขนาดและระยะความยาวต่างๆ เพื่อใช้ในการตรวจสอบคุณภาพของวัสดุฉนวนสายเคเบิล โดยที่ไม่มีขั้นตอนยุ่งยากในการทดสอบ และผลที่ได้สามารถยอมรับได้

2. ทฤษฎี

2.1 ค่าคงที่การกระจายของสายส่ง

วงจรของสายส่งไฟฟ้าจะประกอบด้วยองค์ประกอบที่สำคัญคือ ค่าความต้านทาน (R) ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้า (L) และค่าความจุไฟฟ้า (C) ระหว่างสายหรือระหว่างสายกับ Shield กับค่าความนำไฟฟ้า (G) ต่อหนึ่งหน่วยความยาวของสายส่งไฟฟ้า โดยมีความต้านทานกับความเหนี่ยวนำไฟฟ้าต่ออนุกรมกัน และความจุไฟฟ้ากับความนำไฟฟ้าต่อขนานกันตลอดระยะเวลาของสายส่งไฟฟ้าดังรูปที่ 1 [6]



รูปที่ 1 วงจรสมมูลของสายส่งไฟฟ้า

2.2 สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ

เมื่อแรงดันถูกจ่ายจากปลายด้านส่งไปจนถึงสิ้นสุดของปลายสายส่งคลื่นของแรงดัน v^+ จะเริ่มต้นเดินทางมาระหว่างสายส่งพร้อมคลื่นของกระแส i^+ อัตราส่วนของแรงดัน v_R กับกระแส i_R ที่ปลายสายส่ง ณ เวลาใดๆ จะต้องมีค่าเท่ากับค่าความต้านทาน Z_R ที่ปลายสุดของสายส่งนั้น เพราะฉะนั้นค่าของ v^+ และ i^+ จะปรากฏที่ปลายด้านรับ ซึ่งจะมีค่าเป็น v_R^+ และ i_R^+ โดยแรงดันของ v_R^- ที่ปลายด้านรับจะเหมือนกับฟังก์ชันของ v_R^+ ที่เวลา t (แต่จะมีขนาดลดน้อยลง นอกจาก Z_R จะเป็นศูนย์หรือมีค่าอนันต์) ซึ่งสัมประสิทธิ์การสะท้อน ρ_R ของแรงดันที่ปลายสายส่งจะกำหนดเป็น v_R^- / v_R^+ ดังนั้น [7]

$$\rho_R = \frac{Z_R - Z_C}{Z_R + Z_C} \tag{1}$$

เมื่อ Z_C : อิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายส่ง (Characteristic Impedance)

2.3 ความเร็วของคลื่นเคลื่อนที่

ความเร็วของคลื่นเคลื่อนที่ในอากาศมีค่าโดยประมาณเท่ากับความเร็วแสงคือ $v_s = 3 \times 10^8$ m/s เมื่อให้ v เป็นความเร็วของคลื่นเคลื่อนที่ในสายเคเบิลที่มีตัวนำหุ้มด้วยฉนวนที่มีค่า Relative permittivity ϵ_r จะให้ความเร็วคลื่นเคลื่อนที่บนสายเคเบิลคือ [8]

$$v = \frac{v_s}{\sqrt{\epsilon_r}} \tag{2}$$

ดังนั้นเมื่อคลื่นเคลื่อนที่ในสายเคเบิลที่มีค่า ϵ_r ของวัสดุฉนวนต่างกันก็จะมีความเร็วในการเคลื่อนที่ที่แตกต่างกันด้วยระยะเวลาของการเคลื่อนที่หาได้จาก [8-9]

$$D = \frac{tV}{2} \tag{3}$$

2.4 การหาค่าเพอร์มิททิวิตีสัมพัทธ์ของวัสดุฉนวน

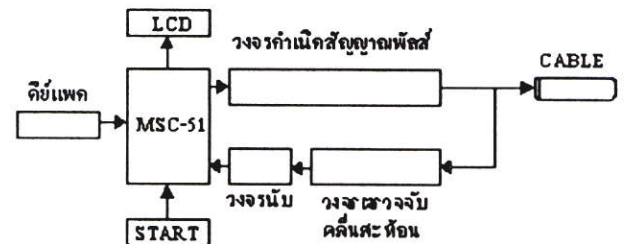
การหาค่า ϵ_r ของฉนวนสายเคเบิลที่นำเสนอในบทความนี้ใช้เทคนิคการวัดช่วงเวลาคลื่นเดินทางไปและกลับโดยการส่งสัญญาณพัลส์เข้าไปในสายเคเบิลที่ทดสอบ และทำการตรวจวัดช่วงเวลาคลื่นสะท้อนกลับ ดังนั้นสามารถหาค่า ϵ_r ของฉนวนสายเคเบิลได้จาก [8-9]

$$\epsilon_r = \left[\frac{tV}{2D} \right]^2 \tag{4}$$

เมื่อ t เป็นช่วงเวลาของคลื่นเดินทางไปและกลับ(sec)
 v_s เป็นค่าความเร็วแสงมีค่าเท่ากับ 3×10^8 m/s
 D เป็นระยะทางของตัวนำ (m)

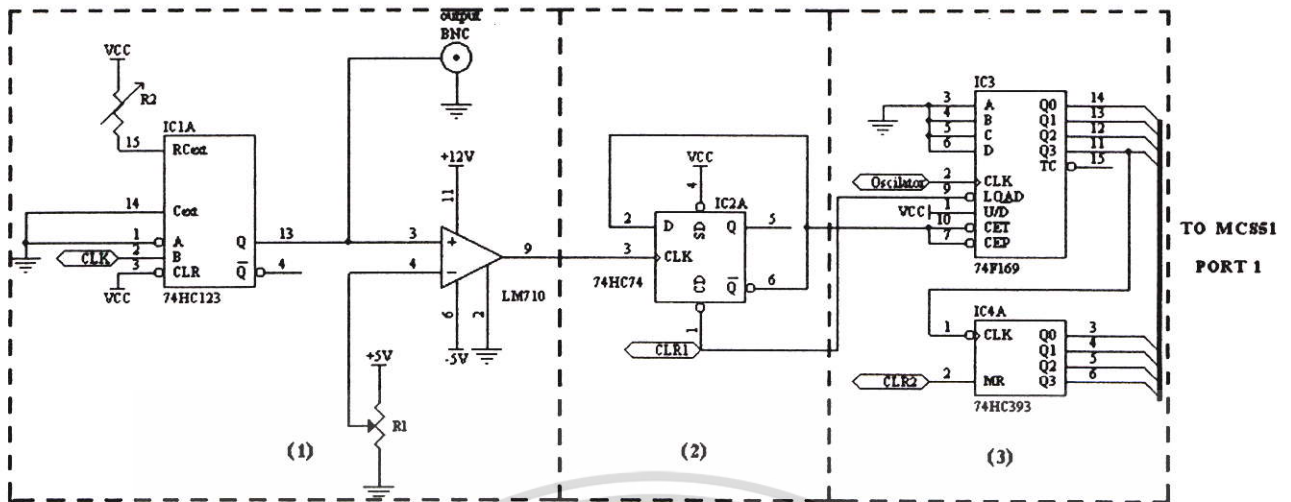
3. การออกแบบและสร้างเครื่อง

เครื่องวัดค่าเพอร์มิททิวิตีสัมพัทธ์ (ϵ_r) ของฉนวนสายเคเบิลที่ออกแบบในบทความนี้ สามารถหาค่าเพอร์มิททิวิตีสัมพัทธ์ของฉนวน PVC และ XLPE ของสายทั้งประเภทสองตัวนำและสายเคเบิลได้คืน โดยสามารถหาค่าเพอร์มิททิวิตีสัมพัทธ์ที่ระยะความยาวสายต่างๆ ได้ตั้งแต่ในช่วงระยะทาง 10-250 เมตร โดยเลือกใช้แหล่งจ่ายไฟ 220 Vac หรือจากแบตเตอรี่ขนาด 9 Vdc โดยการออกแบบสามารถแบ่งได้เป็น 2 ส่วนคือการออกแบบฮาร์ดแวร์ และการออกแบบซอฟต์แวร์



รูปที่ 2 หลักการทำงานของเครื่องวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3 วงจรเครื่องวัดค่าเพอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์

3.1 การออกแบบฮาร์ดแวร์

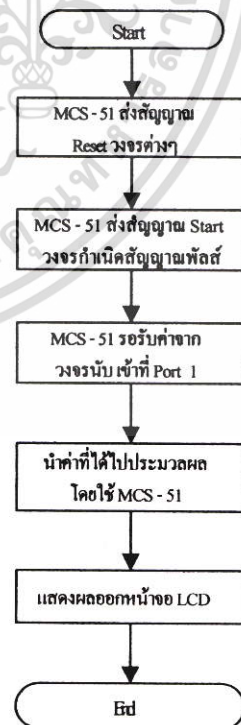
ส่วนที่ 1 วงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์จะใช้ IC เบอร์ 74HC123 ซึ่งเป็นวงจรแบบ Dual Retriggerable Monostable Multivibrator (one shots) เป็นส่วนสำคัญหลัก ซึ่งสามารถทำการปรับความกว้างของสัญญาณพัลส์ให้มีค่ามากหรือน้อยได้ โดยการปรับค่าความต้านทานที่ต่อกับขา 15 ของ IC เบอร์ 74HC123 กับแหล่งจ่าย VCC โดยได้คาบเวลาของสัญญาณพัลส์ในช่วง 70 - 1000 ns (Rise Time 7 - 19 ns)

ส่วนที่ 2 วงจรตรวจจับคลื่นสะท้อนของสายเคเบิลจะใช้ LM 710 ซึ่งเป็น Voltage Comparator เป็นตัวตรวจจับสัญญาณรบกวนที่เข้ามาให้มีแต่แรงดันที่สะท้อนกลับ โดยต่อร่วมกับ IC เบอร์ 74HC74 ซึ่งเป็นวงจร Dual D Type Positive Edge Triggered Flip Flop เป็นตัวตรวจจับช่วงเวลาการสะท้อนกลับของคลื่น ซึ่งจะทำงานตามขอบขาขึ้นของสัญญาณที่ป้อนให้กับขา clock โดยที่ขา clock จะมีสัญญาณพัลส์เข้ามา 2 ลูก คือสัญญาณพัลส์ที่ป้อนเข้าไปในสายเคเบิล และสัญญาณพัลส์ที่สะท้อนกลับมา ซึ่ง Output Q ของ IC เบอร์ 74HC74 ก็จะได้สัญญาณพัลส์ 1 ลูก และช่วงความกว้างของสัญญาณพัลส์ที่ได้ก็คือระยะเวลาของการสะท้อนกลับของคลื่นนั่นเอง ซึ่งช่วงความกว้างของสัญญาณพัลส์ก็จะแปรตามระยะเวลาความยาวของสายที่นำมาทดสอบ และค่า ϵ_r ของฉนวนสายเคเบิล

ส่วนที่ 3 วงจรนับจะประกอบด้วย Counter Synchronous และ Counter Asynchronous ทำงานร่วมกัน ซึ่งเป็นวงจรแบบ Dual 4 Bit Binary Counter ต่อกัน 2 ตัว โดยการทำงานของวงจรถับ จะเริ่มนับเมื่อมีการป้อนสัญญาณพัลส์เข้าไปในสายเคเบิล และจะหยุดนับเมื่อตรวจจับสัญญาณพัลส์ที่สะท้อนกลับมา ซึ่งช่วงเวลาการสะท้อนกลับของคลื่นคำนวณได้จากจำนวนพัลส์ที่นับได้หารด้วยความถี่ของออสซิลเลเตอร์ ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดระยะเวลาความยาวสายที่ทดสอบ (Crystal ที่ใช้งานในวงจรถับจะให้ขา CLK คือ 80 MHz) ซึ่งก็จะส่งข้อมูลจากวงจร Counter ไปเป็น Input ให้ Microcontroller เพื่อคำนวณค่า ϵ_r ของสายเคเบิลต่อไป

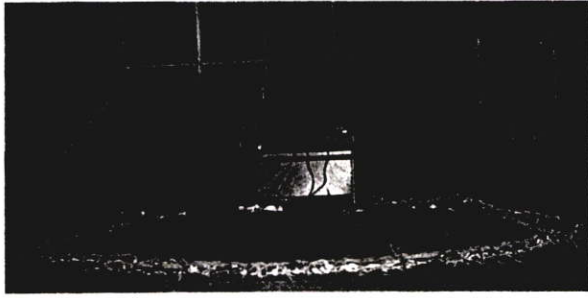
3.2 การออกแบบซอฟต์แวร์

โปรแกรมการควบคุมเป็นส่วนควบคุมหลักของเครื่อง จะทำหน้าที่รับข้อมูลจากคีย์แพดในการรับค่าระยะความยาวของสายที่จะทำการทดสอบและทำหน้าที่การควบคุมการส่งสัญญาณพัลส์เข้าไปในสายเคเบิล และบันทึกช่วงเวลาของคลื่นเดินทางที่ได้จากวงจรถับมาทำการประมวลผลออกทางจอ LCD โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51 เบอร์ 89C51 เป็นส่วนประมวลผล โดยหลักการการทำงานของส่วนประมวลผลจะเป็นไปตามบล็อกไดอะแกรมดังรูปที่ 4



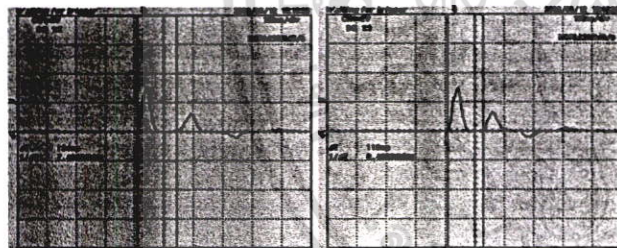
รูปที่ 4 ส่วนควบคุมและประมวลผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 8 การทดสอบหาค่า ϵ_r ที่อุณหภูมิต่างๆ โดยวิธีการจ่ายกระแส
 ตารางที่ 3 ค่า ϵ_r ของสายเคเบิลใต้ดิน 12/20 kV-CE ฉนวน XLPE

อุณหภูมิ (°C)	ช่วงเวลา (ns)	ค่า ϵ_r ที่คำนวณจากสัญญาณ	ค่า ϵ_r จากเครื่องวัด	ความคลาดเคลื่อน (%)
30	152	2.310	2.320	0.43
40	148	2.190	2.177	0.59
50	138	1.904	1.920	0.84
60	134	1.796	1.779	0.95
70	129	1.664	1.655	0.54
80	124	1.538	1.556	1.17
90	119	1.488	1.505	1.14

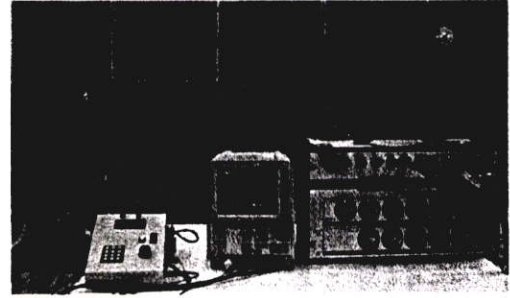


(a) อุณหภูมิ 60°
 รูปที่ 9 สัญญาณช่วงเวลาที่คลื่นสะท้อนที่อุณหภูมิต่างๆ (XLPE)

4.3 การทดสอบเครื่องมือวัดที่ออกแบบโดยเปรียบเทียบกับวิธีการทดสอบตามมาตรฐานโดยวิธีการวัด C & tanδ

การทดสอบหาค่า ϵ_r ของฉนวนสายเคเบิลขนาดต่างๆ จากเครื่องมือวัดที่ได้ทำการออกแบบนำมาเปรียบเทียบกับผลของตารางแสดงค่าเฟอร์มิทวิตีที่สัมพันธ์ของวัสดุ Polymer [1-2] และผลที่ได้จากการทดสอบโดยวิธีการวัดค่าคาปาซิแตนซ์และค่าแฟคเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก ซึ่งในการทดสอบสาย Copper Cable Twin Conductor (0.6/1 kV- CE) เป็นการทดสอบโดยอ้างอิงการทดสอบตามมาตรฐาน ICEA S-66-524 [3] และสายเคเบิลใต้ดินทึดก 12/20 kV-CE ตามมาตรฐาน IEC 60502-2 [4] โดยทำการทดสอบที่ระยะความยาวสาย 15 เมตร โดยควบคุมสภาวะการทดสอบตามมาตรฐานที่กำหนด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 10 การทดสอบหาค่า ϵ_r ของเครื่องมือวัดเทียบกับผลการทดสอบโดยวิธีหาค่าคาปาซิแตนซ์และพลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก

ตารางที่ 4 ค่า ϵ_r ของสาย Twin Conductor 0.6/1 kV- CE ฉนวน XLPE

ขนาด (mm ²)	ช่วงค่า ϵ_r มาตรฐาน	ค่า ϵ_r ที่คำนวณจาก C & tanδ	ค่า ϵ_r จากเครื่องวัด	ความคลาดเคลื่อน (%)
6	2.3-5.2	2.343	2.292	2.18
10	2.3-5.2	2.343	2.292	2.18

ตารางที่ 5 ค่า ϵ_r ของสายเคเบิลใต้ดิน 12/20 kV-CE ฉนวน XLPE

ขนาด (mm ²)	ช่วงค่า ϵ_r มาตรฐาน	ค่า ϵ_r ที่คำนวณจาก C & tanδ	ค่า ϵ_r จากเครื่องวัด	ความคลาดเคลื่อน (%)
35	2.3-5.2	2.299	2.320	0.91
70	2.3-5.2	2.298	2.320	0.96
400	2.3-5.2	2.301	2.320	0.83

5. สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองพบว่าค่า ϵ_r นั้นเป็นค่าคงที่ของวัสดุฉนวนแต่ละชนิดซึ่งไม่ขึ้นกับขนาดและระยะความยาว[9] รวมทั้งค่า ϵ_r ของวัสดุฉนวนแต่ละชนิดจะมีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากผลของอุณหภูมิตามคุณสมบัติทางเคมีของวัสดุ โดยอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะมีผลทำให้ค่า ϵ_r ของฉนวน XLPE ลดลงเนื่องจากคุณสมบัติของฉนวน XLPE เป็นสาร Nonpolar Dielectric [9-10]

จากผลการทดสอบในหัวข้อ 4.1 จะเห็นว่าช่วงเวลาการสะท้อนกลับของคลื่นจะแปรตามระยะความยาวสายในลักษณะเชิงเส้นโดยจะมีค่าเท่ากันหรือใกล้เคียงกันมาก รวมทั้งผลจากเครื่องมือวัดก็มีความคลาดเคลื่อนน้อย ทั้งนี้ความกว้างของสัญญาณพัลส์ที่ส่งจะต้องมีความเหมาะสมในแต่ละระยะความยาวทดสอบ โดยช่วงเวลาการสะท้อนกลับหลังผ่านวงจรตรวจจับคลื่นสะท้อนจะต้องมีค่าใกล้เคียงกันกับช่วงเวลาจริงและวงจรจะต้องสามารถรองรับออสซิลเลเตอร์ที่ความถี่สูงๆ ได้ จะทำให้การประมวลผลมีความคลาดเคลื่อนน้อย โดยแรงดันที่ใกล้จุดส่งจะประกอบด้วยถูกคลื่นที่ตกกระทบบวกกับถูกคลื่นที่สะท้อนแรกเริ่ม (ครึ่ง

หนึ่งของลูกคลื่นตกกระทบ) บวกกับลูกคลื่นที่สะท้อนใหม่ซึ่งจะเป็น
 หนึ่งส่วนสี่ และจึงมีการลดทอนตามระยะความยาวที่ทดสอบเนื่องจากค่า
 อิมพีแดนซ์ของสายที่เพิ่มมากขึ้น จากเทคนิคที่นำเสนอสามารถนำมาออก
 แบบและสร้างเป็นเครื่องมือวัดที่สามารถทำการตรวจวัดค่าเพอร์มิททิวิตี
 ดีส์สัมพัทธ์ได้รวดเร็วและไม่ซับซ้อนที่ยุ่งยาก โดยผลการทดสอบเครื่อง
 มีวัดที่ออกแบบค่าที่ได้อยู่ในช่วงตารางแสดงค่าเพอร์มิททิวิตีสัมพัทธ์
 ของวัสดุ Polymer [1-2] โดยสามารถตรวจวัดขนาดสายสูงสุด 400 mm²
 ระหว่างความยาวในช่วง 10 – 250 เมตร และมีค่าความคลื่อนไม่เกิน
 2.50 % เมื่อเปรียบเทียบกับค่าคำนวณโดยวิธีการวัดค่าคาปาซิแตนซ์
 และค่าแฟคเตอร์พลังงานสูญเสียค่าไดอิเล็กตริกตามมาตรฐาน ซึ่ง
 ประโยชน์จากงานวิจัยนี้สามารถใช้เป็นแนวทางในการทดสอบให้กับ
 ภาคอุตสาหกรรมต่อไปได้ ซึ่งในอนาคตจะเป็นการนำเสนอถึงการศึกษา
 อายุการใช้งานจากการตรวจวัดค่า ϵ_r

พิกัดของเครื่องมือวัดค่าเพอร์มิททิวิตีสัมพัทธ์:

เครื่องมือวัดค่าเพอร์มิททิวิตีสัมพัทธ์ของฉนวนสายเคเบิล โดยใช้เทคนิคของคลื่นเดินทาง	
	
ส่วนประกอบภายนอก	ส่วนประกอบภายใน
แหล่งจ่ายไฟให้กับเครื่องมือวัด	220 V (AC) หรือ 9 V (DC)
ความยาวสายที่ใช้ในการทดสอบ	10 – 250 เมตร
ขนาดสายที่ใช้ในการทดสอบ	1 – 400 ตารางมิลลิเมตร
ชนิดฉนวนที่ใช้ในการทดสอบ	PVC และ XLPE
ประเภทสายที่ใช้ในการทดสอบ	สายเคเบิลใต้ดิน, สายสองตัวนำ
ความละเอียดในการแสดงค่า	16 ตัวอักษร LCD MODULE (ทัศนियม 3 ตำแหน่ง)
การปรับระยะความยาวทดสอบ	5 สเต็ป (70 – 1000 ns)
มาตรฐานในการทดสอบเทียบ	IEC 60502-2, ICEA S 66-524
ความคลาดเคลื่อนสูงสุด	± 2.5 %

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ บริษัทจุงไทยไวร์แอนด์เคเบิล จำกัด บริษัทสาย
 ไฟฟ้าไทย-ซาซากิ จำกัด ศูนย์บริการและพัฒนาวิศวกรรมไฟฟ้า ห้อง
 ปฏิบัติการวิจัยวัสดุวิศวกรรมไฟฟ้า ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง และภาค
 วิศวกรรมไฟฟ้า สจล. ที่เอื้อเฟื้ออุปกรณ์ ข้อมูลและสถานที่ทดสอบ
 รวมทั้งคำแนะนำด้านมาตรฐานการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] G.F. Moore, Electric Cables Handbook, BSP Professional Books, 1997, p.50.
- [2] H. Wa Beaty, Electrical Engineering Materials Reference guide, McGraw-Hill, 1990, p.5-3.
- [3] ICEA Publication No.S-66-524 (Cross-Linked Thermosetting Polyethylene Insulated Wire and Cable for the Transmission and Distribution of Electrical Energy).
- [4] IEC No.60502-2 (Power cable with extruded insulation and their accessories for rated voltages from 1 kV ($U_m = 1, 2$ kV) up to 30 kV ($U_m = 36$ kV)).
- [5] R.K. Moore, Traveling-Wave Engineering, McGraw-Hill, 1960, p. 89-102.
- [6] S. Potivejkul, P.Kerdonfag, S. Jamnian and V.Kinnares, "Design of A Low Voltage Cable Fault Detector," IEEE Conf. On PES Winter Meeting, 2000 vol. 1, 2000, pp. 724-769.
- [7] William. D, Stevenson Jr., Elements of Power System Analysis, Forth Edition. McGraw – Hill, Inc. Singapore, 1982 p.114-118.
- [8] B. Clegg, Underground Cable Fault Location, McGraw-Hill, 1993, p.43
- [9] ทงษ์เทพ เกิดคอนแฝก, รุ่งโรจน์ สมบูรณ์ทรัพย์, สราจิต จันทร์ยอร์ และ ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล "เทคนิคการวัดค่าเพอร์มิททิวิตีสัมพัทธ์ของฉนวนสายเคเบิลโดยใช้คลื่นเดินทาง", การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 23, 2543, หน้า 29-32.
- [10] B. Tareev, Physics of Dielectric Materials, MIR PUBLISHERS MOSCOW, 1979, p.105-107.

ประวัติผู้เขียน



นายรุ่งโรจน์ สมบูรณ์ทรัพย์ จบการศึกษา ว.ศ.บ. ไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ปัจจุบันเป็นนักศึกษาปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ

ทหารลาดกระบังโดยทำงานวิจัยในด้าน วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงและวัสดุวิศวกรรมไฟฟ้า



นายศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล จบการศึกษา ว.ศ.บ. ไฟฟ้า และ ว.ศ.ม. ไฟฟ้า จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปัจจุบันดำรงตำแหน่งเป็นรองศาสตราจารย์ ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยทำงานวิจัยในด้าน วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง, วัสดุวิศวกรรมไฟฟ้า, การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังและการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกส์ในระบบไฟฟ้ากำลัง

ประวัติผู้เขียน



นายรุ่งโรจน์ สมบูรณ์ทรัพย์ เกิดเมื่อวันที่ 26 ตุลาคม พ.ศ. 2517 ที่อำเภอเมือง จังหวัดคนนทบุรี

ปี พ.ศ. 2537 สำเร็จการศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง สาขาวิชาไฟฟ้ากำลัง สถาบันเทคโนโลยีราชมงคลวิทยาเขตเทคนิคกรุงเทพฯ

ปี พ.ศ. 2539 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

งานวิจัยที่สนใจ เทคโนโลยีทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง การศึกษาคุณภาพและอายุการใช้งานของฉนวนสายเคเบิล

การทำงานที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยปี พ.ศ. 2543 – ปัจจุบัน มีประสบการณ์ในด้านการทดสอบคุณภาพของฉนวนสายเคเบิลแรงต่ำและแรงสูง รวมทั้งการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าประเภทต่างๆ ให้กับศูนย์บริการและพัฒนาวิศวกรรมไฟฟ้าและห้องปฏิบัติการวิจัยวัสดุวิศวกรรมไฟฟ้า รวมทั้งภาควิศวกรรมไฟฟ้า สจล.

ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์

- [1] พงษ์เทพ เกิดคอนแฝก, รุ่งโรจน์ สมบูรณ์ทรัพย์, สาทิต จำเนียร และ ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล “เทคนิคการวัดค่าเพอร์มิทิวตี้สัมพัทธ์ของฉนวนสายเคเบิลโดยใช้คลื่นเดินทาง”, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 23, 2543, หน้า 29-32.
- [2] รุ่งโรจน์ สมบูรณ์ทรัพย์ และ ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล “เครื่องวัดค่าเพอร์มิทิวตี้สัมพัทธ์ของฉนวนสายเคเบิลไฟฟ้าแรงสูงโดยใช้เทคนิคของคลื่นเดินทาง”, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 26, 2546, หน้า 471-476.