

เครื่องทดสอบวัดค่าเพอร์มิททิวิตีของฉนวนเคเบิลโดยใช้เทคนิคคลื่นนิ่ง

RELATIVE PERMITTIVITY MEASUREMENT FOR CABLE
INSULATOR USING STANDING WAVE TECHNIQUE

อติกร เสรีพัฒน์นันท์

ATIGON SAREEPHATTANANON

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2547

ISBN 974-15-1181-7

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

เครื่องทดสอบวัดค่าเพอร์มิททิวิตีสัมพัทธ์ของฉนวนเคเบิลโดยใช้เทคนิคคลื่นนิ่ง

RELATIVE PERMITTIVITY MEASUREMENT FOR CABLE
INSULATOR USING STANDING WAVE TECHNIQUE



อติกร เสรีพัฒนานนท์

ATIGON SAREEPHATTANANON

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

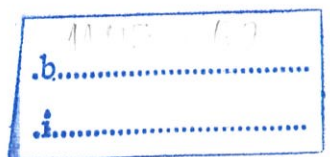
บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2547

ISBN 974-15-1181-7

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน **67463**
วัน,เดือน,ปี **19 S.A. 2549**



**RELATIVE PERMITTIVITY MEASUREMENT FOR CABLE
INSULATOR USING STANDING WAVE TECHNIQUE**

ATIGON SAREEPHATTANANON

**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**

2004

ISBN 974-15-1181-7

COPYRIGHT 2004

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ เครื่องทดสอบวัดค่าเพอร์มิททีวิตีสัมพัทธ์ของฉนวนเคเบิลโดยใช้เทคนิคคลื่นนิ่ง
RELATIVE PERMITTIVITY MEASUREMENT FOR CABLE INSULATOR USING STANDING WAVE TECHNIQUE

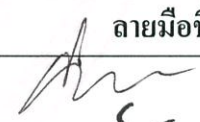




ชื่อนักศึกษา นายอดิกร เสรีพัฒนานนท์

รหัสประจำตัว 43061011

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ รศ.ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ศุภี	บรรจงจิตร	
รศ.จรงค์ษ์	บุญเส็ง	
รศ.มณฑล	ลีลาจินดาไกรฤกษ์	
รศ.ดร.วิจิตร	กิมเรศ	
รศ.ศิริวัฒน์	โปธิเวชกุล	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 27 กรกฎาคม 2547 เวลา 9.00-11.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร 12 ชั้น ชั้น 4 (ห้อง E12-403)


บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว
(ผศ.ดร.จารุวัตร เจริญสุข)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....๒๗.....เดือน.....กุมภาพันธ์.....พ.ศ.....๒๕๔๗

หัวข้อวิทยานิพนธ์	เครื่องทดสอบวัดค่าเพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์ของฉนวนเคเบิลโดยใช้เทคนิคคลื่นนิ่ง
นักศึกษา	นายอดิกร เสรีพัฒนานนท์
รหัสประจำตัว	43061011
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2547
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ. ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการวิจัย และออกแบบสร้างเครื่องมือต้นแบบเพื่อทดสอบวัดค่าเพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์ (ϵ_r) ของฉนวนแข็งโดยเฉพาะฉนวนสายเคเบิล โดยใช้ทฤษฎีคลื่นนิ่งที่เกิดในสายโดยวิธีการป้อนสัญญาณไซน์แรงดันต่ำ มีการปรับค่าความถี่ได้เข้าไปในสายเคเบิลเพื่อทดสอบหาค่าเพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์ของวัสดุฉนวน โดยการทดสอบแบบเปิดวงจรที่ปลายสายอีกด้านหนึ่ง ผลของคลื่นสะท้อนที่สะท้อนกลับจากปลายสายจะรวมตัวกับคลื่นตกกระทบในสายเคเบิล จุดที่มีเฟสของแรงดันหักล้างกันมากที่สุดเกิดขึ้นที่ตำแหน่งความยาวคลื่นมีค่าเป็นจำนวนเท่าเลขคี่ของความยาวคลื่นเท่ากับ $\frac{\lambda}{4}$ ทำให้แรงดันที่ป้อนมีค่าต่ำที่สุด ทำการตรวจสอบค่าความถี่ที่จุดนั้น ซึ่งค่าความถี่ที่ได้จะมีการเปลี่ยนแปลงตามคุณสมบัติของวัสดุฉนวนแต่ละชนิด จึงสามารถหาค่าเพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์ได้ โดยเครื่องทดสอบประกอบด้วย วงจรกำเนิดสัญญาณไซน์ วงจรกรองแรงดัน LC ฟิลเตอร์ และวงจรแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัล (A/D) ซึ่งกำหนดระยะความยาวสายทดสอบจากคีย์บอร์ด ประมวลผลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ และแสดงผลออกหน้าจอ LCD เครื่องต้นแบบสามารถทำการหาค่าเพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์ของฉนวน PVC และ XLPE ของตัวอย่างสายเคเบิลตัวนำคู่ สายเคเบิลได้ดินพิกัด 300 V -24 kV ขนาด 1 – 400 ตารางมิลลิเมตร ที่ระยะความยาวสายในช่วงทดสอบ 15-250 เมตร จากผลการทดสอบวัดค่าเพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์ของตัวอย่างฉนวนสายเคเบิลในสภาวะอุณหภูมิห้อง ค่าที่วัดได้เปรียบเทียบกับวิธีการวัดโดยใช้เทคนิคของคลื่นเดินทาง (Travelling Wave)[15] และค่าจากผลการทดสอบตามมาตรฐาน ICEA S-66-524 (Revision No.1 1992) [3], IEC 60502-2 (1998) [4]. และตารางแสดงค่าเพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์ของวัสดุโพลีเมอร์[1-2].

Thesis Title	Relative Permittivity Measurement for Cable Insulator Using Standing Wave Technique
Student	Mr. Atigon Sareephattananon
Student ID.	43061011
Degree	Master of Engineering
Programme	Electrical Engineering
Year	2004
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Siriwat Potivejkul

ABSTRACT

The thesis present a study and design measurement of Relative Permittivity (ϵ_r) of cable insulators. The standing wave and resonance wave theory are applied to generate low voltage sine wave signal and sweeping the frequency into cable lines that need to know ϵ_r of insulators. When a cable circuit is opened, the reflected wave from a load is include with an indicated wave in cable. In every odd multiple of the $\lambda/4$ wavelength, an amplitude of the standing wave is minimum. Results are indicated that the frequency of the standing wave dependent on characteristics of insulator types. The portable meter consists of sinewave generate ,LC filter and analog to digital circuit (A/D). The microcontroller allows user to input the cable distance via keypad and showed the value on LCD. Design and producing of the proto-type meter to measure relative permittivity of the cable insulator. The portable meter is able to measure relative permittivity of PVC and XLPE Insulators. The samples, twin conductors and underground cable lines, are tested range of 300 V – 24 kV, 1 – 400 mm² in diameter, and 15 – 250 meters in length. The measure results from example cables in ambient temperature have slight error comparison to relative permittivity measurement using travelling wave technique[15], relative permittivity standard table [1-2] and calculate from capacitance and dissipation factor by referring the ICEA S-66-524 (Revision No.1 1992) [3] and IEC 60502-2 [4].

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณท่านอาจารย์รองศาสตราจารย์ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล อาจารย์ที่ปรึกษาเป็น
อย่างสูงที่ให้คำปรึกษา และแนะนำในการทำโครงการวิทยานิพนธ์ รวมทั้งให้คำสั่งสอนตลอดมา
ทำให้มีความมานะพยายาม และขอขอบคุณท่านอาจารย์ทุกท่าน ผู้ซึ่งเสียสละเวลาอันมีค่าของท่าน
ในการให้แนวทางความคิด และข้อแนะนำต่างๆ ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง
มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซียที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือ และอุปกรณ์ ขอขอบคุณเพื่อน พี่
และน้องที่มีส่วนช่วยทำให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวเสรีพัฒนานนท์ เป็นอย่างสูงที่ได้
ให้ความรักเลี้ยงดูส่งเสริมให้เล่าเรียน และให้กำลังใจมาตลอด

อดิกร เสรีพัฒนานนท์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	IX
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมาย และวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎี หรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	3
1.5 ขอบเขตงานวิจัย.....	5
1.6 ขั้นตอนการศึกษา.....	5
บทที่ 2 ทฤษฎีทั่วไป	
2.1 บทนำ.....	6
2.2 สายไฟฟ้า.....	6
2.3 ประเภทของสายไฟฟ้า.....	7
2.4 คุณสมบัติของวัสดุฉนวนที่ดี.....	13
2.5 ชนิดของวัสดุฉนวนที่ใช้กับไฟฟ้าแรงสูง.....	13
2.6 โครงสร้างของสายเคเบิลชนิดฉนวนโพลีเมอร์.....	14
2.7 ไดอิเล็กตริก.....	22
2.8 ปัจจัยที่ผลกระทบต่อค่าเพอร์มิตติวิตี (ϵ_r) ของสารฉนวน.....	30
2.9 การวิเคราะห์คุณสมบัติของสายนำสัญญาณโดยใช้ทฤษฎีวงจร.....	33
2.10 การสะท้อนของคลื่น และคลื่นนิ่ง.....	44
2.11 คลื่นนิ่ง (Standing Wave).....	50

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 การออกแบบ	
3.1 บทนำ.....	54
3.2 การออกแบบทางฮาร์ดแวร์.....	55
3.3 การออกแบบทางซอฟต์แวร์.....	66
บทที่ 4 การทดลอง และผลการทดลอง	
4.1 คำนำ.....	67
4.2 วัตถุประสงค์.....	67
4.3 อุปกรณ์การทดลอง.....	68
4.4 ข้อควรระวังในการทดลอง.....	68
4.5 การทดลอง และผลการทดลองตามมาตรฐาน.....	68
4.6 การทดลองและผลการทดลองจากเครื่องทดสอบ.....	77
บทที่ 5 วิเคราะห์ผล	
5.1 วิเคราะห์ผลการทดลอง.....	107
5.2 ผลการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนของชุดทดสอบกับค่าการทดสอบ.....	112
ตามมาตรฐาน และผลการทดสอบโดยใช้เทคนิคของคลื่นเดินทาง	
5.3 สรุป.....	115
บทที่ 6 สรุปผล	
6.1 การออกแบบสร้างเครื่องมือวัดค่าเพอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ของสารฉนวน.....	116
โดยใช้คลื่นนิ่ง	
6.2 การศึกษาการวัดค่าเพอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ของสายเคเบิล โดยใช้คลื่นนิ่ง.....	117
6.3 แนวทางพัฒนางานวิจัย.....	117
เอกสารอ้างอิง.....	118

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก ภาพการออกแบบ และชุดอุปกรณ์การทดสอบ	119
ภาคผนวก ข ขั้นตอนการใช้งานเครื่องทดสอบวัดค่าเพอร์มิทิวิตีที่สัมพัทธ์ของฉนวน.....	123
เคลือบ โดยใช้เทคนิคคลื่นนิ่ง	
ภาคผนวก ค บทความที่ได้รับการตีพิมพ์.....	125
ประวัติผู้เขียน.....	131

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
5.3 การเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนของสาย 0.6/1 kV Copper cable twin conductor.....113 crosslinked polyethylene insulated and polyethylene sheathed ขนาด 6 mm ²	
5.4 ความคลาดเคลื่อนในการวัดของสาย 300 V, 2-core PVC Insulated Sheathed,.....114 Flat Type ขนาด 1 mm ²	
5.5 ความคลาดเคลื่อนในการวัดของสาย 12/20 kV Underground cable copper stranded.....114 conductor XLPE insulator and PE sheathed ขนาด 70 mm ²	
5.6 ความคลาดเคลื่อนในการวัดของสาย 0.6/1 kV Copper cable twin conductor.....114 cross- linked polyethylene insulated and polyethylene sheathed ขนาด 6 mm ²	
6.1 รายละเอียดข้อมูลของเครื่องทดสอบวัดค่าเพอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์.....116	

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.26 ค่าเพอร์มิตติวิตี และความถี่สำหรับ Polar Dielectric Polyvinylacetate.....	30
2.27 ค่าเพอร์มิตติวิตี และอุณหภูมิสำหรับ non Polar Dielectric.....	31
2.28 ค่าเพอร์มิตติวิตี และอุณหภูมิสำหรับ non Polar Liquid.....	31
2.29 ค่าเพอร์มิตติวิตี และอุณหภูมิสำหรับ Solid Polar Dielectric.....	32
2.30 ค่าเพอร์มิตติวิตีของ Purifying Water และความดัน.....	32
2.31 สายนำสัญญาณแบบสายคู่ขนาน และวงจรสมมูลของส่วนสั้น ๆ ส่วนหนึ่ง.....	34
2.32 รูปคลื่นไซน์ที่เคลื่อนที่ไปในทิศ $+z$ และไปในทิศ $-z$	38
2.33 สายนำสัญญาณที่มีความยาวอนันต์.....	44
2.34 วงจรสมมูลสายนำสัญญาณที่มีความยาวอนันต์.....	45
2.25 สายนำสัญญาณที่ต่อโหลดไว้ที่ปลายสาย.....	46
2.36 สายนำสัญญาณที่ปลายสายต่อไว้ด้วยเมตซิง โหลด (ก) , ปลายลัดวงจร	48
(ข) และปลายสายเปิดวงจร(ค)	
2.37 การเกิดคลื่นนิ่งบนสายนำสัญญาณ.....	52
3.1 ความยาวคลื่นเท่ากับจำนวนเท่าเลขคี่ของ $\lambda / 4$ ในสายกรณีเปิดวงจรและวงจรการทดสอบ..	54
(ก) คลื่นนิ่งของแรงดันไฟฟ้าในสายเคเบิล	
(ข) วงจรการหาค่าเพอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ (ϵ_r)	
3.2 แผนผังการทำงานของเครื่องวัดค่าความเป็นฉนวนของสายส่ง.....	56
3.3 ไมโครคอนโทรลเลอร์ เบอร์ P89C51RD2.....	57
3.4 วงจรรับข้อมูลค่าคีย์บอร์ด.....	57
3.5 วงจรกำเนิดสัญญาณไซน์.....	58
3.6 สัญญาณอินพุต (CH1) และเอาต์พุต (CH2) จากการวัดของวงจรกำเนิดสัญญาณคลื่นไซน์.....	60
3.7 วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 5 โวลต์ และ 9 โวลต์.....	60
3.8 สัญญาณอินพุต (CH2) และเอาต์พุต (CH1) จากการวัดจากการวัดของไอซี 7805.....	61
3.9 สัญญาณอินพุต (CH2) และเอาต์พุต (CH1) จากการวัดของไอซี 7809.....	61
3.10 วงจรแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นสัญญาณดิจิตอล (Analog to Digital).....	62
3.11 วงจรกรองความถี่แบบ LC ฟิเตอร์.....	62
3.12 คลื่นสัญญาณเอาต์พุตจากการวัดของวงจรความถี่แบบ LC ที่ความถี่ 150 kHz	63
3.13 คลื่นสัญญาณจากการวัดคาร์ิปเปิล โวลต์เตจที่ความถี่ 150 kHz.....	63

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.14 ส่วนแสดงผล.....	65
3.15 แผนผังการทำงานของซอฟต์แวร์.....	66
4.1 เครื่องมือวัด C Tan δ Bridge Tettex Instrument Type 2805 QK.....	68
4.2 วงจรบาลานซ์บริดจ์.....	68
4.3 วงจร Shearing bridge.....	69
4.4 วงจรทดสอบวัดค่าคาปาซิแตนซ์และค่าพลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก.....	70
4.5 กราฟเปรียบเทียบผลจนวน XLPE ของสายเคเบิลใต้ดินขนาด 35 mm ² , 70 mm ² และ 400 mm ² ที่แรงดันต่างๆ ตามมาตรฐาน IEC 60502-2	73
4.6 การทดสอบวัดค่าเพอร์มิทิวิตีที่สัมพัทธ์ของสาย 12/20 kV Underground Cable..... Copper Standard Conductor XLPE Insulated and PE Sheathed ขนาด 70 mm ²	73
4.7 ผลการทดสอบหาค่าเพอร์มิทิวิตีที่สัมพัทธ์ของจนวน XLPE ของสายแรงดันต่ำ..... ที่อุณหภูมิ 30°C ที่ Core 1 และ Core 2	74
4.8 การทดสอบวัดค่าเพอร์มิทิวิตีที่สัมพัทธ์ของสาย 0.6/1 kV Copper cable twin conductor crosslinked polyethylene insulated polyethylene sheathed ขนาด 6 mm ²	75
4.9 การทดสอบวัดค่าเพอร์มิทิวิตีที่สัมพัทธ์ของสาย 0.6/1 kV Copper cable twin..... conductor crosslinked polyethylene insulated polyethylene sheathed ขนาด 1 mm ²	75
4.10 ผลการทดสอบหาค่าเพอร์มิทิวิตีที่สัมพัทธ์ของจนวน PVC ของสายแรงดันต่ำ..... ที่อุณหภูมิ 30°C ที่ Core 1 และ Core 2	76
4.11 การทดสอบวัดค่าค่าเพอร์มิทิวิตีที่สัมพัทธ์ของจนวนเคเบิล 300 V, 2-core PVC Insulator and Sheathed, flat type ที่ระยะความยาวสาย 100 m	79
4.12 ตัวอย่างรูปคลื่นสัญญาณแรงดันที่ต้นสายของสาย 300 V, 2-core PVC Insulator..... and Sheathed, flat type ที่ระยะความยาวสาย 100 m	80
4.13 กราฟเปรียบเทียบค่าเพอร์มิทิวิตีที่สัมพัทธ์ของจนวนเคเบิล 300 V, 2-core..... PVC Insulator and Sheathed, flat type ที่ระยะความยาวสาย 15 m	80
4.14 กราฟเปรียบเทียบค่าเพอร์มิทิวิตีที่สัมพัทธ์ของจนวนเคเบิล 300 V, 2-core PVC Insulator and Sheathed, flat type ที่ระยะความยาวสาย 50 m	80
4.15 กราฟเปรียบเทียบค่าเพอร์มิทิวิตีที่สัมพัทธ์ของจนวนเคเบิล 300 V, 2-core PVC.....	81

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
Insulator and Sheathed, flat type ที่ระยะความยาวสาย 100 m	
4.16 กราฟเปรียบเทียบค่าเพอร์มิทิวิตีที่สัมพัทธ์ของฉนวนเคเบิล 300 V, 2-core PVC	81
Insulator and Sheathed, flat type ที่ระยะความยาวสาย 150 m	
4.17 กราฟเปรียบเทียบค่าเพอร์มิทิวิตีที่สัมพัทธ์ของฉนวนเคเบิล 300 V, 2-core PVC	81
Insulator and Sheathed, flat type ที่ระยะความยาวสาย 200 m	
4.18 กราฟเปรียบเทียบค่าเพอร์มิทิวิตีที่สัมพัทธ์ของฉนวนเคเบิล 300 V, 2-core PVC	82
Insulator and Sheathed, flat type ที่ระยะความยาวสาย 250 m	
4.19 กราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยเพอร์มิทิวิตีที่สัมพัทธ์ของเคเบิล 300 V, 2-core PVC	82
Insulator and Sheathed, flat type ที่ระยะความยาวสายต่างๆ	
4.20 ตัวอย่างรูปคลื่นสัญญาณแรงดันที่ต้นสายของสาย 300 V, 2-core PVC Insulator and	83
Sheathed, flat type ที่ระยะความยาวสาย 100 m	
4.21 กราฟเปรียบเทียบค่าเพอร์มิทิวิตีที่สัมพัทธ์ของฉนวนเคเบิล 12/20 kV Underground	84
cable copper stranded conductor XLPE insulator and PE sheathed ที่ยาว 15 m	
4.22 กราฟเปรียบเทียบค่าเพอร์มิทิวิตีที่สัมพัทธ์ของฉนวนเคเบิล 12/20 kV Underground.....	85
cable copper stranded conductor XLPE insulator and PE sheathed ที่ยาว 50 m	
4.23 กราฟเปรียบเทียบค่าเพอร์มิทิวิตีที่สัมพัทธ์ของฉนวนเคเบิล 12/20 kV Underground	85
cable copper stranded conductor XLPE insulator and PE sheathed ที่ยาว 100 m	
4.24 กราฟเปรียบเทียบค่าเพอร์มิทิวิตีที่สัมพัทธ์ของฉนวนเคเบิล 12/20 kV Underground	85
cable copper stranded conductor XLPE insulator and PE sheathed ที่ยาว 150 m	
4.25 กราฟเปรียบเทียบค่าเพอร์มิทิวิตีที่สัมพัทธ์ของฉนวนเคเบิล 12/20 kV Underground	86
cable copper stranded conductor XLPE insulator and PE sheathed ที่ยาว 200 m	
4.26 กราฟเปรียบเทียบค่าเพอร์มิทิวิตีที่สัมพัทธ์ของฉนวนเคเบิล 12/20 kV Underground	86
cable copper stranded conductor XLPE insulator and PE sheathed ที่ยาว 250 m	
4.27 กราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยเพอร์มิทิวิตีที่สัมพัทธ์ของเคเบิล 12/20 kV Underground	86
cable copper stranded conductor XLPE insulator and PE sheathed ที่ความยาวสายต่างๆ	
4.28 ตัวอย่างรูปคลื่นสัญญาณแรงดันที่ต้นสายของสาย 0.6/1 kV Copper cable twin	88
conductor cross-linked polyethylene insulated polyethylene sheathed ระยะสาย 100 m	
4.29 กราฟเปรียบเทียบค่าเพอร์มิทิวิตีที่สัมพัทธ์ของฉนวนเคเบิล 0.6/1 kV Copper cable.....	89

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
twin conductor cross-linked polyethylene insulated and polyethylene sheathed ที่ระยะ 15 m	
4.30 กราฟเปรียบเทียบค่าเพอร์มิทิวิตีที่สัมพัทธ์ของฉนวนเคเบิล 0.6/1 kV Copper cable.....89 twin conductor cross-linked polyethylene insulated and polyethylene sheathed ที่ระยะ 50 m	
4.31 กราฟเปรียบเทียบค่าเพอร์มิทิวิตีที่สัมพัทธ์ของฉนวนเคเบิล 0.6/1 kV Copper cable89 twin conductor cross-linked polyethylene insulated and polyethylene sheathed ที่ระยะ 100 m	
4.32 กราฟเปรียบเทียบค่าเพอร์มิทิวิตีที่สัมพัทธ์ของฉนวนเคเบิล 0.6/1 kV Copper cable90 twin conductor cross-linked polyethylene insulated and polyethylene sheathed ที่ระยะ 150 m	
4.33 กราฟเปรียบเทียบค่าเพอร์มิทิวิตีที่สัมพัทธ์ของฉนวนเคเบิล 0.6/1 kV Copper cable.....90 twin conductor cross-linked polyethylene insulated and polyethylene sheathed ที่ระยะ 200 m	
4.34 กราฟเปรียบเทียบค่าเพอร์มิทิวิตีที่สัมพัทธ์ของฉนวนเคเบิล 0.6/1 kV Copper cable90 twin conductor cross-linked polyethylene insulated and polyethylene sheathed ที่ระยะ 250 m	
4.35 กราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยเพอร์มิทิวิตีที่สัมพัทธ์ของเคเบิล 0.6/1 kV Copper cable91 twin conductor cross-linked polyethylene insulated and polyethylene sheathed ที่ระยะสายต่างๆ	
4.36 ฉนวนเคเบิลที่ตัวนำขนาดต่างๆ.....91	
4.37 ตัวอย่างรูปคลื่นสัญญาณแรงดันที่ต้นสายของสาย 300 V, 2-core PVC Insulator.....93 and sheathed, flat type ขนาดตัวนำ 1 mm ² ที่ความยาวสาย 100 m	
4.38 กราฟเปรียบเทียบค่าเพอร์มิทิวิตีที่สัมพัทธ์ของฉนวนเคเบิล 300 V, 2-core PVC93 Insulator and sheathed, flat type ขนาดตัวนำ 1 mm ²	
4.39 กราฟเปรียบเทียบค่าเพอร์มิทิวิตีที่สัมพัทธ์ของฉนวนเคเบิล 300 V, 2-core PVC.....93 Insulator and sheathed, flat type ขนาดตัวนำ 2.5 mm ²	
4.40 กราฟเปรียบเทียบค่าเพอร์มิทิวิตีที่สัมพัทธ์ของฉนวนเคเบิล 300 V, 2-core PVC.....94	

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
Insulator and sheathed, flat type ขนาดตัวนำ 4 mm ²	
4.41 กราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยเพอร์มิทิวิตีที่สัมพัทธ์ของฉนวนเคเบิล 300 V, 2-core.....	94
PVC Insulator and sheathed, flat type ขนาดตัวนำต่างๆ	
4.42 ตัวอย่างรูปคลื่นสัญญาณแรงดันที่ต้นสายของสาย 12/20 kV Underground cable	95
copper stranded conductor XLPE insulator PE sheathed ขนาดตัวนำ 70 mm ² ที่ระยะสาย 100 m	
4.43 กราฟเปรียบเทียบค่าเพอร์มิทิวิตีที่สัมพัทธ์ของฉนวนเคเบิล 12/20 kV Underground	96
cable copper stranded conductor XLPE insulator and PE sheathed ขนาด 35 mm ²	
4.44 กราฟเปรียบเทียบค่าเพอร์มิทิวิตีที่สัมพัทธ์ของฉนวนเคเบิล 12/20 kV Underground	96
cable copper stranded conductor XLPE insulator and PE sheathed ขนาด 70 mm ²	
4.45 กราฟเปรียบเทียบค่าเพอร์มิทิวิตีที่สัมพัทธ์ของฉนวนเคเบิล 12/20 kV Underground	96
cable copper stranded conductor XLPE insulator and PE sheathed ขนาด 400 mm ²	
4.46 กราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยเพอร์มิทิวิตีที่สัมพัทธ์ของฉนวนเคเบิล 12/20 kV	97
Underground cable copper stranded conductor XLPE insulator and PE sheathed ขนาดต่างๆ	
4.47 ตัวอย่างรูปคลื่นสัญญาณแรงดันที่ต้นสายของสาย 0.6/1 kV Copper cable twin.....	98
conductor cross-linked polyethylene insulated and polyethylene sheathed ขนาดตัวนำ 10 mm ²	
4.48 กราฟเปรียบเทียบค่าเพอร์มิทิวิตีที่สัมพัทธ์ของฉนวนเคเบิล 0.6/1 kV Copper cable twin.....	98
conductor cross-linked polyethylene insulated and polyethylene sheathed 6 mm ²	
4.49 กราฟเปรียบเทียบค่าเพอร์มิทิวิตีที่สัมพัทธ์ของฉนวนเคเบิล 0.6/1 kV Copper cable twin.....	98
conductor cross-linked polyethylene insulated and polyethylene sheathed 10 mm ²	
4.50 กราฟเปรียบเทียบค่าเพอร์มิทิวิตีที่สัมพัทธ์ของฉนวนเคเบิล 0.6/1 kV Copper cable twin.....	99
conductor cross-linked polyethylene insulated and polyethylene sheathed 16 mm ²	
4.51 กราฟเปรียบเทียบค่าเพอร์มิทิวิตีที่สัมพัทธ์ของฉนวนเคเบิล 0.6/1 kV Copper cable twin.....	99
conductor cross-linked polyethylene insulated and polyethylene sheathed ขนาดต่างๆ	
4.52 การทดสอบหาค่าเพอร์มิทิวิตีที่สัมพัทธ์ของฉนวนเคเบิลที่ระดับแรงดันต่างๆ.....	100
4.53 ตัวอย่างรูปคลื่นสัญญาณแรงดันที่ต้นสายของฉนวนเคเบิล 300V, 4 mm ² 2-core PVC.....	101

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
Insulator and sheathed, flat type ที่แรงดันป้อน 10 Vp-p	
4.54 กราฟเปรียบเทียบค่าเพอร์มิทิวิตีที่สัมพัทธ์ของฉนวนเคเบิล 300 V, 1 mm ² 2-core.....	101
PVC insulator and sheathed, flat type ที่แรงดันต่างๆ	
4.55 กราฟเปรียบเทียบค่าเพอร์มิทิวิตีที่สัมพัทธ์ของฉนวนเคเบิล 300 V, 2.5 mm ² 2-core.....	101
PVC insulator and sheathed, flat type ที่แรงดันต่างๆ	
4.56 กราฟเปรียบเทียบค่าเพอร์มิทิวิตีที่สัมพัทธ์ของฉนวนเคเบิล 300 V, 4 mm ² 2-core.....	102
PVC insulator and sheathed, flat type ที่แรงดันต่างๆ	
4.57 ตัวอย่างรูปคลื่นสัญญาณแรงดันที่ต้นสายของ 12/20 kV 35mm ² Underground.....	103
cable copper stranded conductor XLPE insulator and PE sheathed ที่แรงดันป้อน 5Vp-p	
4.58 กราฟเปรียบเทียบค่าเพอร์มิทิวิตีที่สัมพัทธ์ของเคเบิล 12/20 kV 35 mm ² Underground.....	103
cable copper stranded conductor XLPE insulator and PE sheathed ที่แรงดันต่างๆ	
4.59 กราฟเปรียบเทียบค่าเพอร์มิทิวิตีที่สัมพัทธ์ของเคเบิล 12/20 kV 70 mm ² Underground.....	104
cable copper stranded conductor XLPE insulator and PE sheathed ที่แรงดันต่างๆ	
4.60 กราฟเปรียบเทียบค่าเพอร์มิทิวิตีที่สัมพัทธ์ของเคเบิล 12/20 kV 400 mm ² Underground.....	104
cable copper stranded conductor XLPE insulator and PE sheathed ที่แรงดันต่างๆ	
4.61 ตัวอย่างรูปคลื่นสัญญาณแรงดันที่ต้นสายของสาย 0.6/1 kV 6 mm ² Copper cable twin.....	105
conductor cross-linked polyethylene insulated and polyethylene sheathed ที่แรงดัน 10 Vp-p	
4.62 กราฟเปรียบเทียบค่าเพอร์มิทิวิตีที่สัมพัทธ์ของฉนวนเคเบิล 0.6/1 kV 6 mm ² Copper	106
cable twin conductor cross-linked polyethylene insulated and polyethylene sheathed ที่แรงดัน	
4.63 กราฟเปรียบเทียบค่าเพอร์มิทิวิตีที่สัมพัทธ์ของฉนวนเคเบิล 0.6/1 kV 10 mm ² Copper.....	106
cable twin conductor cross-linked polyethylene insulated and polyethylene sheathed ที่แรงดัน	
4.64 กราฟเปรียบเทียบค่าเพอร์มิทิวิตีที่สัมพัทธ์ของฉนวนเคเบิล 0.6/1 kV 16 mm ² Copper.....	106
cable twin conductor cross-linked polyethylene insulated and polyethylene sheathed ที่แรงดัน	
5.1 โมเดลลูกโลกโซ่ของพีวีซี.....	107

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.2 โมเลกุลลูกโซ่พีอี และ โครงสร้างผลึกของเอ็กซ์แอลพีอี(XLPE).....	108
5.3 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าเพอร์มิตติวิตี้สัมพัทธ์ของฉนวนต่อความยาวสาย.....	109
5.4 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าเพอร์มิตติวิตี้สัมพัทธ์ของฉนวนต่อขนาดตัวนำ.....	109
ของสาย 300V, 2-core PVC Insulator and Sheathed, flat type ที่ความยาว 100 m	
5.5 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าเพอร์มิตติวิตี้สัมพัทธ์ของฉนวนต่อขนาดตัวนำ.....	110
ของสาย 0.6/1 kV Copper cable twin conductor cross-linked polyethylene insulated and polyethylene sheathed	
5.6 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าเพอร์มิตติวิตี้สัมพัทธ์ของฉนวนต่อขนาดตัวนำ.....	110
ของสาย12/20 kV Underground cable copper stranded conductor XLPE insulator and PE sheathed	
5.7 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าเพอร์มิตติวิตี้สัมพัทธ์ของฉนวนต่อระดับแรงดัน.....	110
ของสาย 300V, 2-core PVC Insulator and Sheathed, flat type	
5.8 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าเพอร์มิตติวิตี้สัมพัทธ์ของฉนวนต่อระดับแรงดัน.....	111
ของสาย 0.6/1 kV Copper cable twin conductor cross-linked polyethylene insulated and polyethylene sheathed	
5.9 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าเพอร์มิตติวิตี้สัมพัทธ์ของฉนวนต่อระดับแรงดัน.....	111
ของ12/20 kV Underground cable copper stranded conductor XLPE insulator and PE sheathed	
ก.1 วงจรรวมของชุดทดสอบ.....	120
ก.2 การจัดวางอุปกรณ์บนแผงวงจร.....	120
ก.3 เครื่องมือวัด C Tan δ Bridge Tettex Instrument Type 2805 QK	121
ก.4 ตัวเก็บประจุ Standard Capacitor Tettex Instrument 99.91pF 3370/100/200.....	121
ก.5 หม้อแปลง Testing Transformer Foster Transformer Ltd. 100kV. 5kVA. 50Hz.....	121
ก.6 อุปกรณ์ควบคุมแรงดัน AC Voltage Generator Control Unit.....	122
ก.7 Temperature & Humanity T-1 M MINOLTA.....	122
ข.1 วงจรการต่อใช้งานของเครื่องทดสอบ.....	123
ข.2 หน้าจอแสดงความพร้อมการทำงาน.....	123

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ข.3 หน้าจอแสดงความพร้อมการป้อนความยาวสาย.....	123
ข.4 ตัวอย่างการป้อนค่าความยาวสายทดสอบที่ระยะ 50 เมตร ของตัวอย่างสาย.....	124
300V, 2-core PVC Insulator and Sheathed, flat type	
ข.5 แป้นคีย์บอร์ดในการป้อนค่าความยาวสายและควบคุมการทำงานของชุดทดสอบ.....	124
ข.6 ค่าความถี่เริ่มต้นในการทดสอบ.....	124
ข.7 ผลการทดสอบของตัวอย่างฉนวน 300V, 2-core PVC Insulator and Sheathed, flat type.....	124

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

1.1.1 ปัญหาที่กำลังศึกษาและวิจัย

การคำนวณเป็นสิ่งจำเป็นในการสร้าง และใช้ประโยชน์ของไฟฟ้า โดยเฉพาะสำหรับไฟฟ้าแรงสูงเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดอันตรายแก่สิ่งมีชีวิต และป้องกันการเกิดการลัดวงจรระหว่างสายไฟฟ้ากับสายไฟหรือสายไฟกับดิน การคำนวณสามารถทำได้ง่ายหากมีที่ว่างมากพอหรือแรงดันไฟฟ้าต่ำ แต่กรณีไฟฟ้าแรงสูงที่มีที่ว่างจำกัด การออกแบบการคำนวณให้ดี และประหยัดนั้นจำเป็นต้องใช้ความรู้ทางด้านเทคนิคการคำนวณ ซึ่งมีผลเกี่ยวข้องกับพิสัยความคงทนของฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้า กำหนดด้วยคุณสมบัติของฉนวน คือ

1. ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า (Dielectric Strength)
2. เพอร์มิททิวิตี (Permittivity : $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$)
3. ความคงทนทางกล
4. ความคงทนต่อปฏิกิริยาเคมี, ความร้อน

ซึ่งจะเห็นว่าเพอร์มิททิวิตี (ϵ) เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญประการหนึ่ง ไม่มีมิติและเป็นตัวชี้บอกลักษณะของไดอิเล็กตริกหรือสารฉนวนไฟฟ้าเป็นพารามิเตอร์ที่กำหนดความสามารถในการสร้างคาปาซิเตอร์ เพอร์มิททิวิตีสัมพัทธ์ (ϵ_r) คือค่าตัวเลขที่บอกให้ทราบว่าคาปาซิแตนซ์จะเพิ่มเป็นกี่เท่าของคาปาซิแตนซ์สูญญากาศเมื่อใส่ไดอิเล็กตริกที่มีเพอร์มิททิวิตีสัมพัทธ์ เข้าไปแทนที่

โดยในปัจจุบันในการทดสอบวัดค่าเพอร์มิททิวิตีสัมพัทธ์สามารถหาได้หลายวิธี เช่น วิธีการวัดหาค่าคาปาซิแตนซ์และค่าแฟคเตอร์พลังงานสูญเปล่าไดอิเล็กตริก (Capacitance and Dissipation factor ($\tan \delta$)) ซึ่งเป็นการทดสอบมาตรฐาน [3-4], การใช้ Network Analyzer และจากงานวิจัยวัดค่าเพอร์มิททิวิตีสัมพัทธ์โดยใช้คลื่นจร (Travelling Wave) [10] เป็นต้น ซึ่งจะพบว่าวิธีการทดสอบนั้นมีกระบวนการและขั้นตอนที่ยุ่งยาก ต้องอาศัยความรู้ความเข้าใจในการใช้เครื่องมือสูงและราคาสูง ซึ่งลักษณะการเลือกใช้งานจะเป็นไปตามในการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ดังนั้นผู้วิจัยจึงศึกษาปัญหาดังกล่าวโดยออกแบบชุดทดสอบหาค่าเพอร์มิททิวิตีสัมพัทธ์ขึ้น เพื่อลดขบวนการและเวลาที่เสียไปทั้งยังสามารถนำไปใช้ภาคสนามและห้องปฏิบัติการวิจัยในบริษัทอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องทางด้านฉนวนไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ และถูกต้องตามมาตรฐาน

1.1.2 ปัญหาที่น่าสนใจ

ในการทดสอบวัดค่าเพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์ ที่ใช้ในปัจจุบัน จะพบว่ามีข้อจำกัดอยู่หลายประการ ในการใช้งานที่ยุ่งยากและมีราคาสูงมาก ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้ลดต้นทุนในการสร้างชุดทดสอบ ดันแบบพร้อมการออกแบบให้มีการใช้งานที่สะดวกและง่าย ในการทดสอบวัดค่าเพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์ โดยใช้คุณสมบัติของการสะท้อนกลับของคลื่นนิ่ง (Reflected of Standing wave) ใน สาย มาประยุกต์ใช้หาค่าเพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์ โดยนำเอาไมโครคอนโทรลเลอร์มาประมวลผลในการ ตรวจสอบจับคลื่นสะท้อนกลับของคลื่นนิ่งในฉนวนสายเคเบิลเพื่อหาค่าเพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์ ของ ฉนวนที่เป็นของแข็งเฉพาะสายเคเบิล โดยค่าที่ได้แสดงผลการทดสอบเป็นตัวเลข

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์การศึกษา

จุดมุ่งหมายของวิทยานิพนธ์นี้จัดสร้างขึ้นมาเพื่อเป็นชุดทดสอบดันแบบ โดยใช้คุณสมบัติของ การสะท้อนกลับของคลื่นนิ่ง (Reflected of Standing Wave) ในสายมาประยุกต์ใช้หาค่าเพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์โดยนำเอาไมโครคอนโทรลเลอร์มาประมวลผลในการตรวจสอบจับคลื่นสะท้อนกลับ ของคลื่นนิ่งในฉนวนสายเคเบิลเพื่อหาค่าเพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์ ของฉนวนที่เป็นของแข็งเฉพาะสาย เคเบิลค่าที่ได้แสดงผลการทดสอบเป็นตัวเลข โดยมีวัตถุประสงค์ดังนี้

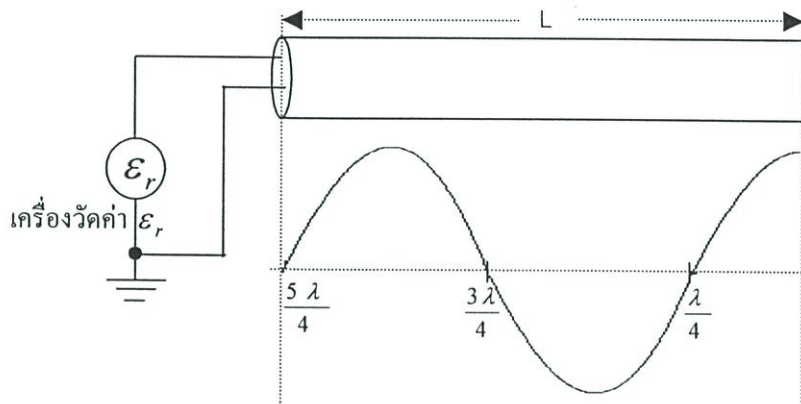
1. เพื่อศึกษาหลักการทำงานของเครื่องดันแบบที่ได้จัดสร้างขึ้น
2. เพื่อให้ผู้ทดสอบเข้าใจถึงลักษณะของค่าการทดสอบที่ได้จากการทดลอง ณ อุณหภูมิห้อง
3. เพื่อทดสอบฉนวนที่เป็นของแข็งเฉพาะสายเคเบิลได้ที่ระยะความยาวสายต่างๆ
4. เพื่อการทดสอบที่แม่นยำ และรวดเร็วในการทดสอบแต่ละครั้ง
5. เพื่อเป็นการพัฒนาการทดสอบฉนวนที่เป็นของแข็งเฉพาะสายเคเบิลให้ทันสมัย

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

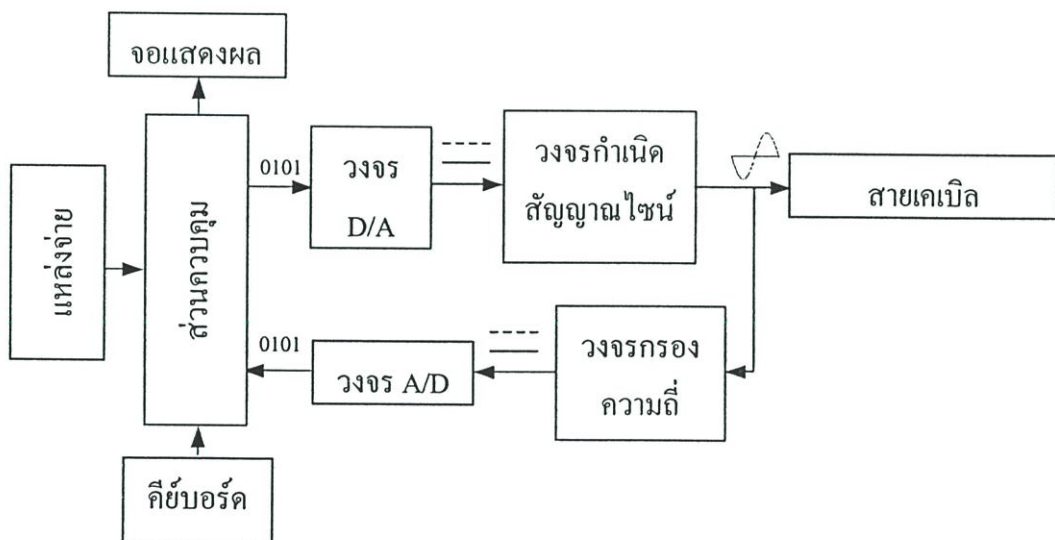
1. ชุดทดสอบที่จัดสร้างขึ้นสามารถทดสอบหาค่าเพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์ เมื่อใช้คุณสมบัติของ การสะท้อนกลับของคลื่นนิ่งที่ความยาวคลื่นเท่ากับ $\lambda / 4$ ได้ และแปลงสัญญาณอะนาลอก ของผลที่ได้เป็นดิจิตอลเข้าไมโครคอนโทรลเลอร์ในการประมวลผล
2. ชุดทดสอบที่จัดสร้างขึ้นสามารถรับข้อมูลในการทดสอบเข้าประมวลผล โดยใช้หลักการ รับสัญญาณอะนาลอกเป็นดิจิตอลเข้าไมโครคอนโทรลเลอร์แสดงผลเป็นตัวเลข
3. การทดสอบฉนวนที่เป็นของแข็งเฉพาะสายเคเบิลในสภาวะอุณหภูมิห้องของอากาศแวดล้อมสามารถฉนวนสายเคเบิลที่ดีได้จากผลการทดสอบ และเปรียบเทียบผลที่ได้จากการ ทดสอบจากตามมาตรฐาน ICEA S-66-524 [3] และ IEC 60502-2 [4] และตารางแสดงค่า เพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์ของวัสดุโพลีเมอร์ [1-2]

1.4 ทฤษฎี หรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

ในเบื้องต้นของการศึกษาได้ตั้งเป้าและศึกษาทฤษฎีการเกิดคลื่นนิ่งในสายส่งไฟฟ้าใน 2 กรณี คือการคลื่นนิ่งในสายแบบวงจรเปิดที่ปลายสาย (Open circuit) และ การคลื่นนิ่งในสายแบบวงจรปิดที่ปลายสาย (Close circuit) ที่ความยาวคลื่นเท่ากับ $\lambda / 4$ ซึ่งพบว่าในกรณีของการศึกษาแบบวงจรปิดที่ปลายสายนั้นค่ากระแสจะเกิดขึ้นสูงในการทดสอบจึงทำให้เกิดการเสียหายต่อวงจรภายในได้จึงเลือกใช้ใช้การทดสอบแบบวงจรเปิดที่ปลายสายเพื่อลดผลกระทบต่อวงจรทดสอบ



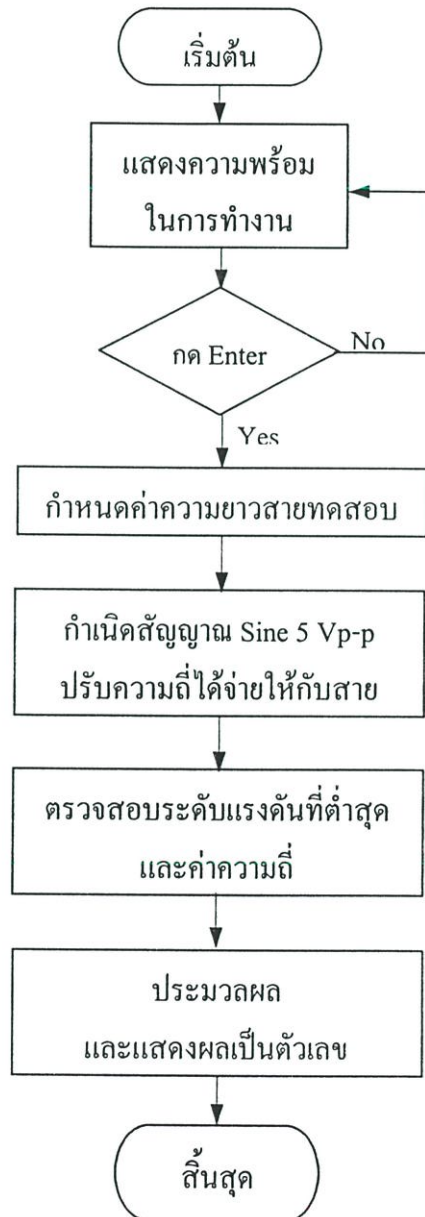
รูปที่ 1.1 วงจรการทดสอบและคลื่นนิ่งที่เกิดขึ้นในสาย



รูปที่ 1.2 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของเครื่องวัดค่าเพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์ของสายเคเบิล

อาศัยหลักการสะท้อนกลับของคลื่นนิ่งในสายเคเบิล โดยการป้อนสัญญาณไซน์แรงดันต่ำที่มีการปรับค่าความถี่ได้เข้าไปในสายเคเบิลทดสอบของวัสดุฉนวน โดยการเปิดวงจรที่ปลายสายอีกด้านหนึ่งผลของคลื่นสะท้อนที่สะท้อนกลับจากปลายสายจะรวมตัวกับคลื่นตกกระทบในสายเคเบิล

จุดที่มีเฟสของแรงดันหักล้างมากที่สุดจะเกิดที่ทุกๆจำนวนเท่าของเลขี่ของความยาวคลื่นเท่ากับ $\lambda/4$ ทำให้แรงดันที่ป้อนมีค่าต่ำที่สุด ทำการตรวจสอบค่าความถี่ที่จุดนั้น แรงดันที่วัดได้ผ่าน วงจรแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัลเข้าสู่ไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อประมวลผลโดย แสดงผลเป็นตัวเลขผ่านจอแสดงผล โดยมีวงจรการทดสอบและคลื่นนิ่งที่เกิดขึ้นในสาย ดังรูปที่ 1.1 และมีบล็อกไดอะแกรมการทำงานของเครื่องวัดค่าเพอร์มิททีวิตีสัมพัทธ์ ของสายเคเบิลดังรูปที่ 1.2 แผนผังแสดงการทำงานของโปรแกรมดังรูปที่ 1.3



รูปที่ 1.3 แผนผังแสดงการทำงานของโปรแกรม

1.5 ขอบเขตงานวิจัย

ศึกษาทฤษฎีของคลื่นนิ่ง และการสะท้อนกลับของคลื่นนิ่งที่ความยาวคลื่นเท่ากับ $\lambda/4$ เพื่อประยุกต์ในการออกแบบและสร้างเครื่องวัดค่าเพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์ของสายเคเบิลที่สภาวะอุณหภูมิห้อง โดยสามารถหาค่าเพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์ (ϵ_r) ของฉนวนสายเคเบิลที่ระยะสาย 15 – 250 เมตร ของฉนวนสายเคเบิลชนิดต่างๆ ในสภาวะอุณหภูมิห้อง ได้ทั้งประเภท Twin Conductor และ Underground Cable ทดสอบกับพิกัดแรงไฟฟ้าของสาย 24 กิโลโวลต์ ขนาด 35–400 ตารางมิลลิเมตร ที่เป็นม้วนสาย และสามารถนำไปทดสอบตามสถานที่ต่างๆ ได้ มีขั้นตอนการทดสอบที่ง่าย ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุมและประมวลผลอีกทั้งสามารถแสดงค่า ϵ_r ที่ได้เป็นตัวเลข โดยสามารถเปรียบเทียบผลการทดสอบกับการทดสอบตามมาตรฐาน ICEA S-66-524, IEC 60502-2 และตารางแสดงค่าเพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์ ของวัสดุโพลีเมอร์ [1-2] โดยค่าที่วัดได้จากตัวเครื่องมีค่าผิดพลาดไม่เกิน 3 เปอร์เซ็นต์

ขั้นตอนการศึกษา

1. ศึกษาทฤษฎีวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง
2. ศึกษาทฤษฎีสายส่งไฟฟ้า
3. ศึกษาการทดสอบฉนวนตามมาตรฐาน ICEA S-66-524 และ IEC 60502-2
4. ศึกษาทฤษฎีส่วนรับ-ส่งข้อมูล และการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์
5. ออกแบบสร้างชุดกำเนิดสัญญาณไซน์ (Sinewave)
6. ออกแบบ และสร้างโปรแกรมในส่วนรับ-ส่งข้อมูลและประมวลผล
7. ทดสอบ และบันทึกผลการทดสอบ
8. สรุปผล และวิเคราะห์

บทที่ 2

ทฤษฎีทั่วไป

2.1 บทนำ

สายส่งไฟฟ้า (Electric Transmission Line) เป็นส่วนหนึ่งขององค์ประกอบที่สำคัญมากในด้านวิศวกรรมไฟฟ้า สายส่งไฟฟ้าเป็นตัวกลางที่ยอมให้กำลังไฟฟ้า (Electrical Power) หรือสัญญาณไฟฟ้า (Electrical Signal) ไหลผ่านตามความยาวของสายส่งจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งตามที่ต้องการได้ และสามารถพบเห็นสายส่งได้โดยทั่วไปในชีวิตประจำวัน และพอจะสังเกตเห็นได้ว่าสายส่งที่ใช้งานแต่ละประเภทดังกล่าวจะมีลักษณะรูปทรงทางกายภาพแตกต่างกันออกไปตามประเภทของการใช้งาน ดังนั้นการเลือกใช้วัสดุสายไฟฟ้าต้องคำนึงถึงคุณสมบัติต่างๆที่เหมาะสม

2.2 สายไฟฟ้า

สายไฟฟ้า ประกอบด้วยส่วนประกอบที่สำคัญ 2 ส่วนคือ ตัวนำ และฉนวน

2.2.1 ตัวนำ

ตัวนำของสายไฟฟ้าทำมาจากโลหะที่มีความนำไฟฟ้าสูง อาจเป็นตัวนำเดี่ยว หรือตัวนำตีเกลียว (Strand) ที่นิยมได้แก่ ทองแดง และอลูมิเนียม ซึ่งมีข้อดี-ข้อเสีย ดังนี้

- ทองแดง มีความนำไฟฟ้าสูงมาก แข็งแรง เหนียว ทนต่อการกัดกร่อนได้ดี ข้อเสียคือน้ำหนักมาก ราคาแพง จึงไม่เหมาะกับงานแรงดันสูง แต่เหมาะกับงานทั่วไป โดยเฉพาะงานในอาคาร
- อลูมิเนียม มีความนำไฟฟ้ารองจากทองแดง แต่เมื่อเทียบกรณีกระแสเท่ากันแล้ว อลูมิเนียมจะเบา และราคาถูกกว่า จึงเหมาะกับงานนอกอาคารและแรงดันสูง อลูมิเนียมถ้าทิ้งไว้ในอากาศ จะเกิดออกไซด์เป็นฉนวนฟิล์มบางๆ ป้องกันการสึกกร่อน แต่ทำให้การเชื่อมต่อทำได้ยาก

2.2.2 ฉนวน

ทำหน้าที่ห่อหุ้มตัวนำ เพื่อป้องกันการสัมผัสโดยตรง ระหว่างตัวนำ หรือตัวนำกับส่วนที่ต่อลงดิน ในระหว่างที่ตัวนำนำกระแสไฟฟ้าจะเกิดพลังงานสูญเสียในรูปความร้อน ซึ่งจะถ่ายเทไปยังเนื้อฉนวนซึ่งความสามารถในการทนต่อความร้อนของฉนวนจะเป็นตัวกำหนดความสามารถในการทน ความร้อนของสายไฟฟ้านั้นเอง การเลือกใช้ชนิดของฉนวนจะขึ้นกับอุณหภูมิใช้งาน และแรงดันของระบบ และสภาพแวดล้อมในการติดตั้งซึ่งวัสดุที่นิยมใช้เป็น ฉนวนมากที่สุดในขณะนี้คือ Polyvinyl Chloride (PVC) และ Cross Linked Polyethylene (XLPE)

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบคุณสมบัติของฉนวน PVC และ XLPE

คุณสมบัติ	PVC	XLPE
พิกัดอุณหภูมิสูงสุดขณะใช้ ($^{\circ}C$)	70	90
พิกัดอุณหภูมิสูงสุดขณะลัดวงจร ($^{\circ}C$)	120	250
ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก	3.2-4	2.3
ความหนาแน่น (g/cm^3)	1.4	0.92
ความนำความร้อน ($cal/cm.sec^{\circ}c$)	3.5	8
ความทนทานต่อแรงดึง (kg/mm^2)	2.5	3

2.3 ประเภทของสายไฟฟ้า

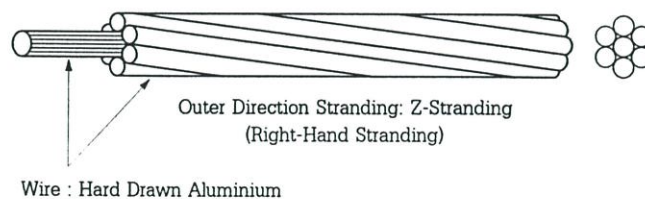
2.3.1 สายไฟฟ้าแรงดันสูง เป็นตัวนำที่เก็ยวมีขนาดใหญ่ แบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ สายแบบเปลือย และสายแบบหุ้มฉนวน

2.3.1.1 สายเปลือย

สายชนิดนี้ใช้กับแรงดันต่ำจะไม่ปลอดภัย จึงนิยมใช้กับแรงดันสูง และมักทำจากสายอลูมิเนียมเพราะน้ำหนักเบา และราคาถูก แต่สายอลูมิเนียมล้วนสามารถรับแรงดึงได้ต่ำ จึงได้พัฒนาให้สามารถรับแรงดึงให้สูงขึ้น โดยเสริมแกนเหล็กหรือวัสดุอื่น สายเปลือยที่นิยมใช้ปัจจุบันได้แก่

- สายอลูมิเนียมตีเกลียวเปลือย (AAC - All Aluminum Conductor)

เป็นตัวนำอลูมิเนียมล้วนตีเกลียวเป็นชั้นๆ รับแรงดึงได้ต่ำ จึงไม่สามารถขึงสายให้มีระยะห่างมากๆ ได้ปกติความยาวช่วงเสาต้องไม่เกิน 50 เมตร ยกเว้นสายที่มีขนาด 95 ตารางมิลลิเมตรขึ้นไปโดยสามารถมีระยะช่วงเสามากถึง 100 เมตร มีลักษณะและข้อมูลทางเทคนิค ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 สายอลูมิเนียมตีเกลียวเปลือย (AAC)

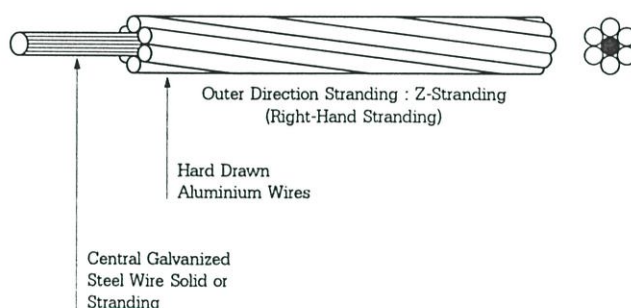
- สายอลูมิเนียมผสม (AAAC - All Aluminum Alloy Conductor)

สายชนิดนี้มีส่วนผสมของอลูมิเนียม แมกนีเซียม และซิลิกอน ซึ่งมีความเหนียว

และสามารถรับแรงดึงได้สูงกว่าสายอลูมิเนียมล้วน จึงสามารถจึงสายได้ห่างมากขึ้น นิยมใช้บริเวณชายทะเลเพราะสามารถทนการกัดกร่อนของไอเกลือได้ดี

- สายอลูมิเนียมแกนเหล็ก (ACSR - Aluminum Conductor Steel Reinforced)

เป็นสายอลูมิเนียมตีเกลียวและมีสายเหล็กอยู่ตรงกลาง เพื่อให้สามารถรับแรงดึงได้สูงขึ้น ทำให้ขยายระยะห่างช่วงเสาได้มากขึ้น แต่จะไม่ใช้สายชนิดนี้บริเวณชายทะเล เพราะจะเกิดการกัดกร่อนจากไอเกลือมีลักษณะและข้อมูลทางเทคนิค ดังรูปที่ 2.2



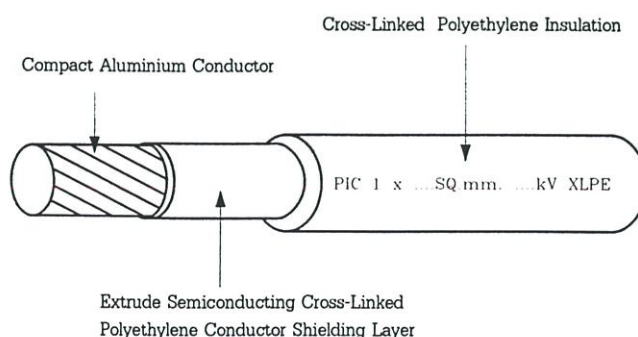
รูปที่ 2.2 สายอลูมิเนียมแกนเหล็ก

2.3.1.2 สายหุ้มฉนวน

ในการเดินสายแรงสูงผ่านที่อยู่อาศัย เพื่อความปลอดภัยต้องใช้สายที่มีฉนวนหุ้มซึ่งทำให้มีความเชื่อถือสูงขึ้น ที่นิยมใช้มีดังนี้

- สายเคเบิลแบบพาร์เชียล (Partial Insulated Cable :PIC)

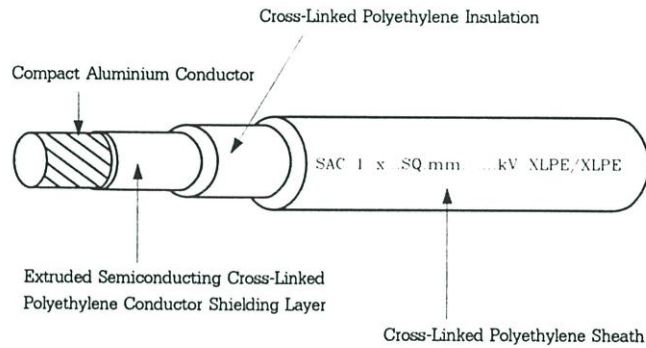
โครงสร้างประกอบด้วยตัวนำอลูมิเนียมตีเกลียวอัดแน่น หุ้มด้วยฉนวน XLPE (Cross-Linked Polyethylene) หรือ PE (Polyethylene) แล้วแต่ความเหมาะสม 1 ชั้น ปัจจุบันนิยมใช้ฉนวน XLPE ถึงแม้มีฉนวนหุ้ม ก็ไม่สามารถแตะต้องสายได้ เพราะฉนวนบางมาก ซึ่งจะช่วยลดการเกิดลัดวงจร ของสายเปลือยเท่านั้น ใช้เดินในอากาศผ่านลูกถ้วยแทนสายเปลือย



รูปที่ 2.3 สายเคเบิลแบบพาร์เชียล (PIC)

- สาย Space Aerial Cable (SAC)

โครงสร้างประกอบด้วยตัวนำอลูมิเนียมตีเกลียวหุ้มด้วยฉนวน XLPE เช่นเดียวกับสาย PIC แต่จะมีเปลือก (Sheath) ที่ทำจาก XLPE หุ้มฉนวนอีกชั้นหนึ่ง แต่ไม่มีซีลด์จึงไม่สามารถกันสนามไฟฟ้าที่ออกจากตัวนำได้ และถึงแม้จะมีเปลือกหุ้ม ก็ไม่ควรสัมผัสสายโดยตรง เพราะมีความเข้มสนามไฟฟ้าสูง ในการใช้งาน จำเป็นต้องติดตั้งบนฉนวนไฟฟ้าอีกทีหนึ่ง และต้องใช้ฉนวนที่เรียกว่าสเปเซอร์ (Spacer) ที่เหมาะสมกับแรงดันเป็นตัวรองรับ และเพื่อจำกัดระยะห่างระหว่างสาย แม้ว่าจะสามารถวางไว้ใกล้กันได้มากกว่าสาย PIC แต่ต้องไม่เกินค่าจำกัดค่าหนึ่ง และต้องใช้ (Messenger Wire) เป็นตัวรับน้ำหนัก และช่วยดึงสายไว้ด้วย Messenger Wire จะต่อลงดินทำหน้าที่เป็นสาย Overhead Ground Wire ด้วย



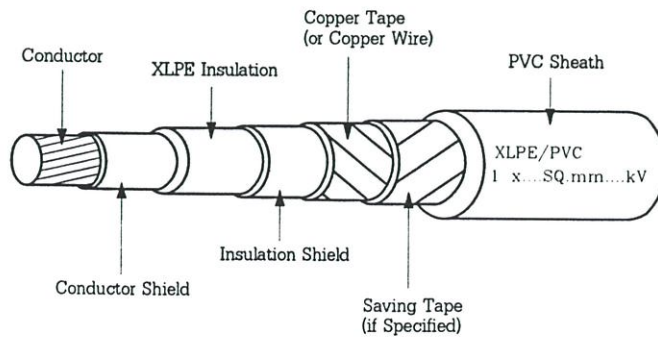
รูปที่ 2.4 สาย Space Aerial Cable

- สาย Preassembly Aerial Cable

สายชนิดนี้จัดเป็นสาย Fully Insulated มีโครงสร้างคล้ายสาย XLPE และสามารถวางใกล้กันได้ จึงใช้สายชนิดนี้ในบริเวณที่มีระยะห่างจากตัวอาคารจำกัดหรือผ่านบริเวณที่มีคนอาศัย

- สาย Cross-linked Polyethylene (XLPE)

สายชนิดนี้จัดเป็นสาย fully insulated มีโครงสร้างดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 สาย Cross-Linked Polyethylene

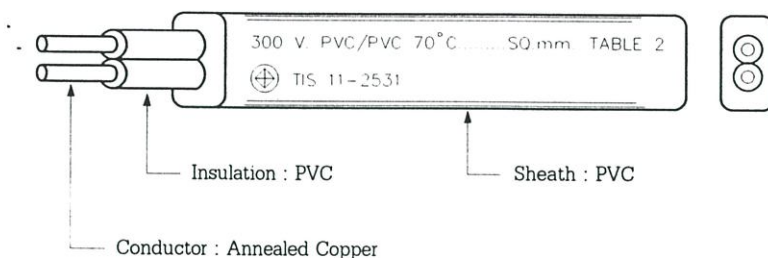
- ตัวนำ (Conductor) ส่วนใหญ่เป็นทองแดงตีเกลียว ซึ่งอาจจัดอยู่ในรูปแบบของ Copper Concentric Strand
- ชีลด์ของตัวนำ (Conductor Shield) ทำด้วยสารกึ่งตัวนำ มีหน้าที่ช่วยให้สนามไฟฟ้าระหว่างตัวนำกับฉนวนกระจายอย่างสม่ำเสมอในแนวรัศมี ช่วยลดการเกิดเบรคดาวน์ได้
- ฉนวน (Insulation) เป็นชั้นที่ห่อหุ้มชีลด์อีกทีหนึ่ง ทำด้วยฉนวน XLPE
- ชีลด์ของฉนวน (Insulation Shield) เป็นชั้นของเทปสารกึ่งตัวนำพันทับชั้นของฉนวนจากนั้นก็หุ้มด้วยชั้นของเทปทองแดงอีกทีหนึ่ง ชีลด์ของฉนวนนี้ทำหน้าที่จำกัดสนามไฟฟ้า ให้อยู่เฉพาะภายในสายเคเบิล เป็นการป้องกันการรบกวนระบบสื่อสาร นอกจากนี้การต่อชีลด์ลงดิน จะช่วยลดอันตรายจากการสัมผัสถูกสายเคเบิลด้วย และทำให้เกิดการกระจายของแรงดันอย่างสม่ำเสมอเวลาใช้งาน
- เปลือกนอก (Jacket) อาจเป็น Polyvinyl Chloride หรือ Polyethylene ก็ได้แล้วแต่ลักษณะงาน ถ้าเป็นงานกลางแจ้ง มักใช้ Polyvinyl Chloride เพราะเมื่อเกิดการติดไฟ ขณะที่ Polyethylene มักใช้งานเดินลอย เนื่องจากทนต่อสภาพดินฟ้าอากาศ สายชนิดนี้สามารถเดินลอย ในอากาศหรือฝังดินก็ได้ แต่นิยมฝังใต้ดิน เนื่องจากมีความแข็งแรง ทนทานสามารถทนต่อความชื้นได้ดี

2.3.2 สายไฟฟ้าแรงดันต่ำ

เป็นสายไฟฟ้าที่ใช้กับแรงดันไม่เกิน 750 โวลต์ เป็นสายหุ้มฉนวน ทำด้วยทองแดงหรืออลูมิเนียม โดยทั่วไปเป็นสายทองแดงสายขนาดเล็กจะเป็นตัวนำเดี่ยว แต่สายขนาดใหญ่เป็นตัวนำตีเกลียว วัสดุฉนวนที่ใช้กับสายแรงดันต่ำคือ Polyvinyl Chloride (PVC) และ Cross-Linked Polyethylene (XLPE)

2.3.2.1 สายชนิด วีเอเอฟ (VAF)

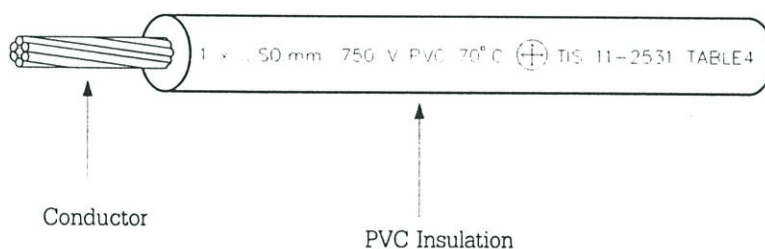
สายไฟตาม มอก.11-2531 ที่ตามท้องตลาดเรียกว่าสายชนิด วีเอเอฟ (VAF) เป็นสายชนิดทนแรงดัน 300 โวลต์ มีทั้งชนิดที่เป็นสายเดี่ยว สายคู่ และที่มีสายดินอยู่ด้วย ถ้าเป็นสายเดี่ยว จะเป็นสายกลม และถ้าเป็นชนิด 2 แกน หรือ 3 แกน จะเป็นสายแบน ตัวนำนอกจาก จะมีฉนวนหุ้ม แล้วยังมีเปลือกหุ้มอีกชั้นหนึ่ง สายคู่จะนิยมนรัดด้วยเข็มขัดรัดสาย (Clip) ใช้ในบ้านอยู่อาศัยทั่วไป สายชนิดนี้ห้ามใช้ในวงจร 3 เฟส ที่มีแรงดัน 380 โวลต์ เช่นกัน (ในระบบ 3 phase แต่แยกไปใช้งานเป็นแบบ 1 เฟส แรงดัน 220 โวลต์ จะใช้ได้)



รูปที่ 2.6 สายไฟฟ้าแบบวีเอเอฟ (VAF) ชนิด 2 แกน

2.3.2.2 สายชนิดที่เอชดับเบิลยู (THW)

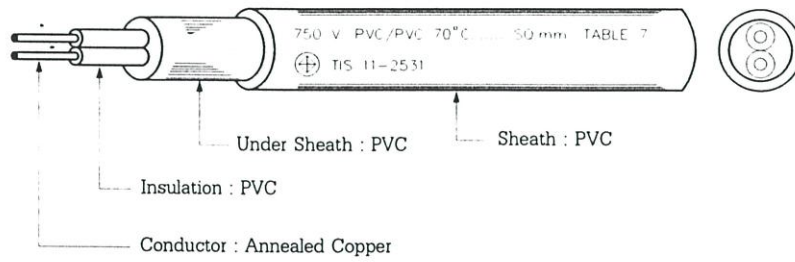
สายไฟฟ้าตาม มอก.11-2531 ที่ในท้องตลาดนิยมเรียกว่า ทีเอชดับเบิลยู (THW) เป็นสายไฟฟ้าชนิดทนแรงดัน 750 โวลต์ เป็นสายเดี่ยว นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะใน โรงงานอุตสาหกรรม เนื่องจากใช้ในวงจรไฟฟ้า 3 เฟส ได้ ปกติจะเดินร้อยในท่อร้อยสาย ชื่อ THW เป็นชื่อตามมาตรฐานอเมริกัน ซึ่งเป็นสายชนิดทนแรงดัน 600 โวลต์ อุณหภูมิใช้งานที่ 75 องศาเซลเซียส แต่ในประเทศไทยนิยม เรียกสายที่ผลิตตาม มอก. 11 -2531 ว่า สาย THW เนื่องจากมีโครงสร้างคล้ายกัน และรู้จักกันไปในท้องตลาดดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 สายไฟฟ้าทีเอชดับเบิลยู (THW)

2.3.2.3 สายชนิดเอ็นวายวาย (NYY)

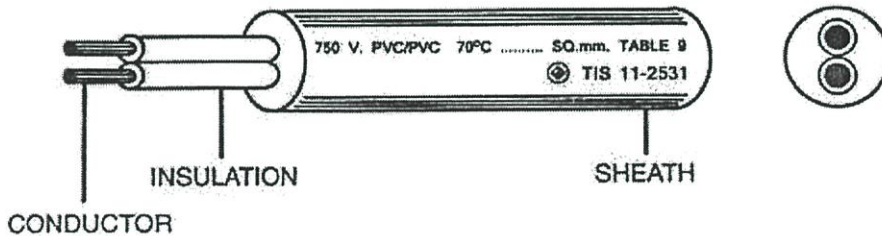
สายไฟฟ้าตาม มอก.11-2531 ตามท้องตลาดนิยมเรียกว่าสายชนิด เอ็นวายวาย (NYY) มีทั้งชนิดแกนเดี่ยว และหลายแกน สายหลายแกน ก็จะเป็นสายชนิดกลมเช่นกัน สายชนิดนี้ทนแรงดันที่ 750 โวลต์ นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางเช่นกัน เนื่องจากมีความทนต่อสภาพแวดล้อม เพราะมีเปลือกหุ้มอีกชั้นหนึ่ง บางทีเรียกว่าเป็นสายฉนวน 3 ชั้น ความจริงแล้ว สายชนิดนี้มีฉนวนชั้นเดียว อีกสองชั้นที่เหลือเป็นเปลือก เปลือกชั้นในทำหน้าที่เป็นแบบ (Form) ให้สายแต่ละแกนที่ตีเกลียวเข้าด้วยกัน มีลักษณะกลม แล้วจึงมีเปลือกนอกหุ้ม อีกชั้นหนึ่ง ทำหน้าที่ป้องกันความเสียหายทางกายภาพ



รูปที่ 2.8 สายไฟฟ้าชนิดเอ็นวายวาย(NYY)

2.3.2.4 สายชนิด วีซีที (VCT)

สายไฟฟ้าตาม มอก.11 - 2531 ตามท้องตลาดเรียกว่า สาย วีซีที (VCT) เป็นสายกลมมี ทั้งชนิดหนึ่งแกน 2 แกน 3 แกนและ 4 แกนทนแรงดันที่ 750 โวลต์ มีฉนวนและเปลือกเช่นกัน มีข้อ พิเศษกว่าก็คือ ตัวนำจะประกอบไปด้วย ทองแดงฝอยเส้นเล็ก ๆ ทำให้มีข้อดีคือ อ่อนตัว และทนต่อ สภาพการสั่นสะเทือนได้ดี เหมาะที่จะใช้เป็น สายเดินเข้าเครื่องจักร ที่มีการสั่นสะเทือนขณะใช้งาน สายชนิดนี้ ใช้งานได้ทั่วไปเหมือนสายชนิด NYY สาย VCT มีหลายแบบตามรูปทรง โดยแบ่งได้ทั้ง แบบ VCT - GRD ซึ่งมี 2 แกน 3 แกนและ 4 แกน และมีสายดินเดินร่วมไปด้วยอีกเส้นหนึ่ง เพื่อให้ เหมาะสำหรับใช้เครื่องอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ต้องต่อลงดินดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 สายไฟฟ้าชนิด วีซีที (VCT)

สายส่งที่ใช้งานยังมีประเภทอื่น ๆ อีกที่มีลักษณะโครงสร้างไม่เหมือนกับสายส่งแบบที่ได้กล่าว มาข้างต้น ซึ่งสามารถพบได้ในบางส่วนของบทสรุปสมบัติของสายส่งแบบต่าง ๆ ที่ได้รวบรวมไว้ ในภาคผนวก สมการพื้นฐานของทฤษฎีสายส่งที่ได้จากสายส่งที่การเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็ก ไฟฟ้าแบบ TEM (Transverse Electromagnetic Mode) แต่อย่างไรก็ตาม สมการและแนวคิดที่ได้ สามารถใช้ได้กับสายส่งทุกประเภท แต่เพื่อความสะดวก และความเข้าใจหรือความชัดเจนในการ มองเห็นภาพได้ง่าย ในการอธิบายเกี่ยวกับทฤษฎีของสายส่งในบทต่อ ๆ ไปจะใช้สายส่งเส้นคู่เป็น ตัวอย่างในการอธิบายถึงทฤษฎี และหลักการของสายส่งทั้งหมด ตัวทฤษฎีสายส่งเองนั้นอาจหาได้ จากการใช้ทฤษฎีสนามแม่เหล็ก ไฟฟ้า (Electromagnetic Field Theory) หรืออาจใช้ทฤษฎีวงจร

ไฟฟ้า (electric circuit theory) ก็ได้ ก็มองปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นอยู่ในรูปของแรงดัน และกระแส งานวิจัยนี้จะใช้ทฤษฎีวงจรไฟฟ้าเท่านั้น

2.4 คุณสมบัติของวัสดุฉนวนที่ดี

วัสดุฉนวนที่ดีจะพิจารณาจากคุณสมบัติต่อไปนี้

1. คุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ดีของวัสดุฉนวน จะต้องมีความทนต่อแรงดันไฟฟ้าได้สูง เพื่อให้ทำให้อุปกรณ์มีขนาดเล็กลง ใช้วัสดุน้อย ประหยัด มีความต้านทานสูงทุกระดับแรงดัน มีค่าสูญเสียไดอิเล็กตริกต่ำ เพื่อป้องกันมิให้อุณหภูมิของฉนวนเพิ่มขึ้นเกินขีดจำกัด มีความทนต่อการเกิดร่องรอยนำไฟฟ้าที่ผิว(Tracking) เพื่อป้องกันการกัดกร่อน หรือการเสื่อมสภาพของฉนวน
2. คุณสมบัติทางกลของฉนวน จะต้องมีความทนต่อแรงกลสูงเนื่องจากในทางปฏิบัติวัสดุฉนวนนอกจากจะต้องทำหน้าที่เป็นฉนวนทางไฟฟ้าแล้วยังต้องรองรับน้ำหนัก แรงกด แรงบิด หรือแรงดึง ตัวอย่าง เช่น ลูกถ้วยฉนวนยึดสายไฟขึงในอากาศ เป็นต้น ตลอดจนแรงระเบิดจากความดันของก๊าซภายใน
3. คุณสมบัติทางความร้อนของฉนวน อุปกรณ์ไฟฟ้าเมื่อใช้งานจะมีอุณหภูมิสูงขึ้น เช่นเดียวกันขณะเกิดผิดพลาดก็จะทำให้เกิดความร้อนขึ้นมากมาย ซึ่งฉนวนที่ดีจะต้องทนความร้อนเหล่านี้ได้ ช่วยระบายความร้อนได้ดี ไม่ติดไฟ มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ
4. มีความทนต่อปฏิกิริยาเคมีได้ดี ไม่ทำปฏิกิริยากับสารอื่น ไม่เป็นพิษแม้จะติดไฟหรือเกิดเพลิงไหม้
5. คุณสมบัติของฉนวนที่ดีต้องทนต่อสภาพแวดล้อม ณ ที่ติดตั้งใช้งาน ทนต่อน้ำมันทนต่อโอโซน ไม่ดูดซึมความชื้น ทนต่อการแผ่รังสีในบางกรณีของการใช้งาน

2.5 ชนิดของวัสดุฉนวนที่ใช้กับไฟฟ้าแรงสูง

สารฉนวนไฟฟ้าอาจแบ่งออกตามสถานะได้เป็น 3 ชนิด คือ ฉนวนก๊าซ ฉนวนเหลว และฉนวนแข็ง แต่ในที่นี้จะกล่าวถึงฉนวนแข็งเท่านั้น

ฉนวนไฟฟ้านอกจากจะทำหน้าที่กั้นหรือแยกส่วนที่มีไฟฟ้าที่มีความต่างศักย์มิให้สัมผัสหรือลัดวงจรถึงกันแล้ว บางส่วนยังต้องทำหน้าที่ยึดให้มั่นคง หรือรับแรงอันเกิดจากน้ำหนักของโครงสร้างหรือแรงกลไดนามิกส์ที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าอีกด้วย ฉนวนก๊าซ และฉนวนเหลวใช้ทำหน้าที่การฉนวนทางไฟฟ้าได้ดี และเพียงพอแต่ก็ต้องใช้ฉนวนแข็งประกอบทำหน้าที่ยึด รับแรงกล ตัวอย่างง่ายๆ เช่นสายไฟขึงในอากาศใช้อากาศทำหน้าที่เป็นฉนวน แต่สายไฟจะลอยหรือยึดอยู่ในอากาศได้อย่างไร จำเป็นต้องใช้ฉนวนแข็ง เช่น ลูกถ้วยทำหน้าที่ยึดสายไฟให้มั่นคงห่างจากดิน และสายไฟ

อื่นที่มีศักย์ไฟฟ้าเท่ากันหรือเคเบิลอัดก๊าซหรืออัดน้ำมันก็ตามต้องใช้ฉนวนแข็งเป็นตัวยึดตัวนำหรือในหม้อแปลงไฟฟ้าใช้ฉนวนเหลวหรือก๊าซเป็นฉนวน แต่ก็ต้องใช้ฉนวนแข็งเพื่อยึด ขดลวดต่าง ๆ และแกนเหล็กให้มั่นคง ให้มีระยะห่างตามกำหนดออกแบบ ฉะนั้นจึงกล่าวได้ว่าการฉนวนแข็งเป็นฉนวนที่สำคัญยิ่งในระบบและอุปกรณ์ไฟฟ้า ลักษณะสมบัติที่ต้องการของฉนวนแข็งอาจกำหนดด้วยคุณสมบัติที่สำคัญต่างๆ ดังนี้

- 1) ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า (Electrical Strength)
- 2) เพอร์มิททิวิตี (ϵ)
- 3) แฟคเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก ($\tan \delta$)
- 4) ความคงทนต่อแรงกล
- 5) ความคงทนต่อปฏิกิริยาเคมี , ความร้อน

ฉนวนแข็งที่ดีนั้นจะต้องมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูง มีความต้านทานสูงทุกระดับแรงดันมีพลังงานสูญเสียในไดอิเล็กตริกต่ำ ทนต่อแรงกลได้สูง ปลอดภัยจากฟองก๊าซและความชื้น ไม่ดูดซึมความชื้น ทนความร้อนได้สูง ทนต่อปฏิกิริยาได้ดี และไม่เป็นพิษเมื่อติดไฟ ฉนวนแข็งใช้กันอยู่ทั่วไปอาจได้มาจากสารอินทรีย์ เช่น กระดาษ ผ้า ยาง เป็นต้น หรือสารอนินทรีย์ เช่น ไมก้า แก้ว เซรามิกส์ หรือสารสังเคราะห์ เช่น พลาสติก และโพลีเมอร์ แต่ในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงฉนวนสายเคเบิลชนิดฉนวนโพลีเมอร์เท่านั้น

2.6 โครงสร้างของสายเคเบิลชนิดฉนวนโพลีเมอร์

สายเคเบิลได้คิดที่ใช้ในระบบส่งกำลังไฟฟ้าระดับแรงดันสูง ในปัจจุบันนิยมใช้สารชนิดโพลีเมอร์เป็นฉนวน เนื่องจากกรรมวิธีการผลิตง่ายไม่ต้องการการบำรุงรักษามาก เนื่องจากโครงสร้างของสายเคเบิลชนิดนี้ไม่ยุ่งยากจึงทำให้ต้นทุนการผลิตต่ำ และนอกจากนั้นฉนวนชนิดนี้ยังมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่เป็นฉนวนที่ดีอีกด้วยกล่าวคือ มีค่าสนามไฟฟ้าเสถียรภาพฉนวน (Breakdown Field Strength) สูง เช่น ฉนวนโพลีเอทิลีน (PE) มีค่าสนามไฟฟ้าเสถียรภาพฉนวนสูงถึง 700 กิโลโวลต์/มิลลิเมตร (Intrinsic Breakdown) และนอกจากนั้นยังมีค่าสูญเสียไดอิเล็กตริกต่ำมาก เช่นของพีอี $\tan \delta = 2 \times 10^{-4}$ [5] ด้วยเหตุนี้สารชนิดโพลีเมอร์จึงเป็นสารที่มีคุณสมบัติการเป็นฉนวนสายเคเบิลที่ดีในทางปฏิบัติค่าสนามไฟฟ้าเสถียรภาพฉนวนของพีอีที่วัดได้จากการทดลอง ไม่สามารถนำไปใช้เป็นค่ากล่าวอ้างกับฉนวนสายเคเบิลได้ เนื่องจากเมื่อสายเคเบิลถูกใช้งานภายใต้ภาระแรงดันไฟฟ้าเป็นเวลานาน ๆ ค่าสนามไฟฟ้าเสถียรภาพฉนวนลดลงอย่างมาก ปัจจุบันฉนวนสายเคเบิลจะถูกออกแบบให้ใช้งานที่สนามไฟฟ้าเพียง 2 ถึง 5 กิโลโวลต์/มิลลิเมตรเท่านั้น [1] จะเห็นได้ว่าเป็นค่าประมาณเพียง 1 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 2.10 ภาคตัดขวางของสายเคเบิลชนิดฉนวนโพลีเมอร์

จากรูปที่ 2.10 แสดงภาคตัดขวางของสายเคเบิลชนิดฉนวนโพลีเมอร์แบบแกนเดี่ยว [5] ซึ่งมีส่วนประกอบดังต่อไปนี้คือ

ตัวนำ : ทำจากอลูมิเนียมหรือทองแดงตีเกลียว เพื่อให้มีความอ่อนตัว ทำหน้าที่เป็นทางเดินของกระแสไฟฟ้า

ฉนวน : เป็นสารโพลีเมอร์ ทำหน้าที่ฉนวนกั้นศักย์ไฟฟ้าระหว่างตัวนำกับดิน (Ground)

กำบัง : ทำจากทองแดง และจะต่อลงดิน ทำหน้าที่เป็นทั้งตัวสร้างให้เกิดสนามสมมาตรรูปทรงกระบอก (Cylindrical symmetrical field) และเป็นทางเดินกลับของกระแสไฟฟ้า ในกรณีที่เกิดการลัดวงจร ดังนั้นจึงต้องมีพื้นที่หน้าตัดรวมใหญ่เพียงพอที่จะนำกระแสลัดวงจรในเวลาอันสั้นได้

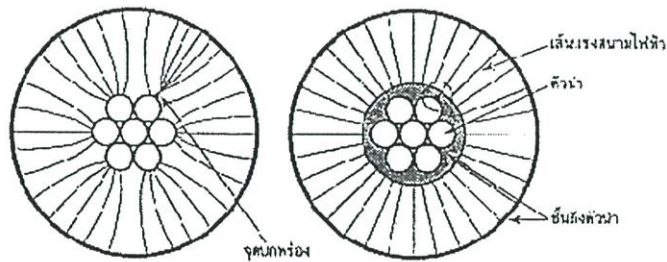
ปลอก : อาจทำจาก พีวีซี (PVC = Polyvinylchloride) หรือ พียู หรือ โลหะก็ได้ ทำหน้าที่ป้องกันสายเคเบิลจากแรงกระทำทางกลภายนอกและป้องกันการซึมของน้ำที่จะเข้าไปทำอันตรายต่อฉนวนสายเคเบิล

ชั้นกึ่งตัวนำด้านใน และชั้นกึ่งตัวนำด้านนอก : ในสายเคเบิลได้ดินแบบเก่า จะใช้ผงกราไฟต์และเทปตัวนำพันรอบ ๆ ในชั้นกึ่งตัวนำด้านนอก แต่ในเทคนิคของสายเคเบิลได้ดิน แบบใหม่ จะใช้วัสดุชนิดเดียวกับฉนวนผสมด้วยผงกราไฟต์หรือผงถ่าน ซึ่งทำให้ส่วนนี้มีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าที่ดีขึ้น ชั้นกึ่งตัวนำทั้งสองทำหน้าที่ให้เกิดสนามสมมาตรรูปทรงกระบอก เพื่อลดความเครียดของสนามไฟฟ้าที่เกิดเนื่องจากความไม่เรียบของผิวตัวนำ และของกำบัง

เป็นที่ทราบกัน โดยทั่วไปว่า สาเหตุของการเกิดเบรกดาวน์ในสายเคเบิล คือความเครียดทางไฟฟ้า อันเกิดมาจากความไม่สม่ำเสมอของการกระจายสนามไฟฟ้า และในกรณีของสายเคเบิลได้ดิน องค์ประกอบต่างๆของโครงสร้างถูกจัดวางเพื่อให้เกิดสนามไฟฟ้าสมมาตรรูปทรงกระบอกภายในชั้นฉนวน โดยจัดโครงสร้างของตัวนำ ชั้นฉนวน และกำบังอยู่ในรูปทรงกระบอกร่วมศูนย์ (Concentric Cylinder) อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติไม่อาจหลีกเลี่ยงความไม่สมบูรณ์ของผิวหน้าของทรงกระบอก อันเกิดเนื่องมาจากลักษณะทางกายภาพขององค์ประกอบต่างๆ ได้ ตัวอย่างของความไม่สมบูรณ์ได้แก่ ผิวของตัวนำซึ่งไม่เป็นทรงกระบอกที่เรียบจริง เพราะเกิดจากการตีเกลียวของตัว

นำหลาย ๆ เส้น หรือแม้แต่ผิวของตัวนำแต่ละเส้นอาจจะมีปลายแหลม (Protrusion) เกิดขึ้นมาได้ อันเนื่องมาจากขบวนการผลิตตัวนำหรือผิวหน้าของกำบัง (Screen) ก็อาจจะเกิดความไม่สมบูรณ์ได้เช่นกันซึ่งความไม่สมบูรณ์เหล่านี้เราอาจจะเรียกรวม ๆ กันได้ว่าเป็นความผิดพลาดทางเรขาคณิตของโครงสร้างซึ่งจะนำไปสู่ความไม่สม่ำเสมอของการกระจายสนามไฟฟ้า

ดังนั้นในเทคนิคของสายเคเบิลใต้ดิน จะใช้วัสดุฉนวนผสมด้วยผงถ่านหรือกราไฟต์ เพื่อเพิ่มคุณสมบัติการนำไฟฟ้ามาหุ้มตัวนำที่ตีเกลียวแล้วก่อนเพื่อขจัดความผิดพลาดทางเรขาคณิตของตัวนำ ซึ่งจะเรียกโครงสร้างชั้นนี้ว่าชั้นกึ่งตัวนำด้านใน ในทำนองเดียวกันก่อนที่จะหุ้มกำบังกับชั้นของฉนวน ก็จะมีการหุ้มด้วยชั้นกึ่งตัวนำอีกชั้นหนึ่งก่อน โดยเรียกโครงสร้างชั้นนี้ว่า ชั้นกึ่งตัวนำด้านนอก ดังรูปที่ 2.11 แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าที่เกิดรอบตัวนำ หลังจากหุ้มตัวนำที่มีความผิดพลาดทางเรขาคณิตด้วยชั้นกึ่งตัวนำแล้ว



รูปที่ 2.11 การกระจายของสนามไฟฟ้าในฉนวนสายเคเบิลเมื่อไม่มี และมีชั้นกึ่งตัวนำ

เทคนิคของการผลิตสายเคเบิลแบบโพลีเมอร์ที่มีชั้นกึ่งตัวนำอยู่ทั้ง 2 ด้านของฉนวนเรียกว่า Triple Extrusion ซึ่งหมายถึง การฉีดยาหุ้มตัวนำพร้อมกันทั้ง 3 ชั้นคือ ชั้นกึ่งตัวนำด้านในฉนวน และชั้นกึ่งตัวนำด้านนอก

ผลดีอีกข้อหนึ่งของการใช้ชั้นกึ่งตัวนำที่เป็นวัสดุชนิดเดียวกับฉนวนผสมผงถ่านคือ การป้องกันช่องว่างที่จะเกิดขึ้นระหว่างตัวนำกับฉนวน และกำบังกับฉนวนดังรูปที่ 2.10 สาเหตุของการเกิดช่องว่างคือ เมื่อมีกระแสไหลในสายตัวนำจะทำให้เกิดความร้อนขึ้น ถ้าชั้นกึ่งตัวนำเป็นวัสดุต่างชนิดกับแทนความแตกต่างของสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนจะทำให้เกิดช่องว่างระหว่างชั้นกึ่งตัวนำกับฉนวนช่องว่างหรือช่องอากาศที่เกิดขึ้นนั้นเนื่องจาก ค่าเพอร์มิทิวตี้สัมพัทธ์ต่ำกว่าฉนวน จึงทำให้มีค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงกว่าปกติและจะทำให้เกิดการคายประจุบางส่วน (Partial Discharge หรือ PD) ในช่องว่างนั้น แต่เมื่อชั้นกึ่งตัวนำเป็นฉนวนชนิดเดียวกับแนว จึงมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนเท่ากันจึงไม่ทำให้เกิดช่องว่าง และไม่เกิดการคายประจุบางส่วนขึ้น

2.6.1 โครงสร้างและคุณสมบัติของสารฉนวนโพลีเมอร์

สารฉนวนโพลีเมอร์ คือ ฉนวนของสายเคเบิลที่ทำจากสารประเภทพลาสติก เช่น พีวีซี และพีอี ชนิดต่าง ๆ โครงสร้างทางโมเลกุลของสารเหล่านี้ซับซ้อน และโครงสร้างโมเลกุลมีความสัมพันธ์กับคุณสมบัติทางไฟฟ้าของสารแต่ละชนิด จะใช้แบบจำลองอย่างง่ายในการอธิบายให้เข้าใจถึงคุณสมบัติที่สำคัญบางประการของสารเหล่านี้เท่านั้น

2.6.2 วัสดุที่มีความเป็นโพลีเมอร์สูง

วัสดุฉนวนชนิดเป็นโพลีเมอร์สูง จะประกอบไปด้วยโมเลกุลแบบมาโคร (Macromolecule) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า โมเลกุลลูกโซ่ (Chain Molecule) ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากการเรียงตัวของกลุ่มอะตอมหลายร้อยกลุ่มเป็นอย่างน้อย รูปแบบของการเรียงตัวแบ่งออกได้เป็น 3 แบบคือ

แบบที่ 1 แบบหนึ่งมิติ (One-Dimension) การเรียงตัวเป็นไปเฉพาะตามแนวยาวเท่านั้น การเรียงตัวของกลุ่มอะตอมเป็น โมเลกุลลูกโซ่แบบนี้ มีชื่อเรียกวัสดุชนิดนี้ว่าเป็นวัสดุเทอร์โมพลาสติก (Thermoplast) หรือ เทอร์โมอีลาสต์ (Thermoelast) สาเหตุเนื่องจาก โมเลกุลลูกโซ่ที่เกิดขึ้นไม่สามารถเรียงตัวกันได้ยาวตลอด จะมีส่วนที่ผิดรูปออกไปเล็กน้อย โมเลกุลเหล่านี้จึงสามารถเคลื่อนตัวได้เล็กน้อยเมื่อได้รับพลังงานจากภายนอก เช่น พลังงานความร้อนซึ่งจะทำให้วัสดุชนิดนี้อ่อนตัวลงได้ และกลับเข้าสู่สภาพเดิมได้ในขณะเดียวกันมันจะสามารถเปลี่ยนรูปได้ง่ายตามแรงกล ดังนั้นวัสดุชนิดนี้จึงสามารถขึ้นรูปได้ง่ายด้วยวิธีการฉีด (Extrusion)

แบบที่ 2 แบบสองมิติ (Two-Dimension) เป็นการเรียงตัวในลักษณะที่ทำให้เกิดเป็นพื้นที่ของโมเลกุลมาโคร

แบบที่ 3 แบบสามมิติ (Three-Dimension) การเรียงตัวของกลุ่มอะตอม ทำให้เกิดเป็นกลุ่มโมเลกุลในทุกทิศทางโดยโมเลกุลลูกโซ่ที่อยู่ข้างเคียงจะเชื่อมต่อกันด้วยกรรมวิธีทางเคมี ซึ่งเราเรียกว่าการต่อโมเลกุล (Intermolecular) หรือการเชื่อมต่อแบบไขว้ (Cross Linking) เมื่อการเชื่อมต่อแบบไขว้ในวัสดุใด ๆ มีความหนาแน่นน้อยวัสดุนั้นเรียกว่า วัสดุชนิดอีลาสโตเมอร์ (Elastomer) และถ้าวัสดุใดมีโครงสร้างของการการเชื่อมต่อแบบไขว้ที่มีความหนาแน่นมาก วัสดุนั้นเรียกว่า วัสดุชนิดดูโรพลาสติก (Duroplast) วัสดุชนิดนี้เมื่อได้รับความร้อนที่สูงมากจะเสียคุณสมบัติทางกลโดยสิ้นเชิง และไม่สามารถกลับเป็นรูปเดิมได้ ดังนั้นการขึ้นรูปของวัสดุชนิดนี้จึงสามารถทำได้ด้วยวิธีการอัด (Press) หรือวิธีการหล่อเท่านั้น

ขบวนการ (Process) ของการเรียงตัวของกลุ่มอะตอมนี้เรียกว่า โพลีรีแอคชั่น (Polyreaction) สามารถแยกขบวนการได้เป็น 3 ขบวนการ คือ

- โพลีเมอไรเซชัน (Polymerisation) เป็นขบวนการเรียงตัวที่เกิดจากกลุ่มอะตอมที่เรียกว่า โมโนเมอร์ (Monomer) กลุ่มเดียวกันหรือชนิดที่เหมือนกัน ซึ่งกลุ่มอะตอมเหล่านี้มีคุณสมบัติการเรียงตัวในยาวเท่านั้น ถ้าขบวนการการเรียงตัวเกิดจากโมโนเมอร์ชนิดเดียวกันทั้งหมดเรียกว่า

โมโนโพลิเมอร์ไรเซชัน (Monopolymerisation) ถ้าการเรียงตัวเกิดจากโมโนเมอร์ตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปเรียกว่า โคโพลิเมอร์ไรเซชัน (Copolymerisation)

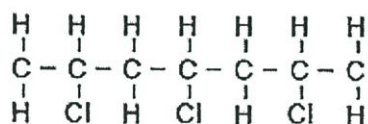
- โพลีคอนเดนเซชัน (Polycondensation) เป็นขบวนการที่ตรงกันข้ามกับขบวนการโพลิเมอร์ไรเซชัน กล่าวคือ เป็นการเรียงตัวของโมโนเมอร์ที่ไม่เหมือนกัน โดยมากขบวนการเรียงตัวชนิดนี้จะก่อให้เกิดช่องว่างระหว่างกลุ่มอะตอมได้ จึงไม่เหมาะจะใช้เป็นวัสดุฉนวนในระดับแรงดันสูง

- โพลีแอดดิชัน (Polyaddition) เป็นขบวนการการเรียงตัวของกลุ่มอะตอมสารประกอบกับอะตอมไฮโดรเจน

ในงานวิจัยนี้จะได้กล่าวถึงโครงสร้างของวัสดุฉนวนโพลิเมอร์ที่สำคัญที่ใช้เป็นฉนวนสายเคเบิลเท่านั้น

2.6.3 พีวีซี (Polyvinylchloride : PVC)

พีวีซีเกิดขึ้นจากขบวนการเรียงตัวของโมโนเมอร์แบบโพลิเมอร์ไรเซชัน และเรียงตัวในแบบหนึ่งมิติ ดังนั้น พีวีซี จึงจัดเป็นสารประเภทเทอร์โมพลาสติก มีโครงสร้างพื้นฐานทางเคมี เป็นโมเลกุลลูกโซ่ที่ประกอบด้วยอะตอมของคาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) และคลอรีน (Cl) ดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 โมเลกุลลูกโซ่ของพีวีซี

จากโครงสร้างพื้นฐานทางเคมีของพีวีซี จะเห็นได้ว่าด้านบนของลูกโซ่ ประกอบด้วยอะตอมของไฮโดรเจนอย่างเดียว ในขณะที่ด้านล่างของลูกโซ่จะประกอบด้วยอะตอมไฮโดรเจน และคลอรีนสลับกันไป ความแตกต่างกันอย่างมากในขนาดของอะตอมไฮโดรเจนด้านบนและอะตอมคลอรีนด้านล่างจะทำให้เกิดไดโพล (Dipole) ขึ้นในโมเลกุลลูกโซ่นี้ ดังนั้น พีวีซีจึงจัดเป็นสารมีขั้ว (Polar Material)

สารมีขั้วเมื่ออยู่ภายใต้ภาระแรงดันที่มีการกลับขั้วตลอดเวลา เช่น แรงดันกระแสสลับจะทำให้เกิดการกลับขั้วของไดโพล ซึ่งจะทำให้สารมีค่าตัวประกอบสูญเสีย (Dissipation Factor or $\tan \delta$) สูงนอกจากนี้ยังมีสภาพยอม (Permittivity or ϵ_r) สูงมากเช่นกัน พีวีซีที่ใช้ในสายเคเบิลมีค่า $\epsilon_r \cong 6$ และเมื่อใช้งานที่ความถี่ 50 เฮิรท์ มี $\tan \delta$ ประมาณ 300 ถึง 500×10^{-4} ซึ่งนับว่าสูงมาก จากสมการของกำลังไฟฟ้าสูญเสียในไดอิเล็กตริก

$$P_D = \omega CU^2 \tan \delta \quad (2.1)$$

โดยที่ U เป็นแรงดันไฟฟ้า $\omega = 2\pi f$ เมื่อ f เป็นความถี่ และ C เป็นค่าความจุไฟฟ้ารวมของสายเคเบิล (ซึ่งแปรผันโดยตรงกับ ϵ_r)

จะเห็นได้ว่า ค่าตัวประกอบสูญเสีย ($\tan \delta$) ของวัสดุฉนวนใดๆ เป็นตัวบ่งชี้ถึงคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุฉนวนนั้นๆ จากสมการกำลังไฟฟ้าสูญเสียในไดอิเล็กตริกนั้นเนื่องจาก พีวีซีมีค่า $\tan \delta$ และ ϵ_r ก่อนข้างสูง จึงทำให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียในไดอิเล็กตริกในพีวีซีสูง และเนื่องจากค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในไดอิเล็กตริกแปรผันโดยตรงกับแรงดันกำลังสอง ดังนั้นพีวีซีจะถูกจำกัดให้ใช้งานได้ที่แรงดันต่ำเท่านั้น โดยทั่วไปจะจำกัดที่แรงดันสูงไม่เกิน 10 กิโลโวลต์ สนามไฟฟ้าภายในฉนวนเคเบิลชนิดพีวีซีจะอยู่ที่ค่าประมาณ 2.5 ถึง 3 กิโลโวลต์/มิลลิเมตร ซึ่งหากความยาวของสายไม่มาก (ความจุมีค่าต่ำ) อาจจะใช้งานได้ที่แรงดันสูงถึง 20 กิโลโวลต์ [5]

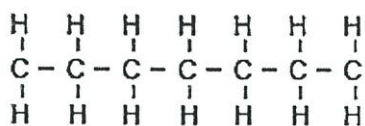
ในระดับแรงดัน 1 กิโลโวลต์ 3 กิโลโวลต์ และ 6 กิโลโวลต์ สายเคเบิลที่ใช้ฉนวนพีวีซี จะใช้ได้ดี มีราคาถูก และมีความเชื่อถือได้มาก อุณหภูมิใช้งานสูงสุดของสายตัวนำเท่ากับ 70 องศาเซลเซียส นอกจากนั้นพีวีซียังนิยมนำมาใช้เป็นปลอกของสายเคเบิลใต้ดินที่ระดับแรงดันสูง ๆ

2.6.4 พีอี(Polyethylene : PE)

โพลีเอทิลีน เกิดขึ้นจากขบวนการเรียงตัวแบบโพลิเมอไรเซชันของกลุ่มอะตอมโมโนเมอร์เอทิลีน (Ethylene, C_2H_4) โดยการเรียงตัวของกลุ่มอะตอมในแนวยาว ดังรูปที่ 2.13 พีอีจัดเป็นสารประเภทโทโมพลาสติกเช่นกัน จากลักษณะโครงสร้างของพีอีเห็นได้ว่า ส่วนบนและส่วนล่างของโมเลกุลถูกโซ่เป็นอะตอมของไฮโดรเจนอย่างเดียว จึงมีความสมมาตรของลูกโซ่ จึงจัดอยู่ในสารไม่มีขั้ว(Non-Polar Material) ผลดังกล่าวจึงทำให้พีอีมีค่า ϵ_r ต่ำ ($\epsilon_r \approx 2.3$) และค่าสูญเสียไดอิเล็กตริกต่ำด้วย ($\tan \delta = 1 \times 10^{-4}$) ซึ่งน้อยกว่าพีวีซีประมาณ 300 ถึง 500 เท่า จากผลการวิจัยเป็นลำดับมาพบว่า พีอีมีค่า $\tan \delta$ ต่ำที่สุด และมีค่าความเครียดสนามไฟฟ้า (Breakdown Field Strength) สูงมาก ดังนั้นพีอีจึงเป็นวัสดุที่น่าสนใจมากในการใช้เป็นวัสดุฉนวนสายเคเบิลใต้ดิน

ลักษณะ โครงสร้างที่สำคัญของพีอีที่ใช้เป็นวัสดุฉนวนของสายเคเบิลใต้ดินนั้น สามารถแบ่งแยกได้อีก 3 ชนิด คือ

- เอชดีพีอี (HDPE)
- แอลดีพีอี (LDPE)
- เอ็กซ์แอลพีอี (XLPE)



รูปที่ 2.13 โมเลกุลลูกโซ่พีอี (PE)

2.6.4.1 เอชดีพีอี (High-density polyethylene : HDPE or Linear PE)

เอชดีพีอี มีลักษณะเฉพาะคือ มีโครงสร้างเป็นโมเลกุลลูกโซ่ยาวขนาดกัน โดยตลอด โดยมีแขนง (Branch) หรือการเชื่อมต่อระหว่างลูกโซ่ที่อยู่ใกล้กันน้อยมาก (เพียงประมาณ 5 จุด ต่อ 1000 อะตอมของคาร์บอน) ดังแสดงในรูปที่ 2.14 ความหนาแน่นโมเลกุลจึงสูงและมีความถ่วงจำเพาะสูง (ประมาณ 0.95 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร) มีความผิดพลาดของผลึกน้อยจึงมีค่า $\tan \delta$ ต่ำ (สารไม่มีขั้ว) และเป็นสารเทอร์โมพลาสติกที่มีจุดหลอมเหลวค่อนข้างสูงคือ 130-135 องศาเซลเซียส จึงทำให้สามารถนำไปใช้งานที่อุณหภูมิสูงถึง 90 องศาเซลเซียส

ข้อเสียของเอชดีพีอี คือ เนื่องจากมีความหนาแน่นของโมเลกุลสูง จึงเป็นวัสดุที่มีความแข็งมาก ไม่อ่อนตัว ซึ่งทำให้เกิดความเสียหายได้ง่าย เมื่อต้องรับแรงกระทำ เช่น การโค้งงอขณะวางสาย ข้อเสียดังกล่าวทำให้ในปัจจุบันไม่มีการนำเอาเอชดีพีอีมาใช้เป็นสารฉนวนเคเบิลใต้ดิน



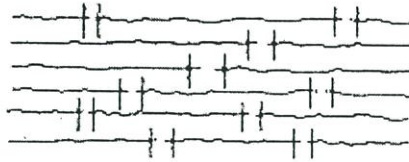
รูปที่ 2.14 โครงสร้างผลึกของเอชดีพีอี (HDPE)

2.6.4.2 แอลดีพีอี (Low-density polyethylene : LDPE or Branched PE)

แอลดีพีอี มีลักษณะเฉพาะเพิ่มเติมจากเอชดีพีอี คือ มีแนวหรือการเชื่อมต่อของโมเลกุลลูกโซ่ที่อยู่ใกล้กันในบริเวณใกล้เคียง กับแขนงหลักมากกว่าของเอชดีพีอี (ประมาณ 30 จุดต่อ 1000 อะตอมคาร์บอน) แต่จะไม่มีการเชื่อมต่อของโมเลกุลลูกโซ่ที่อยู่ใกล้กัน ดังแสดงในรูป 2.15 ดังนั้นจึงทำให้มีคุณสมบัติคล้ายกับเอชดีพีอี แต่ความหนาแน่นของ โมเลกุลและความถ่วงจำเพาะต่ำกว่า (ประมาณ 110 ถึง 115 องศาเซลเซียส) จึงมีความอ่อนตัวมากกว่า และสามารถนำไปใช้งานที่อุณหภูมิต่ำกว่าคือเพียง 70 องศาเซลเซียส

เนื่องจากมีจุดหลอมเหลวต่ำ ดังนั้นแอลดีพีอีจึงมีข้อเสียคือ เมื่อมีการลัดวงจรเกิดขึ้น อุณหภูมิของสายอาจจะสูงถึงจุดหลอมเหลวของมัน ทำให้แอลดีพีอีหลอมละลายจนมีลักษณะคล้ายน้ำผึ้ง

ลักษณะเช่นนี้จะทำให้แอลดีพีอีไม่สามารถรับน้ำหนักของสายตัวนำที่อยู่ตรงกลางสายเคเบิลได้ ทำให้ตัวนำเลื่อนมาชิดของด้านล่าง และสายเคเบิลจะสูญเสียความสม่ำเสมอของระยะจนวน นั่นคือเกิดความผิดพลาดทางเรขาคณิตของโครงสร้างสายเคเบิล ทำให้เกิดความเครียดทางไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอ ซึ่งจะนำไปสู่การเบรคความถี่ได้ถ้ามีการป้อนแรงดันอีกครั้งหนึ่งหลังจากการแก้ไขการลัดวงจรแล้ว

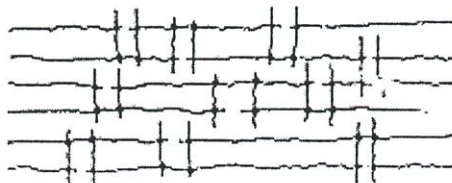


รูปที่ 2.15 โครงสร้างผลึกของแอลดีพีอี

2.6.4.3 เอ็กซ์แอลพีอี(Cross-linked polyethylene : XLPE)

ดังแสดงในรูปที่ 2.16 การแตกแขนงของสารเอ็กซ์แอลพีอี จะมีลักษณะเหมือนกับของแอลดีพีอี (คือมีประมาณ 30 จุดต่อ 1000 อะตอมของคาร์บอน) ซึ่งทำให้สารทั้งสองชนิดมีคุณสมบัติด้านความหนาแน่นของโมเลกุล ความถ่วงจำเพาะ และจุดหลอมเหลวเหมือนกัน แต่ด้วยวิธีการทางเคมีที่สามารถทำให้เกิดการเชื่อมโยงโดยการไขว้ (Cross Linking) โมเลกุลลูกโซ่ที่ใกล้เคียงกันของแอลดีพีอีจะเชื่อมโยงกัน ทำให้เกิดเป็นลักษณะเป็นโครงตาข่าย ซึ่งรูปแบบของการเรียงตัวของโมเลกุลลูกโซ่ แบบสามมิติ (Three-Dimension) ดังรูปที่ 2.16 แสดงให้ดูได้เพียง 2 มิติ เท่านั้น ดังนั้นแอลดีพีอีที่ผ่านขบวนการเชื่อมโยงโมเลกุลลูกโซ่แบบไขว้ จึงมีชื่อว่า เอ็กซ์แอลพีอี

การเชื่อมโยงของโมเลกุลลูกโซ่นี้เป็นผลให้เอ็กซ์แอลพีอีไม่หลอมละลายแม้อุณหภูมิสูงถึง 115 องศาเซลเซียส แต่จะเปลี่ยนสถานะเป็นยางอิลาสติก เนื่องจากเอ็กซ์แอลพีอีมีการเรียงตัวเป็นแบบสามมิติ จึงจัดเป็นสารประเภทอิลาสโตเมอร์ ดังนั้นเอ็กซ์แอลพีอีเมื่อเปรียบกับแอลดีพีอี จึงมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าและทางกลที่ดีเท่ากัน แต่สามารถนำไปใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงกว่า 90 องศาเซลเซียส และไม่มีปัญหาเกี่ยวกับการหลอมละลายที่อุณหภูมิสูงในปัจจุบันเอ็กซ์แอลพีอี เป็นวัสดุจนวนที่เหมาะสมที่สุดสำหรับสายเคเบิลชนิดจนวนโพลิเมอร์

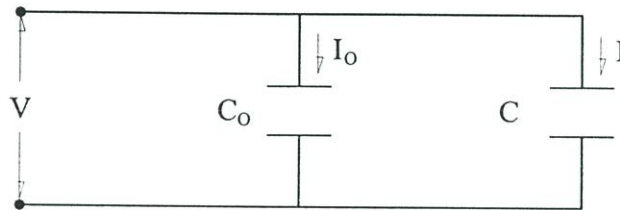


รูปที่ 2.16 โครงสร้างผลึกของเอ็กซ์แอลพีอี (XLPE)

2.7 ไดอิเล็กตริก

ไดอิเล็กตริก คือสารที่มีคุณสมบัติของฉนวนไฟฟ้าที่ใช้คั่นระหว่างอิเล็กโทรดเพื่อให้ทนต่อแรงดันไฟฟ้าได้สูงขึ้น ข้อมูลทางไดอิเล็กตริกของระบบฉนวนให้ความรู้เกี่ยวกับสมบัติทางไฟฟ้า อายุ และการประกอบของอุปกรณ์ต่างๆ การรู้ข้อมูลทางไดอิเล็กตริกสามารถควบคุมระบบการฉนวนให้มีความน่าเชื่อถือ หลีกเลี่ยงผลเสียรวมทั้งค่าใช้จ่ายจากความสูญเสียทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้น และเพื่อประสิทธิภาพของระบบไฟฟ้า

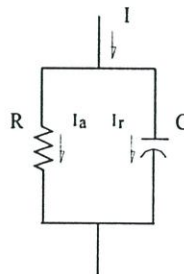
ϵ คือค่าคงที่ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่กำหนดความสามารถในการสร้างคาปาซิแตนซ์ของฉนวนแต่ละชนิด ในอากาศที่คั่นระหว่างแผ่นอิเล็กโทรด 2 แผ่น ค่าคาปาซิแตนซ์ของฉนวนอากาศคือ C_0 กระแสที่ไหลผ่านคือ I_0 ในรูปที่ 2.17 แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างระหว่างฉนวนที่เป็นอากาศ กับฉนวนที่เป็นสารไดอิเล็กตริก (อาจเป็น ของแข็ง ของเหลว ก๊าซ หรือของผสม)



รูปที่ 2.17 ความแตกต่างของคาปาซิแตนซ์ของอากาศเทียบกับสารไดอิเล็กตริกในอากาศ

$$I_0 = j\omega C_0 V \quad (2.2)$$

เครื่องหมาย j หมายความว่า เฟสเซอร์ของกระแสหน้าแรงดัน 90° แต่ในสารไดอิเล็กตริก ค่าคาปาซิแตนซ์ C ในทางปฏิบัติเฟสเซอร์ระหว่างกระแส และแรงดันน้อยกว่า 90° เพราะมีพลังงานสูญเสียที่สูญเสียไปในรูปของความต้านทาน ในสารไดอิเล็กตริกที่มีพลังงานสูญเสียนี้อาจจะเสมือนเป็น RC ขนานดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 วงจรเสมือนของไดอิเล็กตริกที่มีค่าพลังงานสูญเสีย

กระแส I แบ่งเป็น 2 ส่วนคือ I_a (Active current) ไหลผ่าน R และ I_r (Reactive current) ไหลผ่าน C คือมุมพลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก เป็นมุมที่รวมกับมุมเฟสของไดอิเล็กตริก (φ) แล้วได้ 90° แฟกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก ($\tan \delta$)

$$\tan \delta = \frac{I_a}{I_r} \quad (2.3)$$

พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก (P) ในฉนวนที่มีค่าคาปาซิแตนซ์ C คือ

$$P = I_a V = V I_r \tan \delta \quad (2.4)$$

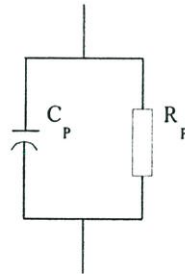
$$I_r = V \omega C \quad (2.5)$$

$$P = V^2 \omega C \tan \delta \quad (2.6)$$

วงจรเสมือนของไดอิเล็กตริกที่มีพลังงานสูญเสีย (Equivalent diagram of lossy dielectric)

วงจรสมมูลที่ใช้ศึกษาไดอิเล็กตริกที่มีพลังงานสูญเสียภายใต้การป้อนไฟฟ้ากระแสสลับ จะมีอยู่ 2 ชนิด คือ

1. วงจรเสมือนแบบขนาน (Parallel equivalent circuit) วงจรสมมูลเป็นแบบขนาน RC



รูปที่ 2.19 วงจรเสมือนแบบขนาน

จากรูปที่ 2.19 จะได้ว่า

$$I_r = U \omega C_p; I_a = \frac{U}{R_p}$$

$$\tan \delta = \frac{I_a}{I_r} = \frac{1}{\omega C_p R_p}$$

$$P = U^2 \omega C_p \tan \delta = \frac{u^2}{R_p}$$

2. วงจรเสมือนแบบอนุกรม (Series equivalent circuit) วงจรสมมูลจะเป็นแบบอนุกรม RC



รูปที่ 2.20 วงจรเสมือนแบบอนุกรม

จากรูปที่ 2.20 จะได้ว่า

$$U_R = IR_S; U_C = \frac{I}{\omega C_S}$$

$$\tan \delta = \frac{U_R}{U_C} = \omega C_S R_S$$

$$P = U_R I = U_R \frac{U_C}{X_C} = U \sin \delta \frac{U \cos \delta}{X_C}$$

$$P = U^2 \omega C_S \sin \delta \cos \delta$$

$$= \frac{1}{2} U^2 C_S \sin 2\delta$$

$$= U^2 \omega C_S \frac{\tan \delta}{1 + \tan^2 \delta}$$

ถ้า δ มีค่าน้อยมาก ดังนั้น $\tan^2 \delta \approx 0$ จะได้

$$P = U^2 \omega C_S \tan \delta = U^2 \omega^2 C^2 S R_S = I^2 R_S$$

จากสมการข้างต้นจะได้

$$C_S = C_P (1 + \tan^2 \delta) \quad (2.7)$$

และจะได้

$$R_S = \frac{R_P}{1 + \frac{1}{\tan^2 \delta}} \quad (2.8)$$

จากสมการที่ 2.7-2.8 ทำให้ทราบว่าถ้าค่า δ มีค่าน้อยมาก $\tan^2 \delta \approx 0$ จะได้

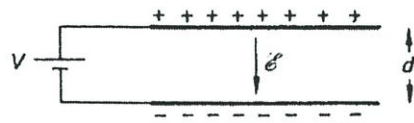
$$C_S \approx C_P \text{ และ } R_S \approx R_P \tan^2 \delta$$

และค่า δ มีค่ามากจะได้

$$C_S \geq C_P; R_S \leq R_P; R_P = R_S \tan^2 \delta$$

นั่นคือค่า $\tan \delta$ ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงวงจรเสมือนได้ และมักจะพบว่าวงจรเสมือนของไดอิเล็กตริกที่มีความสูญเสียจะเป็นขนาน R, C และ $\tan \delta$ จะแปรผันตาม ความถี่ อุณหภูมิ ความชื้น และแรงดันไฟฟ้า

ฉนวนไฟฟ้ามีสมบัติทางไฟฟ้าที่น่าสนใจอีกประการหนึ่ง คือ มันสามารถเกิดมีไดโพลไฟฟ้า (Electric dipole) ขึ้นได้เนื่องจากสนามไฟฟ้าที่ใส่เข้ามา ไดโพลไฟฟ้าอันหนึ่งคือ หน่วยอันหนึ่งซึ่งมีประจุบวกและประจุลบอยู่ในปริมาณที่เท่าๆกัน และประจุทั้งสองนี้ถูกแยกออกจากกันเป็นระยะทางสั้นๆ สำหรับรูปไดโพลแบบง่ายๆ โมเมนต์ไดโพลไฟฟ้า p ถูกกำหนดโดย $p = qr$ โมเมนต์ไดโพลไฟฟ้านี้เป็นปริมาณเวกเตอร์ซึ่งมีทิศทางประจุลบไปประจุบวก และมีหน่วยเป็น debye ($1 \text{ debye} = 3.33 \times 10^{-30}$ คูลอมป์-เมตร) นอกจากไดโพลไฟฟ้าจะมีอยู่ในวัสดุขณะมีสนามไฟฟ้าอยู่ ไดโพลยังอาจเป็นลักษณะที่ถาวรของโครงสร้างโมเลกุลได้อีกด้วย ไดโพลประเภทนี้มีชื่อว่า ไดโพลถาวร (Permanent dipole) ส่วนวัสดุซึ่งผลของโพลาริเซชัน (Polarization) มีความสำคัญมีชื่อว่า ไดอิเล็กตริก ภาพพจน์ของไดอิเล็กตริกโพลาริเซชันสามารถแสดงให้เห็นแบบมหภาพ โดยพิจารณาตัวเก็บประจุแบบง่ายๆ สมมติให้ตัวเก็บประจุตัวหนึ่งประกอบด้วยแผ่นโลหะซึ่งมีพื้นที่ A อยู่สองอันแผ่นโลหะทั้งสองถูกคั่นจากกันเป็นระยะทาง d ด้วยสูญญากาศดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 ตัวเก็บประจุซึ่งมีไดอิเล็กตริกเป็นสูญญากาศ

จากนั้นต่อแบตเตอรี่ซึ่งมีแรงดัน V โวลต์ ครอบผ่าน โลหะทั้งสองไว้สนามไฟฟ้า ξ ระหว่างแผ่นโลหะทั้งสองมีขนาด $\frac{V}{d}$ และมีทิศทางดังแสดงในรูปที่ 2.21 สนามไฟฟ้างกล่าวเกิดจากความหนาแน่นของประจุ $\pm Q$ ซึ่งอยู่บนแผ่นโลหะทั้งสองความสัมพันธ์ระหว่าง Q และ ξ จะเป็นไปตามสมการ 2.3 โดยมี ϵ_0 เป็นค่าเพอร์มิททิวิตีของสูญญากาศมีค่า 8.854×10^{-12} ฟารัด/เมตร

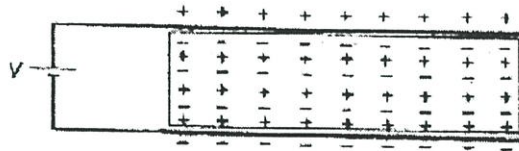
$$Q = \epsilon_0 \xi \quad (2.9)$$

เพื่อความสะดวกอาจคิดว่า Q เป็นแหล่งจ่ายเส้นแรงไฟฟ้าอยู่ระหว่างแผ่นโลหะทั้งสอง ความหนาแน่นของเส้นแรงไฟฟ้าเหล่านี้มีชื่อว่า Electric Displacement : D

$$D = Q = \epsilon_0 \xi \quad (2.10)$$

ตอนนี้สมมติว่าสอดแผ่นไดอิเล็กตริกให้เข้าไปเต็มช่องว่างระหว่างแผ่นโลหะพอดี ตัวกลางไดอิเล็กตริกนี้จะถูกโพลาไรซ์ (คือการทำให้เกิดไดโพลไฟฟ้าขึ้นในตัวกลาง) โดยสนามไฟฟ้า และไดโพลในตัวกลางไดอิเล็กตริกจะเรียงตัวอยู่ในทิศทางสนามไฟฟ้า ปลายของไดโพลทุกตัวที่มีประจุต่างกันจะให้ผลซึ่งหักล้างกันไป ยกเว้นที่บริเวณผิวซึ่งยังไม่มีหักล้างประจุจะมีประจุบอบอยู่ที่ผิวบนและประจุบวกอยู่ที่ผิวล่าง ประจุที่ผิวเหล่านี้จะดึงดูด และยึดเหนี่ยวประจุจำนวนเท่ากัน แต่เป็นชนิดตรงข้ามบนแผ่นโลหะ ประจุซึ่งอยู่บนผิวโลหะนี้ต่างจากไดโพลกล่าวคือมันสามารถเคลื่อนที่ได้

สนามไฟฟ้าระหว่างแผ่นโลหะจะถูกกำหนดโดยแรงดันไฟฟ้าที่ใส่เข้ามา และจะมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงไม่ว่าจะมีไดอิเล็กตริกชนิดใดอยู่ระหว่างแผ่นโลหะทั้งสองหรือไม่ สำหรับกรณีที่มีแผ่น ไดอิเล็กตริกสอดเข้ามาอยู่ระหว่างแผ่นโลหะ ประจุที่ผิวของแผ่นโลหะบางตัวจะถูกยึดโดยประจุที่ผิวของแผ่นไดอิเล็กตริกทำให้ไม่มีส่วนของการสร้างเส้นแรงไฟฟ้าระหว่างแผ่นโลหะ เนื่องจากสนามไฟฟ้าระหว่างแผ่นโลหะต้องมีค่าคงเดิมดังนั้นแบตเตอรี่จะต้องจ่ายประจุเพิ่มเติมเพื่อชดเชยประจุที่ยึดเหนี่ยว โดยประจุที่ผิวของแผ่นไดอิเล็กตริกดังกล่าว



รูปที่ 2.22 ตัวเก็บประจุซึ่งมีไดอิเล็กตริกของแข็งอยู่

เมื่อให้ Q เป็นความหนาแน่นประจุที่ผิวของโลหะที่ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าระหว่างแผ่นโลหะ และ Q_B เป็นความหนาแน่นประจุที่ผิวของโลหะที่ถูกยึดเหนี่ยวโดยประจุที่ผิวของไดอิเล็กตริก ปริมาณของประจุที่ผิวของโลหะทั้งหมด Q' จะเป็น

$$Q' = Q + Q_B \quad (2.11)$$

อาจเขียนสมการใหม่ได้เป็น

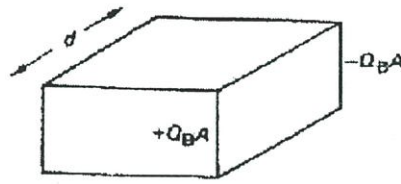
$$Q' = \epsilon_r Q \quad (2.12)$$

เมื่อให้ D เป็นความหนาแน่นเส้นแรงไฟฟ้าทั้งหมดที่ออกจากแผ่นโลหะ โดยคิดทั้งที่ออกจากประจุที่ไม่ถูกยึดเหนี่ยว และถูกยึดเหนี่ยว จะได้

$$D = Q' = \epsilon_0 \epsilon_r \xi \quad (2.13)$$

$$D = \epsilon_0 \xi + Q_B \quad (2.14)$$

ความหนาแน่นของประจุที่ถูกยึดเหนี่ยว Q_B นี้ มีชื่อเรียกว่า Polarization : P ถ้าพิจารณาไดอิเล็กตริกก้อนหนึ่ง ซึ่งมีความหนาแน่นประจุ $\pm Q_B$ อยู่บนผิวด้านตรงข้ามกันดังรูปที่ 2.23 ระยะห่างระหว่างผิวทั้งสองเท่ากับ d ดังนั้น โมเมนต์ไดโพลทั้งหมดมีค่าเป็น $Q_B Ad$ หรือเท่ากับ Q_B คูณปริมาตร นั่นคือความหนาแน่นของประจุที่ถูกยึดเหนี่ยว Q_B มีค่าเท่ากับ โมเมนต์ไดโพลต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร



รูปที่ 2.23 ไดอิเล็กตริกซึ่งมีประจุที่ผิว $\pm Q_A A$

โดยทั่วไปใช้เวกเตอร์แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง D , ξ และ P ดังนั้นสมการที่ 2.14 จึงกลายเป็น

$$D = \epsilon_0 \xi + P \quad (2.15)$$

อัตราส่วน D/ξ มีชื่อว่า Permittivity ของตัวกลางไดอิเล็กตริก

$$D/\xi = \epsilon_0 \epsilon_r = \epsilon$$

ส่วน ϵ_r มีชื่อ Relative permittivity หรือค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric constant) ของตัวกลาง สำหรับสุญญากาศ $\epsilon_r = 1$ และ $\epsilon = \epsilon_0$

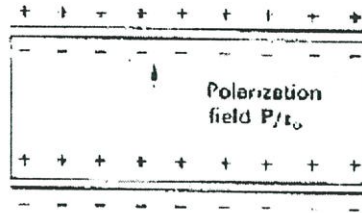
อีกวิธีหนึ่งที่ใช้การมองปัญหาข้างต้นคือการพิจารณาสนามไฟฟ้า ξ' ในไดอิเล็กตริกให้ขึ้นกับความหนาแน่นของประจุทั้งหมด Q' ซึ่งอยู่บนแผ่นโลหะ สนามไฟฟ้า ξ' นี้จะมีค่ามากกว่าสนามไฟฟ้า ξ ที่ใส่เข้ามาเนื่องจากเบคเตอร์ นั่นคือ

$$\xi' = \xi + P/\epsilon_0$$

เทอม P/ϵ_0 เกิดจากประจุที่เพิ่มเข้ามาเมื่อแผ่นไดอิเล็กตริกถูกสอดเข้ามาระหว่างแผ่นโลหะ ภายในไดอิเล็กตริก, สนามไฟฟ้า ϵ' จะถูกต้านด้วยสนามไฟฟ้า P/ϵ_0 ซึ่งเกิดจากประจุที่ผิวของไดอิเล็กตริกเอง ดังนั้นสนามไฟฟ้าในไดอิเล็กตริกจะมีค่าเป็น

$$\xi' - P/\epsilon_0 = \xi + P/\epsilon_0 - P/\epsilon_0 = \xi$$

ซึ่งก็เป็นผลลัพธ์เดียวแบบตอนแรกจะเห็นได้ว่าการเพิ่มตัวกลางไดอิเล็กตริกเข้ามาระหว่างแผ่นโลหะเป็นการเพิ่มความสามารถในการเก็บประจุให้แก่ระบบด้วยแฟคเตอร์ ϵ_r



รูปที่ 2.24 สนามไฟฟ้าโพลาไรเซชันในไดอิเล็กตริก

จากสมการที่ 2.13 และ 2.15

$$\epsilon_0 \epsilon_r \xi = \epsilon_0 \xi + P$$

เพราะฉะนั้น

$$P = \epsilon_0 \xi (\epsilon_r - 1)$$

อัตราส่วน $P / \epsilon_0 \xi$ มีชื่อว่า Electric susceptibility χ ของไดอิเล็กตริก

$$P / \epsilon_0 \xi = \epsilon_r - 1 = \chi \quad (2.16)$$

χ นี้เป็นอัตราส่วนระหว่างประจุที่ถูกยึดเหนี่ยวต่อประจุที่เป็นอิสระเท่ากับ P/Q

โดยการใช้นิยามข้างต้นจะเห็นว่ารายละเอียดในการเกิดโพลาไรเซชันในไดอิเล็กตริกเป็นสิ่งไม่จำเป็นอย่างไรก็ตามพฤติกรรมทางกายภาพที่สำคัญจำนวนหนึ่งก็สามารถถูกอธิบายได้โดยโมเดลแบบง่าย ๆ

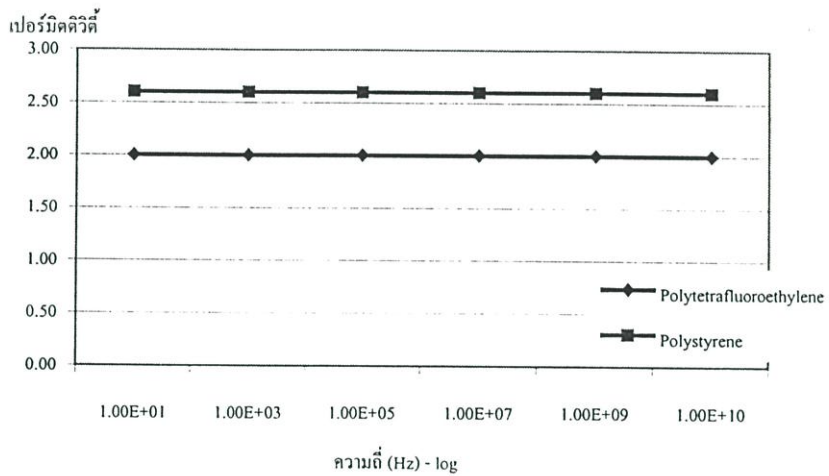
ไดอิเล็กตริกมักถูกใช้งานในรูปแบบของฉนวนไฟฟ้า และในรูปแบบของตัวเก็บประจุ น้ำมัน และกระดาษหุ้มไข ถูกใช้เป็นฉนวนในหม้อแปลงไฟฟ้า และ Steatite (ส่วนผสมของดินเหนียว, แบเรียม และ แคลเซียม คาร์บอเนตอัดแข็ง) ถูกใช้เป็นฉนวนไฟฟ้าแรงดันสูง สำหรับตัวเก็บประจุ, วัสดุไดอิเล็กตริกที่ใช้งานก็มี กระดาษ,ฟิล์มพลาสติก และแผ่นไมก้า ออกไซด์ของอะลูมิเนียม, ดิเตเนียม และแทนทาลัม (ตัวเก็บประจุชนิดไดอิเล็กโตรไลติก) และเซรามิกออกไซด์ หลายชนิดซึ่งมักจะเป็นทั้งเฟอร์โรอิเล็กตริก และไดอิเล็กตริก วัสดุโพลีเมอร์ซึ่งใช้เป็นไดอิเล็กตริก เซิงพาณิชย์ได้แก่ โพลีเอสเตอร์ซึ่งรู้จักชื่อว่าไมลาร์ (PET) โพลีสไตรีนและโพลีคาร์บอเนต ตัวอย่างเช่นโพลีสไตรีนเป็นสารประกอบแบบไม่มีขั้วไฟฟ้าที่มีค่า Relative Permittivity = 2.55 ที่ 25 องศาเซลเซียส และมีค่า $\tan \delta$ น้อยกว่า 2×10^{-4} ในย่านความถี่ 100 ถึง 10 กิกะเฮิร์ต ค่ายกกำลังสองของดรรชนีหักเหของแสงคือ 2.53

2.8 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าเพอร์มิตติวิตี (ϵ_r) ของสารฉนวน

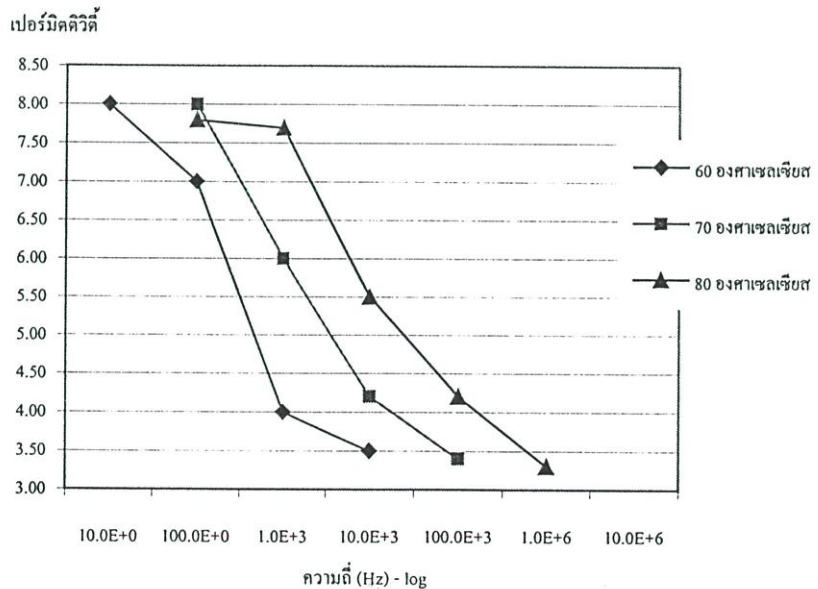
2.8.1 ค่าเพอร์มิตติวิตี (ϵ_r) และความถี่ (Frequency)

เกิดจากผลของกระบวนการโพลาไรเซชัน ในสาร นอนโพล่าไดอิเล็กตริก ค่าเพอร์มิตติวิตี ซึ่งไม่แปรผันกับค่าความถี่ ส่วนสารโพล่าไดอิเล็กตริก (ไดโพลโพลาไรเซชัน) ค่าเพอร์มิตติวิตี จะแปรผันกับค่าความถี่[14]

สารนอนโพล่าไดอิเล็กตริกนำไปใช้ในย่านความถี่วีดีโอได้ดี และในก๊าซ SF6 ซึ่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ กระแสตรง และแรงดันอิมพัลส์ เมื่อค่าความเครียดสนามไฟฟ้าเบรกดาวน์คงที่



รูปที่ 2.25 ค่าเพอร์มิตติวิตี และความถี่สำหรับ Solid non Polar Dielectric



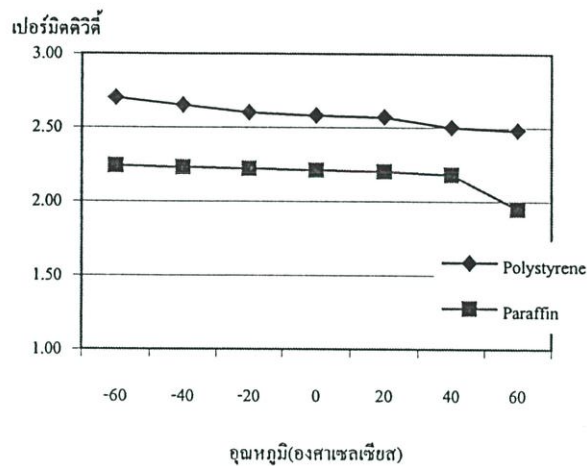
รูปที่ 2.26 ค่าเพอร์มิตติวิตี และความถี่สำหรับ Polar Dielectric Polyvinylacetate

โพลีเมอร์ที่ความถี่ต่ำ ค่าเปอร์มิตติวิตีอาจจะคงเดิม แต่เมื่อความถี่สูงขึ้นจะมีผลทำให้ค่าเปอร์มิตติวิตีลดลง ซึ่งเกิดจากผลของอิเล็กตรอนิกส์ หรือ ไอออนิกโพราไรเซชัน

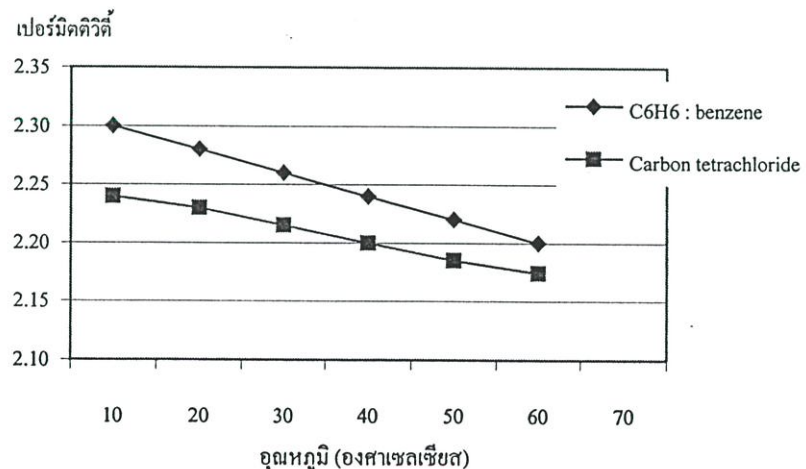
2.8.2 ค่าเพอร์มิตติวิตี (ϵ_r) และอุณหภูมิ (Temperature)

สารประเภทนอนโพล่า การเปลี่ยนแปลงของเปอร์มิตติวิตีต่ออุณหภูมิไม่ได้มาจากผลของอิเล็กตรอนิกส์ หรือ ไอออนิกโพราไรเซชัน แต่เป็นผลมาจากการขยายตัวของปริมาตรของสารจากอุณหภูมิ

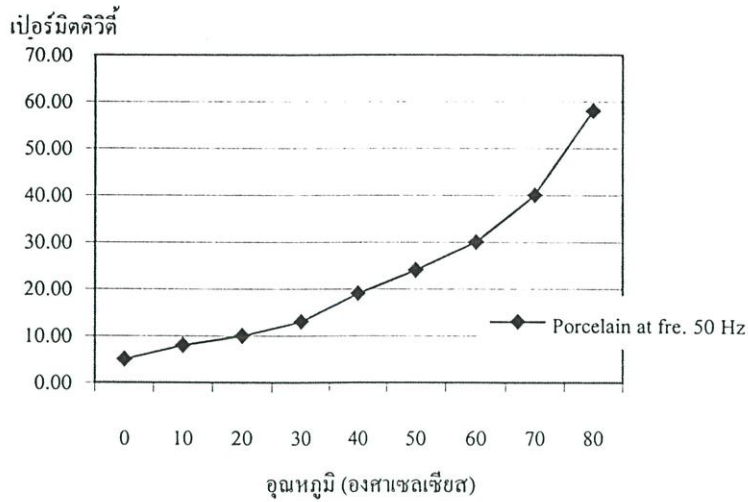
สารประเภทโพล่า การเปลี่ยนแปลงของเปอร์มิตติวิตีต่ออุณหภูมิเป็นผลอย่างมากในสารประเภท ไอออนิก ไดอิเล็กตริกชนิดของแข็ง



รูปที่ 2.27 ค่าเพอร์มิตติวิตี และอุณหภูมิสำหรับ non Polar Dielectric



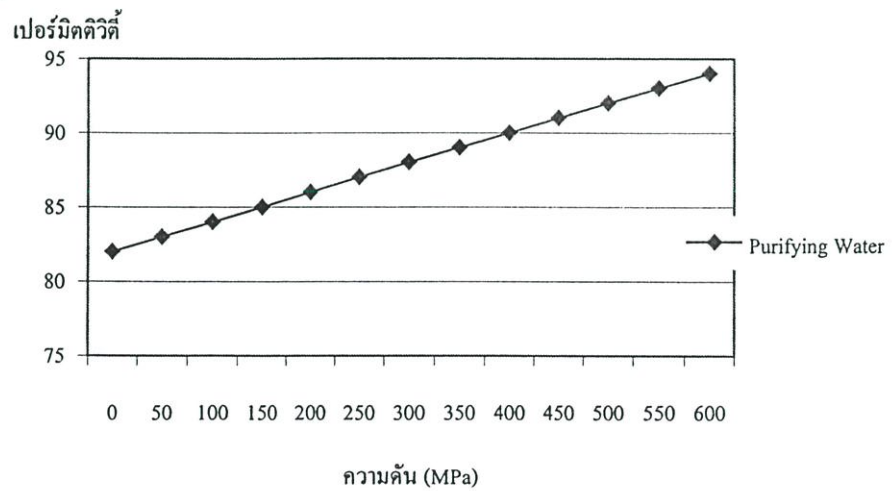
รูปที่ 2.28 ค่าเพอร์มิตติวิตี และอุณหภูมิสำหรับ non Polar Liquid



รูปที่ 2.29 ค่าเปอร์มิตติวิตี และอูณหภูมิจึงสำหรับ Solid Polar Dielectric

2.8.3 ค่าเปอร์มิตติวิตี (ϵ_r) และความดัน (Pressure)

ผลของการเปลี่ยนแปลงความดัน จะทำให้ค่าเปอร์มิตติวิตีของสารเพิ่มขึ้น แต่ไม่มากนัก เช่นใน ก๊าซ ผลของการเพิ่มความดันทำให้ความหนาแน่นของ โมเลกุลในปริมาตรหนาแน่นมากขึ้น ทำให้ค่าเปอร์มิตติวิตีเพิ่มขึ้นบ้าง และในสารประเภท Non Polar Gases เมื่อเพิ่มความดันค่าเปอร์มิตติวิตี จะเพิ่มขึ้นอย่างเป็นเชิงเส้น เช่นเดียวกับสารของแข็ง และของเหลว ในสารของเหลวนี้อาจมีค่าหนึ่งที่มีเปอร์มิตติวิตีสูงสุด จากรูปที่ 2.30 ค่าเปอร์มิตติวิตีของ Purifying Water จะเพิ่มขึ้นตามความดันจนถึง 600 MPa



รูปที่ 2.30 ค่าเปอร์มิตติวิตีของ Purifying Water และความดัน

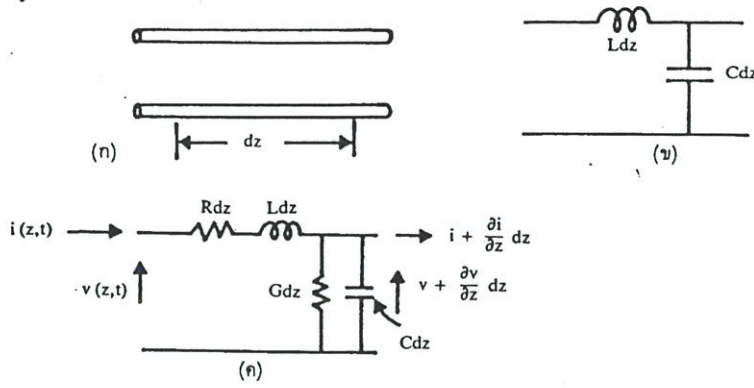
2.9 การวิเคราะห์คุณสมบัติของสายนำสัญญาณโดยใช้ทฤษฎีวงจร

การวิเคราะห์คุณสมบัติของสายตัวนำสัญญาณนั้นทำได้ 2 วิธี ด้วยกัน วิธีแรกเป็นการใช้ทฤษฎีวงจร วิธีที่สองเป็นการใช้ทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านชุดสมการของแมกเวลล์ ข้อแตกต่างของสองวิธีนี้คือ วิธีแรกเป็นวิธีที่วิเคราะห์ปัญหาโดยพิจารณาแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในโครงสร้างของสายนำสัญญาณ และพิจารณาว่ากำลังไฟฟ้านั้นถูกพาไปตามสายตัวนำสัญญาณโดยส่งผ่านไปโนโลหะที่ใช้ทำสายนำสัญญาณนั้น ดังนั้นการวิเคราะห์ปัญหาจึงพุ่งความสนใจไปที่โลหะที่ใช้สายนำสัญญาณ โดยที่ไม่ได้คำนึงถึงปรากฏการณ์ที่เกิดในอวกาศที่ห้อมล้อมตัวนำสายสัญญาณอยู่ วิธีแรกนี้เป็นวิธีที่ใช้กันในช่วงก่อนการประกาศทฤษฎีแม่เหล็กของแมกซ์เวลล์และได้ใช้กับสายนำสัญญาณที่มีแรงดันไฟฟ้าปรากฏให้เห็นระหว่างโลหะของสายนำสัญญาณเท่านั้น หลังจากแมกซ์เวลล์ประกาศทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้าแล้วก็เป็นที่ยอมรับกันว่าพลังงานไฟฟ้าสามารถส่งผ่านบรรยากาศในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ดังนั้นในกรณีของสายนำสัญญาณก็จะมีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าปรากฏอยู่ในอวกาศที่ห้อมล้อมสายนำสัญญาณ และทำให้เกิดแนวความคิดที่ให้ความสำคัญแก่บรรยากาศที่อยู่รอบ ๆ โดยพิจารณาว่าพลังงานไฟฟ้านั้นส่งผ่านตามสายนำสัญญาณในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยมีสายนำสัญญาณเป็นตัวนำคลื่น แนวความคิดดังกล่าวนี้ถูกเรียกว่า ไกด์เวฟ (guided wave) ซึ่งเป็นแนวคิดที่สามารถใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติของสายนำสัญญาณทุกประเภท

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการวิเคราะห์คุณสมบัติของสายนำสัญญาณโดยใช้ทฤษฎีวงจรซึ่งเป็นวิธีที่ง่าย และสามารถเชื่อมโยงกับหลักการของวงจรทั่วไปได้ง่าย นอกจากนี้จะกล่าวถึงการสะท้อนของคลื่น และคลื่นนิ่ง (Standing Wave)

2.9.1 การสร้างสมการคลื่นโดยใช้ทฤษฎี

การวิเคราะห์คุณสมบัติของสายนำสัญญาณโดยใช้ทฤษฎีวงจรมันเป็นวิธีที่อาศัยแนวคิดที่ว่าสายนำสัญญาณที่ทำด้วยโลหะ 2 ชั้น เช่น สายนำสัญญาณแบบสายคู่ขนาน และแบบโคแอกเชียล เป็นต้น จะมีค่าอินดักแตนซ์และค่าคาปาซิแตนซ์กระจายอยู่ตามแนวความยาวของสาย [9] รูปที่ 2.25 (ก) แสดงกรณีของสายตัวนำสัญญาณแบบสายคู่ขนานรูป (ข) แสดงวงจรสมมูลของสายนำสัญญาณในรูป (ก) กรณีที่ไม่มีการสูญเสียในลวดตัวนำ และในฉนวนที่คั่นระหว่างตัวนำ สำหรับรูป (ค) นั้นแสดงวงจรสมมูลในกรณีที่คำนึงถึงความสูญเสีย ดังนั้นเมื่อมีการกระตุ้นให้เกิดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่จุดใดจุดหนึ่ง



รูปที่ 2.31 สายนำสัญญาณแบบสายคู่ขนาน และวงจรสมมูลของส่วนสั้น ๆ ส่วนหนึ่ง

เช่นที่จุดคั่นทาง แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้านั้นก็สามารถส่งผ่านไปตามโครงสร้างของสายนำสัญญาณในลักษณะเดียวกับการส่งผ่านวงจรสมมูลที่กระจายกันอยู่ตามแนวแกนของสายนำสัญญาณ ในสภาพเช่นนี้เมื่อให้ L เป็นค่าอินดักแตนซ์ต่อความยาว 1 เมตร R เป็นค่าความต้านต่อความยาว 1 เมตร C เป็นค่าคาปาซิแตนซ์ต่อความยาว 1 เมตร และ G เป็นค่าคอนดักแตนซ์ต่อความยาว 1 เมตร เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ตำแหน่งห่างกัน dz โดยใช้วงจรสมมูลรูปที่ 2.31 (ค) จากกฎของเคอร์ชอฟจะได้ความสัมพันธ์ในรูปดังต่อไปนี้

$$v - \left(v + \frac{\partial v}{\partial z} dz \right) = \left(Ri + L \frac{\partial i}{\partial t} \right) dz \tag{2.17}$$

$$i - \left(i + \frac{\partial i}{\partial z} dz \right) = \left(Gv + C \frac{\partial v}{\partial t} \right) dz \tag{2.18}$$

โดยใช้ v, i เป็นแรงดันชั่วขณะ และกระแสชั่วขณะที่จุด z เมื่อทำการจัดรูปสมการใหม่จะได้ผลดังต่อไปนี้

$$\frac{\partial v}{\partial z} = - \left(Ri + L \frac{\partial i}{\partial t} \right) \tag{2.19}$$

$$\frac{\partial i}{\partial z} = - \left(Gv + C \frac{\partial v}{\partial t} \right) \tag{2.20}$$

เมื่อแทนค่า I ในสมการที่ 2.20 ลงในสมการที่ 2.19 และแทนค่า v ในสมการที่ 2.19 ลงในสมการที่ 2.20 จะได้ผลเป็นสมการที่ 2.21 และสมการที่ 2.22 ตามลำดับ

$$\frac{\partial^2 v}{\partial z^2} = RGv + (RC + LG)\frac{\partial v}{\partial t} + LC \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \quad (2.21)$$

$$\frac{\partial^2 i}{\partial z^2} = RGi + (RC + LG)\frac{\partial i}{\partial t} + LC \frac{\partial^2 i}{\partial t^2} \quad (2.22)$$

สมการที่ได้นี้โดยทั่วไปเรียกว่าสมการสายนำสัญญาณ (Transmission Line Equation) ซึ่งมีลักษณะเป็นสมการคลื่น (Wave Equation) แบบหนึ่ง

เพื่อให้เข้าใจสมการคลื่นได้อย่างง่ายขึ้น จะขอพิจารณากรณีพิเศษที่ค่า $R=0, G=0$ ซึ่งทำให้สมการที่ 2.21 และ 2.22 ลดรูปลงเป็นดังนี้

$$\frac{\partial^2 v}{\partial z^2} = LC \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \quad (2.23)$$

$$\frac{\partial^2 i}{\partial z^2} = LC \frac{\partial^2 i}{\partial t^2} \quad (2.24)$$

ผลที่ได้นี้คือสมการคลื่นของสายนำสัญญาณที่ไม่มีการสูญเสีย ผลเฉลยของสมการคลื่นตามสมการที่ 2.23 และ 2.24 นี้เป็นที่ทราบกันโดยทั่วไปว่าจะมีรูปร่างดังต่อไปนี้

$$v(z,t) = v_1(v_p t - z) + v_2(v_p t + z) \quad (2.25)$$

$$i(z,t) = i_1(v_p t - z) + i_2(v_p t + z) \quad (2.26)$$

โดยที่ $v_p = 1/\sqrt{LC}$

ทั้งนี้เราทดสอบความถูกต้องได้โดยแทนสมการที่ 2.25 ลงในสมการที่ 2.23 และแทนสมการที่ 2.26 ลงในสมการที่ 2.24 โดยที่ $v_1(v_p t - z)$ และ $v_2(v_p t + z)$ เป็นฟังก์ชันใด ๆ ที่มีค่าอนุพันธ์ต่อเนื่องจะถึงอันดับสองสำหรับตัวแปร $(v_p t - z)$ นั้นแสดงว่าเคลื่อนที่ไปในทิศ $+z$ ในขณะที่ตัวแปร $(v_p t + z)$ แสดงว่าเคลื่อนที่ไปในทิศทาง $-z$ โดยที่ v_p เป็นความเร็วในการเคลื่อนที่ของคลื่น

2.9.2 การแก้สมการคลื่น

การแก้สมการคลื่นในสมการที่ 2.21 และ 2.22 หรือในสมการที่ 2.23 และ 2.24 โดยทั่วไปเราจะพิจารณาแหล่งกำเนิดคลื่นและคลื่นที่ส่งผ่านอยู่นั้นเป็นรูปคลื่นไซน์ เพราะถึงแม้สัญญาณที่ส่งจะไม่ใช้รูปคลื่นไซน์ แต่ตามกฎเกณฑ์ของฟูรีเยร์ทรานฟอร์ม และการกระจายอนุกรมฟูรีเยร์สัญญาณใดๆ จะประกอบด้วยสเปกตรัมของคลื่นไซน์ เพราะฉะนั้นการวิเคราะห์ปัญหาโดยพิจารณาในรูปคลื่นไซน์จึงไม่มีการสูญเสียลักษณะทั่วไป (Generality) ของปัญหาไป เมื่อวิเคราะห์ปัญหาโดยใช้หลักการดังกล่าวนี้ค่าชั่วขณะของ v และ i จะเขียน ในรูปเฟสเซอร์เช่นเดียวกับในทฤษฎีวงจรไฟฟ้าดังนี้

$$v(z,t) = \text{Re}(\sqrt{2}Ve^{j\omega t}) = \frac{1}{\sqrt{2}}(Ve^{j\omega t} + V^*e^{-j\omega t}) \quad (2.27)$$

$$i(z,t) = \text{Re}(\sqrt{2}Ie^{j\omega t}) = \frac{1}{\sqrt{2}}(Ie^{j\omega t} + I^*e^{-j\omega t}) \quad (2.28)$$

โดยที่ v , i เป็นเฟสเซอร์ของแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าซึ่งเป็นฟังก์ชันของ z เมื่อแทนค่า v และ I ในสมการที่ 2.27 และ 2.28 ลงในสมการที่ 2.19 และ 2.20 จะได้ผลดังนี้

$$\frac{dV}{dz} = -(R + j\omega L)I \quad (2.29)$$

$$\frac{dI}{dz} = -(G + j\omega C)V \quad (2.30)$$

เมื่อแทนค่าสมการที่ 2.30 ลงในสมการที่ 2.29 จะได้สมการ V ในรูปต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \frac{d^2V}{dz^2} &= (R + j\omega L)(G + j\omega C)V \\ &= ZYV \end{aligned} \quad (2.31)$$

โดยที่ $z \cong R + j\omega L$, $Y \cong G + j\omega C$ ซึ่งเปรียบเทียบค่าเหมือนอิมพีแดนซ์ต่อ 1 m ของสายนำสัญญาณตามลำดับ ผลเฉลยของสมการที่ 2.31 นี้จะเขียนได้ในรูปต่อไปนี้

$$V = Ae^{-\gamma z} + Be^{\gamma z} \quad (2.32)$$

$$\gamma = \sqrt{ZY} = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} \quad (2.33)$$

โดยที่ A และ B นั้นเป็นค่าสัมประสิทธิ์ที่ถูกกำหนดโดยเงื่อนไขขอบเขตและมีค่าเชิงซ้อนได้ สำหรับ γ คือค่าคงที่ของการส่งผ่าน (Propagation Constant) ตามสมการที่ 2.33 ค่า γ จะเป็นค่าเชิงซ้อนซึ่งโดยทั่วไปเราจะเขียนอยู่ในรูปต่อไปนี้

$$\gamma \equiv \alpha + j\beta \quad (2.34)$$

โดยที่ α คือค่าคงที่ของการลดทอนสัญญาณ (Attenuation Constant) มีหน่วยเป็น Nep/m และ β คือค่าคงที่เฟส (Phase Constant) มีหน่วยเป็น rad/s ในกรณีที่ R และ G ซึ่งเป็นต้นเหตุของการสูญเสียมีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับ ωL และ ωC สมการที่ 2.33 จะประมาณค่าได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \gamma &= j\omega\sqrt{LC} \left[\left(1 + \frac{R}{2j\omega L} \right) \left(1 + \frac{G}{2j\omega C} \right) \right] \\ &\cong j\omega\sqrt{LC} + \frac{1}{2} \left(R\sqrt{\frac{C}{L}} + G\sqrt{\frac{L}{C}} \right) \end{aligned} \quad (2.35)$$

นั่นคือจะได้

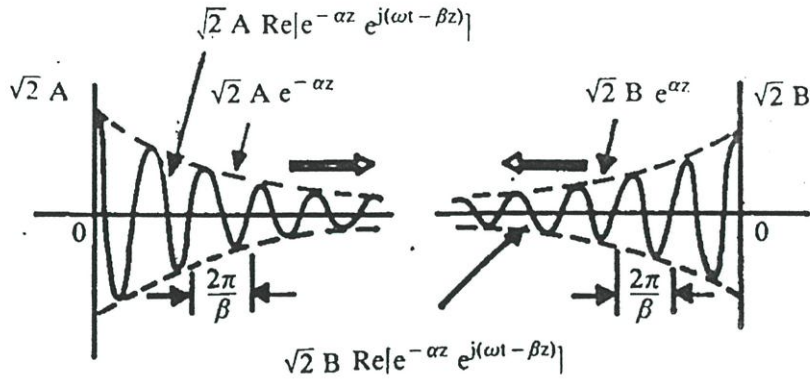
$$\alpha \cong \frac{1}{2} \left(R\sqrt{C/L} + G\sqrt{L/C} \right) \quad (2.36)$$

$$\beta \cong \omega\sqrt{LC} \quad (2.37)$$

จากค่า α ในสมการที่ 2.36 จะเห็นว่าพจน์ที่หนึ่งเกิดจากความต้านทานในลวดตัวนำ ส่วนพจน์ที่สองนั้นเกิดจากความไม่สมบูรณ์แบบของสารไดอิเล็กตริกที่คั่นระหว่างตัวนำ เมื่อแทนค่าสมการที่ 2.32 และสมการที่ 2.34 ลงในสมการที่ 2.27 จะได้ค่าชั่วขณะของ v ในรูปดังต่อไปนี้

$$v(z, t) = \text{Re} \left(\sqrt{2} A e^{-\alpha z} e^{j(\omega t - \beta z)} \right) + \text{Re} \left(\sqrt{2} B e^{\alpha z} e^{j(\omega t + \beta z)} \right) \quad (2.38)$$

พจน์แรกทางขวามือของสมการที่ 2.38 คือคลื่นที่เคลื่อนที่ไปในทิศทาง $-z$ ในขณะที่พจน์ที่สองเป็นคลื่นที่เคลื่อนที่ไปในทิศทาง $+z$ และคลื่นทั้งสองจะมีขนาดเล็กลงเมื่อคลื่นเคลื่อนที่ไปรูปที่ 2.32 แสดงภาพของคลื่นทั้งสองดังกล่าวนี้ ในกรณีอุดมคติ คือ $R=0$ และ $G=0$ ซึ่งไม่เกิดขึ้นในภาคปฏิบัติ ค่า α จะเท่ากับศูนย์ทำให้ขนาดของคลื่นไม่เล็กลงเมื่อส่งผ่านไปตามแกน z



รูปที่ 2.32 รูปคลื่นไซน์ที่เคลื่อนที่ไปในทิศทาง $+z$ และไปทิศทาง $-z$

เนื่องจาก β แสดงการเปลี่ยนแปลงของเฟสตามตำแหน่ง z จึงมีความสัมพันธ์กับความยาวคลื่นตามแกน z คือ λ_g ในรูปต่อไปนี้

$$\beta = 2\pi/\lambda_g \quad (2.39)$$

สำหรับการหาผลเฉลยของ i นั้นจะทำได้โดยแทนสมการที่ 2.32 ลงในสมการที่ 2.33 ซึ่งได้ผลดังนี้

$$I = A\sqrt{\frac{Y}{Z}}e^{-\gamma z} - B\sqrt{\frac{Y}{Z}}e^{\gamma z} \quad (2.40)$$

เมื่อเขียนค่าชั่วขณะของกระแสไฟฟ้า i จะได้ผลดังนี้

$$i(z, t) = \text{Re}(\sqrt{2}A\sqrt{Y/Z}e^{-\alpha z}e^{j(\omega t - \beta z)}) - \text{Re}(\sqrt{2}B\sqrt{Y/Z}e^{\alpha z}e^{j(\omega t + \beta z)}) \quad (2.41)$$

โดยพจน์แรก และพจน์ที่สองทางขวามือแสดงคลื่นที่ส่งผ่านไปทิศทาง $+z$ และทิศทาง $-z$ ตามลำดับ เนื่องจากตามทฤษฎีของวงจรไฟฟ้าทั่วไปเมื่อเรานำแรงดันหารด้วยกระแสที่ชั่วเดียวกันผลที่

ได้จะเป็นอิมพีแดนซ์ของวงจรที่มองจากซ้าย ๆ นั้น ในกรณีของคลื่นแรงดันไฟฟ้า และคลื่นกระแสไฟฟ้าที่กำลังพิจารณาอยู่นี้ เมื่อนำคลื่นแรงดันไฟฟ้า และคลื่นกระแสไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ไปในทิศเดียวกันมาหาอิมพีแดนซ์ในลักษณะเดียวกันโดยใช้สมการที่ 2.32 กับสมการที่ 2.40 หรือใช้สมการที่ 2.38 กับสมการที่ 2.41 ผลที่ได้เป็นดังนี้

$$\frac{V^+}{I^+} = \frac{V^-}{I^-} = \sqrt{\frac{Z}{Y}} \equiv Z_c \quad (2.42)$$

โดยที่ V^+ , I^+ แสดงคลื่นที่เคลื่อนที่ไปในทิศ $+z$ และ V^- , I^- แสดงคลื่นที่เคลื่อนที่ไปในทิศ $-z$ ผลที่ได้คือ Z_c นี้เรียกว่าอิมพีแดนซ์ลักษณะสมบัติของสายนำสัญญาณ (Characteristics Impedance) เมื่อแทนค่า Z , Y ลงในสมการที่ 2.27 แล้วใช้เงื่อนไขที่ R , G เล็กกว่า ωL , ωC มาก ๆ จะสามารถประมาณ Z_c ได้ในรูปดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} Z_c &= \sqrt{\frac{Z}{Y}} = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \\ &\equiv \sqrt{\frac{L}{C}} \left\{ 1 - \frac{j}{2} \left(\frac{R}{\omega L} - \frac{G}{\omega C} \right) \right\} \end{aligned} \quad (2.43)$$

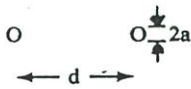

สำหรับกรณีที่ $R=0$, $G=0$ นั้น Z_c จะมีค่าเป็นดังนี้

$$Z_c = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2.44)$$

ตามสมการที่ (2.43) เนื่องจากพจน์ที่เป็นค่าจินตภาพนั้นอยู่ในรูปของผลต่างของ $R/\omega L$ และ $G/\omega C$ เพราะฉะนั้นถึงแม้จะมีค่า R และ G บ้าง ค่าจินตภาพของสมการที่ 2.43 จะมีขนาดเล็กมาก โดยทั่วไปจึงมักอนุโลมให้ใช้ค่า Z_c ตามสมการที่ 2.44 เป็นค่าอิมพีแดนซ์ลักษณะสมบัติได้ เนื่องจากค่า Z_c , v_p , α , β สามารถหาได้จากค่า L , C , R , G ของสายนำสัญญาณ ดังนั้นสำหรับสายนำสัญญาณที่มีโครงสร้างไม่ยุ่งยาก และสามารถหา L , C , R , G ได้ก็จะหาค่า Z_c , v_p , α และ β ได้ ตารางที่ 2.2 แสดงค่าต่าง ๆ เหล่านี้ของสายสัญญาณแบบสายคู่ขนาน และแบบโคแอกเชียล ซึ่งเป็นสายนำสัญญาณที่มีใช้กว้างขวาง และสามารถทำการวิเคราะห์คุณสมบัติโดยใช้ทฤษฎีวงจรตามที่กล่าวมานี้ อนึ่ง การหาค่า L และ C จะหาอ่านได้ตามหนังสือสนามไฟฟ้า และ

สนามแม่เหล็กทั่วไป สำหรับการหาค่า R และ G นั้นคิดจากความต้านทานผิว (Surface Resistance) และค่า $\tan \delta$ ของสารไดอิเล็กตริกตามลำดับ

ตารางที่ 2.2 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายนำสัญญาณแบบสายคู่ขนาน และแบบโคแอกเซียล

โครงสร้าง	สายคู่ขนาน	สายโคแอกเซียล
		
$L(H/m)$	$\frac{\mu_0}{\pi} \cosh^{-1}\left(\frac{d}{2a}\right) \cong \frac{\mu_0}{\pi} \ln\left(\frac{d}{a}\right)$ ($d \gg a$)	$\frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{b}{a}\right)$
$C(F/m)$	$\frac{\pi\epsilon}{\cosh^{-1}(d/2a)} \cong \frac{\pi\epsilon}{\ln(d/a)}$ ($d \gg a$)	$\frac{2\pi\epsilon}{\ln(b/a)}$
$R(\Omega/m)$	$\frac{1}{a} \sqrt{\frac{\mu_0 f}{\pi\sigma}}$	$\left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b}\right) \sqrt{\frac{\mu_0 f}{4\pi\sigma}}$
$G(S/m)$	$\omega C \tan \sigma$	$\omega C \tan \sigma$
$Z_c(\Omega)$	$\frac{120}{\sqrt{\epsilon_r}} \cosh^{-1} \frac{d}{2a} \cong \frac{120}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln\left(\frac{d}{a}\right)$ ($d \gg a$)	$\frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \frac{b}{a}$
$\alpha_e = R/2Z_c$ (ส่วนที่เกิดจากตัว) Nep/m	$\frac{\sqrt{\epsilon_r \mu_0 f / \pi\sigma}}{240a \ln(d/a)}$ ($d \gg a$)	$\left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b}\right) \frac{\sqrt{\epsilon_r \mu_0 f / 4\pi\sigma}}{120 \ln(b/a)}$
$\alpha_d = GZ_c/2$ (ส่วนที่เกิดจากไดอิเล็กตริก) Nep/m	$\frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \omega C \tan \sigma \ln\left(\frac{d}{a}\right)$ ($d \gg a$)	$\frac{30}{\sqrt{\epsilon_r}} \omega C \tan \sigma \ln\left(\frac{d}{a}\right)$
$\beta(rad/m)$	$\omega \sqrt{\mu_0 \epsilon}$	$\omega \sqrt{\mu_0 \epsilon}$
v_p	$1/\sqrt{\mu_0 \epsilon}$	$1/\sqrt{\mu_0 \epsilon}$

2.9.3 ความเร็วของคลื่นที่แพร่ไปตามสายส่ง

ความเร็วของคลื่นที่แพร่หรือเคลื่อนที่ไปตามความยาวของสายส่งจะเป็นค่าคงที่ ความถี่ และค่าคงตัวเฟสของสัญญาณบนสายส่งจะมีความสัมพันธ์ที่ขึ้นกับความเร็วตามสมการดังนี้ [11]

$$V_p = \frac{\omega}{\beta} \quad (2.45)$$

ω ขึ้นอยู่กับสัญญาณที่ใช้ว่ามีความถี่เท่าไร ซึ่งขึ้นอยู่กับเครื่องกำเนิด ω เป็นค่าที่กำหนดโดยผู้ใช้แต่ค่าคงตัวเฟสเป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับสายส่ง เกี่ยวข้องกับระยะทางที่คลื่นเคลื่อนที่ไปเมื่อเทียบกับเวลาที่สัญญาณเปลี่ยนไปหนึ่งรอบ นั่นคือความถี่ของสัญญาณ

เพื่อให้การวิเคราะห์ในที่นี้ง่ายขึ้น ให้เริ่มด้วยสายส่งไร้ความสูญเสีย จากสมการค่าคงตัวการแพร่พบว่า

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{(r + j\omega l) + (g + j\omega c)} \quad (2.46)$$

ถ้าการใช้งานมีเงื่อนไขทำให้ $r \ll \omega l$ และ $g \ll \omega c$ แล้วจะพบว่า

$$\beta = \omega\sqrt{\ell c} \quad (2.47)$$

เมื่อแทน β ในสมการที่ 2.45 จะพบว่า

$$V_p = \frac{1}{\sqrt{\ell c}} \quad (2.48)$$

เมื่อแทนค่า ℓ และ c ที่ให้ไม่ว่าสายส่งนั้นจะเป็นสายส่งเส้นคู่หรือสายส่งโคแอดเซียลก็ตามจะพบว่า

$$V_p = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} \quad (2.49)$$

โดยที่ μ_d คือสภาพให้ซึมได้ของสารที่อยู่รอบตัวนำที่ใช้ทำสายส่งให้อธิบายสมบัติทางแม่เหล็ก และ ϵ_d คือสภาพยอมได้ของสารที่อยู่รอบตัวนำที่ใช้ทำสายส่งให้อธิบายสมบัติทางไฟฟ้า จาก สมการนี้พบว่าความเร็วของคลื่นที่แพร่ไปตามสายส่งขึ้นกับสมบัติของสารที่อยู่รอบๆ ตัวนำที่

ใช้ทำสายส่งไม่ได้ขึ้นกับตัวนำที่ใช้ทำสายส่ง เพราะคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นกระจายอยู่ภายนอกของตัวนำทิศทางตามความยาวของตัวนำของสายส่ง และคลื่นเคลื่อนที่ไปในสารที่อยู่รอบๆ โดย ทิศทางการเคลื่อนที่ถูกนำ (Guide) ในทิศทางตามความยาวสายของตัวนำของสายส่ง

ปกติแล้วการบอกสภาพให้ซึมได้และสภาพยอมได้ของสารใดๆ มักจะระบุว่าคุณค่าดีกว่าหรือเลวกว่าสูญญากาศเป็นกี่เท่าดังนี้

$$\mu = \mu_r \mu_0 \quad (2.50)$$

$$\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0 \quad (2.51)$$

โดยที่ μ_r เรียกว่าสภาพให้ซึมได้สัมพัทธ์ (Relative Permeability) ของสารใช้บอกว่าคุณค่าสารนี้มีสภาพให้ซึมได้เป็นกี่เท่าของสูญญากาศ สำหรับสูญญากาศ μ_r มีค่าเท่ากับ 1

μ_0 คือสภาพให้ซึมได้ของสูญญากาศ มีค่า 400π nH/m

ϵ_r เรียกว่าค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ (Relative Dielectric Constant) ของสารมีค่าเท่ากับ 1 สำหรับ ϵ_r สูญญากาศ

ϵ_0 คือสภาพยอมได้ของสูญญากาศ มีค่า 8.854 pF/m

เช่น สารพอลิเอทิลีนมีค่า $\epsilon_r = 2.2$ หมายความว่าสารนี้มีสภาพยอมได้ต่อสนามไฟฟ้าดีกว่าสูญญากาศ 2.2 เท่า ตามปกติแล้วสารไดอิเล็กตริกที่เป็นฉนวนไฟฟ้าโดยทั่วไปจะไม่ใช่เป็นสารแม่เหล็กและจะมีสภาพให้ซึมได้ของสารใกล้เคียงกับสูญญากาศจึงมี $\mu_r = 1$ เมื่อแทน μ_d และ ϵ_d ลงในสมการที่ 2.49 จะได้ความเร็วของคลื่นที่แพร่ไปตามความยาวของสายส่งดังนี้

$$V_p = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \mu_r \epsilon_0 \epsilon_r}} \quad (2.52)$$

ดังนั้นความเร็วของคลื่นที่เคลื่อนไปตามความยาวของสายส่งซึ่งมีสูญญากาศอยู่รอบๆ ตัวนำที่ทำสายส่งจะมีค่า

$$V_s = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \quad (2.53)$$

ซึ่งมีค่าเท่ากับความเร็วของแสงหรือความเร็วของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในสุญญากาศ

$$\frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = \frac{1}{\sqrt{400\pi \text{H/m} \times 8.854 \text{pF/m}}} = 3 \times 10^8 \text{ m/s} \quad (2.54)$$

ดังนั้นเขียนสมการที่ 2.52 ใหม่แสดงความเร็วเมื่อเทียบกับความเร็วของแสงในสุญญากาศได้ดังนี้

$$V_p = \frac{V_s}{\sqrt{\mu_r \epsilon_r}} \quad (2.55)$$

นั่นคือ ตัวประกอบความเร็ว (Velocity Factor) บางครั้งอาจเรียกว่าอัตราส่วนความเร็ว (Velocity Ratio) ของสายส่งคือค่าที่ใช้บอกว่าคุณสมบัติบนสายส่งมีความเร็วเป็นกี่เท่าของความเร็วของแสงหรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในสุญญากาศ ดังนี้

$$V_F = \frac{V_p}{V_s} = \frac{1}{\sqrt{\mu_r \epsilon_r}} \quad (2.56)$$

บางครั้งอาจจะระบุความเร็วของคลื่นบนสายส่งเป็นร้อยละของความเร็วแสงในสุญญากาศ นั่นคือ คุณตัวประกอบ VF ข้างต้นด้วย 100%

โดยทั่วไป ฉนวนไฟฟ้าเป็นสารไดอิเล็กตริกที่มีค่า $\mu_r \cong 1$ ตามที่ได้กล่าวมาแล้วในข้างต้น จึงสามารถหาความเร็วของคลื่นที่แพร่ไปตามความยาวของสายส่ง [6, 11] โดยเฉพาะสายส่งเส้นคู่ และสายส่งโคแอกเซียลได้ดังนี้

$$V_p = \frac{V_s}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.57)$$

หรือ

$$V_F = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.58)$$

เนื่องจากสารไดอิเล็กตริกโดยทั่วไปจะมีค่า ϵ_r มากกว่า 1 จึงทำให้ VF มีค่าน้อยกว่า 1 แสดงว่าสายส่งที่มีบริเวณโดยรอบของตัวนำที่ใช้ทำสายส่งเป็นสารไดอิเล็กตริก นอกเหนือจากเป็น

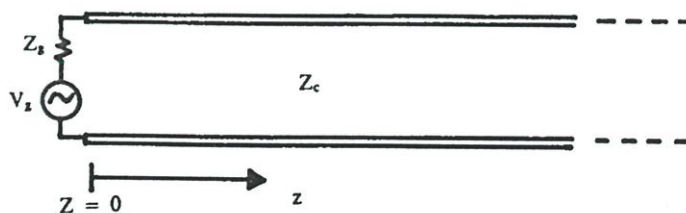
สูญญากาศแล้วความเร็วของคลื่นที่เคลื่อนที่ไปตามความยาวของสายส่งจะมีความเร็วต่ำกว่าความเร็วของแสงในสูญญากาศ

2.10 การสะท้อนของคลื่น และคลื่นนิ่ง

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการส่งผ่านของคลื่นจากแหล่งกำเนิดสัญญาณต้นทางไปตามสายนำสัญญาณภายใต้เงื่อนไขขอบเขตแบบต่าง ๆ คือ กรณีที่สายยาวเป็นอนันต์ กรณีที่สายมีความยาวจำกัด และมีโหลดต่ออยู่ที่ปลายสายซึ่งเป็นกรณีที่มีคลื่นสะท้อน การเกิดคลื่นนิ่ง (Standing Wave) บนสายนำสัญญาณ

2.10.1 คลื่นจร (Traveling wave)

กรณีที่สายนำสัญญาณมีความยาวเป็นอนันต์และถูกป้อนด้วยแหล่งกำเนิดสัญญาณ v_g ซึ่งมีอิมพีแดนซ์ภายใน เป็น Z_g ดังในรูปที่ 2.33 การที่สายยาวอนันต์ก็หมายถึง $z = \infty$ ซึ่งเมื่อพิจารณาผลเฉลยของคลื่นแรงดันไฟฟ้า และคลื่นกระแสไฟฟ้าที่กล่าวไว้ในสมการที่ 2.32 และสมการที่ 2.40 ในหัวข้อ 2.1 จะพบว่าถ้า $B \neq 0$ พจน์ที่สองจะมีค่าเป็นอนันต์ตามค่า z ซึ่งขัดแย้งกับปรากฏการณ์ทางกายภาพ ดังนั้นจะได้ว่า $B = 0$ ซึ่งหมายถึงจะไม่มีคลื่นเคลื่อนที่ในทิศ $-z$ เนื่องจากรูปที่ 2.23 การส่งผ่านของคลื่นในทิศ $+z$ ถือว่าเป็นทิศทางปกติหรือมีการส่งผ่านไปด้านหน้าคลื่นที่ส่งผ่านไปในทิศ $-z$ จะถือว่าเป็นคลื่นสะท้อนในกรณีที่สายยาวอนันต์นี้เนื่องจาก $B = 0$ จึงไม่มีคลื่นสะท้อน และตรงกับความเป็นจริงที่ว่าคลื่นที่ถูกป้อนจากต้นทางจะสามารถส่งผ่านไปในทิศ $+z$ ตามโครงสร้างของสายนำสัญญาณโดยไม่มีการสะท้อนหรือสะท้อนกลับ คลื่นที่ส่งผ่านในสภาพในสภาพที่กล่าวมานี้เรียกว่าคลื่นจร

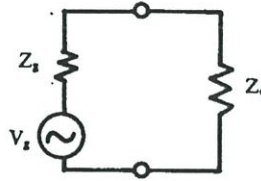


รูปที่ 2.33 สายนำสัญญาณที่มีความยาวอนันต์

ในลำดับต่อไปจะพิจารณาการหาขนาดของคลื่นจรนี้โดยใช้รูปที่ 2.33 ประกอบและคิดในรูปเฟสเซอร์ของสัญญาณ ตามรูปเนื่องจากที่ตำแหน่ง $z = 0$ อิมพีแดนซ์ที่มองเข้าไปทางสายนำสัญญาณเท่ากับอิมพีแดนซ์ลักษณะสมบัติของสายนำสัญญาณคือ Z_c ดังนั้นจึงเปรียบเสมือนมี

อิมพีแดนซ์ Z_c มาต่ออยู่ดังวงจรสมมูลที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.34 จากวงจรสมมูลนี้เราสามารถหาค่าของแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อม Z_c ได้ดังนี้

$$V_i = \frac{Z_c}{Z_g + Z_c} V_g \quad (2.59)$$



รูปที่ 2.34 วงจรสมมูลสายนำสัญญาณที่มีความยาวอนันต์

ผลที่ได้จากสมการที่ 2.59 นี้จะเป็นขนาดของคลื่นแรงดันไฟฟ้าที่ตำแหน่ง $z = 0$ ซึ่งจะส่งผ่านไปตามสายนำสัญญาณ เนื่องจากตามหลักการของการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Maximum Power Transfer) ค่า Z_g และ Z_c จะต้องมีความสัมพันธ์ในรูป $Z_g = Z_c^*$ แต่เนื่องจาก Z_c จะเป็นค่าจริง ดังนั้น Z_g จะมีค่าเป็นจริง และมีค่าเท่ากับ Z_c ดังนั้นในภาคปฏิบัติจึงต้องสร้างเครื่องกำเนิดสัญญาณหรือเครื่องส่งให้มีอิมพีแดนซ์ภายในเท่ากับ Z_c ยกตัวอย่างเช่น ถ้านำไปใช้กับสายโคแอกเชียลแบบ 50Ω อิมพีแดนซ์ภายในของเครื่องกำเนิดสัญญาณก็ต้องเท่ากับ 50Ω ด้วย เป็นต้น ในกรณีเช่นนี้เราเรียกว่ามีการแมทอิมพีแดนซ์ที่สมบูรณ์ที่ต้นทาง และขนาดของแรงดันต้นทางก็จะมีค่าเป็นดังนี้

$$V_i = \frac{V_g}{2} \quad (2.60)$$

คลื่นที่มีขนาดดังสมการที่ 2.59 หรือสมการที่ 2.60 ส่งผ่านไปตามสายนำสัญญาณก็จะมีการเปลี่ยนแปลงไปตามตำแหน่ง คลื่นแรงดันไฟฟ้าและคลื่นกระแสไฟฟ้าที่ได้เขียนได้ในรูปต่อไปนี้

กรณี $Z_g \neq Z_c$,
$$V(z) = \frac{Z_c}{Z_g + Z_c} V_g e^{-(\alpha + j\omega)z}$$

$$I(z) = \frac{Z_c}{Z_g + Z_c} e^{-(\alpha + j\beta)z} \quad (2.61)$$

กรณี

$$Z_g = Z_c, \quad V(z) = \frac{V_g}{2} e^{-(\alpha+j\beta)z}$$

$$I(z) = \frac{V_g}{2Z_c} e^{-(\alpha+j\beta)z} \quad (2.62)$$

และจะสามารถหาค่ากำลังไฟฟ้าที่ตำแหน่ง z ได้ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} p(z) &= \operatorname{Re}[V(z)I^*(z)] \\ &= \frac{\operatorname{Re}[Z_c]V_g^2}{|Z_g + Z_c|^2} e^{-2\alpha z} \end{aligned} \quad (2.63)$$

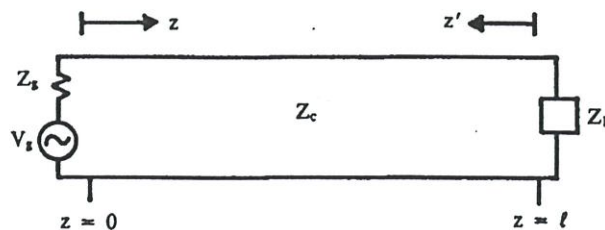
ในกรณีที่ Z_c, Z_g เป็นค่าจริง และมีค่าเท่ากัน สมการที่ 2.63 จะเขียนได้ดังนี้

$$P(z) = \begin{cases} \frac{V_g^2}{4Z_c} e^{-2\alpha z} & \alpha \neq 0 \\ \frac{V_g^2}{4z_c} & \alpha = 0 \end{cases} \quad (2.64)$$

ผลที่ได้จะเป็นกำลังคลื่นสูงสุดที่คลื่นจรพาไปตามสายนำสัญญาณ กรณีที่ $\alpha = 0$ นั้นเป็นกรณีอุดมคติ และไม่เกิดขึ้นในทางปฏิบัติ

2.10.2 การสะท้อนของคลื่น

ในกรณีที่สายนำสัญญาณไม่ได้ยาวอนันต์หรือมีค่าอิมพีแดนซ์ไม่สม่ำเสมอตามแกน z คลื่นจรที่ส่งผ่านไปจะกลับจะได้รับผลกระทบจากสภาพนั้น ๆ ยกตัวอย่างเช่น ถ้าสายมีความยาวจำกัดแล้วปลายสายต่อไว้กับโหลดที่มีค่าเป็น Z_L ดังที่แสดงดังรูปที่ 2.35 เงื่อนไขขอบเขตที่ปลายสายจะทำให้เกิด



รูปที่ 2.35 สายนำสัญญาณที่ต่อโหลดไว้ที่ปลายสาย

คลื่นสะท้อนกลับมาจากทิศทาง $-z$ การหาขนาดของคลื่นสะท้อนจะทำได้โดยพิจารณาจากเงื่อนไขขอบเขตดังนี้คือ ก่อนอื่นถ้าให้ $Z_g = Z_c$ แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ตำแหน่ง z จะเขียนได้ดังนี้

$$V(z) = \frac{V_g}{2} e^{-\gamma z} + B e^{\gamma z} \quad (2.65)$$

$$I(z) = \frac{V_g}{2Z_c} e^{-\gamma z} - \frac{B}{Z_c} e^{\gamma z} \quad (2.66)$$

เนื่องจากความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่คร่อมโหลดจะต้องเป็น $V_L/I_L = Z_L$ ดังนั้นเมื่อแทนค่า $z = l$ ลงในสมการที่ 2.65 และสมการที่ 2.66 แล้วใช้เงื่อนไขขอบเขตดังกล่าวนี้สามารถแก้สมการหาค่า B ได้ดังนี้

$$B = \frac{Z_L - Z_c}{Z_L + Z_c} \frac{V_g}{2} e^{-2\gamma l} \quad (2.67)$$

เมื่อแทนค่า B ลงในสมการที่ 2.67 และในสมการที่ 2.65 และสมการที่ 2.66 จะได้ผลดังนี้

$$V(z) = \frac{V_g}{2} e^{-\gamma z} + \frac{V_g}{2} e^{-\gamma l} \frac{Z_L - Z_c}{Z_L + Z_c} e^{-\gamma(l-z)} \quad (2.68)$$

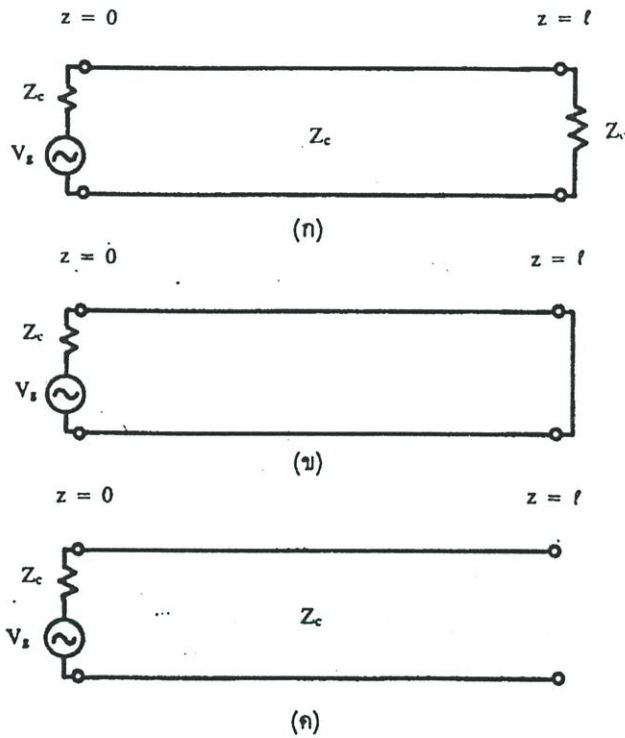
$$I(z) = \frac{V_g}{2Z_c} e^{-\gamma z} + \frac{V_g}{2Z_c} e^{-\gamma l} \frac{Z_L - Z_c}{Z_L + Z_c} e^{-\gamma(l-z)} \quad (2.69)$$

อัตราส่วนระหว่างคลื่นสะท้อนกับคลื่นขาเข้าที่ตำแหน่งของโหลดนี้เราเรียกว่าสัมประสิทธิ์ของการสะท้อน (Reflection Coefficient) ซึ่งจะหาได้โดยการนำพจน์ที่สองของสมการที่ 2.68 หาคิวพจน์ที่หนึ่ง และให้ $z = l$ ผลที่ได้จะเป็นดังนี้[7]

$$\Gamma_L = \frac{Z_L - Z_c}{Z_L + Z_c} \quad (2.70)$$

เมื่อทำการพิจารณารายละเอียดของ Γ_L จะเห็นได้ว่า สำหรับโหลดแบบแพสซีฟโดยทั่วไป $\text{Re}(Z_L) \geq 0$ เสมอ ดังนั้น $|\Gamma_L| \leq 1$ เสมอ กรณีพิเศษที่น่าสนใจได้แก่กรณีที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.36 กรณีแรกได้แก่ กรณีที่ $|\Gamma_L| = 0$ ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อ $Z_L = Z_c$ และเป็นสภาพที่โหลดปลายสายแมตซ์

ได้พอดีกับอิมพีแดนซ์ ลักษณะของสายนำสัญญาณ ในสภาพดังกล่าวนี้จะไม่มีการสะท้อนกลับ มา และหมายถึงกำลังไฟฟ้าที่เข้าสู่โหลดถูกใช้หมดที่โหนดนั้น กรณีที่น่าสนใจอีกกรณีหนึ่งคือ $|\Gamma_L| = 1$ ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อ $Z_L = 0$ หรือ $Z_L = \infty$ ซึ่งเป็นสภาพที่ปลายสายต่อลัดวงจรและปลายสายเปิดวงจรตามลำดับ กรณีปลายสายลัดวงจรนั้น $|\Gamma_L| = -1$ กรณีที่ปลายสายเปิดวงจรนั้น $|\Gamma_L| = 1$ ทั้งสองกรณีนี้จะมีขนาดเท่ากับคลื่นที่เข้าสู่ปลายสายนั้นหมายถึงกำลังคลื่นทั้งหมดถูกสะท้อนกลับ ยังเครื่องกำเนิดสัญญาณ และเป็นสภาพที่ไม่พึงปรารถนา เพราะจะทำให้เครื่องกำเนิดสัญญาณ ร้อนจัดจนทำงานผิดปกติหรือเสียหายได้ โดยทั่วไปเพื่อป้องกันปัญหาในเรื่องลักษณะดังกล่าวมานี้ ที่ขั้วเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดสัญญาณ หรือ เครื่องส่ง มักต่อไว้ด้วยชิ้นส่วนไอโซเลเตอร์ (Isolator) หรือตัวลดทอนสัญญาณ (Attenuator) ซึ่งจะทำหน้าที่ดูดคลื่นกำลังคลื่นที่สะท้อนกลับมาจากปลายสายไม่ให้ไปรบกวนเครื่องกำเนิดสัญญาณ



รูปที่ 2.36 สายนำสัญญาณที่ปลายสายต่อไว้ด้วยเมทซิง โหลด (ก) ปลายลัดวงจร (ข) และปลายสายเปิดวงจร(ค)

การหาลำดับกำลังไฟฟ้าส่วนที่สะท้อนกลับที่ปลายสายจะทำได้โดยการพิจารณาจากพจน์ที่สองของสมการที่ 2.68 และสมการที่ 2.69 เมื่อเขียน $(Z_L - Z_c)/(Z_L + Z_c) = \Gamma_L$ จะได้ดังนี้

$$P_r = \text{Re} \left[\Gamma_L \frac{V_g}{2} e^{-(\alpha+j\beta)l} \times \Gamma_L^* \frac{V_g}{2Z_c} e^{-(\alpha-j\beta)l} \right]$$

$$= |\Gamma_L|^2 \frac{V_g}{4Z_c} e^{-2\alpha l} \quad (2.71)$$

เนื่องจากกำลังคลื่นขาเข้าที่โหลดปลายสายเท่ากับ $(V_g^2/4Z_c)e^{-2\alpha l}$ อัตราส่วนระหว่างกำลังคลื่นที่สะท้อนกลับกับกำลังคลื่นขาเข้าจะเท่ากับ $|\Gamma_L|^2$

สิ่งที่ต้องเน้นไว้ในที่นี้คือค่า Γ_L และค่า P_r ที่คำนวณตามสมการที่ 2.70 และสมการที่ 2.71 นั้นเป็นการพิจารณาที่ตำแหน่งปลายสายคือ $z = l$ ที่ตำแหน่ง z ใดๆ ระหว่างทางนั้นค่าทั้งสองนี้จะมีค่าเปลี่ยนแปลงไป ก่อนอื่น เราสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ของการสะท้อนที่ตำแหน่ง z ได้จากอัตราส่วนของพจน์ที่สองและพจน์ที่หนึ่งของสมการที่ 2.68 ซึ่งได้ผลดังนี้

$$\begin{aligned} \Gamma_L(z) &= \frac{Z_L - Z_c}{Z_L + Z_c} e^{-2\gamma(l-z)} \\ &= \Gamma_L e^{-2\gamma(l-z)} \end{aligned} \quad (2.72)$$

สำหรับกำลังไฟฟ้าสะท้อนกลับที่ตำแหน่ง z นั้นจะหาได้โดยใช้พจน์ที่สองของสมการ(2.68) และพจน์ที่สองของสมการที่ 2.69 ซึ่งได้ผลดังนี้

$$\begin{aligned} P_r &= \text{Re} \left[\Gamma_L \frac{V_g}{2} e^{-(\alpha+j\beta)(2l-z)} \times \Gamma_L^* \frac{V_g}{2Z_c} e^{-(\alpha+j\beta)(2l-z)} \right] \\ &= |\Gamma_L|^2 \frac{V_g^2}{4Z_c} e^{-2\alpha(2l-z)} \end{aligned} \quad (2.73)$$

ในกรณีที่ α มีค่าเล็กมากและ l มีค่าไม่มากนัก เราอาจประมาณค่าให้ $\alpha = 0$ ในกรณีเช่นนี้สมการที่ 2.72 และสมการที่ 2.73 จะลดรูปลงดังนี้

$$\Gamma_L(z) = \Gamma_L e^{-2j\beta(l-z)} \quad (2.74)$$

$$P_r(z) = |\Gamma_L|^2 \frac{V_g^2}{4Z_c} \quad (2.75)$$

ผลที่ได้จากสมการที่ 2.74 นั้นแสดงให้เห็นว่า ค่า $\Gamma_L(z)$ จะมีเฟสเปลี่ยนแปลงไปตามตำแหน่งของ z ในขณะที่สมการที่ 2.75 แสดงว่ากำลังคลื่นสะท้อนจะไม่เปลี่ยนแปลงไปตามตำแหน่ง z ซึ่งเป็นเรื่องปกติเพราะถ้าไม่มีการลดทอนสัญญาณในสายนำสัญญาณกำลังคลื่นที่สะท้อนกลับก็จะมีขนาดเท่ากับที่ปลายสายโดยไม่เล็กลงแต่อย่างใด ในสภาพเช่นนี้กำลังคลื่นที่ใช้ไปในโหลดจะเขียนได้ดังนี้

$$P_L = P - P_r(l) = (1 - |\Gamma_L|^2) \frac{V_g^2}{4Z_c} \quad (2.76)$$

2.11 คลื่นนิ่ง(Standing Wave)

ในหัวข้อก่อนได้อธิบายไว้ว่ากรณีที่ปลายสายต่อไว้ด้วยแมทซิง โหลด (Matching Load) หรือสายยาวอนันต์จะไม่มีคลื่นสะท้อนกลับ แต่กรณีที่ปลายสายต่อไว้ด้วยโหลดทั่วไป ที่ไม่ใช่แมทซิง โหลดจะมีคลื่นสะท้อนทำให้คลื่นแรงดันมีขนาดเปลี่ยนแปลงไปตามตำแหน่งของ z เมื่อทำการพิจารณารายละเอียดของสมการที่ 2.68 โดยพิจารณาขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่ตำแหน่ง z จะได้ผลดังนี้

$$|V(z)| = \frac{V_g}{2} e^{-\alpha z} |1 + \Gamma_L e^{-2(\alpha + j\beta)(l-z)}| \quad (2.77)$$

ในกรณีที่ $\alpha = 0$ สมการที่ 2.77 จะลดรูปลงดังนี้

$$|V(z)| = \frac{V_g}{2} e^{-\alpha z} |1 + \Gamma_L e^{-j2\beta(l-z)}| \quad (2.78)$$

เนื่องจาก $|\Gamma_L| \leq 1$ เสมอ เมื่อนำสมการที่ 2.77 และสมการที่ 2.78 ไปเขียนกราฟ จะได้ผลดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.31 (ก) และ (ข) จากรูปจะเห็นว่ากรณีที่ $\alpha = 0$ นั้น ค่า $|V(z)|$ ที่ได้จะแกว่งไปมาระหว่างค่า $V_g/2$ โดยมีค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงไปตามตำแหน่ง z เมื่อพิจารณาจากสมการที่ 2.78 จะพบว่า $|V|_{\max} = (1 + |\Gamma_L|) V_g/2$ และ $|V|_{\min} = (1 - |\Gamma_L|) V_g/2$ นอกจากนั้นคาบของการแกว่งนั้นจะเท่ากับ $\lambda_g/2$ (คำนวณ $2\beta z = 2\pi$) สำหรับกรณีที่ $\alpha \neq 0$ นั้น คาบของการแกว่งยังคงเดิมแต่ค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของ $|V(z)|$ จะเปลี่ยนไปตามตำแหน่ง z โดยที่ความแตกต่างระหว่างค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดจะน้อยลงเมื่อเข้าใกล้เครื่องกำเนิดสัญญาณซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนจากรูป (ข) ลักษณะของรูปคลื่นที่ได้นี้เราเรียกว่า คลื่นนิ่ง และจะแสดงค่า rms ของขนาดของคลื่นที่จุดนั้น สำหรับรูปที่ 2.31 (ค) และ (ง) นั้น แสดงคลื่นนิ่งที่เกิดขึ้นในกรณีที่ปลายสายลัดวงจร

จรและปลายสายเปิดวงจรไว้ตามลำดับ เนื่องจาก $|\Gamma_L|$ ของกรณีลัดวงจรเป็น -1 และกรณีเปิดวงจรเป็น $+1$ ดังนั้นคลื่นนิ่งที่ได้จะมีค่าสูงสุดคือ V_g และมีค่าต่ำสุดเป็น 0 โดยตำแหน่งที่เกิดค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดจะเหลื่อมกันอยู่ $\lambda_g/4$ หรือตำแหน่งที่เกิดค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดในรูป (ค) และ รูป (ง) นี้จะสลับกัน กรณีที่ปลายสายต่อไว้ด้วยแมทซิงโพลดซึ่งจะไม่มีคลื่นสะท้อนกลับและคลื่นนิ่งจะเป็นเส้นโค้งที่ไม่แกว่งขึ้นแกว่งลง

จากคลื่นนิ่งที่ได้ี้มีการนิยามอัตราส่วนระหว่างค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดในคลื่นนิ่ง และเรียกว่า VSWR (Voltage Standing Wave Ratio) ในกรณีที่ $\alpha = 0$ จากสมการที่ 2.78 เราจะสามารถหาค่า VSWR ได้ ดังนี้ [6]

$$VSWR = \frac{|V|_{\max}}{|V|_{\min}} = \frac{|V^+| + |V^-|}{|V^+| - |V^-|} = \frac{1 + |\Gamma_L|}{1 - |\Gamma_L|} \quad (2.79)$$

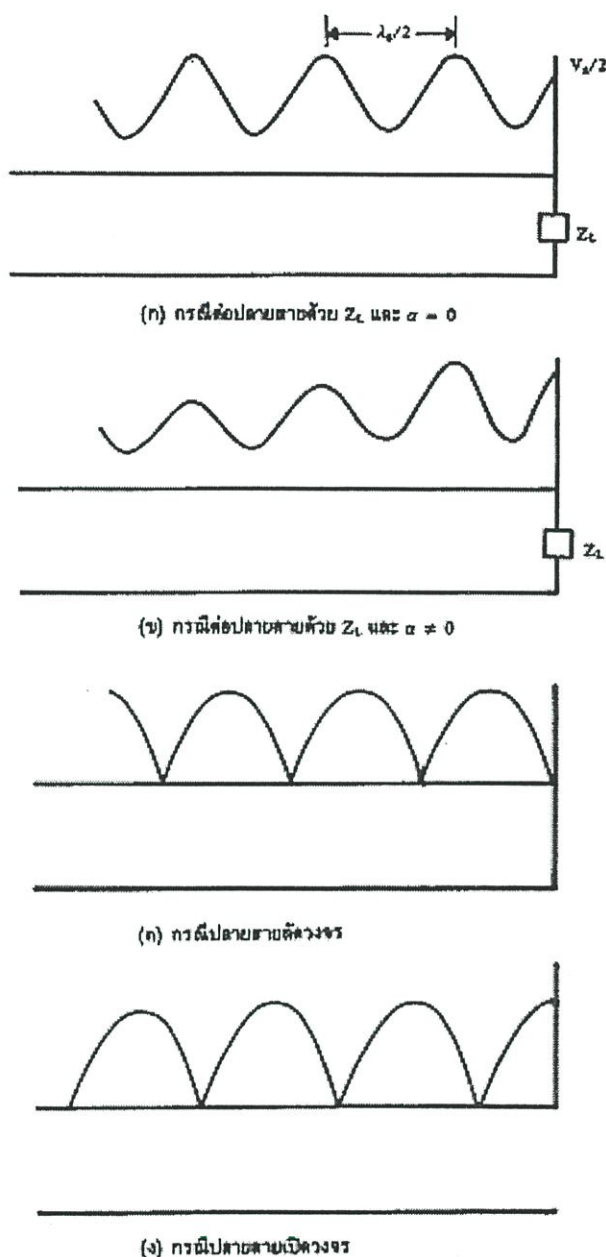
ในกรณีที่ $\alpha = 0$ นี้ ค่า VSWR จะมีค่าคงที่โดยไม่ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของ z ยกตัวอย่างเช่นถ้า

$$Z_c = 50 \quad Z_L = 50 + j50\Omega$$

$$\text{จะได้ } \Gamma_L = (50 + j50 - 50)/(50 + j50 + 50) = j/2 + j = 1/\sqrt{5}e^{j\tan^{-1}(2)}$$

ซึ่งจะทำให้ได้ค่า VSWR = 2.62 สำหรับกรณีที่ $\alpha \neq 0$ นั้นการคำนวณค่า VSWR จะต้องใช้สมการ (19) ซึ่งผลที่ได้จะแตกต่างกันไปตามตำแหน่ง z เพราะค่า $|V|_{\max}$ และ $|V|_{\min}$ จะเปลี่ยนแปลงไปตามตำแหน่ง z ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.27 (ข) ค่า VSWR ในกรณีนี้จะคำนวณจากจุดสูงสุดและจุดต่ำสุดที่อยู่ติดกัน ถ้าให้ Γ_L เขียนได้เป็น $|\Gamma_L|e^{j\theta}$ ค่าสูงสุดจะเกิดขึ้นตรงตำแหน่งที่ $2\beta(l - z_1) = \theta + 2n\pi$ หรือ $z_1 = l - (\theta + 2n\pi)/2\beta$ สำหรับจุดต่ำสุดจะเกิดขึ้นตรงตำแหน่ง $2\beta(l - z_2) = \theta + (2n + 1)\pi$ หรือ $z_2 = l - \{\theta + (2n + 1)\pi\}/2\beta$ เมื่อแทนค่า z_1 และ z_2 สำหรับค่า n เดียวกันลงในสมการที่ 2.77 จะได้ค่า $|V|_{\max}$ และ $|V|_{\min}$ ที่อยู่ติดกันซึ่งจะนำไปคำนวณค่า VSWR

$$\begin{aligned} VSWR &= \frac{e^{-\alpha z_1} (1 + |\Gamma_L| e^{-2\alpha(l-z_1)})}{e^{-\alpha z_2} (1 - |\Gamma_L| e^{-2\alpha(l-z_2)})} \\ &= e^{-\alpha\lambda_g/4} \frac{(1 + |\Gamma_L| e^{-\alpha(\theta+2n\pi)/\beta})}{(1 - |\Gamma_L| e^{-\alpha\{\theta+(2n+1)\pi\}/\beta})} \end{aligned} \quad (2.80)$$



รูปที่ 2.37 การเกิดคลื่นนิ่งบนสายนำสัญญาณ

ค่า VSWR ตามสมการที่ 2.80 นี้จะมีค่าเล็กลงใกล้เคียงกับ 1 มากเมื่อ n มีขนาดใหญ่ขึ้นหรือตำแหน่งของ z อยู่ห่างจากปลายสายมากขึ้น สภาพดังกล่าวนี้จะเห็นได้ชัดจากรูปที่ 2.37 (ข) ซึ่งค่า $|V|_{\max}$ และ $|V|_{\min}$ จะแตกต่างกันเล็กน้อยเมื่อตำแหน่ง z อยู่ห่างจากปลายสายมากขึ้นการที่ VSWR มีขนาดเล็กลงและใกล้เคียงกับ 1 มากขึ้นเมื่อจุดสังเกตอยู่ห่างจากปลายสายมากขึ้นนั้นเป็นเพราะขนาดของ $|V^+|$ สูงขึ้นในขณะที่ $|V^-|$ เล็กลงทำให้ความแตกต่างระหว่าง $|V^+| + |V^-|$ กับ $|V^+| - |V^-|$ มีค่าน้อยลง ซึ่งทำให้ VSWR ดีขึ้นเมื่อเทียบกับค่าที่เกิดขึ้นจริงที่ปลายสาย สภาพเช่นเป็นสิ่งที่ต้องระวังในภาคปฏิบัติเช่นเดียวกับการวัดค่ากำลังไฟฟ้าสะท้อนกลับที่กล่าวไว้ก่อน

หน้านี้ กล่าวคือ ถ้าทำการวัด VSWR ที่ตำแหน่งห่างจากปลายสายมากจะต้องทำการชดเชยค่าให้ถูกต้องโดยใช้สมการที่ 2.80 ในการคำนวณค่า $|\Gamma_L|$ ไม่เช่นนั้นค่าที่มีได้จะเชื่อถือไม่ได้เพราะจะดีกว่าค่าจริงที่ปลายสายเสมอ

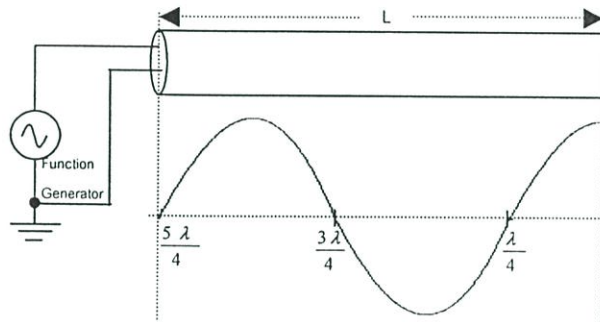
ค่า VSWR ในกรณีที่ปลายสายต่อลัดวงจรหรือปลายสายเปิดวงจรนั้นจะเป็นอนันต์เพราะค่าต่ำสุดเป็นศูนย์ในกรณีที่ได้ด้วยแมทซิงโพลค่านั้นค่า VSWR จะเป็น 1 ซึ่งจัดว่าเป็นค่าที่ดีที่สุด

บทที่ 3

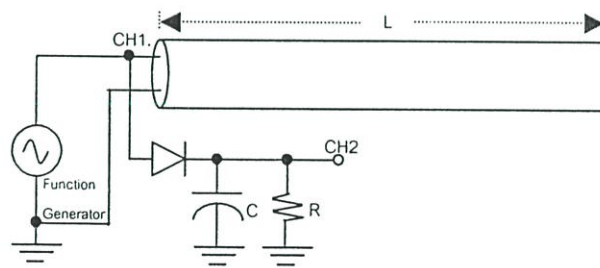
การออกแบบ

3.1 บทนำ

ในการทำวิทยานิพนธ์นี้ทำการศึกษา และวิเคราะห์เกี่ยวกับปรากฏการณ์ของสัญญาณคลื่นสะท้อนกลับ (Reflected Wave) ของคลื่นนิ่ง (Standing wave) ที่เกิดขึ้นภายในสายเคเบิล โดยเทคนิคการหาค่าเพอร์มิททิวิตี้สัมพัทธ์ของฉนวนแบบวงจรเปิด (Open Circuit) โดยศึกษาถึงผลการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน และความถี่ที่ทุกๆ จำนวนเท่าของเลขคี่ของความยาวคลื่นเท่ากับ $\lambda / 4$ ในสายเคเบิลที่หุ้มด้วยวัสดุฉนวนชนิดต่างๆ เพื่อใช้ในการตรวจสอบวัดค่าเพอร์มิททิวิตี้สัมพัทธ์ของสารฉนวนของสายเคเบิล [13] โดยกำหนดว่ากระแสที่ปลายสายต้องเท่ากับศูนย์ แต่แรงดันไฟฟ้ามีค่าสูงสุด โดยมีวงจรทดสอบสมมุติฐานเบื้องต้นดังรูปที่ 3.1



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.1 ความยาวคลื่นเท่ากับจำนวนเท่าเลขคี่ของ $\lambda / 4$ ในสายกรณีเปิดวงจร และวงจรการทดสอบ

(ก) คลื่นนิ่งของแรงดันไฟฟ้าในสายเคเบิล

(ข) วงจรการหาค่าเพอร์มิททิวิตี้สัมพัทธ์ (ϵ_r)

จากรูประยะจากตำแหน่งเปิดวงจรไปยังเครื่องกำเนิดทุก ๆ จำนวนเท่าของเลขคี่ของความยาวคลื่นเท่ากับ $\lambda/4$ (หนึ่งในสี่ของความยาวคลื่น) จะเป็นตำแหน่งที่แรงดันไฟฟ้าเกิดขึ้นต่ำสุด [8] ดังแสดงในรูปที่ 3.1 (ก)

ทำการทดสอบที่ความยาวสายโดยมีความยาวเท่ากับความยาวคลื่นเท่ากับ $\lambda/4$ สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3.1 จะได้ว่า

$$\lambda = 4L \quad (3.1)$$

เมื่อ λ คือ ความยาวคลื่น : m

L คือ ความยาวสายเคเบิล : m

จากความสัมพันธ์ของความเร็วในการเคลื่อนที่ของคลื่นแปรผันตามความยาวคลื่น และความถี่ที่ทำให้เกิดคลื่น สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.2 [8]

$$V = \lambda f \quad (3.2)$$

V คือ ความเร็วของคลื่นเคลื่อนที่ในสายเคเบิล : m/s

f คือ ความถี่ที่ทำให้เกิดคลื่น : Hz

จากความสัมพันธ์ของสมการที่ 2.58, 3.1 และ 3.2 ดังกล่าวสามารถหาค่าเพอร์มิทิตีวี่สัมพันธ์ของฉนวนสายเคเบิลเมื่อพิจารณาที่ความยาวคลื่นเท่ากับ $\lambda/4$ ได้จากสมการที่ 3.3 [13]

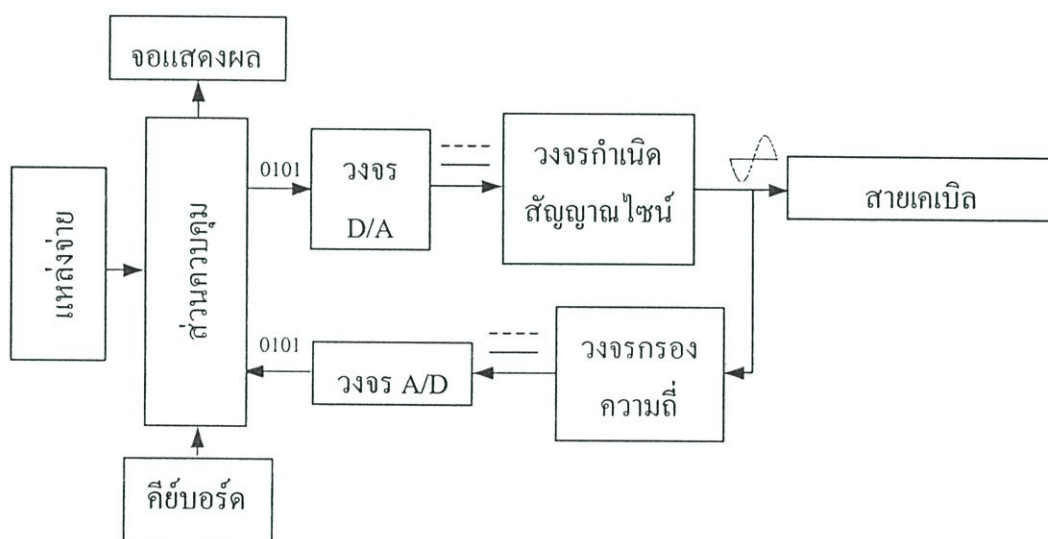
$$\epsilon_r = \left(\frac{V_s}{4Lf} \right)^2 \quad (3.3)$$

3.2 การออกแบบฮาร์ดแวร์

จากหลักการที่ได้กล่าวข้างต้นแล้วนั้น ทำการศึกษาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เพื่อการออกแบบการทำงานของเครื่องทดสอบวัดค่าเพอร์มิทิตีวี่สัมพันธ์ของฉนวนเคเบิล โดยใช้เทคนิคคลื่นนิ่ง โดยกำหนดเงื่อนไขการออกแบบ โดยเริ่มต้นจากการกำหนดค่าความยาวของสายเคเบิลผ่านทางคีย์บอร์ด ไมโครคอนโทรลเลอร์ทำหน้าที่ควบคุมการสร้างสัญญาณไซน์ที่สามารถปรับค่าความถี่ได้ของวงจรกำเนิดสัญญาณไซน์ เพื่อป้องกันกับสายทดสอบค่าแรงดันที่ได้จากการทดสอบจะผ่านวงจรเรียงกระแสแบบ LC และวงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัลเข้าสู่ไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อประมวลผลออกมาเป็นตัวเลข

การออกแบบของวิทยานิพนธ์นี้จะทำการออกแบบสร้างเครื่องมือวัดให้สามารถทดสอบสายในช่วงระยะความยาว 15 – 250 เมตร เครื่องทดสอบวัดค่าเพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์ของฉนวนเคเบิลโดยใช้เทคนิคคลื่นนิ่ง จะต้องคำนึงถึงค่าความยาวสาย และค่าเพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์ของฉนวนเคเบิล โดยได้ออกแบบให้ใช้ได้สายเคเบิลชนิดฉนวน PVC และ XLPE โดยค่าเพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์ของฉนวน PVC มีค่า 3.2 - 4 และค่าเพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์ของฉนวน XLPE มีค่า 2.3 เมื่อแทนค่าความยาวสาย และค่าเพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์ของฉนวนในสมการที่ 3.3 จะได้ค่าความถี่ในการออกแบบและทดสอบของเครื่องมือวัดโดยมีค่าเท่ากับ 120 kHz – 3.5 MHz โดยใช้แรงดันทดสอบ 5 Vp-p

จากการศึกษาการทำงานเบื้องต้นของการออกแบบวงจร โดยได้เลือกใช้ ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51 โดยบนบอร์ดมี CPU, ADC ขนาด 12 บิต, DAC ขนาด 16 บิต, LCD 16x1, KEY PAD, OSC แบบ VCO

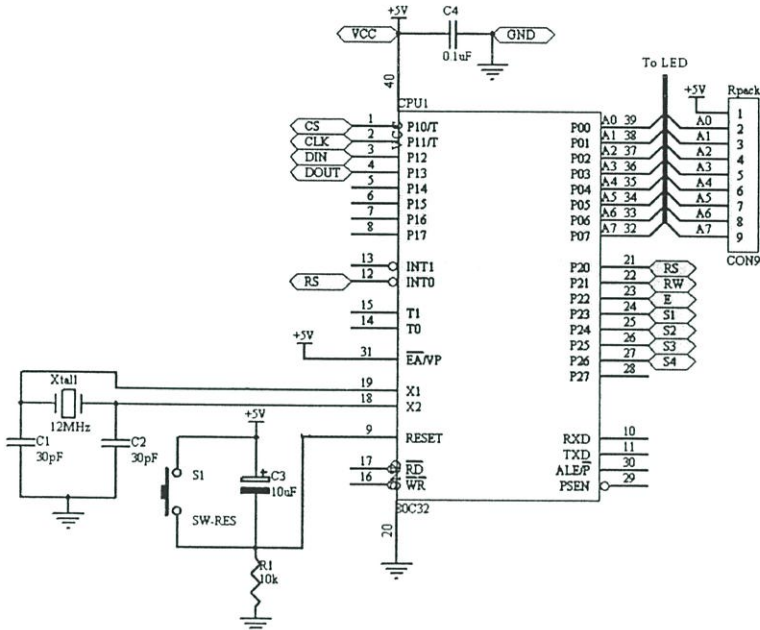


รูปที่ 3.2 แผนผังการทำงานของเครื่องวัดค่าเพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์ของฉนวนเคเบิล

3.2.1 ส่วนควบคุมหลัก และประมวลผล (CPU)

วงจรควบคุมหลักใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์(89C51RD2) ในการประมวลผล และควบคุมการทำงานของระบบ โดยทำการรับข้อมูลความยาวสายทดสอบจากชุดคีย์บอร์ด โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์(89C2051) เป็นตัวส่งข้อมูลให้กับคอนโทรลเลอร์หลักทำการประมวลผลข้อมูล และทำการแปลงจากสัญญาณจากดิจิทัลเป็นอะนาลอก ให้กับวงจรกำเนิดคลื่นไซน์ความถี่ตั้งแต่ 120kHz – 3.5MHz โดยใช้ IC MAX038 ให้กับสายเคเบิลชนิดฉนวน PVC และ XLPE ของตัวอย่างสายเคเบิลตัวนำคู่ และสายเคเบิลได้ดินพิกัดไม่เกิน 24 kV ขนาด 1 – 400 ตารางมิลลิเมตร ที่ระยะความยาวสายในช่วงทดสอบ 15-250 เมตรในการตรวจวัดค่าเพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์ของสายเคเบิล

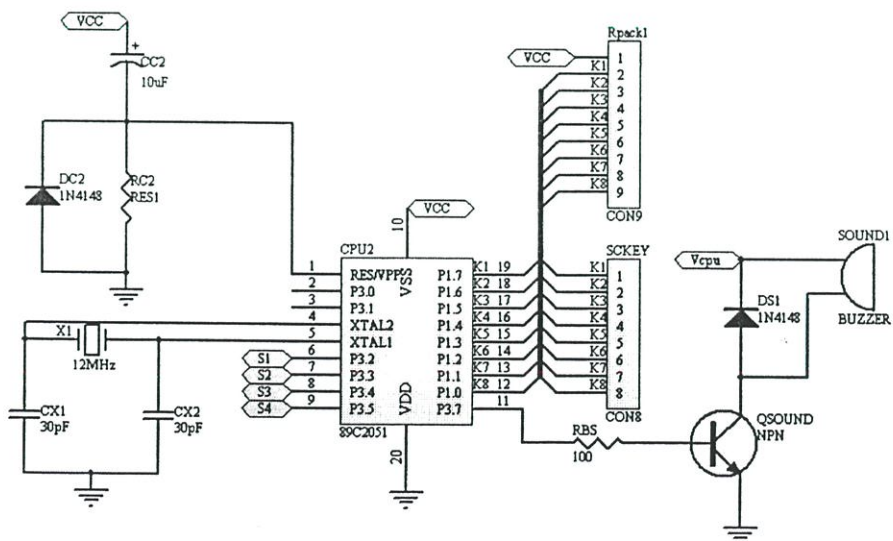
โดยใช้วงจรกรองความถี่ ทำการแปลงสัญญาณคลื่นไซน์ดังกล่าวให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 0 – 5 Vdc ให้กับวงจร ADC (LTC1298) และไมโครคอนโทรลเลอร์หลักอ่านข้อมูลแบบ I2C เข้าทำการประมวลผลค่าความถี่ของแรงดันจากวงจรกรองที่ต่ำสุด โดยใช้ค่าความถี่จากขา Sync ขาที่ 14 ของ IC MAX038 มาประมวลผลเป็นค่าเพอร์มิททิวิตีสัมพัทธ์ โดยผลการทดสอบแสดงผลผ่านจอ LCD



รูปที่ 3.3 ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ P89C51RD2

3.2.2 วงจรตรวจสอบคีย์บอร์ด

ในส่วนของคีย์บอร์ดแบบ Matrix ขนาด 3x4 แถวโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ (89C2051)

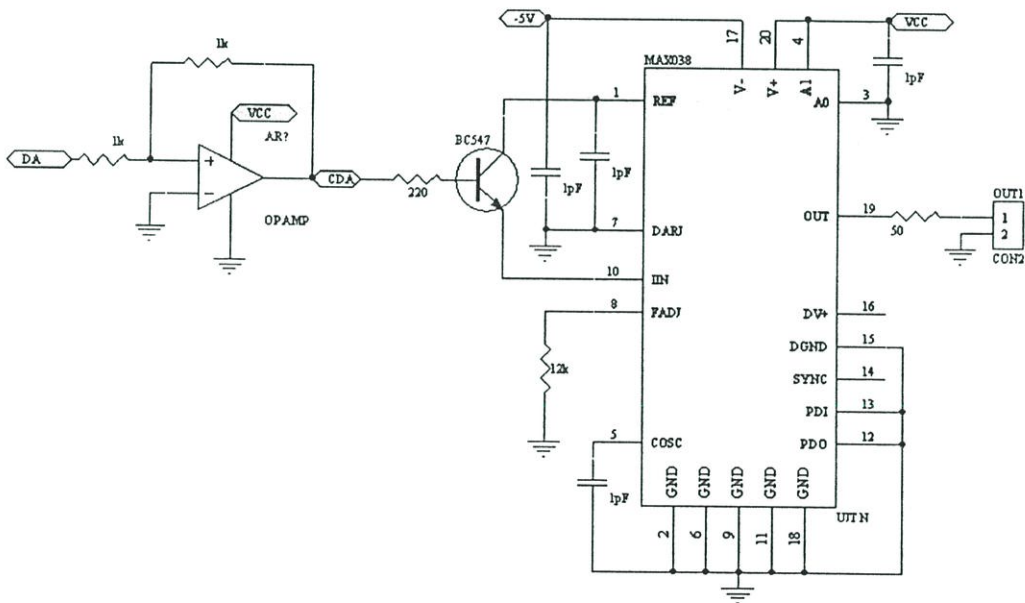


รูปที่ 3.4 วงจรรับข้อมูลค่าคีย์บอร์ด

ในการรับข้อมูลค่าคีย์บอร์ดจาก P1.0-P1.7 เพื่อแปลงเป็นรหัสฐาน 16 ให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์หลักที่ P3.2-3.5 ในการประมวลผลข้อมูลของคีย์บอร์ด และใช้ P3.7 ในการส่งเสียงในการกดคีย์

3.2.3 วงจรกำเนิดสัญญาณ

ในการกำเนิดสัญญาณไซน์จะใช้ IC MAX038 ทำการกำเนิดความถี่เพื่อทดสอบโดยจะควบคุมจากไมโครคอนโทรลเลอร์ทำการกำเนิดความถี่ที่อยู่ในช่วง 120 kHz – 3.5 MHz โดยจะถูกควบคุมด้วยแรงดัน ความถี่ทางเอาต์พุตนั้นสามารถที่จะควบคุมได้เกินย่านความถี่ที่ระบุไว้ จากย่านแรงดันอ้างอิงภายในไอซีขนาด 2.5 โวลต์ ร่วมกับตัวต้านทานและตัวเก็บประจุจะต่อประกอบรวมอยู่ภายนอก นอกจากนั้นแล้วค่าความถี่ที่เกิดสามารถปรับค่าได้ในย่านที่กว้างมากกว่าที่ระบุไว้จากสัญญาณควบคุมด้วยแรงดัน ± 2.5 โวลต์ ทางด้านเอาต์พุตสามารถทำการเลือกสัญญาณรูปคลื่นไซน์, สี่เหลี่ยม และสามเหลี่ยมสามารถเลือกได้จากขาควบคุมสองขาที่ต้องเซตรหัสทั้งสองด้วยรหัสทั้งสองด้วยสัญญาณ TTL สัญญาณทางเอาต์พุตของรูปคลื่นสัญญาณจะมีระดับอยู่ที่ 2 โวลต์ พิก-ทู-พิก



รูปที่ 3.5 วงจรกำเนิดสัญญาณไซน์

ค่าความถี่ที่เกิด สามารถควบคุมค่าการเปลี่ยนแปลงได้ตั้งแต่ 10-90 เปอร์เซ็นต์ จากค่าแรงดัน ± 2.3 โวลต์ ที่จ่ายให้กับขา D_{ADJ} ค่าแรงดันที่เปลี่ยนแปลงนี้จะเป็นอัตราส่วนกับกระแสซาร์จ และดิซซาร์จให้กับ C_f และจะทำให้ได้ค่าความถี่ใกล้เคียงกับค่าคงที่มากที่สุด นอกจากนั้นแล้วแรงดันอ้างอิง (REF) 2.5 โวลต์ ที่มีเสถียรภาพจะถูกแบ่งแรงดันให้กับขา I_{in} , F_{ADJ} , และ D_{ADJ} ผ่านทางตัวต้านทานที่คงที่ และสามารถที่จะกำหนดให้เป็นการทำงานที่เปลี่ยนแปลงได้เมื่อเปลี่ยนความดัน

ทานที่คงที่เหล่านี้นั้นให้เป็นความต้านทานแบบปรับค่าได้ต่อเข้าขาอินพุทระหว่างขา R_{EF} และ F_{ADJ} และหรือกับ D_{ADJ} เทียบกับกราวด์ก็จะได้ค่าความถี่ปกติที่มีค่าควิตซ์ไซเกิลเท่ากับ 50 เฟอร์เซ็นต์

การเลือกรูปคลื่นเอาต์พุท

MAX 038 สามารถที่จะกำเนิดรูปสัญญาณได้ถึงสามรูปคลื่นดังได้กล่าวมาแล้ว และที่สำคัญต่อการใช้งานมากสำหรับรูปคลื่นทั้งสาม และที่ขาแอกเดรส A_0 และ A_1 จะเป็นที่จะต้องได้รับระดับ หรือสัญญาณลอจิกควบคุมไม่ว่าจะเป็น TTL หรือ CMOS ลอจิกก็ใช้งานได้เช่นกันโดยลักษณะการเซตลอจิกควบคุมขาแอกเดรสทั้งสองจะเป็นดังนี้

A_0	A_1	รูปคลื่นเอาต์พุท
X	1	คลื่นไซน์
0	0	คลื่นสี่เหลี่ยม
1	0	คลื่นสามเหลี่ยม

ค่าความถี่เอาต์พุท

ค่าความถี่เอาต์พุทนั้นจะได้ออกมาจากการแบ่งส่วนค่าของกระแสที่ไหลไปยังขา I_{IN} ร่วมกับค่าความจุของตัวเก็บประจุ C_F ที่ต่ออยู่กับขา C_{OSC} เทียบกับกราวด์ และร่วมกับค่าแรงดันที่จ่ายให้กับขา F_{ADJ} เมื่อค่าแรงดัน $V_{FADJ} = 0$ โวลต์ ค่าความถี่เริ่มต้นหรือค่าความถี่มูลฐาน (F_0) จะสามารถหาได้จากสมการ

$$F_0 = \frac{I_{IN}}{C_F} \quad (3.4)$$

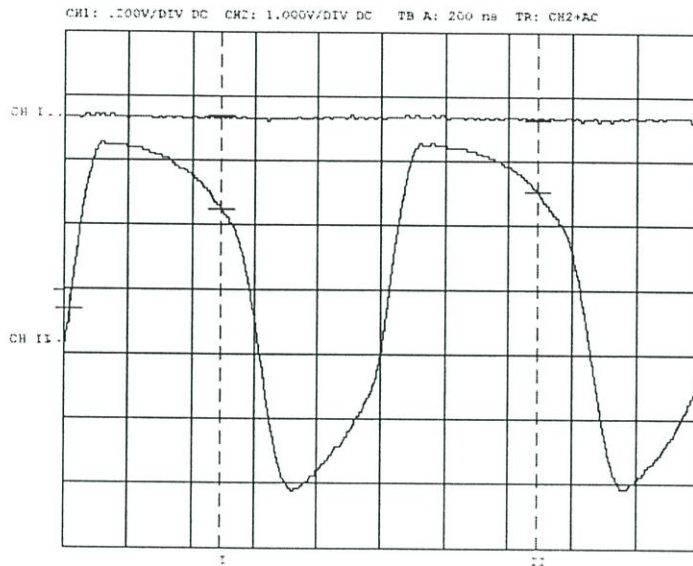
โดยที่ F_0 คือค่าความถี่มูลฐาน (เมกะเฮิรตซ์)
 I_{IN} คือค่ากระแสที่ขา I_{IN} (ไมโครแอมป์)
 C_F คือค่าความจุที่ต่อกับขา 5

ค่าของคาบเวลา (t_0) ของความถี่สามารถหาได้จากสมการ

$$t_0 = \frac{C_F (\rho F)}{I_{IN} (\mu A)} \quad \text{ไมโครวินาที} \quad (3.5)$$

การกวาดความถี่

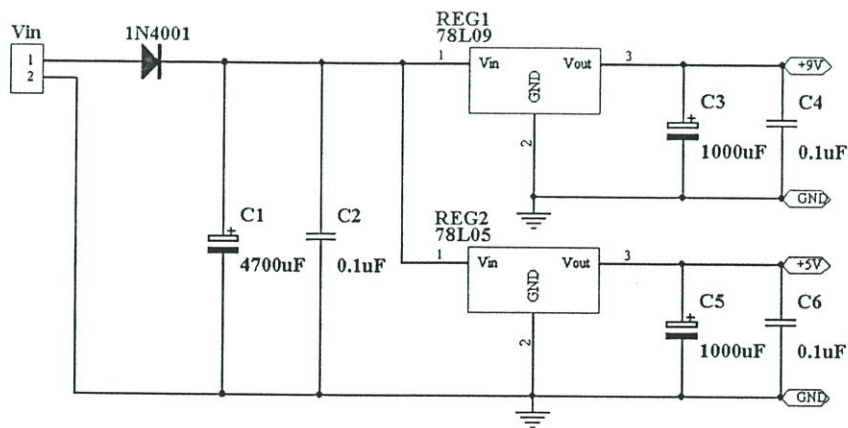
ความถี่ทางเอาต์พุตนั้น สามารถที่จะทำให้ทำงานในลักษณะกวาดความถี่ (sweep frequency) ได้ด้วยการทำให้สัญญาณควบคุมที่ขา I_{IN} หรือขา F_{ADJ} มีการเปลี่ยนแปลงตามลักษณะที่ต้องการให้กวาด การควบคุมสัญญาณกวาดที่ขา I_{IN} นั้นจะมีการกวาดสัญญาณขยายกว้าง การตอบสนองการเลื่อนความถี่เป็นไปอย่างช้า พร้อมกับค่าสัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิต่ำ การต่อควบคุมสามารถกระทำได้โดยการต่อชุดความต้านทานระหว่างขาจ่ายแรงดันอ้างอิง REF กับแหล่งจ่ายแรงดัน และที่ขาเลือกค่าความต้านทานจะมาต่อกับขา F_{ADJ} หรือ I_{IN} ซึ่งเป็นการเลือกรับแรงดัน ออฟเซตในการกวาดสัญญาณนั่นเอง



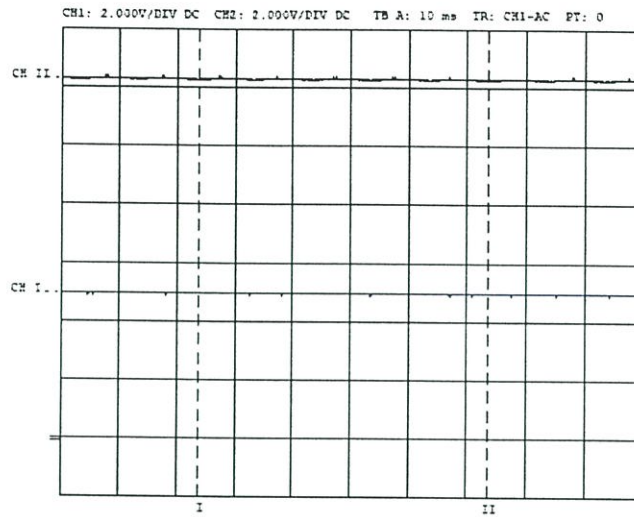
รูปที่ 3.6 สัญญาณอินพุต (CH1) และเอาต์พุต (CH2) จากการวัดของวงจรกำเนิดสัญญาณคลื่นซายน์

3.2.4 แหล่งจ่ายไฟ

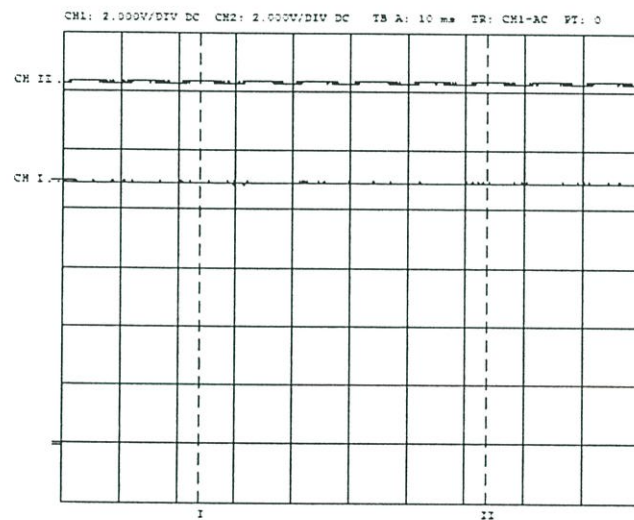
วงจรแหล่งจ่ายแรงดันของระบบใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 9 Vdc และ 5Vdc โดยมีวงจรเร็กกูเลเตอร์ในการรักษาแรงดัน(7809 และ 7805)



รูปที่ 3.7 วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 5 โวลต์ และ 9 โวลต์



รูปที่ 3.8 สัญญาณอินพุต (CH2) และเอาต์พุต (CH1) จากการวัดจากการวัดของไอซี 7805



รูปที่ 3.9 สัญญาณอินพุต (CH2) และเอาต์พุต (CH1) จากการวัดของไอซี 7809

3.2.5 ส่วนแปลงสัญญาณ(A/D)

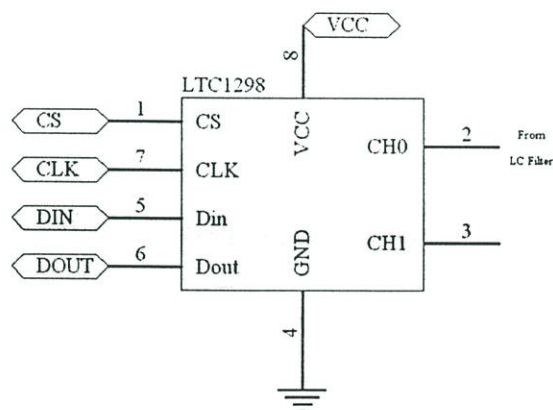
ส่วนวงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัล(A/D) เลือกใช้ LTC1298 เป็นอินทิเกรตที่ภายในเป็นสวิทช์คาปาซิเตอร์ A/D โดยรับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจากวงจรเรียงกระแสแบบ LC และเปลี่ยนสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัล โดยสามารถอินเทอร์เฟสได้โดยตรงกับไมโครโปรเซสเซอร์แบบอนุกรมผ่านข้อมูลเอาต์ ที่ P1.0-1.3 ดังรูปที่ 3.12

การคำนวณค่าความละเอียดของการแปลงสัญญาณของวงจร A/D

ที่ความสามารถของตัว IC สามารถที่จะให้ค่าความละเอียดที่ 2^{12} หรือที่ 4096 ตำแหน่ง และเมื่อเปรียบเทียบกับระดับแรงดันสูงสุดของสัญญาณที่ระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 0 - 1 โวลท์ จะได้ค่าความละเอียดคือ $1\text{V} / 4096 = 0.244\text{ mV}$

นั่นคือประสิทธิภาพของการทำงานของเครื่องที่จะรับรู้ระดับความละเอียดของระดับแรงดันเอาต์พุตนั่นเอง

$$(0.244\text{ mV} / 1\text{ Vdc}) \times 100 = 0.0244\text{ เปอร์เซ็นต์}$$

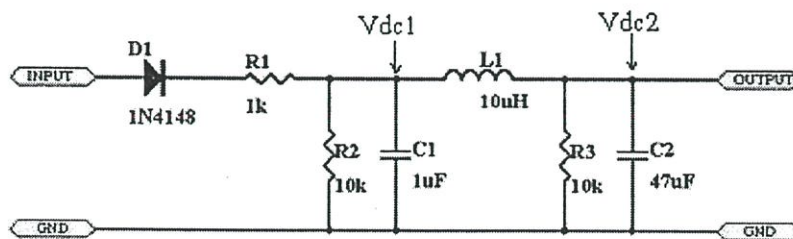


รูปที่ 3.10 วงจรแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัล (Analog to Digital)

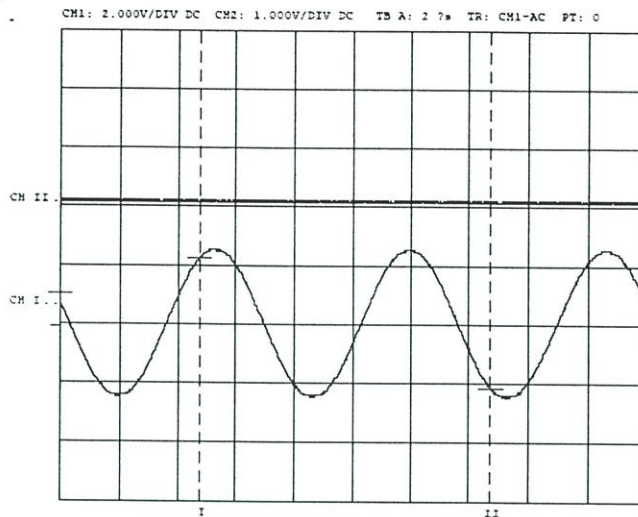
3.2.6 วงจร LC ฟิลเตอร์

LC ฟิลเตอร์หรือ LC- π ฟิลเตอร์เป็นวงจรฟิลเตอร์ที่ประกอบด้วยวงจร C ฟิลเตอร์ ต่อร่วมกับวงจร L ฟิลเตอร์ มีผลต่อการช่วยลดแรงดันริบเปิดให้ต่ำลง มีระดับแรงดันไฟกระแสตรง V_{dc} สูงขึ้น และไม่ต้องถูกลดทอนแรงดันลงเหมือนกับวงจร RC ฟิลเตอร์ ทำให้วงจรฟิลเตอร์แบบนี้ให้คุณภาพในการฟิลเตอร์ที่ดีกว่าวงจรฟิลเตอร์แบบอื่น โดยมีวงจรวงจรดังรูปที่ 3.13

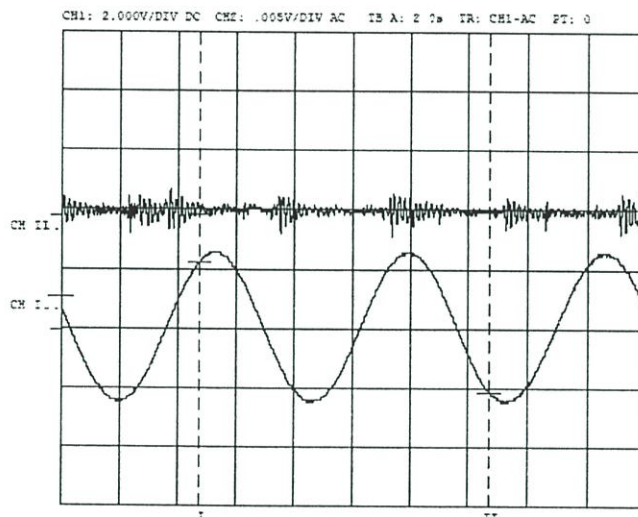
การวิเคราะห์ค่าแรงดันไฟกระแสตรงที่เอาต์พุต ตัวเก็บประจุ C_2 เสมือนเปิดวงจรไม่ต้องนำมาคิด ส่วนที่จุดอินพุต C_1 เสมือนเป็นแหล่งจ่ายแรงดันไฟกระแสตรง มีระดับแรงดัน V_{dc1} ง่ายผ่านตัวเหนี่ยวนำ $L1$ แสดงคุณสมบัติออกมาเป็นความต้านทาน มีค่าความต้านทานเป็น R_w การหาค่าแรงดันไฟกระแสตรง V_{dc2} ที่เอาต์พุต C_2



รูปที่ 3.11 วงจรกรองความถี่แบบ LC ฟิลเตอร์



รูปที่ 3.12 คลื่นสัญญาณเอาต์พุตจากการวัดของวงจรความถี่แบบ LC ที่ความถี่ 150 kHz



รูปที่ 3.13 คลื่นสัญญาณจากการวัดค่ารีปเปิลโวลต์ที่ความถี่ 150 kHz

วิเคราะห์ค่าแรงดันไฟกระแสสลับหรือแรงดันรีปเปิลที่เอาต์พุตที่จุด C_2 ตัวเหนี่ยวนำ L_1 มีคุณสมบัติเป็นอิมพีแดนซ์ Z_L และตัวเก็บประจุ C_2 มีคุณสมบัติเป็นรีแอกแตนซ์ X_{C_2} มีผลต่อการทำงานในวงจรฟิลเตอร์ การหาค่าแรงดันรีปเปิลของวงจรเรกติไฟเออร์เป็นแบบครึ่งคลื่น $V_{r2(rms)}$ ที่จุด C_2 ในวงจรหาได้จากสมการที่ 3.7

$$V_{dc2} = \frac{R_2}{R_w + R_2} V_{dc1} \quad (3.6)$$

$$V_{r2(rms)} = \frac{V_{r1(rms)}}{(2\pi f)^2 L_1 C_2} \quad (3.7)$$

การหาค่าตัวประกอบรีปเปลที่เอาที่พหุหาได้จากสมการที่ 3.8

$$r_2 = \frac{V_{r2(rms)}}{V_{dc2}} \quad (3.8)$$

ในการออกแบบต้องการให้แรงดันเอาที่พหุ $V_{dc2} = 1.5V$ และ $I_{dc2} = 150\mu A$ โดยมีค่า $\%R = 1\%$ จาก

$$R_L = \frac{V_{dc2}}{I_{dc2}} = \frac{1.5}{150 \times 10^{-6}} = 10k\Omega$$

และ

$$r_2 = \frac{V_{r2(rms)}}{V_{dc2}}$$

หรือ

$$\begin{aligned} V_{r2} &= r_2 V_{dc2} \\ &= \frac{0.1}{100} \times 1.5 = 1.5mV \end{aligned}$$

จากสมการที่ 3.7

$$V_{r2(rms)} = \frac{V_{r1(rms)}}{(2\pi f)^2 L_1 C_2}$$

จากสมการของวงจร C ฟิเตอร์แบบครึ่งคลื่น

$$V_{r1(rms)} = \frac{I_{dc}}{2\sqrt{3}fC_1}$$

นำสมการสมการของวงจร C ฟิเตอร์แบบครึ่งคลื่นแทนในสมการที่ 3.7 จะได้

$$V_{r2(rms)} = \frac{I_{dc}}{8\sqrt{3}\pi^2 f^3 L_1 C_1 C_2}$$

เมื่อให้ $I_{dc1} = I_{dc2}$ และ $C_1 = C_2 = C$

$$\therefore V_{r2(rms)} = \frac{I_{dc}}{8\sqrt{3}\pi^2 f^3 L_1 C^2}$$

และจากข้อกำหนดการออกแบบ $V_{r2(rms)} = 1.5mV$, $I_{dc2} = 150\mu A$ และ $f = 150k\Omega$

เลือกใช้ $L_1 = 400mH$, $R_w = 6\Omega$ แทนค่าหาค่า C

$$C^2 = \frac{I_{dc2}}{8\sqrt{3}\pi^2 f^3 L_1 V_{r2(rms)}}$$

$$= \frac{150 \times 10^{-6}}{8\sqrt{3}\pi^2 \times (150 \times 10^3)^3 \times 400 \times 10^{-3} \times 1.5 \times 10^{-3}}$$

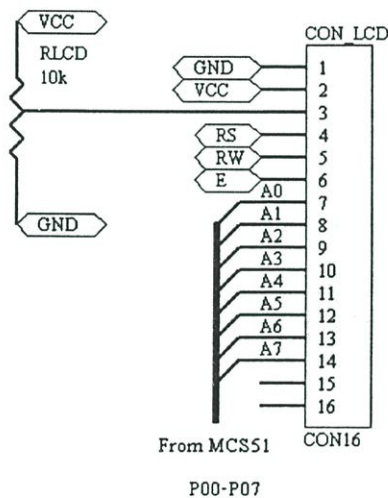
$$C^2 = 5.4149 \times 10^{-22}$$

$$\therefore C = 23.27 \mu F$$

เลือกใช้ C ที่มีขายในท้องตลาดในค่าที่สูงกว่าที่คำนวณได้ เลือกใช้ C = 25pF

3.2.7 ส่วนแสดงผล

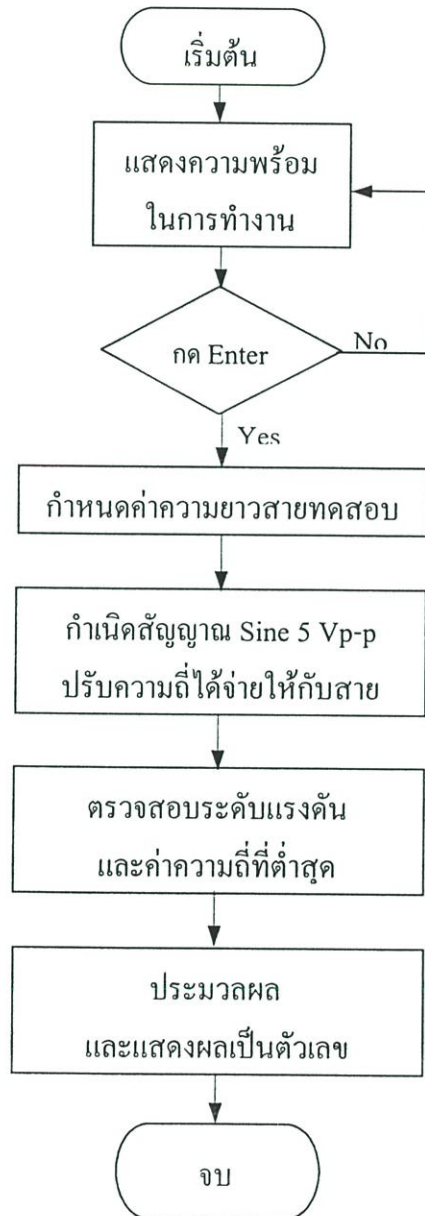
ในการแสดงผลการทำงานนั้นจะใช้การแสดงผลทาง LCD 16x1 ซึ่งสามารถที่จะแสดงผลการทดสอบ โดยการรับข้อมูลจากไมโครคอนโทรเลอร์จาก P00-P07 ในการแสดงผลทางหน้าจอ ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.14 ส่วนแสดงผล

3.3 การออกแบบทางซอฟต์แวร์

การทำงานของเครื่องทดสอบวัดค่าเพอร์มิททิวิตีสัมพัทธ์ของฉนวนเคเบิลโดยใช้เทคนิคคลื่นนิ่ง มีโครงสร้างโปรแกรมคำสั่งให้เครื่องทำงานสัมพันธ์กับฮาร์ดแวร์ โดยกำหนดแผนผังการทำงานของโปรแกรมดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.15 แผนผังการทำงานของซอฟต์แวร์

บทที่ 4

การทดลอง และผลการทดลอง

4.1 คำนำ

การทดสอบสำหรับวิทยานิพนธ์นี้เป็นการทดสอบวัดค่าเพอร์มิทิวิตีที่สัมพันธ์ของฉนวนเคเบิล โดยใช้คลื่นนิ่ง ซึ่งได้ทำการสร้างชุดทดสอบอัตโนมัติสำหรับการทดสอบสายไฟฟ้าชนิดตัวนำคู่ (Twin Conductor) ชนิดฉนวน PVC, XLPE และสายเคเบิลใต้ดิน (Underground Cable) ซึ่งการทดสอบตัวเครื่อง และผลการทดสอบจะทำการเปรียบเทียบกับผลการทดสอบหาค่าคาปาซิแตนซ์ และค่าแฟคเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก ($C \tan \delta$) ของสาย XLPE ตามมาตรฐาน IEC 60502-2 และ ICEA S-66-524 รวมถึงการทดสอบหาค่าเพอร์มิทิวิตีที่สัมพันธ์ของฉนวน PVC ในลักษณะต่างๆ โดยมีหัวข้อการทดสอบดังนี้

1. การทดลองและผลการทดลองตามมาตรฐานเป็นการหาค่าคาปาซิแตนซ์ และค่าแฟคเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกในสายเคเบิลเพอร์มิทิวิตีที่สัมพันธ์จากการทดสอบตามมาตรฐานนี้จะเป็นค่าอ้างอิงในการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนของชุดทดสอบที่ได้จัดสร้างขึ้น
2. การทดลองและผลการทดลองจากตัวเครื่องทดสอบเป็นการทดสอบถึงปัจจัยที่มีผลต่อค่าเพอร์มิทิวิตีที่สัมพันธ์ของสายเคเบิลในสถานะอุณหภูมิห้อง โดยมีหัวข้อการทดสอบดังนี้
 - 2.1. การทดสอบหาค่าเพอร์มิทิวิตีที่สัมพันธ์ของฉนวนเคเบิลที่ระยะความยาวสายต่างๆ เพื่อดูผลการเปลี่ยนแปลงของค่าเพอร์มิทิวิตีที่สัมพันธ์ต่อความยาวสาย เนื่องจากค่าเพอร์มิทิวิตีที่สัมพันธ์ของสารฉนวนมีความสัมพันธ์ต่อความถี่ซึ่งจะดูค่าความสัมพันธ์ได้จากสมการที่ 3.3 จึงกล่าวได้ว่าการทดสอบหัวข้อนี้เป็นการดูผลการเปลี่ยนแปลงของค่าเพอร์มิทิวิตีที่สัมพันธ์ต่อความถี่นั่นเอง
 - 2.2. การทดสอบหาค่าเพอร์มิทิวิตีที่สัมพันธ์ของฉนวนเคเบิลที่ตัวนำขนาดต่างๆ
 - 2.3. การทดสอบหาค่าเพอร์มิทิวิตีที่สัมพันธ์ของฉนวนเคเบิลที่ตัวนำขนาดแรงดัน

4.2 วัตถุประสงค์

- 4.2.1 เพื่อประยุกต์การควบคุมการทำงาน และประมวผล โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์
- 4.2.2 เพื่อทดสอบหาค่าเพอร์มิทิวิตีที่สัมพันธ์ของฉนวนสายเคเบิลชนิดตัวนำคู่ และสายเคเบิลใต้ดินที่ขนาด และความยาวสายต่างๆ ที่สภาพอุณหภูมิห้อง
- 4.2.3 เพื่อพัฒนาชุดทดสอบให้ทันสมัย ความสะดวก และรวดเร็วในการทดสอบยิ่งขึ้น
- 4.2.4 เพื่อให้ผู้ทดสอบเข้าใจถึงลักษณะการทดสอบวัดค่าเพอร์มิทิวิตีที่สัมพันธ์แบบต่างๆ
- 4.2.5 เพื่อเปรียบเทียบผลจากตัวเครื่องกับค่ามาตรฐานเพื่อหาค่าความคลาดเคลื่อนจากการวัด

4.3 อุปกรณ์การทดลอง

- 4.3.1 สายเคเบิลชนิดตัวนำคู่ และสายเคเบิลได้ดินขนาดต่างๆ
- 4.3.2 เครื่องทดสอบวัดค่าเพอร์มิทิตีวีตีสัมพัทธ์โดยใช้คลื่นนิ่งแบบอัตโนมัติ
- 4.3.3 OSC รุ่น Analog Digital Scope HM 407-2
- 4.3.4 เครื่องวัดค่า $C \tan \delta$ ยี่ห้อ Tettex รุ่น AG 2805

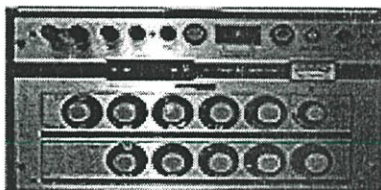
4.4 ข้อควรระวังในการทดลอง

ศึกษาเครื่องมือ และอุปกรณ์ในห้องปฏิบัติการให้เข้าใจอย่างละเอียด ควรทำการคิซชาร์ตสายทุกครั้งก่อนที่จะเข้าไปจับอุปกรณ์นั้นเพื่อป้องกันไม่ให้มีประจุค้างในอุปกรณ์นั้น ควรจัดอุปกรณ์ควบคุมให้อยู่ห่างจากสนามแม่เหล็ก และสนามไฟฟ้าเพื่อป้องกันการรบกวนระบบควบคุมได้

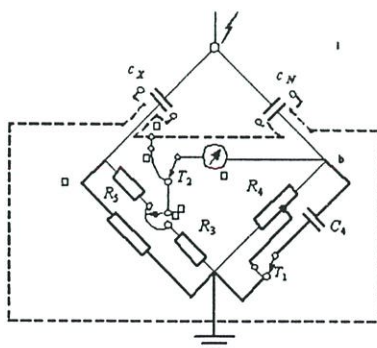
4.5 การทดลอง และผลการทดลองตามมาตรฐาน

4.5.1 การหาค่าคาปาซิแตนซ์ และค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียต่อไดอิเล็กตริกในสาย

อุปกรณ์วัดค่าคาปาซิแตนซ์ และค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียต่อไดอิเล็กตริก ($\tan \delta$) ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ใช้เครื่องรุ่น Tettex AG 2805 ในการทดสอบ ซึ่งค่า $C \tan \delta$ เป็นส่วนหนึ่งของข้อมูลทางไดอิเล็กตริกของระบบจนวน และสามารถนำค่าทั้งสองนี้ไปคำนวณเพื่อหาค่าพลังงานสูญเสียต่อไดอิเล็กตริกได้ดังกล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.7 ดังนั้นจึงกล่าวพื้นฐานการทำงานของตัวเครื่องหลักการทำงานของเครื่อง Tettex AG 2805

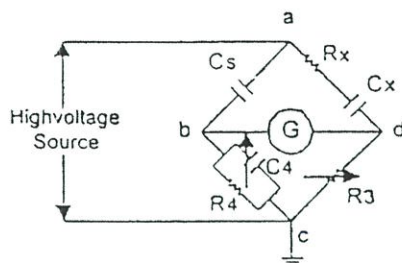


รูปที่ 4.1 เครื่องมือวัด $C \tan \delta$ Bridge Tettex Instrument Type 2805 QK



รูปที่ 4.2 ตัวอย่างวงจรบาลานซ์บริดจ์

จากหลักการของบาลานซ์บริดจ์



รูปที่ 4.3 วงจร Schering bridge

เมื่อพิจารณา R_x และ C_x อนุกรมกันจะได้

$$\tan \delta = \omega R_s C_s \quad (4.1)$$

และเมื่อพิจารณา R_x และ C_x ขนานกันจะได้

$$\tan \delta_p = \frac{1}{\omega R_p C_p} \quad (4.2)$$

ซึ่ง

$$C_p = \frac{C_s}{1 + \tan^2 \delta_s} \quad (4.3)$$

หรือ

$$\varepsilon_p = \frac{\varepsilon_s}{1 + \tan^2 \delta_s} \quad (4.4)$$

$$R_p = R_s \left(1 + \frac{1}{\tan^2 \delta_s} \right) \quad (4.5)$$

เมื่อให้กัลวานอมิเตอร์มีค่าเป็น 0 จะได้ว่า

$$\frac{Z_{ab}}{Z_{bc}} = \frac{Z_{ad}}{Z_{dc}} \quad (4.6)$$

$$\begin{aligned} Z_{ad} &= R_x + j \frac{1}{\omega C_x} & ; & & Z_{ab} &= -j \frac{1}{\omega C_s} \\ Z_{bc} &= \frac{R_4 [-j1 / \omega C_4]}{R_4 - j(1 / \omega C_4)} & ; & & Z_{dc} &= R_3 \end{aligned} \quad (4.7)$$

ซึ่งจะได้

$$C_x = C_s \frac{R_4}{R_3} \quad (4.8)$$

และ

$$R_x = \frac{C_4 R_3}{C_s} \quad (4.9)$$

เราจะได้

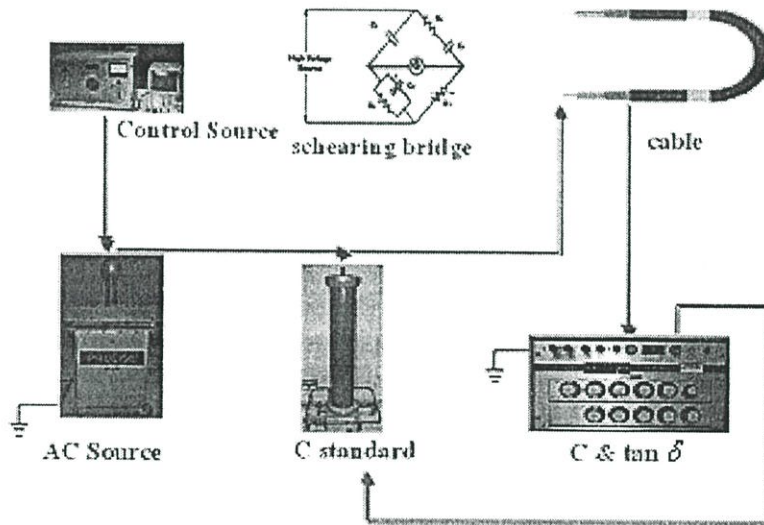
$$\omega C_x R_x = \omega C_4 R_4 \quad (4.10)$$

ดังนั้น

$$\tan \delta = \omega C_4 R_4 \quad (4.11)$$

4.5.2 วิธีและขั้นตอนการทดสอบ

1. ตรวจสอบไฟเลี้ยงเครื่องมือวัดค่าคาปาซิแตนซ์ และค่าพลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกของเครื่อง Tettex AG 2805 โดยปรับสวิตช์ปรับค่าความแม่นยำในการวัด โดยหมุนไปตำแหน่งเซ็คเตอร์ถ้ามีไฟเลี้ยงพอเพิ่มบนหน้าปัดอนุอินดิเคเตอร์จะเคลื่อนไปที่ค่า 100
2. ต่อวงจรดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 วงจรทดสอบวัดค่าคาปาซิแตนซ์ และค่าพลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก

3. ปรับสวิตช์ค่าแฟคเตอร์ผลคูณของค่าคาปาซิแตนซ์ของวัสดุทดสอบให้อยู่ที่ค่า $I_{max} = 50$ มิลิแอมป์ (ค่ากระแสสูงสุดที่เครื่องมือวัดสามารถทนได้)
4. ปรับสวิตช์ค่าความแม่นยำการวัดให้มาอยู่ที่สแต็ปแรกซึ่งมีระดับความแม่นยำต่ำสุด (สแต็ปค่าความแม่นยำมี 4 สแต็ป)
5. ป้อนแรงดันทดสอบเข้าวงจรที่ทดสอบ
6. ปรับสวิตช์แฟคเตอร์ตัวคูณค่าคาปาซิแตนซ์ของวัสดุทดสอบและสวิตช์ปรับค่าคาปาซิแตนซ์ของวัสดุทดสอบ รวมทั้งปรับสวิตช์แฟคเตอร์ตัวคูณของแฟคเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกโดยปรับเข็มอนุอินดิเคเตอร์ชี้ที่ 0

7. เพิ่มระดับความแม่นยำไปที่สตีปที่ 2 และปรับค่าคาปาซิแตนซ์และค่าพลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกตามข้อที่ 6 จนถึงระดับความแม่นยำในสตีปสุดท้าย (สตีปที่ 7)
8. บันทึกค่าคาปาซิแตนซ์และค่าพลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกที่อ่านได้จากผลการปรับข้อที่ 7 ไปคำนวณหาค่าคาปาซิแตนซ์และค่าพลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกของวัสดุทดสอบ และตารางบันทึกผล

คาปาซิแตนซ์ = คาปาซิแตนซ์มาตรฐาน x ค่าที่อ่านได้จากการปรับ

$$C_x = C_N F_{CX} C_X \text{ (ที่ได้จากการปรับ)}$$

ค่าพลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกของวัสดุทดสอบ = ค่าที่อ่านได้จากการปรับ

$$\tan \delta = F \tan \delta * \tan \delta$$

9. นำค่าคาปาซิแตนซ์ที่ได้ไปคำนวณหาค่าเพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์และบันทึกผลลงในตาราง โดยสามารถหาได้จากสมการ

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r l}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (4.12)$$

และค่าเพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์ของฉนวนเคเบิลหาได้จาก

$$\epsilon_r = \frac{C \ln \frac{r_2}{r_1}}{2\pi\epsilon_0 l} \quad (4.13)$$

เมื่อ ϵ_r คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกหรือค่าเพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์ของฉนวน

ϵ_0 คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของสุญญากาศมีค่าเท่ากับ 8.854×10^{-12} ฟารัด/เมตร

r_1 คือ รัศมีของตัวนำ (รวม Conductor Shield ถ้ามี)

r_2 คือ รัศมีของฉนวน (ไม่รวม Insulation Shield)

l คือ ระยะสายเคเบิล (เมตร)

4.5.3 มาตรฐานการทดสอบ

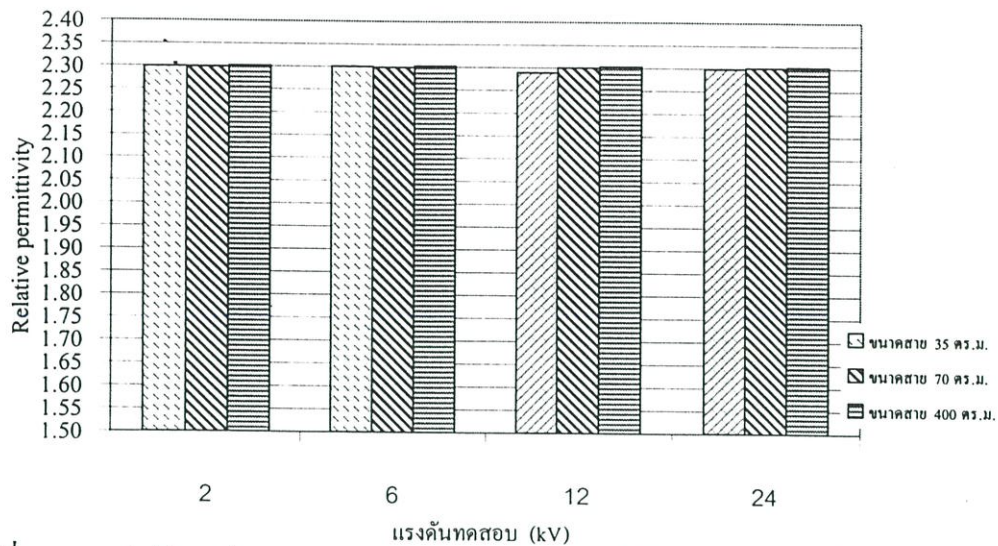
4.5.3.1 การทดสอบในหัวข้อ Tan δ Measurement ตามมาตรฐาน IEC 60502-2

ผลการทดสอบตัวอย่างสาย 12/20 kV Underground Cable Copper Standard Conductor XLPE Insulated and PE Sheathed (12/20 kV -CE) ขนาด 35 mm², 70 mm², 400 mm² ที่ระยะความยาวสาย 15 เมตร ที่อุณหภูมิแวดล้อม 35 °C โดยทำการทดสอบที่แรงดัน 2 kV, 0.5U_o, U_o และ 2U_o โดยการทดสอบจะได้ค่าคาปาซิแตนซ์เพื่อหาค่าเพอร์มิทิตีวี่สัมพัทธ์ของสารฉนวน โดยเมื่อทดสอบที่แรงดันทดสอบ 2 kV, U_o จะต้องมามีค่า tan δ ไม่เกิน 40×10^{-4} และที่แรงดันทดสอบ 0.5 V, 2U_o จะต้องมามีค่า tan δ ไม่เกิน 20×10^{-4} โดยใช้คาปาซิเตอร์มาตรฐานของ Tettex รุ่น 3380 ขนาดความจุ 100 pF

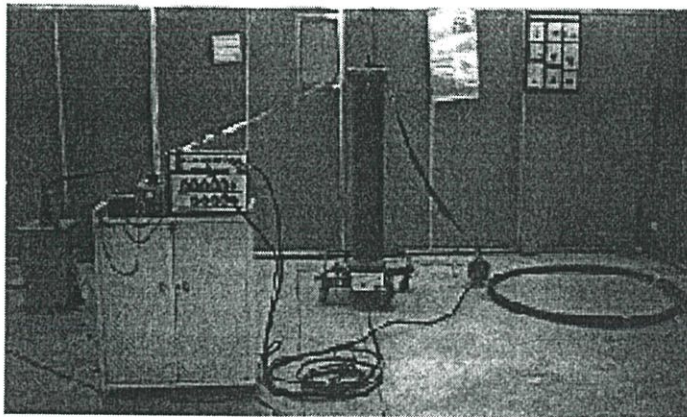
ตารางที่ 4.1 ผลทดสอบของฉนวน XLPE ของสายขนาดต่างๆ ในหัวข้อ Tan δ measurement

ตามมาตรฐาน IEC 60502-2 ที่อุณหภูมิ 35°C

ขนาดสาย (mm ²)	แรงดัน ทดสอบ (kV)	r_1 (mm ²)	r_2 (mm ²)	Cx (pF)	ϵ_r
35	2	4.060	9.833	2,128.5	2.299
	6			2,128.7	2.300
	12			2,129.0	2.289
	24			2,129.0	2.299
70	2	5.421	11.116	2,635.0	2.298
	6			2,636.0	2.299
	12			2,637.5	2.300
	24			2,638.0	2.301
400	2	12.324	17.974	5,022.0	2.301
	6			5,024.0	2.302
	12			5,026.5	2.303
	24			5,026.5	2.303



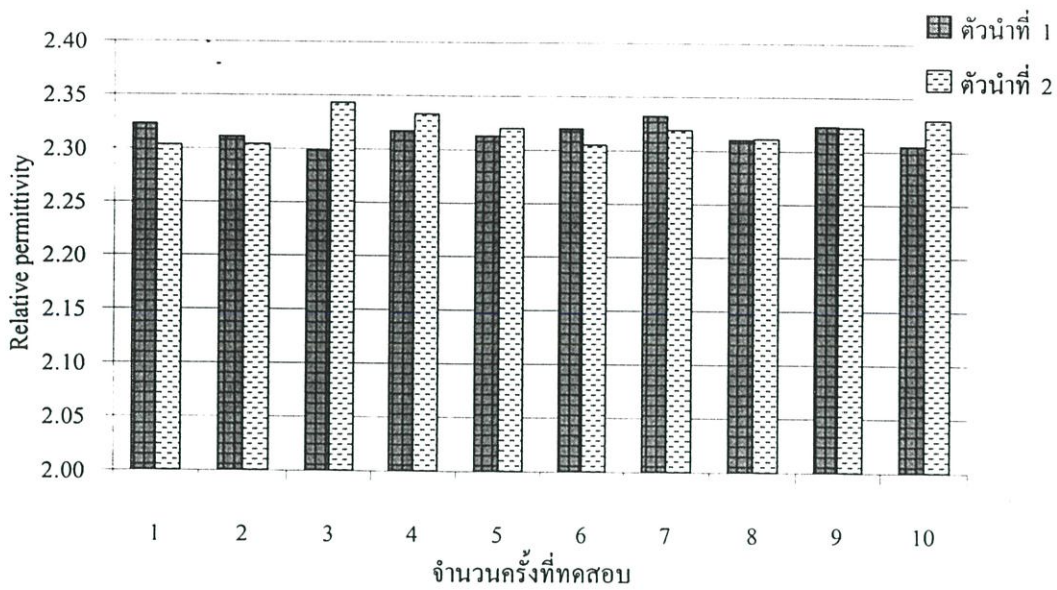
รูปที่ 4.5 กราฟเปรียบเทียบผลฉนวน XLPE ของสายเคเบิลใต้ดินขนาด 35 mm^2 , 70 mm^2 และ 400 mm^2 ที่แรงดันต่างๆ ตามมาตรฐาน IEC 60502-2



รูปที่ 4.6 การทดสอบวัดค่าเพอร์มิทิวตี้สัมพัทธ์ของสาย 12/20 kV Underground Cable Copper Standard Conductor XLPE Insulated and PE Sheathed (12/20 kV -CE) ขนาด 70 mm^2

4.5.3.2 การทดสอบฉนวน XLPE ของสายเคเบิลแรงดันต่ำ

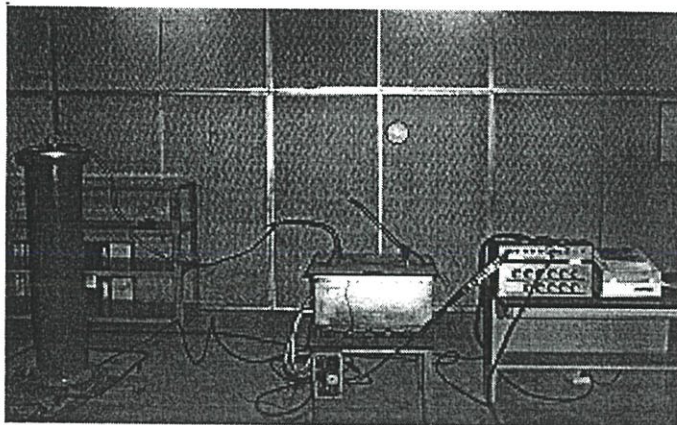
ผลการทดสอบตัวอย่างสาย 0.6/1 kV Copper cable twin conductor crosslinked polyethylene insulated and polyethylene sheathed ขนาด 6 mm^2 เพื่อศึกษาค่าเพอร์มิทิวตี้สัมพัทธ์ของฉนวนพีวีซี โดยอ้างอิงการทดสอบตามมาตรฐาน ICEA S-66-524 ที่ระยะความยาวสายในการทดสอบ 15 ft (4.57 m) ระยะความยาวสายที่แช่น้ำขณะทดสอบ 10 ft (3.05 m) โดยทำการทดสอบที่แรงดัน 1 kV ตามพิกัดแรงดันของสาย โดยอุณหภูมิห้องขณะทดสอบ 35°C และอุณหภูมิน้ำขณะทดสอบ 35°C โดยใช้คาปาซิเตอร์มาตรฐานของ Tettex รุ่น 3370 ขนาด 99.91 pF



รูปที่ 4.7 ผลการทดสอบหาค่าเพอร์มิทิวิตีที่สัมพันธ์กับจำนวน XLPE ของสายแรงดันต่ำที่อุณหภูมิ 35 °C ที่ตัวนำที่ 1 และตัวนำที่ 2

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบหาค่าเพอร์มิทิวิตีที่สัมพันธ์กับจำนวน XLPE ที่อุณหภูมิ 35 °C

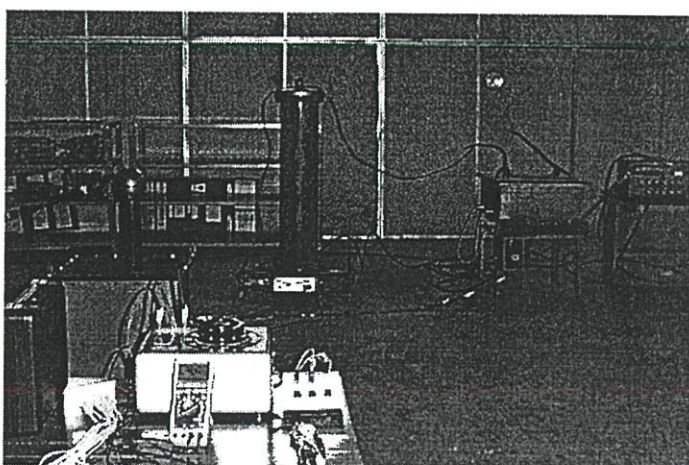
จำนวนครั้งที่ทดสอบ	r_1 (mm ²)	r_2 (mm ²)	ตัวนำที่ 1		ตัวนำที่ 2	
			Cx (pF)	ϵ_r	Cx (pF)	ϵ_r
1	1.570	2.568	1,200.25	2.323	1,189.92	2.303
2	1.570	2.568	1,194.05	2.311	1,190.43	2.304
3	1.570	2.568	1,187.33	2.298	1,210.58	2.343
4	1.570	2.568	1,197.15	2.317	1,205.42	2.333
5	1.570	2.568	1,195.08	2.313	1,198.70	2.320
6	1.570	2.568	1,198.70	2.320	1,190.95	2.305
7	1.570	2.568	1,204.90	2.332	1,198.18	2.319
8	1.570	2.568	1,193.53	2.310	1,194.05	2.311
9	1.570	2.568	1,200.25	2.323	1,199.73	2.322
10	1.570	2.568	1,190.95	2.305	1,203.35	2.329
ค่าเฉลี่ย	1.570	2.568	1,196.21	2.315	1,198.13	2.318



รูปที่ 4.8 การทดสอบวัดค่าเพอร์มิทิวตี้สัมพัทธ์ของสาย 0.6/1 kV Copper cable twin conductor crosslinked polyethylene insulated and polyethylene sheathed ขนาด 6 mm^2

4.5.3.3 การทดสอบฉนวน PVC ของสายเคเบิลแรงดันต่ำ

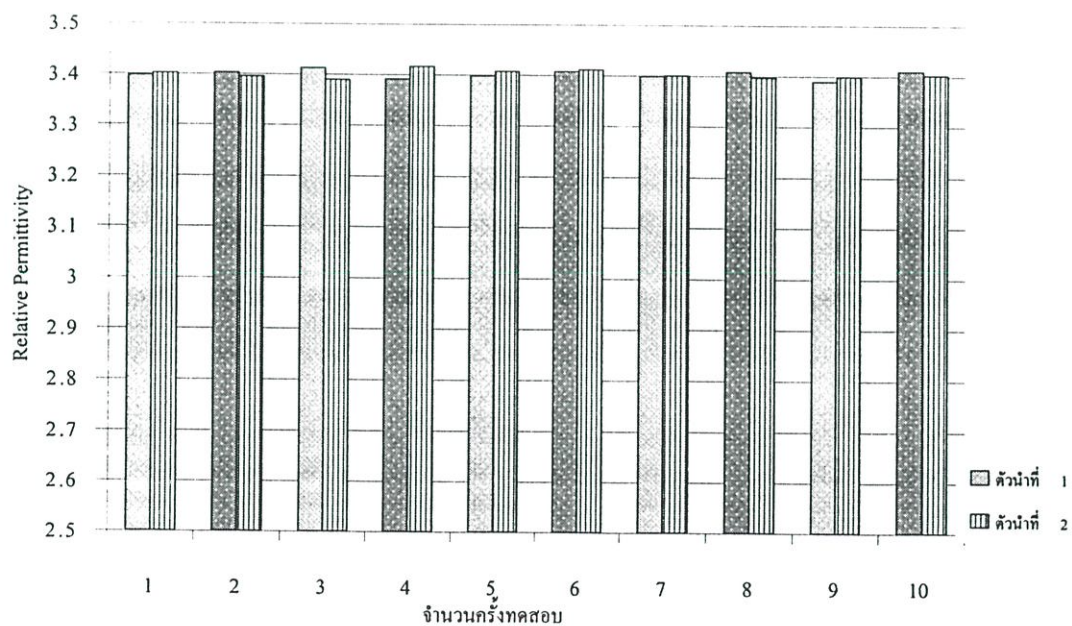
ผลการทดสอบตัวอย่างสาย 300 V, 2 - core PVC Insulated Sheathed, Flat Type ขนาด 1 mm^2 เพื่อศึกษาค่าเพอร์มิทิวตี้สัมพัทธ์ของฉนวน PVC โดยอ้างอิงการทดสอบตามมาตรฐาน ICEA S-66-524 ที่ระยะความยาวสายในการทดสอบ 15 ft (4.57 m) ระยะความยาวสายที่แช่น้ำขณะทดสอบ 10 ft (3.05 m) โดยทำการทดสอบที่แรงดัน 300 V ตามพิกัดแรงดันของสาย โดยอุณหภูมิห้องขณะทดสอบ $35 \text{ }^\circ\text{C}$ และอุณหภูมิน้ำขณะทดสอบ $35 \text{ }^\circ\text{C}$ โดยใช้คาปาซิเตอร์มาตรฐานของ Tettex รุ่น 3370 ขนาด 99.91 pF



รูปที่ 4.9 การทดสอบวัดค่าเพอร์มิทิวตี้สัมพัทธ์ของสาย 0.6/1 kV Copper cable twin conductor crosslinked polyethylene insulated and polyethylene sheathed ขนาด 1 mm^2

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบหาค่าเพอร์มิทิวิตีที่สัมพันธ์กับจำนวนพีวีซีแรงดันต่ำที่อุณหภูมิ 35 °C

จำนวนครั้งที่ทดสอบ	r_1 (mm ²)	r_2 (mm ²)	ตัวนำที่ 1		ตัวนำที่ 2	
			Cx (pF)	ϵ_r	Cx (pF)	ϵ_r
1	0.89	1.590	1,218.9	3.346	1,490.0	3.401
2	0.89	1.590	1,465.9	3.358	1,487.4	3.395
3	0.89	1.590	1,494.9	3.412	1,484.8	3.389
4	0.89	1.590	1,467.7	3.350	1,496.6	3.416
5	0.89	1.590	1,488.7	3.398	1,492.7	3.407
6	0.89	1.590	1,512.0	3.451	1,494.4	3.411
7	0.89	1.590	1,489.2	3.399	1,489.6	3.400
8	0.89	1.590	1,532.5	3.498	1,488.3	3.397
9	0.89	1.590	1,484.8	3.389	1,489.2	3.399
10	0.89	1.590	1,494.0	3.410	1,490.5	3.402
ค่าเฉลี่ย	0.89	1.590	1,464.86	3.401	1,490.35	3.401



รูปที่ 4.10 ผลการทดสอบหาค่าเพอร์มิทิวิตีที่สัมพันธ์กับจำนวน PVC ของสายแรงดันต่ำที่อุณหภูมิ 35°C ที่ ตัวนำที่ 1 และตัวนำที่ 2

ผลการทดสอบดังตารางที่ 4.1 ของสายตัวอย่าง 12/20 kV Underground Cable Copper Standard Conductor XLPE Insulated and PE Sheathed (12/20 kV -CE) ขนาด $35 \text{ mm}^2, 70 \text{ mm}^2, 400 \text{ mm}^2$ ที่ระยะความยาวสาย 15 m ที่อุณหภูมิห้องทดสอบ 35°C โดยทำการทดสอบที่แรงดัน 2 kV, $0.5U_0$, U_0 และ $2U_0$ ตามมาตรฐาน IEC 60502-2 ซึ่งผลการศึกษพบว่าผลของขนาดตัวนำและขนาดของแรงดันที่ใช้ในการทดสอบไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าเพอร์มิติวิตีสัมพัทธ์[11] และผลที่ได้มีค่าตรงกับค่าแสดงค่าเพอร์มิติวิตีสัมพัทธ์ของสาร Polymer[1-2] และจากการวัดค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกของฉนวนมีค่าไม่เกินกว่าค่ามาตรฐานกำหนด [5] ซึ่งเป็นผลมาจากคุณสมบัติของสารฉนวนประเภท Nonpolar Dielectric

ผลการทดสอบดังตารางที่ 4.2 และ 4.3 ของสายตัวอย่าง 0.6/1 kV Copper cable twin conductor cross-linked polyethylene insulated and polyethylene sheathed ขนาด 6 mm^2 และ 300 V, 2 - core PVC Insulated Sheathed, Flat Type ขนาด 1 mm^2 โดยอ้างอิงการทดสอบตามมาตรฐาน ICEA S-66-524 ค่าเพอร์มิติวิตีสัมพัทธ์ของสารฉนวน PVC และ XLPE พบว่าค่าที่วัดได้จากการทดสอบจากสายตัวนำที่ 1 และ ตัวนำที่ 2 มีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากัน เนื่องมาจากฉนวนที่สายตัวนำทั้งสองเป็นฉนวนชนิดเดียวกัน และผลที่ได้มีค่าตรงกับค่าแสดงค่าเพอร์มิติวิตีสัมพัทธ์ของสาร Polymer[1-2] และจากการวัดค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกของฉนวนมีค่าไม่เกินกว่าค่ามาตรฐานกำหนด[1] ซึ่งเป็นผลมาจากคุณสมบัติของสารฉนวนประเภท Nonpolar Dielectric และ Polar Dielectric

4.6 การทดลองและผลการทดลองจากเครื่องทดสอบ

4.6.1 วิธีและขั้นตอนการทดลอง

1. ศึกษาการใช้งานอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบฉนวนให้เข้าใจ และสามารถใช้งานได้
2. คำนวณหาค่าเฉลี่ย (Simple Average) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน(Standard Deviation) จากสมการที่ 4.14 และ 4.15

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (4.14)$$

$$SD = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (4.15)$$

3. คำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของเครื่องทดสอบจากสมการที่ 4.16

$$\% \text{ ความคลาดเคลื่อน} = \frac{\text{ค่าจริง} - \text{ค่าที่วัดได้}}{\text{ค่าจริง}} \times 100 \% \quad (4.16)$$

4.6.2 ผลการทดลอง

4.6.2.1 การทดสอบหาค่าเพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์ของฉนวนเคเบิลที่ระยะความยาวสายต่างๆ

ทำการทดสอบกับสายทดสอบ 3 ชนิด เพื่อผลการเปลี่ยนแปลงของค่าเพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์ต่อความถี่ที่ความยาวสายต่างๆ ณ. ความยาวคลื่นเท่ากับ $\lambda/4$ ตามสมการที่ 2.83 ซึ่งค่าที่ได้จากการทดสอบจะเกิดจากคุณสมบัติเฉพาะของสารฉนวน PVC และ XLPE โดยทำการทดสอบ 10 ครั้งในแต่ละระยะความยาวสาย เพื่อหาค่าเฉลี่ยในการทดสอบ ทำการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยในการทดสอบกับค่าที่ได้จากการทดสอบมาตรฐาน และค่าคุณสมบัติของสารฉนวน Polymer[1-2] เพื่อหาค่าความคลาดเคลื่อนในการวัด

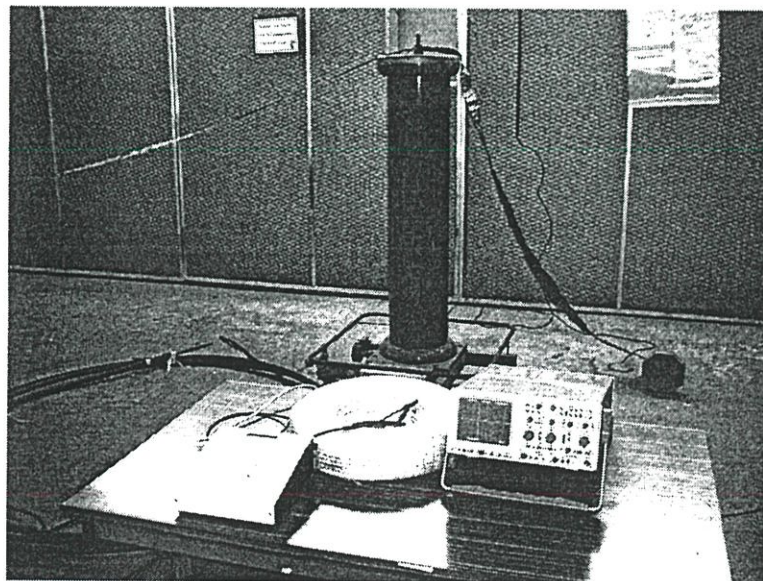
- ชนิดของสายทดสอบ : 300V 2-core PVC Insulator and sheathed ,flat type
 สภาวะแวดล้อม : อุณหภูมิ 35°C : ความชื้นสัมพัทธ์ 65 %
 ชนิดฉนวน : PVC
 ขนาดตัวนำ : 1 mm²

ตารางที่ 4.4 ค่าเพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์ของฉนวนเคเบิล 300V, 2-core PVC Insulator and Sheathed, flat type ที่ระยะความยาวสายต่างๆ

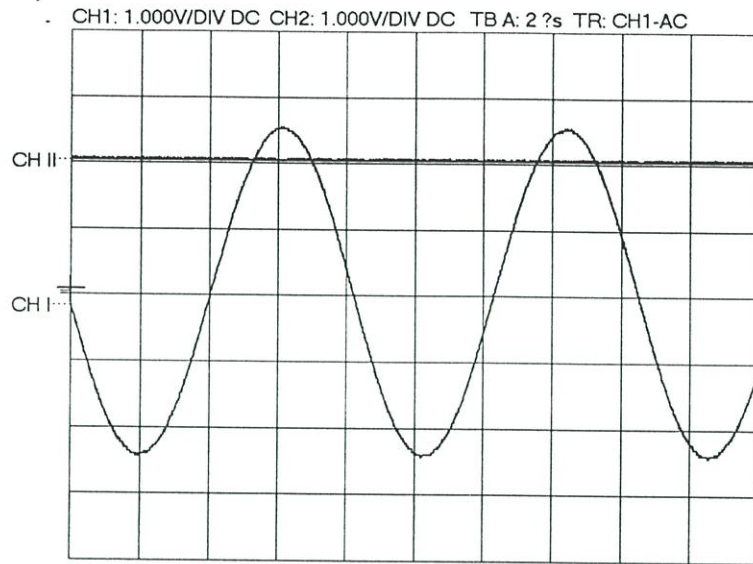
จำนวน ครั้งที่ ทดสอบ	ค่าเพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์ของฉนวนเคเบิลที่ความยาวสายต่าง					
	15 m		50 m		100 m	
	ความถี่ (kHz)	ϵ_r	ความถี่ (kHz)	ϵ_r	ความถี่ (kHz)	ϵ_r
1	2,964.866	2.844	860.733	3.037	426.591	3.091
2	2,964.866	2.837	860.592	3.038	426.117	3.097
3	2,966.954	2.840	860.875	3.036	426.522	3.092
4	2,964.866	2.844	860.733	3.037	426.040	3.099
5	2,968.208	2.837	860.592	3.038	427.144	3.083
6	2,965.909	2.842	860.733	3.037	426.591	3.091
7	2,965.388	2.843	860.733	3.037	426.591	3.091
8	2,966.431	2.841	860.733	3.037	425.834	3.102
9	2,964.866	2.844	860.733	3.037	426.660	3.090
10	2,968.522	2.837	860.592	3.038	426.660	3.090
\bar{x}	2,966.088	2.841	860.704	3.037	426.745	3.092
SD	1.405	0.00298	0.08937	0.000632	0.3781	0.0054

ตารางที่ 4.4(ต่อ)

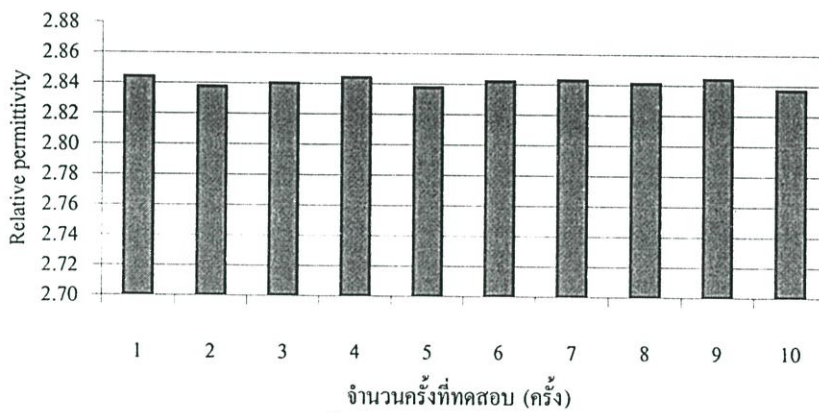
จำนวน ครั้งที่ ทดสอบ	ค่าเพอร์มิทิวตีส์สัมพัทธ์ของฉนวนเคเบิลที่ความยาวสายต่าง					
	150 m		200 m		250 m	
	ความถี่ (kHz)	ϵ_r	ความถี่ (kHz)	ϵ_r	ความถี่ (kHz)	ϵ_r
1	283.660	3.107	212.199	3.123	169.570	3.130
2	283.432	3.112	212.098	3.126	169.814	3.121
3	283.615	3.108	212.267	3.121	169.651	3.127
4	283.250	3.116	212.438	3.116	169.542	3.131
5	283.296	3.115	212.335	3.119	169.759	3.123
6	283.250	3.116	212.267	3.121	169.705	3.125
7	283.432	3.112	212.404	3.117	169.705	3.125
8	283.478	3.111	212.267	3.121	169.841	3.120
9	283.843	3.103	212.199	3.123	169.624	3.128
10	283.615	3.108	212.132	3.125	169.732	3.124
\bar{x}	283.487	3.110	212.260	3.121	169.694	3.125
SD	0.19561	0.00429	0.10967	0.00322	0.0984	0.00362



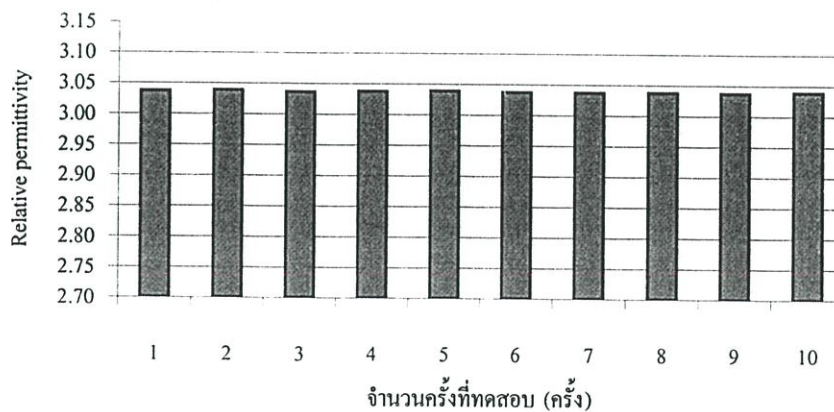
รูปที่ 4.11 การทดสอบวัดค่าเพอร์มิทิวตีส์สัมพัทธ์ของฉนวนเคเบิล 300V, 2-core PVC Insulator and Sheathed, flat type ที่ระยะความยาวสาย 100 m



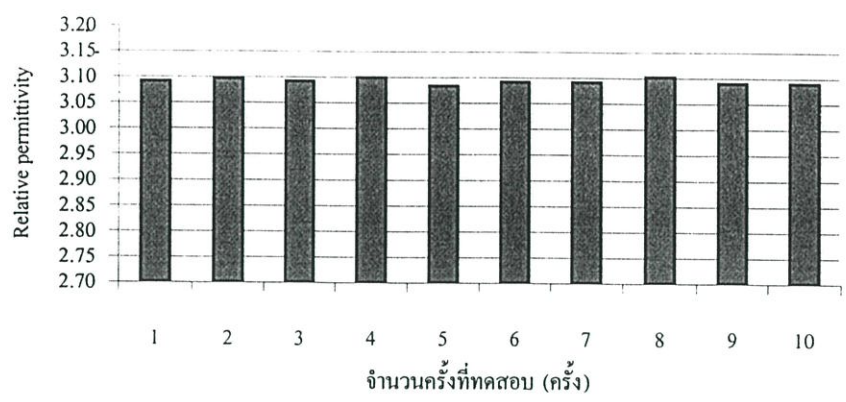
รูปที่ 4.12 ตัวอย่างรูปคลื่นสัญญาณแรงดันที่ต้นสายของสาย 300V, 2-core PVC Insulator and Sheathed, flat type ที่ระยะความยาวสาย 100 m



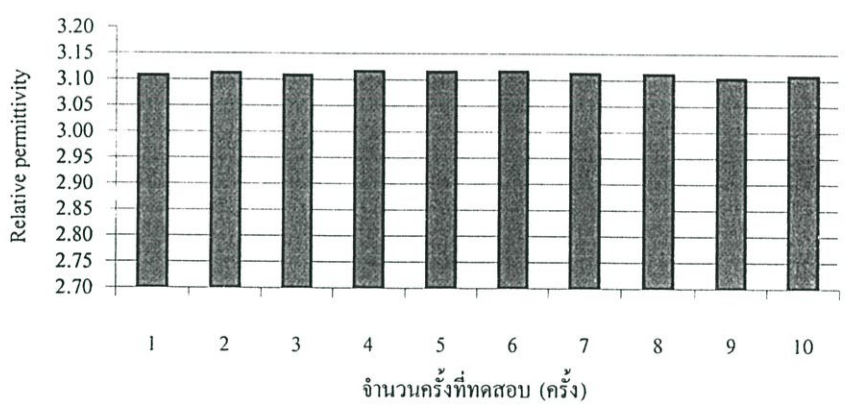
รูปที่ 4.13 กราฟเปรียบเทียบค่าเพอร์มิททิวิตีสัมพัทธ์ของฉนวนเคเบิล 300V, 2-core PVC Insulator and Sheathed, flat type ที่ระยะความยาวสาย 15 m



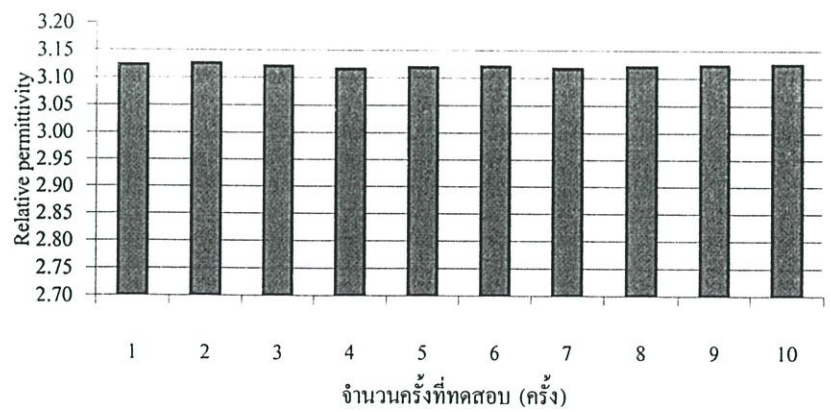
รูปที่ 4.14 กราฟเปรียบเทียบค่าเพอร์มิททิวิตีสัมพัทธ์ของฉนวนเคเบิล 300V, 2-core PVC Insulator and Sheathed, flat type ที่ระยะความยาวสาย 50 m



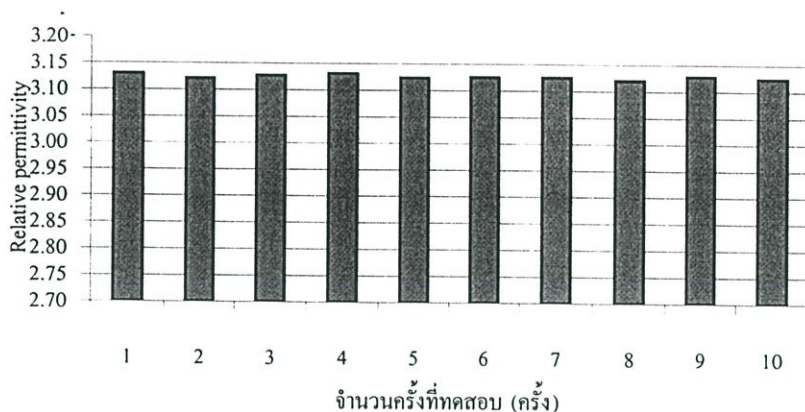
รูปที่ 4.15 กราฟเปรียบเทียบค่าเพอร์มิทิวตี้สัมพัทธ์ของฉนวนเคเบิล 300V, 2-core PVC Insulator and Sheathed, flat type ที่ระยะความยาวสาย 100 m



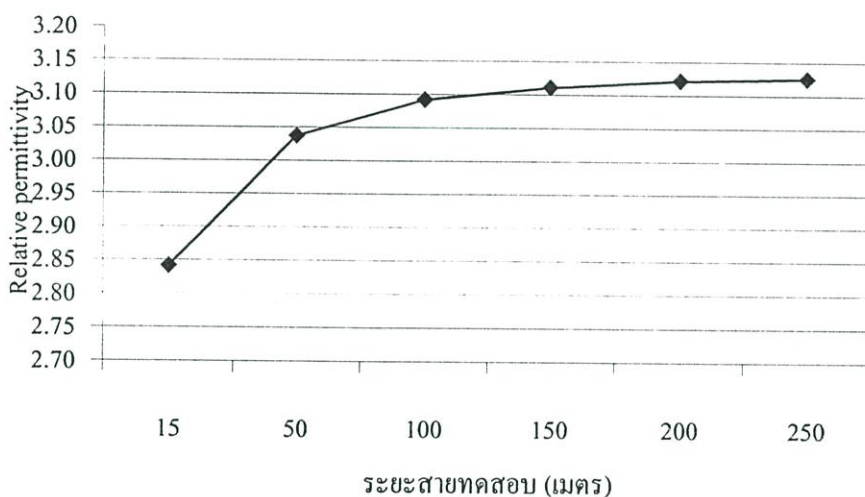
รูปที่ 4.16 กราฟเปรียบเทียบค่าเพอร์มิทิวตี้สัมพัทธ์ของฉนวนเคเบิล 300V, 2-core PVC Insulator and Sheathed, flat type ที่ระยะความยาวสาย 150 m



รูปที่ 4.17 กราฟเปรียบเทียบค่าเพอร์มิทิวตี้สัมพัทธ์ของฉนวนเคเบิล 300V, 2-core PVC Insulator and Sheathed, flat type ที่ระยะความยาวสาย 200 m



รูปที่ 4.18 กราฟเปรียบเทียบค่าเพอร์มิทิวติวี่สัมพัทธ์ของฉนวนเคเบิล 300V, 2-core PVC Insulator and Sheathed, flat type ที่ระยะความยาวสาย 250 m

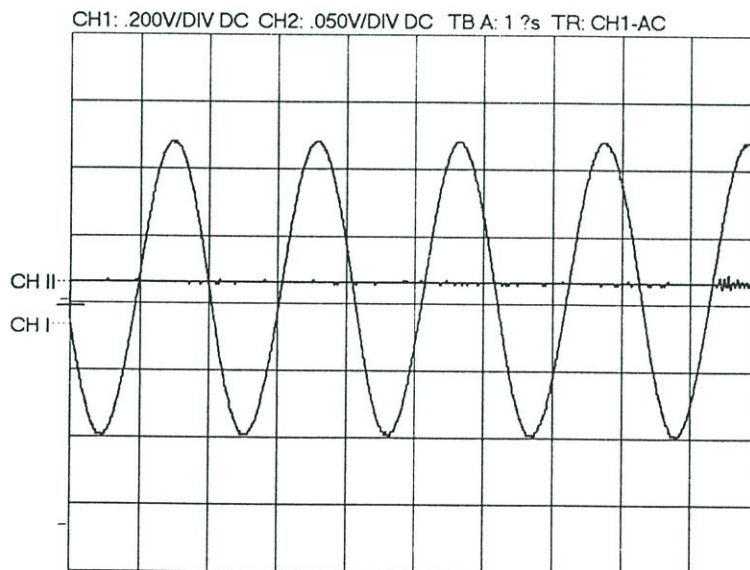


รูปที่ 4.19 กราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยเพอร์มิทิวติวี่สัมพัทธ์ของเคเบิล 300V, 2-core PVC Insulator and Sheathed, flat type ที่ระยะความยาวสายต่างๆ

2. ชนิดของสายทดสอบ : 12/20 kV Underground cable copper stranded conductor
XLPE insulator and PE sheathed
- สภาวะแวดล้อม : อุณหภูมิ 35 °C : ความชื้นสัมพัทธ์ 65 %
- ขนาดตัวนำ : 70 mm²
- ชนิดฉนวน : XLPE ระดับแรงดัน 5Vp-p

ตารางที่ 4.5 ค่าเพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์ของฉนวนเคเบิล 12/20 kV Underground cable copper stranded conductor XLPE insulator and PE sheathed ที่ระยะสายต่างๆ

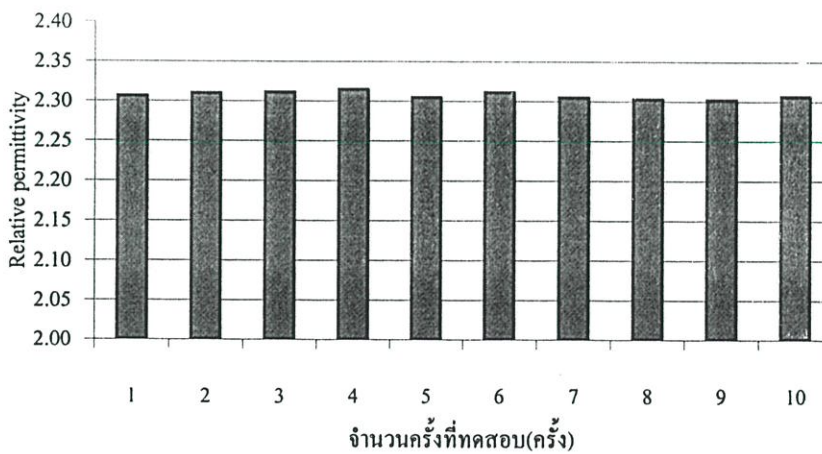
จำนวน ครั้งที่ ทดสอบ	ค่าเพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์ของฉนวนเคเบิลที่ความยาวสายต่าง					
	15 m		50 m		100 m	
	ความถี่ (kHz)	ϵ_r	ความถี่ (kHz)	ϵ_r	ความถี่ (kHz)	ϵ_r
1	3,292.610	2.306	986.287	2.313	493.891	2.306
2	3,289.758	2.310	988.855	2.301	493.037	2.314
3	3,289.046	2.311	986.287	2.313	493.998	2.305
4	3,286.913	2.314	987.997	2.305	493.677	2.308
5	3,294.039	2.304	987.569	2.307	493.667	2.308
6	3,289.046	2.311	989.070	2.300	493.250	2.312
7	3,294.039	2.304	986.713	2.311	493.891	2.306
8	3,295.469	2.302	988.426	2.303	493.463	2.310
9	3,296.185	2.301	987.783	2.306	493.356	2.311
10	3,292.610	2.306	986.287	2.313	493.677	2.308
\bar{x}	3,291.972	2.307	987.527	2.307	493.590	2.309
SD	3.10833	0.00435	1.08095	0.005051	0.309304	0.002898



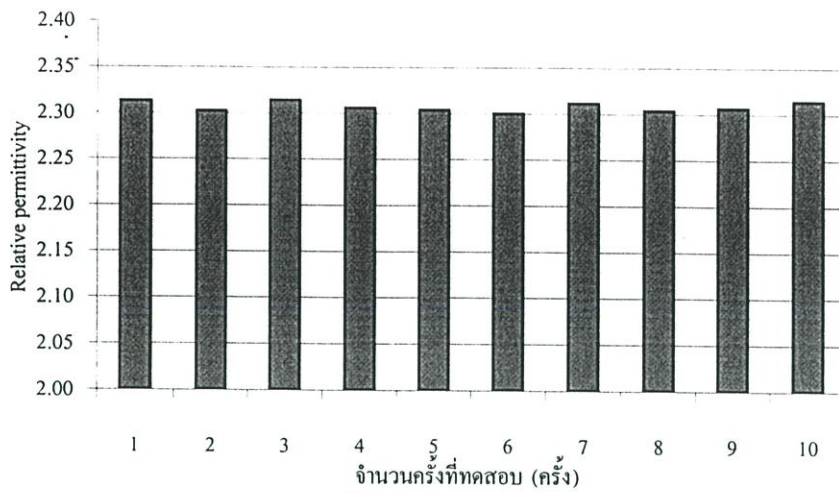
รูปที่ 4.20 ตัวอย่างรูปคลื่นสัญญาณแรงดันที่ต้นสายของสาย 12/20 kV Underground cable copper stranded conductor XLPE insulator and PE sheathed

ตารางที่ 4.5(ต่อ)

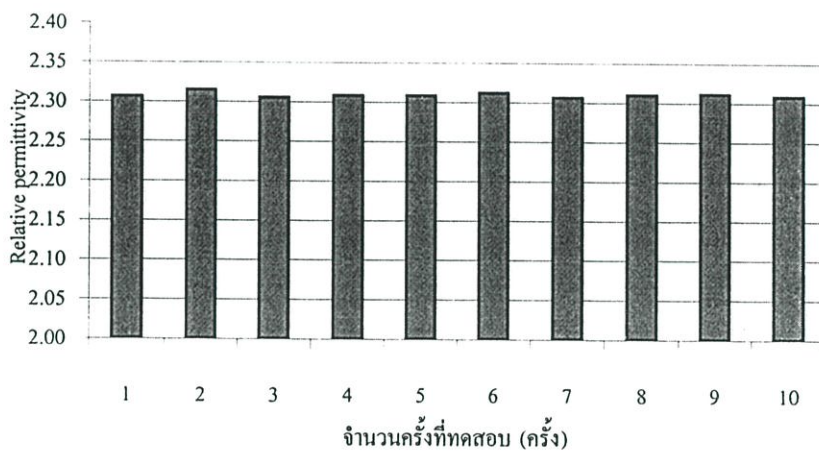
จำนวน ครั้งที่ ทดสอบ	ค่าเพอร์มิทิวตีตี้สัมพัทธ์ของฉนวนเคเบิลที่ความยาวสายต่าง					
	150 m		200 m		250 m	
	ความถี่ (kHz)	ϵ_r	ความถี่ (kHz)	ϵ_r	ความถี่ (kHz)	ϵ_r
1	329.261	2.306	246.785	2.309	197.728	2.302
2	328.975	2.310	246.892	2.307	197.556	2.306
3	329.332	2.305	246.571	2.313	197.385	2.310
4	328.975	2.310	246.945	2.306	197.814	2.300
5	328.904	2.311	246.838	2.308	197.300	2.312
6	329.475	2.303	246.267	2.300	197.214	2.314
7	329.047	2.309	246.838	2.308	197.556	2.306
8	329.332	2.305	246.945	2.306	197.471	2.308
9	329.118	2.308	246.571	2.313	197.428	2.309
10	329.475	2.303	246.785	2.309	197.087	2.317
\bar{x}	329.189	2.307	246.743	2.308	197.493	2.308
SD	0.212837	0.002981	0.21373	0.003725	0.222914	0.005211



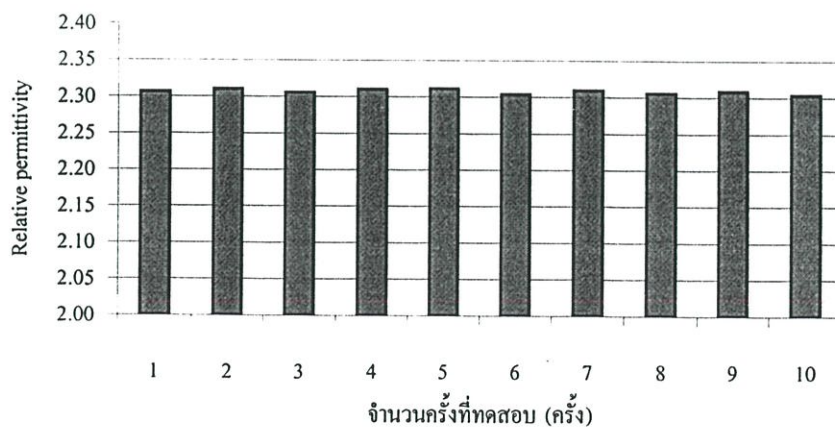
รูปที่ 4.21 กราฟเปรียบเทียบค่าเพอร์มิทิวตีตี้สัมพัทธ์ของฉนวนเคเบิล 12/20 kV Underground cable copper stranded conductor XLPE insulator PE sheathed ที่ระยะความยาว 15 m



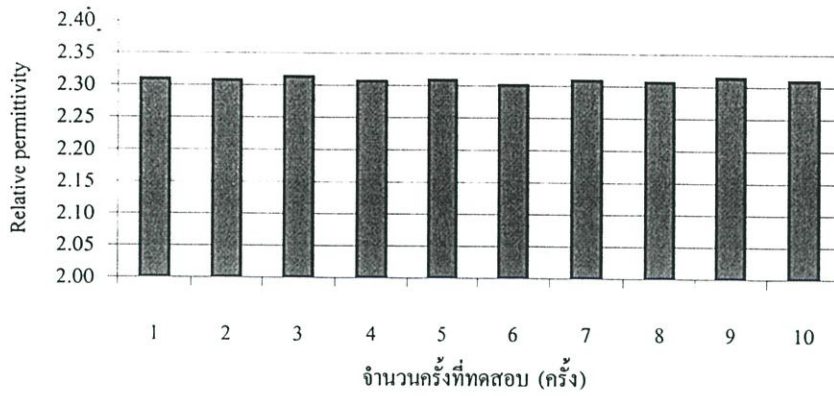
รูปที่ 4.22 กราฟเปรียบเทียบค่าเพอร์มิทิวตี้สัมพัทธ์ของฉนวนเคเบิล 12/20 kV Underground cable copper stranded conductor XLPE insulator and PE sheathed ที่ระยะความยาว 50 m



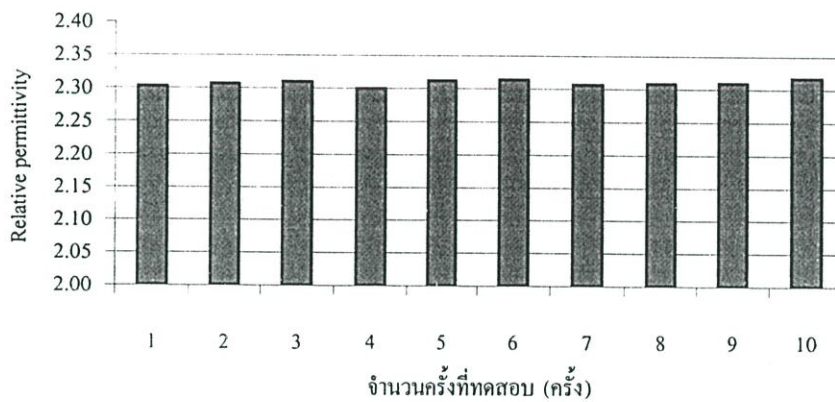
รูปที่ 4.23 กราฟเปรียบเทียบค่าเพอร์มิทิวตี้สัมพัทธ์ของฉนวนเคเบิล 12/20 kV Underground cable copper stranded conductor XLPE insulator and PE sheathed ที่ระยะความยาว 100 m



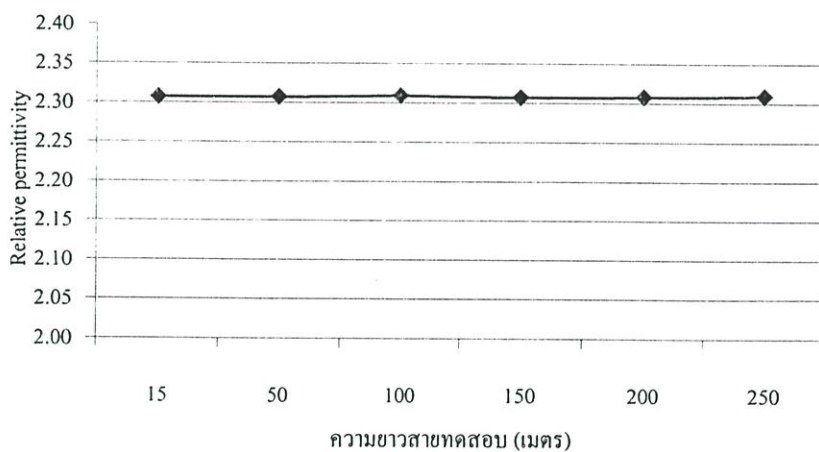
รูปที่ 4.24 กราฟเปรียบเทียบค่าเพอร์มิทิวตี้สัมพัทธ์ของฉนวนเคเบิล 12/20 kV Underground cable copper stranded conductor XLPE insulator and PE sheathed ที่ระยะความยาว 150 m



รูปที่ 4.25 กราฟเปรียบเทียบค่าเพอร์มิทิวตี้สัมพัทธ์ของฉนวนเคเบิล 12/20 kV Underground cable copper stranded conductor XLPE insulator and PE sheathed ที่ระยะความยาว 200 m



รูปที่ 4.26 กราฟเปรียบเทียบค่าเพอร์มิทิวตี้สัมพัทธ์ของฉนวนเคเบิล 12/20 kV Underground cable copper stranded conductor XLPE insulator and PE sheathed ที่ระยะความยาว 250 m



รูปที่ 4.27 กราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยเพอร์มิทิวตี้สัมพัทธ์ของเคเบิล 12/20 kV Underground cable copper stranded conductor XLPE insulator and PE sheathed ที่ระยะความยาวสายต่างๆ

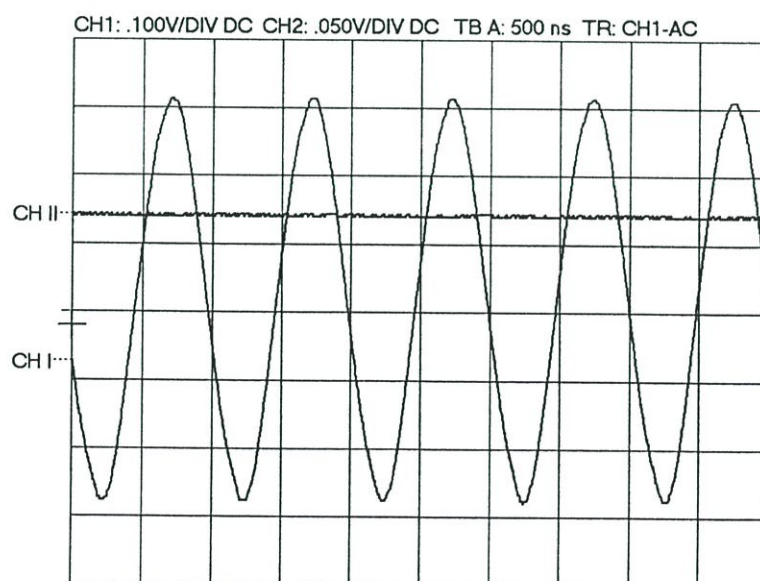
3. ชนิดของสายทดสอบ : 0.6/1 kV Copper cable twin conductor cross-linked polyethylene insulated and polyethylene sheathed
- สภาวะแวดล้อม : อุณหภูมิ 35°C : ความชื้นสัมพัทธ์ 65 %
- ชนิดฉนวน : XLPE
- ขนาดตัวนำ : 6 mm² : ระดับแรงดัน 5 Vp-p

ตารางที่ 4.6 ค่าเพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์ของฉนวนเคเบิล 0.6/1 kV Copper cable twin conductor cross-linked polyethylene insulated and polyethylene sheathed ที่ระยะสายต่างๆ

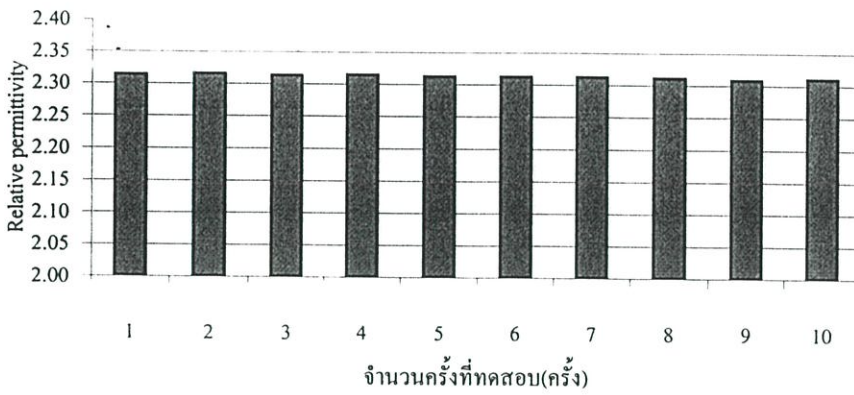
จำนวนครั้งที่ทดสอบ	ค่าเพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์ของฉนวนเคเบิลที่มีความยาวสายต่าง					
	15 m		50 m		100 m	
	ความถี่ (kHz)	ϵ_r	ความถี่ (kHz)	ϵ_r	ความถี่ (kHz)	ϵ_r
1	3,287.624	2.313	986.713	2.311	493.677	2.308
2	3,286.203	2.315	987.355	2.308	493.356	2.311
3	3,287.624	2.313	986.927	2.310	493.143	2.313
4	3,286.913	2.314	987.569	2.307	493.143	2.313
5	3,288.335	2.312	986.713	2.311	493.250	2.312
6	3,288.335	2.312	986.927	2.310	493.677	2.308
7	3,288.335	2.312	987.141	2.309	493.784	2.307
8	3,289.046	2.311	986.355	2.308	493.143	2.313
9	3,291.183	2.308	986.713	2.311	493.677	2.308
10	3,289.758	2.310	986.287	2.313	493.250	2.312
\bar{x}	3,288.790	2.312	986.87	2.310	493.41	2.310
SD	1.422843	0.002	0.405904	0.001814	0.262832	0.002461

ตารางที่ 4.6(ต่อ)

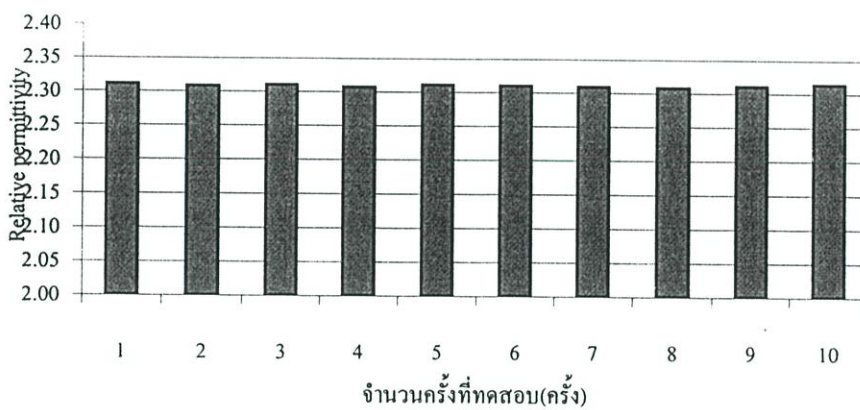
จำนวน ครั้งที่ ทดสอบ	ค่าเพอร์มิททิวิตีสัมพัทธ์ของฉนวนเคเบิลที่ความยาวสายต่าง					
	150 m		200 m		250 m	
	ความถี่ (kHz)	ϵ_r	ความถี่ (kHz)	ϵ_r	ความถี่ (kHz)	ϵ_r
1	328.833	2.312	246.518	2.314	197.471	2.308
2	328.620	2.315	246.678	2.311	197.428	2.309
3	328.833	2.312	246.731	2.310	197.471	2.308
4	329.189	2.307	246.678	2.311	197.428	2.309
5	329.261	2.306	246.571	2.313	197.342	2.311
6	329.261	2.306	246.731	2.310	197.214	2.314
7	329.118	2.308	246.465	2.315	197.257	2.313
8	329.047	2.309	246.371	2.313	197.471	2.308
9	329.261	2.306	246.371	2.313	197.385	2.310
10	329.047	2.309	246.678	2.311	197.300	2.312
\bar{x}	329.079	2.309	246.579	2.312	197.376	2.310
SD	0.220231	0.003091	0.140996	0.001729	0.09422	0.002201



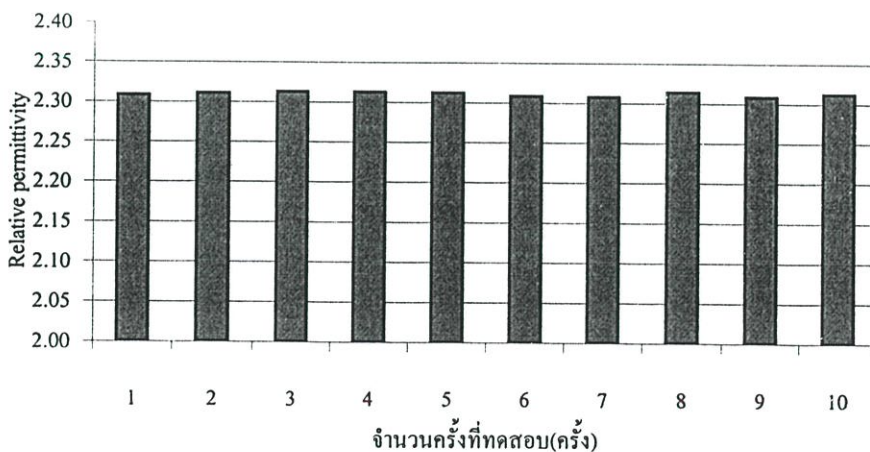
รูปที่ 4.28 ตัวอย่างรูปคลื่นสัญญาณแรงดันที่ต้นสายของสาย 0.6/1kV Copper cable twin conductor cross-linked polyethylene insulated and polyethylene sheathed ที่ระยะสาย 50 m



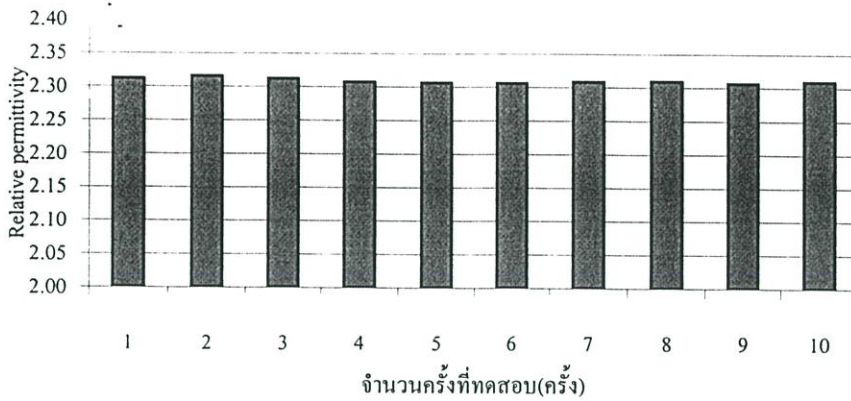
รูปที่ 4.29 กราฟเปรียบเทียบค่าพอร์มิตติวิตี้สัมพัทธ์ของฉนวนเคเบิล 0.6/1 kV Copper cable twin conductor cross-linked polyethylene insulated and polyethylene sheathed ที่ระยะ 15 m



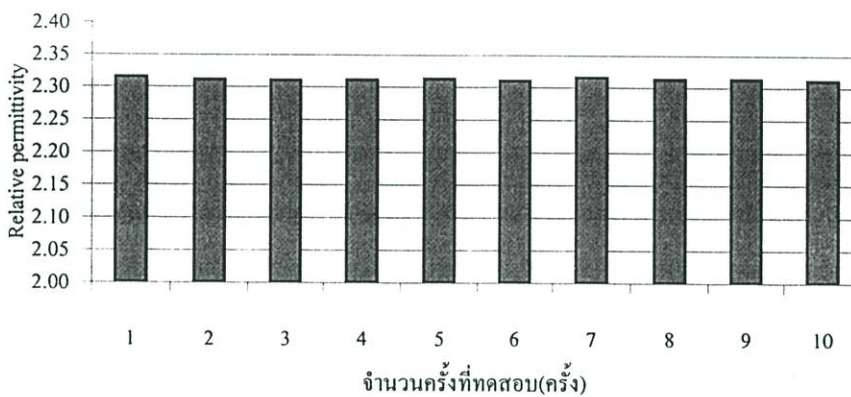
รูปที่ 4.30 กราฟเปรียบเทียบค่าพอร์มิตติวิตี้สัมพัทธ์ของฉนวนเคเบิล 0.6/1 kV Copper cable twin conductor cross-linked polyethylene insulated and polyethylene sheathed ที่ระยะ 50 m



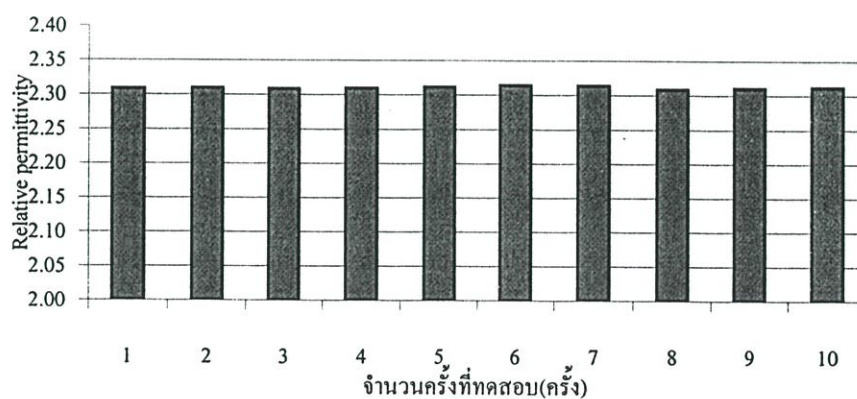
รูปที่ 4.31 กราฟเปรียบเทียบค่าพอร์มิตติวิตี้สัมพัทธ์ของฉนวนเคเบิล 0.6/1 kV Copper cable twin conductor cross-linked polyethylene insulated and polyethylene sheathed ที่ระยะ 100 m



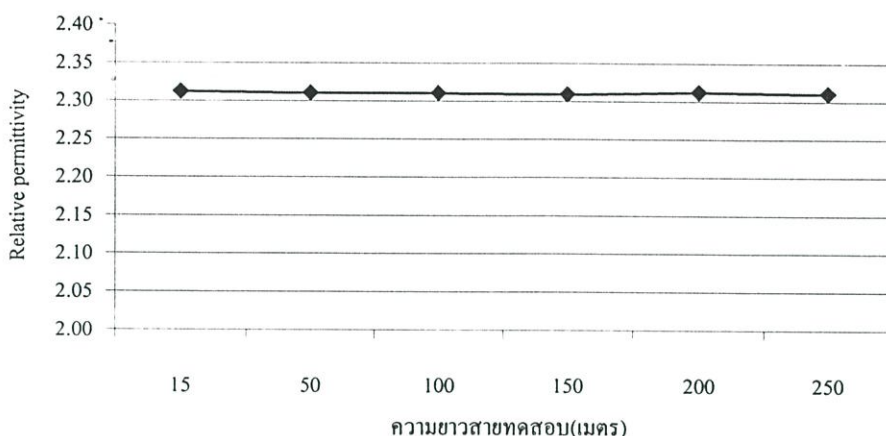
รูปที่ 4.32 กราฟเปรียบเทียบค่าพอร์มีทวิตีตีสัมพัทธ์ของฉนวนเคเบิล 0.6/1 kV Copper cable twin conductor cross-linked polyethylene insulated and polyethylene sheathed ที่ระยะ 150 m



รูปที่ 4.33 กราฟเปรียบเทียบค่าพอร์มีทวิตีตีสัมพัทธ์ของฉนวนเคเบิล 0.6/1 kV Copper cable twin conductor cross-linked polyethylene insulated and polyethylene sheathed ที่ระยะ 200 m



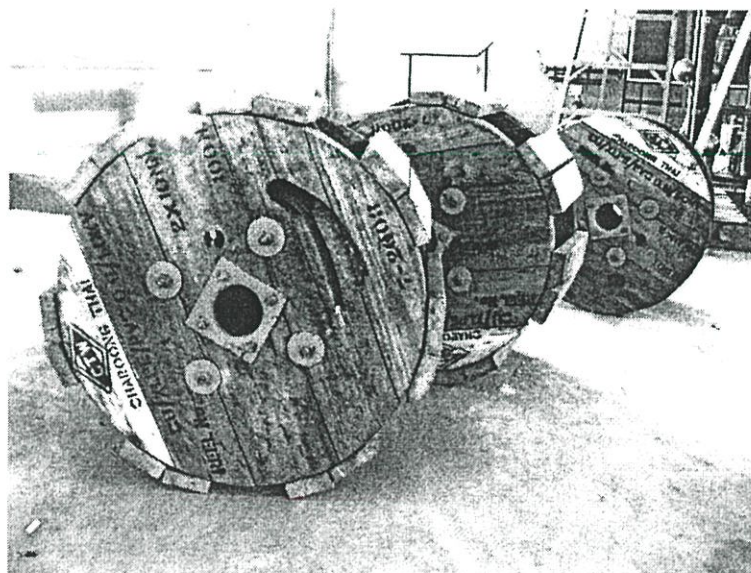
รูปที่ 4.34 กราฟเปรียบเทียบค่าพอร์มีทวิตีตีสัมพัทธ์ของฉนวนเคเบิล 0.6/1 kV Copper cable twin conductor cross-linked polyethylene insulated and polyethylene sheathed ที่ระยะ 250 เมตร



รูปที่ 4.35 กราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยเพอร์มิทิวตี้สัมพัทธ์ของเคเบิล 0.6/1 kV Copper cable twin conductor cross-linked polyethylene insulated and polyethylene sheathed ที่ระยะสายต่างๆ

4.6.2.2 การทดสอบหาค่าเพอร์มิทิวตี้สัมพัทธ์ของฉนวนเคเบิลที่ตัวนำขนาดต่างๆ

ทำการทดสอบกับสายทดสอบ 3 ชนิด เพื่อดูผลการเปลี่ยนแปลงของค่าเพอร์มิทิวตี้สัมพัทธ์ต่อขนาดตัวนำของสาย ที่ความยาวสายเท่ากับ 100 m ฉ. ความยาวคลื่นเท่ากับ $\lambda/4$ ตาม สมการที่ 2.83 ซึ่งค่าที่ได้จากการทดสอบจะเกิดจากคุณสมบัติเฉพาะของสารฉนวน PVC และ XLPE โดยทำการทดสอบ 10 ครั้ง เพื่อหาค่าเฉลี่ยในการทดสอบ ทำการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยในการทดสอบกับค่าที่ได้จากการทดสอบมาตรฐาน และค่าคุณสมบัติของสารฉนวน Polymer[1-2]

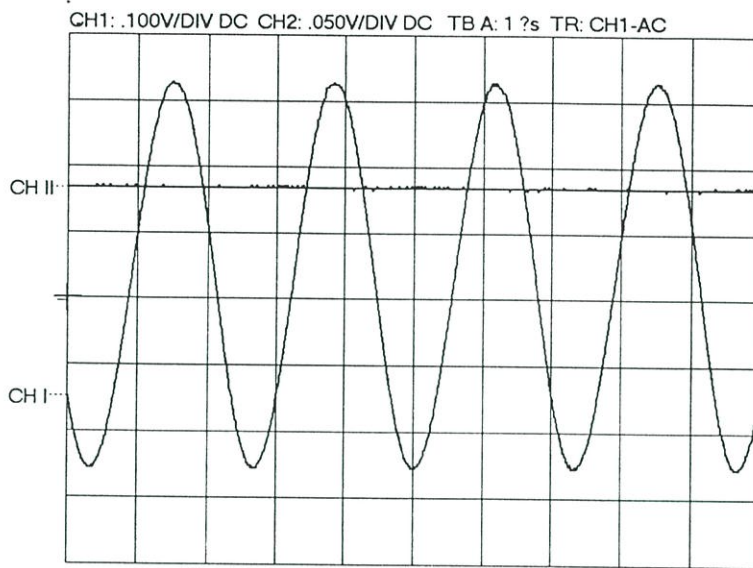


รูปที่ 4.36 ฉนวนเคเบิลที่ตัวนำขนาดต่างๆ

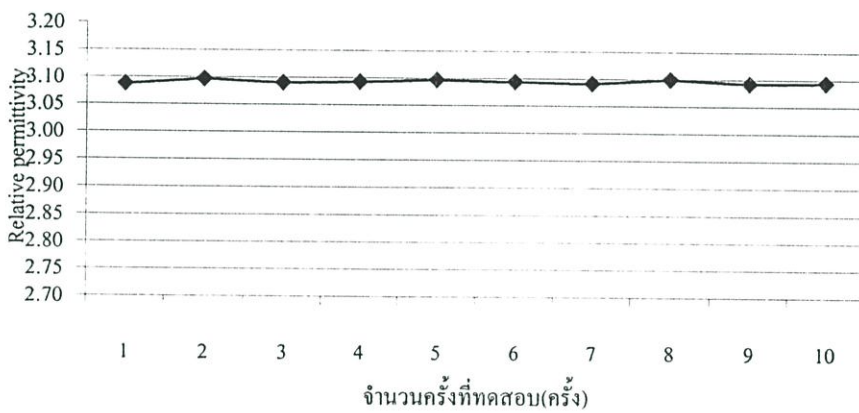
1. ชนิดของสาย : 300V 2-core PVC Insulator and sheathed, flat type
 สภาวะแวดล้อม : อุณหภูมิ 35 °C : ความชื้นสัมพัทธ์ 65 %
 ชนิดฉนวน : PVC
 ความยาวสาย : 100 m รัศมีแรงดัน 5 Vp-p

ตารางที่ 4.7 ค่าเพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์ของฉนวนสายเคเบิล 300V, 2-core PVC Insulator and sheathed, flat type ที่ขนาดตัวนำต่างๆ

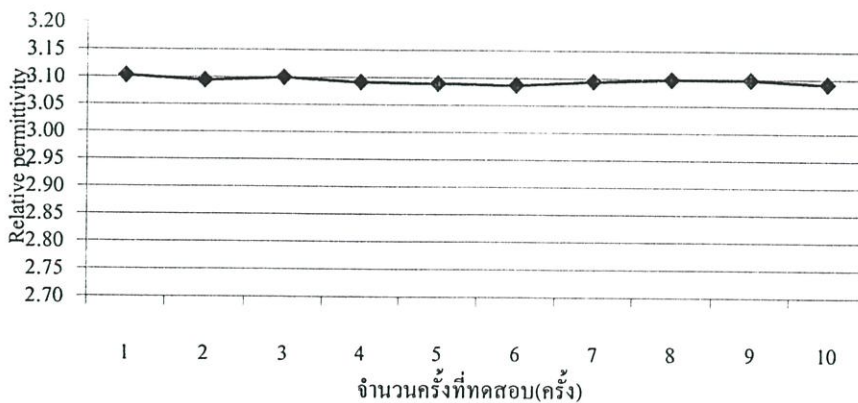
จำนวน ครั้งที่ ทดสอบ	ค่าเพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์ของฉนวนเคเบิลที่ขนาดตัวนำต่างๆ					
	1 mm ²		2.5 mm ²		4 mm ²	
	ความถี่ (kHz)	ϵ_r	ความถี่ (kHz)	ϵ_r	ความถี่ (kHz)	ϵ_r
1	426.867	3.087	425.834	3.102	425.971	3.100
2	426.246	3.096	426.384	3.094	426.384	3.094
3	426.597	3.090	426.040	3.099	426.384	3.094
4	426.522	3.092	426.591	3.091	426.591	3.091
5	426.246	3.096	426.729	3.089	426.108	3.099
6	426.453	3.093	426.867	3.087	426.177	3.097
7	426.591	3.091	426.384	3.094	426.798	3.088
8	426.040	3.099	426.108	3.098	426.597	3.090
9	426.522	3.092	426.108	3.098	426.522	3.092
10	426.453	3.093	426.591	3.091	426.453	3.093
\bar{x}	426.453	3.092	426.343	3.094	426.498	3.093
SD	0.230208	0.003414	0.334504	0.004855	0.251862	0.003882



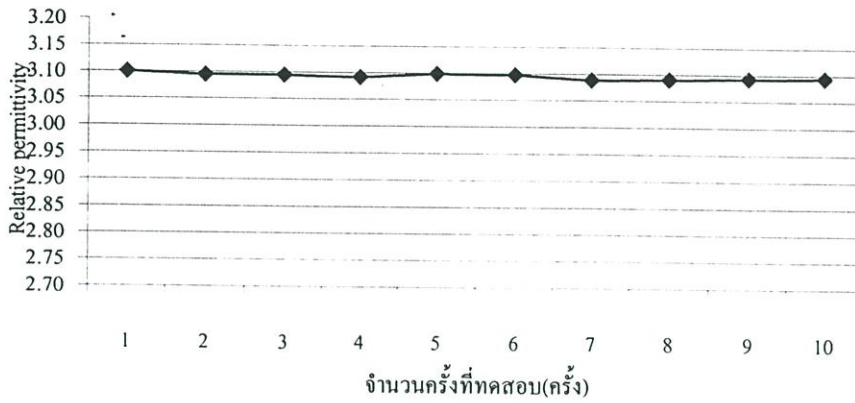
รูปที่ 4.37 ตัวอย่างรูปคลื่นสัญญาณแรงดันที่ต้นสายของสาย 300V, 2-core PVC Insulator and sheathed, flat type ขนาดตัวนำ 1 mm^2 ที่ความยาวสาย 100 m



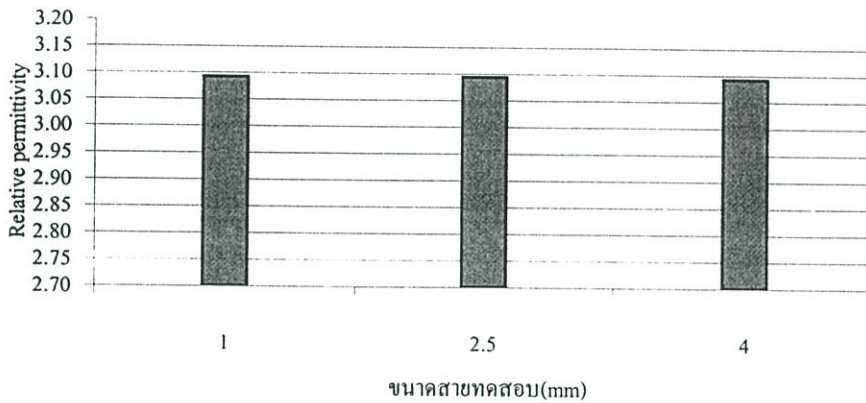
รูปที่ 4.38 กราฟเปรียบเทียบค่าเพอร์มิทิวตี้สัมพัทธ์ของฉนวนเคเบิล 300V, 2-core PVC Insulator and sheathed, flat type ขนาดตัวนำ 1 mm^2



รูปที่ 4.39 กราฟเปรียบเทียบค่าเพอร์มิทิวตี้สัมพัทธ์ของฉนวนเคเบิล 300V, 2-core PVC Insulator and sheathed, flat type ขนาดตัวนำ 2.5 mm^2



รูปที่ 4.40 กราฟเปรียบเทียบค่าเพอร์มิทิวตี้สัมพัทธ์ของฉนวนเคเบิล 300V, 2-core PVC Insulator and sheathed, flat type ขนาดตัวนำ 4 mm²



รูปที่ 4.41 กราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยเพอร์มิทิวตี้สัมพัทธ์ของฉนวนเคเบิล 300V, 2-core PVC Insulator and sheathed, flat type ขนาดตัวนำต่างๆ

2. ชนิดของสาย : 12/20 kV Underground cable copper stranded conductor XLPE insulator and PE sheathed

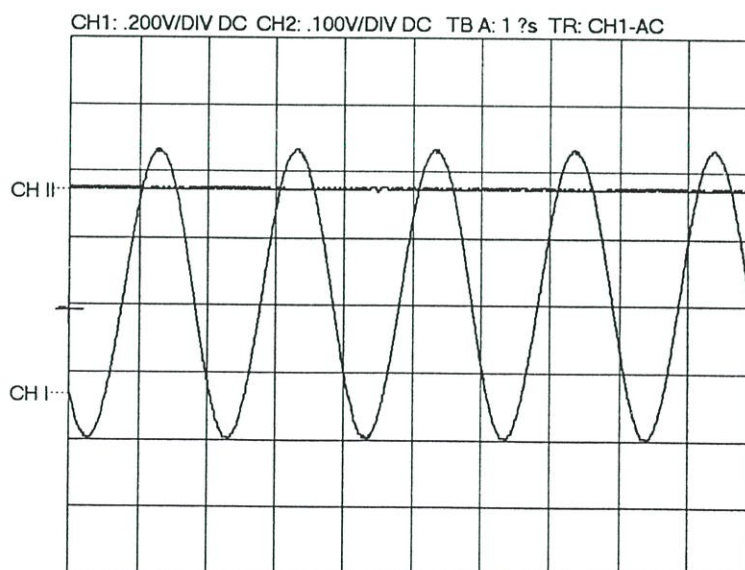
สภาวะแวดล้อม : อุณหภูมิ 35°C : ความชื้นสัมพัทธ์ 65 %

ชนิดฉนวน : XLPE

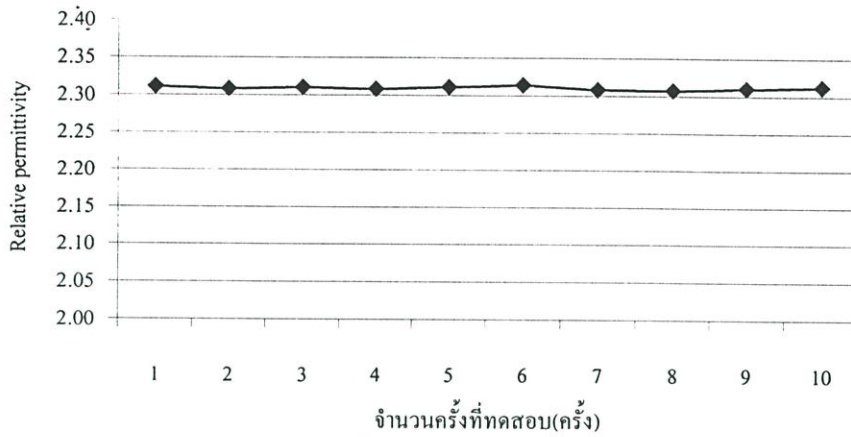
ความยาวสาย : 100 m รัศมีแรงดัน 5 Vp-p

ตารางที่ 4.8 ค่าเพอร์มิทิวิตีที่สัมพันธ์ของฉนวนสายเคเบิล 12/20 kV Underground cable copper stranded conductor XLPE insulator and PE sheathed ที่ขนาดตัวนำต่างๆ

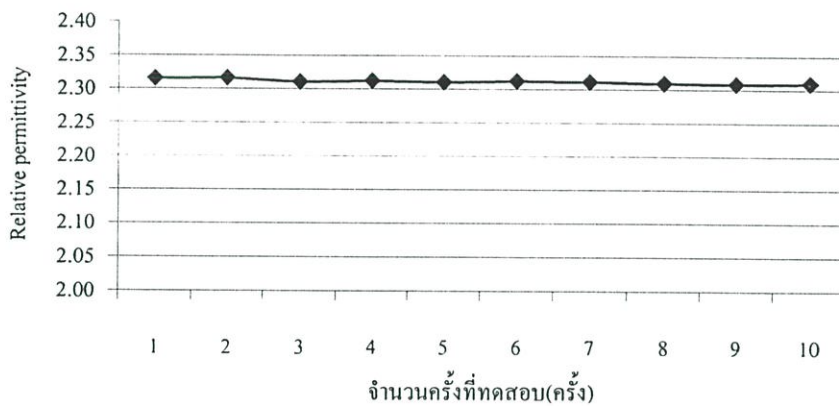
จำนวน ครั้งที่ ทดสอบ	ค่าเพอร์มิทิวิตีที่สัมพันธ์ของฉนวนเคเบิลที่ขนาดตัวนำต่างๆ					
	35 mm ²		70 mm ²		400 mm ²	
	ความถี่ (kHz)	ϵ_r	ความถี่ (kHz)	ϵ_r	ความถี่ (kHz)	ϵ_r
1	493.356	2.311	493.037	2.314	493.570	2.309
2	493.677	2.308	492.930	2.315	493.463	2.310
3	493.463	2.310	493.463	2.310	493.463	2.310
4	493.677	2.308	493.250	2.312	493.463	2.310
5	493.356	2.311	493.463	2.310	493.037	2.314
6	493.037	2.314	493.250	2.312	493.570	2.309
7	493.677	2.308	493.356	2.311	493.570	2.309
8	493.784	2.307	493.570	2.309	493.784	2.307
9	493.463	2.310	493.677	2.308	493.356	2.311
10	493.250	2.312	493.570	2.309	493.570	2.309
\bar{x}	493.474	2.309	493.596	2.311	493.484	2.310
SD	0.233086	0.002183	0.241117	0.002261	0.193533	0.001814



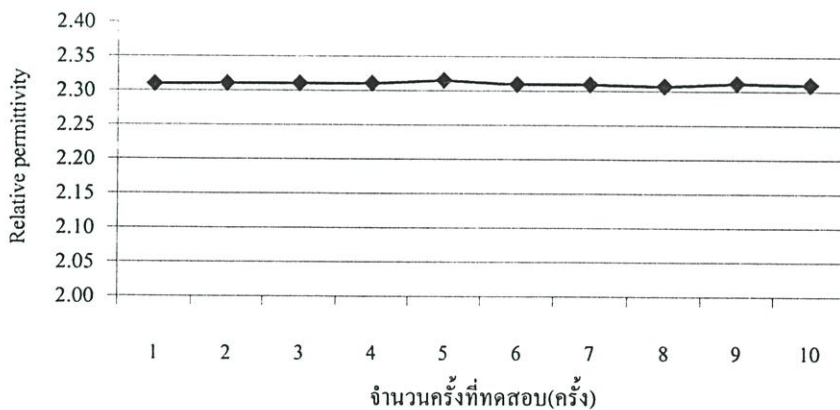
รูปที่ 4.42 ตัวอย่างรูปคลื่นสัญญาณแรงดันที่ต้นสายของสาย 12/20 kV Underground cable copper stranded conductor XLPE insulator PE sheathed ขนาดตัวนำ 70 mm² ที่ระยะสาย 100 m



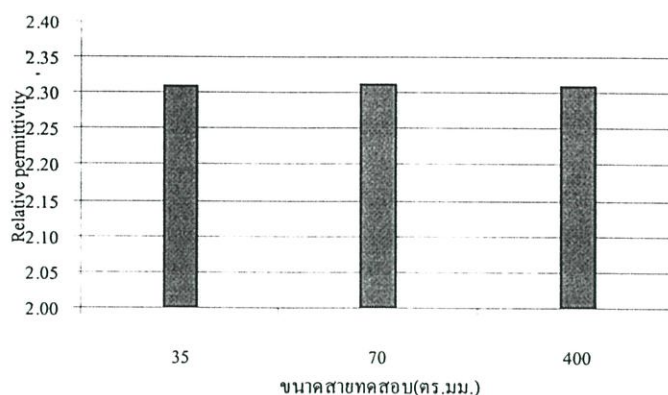
รูปที่ 4.43 กราฟเปรียบเทียบค่าเพอร์มิทิวตี้สัมพัทธ์ของฉนวนเคเบิล 12/20 kV Underground cable copper stranded conductor XLPE insulator and PE sheathed ขนาดตัวนำ 35 mm^2



รูปที่ 4.44 กราฟเปรียบเทียบค่าเพอร์มิทิวตี้สัมพัทธ์ของฉนวนเคเบิล 12/20 kV Underground cable copper stranded conductor XLPE insulator and PE sheathed ขนาดตัวนำ 70 mm^2



รูปที่ 4.45 กราฟเปรียบเทียบค่าเพอร์มิทิวตี้สัมพัทธ์ของฉนวนเคเบิล 12/20 kV Underground cable copper stranded conductor XLPE insulator and PE sheathed ขนาดตัวนำ 400 mm^2



รูปที่ 4.46 กราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยเพอร์มิทิวตี้สัมพัทธ์ของฉนวนเคเบิล 12/20 kV Underground cable copper stranded conductor XLPE insulator and PE sheathed ขนาดตัวนำต่างๆ

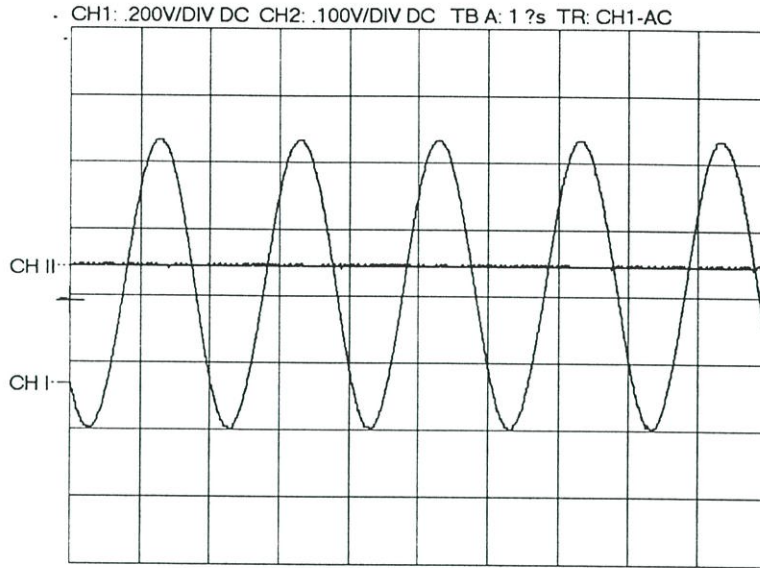
3. ชนิดของสาย : 0.6/1 kV Copper cable twin conductor cross-linked polyethylene insulated and polyethylene sheathed

สภาวะแวดล้อม : อุณหภูมิ 35 °C , ความชื้นสัมพัทธ์ 65 %

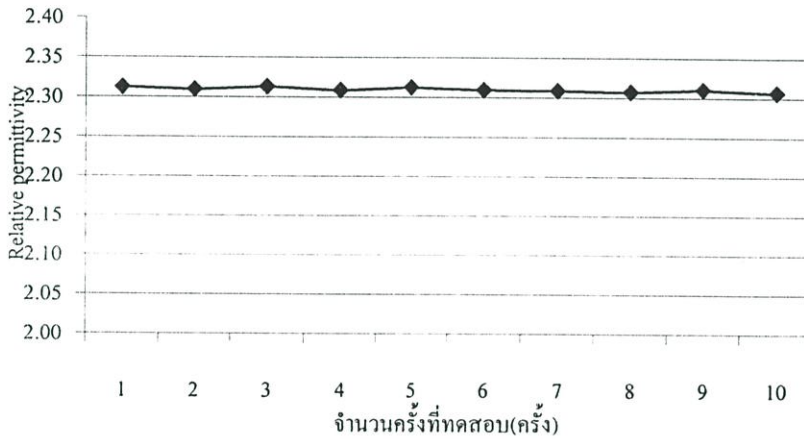
ชนิดฉนวน : XLPE ความยาวสาย 100 m , ระดับแรงดัน 5Vp-p

ตารางที่ 4.9 ค่าเพอร์มิทิวตี้สัมพัทธ์ของฉนวนสายเคเบิล 0.6/1 kV Copper cable twin conductor cross-linked polyethylene insulated and polyethylene sheathed ที่ขนาดตัวนำต่างๆ

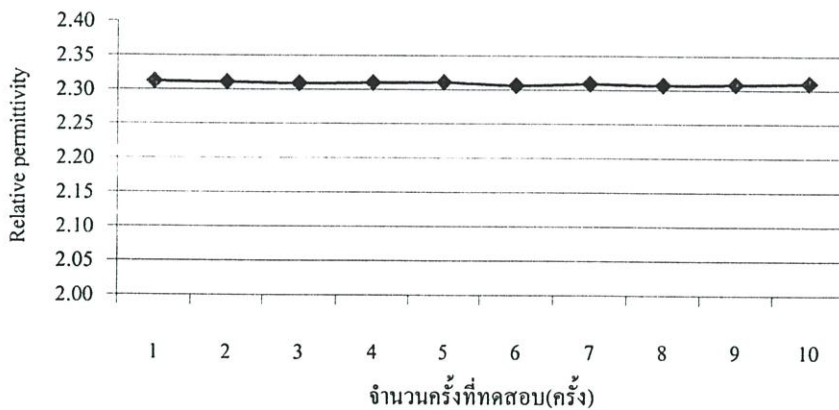
จำนวน ครั้งที่ ทดสอบ	ค่าเพอร์มิทิวตี้สัมพัทธ์ของฉนวนสายเคเบิลที่ขนาดตัวนำต่างๆ					
	6 mm ²		10 mm ²		16 mm ²	
	ความถี่ (kHz)	ϵ_r	ความถี่ (kHz)	ϵ_r	ความถี่ (kHz)	ϵ_r
1	493.143	2.313	492.717	2.317	493.250	2.312
2	493.037	2.314	493.463	2.310	493.570	2.309
3	493.570	2.309	493.570	2.309	493.143	2.313
4	493.570	2.309	493.463	2.310	493.677	2.308
5	493.677	2.308	493.463	2.310	493.250	2.312
6	493.356	2.311	493.891	2.306	493.570	2.309
7	493.891	2.306	493.677	2.308	493.677	2.308
8	493.677	2.308	493.784	2.307	493.784	2.307
9	493.143	2.313	493.677	2.308	493.463	2.310
10	493.356	2.311	493.570	2.309	493.891	2.306
\bar{x}	493.442	2.310	493.527	2.309	493.527	2.309
SD	0.279372	0.002616	0.318962	0.002989	0.247712	0.002319



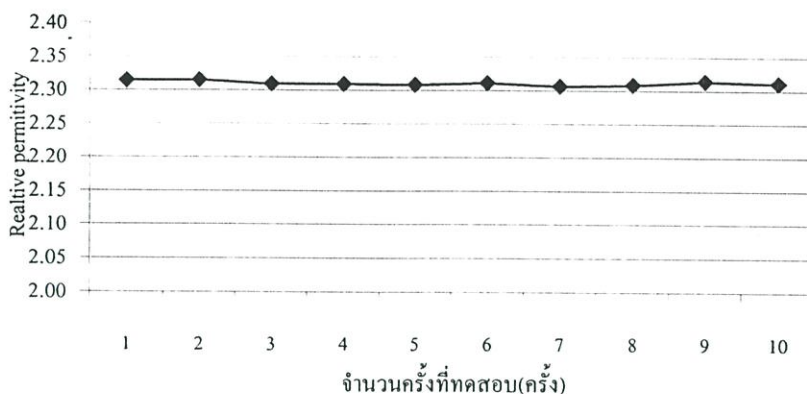
รูปที่ 4.47 ตัวอย่างรูปคลื่นสัญญาณแรงดันที่ต้นสายของสาย 0.6/1 kV Copper cable twin conductor cross-linked polyethylene insulated and polyethylene sheathed ขนาดตัวนำ 10 mm²



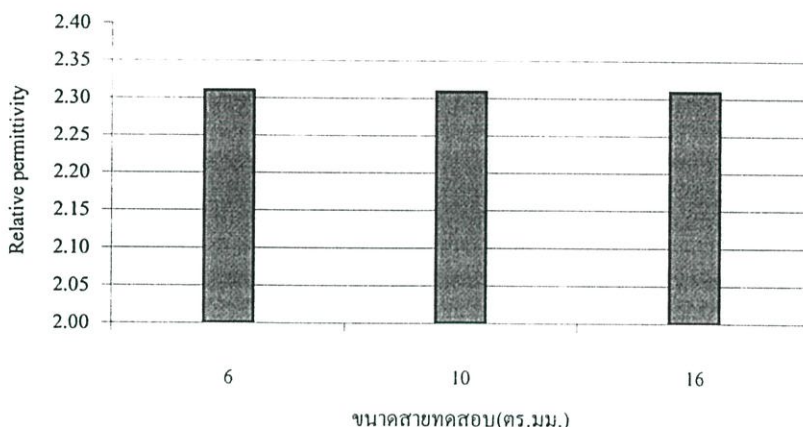
รูปที่ 4.48 กราฟเปรียบเทียบค่าเพอร์มิทิวตี้สัมพัทธ์จำนวนเคเบิล 0.6/1 kV Copper cable twin conductor cross-linked polyethylene insulated and polyethylene sheathed ขนาดตัวนำ 6 mm²



รูปที่ 4.49 กราฟเปรียบเทียบค่าเพอร์มิทิวตี้สัมพัทธ์จำนวนเคเบิล 0.6/1 kV Copper cable twin conductor cross-linked polyethylene insulated and polyethylene sheathed ขนาดตัวนำ 10 mm²



รูปที่ 4.50 กราฟเปรียบเทียบค่าเพอร์มิทิวตี้สัมพัทธ์ของฉนวนเคเบิล 0.6/1 kV Copper cable twin conductor cross-linked polyethylene insulated and polyethylene sheathed ขนาดตัวนำ 16 mm²



รูปที่ 4.51 กราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยเพอร์มิทิวตี้สัมพัทธ์ของฉนวนเคเบิล 0.6/1 kV Copper cable twin conductor cross-linked polyethylene insulated and polyethylene sheathed ขนาดตัวนำต่างๆ

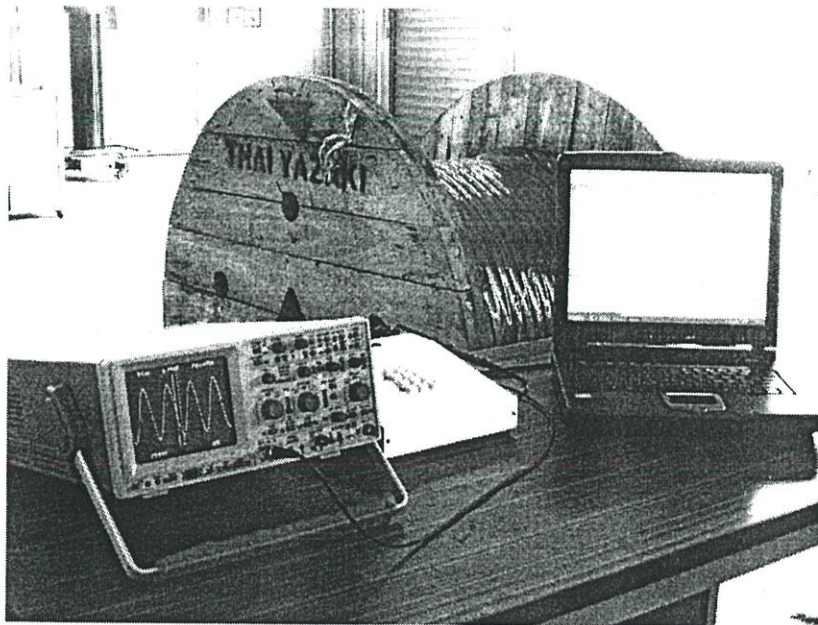
4.6.2.3 การทดสอบหาค่าเพอร์มิทิวตี้สัมพัทธ์ของฉนวนเคเบิลที่ระดับแรงดันต่างๆ

ทำการทดสอบกับสายทดสอบ 3 ชนิด เพื่อดูผลการเปลี่ยนแปลงของค่าเพอร์มิทิวตี้สัมพัทธ์ต่อขนาดแรงดันป้อนค่าต่างๆ ที่ความยาวสายเท่ากับ 100 m ณ. ความยาวคลื่นเท่ากับ $\lambda/4$ ตามสมการที่ 2.83 ซึ่งค่าที่ได้จากการทดสอบจะเกิดจากคุณสมบัติเฉพาะของสารฉนวน PVC และ XLPE โดยทำการทดสอบ 10 ครั้ง เพื่อหาค่าเฉลี่ยในการทดสอบ เพื่อทำการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยในการทดสอบกับค่าที่ได้จากการทดสอบมาตรฐานและค่าคุณสมบัติของสารฉนวน Polymer[1-2]

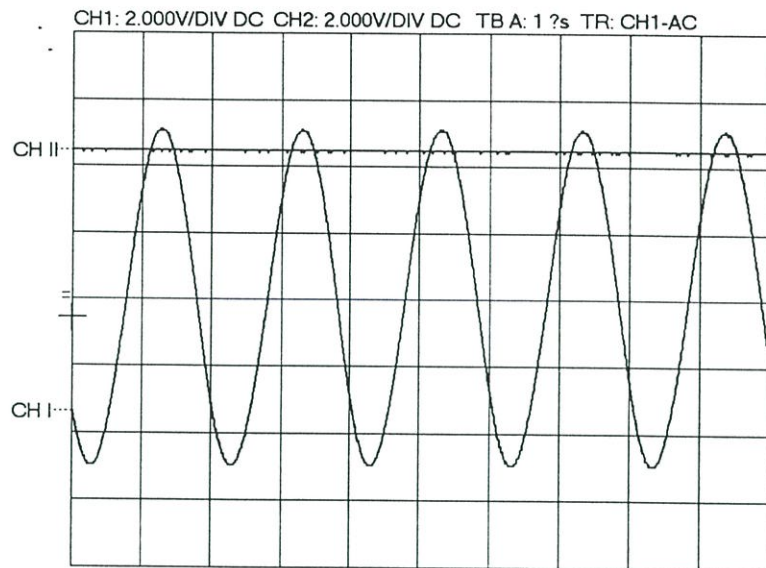
- 1. ชนิดของสาย : 300V 2-core PVC Insulator and sheathed ,flat type
- สภาวะแวดล้อม : อุณหภูมิ 35 °C : ความชื้นสัมพัทธ์ 65 %
- ชนิดฉนวน : PVC ความยาวสาย : 100 m

ตารางที่ 4.10 ค่าเพอร์มิทิวิตีที่สัมพันธ์ของฉนวนสายเคเบิล 300V 2-core PVC Insulator and sheathed ,flat type ที่ระดับแรงดันต่างๆ

ระดับแรงดัน ป้อน (Vp-p)	ค่าเพอร์มิทิวิตีที่สัมพันธ์ของฉนวนเคเบิลที่ขนาดตัวนำต่างๆ					
	1 mm ²		2.5 mm ²		4 mm ²	
	ความถี่ (kHz)	ϵ_r	ความถี่ (kHz)	ϵ_r	ความถี่ (kHz)	ϵ_r
1	426.867	3.087	425.834	3.102	425.971	3.100
2	426.936	3.086	425.971	3.100	426.384	3.094
3	426.522	3.092	426.315	3.095	426.108	3.098
4	426.384	3.094	426.384	3.094	426.660	3.090
5	426.867	3.087	426.729	3.089	426.453	3.093
6	426.384	3.094	426.867	3.087	426.729	3.089
7	426.246	3.096	426.384	3.094	426.798	3.088
8	426.315	3.095	426.108	3.098	426.798	3.088
9	426.384	3.094	426.798	3.088	426.384	3.094
10	426.453	3.093	427.074	3.084	426.246	3.096
\bar{x}	426.535	3.091	426.446	3.093	426.453	3.093
SD	0.255704	0.003704	0.410268	0.005953	0.290745	0.004216

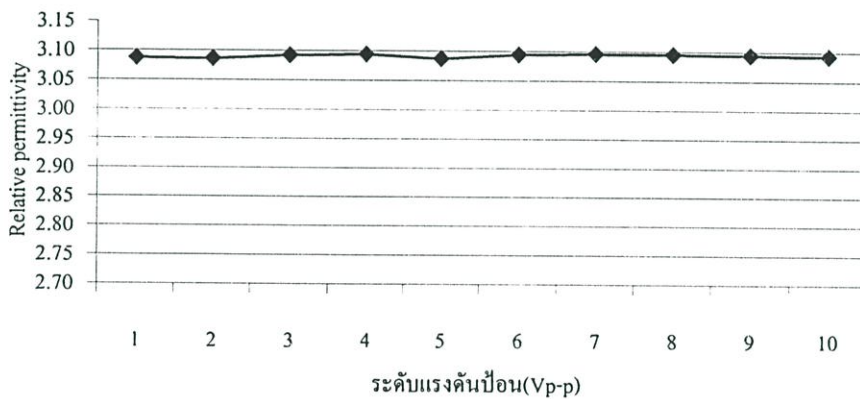


รูปที่ 4.52 การทดสอบหาค่าเพอร์มิทิวิตีที่สัมพันธ์ของฉนวนเคเบิลที่ระดับแรงดันต่างๆ



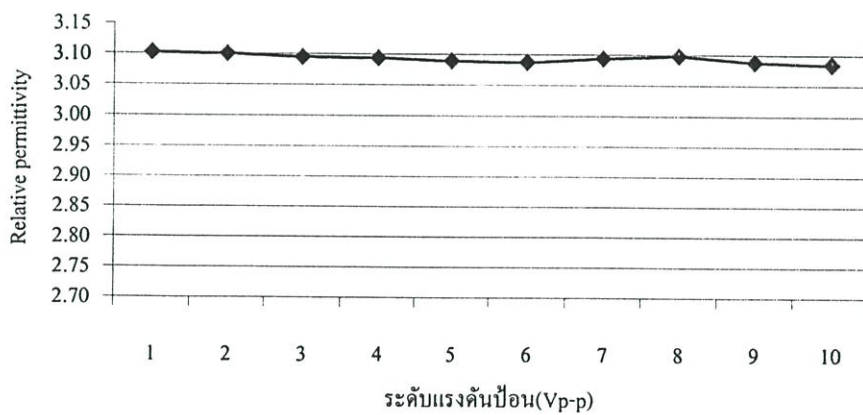
รูปที่ 4.53 ตัวอย่างรูปคลื่นสัญญาณแรงดันที่ต้นสายของฉนวนเคเบิล 300V, 4 mm²-core PVC

Insulator and sheathed, flat type ที่แรงดันป้อน 10 Vp-p



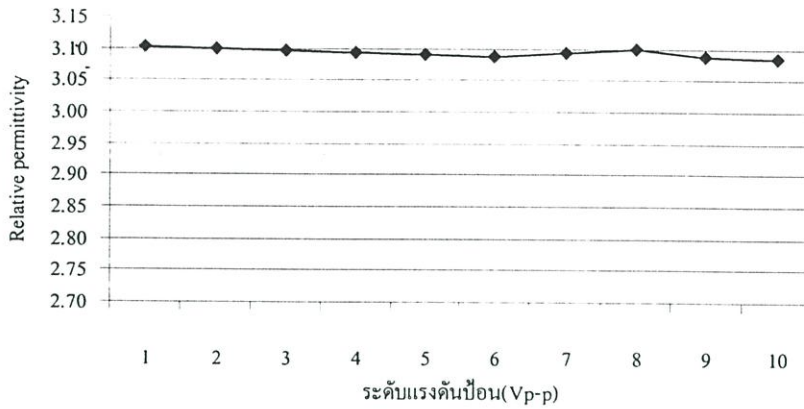
รูปที่ 4.54 กราฟเปรียบเทียบค่าเพอร์มิทิวตี้สัมพัทธ์ของฉนวนเคเบิล 300V, 1 mm²-core PVC

Insulator and sheathed, flat type ที่แรงดันต่างๆ



รูปที่ 4.55 กราฟเปรียบเทียบค่าเพอร์มิทิวตี้สัมพัทธ์ของฉนวนเคเบิล 300V, 2.5 mm²-core PVC

Insulator and sheathed, flat type ที่แรงดันต่างๆ



รูปที่ 4.56 กราฟเปรียบเทียบค่าเพอร์มิทิวตี้สัมพัทธ์ของฉนวนเคเบิล 300V, 4 mm² 2-core PVC Insulator and sheathed, flat type ที่แรงดันต่างๆ

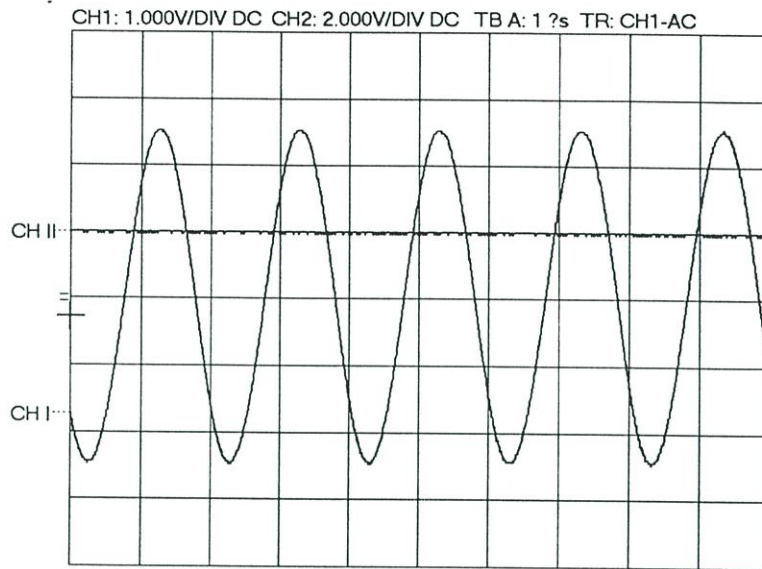
2. ชนิดของสาย : 12/20 kV Underground cable copper stranded conductor
XLPE insulator and PE sheathed

สภาวะแวดล้อม : อุณหภูมิ 35 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 65 %

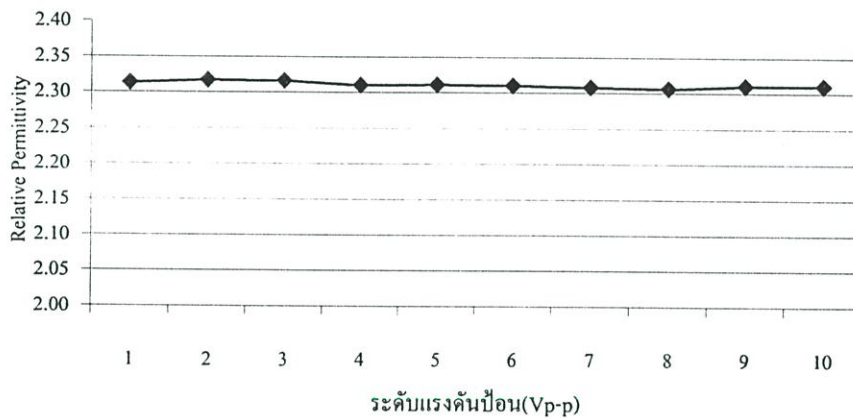
ชนิดฉนวน : XLPE ความยาวสาย 100 m

ตารางที่ 4.11 ค่าเพอร์มิทิวตี้สัมพัทธ์ของฉนวนสายเคเบิล 12/20 kV Underground cable copper stranded conductor XLPE insulator and PE sheathed ที่ระดับแรงดันต่างๆ

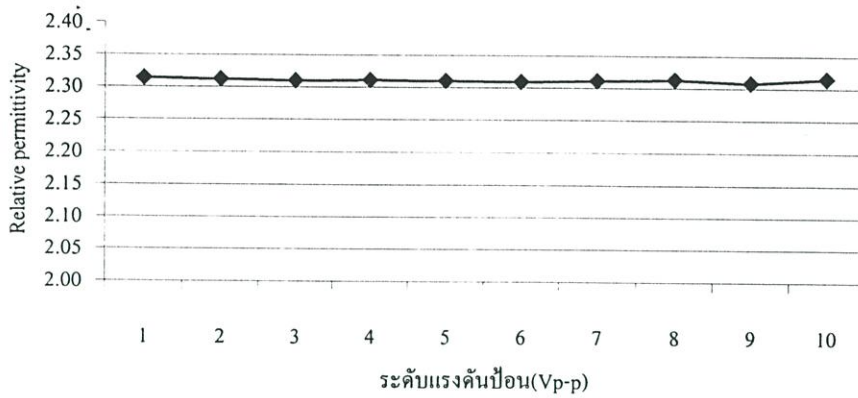
ระดับแรงดันป้อน (Vp-p)	ค่าเพอร์มิทิวตี้สัมพัทธ์ของฉนวนเคเบิลที่ขนาดตัวนำต่างๆ					
	35 mm ²		70 mm ²		400 mm ²	
	ความถี่ (kHz)	ϵ_r	ความถี่ (kHz)	ϵ_r	ความถี่ (kHz)	ϵ_r
1	493.143	2.313	493.037	2.314	493.250	2.312
2	492.717	2.317	493.250	2.312	493.143	2.313
3	492.842	2.316	493.463	2.310	492.842	2.316
4	493.463	2.310	493.356	2.311	493.463	2.310
5	493.356	2.311	493.463	2.310	493.250	2.312
6	493.463	2.310	493.570	2.309	493.570	2.309
7	493.677	2.308	493.356	2.311	493.784	2.307
8	492.842	2.306	493.143	2.313	492.842	2.306
9	493.463	2.310	493.677	2.308	493.250	2.312
10	493.463	2.310	492.930	2.315	493.570	2.309
\bar{x}	493.242	2.311	493.324	2.311	493.296	2.310
SD	0.333833	0.003381	0.236092	0.002214	0.308792	0.002989



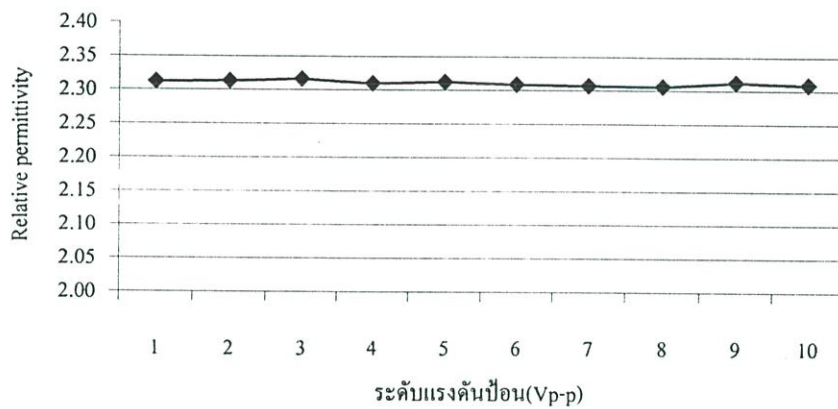
รูปที่ 4.57 ตัวอย่างรูปคลื่นสัญญาณแรงดันที่ต้นสายของ 12/20 kV 35mm² Underground cable copper stranded conductor XLPE insulator and PE sheathed ที่แรงดันป้อน 5Vp-p



รูปที่ 4.58 กราฟเปรียบเทียบค่าเพอร์มิทวิตีที่สัมพัทธ์ของเคเบิล 12/20 kV 35mm² Underground cable copper stranded conductor XLPE insulator and PE sheathed ที่แรงดันต่างๆ



รูปที่ 4.59 กราฟเปรียบเทียบค่าเพอร์มิทิวตี้สัมพัทธ์ของเคเบิล 12/20 kV 70mm² Underground cable copper stranded conductor XLPE insulator and PE sheathed ที่แรงดันต่างๆ



รูปที่ 4.60 กราฟเปรียบเทียบค่าเพอร์มิทิวตี้สัมพัทธ์ของเคเบิล 12/20 kV 400mm² Underground cable copper stranded conductor XLPE insulator and PE sheathed ที่แรงดันต่างๆ

3. ชนิดของสาย : 0.6/1 kV Copper cable twin conductor cross-linked polyethylene insulated and polyethylene sheathed

สภาวะแวดล้อม : อุณหภูมิ 35 °C

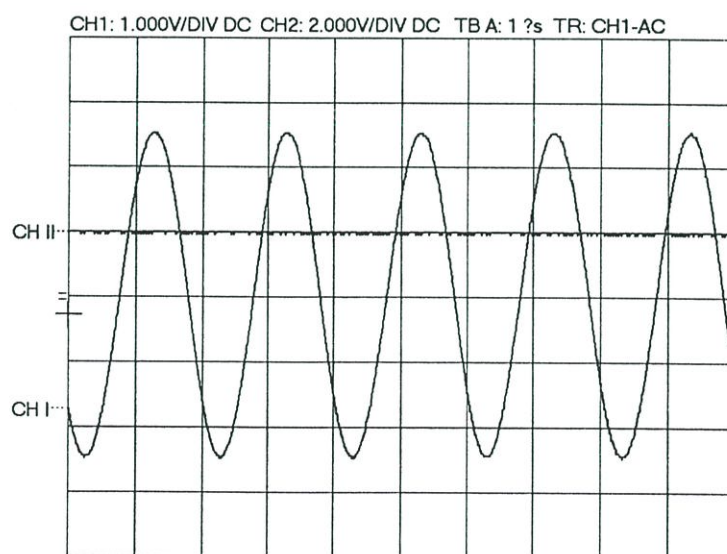
ชนิดฉนวน : XLPE

ความชื้นสัมพัทธ์ : 65 %

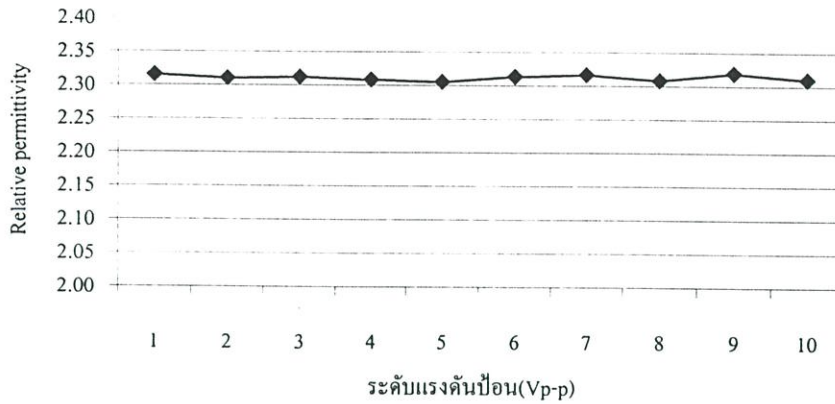
ความยาวสาย : 100 m

ตารางที่ 4.12 ค่าเพอร์มิททิวิตีสัมพัทธ์ของฉนวนสายเคเบิล 0.6/1 kV Copper cable twin conductor cross-linked polyethylene insulated polyethylene sheathed ระดับแรงดันต่างๆ

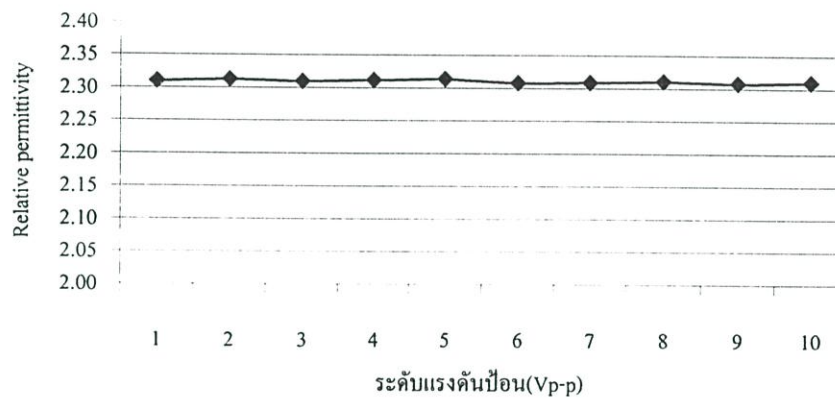
ระดับแรงดัน ป้อน (Vp-p)	ค่าเพอร์มิททิวิตีสัมพัทธ์ของฉนวนเคเบิลที่ขนาดตัวนำต่างๆ					
	6 mm ²		10 mm ²		16 mm ²	
	ความถี่ (kHz)	ϵ_r	ความถี่ (kHz)	ϵ_r	ความถี่ (kHz)	ϵ_r
1	492.930	2.315	493.463	2.310	493.250	2.312
2	493.463	2.310	493.143	2.313	492.930	2.315
3	493.250	2.312	493.463	2.310	493.143	2.313
4	493.677	2.308	493.250	2.312	492.842	2.316
5	493.998	2.305	493.037	2.314	492.930	2.315
6	493.143	2.313	493.677	2.308	493.570	2.309
7	492.842	2.316	493.570	2.309	493.677	2.308
8	493.677	2.308	493.356	2.311	493.784	2.307
9	492.505	2.319	493.677	2.308	493.356	2.311
10	493.463	2.310	493.463	2.310	493.891	2.306
\bar{x}	493.294	2.311	493.409	2.310	493.337	2.311
SD	0.450946	0.004248	0.214874	0.002014	0.379839	0.003584



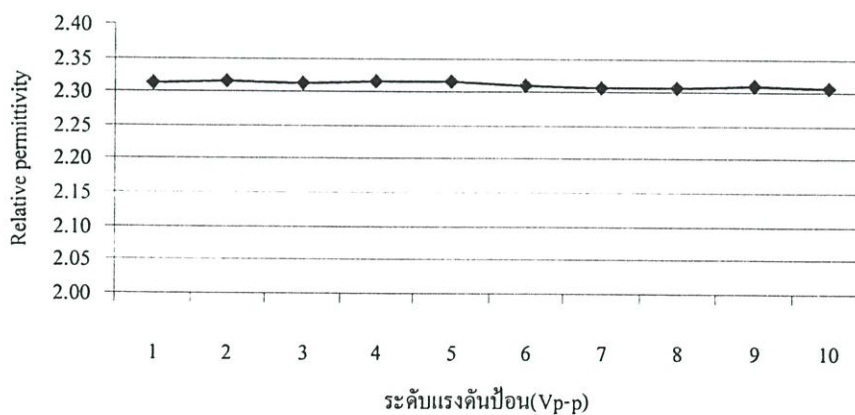
รูปที่ 4.61 ตัวอย่างรูปคลื่นสัญญาณแรงดันที่ต้นสายของสาย 0.6/1 kV 6 mm² Copper cable twin conductor cross-linked polyethylene insulated polyethylene sheathed ที่แรงดัน 10 Vp-p



รูปที่ 4.62 กราฟเปรียบเทียบค่าเพอร์มิทิวตี้สัมพัทธ์ของฉนวนเคเบิล 0.6/1 kV 6 mm² Copper cable twin conductor cross-linked polyethylene insulated polyethylene sheathed ที่แรงดันต่างๆ



รูปที่ 4.63 กราฟเปรียบเทียบค่าเพอร์มิทิวตี้สัมพัทธ์ของฉนวนเคเบิล 0.6/1 kV 10 mm² Copper cable twin conductor cross-linked polyethylene insulated polyethylene sheathed ที่แรงดันต่างๆ



รูปที่ 4.64 กราฟเปรียบเทียบค่าเพอร์มิทิวตี้สัมพัทธ์ของฉนวนเคเบิล 0.6/1 kV 16 mm² Copper cable twin conductor cross-linked polyethylene insulated polyethylene sheathed ที่แรงดันต่างๆ

บทที่ 5

วิเคราะห์ผล

5.1 วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการทดสอบ และศึกษาในวิทยานิพนธ์นี้ เป็นการมุ่งเน้นการศึกษาคุณสมบัติของสารฉนวนแข็งของสายไฟฟ้า โดยทำการพิจารณาเฉพาะสารฉนวน PVC และ XLPE เนื่องจากสารฉนวนดังกล่าวเป็นฉนวนที่นิยมใช้ในวงการอุตสาหกรรมในปัจจุบัน ซึ่งทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อค่าเพอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ของสารฉนวนที่อุณหภูมิห้อง การทดสอบค่าเพอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ของสารฉนวนสายเคเบิลแบ่งออกเป็น 3 หัวข้อในการทดสอบซึ่งสามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

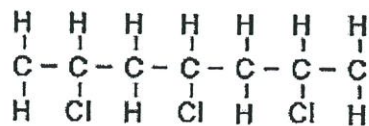
- 5.1.1 การทดสอบค่าเพอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ที่ระยะความยาวสายต่างๆ
- 5.1.2 การทดสอบค่าเพอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ที่ตัวนำขนาดต่างๆ
- 5.1.3 การทดสอบค่าเพอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ที่ระดับแรงดันต่างๆ

5.1.1 การทดสอบค่าเพอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ที่ระยะความยาวสายต่างๆ

เนื่องจากหลักการ และวิธีการวิจัยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ที่สามารถปรับค่าได้ซึ่งทำให้เกิดการหักล้างของคลื่นตกกระทบกับคลื่นสะท้อนที่ความยาวคลื่นที่ $\lambda/4$ ที่ได้จากความสัมพันธ์ สมการที่ 3.3 ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่ระยะความยาวสายต่างๆ จะทำให้ค่าความถี่ที่ได้จากการทดสอบที่ความยาวคลื่นเท่ากับ $\lambda/4$ จะเปลี่ยนแปลงตามคุณสมบัติของสารฉนวนนั้นๆ ซึ่งจะกล่าวได้ว่าในหัวข้อการทดสอบนี้เป็นการทดสอบสัมพันธ์ของค่าเพอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ต่อความถี่ จากการทดสอบสารฉนวนตัวอย่างทั้ง 2 ชนิดสามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

สารฉนวน PVC

จากผลการทดสอบ และกราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยเพอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ของเคเบิลต่อความยาวสาย ในรูปที่ 4.19 ของสารฉนวน PVC มีการเปลี่ยนแปลงลดลงตามถี่ที่เพิ่มขึ้นเนื่องจาก PVC เกิดขึ้นจากขบวนการเรียงตัวของโมโนเมอร์แบบโพลิเมอร์ไรเซชัน และเรียงตัวในแบบหนึ่งมิติ จึงจัดเป็นสารประเภทเทอร์โมพลาสติก มีโครงสร้างพื้นฐานทางเคมี เป็น โมเลกุลลูกโซ่ที่ประกอบด้วยอะตอมของคาร์บอน (C), ไฮโดรเจน (H) และคลอรีน (Cl) ดังแสดงในรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 โมเลกุลลูกโซ่ของพีวีซี

โครงสร้างพื้นฐานทางเคมีของ PVC จะเห็นได้ว่าด้านบนของลูกโซ่ ประกอบด้วยอะตอมของไฮโดรเจนอย่างเดียว ในขณะที่ด้านล่างของลูกโซ่จะประกอบด้วยอะตอมไฮโดรเจน และคลอรีนสลับกันไป ความแตกต่างกันอย่างมากระหว่างขนาดของอะตอมไฮโดรเจน ด้านบนและอะตอมคลอรีนในด้านล่างจะทำให้เกิดไดโพล (Dipole) ขึ้นในโมเลกุลลูกโซ่นี้ ดังนั้น พีวีซีจึงจัดเป็นสารมีขั้ว (Polar Material)

สารมีขั้วเมื่ออยู่ภายใต้ภาระแรงดันที่มีการกลับขั้วตลอดเวลา เช่น แรงดันกระแสสลับจะทำให้เกิดการกลับขั้วของไดโพล ซึ่งจะทำให้สารนี้ค่าตัวประกอบสูญเสีย (Dissipation Factor or $\tan \delta$) สูงนอกจากนี้ยังมีค่าเพอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ (Permittivity or ϵ_r) สูงเช่นกัน

จากสมการของกำลังไฟฟ้าสูญเสียในไดอิเล็กตริก

$$\begin{aligned} P_D &= U^2 \omega C \tan \delta \\ &= 2\pi f U^2 C \tan \delta \end{aligned} \quad (5.1)$$

โดยที่ U เป็นแรงดันไฟฟ้า, $\omega = 2\pi f$ เมื่อ f เป็นความถี่ และ c เป็นค่าความจุไฟฟ้ารวมของสายเคเบิล (ซึ่งแปรผันโดยตรงกับค่าเพอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์)

จะเห็นได้ว่า ค่าตัวประกอบสูญเสีย ($\tan \delta$) ของวัสดุฉนวนใด ๆ เป็นตัวบ่งชี้ถึงคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุฉนวนนั้น ๆ จากสมการกำลังไฟฟ้าสูญเสียในไดอิเล็กตริกนั้นเนื่องจาก พีวีซีมีค่า $\tan \delta$ และ ϵ_r ค่อนข้างสูง จึงทำให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียไดอิเล็กตริกในพีวีซีสูง และเนื่องจากค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในไดอิเล็กตริกแปรผันโดยตรงกับแรงดันกำลังสอง และค่าความถี่ใช้งาน

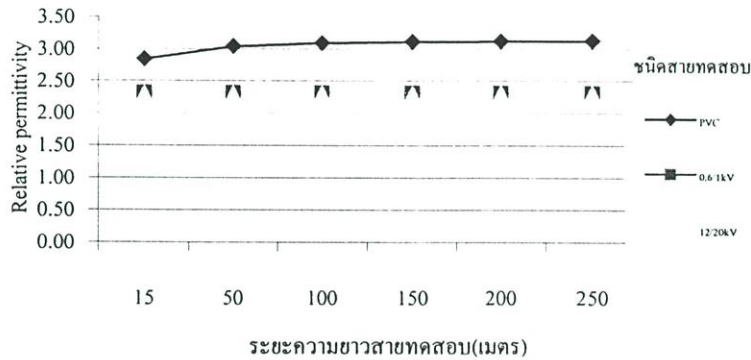
สารฉนวน XLPE

จากผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงค่าเพอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ของสารฉนวนต่อความถี่ที่ระยะความยาวสายทดสอบ ของสารฉนวน XLPE ของสายตัวอย่างทดสอบทั้งสองประเภท จากตารางและกราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยเพอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ในรูปที่ 4.27 และ 4.35 ของสารฉนวน XLPE ตามลำดับ นั้นจะสังเกตได้ว่าค่าเฉลี่ยเพอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ ของสายทดสอบทั้งสองไม่เปลี่ยนแปลงค่าตามความถี่ที่ใช้ ดังสมการที่ 3.3 เนื่องจากสารฉนวน XLPE เกิดขึ้นจากขบวนการเรียงตัวแบบ โพลีเอทิลีนของโมเลกุลอะตอมโมโนเมอร์ เอทิลีน (Ethylene, C_2H_4) โดยการเรียงตัวของกลุ่มอะตอมในแนวยาวดังรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 โมเลกุลลูกโซ่พีอี และ โครงสร้างผลึกของเอ็กซ์แอลพีอี (XLPE)

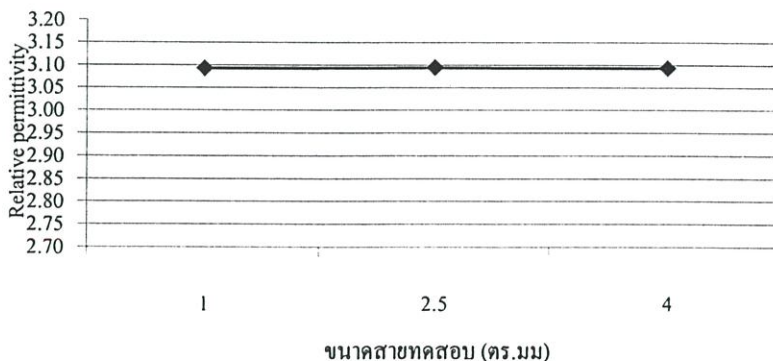
XLPE จัดเป็นสารประเภทโทโมพลาสติก จากลักษณะโครงสร้างของ XLPE เห็นได้ว่า ส่วนบนและส่วนล่างของโมเลกุลถูกโซ่เป็นอะตอมของไฮโดรเจนอย่างเดียว จึงมีความสมมาตรของลูกโซ่ จึงจัดอยู่ในสารไม่มีขั้ว (Non-Polar Material) จึงทำให้ค่าเพอร์มิตติวิตี้สัมพัทธ์ไม่เปลี่ยนแปลงตามความถี่ใช้งาน ผลดังกล่าวจึงทำให้ XLPE มีค่า ϵ_r ต่ำ ($\epsilon_r \approx 2.3$) ค่าสูญเสียไดอิเล็กตริกต่ำ ($\tan \delta = 1 \times 10^{-4}$) จะสามารถเปรียบเทียบค่าเพอร์มิตติวิตี้สัมพัทธ์ของฉนวนต่อความยาวสายทดสอบดังรูปที่ 5.3



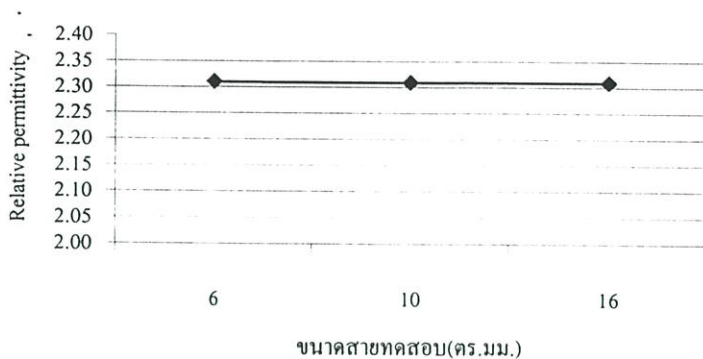
รูปที่ 5.3 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าเพอร์มิตติวิตี้สัมพัทธ์ของฉนวนต่อความยาวสาย

5.1.2 การทดสอบค่าเพอร์มิตติวิตี้สัมพัทธ์ที่ขนาดตัวนำ และแรงดันขนาดต่างๆ

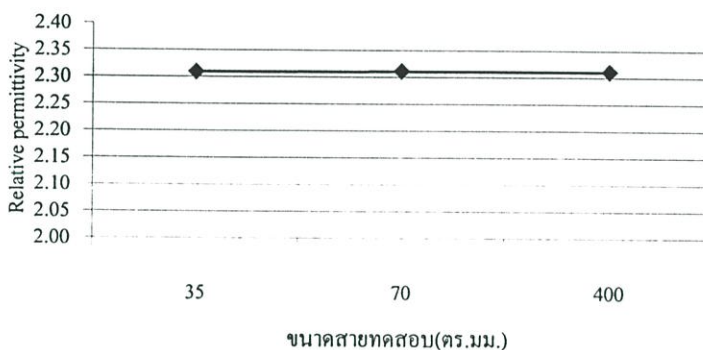
การทดสอบหาค่าเพอร์มิตติวิตี้สัมพัทธ์ของฉนวนเคเบิลที่ตัวนำขนาดต่างๆ และการทดสอบหาค่าเพอร์มิตติวิตี้สัมพัทธ์ของฉนวนเคเบิลที่ระดับแรงดันต่างๆ นั้นเพื่อดูผลของขนาดตัวนำ, ผลที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของค่าตัวประจุ, ค่าความเหนี่ยวนำของสายที่ขนาดตัวนำต่างๆ และแรงดันที่ทดสอบหรือใช้งานว่ามีผลกระทบต่อค่าเพอร์มิตติวิตี้สัมพัทธ์ของฉนวนเคเบิลหรือไม่ ซึ่งจากกราฟเปรียบเทียบค่าเพอร์มิตติวิตี้สัมพัทธ์ของหัวข้อการทดสอบที่ตัวนำขนาดต่างๆ แสดงดังกราฟ 5.4-5.6 จะพบว่าค่าเพอร์มิตติวิตี้สัมพัทธ์ของฉนวนเคเบิลทดสอบไม่เปลี่ยนแปลง และไม่ขึ้นกับขนาดตัวนำของสายทดสอบ[1-2]



รูปที่ 5.4 กราฟเปรียบเทียบค่าเพอร์มิตติวิตี้สัมพัทธ์ต่อขนาดตัวนำของสาย 300V, 2-core PVC Insulator and Sheathed, flat type ที่ความยาวสาย 100 เมตร

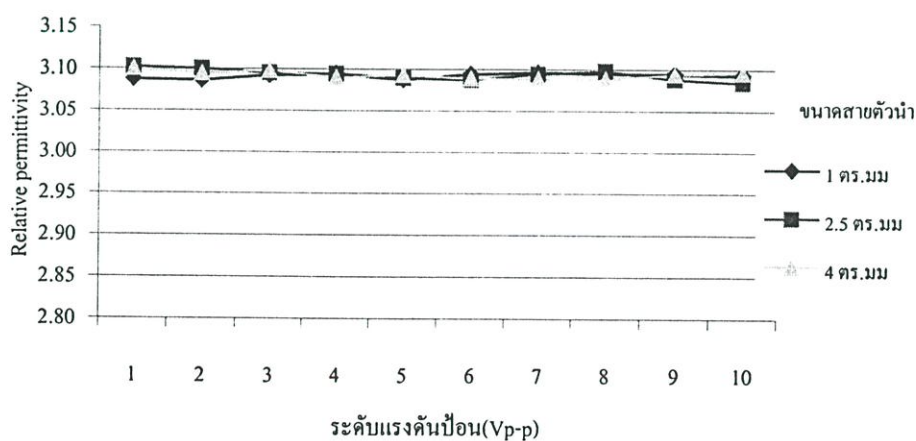


รูปที่ 5.5 กราฟเปรียบเทียบค่าเพอร์มิตติวิตี้สัมพัทธ์ต่อขนาดตัวนำของสาย 0.6/1 kV Copper cable twin conductor cross-linked polyethylene insulated and polyethylene sheathed

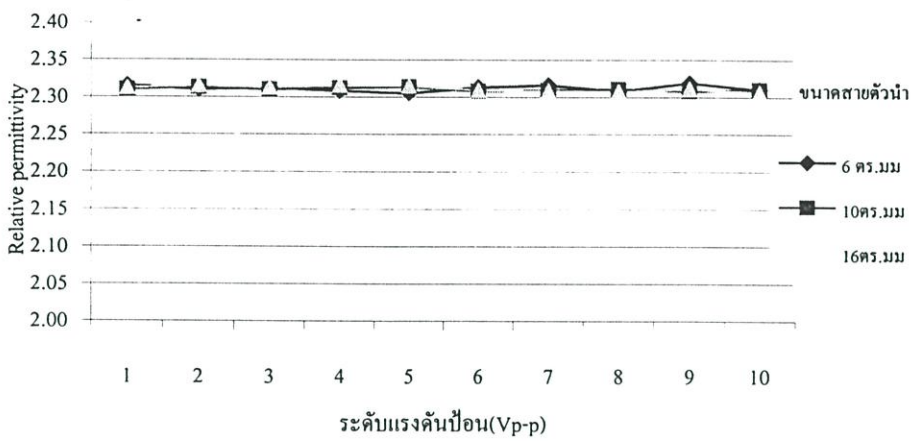


รูปที่ 5.6 กราฟเปรียบเทียบค่าเพอร์มิตติวิตี้สัมพัทธ์ต่อขนาดตัวนำของสาย 12/20 kV Underground cable copper stranded conductor XLPE insulator and PE sheathed

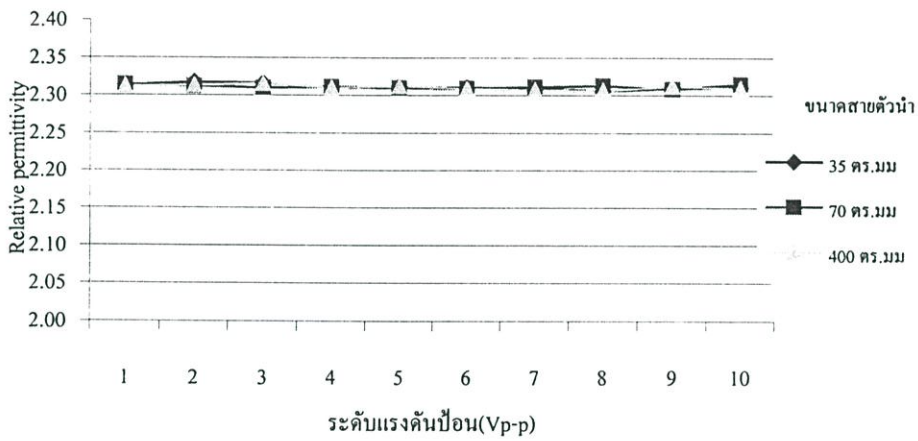
และจากกราฟเปรียบเทียบค่าเพอร์มิตติวิตี้สัมพัทธ์ต่อขนาดแรงดันแสดงดังกราฟรูปที่ 5.7-5.9



รูปที่ 5.7 กราฟเปรียบเทียบค่าเพอร์มิตติวิตี้สัมพัทธ์ต่อระดับแรงดันของสาย 300V, 2-core PVC Insulator and Sheathed, flat type ที่ความยาวสาย 100 เมตร



รูปที่ 5.8 กราฟเปรียบเทียบค่าเพอร์มิตติวิตีที่สัมพันธ์ต่อระดับแรงดันของสาย 0.6/1 kV Copper cable twin conductor cross-linked polyethylene insulated and polyethylene sheathed



รูปที่ 5.9 กราฟเปรียบเทียบค่าเพอร์มิตติวิตีที่สัมพันธ์ต่อระดับแรงดันของสาย 12/20 kV Underground cable copper stranded conductor XLPE insulator and PE sheathed

5.2 ผลการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนของชุดทดสอบกับค่าการทดสอบตามมาตรฐาน และตารางแสดงค่าเพอร์มิตติวิตี้สัมพัทธ์

จากผลการทดสอบวัดค่าเพอร์มิตติวิตี้สัมพัทธ์โดยใช้คลื่นนิ่ง ที่ได้ศึกษาจัดสร้าง และทดสอบการหาความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัดทำการเปรียบเทียบกับวิธีการวัดค่าคาปาซิแตนซ์และแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกตามมาตรฐาน และค่าในตารางแสดงค่าเพอร์มิตติวิตี้สัมพัทธ์ของสารฉนวน โพลีเมอร์ [1-2] และค่าที่วัดได้เปรียบเทียบกับวิธีการวัด โดยใช้เทคนิคของคลื่นเดินทาง (Travelling Wave) โดยจะทำการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนในการวัดที่ระยะความยาวสาย 100 เมตร โดยหาความคลาดเคลื่อนจากสมการที่ 4.16

5.2.1 ผลการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนในการวัดจากเครื่องวัดค่าเพอร์มิตติวิตี้สัมพัทธ์โดยใช้คลื่นนิ่ง กับผลการทดสอบตามมาตรฐาน

จากผลการทดสอบวัดค่าเพอร์มิตติวิตี้สัมพัทธ์โดยใช้คลื่นนิ่ง ที่ได้ศึกษาจัดสร้าง และทดสอบการหาความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัดทำการเปรียบเทียบกับวิธีการวัดค่าคาปาซิแตนซ์และแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกตามมาตรฐาน และค่าในตารางแสดงค่าเพอร์มิตติวิตี้สัมพัทธ์ของสารฉนวน โพลีเมอร์ [1-2] โดยจะแสดงผลการเปรียบเทียบในตารางที่ 5.1 –5.3 ในแต่ละตัวอย่างสายทดสอบ

ตารางที่ 5.1 ความคลาดเคลื่อนในการวัดของสาย 300 V, 2-core PVC Insulated Sheathed, Flat Type
ขนาด 1 mm²

ค่าการทดสอบตามมาตรฐาน ICEA S-66-524	ค่ามาตรฐานจากตารางของฉนวนโพลีเมอร์	ค่าการทดสอบจากเครื่องมือวัด		
		หัวข้อการทดสอบ		
		ระยะสายต่างๆ	ขนาดตัวนำต่างๆ	ระดับแรงดันต่างๆ
3.401	3.2-4	3.092	3.092	3.091
% ความคลาดเคลื่อน	-	9.085 %	9.085 %	9.114 %

จากค่าความคลาดเคลื่อนในการวัดในตารางที่ 5.1 จะพบว่ามีความคลาดเคลื่อนในการวัดสูงเนื่องมาจากผลการเปลี่ยนแปลงค่าเพอร์มิตติวิตี้สัมพัทธ์ของสารฉนวน PVC ตามความถี่ ซึ่งเป็นคุณสมบัติของสารฉนวน PVC นั่นคือเมื่อค่าความถี่สูงขึ้นจะทำให้ค่าเพอร์มิตติวิตี้สัมพัทธ์ของสารฉนวน PVC ลดลง ซึ่งเมื่อเปรียบผลความคลาดเคลื่อนการทดสอบตามมาตรฐานซึ่งทำการทดสอบที่ความถี่ 50 Hz จะพบว่าค่าที่ได้มีค่าความคลาดเคลื่อนสูงมาก และจากการเปรียบเทียบกับค่าในตารางแสดงค่าเพอร์มิต

ตีวัตต์สัมพัทธ์ของสารฉนวนโพลิเมอร์ ค่าที่ได้จากการทดสอบอยู่ในช่วงที่แสดงไว้ สามารถวิเคราะห์ได้ว่าค่าจากการทดสอบในหัวข้อนี้ถูกต้อง

ตารางที่ 5.2 ความคลาดเคลื่อนในการวัดของสาย 12/20 kV Underground cable copper stranded conductor XLPE insulator and PE sheathed ขนาด 70 mm²

ค่าการทดสอบ ตามมาตรฐาน ICEA S-66-524	ค่ามาตรฐานจาก ตารางของฉนวน โพลิเมอร์	ค่าการทดสอบจากเครื่องมือวัด หัวข้อการทดสอบ		
		ระยะสายต่างๆ	ขนาดตัวนำต่างๆ	ระดับแรงดันต่างๆ
2.299	2.3	2.309	2.311	2.311
% ความคลาดเคลื่อน	-	0.347 %	0.521 %	0.521 %

ตารางที่ 5.3 ความคลาดเคลื่อนในการวัดของสาย 0.6/1 kV Copper cable twin conductor cross-linked polyethylene insulated and polyethylene sheathed ขนาด 6 mm²

ค่าการทดสอบ ตามมาตรฐาน ICEA S-66-524	ค่ามาตรฐานจาก ตารางของฉนวน โพลิเมอร์	ค่าการทดสอบจากเครื่องมือวัด หัวข้อการทดสอบ		
		ระยะสายต่างๆ	ขนาดตัวนำต่างๆ	ระดับแรงดันต่างๆ
2.315	2.3	2.312	2.310	2.311
% ความคลาดเคลื่อน	-	0.13 %	0.22 %	0.17 %

5.2.2 ผลการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนในการวัดจากเครื่องมือวัดค่าเพอร์มิทตีวตีสัมพัทธ์โดยใช้คลื่นนิ่ง กับผลการทดสอบโดยใช้เทคนิคของคลื่นเดินทาง (Travelling Wave)

จากผลการทดสอบวัดค่าเพอร์มิทตีวตีสัมพัทธ์โดยใช้คลื่นนิ่ง ที่ได้ศึกษาจัดสร้าง และทดสอบการหาความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัดทำการเปรียบเทียบกับโดยใช้เทคนิคของคลื่นเดินทาง (Travelling Wave) โดยจะทำการเปรียบเทียบในหัวข้อการทดสอบค่าเพอร์มิทตีวตีสัมพัทธ์ที่ระยะความยาวสายต่างๆ และการทดสอบค่าเพอร์มิทตีวตีสัมพัทธ์ที่ตัวนำขนาดต่างๆ เนื่องจากในหัวข้อการทดสอบที่ระดับแรงดันต่างๆ จะไม่สามารถเปรียบเทียบผลการทดสอบได้เนื่องมาจากการทดสอบ โดยใช้เทคนิคของคลื่นเดินทางจะใช้พัลส์ในการทดสอบ ส่วนการทดสอบโดยใช้เทคนิคคลื่นนิ่ง จะใช้แรงดันไซนัสในการทดสอบ โดยจะแสดงผลการเปรียบเทียบในตารางที่ 5.4 – 5.6 ในแต่ละตัวอย่างสายทดสอบ

ตารางที่ 5.4 ความคลาดเคลื่อนในการวัดของสาย 300 V, 2-core PVC Insulated Sheathed, Flat Type
ขนาด 1 mm²

หัวข้อการทดสอบ	ค่าการทดสอบจากเครื่องมือวัดหัวข้อการทดสอบ		
	ระยะสาย	ขนาดตัวนำ	ระดับแรงดัน
ค่าจากการ โดยใช้เทคนิคของ คลื่นนิ่ง	3.092	3.092	-
ค่าจากการ โดยใช้เทคนิคของ คลื่นเดินทาง	3.348	3.366	-
% ความคลาดเคลื่อน	7.646 %	8.140 %	-

ตารางที่ 5.5 ความคลาดเคลื่อนในการวัดของสาย 12/20 kV Underground cable copper stranded
conductor XLPE insulator and PE sheathed ขนาด 70 mm²

หัวข้อการทดสอบ	ค่าการทดสอบจากเครื่องมือวัดหัวข้อการทดสอบ		
	ระยะสาย	ขนาดตัวนำ	ระดับแรงดัน
ค่าจากการ โดยใช้เทคนิคของ คลื่นนิ่ง	2.309	2.311	-
ค่าจากการ โดยใช้เทคนิคของ คลื่นเดินทาง	2.298	2.275	-
% ความคลาดเคลื่อน	0.478 %	1.582 %	-

ตารางที่ 5.6 ความคลาดเคลื่อนในการวัดของสาย 0.6/1 kV Copper cable twin conductor cross-linked
polyethylene insulated and polyethylene sheathed ขนาด 6 mm²

หัวข้อการทดสอบ	ค่าการทดสอบจากเครื่องมือวัดหัวข้อการทดสอบ		
	ระยะสาย	ขนาดตัวนำ	ระดับแรงดัน
ค่าจากการ โดยใช้เทคนิคของ คลื่นนิ่ง	2.309	2.310	-
ค่าจากการ โดยใช้เทคนิคของ คลื่นเดินทาง	2.335	2.349	-
% ความคลาดเคลื่อน	1.113 %	1.660 %	-

5.3 สรุป

จากเทคนิคที่นำเสนอ ออกแบบและสร้างเครื่องวัดเพอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์โดยใช้คลื่นนิ่งสามารถวัดเพอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ของสารฉนวน PVC มีค่าความคลาดเคลื่อนสูงเมื่อเปรียบเทียบกับค่าการทดสอบตามมาตรฐาน และการวัดโดยใช้เทคนิคของคลื่นเดินทาง เนื่องค่าเพอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์จากการทดสอบที่ได้เป็นมีผลกระทบต่อความถี่ที่ใช้ทดสอบ และเมื่อเปรียบเทียบกับค่าในตารางแสดงค่าเพอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ของสารฉนวน โพลีเมอร์ ค่าเพอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ที่ได้จากการทดสอบวัดอยู่ในช่วงที่มีค่าถูกต้อง นั่นคือค่าเพอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ของสารฉนวน PVC มีค่าลดต่ำลงตามความถี่ที่เพิ่มขึ้น โดยค่าที่ได้เป็นแนวทางในการศึกษาและเลือกใช้สายเคเบิลได้ และผลจากการวัดค่าเพอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ของสารฉนวน XLPE พบว่าค่าที่ได้มีความคลาดเคลื่อนต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการวัดโดยใช้เทคนิคของคลื่นเดินทาง (Travelling Wave) วิธีการวัดค่าคาปาซิแตนซ์และแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียที่ไดอิเล็กตริกตามมาตรฐาน และค่าในตารางแสดงค่าเพอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ของสารฉนวน โพลีเมอร์

บทที่ 6

สรุปผล

จุดมุ่งหมายในการวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ได้นำเสนอการศึกษาความสัมพันธ์ของเพอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ต่อการฉนวนทางไฟฟ้า และเทคนิคการวัดค่าเพอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ในรูปแบบต่างๆ เพื่อสร้างเครื่องวัดที่ง่ายในการทดสอบ จึงศึกษาทฤษฎีพื้นฐานของคลื่นในสายส่งไฟฟ้า การศึกษาดังกล่าวนำไปสู่การออกแบบและสร้างเครื่องทดสอบวัดค่าเพอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ของสารฉนวนโดยใช้คลื่นนิ่ง เพื่อการวัดค่าที่ง่ายและมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น และสามารถนำไปใช้ตรวจวัดจริงในอนาคตต่อไปได้ โดยสามารถสรุปผลและข้อเสนอแนะของงานวิจัยได้ดังนี้

6.1 การออกแบบสร้างเครื่องมือวัดค่าเพอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ของสารฉนวนโดยใช้คลื่นนิ่ง

จากผลการทดสอบวัดค่าเพอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ของสายเคเบิล โดยใช้คลื่นนิ่ง ซึ่งเป็นการพัฒนาใช้ระบบการทดสอบวัดค่าเพอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ระบบอัตโนมัติตั้งแต่กระบวนการทดสอบ การวัดค่า การแสดงผลขณะการทดสอบ และการประมวลผลโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ สามารถสรุปฟังก์ชันของเครื่องวัดค่าเพอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์โดยใช้คลื่นนิ่งได้ดังนี้

ตารางที่ 6.1 รายละเอียดข้อมูลของเครื่องทดสอบวัดค่าเพอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์

ลำดับ	รายละเอียด	พิกัดเครื่องทดสอบ
1.	ขนาดเครื่องทดสอบ	กว้าง 20 ซม. ยาว 23 ซม. สูง 7 ซม.
2.	ลักษณะสายทดสอบ	- สาย Twin conductor - สาย Underground cable
3.	ความยาวสายทดสอบ	15 - 250 เมตร
4.	แรงดันทดสอบ	5 Vp-p
5.	ย่านความถี่ทดสอบ	120 kHz – 3.5MHz
6.	การแสดงผล	LCD แบบตัวเลข

6.2 การศึกษาการวัดค่าเพอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ของสายเคเบิลโดยใช้คลื่นนิ่ง

ในการศึกษาทฤษฎีสายส่งไฟฟ้า และการเกิดคลื่นนิ่งในสายไฟฟ้า เพื่อประยุกต์ในการออกแบบสร้างชุดทดสอบ โดยวิธีการป้อนสัญญาณไซน์แรงดันต่ำ ที่มีการปรับค่าความถี่ได้เข้าไปในสายเคเบิลเพื่อทดสอบหาเพอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ค่าของวัสดุฉนวน โดยการทดสอบแบบเปิดวงจรที่ปลายสายอีกด้านหนึ่งผลของคลื่นสะท้อนที่สะท้อนกลับจากปลายสายจะรวมตัวกับคลื่นตกกระทบในสายเคเบิล จุดที่มีเฟสของแรงดันหักล้างกันมากที่สุด ณ ตำแหน่งที่ความยาวคลื่นมีค่าเป็นจำนวนเท่าเลขคี่ของ $\lambda/4$ ทำให้แรงดันที่ป้อนมีค่าต่ำที่สุด ทำการตรวจสอบค่าความถี่ที่จุดนั้น ซึ่งค่าความถี่จะมีการเปลี่ยนแปลงตามคุณสมบัติของวัสดุฉนวนแต่ละชนิด แล้วนำค่าความถี่ที่ได้ดังกล่าวคำนวณหาค่าเพอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ค่าของวัสดุฉนวนดังสมการที่ 3.3 จากการทดสอบวัดค่าเพอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ ของตัวอย่างฉนวน PVC ชนิด 300 V, 2-core PVC Insulated Sheathed, Flat Type สรุปได้ว่าชุดทดสอบที่จัดสร้างขึ้นมีความคลาดเคลื่อนในการวัดสูงเมื่อเปรียบเทียบกับค่าการทดสอบตามมาตรฐาน จึงไม่ควรนำค่าที่ได้จากการวัดมาอ้างอิง แต่จะสามารถดูผลของการเปลี่ยนแปลงทางความถี่ของสารฉนวนได้จากการทดสอบโดยอ้างอิงค่ามาตรฐานในตารางแสดงค่าเพอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ของสารฉนวน โพลีเอสเตอร์ และจากการทดสอบวัดค่าเพอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ของตัวอย่างฉนวน XLPE ชนิด 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 insulator and PE sheathed ค่าที่ได้ตรงกับค่าเพอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ที่ได้จากการทดสอบตามมาตรฐาน โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 3 % จึงสรุปว่าค่าที่ได้จากการวัดจากเครื่องทดสอบมีความถูกต้อง และสามารถอ้างอิงได้

6.3 แนวทางพัฒนางานวิจัย

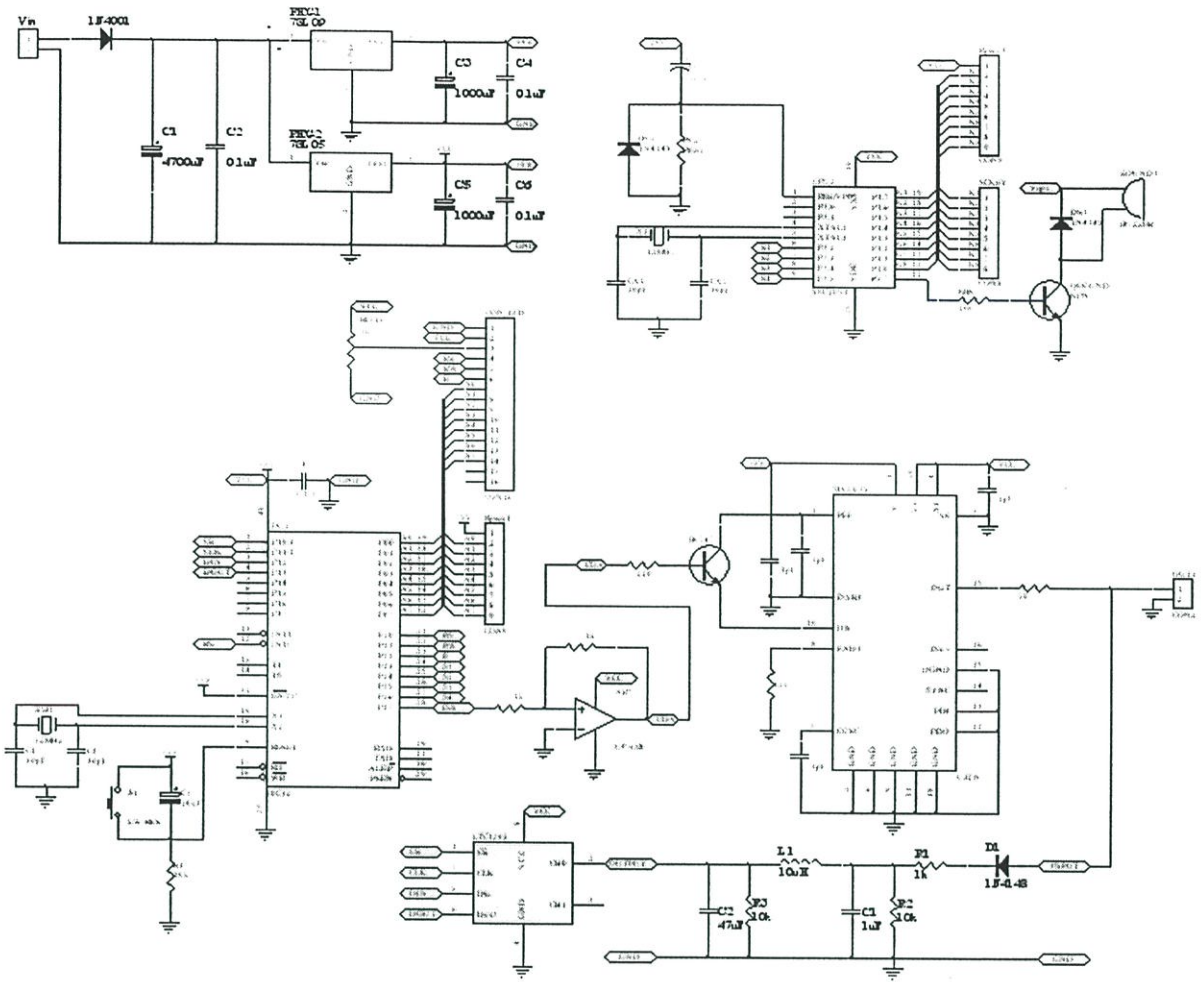
- พัฒนาเครื่องทดสอบให้สามารถทดสอบที่ความยาวสายสูงขึ้นได้ และที่ระดับความยาวต่ำๆ ได้
- พัฒนาเครื่องมือวัดให้สามารถวัดค่าเพอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ให้ค่าความคลาดเคลื่อนลดลงหรือทำให้เกิดความถูกต้องสูงขึ้น
- พัฒนาเครื่องมือวัดให้สามารถในการเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์เพื่อให้สามารถจัดเก็บข้อมูลในการทดสอบ
- พัฒนาเครื่องมือวัดให้สามารถใช้ได้แหล่งจ่ายได้กับแบตเตอรี่ 9 โวลท์

เอกสารอ้างอิง

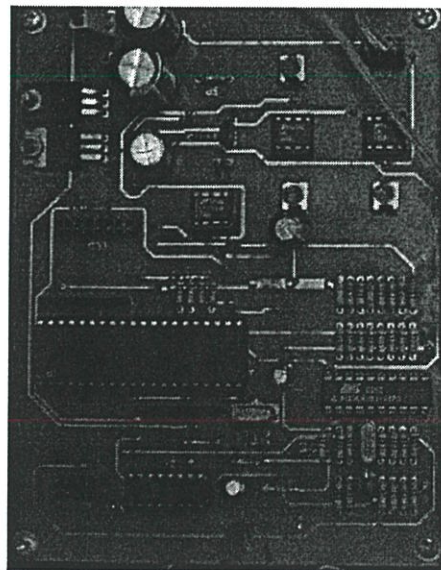
- [1] G.F. Moor, **Electric Cable Handbook**, BSP Professional Book, 1997, p.50.
- [2] H. Wa Beaty, **Electric Engineering Materials Reference guide**, McGraw-Hill, 1990, p.5-3
- [3] ICEA Publication No.S-66-524 (Cross-Linked Thermosetting Polyethylene Insulated Wire and Cable for the Transmission and Distribution of Electrical Energy)
- [4] IEC No.60502-2 (Power cable with extruded insulation and their accessories for rated voltage s form 1 kV ($U_m=1, 2$ kV) up to 30 kV ($U_m=36$ kV)
- [5] M.Beyer ; W. Boeck ; K.Moller ; W.Zaengl. Hochspannungstechnik, theoretische und praktische Grundlagen. Berlin, Heidelberg, New york, Paris, London : Springer-Verlag, 1986.
- [6] B. Clegg, **Underground Cable Fault Location**, McGraw-Hill, 1993, p.43.
- [7] Nannapaneni N.Rao, **Elements of Engineering Electromagnetics**, Prentice Hall, New Jersey 1994
- [8] Fawwaz T.Uaby, **Fundamental of Applied Electromagneties**, Pretice Hall, 1999, p.44-54.
- [9] 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.724-729.
- [10] S .Potivejkul, P.Kerdonfag, S.Jamnian and S.rungroad, Relative Permittivity Measurement Technique for Cable Insulator Using Travelling wave, EECON 23, 2000, p 29-32.
- [11] กิติพัฒน์ ดันตระรุ่งโรจน์ “ทฤษฎีสายส่งไฟฟ้า” วิทยาพัฒน์, 2541
- [12] บัณฑิต รัตนอารยานนท์, “วิศวกรรมไมโครเวฟ” สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2535
- [13] อติกร เสรีพัฒนานนท์ สาริต จำเนียร และ ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล “เทคนิคการวัดค่าเพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์ของฉนวนเคเบิลโดยใช้คลื่นนิ่ง” การประชุมวิชาการทางไฟฟ้าครั้งที่ 25, 2545, หน้า 91-95
- [14] ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล, “เอกสารประกอบการสอนวิชา **Electrical Enginnering Materials**” ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2543
- [15] รุ่งโรจน์ สมบูรณ์ทรัพย์. “การศึกษาหาค่าเพอร์มิทิวิตีสัมพัทธ์ของฉนวนสายเคเบิลโดยใช้เทคนิคของคลื่นเดินทาง” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2546

ภาคผนวก ก

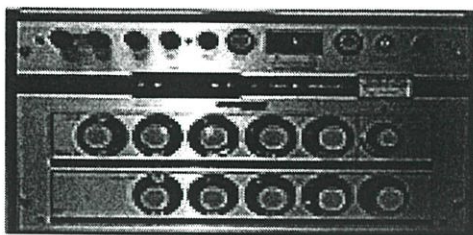
ภาพการออกแบบ การใช้งานและชุดอุปกรณ์การทดสอบ



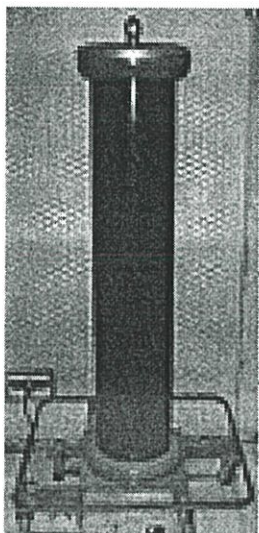
รูปที่ ก.1 วงจรรวมของชุดทดสอบ



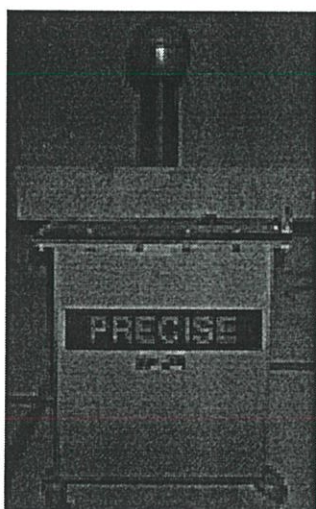
รูปที่ ก.2 การจัดวางอุปกรณ์บนแผงวงจร



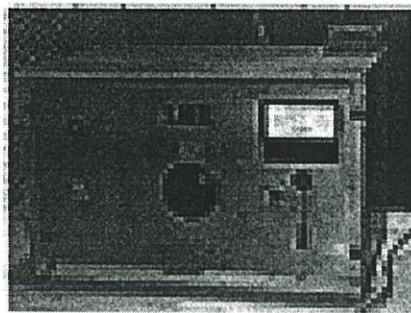
รูปที่ ก.3 เครื่องมือวัด C Tan δ Bridge Tettex Instrument Type 2805 QK



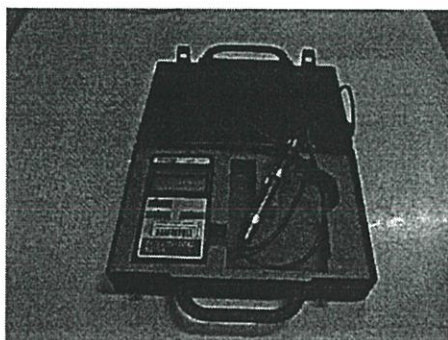
รูปที่ ก.4 ตัวเก็บประจุ Standard Capacitor Tettex Instrument 99.91pF 3370/100/200



รูปที่ ก.5 หม้อแปลง Testing Transformer Foster Transformer Ltd. 100kV. 5kVA. 50Hz



รูปที่ ก.6 อุปกรณ์ควบคุมแรงดัน AC Voltage Generator Control Unit.

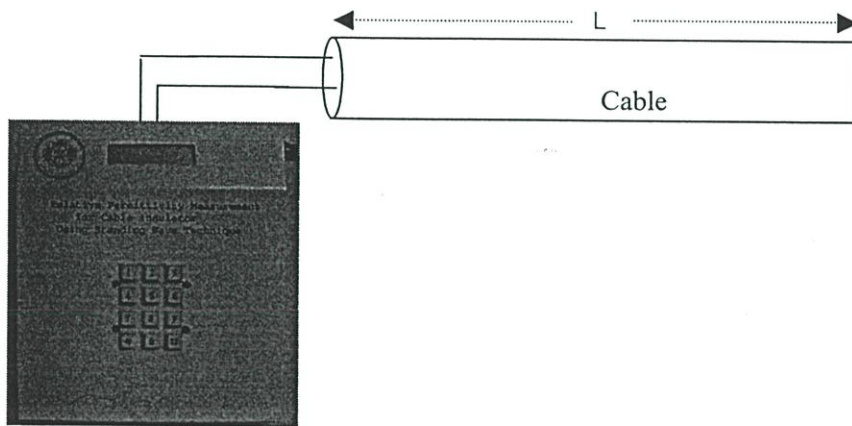


รูปที่ ก.7 Temperature & Humidity T-1 M MINOLTA

ภาคผนวก ข

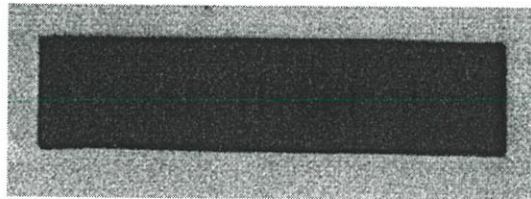
ขั้นตอนการใช้งานเครื่องทดสอบวัดค่าเพอร์มิทิวตี้สัมพัทธ์ของฉนวนเคเบิลโดยใช้เทคนิคคลื่นนิ่ง

1. จ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้กับเครื่องทดสอบ
2. วัดความยาวสายที่แน่นอนและต่อวงจรดังรูป



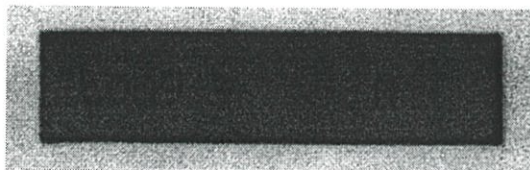
รูปที่ ข.1 วงจรการต่อใช้งานของเครื่องทดสอบ

3. เปิดสวิตช์ของเครื่องทดสอบจะแสดงความพร้อมของเครื่องทดสอบโดยจะแสดง ϵ_r Meter บนหน้าจอแสดงผล



รูปที่ ข.2 หน้าจอแสดงความพร้อมการทำงาน

4. ป้อนความยาวสายทดสอบโดยการป้อนระยะสายจะมีหน่วยเป็นเมตร

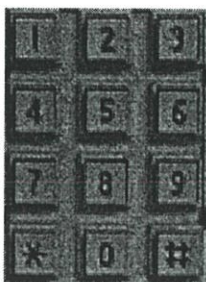


รูปที่ ข.3 หน้าจอแสดงความพร้อมการป้อนความยาวสาย



รูปที่ ข.4 ตัวอย่างการป้อนค่าความยาวสายทดสอบที่ระยะ 50 เมตร ของตัวอย่างสาย300V, 2-core
PVC Insulator and Sheathed, flat type

5. เริ่มต้นการทดสอบโดยการกดปุ่ม # ที่คีย์บอร์ด



รูปที่ ข.5 แป้นคีย์บอร์ดในการป้อนค่าความยาวสาย และควบคุมการทำงานของชุดทดสอบ

6. เครื่องทดสอบจะเริ่มผลิตสัญญาณ ไซน์ที่สามารถปรับค่าความถี่ได้ใช้ในการทดสอบ



รูปที่ ข.6 ค่าความถี่เริ่มต้นในการทดสอบ

7. แสดงผลการทดสอบทางหน้าจอ



รูปที่ ข.7 ผลการทดสอบของตัวอย่างฉนวน 300V, 2-core PVC Insulator and Sheathed, flat type

ภาคผนวก ค

บทความที่ได้รับการพิมพ์



**การประชุมวิชาการ
ทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 25
25th Electrical Engineering Conference
(EECON - 25)**

21-22 พฤศจิกายน 2545
ณ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

Volume I

สาขาบทความ
 • ไฟฟ้ากำลัง (PW)
 • อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (PE)
 • ระบบควบคุมและการวัดคุม (CT)

ดำเนินการจัดการประชุมโดย
 ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
 มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

เทคนิคการวัดค่าเพอร์มิทิวตี้สัมพัทธ์ของฉนวนเคเบิลโดยใช้คลื่นนิ่ง

Relative Permittivity Measurement Technique for Cable Insulator Using Standing Wave

อติกร เสรีพัฒนานนท์ สาธิต จำเนียร ศิริวัฒน์ โพรเวชกุล

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 โทร (226)3269902 Email:s_atigon@hotmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอเทคนิคการวัดค่าเพอร์มิทิวตี้สัมพัทธ์ (ϵ_r) ของสายฉนวนเคเบิล โดยใช้ทฤษฎีคลื่นนิ่งที่เกิดริโซแนนซ์ในสาย โดยวิธีการป้อนสัญญาณไซน์แรงดันต่ำที่มีการปรับค่าความถี่ได้เข้าไปในสายเคเบิลทดสอบของวัสดุฉนวน โดยการเปิดวงจรที่ปลายสายอีกด้านหนึ่งผลของคลื่นสะท้อนที่สะท้อนกลับจากปลายสายจะรวมตัวกับคลื่นตกกระทบในสายเคเบิล จุดที่มีเฟสของแรงดันหักล้างมากที่สุดจะเกิดที่ทุกๆจำนวนเท่าของเลขคี่ของความยาวคลื่นเท่ากับ $\lambda/4$ ทำให้แรงดันที่ป้อนมีค่าต่ำที่สุดทำการตรวจสอบค่าความถี่ที่จุดนั้น ซึ่งค่าความถี่ที่จุดนั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงตามคุณสมบัติของฉนวนแต่ละชนิด จากการทดสอบวัดค่า ϵ_r ของตัวอย่างฉนวน PVC ของสาย VAF ค่าที่วัดได้ตรงกับค่า ϵ_r ของวัสดุฉนวนที่ทดสอบในตารางแสดงค่าเพอร์มิทิวตี้สัมพัทธ์ของวัสดุ Polymer[1-2] และเมื่อเปรียบเทียบกับเทคนิคคลื่นจร[3] ค่าที่ได้มีความถูกต้องสามารถยอมรับได้

คำสำคัญ: เพอร์มิทิวตี้สัมพัทธ์, คลื่นนิ่ง

Abstract

This paper presents a technical measurement of relative permittivity (ϵ_r) of cable insulators. The standing wave and resonance wave theory are applied to generate low sinusoidal voltage sweeping the frequency into cable lines that need to know ϵ_r of insulators. When the end of cable is opened, the reflected wave from this end is include with an indicated wave in cable. In every odd multiple of the $\lambda/4$ wavelength, an amplitude of the standing wave is minimum. Results are indicated that the frequency of the standing wave dependent on characteristic of insulator types. From the test result, the ϵ_r of the VAF line using PVC insulator is quite agreed with the ϵ_r of the Polymer material[1-2]. In comparison between the standing wave and traveling wave[3], result comparison is acceptable.

Keyword: Relative Permittivity, Standing wave

1. บทนำ

ฉนวนทุกประเภทมีลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าขึ้นกับลักษณะสมบัติของค่าเพอร์มิทิวตี้สัมพัทธ์(Relative Permittivity): ϵ_r ของสารฉนวนซึ่งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติเฉพาะของสารวัสดุแต่ละชนิด[1-2] การตรวจหาลักษณะสมบัติของค่า ϵ_r ที่ผ่านมาใช้หลักการของ Traveling wave[3] มีความถูกต้องแม่นยำแต่ยังติดปัญหาในการสร้างเครื่องกำเนิดสัญญาณพัลส์ซึ่งไม่สะดวกในการทดลองและใช้งาน

จากปัญหาดังกล่าวในบทความนี้ได้ทำการศึกษาและวิเคราะห์เกี่ยวกับปรากฏการณ์ของสัญญาณคลื่นสะท้อนกลับ(Reflected wave) ของคลื่นนิ่ง (Standing wave) ที่เกิดขึ้นภายในสายเคเบิล โดยเทคนิคการหาค่าเพอร์มิทิวตี้สัมพัทธ์ของฉนวนแบบวงจรเปิด(Open Circuit) โดยศึกษาถึงผลการเปลี่ยนแปลงของแรงดันและความถี่ที่ทุกจำนวนเท่าของเลขคี่ของความยาวคลื่นเท่ากับ $\lambda/4$ ในสายเคเบิลที่หุ้มด้วยวัสดุฉนวนชนิดต่างๆ เพื่อใช้ในการตรวจสอบหาค่า ϵ_r ของสารฉนวนของสายเคเบิล โดยใช้เครื่องมือมาตรฐานในห้องปฏิบัติการและมีขั้นตอนการทดสอบที่ไม่ยุ่งยากและผลที่ได้สามารถยอมรับได้

2. ทฤษฎี

2.1 คลื่นนิ่ง (Standing Wave)

การเกิดคลื่นนิ่งในสายเคเบิลนั้นสาเหตุจากกรณีสมมาตร (Mismatch) ของอิมพีแดนซ์ประจำตัวสายเคเบิลกับโหลดที่ต่ออยู่ ทำให้คลื่นตกกระทบ (Incident Wave) เกิดการสะท้อนกลับ ปริมาณของคลื่นสะท้อนกลับ (Reflected Wave) จะเกิดขึ้นมากน้อยเพียงใดนั้นขึ้นอยู่กับระดับความไม่สมมาตรของอิมพีแดนซ์ทั้งสองซึ่งพิจารณาในรูปสัมประสิทธิ์การสะท้อน (Reflected Coefficient : Γ) และสามารถคำนวณได้จากสมการที่[4]

$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \tag{1}$$

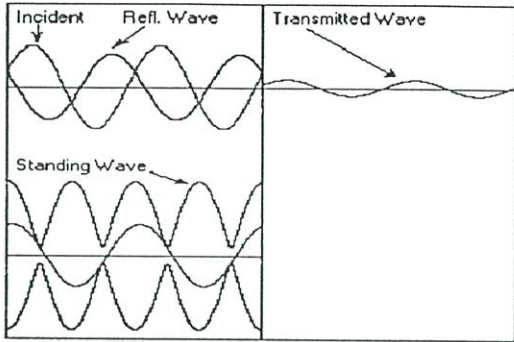
เมื่อ Z_L คือ อิมพีแดนซ์ของโหลด

Z_0 คือ อิมพีแดนซ์ลักษณะเฉพาะของสาย

ผลของคลื่นสะท้อนที่สะท้อนกลับจากโหลดจะรวมตัวกับคลื่นตกกระทบในสายเคเบิล ผลรวมของคลื่นทั้งสองจะทำให้เกิดความแรง



ของคลื่นในสายเคเบิลแต่ละตำแหน่งมีค่าไม่สม่ำเสมอ นั่นคือจุดที่มีเฟสของแรงดันไฟฟ้าเสริมกันจะมีระดับแรงดันไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น จุดที่มีเฟสของแรงดันหักล้างกันจุดนั้นจะมีระดับแรงดันไฟฟ้าลดลงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 การเกิดคลื่นนิ่งในสายเคเบิล

จากผลดังกล่าวเมื่อพิจารณาภาพโดยรวมตลอดทั้งสายเคเบิลจะพบว่าระดับแรงดันไฟฟ้ามีการกระเพื่อมซึ่งแสดงว่าไม่มีความนิ่งของระดับคลื่นตลอดความยาวของสายเคเบิล โดยสามารถวัดความไม่นิ่งของคลื่นนี้ได้ในรูปแบบของอัตราส่วน ระหว่างค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดในคลื่นนิ่ง เรียกว่าค่า VSWR(Voltage Standing Wave Ratio) คำนวณได้จากสมการที่ 2[4]

$$VSWR = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (2)$$

2.2 ความเร็วของคลื่นเคลื่อนที่ในสายเคเบิล

ความเร็วของคลื่นเคลื่อนที่ในสูญญากาศมีค่าโดยประมาณเท่ากับความเร็วแสง คือ $V_s = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ เมื่อให้ V เป็นความเร็วของคลื่นเคลื่อนที่ในสายเคเบิลที่มีตัวนำหุ้มด้วยฉนวนที่มีค่าเพอร์มิททิวิตีสัมพัทธ์ (ϵ_r) จะได้ความเร็วคลื่นเคลื่อนที่ในสายเคเบิลเป็น [5]

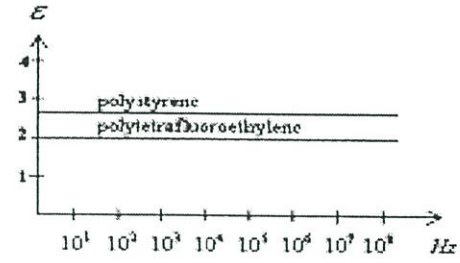
$$V = \frac{V_s}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad \text{m / s} \quad (3)$$

ดังนั้นเมื่อคลื่นเคลื่อนที่ในสายเคเบิลที่มีค่า ϵ_r ของวัสดุฉนวนต่างกันก็จะมีความเร็วในการเคลื่อนที่ที่แตกต่างกันด้วย

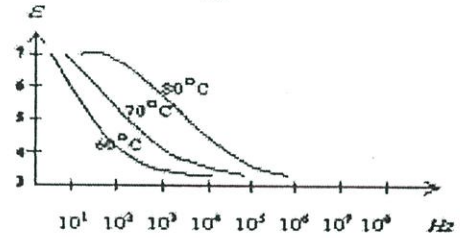
2.3 Permittivity

เพอร์มิททิวิตี (ϵ) หรือค่าคงที่ไดอิเล็กตริก(Dielectric constant) เป็นพารามิเตอร์แสดงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุฉนวน จากคุณสมบัติ

ทางเคมีของวัสดุแบ่งไดอิเล็กตริกออกเป็น 2 ชนิดคือ polar dielectric และ nonpolar dielectric[6] ซึ่งค่า ϵ ของไดอิเล็กตริกแต่ละชนิดจะมีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากผลของความถี่ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 3



(ก)



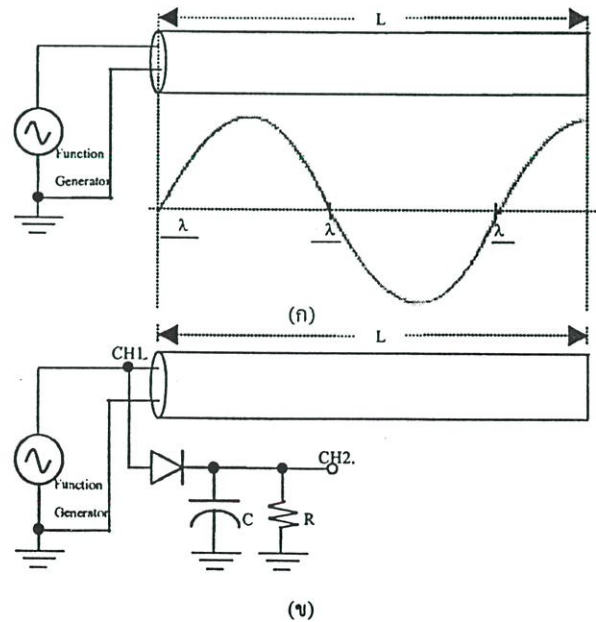
(ข)

รูปที่ 2 (ก) Permittivity ϵ_r Vs Frequency for solid nonpolar dielectric

(ข) Permittivity ϵ_r Vs Frequency for solid polar dielectric

2.4 การหาค่าเพอร์มิททิวิตีสัมพัทธ์(ϵ_r)ของวัสดุฉนวนเคเบิล

การทดสอบนี้กำหนดค่ากระแสที่ไหลต่อตั้งเท่ากับศูนย์ แต่แรงดันไฟฟ้ามีค่าสูงสุด



รูปที่ 3 (ก) คลื่นนิ่งของแรงดันไฟฟ้าในสายเคเบิล

(ข) วงจรการหาค่าเพอร์มิททิวิตีสัมพัทธ์ (ϵ_r)

ดังนั้นระยะจากตำแหน่งเปิดวงจรไปยังเครื่องกำเนิดทุก ๆ จำนวนเท่าของเลขคี่ของความยาวคลื่นเท่ากับ $\lambda/4$ (หนึ่งในสี่ของความยาวคลื่น) จะเป็นตำแหน่งที่แรงดันไฟฟ้าเกิดขึ้นต่ำสุด(เป็นศูนย์) ดังแสดงในรูปที่ 3[7]

ในบทความที่นำเสนอนี้ จะทำการทดสอบที่ความยาวสายมีความยาวเท่ากับความยาวคลื่นเท่ากับ $\lambda/4$ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4

$$\text{จะได้} \quad \lambda = 4L \quad (4)$$

เมื่อ λ คือ ความยาวคลื่น : m
 คือ ความยาวสายเคเบิล : m

จากความสัมพันธ์ของความเร็วในการเคลื่อนที่ของคลื่นแปรผันตามความยาวคลื่น และความถี่ที่ทำให้เกิดคลื่น สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 5[7]

$$= \lambda \quad (5)$$

คือ ความเร็วของคลื่นเคลื่อนที่ในสายเคเบิล : m/s
 คือ ความถี่ที่ทำให้เกิดคลื่น : Hz

จากความสัมพันธ์ของสมการที่ 3-5 ดังกล่าวสามารถหาค่า ϵ_r ของฉนวนสายเคเบิลได้จากสมการที่ 6

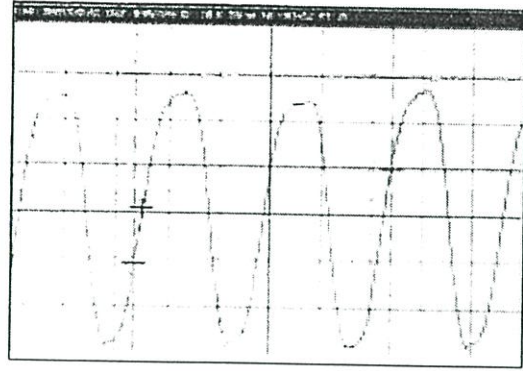
$$\epsilon_r = \left(\frac{V_S}{4Lf} \right)^2 \quad (6)$$

3. การทดลองและผลการทดลอง

3.1 การทดสอบวัดค่าความถี่ที่ระยะความยาวสายต่างๆ

วัตถุประสงค์เพื่อทดสอบการคำนวณหาค่า ϵ_r ของสาย VAF ฉนวน PVC เมื่อทำการปรับเปลี่ยนค่าระยะความยาวสาย โดยการป้อนแรงดันที่มีขนาดคงที่แล้วปรับค่าความถี่ของสัญญาณอินพุตจนกระทั่งแรงดันหักล้างเหลือน้อยที่สุด ทำการวัดค่าความถี่ที่จุดนั้น

โดยการป้อนสัญญาณไซน์ขนาด $10V_{p-p}$ จากเครื่องกำเนิดสัญญาณไซน์คั้งที่ เข้าไปในสายเคเบิล VAF ที่ระยะความยาวสายต่างๆ และใช้ Oscilloscope ตรวจสอบวัดค่าความถี่ที่ทำให้ระดับแรงดันไฟฟ้าหักล้างเหลือน้อยที่สุด เนื่องมาจากมีเฟสของแรงดันหักล้างกันมากที่สุดที่ความยาวคลื่นเท่ากับ $\lambda/4$ ดังแสดงผลในรูปที่ 4 และตารางที่ 1.

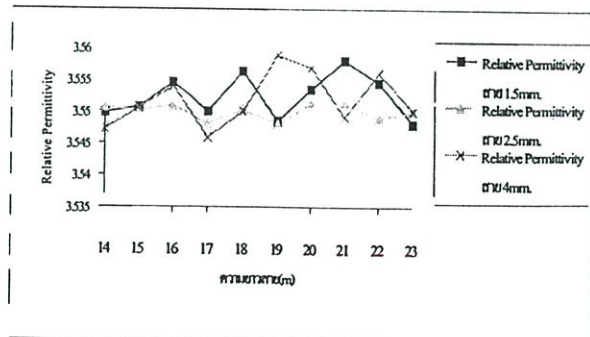


รูปที่ 4 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ต่ำที่สุดที่ระยะความยาวสาย 16 m

ตารางที่ 1 ผลการวัดค่าความถี่ที่ระดับแรงดันต่ำที่สุดที่ระยะสายต่างๆ

ความยาวสายเคเบิล(m)	ความถี่ที่ระดับแรงดันไฟฟ้าต่ำสุด(MHz)		
	สาย 1.5 mm ²	สาย 2.5 mm ²	สาย 4 mm ²
14	2.8415	2.8411	2.8425
15	2.6517	2.6519	2.6618
16	2.4864	2.4859	2.4848
17	2.34	2.3406	2.3413
18	2.2080	2.2099	2.21
19	2.0941	2.0942	2.091
20	1.988	1.9886	1.987
21	1.8921	1.8939	1.8945
22	1.807	1.8084	1.8066
23	1.73	1.7295	1.7295

และสามารถคำนวณค่า ϵ_r จากค่าความถี่ที่วัดได้ที่ระยะความยาวสายต่างๆจากตารางที่ 1 ตามสมการที่ 6 ดังแสดงในรูปที่ 5



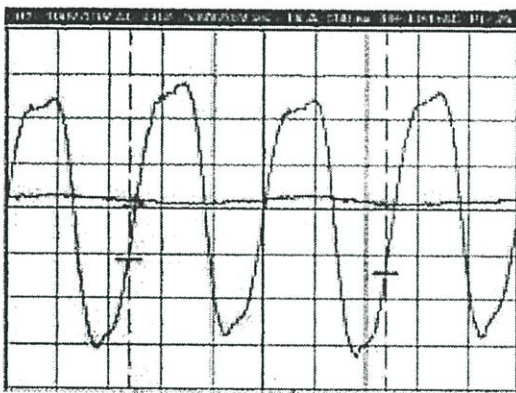
รูปที่ 5 กราฟเปรียบเทียบค่า ϵ_r ที่ระยะสายต่าง

PW

3.2 การทดสอบหาค่า ϵ_r ที่ระดับแรงดันต่างๆ

วัตถุประสงค์เพื่อทดสอบการคำนวณหาค่า ϵ_r ของสาย VAF ฉนวน PVC เมื่อทำการปรับเปลี่ยนระดับแรงดันที่ป้อน โดยการป้อนแรงดันที่มีขนาดคงที่แล้วปรับค่าความถี่ของสัญญาณอินพุตจนกระทั่งแรงดันหักล้างเหลือน้อยที่สุด แล้วทำการวัดค่าความถี่ที่จุดนั้น

โดยการป้อนสัญญาณไซน์ค่าขอดต่างๆ จากเครื่องกำเนิดสัญญาณไซน์คงที่ เข้าไปในสายเคเบิล VAF ที่ระยะความยาวสาย 20 m. และใช้ Oscilloscope ตรวจสอบวัดค่าความถี่ที่ระดับแรงดันไฟฟ้าต่ำที่สุด เนื่องมาจากเฟสของแรงดันหักล้างกันมากที่สุดที่ความยาวคลื่นเท่ากับ $\lambda/4$ ดังแสดงผลในรูปที่ 6 และตารางที่ 2

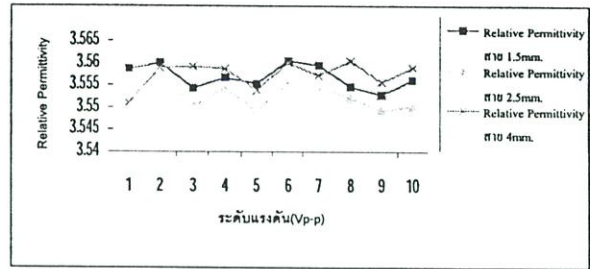


รูปที่ 6 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ต่ำที่สุดที่แรงดันที่ป้อน V_{p-p}

ตารางที่ 2 ผลการตรวจวัดค่าความถี่ที่ทำให้เหลือระดับแรงดันไฟฟ้าต่ำที่สุดที่ระดับแรงดันป้อนต่างๆ

ระดับแรงดันป้อน (Vp-p)	ความถี่ที่ระดับแรงดันไฟฟ้าต่ำสุด(MHz)		
	สาย 1.5 mm ²	สาย 2.5 mm ²	สาย 4 mm ²
1	1.9865	1.9884	1.9887
2	1.9862	1.9869	1.9864
3	1.9877	1.9888	1.9864
4	1.9870	1.9888	1.9865
5	1.9874	1.9892	1.9879
6	1.9861	1.9874	1.9862
7	1.9863	1.9877	1.9870
8	1.9877	1.9884	1.9860
9	1.9882	1.9892	1.9873
10	1.9873	1.9889	1.9864

และจะสามารถทำการคำนวณหาค่า ϵ_r จากค่าความถี่ที่วัดได้ ที่ระดับแรงดันป้อนต่างๆจากตารางที่ 2 ตามสมการที่ 6 ดังแสดงผลในรูปที่ 7



รูปที่ 7 ค่า ϵ_r ที่คำนวณได้ที่ระดับแรงดันที่ป้อนค่าต่างๆ

3.3 วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากผลการทดสอบในตารางที่ 1 จะพบว่าค่าความถี่ที่วัดได้จะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อระยะความยาวลดลงและจะพบว่าค่า ϵ_r ที่คำนวณได้จากสมการที่ 6 ที่ระยะสายต่างๆจะมีค่าใกล้เคียงกันมากและไม่ขึ้นอยู่กับขนาดตัวนำดังแสดงในกราฟรูปที่ 5

และจากผลการทดสอบในตารางที่ 2 จะพบว่าขนาดของแรงดันคลื่น ไซน์แต่ละค่าที่ป้อนในการทดสอบนั้นจะไม่ทำให้ค่าของความถี่ที่วัดได้เปลี่ยนแปลงและค่า ϵ_r ที่คำนวณได้จากสมการที่ 6 ที่แรงดันที่ป้อนค่าต่างๆจะมีค่าใกล้เคียงกันมากและไม่ขึ้นอยู่กับขนาดตัวนำดังแสดงในกราฟรูปที่ 7

ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้จากการทดสอบเกิดจากความผิดพลาดในการอ่านค่าความถี่จาก Oscilloscope ดังนั้นจึงถือได้ว่าค่า ϵ_r เป็นค่าคงที่ของวัสดุจนวนแต่ละชนิดซึ่งไม่ขึ้นอยู่กับขนาดของแรงดันภายในสายและค่าความยาวสายเคเบิล[5,8,9] และพบว่าค่า ϵ_r ที่วัดได้จากเทคนิคการวัดค่าความถี่ที่ทำให้เกิดแรงดันต่ำที่สุดที่ระยะความยาวคลื่นเท่ากับ $\lambda/4$ โดยใช้คลื่นนิ่งที่นำเสนอในบทความนี้กับเมื่อเทียบกับค่า ϵ_r ของวัสดุ Polymer จะมีค่าอยู่ในช่วง 3.2 ถึง 4 ของค่าที่กำหนดในตาราง [1-2] และเมื่อเปรียบเทียบกับเทคนิคคลื่นจร[3] ค่าที่ได้มีความถูกต้องเชื่อถือได้

4.1 สรุป

การวัดค่า ϵ_r ของฉนวนสายเคเบิลโดยอาศัยหลักการของคลื่นนิ่งและการสะท้อนกลับของคลื่น โดยการป้อนสัญญาณไซน์เข้าไปในสายเคเบิลที่ทราบระยะความยาวสาย และทำการวัดค่าความถี่ของคลื่น ไซน์ที่เกิดเฟสของแรงดันไฟฟ้าหักล้างกันมากที่สุดที่ความยาวคลื่นเท่ากับ $\lambda/4$ นี้ค่าความถี่ที่ได้แต่ละค่าขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุจนวนแต่ละชนิด สามารถวัดค่า ϵ_r ของฉนวนสายเคเบิลได้โดยค่าที่วัดได้มีค่าตรง

กับค่า ϵ , ในตารางแสดงค่าเพอร์มิทิวตี้สัมพัทธ์ (ϵ_r) ของวัสดุ Polymer[1-2]

จากเทคนิคที่นำเสนอและจากผลการทดลองที่ได้สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาออกแบบและสร้างเป็นเครื่องวัดค่า ϵ_r ของฉนวนสายเคเบิลได้ต่อไปในอนาคต

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] G.F. Moor, Electric Cable Handbook, BSP Professional Book, 1997, p.50.
- [2] H. Wa Beaty, Electric Engineering Materials Reference guide, McGraw-Hill, 1990, p.5-3
- [3] S .Potivejkul, P.Kerdonfag, S.Jamnian and S.rungroad, "Relative Permittivity Measurement Technique for Cable Insulator Using Travelling wave," EECON23,2000,p 29-32.
- [4] Nannapaneni N.Rao, Elements of Engineering Electromagnetics, Prentice Hall, New Jersey 1994.
- [5] B. Clegg, Underground Cable Fault Location, McGraw-Hill,1993, p.43,
- [6] B.Tareev, Physics of Dielectric Materials, MIR PUBLISHING MOSCOW,1979,P.105-107.
- [7] Fawwaz T.Uaby Fundamental of Applied Electromagnetics, Prentice Hall,1999,p.44-54.
- [8] W.C. Johnson, Transmission Line and network, McGraw-Hill,1950,p.7.
- [9] 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.724-729.

ประวัติผู้เขียนบทความ



นายอดิกร ศรีพัฒนานันท์ จบการศึกษา ว.ศ.บ.ไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ปัจจุบันเป็นนักศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยทำการวิจัยในด้าน Cable insulation co-ordinate, วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง, การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง



นายสาธิต จำเนียร จบการศึกษา ว.ศ.บ.ไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ปัจจุบันเป็นนักศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยทำการวิจัยในด้าน Cable fault location, Insulation co-ordinate, วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง, การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง



นายศิริวัฒน์ โพธิ์เวชกุล จบการศึกษาว.ศ.บ.ไฟฟ้า และว.ศ.ม.ไฟฟ้า จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปัจจุบันดำรงตำแหน่งเป็นรองศาสตราจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟ

ฟ้าสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยทำการวิจัยในด้าน วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง, การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง, การวิเคราะห์ฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลัง, Insulation co-ordinate

ประวัติผู้เขียน



นายอดิกร เสรีพัฒนานนท์ เกิดเมื่อวันที่ 23 พฤษภาคม พ.ศ. 2519 ที่จังหวัด
 ตรัง สำเร็จการศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
 กำลังจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ปีการศึกษา 2542 ประกาศนียบัตร
 วิชาชีพชั้นสูงสาขาไฟฟ้ากำลังจากสถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขต
 นนทบุรี และประกาศนียบัตรวิชาชีพจากวิทยาลัยเทคนิคตรัง

ปี พ.ศ.2542 ทำงานในตำแหน่งผู้ช่วยอาจารย์ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

ปี พ.ศ.2543 ทำงานในตำแหน่งอาจารย์ประจำ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
 กำลัง มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย จนถึงปัจจุบัน