

การพัฒนาระบบตรวจสอบคุณภาพการฉนวนแบบไม่ทำลายของสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน  
ด้วยวิธีการคลื่นจร

นายกุลเดช ฤทธิรุ่งรัตน์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2551  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DEVELOPMENT ON THE NON-DESTRUCTIVE INVESTIGATION SYSTEM FOR HIGH VOLTAGE  
UNDERGROUND CABLES USING TRAVELLING WAVE METHOD

Mr.Kuladet Rittiroongrut

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2008

Copyright of Chulalongkorn University



กุลเดช ฤทธิรุ่งรัตน์ : การพัฒนาระบบตรวจสอบคุณภาพการฉนวนแบบไม่ทำลายของสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินด้วยวิธีการคลื่นจร. (DEVELOPMENT ON THE NON-DESTRUCTIVE INVESTIGATION SYSTEM FOR HIGH VOLTAGE UNDERGROUND CABLES USING TRAVELLING WAVE METHOD). อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ดร.วีระพันธ์ รังสีจิตกรประภา, 120 หน้า.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาเพื่อพัฒนาระบบตรวจสอบคุณภาพการฉนวนแบบไม่ทำลายของสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินด้วยวิธีการคลื่นจร ระบบตรวจสอบคุณภาพฉนวนแบบไม่ทำลายนี้ประกอบด้วย 3 ส่วน ส่วนแรกเป็นส่วนแหล่งกำเนิดสัญญาณพัลส์ ซึ่งจะสร้างสัญญาณพัลส์แรงดันหนึ่งลูกคลื่นขนาดประมาณ 400 โวลต์ ความกว้าง 200 - 500 นาโนวินาที สำหรับเป็นแหล่งกำเนิดคลื่นจรให้กับสายเคเบิลที่ทดสอบ ส่วนที่สองเป็นส่วนรับสัญญาณจะใช้ดีจิจิตอลออสซิลโลสโคปเป็นตัวรับสัญญาณคลื่นสะท้อนกลับ จากนั้นนำรูปคลื่นสะท้อนกลับที่ได้จากการวัดมาทำการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมที่ถูกพัฒนาขึ้นบนคอมพิวเตอร์เป็นส่วนที่สาม

รูปคลื่นสะท้อนกลับที่ได้นี้สามารถวิเคราะห์ หาตำแหน่งผิดพร่องและอัตราส่วนของค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ ณ ตำแหน่งผิดพร่องได้ ในส่วนของการวิเคราะห์การทดสอบที่ความยาวสายเคเบิลไม่เกิน 300 เมตร การหาตำแหน่งผิดพร่องโดยใช้โปรแกรมแบบอัตโนมัติ สามารถระบุตำแหน่งได้ใกล้เคียงกับตำแหน่งผิดพร่องจริง โดยมีค่าความผิดพลาดน้อยกว่าร้อยละ 2 และการหาอัตราส่วนของค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ ณ ตำแหน่งผิดพร่อง สามารถคำนวณได้ใกล้เคียงกับอัตราส่วนของค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์จริง โดยมีค่าความผิดพลาดน้อยกว่าร้อยละ 5

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่อ.....  
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....  
 ปีการศึกษา 2551

4970228221 : ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD : HIGH VOLTAGE UNDERGROUND CABLE / TRAVELLING WAVE /  
DEFECTIVE LOCATION

KULADET RITTIROONGRUT : DEVELOPMENT ON THE NON-DESTRUCTIVE INVESTIGATION SYSTEM FOR HIGH VOLTAGE UNDERGROUND CABLES USING TRAVELLING WAVE METHOD. THESIS ADVISOR : WEERAPUN RUNGSEEVIJITPRAPA, Dr.-Ing. , 120 pp.

This thesis presents the development on the non-destructive investigation system for high voltage underground cables using travelling wave method. This system divides into three parts. In the first part, the pulse generator is used to generate the 400 V, 200 – 500 ns pulse wave shape which injected into test cable. In the second part, the oscilloscope is used to receive the reflection pulse signal. In the third part, the reflection pulse signal is evaluated by developed computer program.

This reflection pulse signal can be analyzed to the defective location and surge impedance ratio at defective location. The calculated results from automatic program under using the cable length less than 300 meter could indicate the defective location in faulty cable with an error less than 2%. The surge impedance ratio was also closed to the real one with an error less than 5%.

Department : Electrical Engineering Student's signature : .....

Field of study : Electrical Engineering Principal Advisor's signature : .....

Academic year : 2008

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาและความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากอาจารย์ ดร.วีระพันธ์ รังสีวิจิตรประภา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้ให้แนวทางการศึกษาวิจัย คำแนะนำ และข้อคิดเห็นต่างๆของการทำวิทยานิพนธ์ด้วยดีตลอดมา รวมทั้งได้กรุณาตรวจสอบและแก้ไขข้อบกพร่องจนกระทั่งวิทยานิพนธ์เสร็จสมบูรณ์

นอกจากนั้น ผู้วิจัยต้องขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งประกอบไปด้วย อาจารย์ ดร.คมสัน เพ็ชรรักษ์ อาจารย์ ดร.แนบบุญ หุนเจริญ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฉัตรชัย เนตรพิศาลวนิช ที่ได้กรุณาตรวจสอบแก้ไขและให้คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จเรียบร้อย คุณ ภักพล โอภาณุรักษ์ ที่ให้คำปรึกษาทางด้านวงจรอิเล็กทรอนิกส์พร้อมทั้งเอื้อเฟื้ออุปกรณ์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ คุณ วิษณุ พันภัย ที่ให้คำปรึกษาทางด้านการเขียนโปรแกรม ตลอดจนพี่ๆ เพื่อนๆ และบุคคลากรท่านอื่นในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงทุกท่านที่สนับสนุนการใช้งานอุปกรณ์ในการทำการทดสอบ อีกทั้งยังเป็นกำลังใจและช่วยเหลือข้าพเจ้าในด้านต่างๆด้วยดีเสมอมา ผู้วิจัยจึงขอขอบพระคุณเอาไว้ ณ โอกาสนี้

เหนือสิ่งอื่นใดผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และญาติพี่น้องของข้าพเจ้า ที่เป็นกำลังใจที่ดีที่สุดและให้การสนับสนุนในทุกๆ ด้านตลอดมา

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ .....	ช
สารบัญตาราง .....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ

## บทที่

1. บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	1
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ .....	1
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	2
2. หลักการ และทฤษฎีการเคลื่อนที่ของคลื่นจรบนสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน .....	3
2.1 สายเคเบิลแรงสูง.....	3
2.1.1 ชนิดของสายเคเบิลแรงสูง .....	3
2.1.1.1 สายเคเบิลฉนวนกระดาษบรรจุด้วยน้ำมัน (Paper insulated, Oil-filled cable) .....	3
2.1.1.2 สายเคเบิลฉนวนแข็ง (Solid dielectric cable) .....	4
2.1.2 โครงสร้างของสายเคเบิลแรงสูง .....	5
2.1.2.1 โครงสร้างหลัก.....	6
2.1.2.2 โครงสร้างรอง.....	7
2.1.3 อุปกรณ์เชื่อมต่อสายเคเบิล .....	8
2.1.3.1 หัวต่อสายเคเบิลกับสายเคเบิล (Splicing).....	8
2.1.3.2 หัวต่อสายเคเบิลกับอุปกรณ์อื่นๆ.....	9
2.2 วงจรสมมูลของสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน .....	10
2.2.1 สายเคเบิลแรงสูงใต้ดินแบบมีการสูญเสีย (Lossy transmission lines) .....	11
2.2.2 สายเคเบิลแรงสูงใต้ดินแบบไม่มีการสูญเสีย (Lossless transmission lines) ...	12

บทที่	หน้า
2.3 ความเร็วเคลื่อนที่ของคลื่นจรบนสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน .....	12
2.4 การสะท้อน และการส่งผ่านของคลื่นจร .....	13
2.5 พฤติกรรมของคลื่นจรบนสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินที่ตำแหน่งปลายสาย.....	14
2.5.1 พฤติกรรมของคลื่นจรบนสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินที่ตำแหน่ง ปลายสายแบบต่างๆ.....	15
2.5.1.1 ลัดวงจร (Short circuit).....	15
2.5.1.2 เปิดวงจร (Open circuit).....	15
2.5.1.3 อิมพีแดนซ์ขนาดต่างๆ.....	16
2.6 เวลาการเคลื่อนที่ของคลื่นจรบนสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน .....	17
2.7 การไม่เข้ากันของสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน.....	18
3. การออกแบบ และการประกอบสร้างระบบตรวจสอบคุณภาพการฉนวน แบบไม่ทำลายของสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินด้วยวิธีการเคลื่อนจร .....	22
3.1 หลักการทำงานของระบบ .....	23
3.2 ส่วนแหล่งกำเนิดสัญญาณพัลส์ .....	23
3.2.1 ส่วนควบคุมการทำงาน.....	24
3.2.2 ส่วนวงจรอัดประจุแรงดันสูง .....	30
3.3 ส่วนรับสัญญาณ.....	34
3.4 ส่วนประมวลผล .....	34
3.4.1 โปรแกรมแบบผู้วิเคราะห์ทำการปรับตำแหน่งได้เอง (Manual program) .....	35
3.4.1.1 โปรแกรมคำนวณหาตำแหน่งผิดพ่วง .....	35
3.4.1.2 โปรแกรมคำนวณหาอัตราส่วนของค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ ณ ตำแหน่งผิดพ่วง .....	36
3.4.2 โปรแกรมแบบอัตโนมัติ (Automatic program) .....	38
3.4.2.1 โปรแกรมคำนวณหาตำแหน่งผิดพ่วง .....	38
3.4.2.2 โปรแกรมคำนวณหาอัตราส่วนของค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ ณ ตำแหน่งผิดพ่วง .....	40
4. การทดสอบระบบตรวจสอบคุณภาพการฉนวนแบบไม่ทำลายของสายเคเบิล ด้วยวิธีการเคลื่อนจร .....	42
4.1 วิธีการทดสอบ.....	42
4.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ.....	42



บทที่	หน้า
4.2 การทดสอบ.....	44
4.2.1 การทดสอบส่วนแหล่งกำเนิดสัญญาณพัลส์กับส่วนรับสัญญาณ.....	44
4.2.1.1 ลัดวงจร(Short circuit)ที่ตำแหน่งปลายสาย.....	46
4.2.1.2 เปิดวงจร(Open circuit)ที่ตำแหน่งปลายสาย.....	49
4.2.1.3 Terminal 50 โอห์มที่ตำแหน่งปลายสาย .....	52
4.2.1.4 Terminal 75 โอห์มที่ตำแหน่งปลายสาย .....	55
4.2.1.5 การจำลองการลัดวงจรแบบมีความต้านทาน โดยการเจาะรู และบรรจุด้วยสำลีชุบน้ำ .....	58
4.2.1.6 สายเคเบิล RG-11/U 75 โอห์มยาว 12.5 เมตร .....	60
4.2.1.7 Terminal 50 และ 75 โอห์ม ต่อขนานกับสายเคเบิล.....	63
4.2.2 การทดสอบส่วนประมวลผล.....	66
4.2.2.1 ทดสอบส่วนโปรแกรมแบบผู้วิเคราะห์ทำการปรับตำแหน่งได้เอง (Manual program) .....	66
4.2.2.2 ทดสอบส่วนโปรแกรมแบบอัตโนมัติ (Automatic program).....	76
5. สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	84
5.1 สรุปผล .....	84
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	85
รายการอ้างอิง.....	88
ภาคผนวก.....	91
ภาคผนวก ก .....	92
ภาคผนวก ข .....	99
ภาคผนวก ค .....	107
ภาคผนวก ง.....	118
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	120

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 2.1 ความเร็วของคลื่นจรรยาที่เคลื่อนที่บนสายเคเบิลที่มีฉนวนแตกต่างกัน .....	13
ตารางที่ 4.1 การทดสอบแหล่งกำเนิดสัญญาณพัลส์กับส่วนรับสัญญาณ.....	44
ตารางที่ 4.2 ความยาวสายเคเบิลที่คำนวณได้แบบลัดวงจรที่ปลายสาย.....	48
ตารางที่ 4.3 ความยาวสายเคเบิลที่คำนวณได้แบบเปิดวงจรที่ปลายสาย .....	51
ตารางที่ 4.4 ความยาวสายเคเบิลที่คำนวณได้แบบ Terminal 50 โอห์มที่ปลายสาย.....	54
ตารางที่ 4.5 ความยาวสายเคเบิลที่คำนวณได้แบบ Terminal 75 โอห์มที่ปลายสาย.....	57
ตารางที่ 4.6 ความยาวสายเคเบิลที่คำนวณได้จากการจำลองการลัดวงจร แบบมีความต้านทาน .....	59
ตารางที่ 4.7 ความยาวสายเคเบิลที่คำนวณได้แบบสายเคเบิล RG-11/U 75 โอห์มยาว 12.5 เมตร.....	61
ตารางที่ 4.8 ความยาวสายเคเบิลที่คำนวณได้แบบ Terminal 50 และ 75 โอห์ม ต่อขนานกับสายเคเบิล.....	65
ตารางที่ 4.9 ความผิดพลาดจากโปรแกรมจากผลการทดสอบที่ 4.2.1.6.....	76
ตารางที่ 4.10 ผลการวิเคราะห์โดยโปรแกรมแบบผู้วิเคราะห์ทำการปรับ ตำแหน่งได้เองและแบบอัตโนมัติ.....	83
ตารางที่ ค.1 ความยาวสายเคเบิล RG-58A/U แต่ละเส้น.....	107
ตารางที่ ค.2 ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของสายเคเบิล RG-58A/U แต่ละเส้น.....	111
ตารางที่ ค.3 ความยาว และพารามิเตอร์ต่างๆของสายเคเบิล RG-58A/U แต่ละเส้น .....	116

## สารบัญภาพ

ภาพประกอบที่	หน้า
รูปที่ 2.1 Paper-Insulated Lead-Covered Cables (PILC).....	4
รูปที่ 2.2 Self Contained Liquid-Filled Cables (SCLF) .....	4
รูปที่ 2.3 Three-core, XLPE insulated cables .....	5
รูปที่ 2.4 Single-core, XLPE insulated cables.....	5
รูปที่ 2.5 โครงสร้างของสายเคเบิลฉนวนแข็งแบบ 3 แกน และ 1 แกน .....	5
รูปที่ 2.6 สายเคเบิลที่มีฉนวนนอกเป็นลักษณะของลูกฟูก.....	7
รูปที่ 2.7 หัวต่อสายเคเบิลกับสายเคเบิล .....	9
รูปที่ 2.8 หัวต่อสายเคเบิลกับอุปกรณ์อื่นๆ.....	10
รูปที่ 2.9 วงจรสมมูลของสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินแบบมีการสูญเสีย .....	11
รูปที่ 2.10 วงจรสมมูลของสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินแบบไม่มีการสูญเสีย .....	12
รูปที่ 2.11 ชนิดของคลื่นจรที่ตำแหน่งที่มีความไม่เข้ากันของค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ .....	14
รูปที่ 2.12 การสะท้อนของคลื่นจรแรงดันจากปลายสายแบบลัดวงจร.....	15
รูปที่ 2.13 การสะท้อนของคลื่นจรแรงดันจากปลายสายแบบเปิดวงจร .....	16
รูปที่ 2.14 การสะท้อนของคลื่นจรแรงดันจากปลายสายแบบค่าอิมพีแดนซ์ขนาดต่างๆ.....	16
รูปที่ 2.15 เวลาการเคลื่อนที่ของคลื่นจรบนสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน .....	18
รูปที่ 2.16 ลักษณะของสายแบบโคแอกเชียล.....	19
รูปที่ 2.17 การสะท้อนของคลื่นจรที่ตำแหน่ง A บนสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน .....	20
รูปที่ 3.1 ส่วนประกอบของระบบตรวจสอบคุณภาพการฉนวนแบบไม่ทำลาย ของสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินด้วยวิธีการคลื่นจร.....	22
รูปที่ 3.2 โครงสร้างของส่วนแหล่งกำเนิดสัญญาณพัลส์.....	24
รูปที่ 3.3 ไอซีขมิตต์ทริกเกอร์ 74LS14.....	25
รูปที่ 3.4 ลักษณะแรงดันขีดเริ่ม(Threshold voltage)ของไอซีขมิตต์ทริกเกอร์ .....	25
รูปที่ 3.5 สัญญาณจากสวิทช์ และสัญญาณทริกเกอร์ที่ได้ .....	26
รูปที่ 3.6 วงจรดีบาวซิง โดยใช้ไอซีขมิตต์ทริกเกอร์ 74LS14.....	26
รูปที่ 3.7 ไอซีโมโนสเตเบิล 74HCT221 .....	27
รูปที่ 3.8 วงจรสร้างสัญญาณพัลส์เพื่อทริกวงจรขับไอซีมอสเฟต .....	28
รูปที่ 3.9 ไอซีออปโตไอโซเลต TLP250 .....	28
รูปที่ 3.10 การแยกกราวด์วงจรและขับไอซีมอสเฟต โดยใช้ไอซีออปโตไอโซเลต TLP250 .....	29

ภาพประกอบที่	หน้า
รูปที่ 3.11 ไอซีมอสเฟต IRF840.....	29
รูปที่ 3.12 ส่วนวงจรควบคุมการทำงาน.....	30
รูปที่ 3.13 ไอซีพัลส์วิตช์มอดูเลชัน TL494CN.....	31
รูปที่ 3.14 ลักษณะสัญญาณพัลส์สี่เหลี่ยมที่ออกจากไอซีพัลส์วิตช์มอดูเลชัน .....	31
รูปที่ 3.15 วงจรไอซีพัลส์วิตช์มอดูเลชัน TL494CN.....	31
รูปที่ 3.16 ไอซีมอสเฟต IRF620.....	32
รูปที่ 3.17 หม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง .....	32
รูปที่ 3.18 วงจรทวีแรงดันหรือวงจร voltage doubler.....	33
รูปที่ 3.19 ส่วนวงจรอัดประจุแรงดันสูง .....	33
รูปที่ 3.20 ดิจิตอลออสซิลโลสโคป Lecroy waveRuner 6050A.....	34
รูปที่ 3.21 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมคำนวณหาค่าตำแหน่งผิดพลาด แบบผู้วิเคราะห์ทำการปรับตำแหน่งได้เอง .....	36
รูปที่ 3.22 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมคำนวณหาอัตราส่วนของค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ ณ ตำแหน่งผิดพลาดแบบผู้วิเคราะห์ทำการปรับตำแหน่งได้เอง.....	37
รูปที่ 3.23 ส่วนหน้าต่างโปรแกรมแบบผู้วิเคราะห์ทำการปรับตำแหน่งได้เอง .....	38
รูปที่ 3.24 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมคำนวณหาค่าตำแหน่งผิดพลาดแบบอัตโนมัติ .....	39
รูปที่ 3.25 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมคำนวณหาอัตราส่วนของค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ ณ ตำแหน่งผิดพลาดแบบอัตโนมัติ.....	40
รูปที่ 3.26 ส่วนหน้าต่างโปรแกรมแบบอัตโนมัติ .....	41
รูปที่ 4.1 อุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในการทดสอบ .....	43
รูปที่ 4.2 การจัดอุปกรณ์ต่างๆเพื่อใช้ในการทดสอบ.....	44
รูปที่ 4.3 วงจรทดสอบแบบลัดวงจรที่ตำแหน่งปลายสาย .....	46
รูปที่ 4.4 คลื่นจรรยาจากการทดสอบแบบลัดวงจรที่ตำแหน่งปลายสาย .....	47
รูปที่ 4.5.วงจรทดสอบแบบเปิดวงจรที่ตำแหน่งปลายสาย.....	49
รูปที่ 4.6 คลื่นจรรยาจากการทดสอบแบบเปิดวงจรที่ตำแหน่งปลายสาย.....	50
รูปที่ 4.7 วงจรทดสอบแบบ Terminal 50 โอห์มที่ตำแหน่งปลายสาย .....	52
รูปที่ 4.8 คลื่นจรรยาจากการทดสอบแบบ Terminal 50 โอห์มที่ตำแหน่งปลายสาย .....	53
รูปที่ 4.9 วงจรทดสอบแบบ Terminal 75 โอห์มที่ตำแหน่งปลายสาย .....	55
รูปที่ 4.10 คลื่นจรรยาจากการทดสอบแบบ Terminal 75 โอห์มที่ตำแหน่งปลายสาย .....	56
รูปที่ 4.11 วงจรทดสอบการจำลองการลัดวงจรแบบมีความต้านทาน.....	58

ภาพประกอบที่	หน้า
รูปที่ 4.12 คลื่นจรรยาจากการทดสอบการจำลองการลัดวงจรแบบมีความต้านทาน.....	59
รูปที่ 4.13 วงจรทดสอบแบบสายเคเบิล RG-11/U 75 โอห์มยาว 12.5 เมตร .....	60
รูปที่ 4.14 คลื่นจรรยาจากการทดสอบแบบสายเคเบิล RG-11/U 75 โอห์มยาว 12.5 เมตร .....	61
รูปที่ 4.15 วงจรทดสอบแบบ Terminal 50 และ 75 โอห์ม .....	63
รูปที่ 4.16 คลื่นจรรยาจากการทดสอบแบบ Terminal 50 และ 75 โอห์ม .....	64
รูปที่ 4.17 การกำหนดความเร็วของคลื่นจรรยาที่เคลื่อนที่บนสายเคเบิล และตำแหน่งผิดพ่วง.....	67
รูปที่ 4.18 การคำนวณหาตำแหน่งผิดพ่วงบนสายเคเบิลของผลทดสอบที่ 4.2.1.6 สายเคเบิล RG-11/U 75 โอห์มยาว 12.5 เมตร ที่ตำแหน่ง 99.56 เมตรจากต้นสาย .....	68
รูปที่ 4.19 การคำนวณหาตำแหน่งผิดพ่วงบนสายเคเบิลของผลทดสอบที่ 4.2.1.6 สายเคเบิล RG-11/U 75 โอห์มยาว 12.5 เมตร ที่ตำแหน่ง 199.1 เมตรจากต้นสาย .....	69
รูปที่ 4.20 การคำนวณหาอัตราส่วนของค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ ณ ตำแหน่งผิดพ่วง กรณีละเลยผล เนื่องจากการลดทอนภายในสายเคเบิลและค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งกำเนิด.....	70
รูปที่ 4.21 การคำนวณหาอัตราส่วนของค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ ณ ตำแหน่งผิดพ่วง กรณีพิจารณาผลเนื่องจากการลดทอนภายในสายเคเบิล แต่ละเลยผล เนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งกำเนิด.....	71
รูปที่ 4.22 การคำนวณหาอัตราส่วนของค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ ณ ตำแหน่งผิดพ่วง กรณีละเลยผลเนื่องจากการลดทอนภายในสายเคเบิล แต่พิจารณาผล เนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งกำเนิด.....	72
รูปที่ 4.23 การคำนวณหาอัตราส่วนของค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ ณ ตำแหน่งผิดพ่วง กรณีพิจารณาผลเนื่องจากการลดทอนภายในสายเคเบิล และค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งกำเนิด .....	73
รูปที่ 4.24 การคำนวณหาอัตราส่วนของค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ ณ ตำแหน่งผิดพ่วง ของผลทดสอบที่ 4.2.1.6 สายเคเบิล RG-11/U 75 โอห์มยาว 12.5 เมตร ที่ตำแหน่ง 199.1 เมตรจากต้นสาย.....	75
รูปที่ 4.25 การกำหนดความเร็วของคลื่นจรรยาและคำนวณหาความยาวสายเคเบิล .....	77
รูปที่ 4.26 การคำนวณหาตำแหน่งผิดพ่วงบนสายเคเบิลของผลทดสอบที่ 4.2.1.6 สายเคเบิล RG-11/U 75 โอห์มยาว 12.5 เมตร ที่ตำแหน่ง 99.56 เมตรจากต้นสาย .....	78
รูปที่ 4.27 การคำนวณหาตำแหน่งผิดพ่วงบนสายเคเบิลของผลทดสอบที่ 4.2.1.6 สายเคเบิล RG-11/U 75 โอห์มยาว 12.5 เมตร ที่ตำแหน่ง 199.1 เมตรจากต้นสาย .....	79

ภาพประกอบที่	หน้า
รูปที่ 4.28 การคำนวณหาอัตราส่วนของค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ ณ ตำแหน่งผิวดพ้อง ของผลทดสอบที่ 4.2.1.6 สายเคเบิล RG-11/U 75 โอห์มยาว 12.5 เมตร ที่ตำแหน่ง 99.56 เมตรจากต้นสาย.....	81
รูปที่ 4.29 การคำนวณหาอัตราส่วนของค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ ณ ตำแหน่งผิวดพ้อง ของผลทดสอบที่ 4.2.1.6 สายเคเบิล RG-11/U 75 โอห์มยาว 12.5 เมตร ที่ตำแหน่ง 199.1 เมตรจากต้นสาย.....	82
รูปที่ 5.1 คลื่นจรแรงดันสะท้อนกลับของสายเคเบิลที่ติดตั้งใหม่.....	86
รูปที่ 5.2 คลื่นจรแรงดันสะท้อนกลับของสายเคเบิลที่ผ่านการใช้งานไประยะเวลาหนึ่ง.....	86
รูปที่ 5.3 การตรวจวัดค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์และสัมประสิทธิ์การลดทอน ของระบบสายเคเบิล 3 เฟส .....	87
รูปที่ ก.1 การสะท้อนของคลื่นจรที่ตำแหน่ง A บนสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน .....	92
รูปที่ ก.2 สายเคเบิลแรงสูงใต้ดินที่มีการลดทอน.....	93
รูปที่ ก.3 สายเคเบิลแรงสูงใต้ดินที่ไม่มีลดทอน แต่มีอิมพีแดนซ์ของแหล่งกำเนิด .....	95
รูปที่ ก.4 สายเคเบิลแรงสูงใต้ดินที่มีการลดทอน และอิมพีแดนซ์ของแหล่งกำเนิด.....	97
รูปที่ ข.1 ส่วนของหน้าต่างโปรแกรมแบบผู้วิเคราะห์ทำการปรับตำแหน่งได้เอง .....	99
รูปที่ ข.2 ขั้นตอนการใช้งานที่ 1-2.....	100
รูปที่ ข.3 ส่วนหน้าต่างเพื่อกำหนดช่วงในการวาดกราฟ .....	100
รูปที่ ข.4 ขั้นตอนการใช้งานที่ 6-8.....	101
รูปที่ ข.5 ขั้นตอนการใช้งานที่ 9-10.....	102
รูปที่ ข.6 ขั้นตอนการใช้งานที่ 1 และ 6-9 .....	103
รูปที่ ข.7 ส่วนของหน้าต่างโปรแกรมแบบอัตโนมัติ .....	104
รูปที่ ข.8 ขั้นตอนการใช้งานที่ 7-10.....	105
รูปที่ ข.9 ขั้นตอนการใช้งานที่ 11-12.....	106
รูปที่ ค.1 สายเคเบิล RG-58A/U.....	107
รูปที่ ค.2 วงจรการหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอน.....	108
รูปที่ ค.3 คลื่นจรแรงดันสะท้อนกลับที่ได้จากกาวัดสายเคเบิลเส้นที่ 1 .....	108
รูปที่ ค.4 คลื่นจรแรงดันสะท้อนกลับที่ได้จากกาวัดสายเคเบิลเส้นที่ 2 .....	110
รูปที่ ค.5 คลื่นจรแรงดันสะท้อนกลับที่ได้จากกาวัดสายเคเบิลเส้นที่ 3 .....	110
รูปที่ ค.6 วงจรการหาค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายเคเบิล RG-58A/U .....	111

ภาพประกอบที่	หน้า
รูปที่ ค.7 คลื่นจรแรงดันสะท้อนกลับของสายเคเบิลเส้นที่ 1 ที่ปลายสายถูกต่อด้วย Terminal 50 โอห์ม .....	112
รูปที่ ค.8 คลื่นจรแรงดันสะท้อนกลับของสายเคเบิลเส้นที่ 1 ที่ปลายสายถูกต่อด้วย Terminal 75 โอห์ม .....	112
รูปที่ ค.9 คลื่นจรแรงดันสะท้อนกลับของสายเคเบิลเส้นที่ 2 ที่ปลายสายถูกต่อด้วย Terminal 50 โอห์ม .....	114
รูปที่ ค.10 คลื่นจรแรงดันสะท้อนกลับของสายเคเบิลเส้นที่ 2 ที่ปลายสายถูกต่อด้วย Terminal 75 โอห์ม .....	114
รูปที่ ค.11 คลื่นจรแรงดันสะท้อนกลับของสายเคเบิลเส้นที่ 3 ที่ปลายสายถูกต่อด้วย Terminal 50 โอห์ม .....	115
รูปที่ ค.12 คลื่นจรแรงดันสะท้อนกลับของสายเคเบิลเส้นที่ 3 ที่ปลายสายถูกต่อด้วย Terminal 75 โอห์ม .....	115
รูปที่ ค.13 วงจรสำหรับตรวจวัดค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งกำเนิดสัญญาณพัลส์แรงดัน.....	116
รูปที่ ค.14 คลื่นจรแรงดันสะท้อนกลับของสายเคเบิลเส้นที่ 1 และ 2 ต่อกัน.....	117
รูปที่ ง.1 รูปคลื่นจรแรงดันที่สะท้อนกลับจากตำแหน่งผิดพ้อง .....	118

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันนี้ความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้ามีเพิ่มมากขึ้น ทำให้จำนวนการใช้สายเคเบิลแรงสูงใต้ดินมีมากขึ้นด้วยเช่นกัน โดยสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินเหล่านี้ส่วนใหญ่มักจะใช้อ้อยู่ภายในเมือง เพราะภายในเมืองต้องการทัศนียภาพที่งดงาม และยังทำให้มีพื้นที่ในการใช้สอยเพิ่มมากขึ้นอีกด้วย สายเคเบิลแรงสูงใต้ดินที่นำมาใช้จะต้องมีคุณภาพที่ดีโดยเฉพาะการฉนวน ถ้าหากฉนวนมีการเสียหายก็จะส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า[1] อีกทั้งการซ่อมบำรุงนั้นก็ทำได้ยากเนื่องจากสายเคเบิลพวกนี้ถูกฝังอยู่ใต้ดิน ดังนั้นสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินที่จะนำมาใช้ภายในระบบจะต้องได้รับการตรวจสอบทั้งก่อนและหลังจากการติดตั้งเข้าไปในระบบ อีกทั้งเมื่อสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินที่ถูกใช้งานไปเป็นระยะเวลาอันยาวนานอาจจะมี ความเสียหายเกิดขึ้นภายในเนื้อฉนวน ซึ่งควรจะต้องได้รับการตรวจสอบและการบำรุงรักษาเพื่อความปลอดภัยของระบบไฟฟ้า

การตรวจสอบสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินที่หน้างานนั้นสามารถตรวจสอบได้ด้วยหลายวิธี เช่น วิธีรีโซแนนซ์[2-3] วิธีตรวจสอบโดยใช้แรงดันไฟฟ้าสูงกระแสตรง[4] วิธีการเหล่านี้อาจทำให้สายเคเบิลแรงสูงใต้ดินเกิดความเสียหายได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงต้องการพัฒนาออกแบบระบบตรวจสอบคุณภาพการฉนวนของสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินแบบไม่ทำลาย เพื่อมาตรวจสอบสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน อีกทั้งเมื่อสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินมีความเสียหายจริงก็จะสามารถตรวจหาตำแหน่งที่เสียหายได้ เนื่องจากตำแหน่งที่เสียหายของสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินจะมีค่าความจุไฟฟ้าผิดไปจากเดิม

### 1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อการพัฒนาออกแบบระบบตรวจสอบคุณภาพการฉนวนแบบไม่ทำลายของสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน โดยอาศัยหลักการการสะท้อนของคลื่นจรบนสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน

### 1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

ขอบเขตในการทำวิทยานิพนธ์เรื่องนี้ เพื่อที่จะศึกษาและพัฒนาระบบตรวจสอบคุณภาพการฉนวนแบบไม่ทำลายของสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินด้วยวิธีการคลื่นจร เพื่อตรวจสอบสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินก่อนการนำไปใช้งาน หรือเมื่อขณะใช้งานผ่านไปช่วงระยะเวลาหนึ่ง โดยต้องปลดสายออกจากระบบ และมีเงื่อนไขในการทดสอบดังต่อไปนี้



- ใช้สายสัญญาณชนิดแกนเดี่ยว(coaxial) รุ่น RG-58A/U จำนวน 3 เส้น ยาวเส้น  
ละประมาณ 100 เมตรในการทดสอบ เพื่อแทนระบบของสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินยาว 300 เมตร

- ตำแหน่งติดตั้งบนสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน ในการทดสอบที่ใช้สายเคเบิล RG-  
58A/U นี้ จะถูกแทนที่ด้วยหัวต่อสายและสายเคเบิลแบบต่างๆ ซึ่งประกอบไปด้วย Terminal 50  
กับ 75 โอห์ม สายเคเบิลเจาะรูและบรรจุด้วยสำลีชุบน้ำ และสายเคเบิล RG-11/U 75 โอห์ม

ระบบตรวจสอบคุณภาพการฉนวนแบบไม่ทำลายของสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินด้วยวิธีการ  
คลื่นจร ประกอบไปด้วย 3 ส่วนหลักดังนี้

1. ส่วนแหล่งกำเนิดสัญญาณพัลส์ เพื่อเป็นแหล่งจ่ายสัญญาณคลื่นจรแรงดัน  
ให้กับสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน

2. ส่วนรับสัญญาณ ใช้ดิจิตอลออสซิลโลสโคป เพื่อตรวจจับสัญญาณของคลื่นจร  
แรงดันสะท้อนกลับที่เกิดขึ้น

3. ส่วนประมวลผล ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อประมวลผลหาตำแหน่งติดตั้ง  
และอัตราส่วนของค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ ณ ตำแหน่งติดตั้งของสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน

ส่วนที่ 1 กับ 3 เป็นส่วนที่จะจัดทำขึ้น และส่วนที่ 2 นั้น จะใช้ดิจิตอลออสซิลโลสโคปที่มีอยู่  
แล้วในห้องปฏิบัติการ

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ปัจจุบันสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินมีการนำมาใช้เพิ่มมากขึ้น ดังนั้นสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินที่  
นำมาใช้จะต้องทำการตรวจสอบก่อนการนำไปติดตั้ง ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจสอบอยู่ในขณะนี้  
ยังเป็นเพียงอุปกรณ์ที่วัดเพียงค่าความต้านทานของฉนวนเท่านั้น ดังนั้นอาจจะทำให้ผลการ  
ตรวจสอบนั้นไม่ละเอียดเพียงพอ ดังนั้นเครื่องมือวิเคราะห์ที่ทำการทำขึ้นนี้ จะช่วยในการตรวจสอบสาย  
เคเบิลแรงสูงใต้ดินได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น อีกทั้งถ้าสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินมีความผิดปกติ  
อยู่ ก็จะสามารถตรวจหาตำแหน่งที่ผิดปกติได้อีกด้วย

## บทที่ 2

### หลักการ และทฤษฎีการเคลื่อนที่ของคลื่นจรบนสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน

บทนี้ จะกล่าวถึงหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของคลื่นจรบนสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน การสะท้อน และการส่งผ่านของคลื่นจรในรูปแบบต่างๆ เพื่อเป็นพื้นฐานในการวิเคราะห์ และพัฒนาระบบตรวจสอบคุณภาพการฉนวนแบบไม่ทำลายของสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน ด้วยวิธีการเคลื่อนจร

ระบบตรวจสอบสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินที่จะทำการศึกษาและพัฒนาขึ้นนี้ จะอาศัยหลักการและทฤษฎีของคลื่นจรบนสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน เนื่องจากสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินเมื่อมีความเสียหายเกิดขึ้น ไม่ว่าจะมีความเสียหายที่เกิดจากการผลิต หรือจะเป็นความเสียหายที่เกิดจากการขนส่งไปยังตำแหน่งที่ติดตั้งก็ตาม ความผิดพลาดที่ส่งผลเสียหายแก่สายเคเบิลแรงสูงใต้ดินเหล่านี้ จะส่งผลกระทบต่อฉนวนของสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินเป็นส่วนใหญ่ และเนื่องจากความเสียหายของฉนวนนี้เองที่ทำให้ค่าความจุไฟฟ้าของสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินนั้นมีค่าผิดไปจากเดิม จึงทำให้เกิดความไม่เข้ากัน(mismatch)ของค่าเสรีจิมพีแดนซ์ของสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน ดังนั้นเราสามารถให้หลักการสะท้อนของคลื่นจรเพื่อนำมาตรวจสอบคุณภาพการฉนวนของสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินได้

#### 2.1 สายเคเบิลแรงสูง

สายเคเบิลที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบันมีหลายประเภท ขึ้นกับลักษณะของงานที่จะนำไปใช้ โดยสายเคเบิลในระดับแรงดันสูงนิยมใช้อยู่ 2 ชนิด ดังนี้ [5]

1. สายเคเบิลฉนวนกระดาษบรรจุด้วยน้ำมัน (Paper insulated, Oil-filled cable)
2. สายเคเบิลฉนวนแข็ง (Solid dielectric cable)

##### 2.1.1 ชนิดของสายเคเบิลแรงสูง

###### 2.1.1.1 สายเคเบิลฉนวนกระดาษบรรจุด้วยน้ำมัน (Paper insulated, Oil-filled cable)

สายเคเบิลฉนวนกระดาษบรรจุด้วยน้ำมัน โดยทั่วไปจะใช้กับขนาดแรงดันระดับกลาง เช่น 24 กิโลโวลต์, 33 กิโลโวลต์ เป็นต้น สายเคเบิลประเภทนี้จะประกอบไปด้วย แกนตัวนำ(conductor)ที่ทำด้วยทองแดงหรืออลูมิเนียมทั้งหมด 3 แกน ชั้นของฉนวน(insulation)จะประกอบด้วยกระดาษชุบน้ำมัน(Impregnated paper) และยังมีส่วนประกอบอื่นๆอีก เช่น ส่วนประกอบที่ป้องกันตัวนำ(conductor shield) ส่วนประกอบที่ป้องกันฉนวน(insulation shield) ปลายตะกั่ว เป็นต้น ส่วนนอกสุดของเคเบิลจะเป็นวัสดุที่ทำด้วยสารโพลีเอทิลีน เช่น โพลีเอทิลีน(Polyethylene),

โพลีไวนิลคลอไรด์(PVC) เป็นต้น ลักษณะตัวอย่างของสายเคเบิลชนิดนี้แสดงได้ดังรูปที่ 2.1 และรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.1 Paper-Insulated Lead-Covered Cables (PILC) [6]



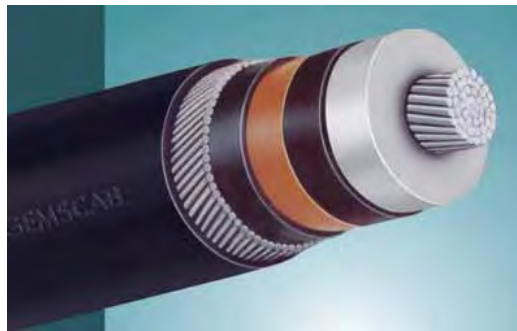
รูปที่ 2.2 Self Contained Liquid-Filled Cables (SCLF) [6]

#### 2.1.1.2 สายเคเบิลฉนวนแข็ง (Solid dielectric cable)

สายเคเบิลฉนวนแข็ง โดยทั่วไปจะใช้กับระดับแรงดันสูง 115 กิโลโวลต์ 69 กิโลโวลต์ และระดับแรงดันปานกลาง 12 - 33 กิโลโวลต์ รวมถึงในระบบแรงดันต่ำก็ใช้สายเคเบิลประเภทนี้ด้วยเช่นกัน สายเคเบิลฉนวนแข็งนี้ ชั้นของฉนวนจะทำมาจากสารจำพวกโพลีเมอร์ เช่น โพลีเอทธีลีน(PE) คลอสลิงโพลีเอทธีลีน(XLPE) เป็นต้น ลักษณะของสายเคเบิลชนิดนี้แสดงได้ดังรูปที่ 2.3 และ รูปที่ 2.4

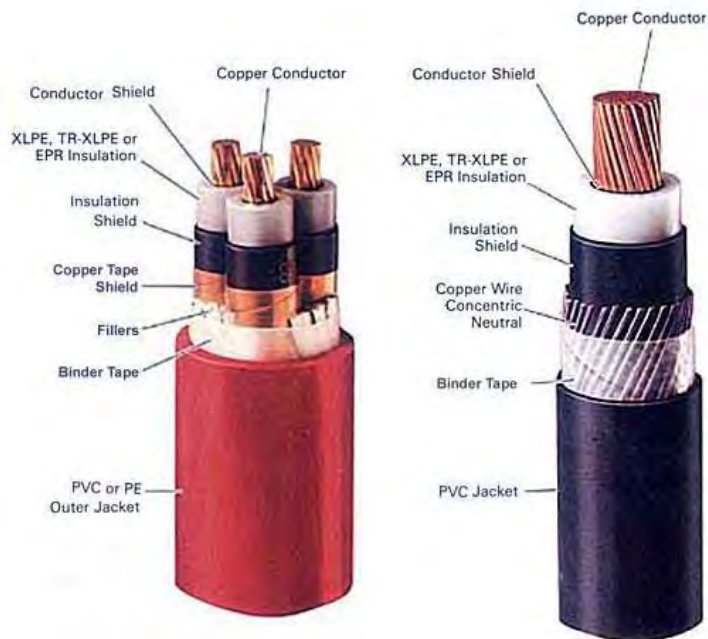


รูปที่ 2.3 Three-core, XLPE insulated cables [6]



รูปที่ 2.4 Single-core, XLPE insulated cables [6]

### 2.1.2 โครงสร้างของสายเคเบิลแรงสูง



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของสายเคเบิลฉนวนแข็งแบบ 3 แกน และ 1 แกน [6]

โครงสร้างของสายเคเบิลแรงสูง สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนหลัก แสดงได้ดังรูปที่ 2.5

1. โครงสร้างหลัก
2. โครงสร้างรอง

#### 2.1.2.1 โครงสร้างหลัก

โครงสร้างส่วนนี้เป็นส่วนประกอบที่มีความสำคัญที่สุดสำหรับสายเคเบิล โดยคุณภาพของสายเคเบิลจะดีมาน้อยเพียงใด ก็ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุที่นำมาทำโครงสร้างส่วนนี้ โครงสร้างหลักจะประกอบไปด้วย

##### 2.1.2.1.1 ตัวนำ (Conductor)

เป็นส่วนที่ทำหน้าที่ให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน โดยส่วนใหญ่มักนำทองแดงหรืออลูมิเนียมมาใช้ ซึ่งจะมีทั้งสายตัวนำแบบเส้นเดียว สายตัวนำแบบตีเกลียว หรือสายตัวนำแบบแบ่งเป็นเซกเมนต์ จากรูปที่ 2.5 เป็นลักษณะของสายตัวนำแกนเดี่ยว(รูปขวา) กับสายตัวนำสามแกน(รูปซ้าย)

##### 2.1.2.1.2 เครื่องป้องกันตัวนำ (Conductor Shield)

เป็นส่วนห่อหุ้มชั้นแรกของตัวนำ สารที่นำมาใช้จะเป็นสารกึ่งตัวนำ เพื่อที่จะช่วยลดความเค้นเนื่องจากความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดจากตัวนำ ซึ่งเกิดขึ้นระหว่างตัวนำและฉนวน ถ้าเป็นสายที่มีขนาดใหญ่จะมีร่องที่เกิดขึ้นจากสายตีเกลียว จึงต้องมีการพันเทปที่ทำจากสารกึ่งตัวนำนี้เพื่อป้องกันฉนวนไหลเข้าไปในร่อง ซึ่งจะมีผลต่อการควบคุมรูปทรงของฉนวน

##### 2.1.2.1.3 ฉนวน (Insulation)

เป็นส่วนประกอบที่สำคัญของสายเคเบิลแรงสูง ทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้กระแสไฟฟ้าไหลไปส่วนที่ไม่ต้องการ โดยในส่วนของฉนวนนี้จะต้องไม่มีสารใดๆเจือปน ไม่มีการเจาะทะลุ รอยร้าว รอยแตก หรือการผิรูปร่างของฉนวน เพราะจะเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดความเสียหายของสายเคเบิลขึ้นได้ในขณะใช้งานจริง ในปัจจุบันฉนวนที่นำมาใช้นี้จะเป็นโพลีเมอร์ประเภท คลอสลิงโพลีเอทิลีน(XLPE) ซึ่งจะช่วยเพิ่มความสามารถในการรับกระแสของสายเคเบิล และมีความแข็งแรงมากขึ้นกว่าสายเคเบิลที่เป็นโพลีเอทิลีน(PE)

##### 2.1.2.1.4 เครื่องป้องกันฉนวน (Insulation Shield)

เป็นส่วนห่อหุ้มชั้นแรกของฉนวน สารที่นำมาใช้จะเป็นสารกึ่งตัวนำ เพื่อทำให้ความเค้นที่เกิดขึ้นบนฉนวนมีความสม่ำเสมอมากขึ้น และยังช่วยเพิ่มความสามารถในการรับแรงดันไฟฟ้าได้สูงขึ้นด้วย

### 2.1.2.2 โครงสร้างรอง

เป็นส่วนที่ช่วยป้องกันความเสียหายต่างๆ ที่อาจจะเกิดกับสายเคเบิลไม่ว่าจะเป็นความเสียหายทางไฟฟ้าหรือทางกล โครงสร้างนี้จะประกอบด้วยส่วนใดบ้างขึ้นอยู่กับประเภทของงานที่จะนำไปใช้

#### 2.1.2.2.1 Copper shield tape

ทำหน้าที่ซีลด์ โดยเชื่อมต่อกับสายดิน โดยสายเคเบิลบางชนิดจะเป็นเทปทองแดง บางชนิดจะเป็นลวดเส้นเล็กพันห่่างๆ แล้วเชื่อมต่อกันด้วย copper contact tape ซึ่งการพันด้วยลวดเส้นเล็กนี้ จะช่วยเพิ่มพื้นที่หน้าตัดหรือลดความต้านทานลงในส่วนนี้ อีกประการหนึ่งที่สำคัญคือ โครงสร้างในส่วนนี้จะมีผลต่อขนาดของกระแสฟอลต์ โดยถ้าพื้นที่หน้าตัดน้อย กระแสฟอลต์จะน้อย แต่ถ้าพื้นที่หน้าตัดมากกระแสฟอลต์จะมากด้วย

#### 2.1.2.2.2 เปลือกหุ้ม (Jacket)

เป็นส่วนประกอบที่อยู่ด้านนอกสุดของสายเคเบิล โดยส่วนมากจะทำมาจากโพลีเอทเธอร์ประเภท โพลีไวนิลคลอไรด์(PVC) หรือโพลีเอทธีลีน(PE) แล้วแต่ความเหมาะสมของงานที่จะนำไปใช้ อีกทั้งลักษณะของผิวยังไม่จำเป็นต้องเรียบเสมอไป ซึ่งผิวนอกอาจจะเป็นลักษณะของลูกฟูกก็ได้ ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 สายเคเบิลที่มีผิวนอกเป็นลักษณะของลูกฟูก [6]

#### 2.1.2.2.3 เทปป้องกันน้ำ (Water blocking tape)

โครงสร้างนี้เป็นโครงสร้างที่ใช้สำหรับงานเฉพาะอย่าง โดยชั้นของเทปป้องกันน้ำนี้จะวางอยู่ระหว่างชั้น Copper shield กับ Insulation shield ซึ่งทำหน้าที่ในการดูดซับน้ำและป้องกันไม่ให้น้ำซึมผ่านเข้ามายังฉนวนได้

#### 2.1.2.2.4 Bender tape

เป็นโครงสร้างที่ใช้สำหรับงานเฉพาะอย่าง จะอยู่ถัดจาก Copper shield ซึ่งทำหน้าที่ป้องกันน้ำอีกชั้นหนึ่ง

#### 2.1.2.2.5 เทปอลูมิเนียม (Aluminum tape)

เป็นโครงสร้างที่ใช้กับงานเฉพาะอย่าง จะอยู่ถัดจาก Bender tape มีหน้าที่ป้องกันความชื้น โดยเมื่อเปลือกหุ้มเกิดความเสียหาย Aluminum tape นี้จะเป็นส่วนแรกที่ทำกำบังป้องกันความชื้นไม่ให้เข้ามาในสายเคเบิล

### 2.1.3 อุปกรณ์เชื่อมต่อสายเคเบิล

สายเคเบิลที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน จะถูกเชื่อมต่อเข้าด้วยกันด้วยอุปกรณ์เชื่อมต่อสายเคเบิล ซึ่งมีอยู่หลักๆ 2 ประเภท คือ

1. หัวต่อสายเคเบิลกับสายเคเบิล แสดงได้ดังรูปที่ 2.7
2. หัวต่อสายเคเบิลกับอุปกรณ์อื่นๆ แสดงได้ดังรูปที่ 2.8

#### 2.1.3.1 หัวต่อสายเคเบิลกับสายเคเบิล (Splicing)

หัวต่อสายจะถูกวางฝังไว้ใต้ดิน ดังนั้นหัวต่อจะต้องมีความมั่นคงแข็งแรงและสามารถนำไฟฟ้าได้ดี ที่สำคัญอีกประการหนึ่งคือต้องสามารถป้องกันความชื้นได้ โดยการเชื่อมต่อสายเคเบิลด้วยหัวต่อสายนี้จะทำอยู่ภายในบ่อพัก (Manhole หรือ Handhole) ลักษณะการต่อสายมีดังนี้

##### 2.1.3.1.1 แบบ Slip On Type

การต่อสายเคเบิลแบบนี้ จะต้องสวมปลอก (Slip) เข้ากับสายเคเบิลให้เรียบร้อยก่อนที่จะต่อสายเคเบิลเข้าด้วยกัน โดยใช้หัวต่อชนิดบีบอัด และยังมีข้อจำกัดคือ แต่ละรุ่นจะใช้ได้เฉพาะขนาดสายนั้นๆ ซึ่งต้องมีขนาดฉนวนเหมาะสมพอดี

##### 2.1.3.1.2 แบบ Cold Shrink Type

เป็นชุดต่อสายสำเร็จรูป โดยในหนึ่งรุ่นสามารถใช้กับสายเคเบิลได้หลายขนาด สามารถป้องกันความชื้น ป้องกันน้ำ ป้องกันความเสียหายทางกล และสารเคมีได้ อีกทั้งยังมีขั้นตอนการติดตั้งที่ไม่ซับซ้อน ไม่ต้องใช้เครื่องมือความร้อน ซึ่งทำให้มีความปลอดภัยกับผู้ปฏิบัติงาน และสามารถติดตั้งในบริเวณที่แคบๆได้

##### 2.1.3.1.3 แบบ Heat Shrink Type

เป็นชุดต่อสายที่เป็นชิ้นส่วน ในหนึ่งรุ่นสามารถใช้กับสายเคเบิลได้หลายขนาด แต่มีข้อเสียคือต้องใช้เครื่องมือเป่าไฟและความร้อนซึ่งอาจเป็นอันตรายกับผู้ปฏิบัติงานได้

ดังนั้นผู้ติดตั้งต้องใช้ความเชี่ยวชาญมากในการเป่าไฟเพื่อให้การหดสม่ำเสมอ อีกทั้งยังมีชิ้นส่วนที่ต้องประกอบกันหลายชิ้นและหลายขั้นตอนอีกด้วย



รูปที่ 2.7 หัวต่อสายเคเบิลกับสายเคเบิล [7]

#### 2.1.3.2 หัวต่อสายเคเบิลกับอุปกรณ์อื่นๆ

หัวต่อสายเคเบิลกับอุปกรณ์อื่นๆ มีหน้าที่และคุณสมบัติเป็นจุดต่อปลายสายของตัวนำ(Connection of Conductor) ควบคุมความเข้มสนามไฟฟ้า(Controlling Electric Field) ป้องกันสายเคเบิลจากสภาพแวดล้อมรอบข้าง(Protection from Environment) ปกป้องฉนวนสายเคเบิลจากรังสีอุลตราไวโอเล็ต(UV Protection) และเป็นฉนวนกันกับศักย์ไฟฟ้าดิน(Insulation from Earthed Parts) มี 4 ชนิด ดังนี้

##### 2.1.3.2.1 แบบ Porcelain Type

เป็นหัวต่อสายเคเบิลสำเร็จรูป ในหนึ่งรุ่นสามารถใช้ได้กับสายหลายขนาด มีคุณสมบัติป้องกันความชื้นและน้ำด้วยน้ำยาหล่อ(Compound) ที่บรรจุอยู่ภายใน อีกทั้งยังทนต่อสภาพแวดล้อมที่เลวได้ดี แต่ข้อเสียคือ มีขนาดใหญ่และน้ำหนักมาก จึงต้องระวังในการติดตั้งเพราะอาจตกแตกได้

##### 2.1.3.2.2 แบบ Slip On Type

เป็นหัวต่อสายเคเบิลสำเร็จรูปหรือเป็นชิ้นส่วน สามารถติดตั้งได้เร็ว แต่มีข้อเสียคือ ต้องใช้แรงในการดันหัวต่อสายเคเบิล โดยแต่ละรุ่นจะใช้ได้เฉพาะขนาดสายนั้น ซึ่งต้องมีขนาดฉนวนเหมาะสมพอดี มิฉะนั้นจะเกิดช่องอากาศภายใน แล้วส่งผลให้เกิดความเสียหายขึ้นได้ อีกทั้งยังมีชิ้นส่วนประกอบหลายชิ้น เช่น อุปกรณ์ควบคุมความเครียด ผิวฉนวน ปีกฉนวน เป็นต้น

##### 2.1.3.2.3 แบบ Cold Shrink Type

เป็นหัวต่อสายเคเบิลสำเร็จรูป โดยในหนึ่งรุ่นสามารถใช้กับสายเคเบิลได้หลายขนาด สามารถป้องกันความชื้น ป้องกันน้ำ ป้องกันความเสียหายทางกลและสารเคมีได้ และ



ยังมีขั้นตอนการติดตั้งที่ไม่ซับซ้อน ไม่ต้องใช้เครื่องมือไฟฟ้า ทำให้ปลอดภัยกับผู้ปฏิบัติงานและใช้เวลาน้อยในการปฏิบัติงาน

#### 2.1.3.2.4 แบบ Heat Shrink Type

เป็นหัวต่อสายที่เป็นชิ้นส่วน โดยในหนึ่งรุ่นใช้กับสายเคเบิลได้หลายขนาด แต่ข้อเสียคือต้องใช้เครื่องมือไฟฟ้าและความร้อนซึ่งอาจเป็นอันตรายกับผู้ปฏิบัติงานได้ ซึ่งต้องใช้ความเชี่ยวชาญมากในการเป่าไฟเพื่อให้การหดสม่าเสมอ อีกทั้งยังมีชิ้นส่วนที่ต้องประกอบกันหลายชิ้นส่วนและหลายขั้นตอนอีกด้วย



รูปที่ 2.8 หัวต่อสายเคเบิลกับอุปกรณ์อื่นๆ [8]

## 2.2 วงจรสมมูลของสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน [9]

สายเคเบิลแรงสูงใต้ดินที่ใช้อยู่ในปัจจุบันนั้น เป็นสายส่งที่มีความยาวมาก จึงไม่สามารถพิจารณาสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินในแบบวงจรสมมูลแบบก้อนได้ ดังนั้นเราจะมองสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินในแบบวงจรสมมูลแบบกระจาย ซึ่งประกอบด้วย ความต้านทาน ความเหนี่ยวนำ ความนำไฟฟ้า และตัวเก็บประจุ

เนื่องจากความยาวของสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน เมื่อทำการเปรียบเทียบกับความยาวคลื่นแล้ว ความยาวของสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินมากกว่าความยาวคลื่น เราจะมองเห็นคลื่นแรงดันหรือกระแสเป็นคลื่นจรที่วิ่งจากแหล่งกำเนิดทางต้นสายไปยังปลายสายอีกข้างหนึ่งของสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน ซึ่งแหล่งจ่ายแรงดันเปรียบเทียบกับที่เก็บกักน้ำ สายเคเบิลแรงสูงใต้ดินเปรียบเทียบกับท่อน้ำที่มีความยาวมาก ดังนั้นเมื่อเปิดวาล์วน้ำ น้ำที่เก็บกักไว้ภายในแหล่งเก็บกักน้ำ ก็จะเริ่มไหลจากปลายท่อด้านหนึ่งไปยังปลายท่ออีกด้านหนึ่ง โดยการเคลื่อนที่ของน้ำนี้ก็จะต้องใช้เวลาในการเคลื่อนที่จากแหล่งเก็บกักน้ำไปยังปลายท่อ ก็เปรียบเทียบกับเมื่อสับสวิตช์เพื่อเชื่อมต่อแหล่งจ่ายแรงดันเข้ากับสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน คือเมื่อเริ่มสับสวิตช์แรงดันก็จะจ่าย

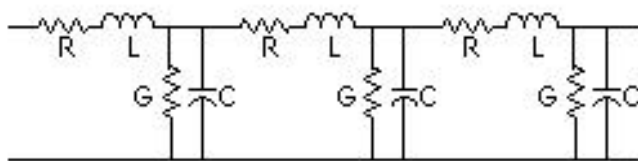
ออกจากแหล่งจ่ายแรงดัน แล้วเคลื่อนที่จากปลายสายด้านหนึ่งไปยังปลายสายอีกด้านหนึ่ง โดยการเคลื่อนที่ของแรงดันนี้ก็ต้องอาศัยช่วงเวลาในการเดินทางเช่นกัน โดยการเดินทางของแรงดันไปตามสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินนี้ ก็คือคลื่นจรที่เคลื่อนที่อยู่บนสายเคเบิลดังกล่าว

สายเคเบิลแรงสูงใต้ดินสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆคือ

1. สายเคเบิลแรงสูงใต้ดินแบบมีการสูญเสีย (Lossy Transmission Lines)
2. สายเคเบิลแรงสูงใต้ดินแบบไม่มีการสูญเสีย (Lossless Transmission Lines)

### 2.2.1 สายเคเบิลแรงสูงใต้ดินแบบมีการสูญเสีย (Lossy transmission lines)

วงจรสมมูลของสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินแบบมีการสูญเสียนั้นจะประกอบด้วย 4 องค์ประกอบหลักดังที่ได้กล่าวมาแล้ว คือ ความต้านทาน ความเหนี่ยวนำ ความนำไฟฟ้า และตัวเก็บประจุ ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 วงจรสมมูลของสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินแบบมีการสูญเสีย

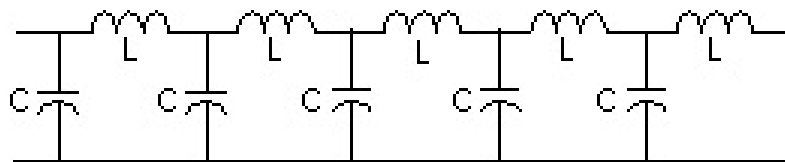
ค่าเสรีจิมพีแดนซ์หรืออิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน (Surge impedance หรือ Characteristic impedance,  $Z_0$ ) ของสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินนั้นสามารถหาได้จาก อัตราส่วนของคลื่นจรแรงดันต่อคลื่นจรกระแส หรืออาจหาได้จากค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลของสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินดังสมการที่ (2.1)

$$Z_0 = \frac{V}{I} = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad (2.1)$$

สำหรับคลื่นจรที่มีความถี่สูง เช่น สัญญาณพัลส์ความถี่สูง จะส่งผลให้พจน์  $j\omega L \gg R$  และพจน์  $j\omega C \gg G$  ดังนั้นค่าเสรีจิมพีแดนซ์ของสายเคเบิลนั้นๆ จะสามารถประมาณได้เท่ากับ  $Z_0 = \frac{L}{C}$

## 2.2.2 สายเคเบิลแรงสูงใต้ดินแบบไม่มีการสูญเสีย (Lossless transmission lines)

เนื่องจากสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินแบบไม่มีการสูญเสียนี้ สามารถละเลยผลของการสูญเสียเนื่องจากความต้านทาน และความสามารถนำไฟฟ้าได้ ดังนั้นวงจรสมมูลของสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินแบบไม่มีการสูญเสียจึงเป็นดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 วงจรสมมูลของสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินแบบไม่มีการสูญเสีย

จากรูปวงจรสมมูล เราสามารถหาค่าเสรีจิมพีแดนซ์หรืออิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน ( $Z_0$ ) ได้จากสมการที่ (2.2)

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2.2)$$

$Z_0$  = เสรีจิมพีแดนซ์ของสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน หน่วย โอห์ม ( $\Omega$ )

$R$  = ความต้านทานของสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินต่อหน่วยความยาว หน่วย  $\Omega/m$

$L$  = ความเหนี่ยวนำของสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินต่อหน่วยความยาว หน่วย H/m

$G$  = ความนำไฟฟ้าของสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินต่อหน่วยความยาว หน่วย S/m

$C$  = ความจุไฟฟ้าของสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินต่อหน่วยความยาว หน่วย F/m

## 2.3 ความเร็วคลื่นจรบนสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน

ความเร็วของคลื่นจรบนสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินนั้น จะขึ้นอยู่กับค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของวัสดุที่นำมาทำเป็นฉนวนของสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน โดยค่าความเร็วของคลื่นจรจะเป็นอัตราส่วนของความเร็วคลื่นแสงในอากาศ ( $3 \times 10^8$  เมตรต่อวินาที) ต่อค่ารากที่สองของค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของฉนวน และยังมีความสัมพันธ์กับค่าพารามิเตอร์ความเหนี่ยวนำ กับค่าความจุไฟฟ้าของสายเคเบิลดังสมการที่ (2.3)

$$v = \frac{3 \times 10^8}{\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2.3)$$

$v$  = ความเร็วในการเคลื่อนที่ของคลื่นจรวบนสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน หน่วย m/s

$\epsilon_r$  = ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของฉนวนของสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน

ความเร็วของคลื่นจรวที่คลื่นที่บนสายเคเบิลที่มีฉนวนแตกต่างกัน สามารถแสดงตัวอย่างได้ดังตารางที่ 2.1 [10]

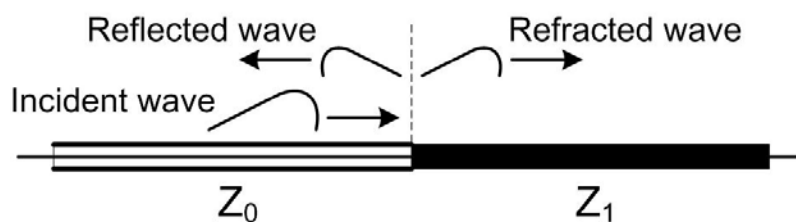
ตารางที่ 2.1 ความเร็วของคลื่นจรวที่เคลื่อนที่บนสายเคเบิลที่มีฉนวนแตกต่างกัน

ชนิดของฉนวน	ความเร็วของคลื่นจรว (m/ $\mu$ sec)
พอลิเอทิลีน(PE)	ประมาณ 200
คลอสลิงพอลิเอทิลีน(XLPE)	156-174

## 2.4 การสะท้อน และการส่งผ่านของคลื่นจรว

เมื่อคลื่นจรวเคลื่อนที่มาตามสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน จนมากระทบกับตำแหน่งผิดพ้องของสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน ซึ่ง ณ ตำแหน่งนี้จะเป็นตำแหน่งที่มีความไม่เข้ากันของค่าเสรีจิมพีแดนซ์ (mismatch) ภายในสายเคเบิล จึงทำให้เกิดการสะท้อน และการส่งผ่านของคลื่นจรว ณ ตำแหน่งผิดพ้องนั้น ความไม่เข้ากันของค่าเสรีจิมพีแดนซ์ที่เกิดขึ้นนี้อาจเกิดจากสาเหตุต่างๆ เช่น การลัดวงจรที่ปลายสาย การเปิดวงจรที่ปลายสาย การไม่ได้ศูนย์กลางของแกนตัวนำ การขาดความต่อเนื่องของชั้นชีลด์ฉนวนหรือชีลด์ตัวนำ ตำแหน่งเชื่อมต่อของสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินที่ทำการเชื่อมต่อไว้ไม่ดี ฉนวนของสายเคเบิลเสื่อมสภาพไปบางจุด และอื่นๆ

คลื่นจรวแรงดันหรือคลื่นจรวกระแสที่วิ่งมากระทบกับตำแหน่งผิดพ้องจะเรียกว่า คลื่นตกกระทบ (incident wave) คลื่นจรวที่สะท้อนกลับไปยังสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินเส้นเดิมจะเรียกว่า คลื่นสะท้อน (reflected wave) และคลื่นจรวที่เคลื่อนที่ผ่านไปยังส่วนถัดไปของสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินจะเรียกว่า คลื่นส่งผ่าน (refracted wave หรือ transmitted wave)



รูปที่ 2.11 ชนิดของคลื่นจรที่ตำแหน่งที่มีความไม่เข้ากันของค่าเสรีจิมพีแดนซ์

จากรูปที่ 2.11 เมื่อคลื่นจรแรงดัน เดินทางมาตามสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน(ค่าเสรีจิมพีแดนซ์เท่ากับ  $Z_0$ ) เมื่อมาถึงจุดที่มีค่าอิมพีแดนซ์( $Z_1$ ) ณ ตำแหน่งนี้จะเป็นตำแหน่งที่เกิดความไม่เข้ากัน ซึ่งจะทำให้เกิดการสะท้อนและการส่งผ่านเกิดขึ้น โดยจะมีค่าคงที่การสะท้อน(reflection coefficient) และค่าคงที่การส่งผ่าน(refraction coefficient) ดังสมการที่ (2.4) และ (2.5) ตามลำดับ

$$\text{reflection coefficient } (\rho) = \frac{Z_1 - Z_0}{Z_1 + Z_0} \quad (2.4)$$

$$\text{refraction coefficient } (\alpha) = 1 + \rho = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_0} \quad (2.5)$$

## 2.5 พฤติกรรมของคลื่นจรบนสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินที่ตำแหน่งปลายสาย

การเคลื่อนที่ของคลื่นจรบนสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินนั้น เมื่อคลื่นจรเคลื่อนที่มายังตำแหน่งปลายสายก็จะเกิดการสะท้อน และการส่งผ่านของคลื่นจรเกิดขึ้น โดยที่ตำแหน่งปลายสายอาจจะลัดวงจร เปิดวงจร หรือต่ออยู่กับค่าอิมพีแดนซ์ต่างๆก็ได้ ซึ่งลักษณะที่ปลายสายที่แตกต่างกันก็จะให้ลักษณะของคลื่นจรที่สะท้อน และที่ส่งผ่านออกมาแตกต่างกันด้วย

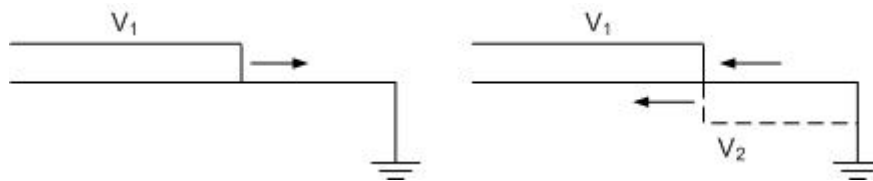
ลักษณะที่ปลายสายแบ่งพิจารณาเป็น 3 แบบดังนี้

1. ลัดวงจร (Short circuit)
2. เปิดวงจร (Open circuit)
3. อิมพีแดนซ์ขนาดต่างๆ

## 2.5.1 พฤติกรรมของคลื่นจรบนสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินที่ตำแหน่งปลายสายแบบต่าง ๆ [9]

### 2.5.1.1 ลัดวงจร (Short circuit)

ที่ตำแหน่งปลายสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินจะถูกลัดวงจรลงสู่ดิน โดยลักษณะของคลื่นจรที่สะท้อนที่ตำแหน่งปลายสายสามารถแสดงได้ดังนี้



รูปที่ 2.12 การสะท้อนของคลื่นจรแรงดันจากปลายสายแบบลัดวงจร

จากรูปที่ 2.12 เมื่อคลื่นจรแรงดันขนาด  $V_1$  ขั้วบวกเคลื่อนที่จากต้นสายไปยังปลายสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน จะเกิดการสะท้อนที่ปลายสายกลับมาตามสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน โดยมีขนาด  $V_2$  ขั้วลบ

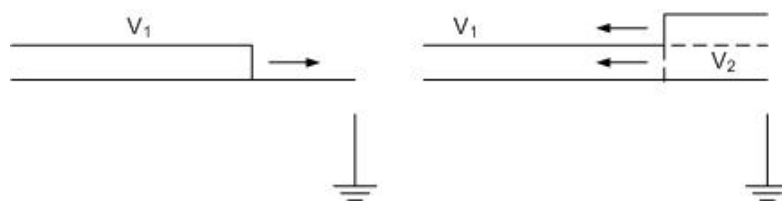
กำหนดให้สายเคเบิลแรงสูงใต้ดินมีค่าเสรีจิมพีแดนซ์เป็น  $Z_0$  และที่ปลายสายลัดวงจรจะมีค่าอิมพีแดนซ์เป็น 0 ดังนั้นจะได้ค่าคงที่การสะท้อนดังสมการที่ (2.6)

$$\text{reflection coefficient } (\rho) = \frac{0 - Z_0}{0 + Z_0} = -1 \quad (2.6)$$

เราจะได้ขนาดของคลื่นจรแรงดันที่สะท้อนกลับมายังสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินคือ  $V_2 = -V_1$  เพราะฉะนั้นคลื่นจรแรงดันรวมภายในสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินขณะที่สะท้อนกลับมาจึงเป็นดังรูปที่ 2.12 (คลื่นจรแรงดันรวมบนสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินมีขนาดเป็น 0)

### 2.5.1.2 เปิดวงจร (Open circuit)

ที่ตำแหน่งปลายสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินจะถูกเปิดวงจรอยู่ โดยลักษณะของคลื่นจรที่สะท้อนที่ตำแหน่งปลายสายสามารถแสดงได้ดังนี้



รูปที่ 2.13 การสะท้อนของคลื่นจรแรงดันจากปลายสายแบบเปิดวงจร

จากรูปที่ 2.13 เมื่อคลื่นจรแรงดันขนาด  $V_1$  ขั้วบวกเคลื่อนที่จากต้นสายไปยังปลายสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน จะเกิดการสะท้อนที่ปลายสายกลับมาตามสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน โดยมีขนาด  $V_2$  ขั้วบวก

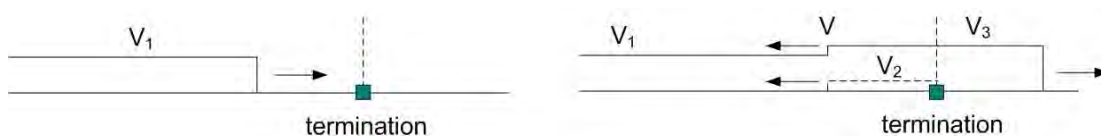
กำหนดให้สายเคเบิลแรงสูงใต้ดินมีค่าเสรีจิมพีแดนซ์เป็น  $Z_0$  และที่ปลายสายเปิดวงจรจะมีค่าอิมพีแดนซ์เป็น  $\infty$  ดังนั้นจะได้ค่าคงที่การสะท้อนดังสมการที่ (2.7)

$$\text{reflection coefficient } (\rho) = \frac{\infty - Z_0}{\infty + Z_0} = 1 \quad (2.7)$$

เราจะได้ขนาดของคลื่นจรแรงดันที่สะท้อนกลับมายังสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินคือ  $V_2 = V_1$  เพราะฉะนั้นคลื่นจรแรงดันรวมภายในสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินขณะที่สะท้อนกลับมาจึงเป็นดังรูปที่ 2.13 (คลื่นจรแรงดันมีขนาดเป็น  $2V_1$ )

### 2.5.1.3 อิมพีแดนซ์ขนาดต่างๆ

ที่ตำแหน่งปลายสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินจะถูกต่อกับอิมพีแดนซ์ขนาดต่างๆ ซึ่งอาจจะเป็นสายเคเบิลที่มีค่าอิมพีแดนซ์แตกต่างออกไปจากเดิม หรืออาจเกิดจากการที่ปลายสายลัดวงจรผ่านความต้านทานค่าต่างๆ โดยลักษณะของคลื่นจรที่สะท้อนที่ปลายสายสามารถแสดงได้ดังนี้



รูปที่ 2.14 การสะท้อนของคลื่นจรแรงดันจากปลายสายแบบค่าอิมพีแดนซ์ขนาดต่างๆ

จากรูปที่ 2.14 เมื่อคลื่นจรแรงดันขนาด  $V_1$  ขั้วบวกเคลื่อนที่จากต้นสายไปยังปลายสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน จะเกิดการสะท้อนที่ปลายสายกลับมาตามสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน โดยมีขนาด  $V_2$  ขั้วบวก และจะเกิดการส่งผ่านของคลื่นจรแรงดันไปยังสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินถัดไปด้วยขนาดแรงดัน  $V_3$  ขั้วบวก

กำหนดให้สายเคเบิลแรงสูงใต้ดินมีค่าเสรีจิมพีแดนซ์เป็น  $Z_0$  และที่ปลายสายเป็นสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินอีกเส้นหนึ่งที่มีค่าเสรีจิมพีแดนซ์เป็น  $Z_1$  ดังนั้นจะได้ค่าคงที่การสะท้อนดังสมการที่ (2.8)

$$\text{reflection coefficient } (\rho) = \frac{Z_1 - Z_0}{Z_1 + Z_0} \quad (2.8)$$

ขนาดของคลื่นจรที่สะท้อนกลับมายังสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน และคลื่นจรที่ส่งผ่านไป สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2.9) และ (2.10) ตามลำดับ

$$V_2 = \rho V_1 \quad (2.9)$$

$$V_3 = (1 + \rho)V_1 \quad (2.10)$$

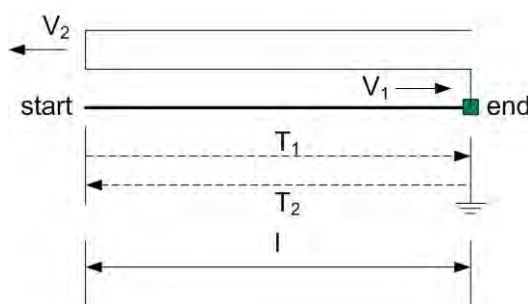
เพราะฉะนั้นคลื่นจรแรงดันรวมภายในสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินขณะที่สะท้อนกลับมาจึงเป็นดังรูปที่ 2.14 (คลื่นจรแรงดันรวมมีขนาดเป็น  $V = V_1 + \rho V_1$ )

## 2.6 เวลาการเคลื่อนที่ของคลื่นจรบนสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน

การเคลื่อนที่ของคลื่นจรบนสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน จะใช้เวลาในการเดินทางจากต้นสายไปยังปลายสายหรือไปยังตำแหน่งผิดพร่อง แล้วสะท้อนกลับมายังตำแหน่งต้นสาย ซึ่งเวลาที่คลื่นจรเคลื่อนที่นี้ สามารถนำมาคำนวณเพื่อหาระยะทางของตำแหน่งผิดพร่องนั้นๆได้[11-12]

$$\text{กำหนดให้ ความเร็วของคลื่นจรบนสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินเป็น } v = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$





รูปที่ 2.15 เวลาการเคลื่อนที่ของคลื่นจรบนสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน

จากรูปที่ 2.15 เวลาที่คลื่นจรเคลื่อนที่จากต้นสายไปยังปลายสาย ( $T_1$ ) กับเวลาที่คลื่นจรเคลื่อนที่จากปลายสายกลับมายังต้นสาย ( $T_2$ ) จะใช้เวลาร่วมกันคือ  $T$  ดังนั้นที่ตำแหน่งต้นสายเราจะได้ค่าเวลาในการเดินทางไปกลับของคลื่นจรเป็น  $2T$  และกำหนดให้สายยาว  $l$  ดังนั้นเราสามารถคำนวณหาระยะห่างระหว่างต้นสาย และปลายสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินได้จากสมการที่ (2.11)

$$l = \frac{v(2T)}{2} = vT \quad (2.11)$$

เพราะฉะนั้นถ้านำมาประยุกต์เข้ากับสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินที่มีความเสียหายเกิดขึ้นที่ตำแหน่งใดๆ ก็จะสามารถนำมาคำนวณหาตำแหน่งที่เสียหายนั้นได้ด้วยหลักการเดียวกัน โดยเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของคลื่นจรบนสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินก็จะแตกต่างกันไปตามตำแหน่งที่เสียหายบนสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินนั้นๆ แต่ความเร็วของคลื่นจรที่เคลื่อนที่บนสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินนั้นยังคงมีค่าเท่าเดิมเสมอ

## 2.7 การไม่เข้ากันของสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน

สายเคเบิลแรงสูงใต้ดินที่มีความผิดปกติเกิดขึ้นภายในเนื้อฉนวนจะทำให้ค่าพารามิเตอร์ของสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินมีการเปลี่ยนแปลงไป เช่น สายเคเบิลแรงสูงใต้ดินที่ถูกใช้งานเป็นเวลานานจะทำให้สายเคเบิลเกิดการเสื่อมสภาพ ซึ่งอาจทำให้ค่าความจุไฟฟ้าของสายเคเบิลมีค่าเพิ่มมากขึ้น [13-14] จากการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ของสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินนี้เอง จะส่งผลให้ค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์เปลี่ยนแปลงไป ทำให้เกิดการไม่เข้ากันของสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน ส่งผลให้เกิดการสะท้อนของคลื่นจรภายในสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน

สาเหตุต่างๆที่ทำให้ค่าความจุไฟฟ้าของสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินมีค่าเปลี่ยนแปลงไปนั้นมีได้หลากหลายสาเหตุด้วยกัน เช่น สายเคเบิลถูกกดทับทำให้เนื้อฉนวนเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง สายเคเบิลมีวัตถุแปลกปลอมอยู่ในเนื้อฉนวน สายเคเบิลมีปลายแหลมเกิดขึ้นในเนื้อฉนวน สายเคเบิลมีรูอากาศเกิดขึ้นภายในเนื้อฉนวน[15] สายเคเบิลเกิดปรากฏการณ์ต้นไม้ภายในเนื้อฉนวน สายเคเบิลเกิดการเสื่อมสภาพ เป็นต้น ด้วยสาเหตุต่างๆเหล่านี้ เมื่อทำให้ค่าความจุไฟฟ้ามีค่าเปลี่ยนแปลงไปก็จะส่งผลให้ค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ ณ ตำแหน่งผิดปกติที่เปลี่ยนแปลงไปด้วย

สายเคเบิลแรงสูงไฟฟ้าใต้ดินส่วนใหญ่จะเป็นสายแบบโคแอกเชียล(แสดงดังรูปที่ 2.16) ซึ่งสายแบบโคแอกเชียลนี้จะสามารถคำนวณหาค่าความจุไฟฟ้าได้ดังสมการที่ (2.12)



รูปที่ 2.16 ลักษณะของสายแบบโคแอกเชียล

$$C = \frac{2\pi\epsilon}{\ln(b/a)} \quad (2.12)$$

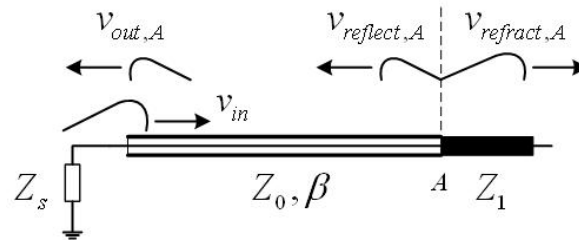
$C$  = ความจุไฟฟ้าของสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินต่อหน่วยความยาว หน่วย F/m

$\epsilon = \epsilon_0\epsilon_r$  = ค่าเพอมิติวิตีของฉนวน หน่วย F/m หรือ  $C^2N^{-1}m^{-2}$

$b$  = รัศมีของเนื้อฉนวนด้านนอก หน่วย m

$a$  = รัศมีของเนื้อฉนวนด้านใน หน่วย m

จากสมการจะเห็นว่า เมื่อค่ารัศมีหรือค่าเพอมิติวิตีของฉนวนมีการเปลี่ยนแปลงด้วยสาเหตุใดก็ตาม จะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าความจุไฟฟ้าของสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน



รูปที่ 2.17 การสะท้อนของคลื่นจรรยาที่ตำแหน่ง A บนสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน

เมื่อเกิดความไม่เข้ากันของสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน ณ ตำแหน่งผิดพร่อง A ดังรูปที่ 2.17 จะเกิดการสะท้อนของคลื่นจรรยาที่เคลื่อนที่บนสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน โดยขนาดของคลื่นจรรยาแรงดันที่สะท้อนจากตำแหน่งผิดพร่องกลับมายังตำแหน่งต้นสาย จะสามารถนำมาวิเคราะห์หาอัตราส่วนของค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ ณ ตำแหน่งผิดพร่อง ( $x = \frac{Z_1}{Z_0}$ ) ได้ โดยถ้าละเลยผลเนื่องจากการลดทอนภายในสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินและค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งกำเนิด จะสามารถหาอัตราส่วนของค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ ณ ตำแหน่งผิดพร่องได้จากสมการที่ (2.13)

$$x = \frac{\left(2 + \frac{v_{out,A}}{v_{in}}\right)}{\left(2 - \frac{v_{out,A}}{v_{in}}\right)} \quad (2.13)$$

ถ้าพิจารณาผลเนื่องจากการลดทอนภายในสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน แต่ละเลยผลเนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งกำเนิด จะสามารถหาอัตราส่วนของค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ ณ ตำแหน่งผิดพร่องได้จากสมการที่ (2.14)

$$x = \frac{\left(2 \cdot 10^{-\beta \cdot l/10} + \frac{v_{out,A}}{v_{in}}\right)}{\left(2 \cdot 10^{-\beta \cdot l/10} - \frac{v_{out,A}}{v_{in}}\right)} \quad (2.14)$$

ถ้าละเลยผลเนื่องจากการลดทอนภายในสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน แต่พิจารณาผลเนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งกำเนิด จะสามารถหาอัตราส่วนของค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ ณ ตำแหน่งผิดพร่องได้จากสมการที่ (2.15)

$$x = \frac{\left( \alpha_s + \frac{v_{out,A}}{v_{in}} \right)}{\left( \alpha_s - \frac{v_{out,A}}{v_{in}} \right)} \quad (2.15)$$

ถ้าพิจารณาผลเนื่องจากการลดทอนภายในสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินและค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งกำเนิด จะสามารถหาอัตราส่วนของค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ ณ ตำแหน่งผิวดพ่วงได้จากสมการที่ (2.16)

$$x = \frac{\left( \alpha_s \cdot 10^{-\beta \cdot l/10} + \frac{v_{out,A}}{v_{in}} \right)}{\left( \alpha_s \cdot 10^{-\beta \cdot l/10} - \frac{v_{out,A}}{v_{in}} \right)} \quad (2.16)$$

$x$  = อัตราส่วนของค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ ณ ตำแหน่งผิวดพ่วง

$\beta$  = สัมประสิทธิ์การลดทอนของสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน หน่วย db/m

$\alpha_s$  = ค่าคงที่การส่งผ่าน ณ แหล่งกำเนิด

$l$  = ความยาวจากต้นสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินถึงตำแหน่งผิวดพ่วง หน่วย m

ทั้ง 4 สมการจะมีข้อจำกัดอยู่คือ สามารถใช้ได้กับตำแหน่งผิวดพ่วงตำแหน่งแรกเท่านั้น เพื่อที่จะละเลยผลเนื่องจากการทับซ้อนของคลื่นจรจากตำแหน่งอื่นๆ ส่วนวิธีการคำนวณจะแสดงไว้ที่ภาคผนวก ก

### บทที่ 3

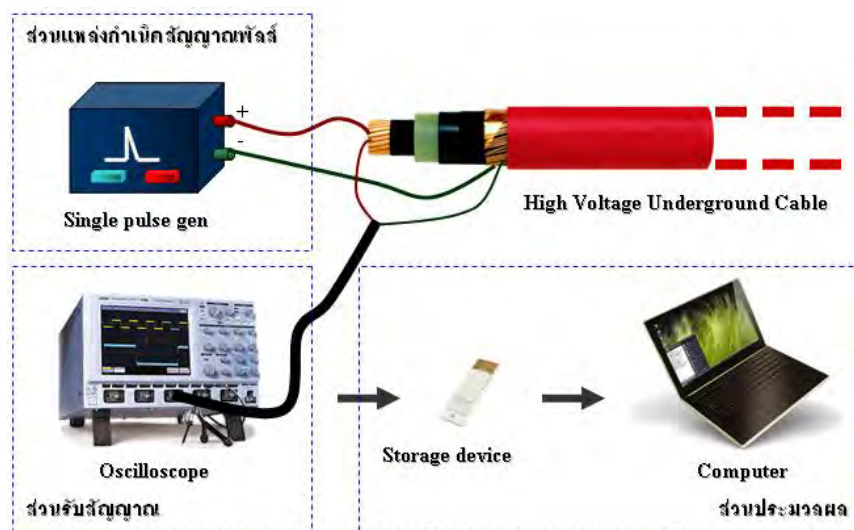
## การออกแบบ และการประกอบสร้างระบบตรวจสอบคุณภาพการฉนวนแบบไม่ทำลายของสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินด้วยวิธีการคลื่นจร

บทนี้ จะกล่าวถึงหลักการทำงานและการพัฒนาระบบตรวจสอบคุณภาพการฉนวนแบบไม่ทำลายของสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินด้วยวิธีการคลื่นจร โดยจะใช้ความรู้ทางทฤษฎีจากบทที่ 2 ในการออกแบบและประกอบสร้าง ส่วนการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ผลการทดสอบ รวมทั้งการวิเคราะห์ผลจะกล่าวถึงในบทที่ 4 ต่อไป

การออกแบบระบบตรวจสอบคุณภาพการฉนวนแบบไม่ทำลายของสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินด้วยวิธีการคลื่นจร สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วนดังนี้ (แสดงได้ดังรูปที่ 3.1)

1. ส่วนแหล่งกำเนิดสัญญาณพัลส์ เพื่อเป็นแหล่งจ่ายสัญญาณคลื่นจรแรงดันให้กับสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน
2. ส่วนรับสัญญาณ ใช้ดิจิจิตอลออสซิลโลสโคป เพื่อตรวจจับสัญญาณของคลื่นจรแรงดันสะท้อนกลับที่เกิดขึ้น
3. ส่วนประมวลผล ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อประมวลผลหาตำแหน่งผิดปกติ และอัตราส่วนของค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ ณ ตำแหน่งผิดปกติบนสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน

โดยส่วนที่ 1 กับ 3 เป็นส่วนที่จะออกแบบและจัดทำขึ้น และส่วนที่ 2 เป็นส่วนที่จะใช้ดิจิจิตอลออสซิลโลสโคป ที่มีอยู่แล้วในห้องปฏิบัติการ



รูปที่ 3.1 ส่วนประกอบของระบบตรวจสอบคุณภาพการฉนวนแบบไม่ทำลายของสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินด้วยวิธีการคลื่นจร

### 3.1 หลักการทำงานของระบบ

ลักษณะการทำงานของระบบตรวจสอบคุณภาพการฉนวนแบบไม่ทำลายของสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินด้วยวิธีการคลื่นจรวดที่จะทำการออกแบบและประกอบสร้างขึ้นนั้น จะอาศัยหลักการสะท้อนของคลื่นจรวดเนื่องจากความไม่เข้ากันของค่าเสรีจิมพีแดนซ์ ณ ตำแหน่งผิดพร่องบนสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน

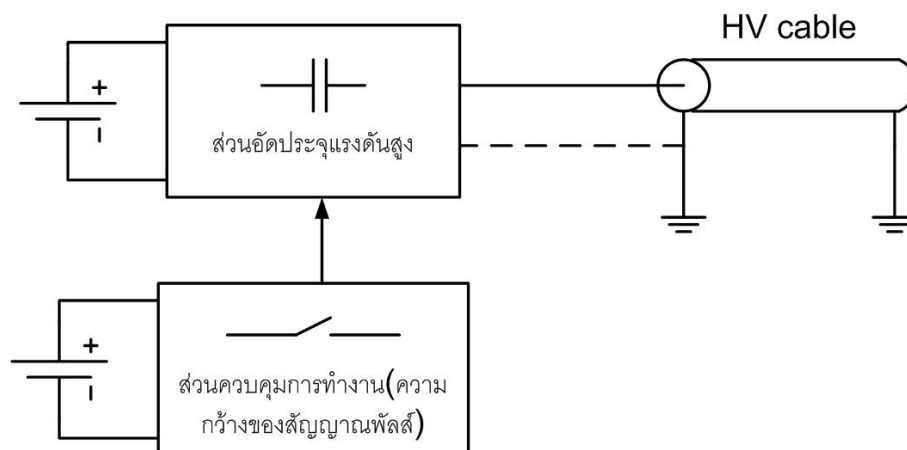
ส่วนแหล่งกำเนิดสัญญาณพัลส์จะส่งสัญญาณพัลส์แรงดันขนาดประมาณ 400 โวลต์ ความกว้างของสัญญาณพัลส์ 200 - 500 นาโนวินาที ไปยังสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน ขณะเดียวกัน ดิจิตอลลอจิกลอจิสติกส์ก็ทำการบันทึกรูปคลื่นจรวดแรงดันสะท้อนกลับด้วย เมื่อสัญญาณพัลส์แรงดันเข้าสู่สายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน สัญญาณพัลส์แรงดันนั้นก็จะมีประพัตต์ตัวเป็นคลื่นจรวดที่เคลื่อนที่อยู่บนสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน เมื่อคลื่นจรวดเคลื่อนที่กระทบกับตำแหน่งผิดพร่องหรือตำแหน่งปลายสาย ซึ่งเป็นตำแหน่งที่เกิดความไม่เข้ากันของสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน โดยคลื่นจรวดสะท้อนกลับมายังทางต้นสายของสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน ซึ่งดิจิตอลลอจิกลอจิสติกส์ก็จับรูปคลื่นจรวดแรงดันสะท้อนกลับนั้นอยู่ และเมื่อดิจิตอลลอจิกลอจิสติกส์จับรูปคลื่นไว้เรียบร้อยแล้ว จึงทำการเก็บข้อมูลลงสู่ฮาร์ดดิสก์เพื่อไปประมวลผลต่อไป

รูปคลื่นจรวดแรงดันสะท้อนกลับจากดิจิตอลลอจิสติกส์โคปที่ได้จากฮาร์ดดิสก์ข้อมูล จะถูกนำมาวิเคราะห์บนระบบประมวลผล ซึ่งในที่นี้จะใช้คอมพิวเตอร์เพื่อวิเคราะห์และประมวลผลหาตำแหน่งที่เกิดความผิดพร่องของสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน โดยจะใช้โปรแกรมที่ถูกพัฒนาขึ้นด้วยโปรแกรม MATLAB ในการวิเคราะห์และประมวลผล

### 3.2 ส่วนแหล่งกำเนิดสัญญาณพัลส์

ส่วนแหล่งกำเนิดสัญญาณพัลส์นี้ จะทำหน้าที่สร้างสัญญาณพัลส์แรงดันขนาดประมาณ 400 โวลต์ ความกว้างของสัญญาณพัลส์ 200-500 นาโนวินาที เพื่อเป็นแหล่งกำเนิดคลื่นจรวดให้กับสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน

โดยจะใช้วงจรส่วนอัดประจุแรงดันสูงเพื่อสร้างสัญญาณแรงดันกระแสตรงขึ้น แล้วใช้หลักการของการตัดแรงดันกระแสตรง(Chopper) ด้วยวงจรควบคุมการทำงาน เพื่อให้เกิดคลื่นจรวดแรงดันขึ้นมา เพื่อใช้เป็นแหล่งกำเนิดคลื่นจรวดแรงดันให้กับสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินที่ต้องการทดสอบ โดยเครื่องต้นแบบนี้มีโครงสร้างหลักที่สำคัญดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 โครงสร้างของส่วนแหล่งกำเนิดสัญญาณพัลส์

แหล่งกำเนิดสัญญาณพัลส์ จะประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลักคือ

1. ส่วนควบคุมการทำงาน
2. ส่วนอัดประจุแรงดันสูง

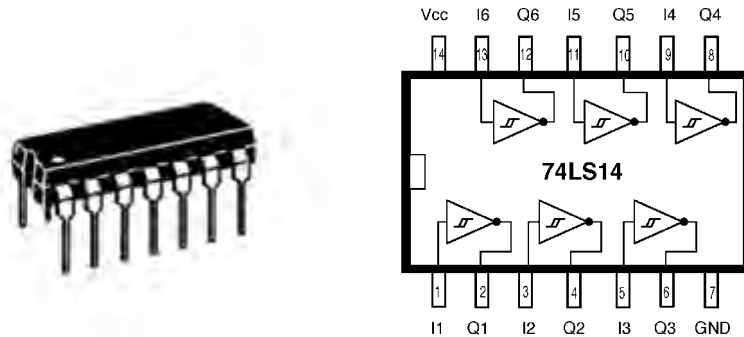
### 3.2.1 ส่วนควบคุมการทำงาน

ส่วนควบคุมการทำงาน จะทำหน้าที่ควบคุมส่วนวงจรอัดประจุแรงดันสูงอีกต่อหนึ่ง เพื่อให้ได้สัญญาณพัลส์แรงดันที่ต้องการ

ส่วนวงจรควบคุมการทำงาน จะใช้วงจรโมโนสเตเบิลสร้างสัญญาณทริกเกอร์ โดยสามารถควบคุมความกว้างของสัญญาณพัลส์ผ่านทางวงจรด้วยการปรับค่าความต้านทาน เมื่อได้สัญญาณทริกเกอร์ที่มีความกว้างตามที่ต้องการแล้ว ก็จะนำสัญญาณทริกเกอร์นั้นไปควบคุมวงจรขับไอซีมอสเฟต โดยจะมีไอซีมอสเฟตทำหน้าที่เป็นวงจรตัดแรงดันกระแสตรงจากส่วนวงจรอัดประจุแรงดันสูง เพื่อให้ได้สัญญาณพัลส์แรงดันสำหรับใช้ทดสอบสายเคเบิลตามที่ต้องการ

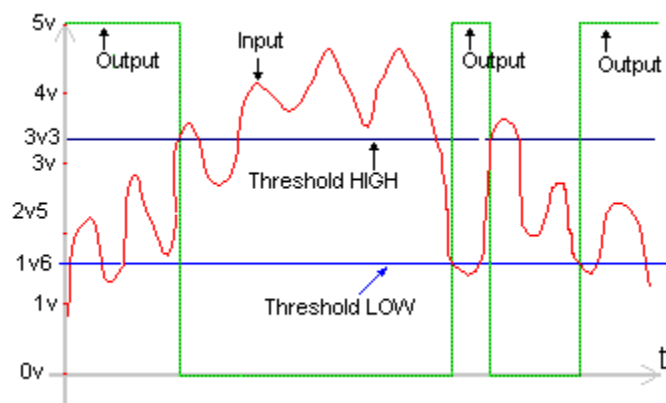
ส่วนประกอบของวงจรส่วนควบคุมการทำงาน จะประกอบไปด้วยอุปกรณ์ 4 ตัวที่สำคัญ ดังนี้

1. ไอซี 74LS14 เป็นไอซีชนิดตรีฟริกเกอร์ ชนิดกลับสัญญาณ



รูปที่ 3.3 ไอซีชนิดตรีฟริกเกอร์ 74LS14 [16]

ไอซีตัวนี้จะทำหน้าที่กลับสัญญาณลอจิกจากศูนย์เป็นหนึ่งหรือหนึ่งเป็นศูนย์ โดยจะมีค่าแรงดันขีดเริ่ม(Threshold voltage)เพื่อควบคุมการกลับสัญญาณลอจิก แสดงได้ดังรูปที่ 3.4

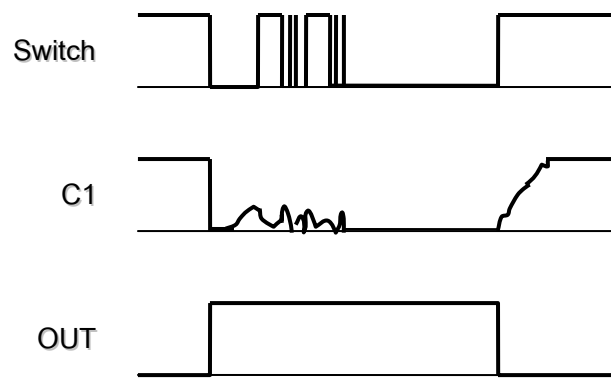


รูปที่ 3.4 ลักษณะแรงดันขีดเริ่ม(Threshold voltage)ของไอซีชนิดตรีฟริกเกอร์ [17]

ไอซีชนิดตรีฟริกเกอร์นี้ นำมาใช้ในการออกแบบวงจรสร้างสัญญาณตรีฟริกเกอร์ โดยนำมาใช้สำหรับทำวงจรดีบาวซิ่ง ซึ่งใช้ขจัดสัญญาณลอจิกที่ไม่คงที่ ที่เกิดจากหน้าสัมผัสของสวิตช์ที่มีความขรุขระ ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้สัญญาณตรีฟริกเกอร์ที่ได้นั้นมีค่าไม่คงที่ และส่งผลให้เกิดการทริกซ้ำซ้อนเกิดขึ้น

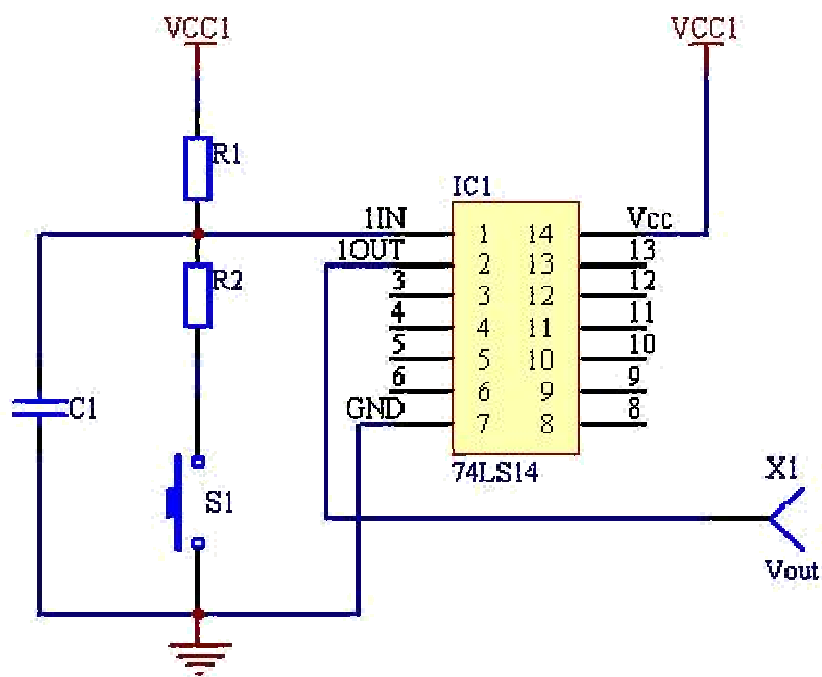
ลักษณะของสัญญาณที่ได้จากการกดสวิตช์ และสัญญาณที่ออกจากไอซีชนิดตรีฟริกเกอร์ (สัญญาณตรีฟริกเกอร์)สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.5





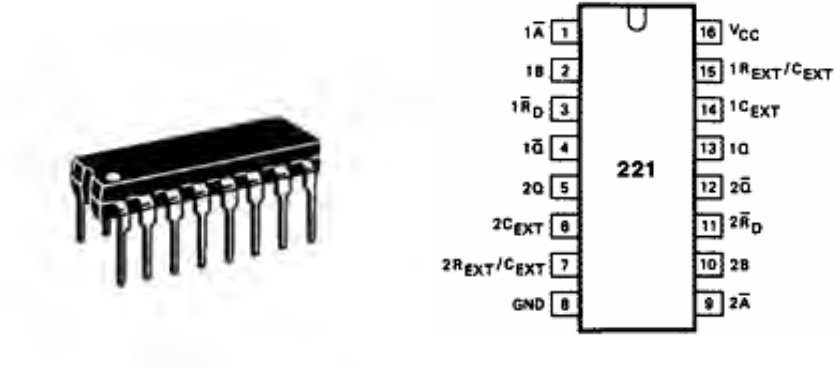
รูปที่ 3.5 สัญญาณจากสวิตช์ และสัญญาณทรiggerที่ได้

วงจรถีบาวซึ่งที่ใช้ในส่วนควบคุมการทำงานประกอบได้ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 วงจรถีบาวซึ่ง โดยใช้ไอซีชนิดทรigger 74LS14

## 2. ไอซี 74HCT221 เป็นไอซีโมโนสเตเบิล

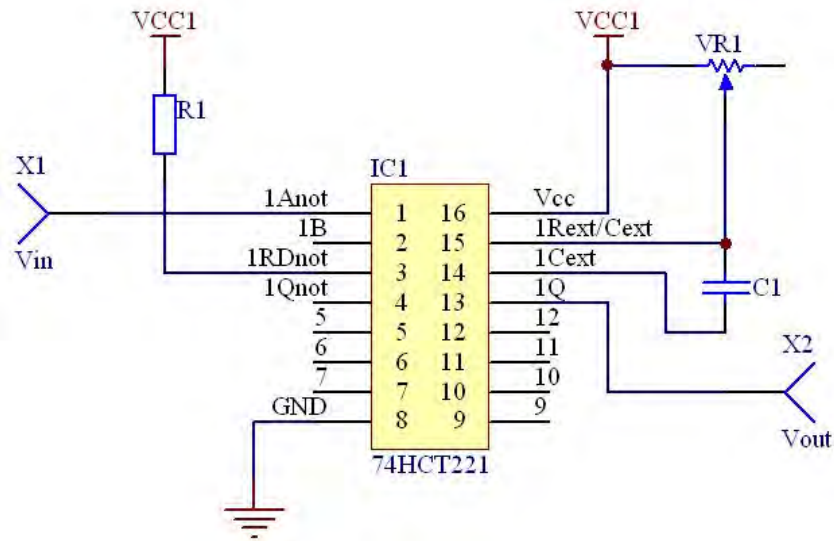


รูปที่ 3.7 ไอซีโมโนสเตเบิล 74HCT221 [18]

เป็นไอซีสำหรับสร้างสัญญาณพัลส์ โดยตัวไอซีจะมีเอาต์พุตเสถียรอยู่ที่สถานะศูนย์หรือหนึ่ง เมื่อไอซีโมโนสเตเบิลได้รับสัญญาณทริกเกอร์ เอาต์พุตของไอซีโมโนสเตเบิลจะเปลี่ยนจากสถานะที่เสถียรอยู่ไปยังสถานะตรงกันข้ามชั่วขณะ แล้วกลับมายังสถานะที่เสถียรเหมือนเดิม โดยช่วงเวลา que เอาต์พุตอยู่ในสถานะที่ไม่เสถียร(ช่วงความกว้างของสัญญาณพัลส์) จะขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานและค่าความจุไฟฟ้าที่ต่ออยู่กับไอซีโมโนสเตเบิลและเป็นไปตามสมการที่ (3.1)

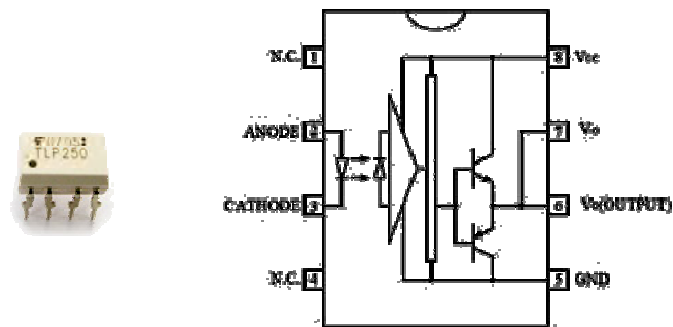
$$t_w = 0.7C_{ext}R_{ext} \quad (3.1)$$

โดยสัญญาณพัลส์ที่จะสร้างขึ้นนั้นจะกำหนดให้มีความกว้างอยู่ในช่วง 200 – 500 นาโนวินาที ซึ่งสามารถกำหนดได้โดยการปรับค่าความต้านทาน ( $R_{ext}$ ) วงจรสำหรับสร้างสัญญาณพัลส์สามารถประกอบได้ดังรูปที่ 3.8



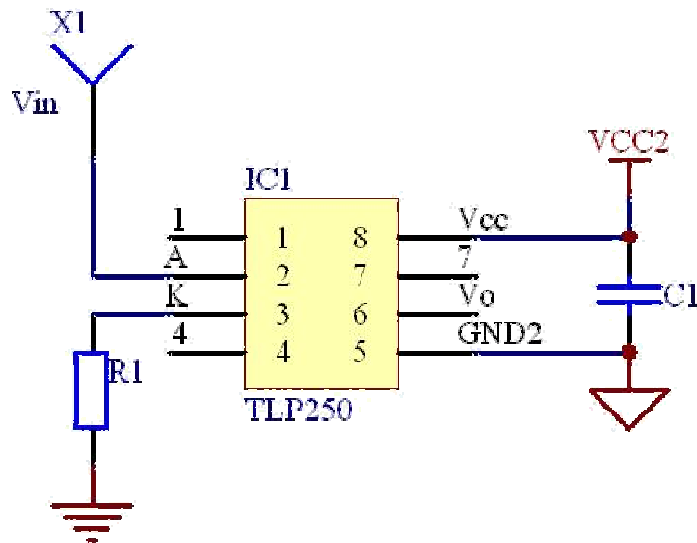
รูปที่ 3.8 วงจรสร้างสัญญาณพัลส์เพื่อทริกวงจรจับไอซีมอสเฟต

### 3. ไอซี TLP250 เป็นไอซีออปโตไอโซเลต



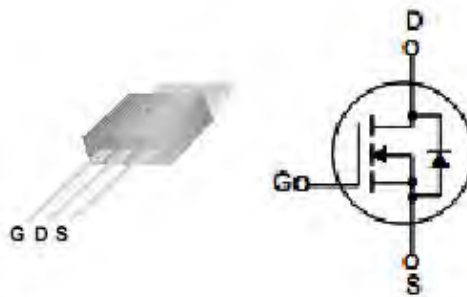
รูปที่ 3.9 ไอซีออปโตไอโซเลต TLP250 [19]

เป็นไอซีที่ใช้แยกกราวด์ของวงจรออกจากกัน โดยอาศัยไดโอดเปล่งแสงในการคับปลิ่งวงจรทั้งสองฝั่งเข้าด้วยกัน ในที่นี้จะนำมาใช้เพื่อวัตถุประสงค์ในการแยกวงจรฝั่งสัญญาณพัลส์ทริกเกอร์ที่ได้จากไอซีโมโนสเตเบิล กับฝั่งไอซีมอสเฟตสำหรับตัดแรงดันกระแสตรง อีกทั้งยังใช้เป็นวงจรสำหรับจับไอซีมอสเฟตด้วย ลักษณะของวงจรสามารถประกอบได้ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 การแยกกราวด์วงจรและขับไอซีมอสเฟต โดยใช้ไอซีคอปไต้อิโซเลต TLP250

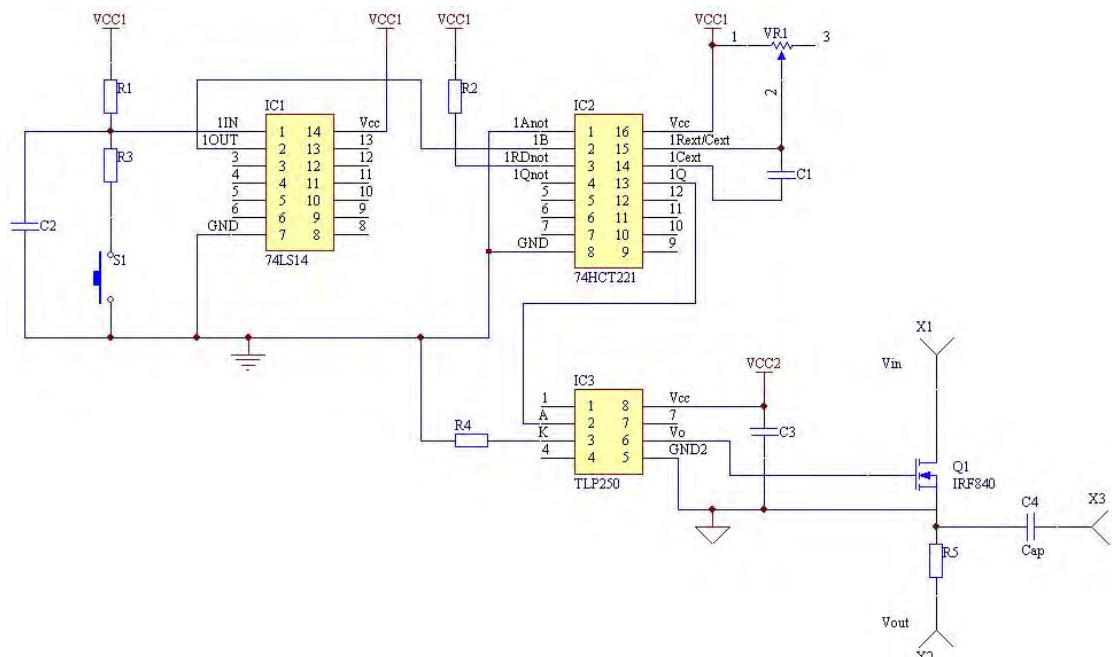
#### 4. ไอซี IRF840 เป็นไอซีมอสเฟต



รูปที่ 3.11 ไอซีมอสเฟต IRF840 [20]

ทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์สำหรับตัดแรงดันกระแสตรง โดยทางด้านขาเดรนจะต่อเข้ากับขั้วบวกของตัวเก็บประจุแรงดันสูง และขาซอสจะต่อเข้ากับความต้านทานสำหรับดีสชาร์จประจุที่เก็บอยู่ในตัวเก็บประจุแรงดันสูง โดยไอซีมอสเฟตนี้จะใช้สัญญาณแรงดันในการควบคุมการเปิดปิดผ่านทางขาเกตและขาซอส ซึ่งสัญญาณแรงดันที่ใช้ควบคุมนี้จะรับมาจากวงจรขับไอซีมอสเฟตอีกต่อหนึ่ง

นำวงจรทั้ง 4 ส่วนย่อยมาประกอบรวมกันเป็นวงจรควบคุมการทำงาน ซึ่งแสดงไว้ดังรูปที่



รูปที่ 3.12 ส่วนวงจรควบคุมการทำงาน

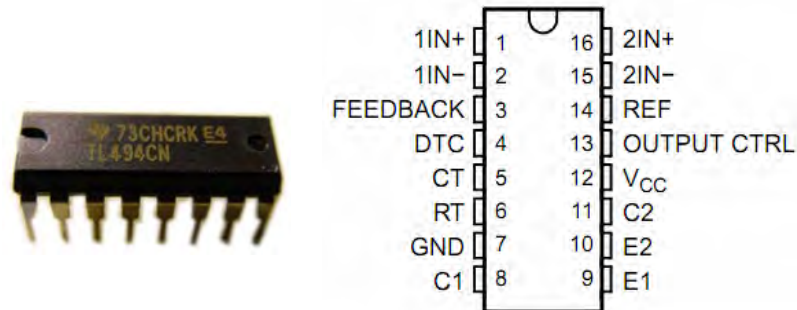
### 3.2.2 ส่วนวงจรอัดประจุแรงดันสูง

ส่วนวงจรอัดประจุแรงดันสูง ทำหน้าที่สร้างแรงดันสูง เพื่อใช้อัดประจุให้กับตัวเก็บประจุ โดยตัวเก็บประจุนี้จะทำหน้าที่ในการดีสชาร์จ เพื่อสร้างสัญญาณพัลส์แรงดันสูง

เนื่องจากการพัฒนาระบบตรวจสอบคุณภาพการขนวนนี้ ต้องการให้เป็นอุปกรณ์ที่มีขนาดเล็ก และสามารถพกพาได้สะดวก ดังนั้นแหล่งจ่ายไฟที่ใช้จึงต้องมีขนาดเล็ก และสามารถพกพาได้สะดวก ดังนั้นในที่นี้จึงเลือกใช้ถ่านไฟฉายขนาด 9 โวลต์ซึ่งมีขนาดเล็กและสามารถพกพาได้สะดวก แต่เนื่องจากถ่านไฟฉายที่ใช้เป็นไฟกระแสตรง ซึ่งการจะทำให้มีแรงดันสูงขึ้นนั้นไม่สามารถใช้ไอซีแปลงแรงดันที่มีอยู่ในท้องตลาดได้ จึงต้องทำการออกแบบโดยใช้ไอซีพัลส์วิตช์มอดูเลชัน เพื่อทำให้เกิดการแกว่งของแรงดันในวงจร แล้วทำการแปลงแรงดันไฟฟ้าโดยใช้หม้อแปลงไฟฟ้า ความถี่สูงเพื่อให้ได้แรงดันที่สูงขึ้น แต่แรงดันที่ได้จากหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีอยู่ยังคงมีค่าไม่สูงพอ จึงเลือกใช้วงจรทวิแรงดันมาช่วยยกระดับแรงดันขึ้นไปอีก จนสามารถสร้างแรงดันสูงตามต้องการได้ แล้วจึงนำวงจรดังกล่าวไปอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุเพื่อเตรียมนำไปสร้างสัญญาณพัลส์แรงดันสูงต่อไป

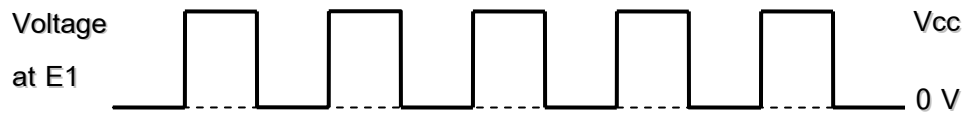
ส่วนประกอบของวงจรอัดประจุแรงดันสูง ประกอบไปด้วยอุปกรณ์ดังนี้

### 1. ไอซีพัลส์วิหัตมอดูเลชั่น TL494CN



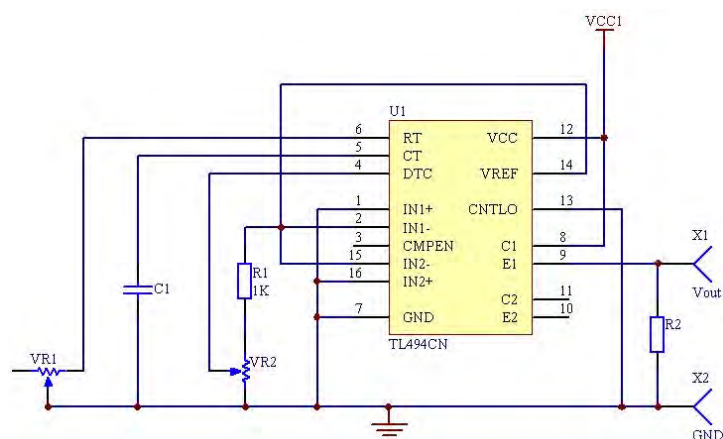
รูปที่ 3.13 ไอซีพัลส์วิหัตมอดูเลชั่น TL494CN [21]

ทำหน้าที่สร้างสัญญาณควบคุมไอซีมอสเฟตให้เปิดและปิดวงจรสลับกันไป โดยลักษณะของสัญญาณที่ออกจากไอซีพัลส์วิหัตมอดูเลชั่นนี้ จะมีลักษณะเป็นคลื่นสัญญาณสี่เหลี่ยม(ดังรูปที่ 3.14) โดยความถี่ของพัลส์จะควบคุมด้วยความต้านทานปรับค่าได้



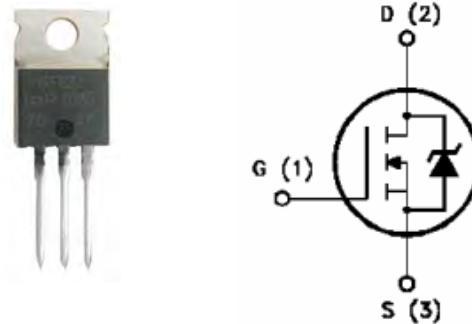
รูปที่ 3.14 ลักษณะสัญญาณพัลส์สี่เหลี่ยมที่ออกจากไอซีพัลส์วิหัตมอดูเลชั่น

วงจรสร้างสัญญาณพัลส์เพื่อควบคุมไอซีมอสเฟต สามารถประกอบได้ดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 วงจรไอซีพัลส์วิหัตมอดูเลชั่น TL494CN

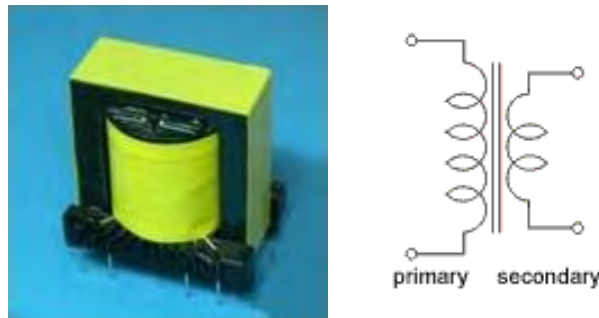
## 2. ไอซี MOSFET IRF620



รูปที่ 3.16 ไอซี MOSFET IRF620 [22]

ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ควบคุมเปิดและปิดวงจรฝั่งปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูง เพื่อให้แรงดันภายในวงจรเกิดการแกว่งตัว โดยไอซี MOSFET จะรับสัญญาณควบคุมการเปิดและปิดวงจรจากสัญญาณพัลส์ที่ได้จากไอซีพัลส์วิดท์มอดูเลชัน

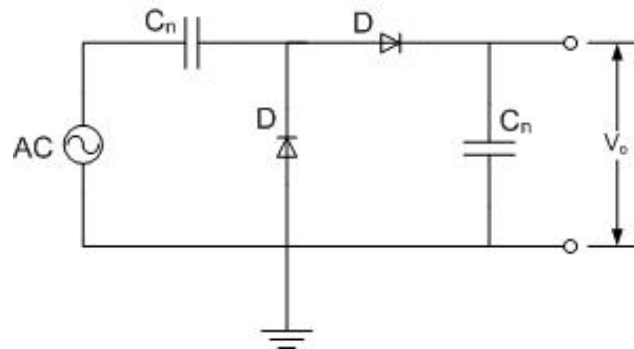
## 3. หม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง



รูปที่ 3.17 หม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง [23]

ทำหน้าที่แปลงแรงดันต่ำไปสู่แรงดันสูง โดยรับแรงดันฝั่งปฐมภูมิมาจากไอซี MOSFET แล้วแปลงเป็นแรงดันสูงออกทางฝั่งทุติยภูมิเพื่อส่งต่อไปยังวงจรทวิแรงดัน

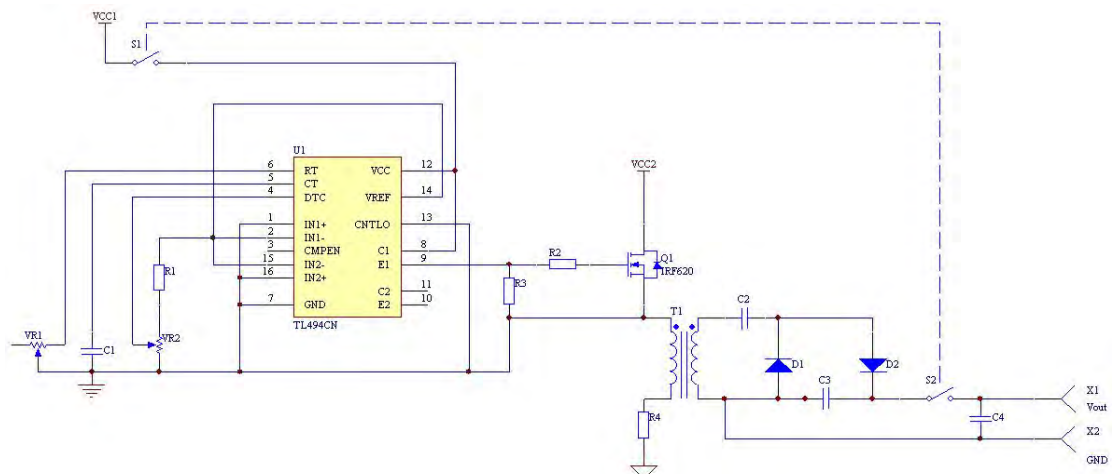
## 4. วงจรทวีแรงดันหรือวงจร voltage doubler



รูปที่ 3.18 วงจรทวีแรงดันหรือวงจร voltage doubler

ทำหน้าที่ทวีแรงดันที่ได้จากด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงความถี่สูง โดยวงจรดีโพลเลอร์นี้ แรงดันด้านออกจะมีขนาดเป็นสองเท่าของแรงดันด้านเข้า

นำวงจรไอซีพัลส์วิตช์มอดูเลชัน หม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง และวงจรทวีแรงดัน มาประกอบรวมกันเป็นวงจรอัดประจุแรงดันสูง ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 ส่วนวงจรอัดประจุแรงดันสูง



### 3.3 ส่วนรับสัญญาณ

ในส่วนภาครับสัญญาณนี้ จะใช้ดิจิตอลออสซิลโลสโคปเพื่อตรวจจับสัญญาณพัลส์ที่สร้างขึ้นจากส่วนแหล่งกำเนิดสัญญาณพัลส์และตรวจจับสัญญาณการสะท้อนของคลื่นจรแรงดันภายในสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน ดิจิตอลออสซิลโลสโคปที่ใช้แสดงได้ดังรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 ดิจิตอลออสซิลโลสโคป Lecroy waveRunner 6050A

เมื่อทำการตรวจจับสัญญาณได้เรียบร้อยแล้ว จะทำการบันทึกข้อมูลลงสื่อบันทึกข้อมูลเพื่อเตรียมส่งต่อไปยังส่วนประมวลผลต่อไป

### 3.4 ส่วนประมวลผล

ส่วนประมวลผลนี้จะรับข้อมูลจากสื่อบันทึกข้อมูลที่ได้จากดิจิตอลออสซิลโลสโคป เพื่อนำมาประมวลผลหาตำแหน่งผิดพร่อง และอัตราส่วนของค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ ณ ตำแหน่งผิดพร่องของสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน

ส่วนประมวลผลนี้ จะนำหลักการและทฤษฎีการคำนวณหาตำแหน่งผิดพร่อง และอัตราส่วนของค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ ณ ตำแหน่งผิดพร่องจากบทที่ 2 มาใช้ และนำโปรแกรม MATLAB มาเป็นเครื่องมือเพื่อพัฒนาโปรแกรม โดยโปรแกรมที่จะพัฒนาขึ้นนั้น จะถูกพัฒนาออกมาในรูปแบบที่ใช้งานง่าย ซึ่งจะอยู่ในลักษณะของ GUI(Graphic User Interface) ซึ่งมีหน้าต่างติดต่อกับผู้ใช้งานเพื่อให้สะดวกในการใช้งาน โดย GUI นี้จะถูกออกแบบโดยโปรแกรม GUIDE ซึ่งเป็นเครื่องมือหลักของ MATLAB ที่ช่วยในการพัฒนาโปรแกรม

โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นจะแบ่งออกเป็น 2 แบบหลักๆคือ

1. โปรแกรมแบบผู้วิเคราะห์ทำการปรับตำแหน่งได้เอง (Manual program) แบ่งเป็นโปรแกรมย่อยได้ 2 ส่วน

1.1. โปรแกรมคำนวณหาตำแหน่งผิดพลาด

1.2. โปรแกรมคำนวณหาอัตราส่วนของค่าเสิร์จิมพีแดนซ์ ณ ตำแหน่งผิดพลาด

2. โปรแกรมแบบอัตโนมัติ (Automatic program) แบ่งเป็นโปรแกรมย่อยได้ 2 ส่วน

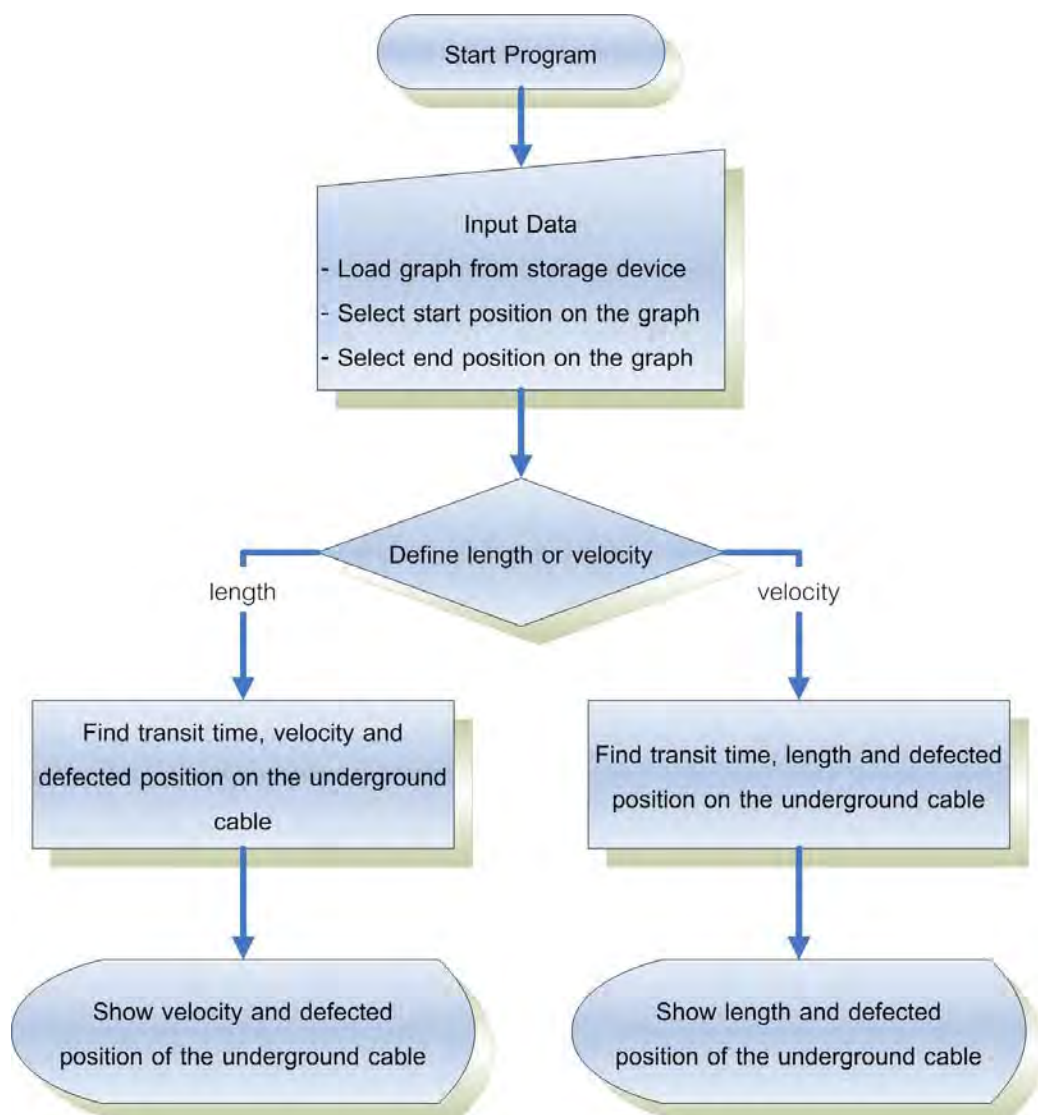
2.1. โปรแกรมคำนวณหาตำแหน่งผิดพลาด

2.2. โปรแกรมคำนวณหาอัตราส่วนของค่าเสิร์จิมพีแดนซ์ ณ ตำแหน่งผิดพลาด

### 3.4.1 โปรแกรมแบบผู้วิเคราะห์ทำการปรับตำแหน่งได้เอง (Manual program)

#### 3.4.1.1 โปรแกรมคำนวณหาตำแหน่งผิดพลาด

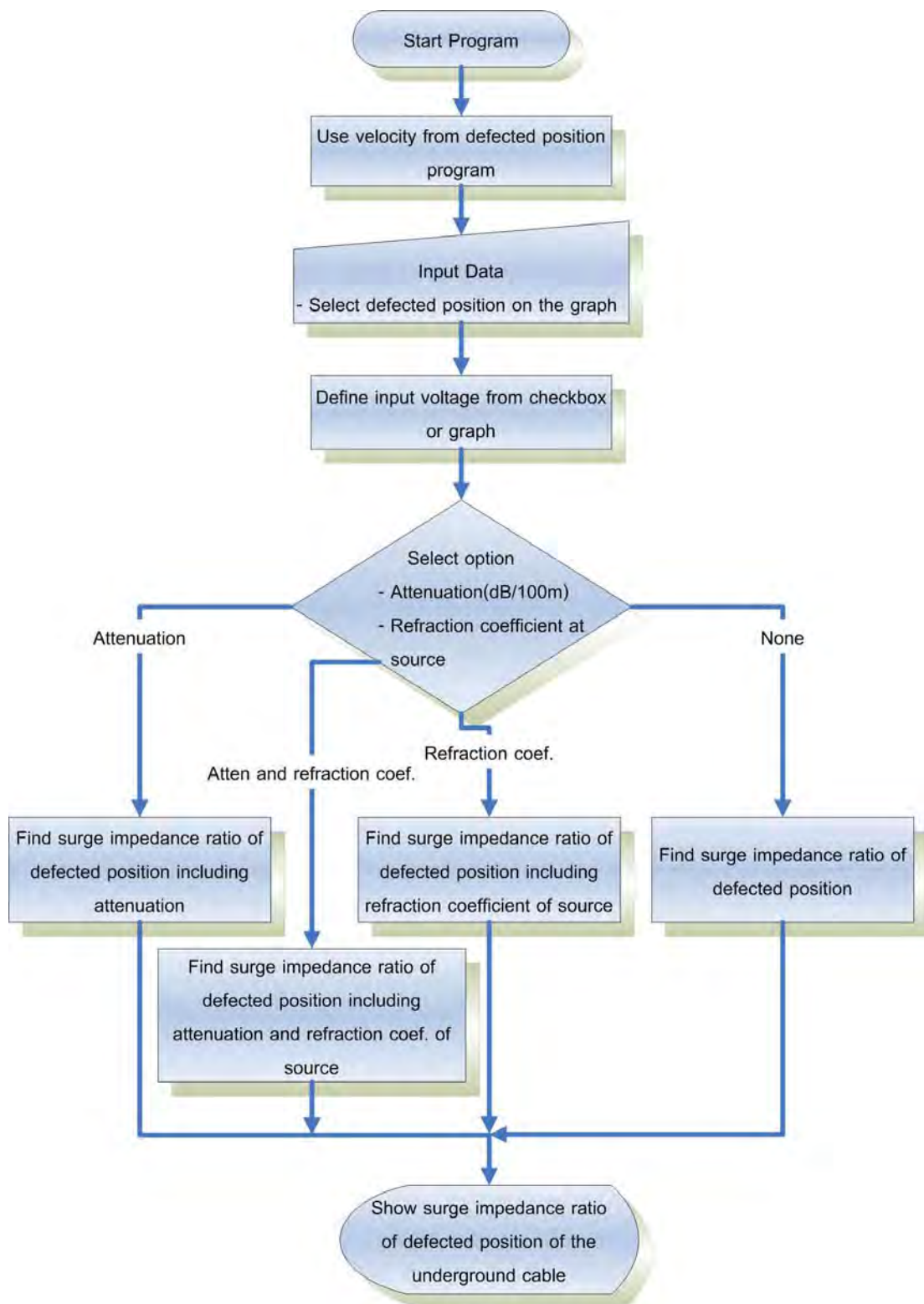
เป็นโปรแกรมที่ใช้คำนวณหาตำแหน่งผิดพลาด โดยอาศัยหลักการและทฤษฎีจากบทที่ 2 เพื่อนำมาวิเคราะห์ผลการทดสอบ ซึ่งการคำนวณจะต้องอาศัยรูปคลื่นแรงดันสะท้อนกลับที่ได้จากดิжитอลออสซิลโลสโคปมาประกอบการวิเคราะห์ด้วย ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.21 ส่วนวิธีการใช้งานโปรแกรมได้แสดงไว้ในภาคผนวก ข



รูปที่ 3.21 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมคำนวณหาตำแหน่งผิดพร่องแบบผู้วิเคราะห์ทำการปรับตำแหน่งได้เอง

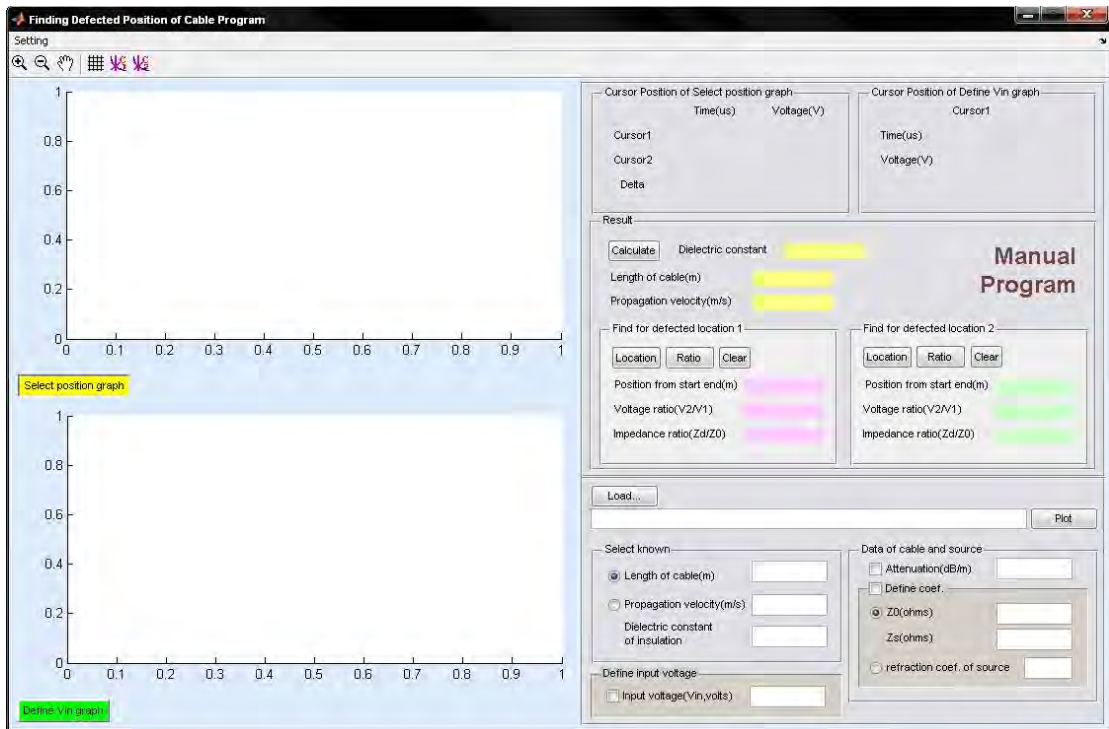
#### 3.4.1.2 โปรแกรมคำนวณหาอัตราส่วนของค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ ณ ตำแหน่งผิดพร่อง

เป็นโปรแกรมที่ใช้คำนวณหาอัตราส่วนของค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ ณ ตำแหน่งผิดพร่อง โดยอาศัยหลักการและทฤษฎีจากบทที่ 2 เพื่อนำมาวิเคราะห์ผลการทดสอบ ซึ่งการคำนวณจะต้องอาศัยรูปคลื่นจรแรงดันสะท้อนกลับที่ได้จากดิจิจิตอลออสซิลโลสโคปมาประกอบการวิเคราะห์ด้วย ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.22 ส่วนวิธีการคำนวณและวิธีการใช้งานโปรแกรมได้แสดงไว้ในภาคผนวก ข



รูปที่ 3.22 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมคำนวณหาอัตราส่วนของค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ ณ ตำแหน่งผิดพ่วงแบบผู้วิเคราะห์ทำการปรับตำแหน่งได้เอง

หน้าต่างโปรแกรมสำหรับคำนวณหาตำแหน่งผิดพร่อง และคำนวณหาอัตราส่วนของค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ ณ ตำแหน่งผิดพร่องแบบผู้วิเคราะห์ทำการปรับตำแหน่งได้เอง(Manual program) ที่ใช้ติดต่อกับผู้ใช้งานแสดงได้ดังรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.23 ส่วนหน้าต่างโปรแกรมแบบผู้วิเคราะห์ทำการปรับตำแหน่งได้เอง

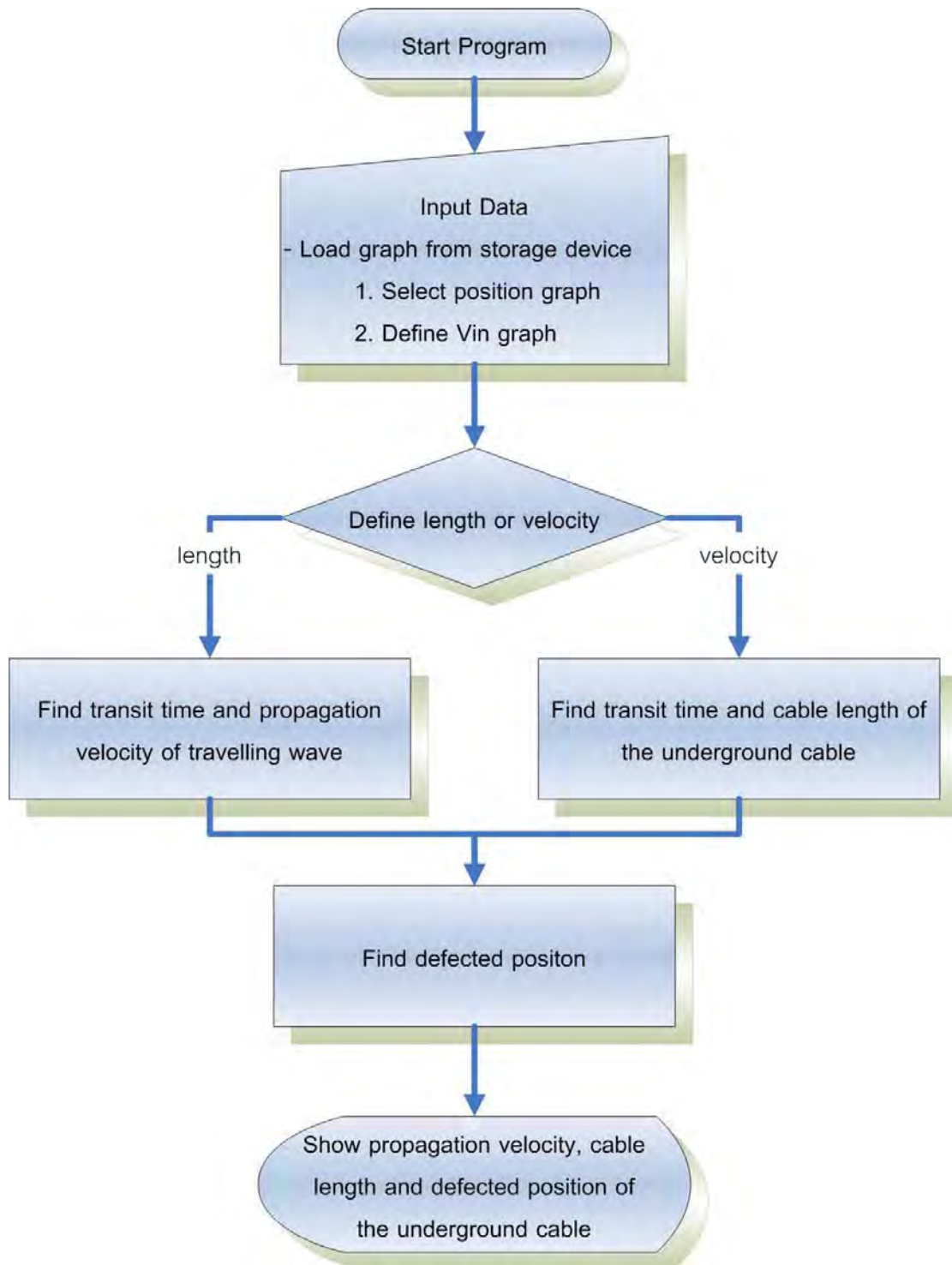
### 3.4.2 โปรแกรมแบบอัตโนมัติ (Automatic program)

#### 3.4.2.1 โปรแกรมคำนวณหาตำแหน่งผิดพร่อง

เป็นโปรแกรมที่ใช้คำนวณหาตำแหน่งผิดพร่อง ซึ่งการคำนวณจะต้องอาศัยรูปคลื่นจรแรงดันสะท้อนกลับที่ได้จากดิิจิตอลออสซิลโลสโคปมาประกอบการวิเคราะห์ โดยจะแตกต่างจากโปรแกรมแบบผู้วิเคราะห์ทำการปรับตำแหน่งได้เอง คือโปรแกรมจะทำการประมวลผลหาความยาวของสายเคเบิล และประมวลหาตำแหน่งผิดพร่องได้ด้วยตัวเอง โดยอาศัยข้อกำหนดของค่าแรงดันขีดเริ่ม(Voltage threshold) เป็นเกณฑ์ในการประมวลผล

การเลือกค่าแรงดันขีดเริ่มจะต้องเลือกให้เหมาะสม โดยสำหรับค่าแรงดันขีดเริ่มที่จะใช้เป็นเกณฑ์ในการหาความยาวของสายเคเบิล จะต้องเลือกให้มีค่าสูงกว่าขนาดแรงดันของสัญญาณรบกวน

ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.24 ส่วนวิธีการใช้งานโปรแกรมได้แสดงไว้ในภาคผนวก ข

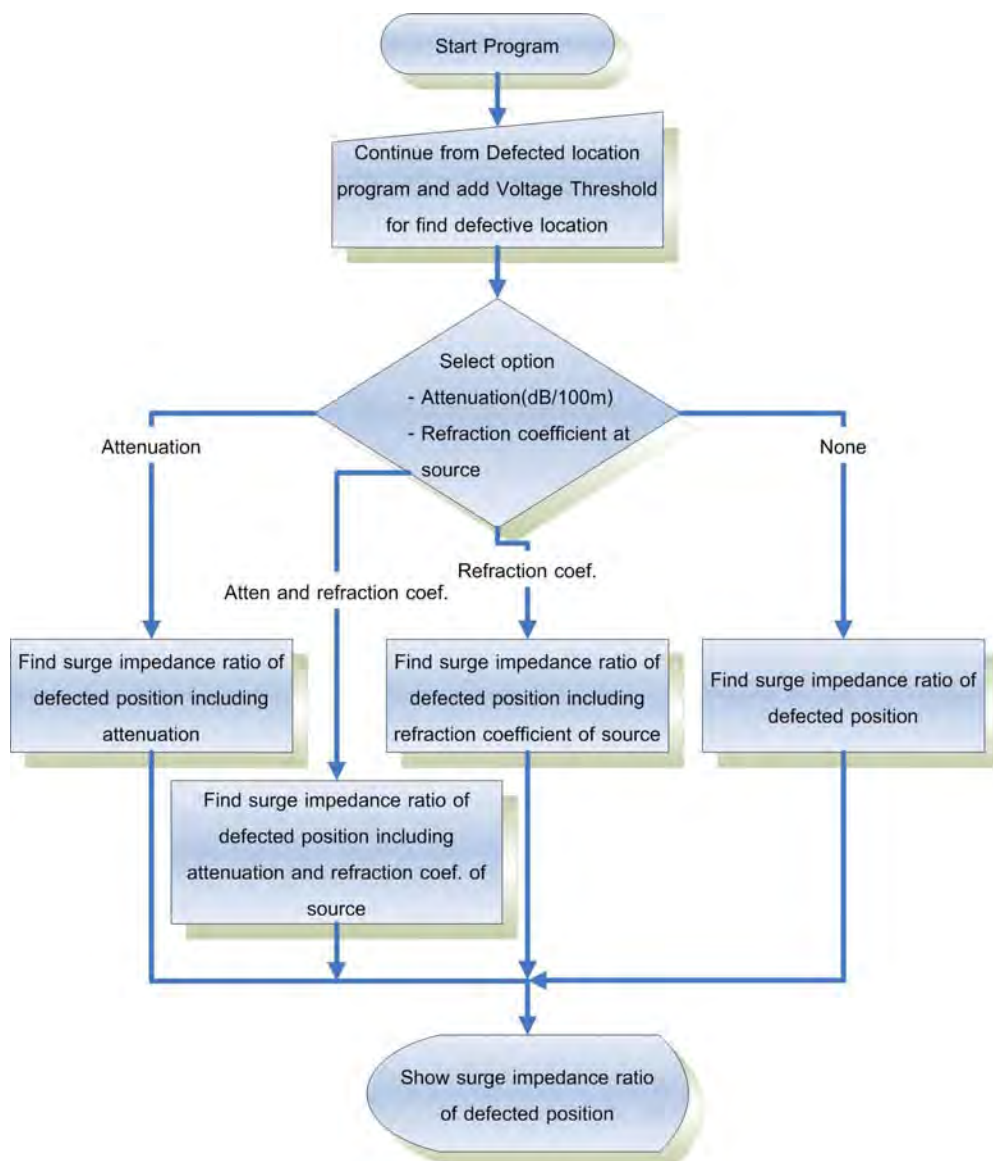


รูปที่ 3.24 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมคำนวณหาตำแหน่งผิดพ่วงแบบอต์โนมัติ

### 3.4.2.2 โปรแกรมคำนวณหาอัตราส่วนของค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ ณ ตำแหน่งผิดพร่อง

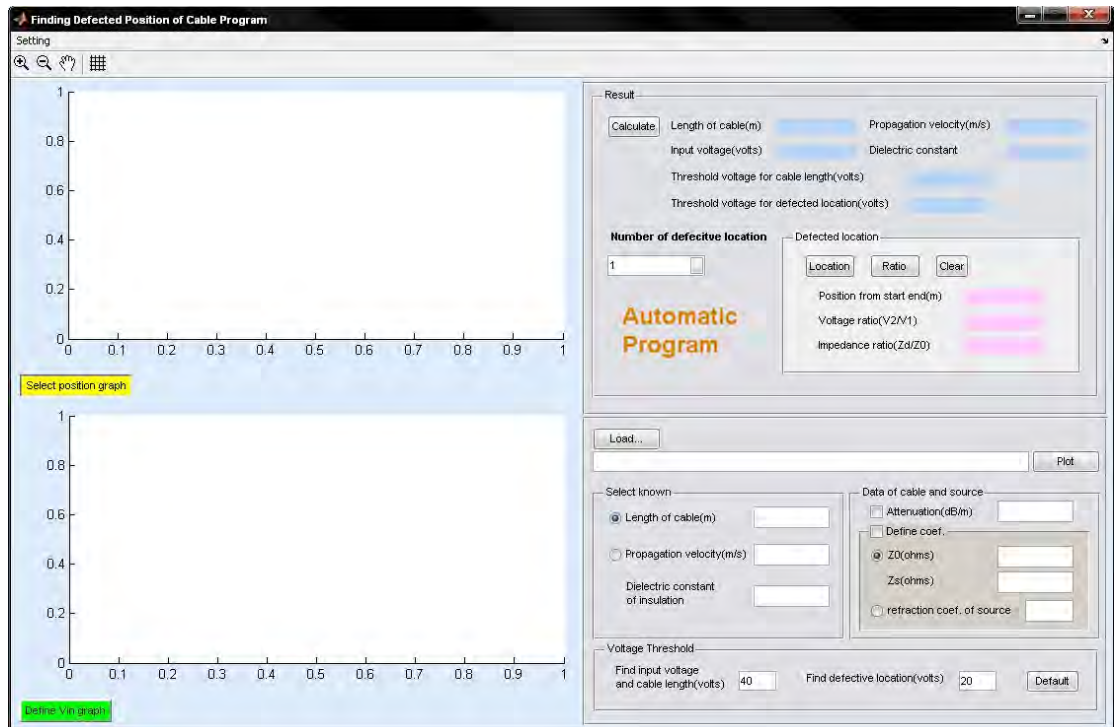
เป็นโปรแกรมที่ใช้คำนวณหาอัตราส่วนของค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ ณ ตำแหน่งผิดพร่อง โดยการทำงานจะต้องกำหนดค่าแรงดันขีดเริ่มที่จะใช้เป็นเกณฑ์ในการหาค่าอัตราส่วนของค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ ณ ตำแหน่งผิดพร่องนั้น โดยจะต้องเลือกใช้ค่าแรงดันที่สูงกว่าค่าแรงดันของสัญญาณรบกวน

ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.25 ส่วนวิธีการใช้งานโปรแกรมได้แสดงไว้ในภาคผนวก ข



รูปที่ 3.25 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมคำนวณหาอัตราส่วนของค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ ณ ตำแหน่งผิดพร่องแบบอัตโนมัติ

หน้าต่างโปรแกรมสำหรับคำนวณหาตำแหน่งผิดพร่อง และคำนวณหาอัตราส่วนของค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ ณ ตำแหน่งผิดพร่องแบบอัตโนมัติ(Automatic program) ที่ใช้ติดต่อกับผู้ใช้งาน แสดงได้ดังรูปที่ 3.26



รูปที่ 3.26 ส่วนหน้าต่างโปรแกรมแบบอัตโนมัติ



## บทที่ 4

### การทดสอบระบบตรวจสอบคุณภาพการฉนวนแบบไม่ทำลายของสายเคเบิล ด้วยวิธีการคลื่นจร

เป้าหมายหลักของการออกแบบสร้างระบบตรวจสอบคุณภาพการฉนวนแบบไม่ทำลายของสายเคเบิลด้วยวิธีการคลื่นจร คือการพัฒนาส่วนประกอบหลัก 2 ส่วนของระบบ ให้สามารถทำการตรวจหาตำแหน่งผิดพร่องบนสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน และประเมินความเสียหายตำแหน่งที่เกิดความผิดพร่องนั้น ดังนั้นเพื่อตรวจสอบผลการออกแบบและประกอบสร้างระบบตรวจสอบคุณภาพการฉนวนแบบไม่ทำลายของสายเคเบิลด้วยวิธีการคลื่นจร ว่าได้ผลตามที่ตั้งเป้าหมายไว้หรือไม่ จึงต้องมีการทดสอบโดยใช้สายเคเบิลที่มีความผิดพร่องแบบต่างๆ เพื่อประเมินหาตำแหน่งผิดพร่องและความเสียหายที่เกิดขึ้น โดยการทดสอบนี้จะทำขึ้นภายในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งมีรายละเอียดการทดสอบดังนี้

1. การทดสอบส่วนแหล่งกำเนิดสัญญาณพัลส์กับส่วนรับสัญญาณ
2. การทดสอบส่วนประมวลผล

จากขอบเขตในการทำวิทยานิพนธ์เรื่องนี้ ได้กำหนดเงื่อนไขเพื่อที่จะพัฒนาระบบตรวจสอบคุณภาพการฉนวนแบบไม่ทำลายของสายเคเบิลด้วยวิธีการคลื่นจร โดยในการทดสอบจะกำหนดตัวแปรควบคุมดังต่อไปนี้

1. สายเคเบิลชนิด RG-58A/U จะถูกนำมาใช้แทนสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน ซึ่งเป็นสายเคเบิลที่มีลักษณะเป็นสายแบบโคแอกเชียลเหมือนกับสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน
2. สายเคเบิลชนิด RG-58A/U ที่นำมาใช้นี้จะมีความยาวรวมไม่เกิน 300 เมตร
3. ตำแหน่งผิดพร่องจะถูกจำลองโดยใช้ Terminal ขนาดต่างๆ สายเคเบิล RG-11/U และสายเคเบิลเจาะรูบรรจุด้วยสำลีสบูบน้ำ

#### 4.1 วิธีการทดสอบ

##### 4.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

ในการทดสอบเครื่องมือต้นแบบนี้ จะใช้อุปกรณ์ที่แสดงดังรูปที่ 4.1 ซึ่งประกอบไปด้วย

1. เครื่องต้นแบบสำหรับสร้างคลื่นจรแรงดันที่ออกแบบและประกอบสร้างขึ้น
2. ดิจิตอลออสซิลโลสโคป Lecroy รุ่น waveRunner 6050A ซึ่งมีอัตราการสุ่ม

ตัวอย่างเท่ากับ 5 Gs/s และความถี่ 500 MHz

3. สายเคเบิลชนิด RG-58A/U Amphenol จำนวน 3 เส้น

สายเคเบิลเส้นที่ 1 มีความยาวเฉลี่ยเท่ากับ 99.56 เมตร ขนาด 68.05 โอห์ม

สายเคเบิลเส้นที่ 2 มีความยาวเฉลี่ยเท่ากับ 99.54 เมตร ขนาด 68.81 โอห์ม

สายเคเบิลเส้นที่ 3 มีความยาวเฉลี่ยเท่ากับ 99.53 เมตร ขนาด 72.66 โอห์ม

ผลการวัดความยาวและค่าเสิร์จจิมพีแดนซ์ของสายเคเบิลแต่ละเส้นแสดงไว้

ที่ภาคผนวก ค

4. สายเคเบิลชนิด RG-11/U 75 โอห์ม ยาว 12.5 เมตร และหัวต่อสายแบบต่างๆ

Terminal 50 โอห์ม ค่าความต้านทานที่วัดได้จริงมีค่าเท่ากับ 52.07 โอห์ม

Terminal 75 โอห์ม ค่าความต้านทานที่วัดได้จริงมีค่าเท่ากับ 77.03 โอห์ม

5. คอมพิวเตอร์ BENQ Joybook S32 สำหรับใช้วิเคราะห์ข้อมูล จากโปรแกรม  
ส่วนประมวลผลที่ได้พัฒนาขึ้น



รูปที่ 4.1 อุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในการทดสอบ

การต่ออุปกรณ์เพื่อที่จะทดสอบสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 การจัดอุปกรณ์ต่างๆเพื่อใช้ในการทดสอบ

## 4.2 การทดสอบ

### 4.2.1 การทดสอบส่วนแหล่งกำเนิดสัญญาณพัลส์กับส่วนรับสัญญาณ

ในส่วนนี้จะแบ่งการทดสอบออกเป็น 7 แบบด้วยกันดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 การทดสอบแหล่งกำเนิดสัญญาณพัลส์กับส่วนรับสัญญาณ

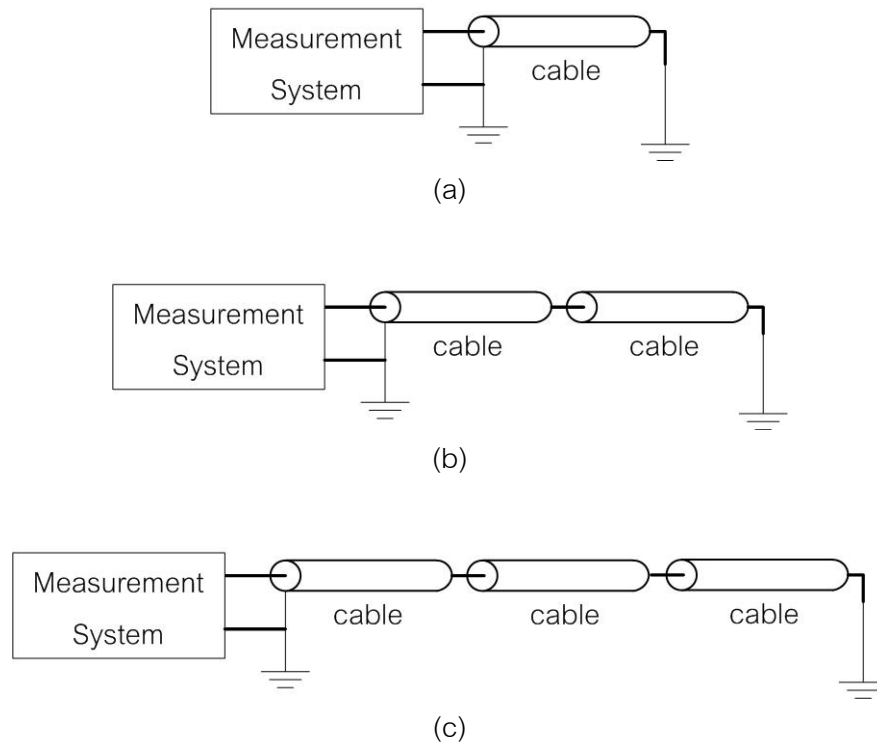
แบบการทดสอบ	การทดสอบ
1. ลัดวงจร(Short circuit)ที่ตำแหน่งปลายสาย	1.1 สายเคเบิล RG-58A/U ยาว 99.56 เมตร
	1.2 สายเคเบิล RG-58A/U ยาว 199.1 เมตร
	1.3 สายเคเบิล RG-58A/U ยาว 298.63 เมตร
2. เปิดวงจร(Open circuit)ที่ตำแหน่งปลายสาย	2.1 สายเคเบิล RG-58A/U ยาว 98.5 เมตร
	2.2 สายเคเบิล RG-58A/U ยาว 199.1 เมตร
	2.3 สายเคเบิล RG-58A/U ยาว 298.63 เมตร
3. Terminal 50 โอห์มที่ตำแหน่งปลายสาย	3.1 สายเคเบิล RG-58A/U ยาว 99.56 เมตร
	3.2 สายเคเบิล RG-58A/U ยาว 199.1 เมตร
	3.3 สายเคเบิล RG-58A/U ยาว 298.63 เมตร

4. Terminal 75 โห้หมที่ตำแหน่งปลายสาย	4.1 สายเคเบิล RG-58A/U ยาว 99.56 เมตร
	4.2 สายเคเบิล RG-58A/U ยาว 199.1 เมตร
	4.3 สายเคเบิล RG-58A/U ยาว 298.63 เมตร
5. การจำลองการลัดวงจรแบบมีความต้านทาน โดยการเจาะรูและบรรจุด้วยสำลีชุบน้ำ	5.1 สายเคเบิลยาว 199.1 เมตร ผิดพ่วงที่ 99.56 เมตรจากต้นสาย
	5.2 สายเคเบิลยาว 298.63 เมตร ผิดพ่วงที่ 99.56 เมตรจากต้นสาย
	5.3 สายเคเบิลยาว 298.63 เมตร ผิดพ่วงที่ 199.1 เมตรจากต้นสาย
6. สายเคเบิล RG-11/U ยาว 12.5 เมตร	6.1 สายเคเบิลยาว 199.1 เมตร ผิดพ่วงที่ 99.56 เมตรจากต้นสาย
	6.2 สายเคเบิลยาว 298.63 เมตร ผิดพ่วงที่ 199.1 เมตรจากต้นสาย
7. Terminal 50 และ 75 โห้หมต่อขนานกับสายเคเบิล	7.1 สายเคเบิลยาว 298.63 เมตร Terminal 50 โห้หมต่อขนานที่ 99.56 เมตรจากต้นสาย
	7.2 สายเคเบิลยาว 298.63 เมตร Terminal 50 โห้หมต่อขนานที่ 199.1 เมตรจากต้นสาย
	7.3 สายเคเบิลยาว 298.63 เมตร Terminal 75 โห้หมต่อขนานที่ 199.1 เมตรจากต้นสาย
	7.4 สายเคเบิลยาว 298.63 เมตร Terminal 75 โห้หมต่อขนานที่ 298.63 เมตรจากต้นสาย

เนื่องจากสายเคเบิลที่นำมาใช้มีฉนวนเป็นแบบพอลิเอทิลีน(PE) ดังนั้นการทดสอบทั้ง 7 แบบนี้ จะกำหนดความเร็วของคลื่นจรที่เคลื่อนที่บนสายเคเบิลตามตารางที่ 2.1 ( $\epsilon_r=2.25$ ) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 200 เมตรต่อไมโครวินาที

#### 4.2.1.1 ลัดวงจร(Short circuit)ที่ตำแหน่งปลายสาย

การทดสอบในกรณีนี้ จะจัดวางอุปกรณ์ในการทดสอบดังรูปที่ 4.3 และรูปคลื่นจรที่ได้จากการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.4

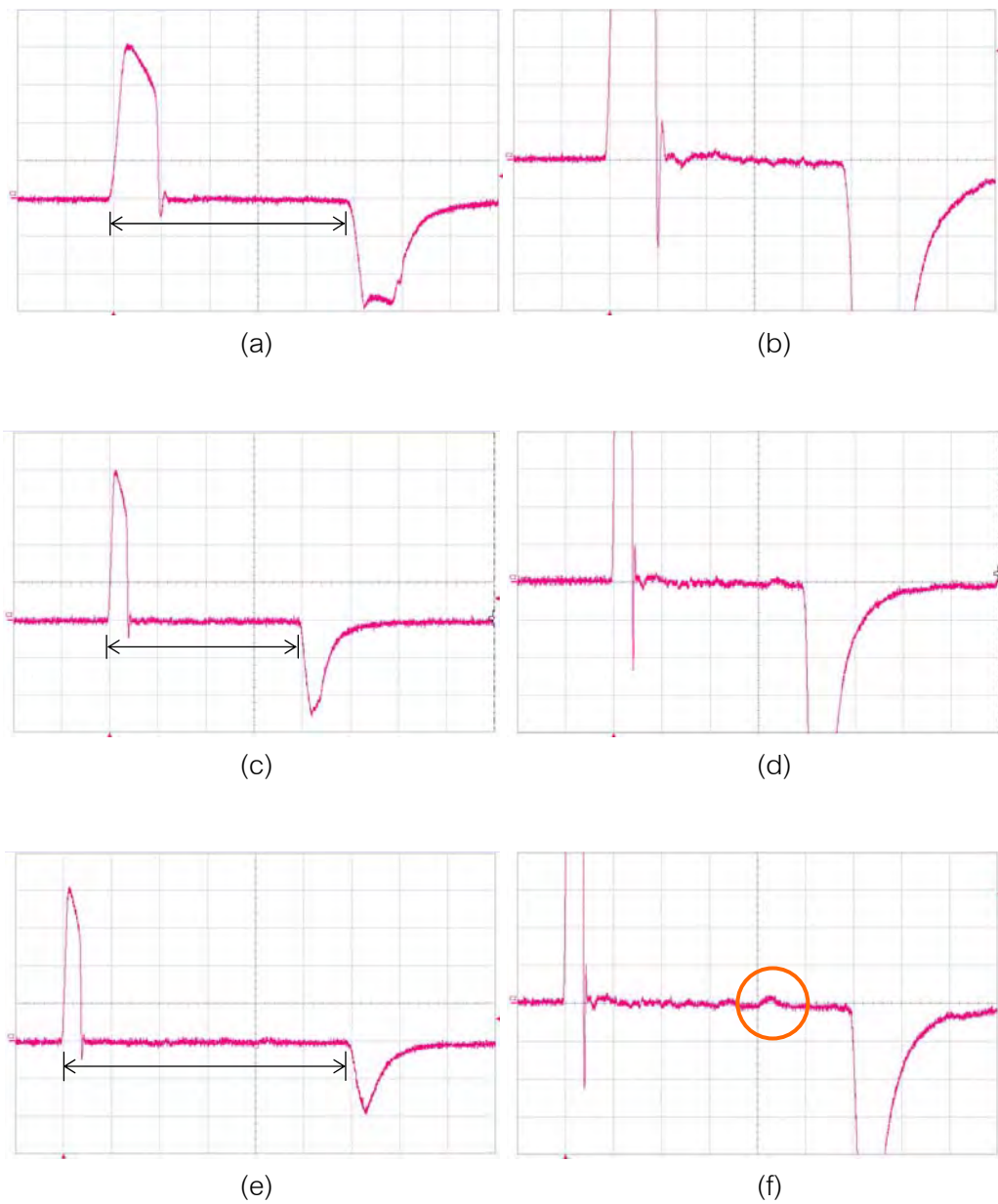


รูปที่ 4.3 วงจรทดสอบแบบลัดวงจรที่ตำแหน่งปลายสาย

(a) สายเคเบิลยาว 99.56 เมตร

(b) สายเคเบิลยาว 199.1 เมตร

(c) สายเคเบิลยาว 298.63 เมตร



รูปที่ 4.4 คลื่นจรรยาจากการทดสอบแบบลัดวงจรที่ตำแหน่งปลายสาย

(a) สายเคเบิลยาว 99.56 เมตร (100V/div,200ns/div)

(b) สายเคเบิลยาว 99.56 เมตร (20V/div,200ns/div)

(c) สายเคเบิลยาว 199.1 เมตร (100V/div,500ns/div)

(d) สายเคเบิลยาว 199.1 เมตร (20V/div,500ns/div)

(e) สายเคเบิลยาว 298.63 เมตร (100V/div,500ns/div)

(f) สายเคเบิลยาว 298.63 เมตร (20V/div,500ns/div)

ระยะจากลูกคลื่นที่อยู่ติดกัน คือช่วงเวลาที่คลื่นจรสะท้อนไปและกลับมายังตำแหน่งต้นสาย จากรูปที่ 4.4 สามารถคำนวณหาความยาวของสายเคเบิลได้ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ความยาวสายเคเบิลที่คำนวณได้แบบลัดวงจรที่ปลายสาย

การทดสอบ	เวลาที่วัดได้ ( $\mu\text{sec}$ )	ความยาวที่ คำนวณได้(เมตร)	ความผิดพลาด (%)
สายเคเบิล RG-58A/U ยาว 99.56 เมตร	0.993	99.28	0.28
สายเคเบิล RG-58A/U ยาว 199.1 เมตร	1.984	198.4	0.35
สายเคเบิล RG-58A/U ยาว 298.63 เมตร	2.97	297	0.55

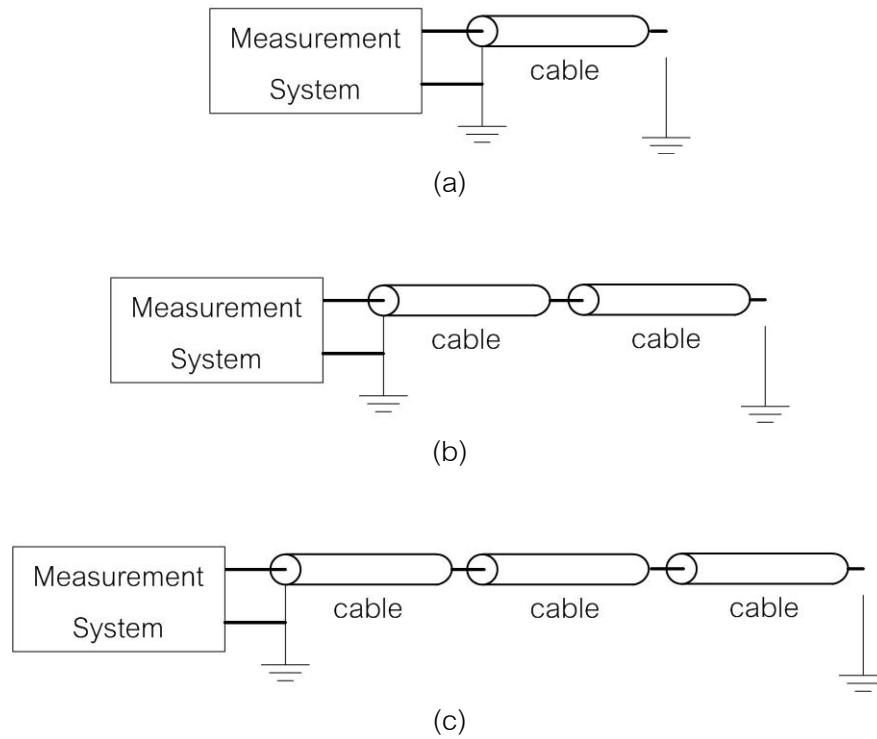
จากรูปที่ 4.4 จะเห็นว่าการสะท้อนของคลื่นจรกลับมายังตำแหน่งต้นสายจะได้ลักษณะเป็นคลื่นจรแรงดันขั้วลบ เนื่องจากที่ปลายสายถูกลัดวงจรไว้ ดังนั้นค่าคงที่การสะท้อนที่ตำแหน่งปลายสายจึงมีค่าเท่ากับ -1 ส่งผลให้คลื่นจรแรงดันที่สะท้อนกลับมายังตำแหน่งต้นสายเป็นคลื่นจรแรงดันขั้วลบ แต่จะสังเกตเห็นว่าขนาดของคลื่นจรแรงดันที่สะท้อนกลับมายังต้นสายนั้นมีขนาดลดลง ซึ่งก็มีสาเหตุมาจากการสูญเสียภายในสายเคเบิล และค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งกำเนิดที่ได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก

จากรูปที่ 4.4(f) จะสังเกตเห็นว่ามีลูกคลื่นจรสะท้อนกลับขนาดเล็กอยู่ระหว่างคลื่นจรด้านเข้ากับคลื่นจรที่สะท้อนกลับมาจากตำแหน่งปลายสาย ซึ่งจากการคำนวณหาตำแหน่งของลูกคลื่นจรสะท้อนกลับขนาดเล็ก พบว่ามีตำแหน่งอยู่ที่ประมาณ 200 เมตรจากต้นสาย ซึ่งตรงกับตำแหน่งที่ต่อสายเคเบิลเส้นที่ 2 กับ 3 เข้าด้วยกัน โดยคลื่นจรแรงดันนั้นมีลักษณะเป็นคลื่นจรแรงดันขั้วบวก ซึ่งเป็นลักษณะของคลื่นจรที่เดินทางอยู่บนสายเคเบิลที่มีค่าเสรีจิมพีแดนซ์น้อยกว่าไปกระทบกับสายเคเบิลที่มีค่าเสรีจิมพีแดนซ์มากกว่า และเมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลของสายเคเบิลเส้นที่ 2 ที่มีค่าเสรีจิมพีแดนซ์เป็น 68.81 โอห์ม กับสายเคเบิลเส้นที่ 3 ที่มีค่าเสรีจิมพีแดนซ์เป็น 72.66 โอห์ม ซึ่งจะพบว่าคลื่นจรเดินทางจากสายเคเบิลเส้นที่มีค่าเสรีจิมพีแดนซ์น้อยกว่าไปยังสายเคเบิลเส้นที่มีค่าเสรีจิมพีแดนซ์มากกว่าจริง

จากการทดสอบในลักษณะนี้ เราจะสามารถตรวจสอบหาตำแหน่งที่เกิดการลัดวงจรบนสายเคเบิลแรงสูงได้ดินได้ โดยดูลักษณะรูปคลื่นจรแรงดันสะท้อนกลับ จะมีลักษณะเป็นแรงดันขั้วลบ

#### 4.2.1.2 เปิดวงจร(Open circuit)ที่ตำแหน่งปลายสาย

การทดสอบในกรณีนี้ จะจัดวางอุปกรณ์ในการทดสอบดังรูปที่ 4.5 และรูปคลื่นจรที่ได้จากการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.6



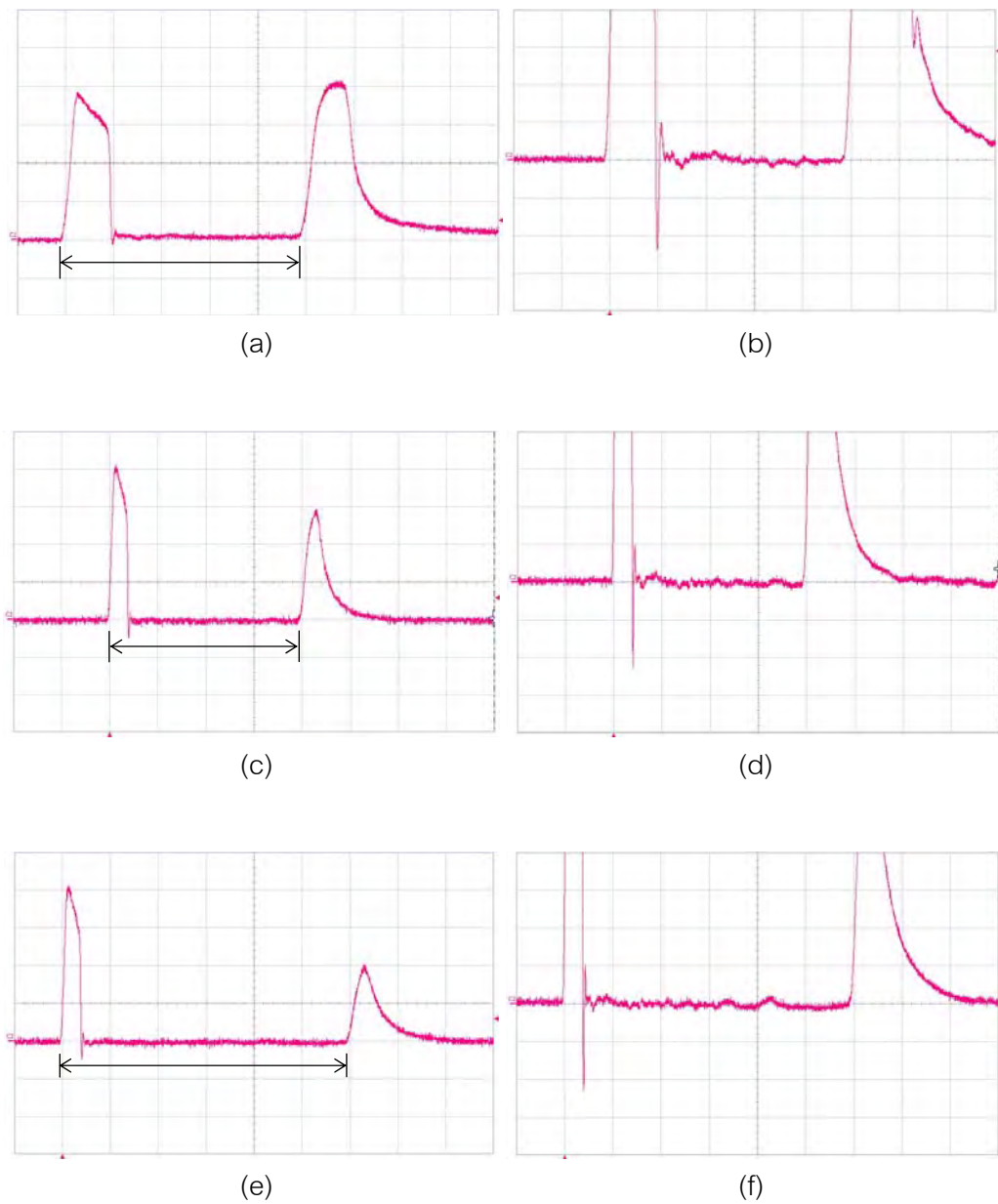
รูปที่ 4.5. วงจรทดสอบแบบเปิดวงจรที่ตำแหน่งปลายสาย

(a) สายเคเบิลยาว 99.56 เมตร

(b) สายเคเบิลยาว 199.1 เมตร

(c) สายเคเบิลยาว 298.63 เมตร





รูปที่ 4.6 คลื่นจรจากการทดสอบแบบเปิดวงจรที่ตำแหน่งปลายสาย

(a) สายเคเบิลยาว 99.56 เมตร (100V/div,200ns/div)

(b) สายเคเบิลยาว 99.56 เมตร (20V/div,200ns/div)

(c) สายเคเบิลยาว 199.1 เมตร (100V/div,500ns/div)

(d) สายเคเบิลยาว 199.1 เมตร (20V/div,500ns/div)

(e) สายเคเบิลยาว 298.63 เมตร (100V/div,500ns/div)

(f) สายเคเบิลยาว 298.63 เมตร (20V/div,500ns/div)

ระยะจากลูกคลื่นที่อยู่ติดกัน คือช่วงเวลาที่คลื่นจรสะท้อนไปและกลับมายังตำแหน่งต้นสาย จากรูปที่ 4.6 สามารถคำนวณหาความยาวของสายเคเบิลได้ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ความยาวสายเคเบิลที่คำนวณได้แบบเปิดวงจรที่ปลายสาย

การทดสอบ	เวลาที่วัดได้ ( $\mu\text{sec}$ )	ความยาวที่ คำนวณได้(เมตร)	ความผิดพลาด (%)
สายเคเบิล RG-58A/U ยาว 99.56 เมตร	0.993	99.32	0.24
สายเคเบิล RG-58A/U ยาว 199.1 เมตร	1.998	199.8	0.35
สายเคเบิล RG-58A/U ยาว 298.63 เมตร	2.97	297	0.55

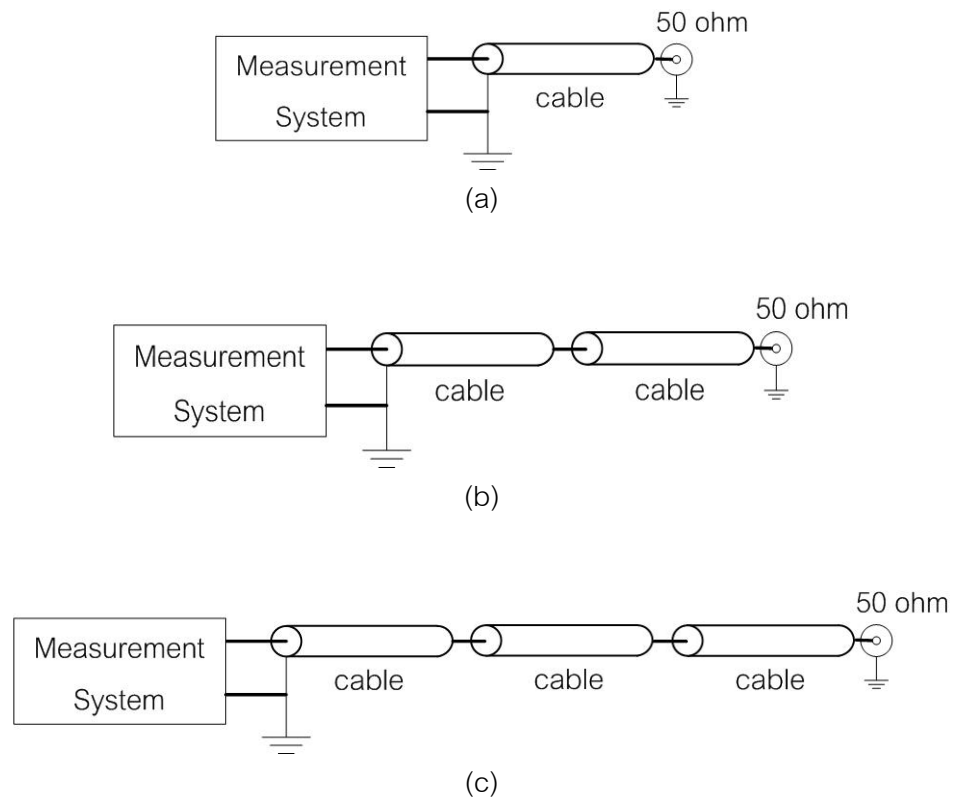
จากรูปที่ 4.6 จะเห็นว่าการสะท้อนของคลื่นจรถลับมายังตำแหน่งต้นสายจะได้ลักษณะเป็นคลื่นจรแรงดันขั้วบวก เนื่องจากที่ปลายสายถูกเปิดวงจรไว้ ซึ่งค่าคงที่การสะท้อนที่ตำแหน่งปลายสายจะมีค่าเท่ากับ 1 ส่งผลให้คลื่นจรแรงดันที่สะท้อนกลับมาที่ตำแหน่งต้นสายเป็นคลื่นจรแรงดันขั้วบวก โดยที่ขนาดของคลื่นจรแรงดันมีขนาดลดลงเนื่องจากการลดทอนภายในสายเคเบิล และค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งกำเนิดดังที่ได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก

จากการทดสอบแบบเปิดวงจรนี้ จะสามารถนำมาทดสอบหาความยาวของสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน หรือตำแหน่งที่สายเคเบิลแรงสูงใต้ดินขาดออกจากกันได้ ซึ่งเป็นความเสียหายของสายเคเบิลที่อาจเกิดจากการติดตั้ง หรืออุบัติเหตุต่างๆ

อีกทั้งการทดสอบแบบเปิดวงจรนี้ ยังสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการทดสอบสายเคเบิลภายในระบบไฟฟ้า เพื่อวิเคราะห์คุณภาพของสายเคเบิลได้ โดยในขั้นตอนแรกจะต้องปลดสายเคเบิลออกจากระบบก่อน แล้วทำการตรวจวัดสายเคเบิลใหม่ที่ติดตั้งเข้าไปในระบบเพื่อหาค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของฉนวนของสายเคเบิล และกลับมาตรวจวัดสายเคเบิลใหม่อีกครั้ง เมื่อสายเคเบิลถูกใช้งานไปเป็นระยะเวลาหนึ่ง เพื่อนำค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของฉนวนของสายเคเบิลทั้งสองมาเปรียบเทียบ และวิเคราะห์คุณภาพของสายเคเบิลนั้น โดยการวิเคราะห์นี้ได้เสนอแนะไว้ในบทที่ 5 เพื่อใช้เป็นแนวทางในการศึกษาต่อไป

### 4.2.1.3 Terminal 50 โอห์มที่ตำแหน่งปลายสาย

การทดสอบในกรณีนี้ จะจัดวางอุปกรณ์ในการทดสอบดังรูปที่ 4.7 และรูปคลื่นจรรถที่ได้จากการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.8

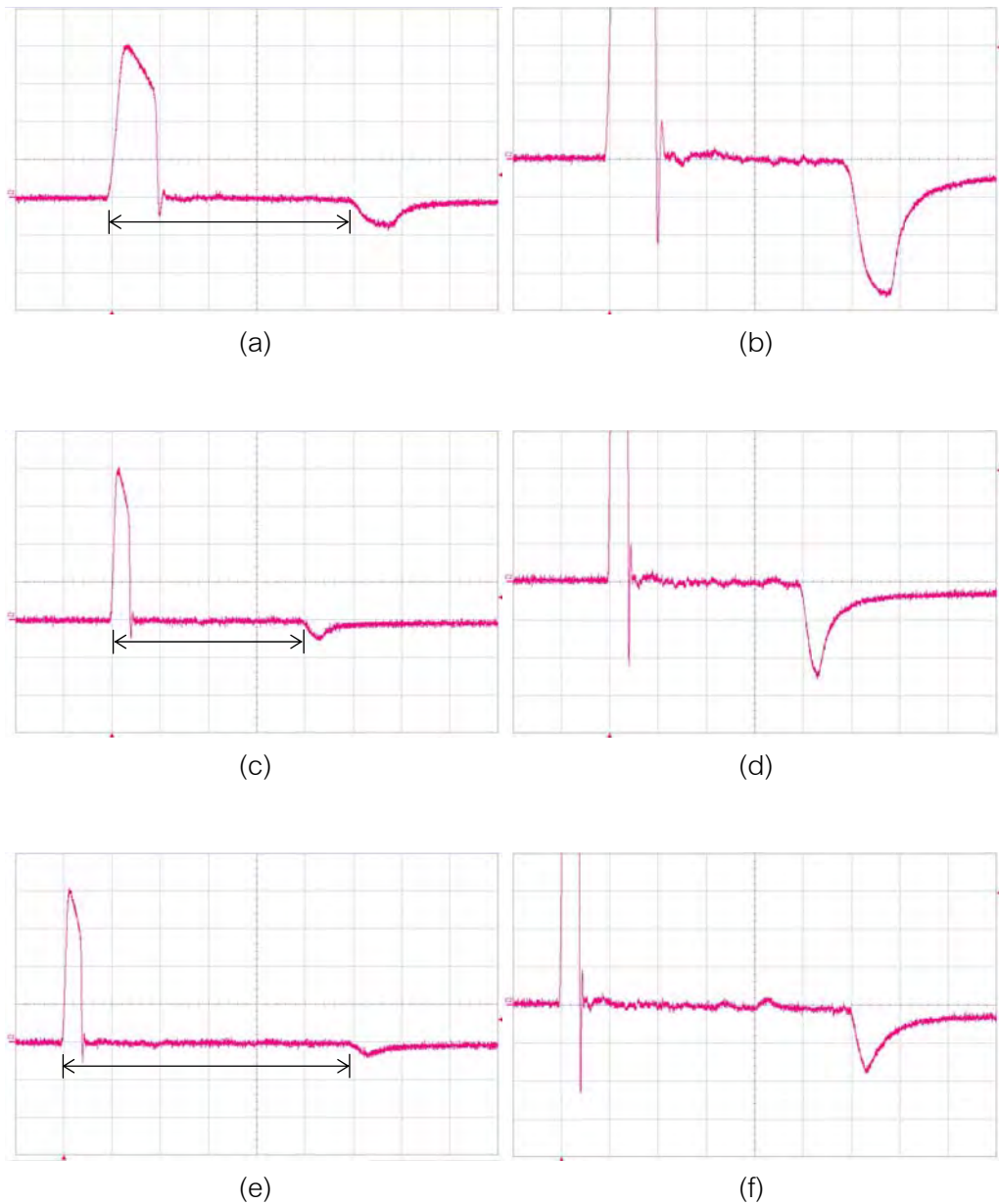


รูปที่ 4.7 วงจรทดสอบแบบ Terminal 50 โอห์มที่ตำแหน่งปลายสาย

(a) สายเคเบิลยาว 99.56 เมตร

(b) สายเคเบิลยาว 199.1 เมตร

(c) สายเคเบิลยาว 298.63 เมตร



รูปที่ 4.8 คลื่นจรรยาจากการทดสอบแบบ Terminal 50 โอห์มที่ตำแหน่งปลายสาย

- (a) สายเคเบิลยาว 99.56 เมตร (100V/div,200ns/div)
- (b) สายเคเบิลยาว 99.56 เมตร (20V/div,200ns/div)
- (c) สายเคเบิลยาว 199.1 เมตร (100V/div,500ns/div)
- (d) สายเคเบิลยาว 199.1 เมตร (20V/div,500ns/div)
- (e) สายเคเบิลยาว 298.63 เมตร (100V/div,500ns/div)
- (f) สายเคเบิลยาว 298.63 เมตร (20V/div,500ns/div)

ระยะจากลูกคลื่นที่อยู่ติดกัน คือช่วงเวลาที่คลื่นจรสะท้อนไปและกลับมายังตำแหน่งต้นสาย จากรูปที่ 4.8 สามารถคำนวณหาความยาวของสายเคเบิลได้ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ความยาวสายเคเบิลที่คำนวณได้แบบ Terminal 50 โอห์มที่ปลายสาย

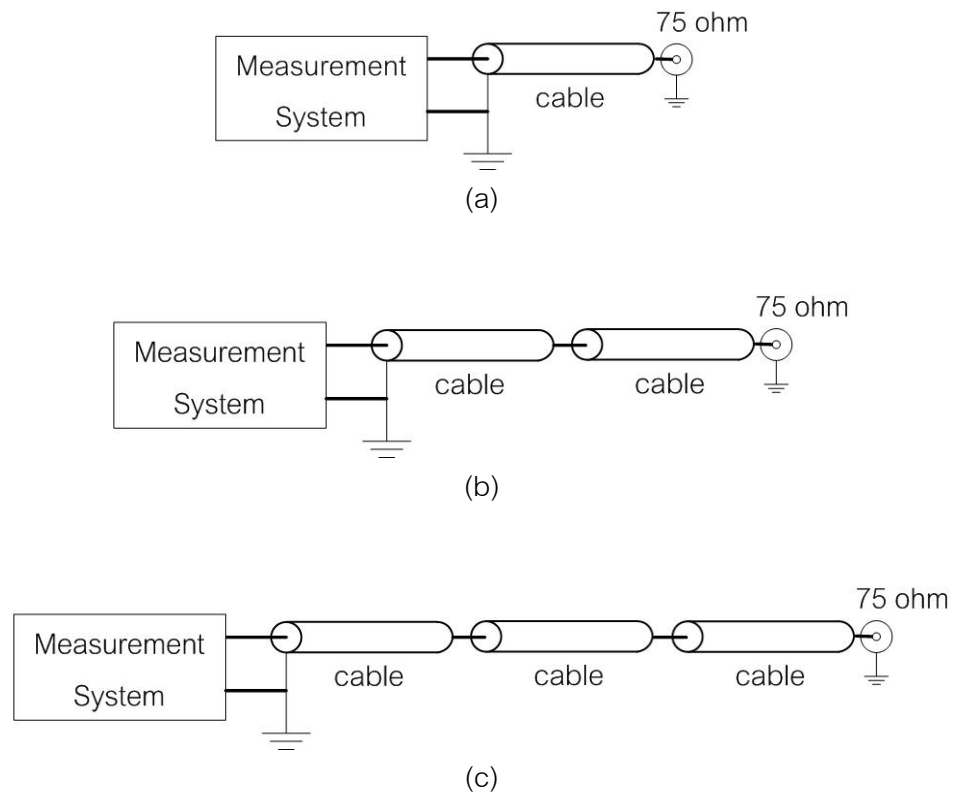
การทดสอบ	เวลาที่วัดได้ ( $\mu\text{sec}$ )	ความยาวที่ คำนวณได้(เมตร)	ความผิดพลาด (%)
สายเคเบิล RG-58A/U ยาว 99.56 เมตร	0.998	99.8	0.24
สายเคเบิล RG-58A/U ยาว 199.1 เมตร	1.984	198.4	0.35
สายเคเบิล RG-58A/U ยาว 298.63 เมตร	2.97	297	0.55

จากรูปที่ 4.8 จะเห็นว่าการสะท้อนของคลื่นจรกลับมายังตำแหน่งต้นสายจะมีลักษณะเป็นคลื่นจรแรงดันชั่วลบ เนื่องจากที่ปลายสายถูกต่อกับ Terminal 50 โอห์ม ซึ่งในการทดสอบแต่ละแบบจะมีค่าคงที่การสะท้อนที่ตำแหน่งปลายสายแตกต่างกัน โดยมีค่าเท่ากับ -0.133 สำหรับสายเคเบิลยาว 99.56 เมตร -0.138 สำหรับสายเคเบิลยาว 199.1 เมตร และ -0.165 สำหรับสายเคเบิลยาว 298.63 เมตร ซึ่งส่งผลให้คลื่นจรแรงดันที่สะท้อนกลับมายังตำแหน่งต้นสายเป็นคลื่นจรแรงดันชั่วลบและมีขนาดแรงดันที่น้อยลงเมื่อเทียบกับขนาดแรงดันด้านเข้า อีกทั้งยังมีผลเนื่องจากการลดทอนภายในสายเคเบิล และอิมพีแดนซ์ของแหล่งกำเนิดที่ทำให้ขนาดของคลื่นจรแรงดันสะท้อนกลับที่วัดได้มีขนาดลดลงอีกด้วย ดังที่ได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก

จากการทดสอบในลักษณะนี้ เปรียบเทียบได้กับสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินที่มีตำแหน่งผิดพร่องที่เกิดจากลัดวงจรด้วยค่าความต้านทานที่มีขนาดน้อยกว่าค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายเคเบิล

#### 4.2.1.4 Terminal 75 โอห์มที่ตำแหน่งปลายสาย

การทดสอบในกรณีนี้ จะจัดวางอุปกรณ์ในการทดสอบดังรูปที่ 4.9 และรูปคลื่นจรรยาที่ได้จากการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.10

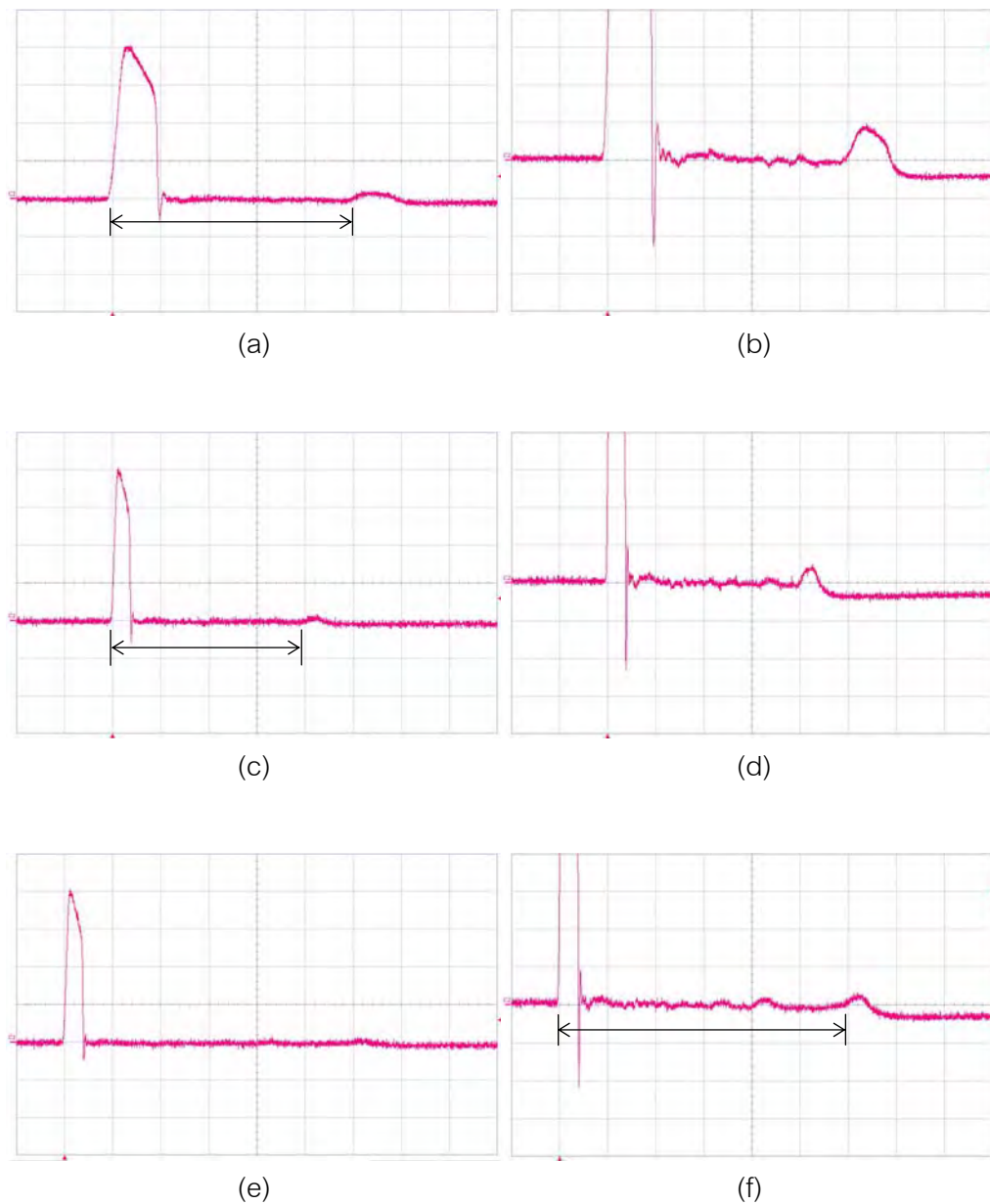


รูปที่ 4.9 วงจรทดสอบแบบ Terminal 75 โอห์มที่ตำแหน่งปลายสาย

(a) สายเคเบิลยาว 99.56 เมตร

(b) สายเคเบิลยาว 199.1 เมตร

(c) สายเคเบิลยาว 298.63 เมตร



รูปที่ 4.10 คลื่นจรรยาจากการทดสอบแบบ Terminal 75 โอห์มที่ตำแหน่งปลายสาย

- (a) สายเคเบิลยาว 99.56 เมตร (100V/div,200ns/div)
- (b) สายเคเบิลยาว 99.56 เมตร (20V/div,200ns/div)
- (c) สายเคเบิลยาว 199.1 เมตร (100V/div,500ns/div)
- (d) สายเคเบิลยาว 199.1 เมตร (20V/div,500ns/div)
- (e) สายเคเบิลยาว 298.63 เมตร (100V/div,500ns/div)
- (f) สายเคเบิลยาว 298.63 เมตร (20V/div,500ns/div)

ระยะจากลูกคลื่นที่อยู่ติดกัน คือช่วงเวลาที่คลื่นจรสะท้อนไปและกลับมายังตำแหน่งต้นสาย จากรูปที่ 4.10 สามารถคำนวณหาความยาวของสายเคเบิลได้ดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ความยาวสายเคเบิลที่คำนวณได้แบบ Terminal 75 โอห์มที่ปลายสาย

การทดสอบ	เวลาที่วัดได้ ( $\mu$ sec)	ความยาวที่ คำนวณได้(เมตร)	ความผิดพลาด (%)
สายเคเบิล RG-58A/U ยาว 99.56 เมตร	0.998	99.8	0.24
สายเคเบิล RG-58A/U ยาว 199.1 เมตร	1.998	199.8	0.35
สายเคเบิล RG-58A/U ยาว 298.63 เมตร	3.003	300.3	0.56

จากรูปที่ 4.10 จะเห็นว่าการสะท้อนของคลื่นจรกลับมายังตำแหน่งต้นสายจะได้ลักษณะเป็นคลื่นจรแรงดันขั้วบวก เนื่องจากที่ปลายสายถูกต่อกับ Terminal 75 โอห์ม ซึ่งในการทดสอบแต่ละแบบจะมีค่าคงที่การสะท้อนที่ตำแหน่งปลายสายแตกต่างกัน โดยมีค่าเท่ากับ 0.062 สำหรับสายเคเบิลยาว 99.56 เมตร 0.056 สำหรับสายเคเบิลยาว 199.1 เมตร และ 0.029 สำหรับสายเคเบิลยาว 298.63 เมตร จึงส่งผลให้คลื่นจรแรงดันที่สะท้อนกลับมายังตำแหน่งต้นสายเป็นคลื่นจรแรงดันขั้วบวกและมีขนาดแรงดันที่น้อยลงเมื่อเทียบกับขนาดแรงดันด้านเข้า อีกทั้งยังมีผลเนื่องจากการลดทอนภายในสายเคเบิล และอิมพีแดนซ์ของแหล่งกำเนิดที่ทำให้ขนาดของคลื่นจรแรงดันสะท้อนกลับที่วัดได้มีขนาดลดลงอีกด้วย ดังที่ได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก

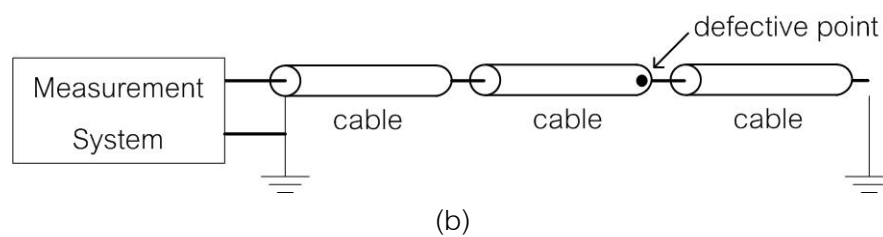
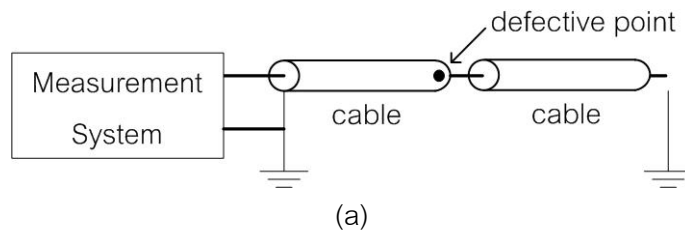
จากการทดสอบในลักษณะนี้ เปรียบเทียบได้กับสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินที่มีตำแหน่งผิดพร่องที่เกิดจากลัดวงจรด้วยค่าความต้านที่มีขนาดมากกว่าค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายเคเบิล



#### 4.2.1.5 การจำลองการลัดวงจรแบบมีความต้านทาน โดยการเจาะรูและบรรจุด้วยสำลีชุบน้ำ

น้ำ

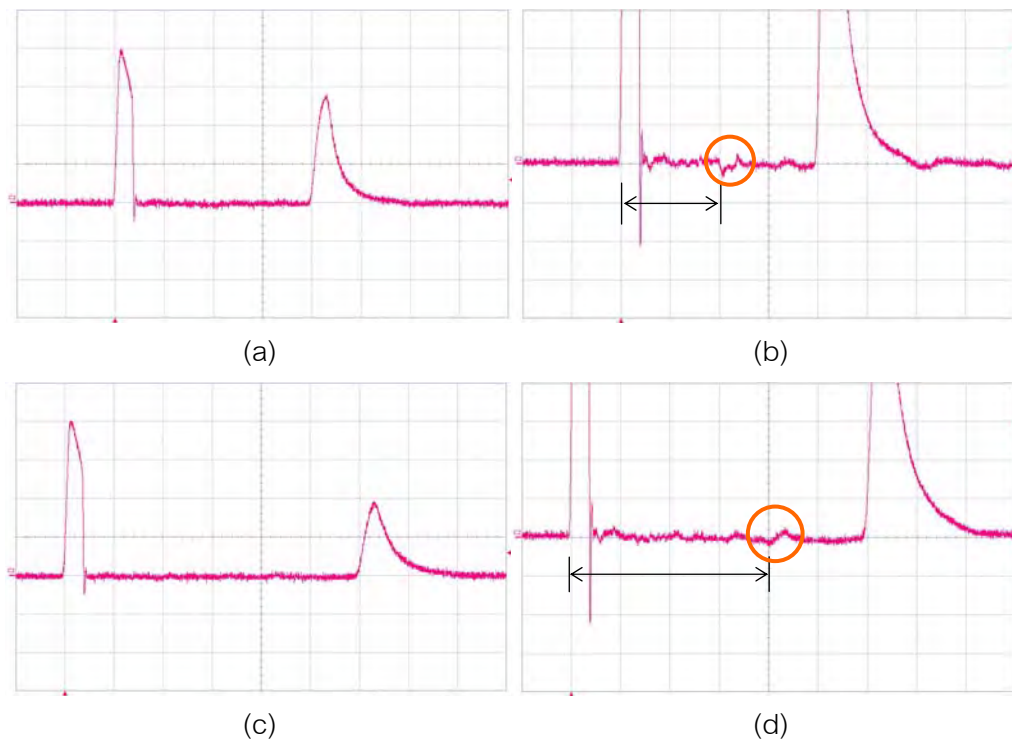
การทดสอบในกรณีนี้ จะจัดวางอุปกรณ์ในการทดสอบดังรูปที่ 4.11 และรูปคลื่นจรรถที่ได้จากการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.11 วงจรทดสอบการจำลองการลัดวงจรแบบมีความต้านทาน

(a) สายเคเบิลยาว 199.1 เมตร ผิดพ่วงที่ 99.56 เมตรจากต้นสาย

(b) สายเคเบิลยาว 298.63 เมตร ผิดพ่วงที่ 199.1 เมตรจากต้นสาย



- รูปที่ 4.12 คลื่นจรจากการทดสอบการจำลองการลัดวงจรแบบมีความต้านทาน
- (a) สายเคเบิลยาว 199.1 เมตร ผิดพ่วงที่ 99.56 เมตรจากต้นสาย(100V/div,200ns/div)
- (b) สายเคเบิลยาว 199.1 เมตร ผิดพ่วงที่ 99.56 เมตรจากต้นสาย(20V/div,200ns/div)
- (c) สายเคเบิลยาว 298.63 เมตร ผิดพ่วงที่ 199.1 เมตรจากต้นสาย(100V/div,200ns/div)
- (d) สายเคเบิลยาว 298.63 เมตร ผิดพ่วงที่ 199.1 เมตรจากต้นสาย(20V/div,500ns/div)

ระยะจากลูกคลื่นที่อยู่ติดกัน คือช่วงเวลาที่คลื่นจรสะท้อนไปและกลับมายังตำแหน่งต้นสาย จากรูปที่ 4.12 สามารถคำนวณหาความยาวของสายเคเบิลได้ดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ความยาวสายเคเบิลที่คำนวณได้จากการจำลองการลัดวงจรแบบมีความต้านทาน

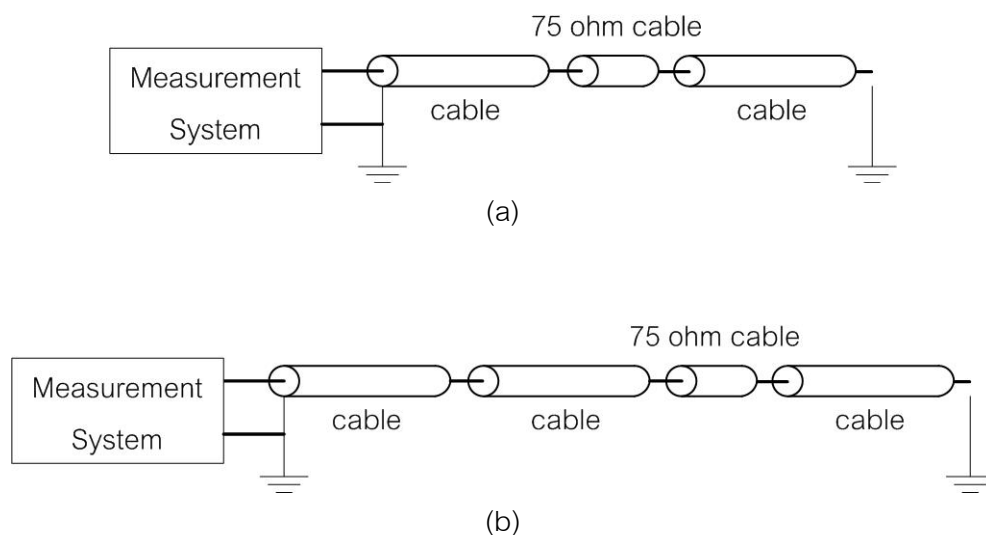
การทดสอบ	เวลาที่วัดได้ ( $\mu\text{sec}$ )	ความยาวที่คำนวณได้ (เมตร)	ความผิดพลาด (%)
สายเคเบิลยาว 199.1 เมตร ผิดพ่วงที่ 99.56 เมตรจากต้นสาย	0.998	99.8	0.24
สายเคเบิลยาว 298.63 เมตร ผิดพ่วงที่ 199.1 เมตรจากต้นสาย	2.00	200	0.45

จากรูปที่ 4.12(b) และ (d) จะเห็นว่าคลื่นจรที่สะท้อนกลับมายังตำแหน่งต้นสาย มีลักษณะเป็นคลื่นจรแรงดันขั้วลบซึ่งมีขนาดเล็ก ดังนั้นจึงสามารถวิเคราะห์ได้ว่า ที่ตำแหน่งเจาะรู และบรรจุด้วยสำลีชุบน้ำนี้มีค่าเสรีจิมพีแดนซ์น้อยกว่าค่าเสรีจิมพีแดนซ์ของสายเคเบิล ซึ่งก็เป็นไปตามความเป็นจริงที่ว่าสายเคเบิลที่มีความชื้นจะมีค่าความจุไฟฟ้ามากกว่าสายเคเบิลปกติ [24] เมื่อนำมาวิเคราะห์ด้วยสมการที่ (2.2) ก็พบว่าสายเคเบิลที่มีความชื้นจะมีค่าเสรีจิมพีแดนซ์น้อยกว่าสายเคเบิลปกติ ดังนั้นค่าคงที่การสะท้อนกลับที่ตำแหน่งเจาะรูและบรรจุด้วยสำลีชุบน้ำจึงมีค่าน้อยกว่า 0

ตำแหน่งที่เจาะรูและบรรจุด้วยสำลีชุบน้ำนี้ ก็เปรียบเทียบกับจุดผิดพร่องของสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินที่มีความชื้น หรือเกิดการลัดวงจรแบบมีความต้านทานขนาดเล็กกว่าค่าเสรีจิมพีแดนซ์ของสายเคเบิล

#### 4.2.1.6 สายเคเบิล RG-11/U 75 โอห์มยาว 12.5 เมตร

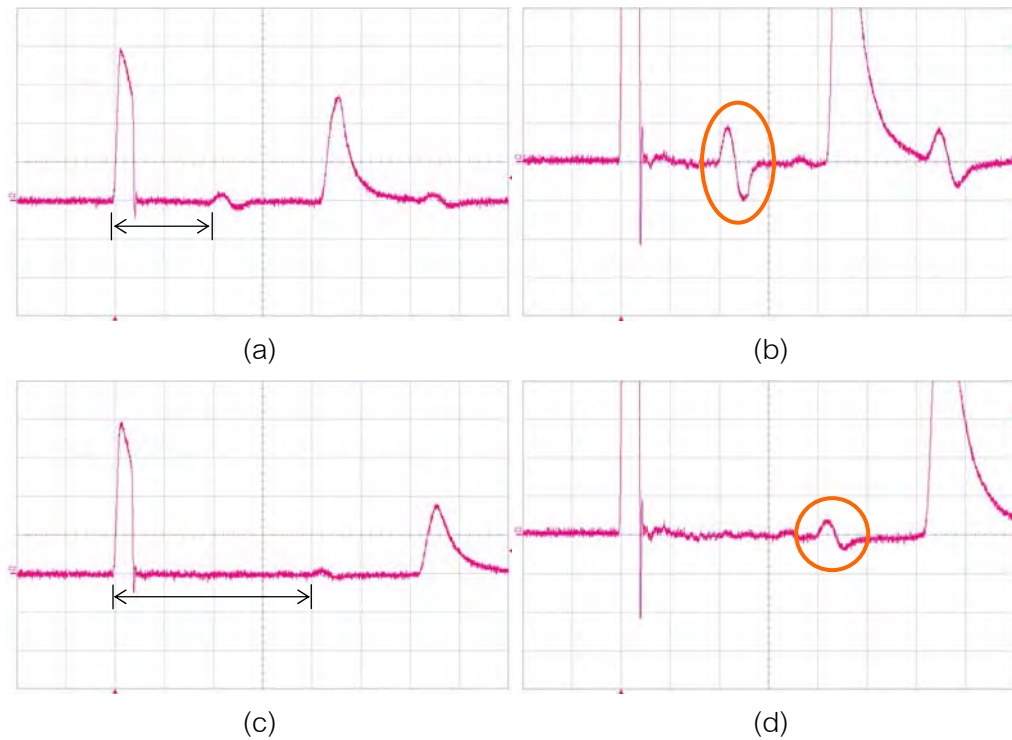
การทดสอบในกรณีนี้ จะจัดวางอุปกรณ์ในการทดสอบดังรูปที่ 4.13 และรูปคลื่นจรที่ได้จากการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.13 วงจรทดสอบแบบสายเคเบิล RG-11/U 75 โอห์มยาว 12.5 เมตร

(a) สายเคเบิลยาว 199.1 เมตร ผิดพร่องที่ 99.56 เมตรจากต้นสาย

(b) สายเคเบิลยาว 298.63 เมตร ผิดพร่องที่ 199.1 เมตรจากต้นสาย



- รูปที่ 4.14 คลื่นจรจากการทดสอบแบบสายเคเบิล RG-11/U 75 โอห์มยาว 12.5 เมตร
- (a) สายเคเบิลยาว 199.1 เมตร ผิดพ่วงที่ 99.56 เมตรจากต้นสาย(100V/div,200ns/div)
- (b) สายเคเบิลยาว 199.1 เมตร ผิดพ่วงที่ 99.56 เมตรจากต้นสาย(20V/div,200ns/div)
- (c) สายเคเบิลยาว 199.1 เมตร ผิดพ่วงที่ 199.1 เมตรจากต้นสาย(100V/div,200ns/div)
- (d) สายเคเบิลยาว 199.1 เมตร ผิดพ่วงที่ 199.1 เมตรจากต้นสาย(20V/div,500ns/div)

ระยะจากลูกคลื่นที่อยู่ติดกัน คือช่วงเวลาที่คลื่นจรสะท้อนไปและกลับมายังตำแหน่งต้นสาย จากรูปที่ 4.14 สามารถคำนวณหาความยาวของสายเคเบิลได้ดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ความยาวสายเคเบิลที่คำนวณได้แบบสายเคเบิล RG-11/U 75 โอห์มยาว 12.5 เมตร

การทดสอบ	เวลาที่วัดได้ ( $\mu\text{sec}$ )	ความยาวที่ คำนวณได้(เมตร)	ความผิดพลาด (%)
สายเคเบิลยาว 199.1 เมตร ผิดพ่วงที่ 99.56 เมตรจากต้นสาย	0.996	99.6	0.04
สายเคเบิลยาว 298.63 เมตร ผิดพ่วง ที่ 199.1 เมตรจากต้นสาย	1.998	199.8	0.35

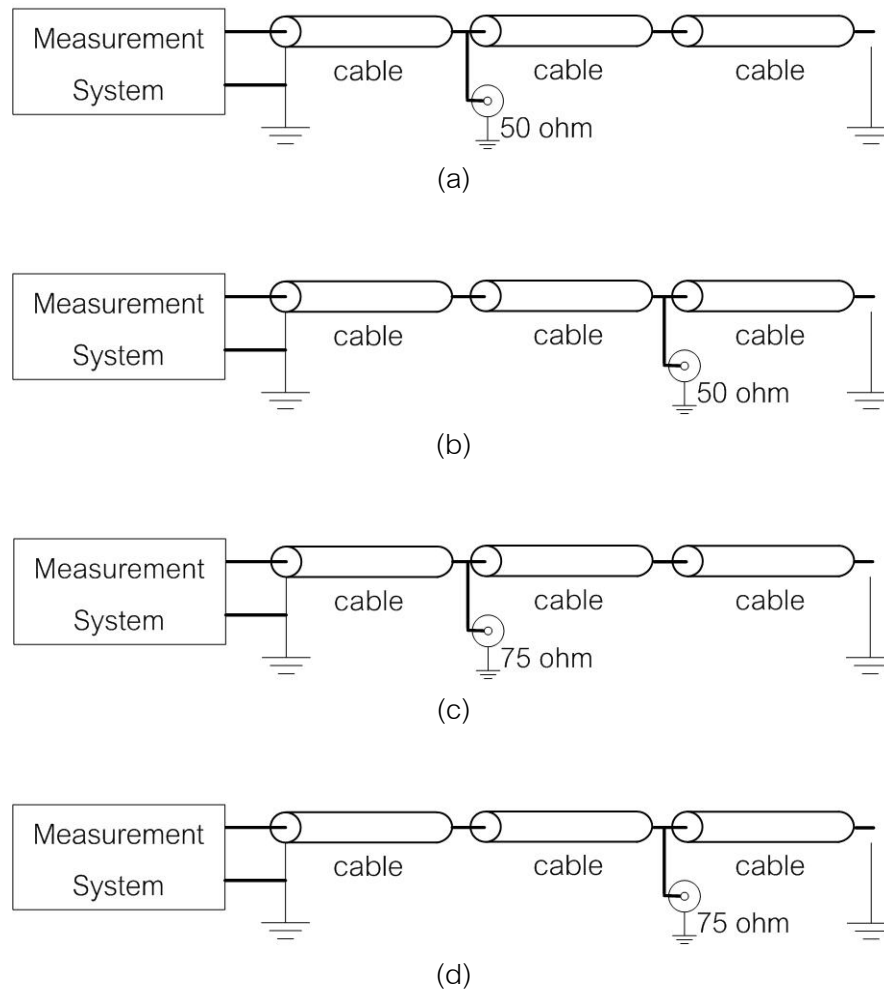
จากรูปที่ 4.14 ลักษณะของคลื่นจรที่สะท้อนกลับมาจากตำแหน่งสายเคเบิล RG-11/U จะเป็นคลื่นจรแรงดันชั่ววอกและต่อเนื่องด้วยคลื่นจรแรงดันชั่ววอบ เนื่องจากในตอนแรกคลื่นจรจะเคลื่อนที่จากต้นสายมากระทบกับสายเคเบิล RG-11/U ก่อน ซึ่งที่ตำแหน่งนี้จะมีค่าคงที่การสะท้อนเป็น 0.049 และค่าคงที่การส่งผ่านเป็น 1.049 โดยคลื่นจรส่วนหนึ่งจะถูกสะท้อนกลับไปยังต้นสายกลายเป็นคลื่นจรแรงดันชั่ววอก และคลื่นจรอีกส่วนหนึ่งจะผ่านไปสายเคเบิล RG-11/U แล้วไปสะท้อนกลับที่ตำแหน่งปลายสายเคเบิล RG-11/U ที่ต่ออยู่กับสายเคเบิล RG-58A/U อีกเส้นหนึ่ง ซึ่งมีค่าคงที่การสะท้อนเป็น -0.043 แล้วคลื่นจรที่สะท้อนกลับนี้ก็ย้อนกลับไปยังตำแหน่งต้นสายเคเบิล RG-11/U แล้วทะลุผ่านกลับไปยังต้นสายเคเบิล RG-58A/U เส้นแรกด้วยค่าคงที่การส่งผ่าน 0.95 ซึ่งก็คือคลื่นจรแรงดันชั่ววอบดังที่กล่าวไว้ข้างต้น

จากรูปที่ 4.14(b) และ (d) ลักษณะของคลื่นจรแรงดันสะท้อนกลับมาจากตำแหน่งสายเคเบิล RG-11/U จะมีค่าแตกต่างกัน โดยที่คลื่นจรแรงดันสะท้อนกลับในรูปที่ 4.14(b) จะมีขนาดใหญ่กว่าในรูปที่ 4.14(d) เนื่องจากคลื่นจรที่สะท้อนจากตำแหน่งผิพรวงที่ตำแหน่ง 200 เมตรจะเดินทางไกลกว่าที่ตำแหน่ง 100 เมตร จึงทำให้เกิดการลดทอนของคลื่นจรแรงดันมากกว่า ซึ่งการลดทอนภายในสายเคเบิลจะทำให้คลื่นจรแรงดันมีขนาดลดลง ดังที่ได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก

จากการทดสอบในลักษณะนี้ เปรียบเทียบได้กับสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินที่ช่วงความยาวหนึ่งได้รับความเสียหายในเชิงที่ทำให้ค่าเสิร์จจิมพีแดนซ์ของสายเคเบิลมีค่าเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม

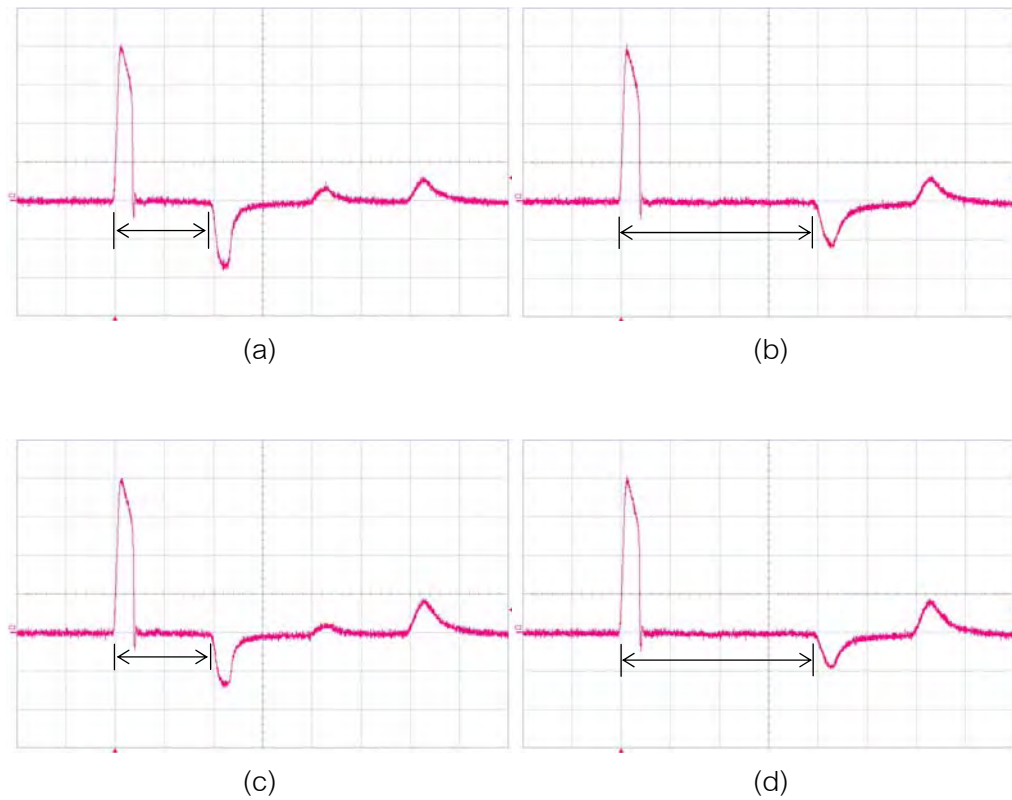
#### 4.2.1.7 Terminal 50 และ 75 โอห์ม ต่อขนานกับสายเคเบิล

การทดสอบในกรณีนี้ จะจัดวางอุปกรณ์ในการทดสอบดังรูปที่ 4.15 และรูปคลื่นจรรถที่ได้จากการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.15 วงจรทดสอบแบบ Terminal 50 และ 75 โอห์ม

- (a) สายเคเบิลยาว 298.63 เมตร Terminal 50 โอห์มต่อขนานที่ 99.56 เมตรจากต้นสาย
- (b) สายเคเบิลยาว 298.63 เมตร Terminal 50 โอห์มต่อขนานที่ 199.1 เมตรจากต้นสาย
- (c) สายเคเบิลยาว 298.63 เมตร Terminal 75 โอห์มต่อขนานที่ 99.56 เมตรจากต้นสาย
- (d) สายเคเบิลยาว 298.63 เมตร Terminal 75 โอห์มต่อขนานที่ 199.1 เมตรจากต้นสาย



รูปที่ 4.16 คลื่นจรจากการทดสอบแบบ Terminal 50 และ 75 โอห์ม

(a) สายเคเบิลยาว 298.63 เมตร Terminal 50 โอห์มต่อขนานที่ 99.56 เมตรจากต้นสาย  
(100V/div,200ns/div)

(b) สายเคเบิลยาว 298.63 เมตร Terminal 50 โอห์มต่อขนานที่ 199.1 เมตรจากต้นสาย  
(20V/div,200ns/div)

(c) สายเคเบิลยาว 298.63 เมตร Terminal 75 โอห์มต่อขนานที่ 99.56 เมตรจากต้นสาย  
(100V/div,200ns/div)

(d) สายเคเบิลยาว 298.63 เมตร Terminal 75 โอห์มต่อขนานที่ 199.1 เมตรจากต้นสาย  
(20V/div,500ns/div)

ระยะจากลูกคลื่นที่อยู่ติดกัน คือช่วงเวลาที่คลื่นจรสะท้อนไปและกลับมายังตำแหน่งต้นสาย จากรูปที่ 4.16 สามารถคำนวณหาความยาวของสายเคเบิลได้ดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ความยาวสายเคเบิลที่คำนวณได้แบบ Terminal 50 และ 75 โอห์ม ต่อขนานกับสายเคเบิล

การทดสอบ	เวลาที่วัดได้ ( $\mu\text{sec}$ )	ความยาวที่ คำนวณได้(เมตร)	ความ ผิดพลาด (%)
สายเคเบิลยาว 298.63 เมตร Terminal 50 โอห์มต่อขนานที่ 99.56 เมตรจากต้นสาย	0.992	99.2	0.36
สายเคเบิลยาว 298.63 เมตร Terminal 50 โอห์มต่อขนานที่ 199.1 เมตรจากต้นสาย	1.982	198.2	0.45
สายเคเบิลยาว 298.63 เมตร Terminal 75 โอห์มต่อขนานที่ 99.56 เมตรจากต้นสาย	0.992	99.2	0.36
สายเคเบิลยาว 298.63 เมตร Terminal 75 โอห์มต่อขนานที่ 199.1 เมตรจากต้นสาย	1.982	198.2	0.45

จากรูปที่ 4.16(a) คลื่นจรแรงดันสะท้อนกลับมีลักษณะเป็นคลื่นจรแรงดันขั้วลบ เนื่องจากการต่อ Terminal 50 โอห์มขนานกับสายเคเบิลจะทำให้คลื่นจรที่เคลื่อนที่มาถึงตำแหน่งนี้เห็นค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์รวมเท่ากับ 29.64 โอห์ม ซึ่งทำให้คลื่นจรสะท้อนกลับด้วยค่าคงที่การสะท้อนเท่ากับ -0.393

คลื่นจรแรงดันสะท้อนกลับที่ได้จากรูปที่ 4.16(b) คือ คลื่นจรที่เคลื่อนที่มาถึงตำแหน่งที่ Terminal 50 โอห์มต่อขนานกับสายเคเบิล(ค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์รวมเท่ากับ 30.33 โอห์ม) แล้วสะท้อนกลับด้วยค่าคงที่การสะท้อนเท่ากับ -0.388

ส่วนคลื่นจรแรงดันสะท้อนกลับที่ได้จากรูปที่ 4.16(c) มีลักษณะเป็นคลื่นจรแรงดันขั้วลบเช่นกัน เนื่องจากการต่อ Terminal 75 โอห์มขนานกับสายเคเบิลจะทำให้ค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์มีค่าเท่ากับ 36.34 โอห์มซึ่งทำให้คลื่นจรสะท้อนกลับด้วยค่าคงที่การสะท้อนเท่ากับ -0.304 ส่วนรูปที่ 4.16(d) ที่ตำแหน่งสะท้อนกลับนั้นจะมีค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์และค่าคงที่การสะท้อนเท่ากับ 37.39 โอห์ม และ -0.296 ตามลำดับ



จากรูปคลื่นจรแรงดันสะท้อนกลับที่ได้จะมีตำแหน่งของคลื่นจรแรงดันสะท้อนกลับที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของจุดที่ต่อขนาของ Terminal ส่วนขนาดของคลื่นจรแรงดันสะท้อนกลับที่แตกต่างกัน จะขึ้นอยู่กับค่าอิมพีแดนซ์ของ Terminal ที่มาต่อขนากับสายเคเบิล ซึ่งจะทำให้ค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์รวมของ Terminal กับสายเคเบิลมีค่าแตกต่างกัน

จากการทดสอบในลักษณะนี้ เปรียบเทียบได้กับตำแหน่งของจุดเชื่อมต่อสายที่เป็นแบบ T-joint หรือมีการต่อแยกสายเคเบิลออกไปเป็นหลายทาง ดังนั้นการใช้การวิเคราะห์ด้วยวิธีการสะท้อนของคลื่นจรแรงดันนี้ ก็สามารถที่จะตรวจสอบหาตำแหน่งจุดต่อแยกสายเคเบิลได้

#### 4.2.2 การทดสอบส่วนประมวลผล

ในส่วนนี้จะแบ่งการทดสอบออกเป็นสองส่วนด้วยกันคือ

1. ทดสอบส่วนโปรแกรมแบบผู้วิเคราะห์ทำการปรับตำแหน่งได้เอง(Manual program)

1.1 ทดสอบส่วนโปรแกรมคำนวณหาตำแหน่งผิดพร่อง

1.2 ทดสอบส่วนโปรแกรมคำนวณหาอัตราส่วนของค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ ณ ตำแหน่ง

ผิดพร่อง

2. ทดสอบส่วนโปรแกรมแบบอัตโนมัติ(Automatic program)

2.1 ทดสอบส่วนโปรแกรมคำนวณหาตำแหน่งผิดพร่อง

2.2 ทดสอบส่วนโปรแกรมคำนวณหาอัตราส่วนของค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ ณ ตำแหน่ง

ผิดพร่อง

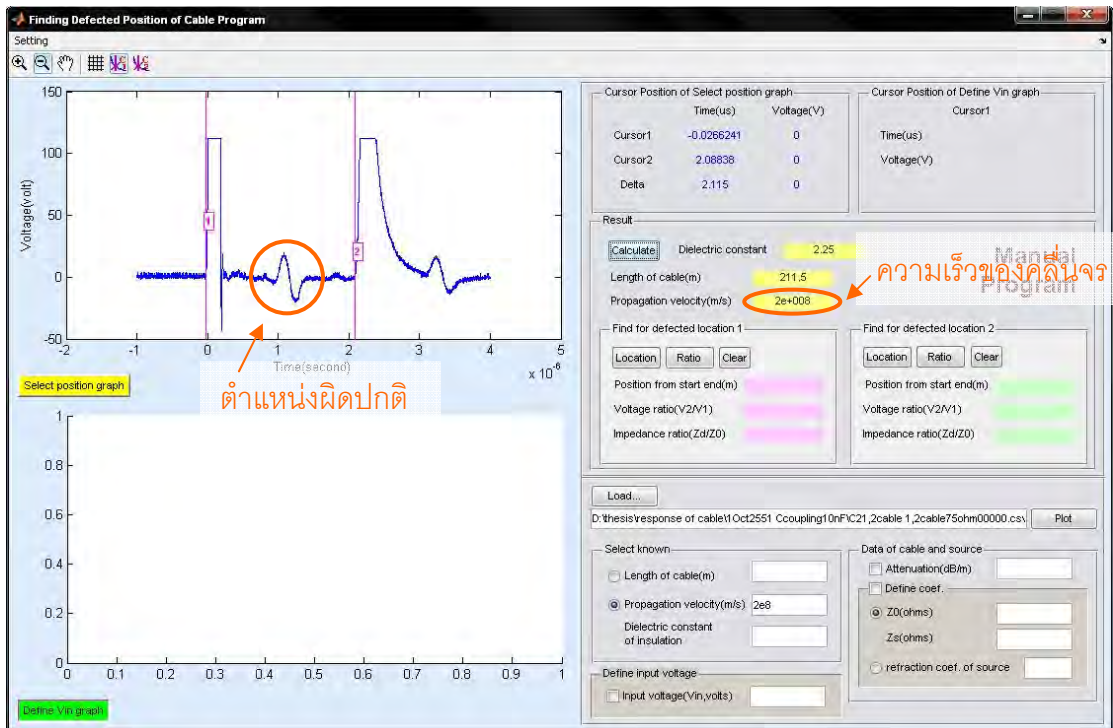
ในการทดสอบจะกำหนดความเร็วของคลื่นจรที่เคลื่อนที่บนสายเคเบิลนี้จากตารางที่ 2.1 ( $\epsilon_r=2.25$ ) ได้เท่ากับ  $2 \times 10^8$  เมตรต่อวินาที หรือ 200 เมตรต่อไมโครวินาที

4.2.2.1 ทดสอบส่วนโปรแกรมแบบผู้วิเคราะห์ทำการปรับตำแหน่งได้เอง (Manual program)

4.2.2.1.1 ทดสอบส่วนโปรแกรมคำนวณหาตำแหน่งผิดพร่อง

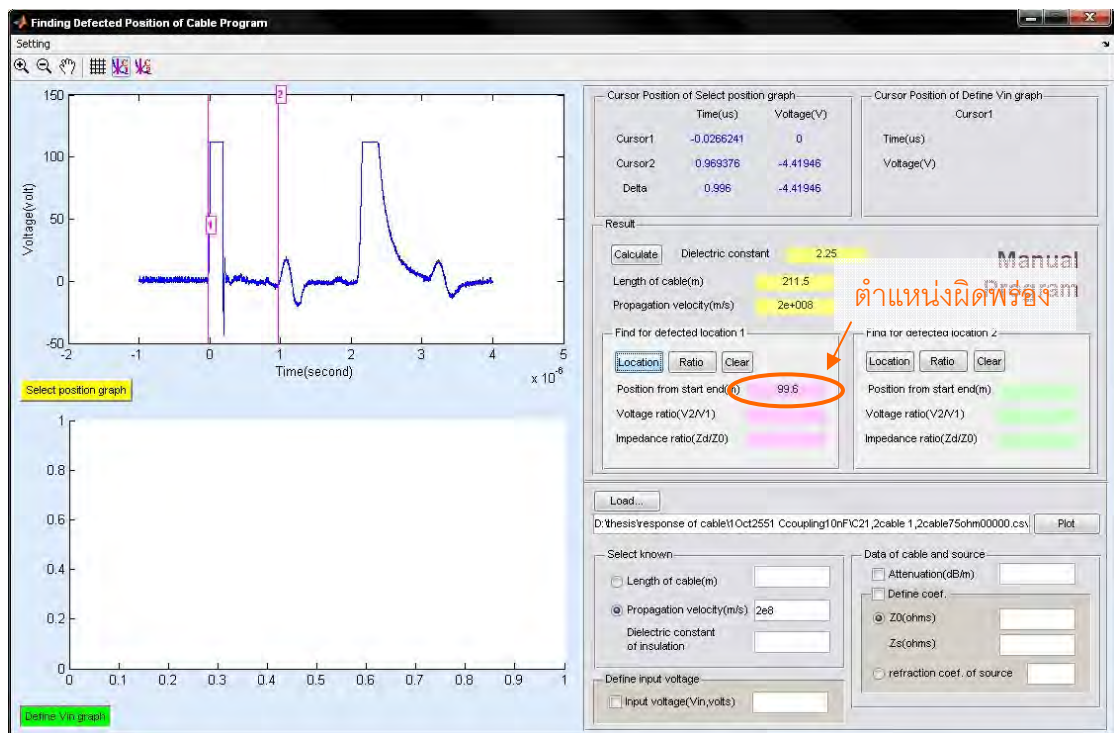
ในการทดสอบส่วนโปรแกรมคำนวณหาตำแหน่งผิดพร่องนี้ จะอาศัยผลทดสอบที่ 4.2.1.6 สายเคเบิล RG-11/U 75 โอห์มยาว 12.5 เมตร ที่ตำแหน่ง 99.56 เมตรจากต้นสาย และสายเคเบิล RG-11/U 75 โอห์มยาว 12.5 เมตร ที่ตำแหน่ง 199.1 เมตรจากต้นสาย เพื่อใช้ในการทดสอบโปรแกรม

1. จากการนำผลทดสอบที่ 4.2.1.6 สายเคเบิล RG-11/U 75 โอห์มยาว 12.5 เมตร ที่ตำแหน่ง 99.56 เมตรจากต้นสายมาทดสอบ ซึ่งสายเคเบิล RG-58A/U จำนวน 2 เส้น ยาวรวม 199.1 เมตร และสายเคเบิล RG-11/U 1 เส้น ยาว 12.5 เมตร เพราะฉะนั้นจะได้ความยาวรวมเท่ากับ 211.6 เมตร



รูปที่ 4.17 การกำหนดความเร็วของคลื่นจรที่เคลื่อนที่บนสายเคเบิล และตำแหน่งผิดพ่วง

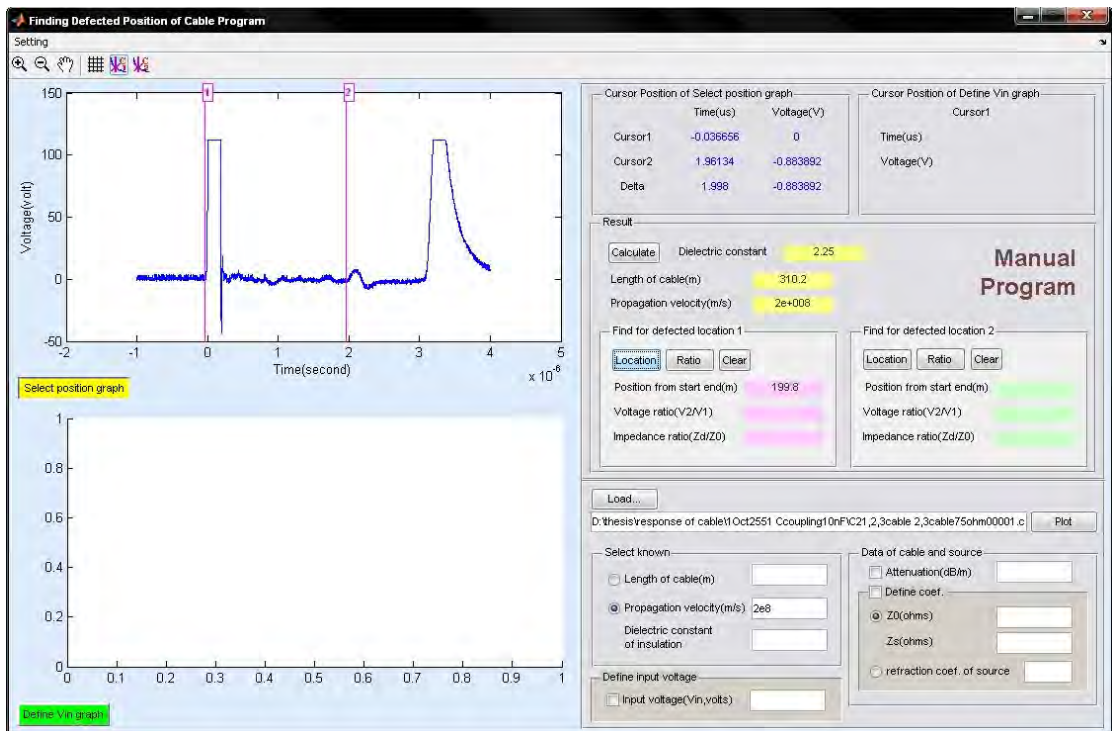
เมื่อกำหนดความเร็วของคลื่นจรที่เคลื่อนที่บนสายเคเบิล และความยาวของสายเคเบิลได้แล้ว ก็จะพิจารณาส่วนของรูปคลื่นว่ามีส่วนใดที่ผิดปกติ แล้วทำการคำนวณหาตำแหน่งผิดพ่วงนั้นโดยใช้โปรแกรมต่อไป ซึ่งจากรูปที่ 4.17 จะเห็นตำแหน่งที่ผิดปกติในส่วนที่ได้วงกลมไว้ ดังนั้นเราจะสามารถคำนวณหาตำแหน่งผิดพ่วงได้ดังรูปที่ 4.18 ซึ่งตำแหน่งที่คำนวณได้มีค่าเท่ากับ 99.6 เมตร และเมื่อเปรียบเทียบกับตำแหน่งจริงซึ่งมีค่าเท่ากับ 99.56 เมตร จะมีความผิดพลาดอยู่ที่ร้อยละ 0.04



รูปที่ 4.18 การคำนวณหาตำแหน่งผิดพ่วงบนสายเคเบิลของผลทดสอบที่ 4.2.1.6 สายเคเบิล RG-11/U 75 โห้มียาว 12.5 เมตร ที่ตำแหน่ง 99.56 เมตรจากต้นสาย

2. จากการนำผลทดสอบที่ 4.2.1.6 สายเคเบิล RG-11/U 75 โห้มียาว 12.5 เมตร ที่ตำแหน่ง 199.1 เมตรจากต้นสายมาทดสอบ ซึ่งดำเนินการเช่นเดียวกันกับการทดสอบดังตัวอย่างที่ผ่านมา โดยมีความยาวรวมของสายเคเบิลเป็น 311.13 เมตร

จากรูปที่ 4.19 จะสามารถคำนวณหาตำแหน่งผิดพ่วงได้เท่ากับ 199.8 เมตร และเมื่อเปรียบเทียบกับตำแหน่งจริงซึ่งมีค่าเท่ากับ 199.1 เมตร จะมีค่าความผิดพลาดอยู่ที่ร้อยละ 0.35



รูปที่ 4.19 การคำนวณหาตำแหน่งผิดพ่วงบนสายเคเบิลของผลทดสอบที่ 4.2.1.6 สายเคเบิล RG-11/U 75 โอห์มยาว 12.5 เมตร ที่ตำแหน่ง 199.1 เมตรจากต้นสาย

4.2.2.1.2 ทดสอบส่วนโปรแกรมคำนวณหาอัตราส่วนของค่าเสิร์จจิมพีแดนซ์ ณ ตำแหน่งผิดพ่วง

ในการทดสอบส่วนโปรแกรมคำนวณหาอัตราส่วนของค่าเสิร์จจิมพีแดนซ์ ณ ตำแหน่งผิดพ่วงนี้ จะอาศัยผลทดสอบที่ 4.2.1.6 สายเคเบิล RG-11/U 75 โอห์มยาว 12.5 เมตร ที่ตำแหน่ง 99.56 เมตรจากต้นสาย และสายเคเบิล RG-11/U 75 โอห์มยาว 12.5 เมตร ที่ตำแหน่ง 199.1 เมตรจากต้นสาย ต่อเนื่องจากการทดสอบส่วนโปรแกรมคำนวณหาตำแหน่งผิดพ่วง เพื่อใช้ในการวิเคราะห์และทดสอบ

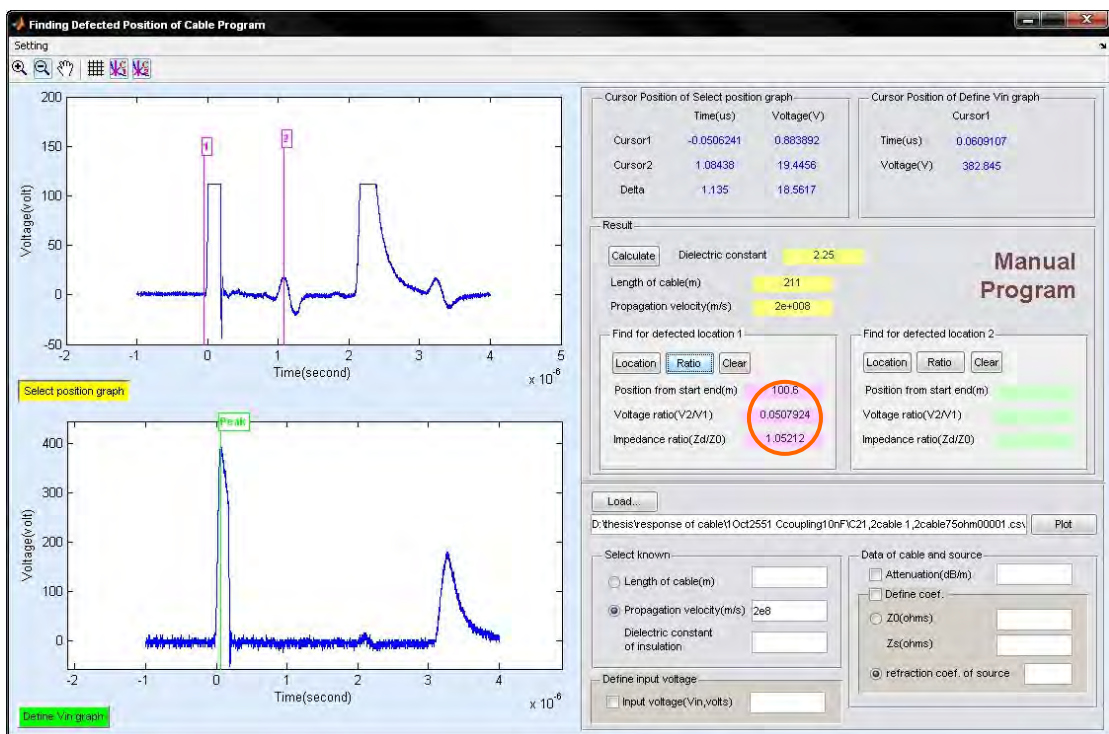
สายเคเบิล RG-58A/U ที่ใช้ในการทดสอบนี้มีค่าเสิร์จจิมพีแดนซ์เท่ากับ 68 โอห์ม ส่วนสายเคเบิล RG-11/U มีค่าเสิร์จจิมพีแดนซ์เท่ากับ 75 โอห์ม ดังนั้นอัตราส่วนของค่าเสิร์จจิมพีแดนซ์จะมีค่าเท่ากับ  $x = \frac{Z_1}{Z_0} = \frac{75}{68} = 1.102$

สายเคเบิล RG-58A/U มีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเท่ากับ 0.0186 เดซิเบลต่อเมตร และมีค่าคงที่การส่งผ่านที่แหล่งกำเนิดสัญญาณพัลส์เท่ากับ 1.76 วิธีการคำนวณแสดงไว้ในภาคผนวก ค

1. การทดสอบโดยใช้ผลทดสอบที่ 4.2.1.6 สายเคเบิล RG-11/U 75 โห้มียาว 12.5 เมตร ที่ตำแหน่ง 99.56 เมตรจากต้นสาย

- กรณีนี้จะเลยผลเนื่องจากการลดทอนภายในสายเคเบิลและค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งกำเนิด

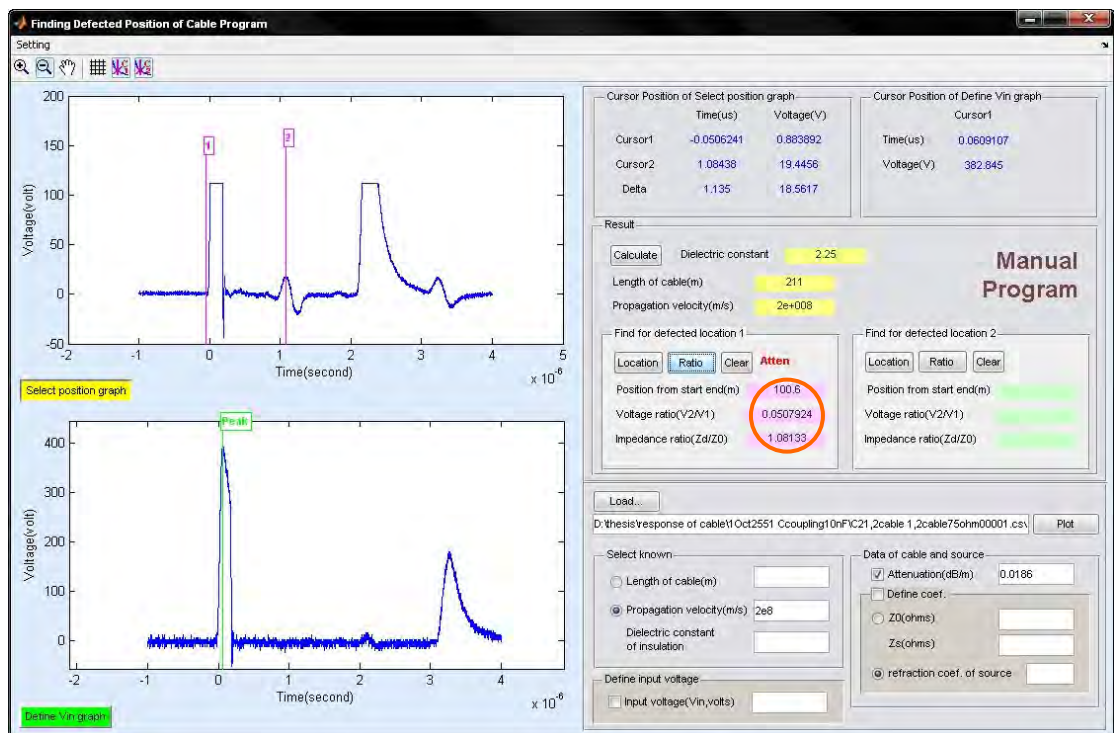
โดยอาศัยสมการที่ (ก.1) และ (2.13) จากโปรแกรมคำนวณหาอัตราส่วนของค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ ณ ตำแหน่งผิดพลาดรูปที่ 4.20 เราจะสามารถหาค่าอัตราส่วนแรงดันได้เท่ากับ 0.0508 และอัตราส่วนของค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ได้เท่ากับ 1.0521 ดังนั้นจะมีความผิดพลาดเป็นร้อยละ 4.53



รูปที่ 4.20 การคำนวณหาอัตราส่วนของค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ ณ ตำแหน่งผิดพลาด กรณีนี้จะเลยผลเนื่องจากการลดทอนภายในสายเคเบิลและค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งกำเนิด

- กรณีพิจารณาผลเนื่องจากการลดทอนภายในสายเคเบิล แต่ละเลยผล  
เนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งกำเนิด

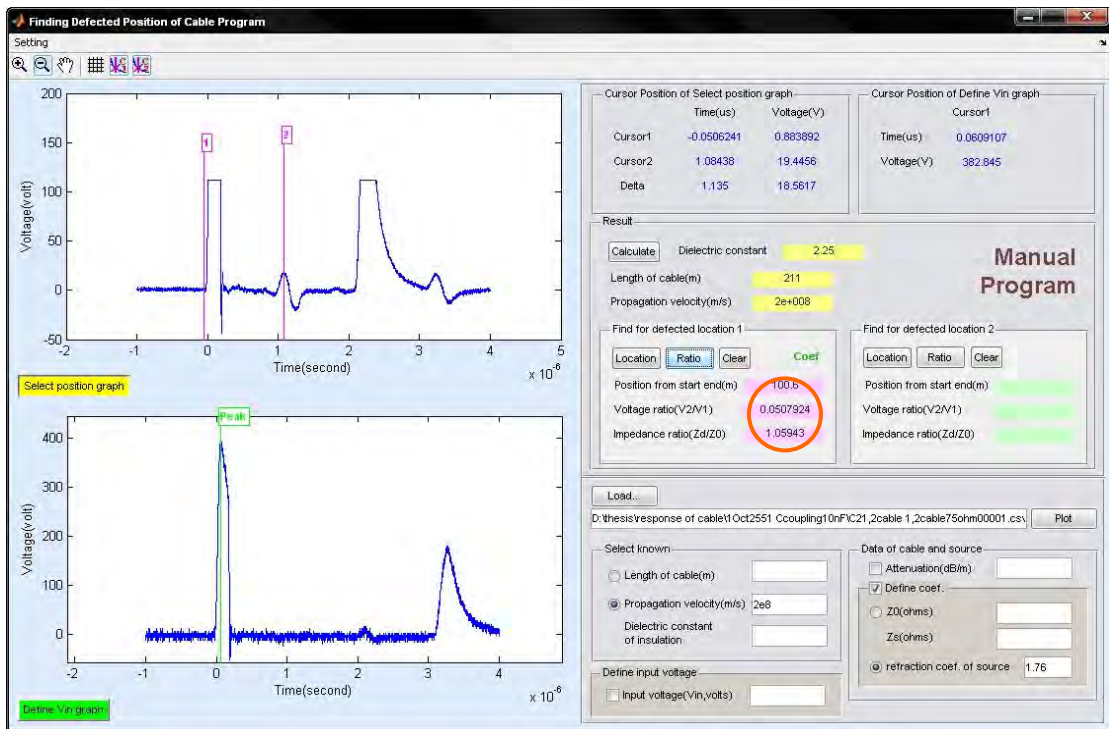
โดยอาศัยสมการที่ (ก.4) และ (2.14) จากโปรแกรมคำนวณหาอัตราส่วน  
ของค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ ณ ตำแหน่งผิดพร่องดังรูปที่ 4.21 เราจะสามารถหาอัตราส่วนของค่าเสิร์จ  
อิมพีแดนซ์ได้เท่ากับ 1.0813 ดังนั้นจะมีความผิดพลาดเป็นร้อยละ 1.88



รูปที่ 4.21 การคำนวณหาอัตราส่วนของค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ ณ ตำแหน่งผิดพร่อง กรณีพิจารณาผล  
เนื่องจากการลดทอนภายในสายเคเบิล แต่ละเลยผลเนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งกำเนิด

- กรณีนี้จะเลยผลเนื่องจากการลดทอนภายในสายเคเบิล แต่พิจารณาผลเนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งกำเนิด

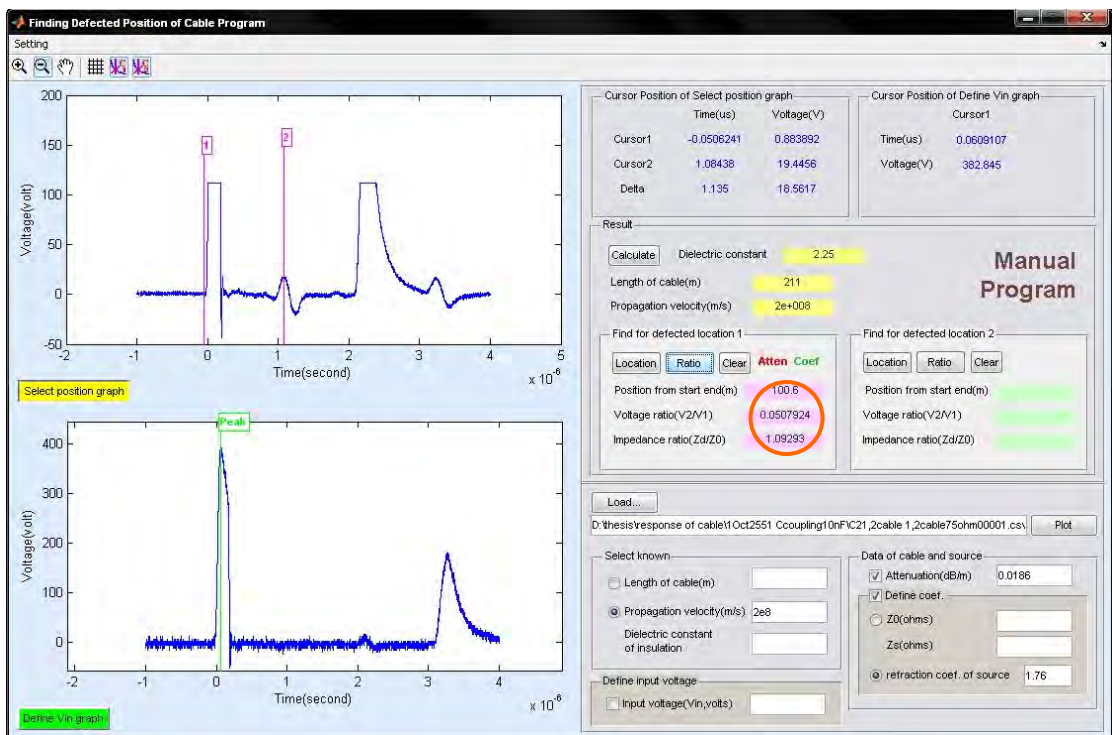
โดยอาศัยสมการที่ (ก.8) และ (2.15) จากโปรแกรมคำนวณหาอัตราส่วนของค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ ณ ตำแหน่งผิดพร่องดังรูปที่ 4.22 เราจะสามารถหาอัตราส่วนของค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ได้เท่ากับ 1.0594 ดังนั้นจะมีความผิดพลาดเป็นร้อยละ 3.87



รูปที่ 4.22 การคำนวณหาอัตราส่วนของค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ ณ ตำแหน่งผิดพร่อง กรณีนี้จะเลยผลเนื่องจากการลดทอนภายในสายเคเบิล แต่พิจารณาผลเนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งกำเนิด

- กรณีพิจารณาผลเนื่องจากการลดทอนภายในสายเคเบิลและค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งกำเนิด

โดยอาศัยสมการที่ (ก.11) และ (2.16) จากโปรแกรมคำนวณหาอัตราส่วนของค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ ณ ตำแหน่งผิดพ่วงดังรูปที่ 4.23 เราจะสามารถหาอัตราส่วนของค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ได้เท่ากับ 1.0923 ดังนั้นจะมีความผิดพลาดเป็นร้อยละ 0.88



รูปที่ 4.23 การคำนวณหาอัตราส่วนของค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ ณ ตำแหน่งผิดพ่วง กรณีพิจารณาผลเนื่องจากการลดทอนภายในสายเคเบิลและค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งกำเนิด

จากการทดสอบทั้งหมด 4 กรณี เมื่อเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนของค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ที่ได้จากการคำนวณกับค่าที่ได้จากโปรแกรมหาอัตราส่วนของค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ ณ ตำแหน่งผิดพ่วง ใน 3 กรณีแรก ค่าอัตราส่วนทั้งสองมีค่าแตกต่างกัน โดยมีค่าความผิดพลาดเป็นร้อยละ 4.53, 1.88 และ 3.87 ตามลำดับ

เนื่องจากค่าที่ได้จากการคำนวณเป็นค่าที่ได้จากทฤษฎี โดยละเลยผลเนื่องจากการลดทอนภายในสายเคเบิลหรือค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งกำเนิด ส่วนค่าที่ได้จากโปรแกรมนั้น จะคำนวณจากรูปคลื่นที่ได้จากการทดลองจริงซึ่งมีผลของการลดทอนภายในสายเคเบิลและค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งกำเนิด จึงทำให้ได้ค่าอัตราส่วนที่แตกต่างจากทฤษฎี



ส่วนในกรณีสุดท้าย เมื่อเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนของค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ ที่ได้จากการคำนวณกับค่าที่ได้จากโปรแกรมหาอัตราส่วนของค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ ณ ตำแหน่งผิดพลาด ค่าทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกันมากขึ้น โดยมีค่าความผิดพลาดเป็นร้อยละ 0.88 เนื่องจากในการใช้โปรแกรมในส่วนนี้ ได้นำผลเนื่องจากการลดทอนภายในสายเคเบิลและผลเนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งกำเนิดมาพิจารณาด้วย

2. การทดสอบโดยใช้ผลทดสอบที่ 4.2.1.6 สายเคเบิล RG-11/U 75 โอห์มยาว 12.5 เมตร ที่ตำแหน่ง 199.1 เมตรจากต้นสาย

- กรณีละเอียดผลเนื่องจากการลดทอนภายในสายเคเบิลและค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งกำเนิด

จากโปรแกรมคำนวณหาอัตราส่วนของค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ ณ ตำแหน่งผิดพลาด สามารถหาอัตราส่วนแรงดันได้เท่ากับ 0.0208 และอัตราส่วนของค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์เป็น 1.021 ดังนั้นจะมีความผิดพลาดเป็นร้อยละ 7.35

- กรณีพิจารณาผลเนื่องจากการลดทอนภายในสายเคเบิล แต่ละเอียดผลเนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งกำเนิด

จากโปรแกรมคำนวณหาอัตราส่วนของค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ ณ ตำแหน่งผิดพลาด สามารถหาอัตราส่วนของค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ได้เท่ากับ 1.0501 ดังนั้นจะมีความผิดพลาดเป็นร้อยละ 4.71

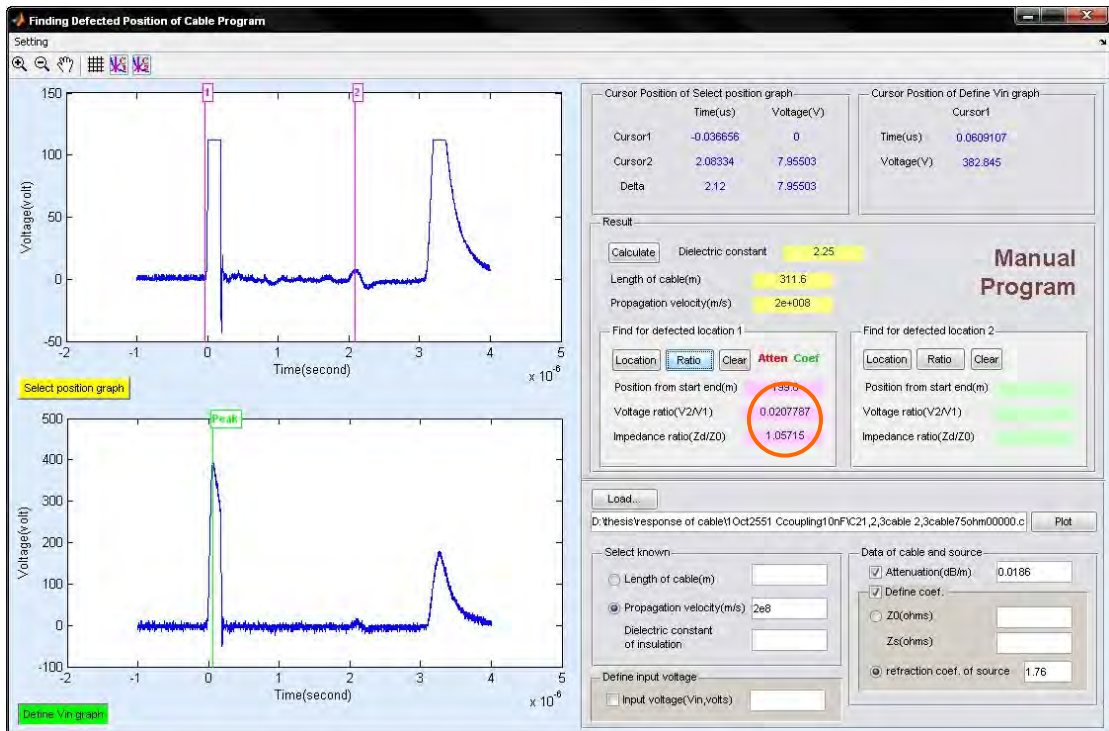
- กรณีละเอียดผลเนื่องจากการลดทอนภายในสายเคเบิล แต่พิจารณาผลเนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งกำเนิด

จากโปรแกรมคำนวณหาอัตราส่วนของค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ ณ ตำแหน่งผิดพลาด สามารถหาอัตราส่วนของค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ได้เท่ากับ 1.0239 ดังนั้นจะมีความผิดพลาดเป็นร้อยละ 7.09

- กรณีพิจารณาผลเนื่องจากการลดทอนภายในสายเคเบิลและค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งกำเนิด

จากโปรแกรมคำนวณหาอัตราส่วนของค่าเสรีจิมพีแดนซ์ ณ ตำแหน่ง ผิดพ่วง สามารถหาอัตราส่วนของค่าเสรีจิมพีแดนซ์เป็น 1.0572 ดังนั้นจะมีความผิดพลาดเป็น ร้อยละ 4.07

การทดสอบทั้ง 4 กรณีสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.24



รูปที่ 4.24 การคำนวณหาอัตราส่วนของค่าเสรีจิมพีแดนซ์ ณ ตำแหน่ง ผิดพ่วงของผลทดสอบที่ 4.2.1.6 สายเคเบิล RG-11/U 75 โอห์มยาว 12.5 เมตร ที่ตำแหน่ง 199.1 เมตรจากต้นสาย

จากการทดสอบทั้ง 4 กรณี ให้ผลออกมาในทำนองเดียวกันกับการทดสอบที่ผ่านมา โดยใน 3 กรณีแรกมีค่าความผิดพลาดเป็นร้อยละ 7.35, 4.71 และ 7.09 ส่วนในกรณีสุดท้ายมีความผิดพลาดต่ำสุดร้อยละ 4.07 เนื่องจากในกรณีสุดท้ายเราได้พิจารณาผลของการลดทอนภายในสายเคเบิลและค่าคงที่การส่งผ่านที่แหล่งกำเนิดเข้าไปในโปรแกรมด้วย

ตารางที่ 4.9 ความผิดพลาดจากโปรแกรมจากผลการทดสอบที่ 4.2.1.6

การทดสอบ	ความผิดพลาด (%)	
	ผลการทดสอบที่ 4.2.1.6 แบบ 1	ผลการทดสอบที่ 4.2.1.6 แบบ 2
ละเลย $\beta$ และ $\alpha_s$	4.53	7.35
พิจารณา $\beta$ ละเลย $\alpha_s$	1.88	4.71
ละเลย $\beta$ พิจารณา $\alpha_s$	3.87	7.09
พิจารณา $\beta$ และ $\alpha_s$	0.88	4.07

หมายเหตุ  $\beta$  = สัมประสิทธิ์การลดทอน และ  $\alpha_s$  = ค่าคงที่การส่งผ่านที่แหล่งกำเนิดสัญญาณ

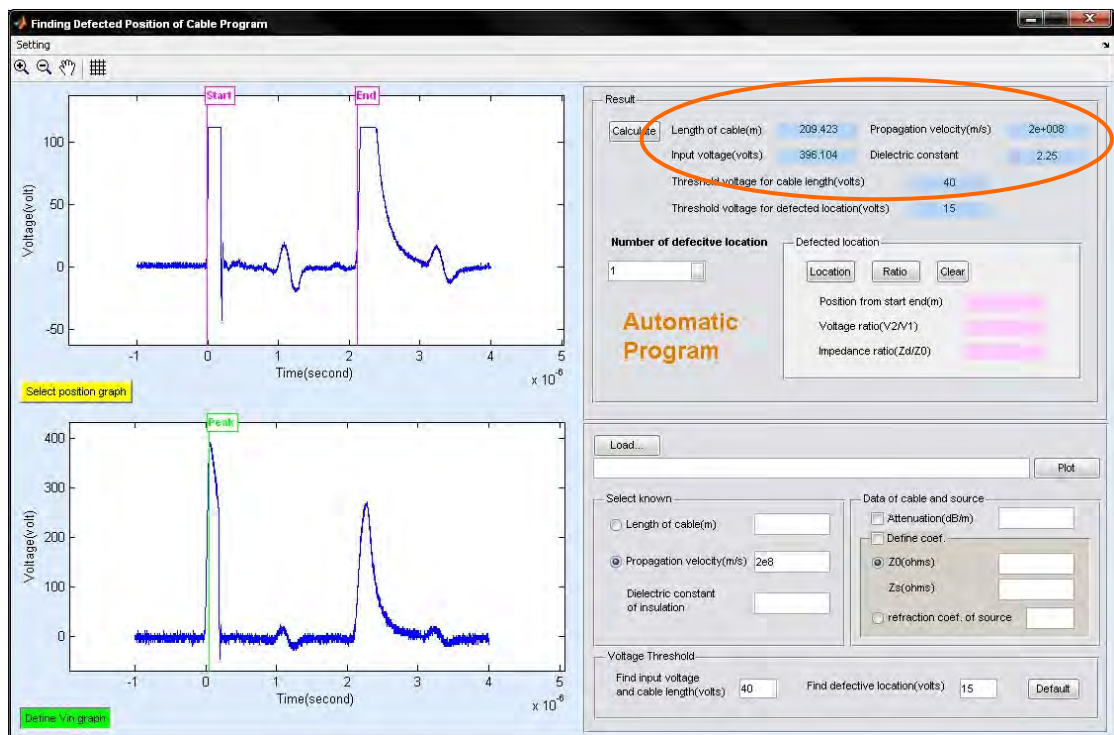
จากตารางที่ 4.9 จะเห็นว่าเมื่อตำแหน่งผิดพร่องบนสายเคเบิลอยู่ห่างจากตำแหน่งต้นสายมากขึ้น ความผิดพลาดก็จะมีค่ามากขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากตำแหน่งผิดพร่องที่อยู่ห่างจากต้นสายมาก จะมีการลดทอนภายในสายเคเบิลแต่ละเส้นไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของสายเคเบิลแต่ละเส้นที่นำมาต่อกัน และเนื่องจากภายในโปรแกรมได้กำหนดเป็นค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเฉลี่ย ดังนั้นจึงส่งผลให้การหาอัตราส่วนของค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ ณ ตำแหน่งผิดพร่องมีความผิดพลาดมากขึ้นเมื่อตำแหน่งผิดพร่องอยู่ห่างจากต้นสายมากขึ้น

#### 4.2.2.2 ทดสอบส่วนโปรแกรมแบบอัตโนมัติ (Automatic program)

##### 4.2.2.2.1 ทดสอบส่วนโปรแกรมคำนวณหาตำแหน่งผิดพร่อง

ในการทดสอบส่วนโปรแกรมคำนวณหาตำแหน่งผิดพร่องนี้ จะอาศัยผลการทดสอบเดียวกันกับการทดสอบส่วนโปรแกรมแบบผู้วิเคราะห์ทำการปรับตำแหน่งได้เอง

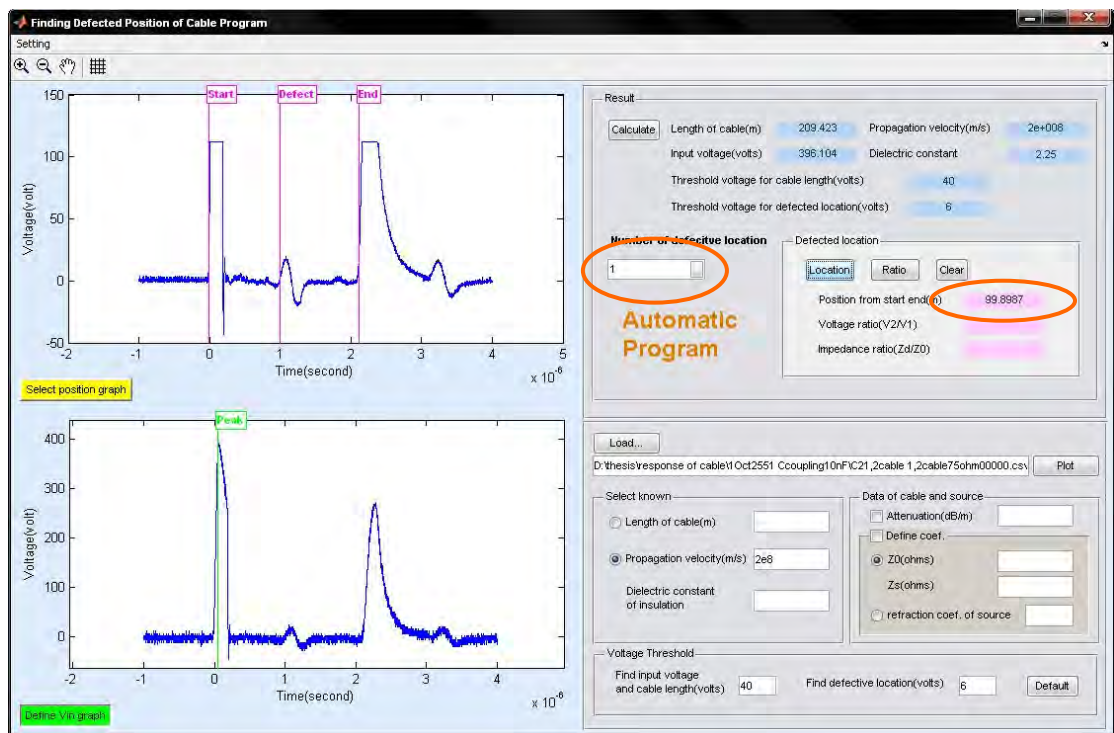
1. จากการนำผลทดสอบที่ 4.2.1.6 สายเคเบิล RG-11/U 75 โอห์มยาว 12.5 เมตร ที่ตำแหน่ง 99.56 เมตรจากต้นสายมาทดสอบ ซึ่งประกอบไปด้วยสายเคเบิล RG-58A/U จำนวน 2 เส้น ยาว 199.1 เมตร และสายเคเบิล RG-11/U 1 เส้น ยาว 12.5 เมตร เพราะฉะนั้นสายเคเบิลจะมีความยาวรวมเท่ากับ 211.6 เมตร โดยขั้นตอนแรกจะต้องโหลดรูปคลื่นจรแรงดันสะท้อนกลับที่บันทึกได้จากดิจิตอลออสซิลโลสโคปขึ้นมาบนโปรแกรมก่อน แล้วทำการกำหนดความเร็วของคลื่นจรที่เคลื่อนที่บนสายเคเบิล โดยส่วนโปรแกรมคำนวณแสดงได้ดังรูปที่ 4.25



รูปที่ 4.25 การกำหนดความเร็วของคลื่นจรและคำนวณหาความยาวสายเคเบิล

เมื่อกำหนดความเร็วของคลื่นจรที่เคลื่อนที่บนสายเคเบิลแล้ว โปรแกรมจะคำนวณหาความยาวสายเคเบิล ซึ่งจากรูปที่ 4.25 โปรแกรมสามารถคำนวณความยาวสายเคเบิลได้เท่ากับ 209.42 เมตร เมื่อเทียบกับตำแหน่งจริงซึ่งมีค่าเท่ากับ 211.6 เมตร จะมีค่าความผิดพลาดเป็นร้อยละ 1.03

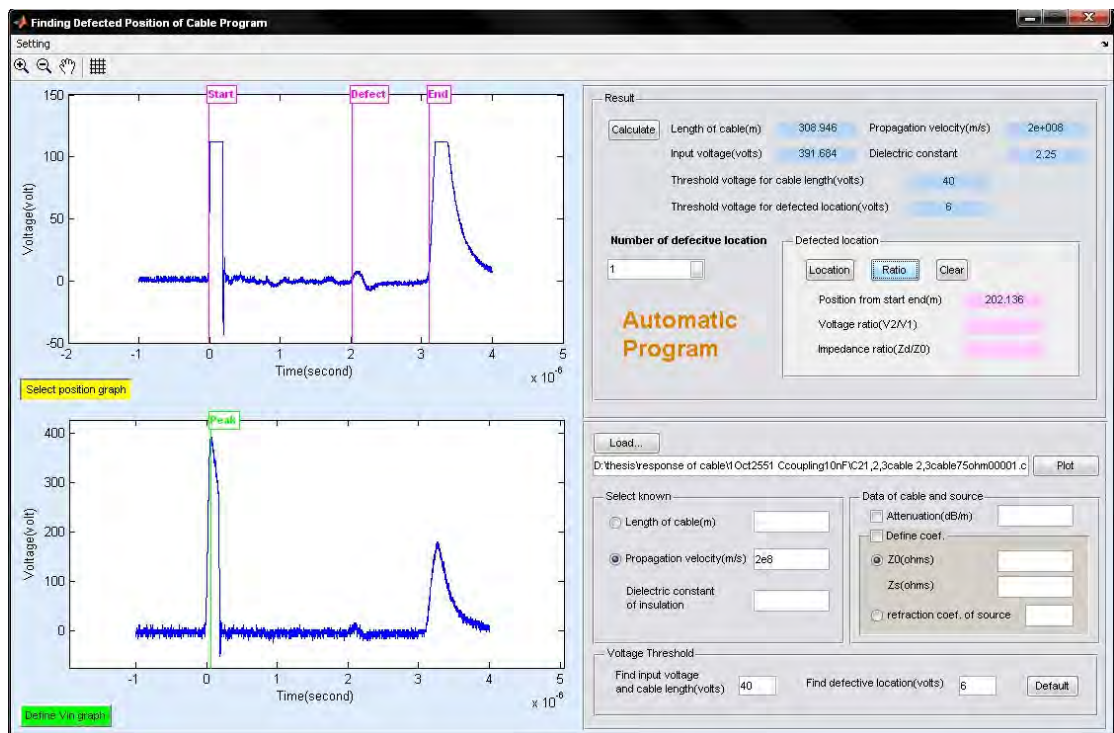
เมื่อโปรแกรมคำนวณหาความยาวสายเคเบิลเสร็จเรียบร้อยแล้ว โปรแกรมจะแจ้งจำนวนตำแหน่งผิดพร่องที่ตรวจพบที่ช่อง Number of defective location ซึ่งสามารถเลือกตำแหน่งผิดพร่องใดๆ เพื่อที่จะหาระยะทางของตำแหน่งผิดพร่องนั้น จากรูปที่ 4.26 โปรแกรมแจ้งว่ามีตำแหน่งผิดพร่องอยู่ 1 จุด อยู่ที่ระยะทาง 99.9 เมตรจากต้นสาย เมื่อเทียบกับตำแหน่งจริงซึ่งมีค่าเท่ากับ 99.56 เมตร จะมีความผิดพลาดอยู่ที่ร้อยละ 0.34



รูปที่ 4.26 การคำนวณหาตำแหน่งผิดพ่วงบนสายเคเบิลของผลทดสอบที่ 4.2.1.6 สายเคเบิล RG-11/U 75 โห้ห์มยาว 12.5 เมตร ที่ตำแหน่ง 99.56 เมตรจากต้นสาย

2. จากการนำผลทดสอบที่ 4.2.1.6 สายเคเบิล RG-11/U 75 โห้ห์มยาว 12.5 เมตร ที่ตำแหน่ง 199.1 เมตรจากต้นสายมาทดสอบ โดยดำเนินการเช่นเดียวกันกับการทดสอบดังตัวอย่างที่ผ่านมา โดยที่มีความยาวรวมของสายเคเบิลเป็น 311.13 เมตร

จากรูปที่ 4.27 โปรแกรมแจ้งว่ามีตำแหน่งผิดพ่วงอยู่ 1 จุด ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ต่อสายเคเบิล RG-11/U ไว้ และโปรแกรมสามารถคำนวณตำแหน่งนี้ได้เท่ากับ 202.14 เมตร เมื่อเทียบกับตำแหน่งจริงซึ่งมีค่าเท่ากับ 199.1 เมตร จะมีค่าความผิดพลาดอยู่ที่ร้อยละ 1.53



รูปที่ 4.27 การคำนวณหาตำแหน่งผิดพ่วงบนสายเคเบิลของผลทดสอบที่ 4.2.1.6 สายเคเบิล RG-11/U 75 โห้หมยาว 12.5 เมตร ที่ตำแหน่ง 199.1 เมตรจากต้นสาย

การคำนวณหาตำแหน่งผิดพ่วงบนสายเคเบิลโดยใช้โปรแกรมแบบอัตโนมัติ นั้น จะมีค่าความผิดพลาดมากกว่าการใช้โปรแกรมแบบผู้วิเคราะห์ทำการปรับตำแหน่งได้เอง เนื่องจากมีการใช้การประมาณค่าเวลาที่ตำแหน่งผิดพ่วง ดังแสดงไว้ในภาคผนวก

#### 4.2.2.2.2 ทดสอบส่วนโปรแกรมคำนวณหาอัตราส่วนของค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ ณ ตำแหน่งผิดพ่วง

ในการทดสอบส่วนโปรแกรมคำนวณหาอัตราส่วนของค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ ณ ตำแหน่งผิดพ่วงนี้ จะอาศัยผลทดสอบเดียวกันกับการทดสอบโปรแกรมคำนวณหาตำแหน่งผิดพ่วง เพื่อใช้ในการวิเคราะห์และทดสอบ

1. จากการนำผลทดสอบที่ 4.2.1.6 สายเคเบิล RG-11/U 75 โห้หมยาว 12.5 เมตร ที่ตำแหน่ง 99.56 เมตรจากต้นสายมาทดสอบ

- กรณีละเลยผลเนื่องจากการลดทอนภายในสายเคเบิลและค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งกำเนิด

จากโปรแกรมคำนวณหาอัตราส่วนของค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ ณ ตำแหน่ง ผิดพร้อม สามารถหาอัตราส่วนแรงดันได้เท่ากับ 0.0491 และอัตราส่วนของค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ เป็น 1.0503 ดังนั้นจะมีความผิดพลาดเป็นร้อยละ 4.69

- กรณีพิจารณาผลเนื่องจากการลดทอนภายในสายเคเบิล แต่ละเลยผลเนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งกำเนิด

จากโปรแกรมคำนวณหาอัตราส่วนของค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ ณ ตำแหน่ง ผิดพร้อม สามารถหาอัตราส่วนของค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ได้เท่ากับ 1.0783 ซึ่งจะมีความผิดพลาดเป็นร้อยละ 2.15

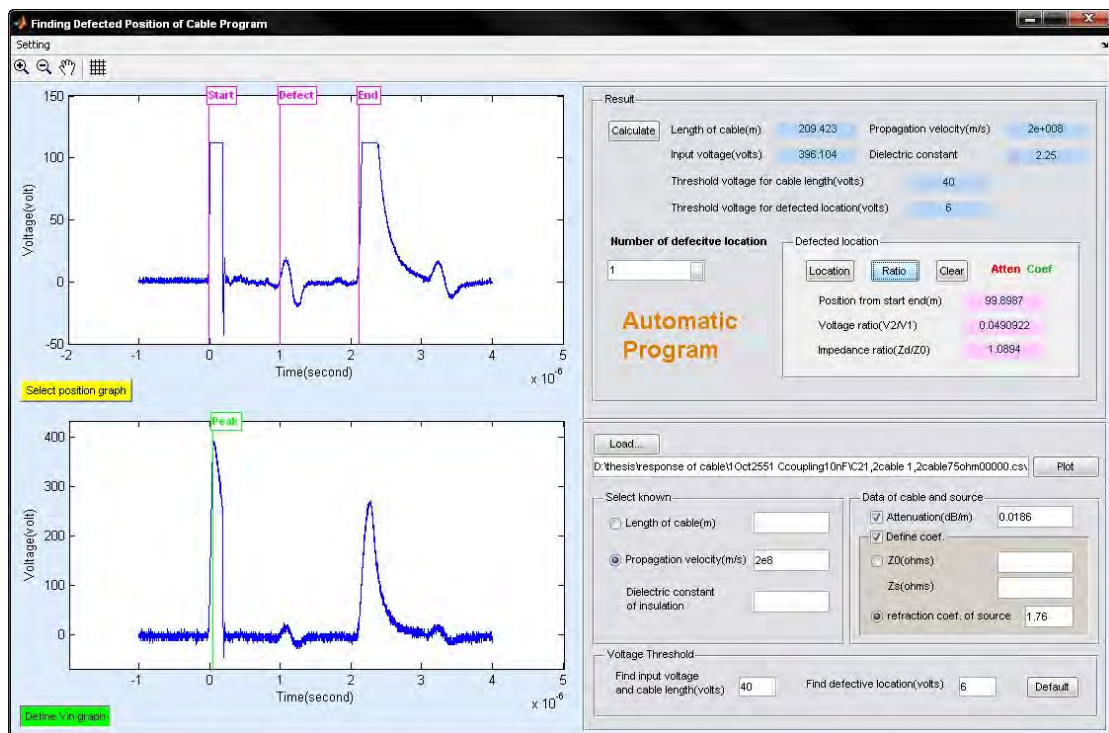
- กรณีละเลยผลเนื่องจากการลดทอนภายในสายเคเบิล แต่พิจารณาผลเนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งกำเนิด

จากโปรแกรมคำนวณหาอัตราส่วนของค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ ณ ตำแหน่ง ผิดพร้อม สามารถหาอัตราส่วนของค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ได้เท่ากับ 1.0574 ซึ่งจะมีความผิดพลาดเป็นร้อยละ 4.05

- กรณีพิจารณาผลเนื่องจากการลดทอนภายในสายเคเบิลและค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งกำเนิด

จากโปรแกรมคำนวณหาอัตราส่วนของค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ ณ ตำแหน่ง ผิดพร้อม สามารถหาอัตราส่วนของค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ได้เท่ากับ 1.0894 ซึ่งจะมีความผิดพลาดเป็นร้อยละ 1.14

การทดสอบทั้ง 4 กรณีสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.28



รูปที่ 4.28 การคำนวณหาอัตราส่วนของค่าเสิร์จจิมพีแดนซ์ ณ ตำแหน่งผิดพ่วงของผลทดสอบที่ 4.2.1.6 สายเคเบิล RG-11/U 75 โอห์มยาว 12.5 เมตร ที่ตำแหน่ง 99.56 เมตรจากต้นสาย

2. จากการนำผลทดสอบที่ 4.2.1.6 สายเคเบิล RG-11/U 75 โอห์มยาว 12.5 เมตร ที่ตำแหน่ง 199.1 เมตรจากต้นสายมาทดสอบ

- กรณีละเอียดผลเนื่องจากการลดทอนภายในสายเคเบิลและค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งกำเนิด

จากโปรแกรมคำนวณหาอัตราส่วนของค่าเสิร์จจิมพีแดนซ์ ณ ตำแหน่งผิดพ่วง สามารถหาค่าอัตราส่วนแรงดันได้เท่ากับ 0.0203 และอัตราส่วนของค่าเสิร์จจิมพีแดนซ์เป็น 1.0205 ดังนั้นจะมีความผิดพลาดเป็นร้อยละ 7.4

- กรณีพิจารณาผลเนื่องจากการลดทอนภายในสายเคเบิล แต่ละเลยผลเนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งกำเนิด

จากโปรแกรมคำนวณหาอัตราส่วนของค่าเสิร์จจิมพีแดนซ์ ณ ตำแหน่งผิดพ่วง สามารถหาอัตราส่วนของค่าเสิร์จจิมพีแดนซ์ได้เท่ากับ 1.0494 ดังนั้นจะมีความผิดพลาดเป็นร้อยละ 4.77



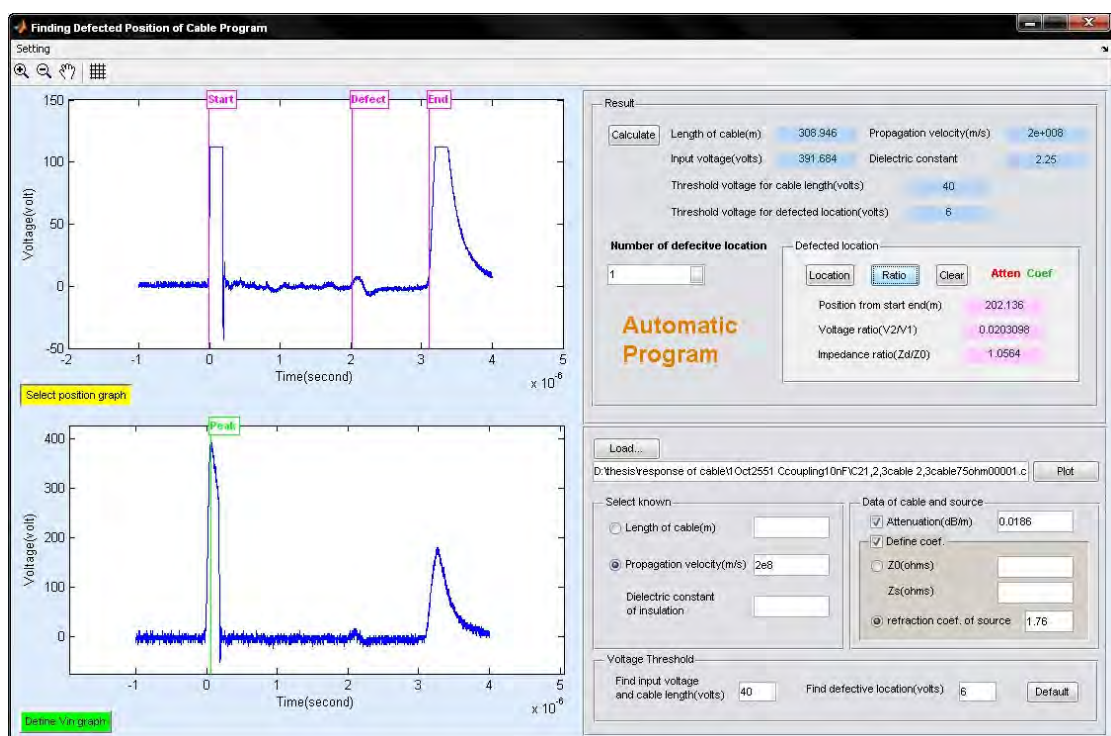
- กรณีละเอียดผลเนื่องจากการลดทอนภายในสายเคเบิล แต่พิจารณาผลเนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งกำเนิด

จากโปรแกรมคำนวณหาอัตราส่วนของค่าเสรีจิมพีแดนซ์ ณ ตำแหน่งผิดพ่วง สามารถหาอัตราส่วนของค่าเสรีจิมพีแดนซ์ได้เท่ากับ 1.0234 ดังนั้นจะมีความผิดพลาดเป็นร้อยละ 7.13

- กรณีพิจารณาผลเนื่องจากการลดทอนภายในสายเคเบิลและค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งกำเนิด

จากโปรแกรมคำนวณหาอัตราส่วนของค่าเสรีจิมพีแดนซ์ ณ ตำแหน่งผิดพ่วง สามารถหาอัตราส่วนของค่าเสรีจิมพีแดนซ์ได้เท่ากับ 1.0564 ดังนั้นจะมีความผิดพลาดเป็นร้อยละ 4.14

การทดสอบทั้ง 4 กรณีสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.29



รูปที่ 4.29 การคำนวณหาอัตราส่วนของค่าเสรีจิมพีแดนซ์ ณ ตำแหน่งผิดพ่วงของผลทดสอบที่

4.2.1.6 สายเคเบิล RG-11/U 75 โห้หมยาว 12.5 เมตร ที่ตำแหน่ง 199.1 เมตรจากต้นสาย

จากการทดสอบโปรแกรมคำนวณหาตำแหน่งผิดพลาดและอัตราส่วนของค่าเสิร์จ อิมพีแดนซ์แบบผู้วิเคราะห์ทำการปรับตำแหน่งได้เอง และแบบอัตโนมัติสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 ผลการวิเคราะห์โดยโปรแกรมแบบผู้วิเคราะห์ทำการปรับตำแหน่งได้เองและแบบอัตโนมัติ

การทดสอบ	ความผิดพลาดการคำนวณ ตำแหน่งผิดพลาด (%)		ความผิดพลาดการคำนวณ อัตราส่วนของค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ ตำแหน่งผิดพลาด (%)	
	ผู้วิเคราะห์ปรับ ตำแหน่งได้เอง	อัตโนมัติ	ผู้วิเคราะห์ปรับ ตำแหน่งได้เอง	อัตโนมัติ
สายเคเบิล RG-11/U ที่ตำแหน่ง 99.56 เมตรจากต้นสาย	0.04	0.34	0.88	1.14
สายเคเบิล RG-11/U ที่ตำแหน่ง 199.1 เมตรจากต้นสาย	0.35	1.53	4.07	4.14

จากตารางที่ 4.10 โปรแกรมแบบผู้วิเคราะห์ทำการปรับตำแหน่งได้เอง จะสามารถคำนวณได้แม่นยำมากกว่าแบบอัตโนมัติ เนื่องจากโปรแกรมแบบอัตโนมัติจะอาศัยค่าแรงดันขีดเริ่มเป็นเกณฑ์ในการหาตำแหน่งผิดพลาด เพื่อหาพิกัดค่ายอดของตำแหน่งผิดพลาด และพิกัดที่ร้อยละ 50 ของค่ายอด เพื่อใช้ในการหาค่าเวลาของตำแหน่งผิดพลาด ซึ่งความผิดพลาดจะเกิดจากการประมาณค่าของจุดพิกัดทั้งสอง(การคำนวณหาเวลาของตำแหน่งผิดพลาดแสดงไว้ในภาคผนวก ง)

ส่วนโปรแกรมแบบผู้วิเคราะห์ทำการปรับตำแหน่งได้เองจะให้ความแม่นยำมากกว่า โดยผู้ใช้งานจะต้องสามารถวิเคราะห์รูปคลื่นแรงดันสะท้อนกลับได้ในเบื้องต้นก่อน ว่ารูปคลื่นจรรยาลักษณะใดเป็นตำแหน่งผิดพลาด แล้วจึงทำการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมต่อไป

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผล

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับ การตรวจสอบคุณภาพการฉนวน การหาตำแหน่งผิดพร่องที่เกิดขึ้นแบบไม่ทำลายของสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน โดยอาศัยหลักการสะท้อนของคลื่นจรบนสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน โดยในงานวิจัยฉบับนี้เน้นไปที่การออกแบบและทดสอบโดยใช้สายเคเบิล RG-58A/U ซึ่งเป็นสายชนิดโคแอกเชียลแบบแกนเดี่ยว แทนสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน จากผลการทดสอบสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ส่วนแหล่งกำเนิดสัญญาณพัลส์แรงดันที่สร้างขึ้นนั้นสามารถสร้างแรงดันขนาดประมาณ 400 โวลต์ ความกว้าง 200 – 500 นาโนวินาทีได้ และสามารถใช้วัดสายเคเบิล RG-58A/U ได้

2. ส่วนโปรแกรมประมวลผลเพื่อหาตำแหน่งผิดพร่องสายเคเบิลแบบผู้วิเคราะห์ทำการปรับตำแหน่งได้เอง สามารถระบุตำแหน่งได้ใกล้เคียงกับตำแหน่งผิดพร่องจริง โดยมีค่าผิดพลาดไม่เกินร้อยละ 2 และส่วนโปรแกรมแบบอัตโนมัติ ระบุตำแหน่งผิดพลาดไม่เกินร้อยละ 2 โดยการใช้งานจะต้องทราบความยาวของสายเคเบิลหรือความเร็วของคลื่นจรที่เคลื่อนที่บนสายเคเบิล เพื่อใช้คำนวณหาตำแหน่งผิดพร่องได้อย่างแม่นยำ

3. ส่วนโปรแกรมประมวลผลเพื่อคำนวณหาอัตราส่วนของค่าเสรีจิมพีแดนซ์ ณ ตำแหน่งผิดพร่องแบบผู้วิเคราะห์ทำการปรับตำแหน่งได้เอง สามารถคำนวณได้ใกล้เคียงกับอัตราส่วนของค่าเสรีจิมพีแดนซ์จริง โดยมีค่าผิดพลาดไม่เกินร้อยละ 5 และส่วนโปรแกรมแบบอัตโนมัติ มีค่าผิดพลาดไม่เกินร้อยละ 5 เช่นกัน โดยการใช้งานจะต้องคำนึงถึงผลของการลดทอนภายในสายเคเบิลและค่าคงที่การส่งผ่านที่แหล่งกำเนิดสัญญาณพัลส์ หรือค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งกำเนิดกับค่าอิมพีแดนซ์ของสายเคเบิลด้วย เพื่อให้ได้อัตราส่วนของค่าเสรีจิมพีแดนซ์ ณ ตำแหน่งผิดพร่องที่ถูกต้องแม่นยำ

4. เมื่อคลื่นจรแรงดันเคลื่อนที่จากสายเคเบิลที่มีค่าเสรีจิมพีแดนซ์สูงกว่ามากระทบกับตำแหน่งที่มีค่าเสรีจิมพีแดนซ์ต่ำกว่า คลื่นจรแรงดันนั้นจะถูกสะท้อนกลับมายังต้นสายด้วยค่าคงที่การสะท้อนที่มีค่าน้อยกว่า 0 และมีลักษณะเป็นคลื่นจรแรงดันชั่วตรงข้ามกัน

5. เมื่อคลื่นจรแรงดันเคลื่อนที่จากสายเคเบิลที่มีค่าเสรีจิมพีแดนซ์ต่ำกว่ามากระทบกับตำแหน่งที่มีค่าเสรีจิมพีแดนซ์สูงกว่า คลื่นจรแรงดันนั้นจะถูกสะท้อนกลับมายังต้นสายด้วยค่าคงที่การสะท้อนที่มีค่ามากกว่า 0 และมีลักษณะเป็นคลื่นจรแรงดันชั่วเดียวกัน

ดังนั้นจากผลสรุปในข้อ 4 และ 5 จึงสามารถนำมาวิเคราะห์ชนิดของความผิดปกติที่เกิดขึ้นได้ว่า ความผิดปกตินั้นเป็นไปในลักษณะใด โดยความแตกต่างของค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์จะสามารถวิเคราะห์ได้จากโปรแกรมคำนวณหาอัตราส่วนของค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ ณ ตำแหน่งผิดปกติ

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

จากผลการทดสอบ และข้อสรุปพบว่า ระบบที่ใช้ทดสอบและส่วนการประมวลผล ยังมีข้อจำกัดและข้อด้อยอยู่บ้าง จึงได้นำเสนอข้อแนะนำเพื่อปรับปรุงระบบให้สามารถใช้งานได้ดียิ่งขึ้น ดังนี้

1. ในการทดสอบกับสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินจริงๆนั้น อาจจะต้องเปลี่ยนค่าตัวเก็บประจุสำหรับดิซชาร์จเพื่อสร้างสัญญาณพัลส์แรงดันสูงให้มีค่ามากขึ้น เพื่อให้เหมาะสมกับสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินที่มีค่าความจุไฟฟ้าสูง

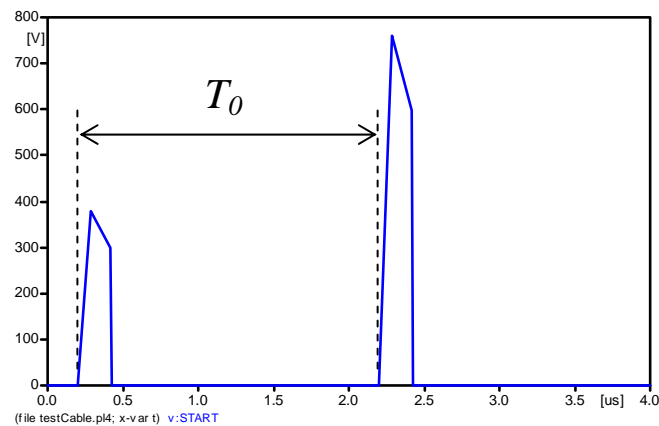
2. เนื่องจากสายเคเบิล RG-58A/U มีความสูญเสียภายในสายมากจึงทำให้ขนาดแรงดันที่สะท้อนกลับมายังต้นสายมีการลดทอนลงไปมาก แต่ถ้านำไปใช้ทดสอบกับสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินความสูญเสียภายในสายจะมีค่าน้อยกว่านี้ เนื่องจากสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินมีตัวนำที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัดที่ใหญ่กว่าสายเคเบิล RG-58A/U จึงทำให้ค่าความต้านทานภายในสายมีค่าน้อย ซึ่งทำให้การลดทอนภายในสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินมีค่าต่ำ

3. ในการทดสอบหาตำแหน่งผิดปกติบนสายเคเบิล และอัตราส่วนของค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ ณ ตำแหน่งผิดปกติให้มีความแม่นยำมากขึ้น ควรจะทราบข้อมูลสัมประสิทธิ์การลดทอนของสายเคเบิล ค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายเคเบิล และค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งกำเนิด

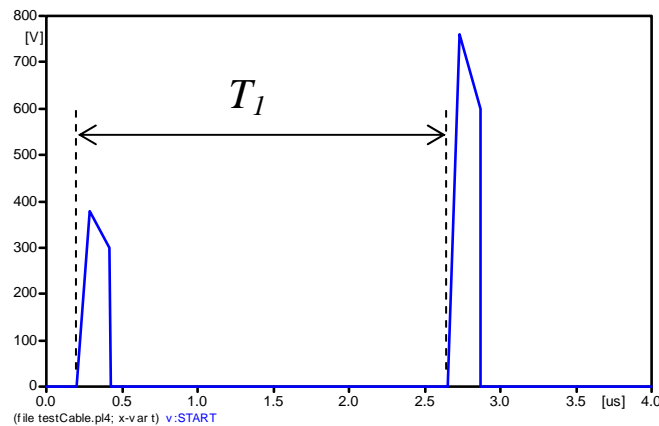
4. ความกว้างของพัลส์จากแหล่งกำเนิดสัญญาณพัลส์แรงดันนั้น มีข้อจำกัดอยู่ที่อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ในการขับไอซีมอสเฟตนั้น ไม่สามารถทำงานในย่านความถี่ที่สูงมากๆได้ ดังนั้นถ้าในอนาคตมีไอซีขับมอสเฟตที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น ก็สามารถที่จะพัฒนาแหล่งกำเนิดสัญญาณพัลส์ให้มีความกว้างแคบลงได้อีก ซึ่งจะช่วยให้วัดสายเคเบิลที่มีความยาวสั้นๆได้

5. สายเคเบิลแรงสูงใต้ดินที่นำมาใช้ในระบบไฟฟ้า เมื่อถูกใช้งานผ่านไปช่วงระยะเวลาหนึ่งคุณภาพของสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินจะเสื่อมลง โดยค่าพารามิเตอร์หนึ่งที่เป็นตัวชี้วัดว่าสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินนั้นมีคุณภาพเสื่อมลงก็คือ ค่าความจุไฟฟ้าของสายเคเบิล โดยค่าความจุไฟฟ้าของสายเคเบิลที่เสื่อมจะมีค่าเพิ่มมากขึ้น ซึ่งส่งผลให้ค่าการสูญเสียทางฉนวน (dielectric loss) มีค่ามากขึ้น[13-14]

จากสมการที่ (2.3) พารามิเตอร์ที่สำคัญในการวิเคราะห์คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริก ( $\epsilon_r$ ) ซึ่งเป็นค่าที่มีความสัมพันธ์กับค่าความจุไฟฟ้าของฉนวนของสายเคเบิลโดยตรง(จากสมการที่ (2.12)) เมื่อให้ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของสายเคเบิลที่ติดตั้งใหม่ในระบบเป็น  $\epsilon_{r0}$  ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของสายเคเบิลที่ถูกใช้งานเป็นระยะเวลาหนึ่งเป็น  $\epsilon_{r1}$  และให้ความยาวสายเคเบิลเป็น  $l$  ลักษณะของรูปคลื่นแรงดันสะท้อนกลับที่วัดได้แสดงได้ดังรูปที่ 5.1 และ 5.2



รูปที่ 5.1 คลื่นจรแรงดันสะท้อนกลับของสายเคเบิลที่ติดตั้งใหม่



รูปที่ 5.2 คลื่นจรแรงดันสะท้อนกลับของสายเคเบิลที่ผ่านการใช้งานไประยะเวลาหนึ่ง

จากสมการที่ (2.3) และ (2.11) จะสามารถคำนวณหาความแตกต่างระหว่างค่าคงตัวไดอิเล็กตริกได้ดังนี้

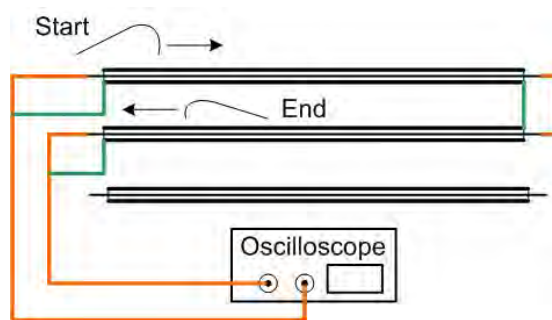
$$\varepsilon_{r0} = \left( \frac{3 \times 10^8}{2l} \cdot T_0 \right)^2 \quad (5.1)$$

$$\varepsilon_{r1} = \left( \frac{3 \times 10^8}{2l} \cdot T_1 \right)^2 \quad (5.2)$$

เวลาที่วัดได้จากรูปคลื่นจรแรงดันสะท้อนกลับ สำหรับสายเคเบิลที่ถูกใช้งานมาเป็นระยะเวลาหนึ่ง ( $T_1$ ) จะมีค่ามากกว่าเวลาที่วัดได้จากรูปคลื่นจรแรงดันสะท้อนกลับสำหรับสายเคเบิลใหม่ ( $T_0$ ) ดังนั้นค่าคงตัวไดอิเล็กตริกที่คำนวณได้ของสายเคเบิลใหม่จะมีค่าน้อยกว่าสายเคเบิลที่ถูกใช้งานมาเป็นระยะเวลาหนึ่ง

ซึ่งวิธีการนี้จะใช้ตรวจสอบคุณภาพการฉนวนของสายเคเบิลได้ ว่าสายเคเบิลมีคุณภาพเสื่อมลงหรือไม่

6. แหล่งกำเนิดสัญญาณพัลส์แรงดันนี้ สามารถนำมาใช้ในการตรวจวัดค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ และสัมประสิทธิ์การลดทอนของสายเคเบิลสำหรับสายเคเบิลเส้นเดียวได้ (ภาคผนวก ค) และสำหรับการตรวจวัดสายเคเบิลระบบ 3 เฟส ที่ติดตั้งอยู่ภายในระบบไฟฟ้า สามารถวัดได้โดยการต่อปลายสายเคเบิล 2 เส้นเข้าด้วยกัน แล้วตรวจวัดรูปคลื่นจรแรงดันสะท้อนกลับทางด้านต้นสายดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 การตรวจวัดค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์และสัมประสิทธิ์การลดทอนของระบบสายเคเบิล 3 เฟส

## รายการอ้างอิง

1. Vahdat Vahedy. Polymer Insulated High Voltage Cables. Electrical Insulation Magazine, IEEE 22 (May-June 2006) : 13-18.
2. T. Grun, M. Loppacher, J. Rickmann, R. Malewski. Equipment for On-site Testing of HV Insulation. High Voltage Engineering, 1999. Eleventh International Symposium on (Conf. Publ. No. 467) (August 1999) : 240-243.
3. Uwe Schichler, Hossein Borsi, Ernst Gockenbach. On-site Cable Testing with a Resonant Test Set and an Additional Partial Discharge Measurement. Conference Record of the 1996 IEEE International Symposium on Electrical Insulation Volumn 1 (June 1996) : 138-141.
4. Hans R. Gnerlich. Cable Testing and Cable Fault Locating with Minimum Risk to Good Cable. Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 1989. Annual Report (October 1989) : 265-271.
5. ไตศักดิ์ ทัศนมานุตรिया. การผลิตและส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า. กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดดูเคชั่น, 2540.
6. CCBDA. Copper medium-voltage power cables[Online]. แหล่งที่มา : <http://coppercanada.ca/publications/pub23e/23e.html>, 2006.
7. S.B.S Engineering. PCJ cable joints[Online]. แหล่งที่มา : [http://sbseng.com/page.php?products\\_ID=23](http://sbseng.com/page.php?products_ID=23), 2003.
8. Eng\_Market. ความรู้ระบบเคเบิลใต้ดิน[Online]. แหล่งที่มา : <http://www.pea.co.th/peas3/1207/?p=270>, 2007.
9. Allan Greenwood. Electrical Transients in Power Systems. Canada : John Wiley & Sons, 1971.
10. อรุณชัย วงศ์วิศาลศรี. การออกแบบและสร้างเครื่องหาตำแหน่งฟอลต์ของสายเคเบิลแรงสูงโดยใช้วิธีการสะท้อนของคลื่น. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.

11. S. Potivejkul, P. Kerdonfag, S. Jamnian , V. Kinnares. Design of A Low Voltage Cable Fault Detector. Power Engineering Society Winter Meeting, 2000. IEEE 1 (January 2000) : 724-729.
12. LI Yongli, Zhang Yi, MA Zhiyu. Fault Location Method Based On The Periodicity of The Transient Voltage Traveling Wave. TENCON 2004. 2004 IEEE Region 10 Conference Volumn C 3 (November 2004) : 389-392.
13. A. Medjdoub and A. Boubakeur. Influence of electrical aging on the properties of cross-linked Polyethylene use as electrical insulation on underground power cables. Power Tech, 2005 IEEE Russia (June 2005) : 1-4.
14. A.Boubakeur, Y.Mecheri and M.Boumerzoug. Influence of continous thermal ageing on the properties of XLPE used in medium voltage cables. High Voltage Engineering, 1999. Eleventh International Symposium on (Conf. Publ. No. 467) 4 (August 1999) : 236-239.
15. D.A. Horvath and R.L. Steinman. Relationship of electric insulation void content with electric cable normalized capacitance. Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2001 Annual Report (October 2001) : 141-144.
16. Marc-Jano Knopp. Inverter / Driver 7406 / 74LS14[Online]. แหล่งที่มา : <http://ist.uwaterloo.ca/~schepers/MJK/invdrv.html>, 1997.
17. Colin Mitchell. Talking Electronic[Online]. แหล่งที่มา : [http://www.talkingelectronics.com/te\\_interactive\\_index.html](http://www.talkingelectronics.com/te_interactive_index.html), 2007.
18. Phillips Semiconductors. 74HC/HCT221 Dual non-retriggerable monostable multivibrator with reset[Online]. แหล่งที่มา : <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/27030/TI/CD74HCT221E.html>, 1990.
19. Toshiba. TOSHIBA Photocoupler GaAlAs Ired & Photo-IC TLP250[Online]. แหล่งที่มา : <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/32418/TOSHIBA/TLP250.html>, 2004.



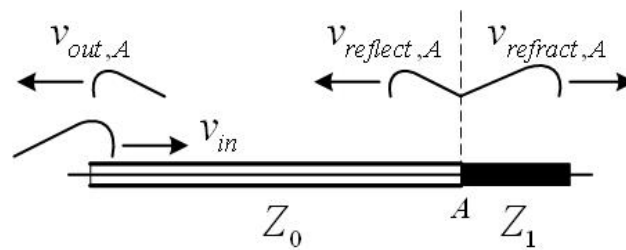
20. SGS Thomson Microelectronics. N-Enhancement Mode Power Mos Transistors IRF840[Online]. แหล่งที่มา : <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/129196/STMICROELECTRONICS/IRF840.html>, 1996.
21. Texas Instruments. TL494 PULSE-WIDTH-MODULATION CONTROL CIRCUITS[Online]. แหล่งที่มา : <http://th.farnell.com/2388947/semiconductors/product.us0?sku=texas-instruments-tl494cn>, 2005.
22. SGS Thomson Microelectronics. N-Enhancement Mode Power Mos Transistors IRF620[Online]. แหล่งที่มา : <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/22393/STMICROELECTRONICS/IRF620.html>, 1996.
23. ENERELEC. High Frequency Transformer[Online]. แหล่งที่มา : <http://www.enerelec.com/industrial/proe/switchpower.htm>, 2008.
24. Roberts Neimanis and Sarah Acker. General Condition Assessment of XLPE and PILC Power Cables. GE Energy (October 2005) : 1-5.

ภาคผนวก

## ภาคผนวก ก วิธีการคำนวณ

การคำนวณหาอัตราส่วนของค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ ณ ตำแหน่งผิดพร่อง

สายเคเบิลแรงสูงใต้ดินมีความผิดพร่องเกิดขึ้น ณ ตำแหน่ง A ดังรูปที่ ก.1



รูปที่ ก.1 การสะท้อนของคลื่นจรที่ตำแหน่ง A บนสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน

สายเคเบิลแรงสูงใต้ดินมีค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์เป็น  $Z_0$  และค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเป็น  $\beta$  (หน่วย เดซิเบลต่อเมตร, db/m) โดยที่ตำแหน่ง A เกิดการไม่เข้ากันของสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินกับค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์  $Z_1$  โดยมีคลื่นจรแรงดันด้านเข้าเป็น  $v_{in}$  และที่ตำแหน่ง A มีคลื่นจรแรงดันสะท้อนกลับเป็น  $v_{reflect,A}$  คลื่นจรแรงดันส่งผ่านเป็น  $v_{refract,A}$  และคลื่นจรแรงดันสะท้อนกลับมายังต้นสายเป็น  $v_{out,A}$

กำหนดให้ อัตราส่วนของค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ ณ ตำแหน่งผิดพร่อง  $(x) = \left( \frac{Z_1}{Z_0} \right)$

1. กรณีที่ละเอียดผลเนื่องจากการลดทอนของสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินและค่าคงที่การส่งผ่านของแหล่งกำเนิดจะได้

$$v_{out,A} = 2 \cdot \rho_A \cdot v_{in} \quad (ก.1)$$

ที่ตำแหน่ง A สามารถหาค่าคงที่การสะท้อน ( $\rho_A$ ) ได้เท่ากับ  $\frac{Z_1 - Z_0}{Z_1 + Z_0}$

แทนค่า  $\rho_A$  ลงในสมการ (ก.1) จะได้

$$\frac{v_{out,A}}{v_{in}} = 2 \cdot \left( \frac{Z_1 - Z_0}{Z_1 + Z_0} \right)$$

$$\frac{v_{out,A}}{v_{in}} = 2 \cdot \frac{Z_0}{Z_0} \cdot \left( \frac{\frac{Z_1}{Z_0} - 1}{\frac{Z_1}{Z_0} + 1} \right) \quad (\text{ก.2})$$

แทน  $x = \frac{Z_1}{Z_0}$  ในสมการ (ก.2) จะได้

$$\frac{v_{out,A}}{v_{in}} = 2 \cdot \left( \frac{x-1}{x+1} \right)$$

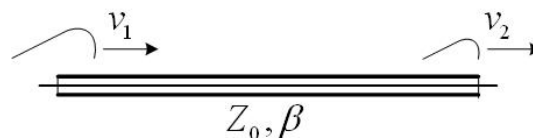
จัดรูปสมการจะได้

$$x = \frac{\left( 2 + \frac{v_{out,A}}{v_{in}} \right)}{\left( 2 - \frac{v_{out,A}}{v_{in}} \right)} \quad (\text{ก.3})$$

เพราะฉะนั้นจะได้อัตราส่วนของค่าเสรีจิมพีแดนซ์ ณ ตำแหน่งผิดพร่อง A ในกรณีทีละเลยผลเนื่องจากการลดทอนของสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินและค่าคงที่การส่งผ่านของแหล่งกำเนิด ดังสมการที่ (ก.3)

2. กรณีที่พิจารณาผลเนื่องจากการลดทอนของสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน แต่ละเลยผลเนื่องจากค่าคงที่การส่งผ่านของแหล่งกำเนิด

สายเคเบิลแรงสูงใต้ดินที่มีการลดทอนแสดงดังรูปที่ ก.2



รูปที่ ก.2 สายเคเบิลแรงสูงใต้ดินที่มีการลดทอน

$$\text{สัมประสิทธิ์การลดทอน}(\beta) = 20 \log \frac{v_1}{v_2} \text{ หน่วย db/m}$$

โดยคลื่นจรแรงดันที่เคลื่อนจากต้นสายไปถึงตำแหน่งผิดพร่องมีความยาว  $l$  ดังนั้นคลื่นจรที่เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งผิดพร่อง และกลับมายังตำแหน่งต้นสายจะได้รับความยาวรวมเท่ากับ  $2l$  เราจะได้คลื่นจรแรงดันสะท้อนกลับที่ตำแหน่งผิดพร่อง A เป็น

$$v_{\text{reflect},A} = \rho_A \cdot (10^{-\beta \cdot l/20} v_{\text{in}})$$

และจะได้คลื่นจรแรงดันสะท้อนกลับที่ต้นสายเป็น

$$v_{\text{out},A} = 2 \cdot (10^{-\beta \cdot l/20} v_{\text{reflect},A})$$

$$v_{\text{out},A} = 2 \cdot \rho_A \cdot (10^{-\beta \cdot 2l/20} v_{\text{in}})$$

$$v_{\text{out},A} = 2 \cdot \rho_A \cdot (10^{-\beta \cdot l/10} v_{\text{in}}) \quad (\text{ก.4})$$

ที่ตำแหน่ง A สามารถหาค่าคงที่การสะท้อน ( $\rho_A$ ) ได้เท่ากับ  $\frac{Z_1 - Z_0}{Z_1 + Z_0}$

แทนค่า  $\rho_A$  ลงในสมการ (ก.4) จะได้

$$\frac{v_{\text{out},A}}{v_{\text{in}}} = 2 \cdot \left( \frac{Z_1 - Z_0}{Z_1 + Z_0} \right) \cdot 10^{-\beta \cdot l/10}$$

$$\frac{v_{\text{out},A}}{v_{\text{in}}} = 2 \cdot \frac{Z_0}{Z_0} \cdot \left( \frac{\frac{Z_1}{Z_0} - 1}{\frac{Z_1}{Z_0} + 1} \right) \cdot 10^{-\beta \cdot l/10} \quad (\text{ก.5})$$

แทน  $x = \frac{Z_1}{Z_0}$  ในสมการ (ก.5) จะได้

$$\frac{v_{\text{out},A}}{v_{\text{in}}} = 2 \cdot \left( \frac{x-1}{x+1} \right) \cdot 10^{-\beta \cdot l/10}$$

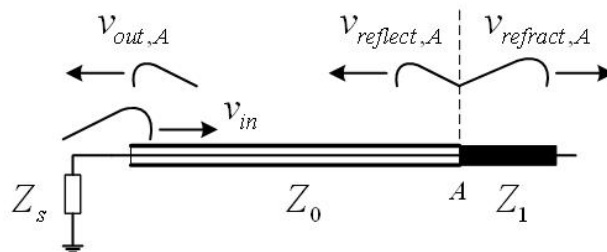
จัดรูปสมการจะได้

$$x = \frac{\left( 2 \cdot 10^{-\beta \cdot l/10} + \frac{V_{out,A}}{V_{in}} \right)}{\left( 2 \cdot 10^{-\beta \cdot l/10} - \frac{V_{out,A}}{V_{in}} \right)} \quad (\text{ก.6})$$

เพราะฉะนั้นจะได้อัตราส่วนของค่าเสรีจิมพีแดนซ์ ณ ตำแหน่งผิดพร่อง A ในกรณีที่พิจารณาผลเนื่องจากการลดทอนของสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน แต่ละเลยผลเนื่องจากการส่งผ่านของแหล่งกำเนิดดังสมการที่ (ก.6)

3. กรณีที่ละเลยผลเนื่องจากการลดทอนของสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน แต่พิจารณาผลเนื่องจากการส่งผ่านของแหล่งกำเนิด

การสะท้อนของคลื่นจรแรงดันภายในสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินแสดงดังรูปที่ ก.3



รูปที่ ก.3 สายเคเบิลแรงสูงใต้ดินที่ไม่มีการลดทอน แต่มีอิมพีแดนซ์ของแหล่งกำเนิด

เมื่อคลื่นจรแรงดันสะท้อนกลับเคลื่อนที่มายังตำแหน่งต้นสาย คลื่นจรแรงดันนั้นก็จะส่งผ่านไปยังแหล่งกำเนิด ดังนั้นจะสามารถหาค่าคงที่การส่งผ่านที่ตำแหน่งต้นสายได้เท่ากับ

$$\alpha_s = \frac{2Z_s}{Z_s + Z_0} \quad (\text{ก.7})$$

ส่วนคลื่นจรแรงดันสะท้อนกลับไปที่ตำแหน่งผิดพร่อง A จะมีค่าเท่ากับ

$$V_{reflect,A} = \rho_A \cdot V_{in}$$

และจะได้คลื่นจรแรงดันสะท้อนกลับที่ต้นสายเป็น

$$\begin{aligned} v_{out,A} &= \alpha_s \cdot v_{reflect,A} \\ v_{out,A} &= \alpha_s \cdot \rho_A \cdot v_{in} \end{aligned} \quad (ก.8)$$

ที่ตำแหน่ง A สามารถหาค่าคงที่การสะท้อน ( $\rho_A$ ) ได้เท่ากับ  $\frac{Z_1 - Z_0}{Z_1 + Z_0}$

แทนค่า ( $\rho_A$ ) ลงในสมการ (ก.8) จะได้

$$\begin{aligned} \frac{v_{out,A}}{v_{in}} &= \alpha_s \cdot \left( \frac{Z_1 - Z_0}{Z_1 + Z_0} \right) \\ \frac{v_{out,A}}{v_{in}} &= \alpha_s \cdot \frac{Z_0}{Z_0} \cdot \left( \frac{\frac{Z_1}{Z_0} - 1}{\frac{Z_1}{Z_0} + 1} \right) \end{aligned} \quad (ก.9)$$

แทน  $x = \frac{Z_1}{Z_0}$  ในสมการ (ก.9) จะได้

$$\frac{v_{out,A}}{v_{in}} = \alpha_s \cdot \left( \frac{x-1}{x+1} \right)$$

จัดรูปสมการจะได้

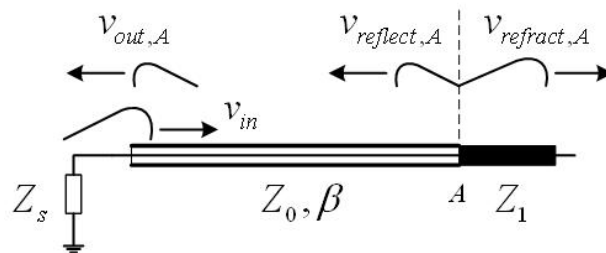
$$x = \frac{\left( \alpha_s + \frac{v_{out,A}}{v_{in}} \right)}{\left( \alpha_s - \frac{v_{out,A}}{v_{in}} \right)} \quad (ก.10)$$

เพราะฉะนั้นจะได้อัตราส่วนของค่าเสรีจิมพีแดนซ์ ณ ตำแหน่งผิดพ่วง A ในกรณีนี้ที่  
ละเลยผลเนื่องจากการลดทอนของสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน แต่พิจารณาผลเนื่องจากการ

ส่งผ่านของแหล่งกำเนิดดังสมการที่ (ก.10) โดยค่าคงที่การส่งผ่านเนื่องจากผลของอิมพีแดนซ์ของแหล่งกำเนิดสามารถหาได้จากสมการที่ (ก.7)

4. กรณีที่พิจารณาผลเนื่องจากการลดทอนของสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน และค่าคงที่การส่งผ่านของแหล่งกำเนิด

การสะท้อนของคลื่นจรแรงดันภายในสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินแสดงดังรูปที่ ก.4



รูปที่ ก.4 สายเคเบิลแรงสูงใต้ดินที่มีการลดทอน และอิมพีแดนซ์ของแหล่งกำเนิด

โดยคลื่นจรแรงดันที่เคลื่อนจากต้นสายไปถึงตำแหน่งผิดพ้องมีความยาว  $l$  ดังนั้นคลื่นจรที่เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งผิดพ้อง และกลับมายังตำแหน่งต้นสายจะได้ความยาวรวมเท่ากับ  $2l$  เราจะได้คลื่นจรแรงดันสะท้อนกลับที่ตำแหน่งผิดพ้อง A เป็น

$$v_{reflect,A} = \rho_A \cdot (10^{-\beta \cdot l/20} v_{in})$$

และจะได้คลื่นจรแรงดันสะท้อนกลับที่ต้นสายเป็น

$$v_{out,A} = \alpha_s \cdot (10^{-\beta \cdot l/20} v_{reflect,A})$$

$$v_{out,A} = \alpha_s \cdot \rho_A \cdot (10^{-\beta \cdot 2l/20} v_{in})$$

$$v_{out,A} = \alpha_s \cdot \rho_A \cdot (10^{-\beta \cdot l/10} v_{in}) \quad (\text{ก.11})$$

ที่ตำแหน่ง A สามารถหาค่าคงที่การสะท้อน ( $\rho_A$ ) ได้เท่ากับ  $\frac{Z_1 - Z_0}{Z_1 + Z_0}$



แทนค่า  $(\rho_A)$  ลงในสมการ (ก.11) จะได้

$$\frac{v_{out,A}}{v_{in}} = \alpha_s \cdot \left( \frac{Z_1 - Z_0}{Z_1 + Z_0} \right) \cdot 10^{-\beta l/10}$$

$$\frac{v_{out,A}}{v_{in}} = \alpha_s \cdot \frac{Z_0}{Z_0} \cdot \left( \frac{\frac{Z_1}{Z_0} - 1}{\frac{Z_1}{Z_0} + 1} \right) \cdot 10^{-\beta l/10} \quad (\text{ก.12})$$

แทน  $x = \frac{Z_1}{Z_0}$  ในสมการ (ก.12) จะได้

$$\frac{v_{out,A}}{v_{in}} = \alpha_s \cdot \left( \frac{x - 1}{x + 1} \right) \cdot 10^{-\beta l/10}$$

จัดรูปสมการจะได้

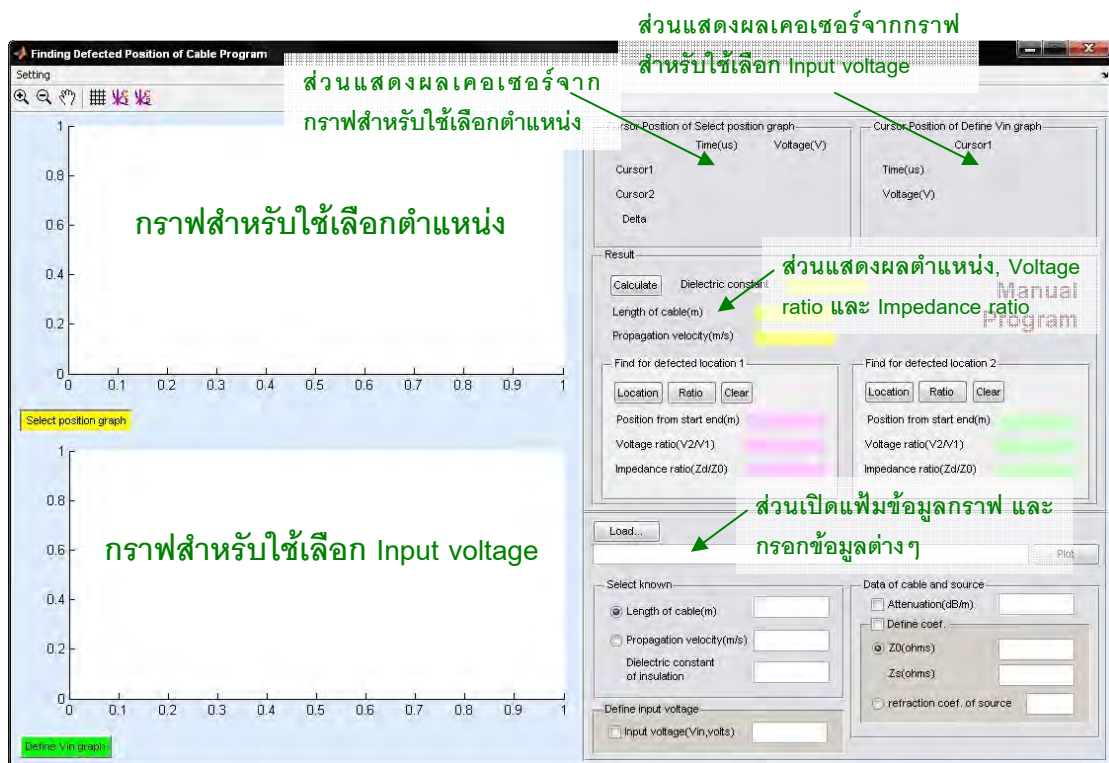
$$x = \frac{\left( \alpha_s \cdot 10^{-\beta l/10} + \frac{v_{out,A}}{v_{in}} \right)}{\left( \alpha_s \cdot 10^{-\beta l/10} - \frac{v_{out,A}}{v_{in}} \right)} \quad (\text{ก.13})$$

เพราะฉะนั้นจะได้อัตราส่วนของค่าเสรีจิมพีแดนซ์ ณ ตำแหน่งผิดพร่อง A ในกรณีนี้ที่พิจารณาผลเนื่องจากการลดทอนของสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน และค่าคงที่การส่งผ่านของแหล่งกำเนิดตั้งสมการที่ (ก.13) โดยค่าคงที่การส่งผ่านเนื่องจากผลของอิมพีแดนซ์ของแหล่งกำเนิดสามารถหาได้จากสมการที่ (ก.7)

## ภาคผนวก ข การใช้งานโปรแกรม

การใช้งานโปรแกรมคำนวณหาตำแหน่งผิดพ่วงแบบผู้วิเคราะห์ทำการปรับตำแหน่งได้เอง(Manual program)

ส่วนของหน้าต่างโปรแกรมที่ใช้ติดต่อกับผู้ใช้งานแสดงได้ดังรูปที่ ข.1

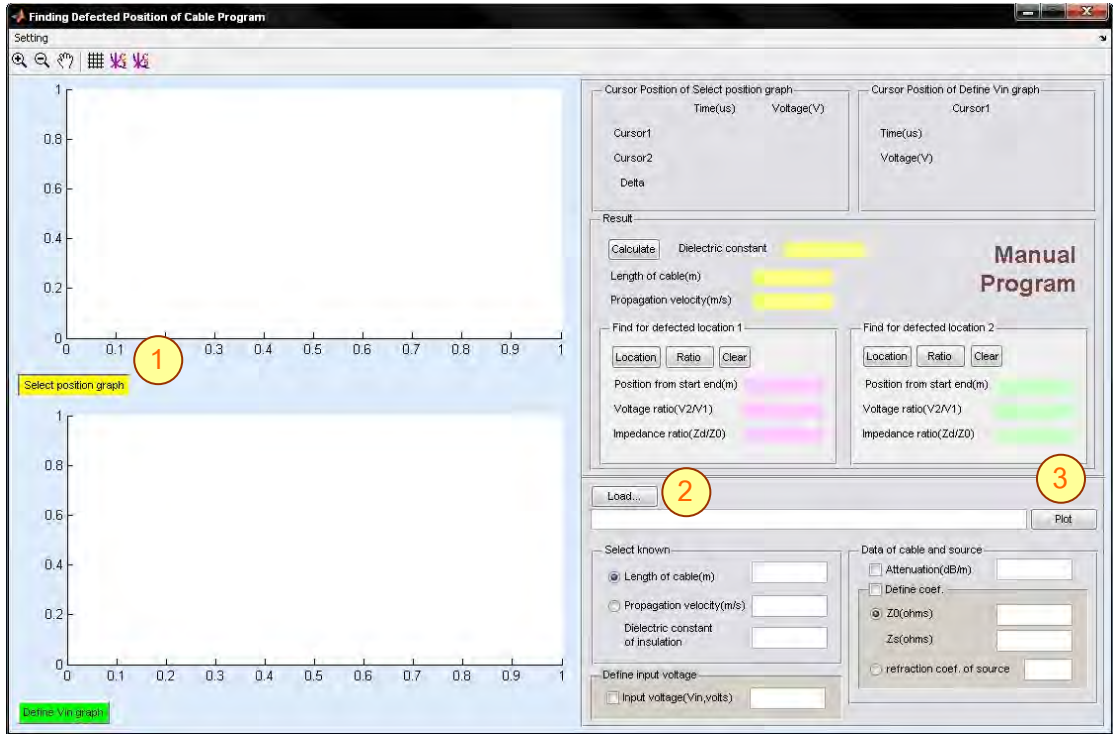


รูปที่ ข.1 ส่วนของหน้าต่างโปรแกรมแบบผู้วิเคราะห์ทำการปรับตำแหน่งได้เอง

จากรูปที่ ข.1 แสดงส่วนของโปรแกรมต่างๆ ไว้ในรูปแบบ ในส่วนของโปรแกรมคำนวณหาตำแหน่งผิดพ่วงแบบผู้วิเคราะห์ทำการปรับตำแหน่งได้เอง จะใช้ส่วนของกราฟสำหรับใช้เลือกตำแหน่งเป็นหลัก เพื่อคำนวณหาตำแหน่งผิดพ่วง โดยการเลือกตำแหน่งของรูปคลื่นจรแรงดันสะท้อนกลับ โดยมีวิธีขั้นตอนการใช้งานดังนี้

1. เลือก Select position graph ให้มีลักษณะปุ่มลงไป เพื่อเลือกใช้กราฟสำหรับเลือกตำแหน่ง
2. เลือก Load... เพื่อเลือกไฟล์ข้อมูลที่บรรจุรูปคลื่นจรแรงดันสะท้อนกลับที่ได้จากการทดสอบ

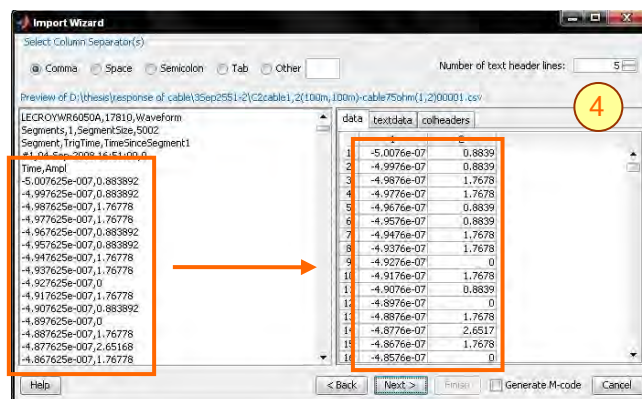
3. เลือก Plot เพื่อวาดรูปคลื่นจรแรงดันสะท้อนกลับลงบนกราฟสำหรับเลือกตำแหน่ง



รูปที่ ข.2 ขั้นตอนการใช้งานที่ 1-2


4. เลือก Number of text header lines : เป็น 5 เพื่อเลือกส่วนของข้อมูลดังรูปที่ 1.3

5. เลือก Next และ Finish เพื่อวาดรูปคลื่นจรแรงดันสะท้อนกลับ

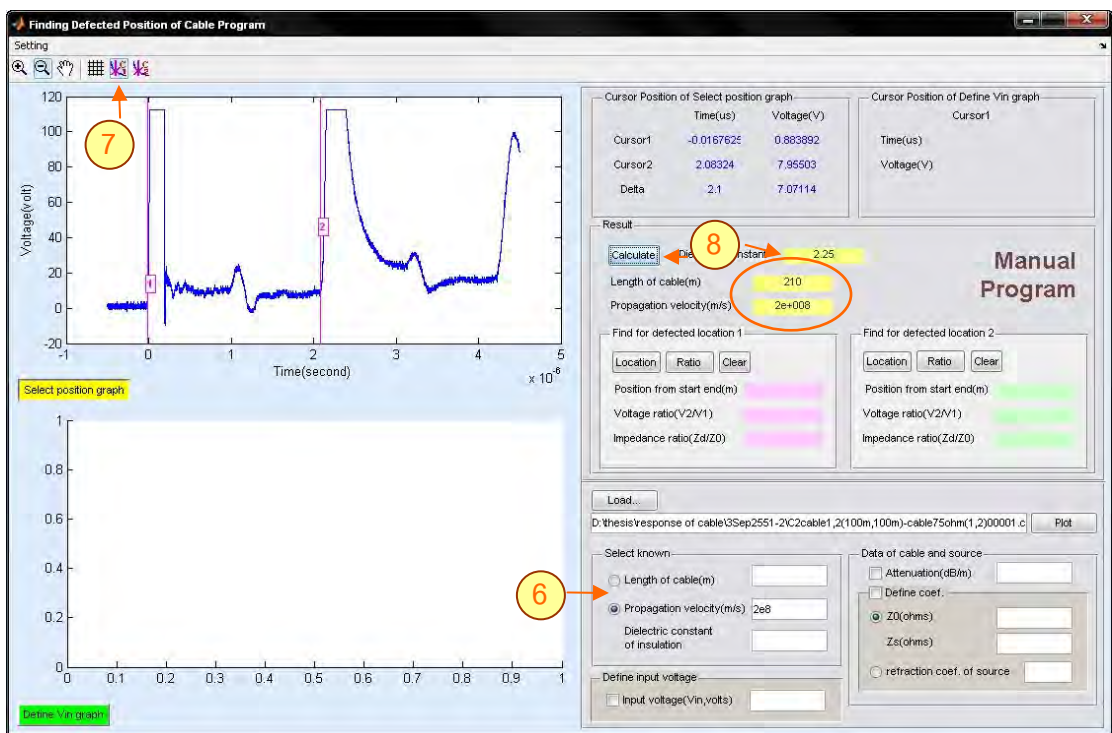


รูปที่ ข.3 ส่วนหน้าต่างเพื่อกำหนดช่วงในการวาดกราฟ

6. กำหนดความยาวของสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน หรือความเร็วของคลื่นจรที่เคลื่อนที่บนสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน หรือค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของฉนวนของสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน โดยเลือกอย่างใดอย่างหนึ่ง

7. เลือก  เพื่อสร้างเคอร์เซอร์สำหรับกำหนดตำแหน่ง เพื่อหาตำแหน่งผิดพลาด โดยในครั้งแรกจะต้องเลือกตำแหน่งที่สัมพันธ์กับข้อมูลที่เลือกในข้อ 6 ก่อน เพื่อที่จะหาความเร็วของคลื่นจรที่เคลื่อนที่บนสายเคเบิล และความยาวของสายเคเบิล


8. เลือก Calculate เพื่อคำนวณหา ความยาวของสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินและ ความเร็วของคลื่นจรที่เคลื่อนที่บนสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน

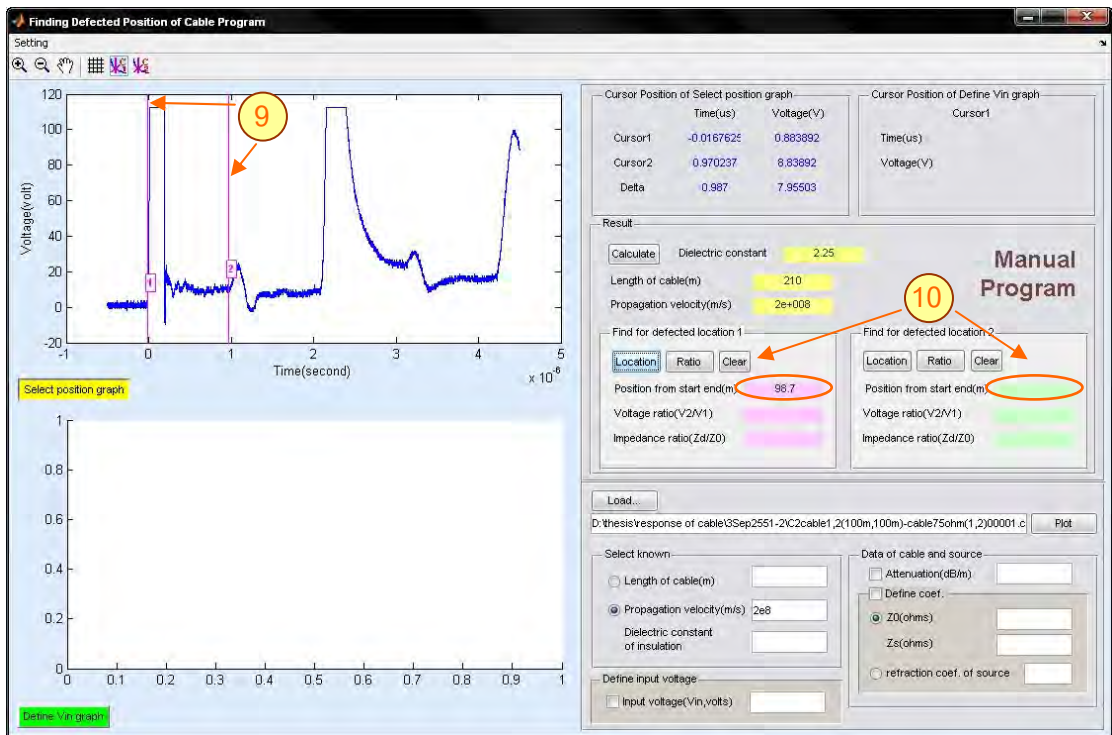


รูปที่ ข.4 ขั้นตอนการใช้งานที่ 6-8

9. เลื่อนเคอร์เซอร์เบอร์ 2 เพื่อเลือกตำแหน่งที่ผิดปกติบนกราฟ เพื่อหาตำแหน่งผิดพลาดของสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน

10. ที่ช่อง Find defected location 1 หรือ Find defected location 2 ให้เลือก Location เพื่อคำนวณและแสดงผลของตำแหน่งผิดพลาดของสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน

หมายเหตุ ปุ่ม  ทำหน้าที่ล้างข้อมูลที่แสดงอยู่ในช่อง Find defected location 1 หรือ Find defected location 2

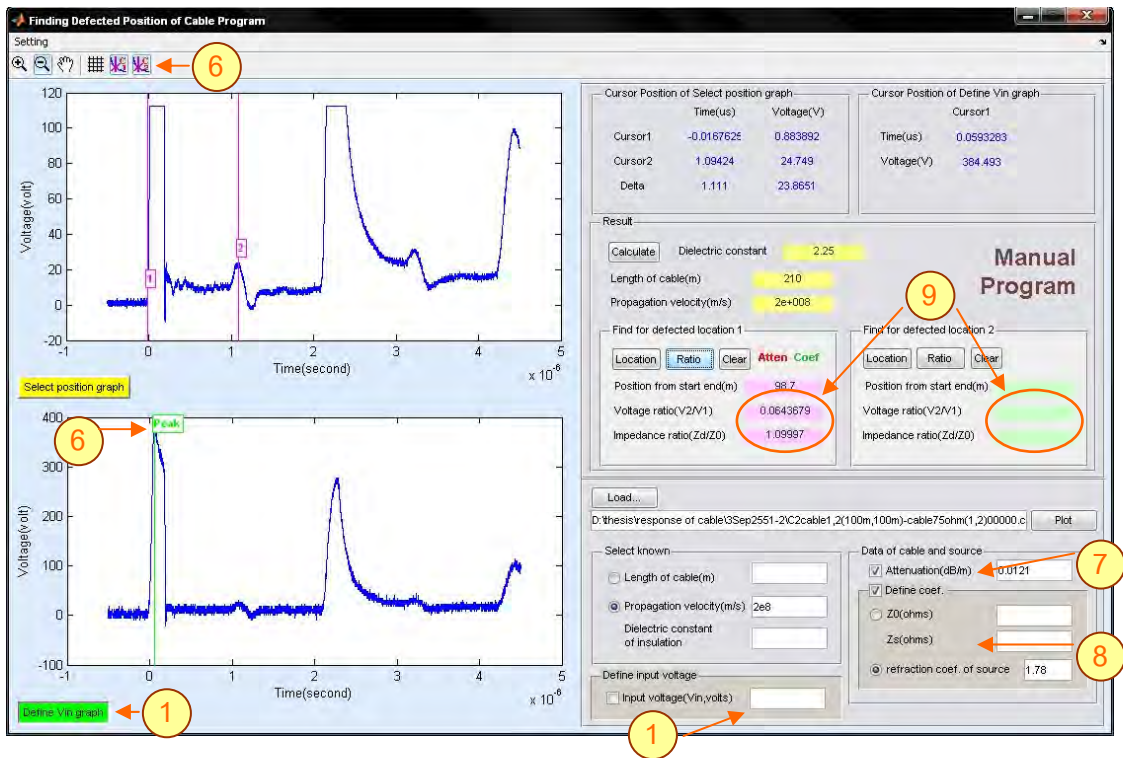


รูปที่ ข.5 ขั้นตอนการใช้งานที่ 9-10


### การใช้งานโปรแกรมคำนวณหาอัตราส่วนของค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ ณ ตำแหน่งผิดพ่วงแบบผู้วิเคราะห์ทำการปรับตำแหน่งได้เอง(Manual program)

ทำตามขั้นตอนที่ 1-9 ของโปรแกรมคำนวณหาตำแหน่งผิดพ่วง และทำตามขั้นตอนดังนี้

1. เลือก Define Vin graph ให้มีลักษณะปุ่มลงไป เพื่อเลือกใช้กราฟสำหรับใช้เลือก Input voltage หรือเลือกที่ช่อง Input voltage แล้วกำหนดขนาดของแรงดันด้านเข้าได้เลย
2. เลือก Load... เพื่อเลือกไฟล์ข้อมูลที่บรรจุรูปคลื่นจรแรงดันสะท้อนกลับที่ได้จากการทดสอบ
3. เลือก Plot เพื่อวาดรูปคลื่นจรแรงดันสะท้อนกลับลงบนกราฟสำหรับใช้เลือก Input voltage
4. เลือก Number of text header lines : เป็น 5 เพื่อเลือกส่วนของข้อมูลดังรูปที่ ข.3
5. เลือก Next และ Finish เพื่อวาดรูปคลื่นจรแรงดันสะท้อนกลับ



รูปที่ ข.6 ขั้นตอนการใช้งานที่ 1 และ 6-9

6. เลือก  เพื่อสร้างเคอร์เซอร์สำหรับใช้เลื่อนกำหนดตำแหน่ง เพื่อกำหนดขนาด Input voltage
7. สามารถกำหนดค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินได้
8. สามารถกำหนดค่าคงที่การส่งผ่านที่ตำแหน่งต้นสายได้ โดยเลือกได้สองแบบ คือ

1. กำหนดจากค่าเสรีจิมพีแดนซ์ของสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน กับค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งกำเนิด

2. กำหนดเป็นค่าคงที่การส่งผ่านที่แหล่งกำเนิด

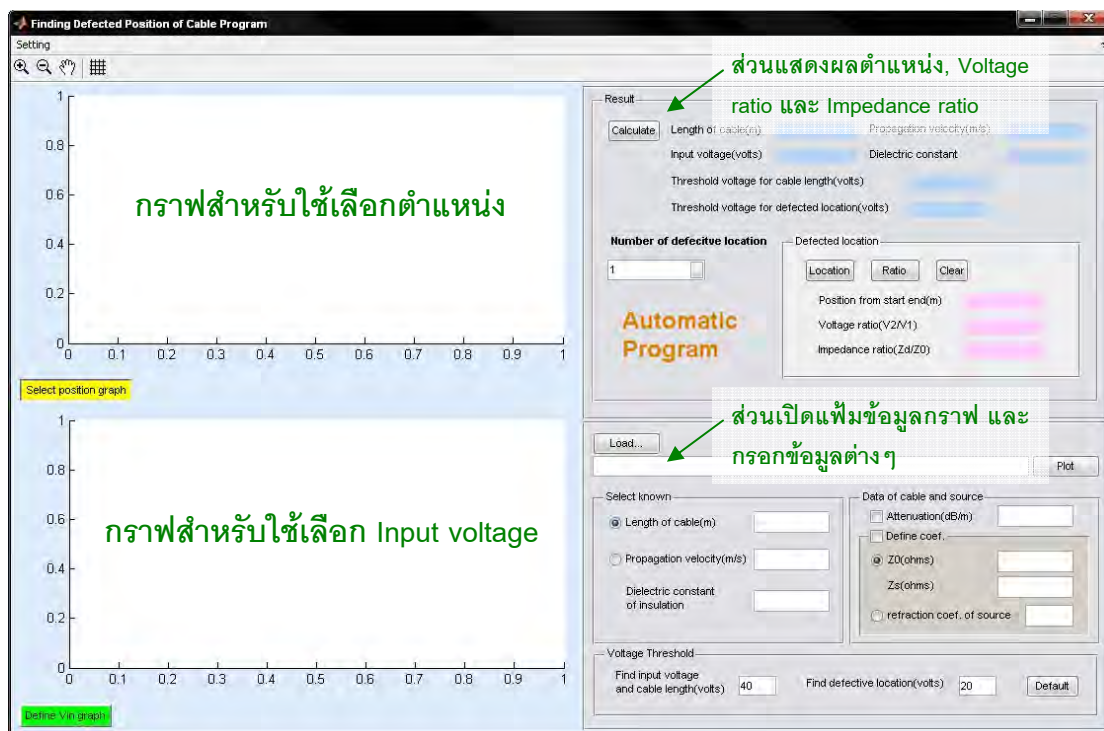
9. ช่อง Find defected location 1 หรือ Find defected location 2 เลือก Ratio เพื่อคำนวณและแสดงผลของอัตราส่วนแรงดันและอัตราส่วนของค่าเสรีจิมพีแดนซ์ ณ ตำแหน่งผิดปกติของสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน

หมายเหตุ ปุ่ม  ทำหน้าที่ล้างข้อมูลที่แสดงในช่อง Find defected location

1 หรือ Find defected location 2

## การใช้งานโปรแกรมคำนวณหาตำแหน่งผิดพร่อง และหาอัตราส่วนของค่าเสิร์จ อิมพีแดนซ์ ณ ตำแหน่งผิดพร่องแบบอัตโนมัติ(Automatic program)

ส่วนของหน้าต่างโปรแกรมที่ใช้ติดต่อกับผู้ใช้งานแสดงได้ดังรูปที่ ข.7



รูปที่ ข.7 ส่วนของหน้าต่างโปรแกรมแบบอัตโนมัติ

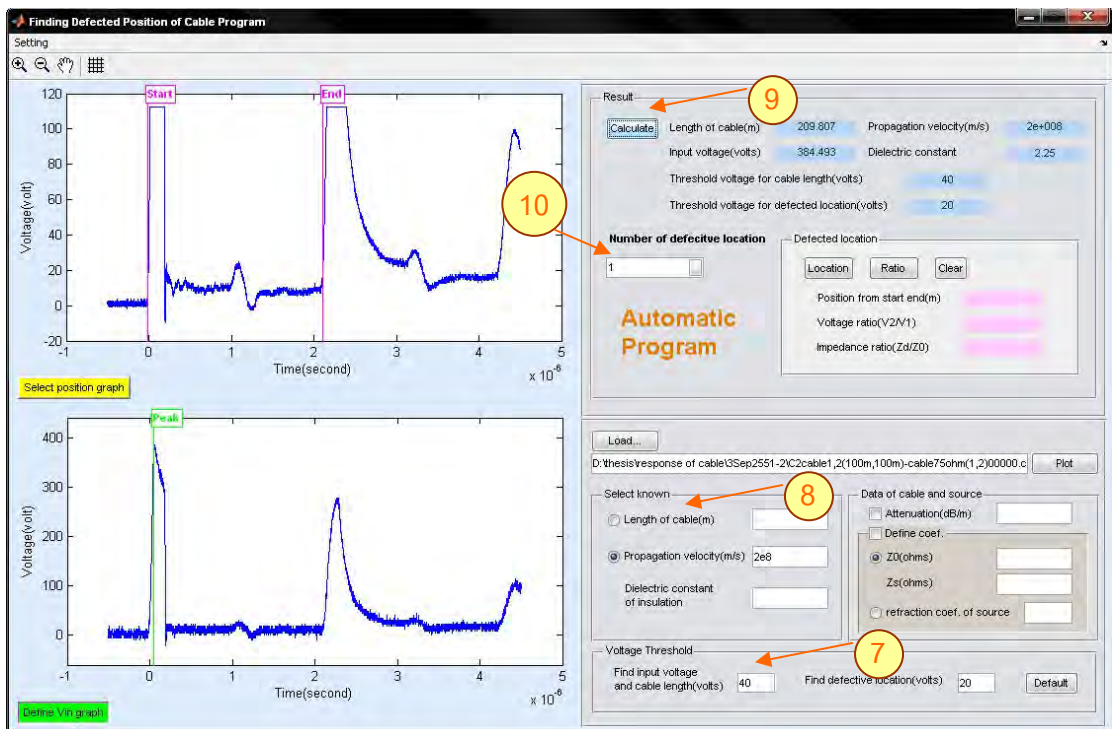
จากรูปที่ ข.7 แสดงส่วนของโปรแกรมต่างๆ ไว้ในรูปแบบ ในส่วนของโปรแกรมคำนวณหาตำแหน่งผิดพร่องแบบอัตโนมัติ จะใช้รูปคลื่นจรรยาแรงดันสะท้อนกลับทั้งสองกราฟ เพื่อนำมาวิเคราะห์หาตำแหน่งผิดพร่องแบบอัตโนมัติ โดยมีขั้นตอนวิธีการใช้งานดังนี้

1. เลือก Select position graph ให้มีลักษณะปุ่มลงไป เพื่อเลือกใช้กราฟสำหรับเลือกตำแหน่ง
2. เลือก Load... เพื่อเลือกไฟล์ข้อมูลที่บรรจุรูปคลื่นจรรยาแรงดันสะท้อนกลับที่ได้จากการทดสอบ
3. เลือก Plot เพื่อวาดรูปคลื่นจรรยาแรงดันสะท้อนกลับลงบนกราฟสำหรับเลือกตำแหน่ง

4. เลือก Number of text header lines : เป็น 5 เพื่อเลือกส่วนของข้อมูลดังรูปที่

ข.3

5. เลือก Next และ Finish เพื่อวาดรูปคลื่นแรงดันสะท้อนกลับ
  6. เลือก Define Vin graph ให้มีลักษณะปุ่มลงไป เพื่อเลือกใช้กราฟสำหรับเลือก Input voltage และทำตามขั้นตอนที่ 2 ถึง 5
  7. กำหนดขนาดค่าแรงดันขีดเริ่มสำหรับหาค่า Input voltage และความยาวสายเคเบิล และกำหนดขนาดค่าแรงดันขีดเริ่มสำหรับหาตำแหน่งผิดพ่วงจากรูปคลื่นแรงดันสะท้อนกลับ โดยสามารถกำหนดขนาดแรงดันได้เอง หรือคลิก Default เพื่อใช้ค่าที่กำหนดไว้แล้ว
  8. กำหนดความยาวของสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน หรือความเร็วของคลื่นจลน์ที่เคลื่อนที่บนสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน หรือค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของฉนวนของสายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน โดยเลือกอย่างใดอย่างหนึ่ง
  9. เลือกปุ่ม Calculate เพื่อหาค่าความยาวสายเคเบิล Input voltage ความเร็วของคลื่นจลน์ที่เคลื่อนที่บนสายเคเบิล และค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของฉนวนของสายเคเบิล
- เมื่อคลิกปุ่ม Calculate แล้ว ที่กราฟ Select position graph จะปรากฏเคอเซอร์บอกตำแหน่งต้นสาย และปลายสายที่ถูกนำมาใช้คำนวณหาค่าเวลาที่คลื่นจลน์เคลื่อนที่จากต้นสาย แล้วกลับมาถึงต้นสาย และที่กราฟ Define Vin graph จะปรากฏเคอเซอร์บอกตำแหน่ง Vin ของคลื่นจลน์แรงดัน



รูปที่ ข.8 ขั้นตอนการใช้งานที่ 7-10

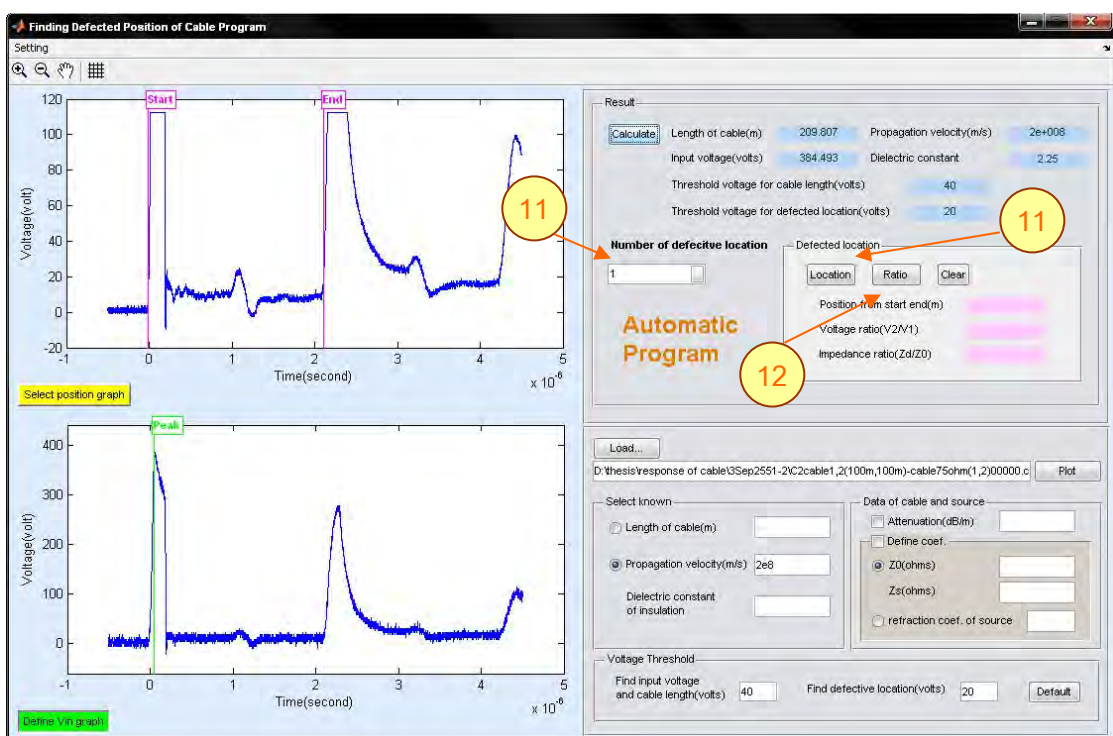


10. ที่ช่อง Number of defective location จะแสดงตำแหน่งผิดพ่วงที่โปรแกรมตรวจพบ ถ้าโปรแกรมตรวจไม่พบตำแหน่งผิดพ่วงที่ช่องจะไม่แสดงค่าใดๆ

11. เลือกตำแหน่งผิดพ่วงที่ช่อง Number of defective location แล้วเลือกปุ่ม Location เพื่อหาระยะทางของตำแหน่งผิดพ่วงนั้นจากต้นสาย

12. เลือกปุ่ม Ratio เพื่อหาค่าอัตราส่วนของค่าเสิร์จจิมพีแดนซ์ ณ ตำแหน่งผิดพ่วงนั้นๆ

หมายเหตุ ปุ่ม **Clear** ทำหน้าที่ล้างข้อมูลช่อง Find defected location



รูปที่ ข.9 ขั้นตอนการใช้งานที่ 11-12

**ภาคผนวก ค**  
**แหล่งกำเนิดสัญญาณพัลส์แรงดัน และสายเคเบิล RG-58A/U ที่ใช้ในการ**  
**ทดสอบ**

**ความยาวสายเคเบิล RG-58A/U**

การวัดความยาวสายเคเบิล RG-58A/U แต่ละเส้นจะทำการวัด 3 ครั้งเพื่อหาค่าเฉลี่ย และจะนำค่าเฉลี่ยนี้ไปเป็นความยาวอ้างอิงที่ใช้ในการทดสอบในบทที่ 4 ข้อมูลการวัดความยาวสายเคเบิลแสดงได้ดังตารางที่ ค.1 และสายเคเบิล RG-58A/U แสดงได้ดังรูปที่ ค.1

ตารางที่ ค.1 ความยาวสายเคเบิล RG-58A/U แต่ละเส้น

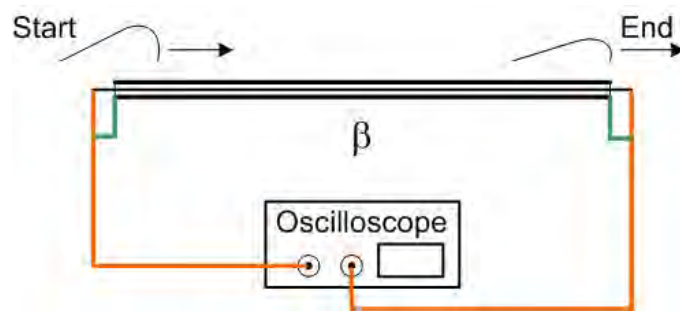
สายเคเบิล RG-58A/U	ความยาวสายเคเบิล (เมตร) ครั้งที่			ความยาวเฉลี่ย (เมตร)
	1	2	3	
สายเคเบิลเส้นที่ 1	99.47	99.65	99.57	99.56
สายเคเบิลเส้นที่ 2	99.47	99.375	99.765	99.54
สายเคเบิลเส้นที่ 3	99.41	99.615	99.56	99.53



รูปที่ ค.1 สายเคเบิล RG-58A/U

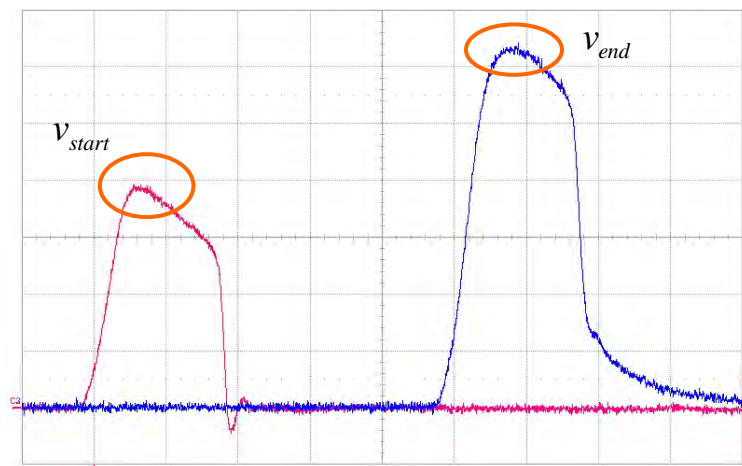
### การหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของสายเคเบิล RG-58A/U

การหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของสายเคเบิล RG-58A/U สามารถทำได้โดยการส่งสัญญาณพัลส์แรงดันเข้าไปที่ต้นสาย แล้ววัดรูปคลื่นแรงดันสะท้อนกลับนั้นทั้งที่ต้นสายและปลายสาย เพื่อนำมาคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอน โดยวิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนแสดงได้ดังรูปที่ ค.2



รูปที่ ค.2 วงจรการหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอน

- สายเคเบิลเส้นที่ 1 รูปคลื่นแรงดันสะท้อนกลับที่วัดได้แสดงดังรูปที่ ค.3



รูปที่ ค.3 คลื่นแรงดันสะท้อนกลับที่ได้จากการวัดสายเคเบิลเส้นที่ 1 (100V/div, 100ns/div)

จากรูปที่ ค.3 ขนาดแรงดันที่ต้นสาย ( $v_{start}$ ) มีค่าเท่ากับ 414.906 โวลต์ และขนาดแรงดันที่ปลายสาย ( $v_{end}$ ) มีค่าเท่ากับ 671.325 โวลต์ จากรูปที่ ค.2 ในการวัดหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของสายเคเบิลนี้ ที่ปลายสายจะมีลักษณะเป็นวงจรเปิด ซึ่งจะทำให้ขนาดแรงดันที่วัดได้ที่

ปลายสาย ( $v_{end}$ ) มีขนาดเป็น 2 เท่าของขนาดแรงดันที่มาตกกระทบที่ปลายสาย ดังนั้นจะสามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนได้ดังนี้

$$\text{สัมประสิทธิ์การลดทอน}(\beta) = 20 \log \frac{v_{in}}{v_{out}} \text{ หน่วย db/m}$$

$$\frac{v_{in}}{v_{out}} = \frac{v_{start}}{\frac{v_{end}}{2}} \quad (\text{ค.1})$$

- สายเคเบิลเส้นที่ 1 ยาว 99.56 เมตร เมื่อแทนสมการที่ (ค.1) ลงในสัมประสิทธิ์การลดทอนจะได้

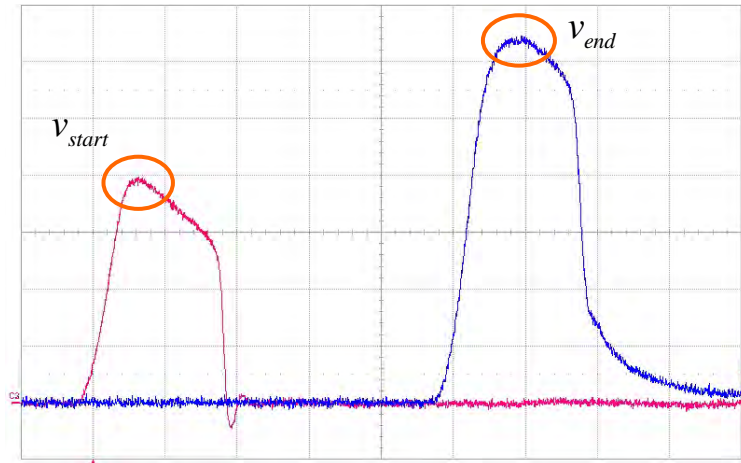
$$\beta \cdot l = 20 \log \frac{v_{start}}{\frac{v_{end}}{2}}$$

$$\beta = \frac{20 \log \frac{v_{start}}{\frac{v_{end}}{2}}}{l}$$

$$\beta = \frac{20 \log \frac{414.906}{671.325}}{99.56} = 0.0185$$

เพราะฉะนั้นค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของสายเคเบิลเส้นที่ 1 จะมีค่าเท่ากับ 0.0185 เดซิเบลต่อเมตร

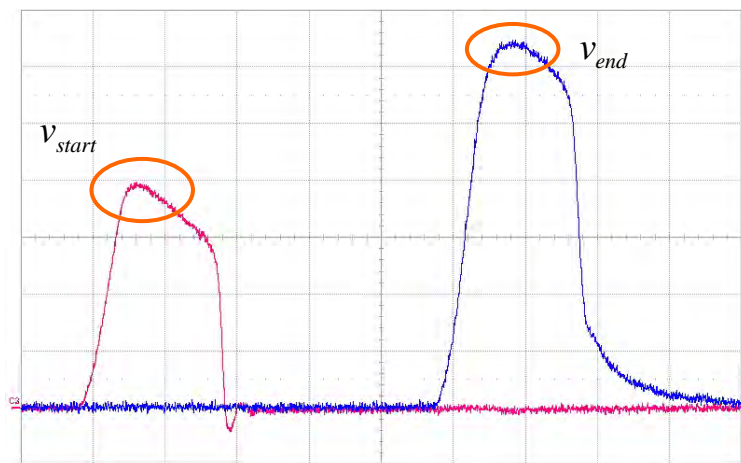
- สายเคเบิลเส้นที่ 2 รูปคลื่นแรงดันสะท้อนกลับที่วัดได้แสดงดังรูปที่ ค.4



รูปที่ ค.4 คลื่นจลน์แรงดันสะท้อนกลับที่ได้จากกาวัดสายเคเบิลเส้นที่ 2 (100V/div, 100ns/div)

จากรูปที่ ค.4 ขนาดแรงดันที่ต้นสาย( $v_{start}$ )มีค่าเท่ากับ 419.325 โวลต์ และขนาดแรงดันที่ปลายสาย( $v_{end}$ )มีค่าเท่ากับ 675.654 โวลต์ จะคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนได้เท่ากับ 0.0188 เดซิเบลต่อเมตร ที่ความยาวสาย 99.54 เมตร

- สายเคเบิลเส้นที่ 3 รูปคลื่นแรงดันสะท้อนกลับที่วัดได้แสดงดังรูปที่ ค.5



รูปที่ ค.5 คลื่นจลน์แรงดันสะท้อนกลับที่ได้จากกาวัดสายเคเบิลเส้นที่ 3 (100V/div, 100ns/div)

จากรูปที่ ค.5 ขนาดแรงดันที่ต้นสาย( $v_{start}$ )มีค่าเท่ากับ 423.745 โวลต์ และขนาดแรงดันที่ปลายสาย( $v_{end}$ )มีค่าเท่ากับ 684.493 โวลต์ จะคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนได้เท่ากับ 0.0186 เดซิเบลต่อเมตร ที่ความยาวสาย 99.53 เมตร

ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของสายเคเบิล RG-58A/U แต่ละเส้นแสดงได้ดังตารางที่ ค.2

ตารางที่ ค.2 ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของสายเคเบิล RG-58A/U แต่ละเส้น

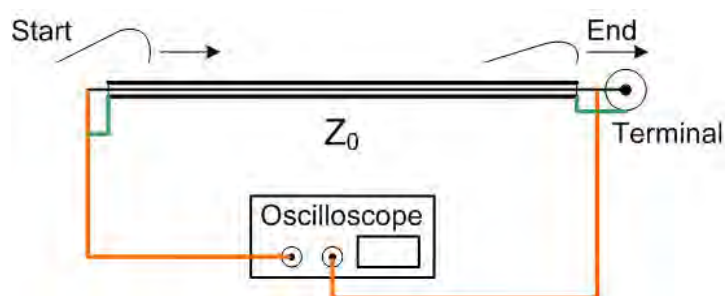
สายเคเบิล RG-58A/U	สัมประสิทธิ์การลดทอน (db/m)
สายเคเบิลเส้นที่ 1	0.0185
สายเคเบิลเส้นที่ 2	0.0188
สายเคเบิลเส้นที่ 3	0.0186

#### การหาค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายเคเบิล RG-58A/U

การหาค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายเคเบิล RG-58A/U จะใช้ Terminal ขนาด 50 และ 75 โอห์ม ต่อเข้ากับสายเคเบิลทางด้านปลายสาย แล้วทำการส่งสัญญาณพัลส์แรงดันเข้าทางต้นสาย และวัดรูปคลื่นจรแรงดันสะท้อนกลับนี้ ทั้งทางด้านต้นสายและปลายสาย วงจรที่ใช้วัดเพื่อหาค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายเคเบิล RG-58A/U แสดงได้ดังรูปที่ ค.6

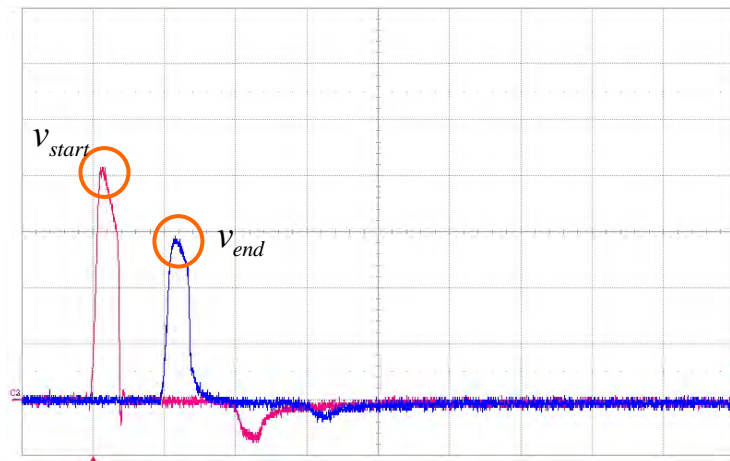
Terminal 50 โอห์ม เมื่อใช้โอห์มมิเตอร์วัดค่าความต้านทานจะได้เท่ากับ 52.07 โอห์ม

Terminal 75 โอห์ม เมื่อใช้โอห์มมิเตอร์วัดค่าความต้านทานจะได้เท่ากับ 77.03 โอห์ม

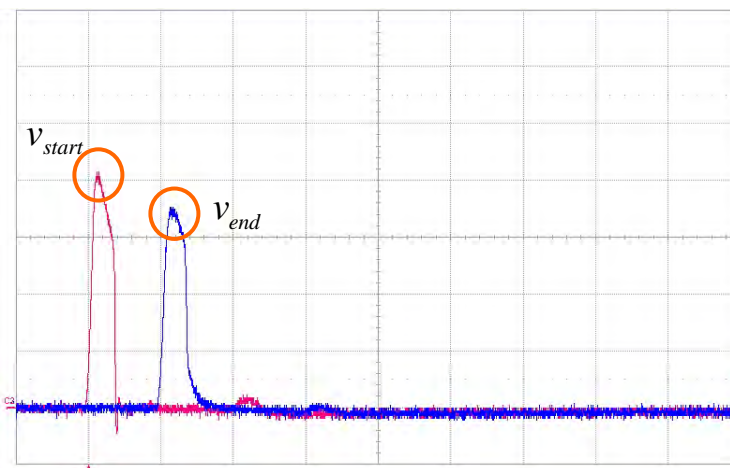


รูปที่ ค.6 วงจรการหาค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายเคเบิล RG-58A/U

- สายเคเบิลเส้นที่ 1 รูปคลื่นแรงดันสะท้อนกลับที่วัดได้จากการต่อปลายสายด้วย Terminal 50 โอห์มแสดงดังรูปที่ ค.7 และรูปคลื่นแรงดันสะท้อนกลับที่วัดได้จากการต่อปลายสายด้วย Terminal 75 โอห์มแสดงดังรูปที่ ค.8



รูปที่ ค.7 คลื่นจรรยาณดันสะท้อนกลับของสายเคเบิลเส้นที่ 1 ที่ปลายสายถูกต่อด้วย Terminal 50 โอห์ม (100V/div, 500ns/div)



รูปที่ ค.8 คลื่นจรรยาณดันสะท้อนกลับของสายเคเบิลเส้นที่ 1 ที่ปลายสายถูกต่อด้วย Terminal 75 โอห์ม (100V/div, 500ns/div)

เมื่อปลายสายถูกต่อด้วย Terminal 50 โอห์มจะสามารถคำนวณค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายเคเบิลได้ดังนี้

$$v_{end} = \alpha_{end} \cdot 10^{-\beta \cdot l/20} v_{start} \quad (\text{ค.2})$$

สายเคเบิลเส้นที่ 1 ยาว 99.56 เมตร, สัมประสิทธิ์การลดทอนเป็น 0.0185 เดซิเบลต่อเมตร, ขนาดแรงดันที่ต้นสาย( $v_{start}$ )มีค่าเท่ากับ 414.906 โวลต์, ขนาดแรงดันที่ปลายสาย( $v_{end}$ )มีค่าเท่ากับ 291.161 โวลต์ และ  $\alpha_{end} = \frac{2(52.07)}{52.07 + Z_0}$  แทนค่าต่างๆลงไปในสมการที่ (ค.2) จะได้

$$291.161 = \left( \frac{2(52.07)}{52.07 + Z_0} \right) \cdot 10^{-(0.0185 \times 99.56)/20} \cdot 414.906$$

$$Z_0 = 67.97 \text{ โอห์ม}$$

ดังนั้นค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายเคเบิลที่หาได้ด้วยวิธีการต่อ Terminal 50 โอห์ม เข้าที่ปลายสายจะมีค่าเท่ากับ 67.97 โอห์ม

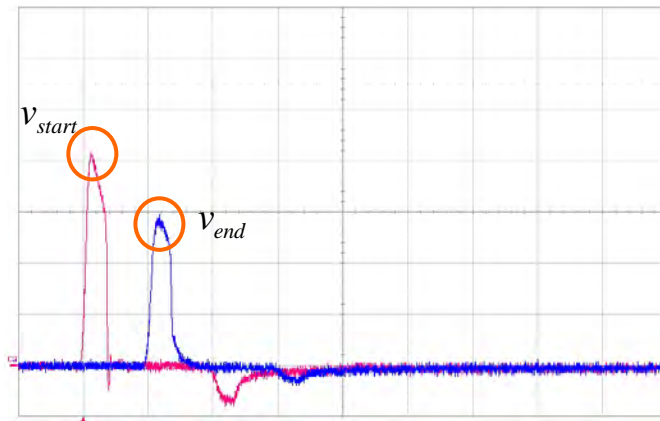
เมื่อปลายสายถูกต่อกับ Terminal 75 โอห์ม ขนาดของแรงดันที่ต้นสาย( $v_{start}$ )ที่วัดได้จะมีค่าเท่ากับ 406.067 โวลต์ และขนาดแรงดันที่ปลายสาย( $v_{end}$ )มีค่าเท่ากับ 348.614 โวลต์ และค่าคงที่การส่งผ่านที่ปลายสายมีค่าเท่ากับ  $\alpha_{end} = \frac{2(77.03)}{77.03 + Z_0}$  ดังนั้นจะสามารถคำนวณหาค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายเคเบิลได้เท่ากับ 68.13 โอห์ม

- สายเคเบิลเส้นที่ 2 รูปคลื่นจรแรงดันสะท้อนกลับที่วัดได้จากการต่อปลายสายด้วย Terminal 50 โอห์มแสดงดังรูปที่ ค.9 และรูปคลื่นจรแรงดันสะท้อนกลับที่วัดได้จากการต่อปลายสายด้วย Terminal 75 โอห์มแสดงดังรูปที่ ค.10

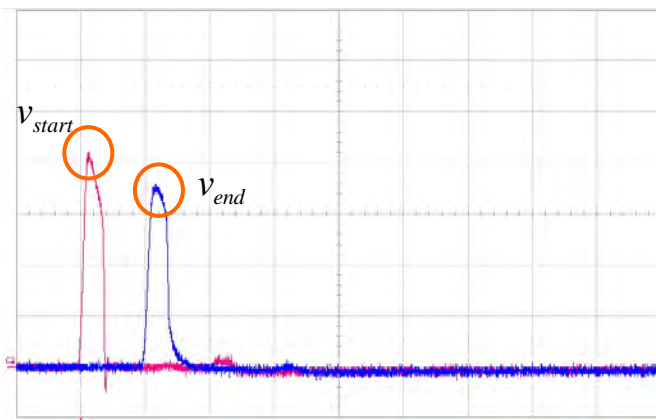
เมื่อปลายสายถูกต่อกับ Terminal 50 โอห์ม ขนาดของแรงดันที่ต้นสาย( $v_{start}$ )ที่วัดได้จะมีค่าเท่ากับ 406.067 โวลต์ และขนาดแรงดันที่ปลายสาย( $v_{end}$ )มีค่าเท่ากับ 282.322 โวลต์ ดังนั้นจะสามารถคำนวณหาค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายเคเบิลได้เท่ากับ 68.68 โอห์ม

เมื่อปลายสายถูกต่อกับ Terminal 75 โอห์ม ขนาดของแรงดันที่ต้นสาย( $v_{start}$ )ที่วัดได้จะมีค่าเท่ากับ 414.906 โวลต์ และขนาดแรงดันที่ปลายสาย( $v_{end}$ )มีค่าเท่ากับ 353.034 โวลต์ ดังนั้นจะสามารถคำนวณหาค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายเคเบิลได้เท่ากับ 68.94 โอห์ม





รูปที่ ค.9 คลื่นจรแรงดันสะท้อนกลับของสายเคเบิลเส้นที่ 2 ที่ปลายสายถูกต่อด้วย Terminal 50  
โอห์ม (100V/div, 500ns/div)

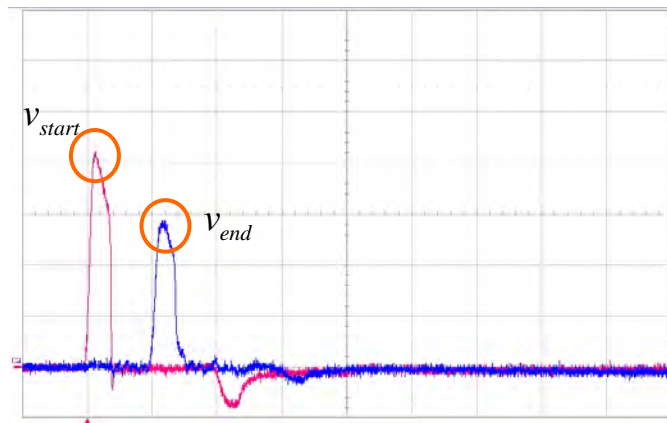


รูปที่ ค.10 คลื่นจรแรงดันสะท้อนกลับของสายเคเบิลเส้นที่ 2 ที่ปลายสายถูกต่อด้วย Terminal 75  
โอห์ม (100V/div, 500ns/div)

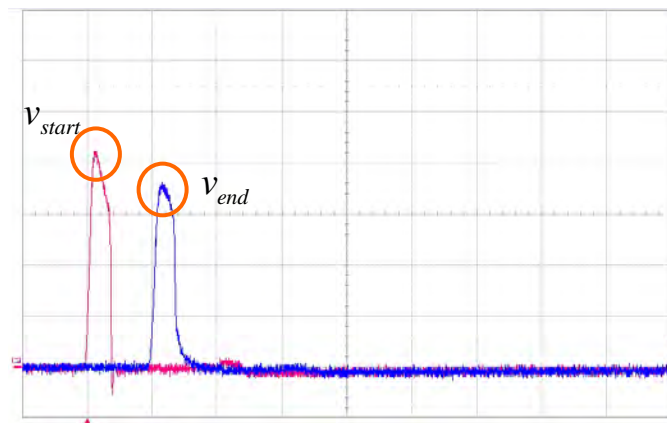
- สายเคเบิลเส้นที่ 3 รูปคลื่นจรแรงดันสะท้อนกลับที่วัดได้จากการต่อปลายสายด้วย Terminal 50 โอห์มแสดงดังรูปที่ ค.11 และรูปคลื่นจรแรงดันสะท้อนกลับที่วัดได้จากการต่อปลายสายด้วย Terminal 75 โอห์มแสดงดังรูปที่ ค.12

เมื่อปลายสายถูกต่อด้วย Terminal 50 โอห์ม ขนาดของแรงดันที่ต้นสาย ( $v_{start}$ ) ที่วัดได้จะมีค่าเท่ากับ 419.325 โวลต์ และขนาดแรงดันที่ปลายสาย ( $v_{end}$ ) มีค่าเท่ากับ 282.322 โวลต์ ดังนั้นจะสามารถคำนวณหาค่าเสิร์จจิมพีแดนซ์ของสายเคเบิลได้เท่ากับ 72.90 โอห์ม

เมื่อปลายสายถูกต่อด้วย Terminal 75 โอห์ม ขนาดของแรงดันที่ต้นสาย ( $v_{start}$ ) ที่วัดได้จะมีค่าเท่ากับ 423.745 โวลต์ และขนาดแรงดันที่ปลายสาย ( $v_{end}$ ) มีค่าเท่ากับ 353.034 โวลต์ ดังนั้นจะสามารถคำนวณหาค่าเสิร์จจิมพีแดนซ์ของสายเคเบิลได้เท่ากับ 72.42 โอห์ม



รูปที่ ค.11 คลื่นจรแรงดันสะท้อนกลับของสายเคเบิลเส้นที่ 3 ที่ปลายสายถูกต่อกับ Terminal 50  
โอห์ม (100V/div, 500ns/div)



รูปที่ ค.12 คลื่นจรแรงดันสะท้อนกลับของสายเคเบิลเส้นที่ 3 ที่ปลายสายถูกต่อกับ Terminal 75  
โอห์ม (100V/div, 500ns/div)

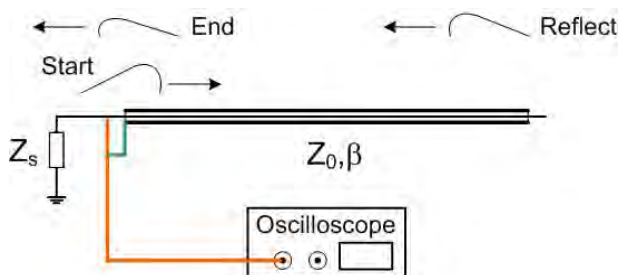
จากการตรวจวัดหาค่าความยาว และพารามิเตอร์ต่างๆของสายเคเบิล RG-58A/U ทั้ง 3  
เส้น สามารถนำผลการตรวจวัดมาเฉลี่ยและแสดงได้ดังตารางที่ ค.3

ตารางที่ ค.3 ความยาว และพารามิเตอร์ต่างๆของสายเคเบิล RG-58A/U แต่ละเส้น

สายเคเบิล	ความยาวเฉลี่ย (เมตร)	สัมประสิทธิ์การ ลดทอน (db/m)	เสิร์จอิมพีแดนซ์ (โอห์ม)
RG-58A/U			
สายเคเบิลเส้นที่ 1	99.56	0.0185	68.05
สายเคเบิลเส้นที่ 2	99.54	0.0188	68.81
สายเคเบิลเส้นที่ 3	99.53	0.0186	72.66

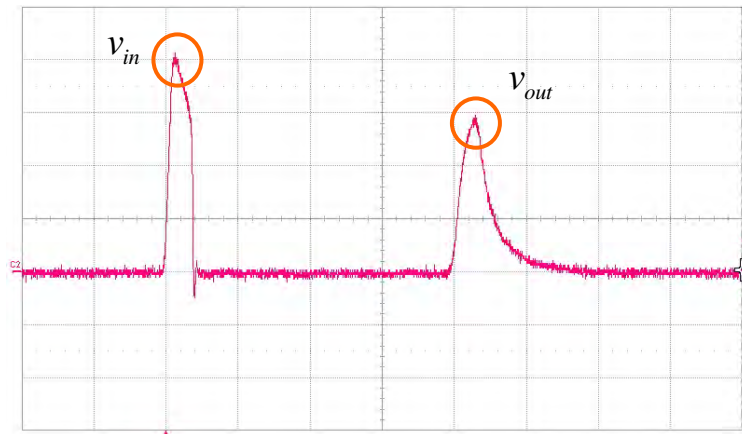
### การหาค่าคงที่การส่งผ่านที่แหล่งกำเนิดสัญญาณพัลส์แรงดัน

การหาค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งกำเนิดสัญญาณพัลส์แรงดันนี้ สามารถหาได้โดยอาศัยรูปคลื่นจรแรงดันสะท้อนกลับที่วัดได้ทางต้นสาย โดยการต่อวงจรถอดตรวจวัดค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งกำเนิดสัญญาณพัลส์แรงดันดังรูปที่ ค.13



รูปที่ ค.13 วงจรสำหรับตรวจวัดค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งกำเนิดสัญญาณพัลส์แรงดัน

สายเคเบิลเส้นที่ 1 และ 2 ต่อกัน รูปคลื่นจรแรงดันสะท้อนกลับที่วัดได้แสดงดังรูปที่ ค.14 ขนาดแรงดันด้านเข้า ( $v_{start}$ ) มีค่าเท่ากับ 391.684 โวลต์ และขนาดแรงดันด้านออก ( $v_{out}$ ) มีเท่ากับ 294.456 โวลต์



รูปที่ ค.14 คลื่นจลน์แรงดันสะท้อนกลับของสายเคเบิลเส้นที่ 1 และ 2 ต่อกัน (100V/div, 500ns/div)

$$\alpha_s = \frac{V_{out}}{V_{in}} \cdot 10^{\beta \cdot l/10}$$

เมื่อแทนค่าตัวแปรต่างๆ จะได้

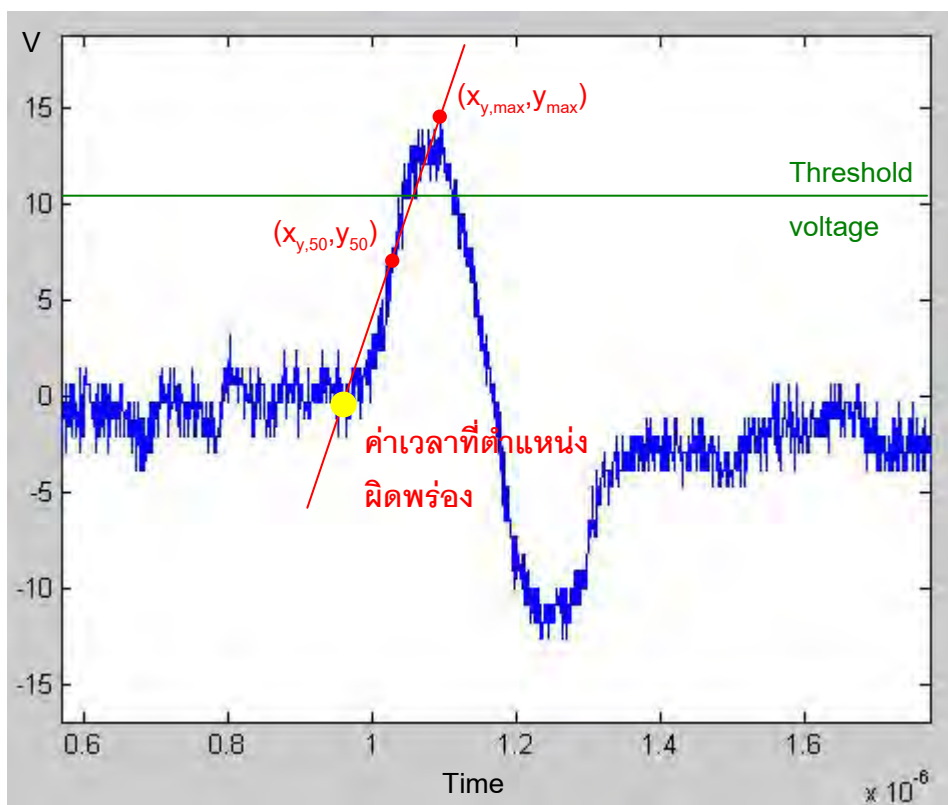
$$\alpha_s = \frac{294.456}{391.684} \cdot 10^{(0.0186 \times 199.1/10)} = 1.76$$

ดังนั้นเราจะสามารถคำนวณหาค่าคงที่การส่งผ่านที่แหล่งกำเนิดได้เท่ากับ 1.76

## ภาคผนวก ง

## การคำนวณในโปรแกรมประมวลผลแบบอัตโนมัติ

การคำนวณหาค่าเวลาที่ตำแหน่งผิดพลาดในโปรแกรมอัตโนมัติ



รูปที่ ง.1 รูปคลื่นจลนแรงดันสะท้อนกลับจากตำแหน่งผิดพลาด

วิธีการหาค่าเวลาที่ตำแหน่งผิดพลาด จะใช้วิธีการประมาณดังนี้ หาค่าพิกัดตำแหน่งที่มีค่าสูงกว่าค่าแรงดันขีดเริ่ม(Threshold voltage) ให้เป็น  $(x_{y,max}, y_{max})$  และกำหนดพิกัดบนรูปคลื่นอีกตำแหน่งหนึ่งโดยเลือกให้มีค่าแรงดันเป็นร้อยละ 50 ของค่า  $y_{max}$  แล้วทำการสร้างสมการเส้นตรงจากจุดพิกัดทั้งสองจุดที่เลือกไว้ แล้วจึงหาจุดตัดแกนเวลาเพื่อนำไปคำนวณหาเวลาที่คลื่นจลนแรงดันเคลื่อนที่จากต้นสายมากระทบกับตำแหน่งผิดพลาด แล้วสะท้อนกลับไปยังต้นสาย โดยจุดตัดแกนเวลาได้แสดงไว้เป็นจุดสีเหลืองดังรูปที่ ง.1

วิธีนี้มีข้อจำกัดที่ทำให้เกิดความผิดพลาดในการคำนวณหาเวลา เนื่องจากการกำหนดค่าสูงสุด อาจจะไปตรงกับค่าสัญญาณรบกวนซึ่งทำให้ค่าสูงสุดที่ได้ผิดจากความเป็นจริง และการกำหนดจุดพิกัดในจุดที่สองได้เลือกค่าแรงดันที่ร้อยละ 50 ของค่า  $y_{max}$  ซึ่งจะทำให้การ

สร้างสมการเส้นตรงเพื่อหาค่าเวลาที่มีความชันน้อยลงหรือมากขึ้น ดังนั้นจึงส่งผลให้จุดตัดแกนเวลา  
มีค่าแตกต่างจากความเป็นจริง ซึ่งส่งผลให้เกิดความผิดพลาดขึ้น

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายกุลเดช ฤทธิรุ่งรัตน์ เกิดเมื่อวันที่ 21 ตุลาคม พ.ศ. 2526 ที่อำเภอภาษีเจริญ จังหวัด กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2548 และเข้ารับการศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในภาคต้น ปีการศึกษา 2549