

เทคนิคการระบุตำแหน่งการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิล

PARTIAL DISCHARGE LOCATION TECHNIQUE IN CABLES

โดย

นาย กฤษณพล ไชยจันทร์

นาย จารุกิตติ บุรณประพฤกษ์

นาย ชลบุรี พากเพียร

นาย ณัฐชนนท์ ณ สงขลา

ปริญญานิพนธ์เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2561

เทคนิคการระบุตำแหน่งการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิล

PARTIAL DISCHARGE LOCATION TECHNIQUE IN CABLES



โดย
นาย กฤษณพล ไชยจันทร์
นาย จารุกิตติ บุรณประพฤกษ์
นาย ชลบุรี พากเพียร
นาย ณัฐชนนท์ ณ สงขลา

ปริญญานิพนธ์เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PARTIAL DISCHARGE LOCATION THCHNIQUE IN CABLES



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

2018

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2561

เทคนิคการระบุตำแหน่งการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิล

PARTIAL DISCHARGE LOCATION TECHNIQUE IN CABLES



อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร. พีรวุฒิ ยุทธโกวิท

รศ.ดร. อานันท์วัฒน์ คุณากร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

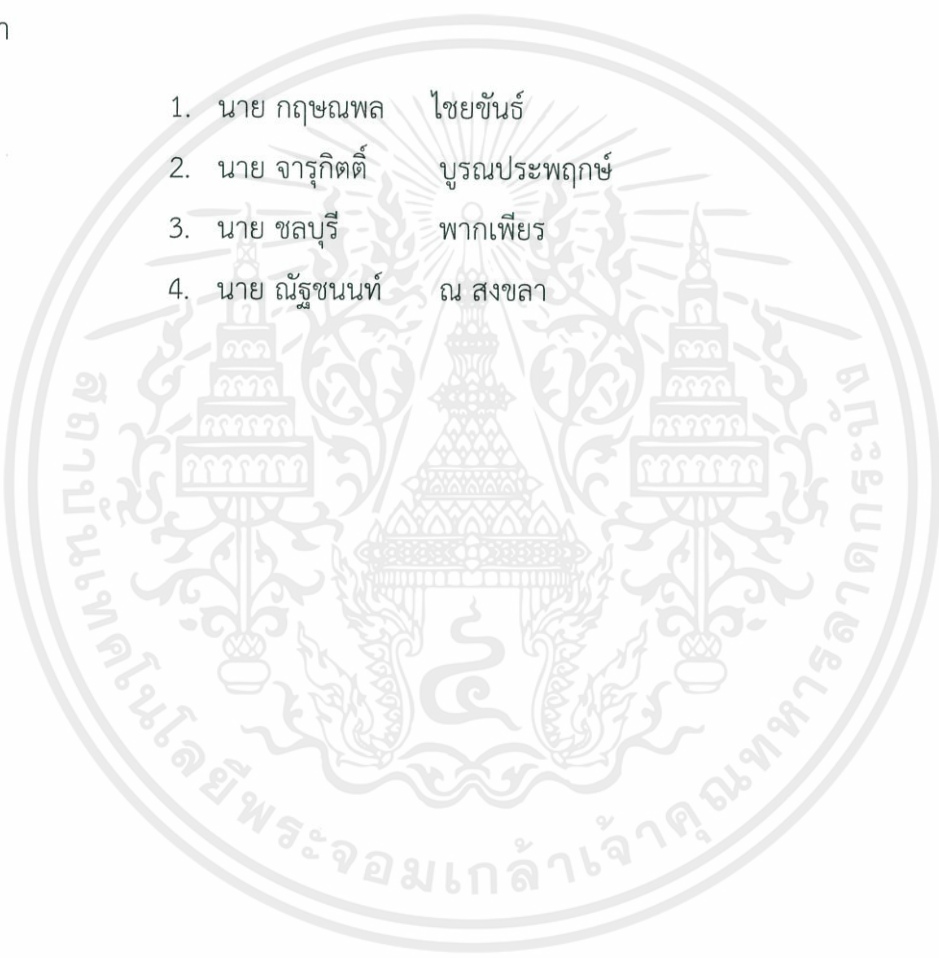
ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2561

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง เทคนิคการระบุตำแหน่งการเกิดดิสซาร์จบางส่วนในสายเคเบิล

ผู้จัดทำ

- 
1. นาย กฤษณพล ไชยจันทร์
 2. นาย จารุกิตติ บวรณประพุกษ์
 3. นาย ชลบุรี พากเพียร
 4. นาย ณัฐชนนท์ ณ สงขลา

.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิรุณี ยุทธโกวิท)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(รองศาสตราจารย์ ดร.อนันต์วัฒน์ คุณากร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทคนิคการระบุตำแหน่งการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิล

นาย กฤษณพล ไชยจันทร์

นาย จารุกิตติ บุรณประพฤษ

นาย ชลบุรี พากเพียร

นาย ธีรชนนท์ ณ สงขลา

ผศ.ดร.พีรวิทย์ ยุทธโกวิท

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร.อานันท์วัฒน์ คุณากร

อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2561

บทคัดย่อ

หลังจากได้ทำการศึกษาเทคนิคการระบุตำแหน่งการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิล สัญญาณการเกิดดิสชาร์จบางส่วนถูกวัดโดยขดลวดเหนี่ยวนำแบบแกนอากาศ ซึ่งได้รับการตรวจสอบ และทดลองติดตั้งที่ปลายสายเส้นหนึ่ง (บริเวณปลายสาย) ของสายเคเบิล โดยใช้เครื่องจำลองพัลส์ การดิสชาร์จบางส่วน โดยใช้ประจุทดสอบ 200 pC สำหรับการตรวจสอบตำแหน่งของการเกิด ดิสชาร์จที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของสายเคเบิลที่มีความยาวรวม 58.88 เมตร ตามโดเมนรีเฟล็คโทเมทรี (TDR) คือ วิธีการระบุตำแหน่งการเกิดดิสชาร์จบางส่วน ใช้เพื่อค้นหาความผิดปกติของการดิสชาร์จ บางส่วนตามสายเคเบิล ซึ่งยึดตามทฤษฎีการเดินทางของคลื่นเป็นหลัก จากผลการทดลองของการ ระบุตำแหน่งการเกิดดิสชาร์จบางส่วน ข้อผิดพลาดสูงสุดของตำแหน่งการเกิดดิสชาร์จบางส่วน ตาม วิธีการ TDR คือ 2.649% ที่จุดผิดปกติของการเกิดดิสชาร์จบางส่วนระยะ (x) 51.38 ม. จากการ ทดลองนี้ เทคนิคที่นำเสนอสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้จริงและสามารถใช้สำหรับการทำวิจัยที่ เกี่ยวข้องกับตำแหน่งการเกิดดิสชาร์จบางส่วนได้

PARTIAL DISCHARGE LOCATION TECHNIQUE IN CABLES

Mr. Kidsanapon

Chaikhan

Mr. Jarukit

Booranaphruek

Mr. Chonburi

Phakpean

Mr. Natchanon

Na Songkhla

Asst.Prof.Dr.Peerawut Yutthagowith Advisor

Assoc.Prof.Dr.Anantawat Kunakorn Advisor

Year 2018

Abstract

A partial discharge location technique for power cables was studied. PD signals are measured by air-core inductive sensor which has been experimentally verified and installed at the end one (near end) of cable. The standard PD pulse calibrator (Haefely Partial Discharge Calibrator Type 451) with the charge of 200 pC was used to investigate the PD location at various position along the cable with total length is 58.88 m. The PD location method, time domain reflectometry (TDR) is used to locate the PD defect along the cable, which essentially based on the travelling wave theory. From the experimental results of PD location, the highest error of PD location by time domain reflectometry method is 2.649 % at PD defect point (x) of 51.38 m. From this experiment, the proposed technique can be applied to further practical application and research related to PD location.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก ผศ.ดร.พีรุดิ ยูทโกวิท ที่คอยสนับสนุนด้านความรู้สำหรับการทำงาน คำปรึกษา การอธิบายทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง รวมถึงช่วยเหลือในอีกหลายๆ ด้านและได้กรุณาช่วยตรวจสอบแก้ไขปริญญานิพนธ์จนสำเร็จเรียบร้อยเป็นอย่างดี นอกจากนี้ยังสนับสนุนทางด้านค่าใช้จ่ายในการจัดซื้ออุปกรณ์ในการจัดทำโครงการอีกด้วย ผู้จัดทำทุกคน ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณ คุณปณณวีร์ ฉายศิริ ที่ให้คำแนะนำ คำปรึกษา และให้ความช่วยเหลือในการทดสอบ การใช้อุปกรณ์ อีกทั้งยังช่วยแก้ปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นในการทดสอบมาโดยตลอด

ขอขอบคุณพี่ๆ ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงทุกคน โดยเฉพาะนายบุษยพล เพาพาน และนายวรกร ชลปฐมพิกุลเลิศ และนายปฐวีกันต์ จันทรสุกศรี ที่ให้คำแนะนำ คำปรึกษาในด้านการทดสอบที่เกี่ยวกับโครงการและควบคุมการทดสอบมาโดยตลอดรวมถึงการให้คำแนะนำในการจัดทำปริญญานิพนธ์

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงสำหรับการช่วยเหลือในด้านอุปกรณ์และสถานที่ในการปฏิบัติการ รวมถึงเพื่อนๆ ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงทุกคนที่ได้ให้กำลังใจ ช่วยกันดูแลห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง และอุปกรณ์ในห้องปฏิบัติการ

สุดท้ายนี้ คณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา รวมถึงสมาชิกท่านอื่นๆ ในครอบครัวตลอดจนผู้ที่เกี่ยวข้องทุกท่านที่ไม่ได้กล่าวไว้ ณ ที่นี้ ซึ่งให้การสนับสนุนในด้านการเงินและด้านกำลังใจในการทำโครงการครั้งนี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

คณะผู้จัดทำ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
Abstract	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูปภาพ	IX
สารบัญตาราง	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	1
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	1
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการ	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 การดิสซาร์จบางส่วน	4
2.1.1 ประเภทของการดิสซาร์จบางส่วน	6
2.2 สื่อสัญญาณที่ใช้ตรวจจับ การดิสซาร์จบางส่วน	9
2.3 วงจรสมมูลของดิสซาร์จบางส่วน	9
2.4 ประจุที่ปรากฏและประจุที่วัดได้	11
2.5 วงจรพื้นฐานการวัด การดิสซาร์จบางส่วน	13
2.7 ความรู้เบื้องต้นสำหรับทามโดเมนรีเฟล็คโตเมทรี	15
2.7.1 ระยะทางในสายเคเบิล	16
2.7.2 สัญญาณที่ส่งเข้าไปในสาย	18
2.7.3 รูปร่างและสัญญาณสะท้อนกลับ	19

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.8 การใช้ชุดลดโรกอฟสกีวัดกระแสอิมพัลส์	21
2.9 ชุดลดเหนี่ยวนำแบบแกนอากาศ	24
2.9.1 วงจรสมมูลของชุดลดเหนี่ยวนำแบบแกนอากาศ	24
2.9.2 การคำนวณความเหนี่ยวนำของชุดลดเหนี่ยวนำแบบแกนอากาศ	26
บทที่ 3 การออกแบบและการสร้าง	28
3.1 การออกแบบและประกอบสร้างแกนชุดลด	28
3.1.1 การออกแบบแกนของชุดลด	28
3.1.2 วิธีการพันชุดลด	29
3.1.3 ความเหนี่ยวนำของชุดลดโรกอฟสกี	30
3.2 การออกแบบและสร้างอุปกรณ์ชุดลดเหนี่ยวนำแบบแกนอากาศ	31
บทที่ 4 การทดสอบและผลการทดสอบ	32
4.1 การทดสอบความเป็นเชิงเส้นของตัวแปลงกระแสความถี่สูง	35
4.1.1. อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของตัวแปลงกระแสความถี่สูง	35
4.1.2. การติดตั้งวงจรการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของตัวแปลงกระแสความถี่สูง	36
4.1.3. ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนอากาศ	36
4.2 การทดสอบหาตำแหน่งการกระจายของชุดลดเหนี่ยวนำแบบแกนอากาศ	35
4.2.1. อุปกรณ์การทดสอบหาตำแหน่งการกระจายของชุดลดเหนี่ยวนำแบบแกนอากาศ	35
4.2.2. การติดตั้งวงจรการทดสอบหาตำแหน่งการกระจายของชุดลดเหนี่ยวนำแบบแกนอากาศ	36
4.2.3. ผลการทดสอบหาตำแหน่งการกระจายของชุดลดเหนี่ยวนำแบบแกนอากาศ	36
บทที่ 5 สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ	43
5.1 สรุปผลการทดสอบ	43
5.2 ข้อเสนอแนะและปัญหาที่พบ	44

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
เอกสารอ้างอิง	45
ภาคผนวก	46
ภาคผนวก ก	47
ประวัติผู้เขียน	52



สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 ผลของดิสชาร์จบางส่วนบนฐานเวลารูปคลื่นไซน์	5
2.2 การดิสชาร์จภายใน	6
2.3 การโคโรนาดิสชาร์จ	7
2.4 การดิสชาร์จตามผิว	8
2.5 วงจรสมมูลของวัสดุที่มีโพรงก๊าซและเกิดดิสชาร์จบางส่วนภายใน	10
2.6 การดิสชาร์จบางส่วน ในโพรงก๊าซในวัสดุฉนวน	11
2.7 ผลของค่าตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว C_k ต่อความไวการวัด q_m/q ซึ่งขึ้นอยู่กับ C_k/C_t	13
2.8 วงจรพื้นฐานการวัดการดิสชาร์จบางส่วน	13
2.9 รูปคลื่นกระแสและแรงดันทดสอบของการดิสชาร์จบางส่วน	14
2.10 การเคลื่อนที่ของสัญญาณในสาย	16
2.11 การเคลื่อนที่ของสัญญาณเมื่อเกิดการดิสชาร์จบางส่วน	17
2.12 รูปสัญญาณพัลส์ที่ส่งเข้าไปในสาย	18
2.13 รูปร่างของสัญญาณสะท้อนกลับ	19
2.14 ขนาดของสัญญาณสะท้อนกลับ	20
2.15 หลักการวัดกระแสของขดลวดโรกอฟสกี	21
2.16 วงจรสมมูลของขดลวดเหนี่ยวนำแบบแกนอากาศ	24
2.17 ผลตอบสนองต่อความถี่ของขดลวดเหนี่ยวนำแบบแกนอากาศ	26
2.18 แบบจำลองของขดลวดเหนี่ยวนำแบบแกนอากาศ	27
3.1 ขนาดของแกนขดลวด	28
3.2 การพันขดลวดโรกอฟสกี	29
3.3 การออกแบบอุปกรณ์ป้องกันในโปรแกรม SolidWorks	31
3.4 อุปกรณ์ขดลวดเหนี่ยวนำแบบแกนอากาศ	31
4.1 วงจรการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของตัวแปลงกระแสความถี่สูง	36
4.2 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างกระแสอินพุตและแรงดันเอาต์พุตของขดลวดเหนี่ยวนำ แบบแกนอากาศจำนวนรอบในการพันทั้งหมด 60 รอบ	33
4.3 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างกระแสอินพุตและแรงดันเอาต์พุตของขดลวดเหนี่ยวนำ แบบแกนอากาศจำนวนรอบในการพันทั้งหมด 40 รอบ	34

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.4 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างกระแสอินพุตและแรงดันเอาต์พุตของขดลวดเหนี่ยวนำแบบแกนอากาศจำนวนรอบในการพันทั้งหมด 8 รอบ	34
4.5 วงจรการทดสอบหาตำแหน่งการกระจายบางส่วนของขดลวดเหนี่ยวนำแบบแกนอากาศ	36
4.6 กราฟวงจรทดสอบ ระยะทางที่ 0 เมตร	36
4.7 กราฟวงจรทดสอบ ระยะทางที่ 4.1 เมตร	37
4.8 กราฟวงจรทดสอบ ระยะทางที่ 8.2 เมตร	37
4.9 กราฟวงจรทดสอบ ระยะทางที่ 15.7 เมตร	38
4.10 กราฟวงจรทดสอบ ระยะทางที่ 21.3 เมตร	38
4.11 กราฟวงจรทดสอบ ระยะทางที่ 25.4 เมตร	39
4.12 กราฟวงจรทดสอบ ระยะทางที่ 29.5 เมตร	39
4.13 กราฟวงจรทดสอบ ระยะทางที่ 37 เมตร	40
4.14 กราฟวงจรทดสอบ ระยะทางที่ 43.18 เมตร	40
4.15 กราฟวงจรทดสอบ ระยะทางที่ 47.28 เมตร	41
4.16 กราฟวงจรทดสอบ ระยะทางที่ 51.28 เมตร	41

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 วิธีการดำเนินงาน	2
2.1 ผลการดิสซาร์จบางส่วน บนฐานเวลาแบบวงรี	5
4.1 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนอากาศ	35
4.2 ความเร็วในการเคลื่อนที่ของสัญญาณ ในตัวกลางที่ต่างกัน	42
5.1 ผลการทดสอบผลตอบแทนต่อความถี่ของขดลวดเหนี่ยวนำแบบแกนอากาศ	43



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันการบำรุงรักษาระบบไฟฟ้าแรงสูงนั้นมีมากมายหลายประการ ในที่นี้การตรวจสอบและวินิจฉัยคุณภาพของฉนวนไฟฟ้าก็เป็นการบำรุงรักษาระบบไฟฟ้าแรงสูงที่สำคัญประการหนึ่ง เพื่อให้การทำงานของระบบไฟฟ้าแรงสูงมีประสิทธิภาพและความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น การตรวจสอบติดตามอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงนั้นจะช่วยให้พบความบกพร่องในอุปกรณ์ก่อนที่อุปกรณ์จะได้รับความเสียหาย โดยการตรวจสอบสภาพของฉนวนนั้นจะใช้วิธีการตรวจวัดตำแหน่งการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิลในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งเป็นวิธีการที่มีศักยภาพสูงวิธีหนึ่งในการตรวจสอบสภาพของฉนวน สำหรับปรากฏการณ์ที่พลังงานต่าง ๆ ถูกปลดปล่อยออกมาให้อยู่ในรูปแบบต่าง ๆ เช่น พลังงานไฟฟ้า พลังงานแสง และพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้า ล้วนเกิดจากการเกิดดิสชาร์จบางส่วนทั้งสิ้น

การเกิดการดิสชาร์จบางส่วนจะเกิดขึ้นในฉนวนที่มีสิ่งเจือปน หรือ ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน หรือ ระบบฉนวนที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง หรือ มีความไม่สม่ำเสมอ ซึ่งทำให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าบางจุดสูงกว่าความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤต จึงเป็นเหตุให้เกิดความผิดปกติขยายตัวมากขึ้น อาจนำไปสู่การเกิดเบรกดาวน์อย่างสมบูรณ์ได้ ทำให้อายุการใช้งานของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงลดลง และฉนวนเกิดความเสียหาย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาคุณสมบัติการเกิดการดิสชาร์จบางส่วนของอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้าแรงสูง
2. เพื่อศึกษาระบบตรวจจับตำแหน่งการเกิดการดิสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิล
3. เพื่อออกแบบประกอบสร้างชุดอุปกรณ์การตรวจจับตำแหน่งและรูปแบบการเกิดการดิสชาร์จ บางส่วนในระบบไฟฟ้าแรงสูงในสายเคเบิล
4. เพื่อส่งเสริมให้เกิดการพัฒนาเทคโนโลยีด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1. ศึกษาและตรวจจับการเกิดการดิสชาร์จบางส่วน
2. ออกแบบและประกอบสร้างชุดอุปกรณ์ตรวจจับการเกิดการดิสชาร์จบางส่วน
3. ทดสอบชุดอุปกรณ์ตรวจจับการเกิดการดิสชาร์จบางส่วนที่พัฒนาขึ้น
4. เปรียบเทียบและวิเคราะห์ชุดอุปกรณ์การวัดการดิสชาร์จบางส่วนระหว่างชุดอุปกรณ์ที่ทำการพัฒนาขึ้นกับชุดอุปกรณ์ที่มีอยู่ภายในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สจล.

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการ

- 1. ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการเกิดการดิสซาร์จบางส่วนในสายเคเบิล
- 2. ออกแบบและสร้างชุดอุปกรณ์การหาตำแหน่งการเกิดการดิสซาร์จบางส่วนในสายเคเบิล
- 3. ทดสอบระบบการวัดการดิสซาร์จบางส่วนในสายเคเบิล
- 4. วิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดสอบกับชุดอุปกรณ์การวัดที่มีอยู่แล้ว
- 5. จัดทำปริญญานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

ตารางที่ 1.1 วิธีการดำเนินงาน

วิธีการดำเนินงาน	ปีการศึกษา 2561								
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.
ศึกษาระบบตรวจจับการเกิดการ ดิสชาร์จบางส่วนตาม มาตรฐาน IEC 60270	←-----→								
ศึกษามาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับการ ทดสอบ	←-----→								
ออกแบบชุดอุปกรณ์การตรวจจับการ เกิดการดิสชาร์จบางส่วน	←-----→								
ประกอบสร้างชุดอุปกรณ์ตรวจจับ การเกิดการดิสชาร์จบางส่วน					←-----→				
ทดสอบชุดอุปกรณ์ตรวจจับการเกิด การดิสชาร์จบางส่วน						←-----→			
ทำการวิเคราะห์ปรับปรุง ชุดอุปกรณ์ตรวจจับการเกิดการ ดิสชาร์จบางส่วน						←-----→			
สรุปและจัดทำรูปเล่มปริญญานิพนธ์ ฉบับสมบูรณ์					←-----→				

วางแผน

←-----→

ระยะเวลาตามแผนปฏิบัติจริง

←-----→

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. สามารถออกแบบและประกอบสร้างชุดอุปกรณ์ตรวจจับการเกิดการดิสชาร์จบางส่วน
2. สามารถเข้าใจถึงสาเหตุการเกิดการดิสชาร์จบางส่วนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง
3. สามารถนำชุดอุปกรณ์การวัดการดิสชาร์จบางส่วนมาใช้ภายในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สจล.
4. สามารถนำไปต่อยอดและใช้ประโยชน์ในภาคหน้าในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สจล. หรือที่อื่น



บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

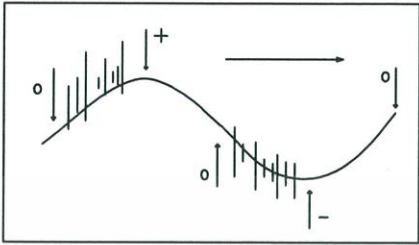
2.1 การดิสชาร์จบางส่วน

การดิสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge) คือ ประจุไฟฟ้าที่ถูกทำลายสภาพความเป็นฉนวนเกิดขึ้นทั้งในเนื้อฉนวนและนอกเนื้อฉนวน โดยการดิสชาร์จบางส่วน ที่เกิดขึ้นในเนื้อฉนวน เป็นผลมาจากการที่ประจุไหลผ่านช่องว่างเล็ก ๆ ในเนื้อฉนวนและสร้างความเสียหาย โดยที่ช่องว่างเหล่านี้จะทนแรงดันไฟฟ้าได้น้อยกว่าฉนวนที่อยู่รอบตัวมัน ความเสียหายจะขยายตัวออกไปจนอาจนำไปสู่เกิดการเบรกดาวน์จากด้านแรงดันสูงลงสู่กราวด์ได้

การดิสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge) เกิดขึ้นในโพรงอากาศหรือฉนวนไฟฟ้า หรือฉนวนไฟฟ้าแรงสูงที่ชำรุด การชำรุดดังกล่าวเกิดได้จากหลายสาเหตุดังต่อไปนี้

- จากการผลิต ฉนวนไฟฟ้าชนิดวัสดุแข็ง ถูกออกแบบให้กระจายความเครียดทางไฟฟ้าอย่างสม่ำเสมอระหว่างตัวนำ แต่ในทางปฏิบัติ การผลิตจำนวนมากอาจมีบางชิ้นเกิดความบกพร่องที่ทำให้เกิดโพรงหรือช่องว่างเล็ก ๆ ในเนื้อของวัสดุ
- จากการติดตั้ง เมื่อมีการประกอบหรือติดตั้งอุปกรณ์ไฟฟ้าในพื้นที่ทำงาน อาจผิดพลาดทำความเสียหายแก่ฉนวน ทำให้ความเป็นฉนวนลดลง หรือมีความเค้นทางไฟฟ้าที่ฉนวนเพิ่มขึ้น
- จากอายุการใช้งานและการเสื่อมสภาพ โดยทั่วไปวัสดุฉนวนไฟฟ้าจำเสื่อมสภาพตามกาลเวลา พันธะทางเคมีภายในถูกทำลาย ขบวนการนี้จะทำให้ฉนวนอ่อนแอลง มีความทนทานต่อความเค้นทางไฟฟ้าลดลง แม้ในสภาพเงื่อนไขการทำงานปกติ
- ได้รับความเครียดสูงเกินไป การลัดวงจร หรือโดนฟ้าผ่า เป็นการเพิ่มความเครียดทางไฟฟ้าให้ฉนวนจากกระแสหรือแรงดันเกิน ถึงแม้จะเกิดในช่วงเวลาสั้นๆ แต่ก็สามารถทำความเสียหายถาวรแก่ฉนวนได้
- เสียหายขณะทำงาน อุปกรณ์ไฟฟ้าทั้งหลายอาจเกิดความเสียหายทางกายภาพในขณะที่ใช้งานได้จากปัจจัยภายนอก เช่น สายเคเบิลใต้ดินอาจเสียหายจากผู้รับเหมา, หน่วยงานอื่นที่ทำการขุดถนน หรือรถบรรทุกที่หนักเกินไปบนถนน

การแสดงดิสชาร์จบางส่วนบนฐานเวลารูปคลื่นไซน์มีผลดีที่วัดขนาดได้ถูกต้องและสังเกตตำแหน่งที่เกิดได้แน่นอน การแสดงบนฐานเวลาแบบวงรีมีข้อดี คือ แยกได้ว่าดิสชาร์จบางส่วนเกิดจากสาเหตุอะไร



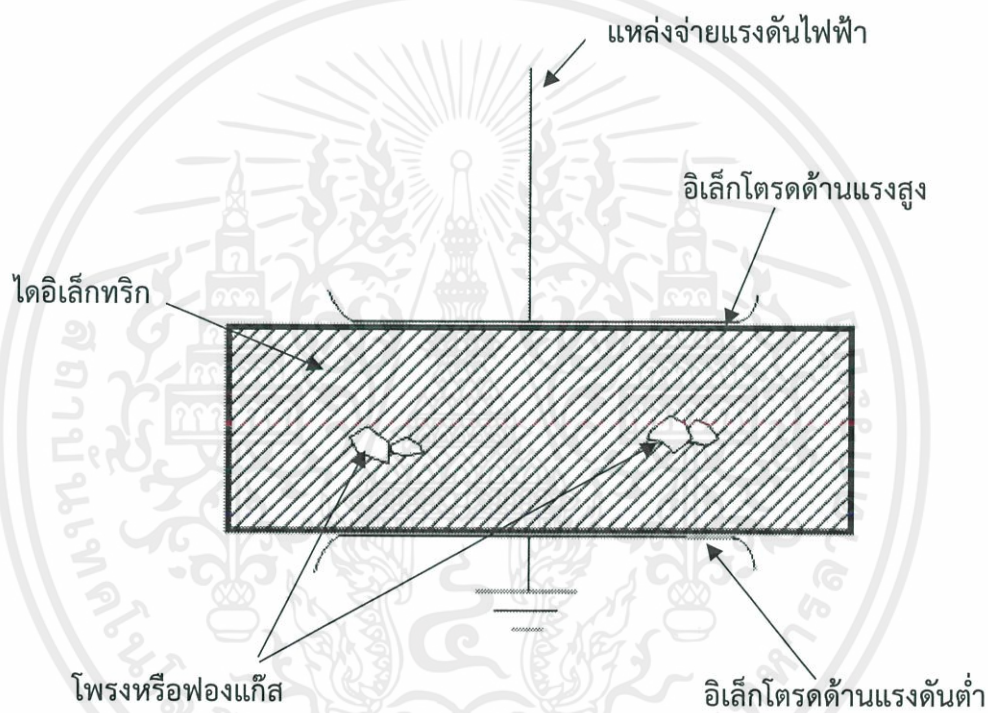
รูปที่ 2.1 ผลของดิสชาร์จบางส่วนบนฐานเวลารูปคลื่นไซน์

ตารางที่ 2.1 ผลการดิสชาร์จบางส่วน บนฐานเวลาแบบวงรี

ชนิด การดิสชาร์จบางส่วน	การแสดงผล การดิสชาร์จบางส่วน	ลักษณะแสดง
โคโรน่า		เกิดที่มุมเฟส 270° ที่ U_i เมื่อ U สูงขึ้นดิสชาร์จบางส่วนจะเกิดในช่วง 90°
ดิสชาร์จภายใน		จะเกิดที่มุมเฟส 0-90° และ 180-270°
ดิสชาร์จตามผิว		จะเกิดที่มุมเฟสระหว่าง 0-90° และ 180-270°

2.1.1 ประเภทของการดิสชาร์จบางส่วน

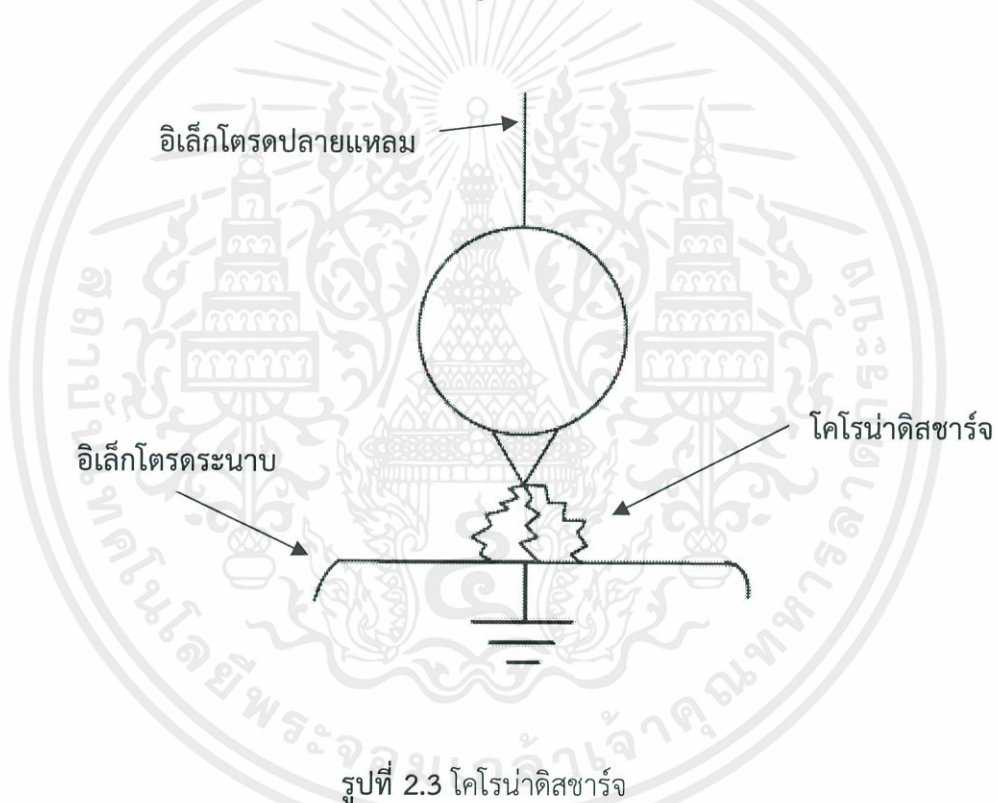
2.1.1.1 การดิสชาร์จภายใน (Internal discharge) การดิสชาร์จภายในเกิดขึ้นเนื่องจากมีโพรงอากาศอยู่ภายในเนื้อฉนวนหรือสิ่งแปลกปลอมที่มีค่าสภาพยอมต่ำกว่าเนื้อฉนวนหลัก เจือปนอยู่ในเนื้อฉนวน เนื่องจากสิ่งแปลกปลอมมีค่าคงตัวของไดอิเล็กทริกต่ำและมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงกว่าบริเวณอื่นในเนื้อฉนวนจึงนำไปสู่การเกิดเบรกดาวน์ ขนาดของแรงดันที่การดิสชาร์จเริ่มเกิดได้ขึ้นอยู่กับความเครียดสนามไฟฟ้าและความคงทนต่อการเบรกดาวน์ของโพรงอากาศในเนื้อฉนวน ดังแสดงในรูปที่ 2.2 การดิสชาร์จภายในสามารถเกิดในกระดาษฉนวน, ฉนวนพลาสติก, น้ำมันฉนวนเรซิน เป็นต้น



รูปที่ 2.2 การดิสชาร์จภายใน

2.1.1.2 โคโรนาดิสชาร์จ (Corona discharge) เกิดขึ้นได้ในฉนวนแก๊สและฉนวนเหลว มักเกิดบริเวณปลายแหลมหรือคม ซึ่งมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงกว่าบริเวณอื่น โคโรนาดิสชาร์จสามารถจำลองได้โดยใช้อิเล็กทรอนิกส์กับอิเล็กทรอนิกส์โดยในการจำลอง ถ้าให้อิเล็กทรอนิกส์เป็นด้านต่อลงดินและให้อิเล็กทรอนิกส์ปลายแหลมเป็นด้านแรงสูง การดิสชาร์จก็จะเกิดขึ้นด้านครึ่งลบของรูปคลื่นแรงดันและถ้าเพิ่มแรงดันขึ้นอีกก็จะเกิดทั้งครึ่งบวกและครึ่งลบของรูปคลื่นแรงดันแต่ถ้าอิเล็กทรอนิกส์เป็นด้านแรงสูงและให้อิเล็กทรอนิกส์ปลายแหลมเป็นด้านต่อลงดิน การดิสชาร์จก็จะเกิดขึ้นที่ครึ่งบวกของรูปคลื่นแรงดันก่อน

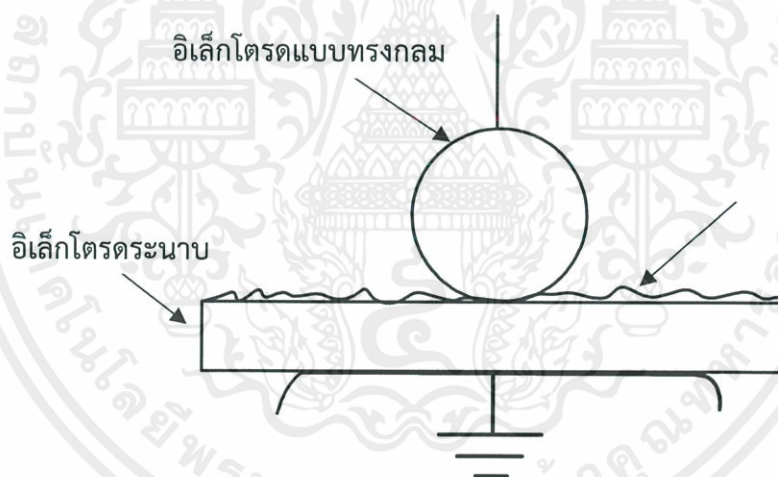
นอกจากนี้แล้วการเกิดโคโรน่ายังสร้างสัญญาณความถี่สูงรบกวนระบบควบคุมและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อีกด้วย การเกิดโคโรนามักมีแนวโน้มที่แย่ลงในวันที่มีอากาศชื้น บางครั้งทิศทางการลามอาจพัฒนาความชื้นจากสถานที่ใกล้เคียงเข้ามาสร้างปัญหาได้อีกด้วย



รูปที่ 2.3 โคโรนาดิสชาร์จ

2.1.1.3 การดิสชาร์จตามผิว (Surface discharge) มักจะเกิดขึ้นถ้าผิวฉนวนบริเวณนั้นมีความเครียดสนามไฟฟ้าในแนวเดียวกันหรือขนานกับผิวฉนวน การดิสชาร์จตามผิวสามารถเกิดขึ้นได้กับปลายสายเคเบิลหรือปลอกฉนวนนำสาย เป็นต้น สนามไฟฟ้าที่แผ่ขยายออกจากบริเวณพื้นผิวเป็นผลมาจากการดิสชาร์จที่ซึ่งองค์ประกอบพื้นผิวแรกเริ่มของสนามไฟฟ้ามีค่าสูงพอที่จะทำให้เกิดการดิสชาร์จ การดิสชาร์จตามผิวเกิดได้ทั้งในอากาศในฉนวนน้ำมันและในแก๊ส SF_6 และเมื่อมีความเครียดสนามไฟฟ้าตามแนวรอยต่อของฉนวนสูงเกินค่าวิกฤตอาจเกิดการดิสชาร์จตามแนวรอยต่อของฉนวนที่ต่างชนิดกันได้

การดิสชาร์จตามผิวจะเกิดขึ้นบริเวณที่แผ่นฉนวนสัมผัสกับอิเล็กโตรดทรงกลมเพราะบริเวณดังกล่าวมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงกว่าบริเวณโดยรอบ เมื่อเพิ่มแรงดันขึ้นทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงขึ้นโดยปกติการดิสชาร์จจะขยายตัวออกไปยังขอบของแผ่นฉนวน ถ้าแผ่นฉนวนมีความหนาพอ และแผ่นไม่กว้างจนเกินไปก็จะเกิดวาบไฟข้ามแผ่นฉนวนไปหาอิเล็กโตรดระนาบได้หรือถ้าแผ่นฉนวนมีความหนาน้อยและแผ่นกว้างมาก การดิสชาร์จตามผิวก็จะเกิดเป็นบริเวณกว้างในระดับหนึ่งจากนั้นอาจจะเกิดเบรกดาวน์และทะลุแผ่นฉนวนได้



รูปที่ 2.4 การดิสชาร์จตามผิว

2.2 สื่อสัญญาณที่ใช้ตรวจจับ การดิสชาร์จบางส่วน

การตรวจจับและวัดค่าการดิสชาร์จบางส่วน จะอาศัยผลที่เกิดจากการดิสชาร์จบางส่วน ซึ่งจะมีผลสืบเนื่องในหลายรูปแบบ คือ

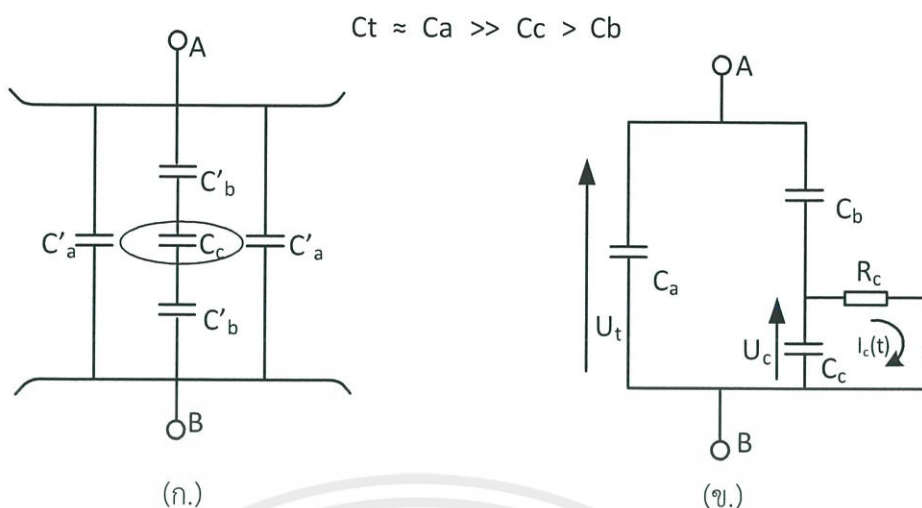
- 1) มีกระแสพัลส์ไฟฟ้าเกิดขึ้นขณะที่เกิดดิสชาร์จบางส่วน
- 2) เกิดกำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก
- 3) เกิดคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ในย่านความถี่สูง รบกวนระบบสื่อสาร
- 4) เกิดแสงเรือง เนื่องจากเกิดไอออไนเซชันเป็นโคโรนา
- 5) เกิดโคโรนาในอากาศ จะมีกลิ่นโอโซน (O_3) เกิดเสียงฮิสซิง (hissing)
- 6) เกิดความดันก๊าซเพิ่มสูงขึ้น
- 7) เกิดความร้อน
- 8) เกิดปฏิกิริยาทางเคมี

การตรวจจับการดิสชาร์จบางส่วน ส่วนมากจะอาศัยผลทางไฟฟ้า ซึ่งให้ผลที่มีความถูกต้องดีกว่าวิธีอื่น คือ ดิสชาร์จทำให้เกิดกระแสพัลส์ไหลผ่านวงจรต่ออันดับกับฉนวนทดสอบ จึงสามารถวัดแรงดันตกคร่อม อิมพีแดนซ์ที่ต่ออยู่ในวงจรได้ การใช้สื่อสัญญาณอื่น จะมีความไวน้อยกว่า บางอย่างก็ต้องเกิดการดิสชาร์จบางส่วนมาก จึงจะตรวจจับได้ การตรวจจับสื่อสัญญาณพัลส์ไฟฟ้าสามารถวิเคราะห์ได้ด้วยวงจรสมมูลที่มีการดิสชาร์จบางส่วน

2.3 วงจรสมมูลของดิสชาร์จบางส่วน

โดยเหตุที่ดิสชาร์จบางส่วนภายในที่เกิดขึ้นในเนื้อฉนวน หรือในอุปกรณ์ ซึ่งไม่สามารถสังเกตเห็นได้ด้วยตา ฉะนั้น เพื่อให้สามารถตรวจจับหรือวัดค่าดิสชาร์จบางส่วนในฉนวนได้ จึงมีการเขียนวงจรสมมูลของฉนวนที่มีดิสชาร์จบางส่วนขึ้น ไม่ว่าจะเป็นดิสชาร์จบางส่วนชนิดใด ก็สามารถเขียนวงจรสมมูลได้ เพื่อให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจ จึงใช้วงจรสมมูลสำหรับฉนวนที่มีโพรงก๊าซ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์การเกิดและหาปริมาณที่ดิสชาร์จบางส่วนภายใน ดังวงจรสมมูลของฉนวนในรูปที่

2.5



รูปที่ 2.5 วงจรสมมูลของวัสดุที่มีโพรงก๊าซและเกิดดิสชาร์จบางส่วนภายใน

ในรูปที่ 2.5 ก.) แสดงวัสดุฉนวน มีโพรงก๊าซภายในเนื้อฉนวน และฉนวนวางอยู่ระหว่างอิเล็กโทรด A-B โพรงก๊าซจะเขียนแทนด้วยความจุไฟฟ้า C_c ส่วนฉนวนที่ต่ออนุกรมกับโพรงก๊าซ หรือ C_c เขียนแทนด้วยความจุไฟฟ้า C_b ส่วนที่ต่ออนุกรมกับ C_c นี้ จะรวมกันได้เป็น C_b ส่วนฉนวนที่สมบูรณ์ที่อยู่โดยรอบของ C_c จะให้ค่าเป็น C'_a และรวมกันในส่วนนี้จะได้เป็น C_a ดังรูปที่ 2.5 ข.) ซึ่งค่าความจุไฟฟ้าของวัสดุทดสอบ C_t จะมีค่าโดยประมาณเท่ากับ C_a ซึ่งมีค่ามากกว่า C_b มาก นั่นคือ

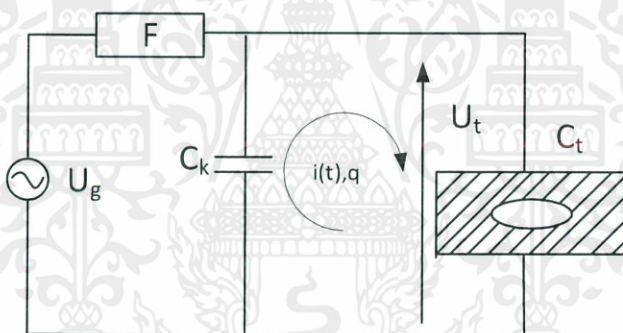
ถ้าป้อนแรงดัน U_t ที่ขั้ว A-B ทำให้แรงดันตกคร่อมโพรงก๊าซมีค่าสูงกว่าค่าแรงดันเบรกดาวน์ของโพรงก๊าซที่แทนด้วย C_c ก็จะเกิดเบรกดาวน์ในโพรงก๊าซ มีความต้านทาน R_c ต่ออนุกรมอยู่เป็นตัวจำกัดกระแสดิสชาร์จ $i_c(t)$ ซึ่งมีลักษณะเป็นพัลส์ช่วงกว้างเป็นนาโนวินาที และทำให้เกิดแรงดันตก δU_c ที่โพรงก๊าซเกิดการปล่อยประจุออกมา กระแส $i_c(t)$ นี้ไหลอยู่ภายในที่ไม่สามารถวัดได้ แต่การที่ดิสชาร์จของ C_c ทำให้เกิดการถ่ายเทประจุของ C_b และ C_a ในวงจรสมมูล เป็นผลให้เกิดแรงดันตกที่ขั้ว A-B เท่ากับ δU_t ค่าแรงดันตกนี้ไม่ให้ข้อมูลอะไรเกี่ยวกับ δq_c เลย แต่เป็นสัดส่วนกับ $C_b \delta U_c$ ค่า δU_t นี้วัดได้เป็นพัลส์รูปขั้น ขึ้นอยู่กับ $i_c(t)$ จะได้ความสัมพันธ์ตามสมการที่ 2.1

$$\delta U_t = \frac{C_b \delta q_c}{C_c (C_b + C_a)} \quad (2.1)$$

ค่าของ U_t มีค่าเพียงเป็นมิลลิโวลต์ถึงโวลต์ ในขณะที่ δU_c มีค่าเป็นกิโลโวลต์ โดยที่ไม่ทราบค่า C_c และ C_b จึงไม่อาจหาความสัมพันธ์ของ δU_t กับ δU_c และ δq_c ได้ อย่างไรก็ตาม การดิสชาร์จในโพรงก๊าซ C_c เป็นผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงถ่ายเทประจุ หรือกระแสในวงจรภายนอกที่สามารถตรวจวัดได้

2.4 ประจุที่ปรากฏและประจุที่วัดได้

ดังที่ได้กล่าวแล้ว ดิสชาร์จบางส่วนภายในเกิดขึ้นภายในฉนวน หรือภายในอุปกรณ์ที่หุ้มห่อมิดชิด ฉะนั้นประจุหรือกระแสที่เกิดจากประจุดิสชาร์จในโพรงก๊าซนั้นไม่สามารถวัดได้ แต่การดิสชาร์จในโพรงก๊าซ C_c นั้น มีผลให้เกิดการถ่ายเทประจุ เป็นผลให้เกิดแรงดันตก δU_t ที่ขั้วป้อนแรงดันภายนอก A-B และการเคลื่อนที่ของประจุ หรือเกิดกระแสไหลวนอันเนื่องจากแรงดันตก เป็นค่ากระแสชดเชยที่วัดได้ (measurable current) $i(t)$ ดังรูปที่ 2.6 แต่มิใช่กระแสหรือประจุที่เกิดขึ้นจริง ภายในโพรงก๊าซ



รูปที่ 2.6 การดิสชาร์จบางส่วน ในโพรงก๊าซในวัสดุฉนวน

U_g คือ ตัวจ่ายแรงดันป้อนให้กับตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว C_k และวัสดุทดสอบ C_t

C_k คือ ตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว

C_t คือ ค่าเก็บประจุของวัสดุทดสอบประกอบด้วย C_a , C_b และ C_c ดังรูปที่ 2.5

$i(t), q$ คือ กระแสพัลส์ การดิสชาร์จบางส่วน ที่ถ่ายเทระหว่าง C_k กับ C_t เพื่อชดเชยแรงดันที่ตกไป

$$\delta U_t \text{ คร่อม } C_t \approx (C_a + C_b)$$

ค่ากระแสไหลวน $i(t)$ ที่วัดได้นี้ ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนค่าเก็บประจุ C_k / C_t เพราะประจุจะเคลื่อนที่จากตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว C_k ที่ชดเชยแรงดันตก δU_t ในกรณีอุดมคติ $C_k \gg C_t$ และ $C_t \approx (C_a + C_b)$ ประจุ q จะมีค่ามากที่สุด

ค่า $C_k \gg C_t$ ค่า δU_t จะได้รับชดเชยสมบูรณ์และประจุที่ถ่ายเทก็คือ กระแส $i(t)$

ประจุถ่ายเทหาได้จาก
$$q = \int i(t) dt = \left\{ C_a + \frac{C_c C_b}{C_c + C_b} \right\} \delta U \quad (2.2)$$

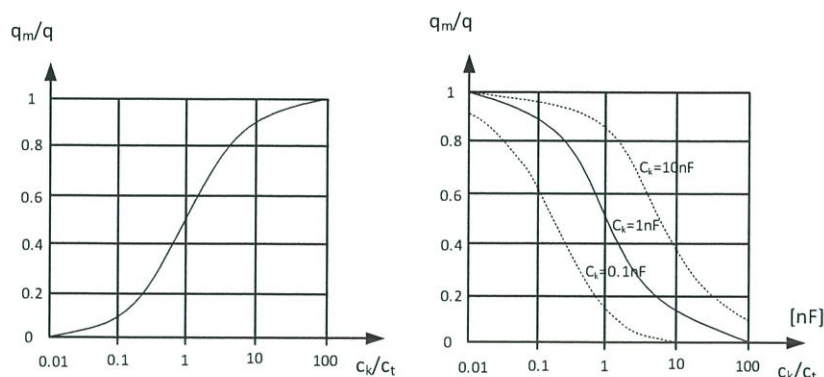
เพราะว่า $C_b < C_c$ จึงได้
$$q \approx (C_a - C_b) \delta U_t \quad (2.3)$$

เมื่อแทนค่าจะได้
$$q = \frac{C_b}{C_c} \delta q_c \quad (2.4)$$

ประจุ q นี้ เรียกว่า ประจุที่ปรากฏของพัลส์การดิสชาร์จบางส่วน เพราะว่าประจุ q นี้ไม่เท่ากับประจุที่เกิดจริงในโพรงก๊าซ C_c แต่สัมพันธ์กับ δq_c ด้วยอัตราส่วนของ C_b / C_c และเป็นพื้นฐานของการวัดค่าการดิสชาร์จบางส่วน ที่มีความเป็นจริงมากกว่า δU_t โดยที่ C_a เป็นค่าเก็บประจุหลักของ C_t ซึ่งไม่มีผลเกี่ยวกับค่าการดิสชาร์จบางส่วน

ในทางปฏิบัติ เงื่อนไขที่จะทำให้ได้ $C_k \gg C_t$ หมายถึง ค่าเก็บประจุคาบเกี่ยวมีค่ามากๆ นั้นเป็นไปได้ยาก เพราะว่าจะกลายเป็นโหลดให้กับตัวจ่ายแรงดันและไม่ประหยัดอย่างไก็ตาม ค่าเก็บประจุ C_k ใหญ่กว่า C_t ของวัสดุทดสอบเพียงเล็กน้อย จะเป็นผลทำให้ความไวในการตรวจจับหรือตรวจวัด การดิสชาร์จบางส่วนนั้นน้อยลง เนื่องจากกระแสชดเชย $i(t)$ จะมีค่าน้อยลง

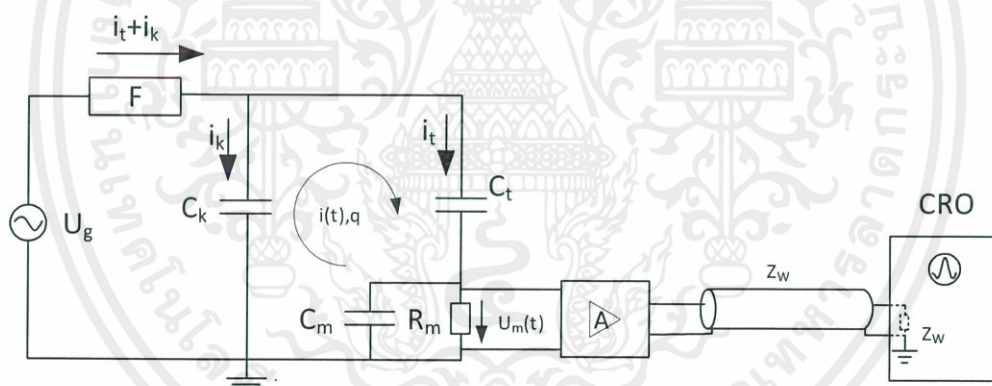
ความสัมพันธ์ของ q_m / q ในเทอมของ C_k / C_t หรือในเทอมของ C_t ดังแสดงในกราฟ รูปที่ 7-9 ซึ่งจะช่วยให้เลือกค่า C_k ที่เหมาะสม เพื่อให้ได้ค่าความไวได้ตามที่ต้องการ ถ้าต้องการความไวสูง จะต้องใช้ C_k ให้โตพอ ซึ่งขึ้นอยู่กับ C_t แพลกเตอร์วงจร q_m / q และความไวการวัดอาจตรวจสอบได้ จึงต้องมีการปรับเทียบวงจรทดสอบ โดยการป้อนประจุที่ทราบค่าแน่นอนและถูกต้องที่วัสดุทดสอบ ผลของ C_k / C_t ต่อความไวการวัด แสดงโดย q_m / q ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ผลของค่าตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว C_k ต่อความไวการวัด q_m/q ซึ่งขึ้นอยู่กับ C_k/C_t

2.5 วงจรพื้นฐานการวัด การดิสชาร์จบางส่วน

วงจรพื้นฐานสำหรับวัสดุที่ดิสชาร์จบางส่วน จะประกอบด้วยตัวจ่ายแรงดันทดสอบ U_g คือ หม้อแปลงทดสอบป้อนแรงดันให้กับวัสดุทดสอบ และตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว C_k ผ่านตัวกรองความสูง F ดังวงจรในรูปที่ 2.8



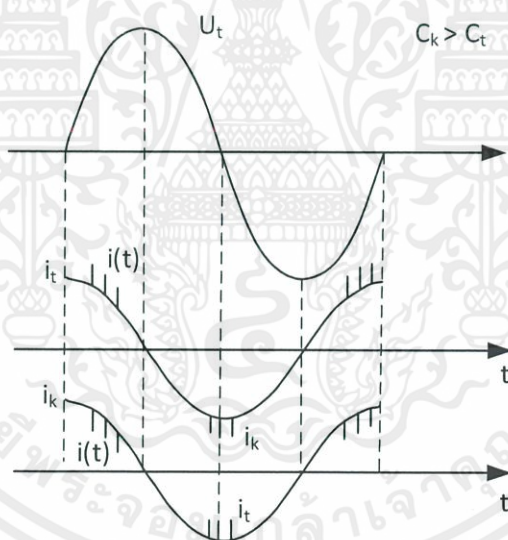
รูปที่ 2.8 วงจรพื้นฐานการวัดการดิสชาร์จบางส่วน

เมื่อ U_g คือ ตัวจ่ายแรงดันสูงกระแสสลับป้อนตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว C_k กับวัสดุทดสอบ C_t

F คือ ตัวกรองประกอบด้วยอิมพีแดนซ์ที่มีความถี่สูง นั่นคือตัวกรองจะทำหน้าที่กันไม่ให้คลื่นรบกวนความถี่สูงจากตัวจ่ายเข้าไปรบกวนวงจรทดสอบ แต่ยอมให้กระแสทดสอบความถี่ต่ำไหลผ่านไปได้ ในเวลาเดียวกัน F จะทำหน้าที่กันมิให้สัญญาณดิสชาร์จบางส่วน (การดิสชาร์จบางส่วน) จากวัสดุทดสอบ ไหลหนีออกไปทางตัวจ่ายแรงดันได้ ตัวกรองนี้ อาจประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำ L หรือประกอบตัวเก็บประจุ C เป็นวงจร π ก็ได้

C_k คือ ตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว มีค่าความจุไฟฟ้าประมาณ ค่าความจุไฟฟ้าของวัสดุทดสอบ หรือใหญ่กว่า ในเชิงปฏิบัติ C_k จะมีค่าความจุไฟฟ้าประมาณ 1000 pF เพื่อให้มีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำพอที่จะทำให้กระแสการดิสชาร์จบางส่วน $i(t)$ ซึ่งมีค่า $< 100 \mu\text{A}$ และเป็นพัลส์แคบ ไหลได้ครบวงจร เป็นกระแสที่วัดได้ ตามที่ได้กล่าวแล้วว่า เมื่อเกิดที่ดิสชาร์จในโพรงก๊าซของฉนวน จะทำให้แรงดันที่ขั้วทดสอบ A-B ตกไปเท่ากับ δU_t และเป็นเหตุให้เกิดการถ่ายเทประจุจากตัวเก็บประจุ C_k เข้าไปทดแทน นั่นคือจะมีกระแสไหลวน $i(t)$ ที่สามารถตรวจจับ หรือวัดได้ (measurable current) ซึ่งมีลักษณะเป็นพัลส์ ซ้อนอยู่บนรูปคลื่นกระแสที่ป้อนให้กับวัสดุทดสอบ i_t และตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว $i_k (C du / dt)$ กระแสทั้งสองจะมีมุมเฟสหน้าแรงดันที่ป้อนประมาณ 90 องศา ถ้าไม่มีค่าเก็บประจุสเตรย์ขนานกับ C_k กระแสพัลส์การดิสชาร์จบางส่วน $i(t)$ ที่ซ้อนบนรูปคลื่นกระแสป้อนนี้ มีขนาดเท่ากันแต่ชั่วตรงกันข้าม ดังรูปที่ 2.9

ถ้าค่าเก็บประจุวัสดุทดสอบน้อย แรงดันที่ได้จากกระแสการดิสชาร์จบางส่วนนี้ $i(t)$ จะจำแนกจากกระแสประจุ $i(t)$ ได้ชัดเจน



รูปที่ 2.9 รูปคลื่นกระแสและแรงดันทดสอบของการดิสชาร์จบางส่วน

- เมื่อ U_t คือ แรงดันที่ป้อน
- i_t คือ กระแสที่ป้อนให้กับวัสดุทดสอบ C_t
- i_k คือ กระแสที่จ่ายให้กับตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว C_k
- $i(t)$ คือ กระแสพัลส์ดิสชาร์จบางส่วน (การดิสชาร์จบางส่วน) ที่วัดได้

กระแสพัลส์การดิสซาร์จบางส่วน คือ $i(t)$ ในแต่ละครึ่งไซเคิลของแรงดันที่ป้อน จะมีจำนวนพัลส์มากขึ้นขึ้นอยู่กับขนาดแรงดันทดสอบ และลักษณะตำแหน่งของการเกิดผิดพร่อง ถ้าวัสดุทดสอบมีจุดผิดพร่องหลายแห่งจำนวนพัลส์การดิสซาร์จบางส่วน จะมีมากขึ้นซึ่งมีช่วงห่างระหว่างพัลส์เป็น μs หรือเร็วกว่านั้น โดยทั่วไปจะสังเกตเห็นอัตราการเกิดดิสซาร์จ มีค่าสูงมากที่สุดเมื่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน dU_t / dt มีค่าสูงสุด ฉะนั้น ขั้วของพัลส์จะไม่ขึ้นอยู่กับขั้วของแรงดันทดสอบ U_t แต่ขึ้นอยู่กับเครื่องหมายการเปลี่ยนแปลง dU / dt ตรงกันข้าม ในกรณีที่ดิสซาร์จโคโรน่าซึ่งเป็นที่ดิสซาร์จบางส่วนเกิดภายนอกจะเกิดที่ยอดของแรงดันทดสอบและเครื่องหมายของพัลส์ การดิสซาร์จบางส่วนจะสอดคล้องกับเครื่องหมาย (ขั้ว) ของแรงดันทดสอบที่ป้อน

ในรูปที่ 2.8 เป็นวงจรที่ใส่แอมพลิฟายเออร์ที่มีแบนด์วิดท์สูงมากที่ต้นทางเคเบิลวัดจะทำให้เคเบิลวัดสัญญาณไม่ต่อทางไฟฟ้ากับความต้านทาน R_m เพราะ R_m มีค่าสูง จะมีผลให้การวัดคลาดเคลื่อน ในการนี้จึงใส่ตัวเก็บประจุ C_m ประมาณ 10 pF ที่ต่อระหว่างปลายล่าง C_t กับดินและขนานกับ R_m จึงเป็นทางเบี่ยงของสัญญาณประกอบที่มีความถี่สูงมากของ $i(t)$ ฉะนั้นถ้า $i(t)$ เป็นพัลส์สั้นๆ รูปร่างและค่ายอดบิดเบือน C_m จะทำการอินทิเกรตกระแสและ R_m ที่ใส่ไว้จะมีผลให้เกิดการหน่วงด้วยเวลาคงตัว $R_m C_t C_k / (C_t + C_k)$

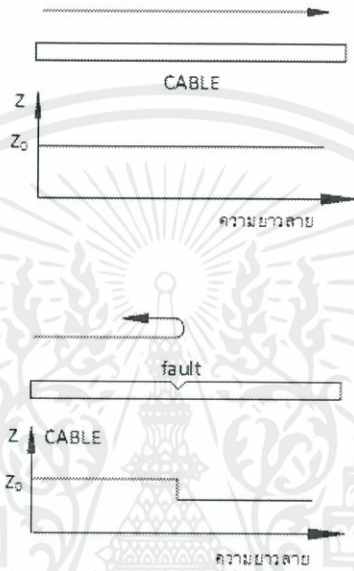
2.7 ความรู้เบื้องต้นสำหรับทามโดเมนรีเฟล็คโตเมทรี (Time domain reflectometry)

เป็นเทคนิคในการวัดระยะหาตำแหน่งจุดบกพร่องของสายตัวนำ โดยจะทำงานคล้ายกับสัญญาณเรดาร์ โดยจะทำการส่งสัญญาณพัลส์ (Pulse) เข้าไปในสายเคเบิล เมื่อเดินทางไปถึงปลายสายหรือพบจุดบกพร่องของสายเคเบิลเนื่องจากสภาพและคุณสมบัติทางสายตรงตำแหน่งนี้มีการเปลี่ยนแปลงทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ (Impedance) ตรงตำแหน่งนั้นไม่ตรงกัน (Mismatch) กับอิมพีแดนซ์ของสาย (Characteristic Impedance or Cable Impedance) สัญญาณพัลส์ที่ส่งไปนั้นก็จะสะท้อนกลับมาที่เครื่องวัดแล้วจะทำการตรวจสอบเวลาที่สัญญาณเดินทางไปและกลับแล้วทำการแปลงช่วงเวลานี้ให้เป็นระยะทางต่อจากนั้นก็ทำการแสดงผลต่อไป

นอกจากนี้ทามโดเมนรีเฟล็คโตเมทรีสามารถตรวจวัดตัวนำโลหะประเภทสายคู่และสายโคแอกเซียลได้ และยังสามารถที่จะตรวจวัดความเสียหายเพียงเล็กน้อยที่เกิดขึ้นกับสายเคเบิลได้ เช่นตัวนำที่เสื่อมสภาพ การสึกกร่อนจากน้ำ ฉนวนที่หุ้มตัวนำเกิดการเสียหาย ฯลฯ ถึงแม้ว่าเครื่องมือที่เราใช้อยู่ในปัจจุบันนี้จะสะดวกและถูกต้อง เพื่อก่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดในการทำงานเช่นเดียวกับอุปกรณ์อื่นๆ เราควรทำความเข้าใจหลักการทำงานของทามโดเมนรีเฟล็คโตเมทรีให้ลึกซึ้งมากยิ่งขึ้น

2.7.1 ระยะทางในสายเคเบิล

โดยปกติ สายส่งสัญญาณแต่ละชนิดจะมีค่าอิมพีแดนซ์คงที่ตลอดความยาวสาย เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายมีค่าคงที่ ดังนั้นถ้าเราทำการส่งสัญญาณตรวจสอบเข้าไปในสาย สัญญาณจะเคลื่อนที่ไปตลอดความยาวสายโดยจะไม่มีการสะท้อนกลับมาของสัญญาณและถ้า หากว่า ส่วนใดของสายส่งสัญญาณที่มีค่าอิมพีแดนซ์เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งหมายถึงตำแหน่งที่สายส่งสัญญาณเกิดการชำรุดจะทำให้เกิดการสะท้อนกลับของสัญญาณที่ตำแหน่งนั้นๆ ดังรูปที่ 2.11



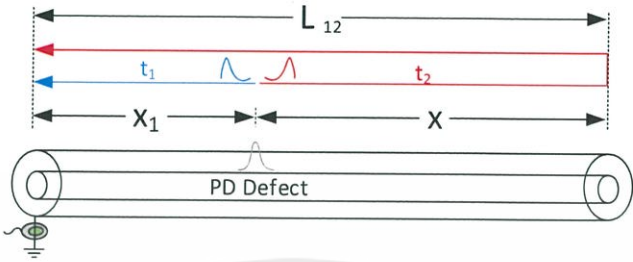
รูปที่ 2.10 การเคลื่อนที่ของสัญญาณในสายที่อิมพีแดนซ์เปลี่ยนไป

จะทำการส่งพัลส์เข้าไปในสายเคเบิลและตรวจวัดสัญญาณที่สะท้อนกลับ ถ้าถึงปลายสายจะเกิดการสะท้อนกลับมา จากนั้นจึงนำสัญญาณที่สะท้อนกลับมาไปประมวลผลและแสดงออกมาให้ทราบผลต่างระหว่างเวลาของพัลส์ลูกแรกกับลูกที่สอง สามารถนำมาคำนวณหาระยะทางจากจุดวัดถึงปลายสาย ดังสมการที่ 2.5

$$D = \frac{U \times T_p}{2} \tag{2.5}$$

- เมื่อ D คือ ระยะทางจากจุดที่วัดถึงปลายสาย (m)
- U คือ ความเร็วในการเคลื่อนที่ของสัญญาณ ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดและขนาดของสายส่งสัญญาณ (m/s)
- T_p คือ เวลาที่สัญญาณใช้ในการเคลื่อนที่ภายในสายตั้งแต่ส่งสัญญาณออกไปจนสะท้อนกลับมา (s)

เมื่อเกิดการดิสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิลอิมพิแดนซ์จะเปลี่ยนแปลงไปทำให้สัญญาณเกิดการสะท้อนกลับมาส่วนหนึ่งส่วนอีกสัญญาณหนึ่งเดินทางไปที่ปลายสายและสะท้อนกลับมาเข้าเครื่องมื่อวัด ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.11 การเคลื่อนที่ของสัญญาณเมื่อเกิดดิสชาร์จบางส่วน

จากรูปที่ 2.11 เวลาที่มาถึงของพัลส์ซ้ายจะเดินทางมาโดยตรง และพัลส์ขวาจะเดินทางไปสะท้อนปลายสายและเดินทางกลับมา แสดงความสัมพันธ์ได้ ดังสมการที่ 2.6

$$t_2 = t_1 + \Delta t \tag{2.6}$$

โดยที่ t_1 และ t_2 คือเวลาของสัญญาณมาถึงที่บริเวณสิ้นสุด Δt คือความแตกต่างของเวลาที่ไปถึงตัวจับสัญญาณระหว่างพัลส์ทั้งสอง

ความยาว L_{12} ของสายทั้งหมดสามารถเขียนได้ ดังสมการที่ 2.7

$$x_2 = L_{12} - x_1 \tag{2.7}$$

สัญญาณพัลส์ซ้ายจะเดินทางไปยังจุดวัดสัญญาณสามารถหาสมการได้ ดังสมการที่ 2.8

$$x_1 = v \times t_1 \tag{2.8}$$

ความเร็วสัญญาณพัลส์ขวาจะเดินทางไปสะท้อนปลายสายและเดินทางกลับมา แสดงความสัมพันธ์ได้ ดังสมการที่ 2.9

$$v = \frac{(L_{12} - x_1) + L_{12}}{t_2} \tag{2.9}$$

และในการวัดสัญญาณจริงจะไม่สามารถทราบเวลาเริ่มต้นที่วัดได้ของเครื่องวัด (t_1) จึงต้องหาผลต่างเวลาของสัญญาณสะท้อนลูกแรกกับสัญญาณสะท้อนลูกที่สองเพื่อนำไปหาระยะทางจากปลายสายเคเบิลถึงจุดเกิดดิสชาร์จบางส่วน ดังสมการที่ 2.7

$$x_1 = L_{12} - \frac{v \times \Delta t}{2} \quad (2.7)$$

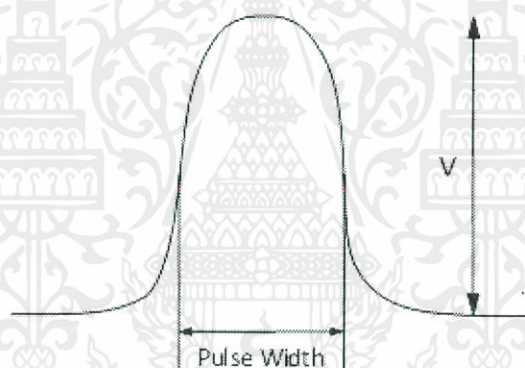
เมื่อ v คือ ความเร็วในการเคลื่อนที่ของสัญญาณ ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดและขนาดของสายส่ง
สัญญาณ (m/s)

Δt คือ ผลต่างเวลาของสัญญาณสะท้อนลูกแรกกับสัญญาณสะท้อนลูกที่สอง (s)

L_{12} คือ ความยาวทั้งหมดของสายเคเบิล (m)

2.7.2 สัญญาณที่ส่งเข้าไปในสาย

สัญญาณที่ใช้ในการทดสอบส่งเข้าไปในสายส่วนใหญ่จะเป็นสัญญาณ Sine-Squared Pulse ซึ่งมี ขนาดแรงดันประมาณ $10-30 V_{peak}$ และขนาดความกว้างของสัญญาณพัลส์ (Pulse Width) อยู่ในช่วง $10 ns - 2 \mu s$ สำหรับวัฏระยะไกลที่ต้องใช้แรงดันสูงความกว้างพัลส์มีขนาดกว้าง เพื่อให้สัญญาณที่ส่งไปสามารถเคลื่อนที่ไปถึงจุดบกพร่องและสะท้อนกลับมา ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 รูปสัญญาณพัลส์ที่ส่งเข้าไปในสาย

ยิ่งขนาดของพัลส์กว้างพลังงานที่ถูกส่งออกไปยิ่งมากขึ้นตามจึงสามารถส่งไปได้ไกล ความกว้างของพัลส์อาจจะเป็น $10 ns$, $100 ns$, $1000 ns$, $2000 ns$ หรือ $4000 ns$ ตามความเหมาะสมกับการใช้งานโดยทั่วไปจะไม่สามารถปรับแรงดันได้ ขนาดความกว้างของสัญญาณที่ส่งไปจะถูกกำหนดไว้อย่างเหมาะสมในแต่ละระยะของการวัด เนื่องจากสัญญาณแต่ละขนาดให้ผลการวัดที่ดีในระยะต่างกัน สัญญาณขนาดแคบๆ จะถูกใช้ในการวัดสายระยะสั้น เพื่อให้สามารถแยกสัญญาณที่ส่งไปและสะท้อนกลับได้อย่างชัดเจนไม่ซ้อนทับกัน สัญญาณขนาดแคบมากเท่าไรก็สามารถวัดระยะจุดบกพร่องได้ใกล้ขึ้นเท่านั้น แต่ถ้าสัญญาณขนาดความกว้างของพัลส์ต่ำสุดไม่แคบพอในบางครั้งจะมีปัญหาในการวัดหาตำแหน่งจุดบกพร่องเพราะถ้าจุดวัดอยู่ใกล้กับจุดบกพร่องมากๆ จะทำให้สัญญาณที่ส่งออกไปและสัญญาณที่สะท้อนกลับเกิดการซ้อนทับกันทำให้การประมวลผลเกิดความผิดพลาดได้

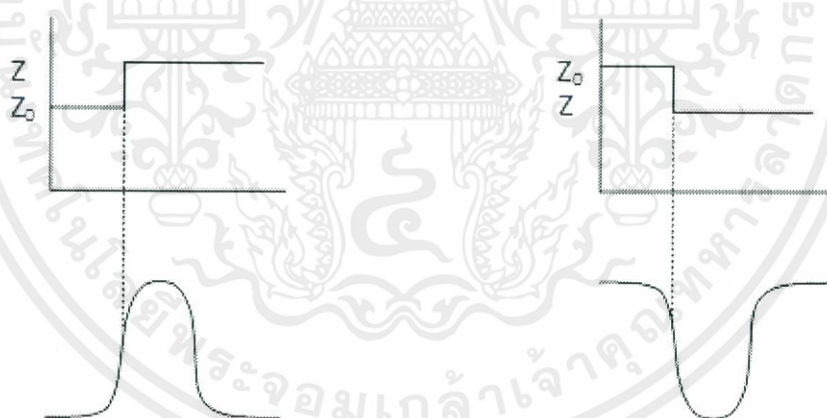
พัลส์ที่มีขนาดเล็กจะมีพลังงานน้อยกว่าพัลส์ที่มีขนาดใหญ่สำหรับการวัดสายระยะไกลต้องใช้พัลส์ที่มีพลังงานมากขนาดความกว้างของพัลส์ก็ต้องมากขึ้นตาม เพื่อที่สามารถส่งไปได้ไกลถึงจุดที่อาจเกิดความเสียหายและสามารถที่จะสะท้อนกลับมายังเครื่องวัดได้ ดังนั้นในการวัดระยะจุดบกพร่องของสายเคเบิลเราจึงต้องเลือกขนาดความกว้างของพัลส์ที่เหมาะสมกับความยาวของสายเคเบิล เพื่อที่จะทำให้พัลส์ที่ถูกส่งออกไปมีพลังงานเหลือเพียงพอที่จะสะท้อนกลับมายังเครื่องวัด ถ้าเราใช้พัลส์ที่มีขนาดเล็กส่งไปในสายระยะยาวสัญญาณจะถูกลดทอนภายในสายจนทำให้สัญญาณไม่มีพลังงานเหลือเพียงพอที่จะสะท้อนกลับมา

เพราะฉะนั้นการเลือกความกว้างของพัลส์จึงมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งเพราะเราจะต้องเลือกให้เหมาะสมโดยจะต้องคำนึงถึงระยะที่ใช้วัดและค่าการลดทอนภายในสายทั้งสองอย่างควบคู่กันไป

ในทางปฏิบัติงานจริงเมื่อต้องการตรวจสอบสายเคเบิลที่ยาวมากๆ ให้เริ่มจากการเลือกขนาดของพัลส์ที่มีขนาดกว้างเล็กที่สุดและเพิ่มความกว้างไปเรื่อยๆ จนกว่าจะพบตำแหน่งที่ชำรุด

2.7.3 รูปร่างและสัญญาณสะท้อนกลับ

สัญญาณที่สะท้อนกลับมานั้นจะสะท้อนกลับมาได้ตรงตำแหน่งที่อิมพีแดนซ์มีการเปลี่ยนแปลงไป และการเปลี่ยนแปลงของอิมพีแดนซ์เกิดขึ้นได้ 2 ลักษณะ คือเปลี่ยนแปลงไปในทางที่เพิ่มขึ้นหรือลดลง สิ่งเหล่านี้จะส่งผลให้เกิดการสะท้อนที่แตกต่างกัน



ก) พัลส์สะท้อนกลับแบบบวก

ข) พัลส์สะท้อนกลับแบบลบ

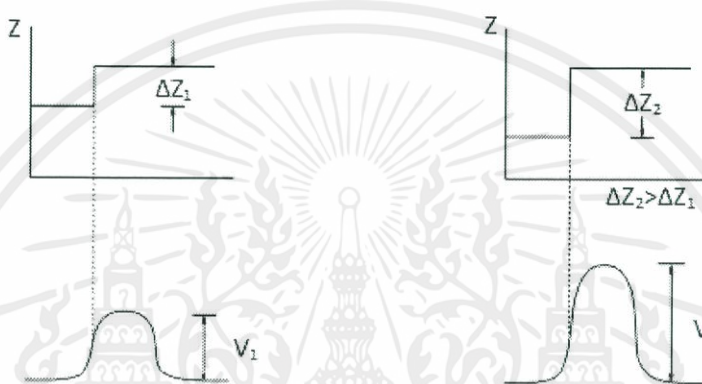
รูปที่ 2.13 รูปร่างของสัญญาณสะท้อนกลับ

จะเห็นว่ากรณีที่อิมพีแดนซ์มีการเปลี่ยนแปลงไปในทางที่เพิ่มขึ้น สัญญาณที่สะท้อนกลับมามีลักษณะเดียวกันกับสัญญาณที่ส่งไปหรือที่เรียกว่าพัลส์สะท้อนกลับแบบบวก (Positive Return Pulse) แต่ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงไปในทางลดลงสัญญาณที่สะท้อนกลับมามีลักษณะที่ตรงกันข้ามกับสัญญาณที่ส่งไปหรือที่เรียกว่า พัลส์สะท้อนกลับแบบลบ (Negative Return Pulse)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากเหตุผลที่แตกต่างดังกล่าว ทำให้เราสามารถที่จะวิเคราะห์ลักษณะของเหตุบกพร่อง (Fault) ที่เกิดขึ้นได้ เนื่องจากเหตุบกพร่องแต่ละชนิดทำให้ค่าอิมพีแดนซ์เปลี่ยนแปลงไปในลักษณะที่ต่างกัน เหตุบกพร่องที่ทำให้ค่าอิมพีแดนซ์เพิ่มขึ้น คือเหตุบกพร่องแบบอนุกรม (Series fault) อันได้แก่ สายขาด, หลวม หรือเกิดออกไซด์ที่จุดต่อ และเหตุบกพร่องที่ทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ลดลง คือเหตุบกพร่องแบบขนาน (Shunt fault) อันได้แก่ สายลัดวงจร, สายแตะดิน เป็นต้น

อิมพีแดนซ์ที่เปลี่ยนแปลงไปนอกจากจะมีผลต่อลักษณะของสัญญาณที่สะท้อนกลับแล้วยังมีผลต่อขนาดของสัญญาณที่สะท้อนกลับอีกด้วยดังรูปที่ 2.14



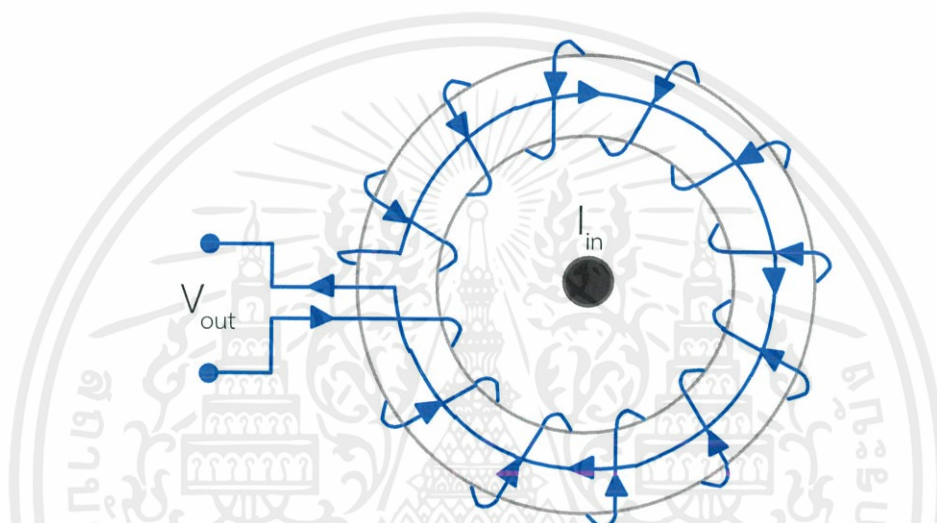
รูปที่ 2.14 ขนาดของสัญญาณสะท้อนกลับ

จะเห็นว่าขนาดของสัญญาณสะท้อนกลับจะมากหรือน้อยจะขึ้นอยู่กับค่าอิมพีแดนซ์มีการเปลี่ยนแปลงไปมากหรือน้อยเพียงใด ถ้าอิมพีแดนซ์มีการเปลี่ยนแปลงไปมากก็จะทำให้ขนาดของสัญญาณที่สะท้อนกลับมีค่ามาก แต่ถ้าอิมพีแดนซ์เปลี่ยนแปลงไปเพียงเล็กน้อยขนาดของสัญญาณที่สะท้อนกลับก็น้อยลงไปด้วยหรืออาจกล่าวได้ว่าขนาดของสัญญาณที่สะท้อนกลับจะแสดงให้เห็นว่าสัญญาณนั้นสามารถสะท้อนกลับได้ดีเพียงใด ในทางปฏิบัติจะเห็นว่ากรณีที่เหตุบกพร่องเกิดขึ้นไม่รุนแรง สัญญาณจะสะท้อนกลับมาเพียงเล็กน้อยจะทำให้ยากต่อการวัดหาตำแหน่งที่เสีย เนื่องจากอิมพีแดนซ์เปลี่ยนแปลงไปเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

โดยทั่วไปการสะท้อนกลับของสัญญาณจะมากหรือน้อยจะถูกกำหนดในรูปของสัมประสิทธิ์การสะท้อน (Reflection Coefficient) ซึ่งจะบ่งบอกถึงความสามารถในการสะท้อนกลับของสัญญาณที่จุดนั้นๆ โดยเปรียบเทียบสัญญาณที่สะท้อนกลับมากับสัญญาณที่ส่งไป ซึ่งได้กล่าวมาแล้วในตอนต้นๆ

2.8 การใช้ขดลวดโรกอฟสกีวัดกระแสอิมพัลส์

เทคนิคการวัดกระแสโดยใช้ขดลวดโรกอฟสกีเป็นที่รู้จักกันมานานตั้งแต่ ค.ศ. 1912 ซึ่ง อาจแสดงได้ดังไดอะแกรมในภาพที่ 1 เมื่อกระแสไหลผ่านตัวนำจะเกิดฟลักซ์แม่เหล็กล้อมรอบตัวนำไป คาบเกี่ยวกับขดลวดโรกอฟสกีที่พันรอบแกนวัสดุที่มีค่าอิมดัวของสนามแม่เหล็กสูงถ้าปริมาณกระแสที่ไหลผ่านตัวนำมีลักษณะเปลี่ยนแปลงตามเวลา เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นก็แปรเปลี่ยนไปตามเวลาด้วยเช่นกัน ฟลักซ์แม่เหล็กที่คล่องผ่านขดลวดจะเหนี่ยวนำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าขึ้นที่ปลายขดลวดโรกอฟสกีเมื่อนำแรงดันเหนี่ยวนำดังกล่าวไปผ่านวงจรอินทิเกรตที่เหมาะสมจะได้ค่ากระแส (i_{in}) ต้องการวัดตามกฎของแอมแปร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 หลักการวัดกระแสของขดลวดโรกอฟสกี

จากรูปที่ 2.15 เมื่อใช้กฎของแอมแปร์ (Ampere's Law) ปริมาณกระแสที่ไหลผ่านตัวนำจะมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.4

$$I_{in} = \int H dl = H l_c \quad (2.4)$$

$$H = \frac{I_{in}}{l_c} \quad (2.5)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (B) กับความเข้มสนามไฟฟ้า (H) แสดงดังสมการที่ 2.6 โดยที่ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก คือ ปริมาณฟลักซ์แม่เหล็กที่ตกกระทบตั้งฉากบนพื้นที่ที่ฟลักซ์แม่เหล็กไหลผ่าน (A) แสดงสมการที่ 2.8

$$B = \mu H \quad (2.6)$$

$$\mu = \mu_0 \mu_r \quad (2.7)$$

$$\phi = \int_A \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} = BA \quad (2.8)$$

เมื่อแทนสมการที่ 2.5 ในสมการที่ 2.6

$$B = \mu H = \frac{\mu I_{in}}{l_c} \quad (2.9)$$

จากนั้นแทนสมการที่ 2.8 ในสมการที่ 2.9

$$\phi = BA = \frac{\mu A I_{in}}{l_c} \quad (2.10)$$

จากกฎของฟาราเดย์กล่าวว่า เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็กในช่วงเวลาหนึ่งจะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นที่ปลายของขดลวด แสดงดังสมการที่ 2.11

ส่วนกฎของเลนซ์กล่าวว่า โดยธรรมชาติแล้วขดลวดจะพยายามไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็ก กล่าวคือเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็กขึ้น ขดลวดจะสร้างฟลักซ์แม่เหล็กในทิศทางตรงข้ามเพื่อต้านการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็กนั้น

$$\varepsilon = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (2.11)$$

และเมื่อแทนสมการที่ 2.10 ในสมการที่ 2.11

$$V_{out} = -N \frac{d\phi}{dt} = -\frac{\mu N A}{l_c} \cdot \frac{dI_{in}}{dt} \quad (2.12)$$

กำหนดให้ $M = \frac{\mu N A}{l_c}$ และแทนค่า ในสมการที่ (2.12)

$$V_{out} = -M \cdot \frac{dI_{in}}{dt} \quad (2.13)$$

ดังนั้นกระแสที่ต้องการวัดจะมีค่าเท่ากับ

$$I_{in} = -\frac{1}{M} \int V_{out} \cdot dt \quad (2.14)$$

จากสมการที่ 2.14 จะเห็นว่าการวัดกระแสด้วยเทคนิคของขดลวดโรกอฟสกีนั้นต้องอาศัยการอินทิเกรตแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนขดลวด ในทางปฏิบัติจึงจำเป็นต้องมีวงจรอินทิเกรตด้วยเสมอ ดังนั้นคุณสมบัติของระบบวัดกระแสด้วยขดลวดโรกอฟสกีแบบทั่วไปจึงขึ้นอยู่กับ การออกแบบวงจรอินทิเกรตที่เหมาะสม ซึ่งขนาดของแรงดันที่จะทำการอินทิเกรตจะถูกกำหนดโดย ค่าเวลาคงตัว (τ) ของวงจรอินทิเกรต ดังสมการที่ 2.15

$$V_{out} = \frac{1}{\tau} \int V_{coil} dt \quad (2.15)$$

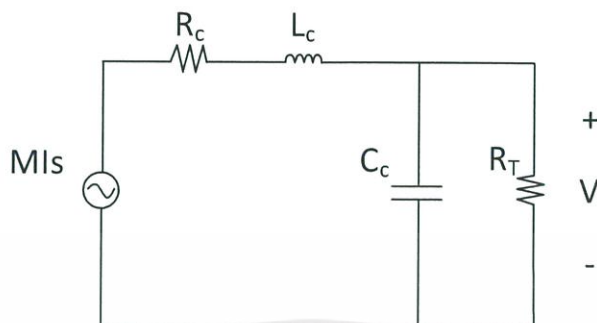
- เมื่อ
- I คือ กระแสไฟฟ้า (A)
 - H คือ ความเข้มสนามแม่เหล็ก (Magnetic field intensity; $A-Turns/m$)
 - l คือ ความยาวรอบพื้นที่วงปิดตามทิศของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (m)
 - B คือ ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (Magnetic flux density; Wb/m^2)
 - μ คือ ความซึมซาบแม่เหล็ก (Absolute permeability; H/m)
 - μ_0 คือความซึมซาบแม่เหล็กสุญญากาศ(Permeability of freespace; H/m)
 - μ_r คือ ความซึมซาบแม่เหล็กสัมพัทธ์ (Relative permeability)
 - ϕ คือ ฟลักซ์แม่เหล็ก (Magnetic flux ; Wb)
 - A คือ พื้นที่ที่ฟลักซ์แม่เหล็กไหลผ่าน (m^2)
 - ε คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Induced voltage ; V)
 - N คือ จำนวนรอบของขดลวด ($Turns$)
 - l_c คือ ความยาวของแกนขดลวด
 - M คือ ความเหนี่ยวนำร่วม (Mutual inductance)

ในสมการที่ 2.12 เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็กตามเวลา จะเกิดการสร้างฟลักซ์แม่เหล็กในทิศทางตรงข้ามกับการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็กนั้นตามกฎหมายของฟาราเดย์และกฎของเลนซ์ จากนั้นจะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลในขดลวดในทิศที่แสดงในรูปที่ 2.11

จากสมการที่ 2.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอินพุตและแรงดันเอาต์พุต กล่าวคือ กระแสอินพุตหาได้จากการอินทิเกรตแรงดันเอาต์พุตนั่นเอง ดังนั้นถ้านำแรงดันเอาต์พุตจากตัวอย่าง กระแสความถี่สูงมาผ่านตัวอินทิเกรตที่เหมาะสมจะได้กระแสอินพุต

2.9 ขดลวดเหนี่ยวนำแบบแกนอากาศ

2.9.1 วงจรสมมูลของขดลวดเหนี่ยวนำแบบแกนอากาศ



รูปที่ 2.16 วงจรสมมูลของขดลวดเหนี่ยวนำแบบแกนอากาศ

จากรูปที่ 2.16 แสดงถึงวงจรสมมูลของขดลวดเหนี่ยวนำแบบแกนอากาศ ซึ่งจากวงจรสมมูลดังกล่าวสามารถหาทรานเฟอร์ฟังก์ชัน (Transfer function) หรือทรานเฟอร์อิมพีแดนซ์ (Transfer impedance ; Z) ได้ ซึ่งแสดงดังสมการที่ 2.17 โดยที่ทรานเฟอร์อิมพีแดนซ์ คือ อัตราส่วนระหว่างแรงดันเอาต์พุตกับกระแสอินพุต

$$Z = \frac{V}{I} = \left(\frac{\frac{R_T}{1 + R_T C_c s} M s}{R_c + L_c s + \frac{R_T}{1 + R_T C_c s}} \right) \quad (2.16)$$

$$= \frac{\frac{M}{L_c C_c} s}{s^2 + \left(\frac{R_c}{L_c} + \frac{1}{R_T C_c} \right) s + \frac{R_c + R_T}{R_T L_c C_c}} \quad (2.17)$$

เนื่องจากความต้านทานของขดลวดเหนี่ยวนำแบบแกนอากาศ (R_c) มีค่าต่ำมาก ดังนั้นในสมการที่ 2.17 ไม่จำเป็นต้องนำความต้านทานของขดลวดเหนี่ยวนำแบบแกนอากาศมาคำนวณ และสามารถเขียนสมการทรานเฟอร์อิมพีแดนซ์ใหม่ดังสมการที่ 2.18

$$Z = \frac{V}{I} \approx \frac{\frac{M}{L_c C_c} s}{s^2 + \left(\frac{1}{R_T C_c} \right) s + \frac{1}{L_c C_c}} \quad (2.18)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\approx \frac{\frac{M}{L_c C_c} s}{\left(s + \frac{1}{R_T C_c} \right) \left(s + \frac{R_T}{L_c} \right)} \quad (2.19)$$

ค่าโพล (Pole) ของสมการทรานเฟอร์อิมพีแดนซ์ในสมการที่ 2.18 คือ $\frac{R_T}{L_c}$ และ $\frac{1}{R_T C_c}$ ซึ่งจะแสดงถึงความถี่คัทออฟของขดลวดเหนี่ยวนำแบบแกนอากาศ (Cut off frequency) ซึ่งความถี่คัทออฟด้านต่ำ (Low cutoff frequency) มีค่าประมาณ $\frac{R_T}{2\pi L_c}$ และความถี่คัทออฟด้านสูง (High cutoff frequency) มีค่าประมาณ $\frac{1}{2\pi R_T C_c}$ และจากสมการที่ 2.19 สามารถหาอัตราส่วนระหว่างแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตกับกระแสไฟฟ้าอินพุต (Gain) ดังสมการที่ 2.20

$$Gain \approx \frac{R_T}{N}$$

เมื่อ Z คือ ทรานเฟอร์อิมพีแดนซ์ (Transfer impedance ; V/A)

V คือ แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต (V)

I คือ กระแสไฟฟ้าอินพุต (A)

M คือ ความเหนี่ยวนำรวม (Mutual inductance)

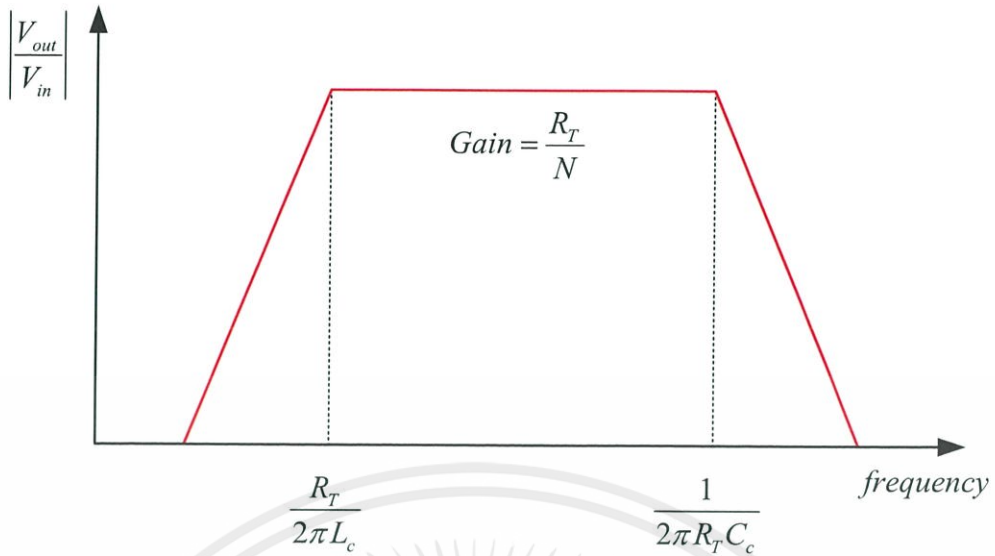
R_c คือ ความต้านทานของขดลวดเหนี่ยวนำแบบแกนอากาศ (Ω)

R_T คือ ตัวต้านทานเมทซิง (Ω)

L_c คือ ความเหนี่ยวนำของขดลวดเหนี่ยวนำแบบแกนอากาศ (H)

C_c คือ ความจุไฟฟ้าของขดลวดเหนี่ยวนำแบบแกนอากาศ (F)

N คือ จำนวนรอบของขดลวด (Turns)



รูปที่ 2.17 ผลตอบสนองต่อความถี่ของขดลวดเหนี่ยวนำแบบแกนอากาศ

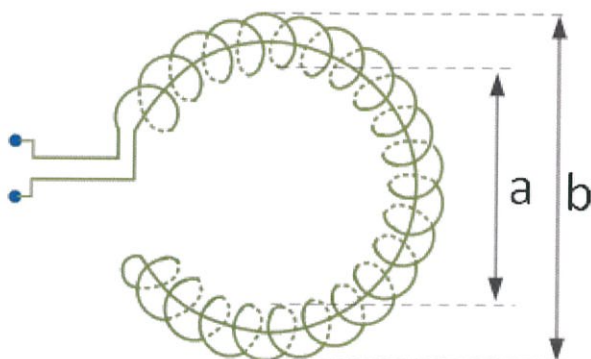
จากรูปที่ 2.17 แสดงให้เห็นว่า ความถี่คutoff ด้านต่ำจะขึ้นอยู่กับค่าตัวต้านทานแม่เหล็ก (R_T) และความเหนี่ยวนำของตัวแปลงกระแสและความถี่สูง (L_c) ส่วนความถี่คutoff ด้านสูงจะขึ้นอยู่กับค่าตัวต้านทานแม่เหล็ก (R_T) และความจุไฟฟ้าของขดลวดเหนี่ยวนำแบบแกนอากาศ (C_c) อย่างไรก็ตามความเหนี่ยวนำไฟฟ้าของขดลวดเหนี่ยวนำแบบแกนอากาศในทางปฏิบัติยังสามารถวัดค่าได้ แต่การวัดค่าความจุไฟฟ้าของขดลวดเหนี่ยวนำแบบแกนอากาศในทางปฏิบัตินั้นทำได้ยาก ดังนั้นในวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะเลือกใช้ความเหนี่ยวนำของขดลวดเหนี่ยวนำแบบแกนอากาศในการออกแบบความถี่คutoff ด้านต่ำเท่านั้น

2.9.2 การคำนวณความเหนี่ยวนำของขดลวดเหนี่ยวนำแบบแกนอากาศ

ความเหนี่ยวนำของขดลวดเหนี่ยวนำแบบแกนอากาศที่ใช้แกนอากาศ จะสามารถหาค่าได้

จาก สมการที่ 2.21

$$L = \frac{\mu_0 N^2 h}{2\pi} \ln\left(\frac{b}{a}\right) \quad (2.21)$$



รูปที่ 2.18 แบบจำลองของขดลวดเหนี่ยวนำแบบแกนอากาศ

เมื่อ μ_0 คือ ความซึมซับแม่เหล็กของสุญญากาศ ($4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$)

N คือ จำนวนรอบขดลวดของขดลวดเหนี่ยวนำแบบแกนอากาศ

h คือ ความสูงของขดลวดเหนี่ยวนำแบบแกนอากาศ

b คือ ความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางกลางภายนอกของขดลวดเหนี่ยวนำแบบแกนอากาศ

a คือ ความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของขดลวดเหนี่ยวนำแบบแกนอากาศ

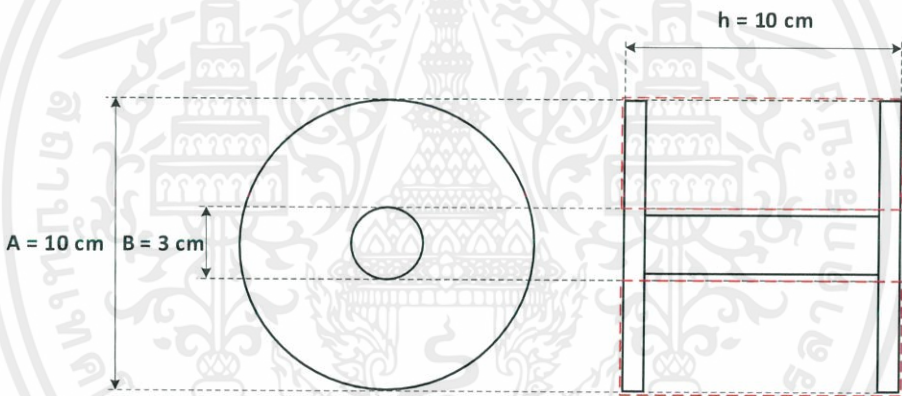
บทที่ 3

การออกแบบและการสร้าง

ในขั้นตอนของการออกแบบขดลวดโรกอฟสกีจะเริ่มจากการเลือกขนาดของแกนอากาศให้มีขนาดเหมาะสมต่อสายไฟที่ต้องการนำไปคล้องในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง

3.1 การออกแบบและประกอบสร้างแกนขดลวด

3.1.1 การออกแบบแกนของขดลวด ออกแบบโดยใช้แกนอากาศเป็นแกนของขดลวด เนื่องจากแกนอากาศนั้นมีค่าความอิ่มตัวสูงจึงสามารถนำไปใช้ในการวัดความถี่สูงแต่ค่าอัตราส่วนระหว่างความเหนี่ยวนำกับขนาดของขดลวดเหนี่ยวนำแบบแกนอากาศมีค่าต่ำ กล่าวคือ ถ้าต้องการความเหนี่ยวนำที่สูงขนาดของขดลวดเหนี่ยวนำแบบแกนอากาศต้องมีขนาดใหญ่ทางผู้จัดทำได้ทำการออกแบบไว้ ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขนาดของแกนขดลวด

ความสูงของแกนอากาศ (h)	= 10	cm
ความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของแกน (B)	= 3	cm
ความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของแกน (A)	= 10	cm
จำนวนรอบของขดลวด (N)	= 8	รอบ
ตัวต้านทานแมทซิง (R_T)	= 50	Ω

สาเหตุที่เลือกใช้ตัวต้านทานแมทซิง (R_T) มีขนาดเท่ากับ $50\ \Omega$ เนื่องจากสายโคแอกเซียล (Coaxial cable) ที่ใช้มีค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ (Surge impedance) เท่ากับ $50\ \Omega$ ซึ่งการเลือกความต้านทานที่มีขนาดเท่ากับค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายโคแอกเซียลจะไม่ทำให้เกิดคลื่นสะท้อน และยังทำให้การตรวจวัดไม่เกิดความผิดพลาดอีกด้วยจากการคำนวณหาความยาวโดยประมาณของขดลวด (l) ที่ใช้พันได้จากความยาวของเส้นรอบวงครบรอบและพันวนกลับมาอีกรอบรวมกับความยาวของการพันแกนอากาศ 8 รอบ

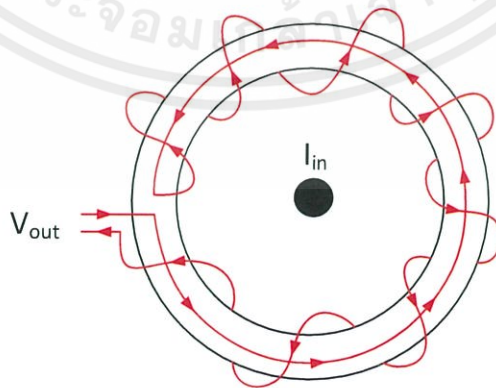
$$\begin{aligned} l &= (((A-B) \times 2) + 4h) \times 4 + 2\pi \frac{5}{2} + 10 + 20 \\ &= (((7) \times 2) + 40) \times 4 + 5\pi + 30 \\ &= (((7) \times 2) + 40) \times 4 + 5\pi + 30 \\ &= 261.708\text{ cm} \end{aligned}$$

เมื่อ h คือ ความสูงของแกนอากาศ

A คือ ความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของแกนอากาศ

B คือ ความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของแกนอากาศ

3.1.2 วิธีการพันขดลวด ในการพันขดลวดโรกอฟสกีนั้นมีการพันที่แตกต่างจากการพันแบบปกติ คือ นอกจากการพันอย่างสม่ำเสมอตลอดความยาวแกนแล้วจะต้องพันย้อนกลับเข้าไปในแกนขดลวดตามแนวแกนของขดลวดโรกอฟสกีเพื่อหักล้างผลจากสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำจากขดลวดทำให้แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจากขดลวดเกิดจากฟลักซ์แม่เหล็กของกระแสไฟฟ้าที่ต้องการวัดเท่านั้น



รูปที่ 3.2 การพันขดลวดโรกอฟสกี

การวัดกระแสของขดลวดโรกอฟสกีอาศัยหลักการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กตามกฎของแอมแปร์ ซึ่งการวัดจะมีความถูกต้องเมื่อพื้นที่หน้าตัดและความหนาแน่นของรอบขดลวดคงที่ตลอดช่วงความยาวแกน ดังนั้นการพันขดลวดจึงต้องคำนึงถึงความสม่ำเสมอของพื้นที่หน้าตัดและรอบด้วย โดยกลุ่มของผู้จัดทำจะใช้จำนวนรอบในการพันทั้งหมด 8 รอบ และระยะห่างระหว่างในการพันแต่ละรอบจะห่างกันสม่ำเสมอ ในการออกแบบจะพันตามหลักการพันขดลวดโรกอฟสกีธรรมดา โดยการพันบนแกนอากาศจริงนั้นจะเริ่มจากการพันเส้นที่ย้อนกลับออกมาก่อนตามเส้นรอบวงของแกนอากาศ แล้วจึงพันรอบแกนอากาศทับแปดรอบ โดยระยะห่างระหว่างรอบของการพันจะต้องสม่ำเสมอ เพื่อให้ทำให้เกิดการวัดที่แม่นยำ

3.1.3 ความเหนี่ยวนำของขดลวดโรกอฟสกี ในการออกแบบสามารถคำนวณค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดโรกอฟสกีได้จาก

$$L = \frac{\mu_0 N^2 h}{2\pi} \times \ln\left(\frac{a}{b}\right) \quad (3.1)$$

จำนวนขดลวดที่ต้องการพัน 8 รอบ ค่าความซึมซาบแม่เหล็กของอากาศ (μ_0) มีค่าเท่ากับ $4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ ความสูงของแกนอากาศมีค่าเท่ากับ 10 cm ความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของแกนอากาศมีค่าเท่ากับ 10 cm ความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของแกนขดลวดเหนี่ยวนำแบบแกนอากาศมีค่าเท่ากับ 3 cm ดังนั้นค่า L ที่เหมาะสมคือ

$$\begin{aligned} L &= \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 8^2 \times 10 \times 10^{-2}}{2\pi} \ln\left(\frac{10 \times 10^{-2}}{3 \times 10^{-2}}\right) \\ &= 2.158 \mu\text{H} \end{aligned}$$

ดังนั้น ความถี่คัทออฟด้านต่ำจากการออกแบบมีค่าดังนี้

$$\begin{aligned} \text{Low cutoff frequency} &\approx \frac{R_T}{2\pi L} \\ &\approx \frac{50}{2 \times \pi \times 2.158 \times 10^{-6}} \\ &\approx 3689.27 \text{ kHz} \end{aligned} \quad (3.2)$$

3.2 การออกแบบและสร้างอุปกรณ์ขดลวดเหนี่ยวนำแบบแกนอากาศ

ในการเลือกแกนของขดลวดเหนี่ยวนำแบบแกนอากาศ จะเลือกกว่าแกนที่จะใช้สำหรับพันขดลวดเนื่องจากแกนพันขดลวดมีค่าความซึมซาบแม่เหล็กเท่ากับอากาศอีกทั้งยังมีคุณสมบัติที่สามารถรับแรงทางกลจากการกระแทกและการพันขดลวดได้ดี จึงทำการออกแบบผ่านโปรแกรม Solidworks ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 การออกแบบอุปกรณ์ป้องกันในโปรแกรม SolidWorks

หลังจากทำการออกแบบจริง ค่าความเหนี่ยวนำที่วัดได้มีค่าประมาณ $3 \mu H$ ซึ่งถือเป็นค่าที่ยอมรับได้ และนำขดลวดเหนี่ยวนำแบบแกนอากาศมาต่อกับ N-Type ที่ปลายขดลวดเพื่อนำไปต่อเข้ากับสายโคแอกเซียล



รูปที่ 3.4 อุปกรณ์ขดลวดเหนี่ยวนำแบบแกนอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดสอบและผลการทดสอบ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการทดสอบหาตำแหน่งของการดิสชาร์จบางส่วน (Partial Discharges) ของขดลวดเหนี่ยวนำแบบแกนอากาศ โดยใช้หลักการวัดการสะท้อนของสัญญาณในโดเมนเวลา (TDR) ซึ่งในการทดสอบจะสมมติระยะทางจริงที่เกิดการดิสชาร์จบางส่วน (Partial Discharges) เป็นทั้งหมด 11 กรณี ได้แก่ ระยะทางที่ 0 เมตร , ระยะทางที่ 4.1 เมตร , ระยะทางที่ 8.2 เมตร , ระยะทางที่ 15.7 เมตร , ระยะทางที่ 21.3 เมตร , ระยะทางที่ 25.4 เมตร , ระยะทางที่ 29.5 เมตร , ระยะทางที่ 37 เมตร , ระยะทางที่ 43.18 เมตร , ระยะทางที่ 47.28 เมตร และระยะทางที่ 57.38 เมตร จากนั้นเมื่อทำการทดสอบแล้วจะได้ค่าระยะทางที่ได้จากการทดสอบมาเปรียบเทียบกับค่าระยะทางจริง เพื่อหาค่าความคลื่อน (% Error)

4.1 การทดสอบความเป็นเชิงเส้นของตัวแปลงกระแสความถี่สูง

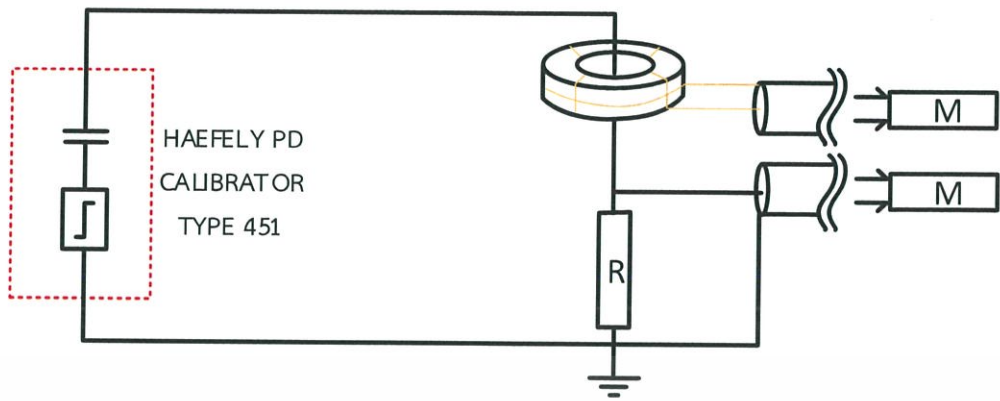
ความเป็นเชิงเส้นของสัญญาณที่วัดได้แสดงถึงควมมีเสถียรภาพของเครื่องมือวัด กล่าวคือ เครื่องมือวัดที่มีดีต้องมีความแม่นยำในการวัดและต้องมีความเสถียรภาพหรือมีความเป็นเชิงเส้นนั่นเอง ถึงจะถือได้ว่าเครื่องมือวัดนั้นมีความน่าเชื่อถือ

4.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของตัวแปลงกระแสความถี่สูง

1.เครื่องจำลองพัลส์การดิสชาร์จบางส่วน (Haefely PD Calibrator Type451)	1 เครื่อง
2.ตัวต้านทานไร้ความเหนี่ยวนำขนาด 50 Ω	1 ตัว
3.ตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนอากาศ	1 ตัว
4.ตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนอากาศเป็นแกนเฟอร์ไรท์	1 ตัว
5.ดิจิตอลออสซิลโลสโคป (Picoscop)	1 เครื่อง
6.สายโคแอกเชียล (Coaxial cable RG-8)	2 เส้น

4.1.2 การติดตั้งวงจรการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของตัวแปลงกระแสความถี่สูง

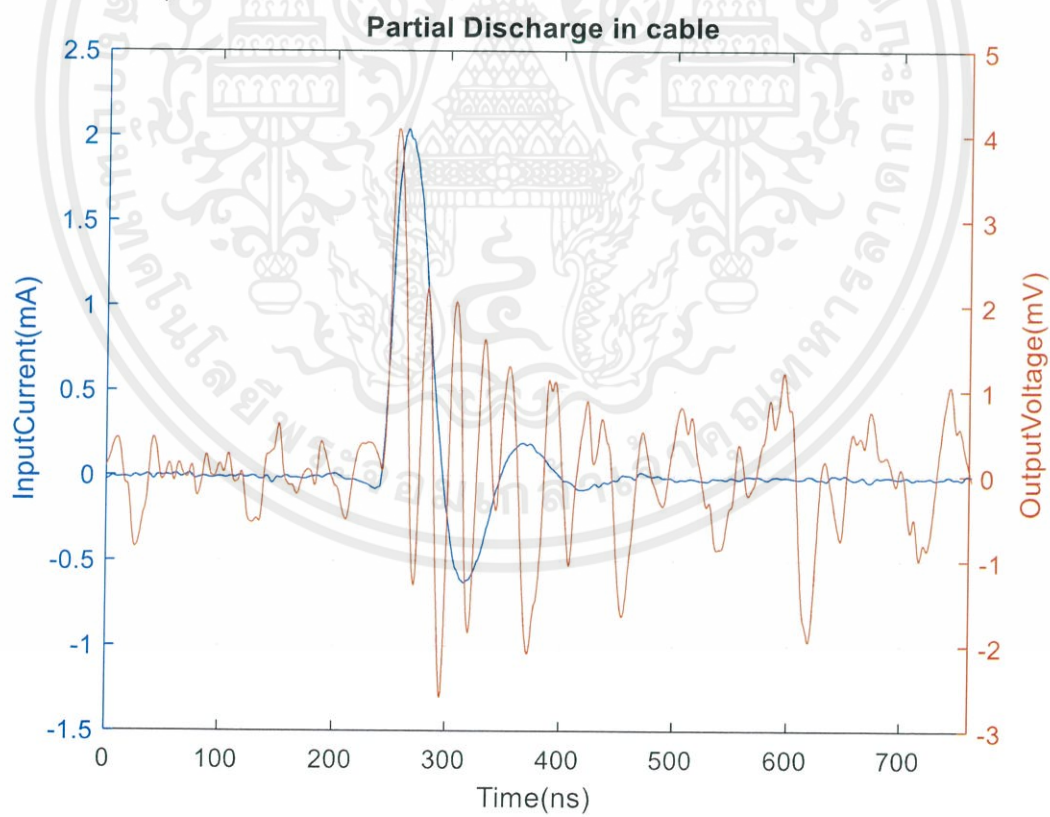
ในวงจรการทดสอบ เครื่องจำลองการดิสชาร์จบางส่วนถูกนำมาเป็นแหล่งจ่ายพัลส์การดิสชาร์จบางส่วน ซึ่งจะปรับระดับประจุตั้งแต่ 10 pC 20 pC 50 pC 100 pC และ 200 pC ตามลำดับ โดยที่แหล่งจ่ายพัลส์จะถูกนำมาต่อขนานกับตัวต้านทานไร้ความเหนี่ยวนำขนาด 50 Ω และจากนั้นนำตัวแปลงกระแสความถี่สูงมาคล้องเพื่อวัดกระแสพัลส์ที่ไหลผ่านตัวต้านทานดังกล่าว ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.1



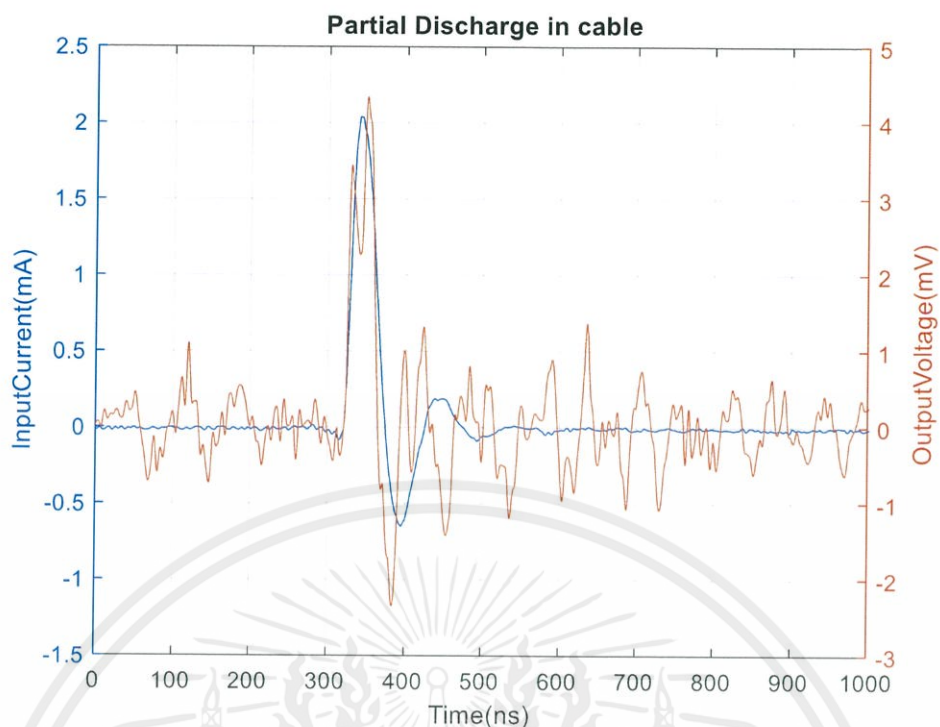
รูปที่ 4.1 วงจรการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของตัวแปลงกระแสความถี่สูง

4.1.3 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนอากาศ

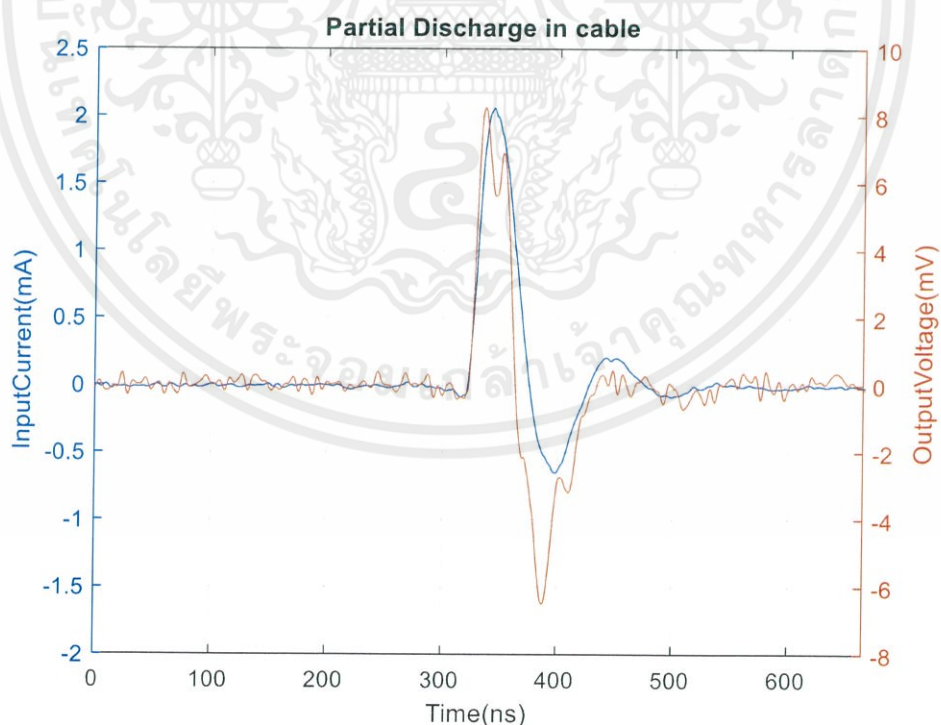
จากการทดสอบจะทำการเปรียบเทียบระหว่างรูปคลื่นกระแสอินพุตที่ตรวจวัดได้จากตัวต้านทานรั่วความเหนี่ยวนำ (กราฟสีน้ำเงิน) และรูปคลื่นแรงดันเอาต์พุตที่ตรวจวัดจากขดลวดเหนี่ยวนำแบบแกนอากาศ (กราฟสีแดง) ที่ระดับประจุต่าง ๆ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.2 – 4.4



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างกระแสอินพุต (สีน้ำเงิน) และแรงดันเอาต์พุต (สีแดง) ของขดลวดเหนี่ยวนำแบบแกนอากาศจำนวนรอบในการพันทั้งหมด 60 รอบ ที่ระดับประจุ 50 pC



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างกระแสอินพุต (สีน้ำเงิน) และแรงดันเอาต์พุต (สีแดง) ของขดลวดเหนี่ยวนำแบบแกนอากาศจำนวนรอบในการพันทั้งหมด 40 รอบ ที่ระดับประจุ 50 pC



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างกระแสอินพุต (สีน้ำเงิน) และแรงดันเอาต์พุต (สีแดง) ของขดลวดเหนี่ยวนำแบบแกนอากาศจำนวนรอบในการพันทั้งหมด 8 รอบ ที่ระดับประจุ 50 pC

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของตัวแปลงกระแสความถี่สูงที่ใช้แกนอากาศ

จำนวนรอบในการพัน(Turns)	ค่าสูงสุดของกระแสอินพุต (mA)	ค่าสูงสุดของแรงดันเอาต์พุต (mV)
60 รอบ	2.06	4
40 รอบ	2.06	4.33
8 รอบ	2.06	8

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าสูงสุดของกระแสอินพุตที่ตรวจวัดได้จากตัวต้านทานไร้ความเหนี่ยวนำ และ ค่าสูงสุดของแรงดันเอาต์พุตที่ตรวจวัดได้จากขดลวดเหนี่ยวนำแบบแกนอากาศ ที่ระดับประจุ 50 pC จะเห็นว่าจำนวนขดลวดมีผลต่อแรงดันเอาต์พุตทำให้ต้องพิจารณาถึงสัญญาณที่วัดได้ของเครื่องมือวัดด้วย เมื่อสัญญาณวิ่งในสายเคเบิลในระยะไกลๆ ลูกคลื่นจะถูกลดทอนทำให้การพิจารณาของรูปกราฟพิจารณาได้ยาก ทางผู้จัดทำจึงเลือกใช้จำนวนรอบที่ 8 รอบ เพราะเหมาะสมต่อการใช้เทคนิคทามโดเมนรีเฟล็คโตเมทรีอีกทั้งยังสามารถวัดในสายที่ยาวได้

4.2 การทดสอบหาตำแหน่งการดิสชาร์จบางส่วนของขดลวดเหนี่ยวนำแบบแกนอากาศ

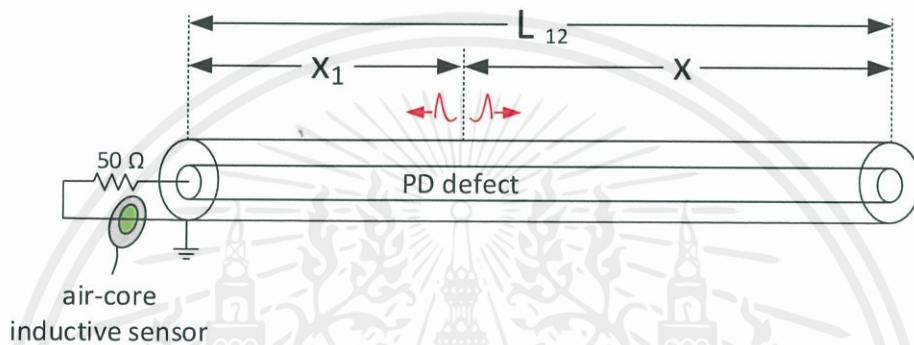
การทดสอบหาตำแหน่งของการดิสชาร์จบางส่วน (Partial Discharges) ของขดลวดเหนี่ยวนำแบบแกนอากาศ คือการหาระยะตำแหน่งของการเกิดดิสชาร์จบางส่วนโดยใช้หลักวัดการสะท้อนของสัญญาณในโดเมนเวลา (TDR) ซึ่งทำได้โดยการส่งพัลส์เข้าไปในสายเคเบิล จะเกิดพัลส์ขึ้นสองพัลส์ โดยพัลส์แรกจะเคลื่อนมาโดยตรงและอีกพัลส์หนึ่งจะสะท้อนกับปลายสายอีกด้านหนึ่ง จากนั้นทำการวัดความแตกต่างของเวลาระหว่าง PD ทั้งสองสัญญาณแล้วนำไปคำนวณหาระยะตำแหน่งของการดิสชาร์จบางส่วน

4.2.1. อุปกรณ์การทดสอบหาตำแหน่งการดิสชาร์จบางส่วนของขดลวดเหนี่ยวนำแบบแกนอากาศ

- | | |
|---|-----------|
| 1. ขดลวดเหนี่ยวนำแบบแกนอากาศ (Air-core inductive sensor) | 1 ตัว |
| 2. เครื่องจำลองพัลส์การดิสชาร์จบางส่วน (Haefely PD Calibrator Type451) | 1 เครื่อง |
| 3. ดิจิตอลออสซิลโลสโคป (Model PICOscope 5443A) | 1 เครื่อง |
| 4. ตัวสิ้นสุดสัญญาณ 50 โอห์ม (BNC Terminator) | 1 ตัว |
| 5. สายโคแอกเซียล (Coaxial cable RG-58) ความยาว 4.1 เมตร | 2 เส้น |
| 6. สายโคแอกเซียล (Coaxial cable RG-58) ความยาว 7.5 เมตร | 1 เส้น |
| 7. สายโคแอกเซียล (Coaxial cable RG-58) ความยาว 21.3 เมตร | 1 เส้น |
| 8. สายโคแอกเซียล (Coaxial cable RG-58) ความยาว 21.8 เมตร | 1 เส้น |

4.2.2. การติดตั้งวงจรการทดสอบหาตำแหน่งการดิสชาร์จบางส่วนของขดลวดเหนี่ยวนำแบบแกนอากาศ

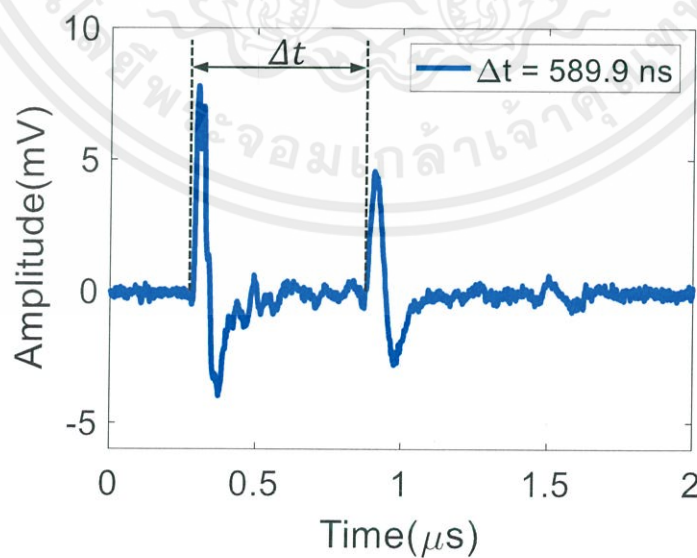
เพื่อยืนยันในวิธีที่ได้นำเสนอไป ได้ติดตั้งการทดลองดังรูป 4.5 ตัวต้านทานเชิงซ้อนสำหรับการวัด PD ของวงจรทดสอบเลือกใช้ 50 โอห์ม เพราะเวลาที่สายเคเบิลทดสอบมีขนาดเท่ากับ 50 โอห์ม เครื่องยังทดสอบพัลส์ตามมาตรฐาน ซึ่งเป็นแหล่งจ่ายประจุขนาด 200 pC ขดลวดเหนี่ยวนำแบบแกนอากาศถูกติดตั้งที่บริเวณปลายสายเคเบิลทดสอบ ดิจิตอลออสซิลโลสโคป(Model PICOscope 5443A) ถูกใช้เพื่อจับรูปคลื่นของขดลวดเหนี่ยวนำแบบแกนอากาศ



รูปที่ 4.5 วงจรการทดสอบหาตำแหน่งการดิสชาร์จบางส่วนของขดลวดเหนี่ยวนำแบบแกนอากาศ

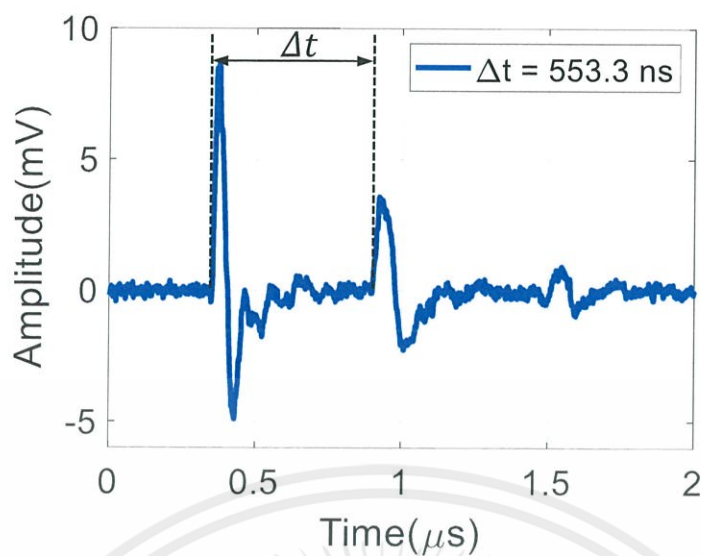
4.2.3. ผลการทดสอบหาตำแหน่งการดิสชาร์จบางส่วนของขดลวดเหนี่ยวนำแบบแกนอากาศ

จากการทดสอบจะทำการวัดระหว่างเวลาของสองรูปคลื่นและจะได้อัตราต่างเวลาของทั้งสองสัญญาณ (Δt) ที่ระยะทางต่างๆ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.2 – 4.12

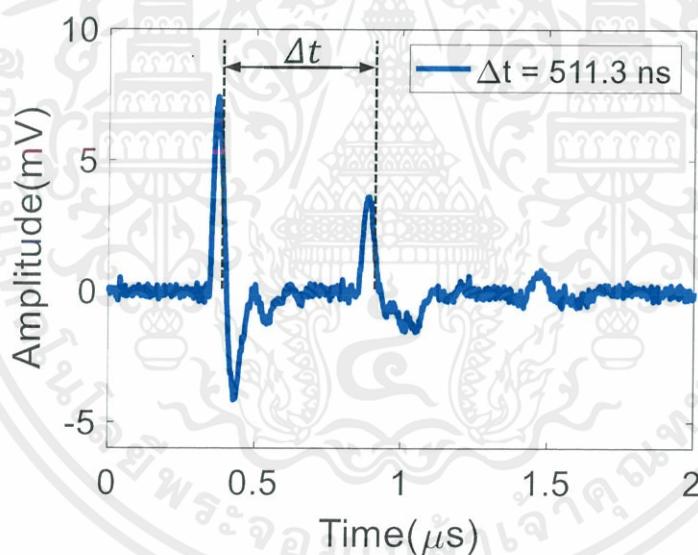


รูปที่ 4.6 กราฟวงจรทดสอบ ระยะที่ 0 เมตร

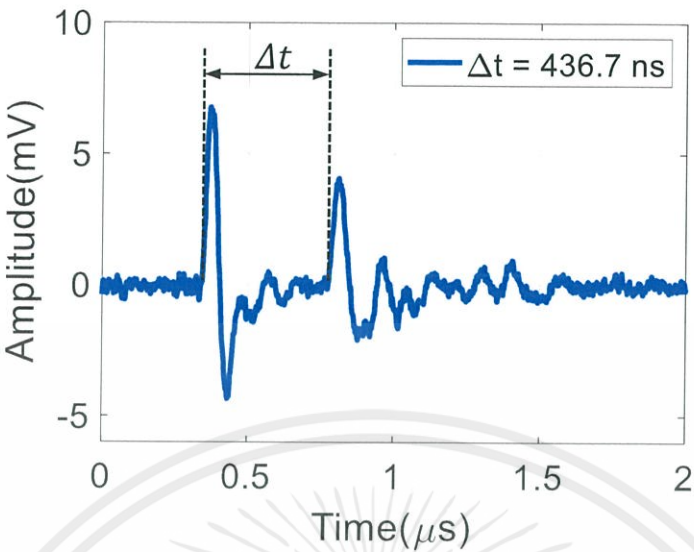
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



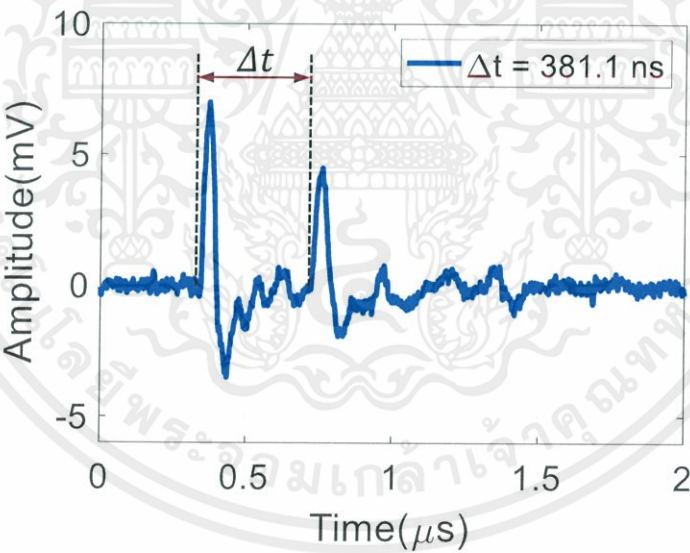
รูปที่ 4.7 กราฟวงจรทดสอบ ระยะทางที่ 4.1 เมตร



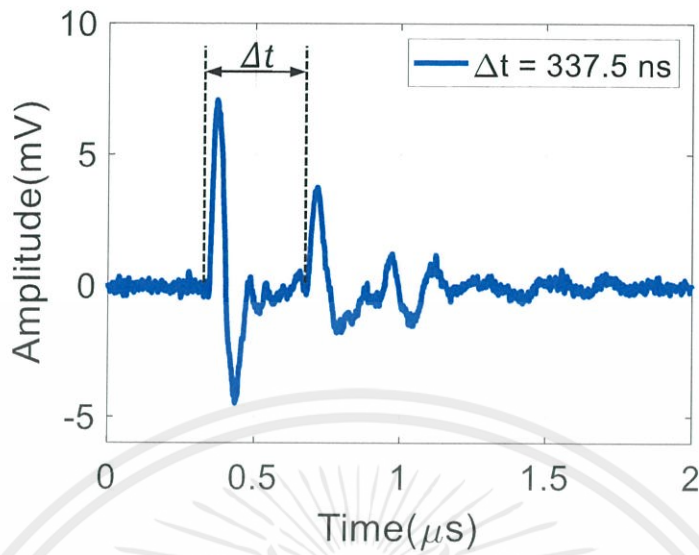
รูปที่ 4.8 กราฟวงจรทดสอบ ระยะทางที่ 8.2 เมตร



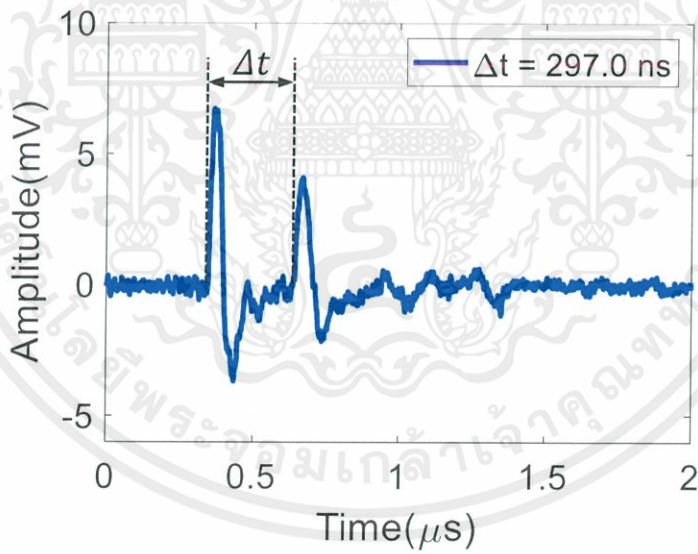
รูปที่ 4.9 กราฟวงจรทดสอบ ระยะทางที่ 15.7 เมตร



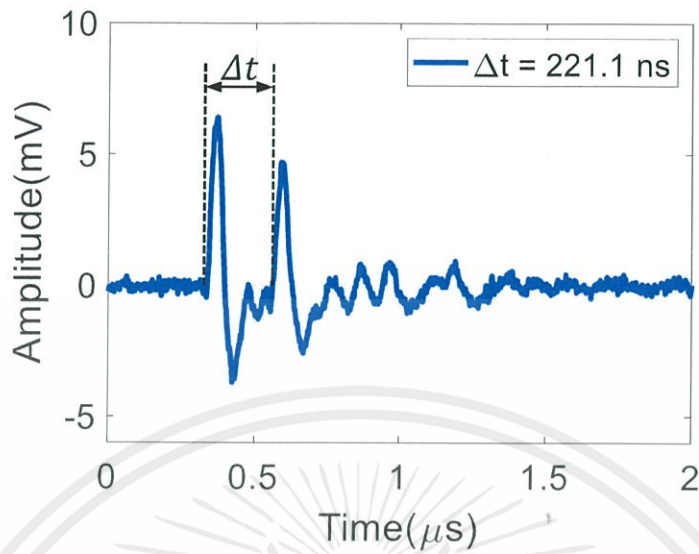
รูปที่ 4.10 กราฟวงจรทดสอบ ระยะทางที่ 21.3 เมตร



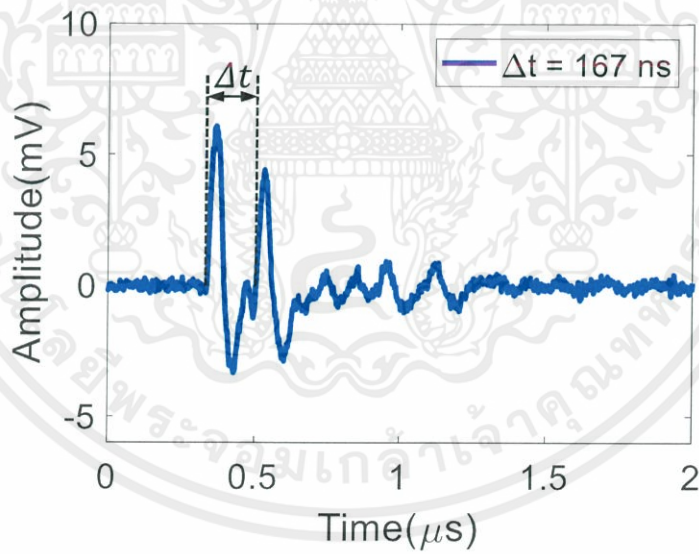
รูปที่ 4.11 กราฟวงจรทดสอบ ระยะทางที่ 25.4 เมตร



รูปที่ 4.12 กราฟวงจรทดสอบ ระยะทางที่ 29.5 เมตร

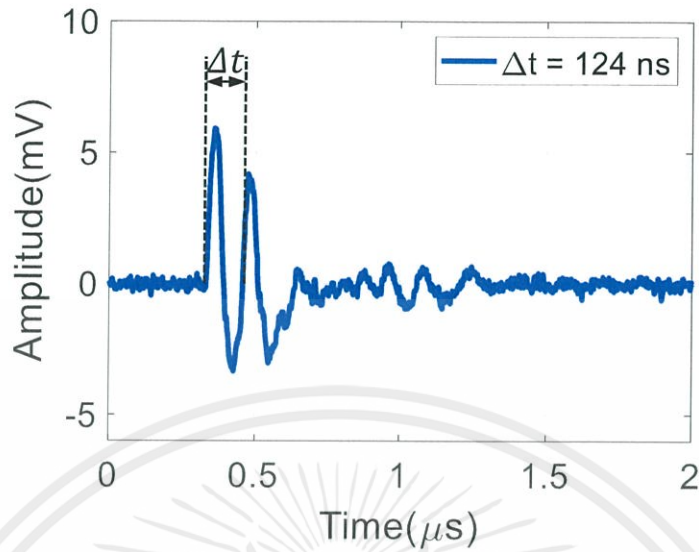


รูปที่ 4.13 กราฟวงจรทดสอบ ระยะทางที่ 37 เมตร

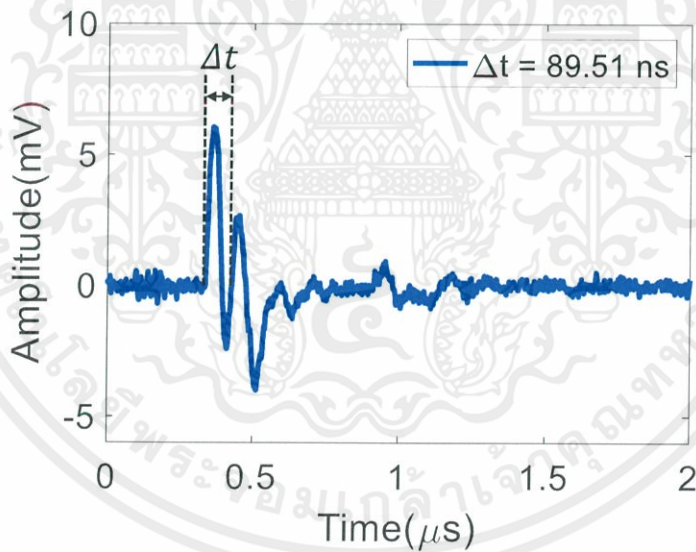


รูปที่ 4.14 กราฟวงจรทดสอบ ระยะทางที่ 43.18 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 กราฟวงจรทดสอบ ระยะทางที่ 47.28 เมตร



รูปที่ 4.16 กราฟวงจรทดสอบ ระยะทางที่ 51.28 เมตร

จากการทดสอบการหาตำแหน่งดิสชาร์จบางส่วนจะทราบ Δt จากกราฟที่ทำกรวัด และสามารถนำมาคำนวณหาตำแหน่งดิสชาร์จบางส่วนได้จากสมการ $x_1 = L_{12} - \frac{v \times \Delta t}{2}$ เมื่อ x_1 คือ ระยะจากปลายสายด้านที่วัดถึงตำแหน่งที่เกิดดิสชาร์จบางส่วน v คือ ความเร็วในการเคลื่อนที่ของสัญญาณ ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดและขนาดของสายส่งสัญญาณ L_{12} คือ ระยะสายเคเบิลทั้งหมด โดยที่ค่า v สามารถหาได้จากค่าดัชนีหักเหหรือจากการคำนวณ ตามตารางที่ 4.2 การพิจารณาดีสชาร์จบางส่วนใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บริเวณที่ห่างจากตำแหน่งเครื่องมือวัดมากๆ จะมีความคลาดเคลื่อนของ Δt อันเนื่องมาจากรูปกราฟของพัลส์ที่ 1 กับพัลส์ที่ 2 จะซ้อนทับกันทำให้เกิดความผิดพลาดจากการวัดได้ที่บริเวณปลายสายเคเบิล(ด้านตรงข้ามกับเครื่องมือวัดที่ติดตั้ง)

ตารางที่ 4.2 ความเร็วในการเคลื่อนที่ของสัญญาณ ในตัวกลางที่ต่างกัน

Conduction	Propagation Velocity (m/us)
RG-58 coaxial cable	198
PE	198
Vacuum	299
Water	34
Paper	237
PVC	134
XLPE	198

การคำนวณหา v จากเครื่องมือวัดทำได้โดยการจำลองดิซชาร์จบางส่วนที่ตำแหน่งใกล้เครื่องมือวัดแล้วพิจารณา Δt จากกราฟเพื่อหาความเร็วจากสูตร $v = \frac{\Delta t \times s}{2}$ เมื่อ s คือ ระยะสายเคเบิลทั้งหมด

บทที่ 5

สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดสอบ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ นำเสนอขดลวดเหนี่ยวนำแบบแกนอากาศสำหรับการตรวจจับการเกิดดิซาร์จบางส่วน และหาตำแหน่งที่เกิดขึ้น โดยใช้เครื่องจำลองพัลส์การดิซาร์จบางส่วน โดยใช้ประจุทดสอบ 200 pC ได้ทำการศึกษาเทคนิคการตรวจจับและหาตำแหน่ง PD ในสายเคเบิล จากผลการทดลอง เพื่อยืนยันความถูกต้องของวิธีการนี้ PD โดยวิธีทามโดเมนรีเฟล็คโตเมตรี ผลที่ได้เกิดคลาดเคลื่อนสูงสุดของตำแหน่ง ด้วยค่า 2.649% จุดเกิด PD (x) ที่ระยะ 51.38 เมตร ,เกิดความคลาดเคลื่อนสูงขึ้นมาของตำแหน่ง ด้วยค่า 1.929% จุดเกิด PD ที่ระยะ (x) 43.18 เมตร และเกิดความคลาดเคลื่อนต่ำสุดของตำแหน่ง ด้วยค่า 0.080% จุดเกิด PD ที่ระยะ (x) 4.1 เมตรดังตารางที่ 5.1 เทคนิคขดลวดเหนี่ยวนำแบบแกนอากาศที่นำเสนอ ปัจจุบันให้ประสิทธิภาพการทำงานที่แม่นยำพอสมควรสำหรับการหาตำแหน่ง PD สามารถนำไปใช้กับการใช้งานจริงและทำการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับตำแหน่ง PD

ตารางที่ 5.1 ผลการทดสอบผลตอบสนองต่อความถี่ของขดลวดเหนี่ยวนำแบบแกนอากาศ

case	Real PD detect position X1(m)	Time difference $\Delta t(s)$	PD defect location by TDR x(m)	Error(%)
1	0.000	589.9n	0.480	-
2	4.100	553.3n	4.103	0.080
3	8.200	511.3n	8.261	0.748
4	15.700	436.7n	15.647	0.338
5	21.300	381.1n	21.151	0.700
6	25.400	337.5n	25.468	0.268
7	29.500	297.0n	29.477	0.078
8	37.000	221.1n	36.991	0.024
9	43.180	167.0n	42.347	1.929
10	47.280	124.0n	46.604	1.430
11	51.380	89.51n	50.019	2.649

5.2 ข้อเสนอแนะและปัญหาที่พบ

ขดลวดเหนี่ยวนำแบบแกนอากาศ เป็นอุปกรณ์เหมาะสำหรับการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนที่ต้องการไม่ให้เกิดการอ้อมตัว อีกทั้งในการติดตั้งวงจรทดสอบทำได้ง่ายเมื่อเปรียบเทียบกับ การตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนตามมาตรฐานสากล อาทิเช่น การตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนของหม้อแปลงไฟฟ้า ณ สถานที่ติดตั้งจริง ยากในการติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบไฟฟ้าแรงสูง และมีพื้นที่ในการทดสอบน้อย

ปัญหาและอุปสรรคที่พบในโครงการขดลวดเหนี่ยวนำแบบแกนอากาศ สำหรับตรวจจับดิสชาร์จบางส่วนมีข้อเสนอแนะและข้อควรระวังดังดังนี้

1. ควรระมัดระวังในขณะทำการทดสอบไม่ให้สายไฟ หรืออุปกรณ์ชำรุด เช่นการเดินเหยียบสายไฟ



เอกสารอ้างอิง

- [1] ผศ.ดร. พีรวุฒิ ยุทธโกวิท, เอกสารประกอบการสอนวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง, 2559
- [2] ดร.สำรวย สังข์สะอาด, วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, พิมพ์ครั้งที่ 3, กรุงเทพฯ, 2547.
- [3] IEC 60270, High - voltage test techniques – Partial discharge measurements, 2000-12.
- [4] N. H. Ahmed และ N. N. Srinivas, “On-line partial discharge detection in cables”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 5, No. 2, pp. 181-188, 1998.
- [5] บุญยพล เพาพาน, “Study of A Partial Discharge Location Technique for Power Cables Using High Frequency Current Transducer”, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [6] วรากร ชลปฐมพิกุลเลิศ, “การออกแบบและประกอบสร้างตัวแปลงกระแสความถี่สูง สำหรับการตรวจจับการเกิดดิซชาร์จบางส่วน”, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2561
- [7] พรชัย สอนสังข์ และ พิสุทธิ รัชศักดิ์, การวิเคราะห์สัญญาณแรงดันฟอลต์ในระบบจำหน่ายเพื่อจำแนกชนิดของฟอลต์ (ม.ป.ป.), สืบค้นเมื่อ 11 พฤศจิกายน 2561. เข้าถึงได้จาก :
http://www.research.eng.ku.ac.th/index.php?option=com_phocadownload&view=category&download=38:analysis-of-fault-voltage-in-the-electrical-power-distribution-system-for-fault-classification&id=17:2553elec&Itemid=55&start=20
- [8] Detlev W. Gross, Partial discharge fault location and diagnosis on HV power cables, สืบค้นเมื่อ 25 พฤศจิกายน 2561. เข้าถึงได้จาก :
<https://ieeexplore.ieee.org/document/884038/citations#citations>



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทคนิคการระบุตำแหน่งการเกิดดิซาร์จบางส่วนในสายเคเบิล PARTIAL DISCHARGE LOCATION TECHNIQUE IN CABLES

กฤษณพล ไชยจันทร์¹ จารุกิต์ บุรณประพุกย์² ชลบุรี พากเพียร³ และ ณัฐชนน ฤกษ์สงขลา⁴

¹ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1 ซอย ฉลองกรุง 1 ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์ 02-329-8000 E-mail: emonname@hotmail.com

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการออกแบบและประกอบสร้างชุดตรวจเหนี่ยวนำแบบแกนอากาศ ในขั้นตอนของการออกแบบชุดตรวจวัดเพื่อที่จะเริ่มจากการเลือกขนาดของแกนอากาศให้มีขนาดเหมาะสมต่อสายไฟที่ต้องการนำไปติดตั้งในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง หลังจากได้ทำการศึกษาเทคนิคการระบุตำแหน่งการเกิดดิซาร์จบางส่วนในสายเคเบิล สัญญาณการเกิดดิซาร์จบางส่วนถูกวัดโดยชุดตรวจเหนี่ยวนำแบบแกนอากาศ ซึ่งได้รับการตรวจสอบและทดลองติดตั้งที่ปลายสายเส้นหนึ่ง (บริเวณปลายสาย) ของสายเคเบิล โดยใช้เครื่องจำลองพัลส์การดิซาร์จบางส่วน โดยใช้ประจุทดสอบ 200 pC สำหรับการตรวจสอบตำแหน่งของการเกิดดิซาร์จที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของสายเคเบิลที่มีความยาวรวม 58.88 เมตร ตามโดเมนรีเฟล็กโทเมทรี (TDR) คือ วิธีการระบุตำแหน่งการเกิดดิซาร์จบางส่วน ใช้เพื่อค้นหาความผิดปกติของการดิซาร์จบางส่วนตามสายเคเบิล ซึ่งยึดตามทฤษฎีการเดินทางของคลื่นเป็นหลัก จากผลการทดลองของการระบุตำแหน่งการเกิดดิซาร์จบางส่วน ข้อผิดพลาดสูงสุดของตำแหน่งการเกิดดิซาร์จบางส่วน ตามวิธีการ TDR คือ 2.649% ที่จุดผิดปกติของการเกิดดิซาร์จบางส่วนระยะ (x) 51.38 ม. จากการทดลองนี้ เทคนิคที่นำเสนอสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้จริงและสามารถใช้สำหรับการทำวิจัยที่เกี่ยวข้องกับตำแหน่งการเกิดดิซาร์จบางส่วนได้

คำสำคัญ: ชุดตรวจเหนี่ยวนำแบบแกนอากาศ, ตามโดเมนรีเฟล็กโทเมทรี

Abstract

A partial discharge location technique for power cables was studied. PD signals are measured by air-core inductive sensor which has been experimentally verified and installed at the end one (near end) of cable. The standard PD pulse calibrator with the charge of 200 pC was used to investigate the PD location at various position along the cable with total length is 58.88 m. The PD location method, time domain reflectometry (TDR) is used to locate the PD defect along the cable, which essentially based on the travelling wave theory. From the experimental results of PD location, the highest error of PD location by time domain reflectometry method is 2.649 % at PD defect point (x) of

51.38 m. From this experiment, the proposed technique can be applied to further practical application and research related to PD location.

Keywords: Air-core inductive sensor, Time domain reflectometry

1. บทนำ

ในปัจจุบันการบำรุงรักษาระบบไฟฟ้าแรงสูงนั้นมีมากมายหลายประการ ในที่นี้การตรวจสอบและวินิจฉัยคุณภาพของฉนวนไฟฟ้าก็เป็นการบำรุงรักษาระบบไฟฟ้าแรงสูงที่สำคัญประการหนึ่ง เพื่อให้การทำงานของระบบไฟฟ้าแรงสูงมีประสิทธิภาพและความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น การตรวจสอบติดตามอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงนั้นจะช่วยให้พบความบกพร่องในอุปกรณ์ก่อนที่อุปกรณ์จะได้รับความเสียหาย โดยการตรวจสอบของฉนวนนั้นจะใช้วิธีการตรวจวัดตำแหน่งการเกิดดิซาร์จบางส่วนในสายเคเบิลในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งเป็นวิธีการที่มีศักยภาพสูงวิธีหนึ่งในการตรวจสอบสภาพของฉนวน สำหรับปรากฏการณ์ที่พลังงานต่าง ๆ ถูกปลดปล่อยออกมาให้อยู่ในรูปแบบต่าง ๆ เช่น พลังงานไฟฟ้า พลังงานแสง และพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้า ส่วนเกิดจากการเกิดดิซาร์จบางส่วนทั้งสิ้น

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 เทคนิคการหาตำแหน่งดิซาร์จบางส่วน

เวลาระหว่างพัลส์ที่เกิดจาก PD สองพัลส์ (พัลส์แรกมาโดยตรงพัลส์สองเกิดจากการสะท้อนที่ปลายสาย) โดยแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$t_2 = t_1 + \Delta t \quad (1)$$

เมื่อ t_1 และ t_2 เป็นเวลาที่มาถึงของสัญญาณที่มาโดยตรงและจากการสะท้อน Δt คือความแตกต่างของเวลาระหว่างสัญญาณ PD ทั้งสองความยาว L_{12} คือความยาวทั้งหมดของสาย

$$x_{12} = L_{12} - x_1 \quad (2)$$

ความเร็วในการเดินทางของพัลส์ PD ในสายเคเบิล (v) สามารถคำนวณได้ดังนี้

- พัลส์ PD แรกเคลื่อนที่ตรงไปยังปลายสายเคเบิล

$$v = \frac{x_1}{t_1} \quad (3)$$

- พัลส์ PD สองเคลื่อนที่ไปบริเวณปลายสายเคเบิลอีกด้านและสะท้อนกลับมา

$$v = \frac{(L_{12} - x_1) + L_{12}}{t_2} \quad (4)$$

ดังนั้นเมื่อพิจารณาสมการ (3) และ (4) ระยะทางของจุดเกิด PD สามารถคำนวณได้เป็น ดังสมการ (5)

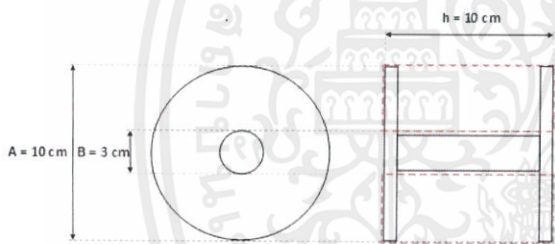
$$x_1 = L_{12} - \frac{v\Delta t}{2} \quad (5)$$

จากสมการที่ (5) หากทราบความแตกต่างของเวลา (Δt) จากผลการทดลองสามารถคำนวณระยะทาง x_1

3. การออกแบบและประกอบสร้างแกนขดลวด

3.1 ขดลวดเหนี่ยวนำแบบแกนอากาศ

3.1.1 แกนของขดลวด ออกแบบโดยใช้แกนอากาศเป็นแกนของขดลวด เนื่องจากแกนอากาศนั้นมีค่าความอิ่มตัวสูงจึงสามารถนำไปใช้ในการวัดความถี่สูงแต่ค่าอัตราส่วนระหว่างความเหนี่ยวนำกับขนาดของขดลวดเหนี่ยวนำแบบแกนอากาศ (L/V) มีค่าต่ำ กล่าวคือ ถ้าต้องการความเหนี่ยวนำที่สูงขนาดของขดลวดเหนี่ยวนำแบบแกนอากาศต้องมีขนาดใหญ่ทางผู้จัดทำทำการออกแบบไว้ ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ขนาดของแกนขดลวด

ความสูงของแกนอากาศ (h)	=	10	cm
ความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของแกน (B)	=	3	cm
ความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของแกน (A)	=	10	cm
จำนวนรอบของขดลวด (N)	=	8	รอบ
ตัวต้านทานเมทซิง (R_T)	=	50	Ω

การคำนวณหาความยาวโดยประมาณของขดลวดที่ใช้พันได้จากความยาวของเส้นรอบวงครบรอบและพันวนกลับมาอีกรอบรวมกับความยาวของการพันแกนอากาศ 8 รอบ

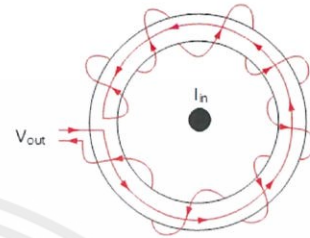
$$\begin{aligned} L &= (((A-B) \times 2) + 4h) \times 4 + 2\pi \frac{5}{2} + 10 + 20 \\ &= (((7) \times 2) + 40) \times 4 + 5\pi + 30 \\ &= (216) + 5\pi + 30 \\ &= 261.708 \text{ cm} \end{aligned}$$

เมื่อ h คือ ความสูงของแกนอากาศ

A คือ ความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของแกนอากาศ

B คือ ความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของแกนอากาศ

ในการพันขดลวดโรกอฟสกีนั้นมีการพันที่แตกต่างจากการพันแบบปกติ คือ นอกจากการพันอย่างสม่ำเสมอตลอดความยาวแกนแล้วจะต้องพันย้อนกลับเข้าไปในแกนขดลวดตามแนวแกนของขดลวดโรกอฟสกีเพื่อหักล้างผลจากสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำจากขดลวดทำให้แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจากขดลวดเกิดจากฟลักซ์แม่เหล็กของกระแสไฟฟ้าที่ลัดวงจรเท่านั้น ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 การพันขดลวดโรกอฟสกี

ความเหนี่ยวนำของขดลวดโรกอฟสกี ในการออกแบบสามารถคำนวณค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดโรกอฟสกีได้จาก

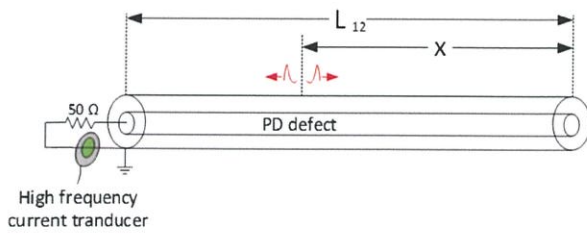
$$L = \frac{\mu_0 N^2 h}{2\pi} \times \ln\left(\frac{a}{b}\right) \quad (6)$$

จำนวนขดลวดที่ต้องการพัน 8 รอบ ค่าความซึมซาบแม่เหล็กของอากาศ (μ_0) มีค่าเท่ากับ $4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ ความสูงของแกนอากาศมีค่าเท่ากับ 10 cm ความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของแกนอากาศมีค่าเท่ากับ 10 cm ความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของแกนขดลวดเหนี่ยวนำแบบแกนอากาศมีค่าเท่ากับ 3 cm ดังนั้นค่า L ที่เหมาะสมคือ

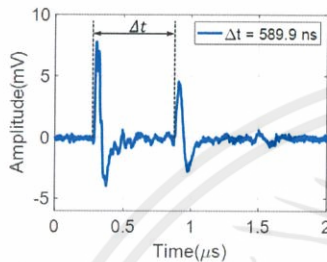
$$\begin{aligned} L &= \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 8^2 \times 10 \times 10^{-2}}{2\pi} \times \ln\left(\frac{10 \times 10^{-2}}{3 \times 10^{-2}}\right) \\ &= 2.158 \mu\text{H} \end{aligned}$$

4. การทดสอบและผลการทดสอบ

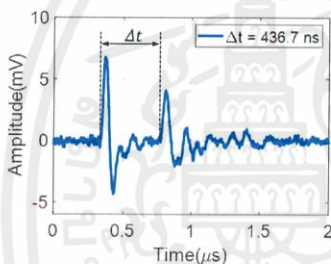
วงจรการทดสอบหาตำแหน่งการดิซซาร์จบางส่วนของขดลวดเหนี่ยวนำแบบแกนอากาศ ประกอบด้วยเครื่องอิงทดสอบพัลส์ตามมาตรฐาน ซึ่งเป็นแหล่งจ่ายประจุขนาด 200 pC ทดสอบ 11 กรณี โดยทดสอบที่ระยะ 0.4, 1, 8.2, 15.7, 21.3, 25.4, 29.5, 37, 43.18, 47.28, 51.28 เมตร ดิจิตอลออสซิลโลสโคป(model PICOscope 5443A) ถูกใช้เพื่อจับรูปคลื่นของขดลวดเหนี่ยวนำแบบแกนอากาศ และในการต่อวงจรทดสอบหาตำแหน่งการดิซซาร์จบางส่วน จะทำได้ดังรูปที่ 3



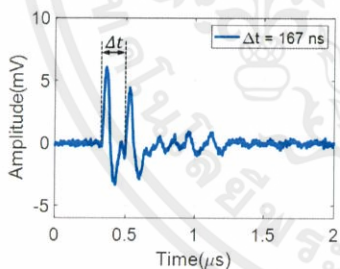
รูปที่ 3 วงจรการทดสอบหาตำแหน่งการคิซาร์บางส่วนของขดลวด
เหนี่ยวนำแบบแกนอากาศ



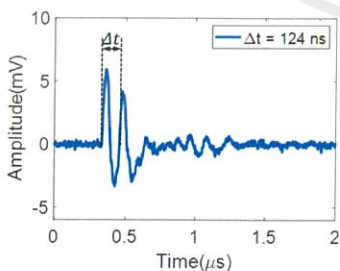
รูปที่ 4 กราฟวงจรทดสอบ ระยะทางที่ 0 เมตร



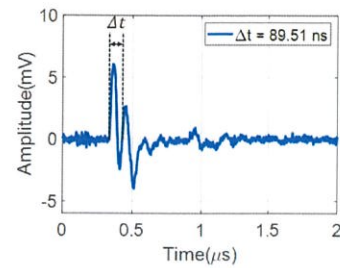
รูปที่ 5 กราฟวงจรทดสอบ ระยะทางที่ 15.7 เมตร



รูปที่ 6 กราฟวงจรทดสอบ ระยะทางที่ 43.18 เมตร



รูปที่ 7 กราฟวงจรทดสอบ ระยะทางที่ 47.28 เมตร



รูปที่ 8 กราฟวงจรทดสอบ ระยะทางที่ 51.28 เมตร

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบผลตอบสนองต่อความถี่ของขดลวดเหนี่ยวนำ
แบบแกนอากาศ

case	Real PD detect position X_1 (m)	Time difference Δt (s)	PD defect location by TDR x (m)	Error(%)
1	0.000	589.9n	0.480	-
2	4.100	553.3n	4.103	0.080
3	8.200	511.3n	8.261	0.748
4	15.700	436.7n	15.647	0.338
5	21.300	381.1n	21.151	0.700
6	25.400	337.5n	25.468	0.268
7	29.500	297.0n	29.477	0.078
8	37.000	221.1n	36.991	0.024
9	43.180	167.0n	42.347	1.929
10	47.280	124.0n	46.604	1.430
11	51.380	89.51n	50.019	2.649

5. สรุป

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ นำเสนอขดลวดเหนี่ยวนำแบบแกนอากาศสำหรับการตรวจจับการเกิดคิซาร์บางส่วน และหาตำแหน่งที่เกิดขึ้น โดยใช้เครื่องจำลองพัลส์การคิซาร์บางส่วน โดยใช้ประจุทดสอบ 200 pC ได้ทำการศึกษาเทคนิคการตรวจจับและหาตำแหน่ง PD ในสายเคเบิล จากผลการทดลอง เพื่อยืนยันความถูกต้องของวิธีการนี้ PD โดยวิธีทามโดเมนรีเฟล็กโตเมทรี ผลที่ได้เกิดความคลาดเคลื่อนสูงสุดของตำแหน่งด้วยค่า 2.649% จุดเกิด PD (x) ที่ระยะ 51.38 เมตร ,เกิดความคลาดเคลื่อนสูงขึ้นมาของตำแหน่ง ด้วยค่า 1.929% จุดเกิด PD ที่ระยะ (x) 43.18 เมตร และเกิดความคลาดเคลื่อนต่ำสุดของตำแหน่ง ด้วยค่า 0.080% จุดเกิด PD ที่ระยะ (x) 4.1 เมตรดังตารางที่ 5.1 เทคนิคขดลวดเหนี่ยวนำแบบแกนอากาศที่นำเสนอ ปัจจุบันให้ประสิทธิภาพการทำงานที่แม่นยำพอสมควร สำหรับการหาตำแหน่ง PD สามารถนำไปใช้กับการใช้งานจริงและทำการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับตำแหน่ง PD

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก ผศ.ดร.ทีรวิทย์ ยุทธโกวิท ที่คอยสนับสนุนด้านความรู้สำหรับการทำงาน คำปรึกษา การอธิบายทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง รวมถึงช่วยเหลือในอีกหลายๆ ด้านและได้กรุณาช่วยตรวจสอบแก้ไขปริญญานิพนธ์จนสำเร็จเรียบร้อยเป็นอย่างดี นอกจากนี้ยังสนับสนุนทางด้านค่าใช้จ่ายในการจัดซื้ออุปกรณ์ในการทำโครงการอีกด้วย ผู้จัดทำทุกคน ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] ผศ.ดร. วีรวุฒิ ขุทศโกวิท, เอกสารประกอบการสอนวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง, 2559
- [2] ดร. สำรวย สังข์สะอาด, วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, พิมพ์ครั้งที่ 3, กรุงเทพฯ, 2547.
- [3] IEC 60270, High - voltage test techniques – Partial discharge measurements, 2000-12.
- [4] N. H. Ahmed และ N. N. Srinivas, “On-line partial discharge detection in cables”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 5, No. 2, pp. 181-188, 1998.
- [5] บุญยพล เพาพาน, “Study of A Partial Discharge Location Technique for Power Cables Using High Frequency Current Transducer”, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [6] วรากร ชลปฐมพิบูลเลิศ, “การออกแบบและประกอบสร้างตัวแปลงกระแสความถี่สูง สำหรับการตรวจจับการเกิดคิซาร์บางส่วน”, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2561
- [7] พรชัย สอนสังข์ และ พิสุทธิ รพีศักดิ์, การวิเคราะห์สัญญาณแรงดันฟอลต์ในระบบจำหน่ายเพื่อจำแนกชนิดของฟอลต์ (ม.ป.ป.), สืบค้นเมื่อ 11 พฤศจิกายน 2561. เข้าถึงได้จาก : http://www.research.eng.ku.ac.th/index.php?option=com_phocadownload&view=category&download=38:analysis-of-fault-voltage-in-the-electrical-power-distribution-system-for-fault-classification&id=17:2553elec&Itemid=55&start=20
- [8] Detlev W. Gross, Partial discharge fault location and diagnosis on HV power cables, สืบค้นเมื่อ 25 พฤศจิกายน 2561. เข้าถึงได้จาก : <https://ieeexplore.ieee.org/document/884038/citations#citations>

ประวัติผู้เขียน



นาย ชลบุรี พากเพียร เกิดวันที่ 5 สิงหาคม พ.ศ.2539

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนชลราษฎรอำรุง จังหวัดชลบุรี

เข้าศึกษาที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังในปีการศึกษา 2558

ฝึกงานที่ : การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคบางแสน

Email : emonname@hotmail.com



นาย จารุกิตติ บูรณประพุกษ์ เกิดวันที่ 16 มิถุนายน พ.ศ.2539

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนนครสวรรค์ จังหวัดนครสวรรค์

เข้าศึกษาที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังในปีการศึกษา 2558

ฝึกงานที่ : บริษัท ผลิตไฟฟ้า จำกัด (มหาชน) หรือ เอ็กโก กรุ๊ป

Email : jarukit44@gmail.com



นาย ณัฐชนน ณ สงขลา เกิดวันที่ 12 สิงหาคม พ.ศ. 2539

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนสวนกุหลาบวิทยาลัย นนทบุรี

เข้าศึกษาที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังในปีการศึกษา 2558

ฝึกงานที่ : National Institute of Technology, Kitakyushu College

Email : zero_soloist@hotmail.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



นาย กฤษณพล ไชยจันทร์ เกิดวันที่ 18 พฤศจิกายน พ.ศ.2539

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนเทศบาล 6 จังหวัดเชียงราย

เข้าศึกษาที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2558

ฝึกงานที่ : การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

Email : Kidsanapon0047@gmail.com



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้