

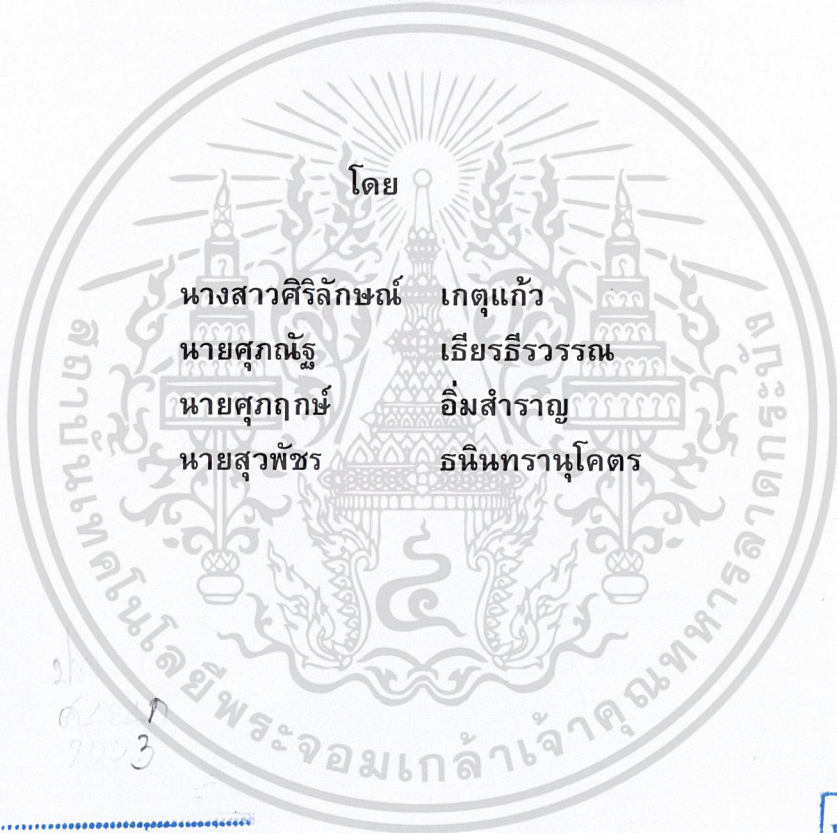
สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การวิเคราะห์และตรวจจับการเกิดดิซชาร์จบางส่วน
ด้วยวิธีการตรวจจับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าย่านความถี่สูง

Partial discharge Measurement using Ultra High Frequency method



T119552



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 119552
วัน,เดือน,ปี..... 8 ส.ค. 2554

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

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2553

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2553

การวิเคราะห์และตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วน
ด้วยวิธีการตรวจจับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าย่านความถี่สูง

Partial discharge Measurement using Ultra High Frequency method



โดย
นางสาวศิริลักษณ์ เกตุแก้ว
นายศุภณัฐ เขียวธีรวรรณ
นายศุภฤกษ์ อิมสำราญ
นายสุวิพัชร ธนินทรานุกุโตร

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร. เชาวน์ ชมภูอินไหว
อ. ดุสิต สุขสวัสดิ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

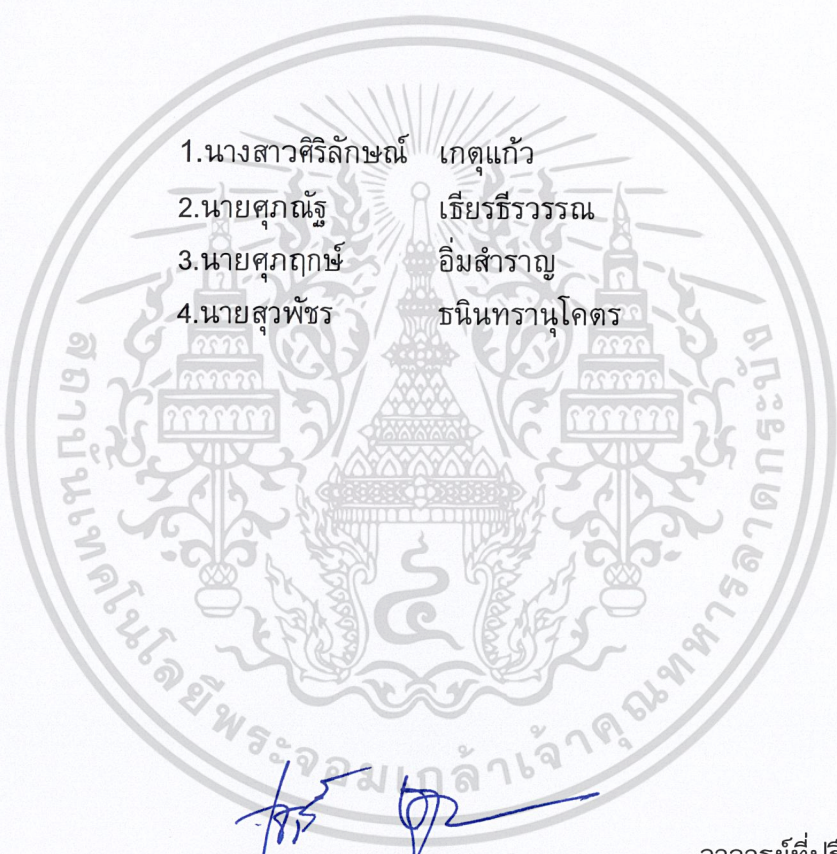
ปริญญาโทปีการศึกษา 2553

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การวิเคราะห์และตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนด้วยวิธีการตรวจจับ
คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าย่านความถี่สูง

ผู้จัดทำ

- 
- 1.นางสาวศิริลักษณ์ เกตุแก้ว
 - 2.นายศุภณัฐ เขียรธีรวรรณ
 - 3.นายศุภฤกษ์ อิมสำราญ
 - 4.นายสุวิพัชร ธนินทรานุกูล

.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เชาว์ ชมภูอินไหว)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ดุสิต สุขสวัสดิ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์และตรวจจับการเกิดดิซซาร์จบางส่วน
ด้วยวิธีการตรวจจับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าย่านความถี่สูง

นางสาวศิริลักษณ์ เกตุแก้ว

นายศุภณัฐ เขียรธีรวรรณ

นายศุภฤกษ์ อิ่มสำราญ

นายสุวิพัชร ธนินทรานุกุศล

ผศ.ดร. เซาว์ ชมพูอินไหว อาจารย์ที่ปรึกษา

อ. ดุสิต สุขสวัสดิ์ อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2553

บทคัดย่อ

บทความฉบับนี้เป็นการนำเสนอการวิเคราะห์และตรวจจับการเกิดดิซซาร์จบางส่วนโดยใช้เทคนิคการตรวจจับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าย่านความถี่สูง ซึ่งเป็นวิธีสมัยใหม่ที่มีความสะดวกในการนำไปใช้ตรวจจับในวัดสุทดสอบ โดยออกแบบสร้างสายอากาศลูปฟิโรไดกไดโพลเออร์เรย์เพื่อตรวจจับดิซซาร์จบางส่วนและทำการวิเคราะห์ผลการทดสอบโดยเปรียบเทียบกับวิธีการทดสอบแบบดั้งเดิมและสายอากาศดิสโมโนโพลที่มีอยู่แล้วในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง พบว่าผลการทดสอบมีลักษณะเช่นเดียวกับวิธีแบบดั้งเดิม แต่แตกต่างกับสายอากาศดิสโมโนโพล ดังนั้นสายอากาศที่ออกแบบสร้างขึ้นสามารถตรวจจับและจำแนกประเภทของการเกิดดิซซาร์จบางส่วนได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาโทฉบับนี้คงไม่สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ถ้าหากขาดความช่วยเหลือและความร่วมมือเป็นอย่างดีจากบุคคลเหล่านี้

คณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาโท ผศ.ดร.เชาว์ ชมภูอินทร์ และอาจารย์ดุสิต สุขสวัสดิ์ ที่ได้ให้คำปรึกษาแนะนำความรู้ต่างๆ รวมทั้งการปรับปรุงเกี่ยวกับภาษาและการนำเสนองานตลอดระยะเวลาของงานศึกษา

คณะผู้จัดทำขอขอบคุณพี่ปุณยวีร์ ทองเขียว นักศึกษาปริญญาโทที่ให้คำปรึกษาและคอยให้ความช่วยเหลือตลอดมา ขอขอบคุณอย่างซาบซึ้ง นอกจากนี้ขอขอบคุณพี่ๆ นักศึกษาปริญญาโทและเพื่อนๆ ห้อง ESIRC ที่ให้ความช่วยเหลือและกำลังใจแก่คณะผู้จัดทำอย่างดีเสมอมา

ท้ายที่สุดนี้ คณะผู้จัดทำต้องขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และสมาชิกครอบครัวทุกคนที่มอบความรัก ความห่วงใย คอยสนับสนุนทางการเรียน และเป็นแรงใจให้ผู้จัดทำก้าวมาถึงจุดนี้ได้

คณะผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ.....	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญรูปภาพ.....	VII
สารบัญตาราง	IX

บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	1
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ.....	2
1.4 แผนการดำเนินโครงการ.....	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย.....	3

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องของการเกิดดิสชาร์จบางส่วน(Partial discharge : PD)	4
2.1.1 โครนาดิสชาร์จ.....	5
2.1.2 ดิสชาร์จตามผิว	5
2.1.3 ดิสชาร์จภายใน.....	6
2.1.4 ผลกระทบของดิสชาร์จบางส่วน.....	7
2.1.5 สิ่งที่ปรากฏเมื่อเกิดดิสชาร์จบางส่วน.....	8
2.1.6 ธรรมชาติพัลส์ของดิสชาร์จบางส่วน	8
2.1.6.1 ลักษณะของการเกิดดิสชาร์จซ้ำ	8
2.1.6.2 ลักษณะรูปร่างของกระแสดิสชาร์จบางส่วน	9
2.1.7 การวัดดิสชาร์จบางส่วนสำหรับวัสดุทดสอบทั่วไป.....	10
2.1.8 คุณสมบัติของเครื่องตรวจจับดิสชาร์จบางส่วน.....	11
2.2 หลักการตรวจสอบดิสชาร์จบางส่วน	12
2.2.1 รูปแบบการตรวจสอบดิสชาร์จบางส่วน.....	12
2.2.2 วงจรพื้นฐานสำหรับการตรวจจับดิสชาร์จบางส่วน	13
2.2.3 วงจรสมมูลของการเกิดดิสชาร์จบางส่วนภายใน.....	14
2.2.4 การแสดงผลของดิสชาร์จบางส่วน.....	16
2.2.5 เทคนิคการลดสัญญาณรบกวน.....	17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังขอให้นำเนื้อหาของเอกสารนี้ไปเผยแพร่หรือต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.2.5.1	สัญญาณรบกวนที่มีผลกระทบในการวัดดิสชาร์จบางส่วน.....	17
2.2.5.2	การลดสัญญาณรบกวน	18
2.2.6	การตรวจจับดิสชาร์จบางส่วนโดยตรวจจับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (UHF method)	19
2.2.6.1	ความแตกต่างของการวัดดิสชาร์จบางส่วนตามมาตรฐาน IEC 60270 และวิธี UHF method.....	20
2.2.6.2	ประเภทของเซนเซอร์.....	20
2.2.6.3	ตัวอย่างการติดตั้งเซนเซอร์ UHF ในระบบไฟฟ้าแรงสูง	22
2.2.6.4	เหตุผลหลักของการเลือกใช้วิธี UHF Method	23
บทที่ 3	การออกแบบสายอากาศลูปฟิโรดิกไดโพลแอร์เรย์	24
3.1	ทฤษฎีเบื้องต้นเกี่ยวกับสายอากาศ(Antenna)	24
3.1.1	ประวัติความเป็นมาของสายอากาศ	24
3.1.2	ประเภทของสายอากาศ	24
3.1.3	ทฤษฎีพื้นฐานของสายอากาศ Disc Monopole.....	26
3.1.4	ทฤษฎีพื้นฐานของสายอากาศลูปฟิโรดิกไดโพลแอร์เรย์	26
3.2	ขั้นตอนการออกแบบสายอากาศลูปฟิโรดิกไดโพลแอร์เรย์.....	30
3.3	การประกอบสร้างสายอากาศ	35
บทที่ 4	การทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดสอบ	39
4.1	การติดตั้งอุปกรณ์การทดสอบ	40
4.1.1	ขั้นตอนการทดสอบ	41
4.1.2	แหล่งกำเนิดดิสชาร์จบางส่วน.....	41
4.2	การวิเคราะห์ผลในเชิงโดเมนเวลา	43
4.3	ผลการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนด้วยวิธี Conventional method.....	45
4.3.1	Background noise.....	46
4.3.2	ผลการทดสอบ HV-electrode Corona discharge	47
4.3.3	ผลการทดสอบ Ground-electrode Corona discharge	47
4.3.4	ผลการทดสอบ Internal discharge	48
4.3.5	ผลการทดสอบ Surface discharge.....	48
4.4	ผลการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนด้วยสายอากาศ Disc Monopole	50
4.4.1	ผลการทดสอบ Background noise	51

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของกรมการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่เอกสารนี้แก่บุคคลอื่นโดยไม่ได้รับอนุญาต

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.4.2 ผลการทดสอบ High volt-electrode corona discharge.....	51
4.4.3 ผลการทดสอบ Ground-electrode Corona discharge	52
4.4.4 ผลการทดสอบ Internal discharge	52
4.4.5 ผลการทดสอบ Surface discharge	53
4.5 ผลการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนด้วยสายอากาศล็อกฟิรโอดิกไดโพลแอร์เรย์ (LPDA)	54
4.5.1 ผลการทดสอบBackground noise	55
4.5.2 ผลการทดสอบ High volt-electrode corona discharge.....	55
4.5.3 ผลการทดสอบ Ground-electrode Corona discharge	56
4.5.4 ผลการทดสอบ Internal discharge	56
4.5.5 ผลการทดสอบ Surface discharge	57
4.6 การเปรียบเทียบผลการทดสอบ.....	57
4.6.1 ผลของการตรวจจับ PD ด้วยสายอากาศ LPDA เปรียบเทียบกับวิธี Conventional method และสายอากาศ DM.....	58
4.6.2 ผลการตรวจจับ PD จากลักษณะการติดตั้งสายอากาศ LPDA	62
4.6.3 ผลการตรวจจับ PD โดยติดตั้งสายอากาศ LPDA และ DM ที่ระยะต่างๆ	64
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	68
5.1 บทสรุป	68
5.2 อุปสรรคและแนวทางนำไปแก้ไข	68
บรรณานุกรม	69
ภาคผนวก ก การวิเคราะห์สัญญาณดิสชาร์จบางส่วนโดยใช้โปรแกรม MATLAB	70
ภาคผนวก ข OMICRON mtronix MPD 600	72
ภาคผนวก ค ผลการตรวจจับดิสชาร์จบางส่วนโดยติดตั้งสายอากาศที่ ระยะ 2.5 เมตร	75
ภาคผนวก ง Matching Impedance	81
ภาคผนวก จ บทความทางวิชาการ.....	84
ประวัติผู้เขียน	89

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1	รูปแบบของดิสชาร์จบางส่วน.....5
2.2	ลักษณะรูปแบบของฉนวนที่ทำให้เกิดดิสชาร์จตามผิวบางส่วน.....6
2.3	คลื่นของแรงดันตกคร่อมแก๊ปและกระแสที่ขั้วสายของอุปกรณ์วัดขณะเกิด PD8
2.4	ลักษณะรูปร่างของกระแสดิสชาร์จบางส่วนในทางทฤษฎีสำหรับแก๊ปเล็กๆ.....10
2.5	วงจรทดสอบดิสชาร์จบางส่วนแบบต่างๆ ตามมาตรฐาน IEC 6027011
2.6	วงจรพื้นฐานสำหรับการตรวจจับดิสชาร์จบางส่วน.....13
2.7	วงจรสมมูลสำหรับฉนวนที่มีโพรงก๊าซ.....15
2.8	การแสดงผลของ PD.....17
2.9	ตัวอย่างสัญญาณรบกวนที่ตำแหน่งต่างๆ.....18
2.10	ตัวอย่างการลดสัญญาณรบกวน.....19
2.11	การติดตั้งเซ็นเซอร์ UHF สำหรับ GIS20
2.12	Tapping point of the integrated sensor with plug-in unit21
2.13	Model of a mobile window coupler for UHF PD measurements mounted on 123 kV GIS.....22
3.1	ตัวอย่างสายอากาศแบบต่างๆ.....25
3.2	แสดงแบบแผนไดอะแกรมของสายอากาศ LPDA.....28
3.3	ลักษณะทางเดินของกราฟที่คำนวณได้ของค่าไดเรกทิวิตี.....31
3.4	โครงสร้างสายอากาศลูปพีริโอดิกไดโพลแอร์เรย์.....34
3.5	Dimension ของสายอากาศ LPDA34
3.6	รูปจำลองสายอากาศ LPDA35
3.7	เตรียมอุปกรณ์.....35
3.8	ตัดท่ออลูมิเนียมตามขนาดที่ออกแบบ.....35
3.9	เจาะรูท่ออลูมิเนียม.....36
3.10	วัดระยะห่างของอิลิเมนต์.....36
3.11	ประกอบสายอากาศ LPDA.....37
3.12	การต่อสายสัญญาณของสายอากาศลูปพีริโอดิกไดโพลแอร์เรย์.....37
3.13	สายอากาศลูปพีริโอดิกไดโพลแอร์เรย์.....38
4.1	แผนผังการทดสอบ39
4.2	วงจรการทดสอบ.....40
4.3	อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ.....40
4.4	รูปจำลอง PD source.....42

สารบัญรูปร่างภาพ (ต่อ)

	หน้า
4.37 High volt-electrode corona discharge at 10.06kV, 150.7pC	59
4.38 Grounded-electrode corona discharge at 10kV, 1.767nC	60
4.39 Internal discharge at 11.16kV, 512.9pC.....	60
4.40 Surface discharge at 10kV,482.9pC.....	61
4.41 รูปจำลองสายอากาศอิลิเมนต์ที่ตั้งฉากกับพื้นโลก	62
4.42 รูปจำลองสายอากาศอิลิเมนต์ขนานกับพื้นโลก	62
4.43 อิลิเมนต์ที่ตั้งฉากกับพื้นโลก.....	63
4.44 อิลิเมนต์ขนานกับพื้นโลก.....	63
4.45 HV-electrode corona discharge ติดตั้งสายอากาศลักษณะแตกต่างกัน	63
4.46 Ground-electrode corona discharge ติดตั้งสายอากาศลักษณะแตกต่างกัน	63
4.47 Internal discharge ติดตั้งสายอากาศลักษณะแตกต่างกัน	64
4.48 Surface discharge ติดตั้งสายอากาศลักษณะแตกต่างกัน	64
4.49 รูปจำลองการติดตั้งสายอากาศ LPDA และDM ที่ระยะ 1.5 เมตร.....	65
4.50 รูปจำลองการติดตั้งสายอากาศ LPDA และDM ที่ระยะ 8 เมตร.....	65
4.51 ระยะการติดตั้งสายอากาศที่ระยะ 1.5 เมตร	65
4.52 ระยะการติดตั้งสายอากาศที่ระยะ 8 เมตร	66
4.53 HV-electrode corona discharge จากสายอากาศ LPDA และ DM ที่ระยะต่าง ๆ....	66
4.54 Ground-electrode corona discharge จากสายอากาศ LPDA และ DM ที่ระยะต่าง ๆ.....	66
4.55 Internal discharge จากสายอากาศ LPDA และ DM ที่ระยะต่าง ๆ	67
4.56 Surface discharge จากสายอากาศ LPDA และ DM ที่ระยะต่าง ๆ.....	67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 การวางแผนจัดลำดับขั้นตอนการทำปริญญานิพนธ์.....	2
3.1 แสดงส่วนประกอบของสายอากาศล็อกพีรีโอดิกไดโพลแอร์เรย์.....	36
4.1 แสดงผลการทดสอบแรงดันเริ่มเกิดดิสชาร์จบางส่วนด้วยวิธีแบบดั้งเดิม.....	49
4.2 แสดงผลการทดสอบแรงดันของดิสชาร์จบางส่วนด้วยวิธีแบบดั้งเดิม.....	49



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ในระบบไฟฟ้าแรงสูงปัญหาสำคัญประการหนึ่งของระบบ คือ การฉนวน ซึ่งจะมีความสำคัญต่อเสถียรภาพและความเชื่อถือได้ของระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า ความผิดปกติในระบบส่งจ่าย ส่วนใหญ่เนื่องมาจากความล้มเหลวของฉนวนหรือการเสื่อมสภาพการฉนวน หมายถึง ฉนวนเปลี่ยนสภาพไปสู่การนำไฟฟ้า ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากความผิดปกติในเนื้อฉนวน ฉนวนไม่ได้คุณภาพตามมาตรฐานที่กำหนด การออกแบบไม่มีประสิทธิภาพ ความบกพร่องในกระบวนการผลิต ความบกพร่องของฉนวนทำให้เกิดดิสชาร์จบางส่วนขึ้นและพัฒนาไปสู่การเกิดเบรกดาวน์ในเนื้อฉนวน ทำให้เสื่อมสภาพฉนวนอย่างถาวร ดังนั้นการตรวจสอบการเกิดดิสชาร์จบางส่วนก่อนนำอุปกรณ์ไปใช้งานจริง จึงเป็นส่วนสำคัญในการตรวจสอบมาตรฐานการฉนวนของอุปกรณ์นั้นๆ เพราะการตรวจสอบการเกิดดิสชาร์จทำให้ทราบสาเหตุและตำแหน่งที่เกิดขึ้น จะช่วยให้แก้ไขปรับปรุงการฉนวนได้อย่างรวดเร็ว

การตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วน โดยทั่วไปจะทำการตรวจจับดิสชาร์จบางส่วนด้วยวิธีการทางไฟฟ้า ซึ่งเป็นการทดสอบแบบดั้งเดิม (Conventional method, IEC 60270) ซึ่งจำเป็นที่จะต้องทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการและต้องอาศัยความเชี่ยวชาญของแต่ละบุคคล แต่ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาวิธีการตรวจจับดิสชาร์จบางส่วนกันอย่างแพร่หลาย ซึ่งแนวความคิดที่น่าสนใจคือการตรวจจับดิสชาร์จบางส่วนโดยใช้เทคนิคคลื่นความถี่สูง UHF โดยอาศัยหลักการที่เมื่อเกิดดิสชาร์จบางส่วนขึ้นที่ฉนวนไฟจะมีคลื่นความถี่สูงแพร่กระจายออกมาในรูปของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ซึ่งสามารถตรวจจับได้โดยใช้เซนเซอร์รับสัญญาณความถี่และวิเคราะห์ผลการทดสอบเปรียบเทียบกับ การทดสอบแบบดั้งเดิม

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.

1. เพื่อศึกษาทฤษฎีและมาตรฐานต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการเกิดดิสชาร์จบางส่วน
2. เพื่อศึกษากระบวนการตรวจจับดิสชาร์จบางส่วนของอุปกรณ์ทดสอบซึ่งจำลองลักษณะการ เกิดดิสชาร์จบางส่วนขึ้น
3. เพื่อศึกษาการตรวจจับดิสชาร์จบางส่วนโดยใช้เทคนิคคลื่นความถี่สูง UHF ในการทดสอบ
4. เพื่อศึกษาวิเคราะห์ผลของสัญญาณที่ได้จากการตรวจจับดิสชาร์จบางส่วน โดยใช้เทคนิคคลื่นความถี่สูง UHF และนำไปเปรียบเทียบกับวิธีดั้งเดิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ

1. ศึกษาการเกิด PD ภายในเนื้อฉนวน
2. ศึกษามาตรฐานและงานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยโดยการสืบค้นจากฐานข้อมูลของ IEEE, IEC, ปรินทิพนิพนธ์ และวิทยานิพนธ์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง
3. ทำการออกแบบการทดสอบการตรวจจับดิสชาร์จบางส่วนโดยใช้เทคนิคคลื่นความถี่สูง UHF
4. ทำการออกแบบสายอากาศเพื่อใช้ในการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วน
5. ทำการทดสอบการตรวจจับดิสชาร์จบางส่วนโดยใช้สายอากาศที่ออกแบบเปรียบเทียบกับสายอากาศของรุ่นพี่
6. ทำการวิเคราะห์สัญญาณที่ได้จากการตรวจจับดิสชาร์จบางส่วน โดยใช้เทคนิคคลื่นความถี่สูง UHF และนำไปเปรียบเทียบกับวิธีดั้งเดิม
7. จัดทำปรินทิพนิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

1.4 แผนการดำเนินโครงการ

ตารางที่ 1.1 การวางแผนจัดลำดับขั้นตอนการทำปรินทิพนิพนธ์

ขั้นตอนดำเนินงาน วิจัย	พ.ศ. 2553							พ.ศ. 2554	
	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.
1. ศึกษาการเกิด PD ภายในเนื้อฉนวน	↔								
2. ศึกษามาตรฐานและงานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยโดยการสืบค้นจากฐานข้อมูลของ IEEE, IEC, ปรินทิพนิพนธ์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง		↔							
3. ศึกษาเกี่ยวกับสายอากาศแบบต่างๆ และวิธีการออกแบบ				↔					
4. ทำการออกแบบสายอากาศ LPDA					↔				
5. ทำการประดิษฐ์สายอากาศ LPDA						↔			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. ทำการทดลอง ตรวจจับ PD โดยใช้ สายอากาศ LPDA และสายอากาศ Disc monopole						←→	←→	
7. นำผลมาวิเคราะห์ ในโปรแกรม Matlab และนำผลมาวิเคราะห์ เปรียบเทียบ						←→	←→	
8. จัดทำปริญา นิพนธ์ฉบับสมบูรณ์								←→
					←→	แสดงแผนงานวิจัย		
					←→	แสดงแผนเวลาปฏิบัติงานจริง		

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1. มีความรู้และความเข้าใจเกี่ยวกับการเกิดดิสชาร์จบางส่วน และการตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วน
2. สามารถวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการตรวจจับดิสชาร์จบางส่วนเปรียบเทียบกับ การทดสอบแบบดั้งเดิม
3. มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับทฤษฎีของสายอากาศ
4. สามารถสร้างบุคลากรที่มีความรู้ความสามารถ และความเชี่ยวชาญด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง ตรงกับความต้องการของภาคอุตสาหกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องของการเกิดดิซชาร์จบางส่วน (Partial discharge : PD) [4]

ในระบบการฉนวนไฟฟ้าแรงสูง ไม่ว่าจะเป็นสายส่งจ่าย หรืออุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงก็ตาม ถ้าหากความเครียดสนามไฟฟ้าที่จุดใด เกิดมีค่าสูงกว่าค่าความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤต หรือค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า (Dielectric Strength) ของฉนวนก็จะทำให้เกิดเบรกดาวน์โดยสมบูรณ์ หรือเบรกดาวน์เป็นเพียงบางส่วน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับว่าจะเกิดแนวที่ฉนวนเปลี่ยนสภาพไปเป็นสภาพนำไฟฟ้าที่มีความต้านทานไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดต่ำพอหรือไม่ ถ้าเกิดเบรกดาวน์ที่สมบูรณ์ไม่ได้ก็จะกลายเป็นดิซชาร์จพัลส์สั้นๆ หรือที่เรียกว่าดิซชาร์จบางส่วน (Partial discharge = PD) เพราะดิซชาร์จนั้นไม่เชื่อมโยงระหว่างอิเล็กโทรด และการดิซชาร์จบางส่วนนี้การฉนวนของอิเล็กโทรดด้านหนึ่ง หรือทั้งสองด้านยังเป็นฉนวนที่สมบูรณ์มั่นคงอยู่ ซึ่งอาจเป็นของแข็งของเหลวหรือก๊าซก็ได้

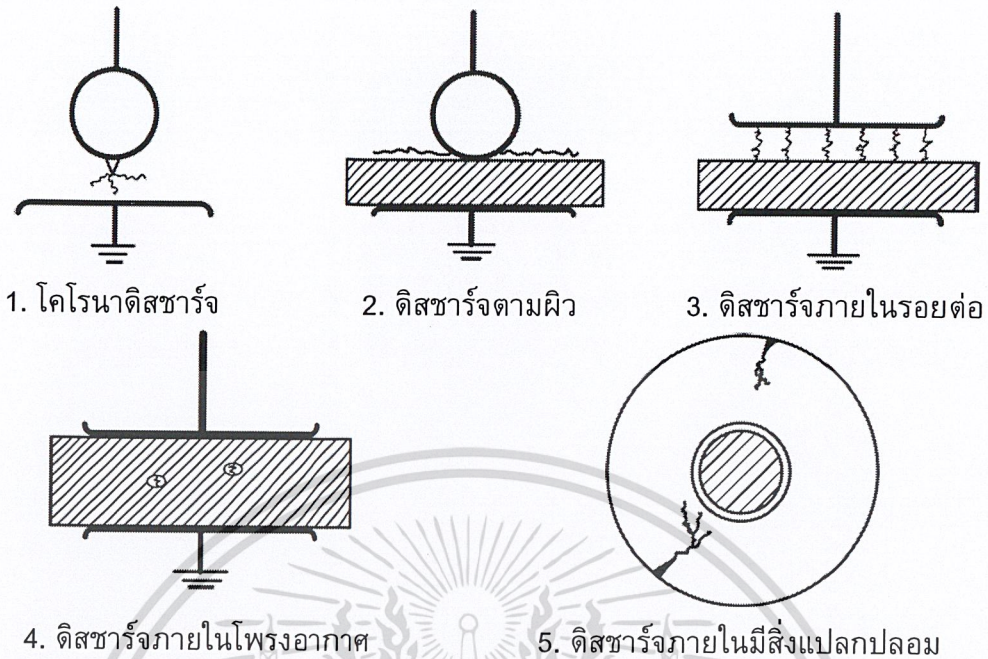
ดิซชาร์จบางส่วน คือ ดิซชาร์จเบรกดาวน์ที่ไม่สมบูรณ์ พลังงานที่ทำให้เกิดดิซชาร์จนั้นไม่มากพอที่จะทำให้ฉนวนเปลี่ยนสภาพไปเป็นสภาพนำไฟฟ้าได้ตลอดแนวระหว่างอิเล็กโทรด จึงเรียกว่า ดิซชาร์จบางส่วน Kreuger ได้ให้คำอธิบายไว้ว่า “ ดิซชาร์จบางส่วนเป็นดิซชาร์จทางไฟฟ้าที่ไม่เชื่อมโยงถึงกันระหว่างอิเล็กโทรด ” [7]

ดิซชาร์จบางส่วนจะเกิดขึ้นในระบบฉนวนที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงหรือฉนวนที่มีความไม่สม่ำเสมอ หรือไม่ป็นเนื้อเดียวกัน หรือมีสิ่งเจือปน ซึ่งทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าบางจุดในฉนวนมีค่าสูงกว่าค่าความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤต แต่ไม่อาจทำให้เกิดเบรกดาวน์โดยสมบูรณ์ได้หากแต่เกิดเพียงบางส่วน

ดิซชาร์จบางส่วนเกิดขึ้นได้ทั้งในสนามไฟฟ้ากระแสสลับและสนามไฟฟ้ากระแสตรงภายใต้สนามไฟฟ้ากระแสสลับ ดิซชาร์จจะเกิดขึ้นซ้ำๆ ซ้ำๆ ไซเคิลของแรงดัน โดยปกติจะเกิดขึ้นขณะที่แรงดันที่ป้อนเพิ่มขึ้นจากศูนย์ไปสู่ค่ายอด

ดิซชาร์จบางส่วนอาจแบ่งออกได้เป็น 3 แบบคือ

1. โคโรนาดิซชาร์จ (Corona discharge)
2. ดิซชาร์จตามผิว (Surface discharge)
3. ดิซชาร์จภายใน (Internal discharge)



รูปที่ 2.1 รูปแบบของดิสชาร์จบางส่วน

2.1.1 โคโรนาดิสชาร์จ

โคโรนาดิสชาร์จคือดิสชาร์จในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงรอบปลายอิเล็กโทรดแหลมหรือขอบคมที่อยู่ในอากาศหรือก๊าซความดันปกติ เรียกว่า โคโรนา โคโรนาดิสชาร์จจะเริ่มเกิดขึ้นเมื่อความเครียดสนามไฟฟ้าเกินค่าสนามไฟฟ้าวิกฤตในอากาศ

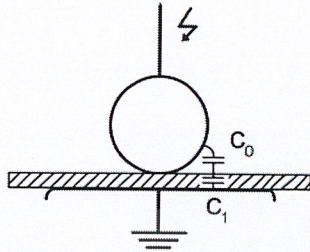
ผลที่เกิดจากโคโรนา

1. เมื่อเกิดโคโรนาดิสชาร์จในสายอากาศอาจสังเกตเห็นหรือรับรู้ได้ด้วยร่างกายของคนคือจะได้ยินเสียงฮิสซิ่ง (เสียงแมลงบิน) มีกลิ่นโอโซน ในยามมืดสนิทจะเห็นแสงเรือง ๆ
2. โคโรนาดิสชาร์จเกิดขึ้นในรูปพัลส์สั้น ๆ ซึ่งมีสเปกตรัมความถี่สูงถึงเมกะเฮิรตซ์ คลื่นความถี่สูงนี้จะรบกวนระบบสื่อสาร เรียกว่า คลื่นรบกวนวิทยุ
3. การเกิดโคโรนาย่อมหมายถึง มีพลังงานสูญเสียเกิดขึ้นอยู่ตลอดเวลา จึงเป็นสิ่งไม่พึงปรารถนา พลังงานสูญเสียเนื่องจากโคโรนาดิสชาร์จขึ้นอยู่กับความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดของผิวตัวนำ ด้วยเหตุนี้ในระบบสายส่งแรงสูงจึงใช้สายควบ (bundled conductors) นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับสภาวะบรรยากาศฝน หมอก น้ำค้าง จะทำให้เกิดโคโรนาได้ง่าย

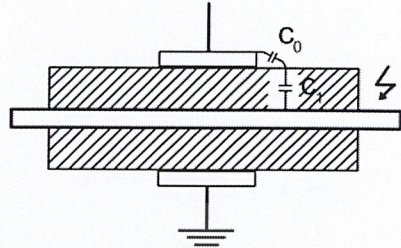
2.1.2 ดิสชาร์จตามผิว

ในสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอหรือไม่สม่ำเสมอก็ตาม ฉนวนแข็งมีส่วนทำให้สนามไฟฟ้าในส่วนที่มีเปอร์มิตติวิตีต่ำ เช่น ก๊าซหรืออากาศมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงขึ้นจนเป็นผลให้เกิดดิสชาร์จขึ้นในส่วนที่เป็นอากาศ ดิสชาร์จตามผิวเกิดขึ้นเมื่อความเครียด

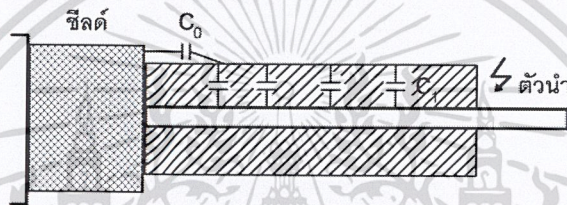
สนามไฟฟ้าตามผิวฉนวน (tangential field E_t) มีค่าสูงถึงค่าวิกฤต (E_c) ตัวอย่างเช่น แผ่นฉนวนแข็งคั่นระหว่างอิเล็กโตรดกับแผ่นระนาบ ที่ปีกยึดปลายฉนวนตัวนำและ ปลายสายเคเบิลแรงสูง



1. อิเล็กโตรดทรงกลมกับระนาบคั่นด้วยแผ่นแก้ว



2. ปลอกฉนวนตัวนำ



3. ปลายสายเคเบิลแรงสูง

รูปที่ 2.2 ลักษณะรูปแบบของฉนวนที่ทำให้เกิดดิซชาร์จตามผิวบางส่วน

ตามรูปที่ 2.2 ค่าเก็บประจุระหว่างอิเล็กโตรด C_0 น้อยกว่าค่าเก็บประจุของฉนวนแข็ง C_1 มากๆ ฉะนั้นแรงดันระหว่างอิเล็กโตรดจะตกคร่อม C_0 เกือบทั้งหมด ทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าบางส่วน C_0 มีค่าสูงเกิน E_c ได้ จึงเกิดเบรกดาว์นหรือดิซชาร์จในส่วนที่เป็นอากาศ แต่ในส่วนที่เป็นฉนวนแข็งซึ่งมีความคงทนต่อแรงดัน E_b สูง จึงไม่อาจเกิดเบรกดาว์นทะลุได้ แต่จะดิซชาร์จไปตามผิวฉนวนแข็ง

2.1.3 ดิซชาร์จภายใน

ดิซชาร์จบางส่วนภายในคือดิซชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นในเนื้อฉนวนแข็งหรือฉนวนเหลวซึ่งมีโพรงอากาศหรือฟองก๊าซหรือสิ่งเจือปนแปลกปลอมที่มีค่าเปอร์มิตติวิตีต่ำกว่าในเนื้อฉนวนหลัก ทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าในโพรงอากาศหรือสิ่งเจือปนดังกล่าวมีค่าสูงกว่าฉนวนรอบๆ ทำให้มีความเครียดสนามไฟฟ้าเกินค่าวิกฤต และเกิดเบรกดาว์นในโพรงนั้นๆ จะทำให้ฉนวนโดยรวมเสียหาย เกิดการกักถ่วง การฉนวนเสื่อมคุณภาพ อายุการใช้งานจะสั้นลง และในบางกรณีอาจนำไปสู่การเบรกดาว์นได้ในที่สุด

1. โพรงอากาศ การเกิดดิซชาร์จภายในจะเกิดขึ้นบ่อยๆ ในโพรงอากาศ ซึ่งสามารถเกิดได้ในทั้ง พลาสติก เรซินหรือกระดาษเคลือบเรซิน แรงดันไฟฟ้าที่ทำให้เกิดดิซชาร์จขึ้นอยู่กับความเครียดในโพรงและความแข็งแรงทางไฟฟ้าของโพรง ความเครียดในโพรง

สามารถคำนวณได้ในบางกรณี ถ้าโพรงตั้งฉากกับสนามไฟฟ้า ความเครียดในโพรงก็จะเท่ากับ ϵ คูณด้วยความเครียดของไดอิเล็กตริก โดยที่ ϵ แทนค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของฉนวน

2. การปนเปื้อน (inclusion) การปนเปื้อนสามารถเกิดขึ้นได้ในพลาสติกหรือเรซินขึ้นรูป การปนเปื้อนประกอบไปด้วย ผุ่น กระจาด ใยผ้า หรือวัสดุแปลกปลอมอื่นใด ซึ่งสิ่งเจือปนเหล่านี้จะมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าน้อยกว่าฉนวน การปนเปื้อนยังทำให้ความคงทนต่อการเกิดเบรกดาวนซ์ของฉนวนลดลงจากเดิม และหลังจากเกิดเบรกดาวนซ์ในโพรงสิ่งเจือปน จะเกิดก๊าซขึ้นภายในโพรงฉนวน แล้วทำให้เกิดดิสชาร์จในก๊าซที่เกิดขึ้น ซึ่งทำให้เกิดเบรกดาวนซ์ได้ง่ายขึ้น

3. โพรงฉนวนเป็นน้ำมัน โพรงฉนวนเป็นน้ำมันเกิดขึ้นระหว่างชั้นของการฉนวนด้วยกระดาษหุ้มขุบน้ำมัน เช่น ในกรณีของขดลวดหม้อแปลง หรือเคเบิล เป็นต้น ความเครียดสนามไฟฟ้าในโพรงอาจคำนวณได้เช่นเดียวกับกรณีของโพรงก๊าซ นั่นคือความเครียดสนามไฟฟ้าในโพรงน้ำมัน (ϵ_1) จะเป็น ϵ_2 / ϵ_1 เท่าของความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวน (ϵ_2) ในกรณีที่โพรงแบนตั้งฉากกับแนวสนามไฟฟ้า ถ้าเกิดเบรกดาวนซ์ในโพรงน้ำมันก็จะเกิดก๊าซขึ้นในโพรงและเกิดดิสชาร์จภายในขึ้น

2.1.4 ผลกระทบของดิสชาร์จบางส่วน

ดิสชาร์จบางส่วนแต่ละครั้งจะมีพลังงานถ่ายเทให้กับพื้นผิวฉนวน ในลักษณะชนกระแทกเป็นเหตุให้เกิดความร้อนเพิ่มขึ้นเฉพาะจุด เป็นผลให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมี ทำให้ฉนวนเสียเป็นจุดๆ และเกิดผิวดพร่องขยายตัวมากขึ้น และอาจนำไปสู่การเกิดเบรกดาวนซ์อย่างสมบูรณ์ได้ ทำให้ฉนวนเสียหาย อายุการใช้งานของฉนวนจะสั้นลง

การเกิดดิสชาร์จบางส่วนบนสายส่งแรงสูงแบบชิงอากาศ เรียกว่า โคโรนา ย่อมหมายถึงการเกิดพลังงานสูญเสียตลอดเวลา และยิ่งกว่านั้นการเกิดโคโรนาพัลส์ดิสชาร์จดังกล่าว ทำให้เกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแพร่กระจายออกไปรบกวนระบบสื่อสารย่านความถี่วิทยุ เรียกว่า คลื่นรบกวนวิทยุ

ฉะนั้น เพื่อให้อายุการใช้งานของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงใช้งานได้ยาวนาน ไม่ก่อให้เกิดคลื่นรบกวนวิทยุ การออกแบบการฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าจะต้องมีคุณภาพดีพอ ความเครียดสนามไฟฟ้าที่แรงดันใช้งานปกติจะต้องต่ำกว่าค่าความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤตของฉนวนและจะต้องไม่มีดิสชาร์จบางส่วน แม้จะมีแรงดันเกินอันเนื่องมาจากแรงดันกระเพื่อมเกิดขึ้น อย่างไรก็ตาม การฉนวนอุปกรณ์แรงสูง มีความยุ่งยากซับซ้อน ดิสชาร์จบางส่วนอาจเกิดขึ้นโดยมิได้ตั้งใจ หรืออาจมีความบกพร่องในกระบวนการผลิต หรือคุณภาพของฉนวนไม่ได้ตามที่กำหนด ฉะนั้น เพื่อความมั่นใจในคุณภาพของการฉนวนอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง จำเป็นต้องมีการทดสอบตรวจวัดค่าดิสชาร์จบางส่วน วัดค่าแรงดันคลื่นรบกวนวิทยุ (Radio interference voltage = RIV) ตามที่มาตรฐานกำหนด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

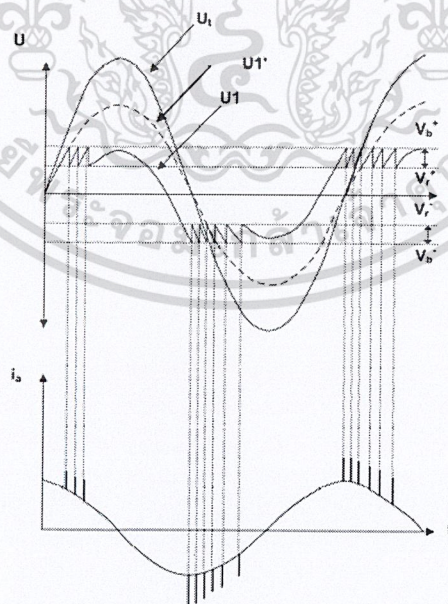
2.1.5 สิ่งที่ปรากฏเมื่อเกิดดิซาร์จบางส่วน

1. มีกระแสพัลส์ไฟฟ้าเกิดขึ้นขณะที่เกิดดิซาร์จบางส่วน
2. เกิดกำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก วัตต์ค่า $tg = f(U)$ เส้นกราฟจะหักมุมเมื่อเกิดดิซาร์จบางส่วน
3. เกิดคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ในย่านความถี่สูง กระทบระบบสื่อสาร
4. เกิดแสงเรืองแสง เนื่องจากเกิดไอออไนเซชันเป็นโคโรนา
5. เกิดโคโรนาในสายอากาศ จะมีคลื่นไอโซน เกิดเสียงฮีสซิ่ง (เสียงแมลงบิน)
6. เกิดความดันก๊าซเพิ่มสูงขึ้น
7. เกิดความร้อน
8. เกิดปฏิกิริยาทางเคมี

2.1.6 ธรรมชาติพัลส์ของดิซาร์จบางส่วน

2.1.6.1 ลักษณะการเกิดดิซาร์จซ้ำ

ในทางปฏิบัติดิซาร์จบางส่วนอาจเกิดซ้ำๆ ได้หลายครั้งในแต่ละคาบเวลา ดังรูปที่ 2.3 โดยที่ V_a คือ แรงดันคร่อมขั้วของอุปกรณ์ V_b คือ แรงดันเบรกดาวนของโพรงอากาศหรือแก๊ป V_r คือ แรงดันหลังการเบรกดาวนของโพรงอากาศหรือแก๊ป V_v คือ แรงดันคร่อมโพรงอากาศหรือแก๊ปถ้าไม่มีการเกิดดิซาร์จบางส่วนเลย และ i_a คือ กระแสที่ขั้วสายของอุปกรณ์ ตามลำดับ



รูปที่ 2.3 รูปคลื่นของแรงดันตกคร่อมแก๊ปและกระแสที่ขั้วสายของอุปกรณ์วัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการ **ขณะเกิดดิซาร์จบางส่วน** ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จำนวนครั้งการเกิดดิสชาร์จบางส่วน สามารถคำนวณได้จากรูปที่ 2.3 โดยสมมติว่า ดิสชาร์จบางส่วนเกิดแบบสมมาตรกับแกนเวลา ดังนั้นจำนวนดิสชาร์จบางส่วนต่อครึ่งคาบเวลา N คำนวณดังนี้

$$N = \frac{[(V_v - V_r) - Y]}{V_b - V_r} \quad (2.1)$$

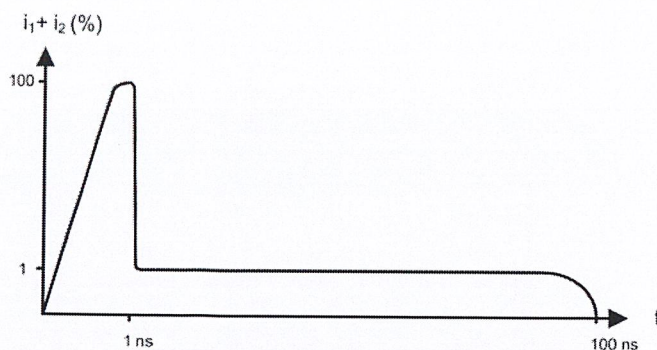
โดยที่ N คือ จำนวนครั้งการเกิดดิสชาร์จบางส่วนต่อครึ่งคาบเวลา
 V_b คือ แรงดันเบรกดาว์นของโพรงอากาศหรือแกป
 V_r คือ แรงดันหลังการเบรกดาว์นของโพรงอากาศหรือแกป
 V_v คือ ค่ายอดของแรงดันคร่อมโพรงอากาศหรือแกปถ้าไม่มีการเกิดดิสชาร์จบางส่วนเลย ซึ่งเท่ากับ $[C_b/C_b + C_w]$ เท่ากับค่ายอดของแรงดันคร่อมวัสดุทดสอบ
 Y คือ แรงดันใดๆ ซึ่งมีค่า $0 < Y < (V_b - V_r)$

2.1.6.2 ลักษณะรูปร่างของกระแสดิสชาร์จบางส่วน

ลักษณะรูปร่างของกระแสดิสชาร์จบางส่วนในแกปเล็กๆ ในทางทฤษฎี แสดงดังรูปที่ 2.4 กล่าวคือลักษณะการเกิดดิสชาร์จบางส่วน การไหลของกระแสผ่านแกปจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนซึ่งเคลื่อนที่ได้เร็วกว่าไอออนบวกผ่านแกปสั้นๆ เมื่ออิเล็กตรอนไหลผ่านแกปหมดกระแสจะลดลงอย่างรวดเร็วและกระแสที่ลดลงนี้ยังคงไหลต่อไปอีกเนื่องจากการเคลื่อนที่ของไอออนบวก แต่อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติจะพบว่าความกว้างของกระแสพัลส์ที่เกิดจากดิสชาร์จบางส่วนในฉนวนจะมีช่วงเวลา 1.5 นาโนวินาทีจนถึงช่วงเวลาเป็นหลัก 100 นาโนวินาที ดังนั้นกระแสพัลส์ดังกล่าวจึงมีสเปกตรัมของความถี่ที่มีแบนด์วิธกว้าง 10 เมกกะเฮิร์ตซ์ขึ้นไปและอาจมีความกว้างถึง 200 เมกกะเฮิร์ตซ์ ซึ่งการเกิดดิสชาร์จบางส่วนจากลักษณะการเกิดทรีอิง (treeing) ในฉนวนจะมีช่วงเวลาของกระแสพัลส์กว้างที่สุด

จากการค้นคว้าเอกสารต่างๆ เกี่ยวกับช่วงเวลาการเกิดดิสชาร์จบางส่วน ในฉนวนแข็งและฉนวนเหลวที่มีโพรงอากาศภายใน จะพบว่ากระแสพัลส์ของดิสชาร์จบางส่วนจะมีช่วงเวลาน้อยกว่า 5 นาโนวินาที เพราะว่าดิสชาร์จบางส่วนจะเกิดในที่แคบๆ ฉนวนเนื้อเดียว เช่น แก๊สจะมีช่วงเวลาน้อยกว่า 5 นาโนวินาทีและช่วงเวลาทางคลื่นจะยาวกว่าช่วงเวลานั้น สำหรับในอากาศกระแสพัลส์ของดิสชาร์จบางส่วนจะมีช่วงเวลาเกิดน้อยกว่า 100 นาโนวินาที

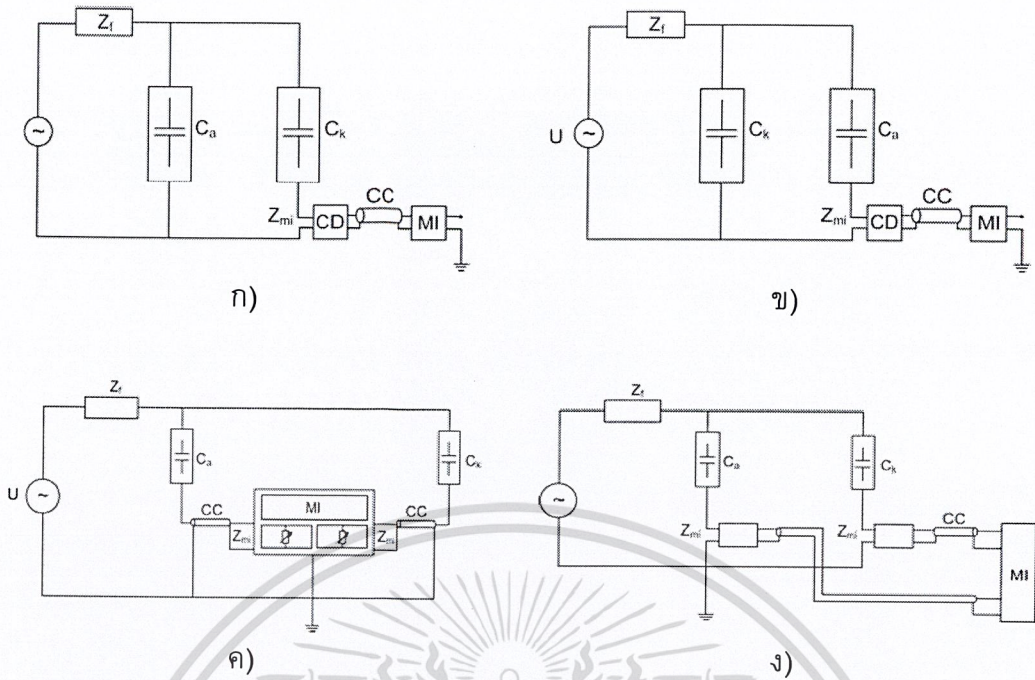
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 ลักษณะรูปร่างของกระแสดิซชาร์จบางส่วนในทางทฤษฎีสำหรับแก๊สเล็ก ๆ

2.1.7 การวัดดิซชาร์จบางส่วนสำหรับวัสดุทดสอบทั่วไป

โดยปกติวัสดุทดสอบทั่วไปอาจแทนได้ด้วยตัวเก็บประจุชนิดองค์ประกอบแบบลัมปีหรือตัวเก็บประจุธรรมดา วงจรทดสอบดิซชาร์จบางส่วนตามมาตรฐานต่าง ๆ จะมีลักษณะเช่นเดียวกัน ในที่นี้ใช้วงจรทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60270 [1] โดยรูปที่ 2.5 ก) และรูปที่ 2.5 ข) เป็นวงจรทดสอบแบบวิธีตรง ข้อดีของวงจรรูปที่ 2.5 ก) คือ ขั้วแรงดันต่ำของวัสดุทดสอบต่อลงกราวด์โดยตรง ในกรณีวัสดุทดสอบเกิดการเบรกดาวนนิ่งพีแดนซ์วัตจะไม่สามารถรับความเสียหาย ข้อดีของวงจรในรูปที่ 2.5 ข) จะให้ความไวในการวัดสูงกว่าแบบแรกในกรณีวัสดุทดสอบมีขนาดเล็กเนื่องจากผลของตัวเก็บประจุทดสอบแบบสเตรย์จะทำให้ตัวเก็บประจุแบบคัปปลิ่งมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในรูปที่ 2.5 ค) เป็นวงจรทดสอบแบบสมดุล วงจรแบบนี้มีข้อได้เปรียบในเรื่องการลดสัญญาณรบกวนที่เข้ามาจากแหล่งหรือสัญญาณแบบคอมมอนโหมดนั่นเองในวงจรรูปที่ 2.5 ง) เป็นวงจรทดสอบแยกขั้วสัญญาณได้ (Polarity Discrimination) มีข้อดีเช่นเดียวกับวงจรทดสอบแบบสมดุล แต่มีความสามารถเพิ่มเติมในการแยกขั้วสัญญาณรบกวนจากภายนอกออกจากการดิซชาร์จบางส่วนภายในวงจรได้ แต่มีข้อเสียของวงจรทั้งรูป 2.5 ค) และรูป 2.5 ง) คือ อาจทำให้เครื่องวัดได้รับความเสียหายในกรณีวัสดุทดสอบเกิดการเบรกดาวนนิ่งและไม่เหมาะสมกับการทดสอบที่มีการชิลด์ขนาดใหญ่ เนื่องจากการชิลด์ไม่ได้ต่อลงกราวด์โดยตรงดังนั้นถ้ามีสัญญาณรบกวนที่ชิลด์จะทำให้ความไวในการวัดดิซชาร์จบางส่วนลดลง หากเปรียบเทียบวงจรทดสอบโดยปกติจะทำก่อนป้อนแรงดันเข้าวงจรทดสอบ โดยใช้เครื่องปรับเทียบดิซชาร์จมาตรฐานในการป้อนกระแสพัลส์สั้น ๆ ที่มีประจุ (Pulse Area) ซึ่งทราบค่าที่แน่นอนที่ขั้วทั้งสองของวัสดุทดสอบ หลังจากทำการปรับเทียบเสร็จแล้วควรเอาเครื่องปรับเทียบดิซชาร์จมาตรฐานออกก่อนการป้อนแรงดันเข้าวงจรทดสอบ



รูปที่ 2.5 วงจรทดสอบดิสชาร์จบางส่วนแบบต่างๆ ตามมาตรฐาน IEC 60270 [1]

2.1.8 คุณสมบัติของเครื่องตรวจจับดิสชาร์จบางส่วน [7]

ข้อกำหนดของเครื่องตรวจจับดิสชาร์จบางส่วนตามมาตรฐาน IEC 60270 [1]

1. เวลาแยกชัตของเครื่องตรวจจับดิสชาร์จบางส่วน กำหนดไว้ว่าต้องไม่เกิน 100sec ในกรณีที่ไม่เกิดความผิดพลาดเนื่องจากการชอนทับของพัลส์ดิสชาร์จบางส่วน
2. เครื่องปรับเทียบดิสชาร์จมาตรฐานใช้สำหรับจ่ายกระแสพัลส์มาตรฐาน กำหนดให้ใช้แรงดันที่มีช่วงเวลาขึ้นไม่เกิน 0.1sec และลดลงด้วยค่าคงตัวเวลาอยู่ในช่วง 10-100sec
3. ความไวของเครื่องตรวจจับ จะต้องมีความสามารถตรวจจับพัลส์ต่ำสุดเป็น 2 เท่าของสัญญาณรบกวน
4. เครื่องกำเนิดพัลส์คู่ที่ใช้ในการตรวจสอบคุณสมบัติ Superposition ของเครื่องตรวจจับดิสชาร์จบางส่วนนั้นต้องสามารถสร้างพัลส์ขนาดเท่ากัน 2 พัลส์ ซึ่งมีช่วงเวลาขาขึ้นไม่เกิน 20 ns และมีความกว้างของพัลส์จากค่า 10% ของหน้าคลื่นถึงหางคลื่นต้องไม่เกิน 150ns โดยทั้ง 25 พัลส์นี้สามารถปรับระยะห่างได้อย่างน้อย 0.2-100s สำหรับเอาท์พุทอิมพีแดนซ์ปกติประมาณ 50-60 ตัวเก็บประจุที่ใช้ในการปรับเทียบต้องมีค่าไม่เกิน 150pF สำหรับการทดสอบในเคเบิล

5. เครื่องตรวจจับดิสชาร์จบางส่วนที่ใช้ในการทดสอบเคเบิลยอมให้เกิด Superposition ทางลบได้ไม่เกิน 10% ในกรณีที่เกิน 10% จะต้องนำผลอันนี้มาพิจารณาใน

เอกสารที่รื้อด้วยวิธีที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 หลักการตรวจจับดิสชาร์จบางส่วน

2.2.1 รูปแบบการตรวจจับดิสชาร์จบางส่วน

เมื่อเกิดดิสชาร์จบางส่วนจะเกิดผลสืบเนื่องต่างๆ ได้แก่ สัญญาณพัลส์ทางไฟฟ้า เสียง การสูญเสียของไดอิเล็กตริก แสง การเพิ่มขึ้นของความดันก๊าซและปฏิกิริยาเคมี เราสามารถสังเกตและตรวจจับดิสชาร์จบางส่วนได้หลายทางโดยการตรวจวัดสัญญาณที่กล่าวมาซึ่งมีข้อดี ข้อเสียแตกต่างกันดังต่อไปนี้

1. การฟังเสียง hissing ที่เกิดจากดิสชาร์จบางส่วนในวัสดุ เป็นวิธีที่ง่าย และเก่าแก่ที่สุด แต่วิธีนี้มีความไวต่ำและถูกรบกวนโดยเสียงอื่นๆ จากภายนอกได้ง่าย

2. การวัดพลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกโดยการวัดค่าตัวประกอบพลังงานสูญเสีย $tg\delta$ (Dissipation factor) สามารถสังเกตการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในวัสดุได้จากค่า $tg\delta$ ที่เพิ่มขึ้นและมีความสัมพันธ์กับแรงดันทดสอบ เนื่องจากพลังงานที่ปลดปล่อยออกมาขณะเกิดดิสชาร์จบางส่วนในวัสดุจะทำให้ตัวประกอบ $tg\delta$ มีค่าเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามการสังเกตดังกล่าวไม่ชัดเจนแม้ว่าจะเกิดดิสชาร์จบางส่วนในวัสดุปริมาณมาก เนื่องจากพลังงานสูญเสียจากการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในวัสดุ ซึ่งเกิดเฉพาะบางบริเวณของเนื้อฉนวนอาจมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับการสูญเสียของไดอิเล็กตริก ซึ่งเกิดขึ้นในปริมาตรทั้งหมดของเนื้อฉนวน

3. การตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วนทางแสง มีข้อจำกัดในเรื่องตำแหน่งที่เกิดดิสชาร์จบางส่วนในวัสดุทดสอบต้องโปร่งแสง จึงไม่สามารถกระทำได้ในหลายกรณี

4. การตรวจวัดการเพิ่มขึ้นของความดันก๊าซและปฏิกิริยาเคมี มีข้อจำกัดที่การเปลี่ยนแปลงต้องใช้ระยะเวลานาน จึงไม่เหมาะสมที่จะใช้ติดตามการเกิดดิสชาร์จบางส่วน

5. สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยการบันทึกสเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งพบว่าสเปกตรัมที่บันทึกได้จากสาเหตุต่างๆ ของการเกิดดิสชาร์จบางส่วนจะให้สเปกตรัมที่ต่างกันออกไปและพบว่าสเปกตรัมในช่วงความถี่คลื่นวิทยุของดิสชาร์จบางส่วนในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ตรวจจับโดยแคลมป์กระแสในสายนิวตรอน สามารถนำมาจำแนกการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในฉนวนของขดลวดสเตเตอร์และการเกิดอาร์คระหว่างปลายขดลวดสองชุดที่อยู่ติดกันได้

6. การวัดทางไฟฟ้า เป็นวิธีการวัดที่นิยมใช้กันมากที่สุดและมาตรฐานสากลแนะนำให้ใช้เนื่องจากมีความไวสูง สามารถติดตามการเกิดดิสชาร์จบางส่วนได้อย่างรวดเร็ว สามารถจำแนกสัญญาณที่เกิดจากดิสชาร์จบางส่วนออกจากสัญญาณอื่นๆ ได้และมีความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้น การวัดปริมาณของดิสชาร์จบางส่วนตามมาตรฐานสากลนั้นจะสามารถวัดได้ในเทอมของ “ประจุที่ปรากฏ” (Apparent Charge) การตรวจจับดิสชาร์จบางส่วนในโครงการวิจัยนี้จะใช้วิธีวัดทางไฟฟ้า

จากวิธีการตรวจวัดสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนที่ได้กล่าวมานี้จะพบว่าสัญญาณที่สามารถใช้ในการจำแนกแหล่งกำเนิดของดิสชาร์จบางส่วนมีหลายแบบ แต่ละแบบมี

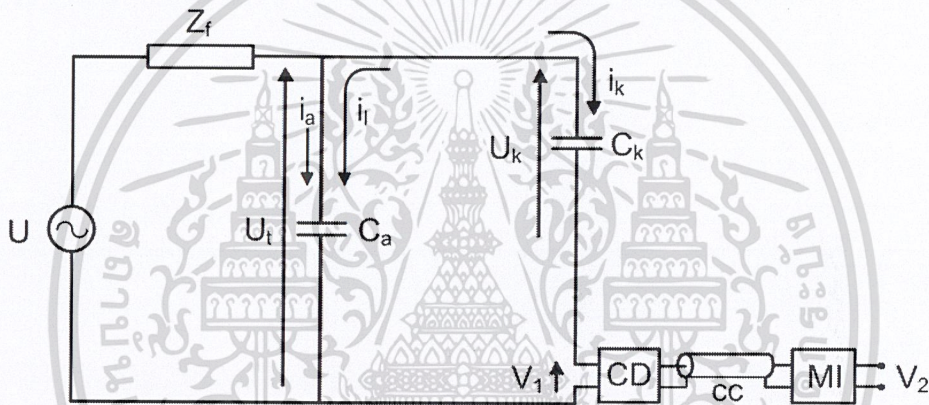
ไม่ว่ากรณีใดๆ ฟังสน อักฟังห้ามมีเหตุให้เบี่ยงเนื้อหาและต้องอ้างอิงเชิงวิชาการทุกประการห้ามนำไปใช้

ความสามารถในการจำแนกสาเหตุในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่ต่างๆ กันไป ดังนั้นจะต้องเลือกวิธีการตรวจวัดที่สามารถใช้ได้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงได้หลายประเภทและต้องมีความสามารถในการจำแนกดิซชาร์จบางส่วนที่เกิดจากสาเหตุต่างๆ ได้ดี

2.2.2 วงจรพื้นฐานสำหรับการตรวจจับดิซชาร์จบางส่วน

การตรวจจับดิซชาร์จบางส่วนสามารถทำได้หลายวิธีด้วยกัน โดยการสังเกตหรือวัดผลที่ปรากฏการณ์ต่างๆ ของดิซชาร์จบางส่วนในเชิงปริมาณที่ได้ผลดีที่สุด คือ การวัดผลทางไฟฟ้าโดยวิธีการตรวจจับกระแสพัลส์ที่ขั้วสายของอุปกรณ์

วงจรพื้นฐานสำหรับการตรวจจับดิซชาร์จบางส่วนด้วยวิธีการตรวจจับกระแสพัลส์ที่ขั้วสายของอุปกรณ์ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 วงจรพื้นฐานสำหรับการตรวจจับดิซชาร์จบางส่วน

โดยที่	U	คือ	แหล่งจ่ายแรงดันสูง
	Z_f	คือ	ตัวกรองสัญญาณ (Filter)
	C_a	คือ	วัสดุทดสอบ (Test Object)
	C_k	คือ	ตัวเก็บประจุคัปปลิง (Coupling Capacitor)
	CD	คือ	อุปกรณ์รับสัญญาณ (Coupling Device)
	CC	คือ	สายเคเบิลนำสัญญาณ (Connecting Cable)
	MI	คือ	เครื่องมือวัด (Measuring Instrument)

หน้าที่การทำงานและคุณสมบัติสำคัญของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบเป็นดังนี้

1. แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูง ใช้ในการจ่ายแรงดันให้วงจรทดสอบและมีฟังก์ชัน

กำลังไฟฟ้าเพียงพอที่จะจ่ายโหลดได้ เช่น หม้อแปลงทดสอบซึ่งควรเป็นหม้อแปลงทดสอบที่ปราศจากดิซชาร์จบางส่วนที่แรงดันทดสอบ เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของหน่วยงานที่จัดทำขึ้นเพื่อการใช้งานเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ตัวกรองสัญญาณหรืออิมพีแดนซ์ Z_f ใช้ในการกรองสัญญาณรบกวนจากแหล่งจ่าย เช่น ฮาร์มอนิกส์และดิสซาร์จบางส่วนที่เกิดภายในหม้อแปลงทดสอบเองที่ใช้เป็นแหล่งจ่ายเป็นต้น และหน้าที่สำคัญอีกประการหนึ่ง คือ ป้องกันดิสซาร์จบางส่วนจากวงจรทดสอบที่ไหลย้อนลงกราวด์ผ่านทางแหล่งจ่าย ตัวกรองดังกล่าวต้องทนแรงดันทดสอบได้ และปราศจากดิสซาร์จบางส่วนที่แรงดันทดสอบ ตัวอย่างตัวกรอง เช่น ตัวเหนี่ยวนำ (High voltage inductor) หรือตัวกรองชนิดผ่านแถบความถี่ต่ำ (High voltage low-pass filter) เป็นต้น ดังนั้นในกรณีที่ใช้หม้อแปลงทดสอบปราศจากดิสซาร์จบางส่วนที่แรงดันทดสอบเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงจะไม่จำเป็นต้องกรองอีก

3. ตัวเก็บประจุคัปปลิ่ง C_k ใช้เป็นส่วนเชื่อมต่อหรือคัปปลิ่งสัญญาณความถี่สูงให้ครบวงจรระหว่าง C_a , C_k และ CD ซึ่งมีอิมพีแดนซ์ต่ำสำหรับดิสซาร์จบางส่วน ดังนั้นตัวเก็บประจุคัปปลิ่งต้องเป็นชนิดที่มีค่าความเหนี่ยวนำภายในต่ำ ปราศจากดิสซาร์จบางส่วนที่แรงดันทดสอบ

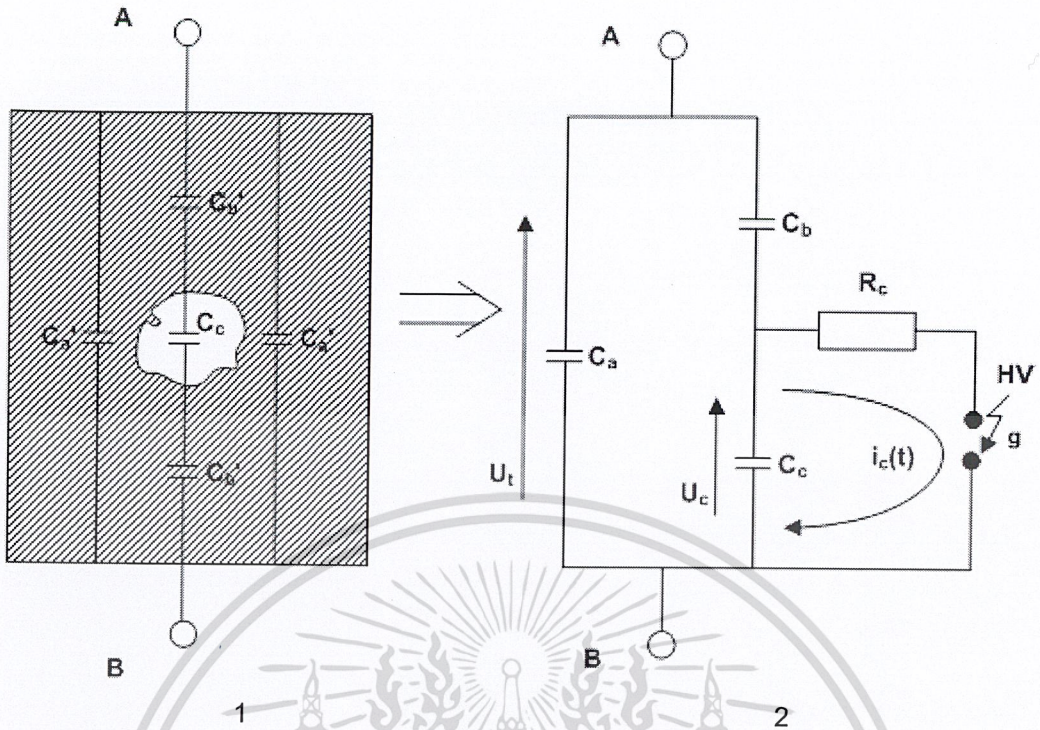
4. อุปกรณ์รับสัญญาณ CD และเครื่องมือวัด MI – อุปกรณ์ทั้งสองส่วนนี้จะทำงานร่วมกันคือทำหน้าที่อินทิเกรต (Integrate) กระแสพัลส์ i_t ที่ไหลในวงจรทดสอบ เนื่องจากการเกิดดิสซาร์จบางส่วน โดยมีสายนำสัญญาณ CC เป็นสายที่เชื่อมต่อระหว่าง CD กับ MI อุปกรณ์รับสัญญาณจะทำหน้าที่สำคัญอีกประการหนึ่ง คือ เป็นตัวกรองกระแสความถี่ต่ำ (50 - 400 Hz) และฮาร์มอนิกส์ต่างๆ จากแหล่งจ่ายแรงดันทดสอบไม่ให้เข้าไปที่เครื่องมือวัดได้ ส่วนเครื่องมือวัด MI จะทำหน้าที่อีก 3 ประการ คือ เป็นวงจรขยายสัญญาณ (Amplifier) เป็นวงจรกรองสัญญาณชนิดผ่านแถบ เพื่อลดสัญญาณรบกวนความถี่ต่ำที่มาจากแหล่งจ่ายแรงดันทดสอบกับสัญญาณรบกวนความถี่สูงที่มาจากคลื่นวิทยุและเป็นอุปกรณ์แสดงผลดิสซาร์จบางส่วน

หลักการการทำงานของวงจรพื้นฐานสำหรับการตรวจจับดิสซาร์จบางส่วนเริ่มจากค่อยๆ ป้อนแรงดันทดสอบจากแหล่งจ่าย U ผ่านตัวกรอง Z_f ให้กับวงจรทดสอบจนกระทั่งเกิดดิสซาร์จบางส่วนที่วัสดุทดสอบ C_a (ถ้าฉนวนของวัสดุทดสอบนั้นมีความบกพร่อง) ทำให้เกิดแรงดันตกที่ขั้วของวัสดุทดสอบ วัดประจุไฟฟ้าที่ถ่ายเทระหว่าง C_a กับ C_k โดยการอินทิเกรตกระแสพัลส์ เพื่อนำไปแสดงผลต่อไป

2.2.3 วงจรสมมูลของการเกิดดิสซาร์จบางส่วนภายใน [7]

โดยเหตุที่ดิสซาร์จบางส่วนภายในเนื้องนวนหรือในอุปกรณ์ซึ่งไม่สามารถสังเกตเห็นได้ด้วยตา ฉะนั้นเพื่อให้สามารถตรวจจับหรือวัดค่าดิสซาร์จบางส่วนในฉนวนได้ จึงมีการเขียนวงจรสมมูลสำหรับฉนวนที่มีโพรงก๊าซขึ้น เพื่อใช้ในการวิเคราะห์การเกิดและหาปริมาณดิสซาร์จบางส่วนภายใน ดังรูปที่ 2.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 วงจรสมมูลสำหรับฉนวนที่มีโพรงก๊าซ

ในรูปที่ 2.7-1 แสดงวัสดุฉนวนที่มีโพรงก๊าซภายในเนื้อฉนวนและฉนวนวางอยู่ระหว่างอิเล็กโทรด A-B โพรงก๊าซจะเขียนแทนด้วยความจุไฟฟ้า C_c ส่วนฉนวนที่ต่ออนุกรมกับโพรงก๊าซหรือ C_c เขียนแทนด้วยความจุไฟฟ้า C_b ส่วนที่ต่ออนุกรมกับ C_c นี้จะรวมกันได้เป็น C_b ส่วนฉนวนที่สมบูรณ์ที่อยู่โดยรอบของ C_c จะให้ค่าเป็น C_a และรวมกันในส่วนนี้จะได้เป็น C_a ดังรูปที่ 2.7-2 ซึ่งค่าความจุไฟฟ้าของวัสดุทดสอบ C_r จะมีค่าประมาณเท่ากับ C_a ซึ่งมีค่ามากกว่า C_b มากๆ นั่นคือ

$$C_r \approx C_a \square C_c > C_b \tag{2.2}$$

ถ้าป้อนแรงดัน U_t ที่ขั้ว A-B ทำให้แรงดันตกคร่อมโพรงก๊าซมีค่าสูงกว่าค่าแรงดันเบรกดาวนของโพรงก๊าซที่แทนด้วย C_c ก็จะเกิดเบรกดาวนในโพรงก๊าซ ซึ่งเขียนแทนด้วยแกป g (แล้วเอาตัวจ่ายแรงดันออก) มีความต้านทาน R_c ต่ออนุกรมอยู่เป็นตัวจำกัดกระแสดิซชาร์จ $i_c(t)$ ซึ่งมีลักษณะเป็นพัลส์ช่วงกว้างเป็นนาโนวินาที และทำให้เกิดแรงดันตก δU_c ที่โพรงก๊าซเกิดการปล่อยประจุออกมาเป็น

$$\Delta q_c = \delta U_c C_c \tag{2.3}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่าจะโดยวิธีใดก็ตาม การนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารถือว่าผิดกฎหมาย การนำเอกสารนี้ไปใช้

ถ่ายเทประจุของ C_b และ C_a ในวงจรสมมูล เป็นผลให้เกิดแรงดันตกที่ขั้ว A-B เท่ากับ δU_c ซึ่งหาได้จากประจุใน C_c คือ

$$\delta U_t = \frac{C_b \delta U_c}{C_b + C_a} \quad (2.4)$$

ค่าแรงดันตกนี้ไม่ให้ข้อมูลอะไรเกี่ยวกับ Δq_c เลย แต่เป็นสัดส่วนกับ $C_b \delta U_c$ ค่า δU_t นี้วัดได้เป็นพัลส์รูปซัน ขึ้นอยู่กับ $i_c(t)$

เมื่อแทนที่

$$\delta U_c = \frac{\delta q_c}{C_c} \quad (2.5)$$

จะได้

$$\delta U_t = \frac{C_b \delta q_c}{C_c (C_b + C_a)} \quad (2.6)$$

ค่าของ δU_t มีค่าเพียงมิลลิโวลต์ถึงโวลต์ ในขณะที่ δU_c มีค่าเป็นกิโลโวลต์ แต่โดยที่ไม่ทราบค่า C_c และ C_b จึงไม่อาจหาความสัมพันธ์ของ δU_t และ δU_c ได้ อย่างไรก็ตาม การดิสชาร์จในโพรงก๊าซ C_c เป็นผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงถ่ายเทประจุหรือกระแสในวงจรภายนอกที่สามารถตรวจวัดได้

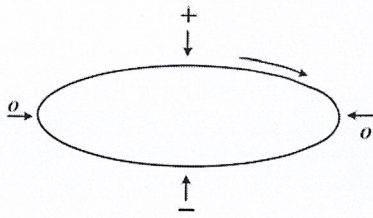
2.2.4 การแสดงผลของดิสชาร์จบางส่วน

การวัดค่า PD อาจวัดด้วยมิเตอร์ความถี่สูงออกมาเป็น micro-volt (μV) pico-coulomb (pC) ได้ แต่จะทราบเพียงขนาดของ PD เท่านั้น วิธีที่นิยมใช้แสดงผลวัด PD ในปัจจุบัน คือ การแสดงผลบนจอออสซิลโลสโคป ซึ่งอาจแสดงได้ 2 แบบ คือ ให้รูปพัลส์ของ PD ปรากฏบนฐานเวลารูปอิลิปส์ ซึ่งมีเครื่องหมายแสดงตำแหน่งยอดบวก ยอดลบ และตำแหน่งศูนย์ของรูปแรงดันทดสอบ ดังรูปที่ 2.8 ก), 2.8 ข) หรือแสดงให้รูปคลื่นพัลส์ PD ปรากฏบนฐานเวลารูปคลื่นไซน์ดังรูปที่ 2.8 ค), 2.8 ง)

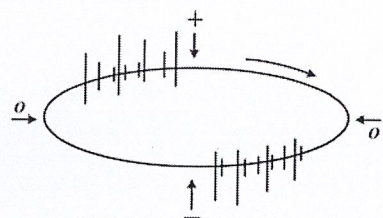
การแสดงผล PD บนฐานเวลารูปคลื่นไซน์มีผลดีที่วัดขนาดได้ถูกต้องและสังเกตตำแหน่งที่เกิดได้แน่นอน การแสดงผลบนฐานเวลารูปอิลิปส์มีข้อดี คือ แยกได้ว่า PD เกิดจากสาเหตุอะไร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

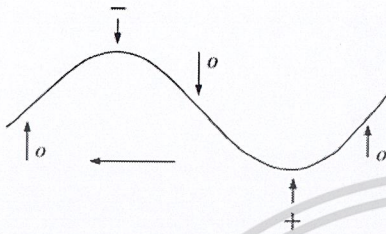
สนามทอสมุกกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง



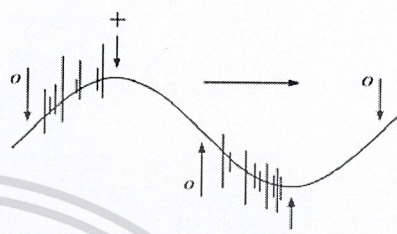
ก) ฐานเวลารูปอิลิปส์



ข) ตัวอย่าง PD บนฐานเวลารูปอิลิปส์



ค) ฐานเวลารูปคลื่นไซน์



ง) ตัวอย่าง PD บนฐานเวลารูปคลื่นไซน์

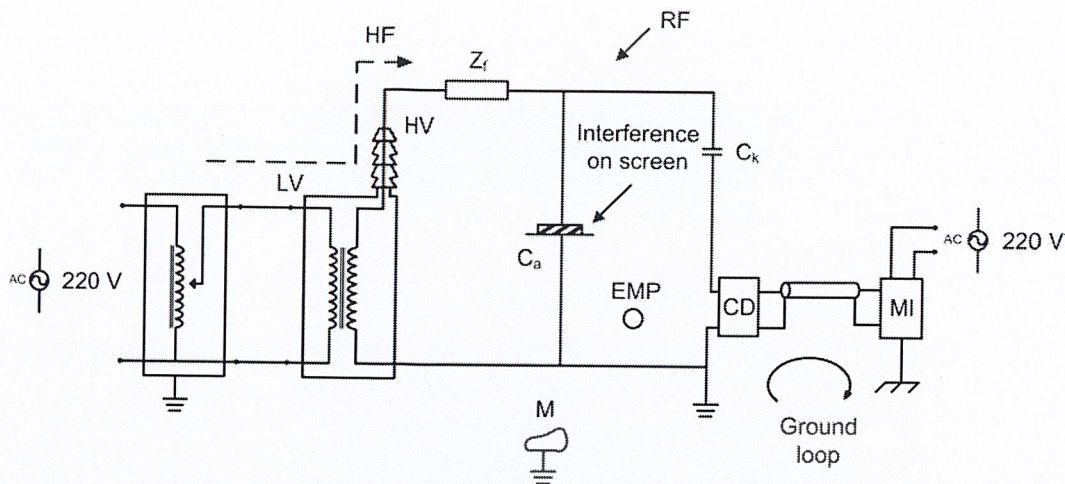
รูปที่ 2.8 การแสดงผลของ PD

2.2.5 เทคนิคการลดสัญญาณรบกวน

เนื่องจากสัญญาณ PD มีขนาดเล็ก ดังนั้นในการทดสอบ PD สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นย่อมมีผลต่อค่าที่วัดได้ แต่เราสามารถลดสัญญาณรบกวนให้เหลือน้อยลงเพื่อให้วงจรทดสอบมีความไวสูงขึ้นได้ โดยมีรายละเอียดของสัญญาณรบกวนที่มีผลกระทบและวิธีการลดสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้น ดังต่อไปนี้

2.2.5.1 สัญญาณรบกวนที่มีผลกระทบในการวัดดิซาร์จบางส่วน

สัญญาณรบกวนประกอบด้วย สัญญาณรบกวนที่เข้ามาทางอากาศ และทางแหล่งจ่าย นอกจากนี้ยังมีสัญญาณรบกวนเนื่องจากการดิซาร์จของอุปกรณ์ที่เป็นโลหะและวางอยู่ใกล้วงจรทดสอบหรือการกราวด์ไม่ดี การเกิดกราวด์ลูป (Ground loop) และเกิดสัญญาณออสซิลเลตเนื่องจากการเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์ไม่ดีหรือหลวม เป็นต้น รายละเอียดแสดงดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ตัวอย่างสัญญาณรบกวนที่ตำแหน่งต่างๆ

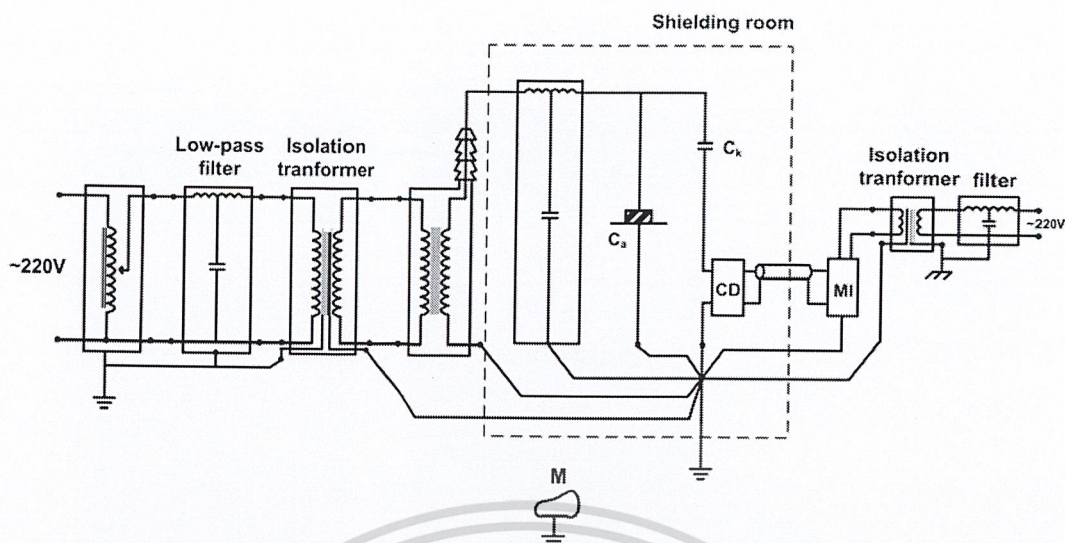
โดยที่

- Ground loop คือ การเกิดครบวงจรสายดิน
- M คือ โลหะที่ไม่ได้ต่อดินและวางอยู่ใกล้วงจรทดสอบ
- HF คือ สัญญาณรบกวนความถี่สูงที่เข้ามาจากแหล่งจ่ายได้แก่ ฮาร์มอนิกส์สูงๆ จากเมนโดยตรง จากอุปกรณ์พวกไครสโตร์ และดีสชาร์จบางส่วนจากหม้อแปลง เป็นต้น
- RF คือ คลื่นรบกวนวิทยุซึ่งอาจจะเป็นคลื่นวิทยุโดยตรง คลื่นรบกวนจากอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง หรือหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่อยู่ใกล้เคียง
- EMP คือ สัญญาณรบกวนจากการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กเนื่องจากการทำงานขอสวิตช์หรือไครสโตร์
- Interference on screen คือ สัญญาณรบกวนที่ซึบหรือสกรีนหรือที่ขั้วแรงดันต่ำของวัสดุทดสอบที่มีซึบขนาดใหญ่ เช่น เคเบิล เป็นต้น

2.2.5.2 การลดสัญญาณรบกวน

การลดสัญญาณความถี่สูง เช่น พวกรังสีฮาร์มอนิกส์สูงๆ จะใช้ตัวกรองแรงดันต่ำ และอาจจะเพิ่มหม้อแปลงขอลวดแยก (Isolation Transformer) ช่วยก็ได้ โดยต่อไว้ทางด้านขดลวดแรงต่ำของหม้อแปลงทดสอบ ในกรณีที่เกิดดีสชาร์จบางส่วนในหม้อแปลงทดสอบ จะต้องใช้ตัวกรองแรงสูงต่อทางด้านขดลวดแรงสูงของหม้อแปลงทดสอบ การลดสัญญาณรบกวน RF และ EMP ซึ่งเข้ามาทางอากาศ ทำได้โดยการทดสอบในห้องซึบ การแก้ปัญหาเรื่องกราวด์ลูปทำได้โดยการต่อกราวด์ร่วมกันเพียงจุดเดียว ตัวอย่างการแก้ปัญหาสัญญาณรบกวน แสดงในรูปที่ 2.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 ตัวอย่างการลดสัญญาณรบกวน

นอกจากการลดสัญญาณรบกวนโดยตรงแล้ว ยังมีวิธีการลดสัญญาณรบกวนทางอ้อมอีกหลายวิธีด้วยกัน ที่นิยมใช้กันมากคือ

1. วงจรทดสอบแบบสมดุลง ใช้ลดสัญญาณรบกวนแบบคอมมอนโหมด เช่น สัญญาณรบกวนที่เข้ามาทางแหล่งจ่าย เป็นต้น
2. การลดสัญญาณรบกวนโดยวิธี “ หน้าต่างเวลา ” (Time window method) วิธีนี้เป็นที่นิยมกันมากในปัจจุบัน โดยจะลดสัญญาณรบกวนที่ซิงโครไนซ์กับความถี่ของแหล่งจ่ายเท่านั้น เช่น สัญญาณรบกวนเนื่องจาก การทำงานของไครสโตลอร์ ด้วยการใช้นิวิตซ์ตัดหรือเปิดวงจรตรงตำแหน่งที่มีสัญญาณรบกวนเพื่อไม่ให้ไปปรากฏที่เอาต์พุตของเครื่องจับดิสซาร์จบางส่วน
3. การลดสัญญาณรบกวนโดยใช้การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (Digital signal processing, DPS) วิธีนี้นิยมใช้การลดสัญญาณรบกวนแบบแถบความถี่แคบ (narrow-band noise) เช่น สัญญาณวิทยุ AM (แบนด์วิธของแต่ละสถานีประมาณ 9 กิโลเฮิร์ตซ์) ออกจากสัญญาณดิสซาร์จบางส่วน ซึ่งมีแถบความถี่กว้างหลายร้อยกิโลเฮิร์ตซ์

2.2.6 การตรวจจับดิสซาร์จบางส่วนโดยตรวจจับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

(UHF method) [2]

การตรวจจับการเกิดดิสซาร์จบางส่วนในสมัยก่อนมีความจำเป็นที่ต้องนำอุปกรณ์ทดสอบนำมาทดสอบในห้องทดสอบโดยใช้วงจรทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60270 ซึ่งค่อนข้างยุ่งยากในการทดสอบ ไม่สามารถทำการทดสอบได้ขณะระบบหรืออุปกรณ์กำลังทำงาน ในปัจจุบันจึงมีการคิดค้นการตรวจจับดิสซาร์จบางส่วนโดยวิธีต่างๆ มากมาย โดยวิธีการตรวจจับดิสซาร์จที่เริ่มมีใช้กันในปัจจุบัน คือการตรวจจับการเกิดดิสซาร์จบางส่วนโดยใช้เทคนิคการตรวจจับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งทำให้การตรวจจับดิสซาร์จบางส่วนมีความ

สะดวกมากขึ้น คือสามารถตรวจจับดิสชาร์จบางส่วนได้ในขณะที่อุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงและระบบไฟฟ้ากำลังทำงาน ลดปัญหาสัญญาณรบกวนที่จะทำให้การตรวจจับดิสชาร์จผิดพลาดไป

2.2.6.1 ความแตกต่างของการวัดดิสชาร์จบางส่วนตามมาตรฐาน IEC 60270 และวิธี UHF method [9]

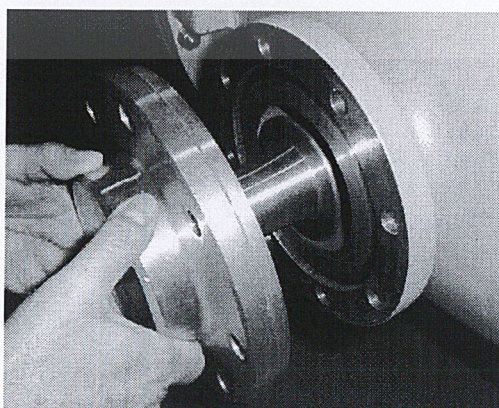
การวัดดิสชาร์จบางส่วนในย่านความถี่ UHF เป็นเครื่องมือสำคัญสำหรับการวิเคราะห์ดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดภายใน GIS แต่ไม่สามารถนำไปเปรียบเทียบกับการวัดแบบมาตรฐาน IEC 60270 ดังนั้นระบบการวัดแบบ UHF จะใช้วิธี “sensitivity check” เพื่อแสดงประสิทธิภาพของการวัด

ระบบ UHF เป็นระบบที่จัดตั้งขึ้นเพื่อตรวจสอบดิสชาร์จบางส่วนในสถานีไฟฟ้าย่อย และเริ่มนิยมใช้กันมากขึ้นกับหม้อแปลงไฟฟ้ากึ่ง การออกแบบเซ็นเซอร์ที่เป็น แบบ disk, spiral, monopole และ dipole จะขึ้นอยู่กับการใช้งานไปใช้

2.2.6.2 ประเภทของเซ็นเซอร์ [10]

1. เซ็นเซอร์แบบมาตรฐาน (Standard type sensor)

เซ็นเซอร์ UHF ตามมาตรฐานมักจะเป็นจานอลูมิเนียม จะสะดวกในการติดตั้งสำหรับ GIS ที่มีส่วนรองรับ ดังรูปที่ 2.11 ในเริ่มแรกเซ็นเซอร์จะถูกออกแบบเพื่อวัดทรานเซียนต์ใน GIS และในภายหลังจึงพบว่าเหมาะสำหรับการวัดดิสชาร์จบางส่วนมากที่สุด เนื่องจากขนาดของเซ็นเซอร์อยู่ในช่วงความยาวคลื่นที่ทำการวัด และรูปร่างทางเรขาคณิต ดังนั้นจากลักษณะความกว้างของรัศมีและช่องว่างจึงออกแบบเซ็นเซอร์เป็นสายอากาศแบบจานกลม นอกจากนี้เซ็นเซอร์แบบกรวย (cone-type) ก็มีลักษณะและความไวที่คล้ายกัน โดยทั่วไปเซ็นเซอร์ที่ตรวจจับแบบ UHF method จะคล้ายคลึงกับวิธี Conventional method ตามมาตรฐาน IEC 60270

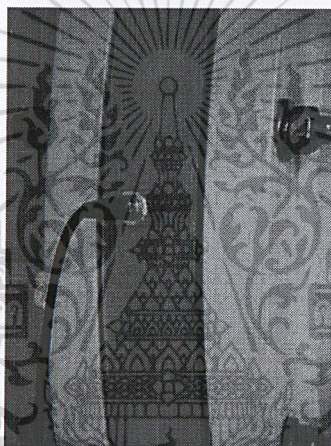


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ในเชิงการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกที่รูปที่ 2.11 การติดตั้งเซ็นเซอร์ UHF สำหรับ GIS เอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. เซ็นเซอร์ชนิด non-conventional

Integrated sensor

ฉนวนที่ห่อหุ้ม GIS ทั้ง 3 เฟส จะพิจารณาฉนวนที่แยก gas barrier รวมถึงการจัดลำดับขั้วไฟฟ้าทางเรขาคณิตเพื่อควบคุมความเครียดที่จะเกิดขึ้น สภาพการทำงานปกติอิเล็กทรอนิกส์จะฝังตัวอยู่ในวัสดุอีพอกซีเรซิน โดยใช้สกรูเป็นตัวเชื่อมต่อลงกราวด์เพื่อลดผลกระทบทางไฟฟ้าที่อาจเกิดขึ้นระหว่างช่องอากาศกับฉนวนอีพอกซีกับฉนวนอลูมิเนียม ถึงแม้ว่าจะเอาสกรูออกไปหนึ่งตัวก็ไม่ได้มีผลกระทบต่อการใช้งานรูป แต่ก็ยังมีความสามารถสัมผัสจุดกึ่งกลางได้ ดังนั้นจึงสามารถใช้สายอากาศ UHF ต่อเข้ากับท่อโดยตรง ซึ่งสามารถวัดค่าตามที่ต้องการได้จุดที่ Integrated sensor สัมผัสกับ barrier ดังรูปที่ 2.12

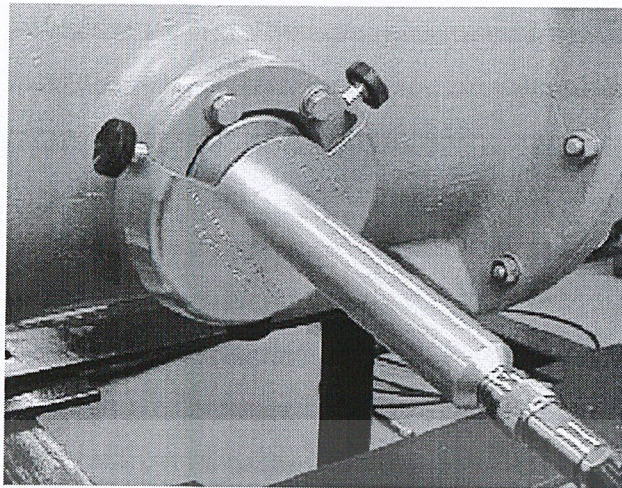


รูปที่ 2.12 Tapping point of the integrated sensor with plug-in unit

Mobile sensor

การติดตั้ง mobile sensor สามารถทำได้โดยไม่ต้องดำเนินงานเกี่ยวกับระบบสารสนเทศ โดยในการออกแบบ GIS ไม่ต้องคำนึงถึงช่องความดันที่เป็นกระจกปิดผนึกภายในเนื่องจากสามารถติดตั้งเซ็นเซอร์ด้านนอกได้ แต่เดิมช่องดังกล่าวจะทำหน้าที่ช่วยในการมองเห็น ตรวจสอบระยะทางแยกและเพื่อการติดตั้ง Window couplers ประกอบด้วยแผ่นอลูมิเนียมติดกับ Window ซึ่งในกรณีของอลูมิเนียมจะช่วยลดเสียงรบกวนจากภายนอก เช่นเดียวกับการติดตั้งเซ็นเซอร์ห่อหุ้ม GIS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 Model of a mobile window coupler for UHF PD measurements mounted on 123 kV GIS

2.2.6.3 ตัวอย่างการติดตั้งเซ็นเซอร์ UHF ในระบบไฟฟ้าแรงสูง [8]

1. Gas-insulated switchgear

จากการเฝ้าติดตามการตรวจจับ PD ใน GIS ที่ย่านความถี่ VHF และความถี่ต่ำ ไม่เหมาะสมที่จะนำไปตรวจจับ PD ขณะออนไลน์ เนื่องจากทั้งสองวิธีมีความไวต่อสัญญาณรบกวนจากภายนอก เช่น โครนาในอากาศที่เกิดจากสาย overhead ซึ่งขนาดแอมพลิจูดของสัญญาณรบกวนที่เกิดจากโครนาจะมีขนาดใหญ่กว่าแอมพลิจูดของสัญญาณ PD ที่เกิดภายใน GIS

การตรวจจับดิสชาร์จบางส่วนใน Gas-insulated switchgear (GIS) ด้วยวิธี UHF เป็นการตรวจจับดิสชาร์จบางส่วนที่ความถี่ UHF (300-3GHz) โดยการติดตั้งเซ็นเซอร์ซึ่งวิธี UHF จะมีข้อได้เปรียบคือ ดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดใน จะสร้างคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่อยู่ย่าน UHF โดยที่โครนาดิสชาร์จในอากาศจะไม่สร้างสัญญาณที่แสดงพลังงานในย่านความถี่ UHF ผลกระทบของสัญญาณรบกวนความถี่สูง เช่น เครื่องส่งสัญญาณโทรทัศน์ โทรศัพท์มือถือ หอควบคุมเรดาร์ จะใช้การวัดดิสชาร์จแบบ narrow band UHF detection ซึ่งเป็นกรวัดที่มีแบนด์วิธเพียงไม่กี่ MHz ใช้กับการวิเคราะห์สเปกตรัมความถี่ของสัญญาณ

2. Power Transformer

ดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นภายในหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังสามารถวัดได้โดยใช้เซ็นเซอร์ UHF เมื่อเกิดดิสชาร์จบางส่วนจะมีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแพร่กระจายออกมาซึ่งสามารถวัดได้ทุกส่วนของหม้อแปลงไฟฟ้าโดยสัญญาณจะไม่เกิดการสูญเสียพลังงาน และโครงสร้างภายในของหม้อแปลงก็ไม่มีผลต่อการแพร่ของสัญญาณ UHF จากการวิเคราะห์ลักษณะการแพร่ของสัญญาณ UHF ภายในหม้อแปลง พบว่าการลดทอนของสัญญาณ UHF จะเกี่ยวข้องกับระยะห่างของแหล่งกำเนิด PD ขึ้นอยู่กับโครงสร้างภายในของหม้อแปลง

ตำแหน่งของแหล่งกำเนิด PD และเส้นทางเดินของสัญญาณ UHF ซึ่งเส้นทางเดินจะมีอิทธิพลมากต่อสัญญาณ UHF ซึ่งมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นระหว่างแอมพลิจูดของสัญญาณ UHF และที่ประจุที่เกิดขึ้นของการเกิด PD การลดทอนของสัญญาณไม่สามารถบอกปริมาณของ PD (ประจุที่เกิดขึ้น) ได้ ถ้าไม่ทราบตำแหน่งของแหล่งกำเนิด PD

2.2.6.4 เหตุผลหลักของการเลือกใช้วิธี UHF Method [5]

1. ช่วงเวลาขาขึ้นของกระแสพัลส์ดิสชาร์จบางส่วนในก๊าซ SF₆ นั้นอยู่ใน ns หน่วย หรือน้อยกว่าจึงมีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแพร่ออกมาซึ่งมีช่วงความถี่ UHF รวมอยู่ด้วย
2. คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากดิสชาร์จบางส่วนนั้นสามารถแพร่ไปได้ในระยะทางไกลใน GIS Tank และมีการลดทอนของสัญญาณน้อยกว่าคลื่นเสียงดังนั้นสัญญาณ UHF จึงสามารถใช้เซ็นเซอร์หรือสายอากาศ ซึ่งติดตั้งไว้ในระยะทางที่ไกลจากแหล่งเกิดดิสชาร์จบางส่วนได้
3. วิธี UHF Method ไม่มีอิทธิพลของสัญญาณรบกวนต่างๆ จากคลื่นสื่อสารหรือคลื่นวิทยุที่มีช่วงความถี่ในย่าน VHF
4. วิธี UHF มีการตอบสนองต่อสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนได้ไวกว่า Conventional Method

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบสายอากาศลูปฟิโรไดโพลแอร์เรย์

3.1 ทฤษฎีเบื้องต้นเกี่ยวกับสายอากาศ (Antenna) [5]

สายอากาศ คือ อุปกรณ์ที่ใช้ส่งพลังงานในรูปแบบคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากแหล่งที่มีข้อมูล ไปยังที่ๆ ต้องการข้อมูล โดยใช้อากาศเป็นตัวกลาง หรือที่เรียกว่าการเชื่อมต่อแบบไร้สาย อาจกล่าวได้ว่าการเชื่อมต่อที่ไร้สายนั้นจำเป็นต้องมีสายอากาศไว้ใช้งานเสมอ

เดิมสายอากาศเรียกว่าเสาอากาศ เพราะลักษณะที่เป็นรูปเสา และการคั่นเคยโดยส่วนใหญ่กับรูปแบบของเสาอากาศที่วิ ถูกสร้างอยู่บนระนาบโลหะเพื่อให้สามารถคงรูปไว้ใช้งานได้ และถูกเรียกว่า “ สายอากาศ ” ในที่สุด

3.1.1 ประวัติความเป็นมาของสายอากาศ

ไม่มีข้อมูลที่แน่ชัดว่าใครเป็นผู้คิดค้นขึ้น แต่หลังจากได้มีการค้นคิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้นมาสายอากาศก็ได้ถูกคิดค้นขึ้นมาตามไปด้วย เมื่อย้อนหลังไปที่การใช้รหัสมอร์สในครั้งแรก พ.ศ. 2327 นั้นการส่งรหัสใช้งานกับสายนำสัญญาณและภายหลังที่ Heinrich Rudolf Hertz ได้ค้นพบหลักการของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแล้ว รหัสมอร์สจึงถูกนำมาใช้กับเสาอากาศเป็นครั้งแรกเมื่อ พ.ศ. 2433 จึงถือได้ว่าการกำเนิดของสายอากาศคือปี พ.ศ. 2433 นั้นเอง และต่อมาก็มีบทบาทในเหตุการณ์สำคัญๆ เช่น เหตุการณ์เรือโททานิคจมใน พ.ศ. 2455 และในสงครามโลกครั้งที่ 1 ช่วงปี พ.ศ. 2455 และในสงครามโลกครั้งที่ 1 ช่วงปี พ.ศ. 2457 ถึงปี พ.ศ. 2461 จากนั้นเสาอากาศจึงถูกพัฒนาต่อมาอย่างแพร่หลาย ถือได้ว่าตั้งแต่ปี พ.ศ. 2483 นั้นเป็นช่วงเวลาที่มีการพัฒนาเสาอากาศให้ก้าวหน้าขึ้นอย่างชัดเจน

เนื่องจากมนุษย์ต้องการการใช้งานเสาอากาศที่อ่อนตัวกว่าเดิม ในขณะที่ความนิยมของเสาอากาศเกิดขึ้นเป็นอย่างมากในทุกๆ อุปกรณ์การสื่อสารไร้สายจำเป็นต้องมีเสาอากาศที่เหมาะสมกับงานเฉพาะด้านนั้นๆ ประกอบกับภายหลังจากที่การใช้งานความถี่สูงขึ้น เสาอากาศก็ได้มีขนาดเล็กลงเรื่อยๆ จนไม่สามารถผลิตในลักษณะเสาได้อีกต่อไป เป็นที่มาของเสาอากาศแบบใหม่อีกหลายๆ แบบ และไม่ถูกเรียกว่าเสาอากาศอีกต่อไป เกิดเป็นคำใหม่ในการเรียกอุปกรณ์ชนิดนี้ว่า “สายอากาศ”

3.1.2 ประเภทของสายอากาศ

จากการพัฒนาเสาอากาศจึงเกิดสายอากาศขึ้นมากมายหลายประเภท สามารถแบ่งประเภทได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 ทฤษฎีพื้นฐานของสายอากาศ Disc Monopole

สายอากาศ Disc Monopole เริ่มถูกใช้งานครั้งแรกเมื่อ พ.ศ. 2513 ในช่วงเริ่มแรก ยังไม่มีการนำสายอากาศชนิดนี้มาพัฒนาเพื่อไปใช้งาน เนื่องจากสาเหตุที่สายอากาศชนิดนี้มีประสิทธิภาพต่ำ แต่มีข้อดีตรงที่มีขนาดเล็ก ซึ่งจะเหมาะกับงานในด้านความถี่สูง UHF ขึ้นไป

กล่าวคือในปัจจุบันเริ่มมีการนำย่านความถี่สูงมาใช้งานมากขึ้น สายอากาศชนิดนี้จึงได้มีการพัฒนาขึ้นเพื่อนำมาใช้งานกับอุปกรณ์ขนาดเล็กเช่น โทรศัพท์มือถือ ลักษณะอุปกรณ์จึงแบนคล้ายแผ่นทองแดงทั่วไป และเนื่องจากถูกออกแบบมาให้ใช้งานกับความถี่ใดความถี่หนึ่งโดยเฉพาะ รูปร่างจึงอิงตามความเหมาะสมของความถี่ใช้งานเป็นหลัก และรูปร่างจะแตกต่างกันไปเนื่องจากสายอากาศชนิดนี้ออกแบบได้ง่ายที่สุด จึงมีนักวิจัยให้ความสนใจออกแบบเป็นอย่างมาก

ประเภทของสายอากาศ Disc Monopole

สายอากาศ Disc Monopole มีหลายประเภท แบ่งตามการใช้งานได้ดังนี้

1. สายอากาศแบบแพร่กระจายคลื่นตามแนวกว้าง เพื่อการสื่อสารตามแนวกว้างของแผ่นทองแดงสายอากาศแบบนี้จะมีทิศทางการส่งสัญญาณตั้งฉากกับแผ่นทองแดง
2. สายอากาศที่แพร่กระจายคลื่นตามแนวยาวเพื่อการสื่อสารในทิศทางตัดขวางของแผ่นทองแดงสายอากาศแบบนี้จะมีทิศทางการส่งสัญญาณตามแนวเดียวกับแผ่นทองแดง
3. สายอากาศอื่นๆ เป็นสายอากาศที่ออกแบบมาเฉพาะการใช้งานชนิดหนึ่งๆ อาจมีมากกว่า สองทิศทางหรืออาจปรับเปลี่ยนทิศทางได้ตามความถี่ที่ใช้งาน

3.1.4 ทฤษฎีพื้นฐานของสายอากาศล็อกพีรีโอดิกไดโพลแอร์เรย์ [3],[6]

สายอากาศล็อกพีรีโอดิกไดโพลแอร์เรย์ เป็นสายอากาศประเภทความถี่อิสระ โดยคุณสมบัติทางไฟฟ้าเปลี่ยนในลักษณะเป็นรายคาบตามค่าลอการิทึมของความถี่ ในขณะที่ความถี่ f_1 เลื่อนไปอีกความถี่หนึ่งคือ f_2 ภายในย่านความถี่ของสายอากาศ จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ทั้งสองดังนี้

$$f_2 = f_1 / \tau \quad (3.1)$$

โดยที่ f_1 คือ ความถี่ต่ำสุดของการใช้งาน

f_2 คือ ความถี่สูงสุดของการใช้งาน

τ คือ พารามิเตอร์ในการออกแบบซึ่งเป็นค่าคงที่ โดยที่ $\tau < 10$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิได้อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งจากคุณลักษณะของการเปลี่ยนแปลงในลักษณะเป็นรายคาบตามค่าลอการิทึมของความถี่ ทำให้เมื่อเราทำการพล็อตค่าของอินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศในลักษณะฟังก์ชันของลอการิทึมความถี่ จะได้ลักษณะเป็นรายคาบของค่าอิมพีแดนซ์ ดังนั้น ชื่อว่า ล็อกพีรีโอดิกไดโพลแอร์เรย์ ก็มีสาเหตุมาจากการแปรผันเป็นรายคาบที่ขึ้นอยู่กับค่าลอการิทึมของความถี่

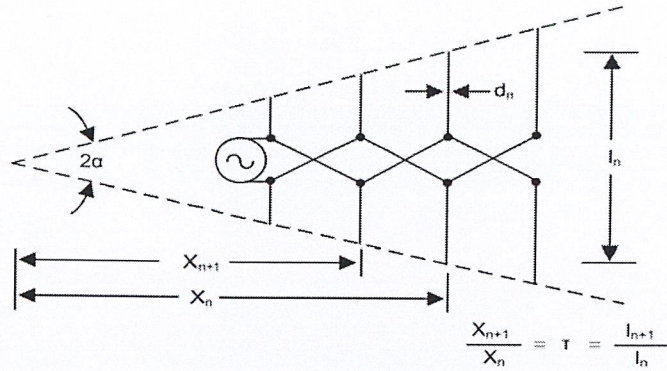
สายอากาศล็อกพีรีโอดิกไดโพลแอร์เรย์ (LPDA) เป็นสายอากาศที่มักนำมาใช้ในย่าน VHF เป็นส่วนมาก สายอากาศ LPDA เป็นสายอากาศบรอดแบนด์ที่มีความสามารถในเรื่องของอัตราขยายและอินพุทอิมพีแดนซ์ที่คงที่ตลอดแบนด์วิธ ซึ่งจะมีค่าอัตราขยายตั้งแต่ 6.5-10.5 dB ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับจำนวนไดโพลที่ยาวเป็นครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น แต่ในทางปฏิบัติแล้วส่วนใหญ่อัตราขยายจะถูกจำกัดอยู่ที่ 6.5-7.5 dB สายอากาศ LPDA เป็นสายอากาศที่วิวัฒนาการมาจากสายอากาศแบบสไปรอลแบบบรอดแบนด์ จากรูปที่ 3.2 แสดงแบบแผนไดอะแกรมของ LPDA และได้กำหนดมุม α , ความยาวของไดโพล L_n , เส้นผ่านศูนย์กลางของอิลิเมนต์ d_n และตำแหน่งของอิลิเมนต์ เมื่อเทียบกับมุมเอเพ็กซ์ของสามเหลี่ยม X_n r ที่ถูกแสดงนี้เป็นอัตราส่วนของความยาวไดโพลหรือตำแหน่งของไดโพลต่อความยาวหรือตำแหน่งของไดโพลตัวถัดไปซึ่งมีขนาดใหญ่กว่า อัตราส่วน r มีค่าคงที่ตลอดความยาวของแอร์เรย์ จากรูปนี้ยังแสดงให้เห็นว่า ไดโพลทั้งหมดจะต้องถูกเชื่อมเข้ากับสายส่งตรงกลางที่มีการทำให้เฟสตรงข้ามกันระหว่างไดโพล ในทางปฏิบัติสายส่งตรงกลางนี้จะมีอยู่ 2 รูปแบบ คือ รูปแบบที่ค่าอิมพีแดนซ์สูง และ รูปแบบที่ค่าอิมพีแดนซ์ต่ำ

รูปแบบที่ค่าอิมพีแดนซ์สูงนี้ จะออกแบบสำหรับอินพุทอิมพีแดนซ์แบบสมดุขขนาด 300 Ω ซึ่งประกอบด้วยบวมเดี่ยวซึ่งจะต้องเป็นฉนวนจากไดโพลแอร์เรย์ทั้งหมด หรือพูดอีกนัยหนึ่งก็คือต้องให้ไดโพลต่อกับบวมที่เป็นฉนวนไฟฟ้า สายส่งที่ใช้ในกรณีที่ว่านี้จะใช้สายส่งแบบเปิดขนาด 2 ตัวนำที่มีค่าอิมพีแดนซ์สูง ซึ่งจะแผ่ไปตามความยาวของสายอากาศด้วยการเชื่อมต่อไขว้สลับจากไดโพลต่อไดโพล เพื่อให้ได้ลักษณะเฟสที่ตรงข้ามกัน รูปแบบที่ค่าอิมพีแดนซ์สูงนี้ควรที่จะจำกัดขอบเขตการออกแบบที่ความถี่ต่ำ (อาทิความถี่ในย่าน HF) ซึ่งทำให้ระยะห่างระหว่างลวดตัวนำ 2 ตัวของสายมีลักษณะเป็นเศษส่วนของความยาวคลื่นค่าต่ำๆ

ส่วนอีกรูปแบบหนึ่งซึ่งเป็นรูปแบบที่ค่าอิมพีแดนซ์ต่ำนี้ จะออกแบบเพื่อให้มีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ 75 Ω โดยไม่สมดุข ซึ่งประกอบด้วยบวมที่เป็นตัวนำ 2 ตัวมาขนานกัน โดยแผ่ออกไปตามความยาวของสายอากาศ เพื่อนำมาทำเป็นสายส่งตัวนำ 2 ตัวที่มีขนาดอิมพีแดนซ์ต่ำ ซึ่งสามารถทำให้เกิดเฟสตรงข้ามกันจากไดโพลตัวหนึ่งไปยังอีกตัวหนึ่งได้ ด้วยการสลับการต่อไดโพลไปตามสายส่งที่เป็นบวม 2 ตัว สายป้อนแบบสายโคแอกเซียลอาจจะสอดเข้าไปในบวมอันหนึ่ง และเชื่อมต่อเข้ากับปลายของไดโพลสั้นของแอร์เรย์ โดยลักษณะโครงสร้างนี้ แอร์เรย์จะแสดงตัวเป็นบาลันตัวหนึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาดูเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 แสดงแบบแผนไดอะแกรมของสายอากาศ LPDA

การป้อนสัญญาณแก่สายอากาศล็อกพีรีโอดิกไดโพลแอร์เรย์ (LPDA) ซึ่งทำได้ง่ายตามแสดงในรูปที่ 3.2 แต่ละอีลิเมนต์จะใช้ตัวฟีดเตอร์แบบสมมูลในการป้อน และจะป้อนสัญญาณโดยมีการเลื่อนเฟสไป 180 องศา ด้วยการต่อสลับอีลิเมนต์ที่กัน โดยในหัวข้อนี้ คำว่าฟีดเตอร์ของสายอากาศจะให้คำจำกัดความคือ สายที่ทำการเชื่อมโยงแต่ละอีลิเมนต์ สายป้อนสัญญาณจะเป็นสายที่อยู่ระหว่างสายอากาศกับสายส่ง

ค่าความต้านทานอินพุทของ LPDA, R_0 จะเปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ ซึ่งจะแสดงคุณสมบัติที่เป็นพีรีโอดิกขึ้น ขอบเขตของความต้านทาน ณ จุดที่ทำการป้อนจะขึ้นอยู่กับค่าคาแรคเตอร์ิสติกอิมพีแดนซ์, Z_0 ของตัวฟีดเตอร์ของสายอากาศ ค่า R_0 อาจจะถูกเลือกให้อยู่กับที่บางค่าได้ โดยการเลือกค่า Z_0 นั่นคือ โดยการเลือกขนาดของตัวนำและระยะห่างของตัวนำที่เป็นตัวฟีดเตอร์ของสายอากาศ องค์ประกอบอื่นๆ ที่มีผลต่อค่า R_0 ก็คือค่าคาแรคเตอร์ิสติกอิมพีแดนซ์โดยเฉลี่ยของไดโพลตัวหนึ่ง Z_a และองค์ประกอบของค่าระยะห่างโดยเฉลี่ย σ การประมาณค่าความสัมพันธ์จะเป็นไปตามสมการ

$$R_0 = \frac{Z_0}{\sqrt{1 + z_0 / 4\sigma Z_a}} \quad (3.2)$$

โดยที่	R_0	คือ	ระดับค่าความต้านทานการแพร่กระจายคลื่นโดยเฉลี่ยของอิมพีแดนซ์ของ LPDA
	Z_0	คือ	ค่าคาแรคเตอร์ิสติกอิมพีแดนซ์ของตัวฟีดเตอร์ของสายอากาศ
	Z_a	คือ	ค่าคาแรคเตอร์ิสติกอิมพีแดนซ์ของไดโพลหนึ่งตัวโดยเฉลี่ย $120[\ln(l_n/dia_n) - 2.25]$
	σ	คือ	องค์ประกอบของระยะห่างโดยเฉลี่ย σ / \sqrt{r}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย

ถ้าอีลิเมนต์ทั้งหมดมีเส้นผ่าศูนย์กลางเหมือนกันแล้ว อัตราส่วน i/dia_i ของอีลิเมนต์นั้นการคำนวณจะเพิ่มขึ้นตามความยาวของแอร์เรย์ ในทางอุดมคติแล้วอัตราส่วนนี้ควรจะมีค่าคงที่ แต่ไปใช้

ในทางปฏิบัติประสิทธิภาพในเรื่องของ SWR ของ LPDA แบบย่านความถี่เดียวจะไม่ลดลงไป ถ้าอีลิเมนต์ทั้งหมดมีเส้นผ่านศูนย์กลางเดียวกันหมด แต่ในการทำให้การเปลี่ยนแปลงค่า Standing Wave Ratio (SWR) ต่ำที่สุด ในกรณีการออกแบบในหลายย่านความถี่นั้น LPDA อาจจะต้องสร้างโดยที่เส้นผ่านศูนย์กลางของอีลิเมนต์เพิ่มขึ้นตามลำดับจากด้านหน้าไปด้านหลังของแอร์เรย์ ซึ่งเป็นการใช้ประโยชน์ตามโครงสร้าง สำหรับอีลิเมนต์ประเภทพวงตนเอง คือ ตัวนำที่ใหญ่ขึ้นจะอยู่ ณ ตำแหน่งอีลิเมนต์ที่ยาวขึ้น

ค่า SWR จะเปลี่ยนแปลงในลักษณะพีริโอดิกกับความถี่ ค่าโดยเฉลี่ยของ SWR จะขึ้นอยู่กับ R_0 ซึ่งมีค่าต่ำสุดโดยประมาณเท่ากับ 1.1:1 ที่ค่า σ_{opt} และจะมีค่าเท่ากับ 1.8:1 ที่ค่า $\sigma = 0.05$ ในกรณีอื่นการเปลี่ยนแปลงค่า SWR ในลักษณะพีริโอดิก (พร้อมกับค่าความถี่เปลี่ยนแปลง) จะสวิงตัวอยู่เหนือขอบเขตที่กว้างขึ้นของค่า SWR โดยมีค่าของ σ ที่ต่ำสุด ขอบเขตของค่า SWR เหล่านี้สามารถที่จะยอมรับค่าได้เมื่อใช้สายป้อนสัญญาณที่เป็นสายโคแอกเซียลขนาดมาตรฐาน 52 Ω และ 72 Ω อย่างไรก็ตาม สามารถที่จะทำให้เกิดการแมทช์ที่ค่า SWR เท่ากับ 1:1 ได้ที่ปลายของเครื่องส่ง โดยการใช้ทรานสมัทช์แบบโคแอก-ต่อ-โคแอกทรานสมัทช์จะทำให้วงจรกรองผ่านความถี่ต่ำของเครื่องส่งเห็นว่า มีโหลดขนาด 52 Ω ที่ความถี่แต่ละค่าภายในย่านความถี่ผ่านของแอร์เรย์ ทรานสมัทช์จะยังกำจัดการแพร่กระจายคลื่นฮาร์โมนิกที่อาจเกิดขึ้นได้ อันเนื่องมาจากธรรมชาติของการที่อิสระจากความถี่ของแอร์เรย์

R_0 ควรจะเลือกใช้กับบาลันที่เจาะจงและคุณสมบัติของสายป้อนสัญญาณที่เจาะจงด้วย กรณีของแอร์เรย์ในย่าน HF ค่า R_0 เท่ากับ 208 Ω จะสามารถใช้งานได้ดีกับบาลันขนาด 4:1 และกับสายโคแอกเซียลขนาด 52 Ω การที่จะป้อนด้วยสายโคแอกเซียล 52 Ω โดยตรงนั้นไม่อาจเป็นไปได้

สำหรับการออกแบบในย่านความถี่ VHF และ UHF ตัวฟีดเดอร์ของสายอากาศอาจจะใช้เป็นบูมได้ด้วย ด้วยเทคนิควิธีนี้ ครึ่งอีลิเมนต์จะถูกพวงด้วยตัวนำที่เป็นท่อของตัวฟีดเดอร์ ซึ่งจะเว้นระยะห่างไว้ใกล้ๆ กัน ถ้า R_0 ที่เลือกมีค่า 72 Ω จะสามารถป้อนด้วยสายเคเบิลขนาด 72 Ω ได้โดยตรง จะมีบาลันที่มีประสิทธิภาพเกิดขึ้น ถ้าสอดสายโคแอกเซียลผ่านหนึ่งในตัวนำฟีดเดอร์จากด้านหลังของแอร์เรย์ไปยังจุดที่ทำการป้อน

ถ้าแบนด์วิธในการออกแบบของแอร์เรย์ค่อนข้างน้อย (ย่านความถี่เดียว) เป็นไปได้ที่เราจะทำการออกแบบแอร์เรย์ให้มีค่า R_0 เท่ากับ 100 Ω และใช้ส่วนที่ทำการแมทช์ซึ่งแบบคลื่นขนาด 1/4 ที่ทำจากสายโคแอกเซียลไปไว้ระหว่างจุดที่ทำการป้อนกับสายป้อนสัญญาณขนาด 52 Ω ในบางกรณีเราจะเลือกเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวฟีดเดอร์ของอีลิเมนต์ที่ขึ้นอยู่กับข้อควรพิจารณาในทางกล ระยะห่างของตัวฟีดเดอร์ตามที่ต้องการจะได้จากการคำนวณ

การต่อท้ายที่ตัวฟีดเดอร์ด้วย Z_{load} ซึ่งเป็นวงจรซึ่งทำการลัดวงจรที่ระยะเท่ากับ $\lambda_{max}/8$ หรือต่ำกว่าอีลิเมนต์หมายเลข 1 ตัวที่ยาวที่สุด ซึ่งเราจะทำการลัดวงจรที่ปลายไปใช้

อีลิเมนต์หมายเลข 1 ซึ่งจะทำให้อีลิเมนต์ที่ถูกลัดวงจรแสดงตัวเป็นพาสซีฟเฟลคเตอร์ที่ความถี่ต่ำสุด ผู้สร้างบางคนจะระบุว่า Z_1 อาจจะถูกกำจัดไปได้โดยไม่มีผลอะไรต่อผลลัพธ์ที่ได้ สตัมป์อิมพีแดนซ์ที่ทำการเทอร์มินเนชันนี้จะใช้เพิ่มค่าอัตราส่วนโอบหน้าต่อโอบหลังสำหรับความถี่ที่ต่ำที่สุด ซึ่งควรปรับความยาวของสตัมป์เพื่อให้ได้ผลออกมาที่ดีที่สุด ซึ่งในบางกรณีควรจะยาวกว่า $\lambda_{\max}/8$ และในกรณีที่ใช้ในย่านความถี่ HF ลวดที่ทำการจัมพ์เพื่อลัดวงจรควรจะยาว 6 นิ้ว เพื่อใช้เป็น Z_1

เป็นที่สังเกตว่า เราสามารถที่จะเพิ่มค่าอัตราส่วนโอบหน้าต่อโอบหลังที่ความถี่ต่ำสุดได้ด้วยการย้ายพาสซีฟเฟลคเตอร์ (อีลิเมนต์หมายเลข 1) ไปไว้ที่ระยะเท่ากับ 0.15λ ถึง 0.25λ โดยอยู่ข้างหลังอีลิเมนต์หมายเลข 2 ซึ่งสิ่งเดียวกันนี้ได้นำมาใช้ในกรณีของสายอากาศยาคิพาราซิติกเฟลคเตอร์แบบธรรมดาซึ่งมีผลทำให้เราจำเป็นต้องเพิ่มความยาวของบูมขึ้น อัตราส่วนโอบหน้าต่อโอบหลังจะเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับความถี่เพิ่มขึ้นเนื่องจากอีลิเมนต์ภายในที่ตัวสั้นกว่าและมีมากกว่านั้นเป็นตัวก่อให้เกิดบริเวณแอกทีฟ และอีลิเมนต์ที่ยาวกว่าจะกลายเป็นตัวรีเฟลคเตอร์ที่เสริมขึ้นมา

3.2 ขั้นตอนการออกแบบสายอากาศล็อกพรีโอติกไดโพลแอร์เรย์ [3]

1. เลือกช่วงความถี่ที่ต้องการตรวจจับ PD โดยเลือกความถี่สูงสุดของการใช้งานเท่ากับ 300 MHz และความถี่ต่ำสุดของการใช้งานเท่ากับ 150 MHz โดยใช้สมการดังนี้

$$B = f_{\max} / f_{\min} \quad (3.3)$$

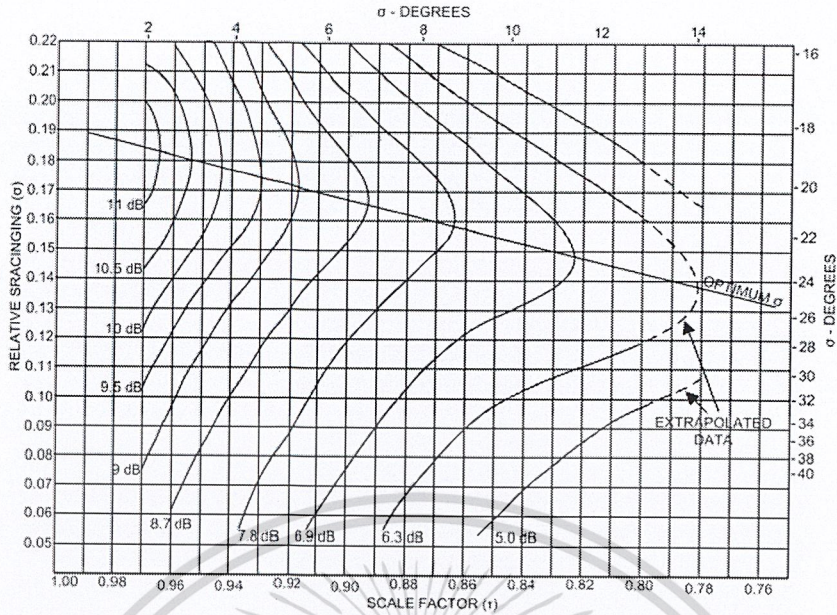
$$B = 300 / 150$$

$$B = 2$$

โดยที่ B คือ ขนาดของแบนด์วิธที่ใช้งาน

2. เลือกค่าของ τ และ σ เพื่อให้ได้ค่าเรคตีวิตีตามที่กำหนด โดยใช้กราฟจากรูปที่ 3.3 ซึ่งในกรณีนี้เราจะกำหนดค่าของ τ เท่ากับ 0.93 และ σ เท่ากับ 0.07 จากกราฟรูปที่ 3.3 จะได้ค่าไดเรคตีวิตีเท่ากับ 7.8 dB

โดยที่ τ คือ พารามิเตอร์ในการออกแบบซึ่งเป็นค่าคงที่
 σ คือ spacing constant



รูปที่ 3.3 ลักษณะทางเดินของกราฟที่คำนวณได้ของค่าไตรีคติวิตี

3. หาค่าของ α โดยใช้สูตรจากสมการดังนี้

$$\cot \alpha = 4\sigma / (1 - \tau) \tag{3.4}$$

$$\cot \alpha = 4(0.07) / (1 - 0.93)$$

$$\alpha = 14^\circ$$

โดยที่ α คือ The half apex angle

4. หาค่า K_1 และ K_2 โดยหาได้จากสมการดังนี้

$$K_1 = 1.01 - 0.519\tau \tag{3.5}$$

$$K_1 = 1.01 - 0.519(0.93)$$

$$K_1 = 0.52733$$

$$K_2 = 7.10\tau^3 - 21.3\tau^2 + 21.98\tau - 7.30 + \sigma(21.82 + 66\tau + 62.12\tau^2 - 18.29\tau^3) \tag{3.6}$$

$$K_2 = 7.10(0.93^3) - 21.3(0.93^2) + 21.98(0.93) - 7.30 + 0.07(21.82 + 66(0.93) + 62.12(0.93)^2 - 18.29(0.93)^3)$$

$$K_2 = 0.39187$$

โดยที่ K_1 คือ lower truncation constant
 K_2 คือ upper truncation constant

5. หาค่า L_1 และ L_u โดยหาได้จากสมการดังนี้

$$L_n = K_n \times \lambda_n \quad (3.7)$$

$$\begin{aligned} L_1 &= K_1 \times \lambda_1 & L_u &= K_u \times \lambda_u \\ L_1 &= 0.52733 \times 2 & L_u &= 0.39187 \times 1 \\ L_1 &= 1.05466 \text{ เมตร} & L_u &= 0.39187 \text{ เมตร} \end{aligned}$$

โดยที่ L_1 คือ ระยะของอีลีเมนต์ที่ยาวที่สุด
 L_u คือ ระยะของอีลีเมนต์ที่สั้นที่สุด

6. หาค่า R_1 และ R_u โดยหาได้จากสมการดังนี้

$$R_n = \frac{2L_n\sigma}{1-\tau} \quad (3.8)$$

$$\begin{aligned} R_1 &= \frac{2L_1\sigma}{1-\tau} & R_u &= \frac{2L_u\sigma}{1-\tau} \\ R_1 &= \frac{2(1.05466)(0.07)}{1-0.93} & R_u &= \frac{2(0.39187)(0.07)}{1-0.93} \\ R_1 &= 2.10932 \text{ เมตร} & R_u &= 0.78374 \end{aligned}$$

โดยที่ R_n คือ virtual apex distance

7. หาความยาวของสายอากาศได้จากสมการดังนี้

$$\text{Length} = R_1 - R_u \quad (3.9)$$

$$\text{Length} = 1.32258 \text{ เมตร}$$

8. จำนวนอีลีเมนต์ทั้งหมดของสายอากาศ (N) โดยหาได้จากสมการดังนี้

$$N = 1 + \frac{\log(K_2 / K_1) + \log(f_{\min} / f_{\max})}{\log \tau} \quad (3.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เฉพาะอาจารย์ผู้สอนเท่านั้น ไม่ควรนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$N \approx 14$$

9. หาความยาวของแต่ละอีลีเมนต์โดยหาได้จากสมการดังนี้

$$L_{n+1} = \tau L_n \quad (3.11)$$

โดยที่ L คือ ความยาวของแต่ละอีลีเมนต์ของสายอากาศ (เมตร)
n คือ 1, 2, 3...

จากสมการที่ (2.16) สามารถคำนวณหาความยาวของแต่ละอีลีเมนต์ของสายอากาศได้ดังนี้
 $L_2 = 0.98083$, $L_3 = 0.91140$, $L_4 = 0.84630$, $L_5 = 0.78700$, $L_6 = 0.73191$, $L_7 = 0.68067$
 $L_8 = 0.63302$, $L_9 = 0.58871$, $L_{10} = 0.54750$, $L_{11} = 0.50918$, $L_{12} = 0.47353$
 $L_{13} = 0.44039$, $L_{14} = 0.40956$

10. หาระยะห่างของแต่ละอีลีเมนต์โดยหาได้จากสมการดังนี้

$$d_1 = R_1(1-\tau) \quad (3.12)$$

$$d_1 = 2.10932(1-0.93)$$

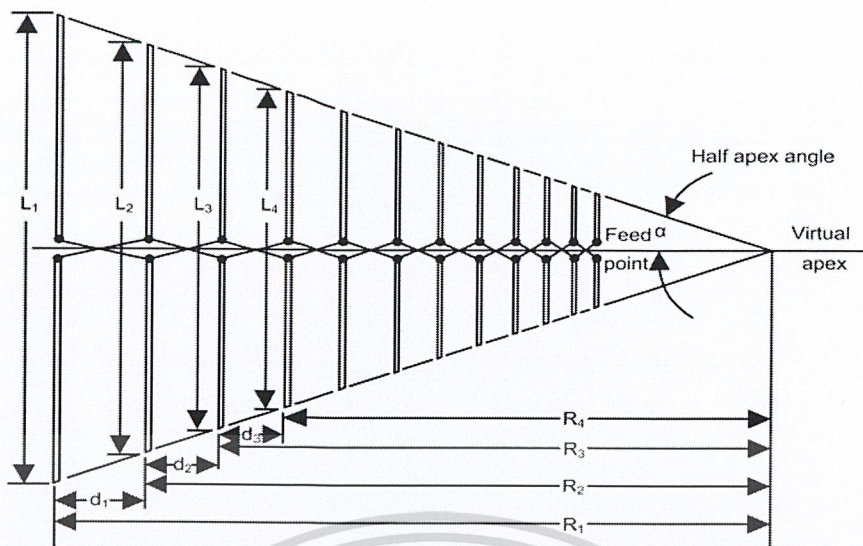
$$d_1 = 0.14765 \text{ เมตร}$$

$$d_{n+1} = \tau d_n \quad (3.13)$$

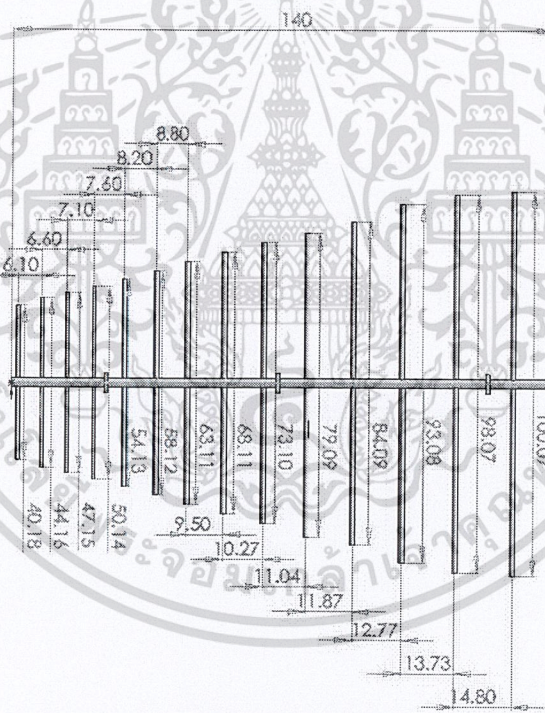
โดยที่ d_n คือ ระยะห่างของอีลีเมนต์ที่ n กับ n+1 (เมตร)
n คือ 1, 2, 3...

จากสมการที่ (2.18) สามารถคำนวณหาระยะห่างของแต่ละอีลีเมนต์ของสายอากาศได้ดังนี้
 $d_2 = 0.13731$, $d_3 = 0.12770$, $d_4 = 0.11876$, $d_5 = 0.11045$, $d_6 = 0.10271$, $d_7 = 0.13731$
 $d_8 = 0.08884$, $d_9 = 0.08262$, $d_{10} = 0.07683$, $d_{11} = 0.07145$, $d_{12} = 0.06645$
 $d_{13} = 0.06180$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 โครงสร้างสายอากาศลือกพีริโอดิกไดโพลแอร์เรย์



รูปที่ 3.5 Dimension ของสายอากาศ LPDA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

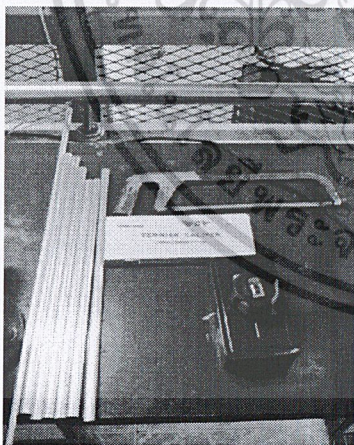


รูปที่ 3.6 รูปจำลองสายอากาศ LPDA

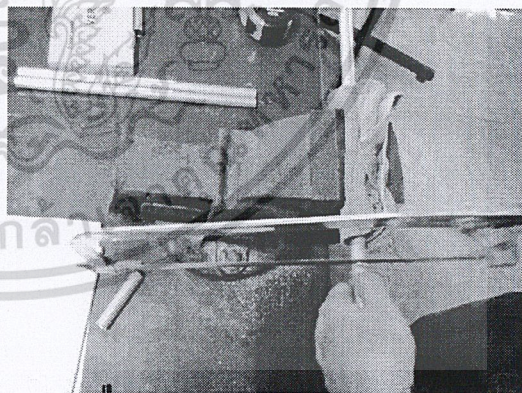
3.3 การประกอบสร้างสายอากาศ

1. นำข้อมูลที่ได้ทำการออกแบบในหัวข้อที่ 3.2 มาออกแบบสายอากาศดังนี้

1.1. นำท่ออลูมิเนียมที่เส้นผ่าศูนย์กลางขนาดต่างๆ มาตัด ทำเป็นกิ่งต่างๆของสายอากาศและตัวแกนกลางของสายอากาศโดยตัดตามระยะที่ได้ออกแบบไว้ดังนี้



รูปที่ 3.7 เตรียมอุปกรณ์



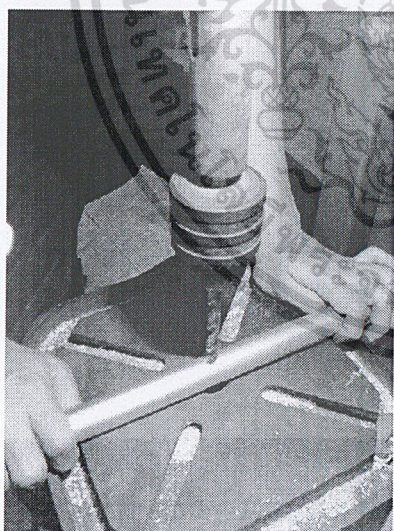
รูปที่ 3.8 ตัดท่ออลูมิเนียมตามขนาดที่ออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

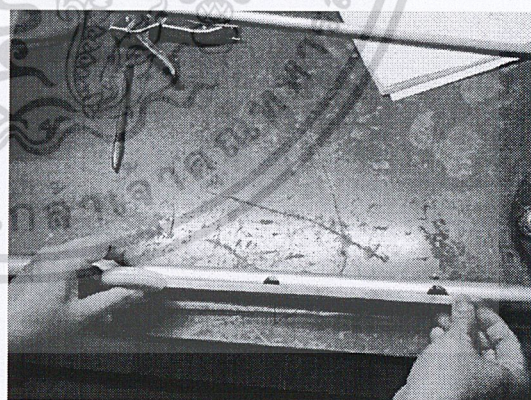
ตารางที่ 3.1 แสดงส่วนประกอบของสายอากาศล๊อทไฟรีโอดิกไดโพลแอร์เรย์

ส่วนประกอบของสายอากาศ	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (นิ้ว)	ขนาดของท่ออลูมิเนียม (เมตร)
แกนกลางของสายอากาศ	1	1.32258×2
กึ่งต่างๆ ของสายอากาศ	5/8	$L_1 = 1.05466, L_2 = 0.98083$ $L_3 = 0.91140$
	1/2	$L_4 = 0.84630, L_5 = 0.78700$ $L_6 = 0.73191, L_7 = 0.68067$ $L_8 = 0.63302, L_9 = 0.58871$ $L_{10} = 0.54750$
	3/8	$L_{11} = 0.50918, L_{12} = 0.47353$ $L_{13} = 0.44039, L_{14} = 0.40956$

1.2 นำแกนกลางของสายอากาศมาทำการเจาะรูให้ได้ขนาดตามเส้นผ่านศูนย์กลางตามกึ่งต่างๆ ของสายอากาศ โดยระยะห่างของรูที่เจาะได้กำหนดตามขนาดที่ได้ออกแบบไว้ตามตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.9 เจาะท่ออลูมิเนียม



รูปที่ 3.10 วัดระยะห่างของอีลีเมนต์

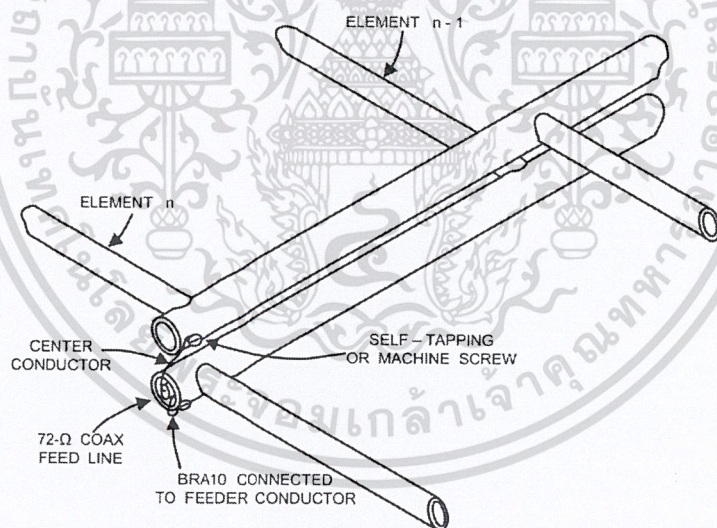
2. นำส่วนประกอบต่างๆ มาประกอบเป็นสายอากาศโดยนำกึ่งต่างๆ ของสายอากาศมาเชื่อมติดเข้ากับแกนกลางของสายอากาศโดยลำดับกันติดตั้ง ตามลำดับที่ได้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ออกแบบไว้ในหัวข้อที่ 3.2

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



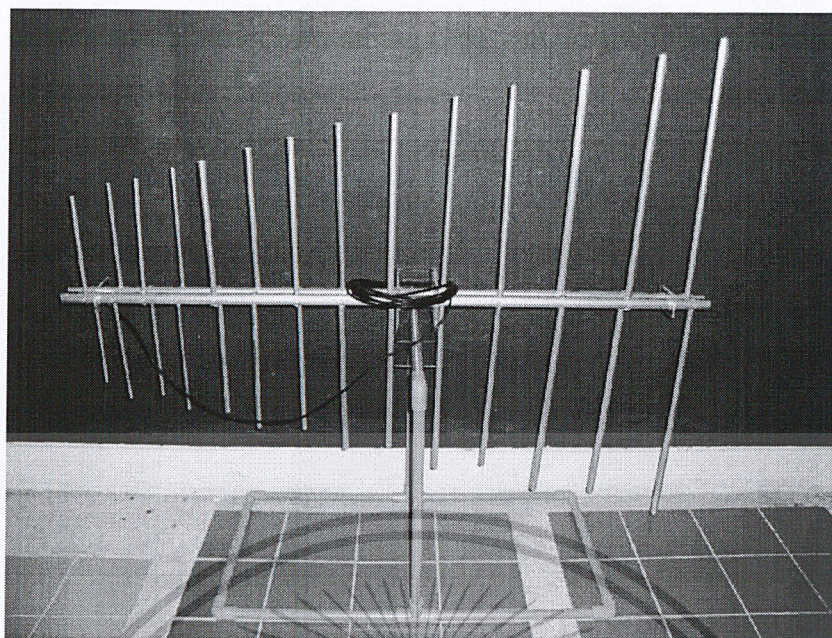
รูปที่ 3.11 การประกอบสายอากาศ

3. ทำการต่อสายสัญญาณเพื่อใช้ในการนำสัญญาณไปแสดงผลในออสซิลโลสโคป โดยใช้สายสัญญาณ RG 58 โดยทำการติดตั้งตามรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 การต่อสายสัญญาณของสายอากาศลูปฟิโรติกไดโพลแอร์เรย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.13 สายอากาศล็อกฟีร์โอติกไดโพลแอร์เรย์

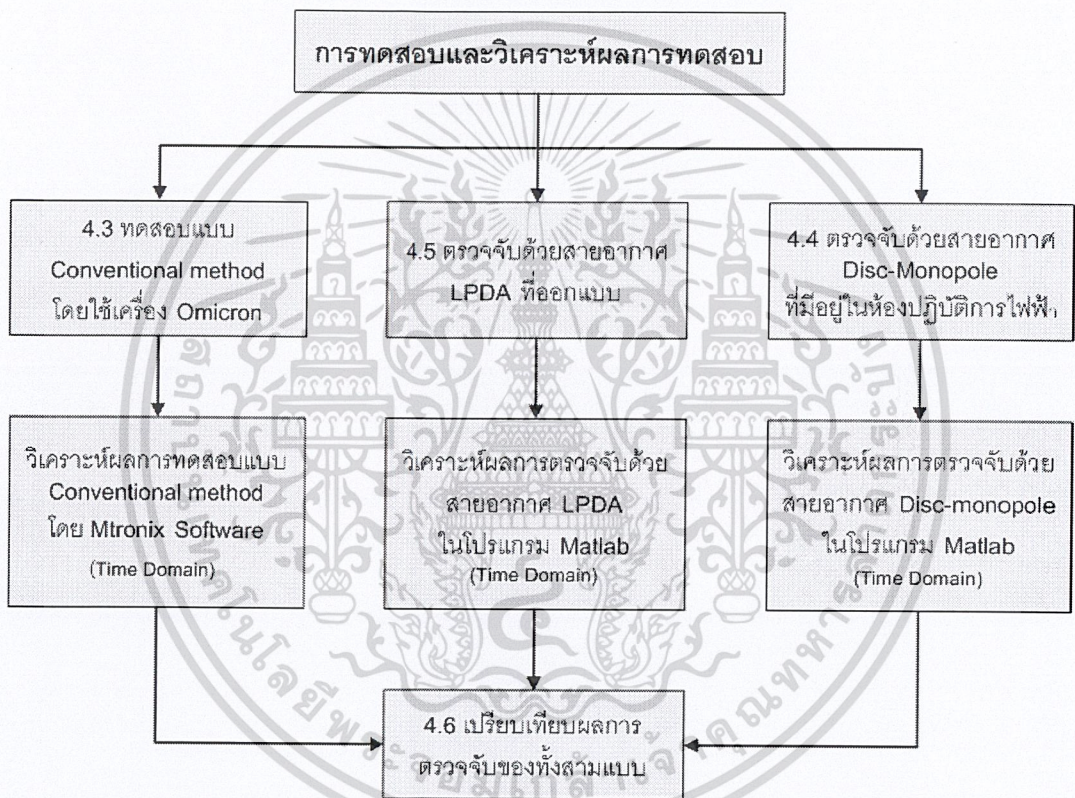


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดสอบ

ในส่วนของผลการทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดลองการตรวจจับดิสชาร์จบางส่วน โดยใช้เทคนิคการตรวจจับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าย่านความถี่สูง จะมีทั้งหมด 2 ส่วนโดย คือ การตรวจจับ PD ด้วยวิธี Conventional method ตามมาตรฐาน IEC 60270 ที่เป็นการวัด PD ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง และการตรวจจับ PD ด้วยวิธี UHF method ซึ่งวิธีการตรวจจับและวิเคราะห์ผลของการทดสอบจะแสดงให้เห็นในแผนภาพดังนี้

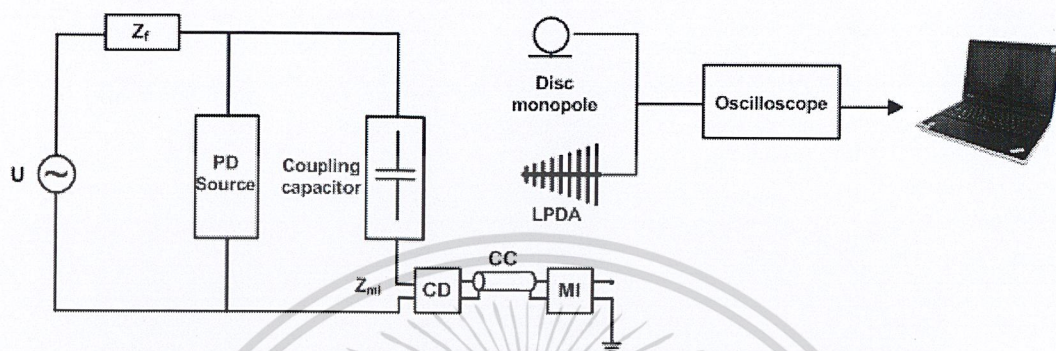


รูปที่ 4.1 แผนผังการทดสอบ

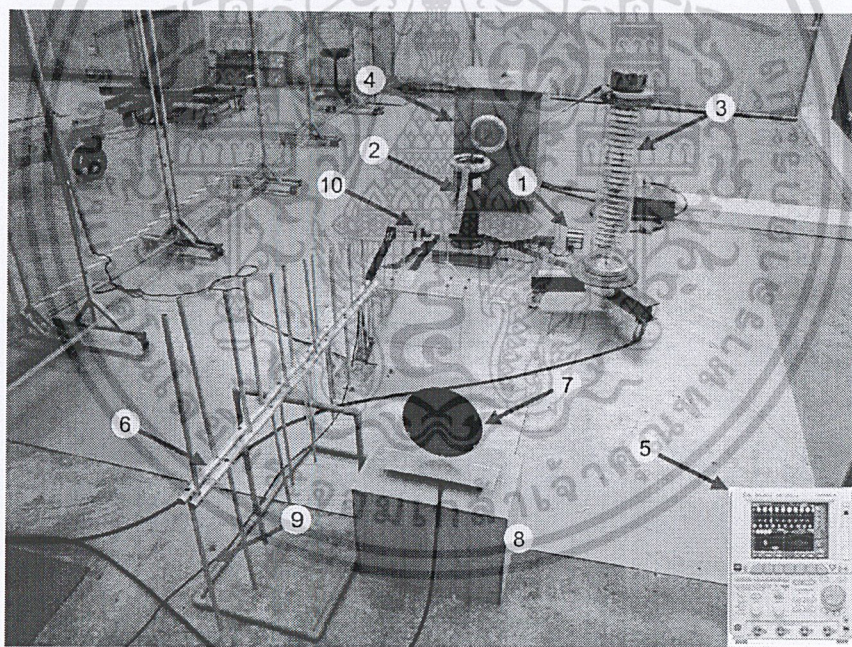
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1 การติดตั้งอุปกรณ์การทดสอบ

การตรวจจับดิสซาร์จบางส่วนด้วยสายอากาศ LPDA สายอากาศ disc monopole และด้วยวิธี Conventional method จะกำหนดและควบคุมตัวแปรต่างๆ ให้เหมือนกัน เช่น อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ ขั้นตอนการทดสอบ โดยมีวงจรการทดสอบดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 วงจรการทดสอบ



รูปที่ 4.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

จากรูปที่ 4.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองมีดังนี้

1. เครื่องตรวจจับดิสซาร์จบางส่วน OMICRON mtronix MPD 600
2. Coupling capacitor (C_k) พิกัด $0.001\mu\text{F}$, 100kV
3. ชุด Voltage divider

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Voltage divider ขนาด $980\text{V}/1\text{V}$
- สายเคเบิล RG-11 จำนวน 1 เส้นพร้อมหัว BNC

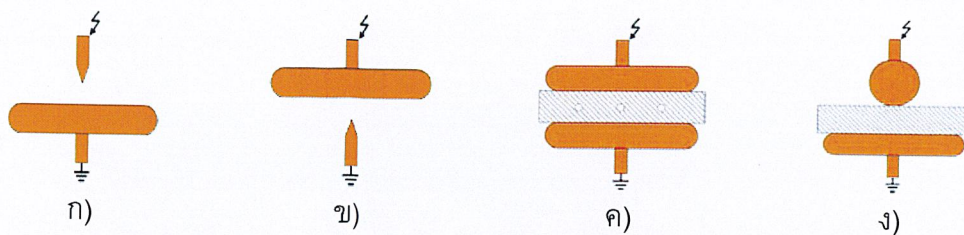
4. หม้อแปลงทดสอบแรงดันสูง AC พิกัด 460V/75kV, 40kVA, 50/60Hz
5. Oscilloscope รุ่น YOKOGAWA DL1640
6. สายอากาศล๊อคพีรีโอดิกไดโพลแอร์เรย์
7. สายอากาศ Disc Monopole
8. สายเคเบิล RG-11 จำนวน 1 เส้น
9. สายเคเบิล RG-58 จำนวน 1 เส้น
10. ชุดอุปกรณ์ทดสอบ (PD source)

4.1.1 ขั้นตอนการทดสอบ

1. ต่อวงจรการทดสอบดังรูปที่ 4.2 โดยเป็นวงจรการทดสอบ PD แบบ Conventional method ตามมาตรฐาน IEC 60270 และติดตั้งสายอากาศ LPDA กับสายอากาศ DM ห่างจาก PD source เป็นระยะทาง 1.5 เมตร
2. ทำการทดสอบกับ PD source ทั้ง 4 แบบดังรูปที่ 4.4 กำหนดให้ PD source แบบ High volt-electrode corona discharge และ Ground-electrode corona discharge มีอากาศเป็นฉนวน ระยะห่างกัน 30 มิลลิเมตร
3. ทำการปรับเทียบชุดวัดดิสชาร์จบางส่วนแบบ Conventional method โดยนำ C Calibration มาต่อแล้วทำการปรับเทียบที่ 100pC เมื่อเสร็จแล้วจะต้องนำ C Calibration ออกจากวงจรทดสอบทุกครั้ง
4. ทำการป้อนแรงดันเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ และสังเกตว่าดิสชาร์จบางส่วนเริ่มเกิดที่แรงดันเท่าไร แล้วบันทึกผลการทดสอบ
5. หลังจากพบดิสชาร์จบางส่วนเริ่มเกิด ทำการเพิ่มแรงดันขึ้นอีกเล็กน้อย แล้วบันทึกผลการทดสอบ
6. การทดสอบด้วย UHF method โดยใช้สายอากาศ LPDA กับสายอากาศ DM ต่อเข้ากับ Oscilloscope และบันทึกผลการทดสอบซึ่งอ้างอิงแรงดันทดสอบจากวิธี Conventional method

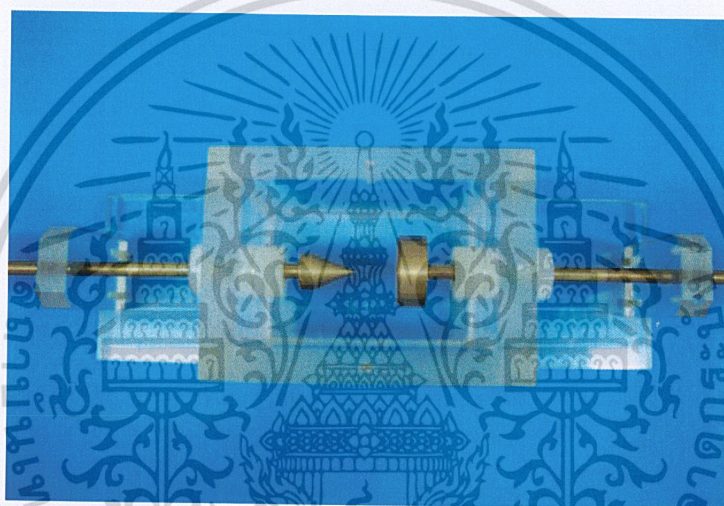
4.1.2 แหล่งกำเนิดดิสชาร์จบางส่วน

แหล่งกำเนิดดิสชาร์จบางส่วนที่ใช้ในการทดลองซึ่งประกอบด้วย 1) High volt-electrode corona discharge, 2) Ground-electrode corona discharge, 3) Internal discharge, 4) Surface discharge ดังรูปที่ 4.4

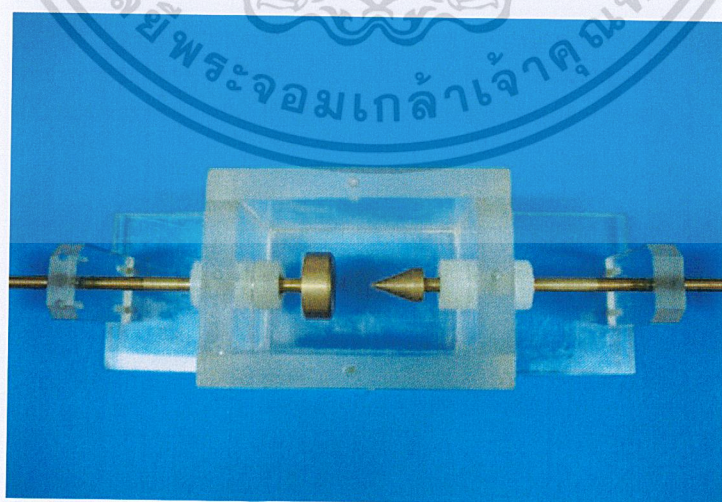


รูปที่ 4.4 รูปจำลอง PD source ก) High volt-electrode corona discharge, ข) Ground-electrode corona discharge, ค) Internal discharge, ง) Surface discharge

รูปที่ 4.5-4.8 เป็นรูปแหล่งกำเนิดดิสชาร์จบางส่วนที่ใช้ในจริงในการทดสอบ

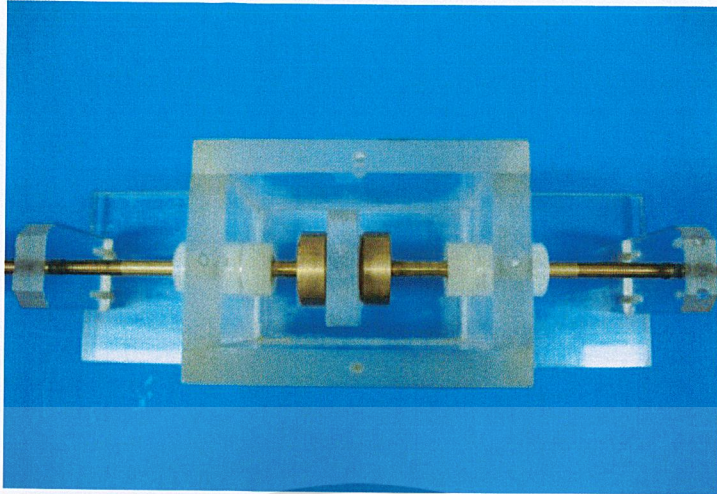


รูปที่ 4.5 PD source แบบ High volt-electrode corona discharge

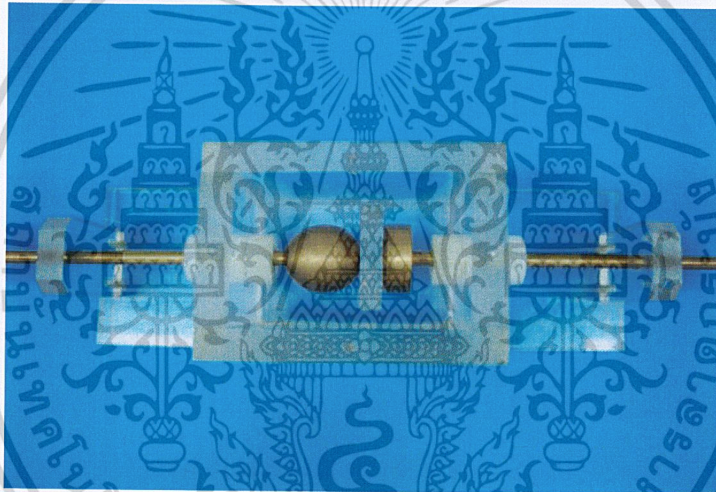


รูปที่ 4.6 PD source แบบ Ground-electrode corona discharge

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



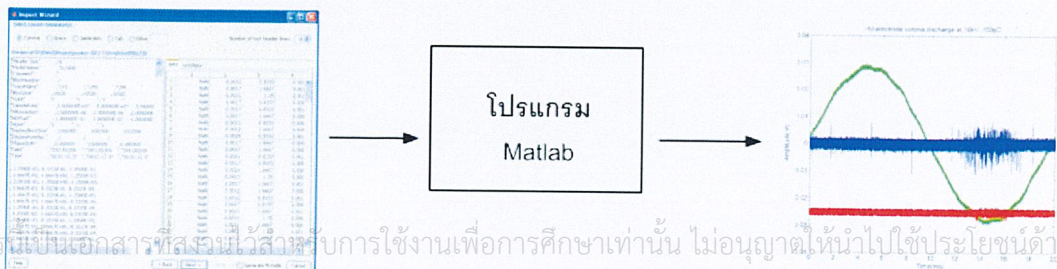
รูปที่ 4.7 PD source แบบ Internal discharge



รูปที่ 4.8 PD source แบบ Surface discharge

4.2 การวิเคราะห์ข้อมูลในโดเมนเวลา

การทดสอบการตรวจจับดิสชาร์จบางส่วนด้วยสายอากาศ LPDA และสายอากาศ DM โดยบันทึกข้อมูลจากออสซิลโลสโคป แล้วนำข้อมูลดังกล่าวมาพล็อตกราฟโดยใช้โปรแกรม Matlab มีขั้นตอนดังนี้

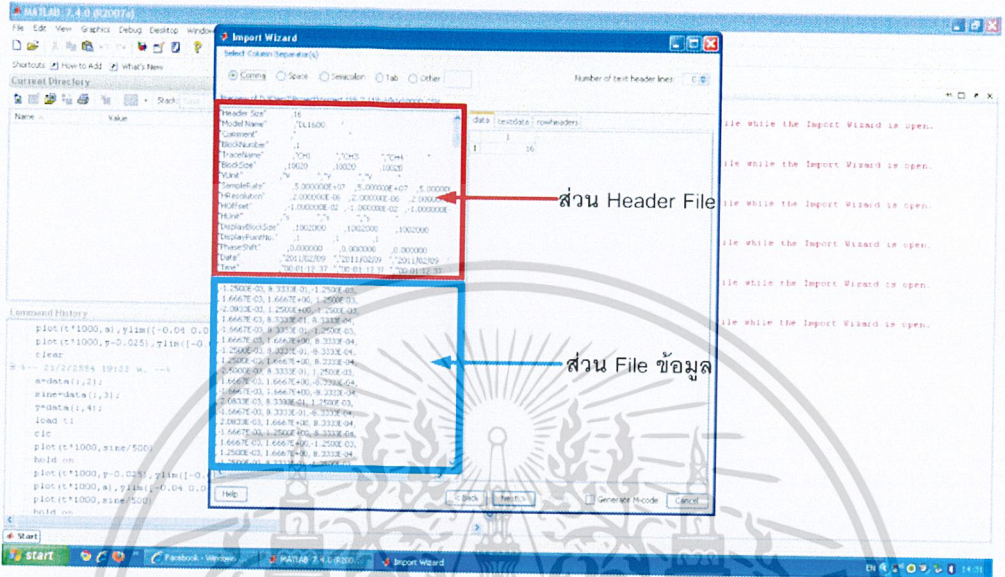


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

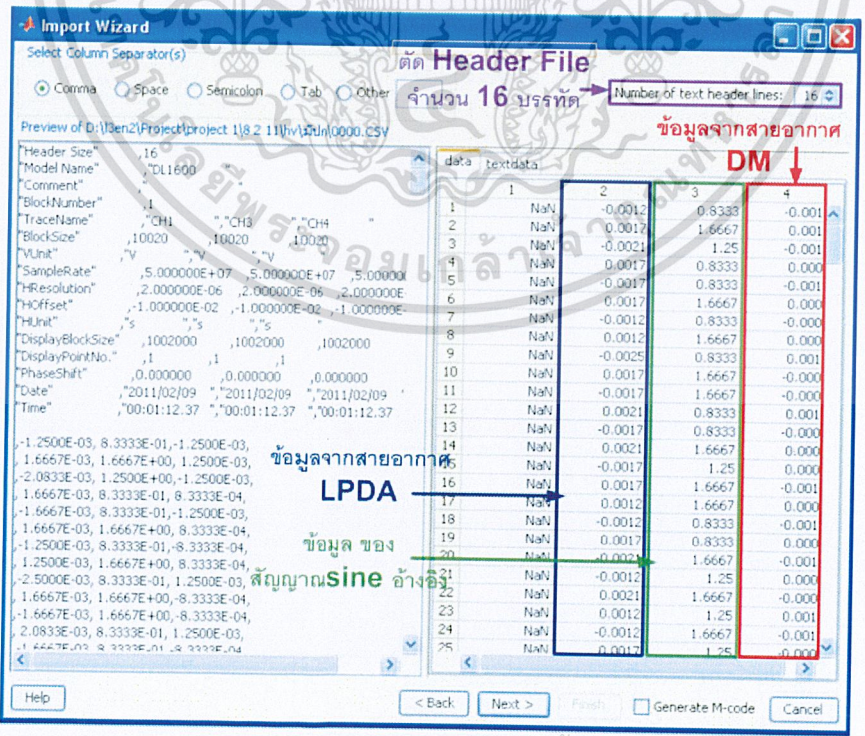
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.9 บล็อกไดอะแกรมการทำงาน

1. โหลดไฟล์ข้อมูล .CSV ที่บันทึกค่าได้จากจากออสซิลโลสโคป ด้วยโปรแกรม Matlab ซึ่งจากข้อมูลประกอบด้วย 2 ส่วนคือ ส่วน Header file และ ส่วน File ข้อมูล ดังรูปที่ 4.10

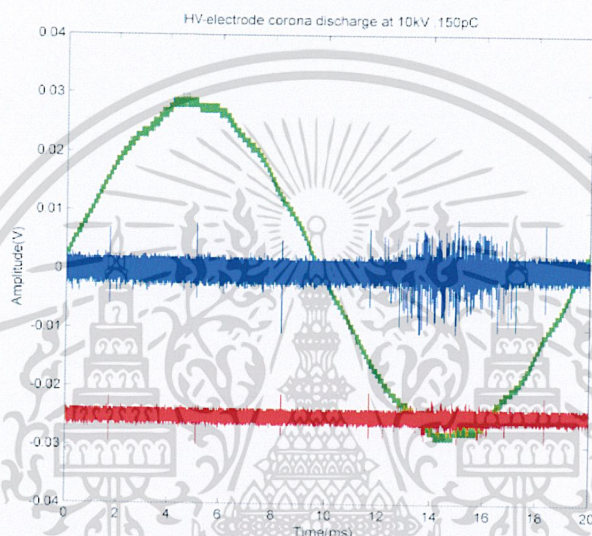


รูปที่ 4.10 ไฟล์ข้อมูล .CSV



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวชนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 4.11 ข้อมูลส่วนจริง
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

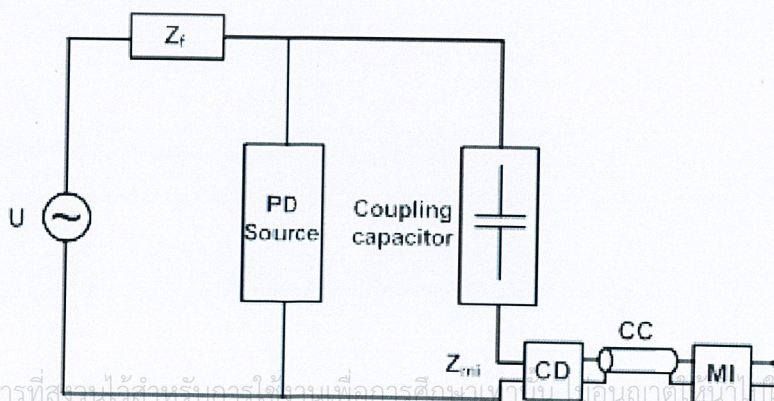
2. ตัดส่วนของ header file ซึ่งมีทั้งหมด 16 บรรทัด ออกเพื่อเก็บข้อมูลในส่วนที่ต้องการ ซึ่งมีข้อมูลจากสายอากาศ LPDA สายอากาศ DM และสัญญาณ sine อ้างอิง ดังรูปที่ 4.11
3. กำหนดแกนเวลาใหม่ โดยใช้คำสั่ง linspace
4. นำข้อมูลที่กำหนดแกนเวลาใหม่มาพล็อตกราฟในโดเมนเวลา ด้วยโปรแกรม Matlab ดังรูปที่ 4.12 เป็นสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนแบบ High volt-electrode corona discharge



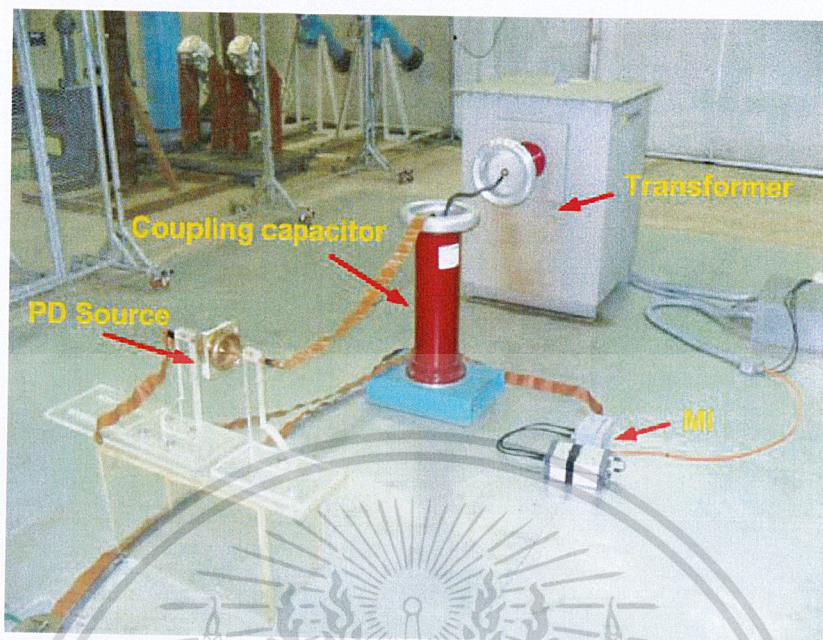
รูปที่ 4.12 สัญญาณดิสชาร์จบางส่วนจากโปรแกรม Matlab

4.3 ผลการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนด้วยวิธี Conventional method

ทำการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนทั้ง 4 แบบ ดังรูปที่ 4.13 ด้วยเครื่องตรวจจับดิสชาร์จบางส่วน OMICRON mtronix MPD 600 และวิเคราะห์ผลการทดสอบด้วยโปรแกรม Mtronix software แสดงผลดังนี้



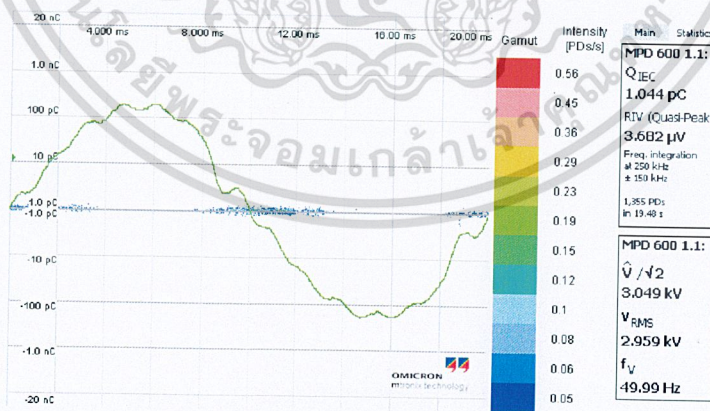
รูปที่ 4.13 รูปจำลองวงจรการทดสอบแบบ Conventional method



รูปที่ 4.14 วงจรการทดสอบแบบ Conventional method

ผลการทดสอบการตรวจจับดิสชาร์จบางส่วนด้วยวิธี Conventional method ซึ่งแสดงผลดังนี้

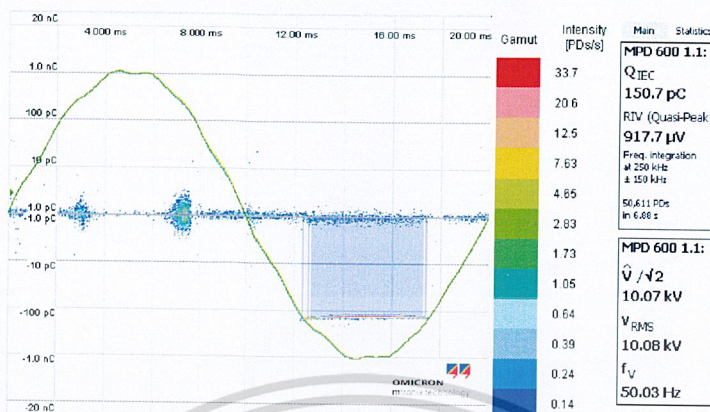
4.3.1 Background noise



รูปที่ 4.15 Background noise

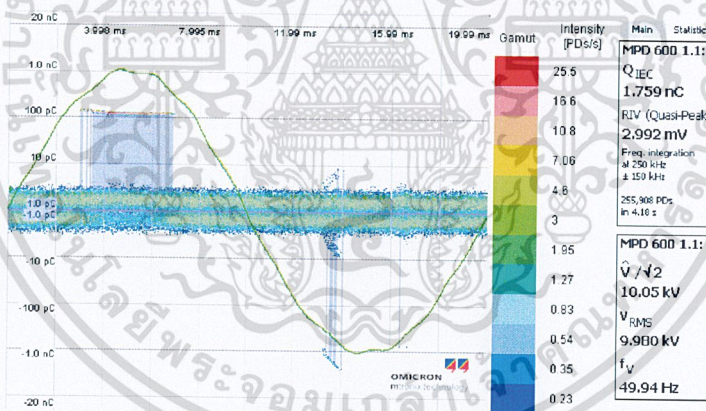
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 ผลการทดสอบ HV-electrode Corona discharge



รูปที่ 4.16 สัญญาณ PD แบบ HV-electrode Corona discharge ที่แรงดัน 10.07kV ค่าดิสชาร์จ 150.7pC

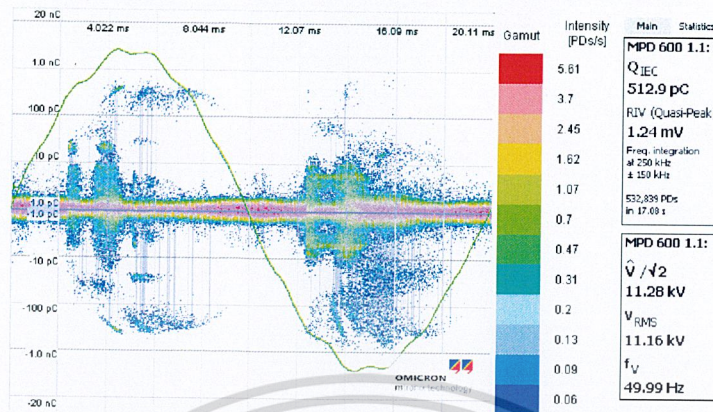
4.3.3 ผลการทดสอบ Ground-electrode Corona discharge



รูปที่ 4.17 สัญญาณ PD แบบ Ground-electrode Corona discharge ที่แรงดัน 9.98kV ค่าดิสชาร์จ 1.767nC

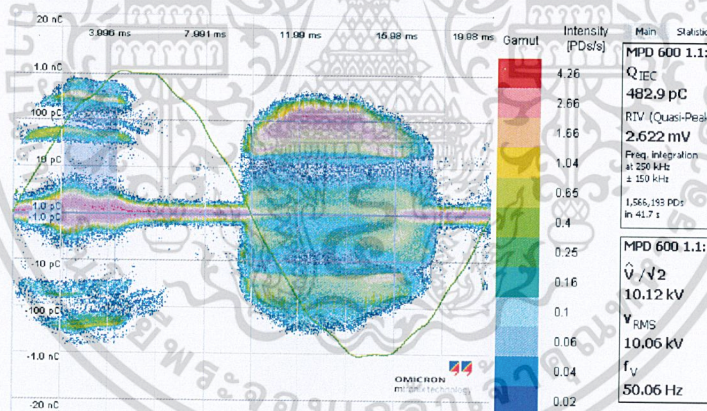
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.4 ผลการทดสอบ Internal discharge



รูปที่ 4.18 สัญญาณ PD แบบ Internal discharge
ที่แรงดัน 11.16kV ค่าดิสชาร์จ 512.9pC

4.3.5 ผลการทดสอบ Surface discharge



รูปที่ 4.19 สัญญาณ PD แบบ Surface discharge
ที่แรงดัน 10.06kV ค่าดิสชาร์จ 482.9pC

จากรูปที่ 4.15 เป็นสัญญาณ background noise ที่ตรวจจับขณะยังไม่เกิด PD ที่ระดับแรงดัน 3kV

จากรูปที่ 4.16 เป็นสัญญาณ PD ที่ตรวจจับจาก PD source แบบ HV-electrode corona discharge ที่ระดับแรงดัน 9.98kV การเกิด PD จะเกิดในช่วงมุมเฟส 270 องศา มีค่าดิสชาร์จ 1.767nC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวทนได้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.17 เป็นสัญญาณ PD ที่ตรวจจับจาก PD source แบบ Ground-electrode corona discharge ที่ระดับแรงดัน 10.07kV การเกิด PD จะเกิดในช่วงมุมเฟส 90 องศา มีค่าดิสชาร์จ 150.7pC

จากรูปที่ 4.18 เป็นสัญญาณ PD ที่ตรวจจับจาก PD source แบบ Internal discharge ที่ระดับแรงดัน 11.16kV การเกิด PD จะเกิดในช่วงมุมเฟส 0-90 องศา และมุม 180-270 องศา มีค่าดิสชาร์จ 512.9pC

จากรูปที่ 4.19 เป็นสัญญาณ PD ที่ตรวจจับจาก PD source แบบ Surface discharge ที่ระดับแรงดัน 10.06kV การเกิด PD จะเกิดในช่วงมุมเฟส 0-90 องศา และมุม 180-270 องศา ค่าดิสชาร์จ 482.9pC

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการทดสอบแรงดันเริ่มเกิดดิสชาร์จบางส่วนด้วยวิธี Conventional

ชนิดของPD	แรงดันเริ่มเกิดPD (kV)	ค่าดิสชาร์จ (pC)
High volt - electrode corona discharge	7.611	50
Ground – electrode corona discharge	9.102	50
Surface discharge	8.781	50
Internal discharge	10.59	50

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการทดสอบแรงดันของดิสชาร์จบางส่วนด้วยวิธี Conventional

ชนิดของPD	แรงดัน PD (kV)	ค่าดิสชาร์จ (pC)	ตำแหน่งมุมที่เกิด PD (องศา)
High volt - electrode corona discharge	10.07	151.4	90, 180-270
Ground - electrode corona discharge	9.983	1767	90, 180-270
Internal discharge	11.16	487.9	0-90, 180-270
Surface discharge	10.06	491.9	0-90, 180-270

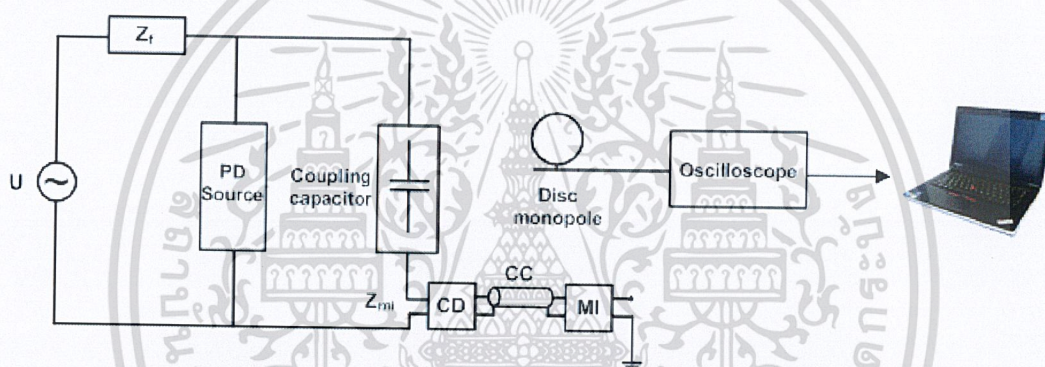
จากตารางที่ 4.1 เป็นการแสดงข้อมูลของแรงดันเริ่มเกิด PD และค่าดิสชาร์จ จากการตรวจจับการเกิด PD ด้วยวิธี Conventional method ที่ PD source แบบ High volt-electrode corona discharge, Ground-electrode corona discharge, Internal discharge และ Surface discharge โดยทำการป้อนแรงดันจนกระทั่งเกิดค่าดิสชาร์จประมาณ 50pC และบันทึกค่าแรงดันที่วัดได้ ซึ่งเรียกว่า แรงดันเริ่มเกิด PD

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

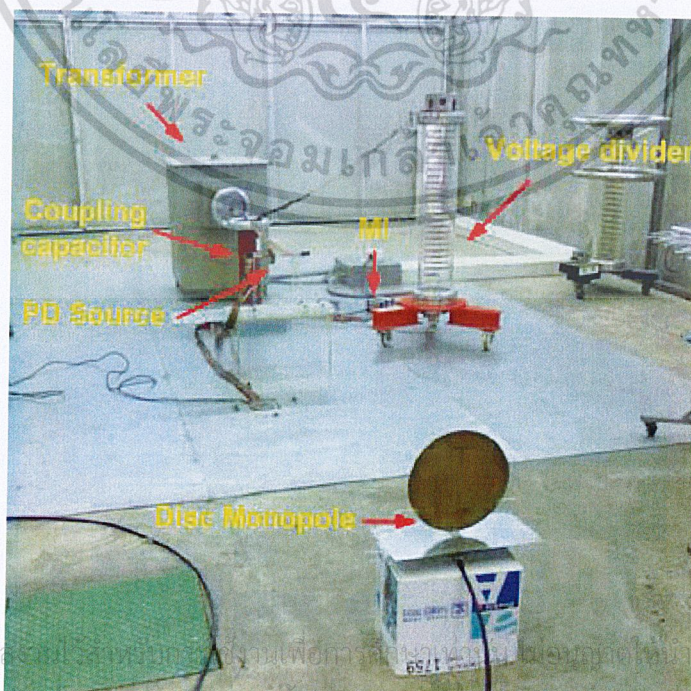
จากตารางที่ 4.2 เป็นการแสดงข้อมูลของแรงดัน PD ค่าดิซชาร์จและตำแหน่งมุมที่เกิด PD จากการตรวจจับ PD ด้วยวิธี Conventional method ที่ PD source แบบ High volt-electrode corona discharge, Ground-electrode corona discharge, Internal discharge และ Surface discharge โดยทำการป้อนแรงดันประมาณ 10kV และบันทึกค่าดิซชาร์จและตำแหน่งมุมที่เกิด PD

4.4 ผลการทดสอบดิซชาร์จบางส่วนด้วยสายอากาศ Disc Monopole

ทำการทดสอบดิซชาร์จบางส่วนทั้ง 4 แบบ ดังรูปที่ 4.2 ด้วยสายอากาศ Disc-Monopole ที่มีอยู่ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง[5] บันทึกข้อมูลจากการทดสอบจากโดยใช้ Oscilloscope และนำข้อมูลจาก Oscilloscope ไปพล็อตกราฟด้วยโปรแกรม Matlab แสดงผลดังนี้



รูปที่ 4.20 รูปจำลองวงจรการทดสอบของสายอากาศ Disc monopole



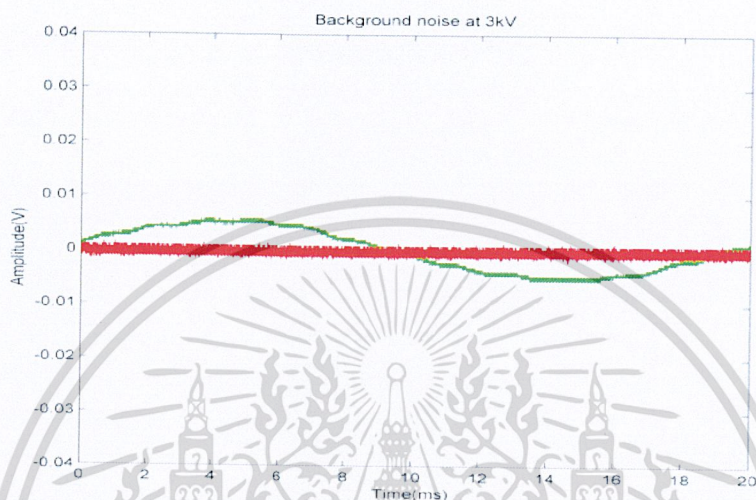
รูปที่ 4.21 วงจรการทดสอบของสายอากาศ Disc monopole

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

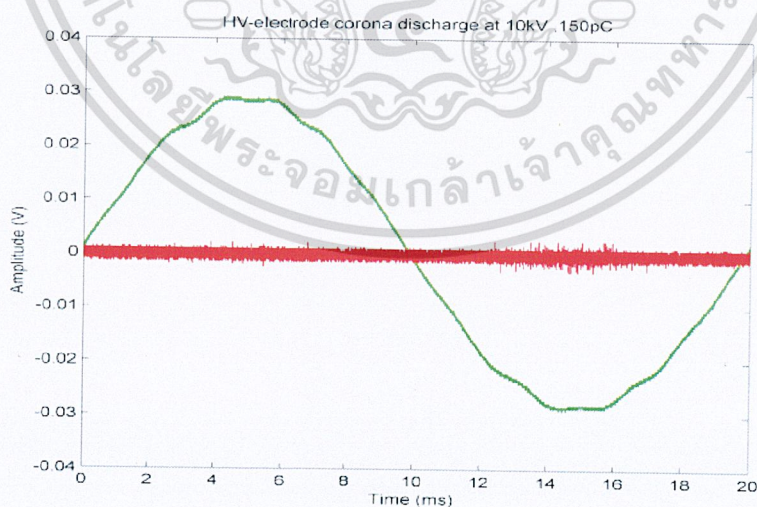
ผลการทดสอบการตรวจจับดิสชาร์จบางส่วนด้วยวิธี Ultra High Frequency method ด้วยสายอากาศ Disc Monopole ซึ่งแสดงผลดังนี้

4.4.1 ผลการทดสอบ Background noise



รูปที่ 4.22 Background noise

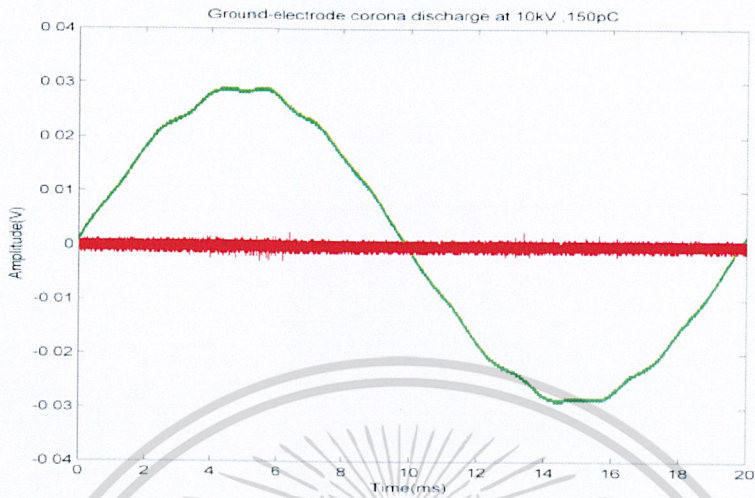
4.4.2 ผลการทดสอบ High volt-electrode corona discharge



รูปที่ 4.23 สัญญาณ PD แบบ HV-electrode corona discharge

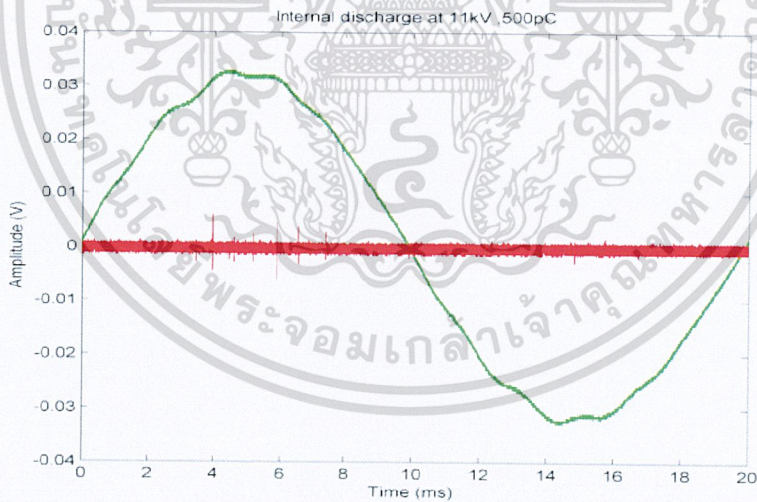
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.3 ผลการทดสอบ Ground-electrode Corona discharge



รูปที่ 4.24 สัญญาณ PD แบบ Ground-electrode corona discharge

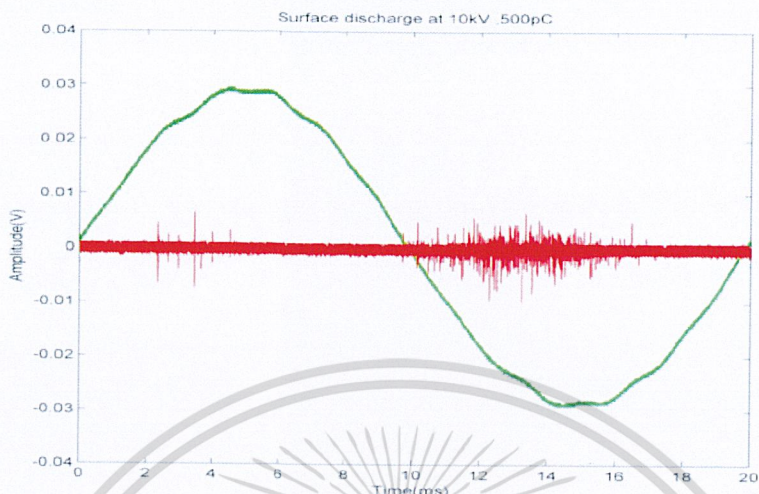
4.4.4 ผลการทดสอบ Internal discharge



รูปที่ 4.25 สัญญาณ PD แบบ Internal discharge

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.5 ผลการทดสอบ Surface discharge



รูปที่ 4.26 สัญญาณ PD แบบ Surface discharge

จากรูปที่ 4.22 เป็นสัญญาณ background noise ที่ตรวจจับขณะยังไม่เกิด PD โดยใช้สายอากาศ DM

จากรูปที่ 4.23 เป็นสัญญาณ PD ที่ตรวจจับจาก PD source แบบ HV-electrode corona discharge โดยใช้สายอากาศ DM พบว่า PD จะเกิดในช่วงมุมเฟส 270 องศา

จากรูปที่ 4.24 เป็นสัญญาณ PD ที่ตรวจจับจาก PD source แบบ Ground-electrode corona discharge โดยใช้สายอากาศ DM พบว่า PD จะเกิดในช่วงมุมเฟส 90 องศา

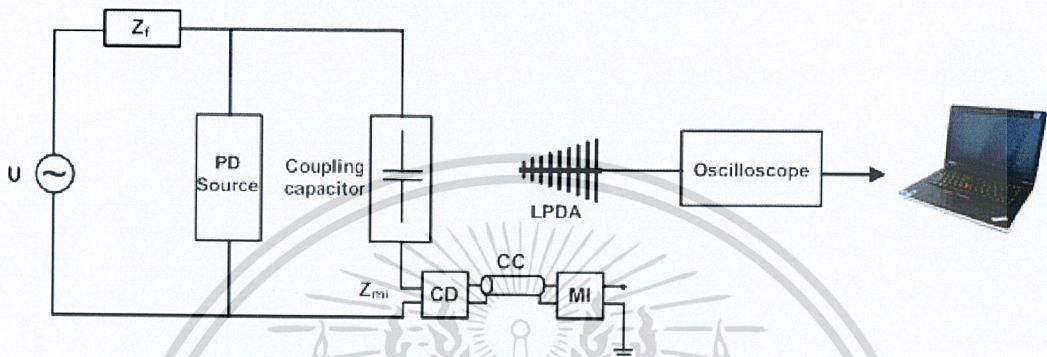
จากรูปที่ 4.25 เป็นสัญญาณ PD ที่ตรวจจับจาก PD source แบบ Internal discharge โดยใช้สายอากาศ DM พบว่า PD จะเกิดในช่วงมุมเฟส 0-90 องศา และมุม 180-270 องศา

จากรูปที่ 4.26 เป็นสัญญาณ PD ที่ตรวจจับจาก PD source แบบ Surface discharge โดยใช้สายอากาศ DM พบว่า PD จะเกิดในช่วงมุมเฟส 0-90 องศา และมุม 180-270 องศา

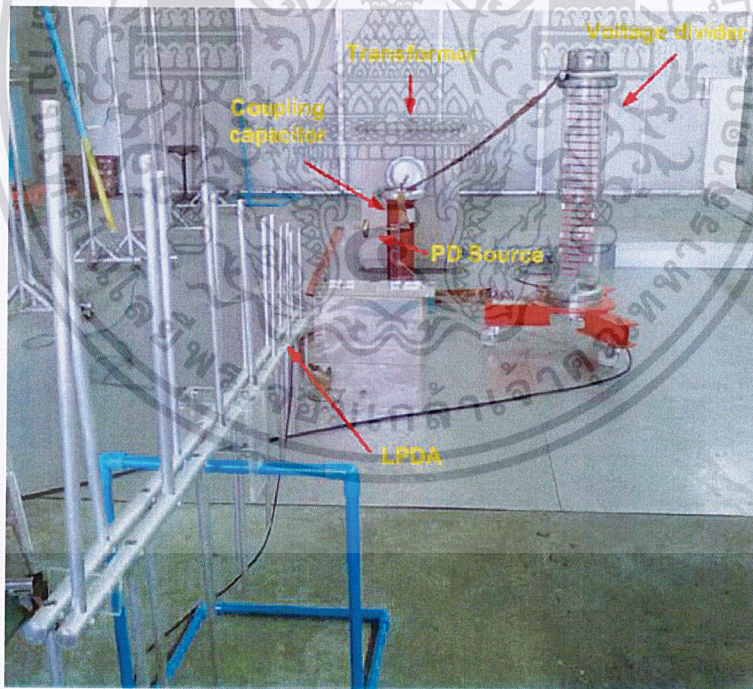
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 ผลการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนด้วยสายอากาศลูปฟิรโอดิกไดโพลแอร์เรย์ (LPDA)

ทำการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนทั้ง 4 แบบ ดังรูปที่ 4.2 ด้วยสายอากาศลูปฟิรโอดิกไดโพลแอร์เรย์ที่ออกแบบสร้างขึ้น บันทึกข้อมูลจากการทดสอบจากโดยใช้ Oscilloscope และนำข้อมูลจาก Oscilloscope ไปพล็อตกราฟด้วยโปรแกรม Matlab แสดงผลดังนี้



รูปที่ 4.27 รูปจำลองวงจรการทดสอบของสายอากาศ LPDA

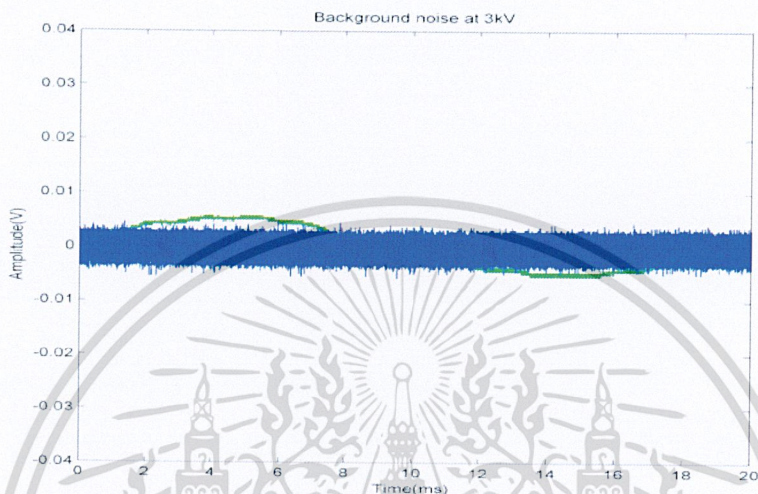


รูปที่ 4.28 วงจรการทดสอบของสายอากาศ LPDA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

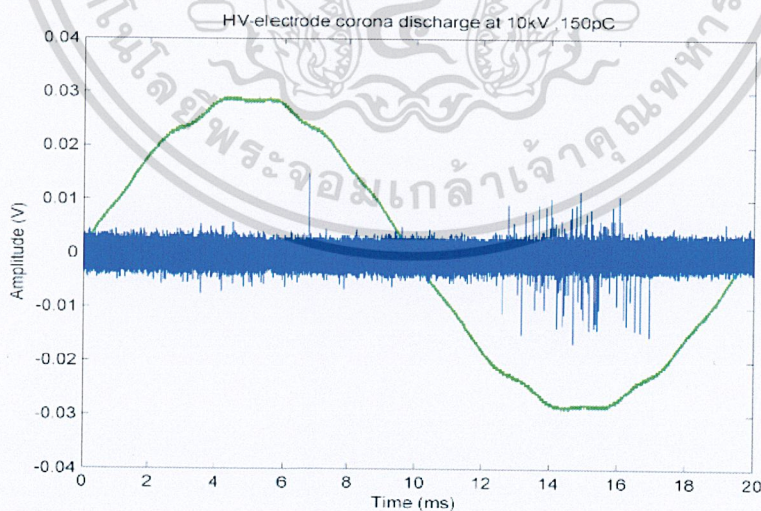
ผลการทดสอบการตรวจจับตีสหาร์จบบางส่วนด้วยวิธี Ultra High Frequency method ด้วยสายอากาศ LPDA ซึ่งแสดงผลดังนี้

4.5.1 ผลการทดสอบ Background noise



รูปที่ 4.29 Background noise

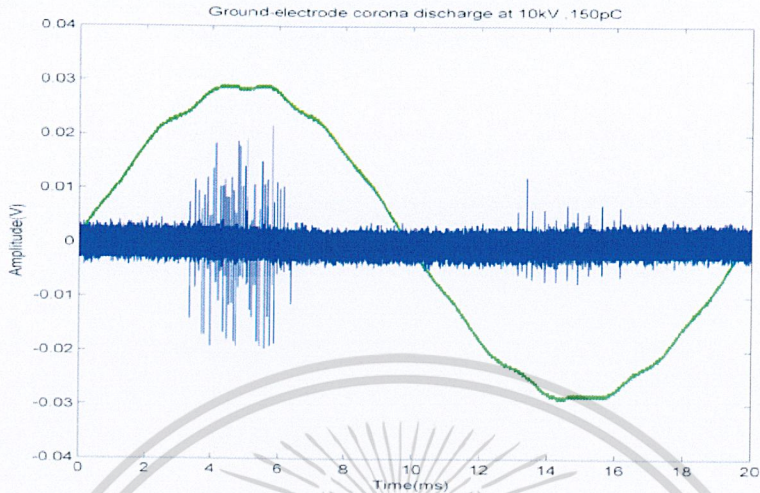
4.5.2 ผลการทดสอบ High volt-electrode corona discharge



รูปที่ 4.30 สัญญาณ PD แบบ HV-electrode corona discharge

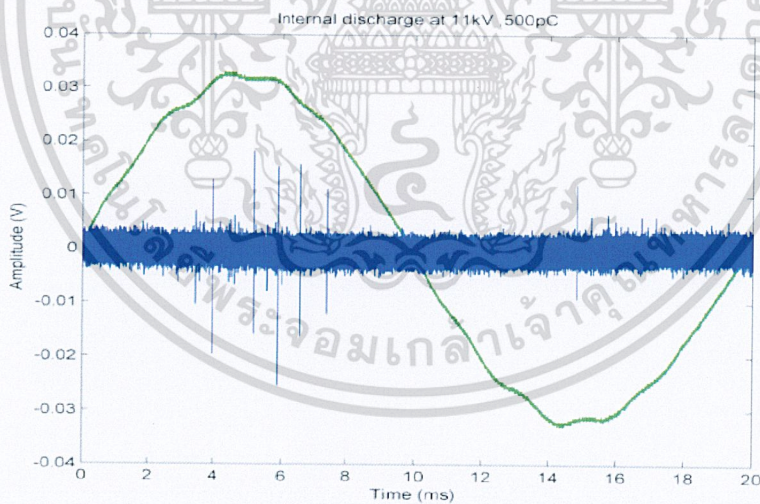
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.3 ผลการทดสอบ Ground-electrode Corona discharge



รูปที่ 4.31 สัญญาณ PD แบบ Ground-electrode corona discharge

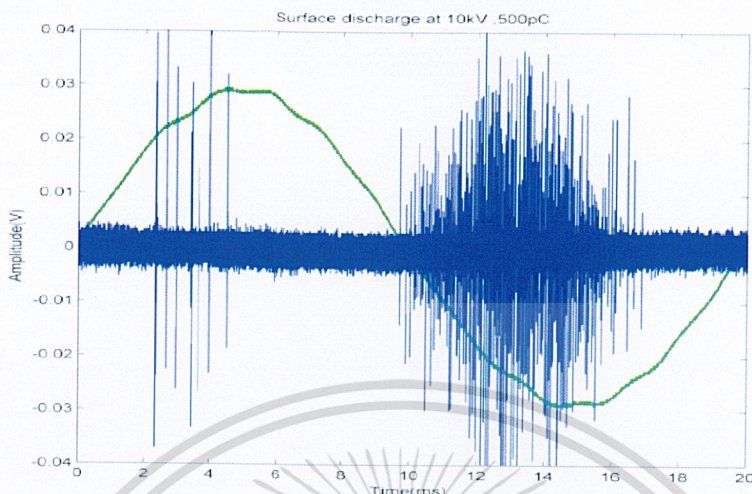
4.5.4 ผลการทดสอบ Internal discharge



รูปที่ 4.32 สัญญาณ PD แบบ Internal discharge

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.5 ผลการทดสอบ Surface discharge



รูปที่ 4.33 สัญญาณ PD แบบ Surface discharge

จากรูปที่ 4.29 เป็นสัญญาณ background noise ที่ตรวจจับขณะยังไม่เกิด PD โดยใช้สายอากาศ LPDA

จากรูปที่ 4.30 เป็นสัญญาณ PD ที่ตรวจจับจาก PD source แบบ HV-electrode corona discharge โดยใช้สายอากาศ LPDA พบว่า PD จะเกิดในช่วงมุมเฟส 270 องศา

จากรูปที่ 4.31 เป็นสัญญาณ PD ที่ตรวจจับจาก PD source แบบ Ground-electrode corona discharge โดยใช้สายอากาศ LPDA พบว่า PD จะเกิดในช่วงมุมเฟส 90 องศา

จากรูปที่ 4.32 เป็นสัญญาณ PD ที่ตรวจจับจาก PD source แบบ Internal discharge โดยใช้สายอากาศ LPDA พบว่า PD จะเกิดในช่วงมุมเฟส 0-90 องศา และมุม 180-270 องศา

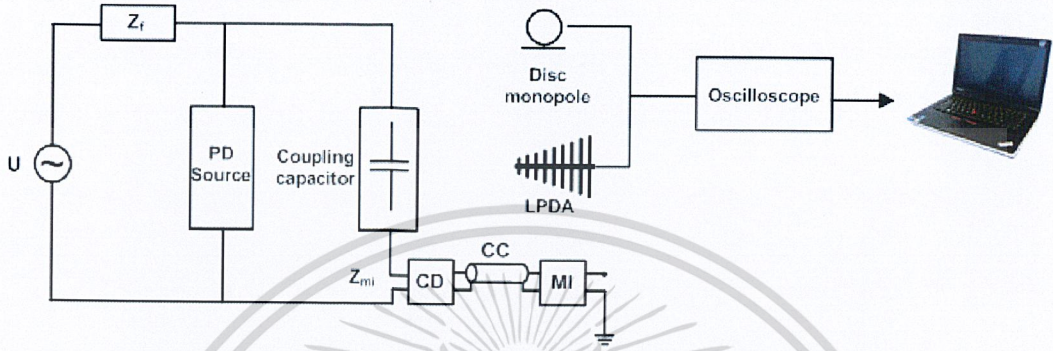
จากรูปที่ 4.33 เป็นสัญญาณ PD ที่ตรวจจับจาก PD source แบบ Surface discharge โดยใช้สายอากาศ LPDA พบว่า PD จะเกิดในช่วงมุมเฟส 0-90 องศา และมุม 180-270 องศา

4.6 การเปรียบเทียบผลการทดสอบ

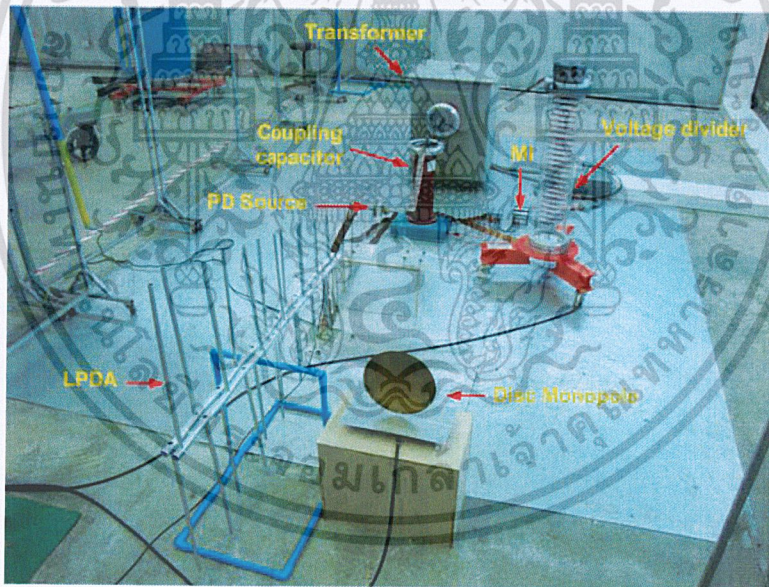
ทำการเปรียบเทียบผลการทดสอบการตรวจจับดิสชาร์จบางส่วนของสายอากาศ LPDA กับวิธี Conventional method และสายอากาศ DM เปรียบเทียบผลการตรวจจับดิสชาร์จบางส่วนจากลักษณะการติดตั้งสายอากาศ LPDA และเปรียบเทียบผลการตรวจจับดิสชาร์จเอกสบบ้างส่วนโดยติดตั้งสายอากาศ LPDA และ DM ที่ระยะต่างๆ ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6.1 ผลการตรวจจับดิสชาร์จบางส่วนด้วยสายอากาศ LPDA เปรียบเทียบกับวิธี Conventional method และสายอากาศ DM

ทำการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนด้วยวิธี Conventional method สายอากาศ LPDA และ DM พร้อมกันเพื่อทดสอบการตรวจจับดิสชาร์จบางส่วนของสายอากาศ LPDA



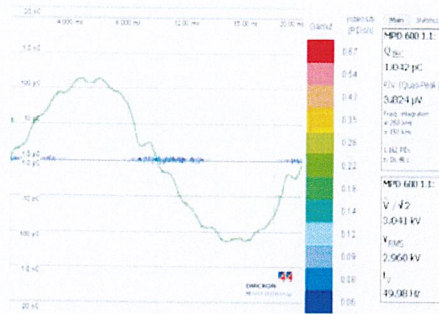
รูปที่ 4.34 รูปจำลองวงจรการทดสอบ



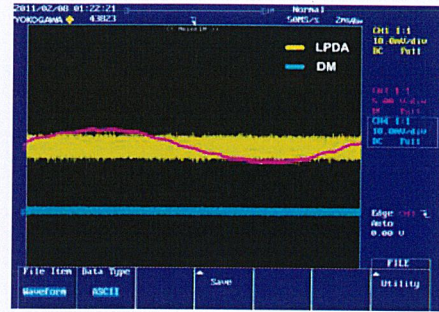
รูปที่ 4.35 วงจรการทดสอบ

ผลการทดสอบการตรวจจับดิสชาร์จบางส่วนด้วยวิธี Ultra High Frequency method โดยการเปรียบเทียบผลระหว่างสายอากาศ Disc Monopole กับ สายอากาศ LPDA ซึ่งแสดงผลดังนี้

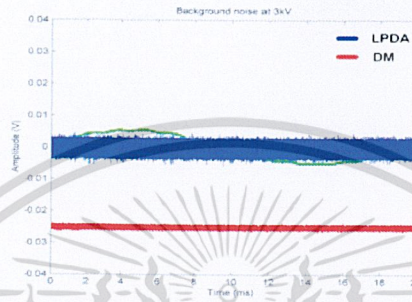
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก)

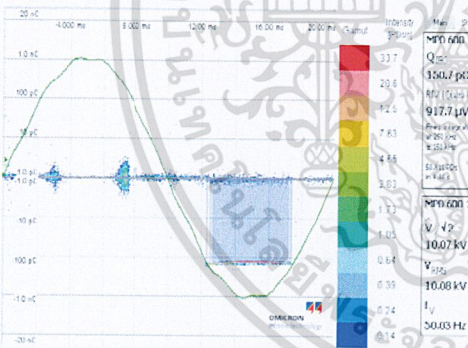


ข)

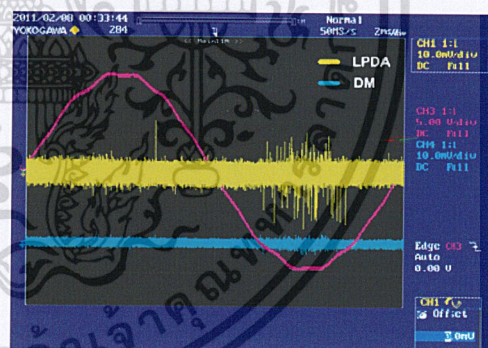


ค)

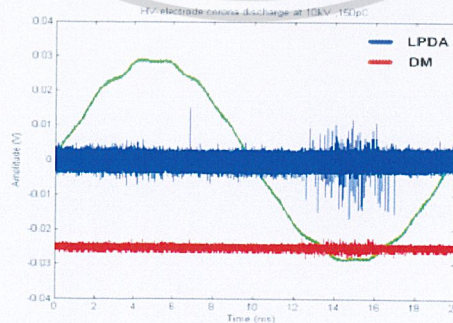
รูปที่ 4.36 Background noise ก) Conventional method, ข) Oscilloscope, ค) โปรแกรม Matlab



ก)



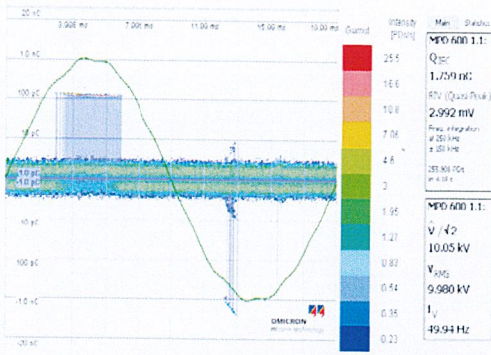
ข)



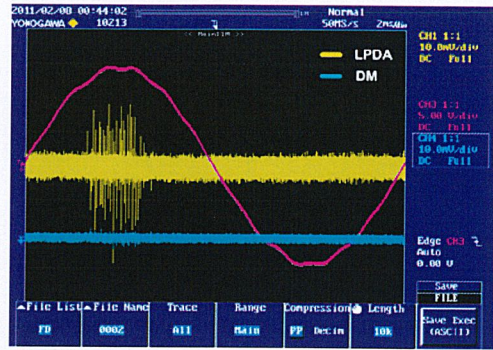
ค)

รูปที่ 4.37 HV-electrode corona discharge at 10.06kV, 150.7pC

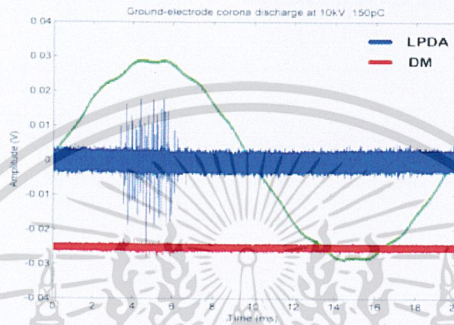
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ก) Conventional method, ข) Oscilloscope, ค) โปรแกรม Matlab
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก)



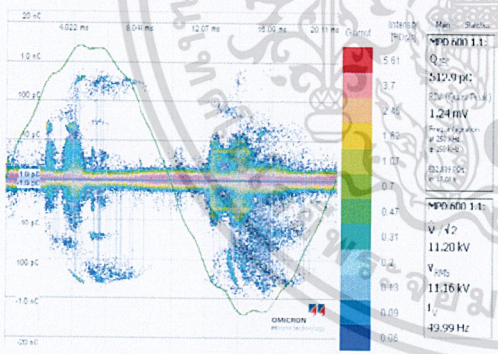
ข)



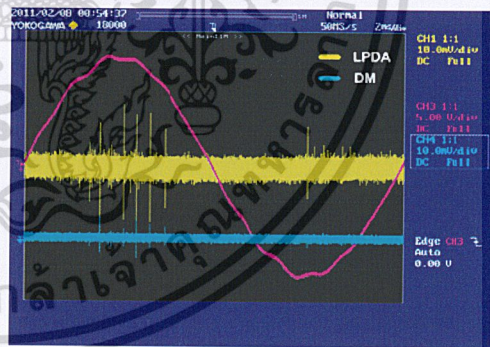
ค)

รูปที่ 4.38 Grounded-electrode corona discharge at 10kV, 1.767nC

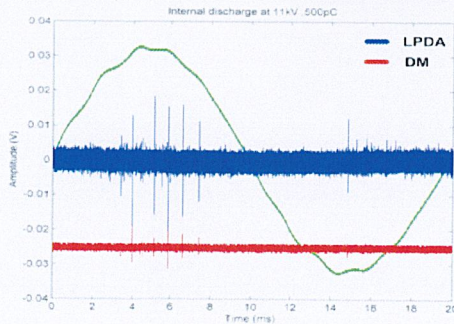
ก) Conventional method, ข) Oscilloscope, ค) โปรแกรม Matlab



ก)



ข)

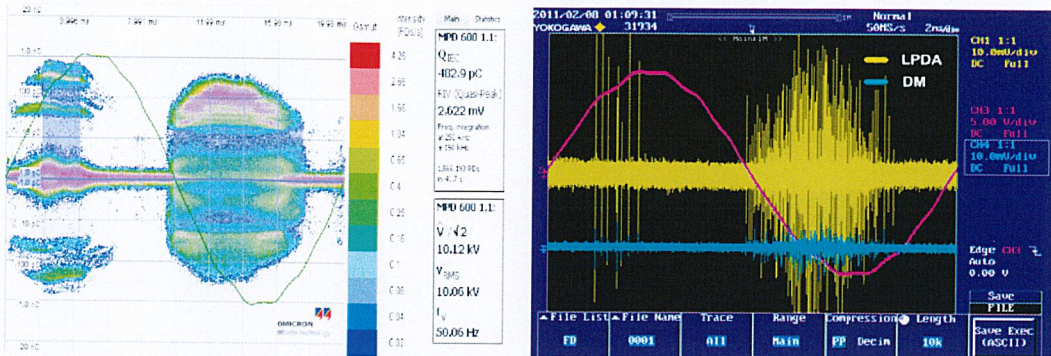


ค)

รูปที่ 4.39 Internal discharge at 11.16kV, 512.9pC

ก) Conventional method, ข) Oscilloscope, ค) โปรแกรม Matlab

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษายเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก)

ข)

ค)

รูปที่ 4.40 Surface discharge at 10kV, 482.9pC

ก) Conventional method, ข) Oscilloscope, ค) โปรแกรม Matlab

จากผลการทดลองดังรูปที่ 4.37-4.40 แสดงผลการตรวจจับ PD ทั้ง 4 แบบ โดยรูป ก) เป็นการตรวจจับด้วยวิธี Conventional method รูป ข) เป็นรูปจากหน้าจอ Oscilloscope และรูป ค) เป็นรูปจากโปรแกรม Matlab ของสายอากาศ LPDA ที่ออกแบบสร้างขึ้นกับสายอากาศ DM ที่มีอยู่ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง [5] โดยตรวจจับ PD พร้อมกันเพื่อเปรียบเทียบผลการทดลอง

จากรูปที่ 4.37 การเกิด PD จะเกิดในช่วงมุมเฟส 270 องศา และเมื่อเปรียบเทียบกับสัญญาณ PD ของสายอากาศ LPDA และสายอากาศแบบ DM จะเกิดในช่วงมุมเฟส 270 องศาเช่นเดียวกัน แต่สายอากาศ LPDA สามารถตรวจจับสัญญาณ PD ได้ชัดเจนกว่าสายอากาศแบบ DM

จากรูปที่ 4.38 การเกิด PD จะเกิดในช่วงมุมเฟส 90 องศา และเมื่อเปรียบเทียบกับสัญญาณ PD ของสายอากาศ LPDA และสายอากาศแบบ DM จะเกิดในช่วงมุมเฟส 90 องศาเช่นเดียวกัน แต่สายอากาศ LPDA สามารถตรวจจับสัญญาณ PD ได้ชัดเจนกว่าสายอากาศแบบ DM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.39 การเกิด PD จะเกิดในช่วงมุมเฟส 0-90 องศา และมุม 180-270 องศา และเมื่อเปรียบเทียบกับสัญญาณ PD ของสายอากาศ LPDA และสายอากาศแบบ DM จะเกิดในช่วงมุมเฟส 0-90 องศา และมุม 180-270 องศาเช่นเดียวกัน แต่สายอากาศ LPDA สามารถตรวจจับสัญญาณ PD ได้ชัดเจนกว่าสายอากาศแบบ DM

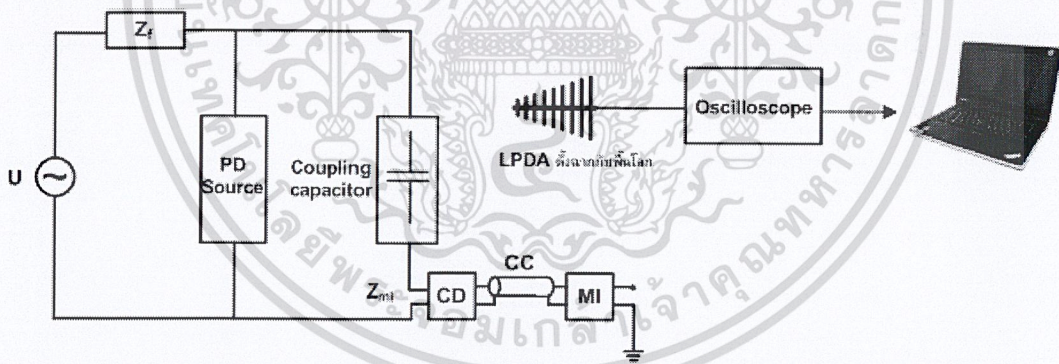
จากรูปที่ 4.40 การเกิด PD จะเกิดในช่วงมุมเฟส 0-90 องศา และมุม 180-270 องศา และเมื่อเปรียบเทียบกับสัญญาณ PD ของสายอากาศ LPDA และสายอากาศแบบ DM จะเกิดในช่วงมุมเฟส 0-90 องศา และมุม 180-270 องศาเช่นเดียวกัน แต่สายอากาศ LPDA สามารถตรวจจับสัญญาณ PD ได้ชัดเจนกว่าสายอากาศแบบ DM

ผลการเปรียบเทียบพบว่า สายอากาศ LPDA สามารถตรวจจับ PD ได้ ซึ่งมีตำแหน่งมุมที่เกิด PD เหมือนกับการตรวจจับด้วยวิธี Conventional method และสายอากาศ LPDA สามารถตรวจจับ PD ได้ชัดเจนกว่าสายอากาศ DM

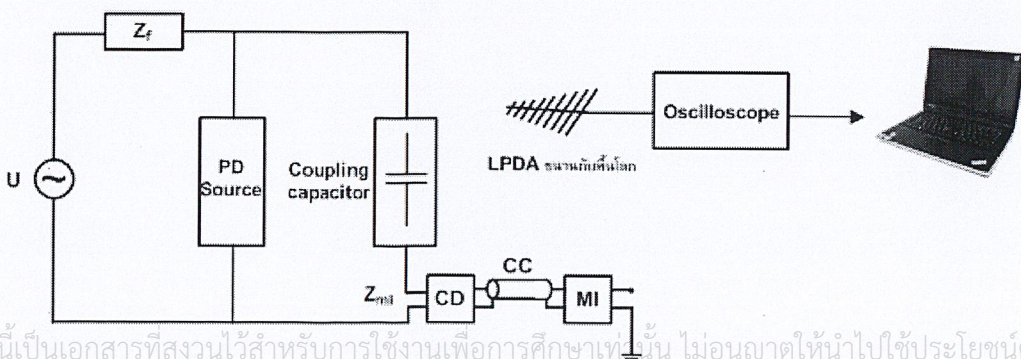
4.6.2 ผลการตรวจจับดิซาร์จบางส่วนจากลักษณะการติดตั้งสายอากาศ

LPDA

การตรวจจับ PD โดยการติดตั้งสายอากาศ LPDA ในลักษณะที่ต่างกัันดังนี้ อิลิเมนต์ที่ตั้งฉากกับพื้นโลก ดังรูปที่ 4.25 และอิลิเมนต์ขนานกับพื้นโลก ดังรูปที่ 4.26 เพื่อเปรียบเทียบการตรวจจับ PD ในการติดตั้งทั้ง 2 แบบ



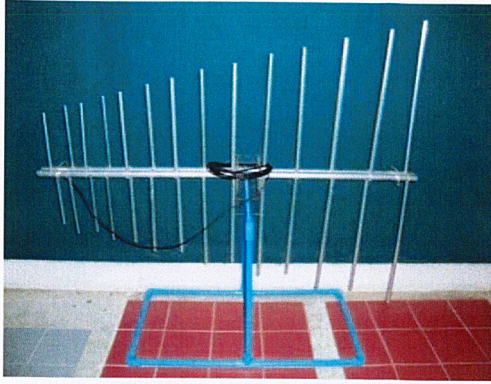
รูปที่ 4.41 รูปจำลองของสายอากาศอิลิเมนต์ที่ตั้งฉากกับพื้นโลก



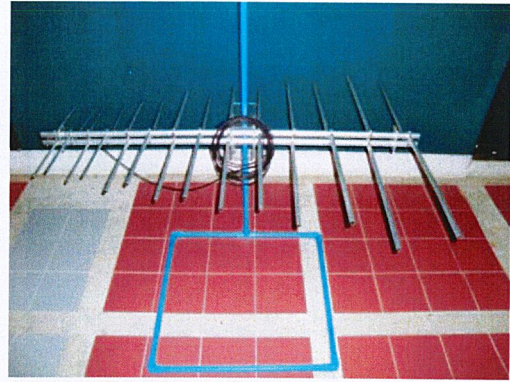
รูปที่ 4.42 รูปจำลองของสายอากาศอิลิเมนต์ขนานกับพื้นโลก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

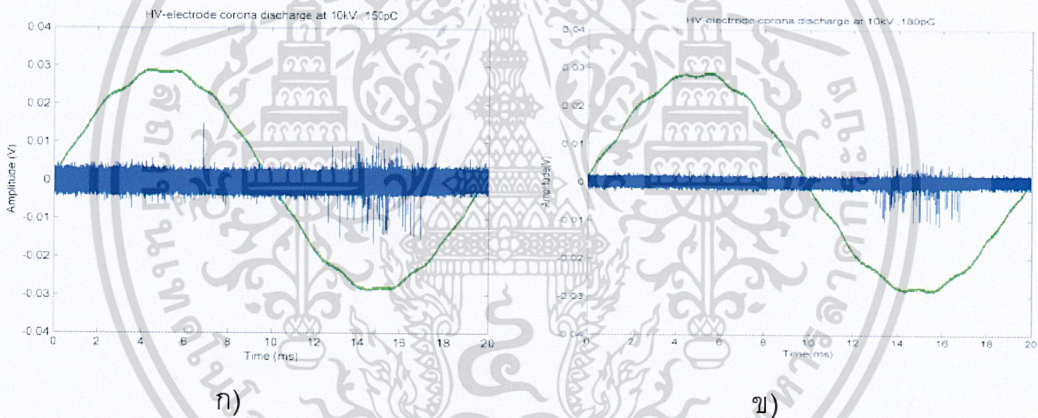


รูปที่ 4.43 อีลิเมนต์ที่ตั้งฉากกับพื้นโลก

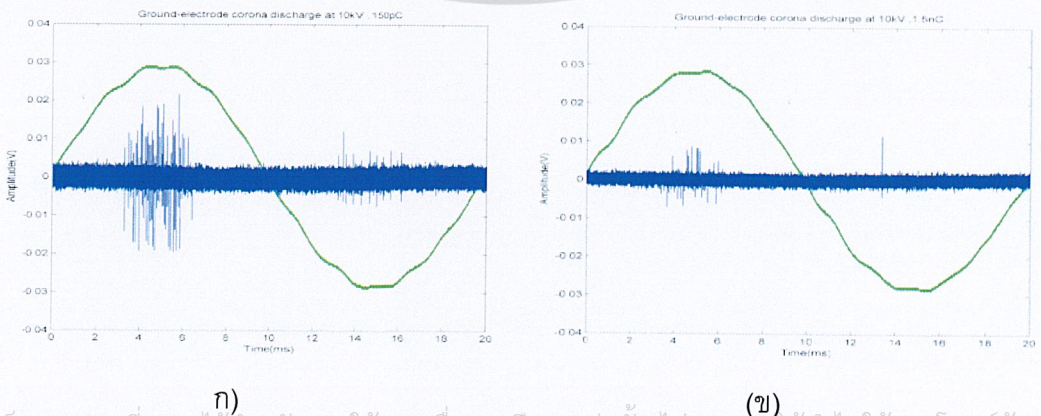


รูปที่ 4.44 อีลิเมนต์ขนานกับพื้นโลก

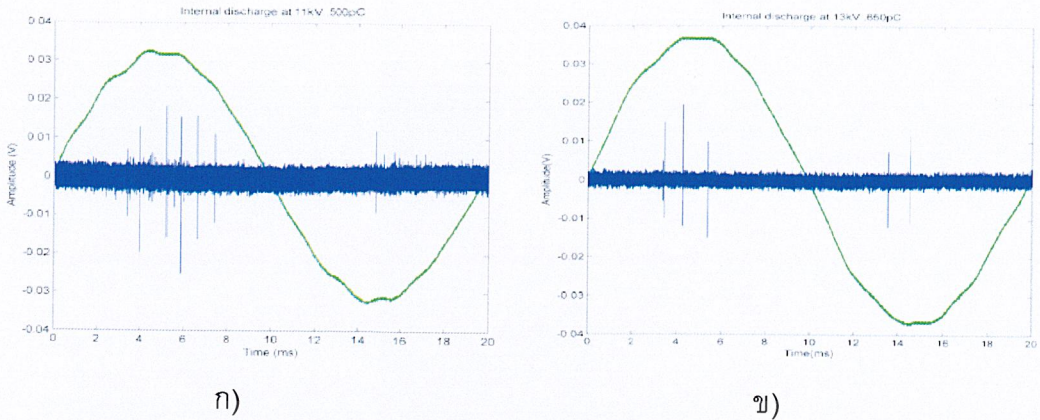
ผลการทดสอบการตรวจจับดิสชาร์จบางส่วน ด้วยสายอากาศ LPDA โดยเปรียบเทียบผลของการติดตั้งสายอากาศระหว่าง สายอากาศ LPDA ที่อีลิเมนต์ตั้งฉากกับพื้นโลก กับ สายอากาศ LPDA ที่อีลิเมนต์ตั้งฉากกับพื้นโลก ซึ่งแสดงผลดังนี้



รูปที่ 4.45 HV-electrode corona discharge ลักษณะการติดตั้งสายอากาศ LPDA ที่แตกต่างกัน ก) อีลิเมนต์ที่ตั้งฉากกับพื้นโลก, ข) อีลิเมนต์ขนานกับพื้นโลก

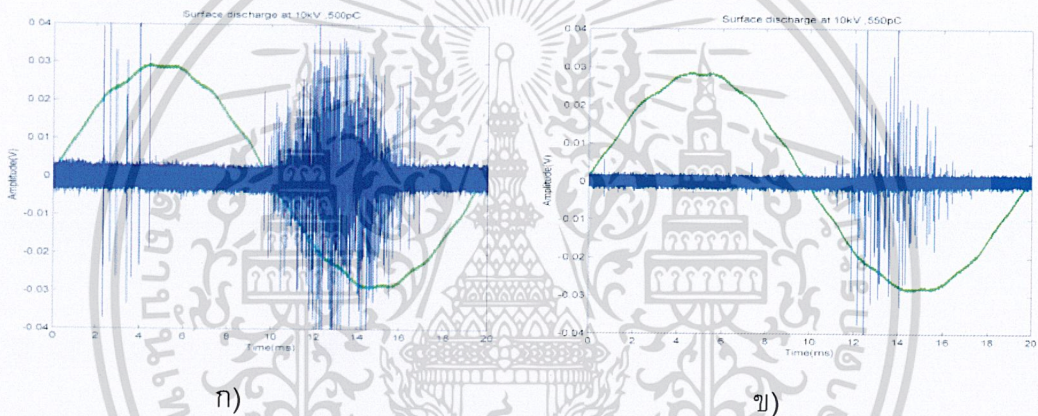


รูปที่ 4.46 Ground-electrode corona discharge ลักษณะการติดตั้งสายอากาศ LPDA ที่แตกต่างกัน ก) ผลจากอีลิเมนต์ที่ตั้งฉากกับพื้นโลก, ข) ผลจากอีลิเมนต์ขนานกับพื้นโลก



รูปที่ 4.47 Internal discharge ลักษณะการติดตั้งสายอากาศ LPDA ที่แตกต่างกัน

ก) ผลจากอิลีเมนต์ที่ตั้งฉากกับพื้นโลก, ข) ผลจากอิลีเมนต์ขนานกับพื้นโลก



รูปที่ 4.48 Surface discharge ลักษณะการติดตั้งสายอากาศ LPDA ที่แตกต่างกัน

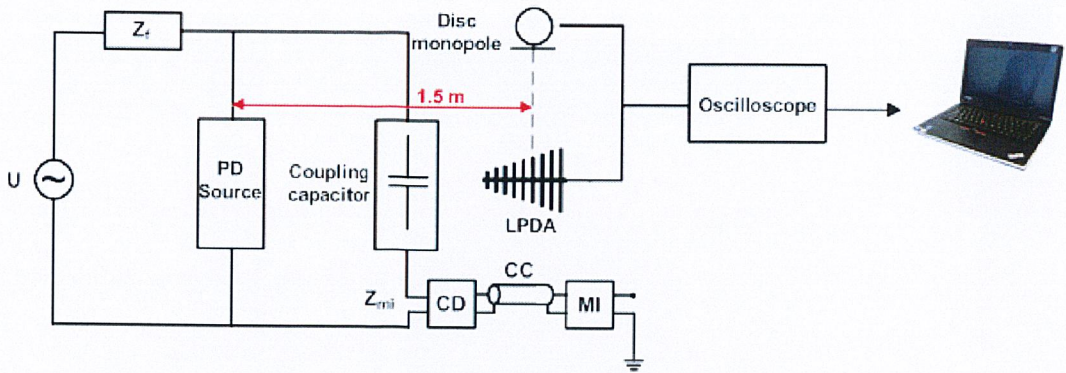
ก) อิลีเมนต์ที่ตั้งฉากกับพื้นโลก, ข) อิลีเมนต์ขนานกับพื้นโลก

จากผลการทดลองดังรูปที่ 4.45-4.48 แสดงผลการตรวจจับ PD ทั้ง 4 แบบ โดยติดตั้งสายอากาศ LPDA ในลักษณะที่อิลีเมนต์ของสายอากาศตั้งฉากกับพื้นโลกและขนานกับพื้นโลก พบว่าการติดตั้งสายอากาศทั้ง 2 ลักษณะ สามารถตรวจจับ PD ได้และมีตำแหน่งมุมเฟสที่เกิด PD เดียวกัน

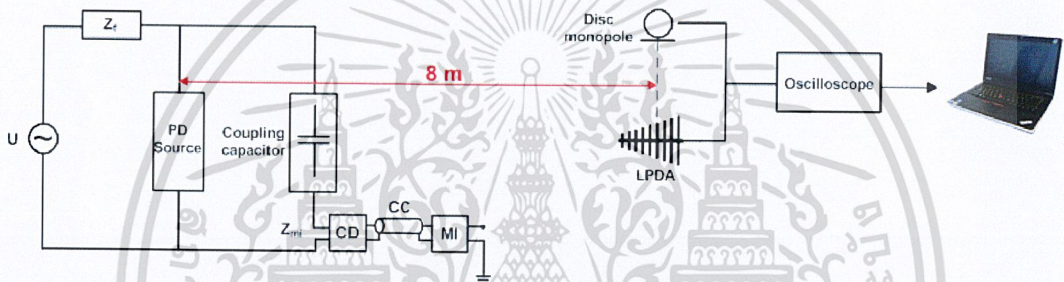
4.6.3 ผลการตรวจจับดิสชาร์จบางส่วนโดยติดตั้งสายอากาศ LPDA และ DM ที่ระยะต่าง ๆ

การตรวจจับ PD โดยการติดตั้งสายอากาศที่ระยะต่างๆเพื่อเปรียบเทียบ

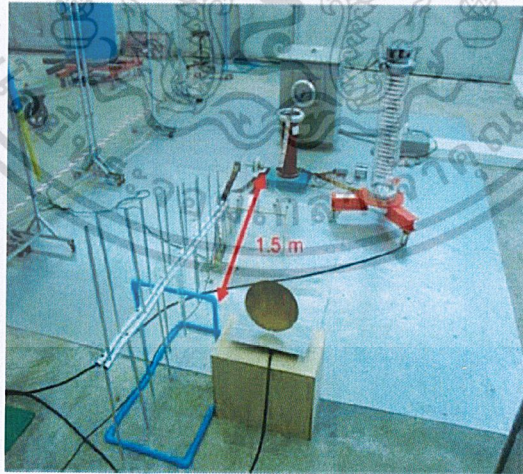
ประสิทธิภาพการตรวจจับ PD ระหว่างสายอากาศ LPDA และ DM ทำการทดลองติดตั้งสายอากาศห่างจาก PD source เป็นระยะทาง 1.5 เมตรและ 8 เมตร ซึ่งทดสอบกับ PD source ทั้ง 4 แบบ



รูปที่ 4.49 รูปจำลองการติดตั้งสายอากาศ LPDA และ DM ที่ระยะ 1.5 เมตร

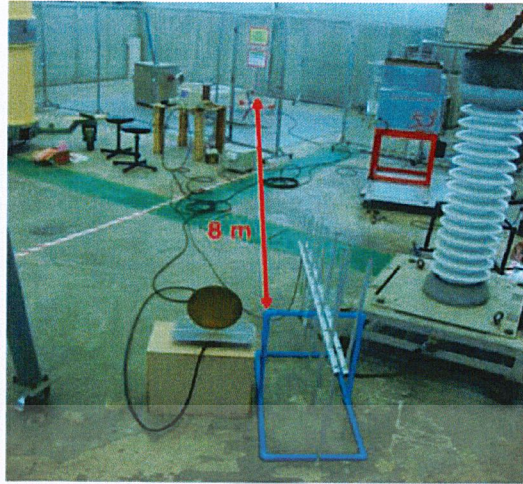


รูปที่ 4.50 รูปจำลองการติดตั้งสายอากาศ LPDA และ DM ที่ระยะ 8 เมตร



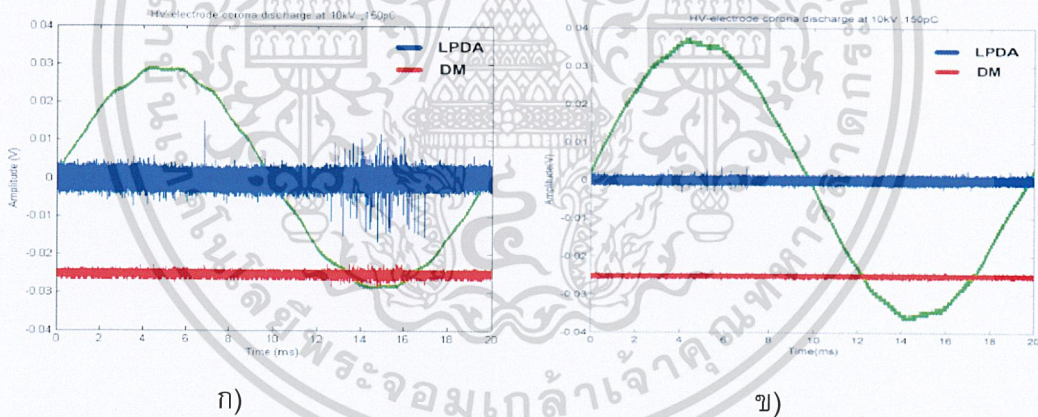
รูปที่ 4.51 ระยะการติดตั้งสายอากาศที่ระยะ 1.5 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

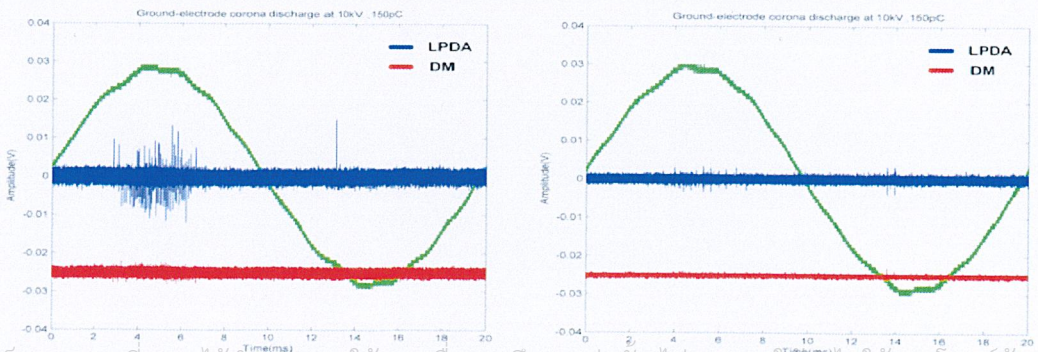


รูปที่ 4.52 ระยะการติดตั้งสายอากาศที่ระยะ 8 เมตร

ผลการทดสอบการตรวจจับดิสชาร์จบางส่วน ด้วยสายอากาศ LPDA และสายอากาศ Disc Monopole โดยเปรียบเทียบผลของระยะการติดตั้งสายอากาศ ที่ระยะ 1.5 เมตร และ 8 เมตร ซึ่งแสดงผลดังนี้

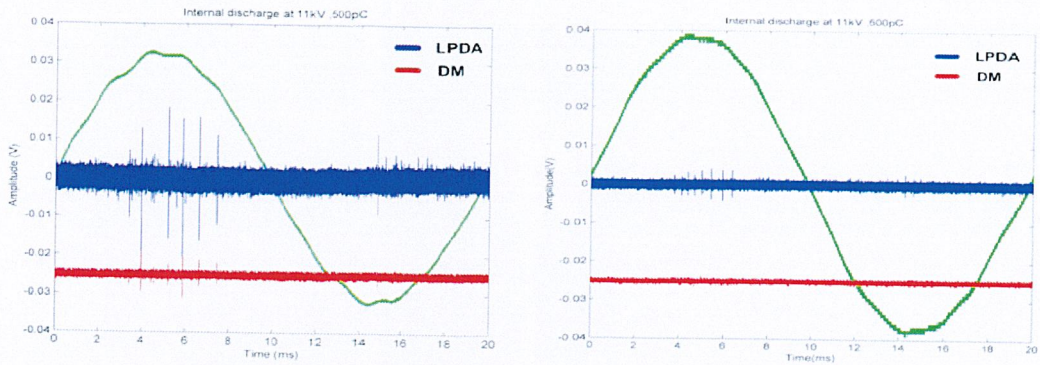


รูปที่ 4.53 HV-electrode corona discharge ก) ระยะ 1.5 เมตร, ข) ระยะ 8 เมตร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

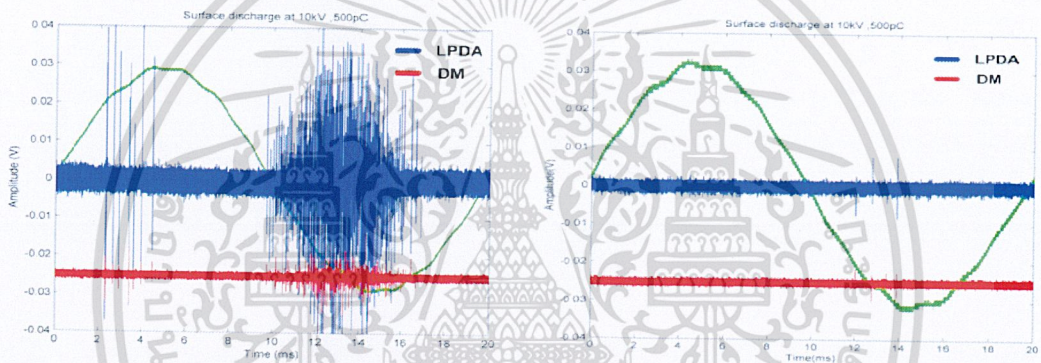
รูปที่ 4.54 Ground-electrode corona discharge ก) ระยะ 1.5 เมตร, ข) ระยะ 8 เมตร



ก)

ข)

รูปที่ 4.55 Internal discharge ก) ระยะ 1.5 เมตร, ข) ระยะ 8 เมตร



ก)

ข)

รูปที่ 4.56 Surface discharge ก) ระยะ 1.5 เมตร, ข) ระยะ 8 เมตร

จากการทดลองดังรูปที่ 4.53-4.56 พบว่าสายอากาศ LPDA สามารถตรวจจับ PD ได้ชัดเจนกว่าสายอากาศ DM ที่ระยะ 1.5 เมตร และที่ระยะ 8 เมตร สายอากาศ LPDA ยังสามารถตรวจจับ PD ได้แต่สายอากาศ DM ไม่สามารถตรวจจับ PD ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 บทสรุป

การตรวจจับดิสซาร์จบางส่วนด้วยเทคนิคการตรวจจับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าย่านความถี่สูง (UHF method) โดยออกแบบและสร้างสายอากาศลูปพีริโอดิกไดโพลแอร์เรย์ (LPDA) เพื่อตรวจจับดิสซาร์จบางส่วนเปรียบเทียบกับวิธีแบบดั้งเดิมและสายอากาศ Dis-monopole (DM) จากผลการทดสอบพบว่า

1. การตรวจจับดิสซาร์จบางส่วนด้วยสายอากาศ LPDA สามารถตรวจจับดิสซาร์จบางส่วนได้ ซึ่งมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับการตรวจจับแบบดั้งเดิมและตรวจจับด้วยสายอากาศ DM
2. การติดตั้งสายอากาศแบบอิลิเมนต์ที่ตั้งฉากกับพื้นโลกและอิลิเมนต์ขนานกับพื้นโลกสามารถตรวจจับดิสซาร์จบางส่วนได้ทั้ง 2 ลักษณะ
3. เมื่อติดตั้งสายอากาศที่ระยะเดียวกัน สายอากาศ LPDA มีประสิทธิภาพในการตรวจจับดิสซาร์จบางส่วนมากกว่าสายอากาศ DM

การตรวจจับดิสซาร์จบางส่วนด้วยเทคนิคการตรวจจับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าย่านความถี่สูง (UHF method) มีจุดเด่นคือ สามารถตรวจจับดิสซาร์จบางส่วนได้ ขณะที่ระบบหรืออุปกรณ์ไฟฟ้ากำลังทำงาน ลดปัญหาสัญญาณรบกวนที่ทำให้การตรวจจับ PD เกิดความผิดพลาด มีความสะดวก ปลอดภัยและราคาถูกกว่าการตรวจจับด้วยวิธีแบบดั้งเดิม


5.2 อุปสรรคและแนวทางนำไปแก้ไข

1. ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการวัดดิสซาร์จบางส่วนด้วยสัญญาณ UHF ในประเทศไทยนั้นยังมีน้อยมาก จึงต้องทำการศึกษาข้อมูลจากงานวิจัยของต่างประเทศ
2. เนื่องจากต้องใช้ความรู้ทางด้านภาควิศวกรรมโทรคมนาคมในการออกแบบสายอากาศจึงควรศึกษาข้อมูลเพิ่มเติมเกี่ยวกับการออกแบบ หลักการทำงานของสายอากาศ
3. ควรพัฒนาออกแบบและสร้างสายอากาศให้มีโครงที่แข็งแรง และมีขนาดเล็กลงเพื่อสะดวกในการนำไปใช้งาน
4. Oscilloscope ที่ใช้บันทึกผลการตรวจจับต้องมีช่วงแบนด์วิธที่กว้างและมี Sampling rate สูง เนื่องจากสัญญาณที่ตรวจจับได้อยู่ในย่านที่มีความถี่สูง
5. สัญญาณดิสซาร์จบางส่วนที่ตรวจจับไม่สามารถนำไปวิเคราะห์หาปริมาณดิสซาร์จบางส่วนได้ เนื่องจากจากการตรวจจับดิสซาร์จบางส่วนด้วย UHF method ยังเป็นงานวิจัยอยู่จึงไม่มีมาตรฐานเพื่อนำมารองรับการเปรียบเทียบหาปริมาณดิสซาร์จได้ ซึ่งไม่สามารถนำไปพัฒนาต่อไปได้ในอนาคต

บรรณานุกรม

- [1] IEC-60270:2000, "High-Voltage test techniques–Partial discharge Measurement"
- [2] A.Haddad and D.Warne, "Advances in High Voltage Engineering" The Institution of Engineering and Technology, London, United Kingdom, (2007), pp. 54-74.
- [3] Thomas A. Milligan, "Modern Antenna Design", United States of America(1985), pp. 384-395.
- [4] สำรวย สังข์สะอาด, วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.
- [5] วิชา เกตุสิงห์น้อย, ศรายุทธ แก้วเนียม, ศุภธร เป็นมันคง, และอำนาจ ทองศรี, "การวัดดิสชาร์จบางส่วนด้วยสายอากาศยูเอชเอฟ", (2550), วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [6] อภิรักษ์ ดอเลาะ, อเนก มีมุขอ, "สายอากาศลูปเพอร์โอดิก", (2541), วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [7] ทิพรรัตน์ กมลพัฒนานันท์, วิชิต พิชัยชาญเลิศ, วิษณุ ต่อตระกูล, "การวิเคราะห์และตรวจวัดการดิสชาร์จบางส่วนโดยใช้เทคนิคทางเสียง", (2552), วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [8] Z.B. Shen and E.F. El-Saadany, "Localization of Partial Discharges Using UHF Sensors in Power Transformers", (2006), IEEE.
- [9] Nicholas De Kock, Branko Coric and Ralf Pietsch, "UHF PD Detection in Gas-Insulated Switchgear-Suitability and Sensitivity of the UHF Method in Comparison with the IEC 270 Method", (1996), IEEE Electrical Insulation Magazine.
- [10] CIGRE, C.Neumann, B. Krampe, R. Feger, K. Feser, M. Knapp, A. Breuer, V. Rees, "PD Measurements on GIS of different designs by non-conventional UHF sensors", (2000).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก
การวิเคราะห์สัญญาณดิจิทัลบางส่วนโดยใช้โปรแกรม MATLAB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

การวิเคราะห์สัญญาณดิสชาร์จบางส่วนโดยใช้โปรแกรม MATLAB

ตัวอย่าง Code background noise ที่ใช้สำหรับในการเขียนโปรแกรม

```
clear
clc
load tek0001ALL.csv
y = tek0001ALL(:,2); % PD signal
t = linspace(0,0.2,10200); % linspace time
figure,plot(t,Y); % Plot time
domain
title('Background noise');
xlabel('Time (mSec)'),ylabel('Amplitude');
```

ตัวอย่าง Code High volt-electrode corona discharge ที่ใช้สำหรับในการเขียนโปรแกรม

```
clear
clc
load tek0003ALL.csv
y = tek0003ALL(:,2); % PD signal
t = linspace(0,0.2,10200); % linspace time
figure,plot(t,Y); % Plot time
domain
title('Highvolt-electrode corona discharge');
xlabel('Time (mSec)'),ylabel('Amplitude');
```

ตัวอย่าง Code Ground-electrode corona discharge ที่ใช้สำหรับในการเขียนโปรแกรม

```
clear
clc
load tek0005ALL.csv
y = tek0005ALL(:,2); % PD signal
t = linspace(0,0.2,10200); % linspace time
figure,plot(t,Y); % Plot time
domain
title('Ground-electrode corona discharge');
xlabel('Time (mSec)'),ylabel('Amplitude');
```

ตัวอย่าง Internal discharge ที่ใช้สำหรับในการเขียนโปรแกรม

```
clear
clc
load tek0007ALL.csv
y = tek0007ALL(:,2); % PD signal
t = linspace(0,0.2,10200); % linspace time
figure,plot(t,Y); % Plot time
domain
title('Internal');
xlabel('Time (mSec)'),ylabel('Amplitude');
```

ตัวอย่าง Surface discharge ที่ใช้สำหรับในการเขียนโปรแกรม

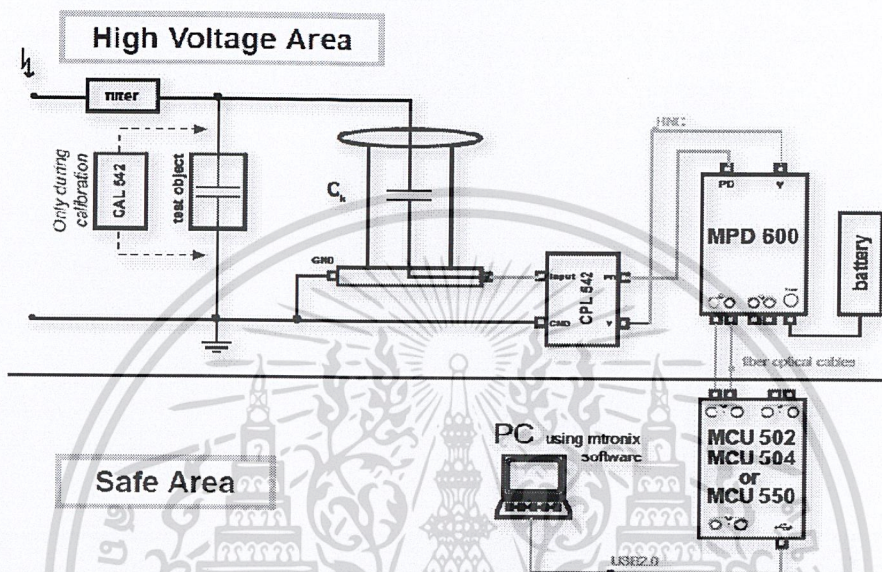
```
clear
clc
load tek0009ALL.csv
y = tek0009ALL(:,2); % PD signal
t = linspace(0,0.2,10200); % linspace time
figure,plot(t,Y); % Plot time
domain
title('Surface');
xlabel('Time (mSec)'),ylabel('Amplitude');
```



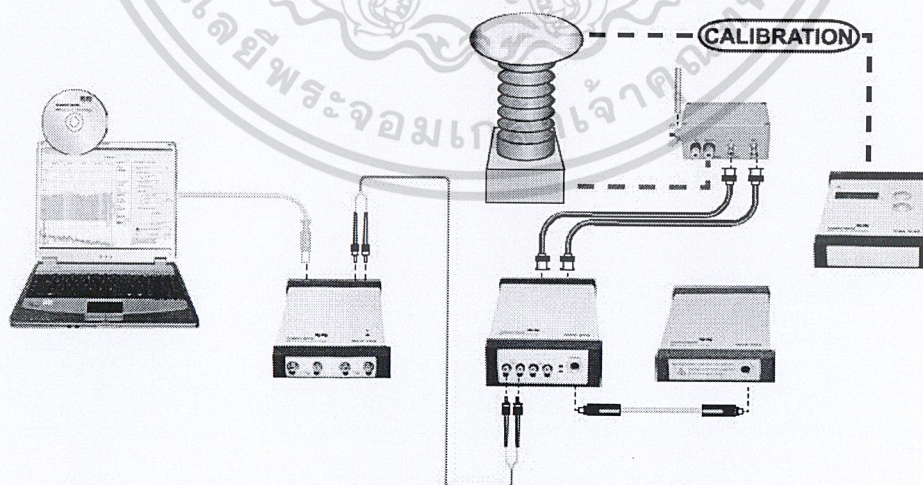
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข
OMICRON mtronix MPD 600

OMICRON mtronix MPD 600 คือ ชุดอุปกรณ์วัดดิสชาร์จบางส่วน

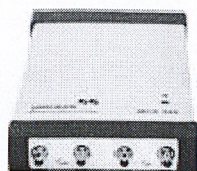


รูปที่ ข.1 Connection daigram

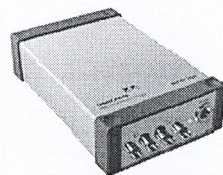


รูปที่ ข.2 การต่อสายอุปกรณ์ OMICRON mtronix MPD 600

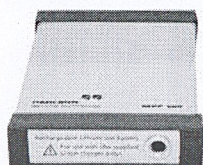
เอกสารนี้เป็นเอกสารเชิงวินัยสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



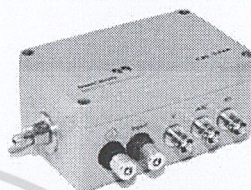
ก) MCU 502



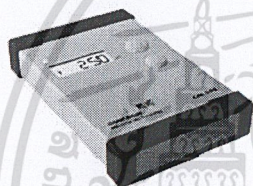
ข) MPD 600



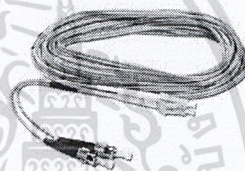
ค) Battery pack MPP 600



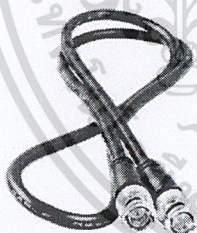
ง) CPL 542



จ) Calibrator CAL 542



ฉ) Fiber optic cable



ช) BNC cable



ซ) USB cable

รูปที่ ข.3 อุปกรณ์ของชุด OMICRON mtronix MPD 600

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



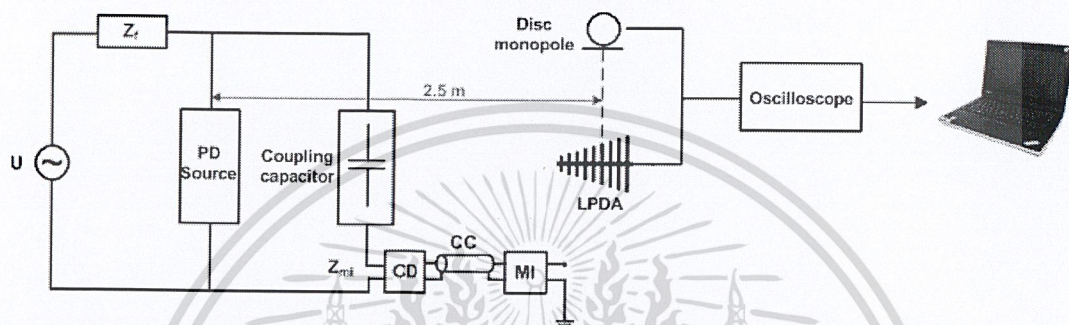
ภาคผนวก ค
ผลการตรวจจับดิสซาร์จบางส่วนโดยติดตั้งสายอากาศ LPDA ที่ระยะ 2.5 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

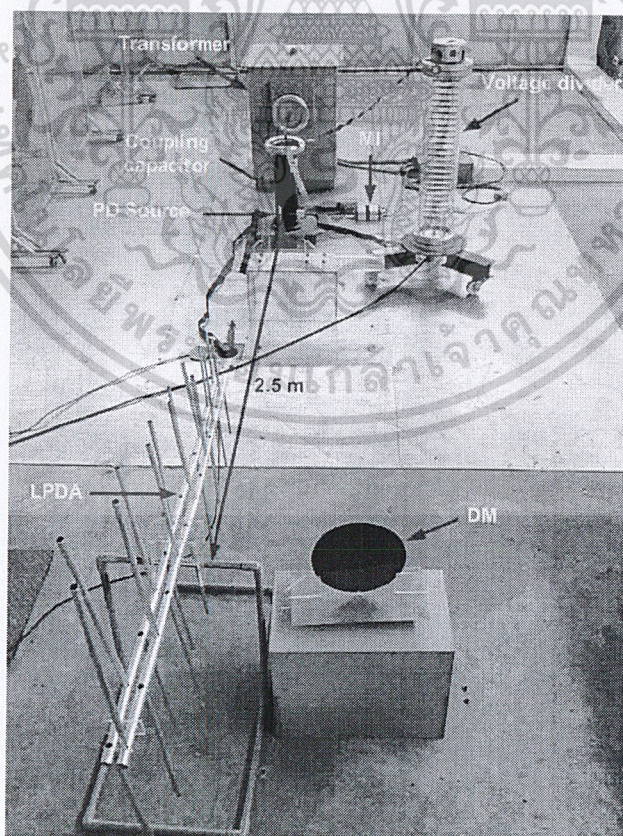
ภาคผนวก ค

ผลการตรวจจับดิสชาร์จบางส่วนโดยติดตั้งสายอากาศ LPDA ที่ระยะ 2.5 เมตร

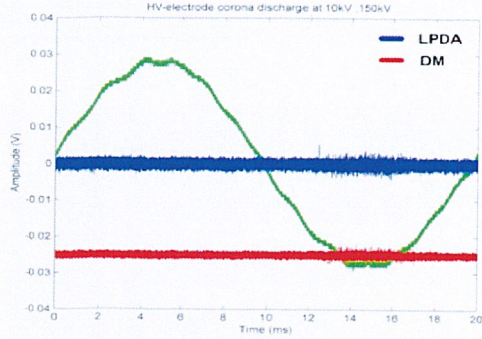
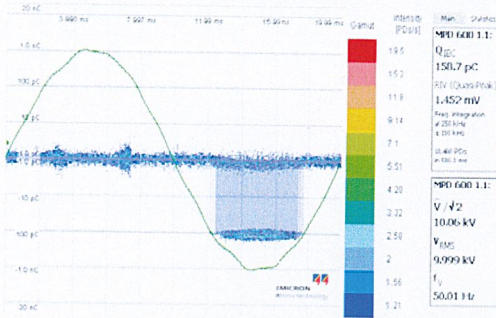
ค.1 ทำการเปรียบเทียบการตรวจจับดิสชาร์จบางส่วนของสายอากาศ LPDA และ DM โดยติดตั้งสายอากาศในลักษณะอีลิเมนต์ที่ตั้งฉากกับพื้นโลก และห่างจาก PD source เป็นระยะทาง 2.5 เมตร



รูปที่ ค.1 รูปจำลองการติดตั้งสายอากาศ LPDA และ DM ที่ระยะ 2.5 เมตร (อีลิเมนต์ที่ตั้งฉากกับพื้นโลก)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่รูปที่ ค.2 การติดตั้งสายอากาศ LPDA และ DM ที่ระยะ 2.5 เมตร
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
 (อีลิเมนต์ที่ตั้งฉากกับพื้นโลก)

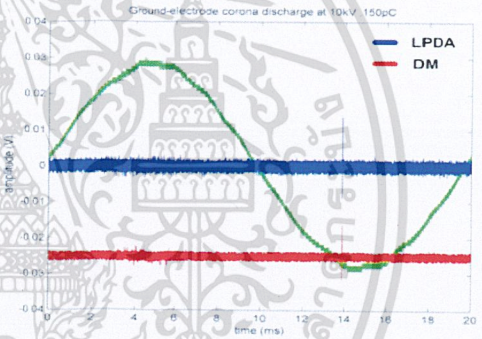
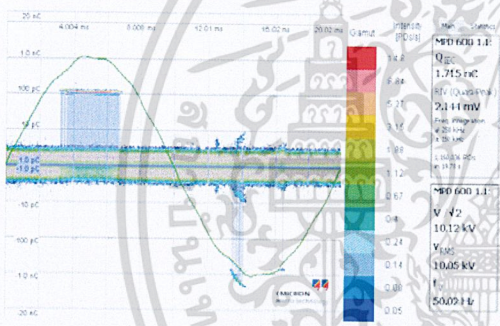


ก)

ข)

รูปที่ ค.3 HV-electrode corona discharge อิลิเมนต์ที่ตั้งฉากกับพื้นโลก

ก) Conventional method, ข) สายอากาศ LPDA และ DM

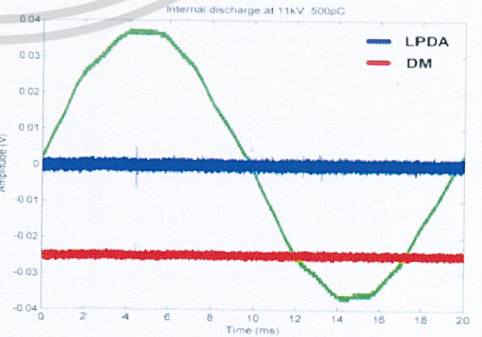
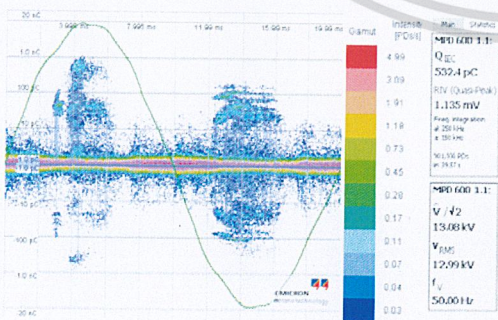


ก)

ข)

รูปที่ ค.4 Ground-electrode corona discharge อิลิเมนต์ที่ตั้งฉากกับพื้นโลก

ก) Conventional method, ข) สายอากาศ LPDA และ DM



ก)

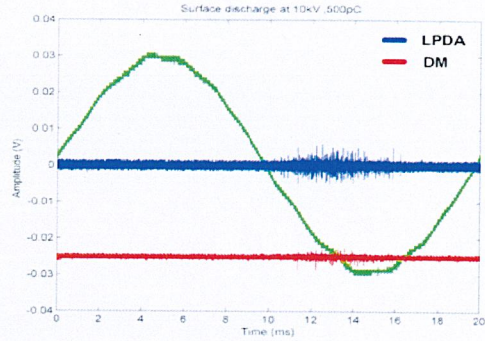
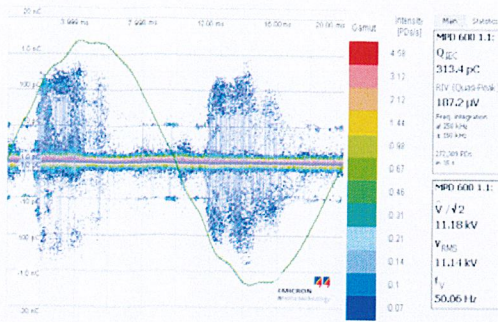
ข)

รูปที่ ค.5 Internal discharge อิลิเมนต์ที่ตั้งฉากกับพื้นโลก

ก) Conventional method, ข) สายอากาศ LPDA และ DM

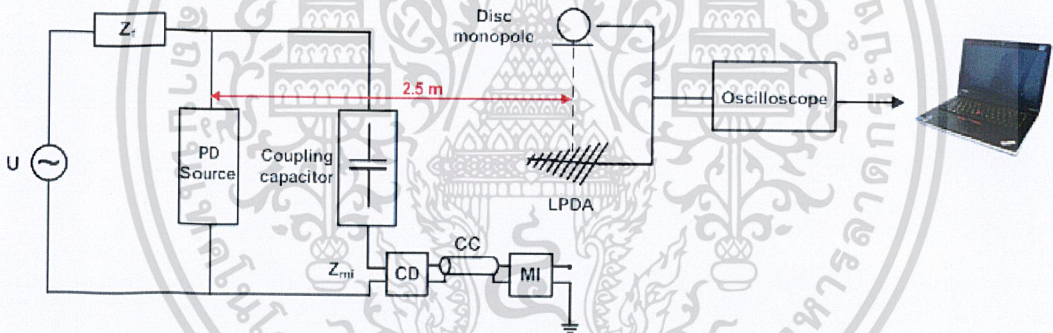
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และเผยแพร่โดยไม่หวังผลกำไร หากมีข้อผิดพลาดประการใด ขออภัยไว้ก่อนและไม่ขอรับผิดชอบต่อการนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสาร

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



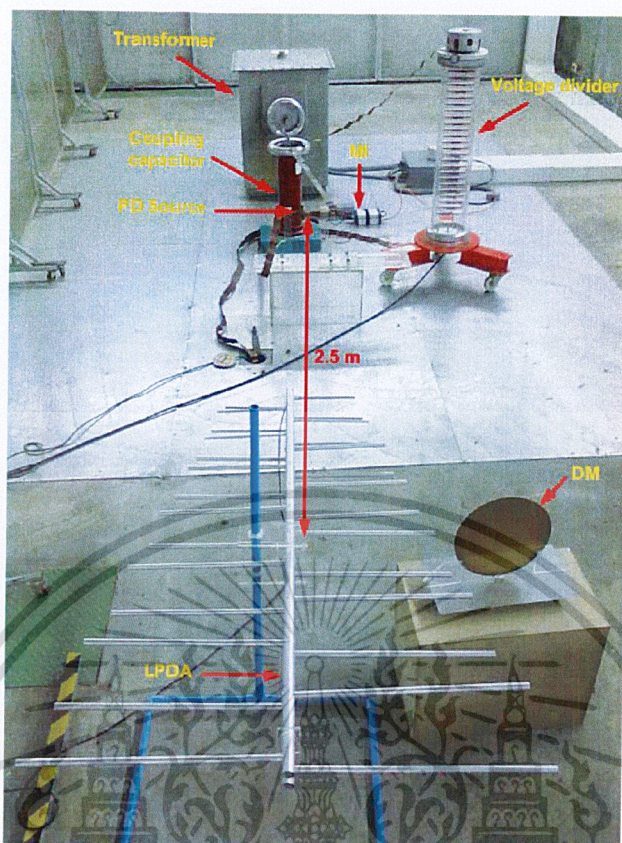
ก) ข) รูปที่ ค.6 Surface discharge อิลิเมนต์ตั้งฉากกับพื้นโลก
 ก) Conventional method, ข) สายอากาศ LPDA และ DM

ค.2 ทำการเปรียบเทียบการตรวจจับดิสชาร์จบางส่วนของสายอากาศ LPDA และ DM โดยติดตั้งสายอากาศในลักษณะอิลิเมนต์ขนานกับพื้นโลก และห่างจาก PD source เป็นระยะทาง 2.5 เมตร

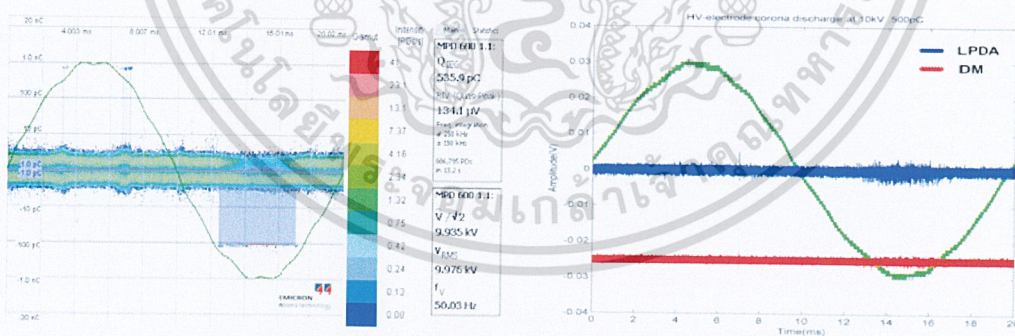


รูปที่ ค.7 รูปจำลองการติดตั้งสายอากาศ LPDA และ DM ที่ระยะ 2.5 เมตร (อิลิเมนต์ขนานกับพื้นโลก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค.8 การติดตั้งสายอากาศ LPDA และ DM ที่ระยะ 2.5 เมตร (อิเลเมนต์ขนานกับพื้นโลก)



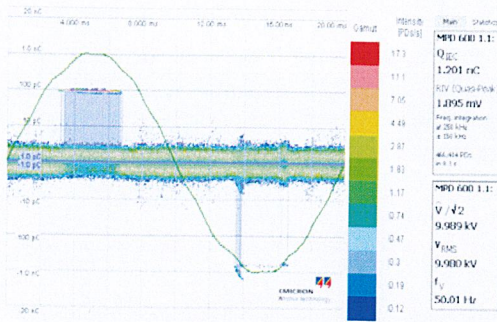
ก)

ข)

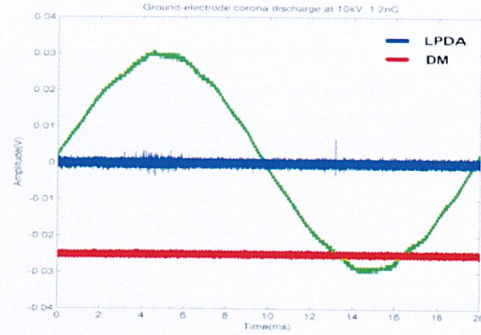
รูปที่ ค.9 HV-electrode corona discharge อิเลเมนต์ขนานกับพื้นโลก

ก) Conventional method, ข) สายอากาศ LPDA และ DM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



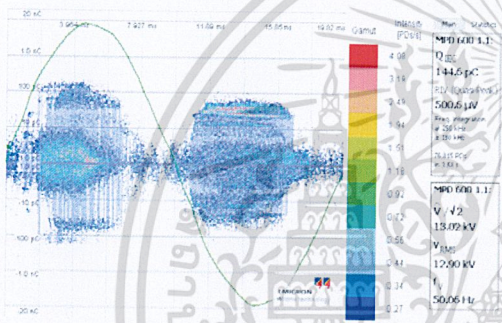
ก)



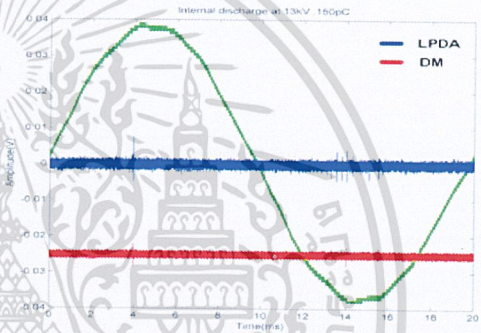
ข)

รูปที่ ค.10 Ground-electrode corona discharge อิลิเมนต์ขนานกับพื้นโลก

ก) Conventional method, ข) สายอากาศ LPDA และ DM



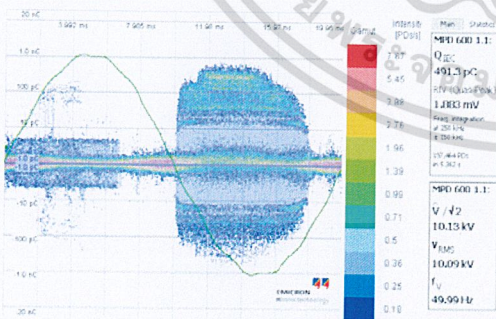
ก)



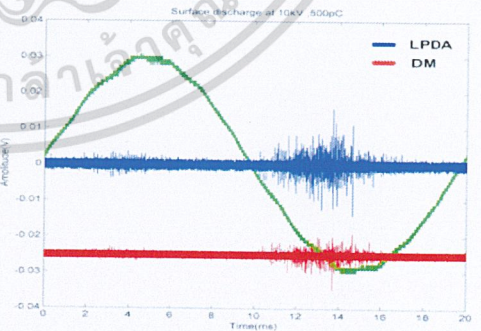
ข)

รูปที่ ค.11 Internal discharge อิลิเมนต์ขนานกับพื้นโลก

ก) Conventional method, ข) สายอากาศ LPDA และ DM



ก)



ข)

รูปที่ ค.12 Surface discharge อิลิเมนต์ขนานกับพื้นโลก

ก) Conventional method, ข) สายอากาศ LPDA และ DM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



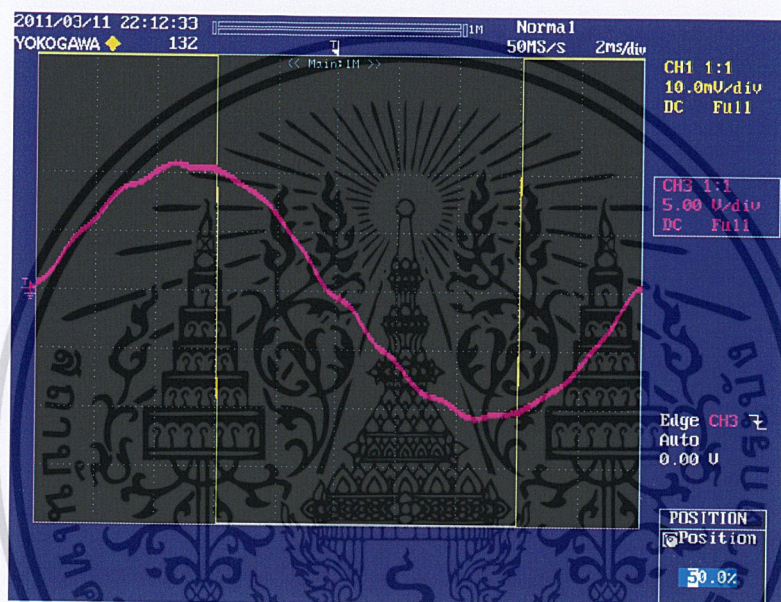
ภาคผนวก
Matching Impedance

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

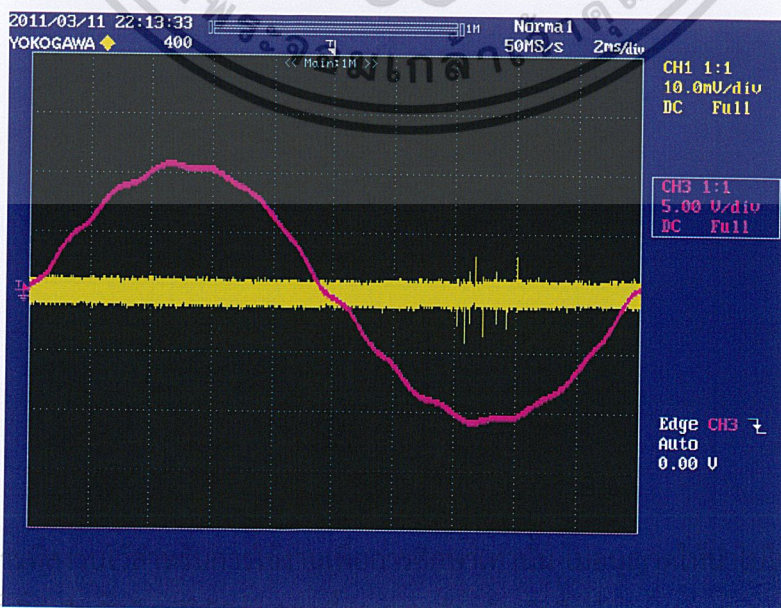
ภาคผนวก ง

Matching Impedance

Matching คือ การเลือกค่าความต้านทานให้เหมาะสมระหว่างสายไฟที่ใช้นำสัญญาณกับออสซิลโลสโคปเพื่อจะไม่ทำให้เกิดกำลังงานย้อนกลับ (Reflected Power) หรือเกิด Standing-Wave ในสายไฟที่ใช้นำสัญญาณขึ้นเลย ซึ่งถ้าเราไม่ทำการ matching สายไฟ จะทำให้สัญญาณเกิดความผิดเพี้ยน แสดงดังรูปที่ ง.1



รูปที่ ง.1 สัญญาณ PD ที่ไม่มีการ matching impedance



รูปที่ ง.1 สัญญาณ PD ที่มีการ matching impedance

จากรูปที่ ง.1 สัญญาณ PD (เส้นสีเหลือง) ที่เกิดจากไม่มีการ matching impedance โดยมีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยม ซึ่งไม่สามารถแสดงผลของการเกิด PD ได้

จากรูปที่ ง.2 สัญญาณ PD (เส้นสีเหลือง) ที่ตรวจจับได้ ที่มีการ matching impedance ซึ่งสามารถแสดงผลการตรวจจับ PD ได้อย่างชัดเจน

ตารางแสดงผลค่า matching impedance ของสายเคเบิล

RG or Type	Part Number	Nom. Z_0 Ω	VF %	Cap. pF/ft	Cent. Cond. AWG
RG-6	Belden 1694A	75	82	16.2	#18 Solid BC
RG-6	Belden 8215	75	66	20.5	#21 Solid CCS
RG-8	Belden 7810A	50	86	23.0	#10 Solid BC
RG-8	TMS LMR400	50	85	23.9	#10 Solid CCA
RG-8	Belden 9913	50	84	24.6	#10 Solid BC
RG-8	CXP1318FX	50	84	24.0	#10 Flex BC
RG-8	Belden 9913F7	50	83	24.6	#11 Flex BC
RG-8	Belden 9914	50	82	24.8	#10 Solid BC
RG-8	TMS LMR400UF	50	85	23.9	#10 Flex BC
RG-8	DRF-BF	50	84	24.5	#9.5 Flex BC
RG-8	WM CQ106	50	84	24.5	#9.5 Flex BC
RG-8	CXP008	50	78	26.0	#13 Flex BC
RG-8	Belden 8237	52	66	29.5	#13 Flex BC
RG-8X	Belden 7808A	50	86	23.5	#15 Solid BC
RG-8X	TMS LMR240	50	84	24.2	#15 Solid BC
RG-8X	WM CQ118	50	82	25.0	#16 Flex BC
RG-8X	TMS LMR240UF	50	84	24.2	#15 Flex BC
RG-8X	Belden 9258	50	82	24.8	#16 Flex BC
RG-8X	CXP08XB	50	80	25.3	#16 Flex BC
RG-9	Belden 8242	51	66	30.0	#13 Flex SPC
RG-11	Belden 8213	75	84	16.1	#14 Solid BC
RG-11	Belden 8238	75	66	20.5	#18 Flex TC
RG-58	Belden 7807A	50	85	23.7	#18 Solid BC
RG-58	TMS LMR200	50	83	24.5	#17 Solid BC
RG-58	WM CQ124	52	66	28.5	#20 Solid BC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก จ
บทความทางวิชาการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์และตรวจจับดิซชาร์จบางส่วนโดยใช้เทคนิคการตรวจจับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าย่านความถี่สูง

Partial discharge Measurement Using UHF Method

ศิริลักษณ์ เกตุแก้ว ศุภณัฐ เขียรธีรวรรณ ศุภฤกษ์ อิ่มสำราญ สุวพัชร ธนินทรานุโคตร
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ถนนฉลองกรุง แขวงลำปลาเทิว เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทร/โทรสาร. 0-2739-2478

บทคัดย่อ

บทความฉบับนี้เป็นการนำเสนอการวิเคราะห์และตรวจจับการเกิดดิซชาร์จบางส่วนโดยใช้เทคนิคการตรวจจับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าย่านความถี่สูง ซึ่งเป็นวิธีสมัยใหม่ที่มีความสะดวกในการนำไปใช้ตรวจจับในวัสดุทดสอบ โดยออกแบบสร้างสายอากาศสี่อวกาศคือไดโพลเออร์เรย์เพื่อตรวจจับดิซชาร์จบางส่วนและทำการวิเคราะห์ผลการทดสอบโดยเปรียบเทียบกับวิธีการทดสอบแบบดั้งเดิม และสายอากาศสี่อวกาศคือโมโนโพล พบว่าผลการทดสอบมีลักษณะเช่นเดียวกับวิธีแบบดั้งเดิม แต่แตกต่างกับสายอากาศสี่อวกาศคือโมโนโพล ดังนั้นสายอากาศที่ออกแบบสร้างขึ้น สามารถตรวจจับและจำแนกประเภทของการเกิดดิซชาร์จบางส่วนได้

คำสำคัญ: สี่อวกาศคือไดโพลเออร์เรย์, ดิสโมโนโพล, ดิซชาร์จบางส่วน, คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

Abstract

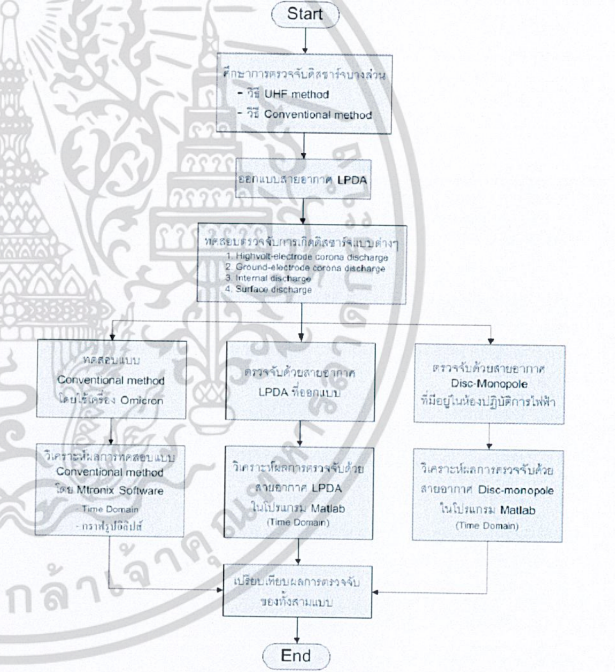
This article presents the design and implementation of the Log-Periodic Dipole Array (LPDA) in detecting electromagnetic waves radiation from the Partial discharge. The main goal is to build the proper antenna which can be used in accurate Partial discharge measurement. The antenna built in this research has a very high efficiency in detecting various types of the Partial discharge generated from the artificial Partial discharge source even with a very strong by noise. The experiment result by comparing the proposed LPDA, the disc monopole and the conventional method. Show that novel design can be effectively applied in detecting and analysing the real time.

Keyword: LPDA, Disc Monopole Antenna, Partial discharge, electromagnetic waves

1. บทนำ

ในระบบไฟฟ้ากำลังนั้นความน่าเชื่อถือของระบบเป็นสิ่งที่สำคัญอย่างมาก ความเสียหายของระบบที่เกิดจากความล้มเหลวของระบบการฉนวนที่มาจากกรอกแบบระบบการฉนวนที่ไม่ได้คุณภาพหรือความบกพร่องในกระบวนการผลิต ซึ่งจะเป็นสาเหตุทำให้เกิดดิซชาร์จบางส่วนภายในเนื้อฉนวน และอาจนำไปสู่การเสียหายที่สมบูรณ์ จึงจำเป็นต้องมีการตรวจจับดิซชาร์จบางส่วนในอุปกรณ์

ไฟฟ้าแรงสูงเป็นประจำ โดยในการตรวจจับดิซชาร์จบางส่วนนั้นสามารถใช้งานตามมาตรฐาน IEC 60270 ซึ่งเป็นการวัดแบบดั้งเดิมที่จำเป็นต้องทดลองในห้องทดลอง ไม่สามารถตรวจจับ PD ในขณะที่อุปกรณ์กำลังทำงาน ดังนั้นจึงมีการนำเสนอการตรวจจับดิซชาร์จบางส่วนโดยใช้เทคนิคการตรวจจับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งมีข้อดีคือ สามารถเคลื่อนย้ายได้ และรองรับการทำงานแบบ online network ได้ ซึ่งจะทำให้การตรวจจับ PD นั้นมีความทันสมัยและสะดวกสบายในการตรวจจับ



รูปที่ 1 Project planning

2. ทฤษฎีและหลักการการตรวจวัดดิซชาร์จบางส่วน

ดิซชาร์จบางส่วน (Partial Discharge : PD) คือ การเกิดเบรกดาวน์ที่ไม่สมบูรณ์ พลังงานที่ทำให้เกิดดิซชาร์จนั้นไม่มากพอที่จะทำให้ฉนวนเปลี่ยนสภาพไปเป็นสภาพนำไฟฟ้าได้ตลอดแนวระหว่างอิเล็กโทรด เป็นการเสียสภาพการเป็นฉนวนเพียงบางส่วน ในการเกิด PD แต่ละครั้ง จะมีพลังงานถ่ายเทให้กับพื้นผิวฉนวน ในลักษณะการชนกระแทก ซึ่งจะเป็นสาเหตุทำให้เกิดความร้อนเพิ่มขึ้นเฉพาะจุด เป็นผลให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมี ทำให้ฉนวนเสียหายเกิดผลิตภัณฑ์คาร์บอน และอาจนำไปสู่การเสียหายของระบบการฉนวนอย่างสมบูรณ์ (การเบรกดาวน์) [1]

การวัดทิศทางบางส่วน โดยใช้เทคนิคการตรวจจับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง(UHF Method)เป็นวิธีการตรวจจับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่าน 300MHz-3GHz ที่แพร่กระจายออกมาขณะเกิด PD ภายในเนื้อฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง เป็นการตรวจสอบหาความบกพร่องขณะที่กำลังเกิดทิศทางขึ้นภายในเนื้อฉนวน ข้อได้เปรียบของวิธีนี้เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการวัดแบบดั้งเดิม (Conventional method) คือช่วยลดผลของสัญญาณรบกวนที่อยู่ในย่านความถี่ต่ำ สามารถควบคุมการทำงานจากระยะทางไกลทำให้มีความปลอดภัยสูง และตรวจจับได้ในขณะonline network ซึ่งจะทำให้การตรวจจับ PD มีความสะดวกสบายและทันสมัยมากขึ้น ถูกนำไปประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงต่างๆ เช่น GIS, Cable, Switch Gear, Power Transformer [3]

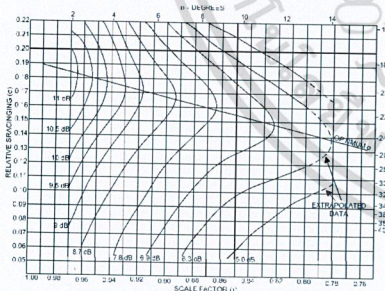
3. การออกแบบสายอากาศ LPDA

สายอากาศ LPDA เป็นสายอากาศแบบอิสระจากความสามารถออกแบบให้ใช้งานในช่วงความถี่ที่กว้าง โดยนิยมออกแบบใช้งานในย่านความถี่ HF (3Hz-30MHz), VHF (30MHz-300MHz) และ UHF (300MHz-3GHz) โดยมีขั้นตอนการออกแบบดังนี้ [5]

1. เลือกช่วงความถี่(f_{max}, f_{min}) เพื่อหาขนาดของแบนวิธ (B) กำหนด $f_{max}=150\text{ MHz}, f_{min}=300\text{MHz}$

$$B = \frac{f_{max}}{f_{min}} \quad (1)$$

2. เลือกค่าพารามิเตอร์ในการออกแบบ (τ) และค่า spacing constant (σ) หาได้จากรูปที่ 1



รูปที่ 2 ลักษณะทางเดินของกราฟที่คำนวณได้ของค่าไดเรกทิวิตี

3. หาค่า The half apex angle (α) จากสมการ

$$\cot \alpha = 4\sigma / (1 - \tau) \quad (2)$$

4. หาค่า lower truncation constant (K_1) และ ค่า upper truncation constant (K_2) จากสมการ

$$K_1 = 1.01 - 0.519\tau \quad (3)$$

$$K_2 = 7.10\tau^3 - 21.3\tau^2 + 21.98\tau - 7.30 + \sigma(21.82 + 66\tau + 62.12\tau^2 - 18.29\tau^3) \quad (4)$$

5. หาระยะของอีลิเมนต์ที่ยาวที่สุด (L_1) และระยะของอีลิเมนต์ที่สั้นที่สุด (L_2) จากสมการ

$$L_n = K_n \times \lambda_n \quad (5)$$

6. หาค่า virtual apex distance (R_1, R_2) จากสมการ

$$R_n = 2L_n \sigma / (1 - \tau) \quad (6)$$

7. หาคความยาวของสายอากาศ จากสมการ

$$Lenght = R_1 - R_2 \quad (7)$$

8. หจำนวนอีลิเมนต์ทั้งหมดของสายอากาศ (N) จากสมการ

$$N = 1 + [\log(\frac{k_2}{k_3}) + \log(\frac{f_{min}}{f_{max}}) / \log \tau] \quad (8)$$

9. หาคความยาวของแต่ละอีลิเมนต์ของสายอากาศ (L) จากสมการ

$$L_{n+1} = \tau L_n \quad (9)$$

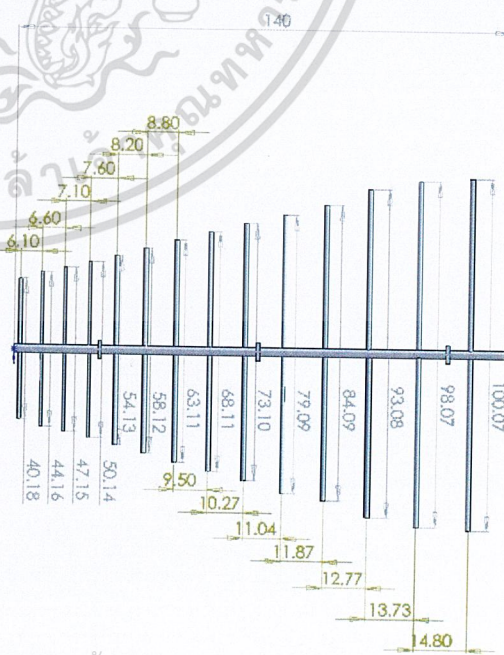
10. หาระยะห่างของแต่ละอีลิเมนต์ (d_1) จากสมการ

$$d_1 = R_1 (1 - \tau) \quad (10)$$

จากการออกแบบจะได้ส่วนประกอบของสายอากาศแต่ละส่วนมีขนาดดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ส่วนประกอบของสายอากาศ LPDA

Items	φ (inch)	ความยาวของท่ออลูมิเนียม (m)
แกนกลาง	1	1.32258 × 2
กิ่งสายอากาศ	5/8	$L_1=1.05466, L_2=0.98083, L_3=0.91140$
	1/2	$L_4=0.84630, L_5=0.78700, L_6=0.73191, L_7=0.68067, L_8=0.63302, L_9=0.58871, L_{10}=0.54750$
	3/8	$L_{11}=0.50918, L_{12}=0.47353, L_{13}=0.44039, L_{14}=0.40956$



รูปที่ 3 สายอากาศ LPDA ที่ออกแบบ โดยโปรแกรม solid works

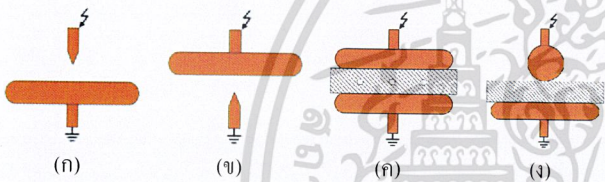
สัญญาครณิใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



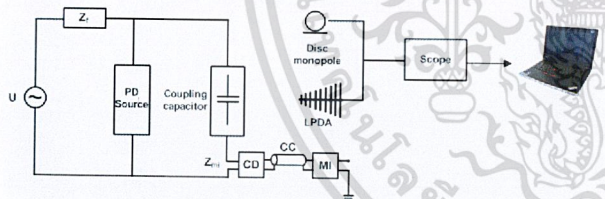
รูปที่ 4 สายอากาศ LPDA

4. ผลการทดลอง

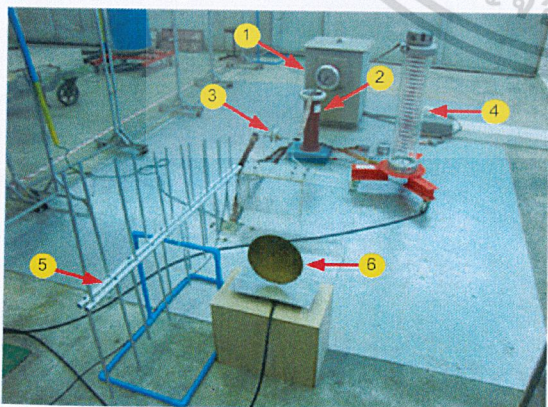
โครงการนี้เป็นการศึกษาการตรวจจับ PD โดยตรวจจับด้วยวิธีแบบดั้งเดิม ตรวจจับด้วยสายอากาศ LPDA และตรวจจับด้วยสายอากาศ DM ซึ่งมีวงจรการทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60270 และมี PD source 4 แบบ คือ (ก) HV-electrode corona discharge, (ข) Ground-electrode corona discharge, (ค) Internal discharge, (ง) Surface discharge



รูปที่ 5 PD source



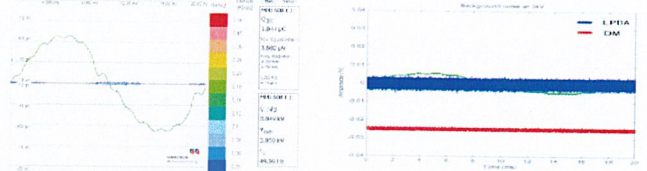
รูปที่ 6 วงจรการทดสอบ



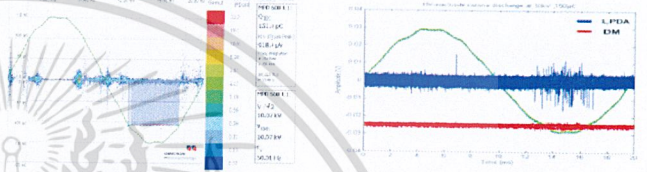
รูปที่ 7 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ (1) Transformer 460V/75kV, 40kVA, (2) Coupling Capacitor 0.001μF, 100V, (3) PD source, (4) Voltage divider 980V/1V, (5) สายอากาศ LPDA, (6) สายอากาศ DM

4.1 ผลของการตรวจจับ PD ด้วยสายอากาศ LPDA เปรียบเทียบกับแบบดั้งเดิมและสายอากาศ DM

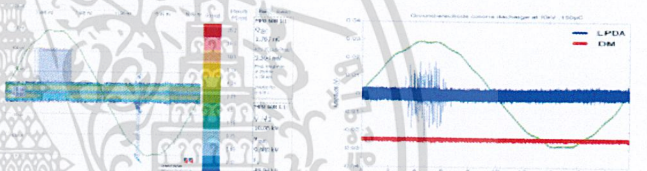
การตรวจจับ PD โดย UHF method มีแหล่งกำเนิด PD ตามวงจรมารมาตรฐาน IEC 60270 ซึ่งติดตั้งสายอากาศ LPDA และสายอากาศ DM ให้มีระยะห่างจาก PD source 1.5 เมตร



รูปที่ 8 Background noise



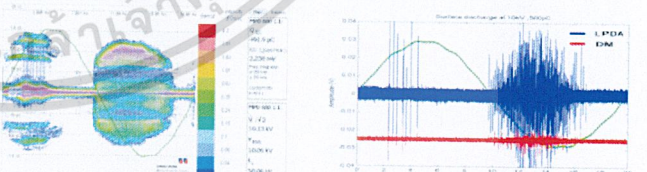
รูปที่ 9 HV-electrode corona discharge at 10kV, 151.4pC



รูปที่ 10 Grounded-electrode corona discharge at 10kV, 1.767nC



รูปที่ 11 Internal discharge at 11.16kV, 487.9pC



รูปที่ 12 Surface discharge at 10kV, 491.9pC

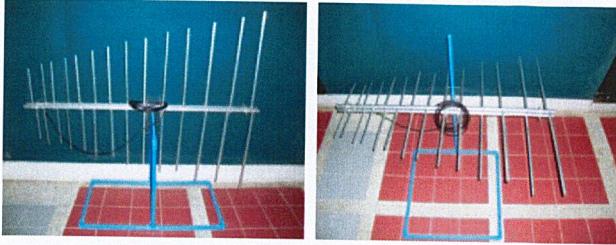
จากผลการทดลอง รูปทางซ้ายมือแสดงการตรวจจับ PD แบบ Conventional method ส่วนทางขวามือเป็นการตรวจจับแบบ UHF method ซึ่งใช้สายอากาศ LPDA ที่ออกแบบสร้างขึ้นและสายอากาศ DM ที่มีอยู่ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง [4] ตรวจจับ PD พร้อมกัน

ผลการเปรียบเทียบพบว่า สายอากาศ LPDA สามารถตรวจจับ PD ได้ และมีตำแหน่งมุมที่เกิด PD เหมือนกับการตรวจจับด้วยวิธี Conventional method และสายอากาศ LPDA สามารถตรวจจับ PD ได้ชัดเจนกว่าสายอากาศ DM

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผลการตรวจจับ PD จากลักษณะการติดตั้งสายอากาศ

LPDA

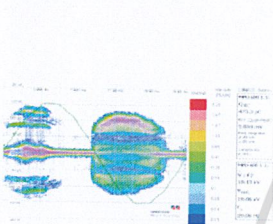


(ก)

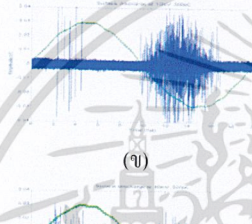
(ข)

รูปที่ 10 ลักษณะการติดตั้งสายอากาศ LPDA

(ก) อีลิเมนต์ที่ตั้งฉากกับพื้นโลก, (ข) อีลิเมนต์ที่ขนานกับพื้นโลก



(ก)



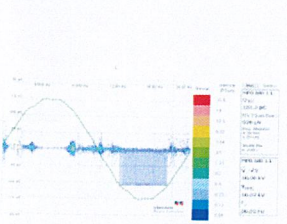
(ข)

รูปที่ 11 Surface dischargeลักษณะการติดตั้งสายอากาศ LPDA ที่แตกต่างกัน (ก) Conventional method, (ข) ผลจากอีลิเมนต์ที่ตั้งฉากกับพื้นโลก, (ค) ผลจากอีลิเมนต์ที่ขนานกับพื้นโลก

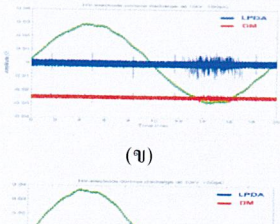
จากการทดลองเปรียบเทียบผลการตรวจจับ PD โดยลักษณะการติดตั้งสายอากาศ LPDA ที่ต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 10 จะพบว่า การติดตั้งสายอากาศทั้ง 2 แบบ สามารถตรวจจับ PD ได้เหมือนกัน ลักษณะตำแหน่งมุมเฟสที่เกิด PD เดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 11

4.3 ผลการตรวจจับ PD โดยติดตั้งสายอากาศ LPDA และ

DM ที่ระยะต่างๆ



(ก)



(ข)

รูปที่ 12 HV-electrode corona dischargeลักษณะการติดตั้งสายอากาศ LPDA ที่แตกต่างกัน (ก) Conventional method, (ข) ที่ระยะ 1.5 เมตร, (ค) ที่ระยะ 8 เมตร

การตรวจจับ PD โดยติดตั้งสายอากาศ LPDA และ DM ในระยะต่างๆกัน เพื่อนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับระยะที่ดีที่สุดในการติดตั้งสายอากาศ LPDA โดยทำการทดลองตรวจจับกับ PD source แบบ HV-electrode corona discharge ที่ระยะระหว่าง 1.5 เมตร และ 8 เมตร

จากการทดลองตรวจจับ PD โดยติดตั้งสายอากาศในระยะต่างๆ ผลที่ได้คือสายอากาศ LPDA สามารถตรวจจับ PD ได้ดีกว่าสายอากาศ DM ในระยะ 1.5 เมตร และในระยะ 8 เมตร สายอากาศ LPDA ยังสามารถตรวจจับ PD ได้ในขณะที่สายอากาศ DM ไม่สามารถที่จะตรวจจับ PD โดยผลแสดงในรูปที่ 12

5. สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองตรวจจับ PD ด้วยวิธี UHF method โดยใช้สายอากาศ LPDA ที่ได้ทำการออกแบบไว้ สามารถตรวจจับ PD ได้โดยเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลการตรวจจับแบบดั้งเดิมและทำการวิเคราะห์ และเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับสายอากาศ DM [5] จะพบว่าสามารถตรวจจับ PD ได้ผลที่ชัดเจนกว่า

จุดเด่นที่ดีกว่าการตรวจจับ PD แบบวิธีอื่น คือสามารถตรวจจับ PD ได้ขณะ online network สดปัญหาสัญญาณรบกวนที่ทำให้การตรวจจับ PD ผิดพลาด มีความปลอดภัยกว่าการตรวจจับแบบดั้งเดิม

6. กิตติกรรมประกาศ

บทความฉบับนี้จะสำเร็จไปได้ด้วยดี ผู้จัดทำขอขอบพระคุณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ห้องปฏิบัติการ High volt และ ESIRC ที่ส่งเสริมในงานวิจัยของนักศึกษา และ ผศ.ดร.ชาวี ชมพูอินทิว อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ผู้ที่ให้คำแนะนำเกี่ยวกับงานทางด้านวิจัย

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] ตำรวย สังข์สะอาด, วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547
- [2] IEC-60270:2000, "High-Voltage test techniques—Partial discharge Measurement"
- [3] A.Haddad and D.Warne, "Advances in High Voltage Engineering" The Institution of Engineering and Technology, London, United Kingdom, (2007), pp. 54-74.
- [4] วิชา เกตุสิงห์น้อย, ศรายุทธ แก้วเนียม, สุภกร เป็นมันคง, และ อำนวย ทองศรี, "การวัดคิสรจรับางส่วนด้วยสายอากาศยูเอชเอฟ", (2550), ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [5] Thomas A. Milligan, "Modern Antenna Design", United States of America (1985), pp. 384-395.

ประวัติผู้เขียน



นางสาวศิริลักษณ์ เกตุแก้ว (นก)

เกิดวันที่ 25 กันยายน 2531

ที่อยู่ 10/3 หมู่ 12 ต.ปากน้ำ อ.บางคล้า จ.ฉะเชิงเทรา 24110

จบชั้นมัธยมศึกษาตอนต้นและตอนปลาย จากโรงเรียนเบญจมราชรังสฤษฎิ์

ฝึกงานที่ บริษัท เอกรัฐวิศวกรรม จำกัด (มหาชน)

E-mail : siriluk_nket@hotmail.com,

Tel : 0870730992



นายสุภณัฐ เขียวธีรวรรณ (เป็นซ์)

เกิดวันที่ 2 มิถุนายน 2532

ที่อยู่ 62/4 หมู่ 8 ต.จำปา อ.ท่าเรือ จ.พระนครศรีอยุธยา 13130

จบชั้นมัธยมศึกษาตอนต้น จากโรงเรียนท่าเรือนิติยานุกูล

จบชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนพิบูลวิทยาลัย

ฝึกงานที่ บริษัท ซี.อาร์.เอ็นจิเนียริงแอนด์เทคโนโลยี จำกัด

E-mail : supanut_tein@hotmail.com,

Tel : 0849738259



นายสุภฤกษ์ อิ่มสำราญ (ปลั่งอง)

เกิดวันที่ 13 มกราคม 2532

ที่อยู่ 72/1 หมู่ 15 ต.ท่าไข่ อ.เมือง จ.ฉะเชิงเทรา 24000

จบชั้นมัธยมศึกษาตอนต้นและตอนปลาย จากโรงเรียนเบญจมราช

รังสฤษฎิ์

ฝึกงานที่ บริษัท เอกรัฐวิศวกรรม จำกัด (มหาชน)

E-mail : suparog_pong@hotmail.com,

Tel : 0861122688



นายสุวพัชร ธนินทรานุกอตร์ (เอ็น)

เกิดวันที่ 31 สิงหาคม 2532

ที่อยู่ 116 หมู่ 4 ต.ม่วงหมู่ อ.เมือง จ.สิงห์บุรี 16000

จบชั้นมัธยมศึกษาตอนต้นและตอนปลาย จากโรงเรียนสิงห์บุรี

ฝึกงานที่ บริษัท ซี.อาร์.เอ็นจิเนียริงแอนด์เทคโนโลยี จำกัด

E-mail : su.wapat@hotmail.com,

Tel : 0880940905

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานในองค์กรที่ขอเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้