

การประยุกต์ใช้งานการวิเคราะห์สัญญาณครอสทอล์ก
สำหรับการวัดดิสชาร์จบางส่วนในภาคสนาม

CROSSTALK ANALYSIS APPLIED FOR ON-SITE PARTIAL DISCHARGE
MEASUREMENT

ชัชณพงค์ ศรีนางแย้ม
CHISSANUPONG SRINANGYAM

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2566

KMITL-2023-EN-M-027-068

CROSSTALK ANALYSIS APPLIED FOR ON-SITE PARTIAL DISCHARGE
MEASUREMENT

CHISSANUPONG SRINANGYAM

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTOR OF ENGINEERING IN ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING
SCHOOL OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2023
KMITL-2023-EN-M-027-068

COPYRIGHT 2023

SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประยุกต์ใช้งานการวิเคราะห์สัญญาณครอสทอล์กสำหรับการวัดดิสชาร์จบางส่วนในภาคสนาม
นักศึกษา	นายชิษณุพงศ์ ศรีนางแย้ม
รหัสประจำตัว	64601037
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์
พ.ศ.	2566
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.นรเศรษฐ์ พัฒนเดช
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	รศ.ดร.พิทยา ปานนิล

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้กล่าวถึงสัญญาณที่ส่งผ่านในระบบสายดิน ระหว่างการวัดดิสชาร์จบางส่วน PD (Partial Discharge) ขณะมีการทำงานจ่ายไฟ (Online) สำหรับอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง เมื่อเกิดกระแสรูปลิ้นพัลส์ PD ต่างๆ จะชาร์จเข้าฉนวน (Dielectric) ของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง, หนึ่งในประเภทของสัญญาณรบกวนที่ส่งผลกระทบต่อรูปแบบ (Pattern) PD เรียกว่า cross-talk นั่นคือ การพบดิสชาร์จที่เกิดในจุดที่วัดโดยมีผลการรบกวนคาบเกี่ยว (Coupling) มาจากอีกจุดหนึ่ง เพื่อศึกษาสัญญาณที่เกิดจากการคาบเกี่ยวมาจากจุดอื่นนี้ จึงได้ดำเนินการกับวงจรวัด PD สองวงจร คือ วงจรที่ 1 และ วงจรที่ 2 โดยอยู่บนระบบกราวด์เดียวกันในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง ระยะห่างระหว่างวงจรวัด PD สองวงจรมีประมาณ 20 เมตร, แบบจำลอง PD ถูกนำมาใช้เพื่อสร้างสัญญาณ PD ใส่เข้าไปในวงจรทดสอบที่ 1 ในขณะที่ตรวจสอบสัญญาณ cross-talk ในวงจรที่ 2 โดยใช้เซ็นเซอร์หม้อแปลงกระแสความถี่สูง (HFCT), ในการวัดสัญญาณ PD ในวงจรที่ 1 และ สัญญาณที่เกิดจากการคาบเกี่ยวมาจากจุดอื่นนี้ ในวงจรที่ 2, ผลการวัดการส่งสัญญาณ cross-talk ในระบบกราวด์ให้รูปแบบจำแนกเฟส PD คือ PRPD (Phase Resolved Partial Discharge) แบบสองขั้ว (Bipolar) , รูปลิ้นพัลส์ที่แสดงการสั่นอย่างมาก (Oscillating pulse shape) นอกจากนี้ ยังได้ศึกษาการวัดค่า PD ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบไอ้ในโรงงานจริง เป็นที่สังเกตว่าความรู้เกี่ยวกับปรากฏการณ์การที่เกิดจากการ cross-talk ในระบบกราวด์สามารถช่วยในการตรวจสอบ PD และหาตำแหน่งสำหรับการวัด PD ขณะมีการทำงานจ่ายไฟได้

Thesis	CROSSTALK ANALYSIS APPLIED FOR ON-SITE PARTIAL DISCHARGE MEASUREMENT
Student	Mr. Chissanupong Srinangyam
Student ID.	64601037
Degree	Master of Engineering
Program	Electrical and Computer Engineering
Year	2023
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr. Norasage Pattanadech
Thesis Co-Advisor	Assoc.Prof.Dr. Pittaya Pannil

ABSTRACT

This thesis discusses signal transmission in the grounding system. During online partial discharge (PD) measurement for the high voltage (HV) apparatus, various PD pulse currents recharge the dielectric of HV apparatus when a PD occurs. One of the noise typologies that affects PD patterns is called the cross-talk, that is, discharges that appear in the measured point due to coupling from another point. In order to study the cross-talk signal, the two PD measuring circuits which are circuit no.1 and circuit no.2, on the same grounding system in the HV laboratory were performed. The distance between two PD measuring circuits is about 20 meters. The artificial PD models were utilized to generate the PD signal injecting to the test circuit no.1, while the cross-talk signals were investigated in circuit no.2. The HFCT sensors were used to measure the PD signal in circuit 1 and the cross-talk signal in circuit 2. The measurement results found that the cross-talk signal transmission in grounding systems provides a bipolar PRPD pattern, and the pulse waveform shows an oscillation shape. Moreover, onsite PD measurements of the generator steam turbine were studied. It is noticeable that the knowledge about cross-talk phenomena in grounding systems can help the PD verification and location for online PD measurement.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากท่านทั้งหลายที่ให้ความช่วยเหลือและคำชี้แนะ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ดร. เพทาย นิมสนอง

ขอขอบคุณ รศ.ดร. นรเศรษฐ พัฒนเดช , รศ.ดร.พิทยา ปานนิล, รศ.ดร. ประภาษ อุดคคกิตมา พันธุ์ , รศ.ดร. พีรวุฒิ ยุทธโกวิท , คุณ บัญชา มหาเทพ , คุณ ธเนศ วอทอง และ คุณ วรชัย สวัสดิ มงคล ที่ให้ความช่วยเหลือและคำชี้แนะตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณ นางอุไร นางสาวสุวพัชร นางสาวพวงผกา นายทม นางสมใจ นางอารมณ ที่ สนับสนุนข้าพเจ้าเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สจล. และ บริษัท ไอดี แอสเซ็ท ตลอดจนกลุ่มบริษัท ทีไอเอส ที่ให้การสนับสนุนข้าพเจ้าด้วยดีจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วง

ขอขอบคุณ พี่ๆ น้องๆ ทุกคนทั้งในวงการทำงานไฟฟ้าแรงสูงและ สจล. ที่ให้คำแนะนำ ตอบคำถามปัญหาต่างๆ และช่วยเหลือด้านอื่นๆ โดยเฉพาะญาณพล และ ศิวกร

ขอขอบคุณผู้ที่กระทำดีต่อข้าพเจ้าซึ่งเป็นที่รักใคร่และมีบุญคุณ ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพ ทั้งหลายทุกท่านที่ได้ถ่ายทอดวิชาความรู้และประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

สำหรับประโยชน์อันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขออนุโมทนาทุกท่านที่ได้รับประโยชน์ จากงานของข้าพเจ้า ขอสิ่งดีๆทั้งหลายเป็นปัจจัยส่งเสริม ให้เจริญงอกงามทั่วทุกท่าน

ชัชฎาพงศ์ ศรีนางแย้ม

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	I
ABSTRACT.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	IX
สารบัญรูป.....	X
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา	3
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ขอบเขตการวิจัย	2
1.5 ขั้นตอนของการศึกษาวิจัย	4
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
1.7 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	5
1.7.1 ยุค 1 : วิธีแรงดันสัญญาณรบกวนวิทยุ (RIV).....	6
1.7.2 ยุค 2 : การตรวจจับแบบอะนาล็อกจนถึง 1 MHz โดยใช้ฮอสซิลโลสโคป	8
1.7.3 ยุค 3 : ยุคดิจิทัลและการประมวลผลสัญญาณวัดสูงถึงช่วงความถี่ GHz.....	12
1.7.4 ไลน์การพัฒนาระบบเทคโนโลยีการวัด PD.....	18
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	20
2.1 ฉนวน (Dielectric)	20
2.1.1 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ϵ (Permittivity)	21
2.1.2 สนามไฟฟ้า (Electric field)	25
2.1.2.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง ประจุ แรงดัน และความเครียดสนามไฟฟ้า	26
2.1.2.2 สนามไฟฟ้าจากอิเล็กโตรดอย่างง่าย	26

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.1.2.3 สนามไฟฟ้าในวัสดุสารเนื้อต่างชนิดกัน.....	29
2.1.2.4 ชนิดของสนามไฟฟ้าและการคำนวณ	32
2.1.2.5 การหักเหของสนามไฟฟ้า	37
2.1.2.6 สนามไฟฟ้าที่โพรงภายในเนื้อฉนวน	38
2.1.2.7 การเปรียบเทียบสนามไฟฟ้าของมาตรฐานทดสอบน้ำมัน.....	40
2.1.3 ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า	42
2.2 การเกิดเบรกดาวน์ในฉนวนก๊าซ.....	44
2.2.1 ทฤษฎีของทาวน์เซนต์ (Townsend's theory).....	44
2.2.2 ทฤษฎีสตรีมเมอร์ (Streamer theory).....	50
2.3 การเกิดเบรกดาวน์ในฉนวนเหลว.....	54
2.3.1 การเกิดเบรกดาวน์ของฉนวนเหลวบริสุทธิ์.....	54
2.3.2 เกิดเบรกดาวน์เนื่องจากอนุภาคเจือปนของแข็ง	54
2.3.3 กลไกการเกิดเบรกดาวน์เนื่องจากฟองก๊าซ.....	55
2.3.4 กลไกการเกิดเบรกดาวน์จากหยดของเหลวเจือปน	56
2.3.5 กลไกการเกิดเบรกดาวน์จากความร้อน.....	56
2.4 การเกิดเบรกดาวน์ในฉนวนแข็ง.....	57
2.4.1 การเกิดเบรกดาวน์ในฉนวนแข็ง.....	57
2.4.2 การเบรกดาวน์แบบแท้จริง (Intrinsic Breakdown)	57
2.4.3 การเบรกดาวน์แบบสตรีมเมอร์ (Streamer Breakdown)	58
2.4.4 การเกิดเบรกดาวน์จากแรงทางกลที่เกิดจากไฟฟ้า	58
2.4.5 การเกิดเบรกดาวน์จากรอยที่ผิวและการร้าวในฉนวน	58
2.4.6 การสึกกร่อน (Erosion).....	59
2.4.7 การเกิดเบรกดาวน์จากผลทางความร้อน (Thermal Breakdown).....	60

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.8 การเกิดเบรกดาวน์เนื่องจากการดิสชาร์จภายใน (Cavity Breakdown).....	60
2.5 การดิสชาร์จบางส่วน PD (Partial Discharge)	62
2.5.1 เงื่อนไขการเกิด PD.....	62
2.5.2 ลักษณะของปรากฏการณ์ PD	65
2.5.3 แบบจำลองการเกิด PD โดยตัวเก็บประจุแบบก้อน (Lump)	70
2.5.4 การเกิด PD.....	70
2.5.5 วงจรสมมูลของการเกิด PD	72
2.5.6 พารามิเตอร์ของ PD เบื้องต้น.....	77
2.5.7 การเปรียบเทียบระบบวัดในวงจรทดสอบ	79
2.5.8 แบบจำลองการเกิด PD โดยอิมพีแดนซ์แบบการกระจาย (distribute).....	80
2.5.9 ตัวอย่างการวิเคราะห์การเกิด PD.....	81
2.6 มาตรฐานและเอกสารที่เกี่ยวข้อง.....	89
2.7 เซนเซอร์ในการวัดสัญญาณ PD.....	92
2.7.1 ตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวและอิมพีแดนซ์ตัวกระจาย C_c	93
2.7.2 ตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวที่ติดตั้งใช้งานในระบบไฟฟ้า EMC.....	94
2.7.3 หม้อแปลงกระแสความถี่สูง HFCT	95
2.7.4 สายอากาศในการวัด PD.....	97
2.7.5 เซนเซอร์วัดแรงดันเกินชั่วขณะในตัวถัง TEV	99
2.7.6 เซนเซอร์ตรวจจับทางเสียง AE	100
2.7.7 เซนเซอร์อื่นๆ.....	102
2.7.7.1 กล้องตรวจจับโคโรนา.....	102
2.7.7.2 อุลตราโพรบ	104

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.8 อุปกรณ์หรือบริเวณที่ไฟฟ้าเบื้องต้น	106
2.8.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า	107
2.8.2 หม้อแปลง.....	108
2.8.3 เคเบิลไฟฟ้าแรงสูง	111
2.8.4 บริเวณที่ในสถานนีไฟฟ้า.....	113
2.8.5 อุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง.....	115
2.8.5.1 หม้อแปลงแรงดันไฟฟ้า.....	115
2.8.5.2 กักตักเสิร์จ.....	116
2.8.5.3 กราวด์.....	117
บทที่ 3 การทดสอบในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง.....	118
3.1 เซนเซอร์ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง	118
3.2 การจัดวงจรทดสอบ PD.....	120
3.3 แบบจำลอง PD.....	125
3.4 ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ.....	126
บทที่ 4 การทดสอบที่หน้างานจริง	133
4.1 การวัด PD ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขณะมีการทำงานจ่ายไฟ.....	133
4.2 การวัด PD ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบหยุดทำงานจ่ายไฟ.....	138
4.3 การวัด PD ในหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง.....	142
4.4 การวัด PD ในสายเคเบิลแรงดันปานกลางแบบฝังดิน.....	145
4.5 การวัด PD ใน GIS	149
4.6 การวัด PD ใน GIL.....	152
4.7 การวัด PD ในตู้สวิตช์เกียร์.....	154

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการทดสอบ.....	156
5.1 สรุปผลการทดสอบ.....	156
5.2 การใช้ประโยชน์ในงาน.....	158
5.3 งานวิจัยในอนาคต.....	159
เอกสารอ้างอิง.....	160

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนของการศึกษาวิจัย	4
ตารางที่ 2.1 สนามไฟฟ้าและการเกิดความล้มเหลวทางฉนวนของสนามไฟฟ้าแต่ละชนิด	36
ตารางที่ 2.2 ความคงทนทางไฟฟ้าของวัสดุทั่วไป	39
ตารางที่ 2.3 ตัวอย่างค่าเปอร์มิตติวิตีและความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวน.....	42
ตารางที่ 2.4 ปัจจัยต่างๆที่ส่งผลต่อความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้า	43
ตารางที่ 2.5 พารามิเตอร์คงที่และเกณฑ์สนามไฟฟ้าสำหรับการจำลอง	83
ตารางที่ 2.6.1 มาตรฐาน IEC ที่เกี่ยวข้อง	89
ตารางที่ 2.6.2 มาตรฐาน IEEE ที่เกี่ยวข้อง	90
ตารางที่ 2.6.3 Cigré โบชัวร์ทางเทคนิคที่เกี่ยวข้อง	91
ตารางที่ 3.1.1 ข้อดีและข้อเสียของ IEC 60270	119
ตารางที่ 3.1.2 ข้อดีและข้อเสียของ IEC 62478	119
ตารางที่ 3.3 สอบเทียบประจุทดสอบ โดยป้อนพัลส์ PD จำลองขนาด 0.5 nC	126
ตารางที่ 3.4 สอบเทียบประจุทดสอบ โดยป้อนพัลส์ PD จำลองขนาด 1 nC	127
ตารางที่ 3.5 สอบเทียบประจุทดสอบ โดยป้อน PD เพื่อคู่สัญญาณ cross-talk.....	128
ตารางที่ 3.6 ผลการวัด PD แบบโคโรน่าด้านแรงสูง ณ แรงดัน 6 kV	129
ตารางที่ 3.7 ผลการวัด PD แบบโคโรน่าด้านแรงต่ำ ณ แรงดัน 8 kV	130
ตารางที่ 3.8 ผลการวัด PD จากแบบจำลอง PD ที่พื้นผิว ณ แรงดัน 8 kV.....	131
ตารางที่ 3.9 ผลการวัด PD จากแบบจำลองการเกิด PD ภายในเนื้อฉนวน ณ แรงดัน 10 kV.....	132
ตารางที่ 5.1 รูปแบบจำแนกเฟส PRPD และรูปคลื่นพัลส์แสดงรูปร่างของสัญญาณที่ตรวจพบ.....	157

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1 โรงผลิตไฟฟ้าในปัจจุบัน	1
รูปที่ 1.2 ภาพแสดงอุปกรณ์หรือบริภัณฑ์ไฟฟ้าในระบบไฟฟ้า	2
รูปที่ 1.3 ปรัชญาการณ PD ที่พลังงานต่าง ๆ ถูกปล่อยออกมา	3
รูปที่ 1.4 การสะท้อนและการส่งผ่านของคลื่นจรในตัวนำที่ไม่ต่อเนื่อง	2
รูปที่ 1.5 รูปถ่ายกระแส PD ที่บันทึกไว้ในออสซิลโลกราฟ.....	5
รูปที่ 1.6 ช่วงความถี่ของสัญญาณวิทยุ.....	6
รูปที่ 1.7 สัญญาณจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (ซ้าย) เมื่อป้อนสัญญาณ PD จำลองเข้าไป (ขวา).....	7
รูปที่ 1.8 ประวัติการพัฒนารอสซิลโลสโคป.....	8
รูปที่ 1.9 การแสดงผลวาง PD ซ้อนบนวงรีของรูปคลื่นไซน์	9
รูปที่ 1.10 รูป prof. F. Kreuger (ซ้าย) และหนังสือ PD ภาษาอังกฤษเล่มแรก (ขวา).....	10
รูปที่ 1.11 มาตรฐาน PD ทางฝั่งอเมริกันฉบับแรก.....	11
รูปที่ 1.13 ชุดอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับการนับพัลส์ (ซ้าย) ดิสชาร์จบนคาบไซน์ (ขวา)	12
รูปที่ 1.14 บทสรุปโดยย่อของการพัฒนา PD ยุคดิจิทัล (ซ้าย) เอกสารแนะนำการวัด PD (ขวา) ...	13
รูปที่ 1.15 ภาพถ่ายกระแส PD เดี่ยว ที่บันทึกได้ครั้งแรก.....	14
รูปที่ 2.1.1 การคำนวณของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าระหว่างสายตัวนำกับเสาส่ง.....	20
รูปที่ 2.1.2 การคำนวณของหม้อแปลงไฟฟ้าระหว่างขดลวดกับตัวถัง.....	21
รูปที่ 2.1.3 ตัวเก็บประจุแบบขนาน	22
รูปที่ 2.1.4 ปรัชญาการณโพลาริเซชัน	23
รูปที่ 2.1.5 สนามไฟฟ้าสุทธิในเนื้อฉนวน.....	23
รูปที่ 2.1.7 อิเล็กโตรดที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าแบบต่างๆ.....	32
รูปที่ 2.1.8 สนามไฟฟ้าและเส้นศักย์ไฟฟ้าเท่าแบบไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย	34
รูปที่ 2.1.9 สนามไฟฟ้ากระจายเปรียบเทียบของอิเล็กโตรดลักษณะต่างๆ.....	35
รูปที่ 2.1.12 ความคงทนทางไฟฟ้าของวัสดุทั่วไป.....	39
รูปที่ 2.1.13 ค่าคงที่สนามไฟฟ้าของโพรงอากาศภายในเนื้อฉนวน	40

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.1.14 การกระจายแรงดันไฟฟ้าและสนามไฟฟ้าของมาตรฐาน ASTM D877	40
รูปที่ 2.1.15 การกระจายแรงดันไฟฟ้าและสนามไฟฟ้าของมาตรฐาน ASTM D1816	41
รูปที่ 2.1.17 การเกิดวาบไฟตามผิวลูกถ้วย.....	42
รูปที่ 2.2.1 การชนไอออนไนเซชันของนิวเคลียส	44
รูปที่ 2.2.2 พลังงานการไอออนไนซ์ของก๊าซแต่ละชนิด	45
รูปที่ 2.2.3 กระบวนการสร้างอิเล็กตรอนขั้นแรกของทาวเซนต์	46
รูปที่ 2.2.4 กระบวนการขั้นแรกของทาวเซนต์	47
รูปที่ 2.2.5 กระบวนการสร้างอิเล็กตรอน ของทาวเซนต์.....	48
รูปที่ 2.2.6 การเบรกดาวนของทาวเซนต์.....	50
รูปที่ 2.2.7 ภาพถ่ายของลำสตรีมเมอร์หัวบวก และ หัวลบ	51
รูปที่ 2.2.9 ทฤษฎีสตรีมเมอร์บวก Meek และ Loeb (ซ้าย) ทฤษฎีสตรีมเมอร์ลบ Rather (ขวา)...	52
รูปที่ 2.2.11 การเกิดสตรีมเมอร์.....	53
รูปที่ 2.2.12 การเกิดสตรีมเมอร์ของปลายแหลมหัวบวก และ หัวลบ.....	53
รูปที่ 2.3.1 การเรียงตัวของอนุภาคไฟเบอร์ภายใต้สนามไฟฟ้า.....	55
รูปที่ 2.3.2 การยึดตัวของหยดน้ำตามแนวสนามไฟฟ้า (ทดสอบที่ สจล.).....	56
รูปที่ 2.3.3 ช่องทางการติสซาร์จของปลายแหลมหัวลบและบวก (บนและล่าง) ในฉนวนน้ำมัน	56
รูปที่ 2.4.1 ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าตามช่วงเวลาที่ได้รับแรงดันนั้น	57
รูปที่ 2.4.2 การเกิด tracking บนลูกถ้วยฉนวนโพลีเมอร์ที่ถูกติดตั้งใช้งานในบริเวณมลภาวะ	59
รูปที่ 2.4.3 การเบรกดาวนที่เริ่มจากพื้นผิวเสียหายจนก่อบริเวณคาร์บอน (carbon).....	60
รูปที่ 2.4.4 สนามไฟฟ้าของโพรงอากาศที่ติดกับฉนวนแข็ง	61
รูปที่ 2.5.1 การเกิด PD ตาม IEC 60270.....	62
รูปที่ 2.5.2 เส้นทางการเกิด PD ในก๊าซ ของเหลว และ ของแข็ง ตามลำดับ	62
รูปที่ 2.5.3 ผลประจุค้างปลายแหลมหัวบวก ปลายแหลมหัวลบ และ หมอกประจุค้าง ตามลำดับ ...	63
รูปที่ 2.5.4 ผลของขั้วแรงดันของปลายแหลมแรงดันสูง AC	64

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.5.5 ผลของขั้วแรงดันของการดิสชาร์จภายใน	64
รูปที่ 2.5.6 ผลของขั้วแรงดันปลายแหลมขั้วบวกและลบ.....	65
รูปที่ 2.5.7 การดิสชาร์จแบบหัวนำร่องตามปรากฏการณ์ฟ้าผ่า	66
รูปที่ 2.5.8 ลักษณะการเริ่มเกิดดิสชาร์จของปลายแหลมกับระนาบ	67
รูปที่ 2.5.9 ลักษณะของปรากฏการณ์ PD.....	67
รูปที่ 2.5.10 ลักษณะ PDIV และ PDEV ของการเกิด PD ลักษณะต่างๆ	68
รูปที่ 2.5.11 ตัวอย่างลักษณะ PDIV และ PDEV ของการเกิด PD ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	69
รูปที่ 2.5.12 PD แบบ โคโรน่า แบบพื้นผิว และ แบบภายใน.....	70
รูปที่ 2.5.13 การเริ่มเกิด PD ภายในโพรงอากาศ.....	71
รูปที่ 2.5.14 การจัดเรียงตัวของประจุภายในโพรงอากาศ.....	71
รูปที่ 2.5.15 วงจรสมมูลของการเกิด PD โดยตัวเก็บประจุแบบก้อน (Lump).....	72
รูปที่ 2.5.16 วงจรสมมูลของการเกิด PD แบบก้อน (Lump).....	72
รูปที่ 2.5.17 วงจรสมมูลของการเกิด PD แบบก้อน (Lump).....	73
รูปที่ 2.5.18 การดิสชาร์จบางส่วนในโพรงก๊าซในวัสดุฉนวน	76
รูปที่ 2.5.19 ผลของค่าตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว C_k ต่อความไวการวัด	77
รูปที่ 2.5.20 พารามิเตอร์ของ PD เบื้องต้น	78
รูปที่ 2.5.21 QIEC ตามนิยาม IEC 60270: 2000/AMD 1: 2015.....	78
รูปที่ 2.3.10 การต่อเครื่องปรับเทียบเมื่อตัวคาบเกี่ยวอนุกรมอยู่กับตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว	79
รูปที่ 2.5.22 ค่าแรงดันเสิร์จสวิตชิ่ง (250/2500 us) ในเทอม ของเวลาและระยะทาง.....	80
รูปที่ 2.5.23 แบบจำลองการเกิด PD โดยอิมพีแดนซ์แบบการกระจายของสายเคเบิลแบบฝังดิน.....	80
รูปที่ 2.5.24 หัวสายเคเบิล 115 kV เกิดการเบรกดาวนและแก้ไข้ปัญหา.....	81
รูปที่ 2.5.25 ระบบฉนวนของหัวต่อสายเคเบิล	81
รูปที่ 2.5.26 ผลการเกิดดิสชาร์จของกรวยลดความเครียด	82
รูปที่ 2.5.27 ภาพโครงสร้างหัวต่อสายเคเบิลที่ใช้จำลองสนามไฟฟ้า.....	82

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.5.28 ผลการจำลองศักย์ไฟฟ้าเท่า และสนามไฟฟ้า ของหัวต่อสายเคเบิล	83
รูปที่ 2.5.29 ความเครียดสนามไฟฟ้าที่วัดตามแนว XLPE และกรวยลดความเครียดสนาม.....	84
รูปที่ 2.5.30 ความเครียดสนามไฟฟ้าโดยมีช่องว่างอากาศ ระหว่าง stress cone และ XLPE	84
รูปที่ 2.5.31 กลไกที่ 1 เส้นศักย์ไฟฟ้าเท่าของ stress cone ที่เบรกดาวน์.....	85
รูปที่ 2.5.32 กลไกที่ 2 ตำแหน่งของจุดเริ่มเกิดการดิสชาร์จ	85
รูปที่ 2.5.33 กลไกที่ 3 เส้นทางการดิสชาร์จของ stress cone	86
รูปที่ 2.5.34 กลไกที่ 4 แสดงเส้นทางการดิสชาร์จที่พัฒนาขึ้น	86
รูปที่ 2.5.35 กลไกที่ 5 การดิสชาร์จเข้าไปใกล้กับตำแหน่งปีกเบนสนาม (deflector)	87
รูปที่ 2.5.36 กลไกที่ 6 เส้นทางการนำไฟฟ้า (conductive path) เจาะชั้น XLPE	87
รูปที่ 2.5.37 กลไกที่ 7 การเบรกดาวน์ของหัวต่อสายเคเบิล	88
รูปที่ 2.7.1 ย่านวัดสัญญาณที่ความถี่ต่างๆ.....	92
รูปที่ 2.7.2 FFT Spectrum ของไฟฟ้ากระแส 50 Hz	92
รูปที่ 2.7.3 ตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว (ช่าย) อิมพีแดนซ์วัดกระแส (ขวา).....	93
รูปที่ 2.7.4 ตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวที่ทำจากอีพ็อกซีไมก้า (EMC).....	94
รูปที่ 2.7.5 หม้อแปลงกระแสความถี่สูง (HFCT)	95
รูปที่ 2.7.6 การตอบสนองในช่วงความถี่ต่างๆ ของ HFCT	96
รูปที่ 2.7.7 ภาพวาดแสดงรายละเอียดโครงสร้าง.....	96
รูปที่ 2.7.8 สายอากาศแบบ Horn ในการวัด PD.....	97
รูปที่ 2.7.9 แพคเตอร์สายอากาศ Horn.....	98
รูปที่ 2.7.10 เซนเซอร์วัดแรงดันเกินชั่วขณะที่ตัวถัง TEV.....	99
รูปที่ 2.7.11 เซนเซอร์ตรวจจับทางเสียง AE.....	100
รูปที่ 2.7.12 ความเร็วของเสียงในตัวกลางต่างๆ	101
รูปที่ 2.7.13 การตอบสนองในช่วงความถี่ต่างๆ ของ AE.....	101
รูปที่ 2.7.14 โครโนนาและการตรวจจับโครโนนา	102

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.7.15 การเกิดโคโรนาของลูกถ้วยแขวน 2 ลูก	102
รูปที่ 2.7.16 การเกิดโคโรนาของพวงลูกถ้วยแขวน 3 ลูก.....	103
รูปที่ 2.7.17 การเกิดโคโรนาของพวงลูกถ้วยแขวน 3 ลูก โดยลูกที่ 2 เป็นลูกถ้วยเจาะทะลุ.....	103
รูปที่ 2.7.18 โคโรนาของพวงลูกถ้วยแขวน 3 ลูก โดยลูกที่ 2 และ 3 เป็นลูกถ้วยเจาะทะลุ	103
รูปที่ 2.7.19 อุบัติเหตุโพรบและการใช้งาน	104
รูปที่ 2.7.20 การเปรียบเทียบสเปกตรัมสัญญาณที่ตรวจจับได้กับสัญญาณต้นแบบ.....	105
รูปที่ 2.8.1 แบบจำลองโรงไฟฟ้ากังหันแก๊ส (Gas Turbine).....	106
รูปที่ 2.8.2 ระบบไฟฟ้ากำลังในปัจจุบัน.....	106
รูปที่ 2.8.3 โครงสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้า.....	107
รูปที่ 2.8.4 ภาพการฉนวนของขดลวดสเตเตอร์.....	107
รูปที่ 2.8.5 โครงสร้างหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง	108
รูปที่ 2.8.6 ภาพวาดแสดงรายละเอียดโครงสร้างหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง	109
รูปที่ 2.8.7 การใช้งานฉนวนกระดาษและเพอร์สบอร์ดในหม้อแปลงไฟฟ้า.....	110
รูปที่ 2.8.8 ภาพโครงสร้างสายเคเบิลแรงสูง	111
รูปที่ 2.8.9 ภาพสนามไฟฟ้าปลายสายเคเบิลแรงสูง	112
รูปที่ 2.8.10 โครงสร้างหัวสายเคเบิลแรงสูง	112
รูปที่ 2.8.11 โครงสร้างตู้สวิตช์เกียร์	113
รูปที่ 2.8.12 ตู้สวิตช์เกียร์ในปัจจุบัน.....	113
รูปที่ 2.8.13 แผนภาพ single line ระบบ GIS ในสถานีไฟฟ้า	114
รูปที่ 2.8.14 โครงสร้างของ GIS	114
รูปที่ 2.8.15 แสดงโครงสร้างของ PT	115
รูปที่ 2.8.16 การติดตั้งหม้อแปลงแรงดันในสถานีไฟฟ้า	115
รูปที่ 2.8.17 โครงสร้างของกักดับฟ้าผ่าชนิด ZnO.....	116
รูปที่ 2.8.18 การติดตั้งใช้งานกักดับฟ้าผ่าในระบบไฟฟ้า.....	116

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.8.19 ลักษณะการต่อลงดินของระบบสายส่ง 115 kV.....	117
รูปที่ 3.1 ช่วงความถี่ต่างๆของการวัด PD.....	118
รูปที่ 3.2 แผนผังวงจรทดสอบสำหรับการวัด PD.....	123
รูปที่ 3.3 การจัดวงจรทดสอบสำหรับการวัด PD.....	123
รูปที่ 3.4 ภาพถ่ายการจัดวงจรทดสอบ PD ในห้องปฏิบัติการ.....	124
รูปที่ 3.5 แบบจำลอง PD.....	125
รูปที่ 3.6 วัตถุทดสอบ (Ca) ในวงจรทดสอบ.....	125
รูปที่ 4.1 แหล่งกำเนิด PD ภายในหม้อแปลงกระตุ้น (Exciter transformer).....	133
รูปที่ 4.2 รูปถ่ายการเก็บผล PD ในหน้างานจริง ของกรณีศึกษาเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 211 MVA....	134
รูปที่ 4.4 การวัด PD ในหน้างานขณะมีการจ่ายไฟของระบบผลิตไฟฟ้า โดย TEV และ EMC.....	136
รูปที่ 4.5 การปรับปรุงแก้ไขฉนวนหลังจากตรวจพบ PD	137
รูปที่ 4.6 การวัด PD ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบหยุดทำงานจ่ายไฟ	138
รูปที่ 4.7 ผลที่ปลายขดลวดที่เกิดจากการดิสชาร์จ	138
รูปที่ 4.8 การตรวจเช็คสอบเทียบระบบวัด	139
รูปที่ 4.9 วงจรทดสอบ จุดติดตั้งเซนเซอร์ และการขึ้นแรงดัน.....	139
รูปที่ 4.10 ค่าของการดิสชาร์จตามแรงดันที่ป้อน	140
รูปที่ 4.11 ผลการวัดของขดลวดเฟส V ที่แรงดันทดสอบ 1U0.....	140
รูปที่ 4.12 การวิเคราะห์ PRPD ที่ได้จากขดลวดเฟส V.....	141
รูปที่ 4.13 ตัวอย่าง PRPD ของขดลวดที่มีความซับซ้อน	141
รูปที่ 4.14 หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังขนาด 50 MVA	142
รูปที่ 4.15 HFCT คล้องที่กราวด์ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง.....	142
รูปที่ 4.16 HFCT คล้องที่กราวด์ของกบดักฟ้าผ่า และ สายเคเบิลฝังแรงต่ำ	143
รูปที่ 4.17 TEV แปะที่ตัวถังของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง.....	144
รูปที่ 4.18 AE แปะที่ตัวถังหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง	144

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.19 การวัด PD ในสายเคเบิลแรงดันปานกลางแบบฝังดิน.....	145
รูปที่ 4.20 ผลการวัด PD ในสายเคเบิลแรงดันปานกลางแบบฝังดิน	145
รูปที่ 4.21 ภาพการเตรียมการวัด PD แบบไม่จ่ายไฟโดยปลดสายเคเบิล.....	146
รูปที่ 4.22 การเตรียมการวัด PD แบบไม่จ่ายไฟโดยปลดสายเคเบิล.....	146
รูปที่ 4.23 การทดสอบ PD ในสายเคเบิล.....	147
รูปที่ 4.24 การทดสอบ PD ในกับดักเสิร์จ.....	147
รูปที่ 4.25 การวิเคราะห์รูปแบบสัญญาณ PD ของกับดักเสิร์จ	148
รูปที่ 4.26 ผลการทดสอบ PD เมื่อเปลี่ยนกับดักเสิร์จ	148
รูปที่ 4.27 การวัด PD ใน GIS	149
รูปที่ 4.28-1 ภาพการดำเนินการวัด PD ใน GIS	149
รูปที่ 4.28-2 ภาพการดำเนินการวัด PD ใน GIS	150
รูปที่ 4.29 การตรวจสอบช่วงการวัดของเซนเซอร์ UHF ใน GIS.....	150
รูปที่ 4.30 ตรวจสอบสัญญาณของเซนเซอร์ UHF	151
รูปที่ 4.31 ผลการวัด PD ของเซนเซอร์ UHF ใน GIS.....	151
รูปที่ 4.32 ผลการวัด PD กราวด์ของสายเคเบิลที่เข้า GIS	151
รูปที่ 4.34 การวัด PD ใน GIL	152
รูปที่ 4.35 แผนภาพของระบบ GIL ที่ทำการวัด PD.....	152
รูปที่ 4.36 ความสามารถในการรับสัญญาณของเซนเซอร์ที่ติดตั้งภายในท่อ GIL	153
รูปที่ 4.37 ผลการวัด PD ของจุดวัดที่ 71.....	153
รูปที่ 4.38 การวัด PD ในตู้สวิตช์เกียร์.....	154
รูปที่ 4.39 การวัด PD ด้วย HFCT สายเคเบิลเข้าตู้สวิตช์เกียร์.....	154
รูปที่ 4.40 การวัด PD ด้วย TEV ในตู้สวิตช์เกียร์.....	155
รูปที่ 5.1 สัญญาณ cross-talk PD ที่ตรวจพบ ณ GCB.....	156
รูปที่ 5.2 ตัวอย่างสัญญาณ cross-talk ในระบบไฟฟ้า.....	158
รูปที่ 5.3 การตรวจสอบหา PD ของอุปกรณ์ต่างๆในระบบไฟฟ้า.....	159

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันประเทศไทยนั้นมีการเจริญเติบโตของเศรษฐกิจทั้งภาคเกษตรกรรม และภาคอุตสาหกรรม ห้างสรรพสินค้า ธุรกิจการท่องเที่ยว และโรงงานอุตสาหกรรม ต่างเพิ่มจำนวนขึ้นอย่างต่อเนื่อง และเมื่อมีผู้ใช้ไฟฟ้ามากขึ้น อุปสงค์การใช้พลังงานไฟฟ้าย่อมสูงขึ้น จึงต้องจัดหาพลังงานไฟฟ้าให้เพียงพอต่อความต้องการ โดยโครงสร้างของระบบไฟฟ้ากำลัง ประกอบด้วย ระบบผลิตกำลังไฟฟ้า, ระบบส่งกำลังไฟฟ้า และระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า ซึ่งระบบผลิตกำลังไฟฟ้าหรือโรงไฟฟ้างานรูปที่ 1.1 นั้นต้องอาศัยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อเปลี่ยนพลังงานที่ถูกเก็บอยู่ในรูปต่างๆ มาเป็นพลังงานไฟฟ้า เมื่อเดินเครื่องใช้งานไปย่อมมีเสื่อมสภาพ (Degradation) เกิดขึ้นโดยจะเกิดจากสาเหตุ เช่น ความร้อนในขณะใช้งาน, ความเครียดของสนามไฟฟ้าขณะทำงาน, แรงทางกลที่เกิดขึ้นจากการเสียดสี และสภาพแวดล้อมที่มีฝุ่นละออง น้ำ หรือน้ำมัน [1]

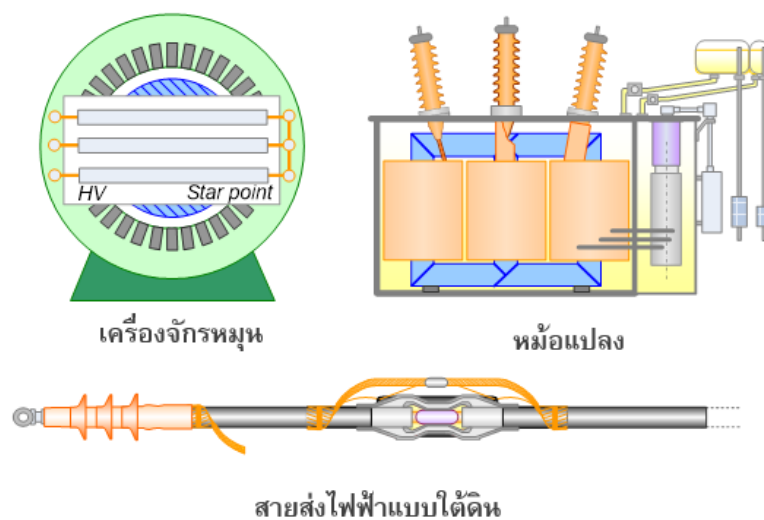
ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้านั้นรับกำลังไฟฟ้าจากระบบผลิตดังกล่าวซึ่งอยู่ใกล้กับแหล่งใช้ไฟฟ้า จึงเพิ่มแรงดันไฟฟ้าเพื่อลดความสูญเสียของพลังงาน รวมถึงลดต้นทุนเนื่องจากตัวนำที่มีขนาดเล็กลงในขณะเดียวกัน แรงดันที่สูงนั้นจะเป็นอันตรายอย่างมากหากเกิดเหตุไม่พึงประสงค์ขึ้น การฉนวนจึงสำคัญมาก และในระบบจำหน่ายจะทำการปรับลดแรงดันลงก่อนส่งจ่ายถึงผู้ใช้ไฟฟ้า โดยใช้หม้อแปลงไฟฟ้า หลังจากหม้อแปลงถูกติดตั้งในระบบและใช้งานไปในระยะหนึ่งแล้ว ระบบการฉนวนของหม้อแปลงจะเริ่มเสื่อมสภาพ เช่น จากความร้อนจากการจ่ายโหลด ความชื้นจากสภาพอากาศที่เข้าไปในตัวหม้อแปลง สภาวะที่เป็นกรดจากสภาพแวดล้อม ความเครียดสนามไฟฟ้าจากแรงดันใช้งาน แรงดันเกินจากการทำงานของสวิตช์ แรงดันเกินจากการเกิดฟ้าผ่า ตลอดจนปัจจัย อื่นๆ ซึ่งจะส่งผลให้หม้อแปลงไฟฟ้ามีอายุการใช้งานที่สั้นลง อาจทำให้เกิดการทำงานที่ผิดพลาด (Failure) และส่งผลต่อระบบไฟฟ้าทำให้ผู้ใช้ไฟฟ้าเกิดผลกระทบ [2-3]



รูปที่ 1.1 โรงผลิตไฟฟ้าในปัจจุบัน [4]

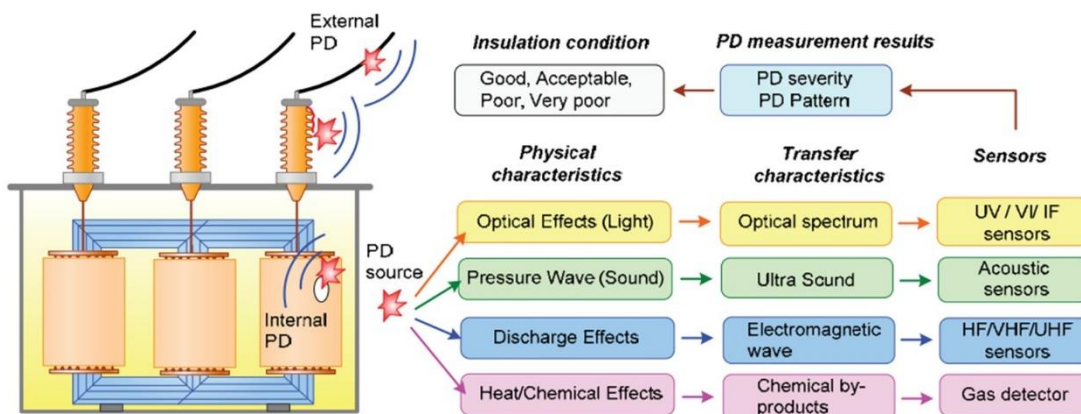
นอกจากหม้อแปลงแล้วระบบส่งจ่ายไฟฟ้ายังมี สายส่งและสถานีไฟฟ้า ที่มีบทบาทสำคัญ โดยสายส่งมีทั้งแบบเหนือดิน (Overhead) และแบบเคเบิลฝังดิน (Underground Cable) ซึ่งขึ้นกับความเหมาะสม เช่น ความปลอดภัย ความน่าเชื่อถือ (Reliability) การคงทัศนียภาพ ข้อจำกัดด้านพื้นที่ (Right of way) ฯ เพื่อส่งถ่ายพลังงานจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่ง เช่น จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไปสู่หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง หรือ จากหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังไปสถานีไฟฟ้าย่อย ซึ่งปัจจุบันสถานีไฟฟ้าย่อยมีใช้ 2 ลักษณะคือ แบบฉนวนแก๊ส (Gas Insulation Substation: GIS) และ แบบดั้งเดิมคือ สถานีไฟฟ้าย่อยฉนวนอากาศ (Air-insulated substation: AIS) โดยแบบ GIS ช่วยแก้ไขปัญหาคือ ข้อจำกัดทางด้านพื้นที่ในการก่อสร้างสถานีไฟฟ้าย่อยในเขตตัวเมือง โดยจะสามารถลดพื้นที่ก่อสร้างได้สูงสุดถึงร้อยละ 90 เมื่อเทียบกับ AIS นอกจากนี้ยังช่วยลดปัญหา อันเกิดมาจากสิ่งแวดล้อม และ สัตว์ต่างๆ ลงได้อย่างมาก [5-6]

ทั้งสายส่งและสถานีไฟฟ้าแรงสูงนั้นต่างก็มีฉนวนไฟฟ้าเป็นหัวใจของการส่งถ่ายพลังงาน เพราะเมื่อฉนวนไฟฟ้าเสียหายหรือเกิดการเบรกดาวน์จนทำให้ไม่สามารถทำหน้าที่กั้นแรงดันสูงดังที่ได้กล่าวมาแล้ว พลังงานย่อมเกิดการเสียเปล่า (fault) ส่งไปไม่ถึงผู้ใช้ไฟฟ้าได้อย่างที่ควร หากส่วนใดส่วนหนึ่งของระบบไฟฟ้าเกิดความเสียหาย เช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชำรุดเสียหายกะทันหันจะส่งผลให้เกิดความเสียหายทั้งทางตรงและทางอ้อมในมูลค่าสูง เพื่อลดความเสียหายดังกล่าวที่จะเกิดขึ้น จำเป็นต้องตรวจสอบ ดูแลเฝ้าระวังฉนวนของระบบไฟฟ้าให้อยู่ในสภาพดี จึงต้องมีการวางแผนการซ่อมบำรุงรักษา ในการซ่อมบำรุงรักษาแต่ละครั้งมีค่าใช้จ่ายเป็นจำนวนมาก ดังนั้นหากสามารถระบุสาเหตุและประเมินการเสื่อมสภาพของฉนวนหรือคาดการณ์ระยะเวลาที่จะต้องได้รับการซ่อมบำรุงได้ ย่อมเป็นผลดีและเป็นประโยชน์ต่อการวางแผนซ่อมบำรุง เพื่อลดค่าใช้จ่ายที่ไม่จำเป็นและเพิ่มความน่าเชื่อถือของระบบไฟฟ้า จึงต้องมีการประเมินสภาพฉนวนและวิเคราะห์สาเหตุความผิดปกติของฉนวนได้ก่อนที่จะเกิดความเสียหายซึ่งจะกระทบไปสู่ด้านสังคมและเศรษฐกิจ รูปที่ 1.2 แสดงภาพอย่างง่ายของอุปกรณ์หรือบริภัณฑ์ไฟฟ้าดังที่ได้กล่าวมาแล้ว [3,7]



รูปที่ 1.2 ภาพแสดงอุปกรณ์หรือบริภัณฑ์ไฟฟ้าในระบบไฟฟ้า

ความเสียหายของฉนวนเกิดจากความเค้นชนิดต่างๆ ได้แก่ ความเค้นทางกล ทางไฟฟ้า ความร้อน และสภาพบรรยากาศ ความเค้นเหล่านี้จะส่งผลต่อฉนวนทำให้เกิดการเสื่อมสภาพ ซึ่งทำให้คุณสมบัติต่างๆ ของฉนวนมีประสิทธิภาพลดลง ข้อบ่งชี้หนึ่งคือการเกิดดิสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge , PD) เป็นปรากฏการณ์ที่พลังงานต่าง ๆ ถูกปล่อยออกมาในรูปแบบต่าง ๆ เช่น ไฟฟ้า เสียง แสง ปฏิกิริยาเคมี ความร้อน และแม่เหล็กไฟฟ้าดังรูปที่ 1.3 ซึ่งจะเกิดขึ้นในฉนวนที่มีสิ่งเจือปน หรือไม่เป็นเนื้อเดียวกัน หรือ ระบบฉนวนที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง หรือ มีความไม่สม่ำเสมอ โดยทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าบางจุดสูงกว่าความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤตหรือค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า (Dielectric strength) ของฉนวน เป็นเหตุให้เกิดเบรกดาวน์เพียงบางส่วนซึ่งอาจขยายตัวมากขึ้นจนนำไปสู่การเบรกดาวน์โดยสมบูรณ์อันไม่พึงประสงค์สำหรับฉนวนไฟฟ้า กล่าวโดยย่อ PD นั้นเริ่มเกิดจากการที่ฉนวนมีความบกพร่อง (Defect) แล้วเกิดพัฒนาไปสู่การเบรกดาวน์หรือเสียหายความเป็นฉนวนอย่างสมบูรณ์ โดยหากเราตรวจพบการ PD ได้ก่อน จะสามารถวางแผนรับมือสถานการณ์ที่ไม่พึงประสงค์ที่จะเกิดขึ้น การตรวจสอบ PD นั้นจึงสำคัญอย่างมาก ทำให้ทราบถึงสภาพของฉนวนซึ่งส่งผลต่อความปลอดภัยและเสถียรภาพการทำงานของอุปกรณ์ต่างๆ ที่ทำงานอยู่ในระบบไฟฟ้า หากระบบไฟฟ้ามีคุณภาพจะส่งเสริมไปถึงการพัฒนาของสังคมและเศรษฐกิจตลอดจนคุณภาพชีวิตของผู้ใช้ไฟฟ้า [8-12]



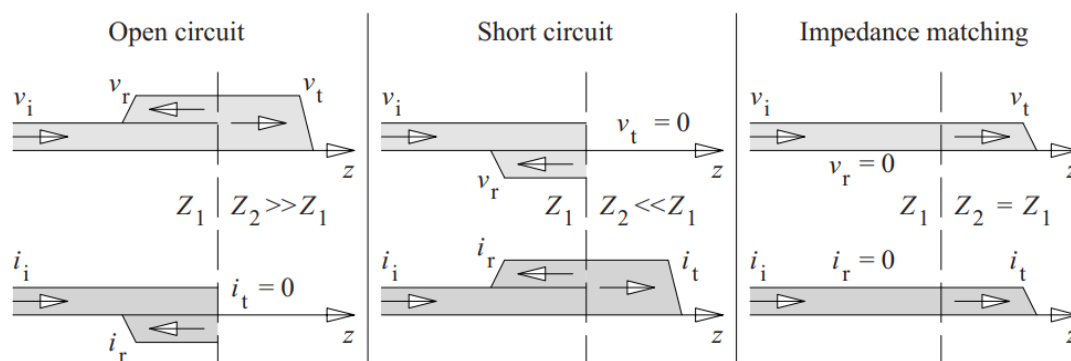
รูปที่ 1.3 ปรากฏการณ์ PD ที่พลังงานต่าง ๆ ถูกปล่อยออกมา [11]

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาพฤติกรรม PD ที่แพร่ในระบบกราวด์ในสถานีไฟฟ้าหรือโรงงานอุตสาหกรรม
2. เพื่อศึกษาพฤติกรรมการแพร่กระจายของ PD ในอุปกรณ์ต่อเสริม เช่น กับดักฟ้าผ่า
3. เพื่อนำไปวิเคราะห์สัญญาณ PD ที่ตรวจพบหน้างาน
4. เพื่อประเมินและวินิจฉัยการเกิด PD ในฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

ด้วยพฤติกรรมของคลื่น PD นั้น สามารถตรวจพบได้หลากหลายวิธี ทั้งทางสัญญาณไฟฟ้าตามวิธีดั้งเดิม IEC 60270 , ทางเสียงที่เป็นคลื่นกล , ทางเคมีที่เป็นปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงของวัสดุฉนวนด้วยค่าบ่งชี้ต่างๆ เช่น ในน้ำมันบ่งชี้ด้วยผลของก๊าซที่ละลายในน้ำมัน (DGA), ทางแม่เหล็กไฟฟ้า เช่น บ่งชี้ด้วยคลื่นรบกวนวิทยุ (RIV) ด้วยหม้อแปลงกระแสความถี่สูง (HFCT) ที่ได้แสดงไว้แล้วดังรูปที่ 1.3 นั้น, ในทางไฟฟ้าของระบบกราวด์ สัญญาณ PD ควรแพร่ไปในทุกทิศทางที่มีค่าเสรีจิมพีแดนซ์ต่ำ เพราะกระแสความถี่สูงจะสามารถเคลื่อนตัวได้ดีในวัสดุฉนวน ดังสมการค่าความจุกระแสลัดทั่วไปที่ทราบกัน $X_c = \frac{1}{2\pi f C}$ ยิ่งความถี่มากอิมพีแดนซ์ก็แปรจึยงน้อย ประจึจะเคลื่อนตัวได้ง่าย นอกจากนี้ด้วยพฤติกรรมการสะท้อนและการส่งผ่านของคลื่นจร ดังแสดงดังรูปที่ 1.4 นั้นอาจทำให้สามารถตรวจพบ PD ได้ทางระบบกราวด์เดียวกัน หากสัญญาณดังกล่าวไม่ถูกลดทอนลงไปจนไม่สามารถตรวจพบจากค่าเสรีจิมพีแดนซ์ โดยสัญญาณที่ตรวจพบเหล่านี้จะเป็นข้อมูลประกอบในการวิเคราะห์ว่า PD เกิดในบริเวณใด เพื่อวางแผนบำรุงรักษาและตอบสนองต่อสถานการณ์อื่นไม่พึงประสงค์ได้อย่างเหมาะสม



รูปที่ 1.4 การสะท้อนและการส่งผ่านของคลื่นจรในตัวนำที่ไม่ต่อเนื่อง [13, p.130]

1.4 ขอบเขตการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาคุณลักษณะของสัญญาณการดิสชาร์จบางส่วนที่ตรวจพบได้จากระบบกราวด์ โดยเซนเซอร์สัญญาณหม้อแปลงกระแสความถี่สูง (HFCT) ด้วยเครื่องวัด PD Analyzer Micro Aquila ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงเพื่อศึกษาเบื้องต้นก่อนจะออกไปวัดหน้างานจริงที่ระบบกราวด์มีอุปกรณ์มากกว่าและสัญญาณรบกวนสูงกว่า

1.5 ขั้นตอนของการศึกษาวิจัย



แผนดำเนินงาน



ดำเนินงานจริง

ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนของการศึกษาวิจัย

ขั้นตอนการทำงาน	ปีการศึกษา 2564												ปีการศึกษา 2565											
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.		
1. ค้นคว้ามาตรฐานและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับหัวข้อวิจัย PD																								
2. ศึกษาวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องในอดีตที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย																								
3. ศึกษาเทคนิคการวัด PD จากการทำงานจริงในภาคอุตสาหกรรม																								
4. ทำการเก็บข้อมูลจากหน้างาน และรวบรวมข้อมูลที่ได้มาทำการทดลอง																								
5. สรุปข้อมูลปัญหาที่พบจากหน้างาน และออกแบบการทดลอง																								
6. ทดสอบเบื้องต้นเพื่อดูความเป็นไปได้ของสมมุติฐานและแก้ไขการทดลอง																								
7. ทดลองและเขียนงานวิจัยเพื่อตีพิมพ์ ตลอดจนจัดทำเล่มวิทยานิพนธ์																								

100%

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

เป็นข้อมูลประกอบและช่วยในการวิเคราะห์หรือประเมินหรือวินิจฉัยการเกิด PD ในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง เนื่องจากการทดสอบแบบออนไลน์นั้นทำได้สะดวก ค่าใช้จ่ายน้อยเมื่อเทียบกับการทดสอบออฟไลน์ ที่ต้องวางแผนการดับไฟ จัดการส่วนงานอื่นที่เกี่ยวข้อง ๆ โดยเมื่อตรวจพบ PD แล้ว จะเป็นการบ่งชี้ปัญหาเบื้องต้นของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงนั้น ควรยืนยันด้วยวิธีการอื่นต่อไป ตามต้นทุนระยะเวลา และเงื่อนไขอื่น ๆ ที่เหมาะสม เพื่อแก้ไข ปรับปรุง ทดแทน ติดตั้งใหม่ ของอุปกรณ์ดังกล่าว ให้อยู่ในสภาพดีไม่เป็นปัญหาต่อระบบไฟฟ้า เพื่อให้เกิดความน่าเชื่อถือและเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า ที่ส่งผลต่อเศรษฐกิจและสังคมตลอดจนคุณภาพการดำเนินชีวิตของผู้ใช้ไฟฟ้า

1.7 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

ประวัติของการทดสอบการคายประจุบางส่วน (PD) ย้อนกลับไปในทศวรรษที่ 1910 เอกสารภาษาอังกฤษฉบับแรก “An oscillograph study of corona” เขียนโดย Edward Bennett จากสหรัฐอเมริกา ซึ่งเขาใช้ตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวเพื่อตรวจจับกระแส PD และบันทึกไว้ในออสซิลโลกราฟ แสดงดังรูปที่ 1.5 เพื่อวัดค่า PD จากอุปกรณ์สายส่งไฟฟ้าแรงสูง [14] การหาข้อสรุปที่บันทึกไว้ในบทความนี้แสดงให้เห็นว่าการวัด PD นั้นทำขึ้นล่วงหน้าแล้ว 15 ปี - นั่นคือปี 1898 บ่งชี้ให้เห็นว่า ก่อนเอกสารภาษาอังกฤษฉบับแรกนี้มีเอกสารหลายร้อยฉบับที่เผยแพร่เกี่ยวกับวิธีการและเทคโนโลยีการวัด PD, ปัจจุบันใน IEEE และ IEE/IET มีเอกสารมากกว่า 20,000 ฉบับเกี่ยวกับการวัด PD (และโคโรนา) บนอุปกรณ์ HV

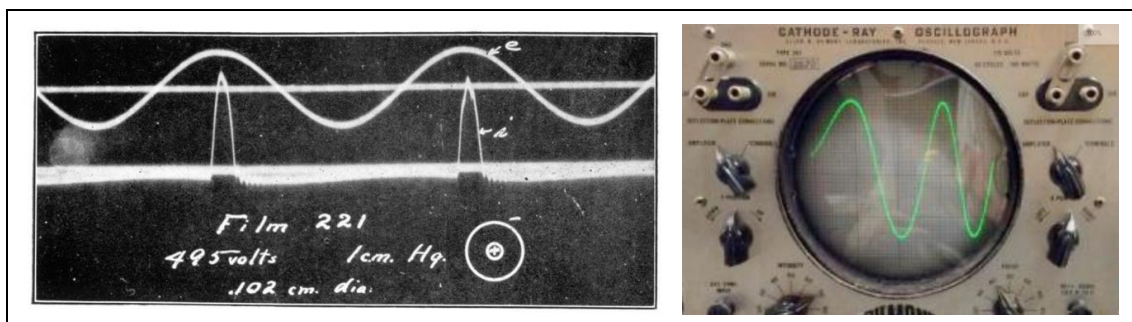
เมื่อพิจารณาเอกสารเหล่านี้แล้ว อาจแบ่งเป็นสามยุคในการพัฒนาอุปกรณ์การวัด PD

ยุค 1 : วิธีแรงดันสัญญาณรบกวนวิทยุ (RIV)

ยุค 2 : การตรวจจับแบบอะนาล็อกจนถึง 1 MHz โดยใช้ออสซิลโลสโคปแสดงผล

ยุค 3 : การตรวจจับแบบดิจิทัลและการประมวลผลสัญญาณวัด สูงถึงช่วงความถี่ GHz

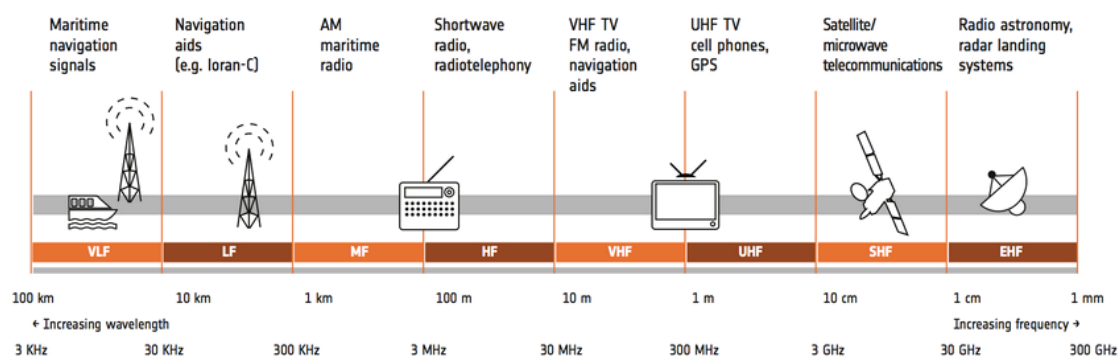
แม้จะใช้คำว่า “ยุค” แต่ความจริงแล้ว วิธีการวัดรูปแบบต่างๆ ตามแต่ละยุคยังคงใช้อยู่ในปัจจุบัน ซึ่งเนื้อหาในส่วนนี้จะระบุบุคคลสำคัญบางส่วน และบริษัทบางแห่งที่ให้บริการอุปกรณ์เชิงพาณิชย์สำหรับการวัด PD [15]



รูปที่ 1.5 รูปถ่ายกระแส PD ที่บันทึกไว้ในออสซิลโลกราฟ

1.7.1 ยุค 1 : วิธีแรงดันสัญญาณรบกวนวิทยุ (RIV)

การทดสอบ RIV เป็นวิธีแรกที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการวัด PD แม้ว่านั่นจะไม่ใช่จุดประสงค์ดั้งเดิมของการทดสอบก็ตาม, RIV ถูกกำหนดไว้ว่าเป็นแรงดันแผ่คลื่นวิทยุ (influence) หรือแรงดันสัญญาณรบกวนวิทยุ (interference) จุดประสงค์ดั้งเดิมของการทดสอบนี้ คือเพื่อกำหนดระดับสัญญาณรบกวน (เป็น μV) ที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าเหนือศีรษะพร้อมกับฉนวนและหม้อแปลงที่เกี่ยวข้องระหว่างการทำงาน หากระดับสูงเกินไป อาจได้รับการร้องเรียนจากประชาชนทั่วไปเกี่ยวกับการรับสัญญาณวิทยุและโทรทัศน์ที่ไม่ดี เช่นเซอร์ PD เป็นเสาอากาศหรือตัวเก็บประจุแบบคาบเกี่ยวบางชนิด สัญญาณถูกวัดโดยเครื่องรับวิทยุพิเศษ (บางครั้งเรียกว่าเครื่องวัดเสียงรบกวนวิทยุ) โดยปกติจะมีความถี่กลางประมาณ 1 MHz ซึ่งมีความถี่กลางในย่านวิทยุ AM ดังแสดงในรูปที่ 1.6 โดยมีแบนด์วิธช่วงแคบๆประมาณ 10 kHz เอาต์พุตของเครื่องมือคือระดับถ่วงน้ำหนัก "ยอดเสมือน (quasi)" ของสัญญาณไฟฟ้าที่สร้างขึ้นโดยการเกิด PD นอกจากนี้ยังสามารถฟังสัญญาณ demodulated จากโคโรนาผ่านลำโพงหรือหูฟังได้ แมื่อนักวิจัยจะทำเครื่องรับสัญญาณในตอนแรกๆ แต่ในที่สุดเครื่องมือเชิงพาณิชย์ก็ถูกสร้างขึ้นสำหรับการวัด RIV โดย Stoddart Aircraft Radio Co. ในสหรัฐอเมริกา และ Siemens ในยุโรป และที่อื่น ๆ เครื่องวัดเสียง Stoddart ผลิตขึ้นในปี 1944 จากสหรัฐอเมริกา (สมัยนั้น ประเทศไทยโดนทิ้งระเบิดที่สะพานพระราม 6)



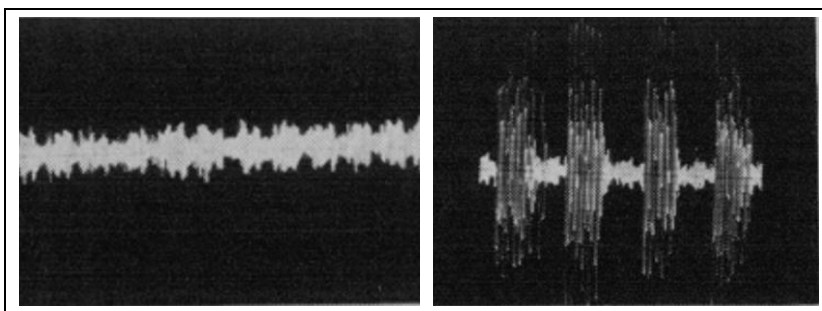
รูปที่ 1.6 ช่วงความถี่ของสัญญาณวิทยุ

โดยพื้นฐานแล้ว เครื่องวัดเสียงมีจุดมุ่งหมายเพื่อวัดโคโรนาจากสายส่ง นักวิจัยจึงริเริ่มใช้วิธี RIV เพื่อตรวจจับ PD ในสายไฟที่หุ้มฉนวนกระดาษน้ำมันและหม้อแปลงไฟฟ้าที่เติมน้ำมัน, ในปี 1924 Del Mar จากสหรัฐอเมริกา ตีพิมพ์บทความ “High voltage impregnated power cables” ใช้การตรวจจับ RIV เพื่อวัดค่า PD ในสายเคเบิลหุ้มฉนวนน้ำมันเพื่อกำหนดความเค้นทางไฟฟ้าสูงสุดในการออกแบบสำหรับฉนวน [16] ในปี 1965 Paul Narbut จากสหรัฐอเมริกา ตีพิมพ์ “Transformer corona measurement using condenser bushing tap and resonant measuring circuits” และในปี 1966 Meador จากสหรัฐอเมริกา ตีพิมพ์ “Transformer corona testing” อธิบายการวัดค่า PD ในหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการทดสอบประกันคุณภาพ (QA) ของโรงงานโดยใช้วิธี RIV [17] และอ้างอิงถึงมาตรฐาน NEMA 107 “Methods Of Measurement Of Radio Influence

Voltage (RIV) Of High-Voltage Apparatus” สำหรับวิธีทดสอบ RIV, เซ็นเซอร์ PD มักจะเป็น tap เก็บประจุบนบุซึ่งหม้อแปลง ซึ่งปกติจะใช้วัดแรงดันของหม้อแปลง Meador แนะนำขีดจำกัด 1,000 μV ที่ 1 MHz และกล่าวว่าปัญหาหลักคือสัญญาณรบกวนทางไฟฟ้าในโรงงาน

Tom Dakin จากสหรัฐอเมริกา ในหนังสือ “ENGINEERING DIELECTRICS VOLUME I CORONA MEASUREMENT AND INTERPRETATION” โดย Bartnikas และ McMahon ในบทที่ 6 เรื่องโคโรนา [19] ระบุว่า การทดสอบ PD ประเภท RIV ยังคงเป็นการทดสอบ PD ของโรงงานสำหรับหม้อแปลงที่พบได้บ่อยที่สุด จนถึงปี 1979 เป็นอย่างน้อย แม้ว่าจะยังไม่เป็นที่รู้จักอย่างกว้างขวางในเวลานั้น แต่ John Johnson จาก Westinghouse ได้ก้าวหน้าอย่างสำคัญ 1951 ตีพิมพ์ “Detection of slot discharges in high voltage stator windings during operation” ด้วยการนำการทดสอบ PD โดยใช้วิธี RIV สำหรับการประเมินสภาพฉนวนแบบออนไลน์ของขดลวด สเตเตอร์ในขั้นต้น [20] เชื่อกันว่านี่เป็นการวัดออนไลน์ครั้งแรกที่ไม่ได้มีวัตถุประสงค์เพื่อวัดการรบกวนทางวิทยุจากสายส่ง ซึ่งได้ตรวจพบพัลส์ PD ผ่านตัวต้านทานระหว่างนิวทรอลสเตเตอร์และกราวด์ โดยออสซิลโลสโคปรุ่นแรก

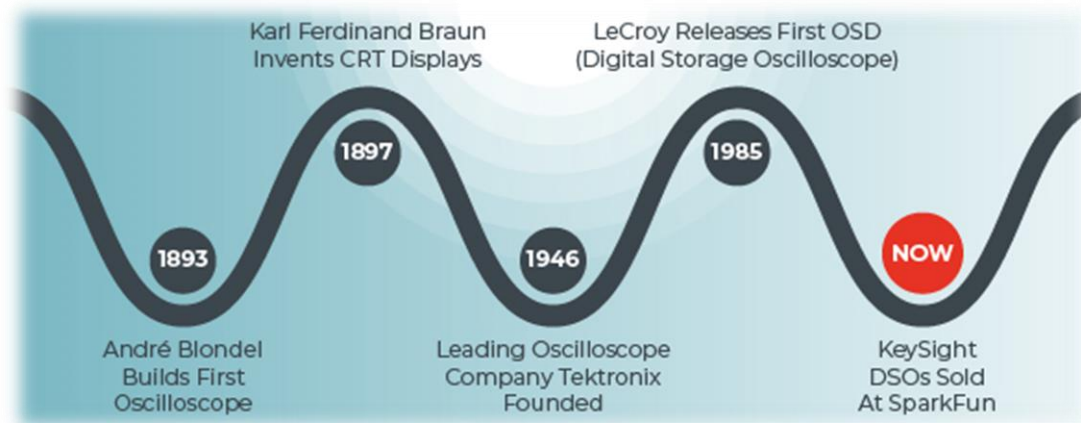
ในปี 1983 Jim Timperley จากสหรัฐอเมริกา ตีพิมพ์ “Incipient Fault Identification Through Neutral RF Monitoring of Large Rotating Machines” ได้ปรับวิธี RIV ดั้งเดิมเพื่อใช้งานเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ร่วมกับการตรวจจับที่นิวทรอล ของ Johnson [21] แทนที่จะวัดระดับ PD ที่ความถี่คงที่หรือใช้ออสซิลโลสโคป เขาใช้เครื่องรับวิทยุแบบพิเศษที่ใช้กันทั่วไปสำหรับการใช้งานด้านแม่เหล็กไฟฟ้า (เช่น การวัดสัญญาณ RF ที่ปล่อยออกมาจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ อุปกรณ์จ่ายไฟ ฯลฯ เพื่อให้แน่ใจว่าจะไม่ทำให้เกิดอุปกรณ์อื่นทำงานผิดปกติ) เครื่องมือเชิงพาณิชย์เหล่านี้ (ซึ่งเป็นคล้ายๆกับเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม RF) สร้างพล็อตขนาดสัญญาณ RF กึ่งยอด (quasi-peak ในหน่วย μV) เทียบกับความถี่ ในตอนแรกเขาสำรวจช่วงความถี่สูงถึงสองสาม MHz แต่ต่อมาขยายช่วงได้ถึง 100 MHz เซ็นเซอร์ PD มักจะเป็นหม้อแปลงกระแสไฟฟ้าความถี่สูง (HFCT) ที่ติดตั้งบนนิวทรอลเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ทีมเพอร์ลีย์ชอบเรียกการทดสอบ RIV เวอร์ชันนี้ว่าการทดสอบการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า (EMI) มีหลายวิธีในการประเมินการเกิดฟิวด PD แสดงดังรูปที่ 1.7 และ Timperley ใช้คำจำกัดความของ quasi-peak ในมาตรฐาน IEC/CISPR 16-1 การทดสอบยังคงดำเนินการโดยบริษัทผู้ให้บริการและสาธารณูปโภคไม่กี่แห่งในปัจจุบัน แม้ว่าบางบริษัทจะเปลี่ยนชื่อการทดสอบ EMI เป็นการทดสอบการวิเคราะห์หลายเส้นแม่เหล็กไฟฟ้า (EMSA - electromagnetic signature analysis)



รูปที่ 1.7 สัญญาณจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (ซ้าย) เมื่อป้อนสัญญาณ PD จำลองเข้าไป (ขวา)

1.7.2 ยุค 2 : การตรวจจับแบบอะนาล็อกจนถึง 1 MHz โดยใช้ออสซิลโลสโคป

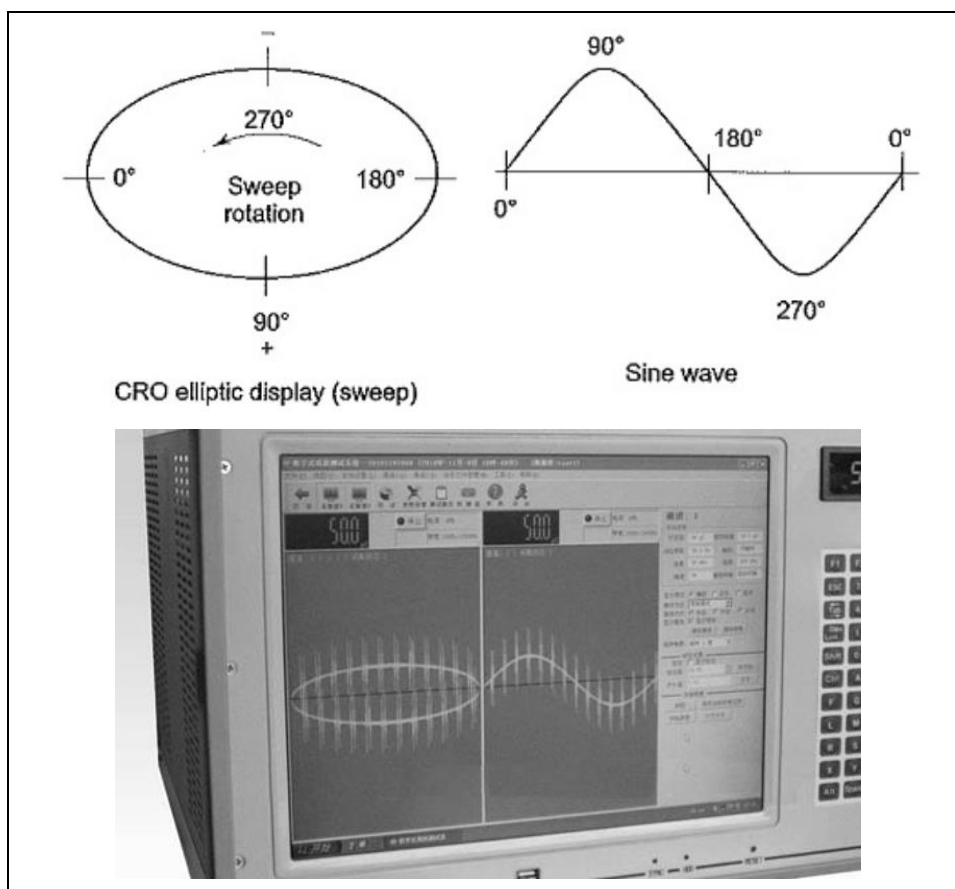
ยุคนี้การวัด PD ขึ้นอยู่กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบอะนาล็อกและการแสดงผลบนออสซิลโลสโคป เพื่อให้สามารถมองเห็นพัลส์ PD ที่เกี่ยวข้องกับคาบไฟฟ้ากระแสสลับ 50 หรือ 60 Hz นั่นคือเป็นการวัดโดเมนเวลา ซึ่งแตกต่างจากการทดสอบ RIV/EMI ในยุคแรกซึ่งเป็นการทดสอบโดเมนความถี่เป็นหลัก เครื่องมือ PD ที่ทันสมัย (ในขณะนั้น) ขึ้นอยู่กับ ประสิทธิภาพ/การพัฒนาของออสซิลโลสโคปที่ดีขึ้น ที่มีจุดกำเนิดเมื่อราว 1893 ซึ่งสามารถตามประวัติออสซิลโลสโคปแสดงดังรูปที่ 1.8 การพัฒนาหลอดรังสีแคโทด (CRT - cathode ray tube) โดย Braun ผู้ได้รับรางวัลโนเบล ในเยอรมนี ปี 1897 นักวิจัยหลายคนใช้ CRT ของเขาในช่วงต้นทศวรรษ 1900 (ขณะนั้นประเทศไทยเลิกทาส เปลี่ยนจากพดด้วงเป็นสตางค์และเสียดินแดนลาวให้ฝรั่งเศส) เพื่อแสดงภาพแรงดันและรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าของการดิสชาร์จ มีการปรับปรุงมากมายใน CRT โดยนักวิจัยหลายคนในช่วงหลายทศวรรษนั้น จนกระทั่ง Tektronix ประดิษฐ์ออสซิลโลสโคป Tek 511 ในปี 1946 (ช่วงนั้น ร.8 สวรรคตด้วยพระแสงปืน) เพื่อให้ออสซิลโลสโคปกลายเป็นอุปกรณ์ที่ใช้งานง่ายและสอบเทียบสำหรับการวิจัย PD, Tek 511 สามารถบันทึกสัญญาณได้สูงสุด 10 MHz ซึ่งสอดคล้องกับ เวลาหน้าคลื่นพัลส์ 30 ns สิ่งนี้นำไปสู่ความเชื่อที่ว่าพัลส์ PD มี เวลาหน้าคลื่น หลายสิบล้าน ns (แทนที่จะเป็นไม่กี่ ns ที่ 100 kPa) ออสซิลโลสโคปแบบพิเศษถูกรวมเข้าไว้ในเครื่องมือ PD เซิงพาณิชย์โดยมีเหตุผลเท่านี้



รูปที่ 1.8 ประวัติการพัฒนาออสซิลโลสโคป

PD ยุคที่สองนี้อาจกล่าวได้ว่าเริ่มต้นในปี 1950 ด้วยผลงานของ George Mole จาก British Electrical Research Association (ERA) ได้ตีพิมพ์ “Design and performance of a portable AC discharge detector” เขาผลิตระบบการวัด PD ซึ่งรวมถึง PD capacitive coupler แรงดันสูง 1 nF, อิมพีแดนซ์การตรวจจับ RC หรือ RLC, ตัวกรองอะนาล็อก และจอแสดงผลที่ใช้หลอดรังสีแคโทด [8] คุณสมบัติของจอแสดงผลคือการวาง PD ซ้อนบนวงรี (รูป Lissajous) ของรูปคลื่น AC 50 หรือ 60 Hz แสดงดังรูปที่ 1.9 สิ่งนี้ทำให้ออสซิลโลสโคปแบบช่องสัญญาณเดียวสามารถแสดงทั้งแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับและ PD รวมทั้งเพิ่มฐานเวลาการกวาด (sweep) เป็นสองเท่าอย่างมีประสิทธิภาพเมื่อเทียบกับฐานเวลาของออสซิลโลสโคปแวนอนทั่วไป คือ ความเร็วในการ sweep มี

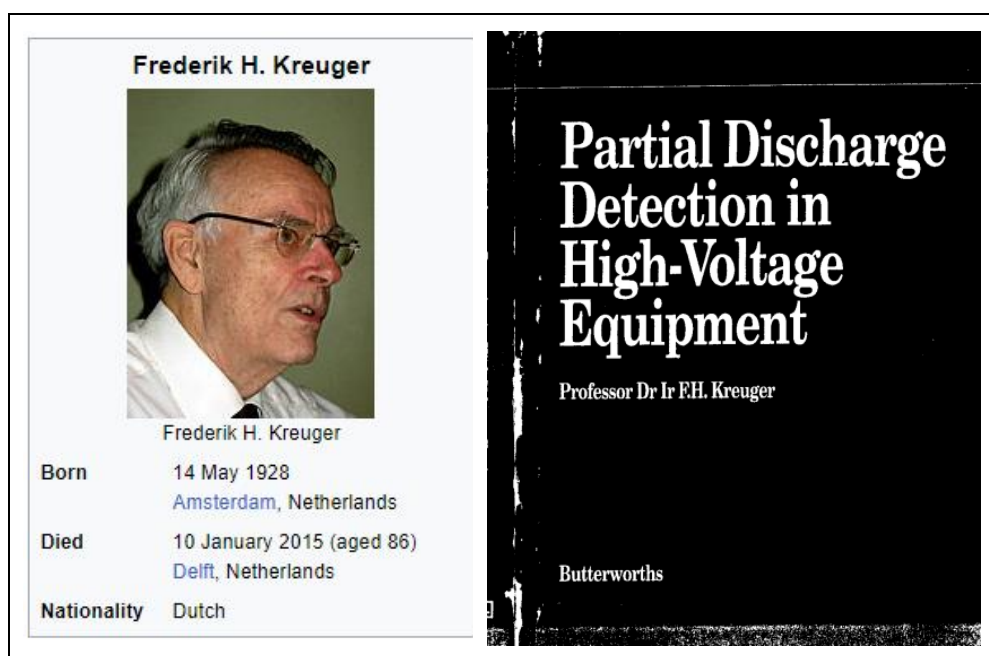
ประสิทธิภาพ เป็น 1 ms/div แทนที่จะเป็น 2 ms/div ด้วยคลื่นไซน์ 50 หรือ 60 Hz แบบเดิม ทำให้สามารถเห็นพัลส์ PD ได้ง่ายขึ้นเมื่อเทียบกับวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ



รูปที่ 1.9 การแสดงผลวง PD ซ้อนบนวงรีของรูปคลื่นไซน์

เครื่องวัด Mole และรุ่นที่ใหม่กว่าจนถึงรุ่น 5 ผลิตโดย Robinson Instruments ในอังกฤษ หลังจากประสบความสำเร็จในเชิงพาณิชย์ของเครื่องตรวจจับ PD ยุคแรกๆ หลายบริษัททั่วโลกได้สร้างอุปกรณ์ที่คล้ายกัน รวมถึง Biddle Instruments (ปัจจุบันเป็นส่วนหนึ่งของ Megger) และ Hipotronics (ปัจจุบันเป็นส่วนหนึ่งของ Hubbell) ในสหรัฐอเมริกา และ Tettex Instruments (ปัจจุบันเป็นส่วนหนึ่งของ Haefley/Pfiffner Group) ในประเทศสวิตเซอร์แลนด์ เครื่องตรวจจับ PD รุ่นเหล่านี้ทำงานในช่วงความถี่ IEC 60270 (นั่นคือ สูงสุดประมาณ 500 kHz ต่อมามาตรฐานขยายเป็น 1 MHz) และตรงกันข้ามกับวิธี RIV โดยสามารถแสดงผล PD บนหน้าจอออสซิลโลสโคปที่มีการเลือกช่วงความถี่แคบๆได้ หรือช่วงความถี่แบบ กว้างๆ ก็ได้, เครื่องมืออะนาล็อกเหล่านี้สามารถรองรับตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวและค่าความจุของวัตถุทดสอบได้หลากหลาย เอาต์พุตเป็นทั้งหน้าจอออสซิลโลสโคปและมิเตอร์ที่บันทึกขนาด PD สูงสุด (หรือ quasi peak) การบันทึกถาวรของหน้าจอออสซิลโลสโคปมักทำด้วยกลอง ซึ่งโดยปกติแล้วจะเป็นกลองโพลาไรซ์ การหามาได้อย่างไม่ยากเย็นของเครื่องมือวัด PD เชิงพาณิชย์นี้ ในปีช่วงปี 1950 ที่ Mole ได้คิดค้น มีไว้สำหรับการวัดและแสดงผล PD โดยเฉพาะ จึงทำให้เกิดการแพร่หลายในการใช้งานกับอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทุกประเภท

ช่วง 1960s มีอีกหนึ่งในผู้บุกเบิกยุคใหม่คือ Frederik Kreuger จาก Delft University ในเนเธอร์แลนด์ งานระดับปริญญาเอกของเขานำไปสู่การตีพิมพ์หนังสือภาษาอังกฤษเล่มแรก “Discharge detection in high voltage equipment” แสดงดังรูปที่ 1.10 เกี่ยวกับการวัดค่า PD ในปี 1965 (เขาจบ ป.เอกเมื่อ 1961) [23] หลังจากทำงานที่ ASEA ในสวีเดนได้ไม่นาน Kreuger ตลอดจนอาชีพการทำงานส่วนใหญ่ของเขาทำงานให้กับ Nederlandse Kabelfabriek ผู้ผลิตเคเบิลของเนเธอร์แลนด์, Kreuger ตรวจสอบวิธีการตรวจจับ PD ต่างๆ และตรวจสอบความไวของสัญญาณ PD เหล่านั้น ทำการวิจัยเกี่ยวกับวิธีการตรวจจับ PD ที่ดีที่สุดสำหรับอุปกรณ์ HV แต่ละประเภท (โดยเฉพาะสายเคเบิล) พัฒนาสิ่งที่ปัจจุบันเรียกว่า Kreuger PD bridge เพื่อแก้ปัญหาสัญญาณรบกวน และหาวิธีการสอบเทียบให้ตรวจพบสัญญาณในรูปแบบประจุปรากฏ (pC) [24] ผลงานของเขานำไปสู่มาตรฐานการวัด PD ระหว่างประเทศฉบับแรกในปี 1968 นั่นคือ IEC 270 (ปัจจุบันคือ IEC 60270)



รูปที่ 1.10 รูป prof. F. Kreuger (ซ้าย) และหนังสือ PD ภาษาอังกฤษเล่มแรก (ขวา)

ช่วง 1970s มีนักวิจัยชั้นนำอีกคนในยุคนี้คือ Ray Bartnikas เช่นเดียวกับ Kreuger, Bartnikas เริ่มต้นอาชีพของเขากับผู้ผลิตสายเคเบิล (Northern Electric ในแคนาดา) ก่อนที่จะดำเนินการวิจัยเกี่ยวกับการวัดค่า PD ที่สถาบันวิจัยของ Hydro-Québec (IREQ), Bartnikas ตรวจสอบทั้งวิธีการที่เหมาะสมที่สุดและข้อจำกัดของการสอบเทียบ PD ในแง่ของ apparent charge (ประจุปรากฏ) ทำการวิจัยเกี่ยวกับ PD รูปแบบต่างๆ และเป็นกุญแจสำคัญในการพัฒนามาตรฐานอเมริกันฉบับแรกเกี่ยวกับการตรวจจับ PD ในปี 1973 (หลัง 270 ออก 5 ปี) , ASTM D1868 “Standard Test Method for Detection and Measurement of Partial Discharge (Corona) Pulses in Evaluation of Insulation Systems” แสดงดังรูปที่ 1.11 และเขายังเขียนหนังสือ

เกี่ยวกับการวัดและตีความ PD “Engineering dielectrics Volume 1 : corona measurement and interpretation” ซึ่งตีพิมพ์ในปี 1979 ซึ่งยังคงพิมพ์อยู่ [19] Bartnikas มีบทบาทในยุคดิจิทัลด้วยการพัฒนาเครื่องวิเคราะห์ขนาดพัลส์ PD , การวิจัยของ Kreuger และ Bartnikas ร่วมกับความพร้อมใช้งานเชิงพาณิชย์ของระบบการวัด PD ที่พกพาได้ นำไปสู่การประยุกต์ใช้การวัด PD อย่างแพร่หลาย ทั้งในโรงงานสำหรับการทดสอบรับประกันคุณภาพอุปกรณ์ HV และการประยุกต์ใช้ในการวิจัย ในตอนท้ายของทศวรรษ 1960 ผู้ผลิตอุปกรณ์ HV แทบทุกรายรวมถึงห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงทุกแห่งมีเครื่องตรวจจับเหล่านี้อย่างน้อยหนึ่งตัว



Designation: D 1868 – 93 (Reapproved 1998)

An American National Standard

Standard Test Method for Detection and Measurement of Partial Discharge (Corona) Pulses in Evaluation of Insulation Systems¹

This standard is issued under the fixed designation D 1868; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

รูปที่ 1.11 มาตรฐาน PD ทางฝั่งอเมริกันฉบับแรก

บุคคลสำคัญอีกคนหนึ่งในยุคนี้คือ Eberhard Lemke จากมหาวิทยาลัยเทคนิคเดรสเดน ประเทศเยอรมนี เขายังทำงานในช่วงเวลาสั้นๆ ที่บริษัทผลิตสายไฟก่อนที่จะเริ่มก่อตั้งบริษัท Lemke Diagnostics ในปี 1990 ซึ่งเขาได้ขาย Lemke probe แสดงดังรูปที่ 1.12 ซึ่งเป็นโพรบ RF เพื่อหาตำแหน่งที่ตั้งของ PD เป็นครั้งแรก ซึ่งถูกซื้อโดย Doble Engineering และในที่สุดก็ได้ผลิตเครื่องมือ IEC 60270 ด้วยเช่นกัน นอกจากการพัฒนาโพรบแล้ว เขายังกระตือรือร้นอย่างมากในการค้นคว้าฟิสิกส์ของ PD, การตรวจจับ PD และการสอบเทียบเครื่องมือ PD เขาเขียนเกี่ยวกับ PD ในหนังสือเกี่ยวกับวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงที่มีผู้อ่านอย่างกว้างขวาง “High voltage test and measuring techniques” [25] และเป็นประธานคณะกรรมการ CIGRE ซึ่งผลิตโบรชัวร์ทางเทคนิคเกี่ยวกับการใช้ IEC 60270 รุ่นปี 2000 “Guide for partial discharge measurements in compliance to IEC 60270” ซึ่งมีบรรณานุกรมภาษาอังกฤษและภาษาเยอรมันที่ครอบคลุม เอกสารในหัวข้อ [26]



รูปที่ 1.12 prof. lemke (ซ้าย) โพรบ lemke (กลาง) หนังสือ HV (ขวา)

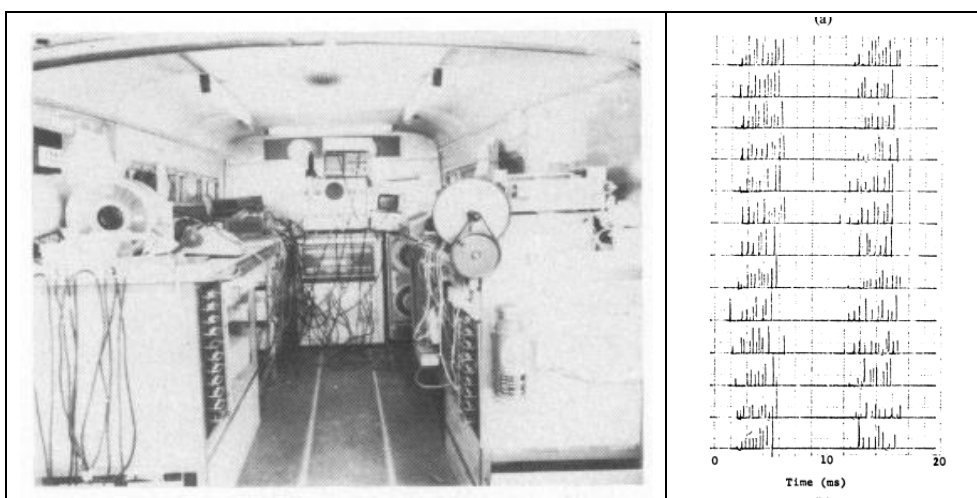
1.7.3 ยุค 3 : ยุคดิจิทัลและการประมวลผลสัญญาณวัดสูงถึงช่วงความถี่ GHz

มีประเด็นน่าสนใจทางเทคนิคสามประการ:

- 1) การเปลี่ยนผ่านสู่เครื่องมือดิจิทัล : เปลี่ยนจากอุปกรณ์แบบแอนะล็อกที่มีการแสดงผลแบบออสซิลโลสโคปเป็นอุปกรณ์แบบดิจิทัลและการจัดเก็บหรือแสดงข้อมูล PD บนคอมพิวเตอร์
- 2) การตรวจจับ PD ในย่าน VHF และ UHF : การหาผู้ใช้ได้ง่ายของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ดิจิทัลที่เร็วขึ้น (และโดยเฉพาะอย่างยิ่งตัวแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัล - ADC) แนวโน้มการตรวจวัด PD ที่ความถี่สูงขึ้น จนถึงความถี่สูงพิเศษ UHF
- 3) การประมวลผลหลังได้รับสัญญาณ : การประมวลผลข้อมูลที่ได้โดยตั้งโปรแกรมจากคอมพิวเตอร์เพื่อแยก PD ออกจากสัญญาณรบกวนและระบุสาเหตุที่แท้จริงของ PD ที่ตรวจพบ

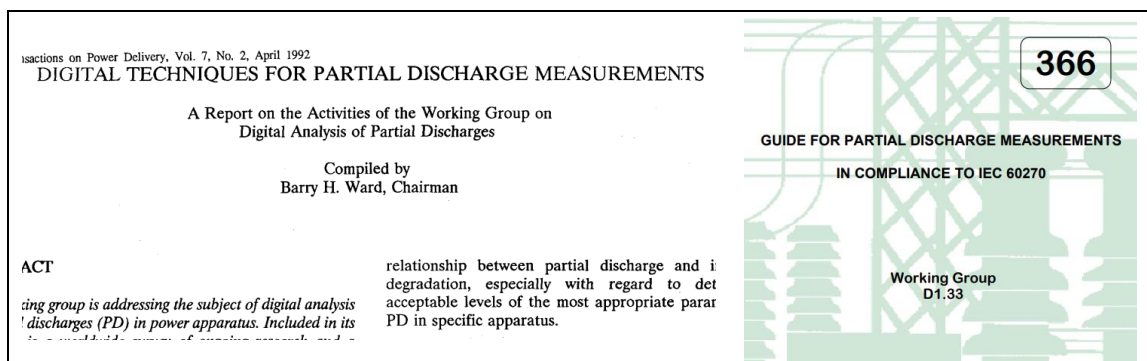
1) การเปลี่ยนผ่านสู่เครื่องมือดิจิทัล

การวิจัยเกี่ยวกับเทคนิคดิจิทัลในการวัด PD อาจกล่าวได้ว่าเริ่มต้นจาก Bartnikas และเครื่องวิเคราะห์ขนาดพัลส์ของเขาในปี 1969 ได้ตีพิมพ์ “A simple pulse-height analyzer for partial discharge rate measurements” [27] วงจรดิจิทัลยุคแรกเหล่านี้ใช้ทรานซิสเตอร์แบบไม่ต่อเนื่อง (discrete) เพื่อแบ่งขนาดของพัลส์ออกเป็นช่องขนาดต่างๆ จากนั้นนับจำนวนของพัลส์ในแต่ละช่องในช่วงระยะเวลาหนึ่ง, เอาต์พุตเป็นการพล็อต 2 มิติ ของขนาดพัลส์ (สเกลแนวอน) เทียบกับอัตราการนับพัลส์ (สเกลแนวตั้ง) ขั้นตอนสำคัญอีกขั้นหนึ่งได้ดำเนินการอย่างอิสระในปี 1976 โดย Austin และ James ในสหราชอาณาจักร ได้ตีพิมพ์ “On-Line Digital Computer System for Measurement of Partial Discharges in Insulation Structures” [28] รวมถึง Andreas Kelen จาก ASEA ในสวีเดน ได้ตีพิมพ์ “The functional testing of HV generator stator insulation” [29] พวกเขา รวมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับการนับพัลส์โดยทำเองที่บ้าน เข้ากับคอมพิวเตอร์ที่มีอยู่ในขณะนั้น แสดงดังรูปที่ 1.13 ไม่เพียงแต่นับจำนวนพัลส์ต่อหน้าต่างเท่านั้น แต่ยังมีนับพัลส์ที่ส่วนต่าง ๆ ของคาบกระแสสลับด้วย



รูปที่ 1.13 ชุดอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับการนับพัลส์ (ซ้าย) ดิสซาร์จบนคาบไซน์ (ขวา)

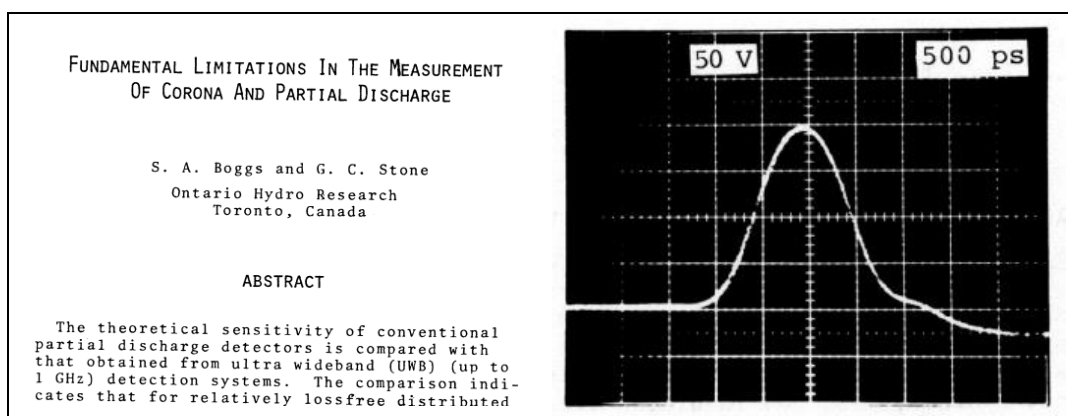
ในปี 1988 Bernhard Fruth และ Jitka Fuhr จาก ABB Research ในสวิตเซอร์แลนด์ได้ตีพิมพ์ “Partial discharge pattern recognition – a tool for diagnosis and monitoring of aging” พวกเขาได้พัฒนาระบบโดยใช้ช่วงความถี่ IEC 60270 ที่เรียกว่า 'PRPDA' – phase resolved partial-discharge analyzer [30] นี่อาจเป็นคำแรกที่ใช้คำว่า "phase-resolved PD" (PRPD) ซึ่งตอนนี้มีแนวโน้มที่จะเชื่อมโยงกับการพล็อต 2 มิติที่ใช้กันอย่างแพร่หลายของขนาดเทียบกับตำแหน่งเฟสและอัตราการนับพัลส์ บทสรุปโดยย่อของงานวิจัยทั้งหมดนี้ได้ตีพิมพ์ “Digital techniques for partial discharge measurements” ในปี 1991 โดย Barry Ward แห่ง Biddle Instruments ซึ่งเป็นประธานคณะกรรมการ IEEE ในหัวข้อนี้ แสดงดังรูปที่ 1.14 (ซ้าย) [31] เครื่องวัด PD แบบดิจิทัลที่สอดคล้องกับ IEC 60270 ในเชิงพาณิชย์เครื่องแรกที่ใช้กันอย่างแพร่หลายผลิตโดย Power Diagnostix ได้รับการพัฒนาโดย Detlev Gross และ Bernhard Fruth และเปิดตัวในปี 1993 , Fruth ได้วิจัยการตรวจวัด PD ในเครื่องจักรกลหมุน สายเคเบิล HV และอุปกรณ์อื่นๆ ส่วน Gross ได้ก่อตั้งบริษัทอิเล็กทรอนิกส์ของตัวเองในช่วงปลายทศวรรษ 1980 และทำงานร่วมกับ Fruth เพื่อพัฒนาสิ่งที่เรียกว่า ICM++ อุปกรณ์เริ่มต้นนี้ทำให้การพล็อต PRPD เป็นที่นิยม (ขนาด PD เทียบกับตำแหน่งคาบเฟส 50/60 Hz เทียบกับอัตราการนับพัลส์) หลังจากที่มีการเปิดตัวเครื่องมือ Power Diagnostix (ปัจจุบันเป็นส่วนหนึ่งของ Megger) หลายๆ บริษัท รวมถึง Hipotronics, Lemke, Omicron, Techimp, Tettex และบริษัทอื่นๆ อีกมากมายก็เปิดตัวเครื่องมือที่สอดคล้องกับ IEC 60270 ที่คล้ายคลึงกันโดยใช้เทคโนโลยีดิจิทัลเป็นหลัก, Lemke เขียนโบรชัวร์ของ CIGRE “Guide for partial discharge measurements in compliance to IEC 60270” แสดงดังรูปที่ 1.14 (ขวา) ได้กล่าวถึงวิธีการใช้โดยเครื่องวัด PD เชิงพาณิชย์ในการจับและวัดค่า PD แบบดิจิทัลในช่วงความถี่ IEC 60270 [26] ตั้งแต่ปี 2000 เป็นต้นมา เครื่องมือ PD แบบอะนาล็อกยุคที่สองน้อยมากถูกนำมาใช้ เนื่องจากความสะดวกและความยืดหยุ่นของเครื่องวัด PD แบบดิจิทัล ตลอดจนความสามารถในการแบ่งปันไฟล์ข้อมูลกับคอมพิวเตอร์สำหรับการแสดงผลและการจัดการข้อมูล



รูปที่ 1.14 บทสรุปโดยย่อของการพัฒนา PD ยุคดิจิทัล (ซ้าย) เอกสารแนะนำการวัด PD (ขวา)

2) การตรวจจับ PD ในย่าน VHF และ UHF

จุดน่าสนใจประการที่สองของยุคนี้ขึ้นอยู่กับการพัฒนาออสซิลโลสโคปที่ดีขึ้น Tektronix เปิดตัวสโคป Tek 466 ในปี 1974 มีแบนด์วิธ 100 MHz ดังนั้นจึงสามารถแสดงพัลส์เดี่ยวได้อย่างชัดเจนโดยมีเวลาหน้าคลื่นสั้นเพียงประมาณ 4 ns การพัฒนาออสซิลโลสโคปแบบอะนาล็อก Tek 7104 ในปี 1978 ทำให้สามารถเห็นพัลส์กระแสของ PD ได้อย่างชัดเจน เนื่องจากมีแบนด์วิดท์ที่ 1 GHz สอดคล้องกับเวลาหน้าคลื่น 0.3 ns และแผ่นเพิ่มความเข้มของภาพแบบไมโครแซนแนลทำให้บันทึกภาพถ่ายของกระแส PD เดี่ยวได้อย่างชัดเจนเป็นครั้งแรก แสดงดังรูปที่ 1.15 การพัฒนาออสซิลโลสโคป 1 GHz ในปี 1970 ทำให้เกิดงานจำนวนมากเกี่ยวกับรูปร่างพัลส์ PD



รูปที่ 1.15 ภาพถ่ายกระแส PD เดี่ยว ที่บันทึกได้ครั้งแรก

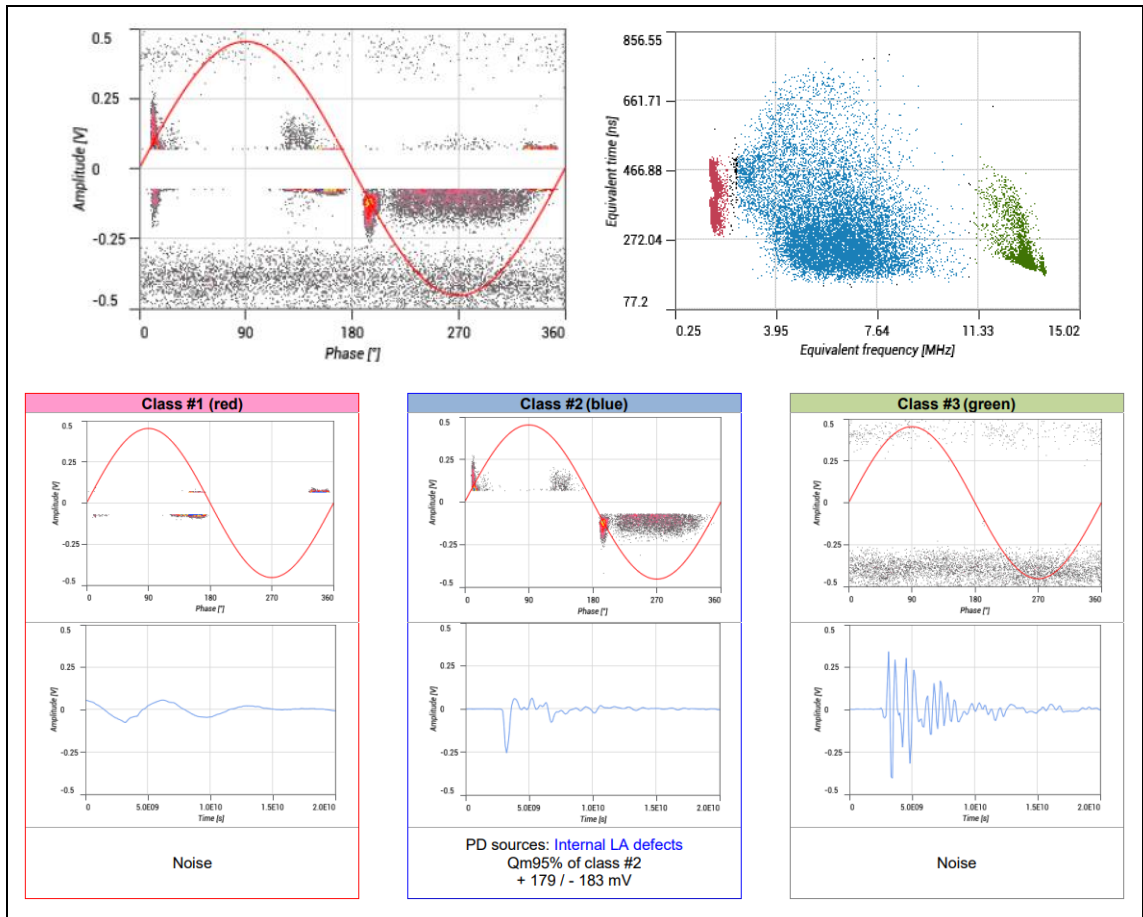
ด้วยการเพิ่มแบนด์วิธของออสซิลโลสโคปแต่ละครั้งจนผ่านช่วง 1 GHz พบว่าเวลาหน้าคลื่นของพัลส์กระแส PD นั้นสั้นกว่าที่เคยเชื่อกัน การตระหนักว่า PD สร้างความถี่ได้สูงถึง 1 GHz ทำให้นักวิจัยจำนวนมากตรวจสอบการวัด PD ในช่วงความถี่ VHF (30-300 MHz) และ UHF (300-3000 MHz) พบว่าการวัด PD ในช่วงความถี่สูงช่วยลดสัญญาณรบกวนทางไฟฟ้า ซึ่งมักพบในการวัด PD ออนไลน์ และนำไปสู่การใช้การวัด PD ออนไลน์อย่างแพร่หลายในระบบ GIS, หม้อแปลง และขดลวดสเตเตอร์ของเครื่องหมุน, รากฐานทางทฤษฎีสำหรับการวัด PD ที่สูงกว่าช่วงความถี่ IEC 60270 นำเสนอโดย Steven Boggs จากแคนาดา ขณะอยู่ที่ห้องปฏิบัติการวิจัยฝ่ายยูทิลิตี้ของ Ontario Hydro (และต่อมาร่วมกับมหาวิทยาลัย Connecticut ในสหรัฐอเมริกา) ตีพิมพ์เรื่อง “Fundamental limitations in the measurement of corona and partial discharge” ในปี 1982 Boggs ตระหนักดีว่าสิ่งที่เขาเรียกว่าการตรวจจับ PD ในย่านความถี่กว้างพิเศษ (UWB) ด้วยเซ็นเซอร์ใกล้เคียงกับจุดเกิด PD จะมีความสามารถที่เหนือกว่าในการยับยั้งสัญญาณรบกวน โดยเฉพะอย่างยิ่งกับการวัด PD ออนไลน์ เขาและเพื่อนร่วมงาน ประยุกต์ใช้การตรวจจับ VHF และ UHF ของ PD กับ GIS และขดลวดสเตเตอร์ของเครื่องจักร เป็นอันดับแรก พวกเขาบันทึกรูปร่างของพัลส์จากวัตถุทดสอบมากมาย รูปที่เขาบันทึกได้เป็นพัลส์เดี่ยวจากต้นไม้ไฟฟ้าที่เติบโตในอ็อกซิโดยมีเวลาหน้าคลื่นที่ชัดเจนประมาณ 500 ps และความกว้างของพัลส์ 1.5 ns นี่อาจเป็นหนึ่งในภาพแรกของ

รูปร่างพัลส์กระแส PD ที่แท้จริง [32] Boggs ใช้ตัวเก็บประจุและตัวแบ่งแรงดันหลายประเภทเพื่อให้ได้แบนด์วิธหลายร้อย MHz ในระบบ GIS, ในช่วง 1980 G. Stone และเพื่อนร่วมงานของเขาที่ศูนย์วิจัย Ontario Hydro ตีพิมพ์ “Diagnostic testing of generator insulation without service interruption” พวกเขาเริ่มวัดค่า PD ในช่วง 30-300 MHz ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้งานอยู่ [33] ข้อได้เปรียบของช่วงความถี่ VHF คือตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว PD ไฟฟ้าแรงสูงอาจมีขนาดเล็กกว่ามาก (80 pF) และทำให้ติดตั้งได้ง่ายภายในเฟรมเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และสามารถใช้หลักการของ time-of-flight เพื่อแยก PD ของสเตเตอร์ออกจากสัญญาณรบกวนของระบบไฟฟ้าโดยใช้เซ็นเซอร์คู่ต่อเฟส นอกจากนี้ยังสามารถยับยั้งสัญญาณรบกวนจากการแสดงผลแบบดิจิทัล (render) ของรูปร่างพัลส์ได้ [34] จากมุมมองเชิงพาณิชย์ การขยายเครื่องวัด PD ไปสู่ความถี่ที่สูงกว่า 1 MHz (ซึ่งปัจจุบันเรียกว่าเครื่องวัดที่สอดคล้องกับ IEC 62478) เริ่มขึ้นในปี 1986 เมื่อ FES International (ต่อมารู้จักกันในชื่อ Adwel และจากนั้นเป็นส่วนหนึ่งของ Iris Power) ผลิตเครื่องมือที่เรียกว่า PDA-H เพื่อวัดค่า PD ในการใช้งานเครื่องกำเนิดพลังน้ำในช่วง VHF ในปี 1991 Iris Power แยกออกจาก Ontario Hydro ได้เปิดตัว PDA-IV ซึ่งเป็นเครื่องวัดดิจิทัลทั้งหมดที่ทำงานในช่วง VHF ที่แยกสัญญาณรบกวนของระบบไฟฟ้าออกจาก PD ที่ขดลวดสเตเตอร์บนพื้นฐาน pulse-by-pulse และแสดง PRPD บนหน้าจอ LCD ในตัว หนึ่งปีต่อมา Iris Power ได้เปิดตัว TGA-S ซึ่งทำงานในช่วง UHF ด้วยตัวคาบเกี่ยวแม่เหล็กไฟฟ้าแบบพิเศษ (เรียกว่า stator slot coupler หรือ SSC) ที่ติดตั้งในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกังหัน (turbine) ที่ระบายความร้อนด้วยไฮโดรเจน จอภาพ PD UHF แบบต่อเนื่องเป็นแบบดิจิทัล, ในปี 1991 Brian Hampton และเพื่อนร่วมงานของเขาที่มหาวิทยาลัย Strathclyde ในสกอตแลนด์ ตีพิมพ์ “A continuous UHF monitor for gas insulated substations” พวกเขาได้พัฒนาเซ็นเซอร์ PD ที่ใช้งานได้จริงสำหรับ GIS ร่วมกับระบบตรวจสอบ UHF PD อย่างต่อเนื่อง (ติดตั้งถาวร) [35] เซ็นเซอร์เป็นแผ่นกลมที่สามารถติดตั้งได้ที่ด้านในของฝาปิดช่องซ่อมบำรุง ภายในตู้ GIS เท่านั้น สิ่งเหล่านี้ทำหน้าที่เป็นเสาอากาศสนามใกล้ (Near field) เพื่อรับสนามไฟฟ้าของพัลส์ PD ขณะที่เคลื่อนที่ไปตามท่อนำคลื่น coaxial ที่สร้างโดย GIS แม้ว่าจะตรวจพบ PD ในช่วง UHF แต่พวกเขาใช้ตัวแยกสัญญาณเพื่อลดสัญญาณ UHF เพื่อให้สามารถใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ความถี่ต่ำทั่วไปในการนับพัลส์และกำหนดตำแหน่งเฟสของ PD สำหรับ GIS ได้รับการแนะนำโดยบริษัทในสกอตแลนด์ชื่อ DMS ซึ่งปัจจุบันเป็นส่วนหนึ่งของ Qualitrol Corp. ก่อตั้งโดย John Pearson, Brian Hampton และ Owen Farish แห่ง Strathclyde University เครื่องวัด PD ใช้เทคโนโลยีที่พัฒนาขึ้นในมหาวิทยาลัย นี่ยังเป็นจอภาพ PD ออนไลน์แบบต่อเนื่องเชิงพาณิชย์เครื่องแรกของโลกอีกด้วย ปัจจุบันมีบริษัทหลายสิบแห่งที่ผลิตเครื่องวัด PD ย่าน VHF และ UHF ซึ่งส่วนใหญ่ใช้สำหรับการตรวจสอบ PD แบบออนไลน์

3) การประมวลผลหลังได้รับสัญญาณ

อีกแง่มุมหนึ่งในยุคนี้ ซึ่งอำนวยความสะดวกด้วยเครื่องวัดดิจิทัลที่เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ได้ง่าย คือการพัฒนาเครื่องมือเพื่อช่วยในการวิเคราะห์ข้อมูล PD โดยเฉพาะอย่างยิ่ง เครื่องวัดเชิงพาณิชย์เหล่านี้ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของเครื่องมือเกือบทั้งหมด ใช้ขนาดของสัญญาณ ตำแหน่งเฟส อัตราการนับ และแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ ณ เวลาของพัลส์เพื่อคำนวณตัวบ่งชี้ต่างๆ ของการเกิด PD (ค่าเฉลี่ย quasi , กำลังไฟฟ้าของ PD , กระแส PD , อัตรากำลังสอง ฯลฯ) ตามที่ระบุไว้ใน IEC 60270 บางทีสิ่งที่สำคัญกว่านั้น การประมวลผลภายหลัง (post-processing) สามารถช่วยแยกพัลส์สัญญาณรบกวนออกจากพัลส์ PD ของฉนวน และระบุสาเหตุการเกิด PD ในวัตถุทดสอบ สิ่งนี้มีความสำคัญเนื่องจากมีความต้องการในขณะทีเทคโนโลยี PD แพร่หลาย จากการวิจัย/ห้องปฏิบัติการทดสอบไฟฟ้าแรงสูงไปยังเจ้าของอุปกรณ์ HV โดยผู้ทดสอบ PD จะสามารถตีความรูปแบบ PRPD ได้โดยไม่ต้องมีนักวิจัย PD ที่มีประสบการณ์ การมีส่วนร่วมที่โดดเด่นครั้งแรกในกระบวนการ post-processive เกิดขึ้นโดย Tatsuki Okamoto และ Toshikatsu Tanaka จาก CRIEPI จากญี่ปุ่นในปี 1986 ได้ตีพิมพ์ “Novel partial discharge measurement: computer-aided measurement systems” พวกเขาเริ่มใช้การวิเคราะห์ทางสถิติของ PD Patterns ที่เกี่ยวข้องกับมุมเฟส [36] ไม่กี่ปีต่อมา Edward Gulski จาก ตีพิมพ์ “Computer-aided Analysis of Discharge Patterns” ในเนเธอร์แลนด์ก็ใช้วิธีการทางสถิติที่อาศัยการแจกแจงแบบปกติเพื่อวิเคราะห์รูปแบบ PRPD [37] งานนี้ถูกนำไปขายให้ระบบตรวจจับ Tettex PD ในที่สุด Alfredo Contin และ Gian Carlo Montanari จากอิตาลีได้ตีพิมพ์ “Use of a Mixed-Weibull Distribution for the Identification of PD Phenomena” พวกเขาใช้การวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้การแจกแจงความน่าจะเป็นแบบ Weibull กับการวิเคราะห์ PRPD [38] ในตัวอย่างทั้งหมด แนวคิดคือการจำแนกรูปแบบต่างๆ ของ PRPD เพื่อหาสาเหตุของ PD แม้ว่าจะไม่ได้ใช้อย่างแพร่หลายในตอนนั้น แต่ก็เป็นวิธีการ ก่อนที่วิธีอื่นๆจะเป็นที่นิยมในหมู่ผู้ทดสอบ PD

ในปี 2004 Cavallini, Montanari และ Contin ในอิตาลี ตีพิมพ์ “Advanced PD inference in on-field measurements Noise rejection” พวกเขาน่าจะเป็นกลุ่มแรกที่ใช้วิธีการ Post-processing ที่ไม่ใช่ทางสถิติเพื่อจัดการผลของสัญญาณรบกวน เช่นเดียวกับการระบุแหล่งที่มาของ PD ประเภทต่างๆ (เช่น แยกแยะ PD ที่เกิดจากช่องว่างอากาศ , PD ที่เกิดบนพื้นผิว) พวกเขาพัฒนาสิ่งที่เรียกว่าวิธีการแผนที่ความถี่เวลา (T-F map) [39] หลังจากการแปลง A/D แต่ละพัลส์จะถูกประมวลผลในโดเมนความถี่และตัวระบุความยาวของพัลส์จะถูกจับ (capture) ซึ่งสร้าง 'แผนที่' ขึ้นด้วยสองแกน (เวลาและความถี่) โดยรูปร่างพัลส์ที่แปลงแล้วของพัลส์ที่ตรวจพบแต่ละอันจะถูกระบุด้วยพิกเซลเดียว พวกเขาค้นพบว่าสัญญาณรบกวนและแหล่งที่มาของ PD ประเภทต่างๆ มีแนวโน้มที่จะจับกลุ่มกันในบริเวณต่างๆ ของแผนที่ T-F แสดงดังรูปที่ 1.16 การใช้ผู้สังเกตการณ์ที่เชี่ยวชาญหรืออัลกอริธึมการจัดกลุ่มของพัลส์จะถูกระบุในหลายกรณีส่งผลให้เกิดรูปแบบ PRPD ที่ไม่ซ้ำใครจากประสบการณ์



รูปที่ 1.16 การแยกแยะสัญญาณ PRPD โดยแผนภาพ T-F

รูปแบบ PD เหล่านี้ อาจเชื่อมโยงกับจุดบกพร่องหรือสัญญาณรบกวนรบกวนต่างๆ เทคโนโลยีนี้ถูกนำไปใช้กับสายไฟฟ้าแรงสูงก่อน จากนั้นจึงแพร่กระจายไปยังอุปกรณ์ HV ประเภทอื่นๆ เทคโนโลยี Post-processing นี้นำไปสู่การสร้างโดย Montanari และเพื่อนร่วมงานของเขาที่ Techimp (ปัจจุบันเป็นส่วนหนึ่งของ Altanova) วิธีการ post-processing เชิงพาณิชย์ที่สำคัญอีกวิธีหนึ่งได้รับการพัฒนาโดย Ronald Plath และเพื่อนร่วมงานของเขาที่ MTronix (ปัจจุบันเป็นส่วนหนึ่งของ Omicron) ในเยอรมนี ทีมพิมพ์ “Multi-channel PD measurements” คุณลักษณะสำคัญของวิธีการ post-processing นี้คือการจับสัญญาณจากทั้งสามเฟสพร้อมกัน การตอบสนองต่อการเกิดพัลส์ ในทั้งสามเฟสจะถูกรวบรวมและจะสัมพันธ์กันบนการพล็อตสามมิติของขนาดพัลส์ในแต่ละเฟส พล็อต "3PARD" ประกอบด้วยพัลส์นับพัน กลุ่มของพิกเซลที่เกี่ยวข้องกับ PD และสัญญาณรบกวนประเภทต่างๆ ก่อตัวขึ้นในพื้นที่ต่างๆ ของแผนภาพ [40] เช่นเดียวกับวิธี T-F map คลัสเตอร์มักจะสร้างรูปแบบ PRPD เฉพาะ เพื่อระบุลักษณะของสัญญาณรบกวนหรือแหล่งที่มาของ PD นอกจากนี้วิธีการ post-processing แล้ว ยังมีวิธีการประมวลผลสัญญาณอื่นๆ อีกมากมายที่ถูกนำมาใช้ ซึ่งมักใช้รูปแบบต่างๆ ของ AI

1.7.4 Timeline การพัฒนาเทคโนโลยีการวัด PD

- 1884 ประเทศไทยมีไฟฟ้าใช้ครั้งแรก ในพระบรมมหาราชวัง
- 1897 Dr. บรรฮาวน์ ได้รับโนเบล CRT - cathode ray tube
- 1898 มีเอกสารหลายร้อยฉบับที่เผยแพร่เกี่ยวกับวิธีการและเทคโนโลยีการวัด PD
- 1901 บริษัท ไฟฟ้าสยาม ตั้งโรงไฟฟ้าแห่งแรกที่วัดเลียบ ระบบ 3.5 kV
- 1913 เอกสารภาษาอังกฤษฉบับแรก Prof. Edward Bennett วัดการดิสชาร์จ corona
- 1924 เดล มาร์ ใช้ RIV วัดค่า PD ในเคเบิลชุบน้ำมันเพื่อหาความเค้นทางสูงสุดในการออกแบบฉนวน
- 1940 NEMA 107 มาตรฐานแรกสำหรับการตรวจวัด PD (RIV) ในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง
- 1944 เครื่องวัดเสียง PD , Stoddart ผลิต ใน siemens ยุโรปก็เริ่มผลิตตามติดๆ
- 1946 Tektronix ประดิษฐ์ออสซิลโลสโคป Tek 511 , fm = 10 MHz วัด pulse PD 30 ns ได้
- 1950 Dr. Mole ผลิตระบบวัด PD (Ck , Zm , filter ...) แสดงผลแบบ Elips
- 1951 Johnson , Warren วัด PD ด้วย RIV เพื่อประเมินสภาพฉนวนแบบออนไลน์ขดลวดสเตเตอร์
- 1959 ประเทศไทยเริ่มใช้แรงดัน 69 kV ในการส่งจ่าย
- 1961 วิธีการวัดแรงดันสัญญาณรบกวนทางวิทยุในยุโรป CISPR 16-1
- 1961 Kreuger จบ Delft University ประเทศ เนเธอร์แลนด์
เรื่อง Detection and location of discharges in particular in plastic insulated RV cables
- 1964 Kreuger บุกเบิก PD textbook ‘Discharge detection in HV equipment’
- 1964 ประเทศไทยเริ่มใช้แรงดัน 230 kV ในการส่งจ่าย
- 1965 มีเอกสาร อธิบายการวัดค่า PD ในหม้อแปลงสำหรับการทดสอบ QA ของโรงงานโดยใช้วิธี RIV
- 1968 งาน Kreuger ส่วนสำคัญต่อ IEC 60270:1968 มาตรฐานการวัด PD ระหว่างประเทศฉบับแรก
- 1969 เครื่องวิเคราะห์ขนาดพัลส์ของ Bartnikas ทำให้เกิด วงจรวัดดิจิตอล PD ยุคแรก
- 1972 Tektronix เปิดตัวสโคป Tek 465 ใช้ solid state ทำให้มี BW 100 MHz
- 1973 Bartnikas ทำให้เกิด ASTM D1868 มาตรฐานอเมริกันฉบับแรกเกี่ยวกับการตรวจวัด PD
- 1974 ผลิตออสซิลโลสโคปแบบเก็บข้อมูลแบบขี้อตเดี่ยวของ Tek 466 , BW 100 MHz
- 1976 Kalen , Austin home made เครื่องบันทึกจำนวนและตำแหน่งเฟสของพัลส์ PD
- 1976 อ. สำรวย จบปริญญาเอกที่ ETH Zürich ประเทศ สวิตเซอร์แลนด์
เรื่อง Dielectric strength of compressed SF-6 in nonuniform fields
- 1978 ผลิตออสซิลโลสโคป Tek 7104 จึงเห็นพัลส์ PD อย่างชัดเจน เนื่องจากมีแบนด์วิดท์ที่ 1 GHz
- 1979 textbook ASTM 669 บันทึกว่าการทดสอบ PD ด้วย RIV สำหรับหม้อแปลงพบได้บ่อยที่สุด
- 1980 G. Stone เริ่มวัดค่า PD ในช่วง 30-300 MHz ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้งานอยู่ โดยใช้
เซ็นเซอร์คู่ต่อเฟส เพื่อแยก PD ของสเตเตอร์ออกจากสัญญาณรบกวนของระบบไฟฟ้า
- 1980 Timperley เอาโอเดียร์ Johnson ใช้ HFCT จับสเปคตรัม เป็นวิธี EMI
- 1981 IEC 270 ฉบับพิมพ์ครั้งที่ 2 เพิ่มส่วนสอบเทียบ กับ ประจุใหญ่สุดที่เกิดซ้ำ

- 1982 ทฤษฎีสำหรับการวัดค่า PD ที่สูงกว่าช่วงความถี่ IEC 60270 นำเสนอโดย Boggs (UWB)
- 1984 อ. สำรวัย เขียนหนังสือวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง
- 1984 Kuffel , Zaengl ตีพิมพ์หนังสือ High Voltage Engineering Fundamentals
- 1986 FES หรือ Adwel ส่วนหนึ่งของ Iris ผลิตเครื่อง PDA-H วัด PD ใน Generator ช่วง VHF
- 1986 Okamoto , Tanaka เริ่มใช้การวิเคราะห์ทางสถิติของ PD Patterns เกี่ยวข้องกับมุมเฟส
- 1988 ABB Research (swtizerland) คิดค้น PRPD
- 1989 ประเทศไทยเริ่มใช้แรงดัน 500 kV ในการส่งจ่าย
- 1990 Gulski , Kreuger ใช้วิธีการทางสถิติที่อาศัยการแจกแจงแบบปกติเพื่อวิเคราะห์รูปแบบ PRPD
- 1991 Iris Power แยกออกจาก Ontario Hydro เปิดตัว PDA-IV เครื่องวัดดิจิทัลในช่วง VHF
- 1991 Ward ประธานคณะกรรมการ IEEE ทำบทสรุปโดยย่อของงานวิจัยทั้งหมด (PD ยุคดิจิทัล)
- 1991 Hampton พัฒนาเซ็นเซอร์ PD GIS และระบบตรวจสอบ UHF PD อย่างต่อเนื่อง (ติดตั้งถาวร)
- 1993 เครื่องวัด PD ตาม 60270 เชิงพาณิชย์เครื่องแรก โดย Power Diagnostix
- 1994 บริษัทในสกอตแลนด์ชื่อ DMS ซึ่งปัจจุบันเป็นส่วนหนึ่งของ Qualitrol Corp. ผลิตเครื่องวัด PD GIS ออนไลน์ เป็นจอภาพแบบต่อเนื่องเชิงพาณิชย์เครื่องแรกของโลก
- 1995 อ. คมสัน จบปริญญาเอกที่ ETH Zürich ประเทศ สวิตเซอร์แลนด์
- เรื่อง Applicability of the streamer breakdown criterion to inhomogenous gas gaps
- 1995 Contin , Montanari ใช้การแจกแจงความน่าจะเป็นแบบ Weibull กับวิธีการวิเคราะห์ PRPD
- 1996 Kuchler ตีพิมพ์หนังสือ High Voltage Engineering: Fundamentals
- 2000 Lemke เขียน Cigre 366 แนะนำการวัด PD ตาม IEC 270
- 2000 IEC 60270 พิมพ์ครั้งที่ 3 เพื่อการทำซ้ำและเปรียบเทียบได้ของผลการ
- 2004 Cavallini , Montanari ใช้วิธีการหลังการประมวลผล T-F map เพื่อวิเคราะห์ PD ประเภท
- 2004 อ. สำรวัย แก้ไขหนังสือวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง ตีพิมพ์ครั้งที่ 2
- 2009 Kuchler แก้ไขหนังสือ High Voltage Engineering: Fundamentals ตีพิมพ์ครั้งที่ 3
- 2005 Planth ใช้วิธีการหลังการประมวลผล จับสัญญาณจากทั้งสามเฟสพร้อมกันมาพล็อต 3PARD
- 2014 Lemke ตีพิมพ์หนังสือ High-Voltage Test and Measuring Techniques
- 2016 IEC TS 62478 ตีพิมพ์
- 2018 Kuchler ตีพิมพ์หนังสือ High Voltage Engineering: Fundamentals (English)
- 2023 ปัจจุบัน ปีที่วิทยานิพนธ์เล่มนี้เขียน
- 2024 IEC 60270:2024 การพิมพ์ครั้งที่ 4 คาดว่าจะเผยแพร่

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับการเบรกดาวน์ สนามไฟฟ้า การดิสชาร์จบางส่วน เอกสารที่เกี่ยวข้อง เช่น เซอร์ที่ ใช้ตรวจจับ PD รวมถึง โครงสร้างของอุปกรณ์หรือบริภัณฑ์ในระบบไฟฟ้าเบื้องต้น จะถูกกล่าวถึงในบทนี้

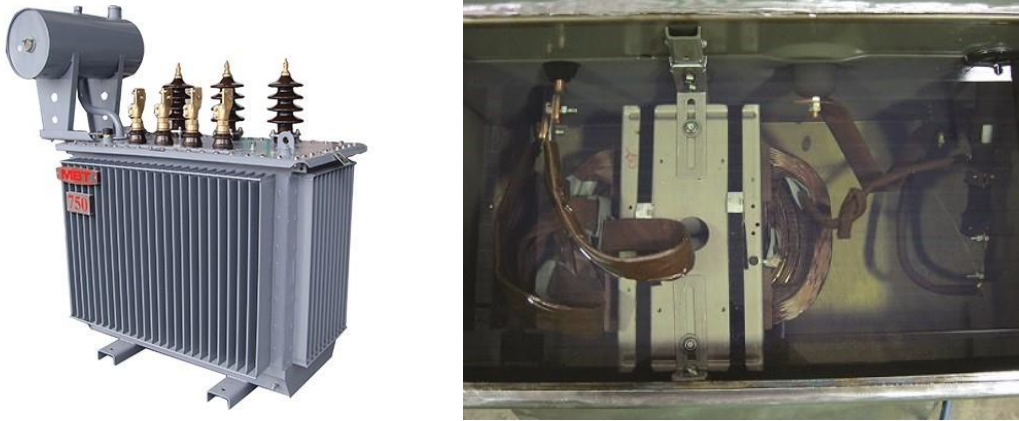
2.1 ฉนวน (Dielectric)

ฉนวนในระบบไฟฟ้ากำลังนั้น ทำหน้าที่เป็นฉนวนทางไฟฟ้าให้กับตัวนำหรือส่วนที่มีความต่าง ศักย์ไฟฟ้าไม่ให้เกิดลัดวงจรถึงกัน โดยทั่วไปฉนวนอาจแบ่งได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่ ฉนวนก๊าซ ฉนวนเหลวและ ฉนวนแข็ง ฉนวนแต่ละประเภทนอกจากจะทำหน้าที่ทางไฟฟ้าแล้วจะมีหน้าที่เฉพาะอย่างเพิ่มเติมยกตัวอย่าง เช่น ฉนวนก๊าซและฉนวนเหลว จะต้องทำหน้าที่ช่วยระบายความร้อนให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงอีกด้วย ในขณะที่ฉนวนแข็งจะต้องทำหน้าที่รองรับแรงทางกลของตัวนำไฟฟ้าที่ฉนวนแข็งนั้นรองรับอยู่ การฉนวนในระบบไฟฟ้ากำลังมักจะเป็นการใช้งานฉนวนร่วมกันมากกว่าหนึ่งประเภท ยกตัวอย่างเช่น การฉนวนของระบบ ส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าระหว่างสายตัวนำกับเสาส่ง จะใช้ลูกถ้วยซึ่งเป็นฉนวนแข็งร่วมกับฉนวนอากาศรอบๆ ลูกถ้วย ฉนวน แสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1.1 การฉนวนของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าระหว่างสายตัวนำกับเสาส่ง

หรือกรณีของหม้อแปลงซึ่งมักจะใช้น้ำมันหม้อแปลงเป็นฉนวนหลักและใช้กระดาษคราฟเป็นฉนวน ระหว่างรอบของขดลวด ดังรูปที่ 2.1.2 รวมทั้งกระดาษอัดแรงใช้คั่นระหว่างรอบของลวดตัวนำและยึดตัวนำ ไม่ให้เคลื่อนที่ การเลือกใช้ฉนวนแต่ละประเภทจะต้องเลือกให้เหมาะสมกับชนิดและประเภทของงานซึ่งจะทำให้การฉนวนมีประสิทธิภาพสูง มีผลต่อความน่าเชื่อถือและเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังนั้นๆ ซึ่งฉนวนหรือ ไดอิเล็กทริกเป็นสารที่นำไฟฟ้าได้น้อยมากหรือไม่นำไฟฟ้าเลยเมื่อมีสนามไฟฟ้ามากระทำต่อฉนวน เนื่องจาก ภายในโมเลกุลไม่มีอิเล็กตรอนอิสระอยู่เลยหรือมีจำนวนน้อย ฉนวนที่สมบูรณ์จริงๆเมื่ออยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า จะไม่มีการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระเลย ซึ่งสภาพต้านทานจะต้องมีค่าเป็นอนันต์ แต่ในทางปฏิบัติแล้วจะ ไม่มีฉนวนที่สมบูรณ์จริง คุณลักษณะสำคัญที่บ่งบอกคุณสมบัติและคุณภาพของฉนวน เช่น ค่าคงตัวไดอิเล็กทริก (ϵ) ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า (U_b) และ สนามไฟฟ้าเป็นต้น



รูปที่ 2.1.2 การฉนวนของหม้อแปลงไฟฟ้าระหว่างขดลวดกับตัวถัง

2.1.1 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ϵ (Permittivity)

เปอร์มิตติวิตีเป็นค่าที่บอกให้ทราบว่าฉนวนดังกล่าวจะมีค่าคาปาซิแตนซ์เป็นกี่เท่าของฉนวนสุญญากาศ โดยกำหนดให้ฉนวนที่พิจารณาและฉนวนสุญญากาศอยู่ภายใต้เงื่อนไขที่ใช้โอเล็กโตรดเดียวกัน หรืออาจจะพิจารณาค่า ϵ เป็นอัตราส่วนระหว่างค่าความหนาแน่นสนามไฟฟ้าต่อค่าความเข้มสนามไฟฟ้า ซึ่งอัตราส่วนดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุแต่ละชนิด [41]

ค่าเปอร์มิตติวิตีของวัสดุคำนวณได้จาก $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$ F/m

เมื่อ ϵ คือค่าเปอร์มิตติวิตีของวัสดุ

ϵ_0 คือค่าเปอร์มิตติวิตีของสุญญากาศ = 8.854×10^{-12} F/m

ϵ_r คือค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ของวัสดุ

ค่า ϵ_r สามารถที่จะนิยามได้จากค่าอัตราส่วนระหว่างค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุที่ใช้วัสดุฉนวน (C) ต่อค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุที่ใช้สุญญากาศเป็นฉนวนคั่นระหว่างโอเล็กโตรด (C_0)

$$\epsilon_r = \frac{C}{C_0}$$

เมื่อ C คือ ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุที่ใช้วัสดุฉนวน

C_0 คือ ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุที่ใช้สุญญากาศเป็นฉนวน

ในกรณีทั่วไปเมื่อฉนวนได้รับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ของวัสดุสามารถเขียนอยู่ในรูปจำนวนเชิงซ้อน (Complex reactive permittivity) ดังแสดงในสมการ

$$\epsilon_r = \epsilon_r' - j\epsilon_r''$$

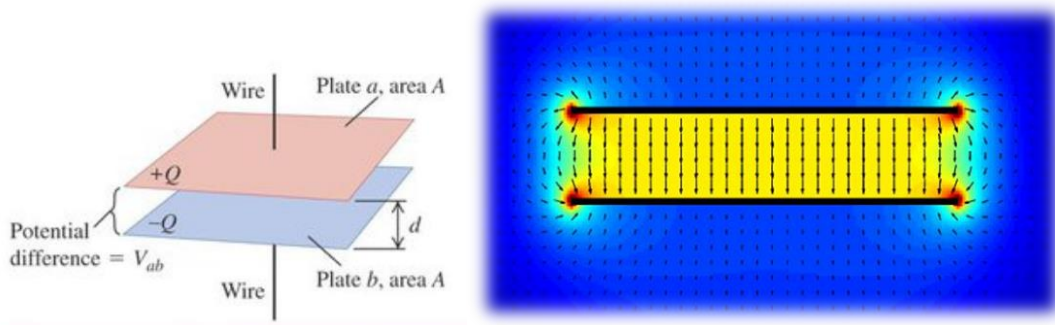
เมื่อ ϵ_r คือ ส่วนจริงเป็นความสามารถของฉนวนในการเก็บพลังงานในรูปของสนามไฟฟ้า
 ϵ_r'' คือ ส่วนจินตภาพเป็นค่าที่มีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าแฟคเตอร์กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก

พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นสนามไฟฟ้า และค่าความเข้มสนามไฟฟ้า

$$D = \epsilon E = \epsilon_0 \epsilon_r E \quad \text{C/m}^2$$

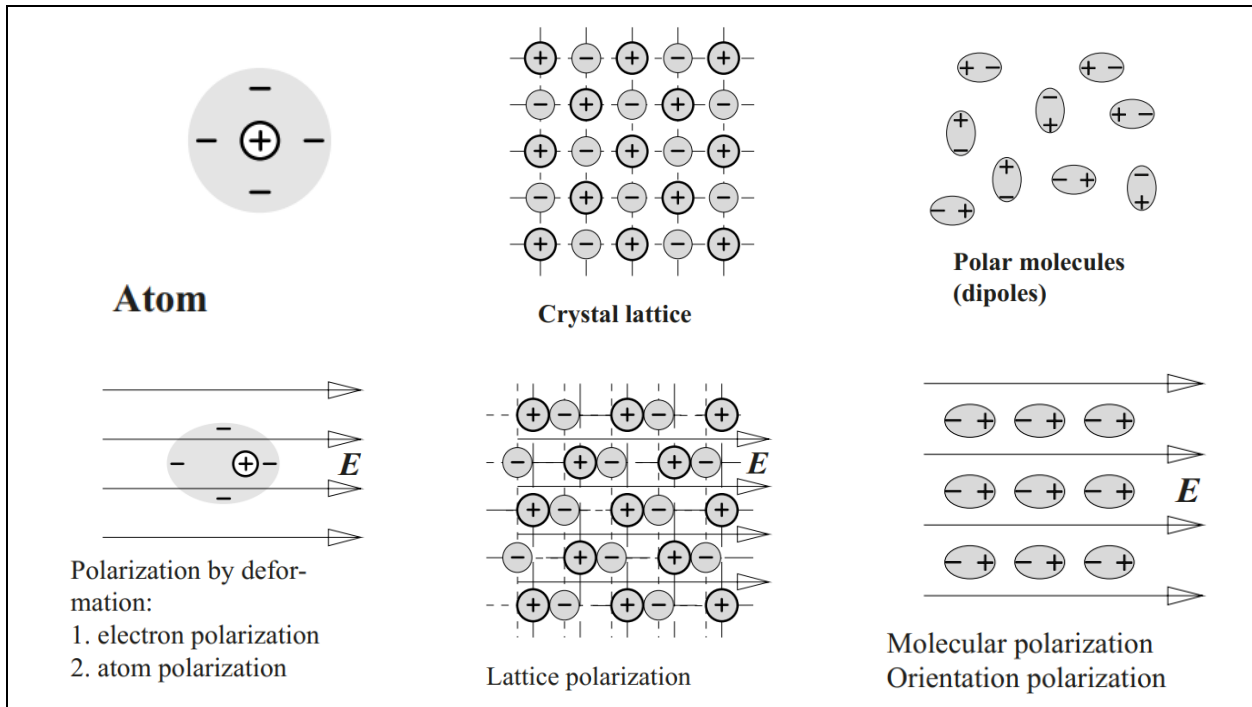
ความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุแบบขนานที่มีพื้นที่หน้าตัดของตัวนำเป็น A และระยะห่างระหว่างแผ่นเพลทเป็น d ดังรูปที่ 2.1.3 วัสดุที่คั่นระหว่างแผ่นเพลทตัวนำมีค่าเปอร์มิตติวิตี ϵ สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$C = \frac{\epsilon A}{d} \quad \text{F}$$



รูปที่ 2.1.3 ตัวเก็บประจุแบบขนาน

พิจารณาตัวเก็บประจุแบบขนานอย่างง่าย ในรูปที่ 2.1.3 (ซ้าย) โดยมีแผ่นเพลทตัวนำพื้นที่หน้าตัด A สองแผ่นวางขนานห่างกันเป็นระยะ d โดยมีสุญญากาศเป็นตัวกลางคั่นอยู่ เมื่อนำแบตเตอรี่ที่มีแรงดันไฟฟ้า V_{ab} ต่อเข้ากับแผ่นตัวนำทั้งสอง จะเกิดประจุ $\pm Q$ ขึ้นบนแผ่นตัวนำ ประจุจะกระจายไปทั่วทั้งผิวของแผ่นตัวนำทันที การเคลื่อนที่ของประจุบวกและอิเล็กตรอน (ประจุลบ) เป็นไปอย่างอิสระ ความหนาแน่นของประจุ $\pm Q$ ทำให้ความเครียดของสนามไฟฟ้า E ขึ้นมา มีทิศทางจากแผ่นเพลทตัวนำประจุบวกไปยังแผ่นเพลทตัวนำประจุลบ ดังแสดงในรูปที่ 2.1.3 (ขวา) ต่อมาหากใส่วัสดุฉนวนหรือวัสดุไดอิเล็กตริกเข้าไปเติมช่องระหว่างแผ่นเพลทตัวนำพอดี แต่ละอะตอมและ/หรือ โมเลกุลที่อยู่ภายในเนื้อฉนวนจะถูกแรงเนื่องจากสนามไฟฟ้า กระทำ จึงเกิดการตอบสนองต่อสนามไฟฟ้านั้น เรียกว่าการโพลาไรซ์ ทำให้เกิดพฤติกรรมเชิงขั้วขึ้นมา เนื่องจากสนามไฟฟ้า E เมื่อพิจารณาพฤติกรรมของอะตอมภายใต้สนามไฟฟ้า กลุ่มหมอกอิเล็กตรอนหรือประจุลบจะพยายามเคลื่อนที่สวนทางกับสนามไฟฟ้า ในขณะที่ประจุบวกในนิวเคลียสจะเคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวกันกับสนามไฟฟ้า ประจุบวกและอิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ห่างออกจากกันได้ไม่เกินกว่าคุณสมบัติความยืดหยุ่นของพันธะของอะตอม การเคลื่อนที่ของประจุบวกและกลุ่มหมอกอิเล็กตรอนทำให้จุดศูนย์กลางมวลของอิเล็กตรอนแยกออกจากนิวเคลียส รูปร่างของอะตอมจะเปลี่ยนไปเล็กน้อย แสดงดังรูปที่ 2.1.4 (deformation) อะตอมและ/หรือโมเลกุลที่ถูกโพลาไรซ์ทำให้เกิดไดโพลไฟฟ้า (Polar molecules) ในวัสดุฉนวน ไดโพลไฟฟ้าแต่ละไดโพลจะเรียงตัวตามทิศทางของสนามไฟฟ้า ดังรูปที่ 2.1.4 (Orientation)

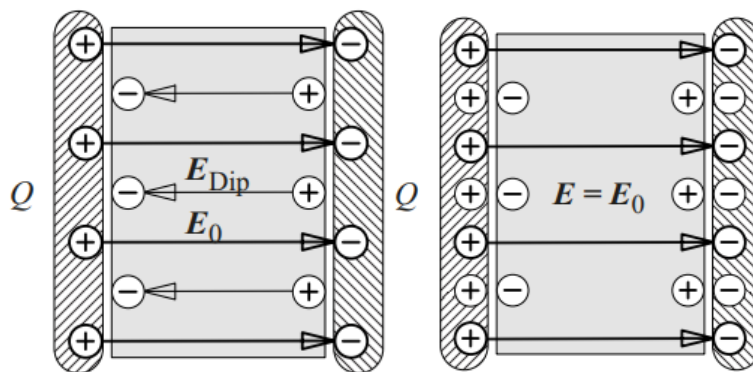


รูปที่ 2.1.4 ปรากฏการณ์โพลาริเซชัน [13]

การเรียงตัวของไดโพลไฟฟ้าทำให้ประจุไดโพลที่เรียงตัวต่อกันภายในเนื้อฉนวนหักล้างกัน เกิดสนามไฟฟ้าภายในขึ้น คือ E_{Dip} แสดงดังรูปที่ 2.1.5 (ซ้าย) ในขณะที่ประจุที่อยู่บริเวณผิวเนื้อฉนวนด้านที่ติดกับแผ่นเพลทตัวนำทั้งสองยังคงอยู่ จะมีประจุลบอยู่ที่ผิวฉนวนด้านซ้ายและประจุบวกอยู่ที่ผิวฉนวนด้านขวา ด้วยปริมาณ Q , ประจุที่ผิวเหล่านี้จะดึงดูดและยึดเหนี่ยวกับประจุที่มีจำนวนเท่ากันแต่เป็นชนิดตรงข้ามบนแผ่นเพลทตัวนำ ดังนั้นสนามไฟฟ้าสุทธิในเนื้อฉนวน หรือ สนามไฟฟ้าที่ฉนวนได้รับ คือ ผลต่างระหว่างสนามไฟฟ้าภายนอก (E_0) กับสนามไฟฟ้าภายในที่เกิดจากการไดโพล (E_{Dip}) แสดงดังรูปที่ 2.1.5 ดังสมการ

$$E = E_0 - E_{Dip}$$

พฤติกรรมของฉนวนภายใต้สนามไฟฟ้าที่กล่าวมานี้คือ คุณสมบัติโพลาริเซชันของวัสดุฉนวนหรือวัสดุไดอิเล็กตริกที่ได้รับอิทธิพลจากสนามไฟฟ้าภายนอก กระบวนการเกิดโพลาริเซชันทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้นภายในเนื้อฉนวนในทิศทางตรงกันข้ามกับสนามไฟฟ้าที่เกิดจากความต่างศักย์ของแผ่นอิเล็กโทรด



รูปที่ 2.1.5 สนามไฟฟ้าสุทธิในเนื้อฉนวน

โพลาริเซชัน P (C/m^2) ถูกนิยามว่าเป็นอัตราส่วนของไดโพลโมเมนต์ p ($C.m$) ที่ถูกเหนี่ยวนำขึ้นมาภายในเนื้อฉนวนภายใต้สนามไฟฟ้าภายนอกที่ป้อนให้กับอิเล็กโตรดต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของฉนวน ขนาดของโพลาริเซชัน P เป็นอัตราส่วนกับขนาดของสนามไฟฟ้า E ในกรณีที่สนามไฟฟ้าไม่มากพอที่จะทำลายคุณสมบัติความเป็นฉนวนของวัสดุฉนวนหรือวัสดุไดอิเล็กตริก ดังสมการ

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

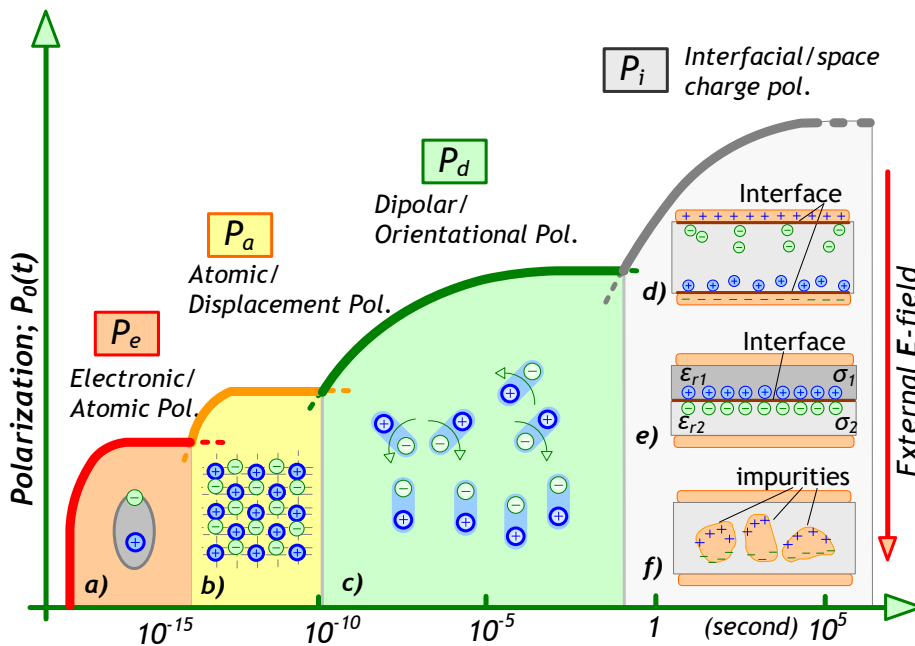
ในกรณีสูญญากาศนั้นไม่มีการโพลาริเซชัน เนื่องจาก $\epsilon_r = 1$ ทำให้ $P = 0$ แต่ในสสารใดๆก็ตาม $\epsilon_r > 1$ ทำให้เกิดการโพลาริเซชันขึ้น เมื่อได้รับสนามไฟฟ้า

โพลาริเซชัน P จะมีทิศทางเดียวกับทิศทางของความเข้มสนามไฟฟ้า ความสัมพันธ์ระหว่างโพลาริเซชัน P กับความหนาแน่นไฟฟ้า D แสดงดังสมการ

$$D = \epsilon_0 E + \epsilon_0 E_{dip}$$

$$D = \epsilon_0 E + P$$

ปรากฏการณ์โพลาริเซชันนี้มีการตอบสนองต่อสนามในช่วงเวลาที่ต่างกัน ดังรูปที่ 2.1.6 แกนตั้งแสดงขนาดของการโพลาริเซชันที่ขึ้นกับเวลา $P(t)$ ส่วนแกนนอนแสดงช่วงเวลา จะเห็นว่า การโพลาริเซชันระดับนิวเคลียสหรือระดับอิเล็กตรอน (P_e) นั้นตอบสนองในช่วง 10^{-15} วินาที , การโพลาริเซชันระดับพันธะหรืออะตอม (P_a) อยู่ในช่วง 10^{-12} วินาที , การโพลาริเซชันระดับประจุอิสระหรือไดโพล (P_d) อยู่ในช่วง 10^{-6} วินาที , การโพลาริเซชันระดับการก้องค้างของประจุที่ผิวรอยต่อ (P_i) อยู่ในช่วง 1 วินาที ถึงหลายชั่วโมง



รูปที่ 2.1.6 การโพลาริเซชันเทียบกับช่วงเวลา

2.1.2 สนามไฟฟ้า (Electric field)

บริเวณใดมีไฟฟ้า หรือก็คือ ศักย์ไฟฟ้าที่นั่นจะมีสนามไฟฟ้า โดยรอบประจุไฟฟ้ามีสิ่งหนึ่งที่เมื่อนำเอาประจุนั้นเข้ามา ในบริเวณนั้นแล้ว ทำให้เกิดแรงกระทำต่อประจุที่นำเข้ามา สิ่งนั้นที่เกิดจากสิ่งที่เรียกว่าสนามไฟฟ้า จะมีมากหรือน้อยอาจแสดงหรือวัดในรูปของแรงที่เกิดขึ้น ซึ่งกฎของคูลอมบ์ (Coulomb's law) ว่า ถ้า มีประจุ Q_1 และ Q' มีขนาดเล็กเป็นจุด วางห่างกันเป็นระยะ r จะเกิดแรงกระทำต่อกันในแนวทิศทางต่อเชื่อมโยงระหว่างสองประจุนั้น สมมติว่าแรงที่เกิดจาก Q_1 ซึ่งมีตำแหน่งทางเทียบกับ Q' เป็น r แรงที่เกิดขึ้นคำนวณได้จากสมการ [42]

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon} \cdot \frac{Q'Q_1 \cdot r}{r^3}$$

เมื่อ r คือ ระยะระหว่างประจุ Q_1 และ Q'

ϵ คือ ค่าเปอร์มิตติวิตีของตัวกลาง = $\epsilon_0 \epsilon_r$

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

ϵ_r คือ ค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ (ไม่มีหน่วย)

แรงที่ประจุต่างๆ กระทำต่อประจุ Q' ถ้าคิดเป็นแรงต่อหนึ่งหน่วยประจุ Q' คำนั้นเรียกว่า ความเข้มสนามไฟฟ้า (electric field intensity) หรือความเครียดสนามไฟฟ้า E ซึ่งเขียนค่าแรงได้ว่า $F = Q'E$ ทั้ง F และ E เป็นเวกเตอร์มีทิศทางเดียวกัน นั่นคือ

$$E = \frac{F}{Q'}$$

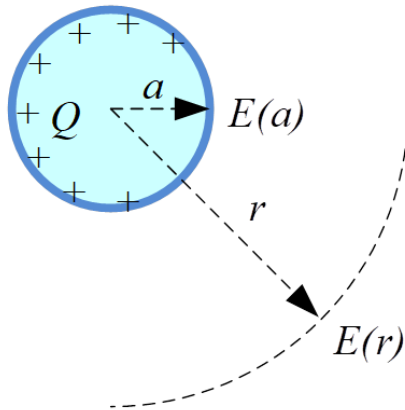
ความเครียดสนามไฟฟ้า (Electric field stress) คือ ความเข้มสนามไฟฟ้าซึ่งเกิดขึ้นจากประจุไฟฟ้าหรือแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งมีหน่วยเป็น V/m แต่ในทางไฟฟ้าแรงสูง ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่มีผลต่อความคงทนของฉนวนต้องมีค่าสูง จึงนิยมใช้เป็นหน่วย kV/cm หรือ kV/mm

$$E(r) = -\nabla V = -\frac{dV}{dr} \quad \text{V/m}$$

ความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้า (Electric field strength) คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าที่วัสดุหนึ่งทนได้โดยไม่เกิดการเสียหายทางฉนวน

หากความเครียดมากกว่าความคงทน (Estress > Estrength) จะเกิดดิสชาร์จ

2.1.2.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง ประจุ แรงแดัน และความเครียดสนามไฟฟ้า



$$V(r) = \frac{Q}{4\pi\epsilon r} \quad [V]$$

$$E(r) = \frac{Q}{4\pi\epsilon r^2} \quad [V/m]$$

$$E_{max} = E(a) = \frac{Q}{4\pi\epsilon a^2}$$

$$E_{max} = E(a) = \frac{U(a)}{a}$$

ความคงทนฉนวนต่อความเครียดสนามไฟฟ้า (E_b) หมายถึง ค่าความเครียดสนามไฟฟ้า (Electrical Field Stress) สูงสุดที่ฉนวนสามารถทนอยู่ได้โดยไม่เกิดความเสียหาย โดยค่านี้จะขึ้นอยู่กับรูปทรงเรขาคณิต ลักษณะสมบัติของวัสดุ สภาพแวดล้อม และเวลา

แรงดันเบรกดาวน์ (U_b ; Breakdown Voltage) คือ แรงดันที่ทำให้ฉนวนเกิดการเบรกดาวน์

แรงดันโคโรนาเริ่มเกิด (U_i ; Inception Voltage) คือ แรงดันที่โคโรนาเริ่มเกิดหรือฉนวนก๊าซเกิดการแตกตัว เกิดอิเล็กตรอนอิสระ ทำให้สนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรดเกิดการเปลี่ยนแปลง [43]

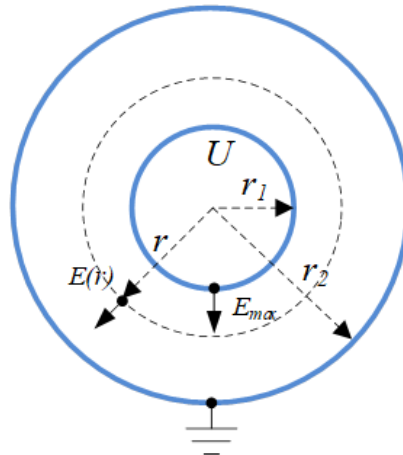
2.1.2.2 สนามไฟฟ้าจากอิเล็กโตรดอย่างง่าย

การหาค่าความเครียดสนามไฟฟ้าเราใช้สมการที่ 3 ของแมกซ์เวลหรือกฎสนามไฟฟ้าของเกาส์ รวมถึงความสัมพันธ์ของความเครียดสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นของเส้นแรงไฟฟ้า $D = \epsilon E$ คือ

$$\oint_S \vec{D} \cdot d\vec{S} = \oint_V \rho_V dV$$

โดยจะแสดงตัวอย่างแนวคิดการหาความเครียดสนามไฟฟ้าง่ายๆ ของอิเล็กโตรดอย่างง่าย คือ ทรงกลมซ้อนกัน (Concentric sphere) และ ทรงกระบอกซ้อนกัน (Concentric cylinder)

ทรงกลมซ้อนแกนร่วม (Concentric sphere)



จากกฎของเกาส์

$$\oint_S \vec{D} \cdot d\vec{S} = \oint_V \rho_V dV$$

$$D(4\pi r^2) = Q \text{ และ } D = \epsilon E$$

$$E = \frac{Q}{4\pi\epsilon r^2}$$

แรงดันที่ป้อนคำนวณได้จากสนามไฟฟ้า คือ

$$U = \int_{r_1}^{r_2} E(r) dr = \frac{Q}{4\pi\epsilon} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

$$Q = 4\pi\epsilon r^2 E(r)$$

$$E(r) = \frac{U}{r^2 \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)}$$

$$C = Q/U = \frac{4\pi\epsilon r_2 r_1}{r_2 - r_1}$$

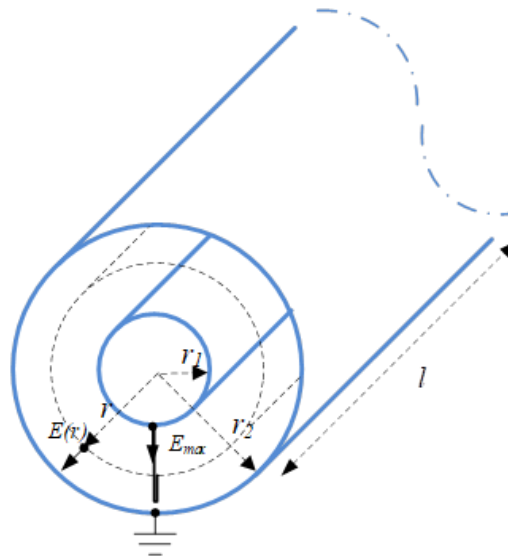
สนามไฟฟ้าสูงสุดที่ผิว

$$E_{max} = E(r_1) = \frac{U}{r_1^2 \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)} = \frac{U}{r_1 \left(1 - \frac{r_1}{r_2} \right)}$$

ยิ่งอุปกรณ์ใช้ที่แรงดันสูง เนื้อฉนวนจะยิ่งหนาทำให้ $r_2 \gg r_1$ แล้ว

$$E_{max} \approx \frac{U}{r_1}$$

ทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม (Concentric cylinder)



จากกฎของเกาส์

$$\oint_S \vec{D} \cdot d\vec{S} = \oint_V \rho_V dV$$

$$D(2\pi r l) = Q \text{ และ } D = \epsilon E$$

$$E = \frac{Q}{2\pi\epsilon r l}$$

แรงดันที่ป้อนคำนวณได้จากสนามไฟฟ้า คือ

$$U = \int_{r_1}^{r_2} E(r) dr = \frac{Q}{2\pi\epsilon l} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)$$

$$Q = 2\pi\epsilon r l \cdot E(r)$$

$$E(r) = \frac{U}{r \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}$$

$$C = Q/U = \frac{2\pi\epsilon l}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}$$

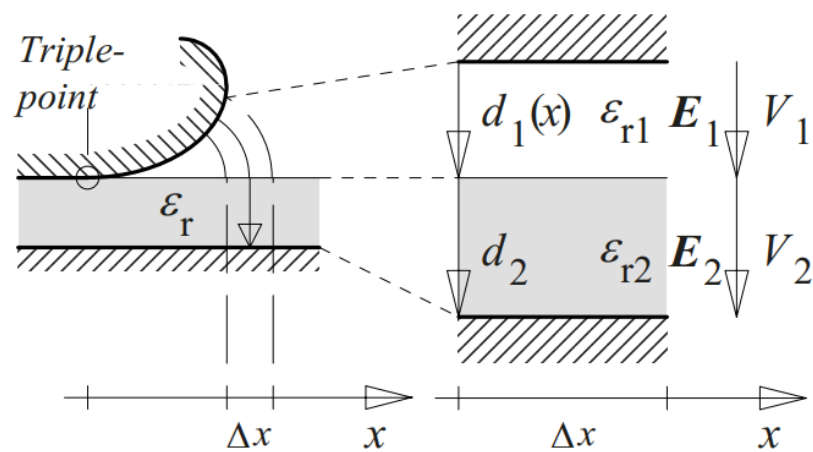
สนามไฟฟ้าสูงสุดที่ผิว

$$E_{max} = E(r_1) = \frac{U}{r_1 \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}$$

2.1.2.3 สนามไฟฟ้าในวัสดุสารเนื้อต่างชนิดกัน

ฉนวนไฟฟ้าในทางปฏิบัตินอกจากทำหน้าที่เป็นฉนวนไฟฟ้าแล้วยังทำหน้าที่อย่างอื่นอีกด้วย เช่น ลูกถ้วยทำหน้าที่เป็นฉนวนไฟฟ้าคั่นระหว่างสายไฟกับเสาไฟที่ต่อลงกราวด์ยังทำหน้าที่รับแรงทางกล เนื่องจากน้ำหนักของสายและแรงลม น้ำมันหม้อแปลงทำหน้าที่เป็นฉนวนไฟฟ้าแล้วยังทำหน้าที่ช่วยระบายความร้อนด้วย จะเห็นได้ว่าอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงจำเป็นต้องมีฉนวนต่างๆ ชนิดกัน ใช้เป็นฉนวนไฟฟ้า เพื่อรับแรงทางกลและระบายความร้อน ฉะนั้นการศึกษาสนามไฟฟ้าที่เกิดในวัสดุเนื้อสารต่างชนิดกันจึงมีความจำเป็นต่อวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง

ฉนวนต่างชนิดซ้อนกันในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ



$$C_1 = \frac{\epsilon_1 A}{d_1}$$

และ

$$C_2 = \frac{\epsilon_2 A}{d_2}$$

$$U_1 = \left(\frac{C_2}{C_1 + C_2} \right) U = \left(\frac{\frac{\epsilon_2}{d_2}}{\frac{\epsilon_1}{d_1} + \frac{\epsilon_2}{d_2}} \right) U$$

$$U_2 = \left(\frac{C_1}{C_1 + C_2} \right) U = \left(\frac{\frac{\epsilon_1}{d_1}}{\frac{\epsilon_1}{d_1} + \frac{\epsilon_2}{d_2}} \right) U$$

$$E_2 = \frac{U_2}{d_2}$$

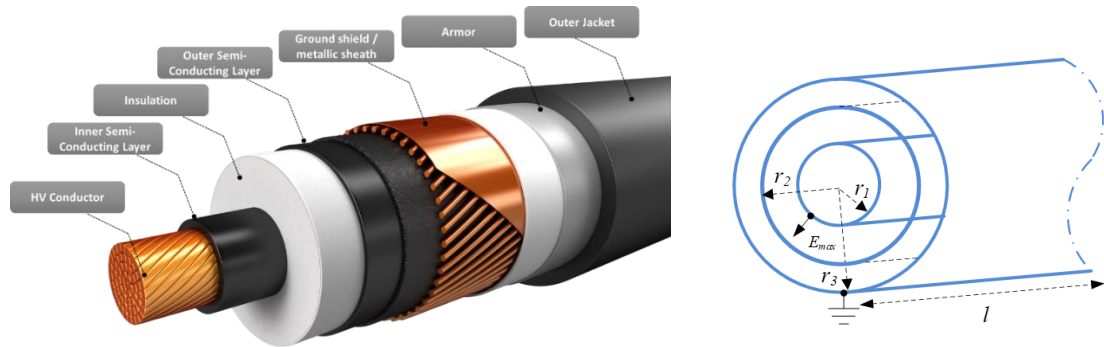
และ

$$E_1 = \frac{U_1}{d_1}$$



$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}$$

ฉนวนต่างชนิดกันซ้อนกันในลักษณะทรงกระบอก



จากกฎของเกาส์

$$\oint_S \vec{D} \cdot d\vec{S} = \oint_V \rho_V dV$$

$$D(2\pi r l) = Q \text{ และ } D = \epsilon E$$

$$E = \frac{Q}{2\pi \epsilon r l}$$

$$E_{max(1)} = \frac{Q}{2\pi \epsilon_1 r_1 l}, \quad E_{max(2)} = \frac{Q}{2\pi \epsilon_2 r_2 l}, \quad \dots, \quad E_{max(n)} = \frac{Q}{2\pi \epsilon_n r_n l}$$

กำหนด $E_{max(1)} = E_{max(2)} = \dots = E_{max(n)}$ เป็นมิติที่เหมาะสมที่สุดและให้ง่ายต่อการออกแบบ จะได้

$$\epsilon_1 r_1 l_1 = \epsilon_2 r_2 l_2 = \dots = \epsilon_n r_n l_n$$

ถ้าเลือกฉนวนเป็นสารชนิดเดียวกันโดยใช้แผ่นโลหะแผ่นบางช่วยในการเกลี่ยแรงดันที่กระจายตามผิวของปลอกฉนวนนำสายไฟ จะได้ความสัมพันธ์ คือ

$$r_1 l_1 = r_2 l_2 = \dots = r_n l_n$$

ตัวอย่างการคำนวณ

ในการออกแบบสายเคเบิล 3 ชั้น โดยตัวนำไฟฟ้ามีรัศมี 50 mm. และเปลือกโลหะหุ้มนอกสุดต่อลงกราวด์ รัศมี 7 cm. มีฉนวนให้ใช้ 3 ชนิด โดยที่ $\epsilon_{r1} = 2$, $\epsilon_{r2} = 3$ และ $\epsilon_{r3} = 6$ ตามลำดับ ถ้าต้องการออกแบบให้ E_{max} บนฉนวนทั้ง 3 มีค่าเท่าๆ กัน ให้แสดงและคำนวณหา

- 1) แสดงให้เห็นว่าจะต้องใช้ฉนวนเรียงอย่างไร และมีความหนาชั้นละเท่าไร
- 2) ค่า Capacitance รวมของสายต่อเมตร

แนวคิดข้อที่ 1 : ให้ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดของฉนวนแต่ละชั้นมีค่าเท่ากัน ในสายเดียวกัน จะได้ว่า

$$\varepsilon_1 r_1 l_1 = \varepsilon_2 r_2 l_2 = \dots = \varepsilon_n r_n l_n$$

$$l_1 = l_2 = \dots = l_n = l$$

$$\varepsilon_1 r_1 = \varepsilon_2 r_2 = \dots = \varepsilon_n r_n$$

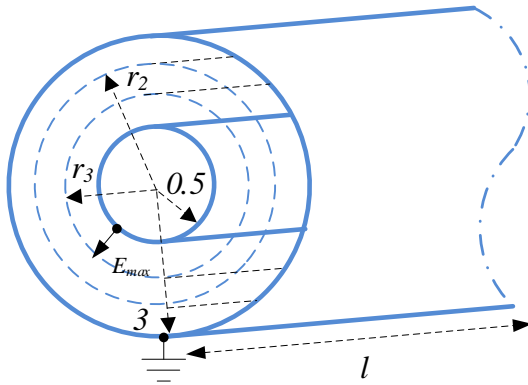
$$\varepsilon_1 r_1 = \varepsilon_2 r_2 = \varepsilon_3 r_3$$

$$2r_1 = 3r_2 = 6r_3$$

ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่อยู่ชั้นนอกควรจะน้อยที่สุดในทั้ง 3 ชั้นเพื่อการเปลี่ยนสนามที่ดี จะได้

$$2(3) = 3r_2 = 6r_3$$

$$\text{จะได้ } r_2 = 2 \text{ cm} , r_3 = 1 \text{ cm}$$



แนวคิดข้อที่ 2 : ค่าความจุไฟฟ้าของสายเคเบิลก็คือความจุไฟฟ้าของฉนวนทั้ง 3 ชั้นต่ออนุกรมกัน

จาก $C = Q/U = \frac{2\pi\varepsilon l}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}$ จากข้อที่ 1 : $r_1 = 3 \text{ cm} , r_2 = 2 \text{ cm} , r_3 = 1 \text{ cm}$

$$C_1 = \frac{C_1}{l} = \frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon r_1}{\ln \frac{r_1}{r_2}} = \frac{55.6 \times 2}{\ln 1.5} = 274 \text{ pF/m}$$

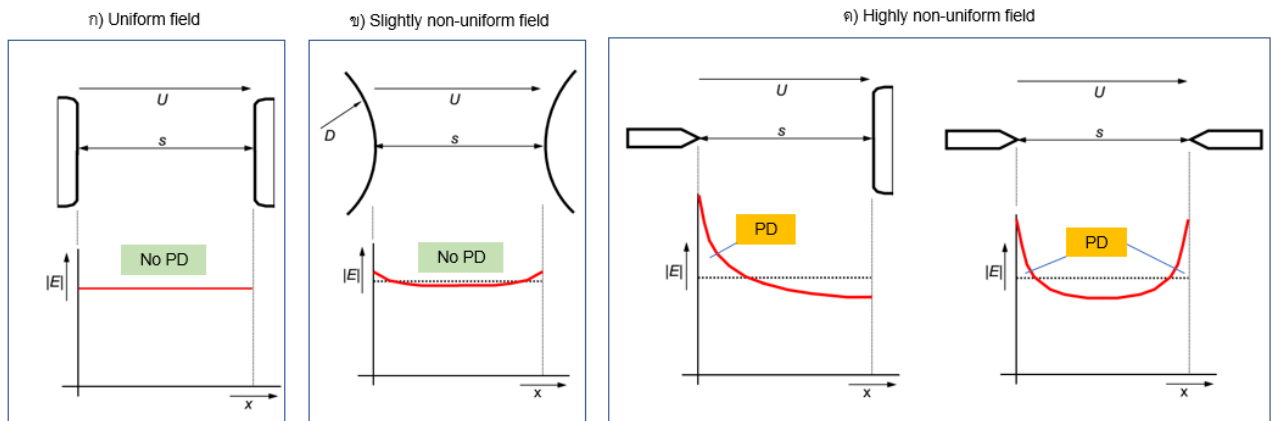
$$C_2 = \frac{C_2}{l} = \frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon r_2}{\ln \frac{r_2}{r_3}} = \frac{55.6 \times 3}{\ln 2} = 241 \text{ pF/m}$$

$$C_3 = \frac{C_3}{l} = \frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon r_3}{\ln \frac{r_3}{0.5}} = \frac{55.6 \times 6}{\ln 2} = 481 \text{ pF/m}$$

$$C_1 // C_2 // C_3 = \left(\frac{1}{274} + \frac{1}{241} + \frac{1}{481} \right)^{-1} = 101.2 \text{ pF/m}$$

2.1.2.4 ชนิดของสนามไฟฟ้าและการคำนวณ

ลักษณะรูปแบบของสนามไฟฟ้านั้น โดยทั่วไปสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ และสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ อย่างไรก็ตามหากพิจารณาโดยละเอียดแล้ว สำหรับสนามไฟฟ้าชนิดไม่สม่ำเสมอนั้น เราสามารถแบ่งแยกย่อยได้อีก 2 ชนิด คือ สนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย และสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอสูง ดังรูปที่ 2.1.7 ได้แสดงรูปตัวอย่างของอิเล็กโทรดที่ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าชนิดต่างๆเอาไว้



รูปที่ 2.1.7 อิเล็กโทรดที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าแบบต่างๆกัน

จากรูปที่ 2.1.7 ก) สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (Uniform Field) ลักษณะอิเล็กโทรดจะเป็นระนาบกับระนาบ หรือเป็นโรกอฟสกี (rogowski) ก็ได้ กราฟสนามไฟฟ้าก็ระยะทางจากอิเล็กโทรดศักย์สูงไปถึงศักย์ต่ำจะเท่ากัน รูปที่ 2.1.7 ข) สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย (Slightly Nonuniform Field) อิเล็กโทรดรูปวงเป็นทรงกลม กับ ทรงกลม กราฟสนามไฟฟ้าจะสูงในช่วงใกล้กับผิวอิเล็กโทรดทั้งสองด้าน และ ต่ำลงเล็กน้อยในระยะที่ห่างจากผิวอิเล็กโทรด รูปที่ 2.1.7 ค) สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง (Highly Nonuniform Field) เกิดจากอิเล็กโทรดปลายแหลมที่ทำให้สนามความเครียดสูง แสดงดังกราฟ ซึ่งจะสูงกว่าระนาบอย่างมาก [45]

การดิสชาร์จสมบูรณ์นั้นจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อ ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าในแนวนั้นสูงเกินค่าที่ตัวกลางสามารถแบกรับได้ตลอดเส้นเชื่อมระหว่างศักย์สูงและศักย์ต่ำ โดยแรงดันที่ทำให้เกิดการดิสชาร์จแบบสมบูรณ์นี้เรียกว่า แรงดันเบรกดาวน์ Breakdown voltage: U_b) ซึ่งแตกต่างจากการเกิดดิสชาร์จบางส่วน Partial discharge : PD ที่มีเพียงบางส่วนของเส้นสนามไฟฟ้า ที่ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงเกินค่าที่ตัวกลางสามารถแบกรับได้ โดยแรงดันที่ทำให้เกิดการดิสชาร์จบางส่วนนี้เรียกว่า แรงดันเริ่มเกิด (Inception voltage: U_i) สำหรับการคำนวณหา U_b และ U_i นั้น แบ่งการพิจารณาออกเป็น 3 กรณีตามลักษณะการกระจายตัวของสนามไฟฟ้า

การคำนวณหาแรงดันเบรกดาว์นกรณีสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

อิเล็กโตรดในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ หมายถึงอิเล็กโตรดที่มีสนามไฟฟ้าทุกๆจุดตามแนวเส้นสนามไฟฟ้ามีค่าเท่ากัน ความเครียดสนามไฟฟ้า ณ จุดใดๆ ระหว่างอิเล็กโตรด สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$E = \frac{U}{d}$$

$$E_{max} = \frac{U}{D}$$

เมื่อ U คือ แรงดันที่ป้อนเข้าไประหว่างอิเล็กโตรด

D คือ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรด

E คือ ความเครียดสนามไฟฟ้า ณ จุดใดๆ ระหว่างอิเล็กโตรด

E_{max} คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด

หมายความว่าเมื่อป้อนแรงดันให้กับอิเล็กโตรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ จะเกิดการเบรกดาว์นหรือสปาร์กทันที่ ที่ความเครียดสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรด (ซึ่งเท่ากันทุกจุด) ถึงค่าที่กำหนดค่าหนึ่ง(โดยประมาณ) และกระแสเพิ่มขึ้นอย่างมากทันทีทันใด ค่ากระแสเบรกดาว์นนี้จะถูกจำกัดด้วยค่าอิมพีแดนซ์ของตัวจ่าย และวงจรภายนอกเท่านั้น ซึ่งก่อนจะเบรกดาว์นนี้นั้นค่ากระแสจะวัดไม่ได้ ส่วนค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดจากแรงดัน ขณะจะเกิดเบรกดาว์นนี้ ก็คือ ค่าความคงทนทางไฟ (dielectric strength) หรือความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าของฉนวน สามารถคำนวณได้จาก

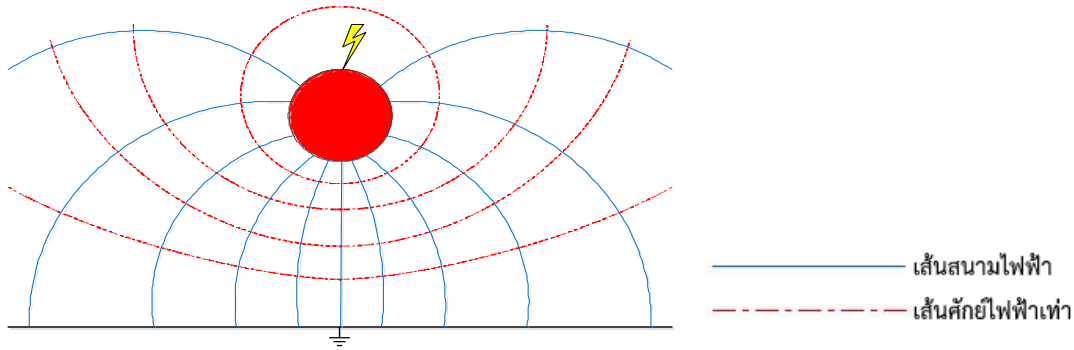
$$E_b = \frac{U_b}{d}$$

เมื่อ U_b คือ แรงดันที่ทำให้เกิดเบรกดาว์นด้วยสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

d คือ ระยะห่างระหว่างขั้วสูงและต่ำตามแนวสนามไฟฟ้าที่ทำให้เกิดเบรกดาว์น

การคำนวณหาแรงดันเบรกดาว์น กรณีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย

สนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอคือ ความเครียดสนามไฟฟ้าแต่ละจุดมีค่าแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของจุดนั้น ความแตกต่างกัน ณ จุดต่างๆ จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับลักษณะทางเรขาคณิตของอิเล็กโตรด หรือก็คือรูปร่าง รูปทรงของอิเล็กโตรด เนื่องจากสนามไฟฟ้าจะตั้งฉากกับพื้นผิว ในที่นี้จะยกตัวอย่าง กรณีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย ถ้าเขียนเส้นสนามไฟฟ้าและเส้นศักย์ไฟฟ้าเท่า จะได้ดังรูปที่ 2.1.8



รูปที่ 2.1.8 สนามไฟฟ้าและเส้นศักย์ไฟฟ้าเท่าแบบไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย

ในรูปที่ 2.1.8 จะเห็นได้ว่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด E_{max} จะเกิดขึ้นที่ผิวของอิเล็กโทรดทรงกลม ซึ่งอาจคำนวณได้จากสมการ

$$E_{max} = \frac{U_b}{d \times \eta^*}$$

เมื่อ η^* คือ แฟกเตอร์สนามไฟฟ้า (field utilization factor) มีนิยามว่า

$$\eta^* = \frac{E_{avg}}{E_{max}} \quad 0 < \eta^* \leq 1$$

เมื่อ E_{avg} คือ ค่าเฉลี่ยของสนามไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ U/d

อาจกล่าวได้ว่า η^* คือ ค่าที่แสดงให้ทราบว่าอิเล็กโทรดนั้น มีลักษณะสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอเล็กน้อยเพียงใด และโดยอาศัยแฟกเตอร์สนามไฟฟ้านี้เอง จึงคำนวณหาความเครียดสนามไฟฟ้าเบรกดาวน์ของฉนวนในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย โดย

$$E_b = \frac{U_b}{d \times \eta^*}$$

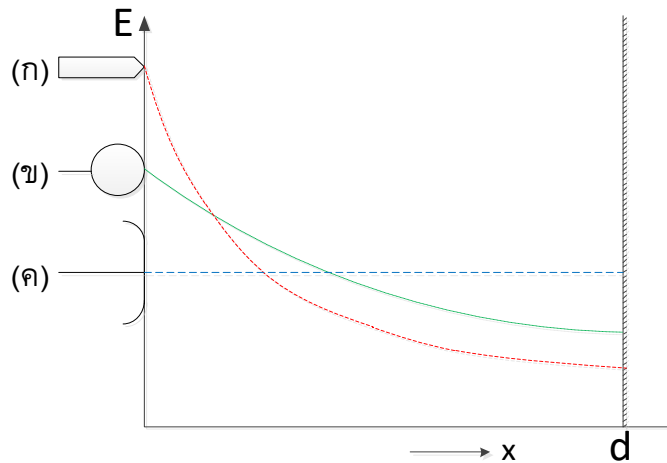
และค่าแรงดันเบรกดาวน์

$$U_b = E_b \times d \times \eta^*$$

แสดงว่า อิเล็กโทรดที่มีค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าลดลง ค่าแรงดันเบรกดาวน์ก็จะลดลง สมการนี้ใช้ได้เฉพาะกรณีที่อิเล็กโทรดมีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย หรือใช้กับกรณีที่ไม่มีโคโรนา คือไม่มีการเกิดดิสชาร์จนำหน้า (Predischarge) เกิดก่อนเบรกดาวน์ หรือก็คือ ไม่เกิด PD นั้นเอง กล่าวคือ ก่อนเกิดเบรกดาวน์จะไม่ปรากฏว่ามีกระแสไหลระหว่างอิเล็กโทรด และลักษณะสนามไฟฟ้าจะไม่มีการเปลี่ยนแปลง จะเกิดเบรกดาวน์ที่ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงถึงค่าความคงทน คือ $E_{max} = E_b$

การคำนวณหาแรงดันเริ่มเกิด กรณีเป็นสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง

ในกรณีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง (Highly Non Uniform Field) ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงจะอยู่บริเวณใกล้กับผิวอิเล็กโทรด ที่มีพื้นที่ผิวน้อยที่สุด เช่น ปลายแหลม **ดังรูปที่ 2.1.9** ดังเส้นกราฟความเครียดสนามไฟฟ้ากระจายเปรียบเทียบแต่ละอิเล็กโทรดนี้ ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะมีค่าวิกฤตทำให้เกิดการแตกตัวของประจุ (ionization) ในบริเวณดังกล่าวเกิด PD แต่เบรกดาวน์จะยังไม่เกิด ส่วนสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอ นั้นเมื่อสนามไฟฟ้าสูงถึงค่าความคงทน คือ $E_{\max} = E_b$ จะไม่เกิด PD แต่จะเกิดการเบรกดาวน์เลย



รูปที่ 2.1.9 สนามไฟฟ้ากระจายเปรียบเทียบของอิเล็กโทรดลักษณะต่างๆ

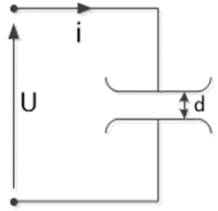
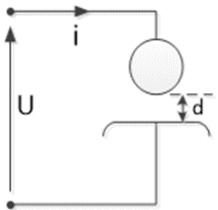
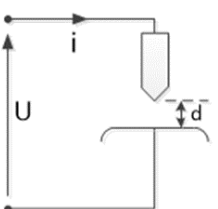
สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงนี้ บริเวณที่ผิวอิเล็กโทรดเป็นบริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด ส่วนบริเวณอื่นๆ ที่ห่างออกไปจะมีความเครียดสนามไฟฟ้าลดลงและโคโรนาไม่เกิด ฉะนั้นในช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดจะเกิดดิสชาร์จบางส่วน ปรากฏการณ์นี้อาจเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง หรือเป็นช่วงๆ จึงทำให้มีกระแสไหลในวงจรที่ป้อนแรงดันให้กับอิเล็กโทรด กระแสนี้จะขึ้นและวัดได้ก่อนเกิดเบรกดาวน์ เรียกว่ากระแสโคโรนา หรือกระแสพรีดิสชาร์จ การเกิดโคโรนาจะทำให้สนามไฟฟ้าของเรขาคณิตเปลี่ยนไปจากเดิม เนื่องจากประจุค้าง (Space Charge) ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะคำนวณดังที่กล่าวมาแล้วไม่ได้ แต่ในขณะที่โคโรนาเริ่มเกิด สนามไฟฟ้าเรขาคณิตยังไม่เปลี่ยนแปลง จึงใช้คำนวณหาความเครียดสนามไฟฟ้าที่แรงดันโคโรนาเริ่มเกิดได้

$$E_i = \frac{U_i}{d \times \eta^*}$$

เมื่อ E_i คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดที่โคโรนาเริ่มเกิด

ตารางที่ 2.1 ได้สรุปวิธีการคำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้าต่างๆ ของแต่ละประเภทสนามไฟฟ้า รวมถึงตัวอย่างอิเล็กทรอนิกส์ไว้โดยสังเขป

ตารางที่ 2.1 สนามไฟฟ้าและการเกิดความล้มเหลวทางฉนวนของสนามไฟฟ้าแต่ละชนิด

ชนิดของสนามไฟฟ้า	ตัวอย่างอิเล็กทรอนิกส์	การเสถียรภาพความเป็นฉนวน
สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (Uniform field)		$U_{max} = U_{AV}$ ไม่มีการเกิด PD ก่อนเกิด Breakdown คำนวณหาแรงดันเบรกดาวน์ได้จาก $U_b = E_b \times d$
สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย (Nonuniform field)		$U_{max} > U_{AV}$ ไม่มีการเกิด Corona ก่อนเกิด Breakdown คำนวณหา แรงดันเริ่มเกิด PD ชนิดอื่นๆได้จาก $U_i = U_b = E_b \times d \times \eta^*$
สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง (Highly nonuniform field)		$U_{max} > U_{AV}$ มีการเกิด Corona ก่อนเกิด Breakdown คำนวณหาแรงดันเริ่มเกิด Corona ได้จากสมการ $U_i = E_b \times d \times \eta^*$

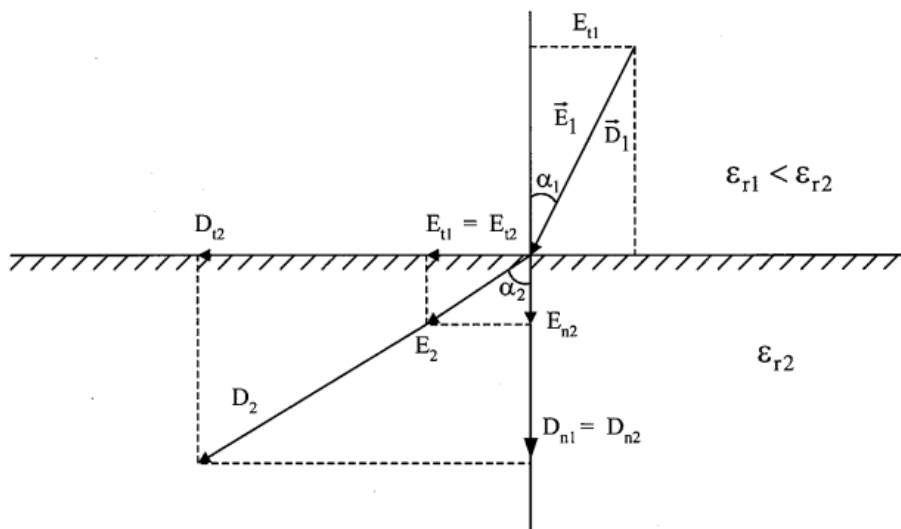
2.1.2.5 การหักเหของสนามไฟฟ้า

การฉนวนในทางภาคปฏิบัติส่วนมากนอกจากจะทำหน้าที่เป็นฉนวนแล้ว ยังต้องทำหน้าที่เป็น ตัวยึดหรือรองรับน้ำหนักด้วย นั่นหมายความว่าโครงสร้างของฉนวนจะต้องทนต่อแรงกลได้ด้วย ฉะนั้นการฉนวนด้วยของเหลวหรือก๊าซ จึงจำเป็นต้องใช้ร่วมกับฉนวนที่เป็นของแข็ง ฉนวนที่ใช้ต่างชนิดกันย่อมมีค่าเปอร์มิตติวิตี (permittivity) และค่าความต้านทานจำเพาะต่างกัน ย่อมทำให้เกิดเป็นชั้นรอยต่อของฉนวนขึ้น อันเป็นผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงหรือหักเหของเส้นทางสนามไฟฟ้า และ ความเครียดสนามไฟฟ้าในชั้นฉนวนต่างๆ ในกรณีที่เป็นสนามไฟฟ้าจากแรงดันกระแสตรง การกระจาย ของสนามไฟฟ้าจะกำหนดด้วยความต้านทานของการฉนวน และเกิดประจุค้าง โดยการหักเหแนวเส้นสนามไฟฟ้าที่รอยต่อของฉนวนต่างชนิด อาศัยหลักความจริงที่ว่า ความเครียดสนามไฟฟ้าในแนวสัมผัส E , ของรอยต่อฉนวนต่าง ชนิดกันมีค่าคงตัว และความหนาแน่นของเส้นฟลักซ์ไฟฟ้า D , ในแนวตั้งฉากกับรอยต่อมีค่าคงตัว กล่าวคือ

$$E_{t1} = E_{t2}$$

$$D_{n1} = D_{n2}$$

ดังในรูปที่ 2.1.10



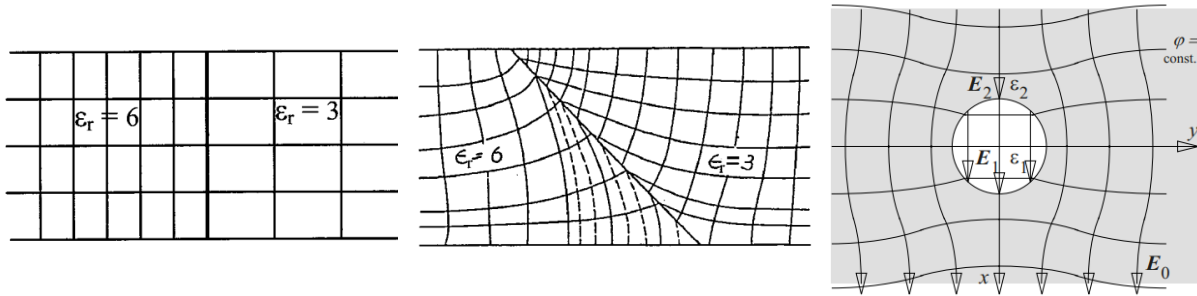
รูปที่ 2.1.10 การหักเหของสนามไฟฟ้าตรงรอยต่อของฉนวน

และจาก $D = \epsilon E$ จะได้ว่า

$$\frac{\tan \alpha_1}{\tan \alpha_2} = \frac{E_{n2}}{E_{n1}} = \frac{D_{t1}}{D_{t2}} = \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2}$$

จึงกล่าวสรุปได้ว่า เส้นฟลักซ์ไฟฟ้า D และ สนามไฟฟ้า E ในเนื้อสารที่มีค่า ϵ_r ที่มีค่ามากกว่าจะหักเหห่างออกจากแนวตั้งฉากหรือหักเหเข้าหารอยต่อนั่นเอง แต่เส้นศักย์ไฟฟ้าเท่าในส่วนที่มี ϵ_r สูง จะหักเหเข้าหาแนวตั้งฉาก ตัวอย่างแสดงเส้นสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรดแผ่นระนาบขนาน ซึ่งมีฉนวนที่มีค่าเปอร์มิตติวิตีต่างกันดังในรูปที่ 2.1.11 (ซ้าย) แสดงถึงรอยต่อของฉนวนตั้งฉากกับระนาบของอิเล็กโตรด รูปที่ 2.1.11

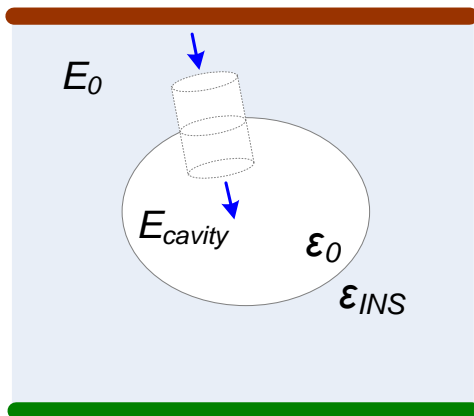
(กลาง) แสดงถึงรอยต่อของฉนวนทำมุมเดียวกับผิวระนาบของอิเล็กโทรด ละจะเห็นว่าที่ปากฉลามของฉนวนที่มีค่าเปอร์มิตติวิตีต่ำจะมีเส้นศักย์ไฟฟ้าเท่าหนาแน่นกว่าบริเวณอื่นๆ ซึ่งหมายถึงว่าบริเวณนั้น จะมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูง, โดยเฉพาะจุดตัดระหว่างผิวระนาบของอิเล็กโทรด กับแนวรอยต่อ ของฉนวนจะมีค่าสูงมาก จะเป็นจุดที่ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงกว่า E, ก่อน และทำให้เกิดดีสชาร์จ ขึ้นได้ ณ บริเวณนั้น รูปที่ 2.1.11 (ขวา) แสดงถึงการหักเหของสนามไฟฟ้าในโพรงอากาศจากเนื้อฉนวนแข็งหรือเหลวที่มีค่า ϵ_r มากกว่า ไปสู่โพรงอากาศที่มี $\epsilon_r \approx 1$



รูปที่ 2.1.11 สนามไฟฟ้าในฉนวนต่างชนิดเชื่อมติดกัน

2.1.2.6 สนามไฟฟ้าที่โพรงภายในเนื้อฉนวน

โพรงมีลักษณะโดยมีสนามไฟฟ้าสูงกว่าสนามภายในเนื้อฉนวน (E0 หรือ EINS) มีความต่อเนื่องของความหนาแน่นฟลักซ์ไฟฟ้า (ในแนวเส้นปกติ) ดังนี้



$$D_{INS} = D_{Cav}$$

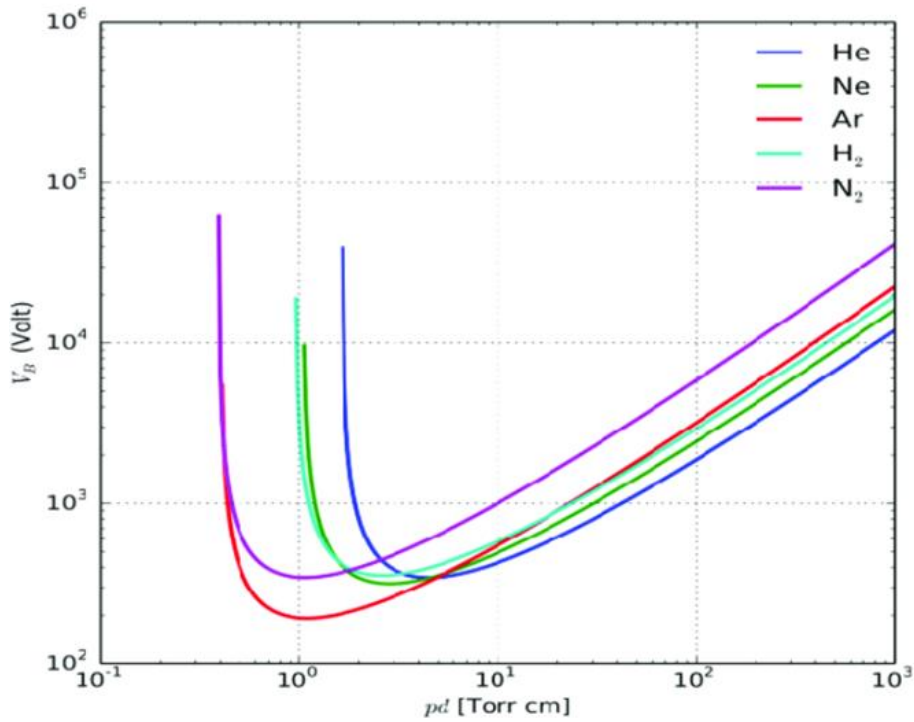
$$\epsilon_o \cdot \epsilon_{INS} \cdot E_{INS} = \epsilon_o \cdot E_{Cav}$$

$$E_{Cav} = \epsilon_{INS} \cdot E_{INS}$$

โดยอากาศภายในโพรงนั้นความคงทนทางไฟฟ้าต่ำกว่าเนื้อฉนวนได้แสดงดังตารางที่ 2.2 และรูปที่ 2.1.12 วัสดุสังเขป ซึ่งก๊าซในโพรงอากาศความคงทนทางไฟฟ้าอาจเปลี่ยนแปลงตามแรงอัดอากาศในโพรงนั้นด้วย รวมถึงอาจเป็นของเหลวแทรกตัวในของแข็งก็ได้ โดยการดีสชาร์จอาจเกิดขึ้นในโพรงซึ่งจะไม่ทำลายระบบฉนวนทั้งหมด

ตารางที่ 2.2 ความคงทนทางไฟฟ้าของวัสดุทั่วไป

ความคงทนทางไฟฟ้าของก๊าซทั่วไป		ความคงทนไฟฟ้าของเนื้อฉนวนที่ไม่ใช่โพรงก๊าซ	
อากาศ Air	24 kV/cm.bar	น้ำมันหม้อแปลง	~150 kV/cm (20°C)
ไฮโดรเจน H ₂	16 kV/cm.bar	อีพ็อกซี เรซิน	~300 kV/cm
SF ₆	88 kV/cm.bar	โพลีเอทิลีน PE	>500 kV/cm



รูปที่ 2.1.12 ความคงทนทางไฟฟ้าของวัสดุทั่วไป

มีความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้าภายในระบบฉนวน E₀ และสนามไฟฟ้าภายในโพรงอากาศ E_{cavity} โดยมีสมมติฐานสองข้อ

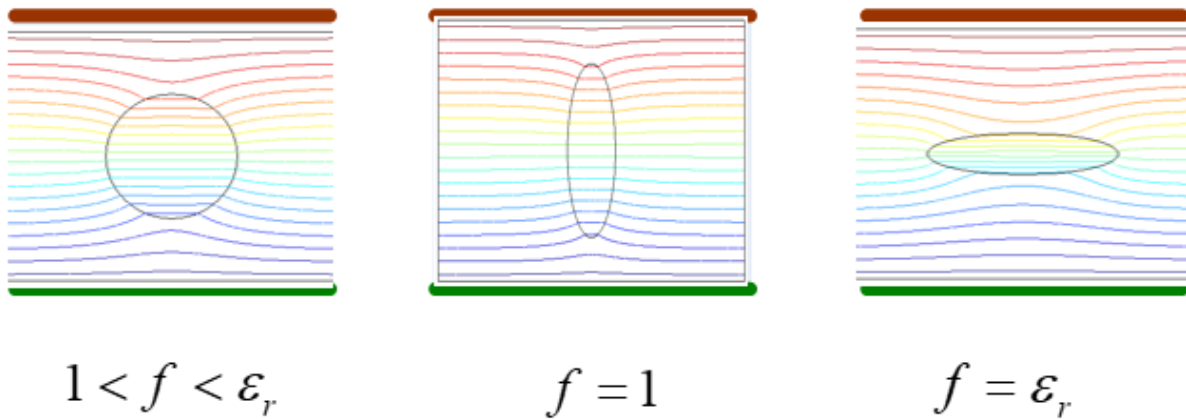
1. แบบจำลองกึ่งสถิต (Quasi-Static) คือ $\text{curl} \vec{E} = 0$
2. ไม่มีผลของประจุค้างภายในโพรงอากาศนั้น $\text{div} \vec{D} = 0$

จะได้ว่าสนามไฟฟ้าภายในโพรงเป็นสัดส่วนกับสนามไฟฟ้าที่เนื้อฉนวนนั้น

$$E_{cavity} = f E_0$$

$$f = \frac{E_{cavity}}{E_0}$$

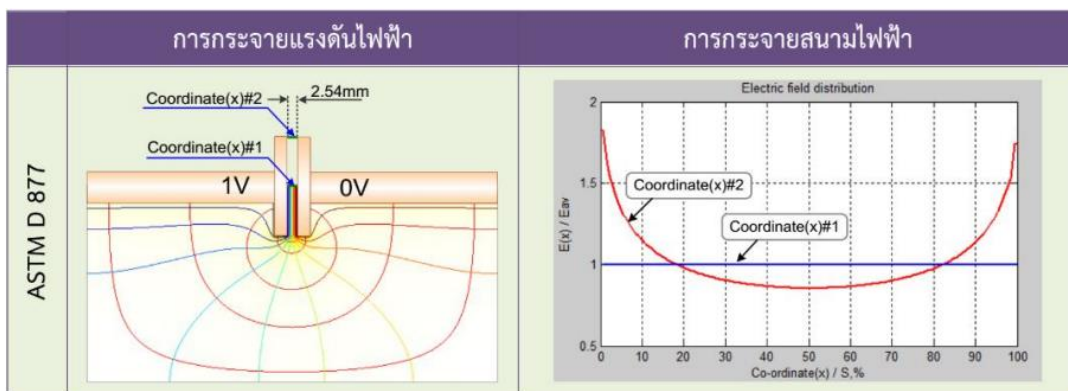
โดยค่าคงที่ f ขึ้นอยู่กับรูปร่างของโพรงในเนื้อฉนวนนั้น แสดงดังรูปที่ 2.1.13 (ซ้าย) ช่องทรงกลม เช่น ระบบฉนวนโพลีเมอร์หรือเรซินที่มีจุดบกพร่องภายในหรือการชุบ (impregnate) ที่ไม่เพียงพอ รูปที่ 2.1.13 (กลาง) ช่องแบนวงรีตั้ง (Prolate) เช่น โพรงก๊าซที่เกิดจากการเจริญเติบโตของต้นไม้ น้ำหรือต้นไม้ ไฟฟ้า รูปที่ 2.1.13 (ขวา) ช่องแบนวงรีนอน (Oblate) การหลุดร่อน (delaminate) เนื่องจากการเพิ่ม ผลิตของอุณหภูมิที่ส่วนต่อประสานของระบบฉนวน



รูปที่ 2.1.13 ค่าคงที่สนามไฟฟ้าของโพรงอากาศภายในเนื้อฉนวน

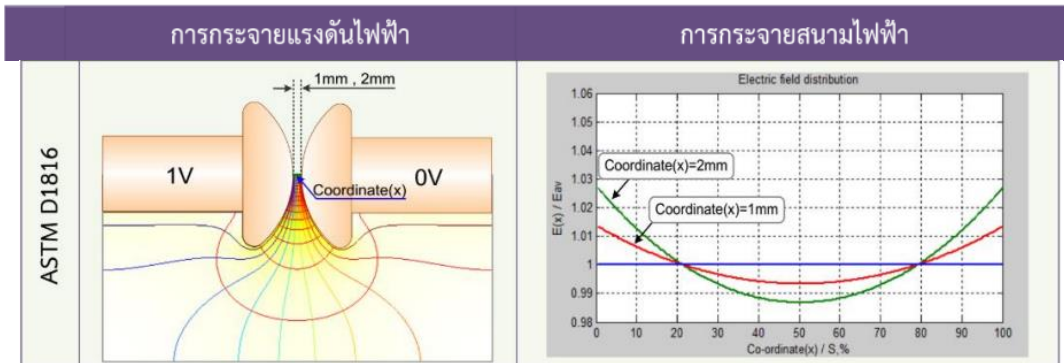
2.1.2.7 การเปรียบเทียบสนามไฟฟ้าของมาตรฐานทดสอบน้ำมัน

ASTM D877 เป็นมาตรฐานการทดสอบ edition แรกของ ASTM ปรับปรุงแก้ไขล่าสุดปี 2002 การวัดค่าแรงดันเบรกดาวนของน้ำมันโดยทดสอบตามวิธีการในมาตรฐานนี้ ค่าแรงดันเบรกดาวนจะไม่ไว ต่อความชื้นหรือความชื้นมีผลต่อแรงดันเบรกดาวนน้อยมาก ซึ่งความชื้นคือสิ่งปนเปื้อนในน้ำมัน ทำให้มาตรฐาน ASTM D877 ไม่นิยมใช้ประเมินสภาพน้ำมันเก่าหรือน้ำมันที่มีสิ่งปนเปื้อน ดังนั้น มาตรฐาน ASTM D877 จึงแนะนำให้ใช้มาตรฐานนี้ประเมินสภาพน้ำมันใหม่เท่านั้น



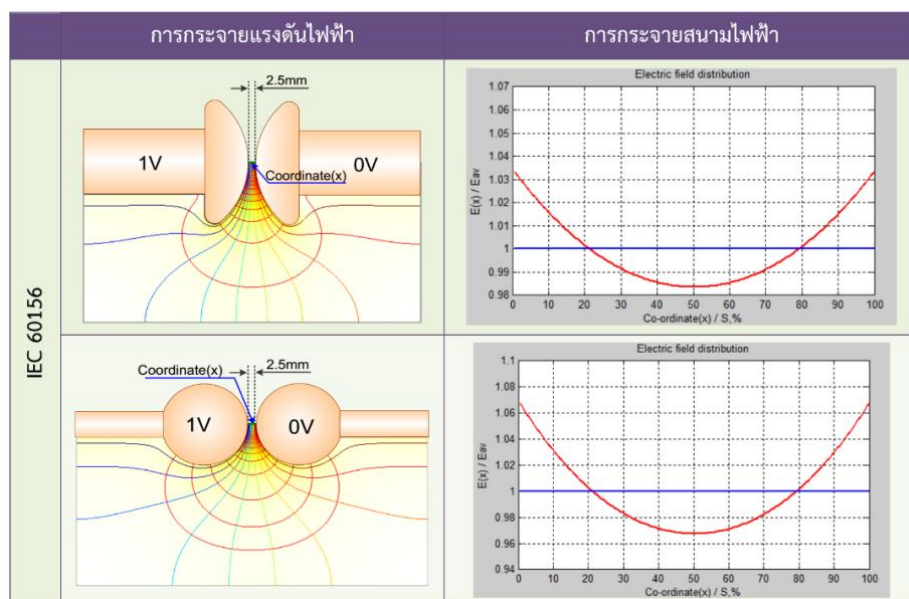
รูปที่ 2.1.14 การกระจายแรงดันไฟฟ้าและสนามไฟฟ้าของมาตรฐาน ASTM D877

ASTM D1816 เป็นมาตรฐานการทดสอบ edition ที่สองของ ASTM ปรับปรุงแก้ไขล่าสุดปี 2019 มาตรฐานนี้นิยมใช้มากกว่า ASTM D877 เนื่องจากค่าแรงดันเบรกดาวนัที่ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D1816 นี้ ค่าแรงดันเบรกดาวนัจะไวต่อความชื้น ไวต่อน้ำมันเสื่อมสภาพ ไวต่อ oxidization และไวต่อสิ่งปนเปื้อนในน้ำมัน จึงนิยมใช้ประเมินสภาพน้ำมัน ทั้งน้ำมันเก่าและน้ำมันใหม่ แต่การ ทดสอบตามมาตรฐานนี้จำเป็นต้องมี Stirrer กวนน้ำมันขณะทดสอบโดยที่ความเร็วอยู่ระหว่าง 200 rpm และ 300 rpm มาตรฐานนี้มีข้อจำกัดคือค่าแรงดันเบรกดาวนัไวต่อก๊าซที่ละลายในน้ำมัน (dissolved gases) กรณีที่มีปริมาณก๊าซที่ละลายในน้ำมันปริมาณมากจะทำให้ค่าแรงดันเบรกดาวนัลดลงหรือไม่ผ่านเกณฑ์การทดสอบทั้งที่น้ำมันอยู่ในสภาพดี



รูปที่ 2.1.15 การกระจายแรงดันไฟฟ้าและสนามไฟฟ้าของมาตรฐาน ASTM D1816

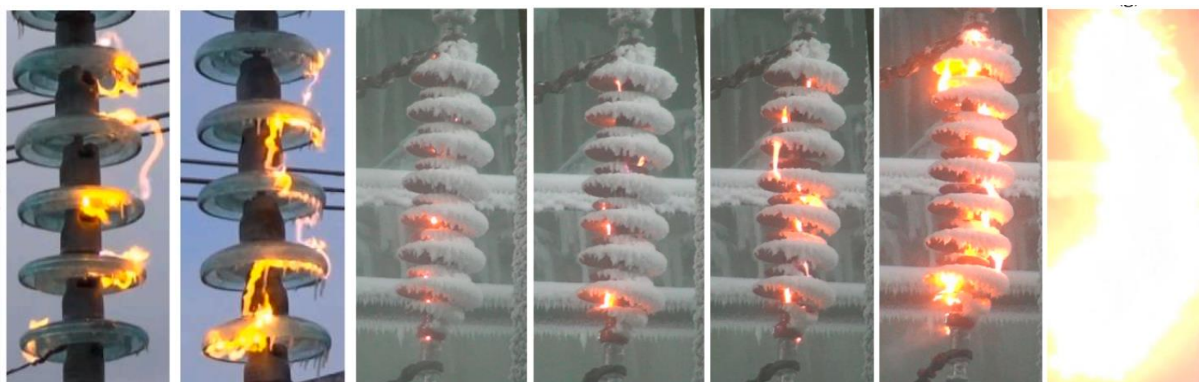
IEC 60156 เป็นมาตรฐานการทดสอบที่นิยมใช้อย่างกว้างขวางปรับปรุงแก้ไขล่าสุดปี 2018 การวัดค่าแรงดันเบรกดาวนัโดยทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60156 นี้ค่าแรงดันเบรกดาวนัจะไวต่อความชื้น ไว ต่อน้ำมันที่เสื่อมสภาพ ไวต่อ oxidization และไวต่อสิ่งปนเปื้อนในน้ำมัน จึงนิยมใช้ประเมินสภาพน้ำมัน ทั้งน้ำมันเก่าและน้ำมันใหม่ แต่มาตรฐานนี้จะแตกต่างจาก ASTM D1816 คือไม่จำเป็นต้องมี Stirrer กวนน้ำมันระหว่างการทดสอบ เนื่องจากใช้แรงดันสูงทดสอบทำให้น้ำมันถูกกวนด้วยสนามไฟฟ้าขณะทดสอบ มาตรฐานนี้มีข้อจำกัดคือปริมาณก๊าซที่ละลายในน้ำมันทำให้ค่าเบรกดาวนัลดลงแต่ผลกระทบน้อยกว่า ASTM D1816



รูปที่ 2.1.16 การกระจายแรงดันไฟฟ้าและสนามไฟฟ้าของมาตรฐาน IEC 60156

2.1.3 ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า

ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวน หมายถึงค่าความเครียดสนามไฟฟ้า (Electric Field Strength) สูงสุดที่ฉนวนนั้นสามารถทนอยู่ได้ โดยไม่เกิดความเสียหาย หรือเกิดการเบรกดาวน์ หรือทำให้การฉนวนเสื่อมสภาพ หน่วยที่นิยมใช้คือ kV/cm ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการเช่น ลักษณะทางมิติของอิล็กโตรด ลักษณะสมบัติของไดอิเล็กตริก คุณลักษณะของแรงดันที่ฉนวนนั้นได้รับ และระยะเวลาที่ฉนวนได้รับแรงดันไฟฟ้า ดังนั้นก่อนที่จะนำฉนวนไปใช้งานในระบบไฟฟ้ากำลังนั้น จำเป็นที่จะต้องทำการทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนก่อนเช่น การทดสอบแรงดันวาบไฟตามผิว หรือแรงดันเจาะทะลุของลูกถ้วยฉนวน หรือการทดสอบความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ของน้ำมัน เป็นต้น โดยที่วิธีการทดสอบและผลการทดสอบจะต้องเป็นไปตามข้อกำหนดของมาตรฐานที่เลือกใช้สำหรับการทดสอบนั้นๆ **รูปที่ 2.1.17** แสดงการสูญเสียสภาพความเป็นฉนวนของฉนวนอากาศรอบๆ ผิวลูกถ้วยฉนวนที่ใช้ในระบบไฟฟ้ากำลัง



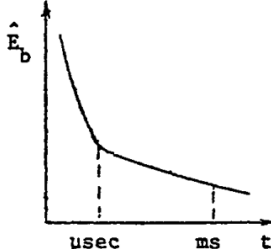
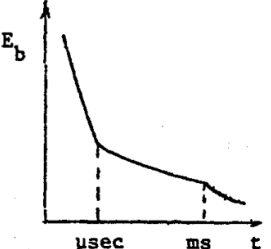
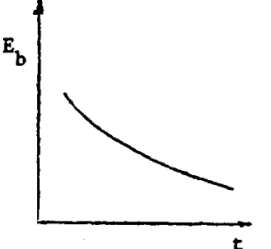
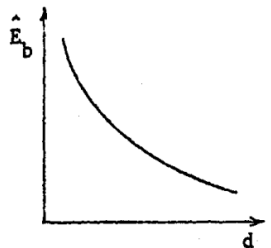
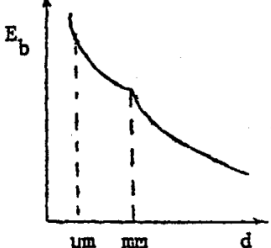
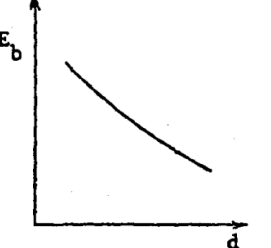
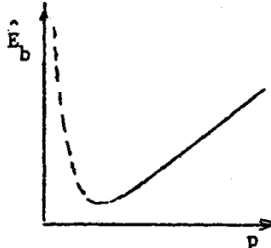
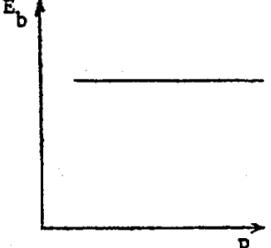
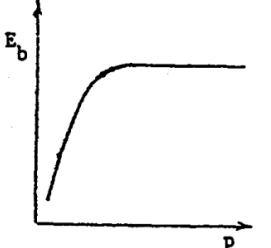
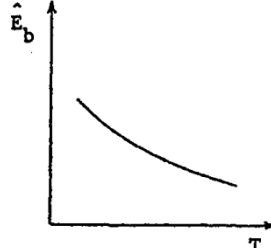
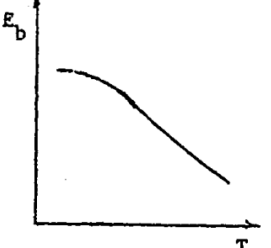
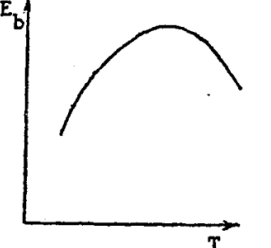
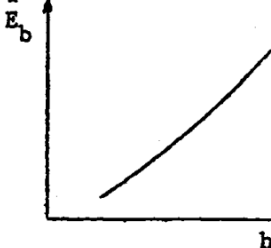
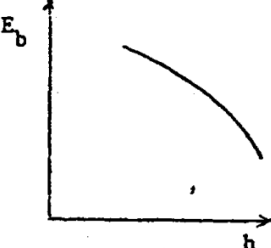
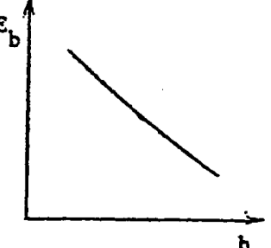
รูปที่ 2.1.17 การเกิดวาบไฟตามผิวลูกถ้วย

ตารางที่ 2.3 ตัวอย่างค่าเปอร์มิตติวิตีและความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวน

วัสดุ	ค่าเปอร์มิตติวิตี	ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า (kV/cm)
Capacitor oil	2.2	>118
Transformer oil	2.25	~150 kV/cm (20 °C)
Polyester	3.3	600
Polypropylene	2.2	700
Polystyrene	2.6	200

นอกจากนี้ยังขึ้นอีกกับปัจจัยอื่นๆ อีกหลายประการ เช่น เวลาที่ป้อนแรงดัน ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด แรงอัดหรือความเค้นทางกลในฉนวน อุณหภูมิ และความชื้น ดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้า

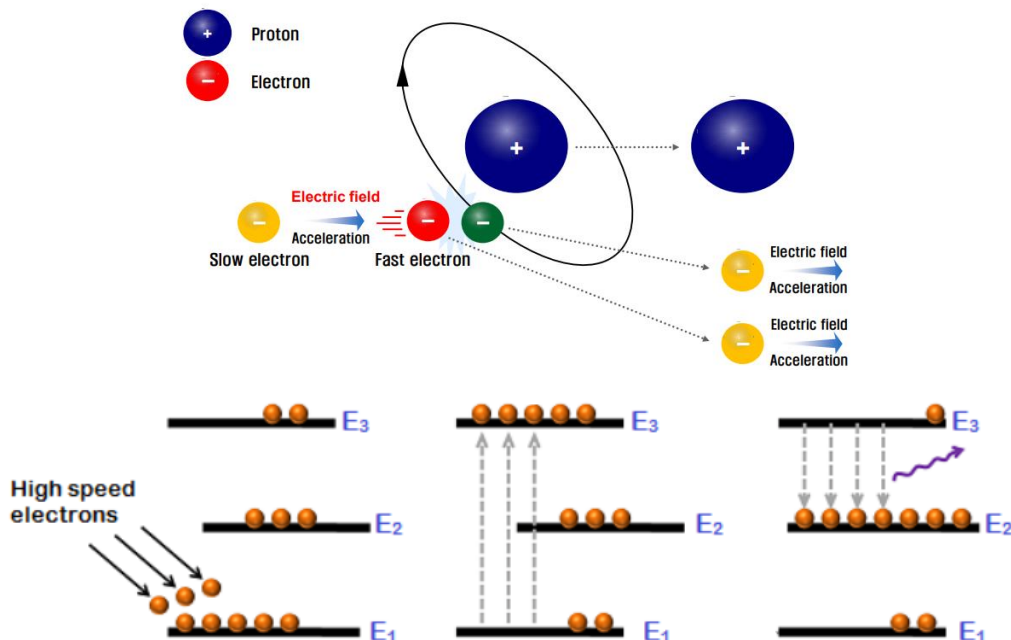
ปัจจัยต่อสนาม/ฉนวน	ก๊าซ	ของเหลว	ของแข็ง
ชนิดแรงดันเบรกดาวน์ U	peak	rms	peak หรือ rms
เวลาที่ป้อนแรงดัน t			
ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด d			
แรงดันอัดในฉนวน p			
อุณหภูมิ T			
ความชื้น h			

2.2 การเกิดเบรกดาวน์ในฉนวนก๊าซ

ฉนวนประเภทก๊าซมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน โดยใช้เป็นฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง เช่น ในระบบสายส่งไฟฟ้าเหนือดินใช้อากาศคั่นระหว่างสายตัวนำ โดยที่อากาศเป็นฉนวนที่ดีและไม่ต้องเสียค่าใช้จ่าย ในการออกแบบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง เช่น หม้อแปลง สายเคเบิลแรงสูงใต้ดิน หรือเซอร์กิตเบรกเกอร์ก็มีการใช้ก๊าซ SF₆ เป็นฉนวน หม้อแปลงบางประเภทก็ยังมีก๊าซไนโตรเจนเป็นฉนวนร่วมกับน้ำมันหม้อแปลงอีกด้วย , การเกิดเบรกดาวน์ในก๊าซ คือการเปลี่ยนแปลงสภาพการฉนวนของก๊าซไปสู่สภาพนำไฟฟ้า ซึ่งจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อมีจำนวนอิเล็กตรอน หรือไอออนในแก๊สระหว่างอิเล็กโตรดมากพอ จนทำให้แก๊สมีสภาพนำไฟฟ้าสูงพอ ปัจจุบันทฤษฎีที่เป็นที่ยอมรับในการอธิบายการเกิดเบรกดาวน์ในก๊าซมีอยู่ 2 ทฤษฎี คือ ทฤษฎีของทาวน์เซนต์ (Townsend's theory) และทฤษฎีสตรีมเมอร์ (Streamer theory)

2.2.1 ทฤษฎีของทาวน์เซนต์ (Townsend's theory)

ทฤษฎีนี้อธิบายการเกิดเบรกดาวน์ของก๊าซว่าเกิดจากเพิ่มทวีคูณของอิเล็กตรอน (avalanch) ซึ่งเกิดจากการชนไอออนไนเซชัน (Collision Ionization) แสดงดังรูปที่ 2.2.1 เมื่ออนุภาคมีมวล m (อิเล็กตรอน, ไอออน หรืออะตอมเป็นกลาง) เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว v และ ชนกับอะตอมมีมวล M จะมีการถ่ายทอดพลังงานจลน์ ถ้าไม่มีผลให้เกิดการตื่นเต้นกระตุ้น (excitation) หรือ การแตกตัวของประจุ (ionization) เรียกการชนนั้นว่า ชนแบบยืดหยุ่น แต่ถ้าชนแล้วอะตอม หรือโมเลกุลของก๊าซที่ถูกชนได้รับพลังงานจากอนุภาคที่มาชน เกิดตื่นเต้นกระตุ้น หรือไอออนไนเซชันขึ้น เรียกการชนนี้ว่า ชนแบบไม่ยืดหยุ่น นั้นหมายความว่า พลังงานจลน์ได้เปลี่ยนไปเป็นพลังงานศักย์ เมื่อมีการเปลี่ยนจากพลังงานจลน์ เป็นพลังงานศักย์หรือกลับกัน เรียกการชนนั้นว่า ชนแบบไม่ยืดหยุ่น



รูปที่ 2.2.1 การชนไอออนไนเซชันของนิวเคลียส

เงื่อนไขการชนเกิดไอออไนเซชัน คือเกิดจากอิเล็กตรอนวงชั้นโมเลกุล หรืออะตอมของก๊าซ โดยที่อิเล็กตรอนได้รับ พลังงานจากสนามไฟฟ้า E ในขณะที่วิ่งเข้าหาอะโนด พลังงานที่อิเล็กตรอนได้รับจะเป็นพลังงานจลน์ ถ้าพลังงานที่อิเล็กตรอนได้รับจากสนามไฟฟ้านี้ มากกว่าพลังงานไอออไนเซชันของโมเลกุลของก๊าซ W_i ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของก๊าซ ก็จะเกิดไอออไนเซชันขึ้น สมมติว่าอิเล็กตรอนเริ่มต้นเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเท่ากับศูนย์ ในทิศทางของสนามไฟฟ้า $E(x)$ เป็นระยะทางเท่ากับระยะอิสระ λ จะได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้า

$$W = e \int_0^{\lambda} E(x) dx = eu$$

โดยจะเกิดการไอออไนเซชันเมื่อพลังงานนี้มากกว่าพลังงานตื่นกระตุ้น (Excite) ของแต่ละโมเลกุล นั่นคือ

$$\lambda = \lambda_i$$

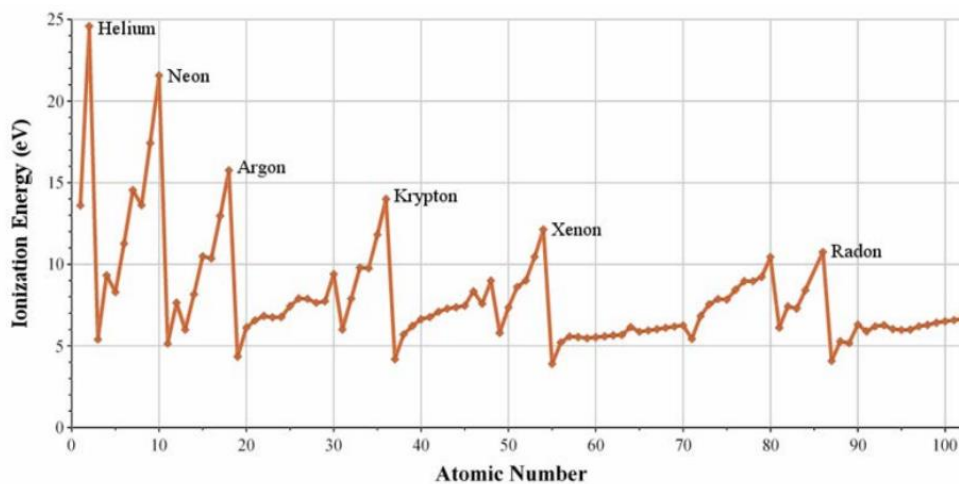
หากความเครียดสนามไฟฟ้า E คงที่

$$e \cdot E \cdot \lambda_i \geq W_i = eu$$

เมื่อ u คือ แรงดันไอออไนเซชัน (V)

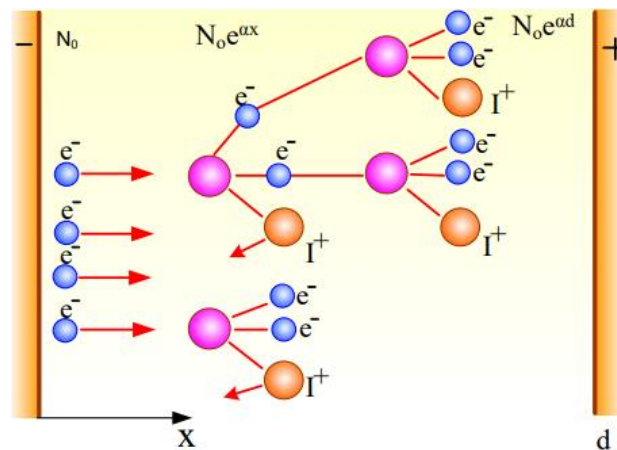
W_i คือ พลังงานที่ทำให้เกิดไอออไนเซชัน (eV)

โดยพลังงานการไอออไนซ์ของก๊าซแต่ละชนิดแสดงดังรูปที่ 2.2.2 โดย แกนตั้งคือพลังงานที่ทำให้เกิดไอออไนเซชัน (W_i) และแกนนอนคือเลขอะตอมของก๊าซ ถ้าพลังงานที่ได้จากสนามไฟฟ้าไม่เพียงพอ ที่จะทำให้เกิดไอออไนซ์ได้ ก็อาจจะทำให้โมเลกุล ที่ถูกชน (แบบไม่ยืดหยุ่น) นั้นอยู่ในสภาพตื่นกระตุ้น (Excite) ได้



รูปที่ 2.2.2 พลังงานการไอออไนซ์ของก๊าซแต่ละชนิด [45]

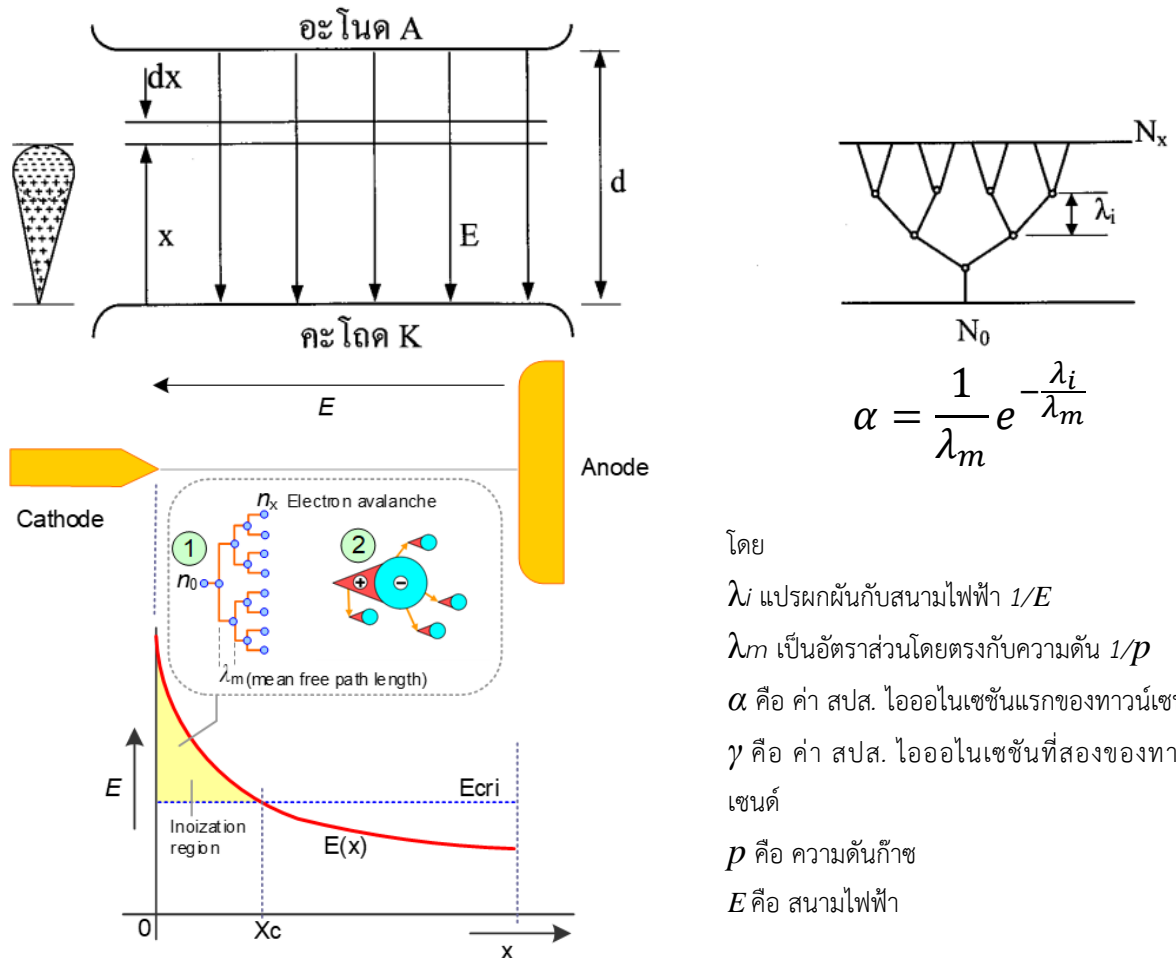
กระบวนการไอออไนซ์นี้ ตามทฤษฎีของทาวเซนต์จะประกอบด้วยขบวนการขั้นต้น (Primary or α - process) หมายถึงการเพิ่มทวีคูณ (avalanch) ของอิเล็กตรอนที่เกิดจากอิเล็กตรอน หลุดจากแคโทด เคลื่อนที่ไปในสนามไฟฟ้าและได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้า ในขณะที่วิ่งเข้าหาแอโนดพลังงานที่อิเล็กตรอน ได้รับจะเปลี่ยนเป็นพลังงานจลน์ เมื่ออิเล็กตรอนดังกล่าว (กำหนดให้เป็น e_1) เคลื่อนที่เข้าชนโมเลกุล หรือ อะตอมของก๊าซ ซึ่งประกอบด้วยกลุ่มอิเล็กตรอน (กำหนดให้เป็น e_2) โคจรอยู่รอบๆ นิวเคลียส หลังจากที่ e_1 ชนอะตอมดังกล่าวแล้ว ถ้าพลังงานที่ e_2 ได้รับจากการชนมีค่ามากกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวระหว่าง e_2 กับ นิวเคลียสของอะตอมหรือโมเลกุลของมัน แล้ว e_2 จะหลุดออกมาเป็นอิสระจากอะตอมเดิมของมัน ซึ่งทำให้ ขณะนี้มีอิเล็กตรอนอิสระเคลื่อนที่ภายใต้สนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้น รวมเป็น 2 ตัว คือ e_1 และ e_2 เรียกว่า การเกิดไอออไนเซชัน โดยอะตอมเดิมที่เป็นกลางจะกลายเป็นไอออนบวก แสดงดังรูปที่ 2.2.3



รูปที่ 2.2.3 กระบวนการสร้างอิเล็กตรอนขั้นแรกของทาวเซนต์

การเกิดไอออไนเซชันโดยทั่วไปจะหมายถึงการสร้างไอออนบวกโดยเอาอิเล็กตรอนออกมาจากอะตอมที่เป็นกลาง สำหรับกระบวนการที่ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาจากแคโทด ซึ่งโดยปกติแล้วอิเล็กตรอนจะยึดติดกับผิวอิเล็กโตรดด้วยแรงเนื่องจากไฟฟ้าสถิต ดังนั้นการทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาจากแคโทดหรืออิเล็กโตรดจะต้องให้พลังงานจำนวนหนึ่งไม่น้อยกว่าพลังงานเนื่องจากไฟฟ้าสถิตดังกล่าว ซึ่งอาจจะทำได้โดยการฉายแสง ฉายรังสี ให้ความร้อน หรือสนามไฟฟ้าไปที่แคโทด หรืออาจจะใช้การชนของไอออนบวกไปที่แคโทด

ซึ่งเกณฑ์เงื่อนไขสำหรับการเริ่มดิสชาร์จ คือ มีการเกิดกระบวนการ α เพราะมีประสิทธิภาพที่ทำให้เกิดกลุ่มอะวาแลนซ์ , มี X_c คือเส้นทางของอะวาแลนซ์ เพียงพอหากสั้นเกินไประยะ λ ก็ไม่พอให้เกิดไอออไนซ์ รวมถึง จำนวนอิเล็กตรอนวิกฤตในการเกิดอะวาแลนซ์ เพื่อเริ่มต้น streamer ซึ่งประมาณ 10^8 อิเล็กตรอน แสดงดังรูปที่ 2.2.4



$$\alpha = \frac{1}{\lambda_m} e^{-\frac{\lambda_i}{\lambda_m}}$$

โดย
 λ_i แปรผกผันกับสนามไฟฟ้า $1/E$
 λ_m เป็นอัตราส่วนโดยตรงกับความดัน $1/p$
 α คือ ค่า สปส. ไอออนไนเซชันแรกของทาวน์เซนต์
 γ คือ ค่า สปส. ไอออนไนเซชันที่สองของทาวน์เซนต์
 p คือ ความดันก๊าซ
 E คือ สนามไฟฟ้า

รูปที่ 2.2.4 กระบวนการขึ้นแรกของทาวเซนต์

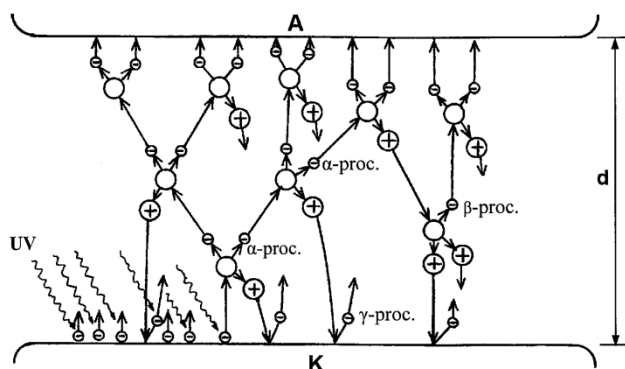
ส่วนกระบวนการขึ้นสอง (γ -process) อันเป็นกระบวนการที่เกิดอิเล็กตรอนอิสระเพิ่มขึ้นโดยการชนของไอออนบวกที่เกิดจากกระบวนการขึ้นต้นซึ่งมีทิศทางในการเคลื่อนที่วิ่งเข้าชนแคโทด และเนื่องจากไอออนบวกมีน้ำหนักมากกว่าอิเล็กตรอน 1,840 เท่า เมื่อไอออนบวกนี้วิ่งเข้าชนแคโทดทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากแคโทดได้ทำให้มีอิเล็กตรอนอิสระในแก๊สเพิ่มทวีคูณเพิ่มขึ้น เมื่อมีอิเล็กตรอนอิสระที่เกิดจากกระบวนการขึ้นสองก็จะทำให้เกิดกระบวนการขึ้นต่อไปอีก นั่นก็หมายความว่าจำนวนอิเล็กตรอนอิสระในแก๊สจะเพิ่มทวีคูณเพิ่มขึ้น ส่วนกระบวนการขึ้นสองอีกกระบวนการหนึ่งคือ กระบวนการที่ไอออนบวกที่เกิดขึ้นจากกระบวนการขึ้นต้นวิ่งไปชนโมเลกุลของก๊าซ ถ้าไอออนบวกนี้มีพลังงานสูงพอก็จะทำให้เกิดไอออนไนเซชันในก๊าซเรียกว่า กระบวนการ β (β -process)

อย่างไรก็ตามกระบวนการนี้ไม่อาจนำมาอธิบายการเกิดเบรกดาวน์ในก๊าซได้ ด้วยเหตุผลพอสรุปได้คือ
 1) ไอออนบวกไม่อาจทำให้เกิดไอออนไนเซชันในก๊าซได้อย่างมีประสิทธิภาพที่ความเครียดสนามไฟฟ้าเบรกดาวน์ เพราะจะเกิดได้ต้องใช้พลังงานตามทฤษฎีถึงสองเท่าแต่โอกาสเช่นนั้นน้อยมาก

2) ถ้ากลไกการเกิดไอออนไนเซชันตามกระบวนการ (β) เป็นส่วนที่ทำให้เกิดเบรกดาวนั โลหะผิวของแคโทดจะไม่มีผลต่อค่าแรงดันเริ่มเกิดเบรกดาวนั แต่ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าโลหะที่ทำแคโทดมีผลอย่างมากต่อค่าแรงดันเบรกดาวนั

3) กลไกการเบรกดาวนัตามกระบวนการ (β) ต้องใช้เวลาการเคลื่อนที่ของไอออนข้ามแก๊ปมากกว่าเวลาการเกิดเบรกดาวนัที่วัดได้

กระบวนการที่สองที่เป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดเบรกดาวนัจึงเป็นแบบไอออนบวกวิ่งชนแคโทด หรือที่เรียกว่ากระบวนการ (γ) การเพิ่มทวีคูณของจำนวนอิเล็กตรอนโดยอาศัยกระบวนการขั้นต้นและกระบวนการขั้นสองสามารถวิเคราะห์ได้ดังรูปที่ 2.2.5 อธิบายได้โดย กำหนดให้แคโทดได้รับการกระตุ้นให้เกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกมาจำนวน N_0 ตัวต่อวินาที



รูปที่ 2.2.5 กระบวนการสร้างอิเล็กตรอนของทาวเซนต์

กระบวนการขั้นต้น จำนวนอิเล็กตรอนในระยะเวลา x ในแก๊ปที่ระยะ x จากแคโทดคือ

$$N_x = N_0 e^{\alpha x}$$

เมื่อ N_0 = จำนวนอิเล็กตรอนที่ปล่อยจากแคโทดต่อวินาที

N_x = จำนวนอิเล็กตรอนที่ระยะ x จากแคโทด

ดังนั้นจำนวนอิเล็กตรอนที่วิ่งเข้าหาแอโนด ($x = d$) ต่อวินาที จะเป็น

$$N_d = N_0 e^{\alpha d}$$

อิเล็กตรอนแต่ละตัวที่ออกจากแคโทดจะสร้างอิเล็กตรอนขึ้นใหม่ $e^{\alpha d} - 1$ ตัว จะเห็นได้ว่าจำนวนอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นเป็นแบบเอกซ์โปเนนเชียล แต่ตามลำพังกระบวนการขั้นต้นนี้ไม่สามารถทำให้เกิดเบรกดาวนัได้ เพราะถ้าเอาต้นกำเนิดที่สร้างอิเล็กตรอนเริ่มต้น N_0 ออกแล้ว กระบวนการไอออนไนเซชันจะหยุดลง ดังนั้นจึงต้องอาศัยกระบวนการที่สองจึงทำให้เกิดเบรกดาวนั

เมื่อนำจำนวนอิเล็กตรอนที่ปลดปล่อยจากกระบวนการขั้นที่สองมาพิจารณาพร้อมกับจำนวนอิเล็กตรอนที่ปลดปล่อยจากกระบวนการขั้นที่ 1 จำนวนอิเล็กตรอนทั้งหมดที่ปลดปล่อยจากแคโทดสามารถแสดงเป็นสมการได้ ดังสมการ

$$N_0'' = N_0 + N_0'$$

เมื่อ N_0 = จำนวนอิเล็กตรอนที่ปล่อยจากแคโทดต่อวินาทีโดยกระบวนการขั้นต้น

N_0' = จำนวนอิเล็กตรอนที่ปล่อยจากกระบวนการขั้นที่สองต่อวินาทีที่แคโทด

N_0'' = จำนวนอิเล็กตรอนรวมทั้งหมดที่ออกจากแคโทดต่อวินาที

อิเล็กตรอนแต่ละตัวที่ออกจากแคโทดจะชนโมเลกุลอิสระ หรืออะตอมตัวอื่นๆ แล้วเกิดไอออไนเซชันขึ้นมีโอกาสเกิดขึ้นเท่ากับ $e^{\alpha d} - 1$ ครั้ง จำนวนอิเล็กตรอน หรือไอออนบวกที่เกิดเพิ่มขึ้นเนื่องจากการชนจากกระบวนการขั้นต้น โดยพิจารณาจากจำนวนอิเล็กตรอนทั้งหมดที่ปลดปล่อยจากแคโทด เป็นดังสมการ

$$N_0' = N_0''(e^{\alpha d} - 1)$$

ไอออนบวกที่เกิดจากกระบวนการขั้นต้นนั้น เมื่อเคลื่อนที่ไปชนแคโทด เป็นผลให้แคโทดปลดปล่อยอิเล็กตรอนมา เนื่องจากกระบวนการขั้นที่ 2 เป็นไปตามสมการ

$$N_0' = \gamma N_0''(e^{\alpha d} - 1)$$

เมื่อ γ เป็นสัมประสิทธิ์ไอออไนเซชันที่สองของทาวนด์เซนต์

ดังนั้น จาก $N_0' = N_0 + N_0'$ สามารถเขียนใหม่เป็น

$$N_0'' = N_0 + \gamma N_0''(e^{\alpha d} - 1)$$

หรือ
$$N_0'' = \frac{N_0}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)}$$

พิจารณา จาก $N_x = N_0 e^{\alpha x}$ พบว่า จำนวนอิเล็กตรอนที่วิ่งไปถึงแอโนดมีค่าเท่ากับ

$$N_d = N_0'' e^{\alpha d}$$

หรือ
$$N_d = \frac{N_0 e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)}$$

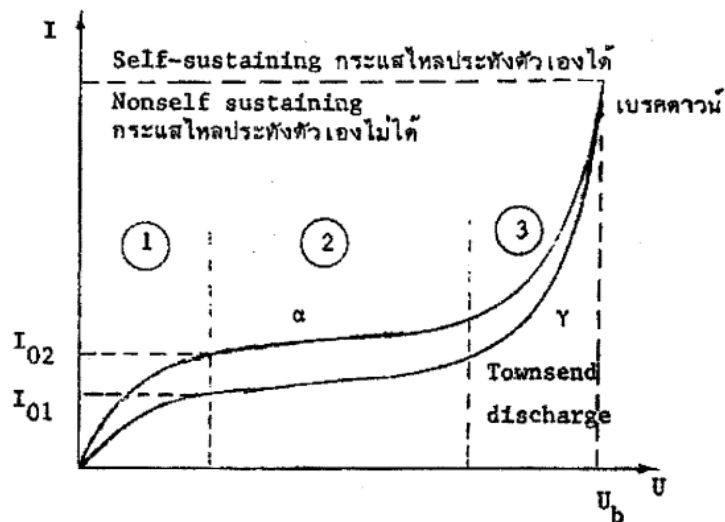
เพราะว่าการเคลื่อนที่ของประจุต่อเวลาคือกระแสไฟฟ้า จะได้สมการของกระแสเป็น

$$\frac{N_d}{N_0} = \frac{I}{I_0} = \frac{e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)}$$

$$I = \frac{I_0 e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)}$$

สามารถกล่าวได้ว่า ในขณะที่สนามไฟฟ้ามีค่าไม่สูงนัก $\gamma(e^{\alpha d} - 1) \ll 1$ ซึ่งจะมีผลตรงกับ $I = I_0 e^{\alpha d}$ เมื่อสนามไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้น $\gamma(e^{\alpha d} - 1)$ มีค่าเข้าใกล้ 1 กระแสจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อ

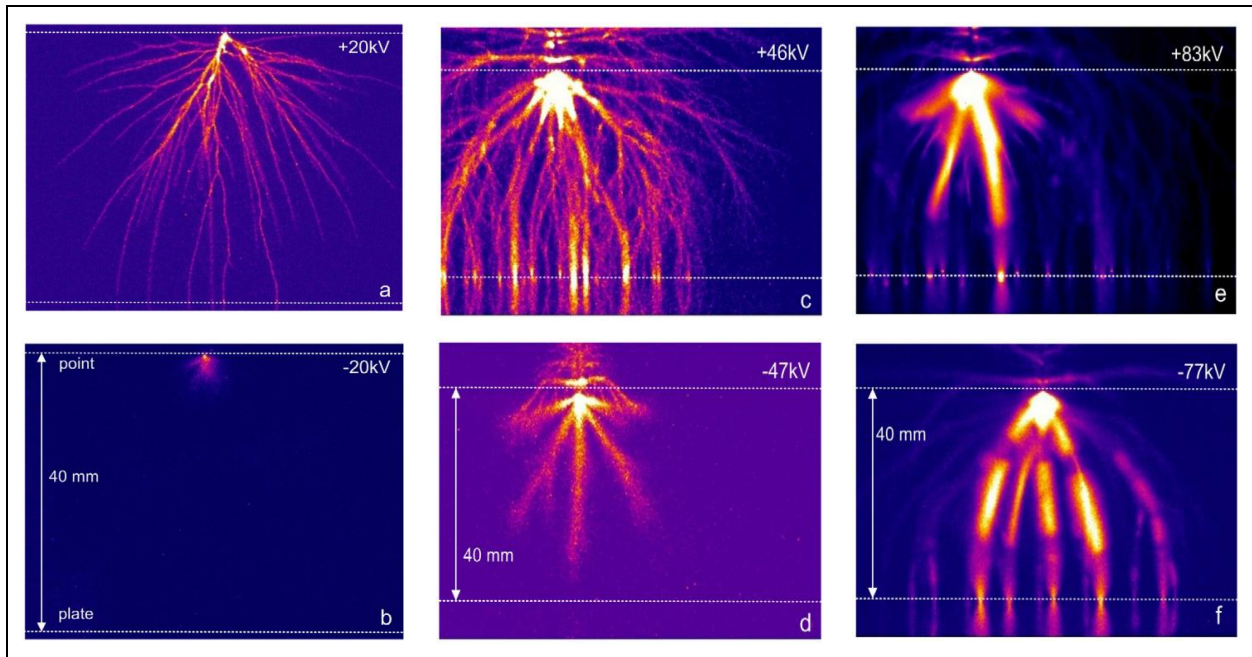
$\gamma(e^{\alpha d} - 1) = 1$ กระแสจะมีค่าเป็นอนันต์ (Infinity) เราเรียกเงื่อนไขนี้ว่า การเบรกดาวนซ์ของทาวน์เซนต์ แสดงดังรูปที่ 2.2.6 การสร้างอิเล็กตรอนอิสระโดยกระบวนการขั้นที่ 2



รูปที่ 2.2.6 การเบรกดาวนซ์ของทาวน์เซนต์

2.2.2 ทฤษฎีสตรีมเมอร์ (Streamer theory)

เนื่องจากกลไกเบรกดาวนซ์ตามทฤษฎีของทาวน์เซนต์ไม่สามารถอธิบายการเกิดเบรกดาวนซ์ได้ทุกกรณี เช่น การเกิดเบรกดาวนซ์ในช่องแคบกว้างๆ ในบรรยากาศของแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าที่เกิดเบรกดาวนซ์ในช่วงหน้าคลื่น เวลาคลื่นตัด เป็นเวลาที่น้อยเกินไปที่ไอออนบวกจะสามารถเคลื่อนที่ไปถึงแคโทดเพื่อสร้างอิเล็กตรอนอิสระได้ เมื่อคำนวณเวลาตามกระบวนการของทาวน์เซนต์ที่ใช้สร้างอะวาลานซ์ของอิเล็กตรอนโดยการชนแตกตัวแล้วปล่อยอิเล็กตรอนจะพบว่า มากกว่าเวลาที่คลื่นตัดที่วัดได้จากการทดลอง หรือแม้แต่คิดเวลาที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่โดยตรงจากแคโทดข้ามช่องแคบไปยังแอโนดโดยไม่ชนกับโมเลกุลเลยก็ใช้เวลานานกว่าเวลาที่คลื่นตัดที่ทดลองได้ อีกประการหนึ่งทฤษฎีของทาวน์เซนต์ไม่สามารถอธิบายผลของประจุค้าง ที่อยู่เบื้องหลังของอิเล็กตรอนอะวาลานซ์ก่อนๆ กลุ่มไอออนเหล่านี้ทำให้สนามไฟฟ้าเดิมบิดเบือนไปในทางที่มีความเครียดสูงขึ้นและอาจทำให้อิเล็กตรอนมีพลังงานมากพอที่จะเกิดไอออไนเซชันขึ้นได้ เช่น ภาพถ่ายของลำสตรีมเมอร์หัวบวกแสดงดังรูปที่ 2.2.7 (ซ้าย) และ ลำสตรีมเมอร์หัวลบ รูปที่ 2.2.7 (ขวา) โดยมีระยะห่างระหว่างปลายแหลมกับระนาบกราวด์ 40 mm ในอากาศความดัน 1 bar แรงดันไฟฟ้าที่ป้อนขณะถ่ายภาพระบุไว้ที่มุมขวาบนของแต่ละภาพ ซึ่งมีค่า (a) +20 kV (b) -20 kV (c) +46 kV (d) -47 kV (e) +83 kV (f) -77 kV ตามลำดับ และเส้นประสีขาวยุบตำแหน่งของอิเล็กโตรดกราวด์ระนาบ ด้านล่างและความสูงของอิเล็กโตรดปลายแหลมด้านบน [46]

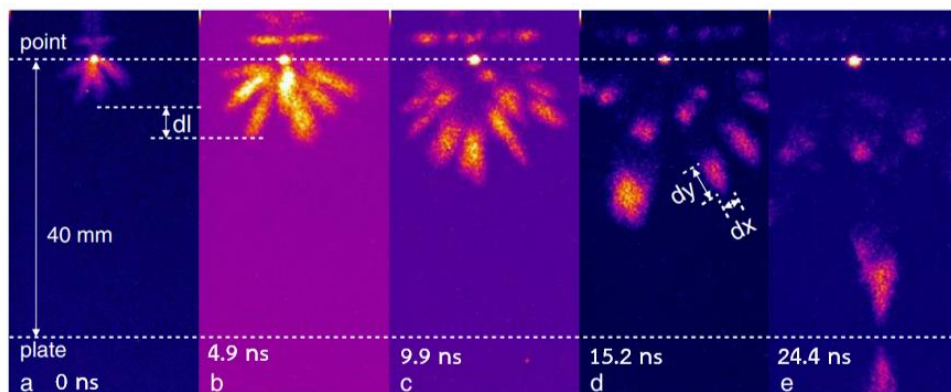


รูปที่ 2.2.7 ภาพถ่ายของลำสตรึมเมอร์หัววก และ หัวลบ

รูปที่ 2.2.8 แสดงการเกิดสตรึมเมอร์หัวลบที่ -56 kV แต่แต่ละภาพถ่ายที่เวลาต่างกัน โดยเว้นระยะแต่ละภาพราวๆ 5 ns ตั้งแต่เริ่มการถ่าย ณ เวลาที่ 0 ns ดังแสดงในรูปที่ 2.2.8 (a) รวมถึงสามารถคำนวณหาความเร็วของลำสตรึมเมอร์ได้โดยระยะ dl ในรูปที่ 2.2.8 (a) และ (b) ทหารด้วยความแตกต่างของเวลาภาพถ่าย คือ 4.9 ns และเส้นสีขาวระบุตำแหน่งของอิเล็กโตรดตั้งรูปที่ 2.2.8 ด้านบน, แสงที่ด้านล่างของรูปที่ 2.2.8 (e) เป็นภาพสะท้อนของแสงสตรึมเมอร์บนแผ่นแอโนด

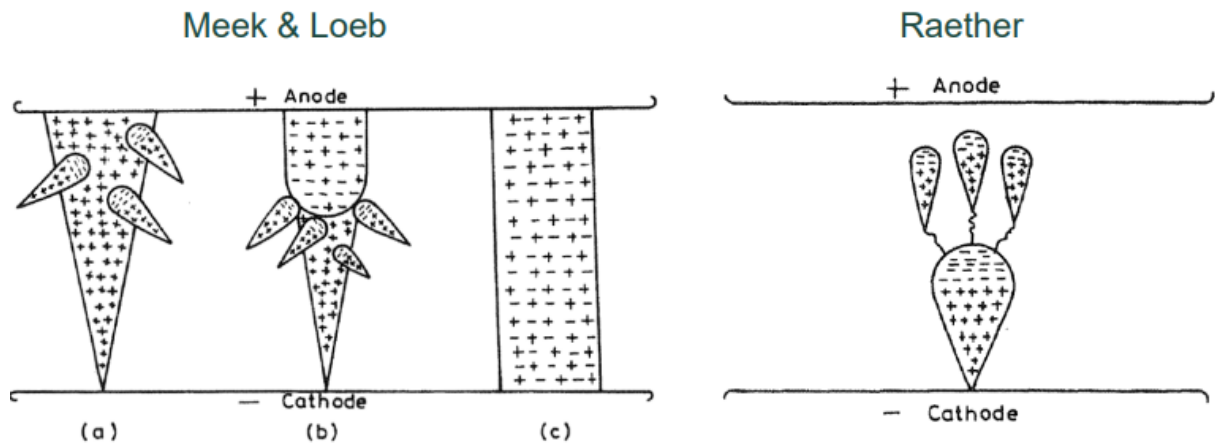
เงื่อนไขการเกิดสตรึมเมอร์เบรกดาวน์กำหนดด้วยช่วงต่อการเปลี่ยนแปลงสถานภาพจากอิเล็กตรอนอะวาลานซ์ไปสู่สตรึมเมอร์ ซึ่งแบ่งอธิบายออกเป็นสองทางตามทฤษฎีที่เสนอ คือ

1. Meek และ Loeb ได้เสนอเงื่อนไขการเปลี่ยนจากอิเล็กตรอนอะวาลานซ์เดี่ยวไปสู่สตรึมเมอร์ว่าจะเกิดขึ้นเมื่อสนามไฟฟ้าเนื่องจากไอออนบวกที่หัวอะวาลานซ์มีค่าประมาณเท่ากับสนามไฟฟ้าที่ป้อนจากภายนอก
2. Rather เสนอเงื่อนไขสตรึมเมอร์เบรกดาวน์กำหนดด้วยสนามไฟฟ้าจากประจุค้างเช่นกัน และกำหนดว่าสตรึมเมอร์จะเกิดขึ้นเมื่ออะวาลานซ์มีจำนวนอิเล็กตรอนหรือไอออนบวกตามกระบวนการชนไอออนไนเซชันประมาณ 10^8 โดยไม่ขึ้นอยู่กับชนิดของก๊าซหรือความดันก๊าซ หรือระดับความสม่ำเสมอของสนามไฟฟ้า



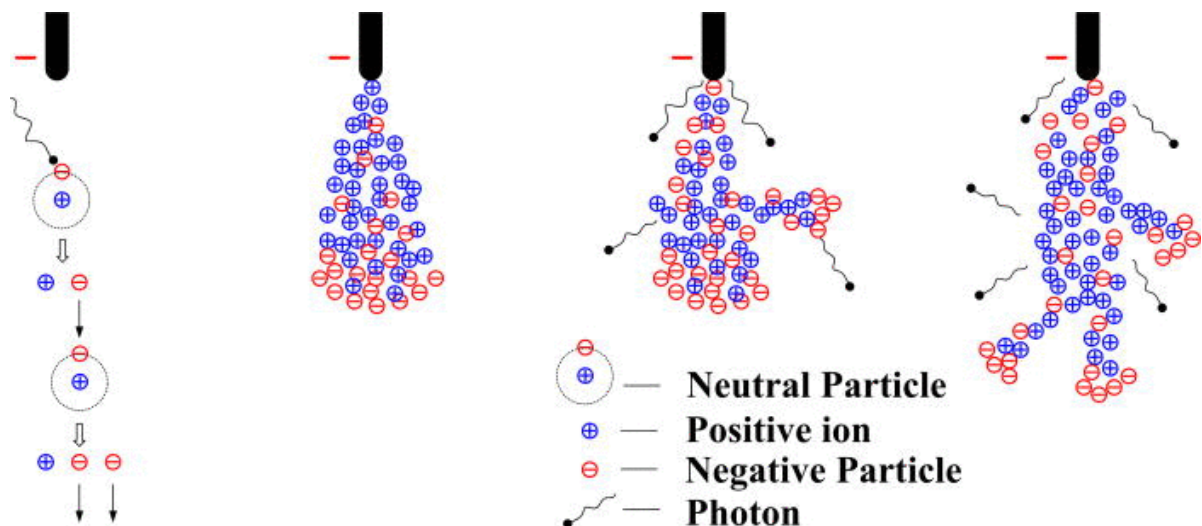
รูปที่ 2.2.8 การเกิดสตรึมเมอร์หัวลบที่ -56 kV

Meek และ Loeb ได้เสนอทฤษฎีสตรีมเมอร์บวกในปี 1940 และในเวลาเดียวกัน Rather ก็เสนอทฤษฎีสตรีมเมอร์ลบ ดังรูปที่ 2.2.9 เพื่ออธิบายปรากฏการณ์ซึ่งทฤษฎีของทาวน์เซนต์อธิบายไม่ได้ หลักการของการเกิดเบรกดาวน์ตามทฤษฎีสตรีมเมอร์เป็นผลสืบเนื่องจากกระบวนการวิ่งชนไอออนไนเซชัน (กระบวนการ α) ของทาวน์เซนต์ กล่าวคือจะมีการไอออนไนเซชันเป็นจำนวนมากจากหลังโพتون ซึ่งเกิดการรวมตัวกันใหม่ (Recombination) ระหว่างไอออนบวกกับอิเล็กตรอนแล้วจะปลดปล่อยพลังงานออกมา การเกิดไอออนไนเซชันแบบนี้เรียกว่า โฟโตไอออนไนเซชัน (Photo-ionization) ของก๊าซ แสดงดังรูปที่ 2.2.10



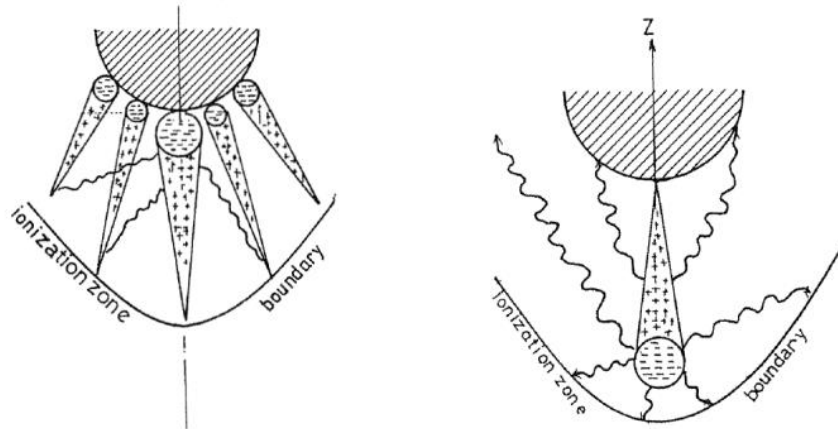
รูปที่ 2.2.9 ทฤษฎีสตรีมเมอร์บวก Meek และ Loeb (ซ้าย) ทฤษฎีสตรีมเมอร์ลบ Rather (ขวา)

รูปที่ 2.2.10 แสดงการก่อตัวและพัฒนาเป็นลำสตรีมเมอร์ของประจุที่เกิดจากปลายแหลมขั้วลบ (a) เล็กตรอนอิสระและการแตกตัว (collision) เป็นไอออน (b) เกิดกลุ่มอิเล็กตรอนอะวาลานซ์เริ่มต้น; (c) กลุ่มอิเล็กตรอนอะวาลานซ์ถัดๆ มา; (d) ลำสตรีมเมอร์ขั้วลบ [47]



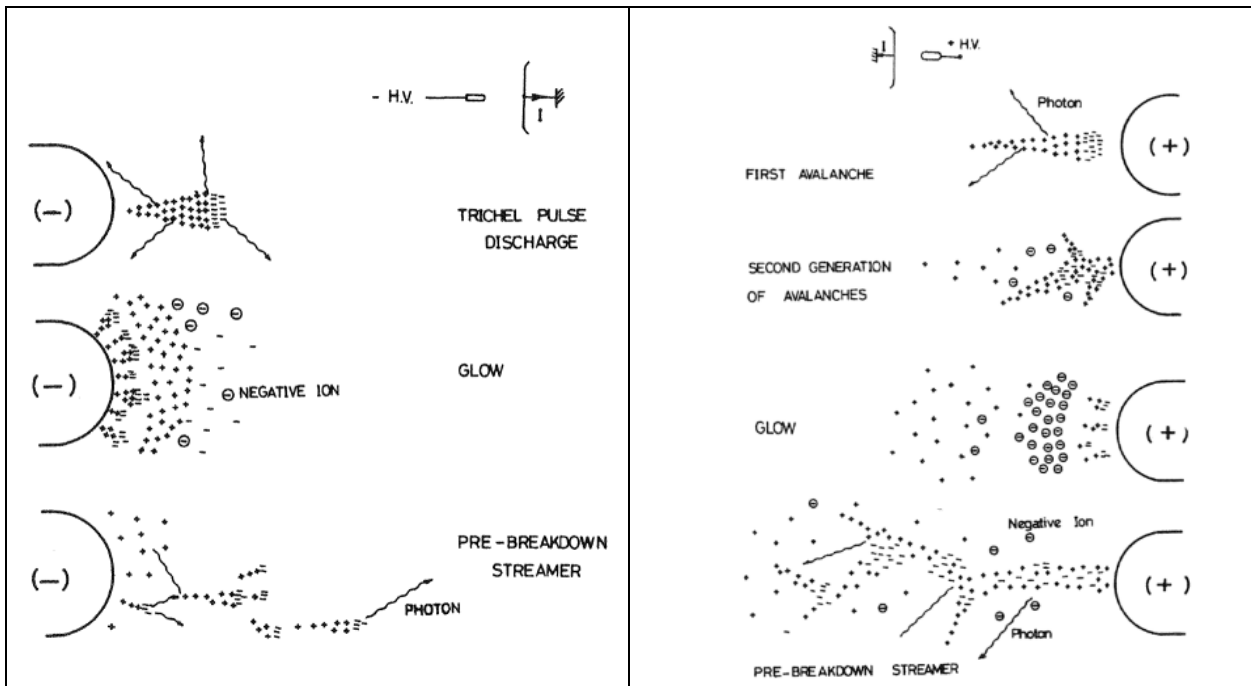
รูปที่ 2.2.10 โฟโตไอออนไนเซชัน สตรีมเมอร์ขั้วลบ

โมเลกุลที่ส่วนหน้าของอะวาลานซ์ กลุ่มประจุค้ำงของไอออนที่ส่วนหัวของอะวาลานซ์ทำให้สนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้นและทำให้เกิดไอออนไนเซชันเพิ่มขึ้นอย่างมาก ไอออนบวกเคลื่อนที่ได้ช้าเมื่อเทียบกับการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน ไอออนบวกจึงรวมตัวกันอยู่เบื้องหลังเป็นหมอกประจุค้ำง ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ส่วนหัวและหลังอะวาลานซ์เพิ่มสูงขึ้น แต่ในบริเวณระหว่างอิเล็กตรอนกับประจุค้ำง ความเครียดสนามไฟฟ้าจะลดลง การเพิ่มสูงขึ้นของความเครียดสนามไฟฟ้าตามจุดต่างๆ ทำให้เกิดโฟโตไอออนไนเซชันขยายตัวเพิ่มขึ้น เกิดอะวาลานซ์ใหม่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว หมอกประจุค้ำงเพิ่มขึ้นทำให้สภาพนำไฟฟ้าสูงขึ้นเป็นแนวมีลักษณะเป็นสตรีมเมอร์ระหว่างอิเล็กโตรดทั้งสองดังรูปที่ 2.2.11 และเกิดเบรกดาวน์ตามแนวนี้ จึงเรียกว่าสตรีมเมอร์เบรกดาวน์



รูปที่ 2.2.11 การเกิดสตรีมเมอร์

การดีสชาร์จที่ปลายแหลมหัวบวก เริ่มจากกระบวนการไอออนไนเซชันจนเกิดกลุ่มอะวาลานซ์แรกก่อน ทางที่เป็นประจุบวกค้ำงจะแผ่รังสีโฟตอนไปรอบข้างทำให้เกิดกลุ่มอะวาลานซ์ใหม่ขึ้นมา และเกิดกระบวนการเหล่านี้ซ้ำไป จนเกิดอิเล็กตรอนจำนวนมากรวมกันเป็นลำสตรีมเมอร์ จึงเกิดการดีสชาร์จแบบสตรีมเมอร์ ดังรูปที่ 2.2.12



รูปที่ 2.2.12 การเกิดสตรีมเมอร์ของปลายแหลมหัวบวก และ หัวลบ

2.3 การเกิดเบรกดาวนในฉนวนเหลว

ฉนวนเหลวเป็นฉนวนทางไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่ยิมนำมาใช้เป็นฉนวนหลักในการออกแบบระบบฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง เนื่องจากมีคุณสมบัติในการเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี โดยที่มีค่าความคงทนต่อการเกิดเบรกดาวนสูงกว่าอากาศที่สภาวะความดันบรรยากาศ มีความสามารถในการคืนตัวเป็นฉนวนอีกครั้งหลังจากเกิดเบรกดาวน มีค่าเปอร์มิตติวิตีต่ำ ค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ประมาณ 2-2.5 ฉนวนเหลวสามารถไหลแทรกซึมเข้าไปในช่องว่างต่างๆเพื่อระบายความร้อนได้เกือบทุกส่วนของอุปกรณ์ แต่อย่างไรก็ตามฉนวนเหลวยังมีข้อเสียอยู่ด้วยเช่น จำเป็นที่จะต้องมีการบำรุงรักษา และมีโอกาสที่จะติดไฟได้ รวมทั้งไม่สามารถใช้เป็นตัวรองรับอุปกรณ์เหมือนกับฉนวนแข็ง การพิจารณาคุณสมบัติของฉนวนเหลว โดยทั่วไปแล้วจะพิจารณาจากคุณสมบัติทางฟิสิกส์ ทางเคมี และทางไฟฟ้า

2.3.1 การเกิดเบรกดาวนของฉนวนเหลวบริสุทธิ์

กลไกการเกิดเบรกดาวนของฉนวนเหลวบริสุทธิ์มีหลักการแบบเดียวกับกรณีของฉนวนก๊าซ ที่เกิดจากอิเล็กตรอนอะวาลานซ์ โดยเกิดจากการชนกันของอิเล็กตรอนกับอนุภาคในสนามไฟฟ้า อิเล็กตรอนเริ่มต้นที่ออกจากแคโทดเนื่องจากผลของสนามไฟฟ้า (Field emission) หรือเป็นผลมาจาก ความร้อน (Thermionic emission) มีรายงานผลการศึกษานำไฟฟ้าในฉนวนเหลว ระบุว่า เมื่อความเครียดสนามไฟฟ้ามีค่าสูง พบว่าการไหลของกระแสไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรดเกิดจากการปล่อยอิเล็กตรอนจากแคโทดโดยสนามไฟฟ้ามากกว่าที่จะเป็นการปล่อยอิเล็กตรอนจากแคโทดด้วยความร้อน การเกิดเบรกดาวนน่าจะเกิดจากการที่ไอออนบวกของอนุภาคเจือปนเคลื่อนที่มาสู่แคโทด ทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าในบริเวณใกล้ผิวแคโทดเพิ่มสูงขึ้นเพียงพอที่อิเล็กตรอนสามารถหลุดออกจากผิวแคโทดได้ อิเล็กตรอนอิสระที่หลุดออกมาเหล่านี้ จะได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้าที่เกิดจากการป้อนแรงดันให้กับอิเล็กโตรด ทำให้เกิดการเคลื่อนที่โดยมีทิศทางไปสู่ขั้วแอโนด ระหว่างทางจะชนกับโมเลกุลของฉนวนเหลวทำให้พลังงานที่ได้รับจากสนามไฟฟ้าสูญเสียไปกับการชน ในกระบวนการนี้จะมีอิเล็กตรอนบางตัวที่สูญเสียพลังงานไปกับการชนต่ำกว่าพลังงานที่ได้รับจากสนามไฟฟ้า ถ้าอิเล็กตรอนเหล่านี้ถูกเร่งจนมีพลังงานสูงพอที่จะชนกับโมเลกุลแล้ว ทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนและก่ออะวาลานซ์ การเกิดเบรกดาวนของฉนวนเหลวก็จะเกิด

2.3.2 เกิดเบรกดาวนเนื่องจากอนุภาคเจือปนของแข็ง

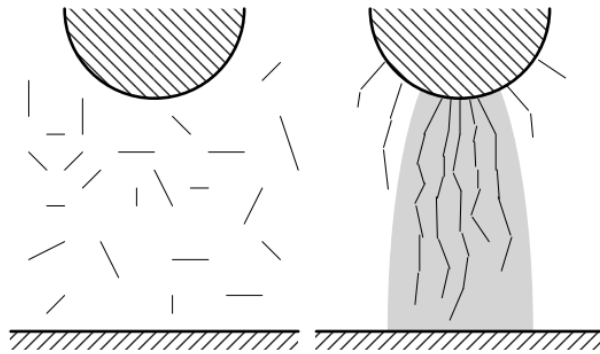
สิ่งเจือปนของแข็งที่ปะปนอยู่ในฉนวนเหลวอาจเป็นอนุภาคตัวนำ ไฟเบอร์หรือฝุ่นละออง ภายใต้สนามไฟฟ้าอนุภาคเจือปนเหล่านี้จะถูกเหนี่ยวนำให้เกิดขั้วทางไฟฟ้าขึ้นมา ถ้ากำหนดให้อนุภาคฉนวนแข็งมีรูปร่างเป็นทรงกลมที่รัศมี r_p และมีค่าเปอร์มิตติวิตี ϵ_p ฉนวนเหลวมีค่าเปอร์มิตติวิตี ϵ_{liq} จะเกิดแรงทางไฟฟ้า F_e กระทำต่ออนุภาคโพลารไรซ์ ตามสมการ

$$F_e = \epsilon_{liq} r_p^3 \frac{\epsilon_p - \epsilon_{liq}}{\epsilon_p + 2\epsilon_{liq}} E \text{ grad } E$$

ถ้าหาก $\epsilon_r > \epsilon_{liq}$ แรงที่เกิดขึ้นจะทำให้อนุภาคเคลื่อนที่ไปยังบริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด ถ้า $\epsilon_r < \epsilon_{liq}$ แรงที่เกิดขึ้นจะกระทำต่ออนุภาคในทิศทางตรงกันข้าม กล่าวคือจะกระทำให้อนุภาคเคลื่อนที่ไปสู่บริเวณที่มีความเครียดของสนามไฟฟ้าต่ำ พบว่าแรงที่กระทำบนอนุภาคจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าเปอร์มิตติวิตีของอนุภาค ในกรณีของอนุภาคตัวนำเจือปนอยู่ในฉนวนเหลว เนื่องจากค่าเปอร์มิตติวิตีของอนุภาคเข้าใกล้อินฟินิตี แรงที่เกิดขึ้นบนอนุภาคตัวนำ จะมีค่าตามสมการ

$$F_e = F_\infty = r_p^3 E \text{ grad } E$$

ผลของแรงที่กระทำต่ออนุภาคฉนวน หรืออนุภาคตัวนำนั้น จะทำให้เกิดการจัดเรียงตัวกันใหม่ของอนุภาคเจือปนเป็นสะพานเชื่อมต่อระหว่างอิเล็กโทรด ทำให้เกิดเบรกดาวน์ขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.3.1 การจัดเรียงอนุภาคเจือปนจะง่ายหรือยากนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการเช่น ลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคภายในฉนวนเหลวก่อนที่จะได้รับสนามไฟฟ้า ชนิดอนุภาค และความหนืดของฉนวนเหลว เป็นต้น



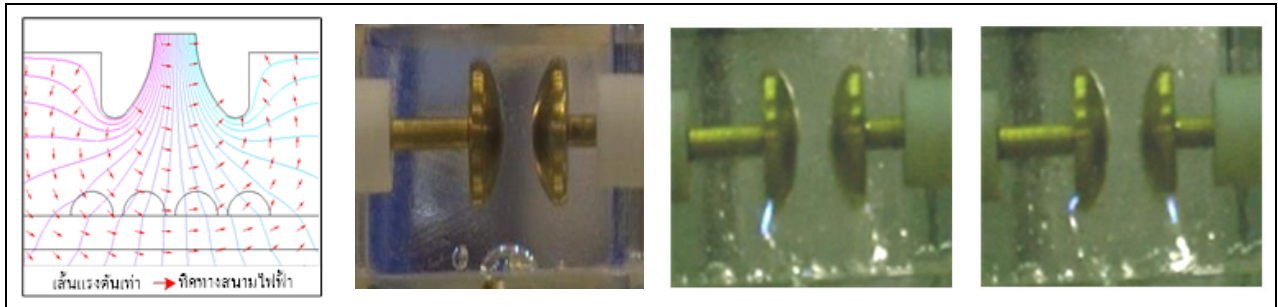
รูปที่ 2.3.1 การเรียงตัวของอนุภาคไฟเบอร์ภายใต้สนามไฟฟ้า

2.3.3 กลไกการเกิดเบรกดาวน์เนื่องจากฟองก๊าซ

ก๊าซสามารถละลายในฉนวนเหลวได้ในปริมาณมากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับสภาวะความดันและอุณหภูมิของฟองก๊าซ ในฉนวนเหลว ฟองก๊าซอาจเกิดจากฉนวนที่มีคุณภาพต่ำหรือเสื่อมคุณภาพ หรือในขณะที่เติมฉนวนเหลวในภาชนะบรรจุ ก๊าซอาจจับอยู่ที่ผิวอิเล็กโทรดที่ขรุขระหรือร่องผิวอิเล็กโทรด หรืออาจเกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางเคมีภายในฉนวนเหลว เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ความดันและการชนของไอออนและอิเล็กตรอน ทำให้ฉนวนเหลวสลายตัวเป็นก๊าซออกมา หรืออาจเกิดจากผลของการเกิดดิสชาร์จบางส่วนบริเวณผิวอิเล็กโทรดที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูง ฟองก๊าซที่เกิดขึ้นเมื่อได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้าก็จะขยายตัวยึดตามแนวสนามไฟฟ้าเพื่อลดพลังงานศักย์ในสนามไฟฟ้า การเบรกดาวน์จะเกิดเมื่อแรงดันตกคร่อมความยาวของฟองก๊าซมีค่าเท่ากับค่าต่ำสุดของเส้นโค้งพาเซน เมื่อความเครียดสนามไฟฟ้าของฟองก๊าซมีค่าเท่ากับความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤตของก๊าซก็จะเกิดดิสชาร์จผ่านฟองก๊าซ เป็นผลให้เกิดการแยกตัวของโมเลกุลฉนวนเหลว นำไปสู่การเกิดเบรกดาวน์ได้ นอกจากสาเหตุที่กล่าวแล้ว ฟองก๊าซยังสามารถเกิดที่บริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงเช่น ปลายแหลมของอิเล็กโทรด เนื่องจากบริเวณนั้นจะมีความร้อนสูง ทำให้ฉนวนเหลวกลายเป็นไอ และเกิดดิสชาร์จขึ้นและนำไปสู่การเกิดเบรกดาวน์ในที่สุด

2.3.4 กลไกการเกิดเบรกดาวนจากหยดของเหลวเจือปน

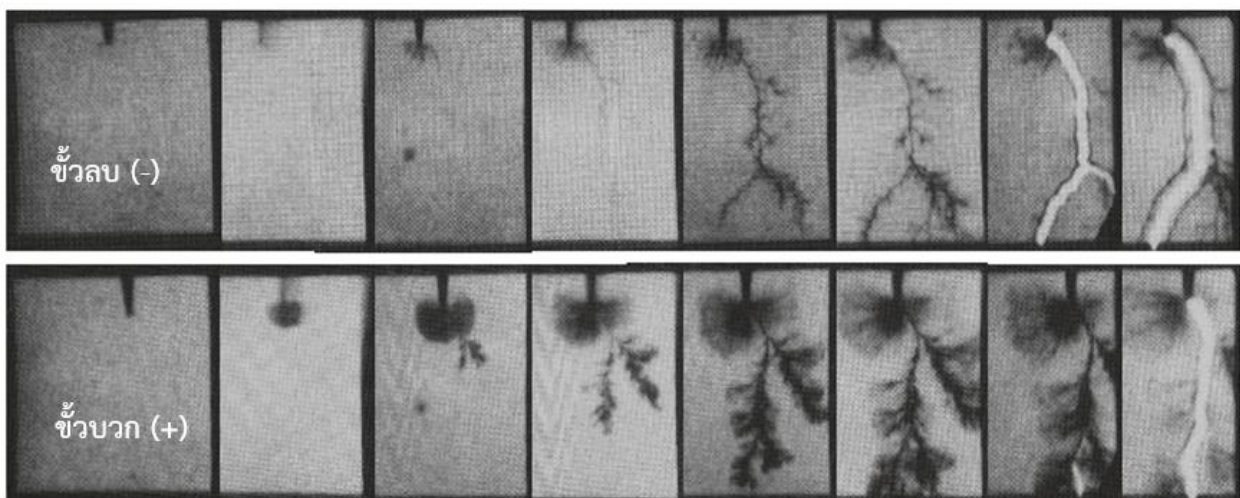
ฉนวนเหลวที่มีหยดของเหลวต่างชนิดเจือปนอยู่สามารถทำให้เกิดเบรกดาวนได้ เนื่องจากการเปลี่ยนรูปร่างของหยดของเหลวเจือปนโดยมีการยืดออกตามแนวของสนามไฟฟ้า เมื่อของเหลวเกิดการยืดตัว ความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนเหลวที่ปลายทั้งสองของหยดของเหลวมีค่าสูงขึ้น ถ้ามีค่าสูงเกินค่าวิกฤติจะทำให้เกิดดิซชาร์จบางส่วน เกิดโพรงก๊าซและนำมาสู่การเกิดเบรกดาวนในที่สุด แสดงดังรูปที่ 2.3.2



รูปที่ 2.3.2 การยืดตัวของหยดน้ำตามแนวสนามไฟฟ้า (ทดสอบที่ สจล.)

2.3.5 กลไกการเกิดเบรกดาวนจากความร้อน

การเกิดเบรกดาวนเนื่องจากความร้อน เกิดขึ้นในกรณีที่มีการป้อนแรงดันชนิดพัลส์ จากการทดลองวัดพัลส์กระแสในฉนวนเหลวพบว่ากระแสมีค่าสูงก่อนเกิดเบรกดาวน โดยมีค่าความหนาแน่นกระแสประมาณ 1 A/cm^2 ซึ่งเชื่อว่ามีแหล่งกำเนิดจากปลายของผิวอิเล็กโทรดขั้วลบหรือแคโทด ทำให้ฉนวนเหลวบริเวณนั้นมีอุณหภูมิสูงและกลายเป็นไอหรือฟองก๊าซ เมื่อฟองก๊าซมีการยืดตัวจนกระทั่งมีความยาวเกินความยาววิกฤติหรือเกิดโพรงตลอดแนวระยะแกปของอิเล็กโทรดจะเกิดเบรกดาวนตามมา แสดงดังรูปที่ 2.3.3 เป็นช่องทางการดิซชาร์จของปลายแหลมขั้วลบและบวก (บนและล่าง) กับระนาบในฉนวนน้ำมัน จากซ้ายไปขวาเป็นการเกิดสตรีมเมอร์แบบปกติ การแตกออกของช่องทางสตรีมเมอร์รองเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว และการเริ่มต้นของการปล่อยกระแสไฟหลักแบบเรืองแสงในตัวเอง [13 p.425]



รูปที่ 2.3.3 ช่องทางการดิซชาร์จของปลายแหลมขั้วลบและบวก (บนและล่าง) ในฉนวนน้ำมัน [13]

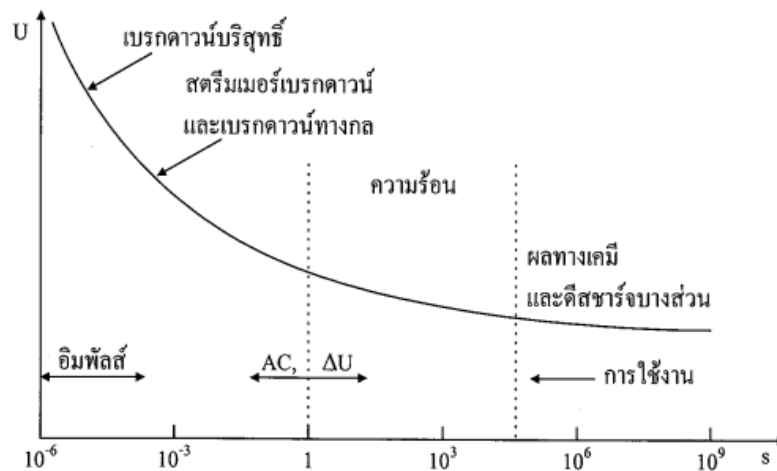
2.4 การเกิดเบรกดาวน์ในฉนวนแข็ง

ฉนวนแข็งนอกจากจะทำหน้าที่เป็นฉนวนทางไฟฟ้าแล้วบางส่วนยังจะต้องทำหน้าที่ยึดหรือรับแรงกลอันเกิดจากน้ำหนักของโครงสร้าง หรือแรงกลไดนามิกส์ที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าอีกด้วย

ฉนวนแข็งที่ดีนั้นจะต้องมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูง มีความต้านทานสูงทุกระดับแรงดัน มีกำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกต่ำ ทนต่อแรงกลได้สูง ปลอดภัยจากฟองก๊าซและความชื้น และไม่ดูดซึมความชื้น ทนความร้อนได้สูง และทนต่อปฏิกิริยาเคมีได้ดี และไม่เป็นพิษเมื่อติดไฟ ฉนวนแข็งที่มีใช้งานทางด้านไฟฟ้าแรงสูงได้แก่

2.4.1 การเกิดเบรกดาวน์ในฉนวนแข็ง

ฉนวนแข็งที่มีใช้งานกันอยู่นั้นเมื่อเบรกดาวน์แล้วจะเสียสภาพฉนวนอย่างถาวร ใช้งานอีกไม่ได้ การเกิดเบรกดาวน์ในฉนวนแข็งจะต่างไปจากการเกิดเบรกดาวน์ในฉนวนก๊าซและฉนวนเหลวซึ่งสามารถกลับคืนสู่สภาพฉนวนได้อีก คุณสมบัติของฉนวนแข็งขึ้นอยู่กับปัจจัยภายนอกหลายอย่าง เช่น อุณหภูมิ ความชื้น ระยะเวลาในการทดสอบ ชนิดของแรงดันที่ป้อนเข้า กระแสตรง กระแสสลับ อิมพัลส์ การถ่ายเทประจุภายใน ช่องว่างเล็กๆที่เกิดขึ้นภายในฉนวนแข็งเนื่องจากการเกิดดีสชาร์จบางส่วน และปัจจัยอื่นอีกหลายประการ กลไกเบรกดาวน์ของฉนวนแข็งค่อนข้างซับซ้อน ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขและกระบวนการป้อนแรงดัน ที่สำคัญคือขึ้นอยู่กับช่วงเวลาคงอยู่ของแรงดันหรือสนามไฟฟ้าที่ป้อน การเกิดเบรกดาวน์ในฉนวนแข็งอาจแบ่งออกตามช่วงเวลาของแรงดันที่ป้อนและปรากฏการณ์การเกิดเบรกดาวน์ได้ แสดงดังรูปที่ 2.4.1



รูปที่ 2.4.1 ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าตามช่วงเวลาที่ได้รับแรงดันนั้น

2.4.2 การเบรกดาวน์แบบแท้จริง (Intrinsic Breakdown)

ในกรณีของฉนวนแข็งที่มีคุณสมบัติบริสุทธิ์และเป็นเนื้อเดียวกัน อุณหภูมิและสภาวะแวดล้อมภายนอกถูกควบคุม เมื่อป้อนสนามไฟฟ้าให้กับวัสดุทดสอบนี้จะไม่เกิดการดีสชาร์จภายนอก ดังนั้นเมื่อป้อนสนามไฟฟ้าภายใต้ระยะเวลาสั้นๆ ความเครียดจากสนามไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นจนถึงขอบเขตบนสุด ซึ่งเรียกว่า Intrinsic Strength ซึ่งการเกิด Intrinsic Strength จะขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุและอุณหภูมิเท่านั้น ทฤษฎีที่ใช้ในการอธิบายการเกิด Intrinsic Strength นั้นยังไม่มีคำอธิบายที่สมบูรณ์ แต่ได้มีการทดลองมากมายเพื่อบันทึกค่าเอาไว้สำหรับวัสดุหลายชนิด

การเกิด Intrinsic Breakdown จะเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ภายในเวลา 10^{-8} วินาที ส่วนความเครียดสนามไฟฟ้าที่สามารถทำให้เกิด Intrinsic Breakdown ได้สมบูรณ์นั้นควรมากกว่า 10^6 MV/cm ได้มีข้อสันนิษฐานว่าการเกิด Intrinsic Breakdown จะเกิดขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนภายในฉนวนได้รับพลังงานเพียงพอที่จะข้ามช่องแถบพลังงานต้องห้าม (Forbidden energy band) จากแถบวาเลนซ์ (Valence Band) สู่อะตอมความนำ (Conduction Band) ได้

2.4.3 การเบรกดาวนแบบสตรีมเมอร์ (Streamer Breakdown)

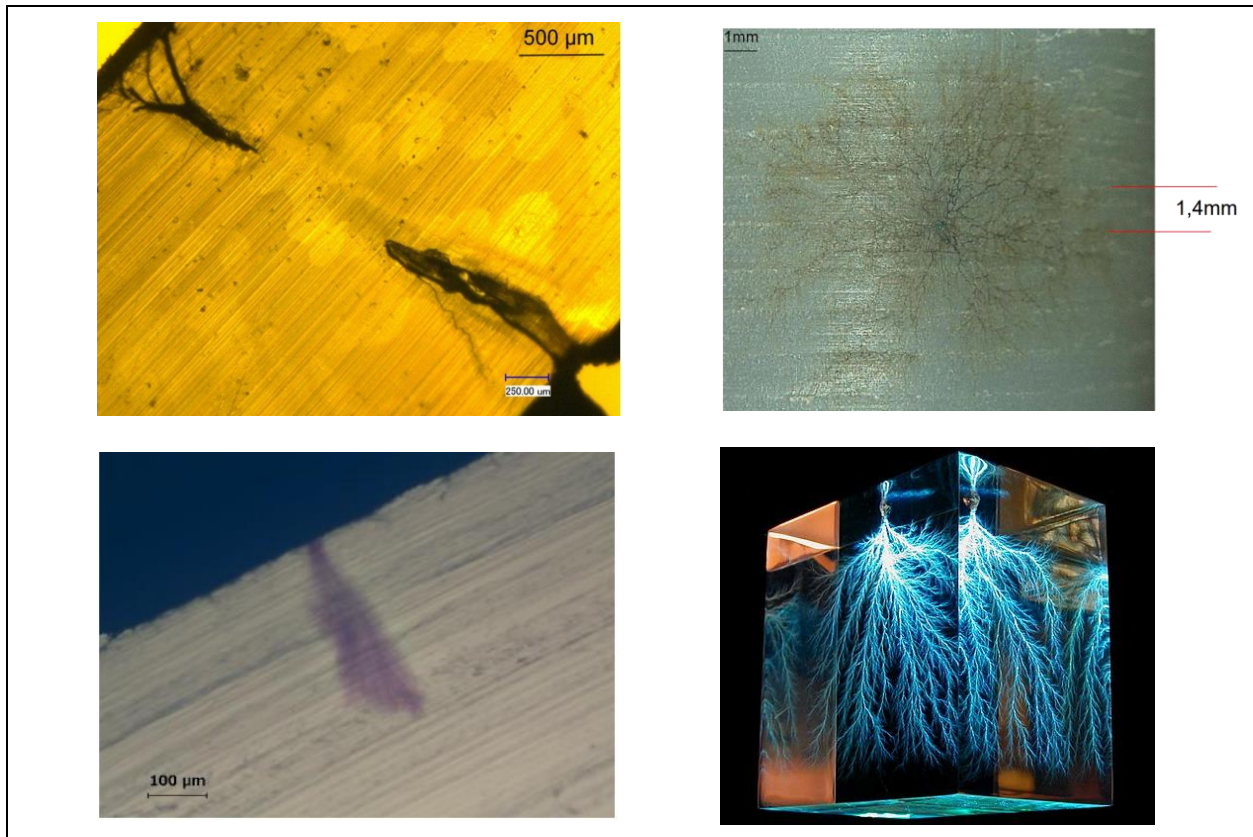
การเกิดเบรกดาวนแบบนี้จะเหมือนกับการเกิดเบรกดาวนในก๊าซ ซึ่งอธิบายได้จากการเกิดไอออนไนเซชัน การเบรกดาวนจะเกิดขึ้นเมื่อมีอิเล็กตรอนจำนวนมากพอเรียงตัวทอดต่อเชื่อมระหว่างแคโทดกับแอโนด อิเล็กตรอนที่อยู่ในฉนวนของแข็งจะเคลื่อนที่โดยเริ่มจากขั้วอิเล็กโตรดที่เป็นแคโทดไปยังแอโนด และในระหว่างทางที่เคลื่อนที่ไปนั้น อิเล็กตรอนจะได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้า ในขณะที่เคลื่อนที่ไป เมื่ออิเล็กตรอนตัวนี้ได้ชนอะตอมอาจจะทำให้อิเล็กตรอนตัวใหม่หลุดจากวงโคจรของอะตอมตัวที่โดนชนได้ ถ้าพลังงานจากการชนมากกว่าค่าศักย์ไอออไนซ์ภายในผลึกของแข็งของอะตอมที่ถูกชน กระบวนการนี้จะเกิดขึ้นซ้ำๆ เป็นทวีคูณ (การเกิดอะวาลานซ์) ในระหว่างที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระมากขึ้น จนเกิดเบรกดาวนขึ้นเมื่อมีปริมาณอิเล็กตรอนในอะวาลานซ์มีจำนวนถึงค่าวิกฤติ

2.4.4 การเกิดเบรกดาวนจากแรงทางกลที่เกิดจากไฟฟ้า (Electromechanical Breakdown)

เมื่อจ่ายสนามไฟฟ้าในระดับสูงๆให้แก่ฉนวนของแข็ง จะทำให้เกิดแรงกดกระทำต่อฉนวนนั้น แรงกดที่เกิดขึ้นเกิดจากแรงดึงดูดระหว่างประจุผิว (Surface charge) ซึ่งเมื่อแรงนี้มีค่ามากจนเกินค่าความคงทนทางกลของฉนวนจะทำให้ฉนวนเกิดการแตกร้าวได้

2.4.5 การเกิดเบรกดาวนจากรอยที่ผิวและการร้าวในฉนวน (Tracking and Treeing)

การเกิด treeing นั้นมักจะเกิดขึ้นในสายเคเบิลที่ฉนวนแข็งเป็นหลัก เช่น PE, XLPE หรือ EPR ลักษณะการเกิดจะเป็นรอยแตกแขนงคล้ายกิ่งไม้แตกกิ่งก้านสาขาออกไป มีผลทำให้เกิดการเบรกดาวนของฉนวนต่อมา treeing อาจจะแบ่งออกเป็น 2 แบบคือ electrical treeing และ water treeing แสดงดังรูปที่ 2.4.2 การเกิด electrical treeing นั้นจะเกิดขึ้นในบริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าค่อนข้างสูงซึ่งสามารถวัดค่าดิสชาร์จบางส่วนได้ ในกรณีของ water treeing จะเกิดขึ้นเมื่อเนื้อฉนวนแข็งมีน้ำผสมอยู่ด้วย ซึ่งอาจจะเกิดจากการะบวนการผลิต เมื่อจุดดังกล่าวได้รับความเครียดสนามไฟฟ้า ตัว water treeing ก็จะก่อตัวขึ้นมาโดยจะเริ่มจากบริเวณที่มีความบกพร่องของเนื้อฉนวนก่อน แนวของ treeing จะอยู่ในแนวเดียวกับสนามไฟฟ้า

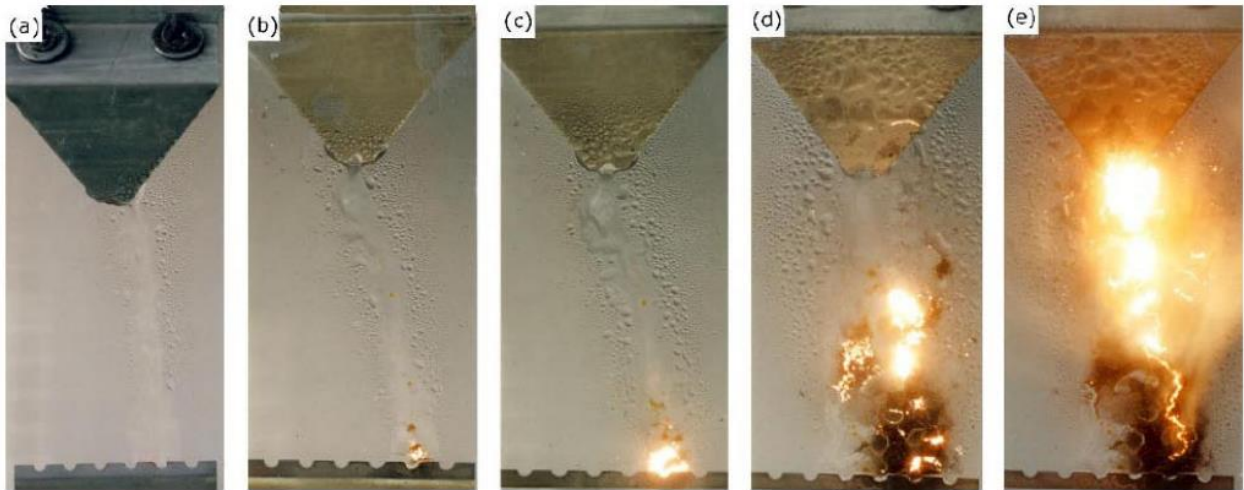


รูปที่ 2.4.2 การเกิด tracking บนลูกถ้วยฉนวนโพลีเมอร์ที่ถูกติดตั้งใช้งานในบริเวณมลภาวะ

การเกิด tracking จะเป็นการฟอร์มตัวทางเดินตัวนำถาวรบนผิวของฉนวน โดยมีกจะเกิดจากความชื้นหรือน้ำค้าง รวมตัวกับสิ่งเปราะเปื้อนเช่น ไอเกลือ ผุนละออง สารเคมี กลายเป็นฟิล์มตัวนำบนผิวฉนวน ทำให้กระแสสามารถไหลผ่านได้ซึ่งจะเรียกกระแสดังกล่าวว่า กระแสรั่วไหล กระแสรั่วไหลทำให้เกิดความร้อนขึ้น ฉนวนก็จะแห้งลง ความร้อนที่เกิดขึ้นที่แต่ละจุดบนผิวฉนวนมีค่าไม่เท่ากัน เกิดการแห้งเฉพาะบางส่วน และจะมีแรงดันตกคร่อมบริเวณดังกล่าว ซึ่งอาจก่อให้เกิดการสปาร์คได้

2.4.6 การสึกกร่อน (Erosion)

ในการคายประจุที่พื้นผิว หากเกิดสารตั้งต้นจากการสลายตัวหรือเปื่อยของวัสดุจำพวกสารอินทรีย์ เช่น กระจก หากไม่มีคาร์บอนตัวนำเหลืออยู่บนพื้นผิว กระบวนการนี้เป็นเพียงแต่การแหงงออกของพื้นผิวเท่านั้น ไม่มีอันตรายใดๆ แต่หากเกิดคาร์บอนตัวนำ แสดงดังรูปที่ 2.4.3 กระบวนการ (a) สารปนเปื้อนไหลลงบนพื้นผิว (b) เกิดการดิสชาร์จที่ผิว คือ เกิดการอาร์คแบบแถบแห้ง (dry band) (c) เกิดประกายไฟ คือ การจุดระเบิด หรือเริ่มเกิดรอยร้าว (tracking) (d) เกิดรอยร้าว (tracking) เช่น การเกิดเส้นทางคาร์ไบด์ และ (e) การดิสชาร์จตามรอยร้าวขยายตัวจนเกิดเบรกควาน์สมบูรณ์เชื่อมระหว่างอิเล็กโทรด



รูปที่ 2.4.3 การเบรกดาวนที่เริ่มจากพื้นผิวเสียดสภาพจนก่อเส้นทางคาร์ไบด์ (carbon)

2.4.7 การเกิดเบรกดาวนจากผลทางความร้อน (Thermal Breakdown)

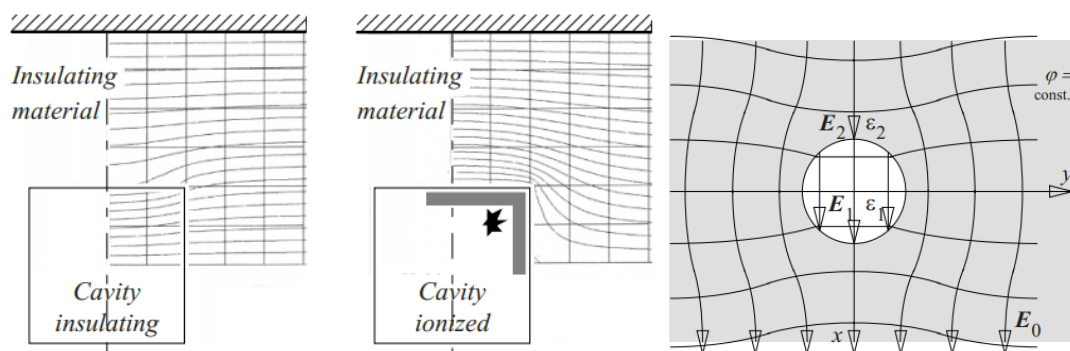
เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับฉนวนของแข็งทำให้เกิดการนำกระแส (Conduction current) ขึ้น ค่าของกระแสจะเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิ กระแสจะเพิ่มเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ความร้อนที่เกิดเนื่องจากการนำบางส่วนจะถ่ายเทออกไปสู่บรรยากาศ ส่วนที่เหลือก็จะทำให้อุณหภูมิของฉนวนแข็งเพิ่มขึ้นอีก ถ้าหากอัตราความร้อนที่เกิดขึ้นมากกว่าความร้อนที่ถูกถ่ายเทออกไปจะทำให้ฉนวนแข็งมีอุณหภูมิสะสมเพิ่มขึ้นจนเกิดเบรกดาวนได้ เมื่อฉนวนได้รับแรงดัน V_1 อุณหภูมิของฉนวนจะเพิ่มขึ้นเป็น T_1 ถ้าอุณหภูมิวิกฤตเบรกดาวนของฉนวนมีค่าน้อยกว่า T_1 ฉนวนก็จะเบรกดาวน ถ้าอุณหภูมิวิกฤตของฉนวนสูงกว่า T_1 ฉนวนก็จะยังไม่เบรกดาวน เมื่อเพิ่มแรงดันให้กับฉนวนเป็น V_2 อุณหภูมิของฉนวนก็จะเพิ่มเป็น T_2 และหากเพิ่มแรงดันให้ฉนวนอีกเป็น $V_2 + \delta V$ ฉนวนก็จะเกิดเบรกดาวนขึ้น สังเกตจากการเพิ่มแรงดันเพียงนิดเดียวทำให้เกิดการเพิ่มของอุณหภูมิเป็นอย่างมาก ค่าแรงดัน V_2 อาจจะนิยามให้เป็นค่าแรงดันสูงสุดที่สามารถป้อนให้กับฉนวนได้โดยที่ฉนวนไม่เกิดเบรกดาวนเนื่องจากอุณหภูมิสะสมในเนื้อฉนวน

2.4.8 การเกิดเบรกดาวนเนื่องจากการดิสชาร์จภายใน (Cavity Breakdown)

วัสดุฉนวนที่ใช้งานอยู่โดยทั่วไปจะมีโพรงหรือช่องว่างอยู่ภายในเนื้อฉนวนหรือตรงบริเวณรอยต่อระหว่างฉนวนกับอิเล็กโตรด โดยส่วนมากโพรงนี้จะมีก๊าซหรือของเหลวบรรจุอยู่ ซึ่งมีความคงทนต่อค่าแรงดันเบรกดาวนได้น้อยกว่าของแข็ง นอกจากนี้ค่าความจุไฟฟ้าของสิ่งแปลกปลอมที่อยู่ภายในฉนวนแข็งส่วนมากแล้วจะมีค่าน้อยกว่าฉนวนแข็ง จึงเป็นผลให้ความเครียดสนามไฟฟ้าภายในโพรงมีค่าสูงกว่าเนื้อฉนวน ดังนั้นภายใต้การใช้งานที่ความเครียดสนามไฟฟ้าปกติของฉนวน แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมโพรงนี้จะมีค่ามากกว่าแรงดันเบรกดาวนของโพรง ทำให้เกิดการเบรกดาวนภายในโพรงก่อนที่จะนำมาสู่การเบรกดาวนของเนื้อฉนวนต่อไป

การเกิดดิสชาร์จภายใน (หรือเรียกว่าดิสชาร์จบางส่วน หรือ Partial Discharge) จะทำให้เกิดปรากฏการณ์บางอย่างในลักษณะเดียวกับการเกิด treeing ในเนื้อฉนวน คือเมื่อเกิดการเบรกดาวนในโพรงอากาศที่อยู่ภายในเนื้อฉนวนจะมีอิเล็กตรอน และไอออนบวกเกิดขึ้น โดยอิเล็กตรอนและไอออนบวกเหล่านี้จะมีพลังงานอยู่ภายในตัว และเมื่ออิเล็กตรอนหรือไอออนบวก เคลื่อนที่ไปถึงผิวของโพรงช่องว่างก็อาจจะทำลายพันธะทางเคมีที่ผิวฉนวน

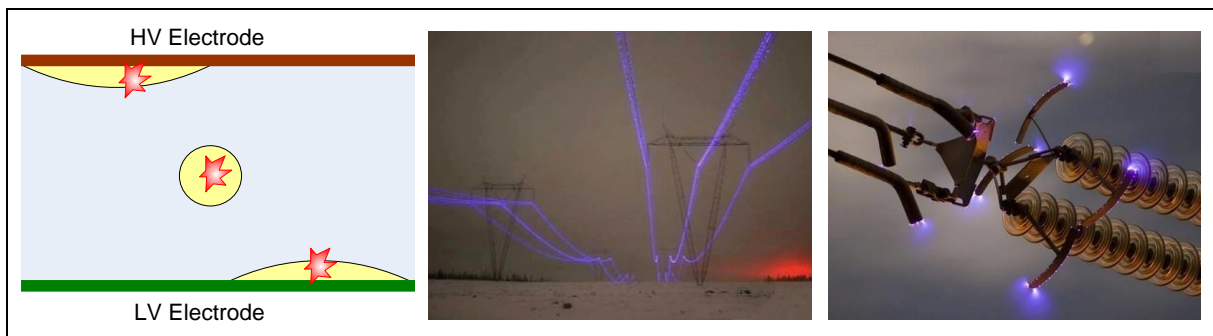
ซึ่งโพรงอาจจะเป็นของเหลว ของแข็ง หรือ ก๊าซ ก็ได้ เช่น **โพรงฉนวนเป็นก๊าซ** ในฉนวนมักมีโพรงหรือฟองก๊าซเกิดขึ้น เช่น การหล่อพลาสติก การเทหุ้มด้วยสารสังเคราะห์ หรือกระบวนการชุบน้ำยาฉนวน ความเครียดสนามไฟฟ้าโคโรนาเริ่มเกิด หรือเบรกดาวนของการฉนวนจึงกำหนดด้วยความคงทนต่อแรงดันของก๊าซในโพรง ซึ่งในบางกรณีสามารถคำนวณได้ ถ้าทราบชนิดของก๊าซ ความดัน และมิติของโพรง หรือ **โพรงฉนวนเป็นสิ่งเจือปน** กระบวนการหล่อหรือหุ้มด้วยฉนวนอาจมีสิ่งเจือปน เช่น ผงฝุ่นกระดาษ เศษใยผ้า หรือ เศษ วัสดุอื่นใด ซึ่งสิ่งเจือปนเหล่านี้จะมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าน้อยกว่าฉนวน หลังจากเกิดเบรกดาวน ในโพรงสิ่งเจือปนจะเกิดก๊าซขึ้นภายในโพรง ค่าแรงดันเบรกดาวนจะลดต่ำลงหลังจากที่ได้เกิดเบรกดาวนครั้งแรกแล้ว หรือ **โพรงฉนวนเป็นน้ำมัน** เกิดขึ้นระหว่างชั้นของการฉนวนด้วยกระดาษชุบน้ำมัน เช่น ในกรณี ของขดลวดหม้อแปลง หรือเคเบิล เป็นต้น ความเครียดสนามไฟฟ้าในโพรงอาจคำนวณได้เช่นเดียวกับ กรณีของโพรงก๊าซ นั่นคือ ความเครียดสนามไฟฟ้าในโพรงน้ำมัน E_1 จะเป็น E_2/ϵ_1 เท่าของความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวน E_2 ดังรูปที่ 2.4.4 ในกรณีที่โพรงแบนตั้งฉากกับแนวสนามไฟฟ้า ถ้าเกิดเบรกดาวนในโพรง น้ำมันก็จะเกิดก๊าซขึ้นในโพรงและเกิดดิสชาร์จภายในขึ้น



รูปที่ 2.4.4 สนามไฟฟ้าของโพรงอากาศที่ติดกับฉนวนแข็ง

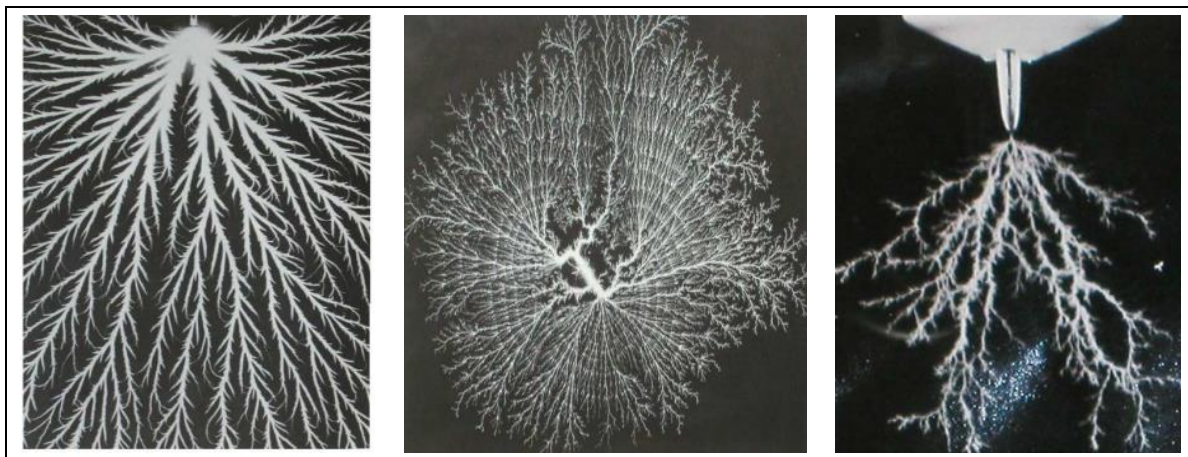
2.5 การดิสชาร์จบางส่วน PD (Partial Discharge)

คำนิยามการดิสชาร์จบางส่วน PD (Partial Discharge) ตามมาตรฐาน IEC 60270 กล่าวว่า PD คือ การดิสชาร์จทางไฟฟ้าเฉพาะที่ซึ่งเชื่อมระหว่างฉนวนกับตัวนำเพียงบางส่วน และจะเกิดหรือไม่เกิดขึ้นใกล้กับตัวนำก็ได้ โดยปกติแล้ว PD จะพัฒนาในช่องว่างอากาศหรือบนพื้นผิวฉนวน เนื่องจากจุดบกพร่องในระบบฉนวน แสดงดังรูปที่ 2.5.1 (ซ้าย) แถบสีน้ำตาลด้านบนของภาพแทนอิเล็กโทรดศักย์สูง และ แถบสีเขียวด้านล่างของภาพแทนอิเล็กโทรดศักย์ต่ำ การดิสชาร์จแสดงด้วยการระเบิดสีแดงในจุดบกพร่องของฉนวนพื้นที่สีเหลือง เช่น รูปที่ 2.5.1 (ขวา) แสดงการเกิดดิสชาร์จในอากาศเนื่องจากความเครียดสนามไฟฟ้าที่สูงบนสายส่งไฟฟ้าแรงสูงทำให้อากาศในขณะนั้นเสียสภาพความเป็นฉนวนจึงเกิดปรากฏการณ์โคโรน่า



รูปที่ 2.5.1 การเกิด PD ตาม IEC 60270

เนื่องจาก PD มีความสัมพันธ์กับอายุของฉนวนจึงเป็นสาเหตุและผลกระทบโดยตรงของการเสื่อมสภาพของฉนวน ดัง รูปที่ 2.5.2 แสดงเส้นทางของการเกิด PD ในฉนวนประเภทต่างๆ

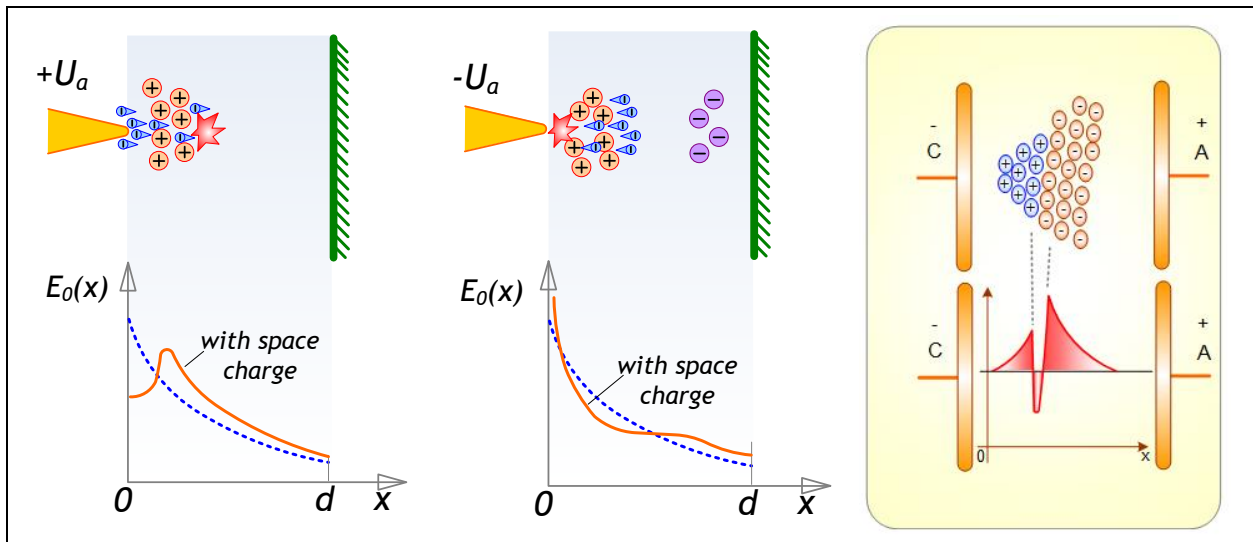


รูปที่ 2.5.2 เส้นทาง การเกิด PD ในก๊าซ ของเหลว และ ของแข็ง ตามลำดับ

2.5.1 เงื่อนไขการเกิด PD

- 1) สนามไฟฟ้าในพื้นที่นั้นต้องถึงสนามเริ่มต้นวิกฤตที่เกิดการเสียสภาพความเป็นฉนวน
- 2) ต้องมีอิเล็กตรอนอิสระจำนวนหนึ่งเพื่อเริ่มการดิสชาร์จแบบอะวาแลนซ์ ตามที่ได้กล่าวไว้แล้วในทฤษฎีทาวเซนต์ซึ่งกระบวนการหลักเพื่อให้ได้มาซึ่งอิเล็กตรอนเริ่มต้นนี้ มาจากการแตกตัวเป็นไอออนด้วยโฟตอน หรือ การหลุดออกของโฟตอนจากข้ออิเล็กโทรดโดยสนามไฟฟ้า

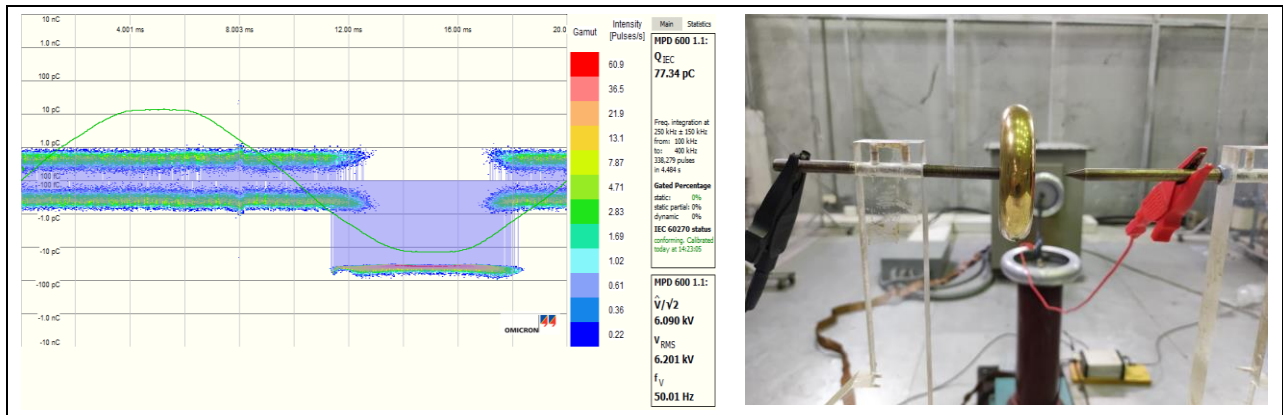
ซึ่งเมื่อเกิด PD ได้แล้วลักษณะของรูปแบบการการเกิดดิสชาร์จ (PRPD) ก็จะแตกต่างกันเนื่องจากคุณสมบัติทางสถิติของกระบวนการเกิดอิเล็กตรอนเริ่มต้น หรือก็คือ ความยากง่ายในการเกิดของอิเล็กตรอนเริ่มต้น ซึ่งขึ้นอยู่กับวัสดุฉนวน สภาพสนามไฟฟ้า สภาพแวดล้อม ฯ และอีกคุณสมบัติที่ส่งผลต่อ PRPD คือ อิทธิพลของชั่วแรงแรงดัน แสดงดังรูปที่ 2.5.3 (บน) แสดงการเกิดดิสชาร์จในอากาศแบบโคโรนาชั่ววอก กลุ่มอิเล็กตรอนอะวาลานซ์จะพุ่งเข้าหาปลายแหลมอิเล็กโตรดเนื่องจากสนามไฟฟ้าชั่ววอกที่สูง ซึ่งกลุ่มอิเล็กตรอนเหล่านั้นเคลื่อนจากที่เดิม บริเวณที่เป็นกลางจึงทิ้งประจุบวกที่เคลื่อนที่ได้ช้ากว่า ซึ่งประจุบวกเหล่านี้จะเคลื่อนที่ไปอย่างช้าๆ ทางด้านกราวด์ (พื้นสีเขียวด้านขวาของภาพ) ทำให้เกิดลักษณะเหมือนประจุบวกที่เคลื่อนที่ช้าๆ กองตัวค้างอยู่บริเวณหนึ่งขณะเดียวกับอิเล็กตรอนที่เล็ก เบา เคลื่อนที่ได้ไว เมื่อเทียบกับประจุบวก นั้นไปค้างกองอยู่บริเวณปลายแหลมอิเล็กโตรดชั่ววอกแล้ว กล่าวโดยย่อคือ สนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปจากลักษณะประจุค้างดังที่ได้กล่าวนี้ ทำให้สนามไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงจากเดิม ดังรูปที่ 2.5.3 (ล่าง) จะเห็นได้ว่าหากไม่มีผลของประจุค้างสนามไฟฟ้าจะเป็นแบบเส้นประ แต่เมื่อมีผลของประจุค้าง ทำให้สนามไฟฟ้าปลายแหลมชั่ววอกนี้ต่ำลงกว่าเดิม เกิด PD ได้ง่ายขึ้น



รูปที่ 2.5.3 ผลประจุค้างปลายแหลมชั่ววอก ปลายแหลมชั่วลบ และ หมอกประจุค้าง ตามลำดับ

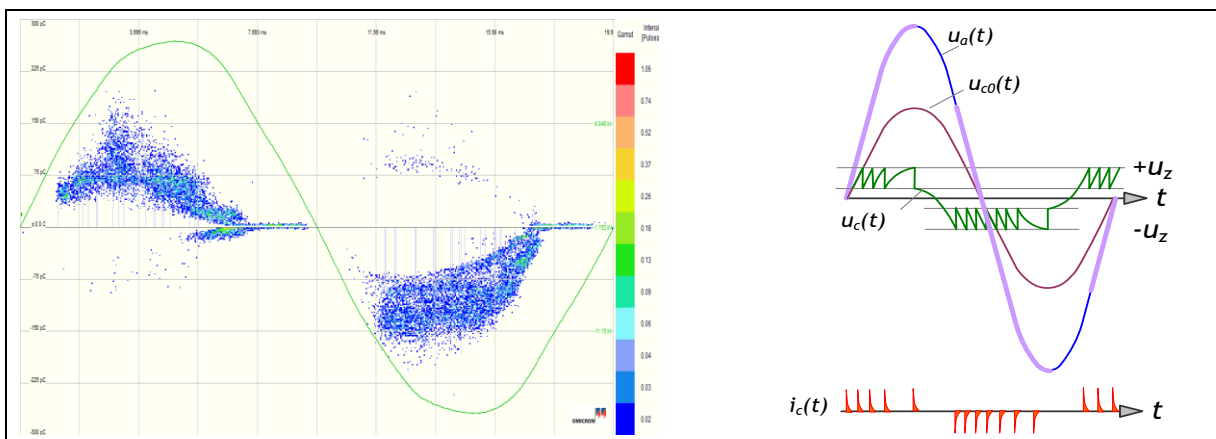
ในลักษณะเดียวกัน ปลายแหลมชั่วลบในรูปที่ 2.5.3 (กลาง) อิเล็กตรอนที่เกิดจากไอออนไนเซชันเคลื่อนที่ไปหาระนาบกราวด์ ซึ่งเป็นบริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าต่ำ แต่ศักย์สูงกว่าปลายแหลมชั่วลบ อิเล็กตรอนอาจเกาะตัวบนโมเลกุลได้และรวมตัวเป็นกลางที่อิเล็กโตรดปลายแหลม ส่วนประจุไอออนบวกเคลื่อนที่ได้ช้าเข้าหาอิเล็กโตรดปลายแหลมจะค้างอยู่บริเวณหน้าปลายแหลม ทำให้สนามไฟฟ้าที่หน้าปลายแหลมมีความเครียดเพิ่มสูงขึ้น ดังกราฟรูปที่ 2.5.3 (กลาง) แต่สนามไฟฟ้าระหว่างหมอกประจุค้างกับระนาบกราวด์จะสม่าเสมอดีขึ้นเนื่องจากประจุค้างดังแสดงในรูปที่ 2.5.3 (ขวา) สนามภายในหมอกประจุค้างจะหักล้างกัน จึงทำให้เกิดเบรกดาวนได้ยากขึ้น ฉะนั้นผลของประจุค้างจะทำให้แรงดันเบรกดาวนชั่วลบมีค่าสูงขึ้น

สามารถยืนยันได้ดังรูปที่ 2.5.4 เป็นการขึ้นแรงดันกระแสสลับจนเกิด PD ที่ปลายแหลม และอิเล็กโตรดโรกอฟสกีต่อลงกราวด์ ซึ่ง PRPD เกิดแต่ซีกแรงดันลบ



รูปที่ 2.5.4 ผลของขั้วแรงดันของปลายแหลมแรงดันสูง AC

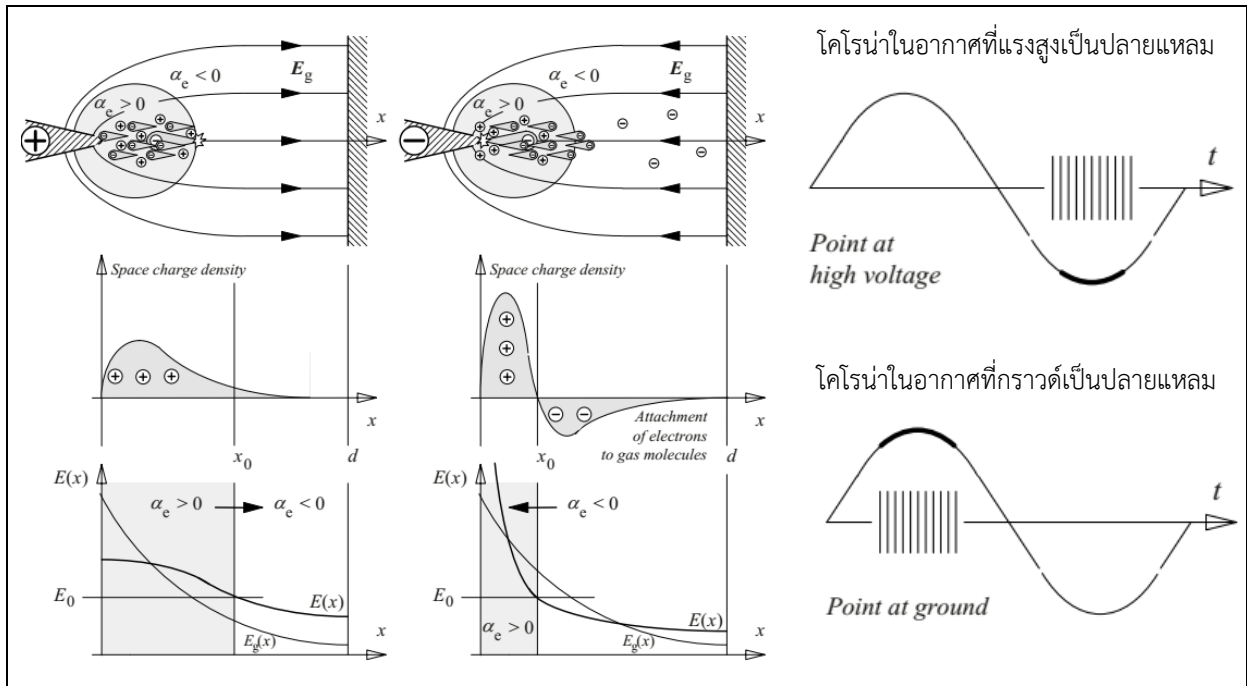
รวมถึงยืนยันได้ดังรูปที่ 2.5.5 (ซ้าย) เป็นการจำลองสัญญาณ PD แบบเกิดการดิสชาร์จภายใน ซึ่งจะเห็นว่าเกิด PD ทั้งสองฝั่งไม่เท่ากัน ฝั่งขั้วแรงดันลบจะสูงกว่าแรงดันขั้วบวกเนื่องจากผลของประจุค้างจะทำให้แรงดันเบรกดาวนซ์วลบมีค่าสูงขึ้น หากเป็นตามทฤษฎีดังรูปที่ 2.5.5 (ขวา) ควรจะเกิด PD ขึ้นทั้งสองซีกของแรงดันขนาดเท่าๆกัน เมื่อแรงดันภายในโพรงทำให้เกิดสนามไฟฟ้าวิกฤตของอากาศภายในโพรงนั้นซึ่งจะทำให้เกิดการดิสชาร์จ กล่าวคือ เมื่อแรงดันภายในโพรงอากาศ V_c ซึ่งมีเฟสทางไฟฟ้าตรงกับ V_a คือเนื้อฉนวนส่วนใหญ่ที่มีความคงทนทางไฟฟ้ามากกว่าโพรงอากาศภายใน เมื่อแรงดันในโพรง V_c ขึ้นถึงค่าสนามวิกฤตของอากาศภายในโพรงจะเกิดการเบรกดาวนซ์เป็นการเสียสภาพของอากาศในโพรงอากาศนั้นจนแรงดันต่ำลงจนทำให้การดิสชาร์จหยุดลง ซึ่งทั้งสองซีกของแรงดันจะมีลักษณะเหมือนกัน



รูปที่ 2.5.5 ผลของขั้วแรงดันของการดิสชาร์จภายใน

การแพร่กระจายของลำสตรีมเมอร์ในพื้นที่สนามไฟฟ้าสูงด้วยค่าสัมประสิทธิ์ไอออนไนเซชันที่ขั้วบวก (α process) ทำให้เกิดการก่อตัวของประจุค้างขั้วบวก โดยไอออนบวกที่เหลืออยู่ในบริเวณสนามไฟฟ้าสูง (ในพื้นที่แรงเงางกลม) และการก่อตัวของประจุค้างขั้วลบโดยการเกาะของอิเล็กตรอนในบริเวณที่สนามไฟฟ้าต่ำ (ด้านขวาของปลายแหลมขั้วลบ) กราฟของรูปที่ 2.5.6 (ล่าง) เส้นบางแสดงความเข้มสนามไฟฟ้า $E(x)$ ตามระยะทางห่างจากปลายแหลมแนวแกนนอน สำหรับประจุอิสระที่ค้างอยู่ด้านหลัง (background) และเส้น

หนาแสดงความเข้มสนามไฟฟ้าสำหรับประจุค้างส่วนใหญ่ (dominate) โดยมีการขยับของขอบเขตไอออไนเซชัน (α process) ดังพื้นที่แรงเงา โดย E_0 คือความเคียดสนามไฟฟ้าที่เกิด PD



รูปที่ 2.5.6 ผลของชั่วแรงดันปลายแหลมชั่ววอกและลบ

2.5.2 ลักษณะของปรากฏการณ์ PD

ลักษณะของปรากฏการณ์การ PD ที่เกิดขึ้นเนื่องจากผลกระทบของชั่วและกลไกการคายประจุต่างๆ เกิดได้แบบ ภายใน และภายนอก ซึ่งแบ่งได้เป็น 4 ลักษณะตามการดิสชาร์จ คือ

1. การดิสชาร์จระดับไมโคร (Micro discharges)

การดิสชาร์จระดับไมโครเป็นการเกิด PD ในโพรงอากาศเล็กๆ ระดับไมโคร ซึ่งมีความเข้มของสนามไฟฟ้า (electric field strength) ต่ำกว่าเกณฑ์การเกิดเบรกดาวน์ ซึ่งมีการกระจายของสนามไฟฟ้าที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันทำให้เกิดการคายประจุเล็กๆ ขึ้นซึ่งจะหายไป (evaporates) หรือเมื่อเกิดแล้วก็จะดับไปเอง เนื่องจากการดิสชาร์จที่มีขนาดเล็กมาก ส่งผลให้แรงดันตกคร่อมในช่องว่างเพิ่มขึ้น จนอาจเกิดการดิสชาร์จขยายตัว [48]

2. การดิสชาร์จแบบทริเชล (Trichel discharges)

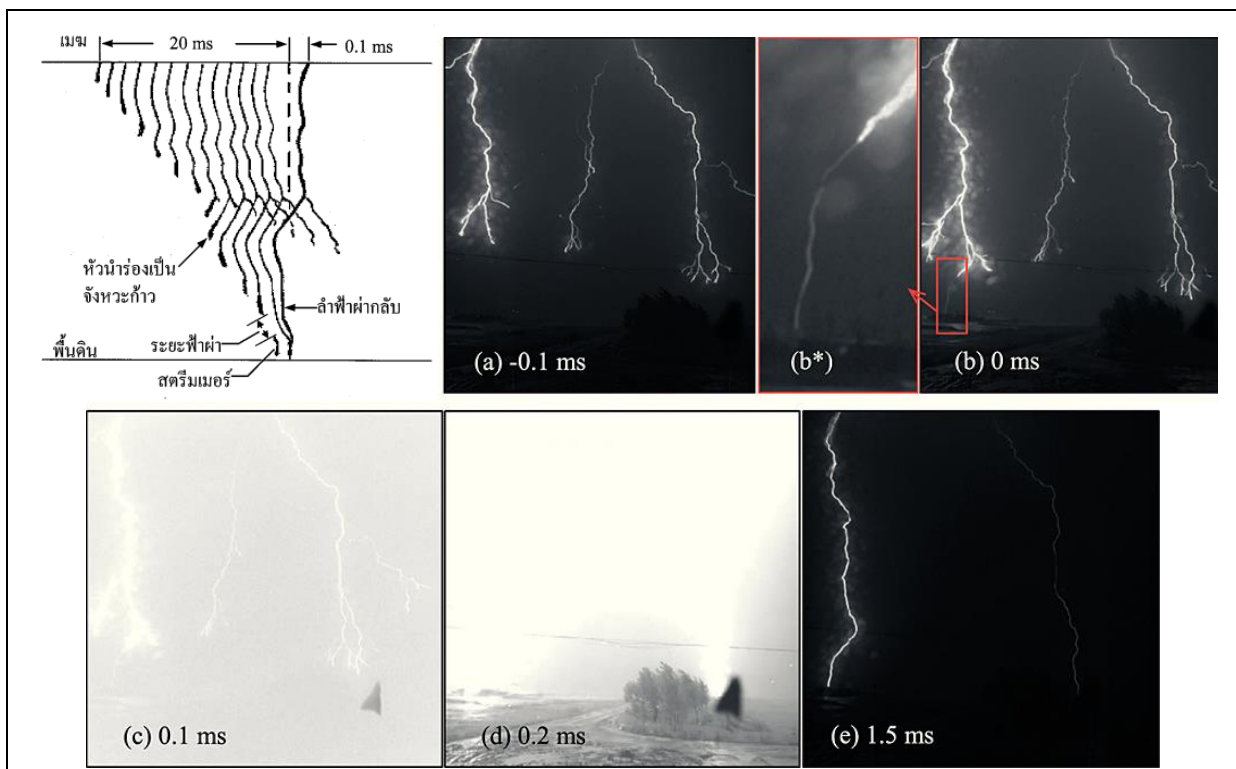
เป็นการดิสชาร์จอย่างต่อเนื่อง โดยอัตราการเกิดซ้ำจะเพิ่มขึ้นตามแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากความเร็วของไอออนดริฟท์ที่เพิ่มขึ้น จากการเพิ่มขึ้นของประจุค้างชั่วลบที่สามารถลดความเข้มสนามไฟฟ้าด้านหน้าของอิเล็กโตรดปลายแหลมชั่วลบได้ ซึ่งจะทำให้การเริ่มเกิดการคายประจุนั้นดับลง ซึ่งการดิสชาร์จนี้จะเกิดขึ้นอีกครั้งหลังจากที่ไอออนลบเคลื่อน (drift) ไปที่ชั่ววอก หากการระบาย (drain) ประจุลบเหล่านี้เท่ากับการรวมตัวกันใหม่ของโมเลกุลที่เป็นกลาง (re-germation) การดิสชาร์จแบบไม่ต่อเนื่องจะเริ่มเกิดการดิสชาร์จอย่างต่อเนื่อง [13]

3. การดีสชาร์จแบบสตรีมเมอร์ (Steamer discharges)

เริ่มจากการเกิดไอออนไนเซชันตามทฤษฎีของทาวเซนต์ อิเล็กตรอนที่อยู่ในฉนวนจะเคลื่อนที่โดยเริ่มจากหัวอิเล็กโตรดที่เป็นแคโทดไปยังแอโนด อิเล็กตรอนจะได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้าในขณะที่เคลื่อนที่ไป เมื่ออิเล็กตรอนตัวนี้ได้ชนอะตอมอาจจะทำให้อิเล็กตรอนตัวใหม่หลุดจากวงโคจรของอะตอมตัวที่โดนชนได้ ถ้าพลังงานจากการชนมากกว่าค่าศักย์ไอออไนซ์ของฉนวนอะตอมที่ถูกชน กระบวนการนี้จะเกิดซ้ำๆ เป็นทวีคูณ (การเกิดอะวาลานซ์) แผ่นโฟตอนไปบริเวณข้างเคียง ทำให้เกิดอะวาลานซ์ขึ้นอีก ในระหว่างที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ก็ทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระมากขึ้นอีก เกิดอะวาลานซ์อีก จนเกิดเบรกควานซ์ขึ้นเมื่อมีปริมาณอิเล็กตรอนในอะวาลานซ์มีจำนวนถึงค่าวิกฤติ

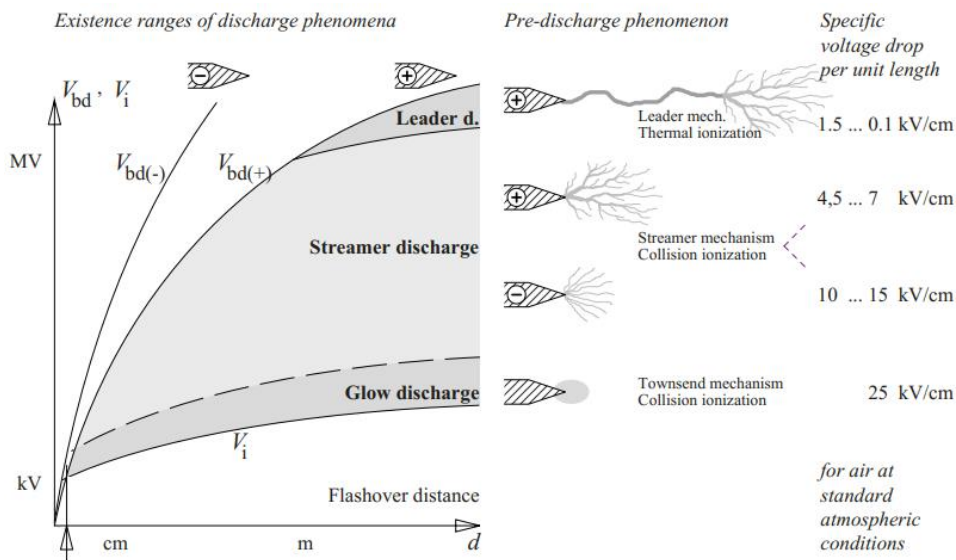
4. การดีสชาร์จแบบหัวนำร่อง (Leader discharges)

เช่นเดียวกับการเกิดฟ้าผ่าที่หัวนำร่องจะเกิดจากการเกิดไอออนไนเซชันของอากาศ มีทิศทางลงสู่พื้นโลกในลักษณะจังหวะก้าว (stepped leader) แบบสุ่มๆ ดังรูปที่ 2.5.7 มีช่วงก้าวตั้งแต่ 3 เมตร ถึง 200 เมตร เฉลี่ยช่วงก้าวประมาณ 50 เมตร ในทิศทางที่แตกตัวง่ายที่สุด ความเร็ว 10-100 km/s แต่ละจังหวะที่ก้าวจะหยุดพักราว 10-50 us ก่อนที่จะกระโดดก้าวต่อไป เมื่อหัวนำร่องเข้ามาใกล้พื้นโลก จะทำให้เกิดประจุเหนี่ยวนำที่พื้นโลก ที่ยอดแหลมของอาคาร สิ่งปลูกสร้าง ต้นไม้ เป็นต้น เกิดไอออนไนซ์เป็นสตรีมเมอร์ มีความยาว 1-100 m (เฉลี่ย 20 m) วิ่งเข้าหาหัวนำร่อง จนมาพบกันจะเกิดเป็นลำฟ้าผ่า (main stroke) มีแสงจ้าจากพื้นโลกวิ่งไปหาก้อนเมฆด้วยความเร็วสูงกว่า $\sim 50,000$ km/s ตามแนวที่หัวนำร่องกรุยทางลงมา การเคลื่อนที่ของประจุในลำฟ้าผ่าคือ กระแสฟ้าผ่านั่นเอง



รูปที่ 2.5.7 การดีสชาร์จแบบหัวนำร่องตามปรากฏการณ์ฟ้าผ่า

ลักษณะการเริ่มเกิดดิสชาร์จจนเบรกดาวนของฉนวนอากาศแบบปลายแหลมกับระยะนาบ แรงดันเริ่มต้น และแรงดันเบรกดาวนขึ้นอยู่กับระยะวาบไฟ d สำหรับปลายแหลมซี่บวกและลบดังรูปที่ 2.5.8 (ซ้าย) เนื่องจากผลของซี่แรงดันดังที่ได้กล่าวมาแล้ว แรงดันเบรกดาวนซี่ลบจะสูงกว่าซี่บวก และหากแรงดันต่ำกว่าความคงทนของฉนวนนั้นก็จะไม่เสียสภาพความเป็นฉนวนซึ่งจะเกิดเพียง PD 3 ลักษณะ คือ ลักษณะแบบหัวน้ำร่อง , สตรีมเมอร์ และแบบขยายตัว (glow discharge) ปรากฏการณ์ที่เริ่มเกิดการดิสชาร์จและแรงดันตกคร่อมที่สอดคล้องกับช่องทางการดิสชาร์จ (channel) แสดงดังรูปที่ 2.5.8 (ขวา)



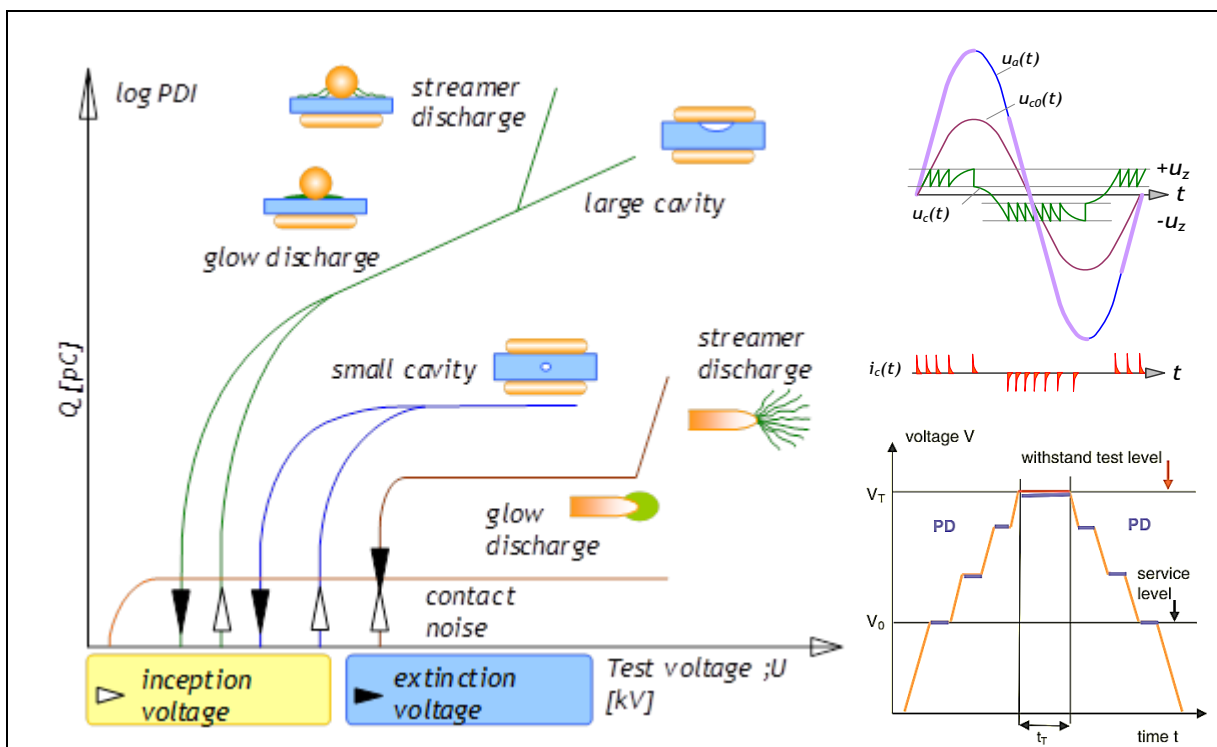
รูปที่ 2.5.8 ลักษณะการเริ่มเกิดดิสชาร์จของปลายแหลมกับระยะนาบ

โดยลักษณะของปรากฏการณ์ PD แสดงได้ดังรูปที่ 2.5.9 คือการดิสชาร์จแบบโคโรน่า แบบที่ผิว และแบบภายในทั้งสามแบบนี้จะมีลักษณะการเกิด PD แบบเดียวกันคือ หากดิสชาร์จรุนแรงจะเป็นลักษณะหัวน้ำร่อง ที่เกิดการแตกตัวของไอออนด้วยการไอออไนซ์ด้วยอุณหภูมิ ร่องลงมาก็เป็นการดิสชาร์จแบบสตรีมเมอร์ที่ไอออไนซ์ด้วยการชนกัน และดิสชาร์จเบาที่สุด คือการดิสชาร์จแบบขยายตัว (glow discharge)

	การดิสชาร์จที่ปลายแหลมในอากาศ	การดิสชาร์จที่ผิว	การดิสชาร์จภายใน
การดิสชาร์จแบบหัวน้ำร่อง	 กระบวนการหัวน้ำร่อง การไอออไนซ์ด้วยอุณหภูมิ	 กระบวนการหัวน้ำร่อง การไอออไนซ์ด้วยอุณหภูมิ	 กระบวนการหัวน้ำร่อง การไอออไนซ์ด้วยอุณหภูมิ
การดิสชาร์จแบบสตรีมเมอร์	 กระบวนการสตรีมเมอร์ การไอออไนซ์ด้วยการชน	 กระบวนการสตรีมเมอร์ การไอออไนซ์ด้วยการชน	 กระบวนการสตรีมเมอร์ การไอออไนซ์ด้วยการชน
การดิสชาร์จแบบขยายตัว	 กระบวนการทาวเซนต์ การไอออไนซ์ด้วยการชน	 กระบวนการทาวเซนต์ การไอออไนซ์ด้วยการชน	 กระบวนการทาวเซนต์ การไอออไนซ์ด้วยการชน

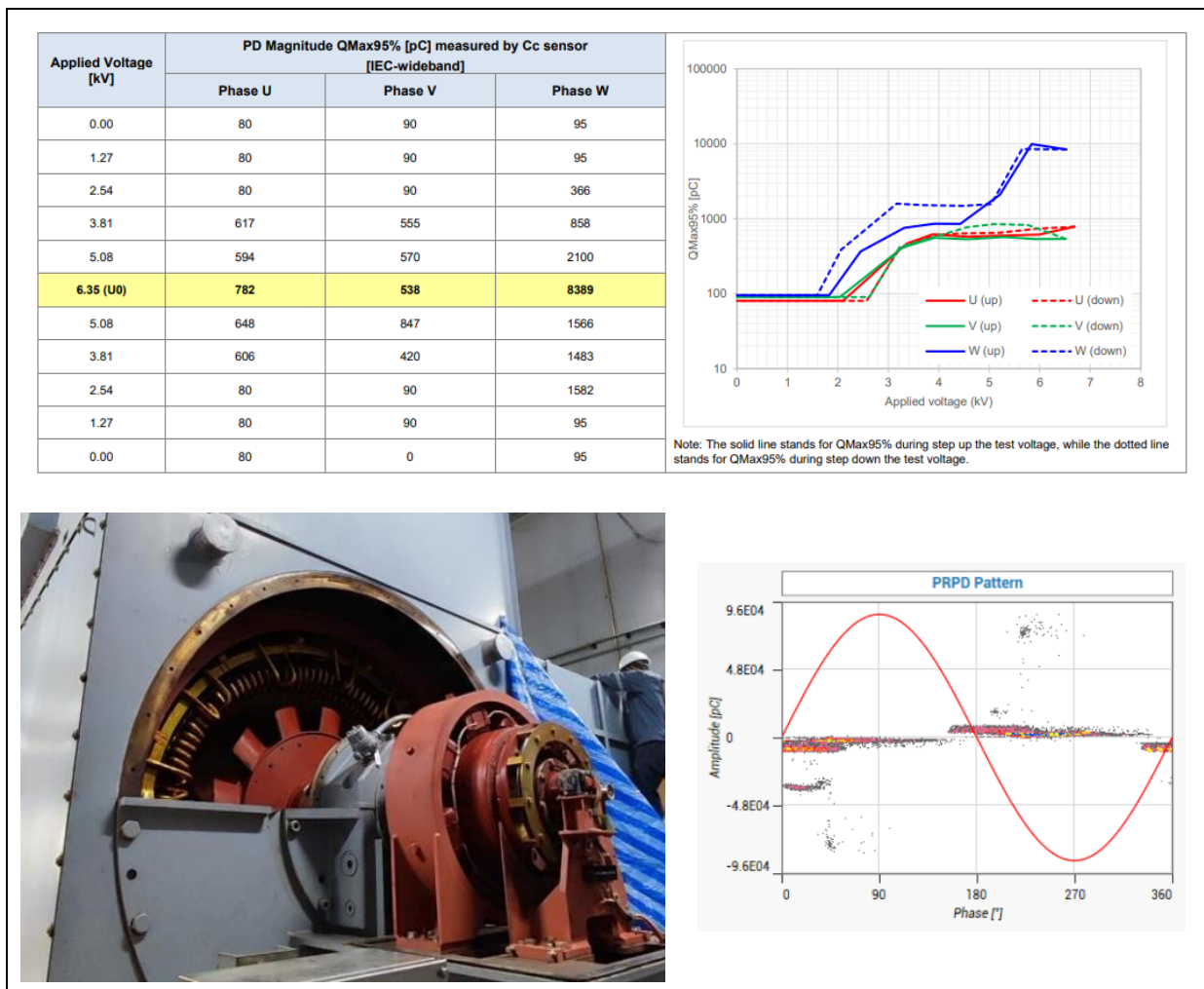
รูปที่ 2.5.9 ลักษณะของปรากฏการณ์ PD

การเกิด PD ลักษณะต่างๆ นี้ เมื่อถึงแรงดันเริ่มเกิด (inception - PDIV) และดับลงของ PD (extinction - PDEV) จะมีลักษณะกราฟขนาดของประจุ PD เทียบกับแรงดันแตกต่างกันแสดงดังรูปที่ 2.5.10 ดังกราฟแกนตั้งเป็นสเกล logarithm แกนนอนเป็นแรงดันที่ป้อนกับฉนวนจนเกิด PD อาจเป็นแรงดันการแสสลับดังรูปที่ 2.5.10 (ขวา) หรือเป็นการขึ้นแบบขั้นบันไดตามมาตรฐานการทดสอบก็ได้ ในกราฟรูปที่ 2.5.10 (ซ้าย) ลูกศร PDIV จะเป็นสีขาวยุ และ PDEV จะเป็นสีดำ เส้นสีเขียวแสดงการเกิด PD โดยมี PDEV ต่ำกว่า PDIV แบบขยายตัวที่ผิวของวัสดุ (surface glow) หรือ PD แบบภายในที่มีโพรงใหญ่ด้วย (internal large cavity) ซึ่งแยกแยะได้ด้วยรูปแบบการเกิด PRPD โดยปกติแล้วโพรงอากาศภายในวัสดุที่ใหญ่จะเกิด PD รุนแรงกว่าแบบพื้นผิว แต่มีลักษณะกราฟเหมือนกัน ($PDEV < PDIV$) รวมถึง PD แบบสตรีมเมอร์ (surface streamer) ที่มีลักษณะกราฟแบบเดียวกันแต่เมื่อถึงแรงดันที่ ...เกิดสตรีมเมอร์ อิเล็กตรอน บลาๆ การเกิด PD จะรุนแรงขึ้น , เส้นสีน้ำเงินแสดงการเกิด PD ภายในที่มีโพรงอากาศเล็กๆ (internal small cavity) จะมี PDEV ต่ำกว่า PDIV เช่นกัน เมื่อถึงจุดหนึ่งขนาดของ PD จะคงที่ , เส้นสีน้ำตาลแสดงการเกิด PD แบบโคโรนาที่มี PDEV และ PDIV เท่ากัน การเกิดลักษณะขยายตัว (corona glow) จะมีขนาดพัลส์ ค่อยข้างคงที่ หลังจากนั้นจะเกิดลักษณะสตรีมเมอร์ (corona streamer) ที่ขนาดพัลส์โตขึ้นอย่างเห็นได้ชัด



รูปที่ 2.5.10 ลักษณะ PDIV และ PDEV ของการเกิด PD ลักษณะต่างๆ

ผู้เขียนขอยกตัวอย่างกรณีหนึ่งซึ่งเป็นการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบพลังงานก๊าซธรรมชาติ ขนาด 50 MVA , 11 kV , 50 Hz , 1500 RPM , ระบายความร้อนด้วยอากาศ , ทำงานมาแล้ว 10 ปี ซึ่งทดสอบตามมาตรฐานสากล IEC 60270 , IEC 60034-27-1 , IEEE 1434 โดยได้ขึ้นแรงดันทดสอบเป็นขั้นบันไดทีละ 0.1U₀ ดังรูปที่ 2.5.11 (ซ้าย) เห็นได้ว่าการตรวจพบ PD ในเฟส W ซึ่งฉนวนเครื่องกำเนิดเป็นแบบพันด้วยไมก้า โดย PDEV ต่ำกว่า PDIV แสดงถึงการดิสชาร์จแบบผิวหรือแบบภายใน ซึ่งแยกแยะได้ด้วยลักษณะกราฟที่จะเห็นว่าไม่มีการพุ่งขึ้นแล้วที่แรงดัน 5.08 – 6.35 kV (0.8U₀ – U₀) แสดงดังรูปที่ 2.5.11 (ขวา) บ่งบอกถึงการดิสชาร์จภายในที่มีโพรงเล็กๆ (internal small cavity) ซึ่งเมื่อตรวจพบก็ได้ทำการแก้ไขฉนวนของเครื่องจักรกลดังกล่าว โดยรูปที่ 2.5.11 (ขวาล่าง) แสดง PRPD ที่ตรวจพบ ซึ่งประกอบด้วยการดิสชาร์จ 2 ลักษณะ คือ การดิสชาร์จภายในเฟส W นี้ที่คาดว่ามิโพรงก๊าซเล็กๆ และ การดิสชาร์จแบบแยกชั้น (Embedded delamination)

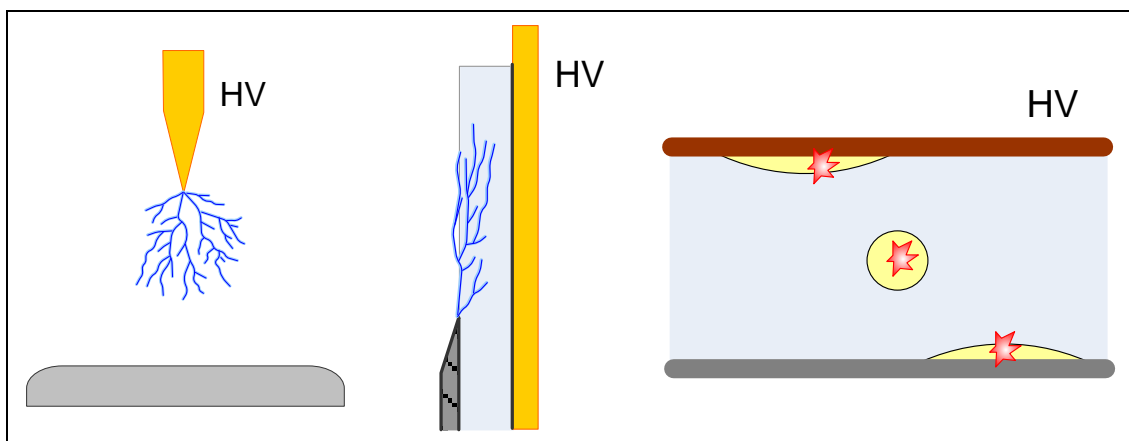


รูปที่ 2.5.11 ตัวอย่างลักษณะ PDIV และ PDEV ของการเกิด PD ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

2.5.3 แบบจำลองการเกิด PD โดยตัวเก็บประจุแบบก้อน (Lump)

ผู้บุกเบิกและเขียนหนังสือเกี่ยวกับ PD ภาษาอังกฤษเล่มแรกของโลกคือ prof.kruger เขาได้แบ่ง PD ออกเป็น 3 ลักษณะ ซึ่งแพร่หลายรวมถึงเป็นที่นิยมในปัจจุบัน แสดงดังรูปที่ 2.5.12 คือ

1. PD แบบโคโรน่า : เกิดขึ้นจากปลายแหลมหรือส่วนที่ยื่นออกมาที่เป็นแรงดันสูงโดยปกติจะไม่เป็นอันตราย
2. PD แบบพื้นผิว : เกิดขึ้นได้ในพื้นผิวที่สนามไฟฟ้าสูงและสามารถกระตุ้นการเกิดรอยลากได้ (tracking)
3. PD แบบภายใน : เกิดในจุดบกพร่องของฉนวน เช่น ช่องว่างหรือสิ่งปนเปื้อน ซึ่งกระตุ้นให้เกิดต้นไม้ไฟ



รูปที่ 2.5.12 PD แบบ โคโรน่า แบบพื้นผิว และ แบบภายใน

2.5.4 การเกิด PD

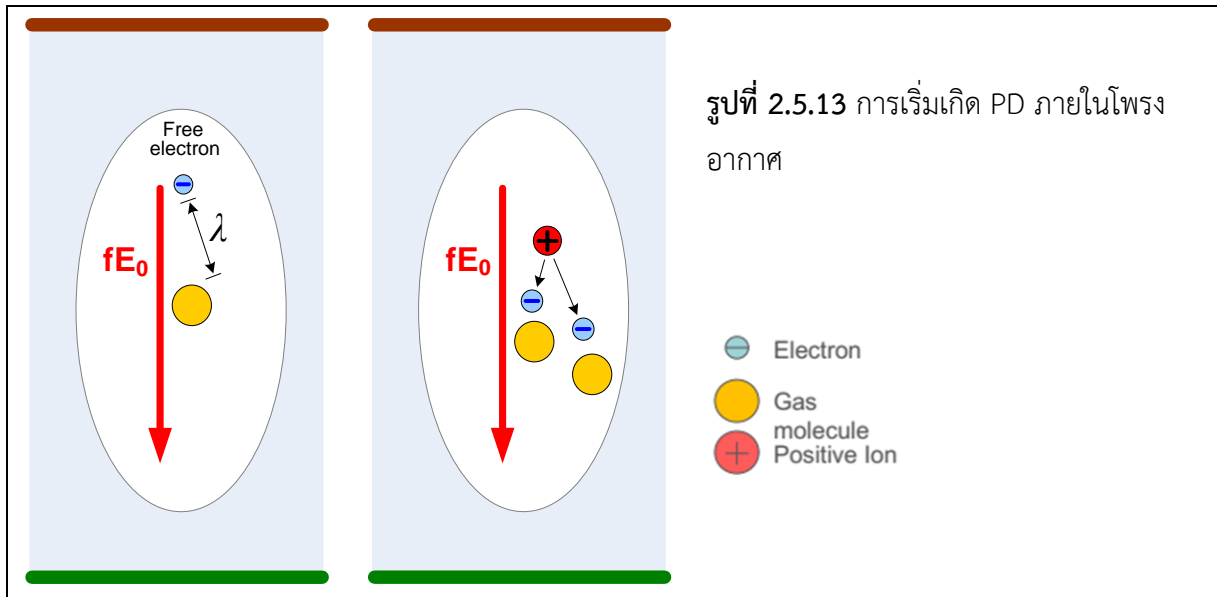
การเริ่มเกิด PD ได้ต้องประกอบด้วยเงื่อนไข 5 ประการ

1. สนามไฟฟ้าภายในโพรงขึ้นกับสนามที่ขั้วอิเล็กโทรด (E_0) เกินสนามไฟฟ้าวิกฤต ดังรูปที่ 2.5.13 (ซ้าย)
2. อิเล็กตรอนอิสระที่มีอยู่ในโพรงอากาศนั้นมีจำนวนเพียงพอในการเริ่มเกิดดิซชาร์จ
3. โพรงอากาศมีโมเลกุลของก๊าซ
4. อิเล็กตรอนอิสระถูกเร่งโดยสนามไฟฟ้า เกิดแรงทางไฟฟ้า $F = E \times Q$
5. อิเล็กตรอนอิสระที่ถูกเร่งจะกระทบกับโมเลกุลของแก๊สบางส่วน

ซึ่งกลไกที่ช่วยให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระภายในก๊าซคือ

- 1) กระบวนการไอออนไนซ์โดยการชนกันของโมเลกุลโฟกัส (หรือการแผ่รังสีพื้นหลังของโฟตอน) (radiation)
- 2) การปล่อยอิเล็กตรอนแบบ Schottky จากพื้นผิวโลหะ และ/หรือ ผิวฉนวน (electron injection)

โดยก่อนการชนกันอิเล็กตรอนจะได้รับพลังงานจลน์จำนวนหนึ่ง ถ้าปริมาณพลังงานดังกล่าวเพียงพอที่จะทำให้ก๊าซเกิดการแตกตัวเป็นไอออนให้ได้อิเล็กตรอนอิสระตัวใหม่ หากอิเล็กตรอนอิสระตัวใหม่ดังกล่าว มีพลังงานมากพอที่จะทำให้โมเลกุลของก๊าซอื่นแตกตัวเป็นไอออนอีก เราก็มีอิเล็กตรอนอิสระ แสดงดังรูปที่ 2.5.13 (ขวา)



รูปที่ 2.5.13 การเริ่มเกิด PD ภายในโพรงอากาศ

เมื่อเกิด PD แล้วจากกระบวนการที่ได้กล่าวมา อิเล็กตรอนจากการไอออไนซ์ดังกล่าวจะเคลื่อนเข้าหาอิเล็กโทรดขั้วบวก แสดงดังรูปที่ 2.5.14 (ซ้าย) ส่วนไอออนบวกที่ผิวโพรงอากาศเคลื่อนเข้าหาอิเล็กโทรดขั้วลบ ซึ่งทำให้เกิด การกระจายของประจุโดยจะสร้างสนามภายใน (E_q) ดังรูปที่ 2.5.14 (กลาง) สนาม E_q นี้จะมีทิศตรงข้ามกับสนามที่ตกคร่อมโพรงอากาศ fE_0 ดังนั้น สนาม E_q นี้จึงหักลบกับสนามที่ตกคร่อมโพรงอากาศ ฉะนั้นสนามที่ตกคร่อมโพรงอากาศจริงๆ จะเป็น

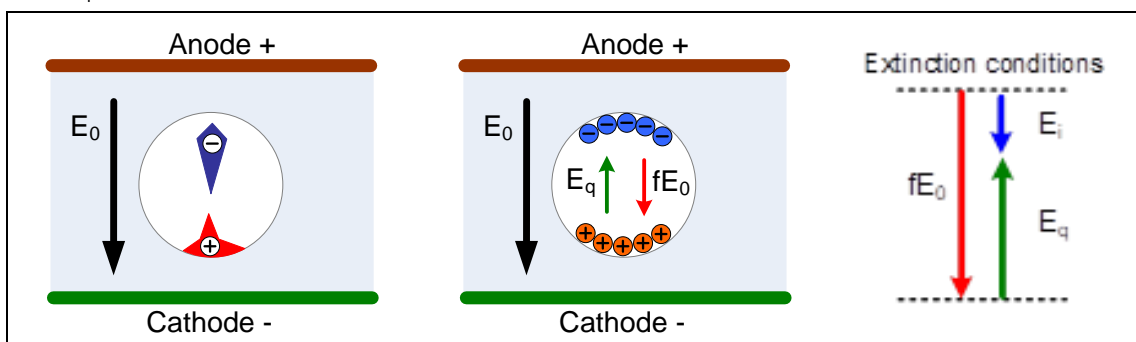
$$E_i = fE_0 - E_q$$

เมื่อ E_i คือ สนามตกคร่อมโพรงอากาศที่หักลบกับสนามภายในโพรง

fE_0 คือ สนามที่ตกคร่อมโพรงซึ่งขึ้นกับสนามที่อิเล็กโทรดหรือที่ตกคร่อมเนื้อฉนวนนี้

E_q คือ สนามภายในที่เกิดจากการจัดเรียงตัวของประจุ หรือประจุค้าง

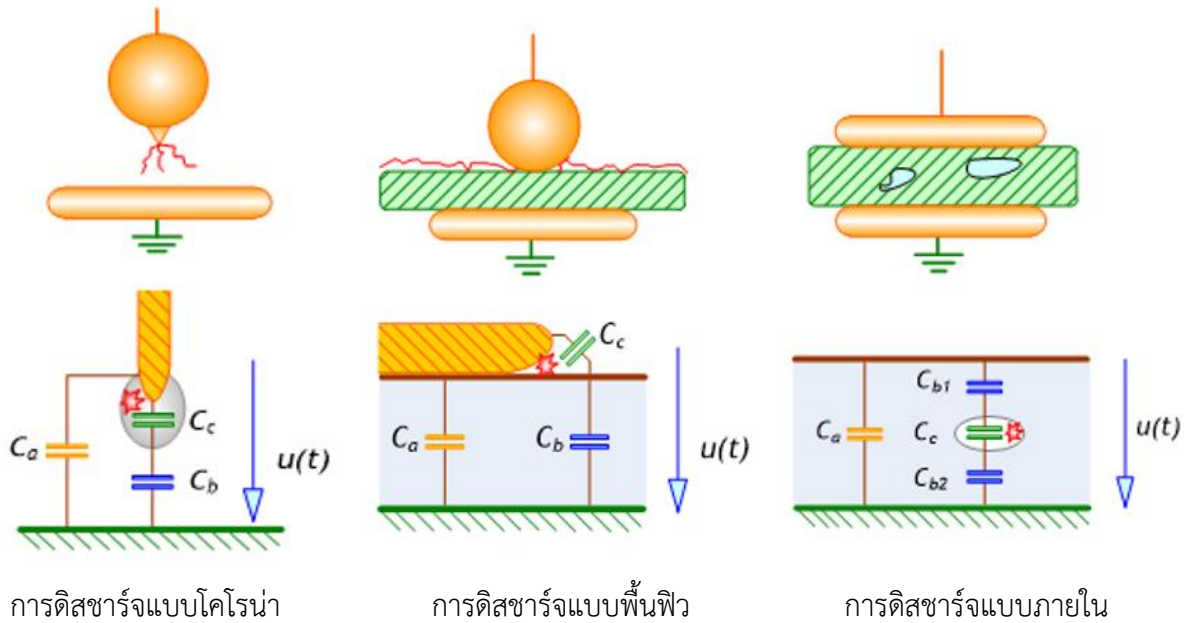
เมื่อสนามตกคร่อมโพรงอากาศคือการหักล้างของสนามภายนอกและภายในแล้ว สนามตกคร่อมโพรงอากาศจะมีขนาดลดลงจนทำให้ความเครียดสนามไม่เพียงพอจึงไม่เกิดการดีสชาร์จ ดังนั้นหาก E_i ไม่เพียงพอแล้วการเกิดอิเล็กตรอนอะวาลานซ์ก็เป็นไปได้ กล่าวอีกนัยหนึ่ง PD จะหยุดเมื่อ E_q สนามภายในมีแรงพอที่จะหยุดการเกิดอิเล็กตรอนอะวาลานซ์



รูปที่ 2.5.14 การจัดเรียงตัวของประจุภายในโพรงอากาศ

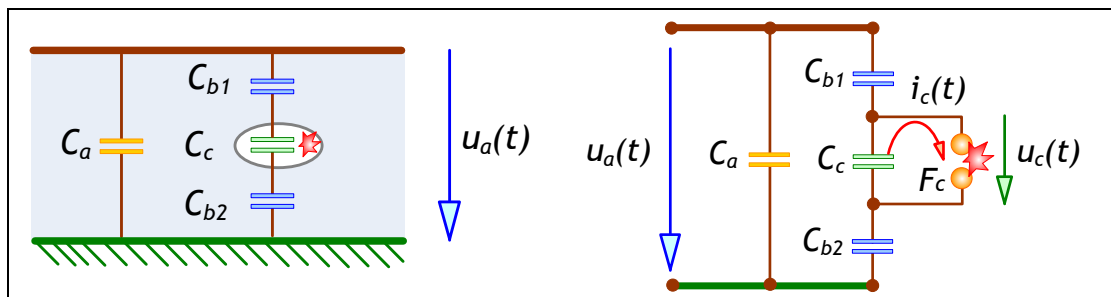
2.5.5 วงจรสมมูลของการเกิด PD

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่า prof.kruger แบ่ง PD ออกเป็น 3 แบบ คือ แบบโคโรน่า แบบพื้นผิว และแบบภายใน แสดงดังรูปที่ 2.5.15 ซึ่งหากพิจารณาเป็นวงจรสมมูลของการเกิด PD นี้ จะมีอยู่ 3 ส่วนหลักๆ คือ ส่วนเนื้อฉนวนหลัก (ส่วนใหญ่) C_a ส่วนเนื้อฉนวนที่อยู่แนวดิซชาร์จ C_b (ส่วนน้อย) และบริเวณเล็กๆที่เกิด PD



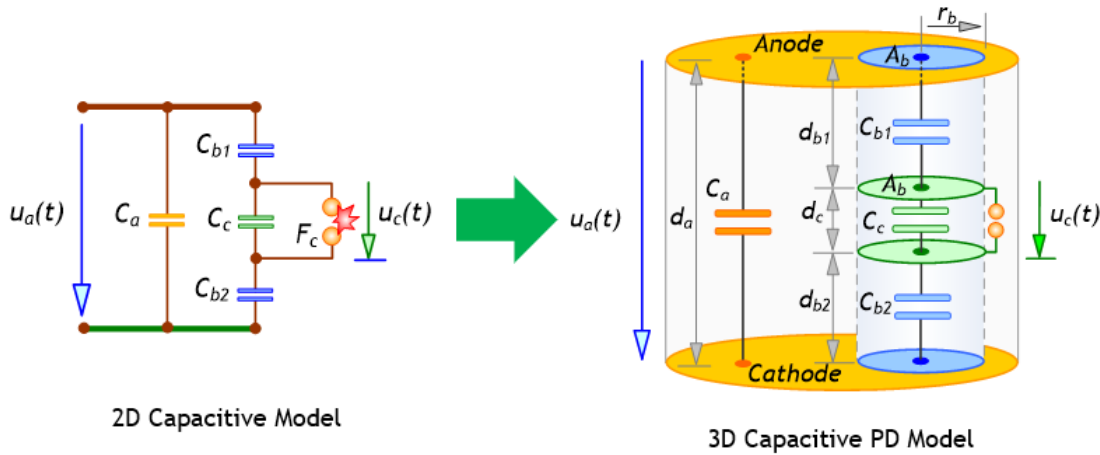
รูปที่ 2.5.15 วงจรสมมูลของการเกิด PD โดยตัวเก็บประจุแบบก้อน (Lump)

การเกิดดิซชาร์จในเนื้อฉนวนหรือในอุปกรณ์ไม่สามารถสังเกตเห็นได้ด้วยตา จึงใช้แบบจำลอง PD อธิบาย เพื่อให้สามารถตรวจจับหรือทำการวัด PD ในฉนวนได้ ไม่ว่าจะเกิด PD ชนิดใดก็สามารถเขียนวงจรสมมูลได้ เพื่อให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจจึงใช้วงจรสมมูลสำหรับฉนวนที่มีโพรงก๊าซเพื่อใช้ในการวิเคราะห์การเกิดและหาปริมาณ PD ภายใน ดังวงจรสมมูลของฉนวนในรูปที่ 2.5.16 (ซ้าย) แสดงวัสดุฉนวนที่มีโพรงก๊าซภายในเนื้อฉนวน และฉนวนวางอยู่ระหว่างอิเล็กโตรด โพรงก๊าซจะเขียนแทนด้วยความจุไฟฟ้า C_c ส่วนฉนวนที่ต่ออนุกรมกับโพรงก๊าซแทนด้วยแทนค่าความจุไฟฟ้าด้วย C_{b1} และ C_{b2} ส่วนที่ต่ออนุกรมกับ C_c นี้ จะรวมกันได้เป็น C_b ส่วนฉนวนที่สมบูรณ์คืออยู่รอบหรือเป็นเนื้อฉนวนส่วนใหญ่แทนด้วยค่าความจุไฟฟ้า C_a แสดงดังรูปที่ 2.5.16 ซึ่งผลรวมของค่าความจุของฉนวนทั้งหมดที่คั่นอยู่ระหว่างอิเล็กโตรดนี้มีค่าเป็น $C_t = C_a + (C_b // C_c)$ เป็นค่าความจุไฟฟ้ารวมซึ่ง $C_t \approx C_a$



รูปที่ 2.5.16 วงจรสมมูลของการเกิด PD แบบก้อน (Lump)

ซึ่งค่าความจุไฟฟ้าของวัสดุทดสอบ C_t จะมีค่าโดยประมาณเท่า ๆ กับ C_a ซึ่งมีค่ามากกว่า C_b มากๆ นั่นคือ $C_t \approx C_a \gg C_c \gg C_b$ และนี่เนื่องมาจาก $C = \epsilon \frac{A}{d}$ หากพิจารณาเส้นทางการเชื่อมต่อของ C_b และ C_a เป็นแนวของทรงกระบอกดังรูปที่ 2.5.17



รูปที่ 2.5.17 วงจรสมมูลของการเกิด PD แบบก้อน (Lump)

$$C_{b1} = \epsilon_{b1} \frac{A_{b1}}{d_{b1}} = \epsilon_{b1} \frac{\pi r^2}{d_{b1}} \quad \text{และ} \quad C_c = \epsilon_c \frac{A_c}{d_c} = \epsilon_c \frac{\pi r^2}{d_c}$$

$$\frac{C_{b1}}{C_c} = \epsilon_{b1} \frac{\pi r^2}{d_{b1}} \div \epsilon_c \frac{\pi r^2}{d_c} \quad r \text{ เดียวกันเพราะรัศมีเป็นแนวทรงกระบอกเดียวกัน}$$

$$= \epsilon_{b1} \frac{\pi r^2}{d_{b1}} \div \epsilon_c \frac{\pi r^2}{d_c} = \frac{\epsilon_{b1}}{\epsilon_c} \cdot \frac{d_c}{d_{b1}}$$

เมื่อพิจารณาเนื้อฉนวน C_b ซึ่งเป็นฉนวนแข็ง และ C_c ที่เป็นฉนวนก๊าซ แล้ว $\epsilon_{b1} > \epsilon_c$ เช่น ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่ 50 Hz [42 p.4-41] ของฉนวนแข็ง $\epsilon_{r,mica} = 4$ หรือ $\epsilon_{r,PVC} = 3.8 - 4.3$ แต่ฉนวนก๊าซอย่างอากาศจะมี $\epsilon_{r,air} \approx 1$ ฉะนั้นแล้ว $\epsilon_{b1} > \epsilon_c$ หากยกเป็นกรณีฉนวนไมก้าที่มีโพรงอากาศอยู่ภายในจะได้

$$\frac{C_{b1}}{C_c} = \frac{\epsilon_{b1}}{\epsilon_c} \cdot \frac{d_c}{d_{b1}} \approx \frac{4}{1} \cdot \frac{d_c}{d_{b1}} \approx 4 \cdot \frac{d_c}{d_{b1}}$$

ซึ่งระยะ d ของโพรงอากาศ C_c ระดับไมโครนั้นเล็กมากเมื่อเทียบกับแนวเนื้อฉนวน C_b ที่เป็นระดับ mm หรือ cm หากสมมติตัวเลขให้เห็นภาพ ให้ $d_c = 1 \times 10^{-6} \text{ m}$ และ $d_{b1} = 1 \times 10^{-3} \text{ m}$ จะได้ว่า

$$\frac{C_{b1}}{C_c} \approx 4 \cdot \frac{d_c}{d_{b1}} \approx 4 \cdot \frac{10^{-6}}{10^{-3}} \approx 4 \times 10^{-3}$$

$$\frac{C_{b1}}{4 \times 10^{-3}} \approx C_c$$

$$0.25 \times 10^3 \cdot C_{b1} \approx C_c$$

$$250C_{b1} \approx C_c$$

จะเห็นได้ว่า $C_c \gg C_b$ และ C_a เป็นเนื้อฉนวนส่วนใหญ่จึงได้ $C_t \approx C_a \gg C_c \gg C_b$ ดังกล่าว

ถ้าป้อนแรงดัน $u_a(t)$ ที่ขั้วอิเล็กโตรด ทำให้แรงดันตกคร่อมโพรงก๊าซมีค่าสูงกว่าค่าแรงดันเบรกดาวนของโพรงก๊าซที่มีค่าเก็บประจุ C_c ก็จะเกิดการเบรกดาวนในโพรงก๊าซ ซึ่งเขียนแทนด้วยแกป F (แล้วเอาตัวจ่ายแรงดันออก) จะมีความต้านทาน R ค่าหนึ่งต่ออนุกรมอยู่เป็นตัวจำกัดกระแสพัลส์ดีสชาร์จ $i_c(t)$ ซึ่งมีลักษณะเป็นพัลส์นาโนวินาที และทำให้เกิดแรงดันตก $u_c(t)$ ที่โพรงก๊าซ และจะเกิดประจุขึ้นในโพรงอากาศ q_c ดังสมการ

$$q_c = u_c C_c$$

พิจารณาจากค่าเก็บประจุรวมของฉนวน $C_t \approx C_a + C_b$ โดยละเลยผลของ C_c ในการเชื่อมต่ออนุกรมกับ C_b เนื่องจากมีค่าเก็บประจุสูงกว่าอย่างมาก เพราะโพรงมีความหนาน้อยกว่า ยกตัวเลขให้เห็นภาพ

$$C_{bc} = \frac{C_b \cdot C_c}{C_b + C_c}$$

ยกตัวเลขให้เห็นภาพจากตัวอย่างด้านบน $250C_{b1} \approx C_c$

$$C_{bc} = \frac{C_b \cdot 250C_b}{C_b + 250C_b}$$

$$C_{bc} = \frac{C_b \cdot 250C_b}{251C_b}$$

$$C_{bc} = \frac{250C_b}{251} \approx C_b$$

การต่อค่าเก็บประจุขนานลักษณะนี้ แรงดันจะเท่ากัน จะได้ว่า

$$u_t(t) = u_a(t) = u_b(t)$$

เมื่อ กระแส $i_c(t)$ นี้ไหลอยู่ภายใน ซึ่งจะไม่สามารถวัดได้ แต่การดิสชาร์จของ C_c ทำให้เกิดการถ่ายเทประจุของ C_b และ C_a ในวงจรสมมูล เป็นผลให้เกิดแรงดันตกที่ขั้วเป็น $u_a(t)$ จากการดิสชาร์จผ่าน F_c ทำให้ประจุจาก C_a และ C_b ถูกถ่ายไปที่ F_c

$$q_t = q_a = q_b$$

$$q_t = q_a$$

$$C_t \cdot u(t) = C_a u_a(t)$$

$$\frac{C_a C_b}{C_a + C_b} \cdot u(t) = C_a u_a(t)$$

$U_c(t)$ เป็นแรงดันตกคร่อม F_c ซึ่งรับแรงดันทั้งหมดของวงจรในก่อนจะลัดวงจรนั้น

$$\frac{C_b}{C_a + C_b} \cdot u_c(t) = u_a(t)$$

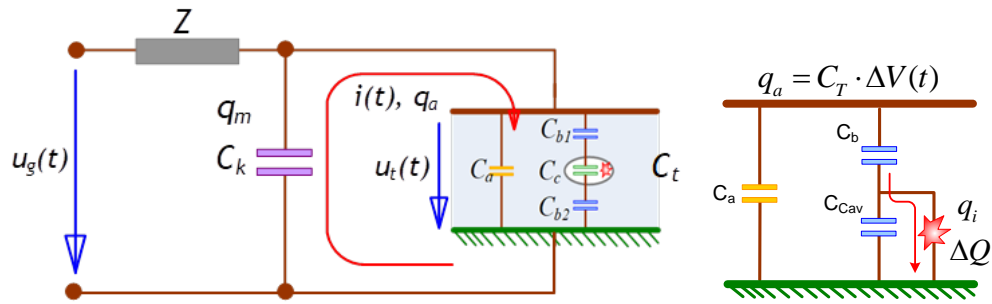
ค่าแรงดันตกนี้ไม่ให้ข้อมูลอะไรเกี่ยวกับ q_c เลย แต่เป็นสัดส่วนกับ $C_b u_c$ ค่า u_c นี้วัดได้เป็นพัลส์รูปขั้น ขึ้นอยู่กับ $i_c(t)$ เมื่อแทนค่า

$$u_c = \frac{q_c}{C_c}$$

$$u_a(t) = \frac{C_b q_c}{C_c (C_a + C_b)}$$

ค่าของ u_t หรือ u_a นี้มีค่าเพียงเป็นมิลลิโวลต์ถึงโวลต์ ในขณะที่ u_c มีค่าเป็นกิโลโวลต์ แต่โดยที่ไม่ทราบค่า C_c และ C_b จึงไม่อาจหาความสัมพันธ์ของ u_t กับ u_c และ q_c ได้ อย่างไรก็ตาม การดิสชาร์จในโพรงก๊าซ C_c เป็นผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงถ่ายเทประจุ หรือกระแสในวงจรภายนอกที่สามารถตรวจวัดได้

ดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น การดิสชาร์จบางส่วนภายในเกิดขึ้นภายในฉนวน หรือภายในอุปกรณ์ที่หุ้มห่อมิดชิด ดังนั้น ประจุหรือกระแสที่เกิดจากการดิสชาร์จในโพรงก๊าซนั้นไม่สามารถวัดได้ แต่การดิสชาร์จในโพรงก๊าซ C_c นั้น มีผลให้เกิดการถ่ายเทประจุ เป็นผลให้เกิดแรงดันตก u_t ที่ขั้วป้อนแรงดันภายนอก และการเคลื่อนที่ของประจุ หรือเกิดกระแสไหลวนอันเนื่องมาจากแรงดันตก เป็นค่ากระแสที่วัดได้ (Measurable current) $i(t)$ ดังรูปที่ 2.5.18 แต่ไม่ใช่กระแสหรือประจุที่เกิดขึ้นจริงภายในโพรงก๊าซ



รูปที่ 2.5.18 การดีสชาร์จบางส่วนในโพรงก๊าซในวัสดุฉนวน

เมื่อ $u_g(t)$ คือ ตัวจ่ายแรงดันป้อนให้กับตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว C_k และวัสดุทดสอบ C_t

C_k คือ ตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว

C_t คือ ค่าเก็บประจุของวัสดุทดสอบประกอบด้วย C_a , C_b และ C_c

$i(t)$ คือ กระแสพัลส์ดีสชาร์จบางส่วนที่ถ่ายเทระหว่าง C_k กับ C_t เพื่อชดเชยแรงดันที่ตกไป

ค่ากระแสไหลวน $i(t)$ ที่วัดได้นี้ ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนค่าเก็บประจุ C_k/C_t เพราะประจุจะเคลื่อนที่จากตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว C_k ที่ชดเชยแรงดันตก $u_t(t)$ คร่อม $C_t \approx (C_a + C_b)$ ในกรณีอุดมคติ $C_k \gg C_t$ และ $C_t \approx C_b + C_a$ ประจุ q จะมีค่ามากที่สุด ค่า $C_k \gg C_t$ ค่า $u_t(t)$ จะได้รับชดเชยสมบูรณ์ และประจุที่ถ่ายเท ก็คือกระแส $i(t)$ ซึ่งประจุถ่ายเทหาได้จากสมการ

$$q = \int i(t) dt = \left\{ C_a + \frac{C_c \cdot C_b}{C_c + C_b} \right\} u_t(t)$$

เพราะว่า $C_b \ll C_c$ จึงได้

$$q = (C_a + C_b) u_t(t)$$

เมื่อแทนค่า $u_t(t)$ จะได้

$$q = \frac{C_b}{C_c} q_c$$

ประจุ q นี้ เรียกว่า ประจุที่ปรากฏของพัลส์ดีสชาร์จบางส่วน เพราะว่าประจุ q นี้ ไม่เท่ากับประจุที่เกิดจริงในโพรงก๊าซ q_c แต่สัมพันธ์กับ q_c ด้วยอัตราส่วนของ C_b/C_c และเป็นพื้นฐานของการวัด PD ที่มีความเป็นจริงมากกว่า $u_t(t)$ ที่ไม่อาจหาความสัมพันธ์ของ u_t กับ u_c และ q_c ได้ โดยที่ C_a เป็นค่าเก็บประจุหลักของ C_t ซึ่งไม่มีผลเกี่ยวกับค่า PD

ในทางปฏิบัติ เงื่อนไขที่จะทำให้ได้ $C_k \gg C_t$ หมายถึง ค่าเก็บประจุคาบเกี่ยวมีค่ามากๆ นั้นไปได้ยาก เพราะว่าจะกลายเป็นโหลดให้กับตัวจ่ายแรงดัน และมีค่าใช้จ่ายที่สูง อย่างไรก็ตาม ค่ามากๆ นั้นตัวเก็บประจุ C_k จะใหญ่กว่า C_t ของวัสดุทดสอบเพียงเล็กน้อย จะเป็นผลทำให้ความไวในการตรวจจับหรือตรวจวัดดีสชาร์จบางส่วนนั้นน้อยลง เนื่องจากกระแสชดเชย $i(t)$ จะมีค่าน้อยลง

เมื่อพิจารณาจากการถ่ายเทของประจุระหว่าง C_t กับ C_k จะได้ความสัมพันธ์

$$q = C_t u_t(t) \quad \text{เมื่อ} \quad C_t \approx (C_a + C_b)$$

นั่นคือ

$$q = (C_t + C_k) u_t'(t)$$

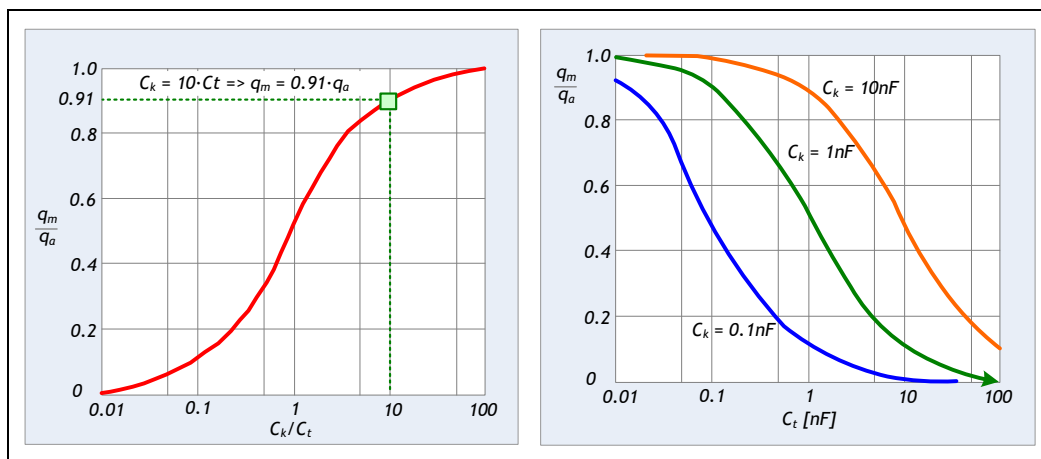
เมื่อ $u_t(t)$ คือ แรงดันที่ชั่วหลังจากสิ้นสุดการถ่ายเทประจุ ประจุที่ปล่อยจากตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว C_k สามารถวัดได้ และเรียกว่าประจุที่วัดได้ q_m (Measurable charge)

$$q_m = C_k u_t'(t)$$

ดังนั้น อัตราส่วนของประจุที่วัดได้ต่อประจุที่ปรากฏ คือ

$$\frac{q_m}{q} = \frac{C_k}{(C_t + C_k)}$$

ความสัมพันธ์ของ q_m/q ในเทอมของ C_k/C_t หรือในเทอมของ C_t ดังแสดงในกราฟ รูปที่ 2.5.19 (ขวา) ซึ่งจะช่วยให้เลือกค่า C_k ที่เหมาะสม เพื่อให้ได้ค่าความไวในการตรวจจับสัญญาณได้ตามต้องการ ถ้าต้องการความไวสูง จะต้องใช้ C_k ให้โตพอ ซึ่งขึ้นอยู่กับ C_t เช่นกันตามแนวแกนนอน ค่า q_m/q หรือความไว อาจตรวจสอบได้ จึงต้องการปรับเทียบวงจรทดสอบ โดยการป้อนประจุที่ทราบค่าแน่นอน และถูกต้องที่สุดทดสอบ ผลของ C_k/C_t ต่อความไวแสดงโดย q_m/q ดังรูปที่ 2.5.19 (ซ้าย)



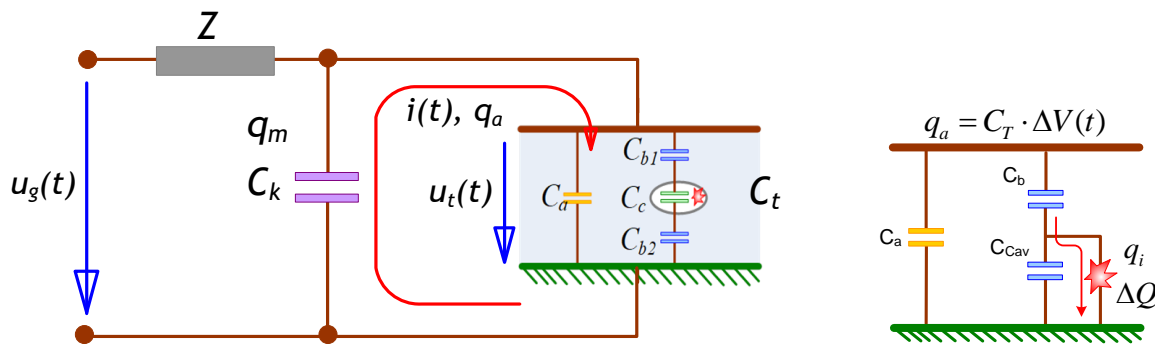
รูปที่ 2.5.19 ผลของค่าตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว C_k ต่อความไวการวัด

2.5.6 พารามิเตอร์ของ PD เบื้องต้น

ในวงจรวัด PD นั้นจะเกิดกระแสชดเชย $i(t)$ ซึ่งสามารถวัดประจุปรากฏได้ คือ q_a และวัดประจุที่ C_k ได้เป็น q_m แสดงดังรูปที่ 2.5.20 ขนาด PD เป็น pC ขึ้นกับสนามสุทธิตั้งในโพรง คือ สนาม E_q ขณะเกิด PD ลบกับ E_q ก่อนเกิด PD ตามความจุไฟฟ้าของโพรงอากาศนั้น จึงเป็นสัดส่วนโดยตรงต่อกัน ดังนี้

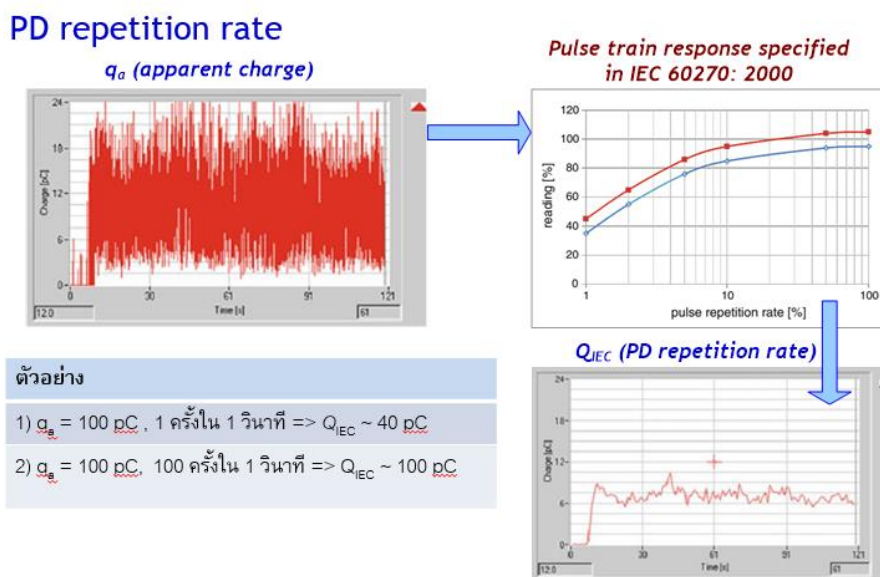
$$q_{PD} = k \times \Delta E_q \quad \text{เมื่อ } \Delta E_q = E_q (\text{ขณะเกิด PD}) - E_q (\text{ก่อนเกิด PD})$$

ค่าสัมประสิทธิ์ k ขึ้นอยู่กับรูปร่างและขนาดของโพรงอากาศ (คือ การกระจายประจุภายในโพรงอากาศ) นั่นคือสาเหตุที่ขนาดของ PD ภายในโพรงอากาศขึ้นอยู่กับขนาดของจุดบกพร่องภายในเนื้อฉนวน



รูปที่ 2.5.20 พารามิเตอร์ของ PD เบื้องต้น

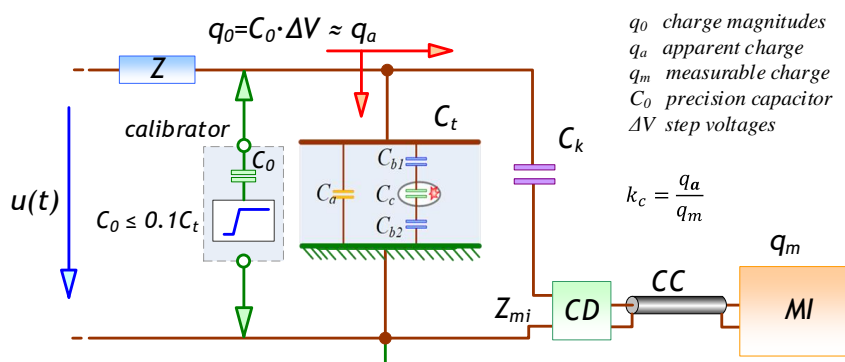
โดยที่ค่าประจุต่างๆ ที่ควรทราบคือ q_c (Real charge) เป็น ประจุจริงภายในโพรงอากาศ (แหล่งกำเนิด PD) ไม่สามารถวัดได้จริง q_a (Apparent Charge) ประจุปรากฏ ใช้เป็นตัวแทนขนาดประจุที่เกิดขึ้นในการวัด PD ไม่ได้มีขนาดเท่ากับประจุในโพรงอากาศ ทางทฤษฎี q_a เกิดจากการถ่ายเทประจุจาก C_k ไปยังวัสดุทดสอบ โดยที่ C_k มีขนาดเป็นอนันต์ (ซึ่งเป็นจริงไม่ได้ทางปฏิบัติ) ตาม IEC 60270:2000 กำหนดให้ q_a เป็นประจุที่เกิดจากการ calibrate ที่รู้ค่าที่แน่นอน และเครื่องวัด PD ได้ถูกเซ็ตให้อ่านค่าดังกล่าว q_m (Measurable Charge) เป็นประจุที่วัดได้จากวงจรวัด PD มีขนาดน้อยกว่าหรือเท่ากับ q_a เกิดจากการถ่ายเทประจุจาก C_k ไปยัง วัสดุทดสอบ โดยที่ C_k มีขนาดไม่เป็นอนันต์ ปกติแล้ว C_k ควรจะมีขนาดมากกว่า ค่าความจุ (Capacitance) ของวัสดุทดสอบประมาณ 10 เท่า และ QIEC ตามนิยาม IEC 60270: 2000/AMD 1: 2015 กำหนดให้ q_a ซึ่งเป็นประจุที่เกิดจากการ calibrate ที่รู้ค่าที่แน่นอน และเครื่องวัด PD ได้ถูกเซ็ตให้อ่านค่าดังกล่าว ปัจจุบันเริ่มนำ QIEC มาใช้แทนที่ q_a แสดงดังรูปที่ 2.5.21



รูปที่ 2.5.21 QIEC ตามนิยาม IEC 60270: 2000/AMD 1: 2015

2.5.7 การปรับเทียบระบบวัดในวงจรทดสอบ

วัตถุประสงค์ของการปรับเทียบ คือ เพื่อตรวจสอบว่าระบบวัดจะสามารถที่จะวัดค่าขนาดของดิสชาร์จบางส่วนที่ต้องการได้อย่างถูกต้อง การปรับเทียบระบบวัดในวงจรทดสอบจะถูกใช้เพื่อหาค่าสเกลแฟคเตอร์สำหรับการวัดค่าประจุปรากฏ เนื่องจากค่าความจุไฟฟ้าของวัตถุทดสอบ (C_t) จะส่งผลต่อคุณลักษณะของระบบวัด การปรับเทียบจะต้องถูกดำเนินการเมื่อมีการเปลี่ยนวัตถุทดสอบ เว้นแต่จะมีการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าของวัตถุทดสอบไม่เกิน 10% การปรับเทียบระบบวัดในวงจรทดสอบจะดำเนินการโดยทำการฉีดพัลส์กระแสที่มีช่วงเวลาสั้นๆ ซึ่งทราบค่าขนาดของประจุ q_0 ไปยังต้นขั้วของวัตถุทดสอบ ดังรูปที่ 2.3.10



รูปที่ 2.3.10 การต่อเครื่องปรับเทียบเมื่อตัวคาบเกี่ยวอนุกรมอยู่กับตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว

2.5.7.1 ขั้นตอนการปรับเทียบ

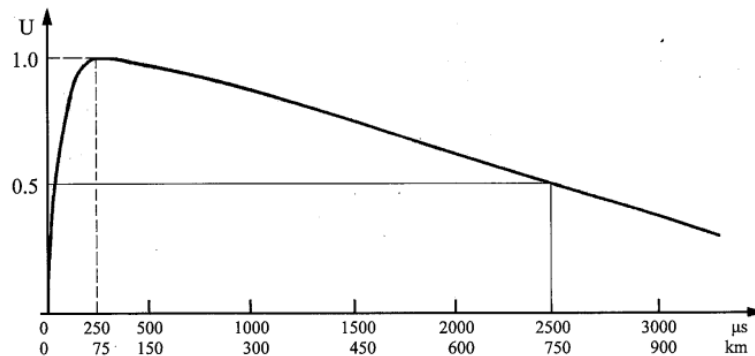
การปรับเทียบระบบวัดสำหรับการวัดประจุปรากฏ (Apparent charge, q) จะดำเนินการโดยฉีดพัลส์กระแสโดยใช้เครื่องปรับเทียบ (Calibrator) ทำการต่อคร่อมที่ขั้วของวัตถุทดสอบ การปรับเทียบจะต้องดำเนินการที่ค่าขนาดหนึ่งค่าในช่วงของค่าขนาดที่คาดหวัง เพื่อให้มั่นใจว่าจะมีความแม่นยำที่ดีที่สุดสำหรับค่าขนาดดิสชาร์จบางส่วนที่ระบุ (Specified PD magnitude) เนื่องจากตัวเก็บประจุ C_0 ของเครื่องปรับเทียบโดยทั่วไปมักจะใช้เป็นตัวเก็บประจุแรงดันต่ำ การปรับเทียบวงจรทดสอบจึงต้องดำเนินการในวัตถุทดสอบที่ไม่มีการจ่ายไฟ สำหรับตัวเก็บประจุในการปรับเทียบ C_0 ควรมีค่าความจุมากกว่าค่าความจุของวัตถุทดสอบ 10 เท่า หลังจากการปรับเทียบ เครื่องปรับเทียบจะต้องถูกนำออกจากวงจรทดสอบก่อนที่จะทำการจ่ายไฟ

2.5.7.2 เครื่องปรับเทียบ (Calibrator)

ในการปรับเทียบระบบวัดโดยทั่วไปแล้วจะทำการป้อนพัลส์กระแสด้วยเครื่องปรับเทียบ (Calibrator) ซึ่งประกอบด้วยเครื่องกำเนิดพัลส์แรงดันไฟฟ้าสแต็ป (Step voltage pulse) ซึ่งมีค่าแรงดัน คือ U_0 โดยต่ออนุกรมอยู่กับตัวเก็บประจุซึ่งมีค่า C_0 ดังนั้น พัลส์ในการปรับเทียบจึงเป็นพัลส์ประจุที่เกิดขึ้นๆ เครื่องปรับเทียบสามารถเป็นได้ทั้งพัลส์กระแสที่เป็นขั้วเดียว (Unipolar) และ สองขั้ว (Bipolar) ความถี่การเกิดซ้ำของพัลส์ จะต้องคงค่าไว้ (ตัวอย่างเช่น เป็นสองเท่าของความถี่แรงดันทดสอบ) หรือ ปรับค่าได้ (โดยให้ช่วงระหว่างพัลส์เกินเวลาความละเอียดของพัลส์ (Pulse resolution time)) เครื่องปรับเทียบดังกล่าวสามารถใช้ปรับเทียบระบบวัดเพื่อหาค่าสเกลแฟคเตอร์ (Scale factor) ของระบบวัดการดิสชาร์จบางส่วน โดยทั่วไปแล้วค่าสเกลแฟคเตอร์จะหาได้จากที่ 50% ถึง 200% ของค่าขนาดดิสชาร์จบางส่วนที่ระบุ

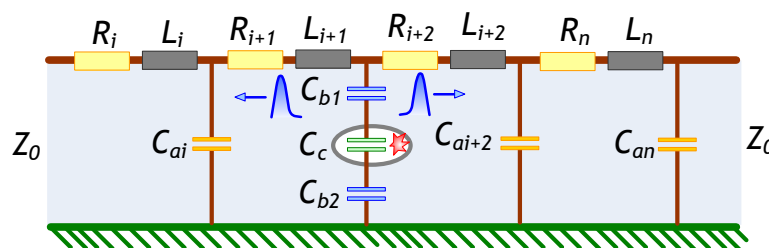
2.5.8 แบบจำลองการเกิด PD โดยอิมพีแดนซ์แบบการกระจาย (distribute)

คลื่นจร (traveling waves) การจะพิจารณาเป็นคลื่นจรเมื่อมีการเคลื่อนที่ของคลื่นในสาย หรือก็คือ ความยาวของตัวนำมากกว่าความยาวคลื่น เมื่อเป็นคลื่นจรแล้วพฤติกรรมจะแตกต่างจากแบบก้อน (lump) เพราะจะต้องพิจารณาสมบัติของคลื่น คือ การสะท้อน หักเห เลี้ยวเบน แทรกทอด ของคลื่นสัญญาณด้วย เช่น เคเบิลวัดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าจะต้องมีการใส่ความต้านทานสมคู่กัน (matching impedance) ที่ปลายสายเคเบิลเพื่อขจัดคลื่น สะท้อนกลับ มิฉะนั้นจะทำให้ค่าที่วัดผิดพลาด จึงต้องพิจารณาสัญญาณที่วัดเป็นคลื่นจร อีกทั้งคลื่นเคลื่อนที่ในอากาศ เช่น สายส่งแบบซิงในอากาศ คลื่นจะมีความเร็วประมาณความเร็วแสง 300 m/s ความเร็วในเคเบิล 150 m/s การเคลื่อนที่ของคลื่นจรบนสายส่งซึ่งอากาศระยะระหว่างเสาห่างกัน 300 m จะใช้เวลา 1 μ s ถ้าคลื่นจรเคลื่อนที่บนสายส่งซึ่งอากาศยาว 300 km จะใช้เวลา 1 ms คิดระยะทางจากความยาวคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่า 100 μ s จะเป็นระยะทาง 30 km ช่วงหน้าคลื่น 1 μ s จะเป็นระยะทาง 300 m ในรูปที่ 2.5.22 แสดงถึงค่าแรงดันเสิร์จสวิตชิง เทียบกับเวลาและระยะทาง



รูปที่ 2.5.22 ค่าแรงดันเสิร์จสวิตชิง (250/2500 μ s) ในทอม ของเวลาและระยะทาง

ในการทดสอบหน้างานนั้นแบบจำลองการเกิด PD โดยอิมพีแดนซ์แบบการกระจาย (distribute) ต้องพิจารณาเพื่อประเมินการเกิด PD เพราะสัญญาณเกิดการสะท้อน ลดทอน ไปเนื่องจากพฤติกรรมของคลื่นจร ดังรูปที่ 2.5.23 แสดงแบบจำลองการเกิด PD โดยอิมพีแดนซ์แบบการกระจายของสายเคเบิลแบบฝังดิน ที่เมื่อเกิด PD ในเนื้อ XLPE แล้วจะเป็นคลื่นจร เพราะ PD มีความถี่สูงซึ่งจะเคลื่อนผ่านฉนวนได้ดีเพราะมีความเป็นตัวเก็บประจุ เพราะอิมพีแดนซ์เก็บประจุความถี่สูงผ่านได้ง่ายจาก $X_c = 1/\omega C$ เมื่อเกิด PD แล้วสัญญาณจะวิ่งไปทั้งสองด้านซึ่งจะถูกลดทอนด้วยความเหนี่ยวนำในสายตัวนำอย่างมาก เพราะความถี่สูงเคลื่อนที่ผ่านได้ยาก เนื่องจากอิมพีแดนซ์เหนี่ยวนำนั้นจะมาก จาก $X_L = \omega L$ เมื่อเคลื่อนที่ไปถึงปลายสายก็จะเกิดการสะท้อน หักเห ๆ เนื่องจากความไม่สม่ำเสมอของตัวกลาง



รูปที่ 2.5.23 แบบจำลองการเกิด PD โดยอิมพีแดนซ์แบบการกระจายของสายเคเบิลแบบฝังดิน

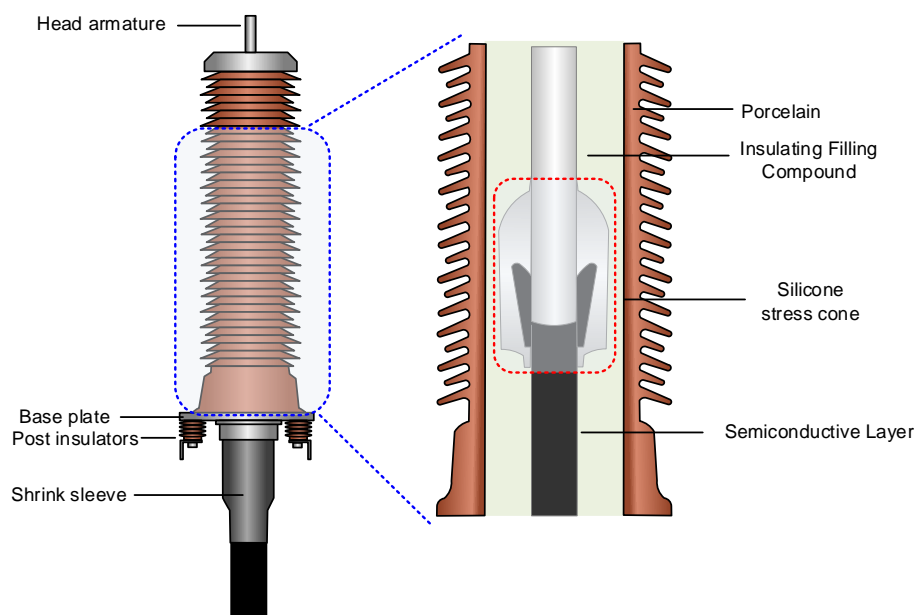
2.5.9 ตัวอย่างการวิเคราะห์การเกิด PD

การติดตั้งของหัวต่อเคเบิลมีความมั่นคง สามารถทนต่อแรงกลทางไฟฟ้าจากแรงดันไฟกระชาก ฐานของเสาที่ดูมั่นคงแข็งแรง ซึ่งการเบรกดาวน์เกิดขึ้นที่หัวต่อสายเคเบิล แสดงดังรูปที่ 2.5.24 เฟสหนึ่งในโคเนลด์ ความเครียดของหัวสาย 115 kV จึงทำการแก้ไขและวิเคราะห์หาสาเหตุ



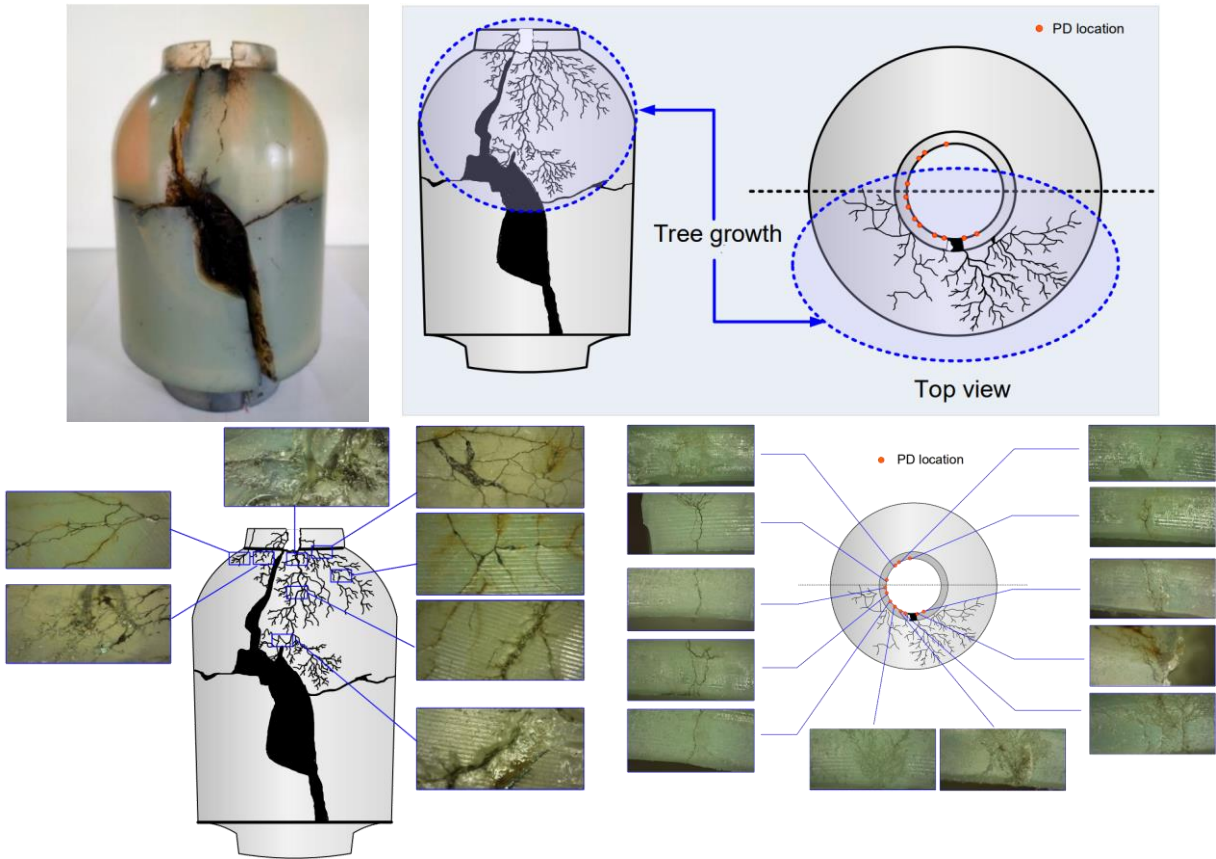
รูปที่ 2.5.24 หัวสายเคเบิล 115 kV เกิดการเบรกดาวน์และแก้ไขปัญหา

โครงสร้างของหัวเคเบิล 115 kV นี้ภายนอกด้านบนจะเป็นหัวต่อหลัก (Head armature) เข้ากับสายเหนือดิน และเข้าหัวด้วยหัวต่อเคเบิลพอร์ซเลนลักษณะที่เป็นครีปคือลดกระแสรั่วไหลตามผิว ที่ฐานของหัวต่อสายจะมีลูกถ้วยยึดขึ้นกับฐานโครงเหล็ก และมีสายเคเบิลที่ปลอกฉนวนออกและหุ้มท่อหดเชื่อมต่อกับหัวต่อเคเบิลนี้ แสดงดังรูปที่ 2.5.25 ส่วนภายในหัวต่อเคเบิลพอร์ซเลนนี้บรรจุน้ำมันซิลิโคนใช้เป็นฉนวนเหลวที่มีประโยชน์ทนต่อการเกิดไฟและมีความคงทนทางไฟฟ้าที่ดี บริเวณที่ปลอก XLPE ของเคเบิลออกหุ้มด้วยกรวยลดความเครียดสนามและชั้นสารกึ่งตัวนำ เพื่อเกลี่ยสนามไฟฟ้าไม่ให้ความเครียดสนามมากเกินไป จนอาจส่งผลต่อการเกิดดิสชาร์จ



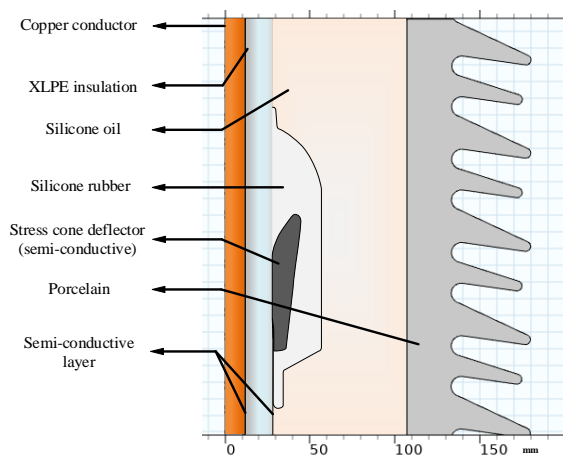
รูปที่ 2.5.25 ระบบฉนวนของหัวต่อสายเคเบิล

กรวยลดความเครียดสนามไฟฟ้าภายในหัวต่อสายเคเบิลที่เกิดการเบรกดาวนมีผลปรากฏดังรูปที่ 2.5.26 จะสังเกตเห็นร่องรอยการดิสชาร์จใต้ที่ปากโคน กรวยความเครียดเป็นวิธีการป้องกันความล้มเหลวของฉนวนที่หัวต่อสายเคเบิลซึ่งเกิดจากความเครียดสนามไฟฟ้าที่สูง โดยกรวยลดความเครียดนี้ทำขึ้นเพื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างส่วนปลายของซิลด์และตัวนำสายเคเบิล ต้องใช้ความระมัดระวังเพื่อให้แน่ใจว่าหัวสายเคเบิลนี้ปราศจากสิ่งสกปรกและสิ่งแปลกปลอมและต้องใช้สารฉนวนและเทปในลักษณะที่กำหนด



รูปที่ 2.5.26 ผลการเกิดดิสชาร์จของกรวยลดความเครียด

โครงสร้างของหัวต่อเคเบิลที่ได้กล่าวแล้วนำมาจำลองสนามไฟฟ้าดังรูปที่ 2.5.27 และ ใช้พารามิเตอร์ต่างๆตามตาราง 2.5 พารามิเตอร์คงที่และเกณฑ์สนามไฟฟ้าสำหรับการจำลอง

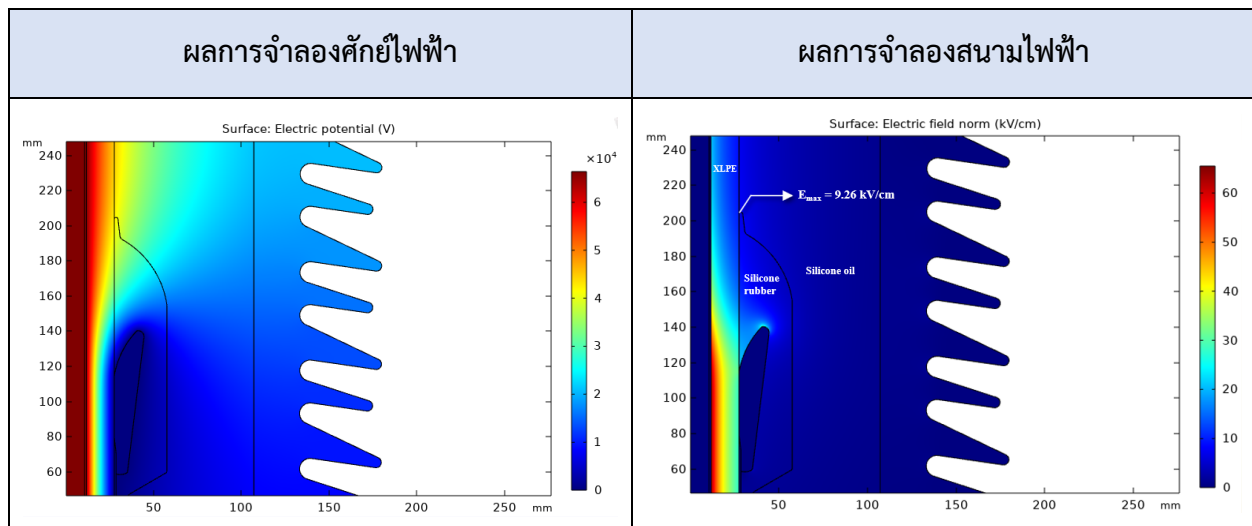


รูปที่ 2.5.27 ภาพโครงสร้างหัวต่อสายเคเบิลที่ใช้จำลองสนามไฟฟ้า

ตารางที่ 2.5 พารามิเตอร์คงที่และเกณฑ์สนามไฟฟ้าสำหรับการจำลอง [49]

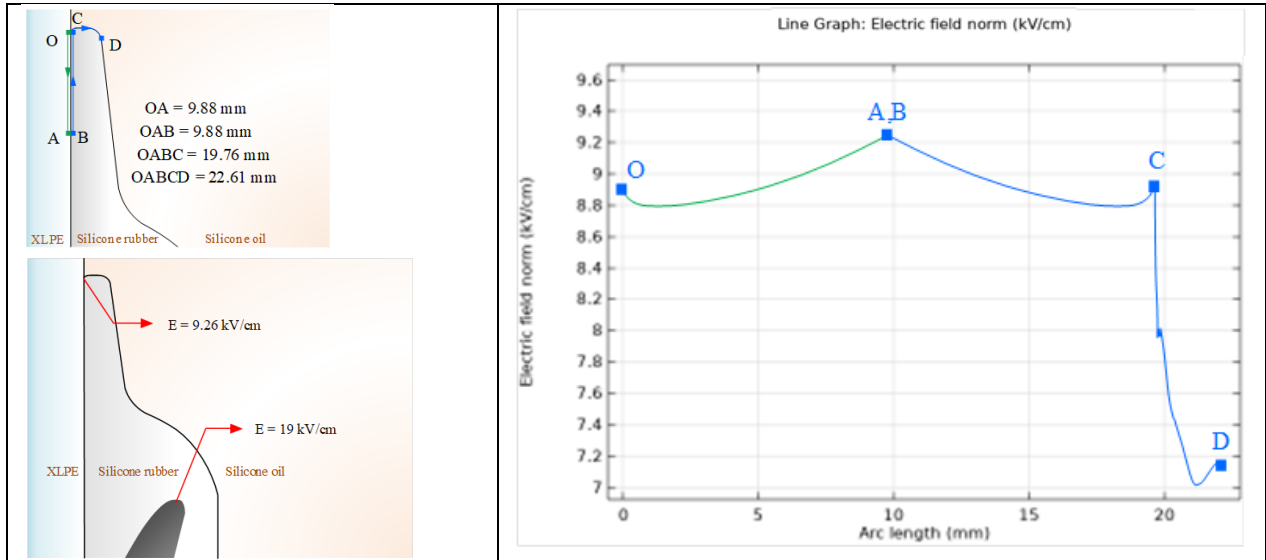
วัสดุ	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ ϵ_r	ค่าความนำไฟฟ้า (S/m)
ตัวนำทองแดง	1	5.998×10^7
ฉนวน XLPE	2.3	1×10^{-18}
น้ำมันซิลิโคน	2.8	10^{-13}
ยางซิลิโคน	3.2	10^{-17}
ปีกกรวยลดความเครียดสนาม	30	2×10^{-4}
พอร์ซเลน	7	10^{-17}
ชั้นสารกึ่งตัวนำ	30	2×10^{-4}
อากาศ	1	0
หยดน้ำ	80	5.5×10^{-6}
น้ำมันซิลิโคนที่เสื่อมสภาพ	10	10^{-4}
ศักย์ไฟฟ้า / แรงดันใช้งาน		$U_0 = \frac{115}{\sqrt{3}} = 66.397 \text{ kV}$

รูปที่ 2.5.28 แสดงผลการจำลองโดยใช้พารามิเตอร์ดังกล่าว เห็นได้ว่าสนามไฟฟ้าที่เครียดที่สุดอยู่ติดกับตัวนำของสายเคเบิลกับช่วงของกรวยลดความเครียด ซึ่งพิจารณาจากสีแล้วความเครียดสนามจะอยู่ที่ 50-60 kV/cm และไล่ระดับลงมาตามสี และที่ขอบปากกรวยลดความเครียดมีสนามไฟฟ้าอยู่ 9.26 kV/cm



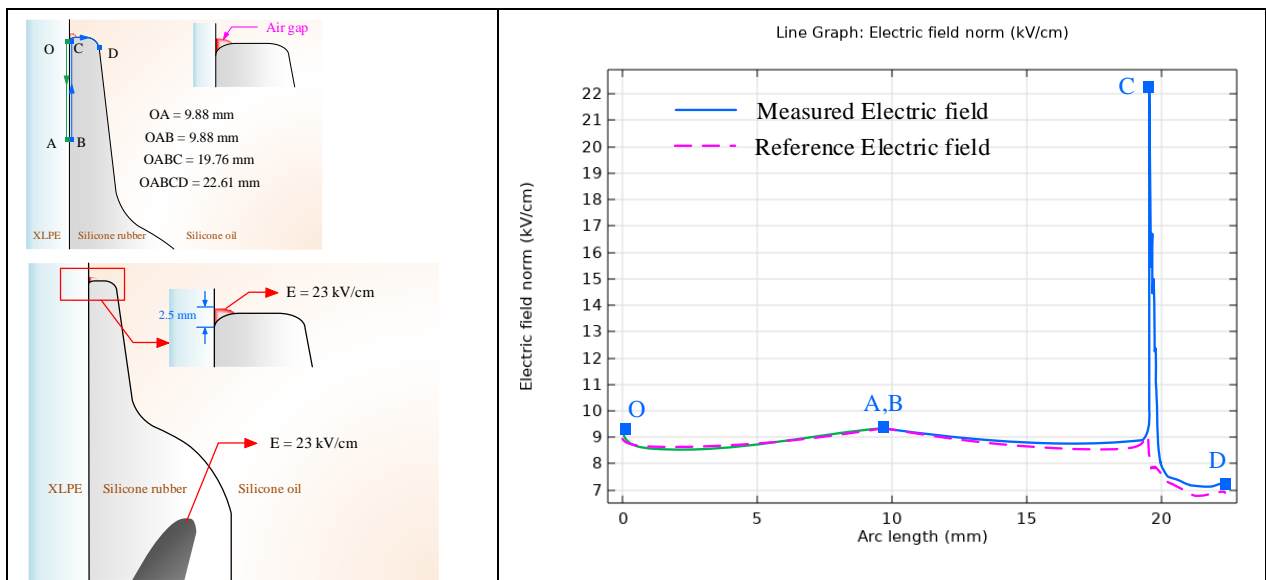
รูปที่ 2.5.28 ผลการจำลองศักย์ไฟฟ้าเท่า และสนามไฟฟ้า ของหัวต่อสายเคเบิล

จำลองค่าสนามไฟฟ้าของกรวยลดความเครียดที่แนบสนิทกับ XLPE โดยไม่มีช่องว่างระหว่าง XLPE ซึ่งมีขนาดแสดงดังรูปที่ 2.5.29 โดยจำลองสนามไฟฟ้าตามแนว OA และ AB ซึ่งเป็นแนวเส้นเดียวกัน มีสนามไฟฟ้าเท่ากัน แต่แนวการวัดตรงข้ามกัน บริเวณขอบปากกรวยลดความเครียดจะมีความเครียดสนามไฟฟ้า 9.26 kV/cm ส่วนที่ปีกเบนสนาม (deflector) มีความเครียดสนาม 19 kV/cm



รูปที่ 2.5.29 ความเครียดสนามไฟฟ้าที่วัดตามแนว XLPE และกรวยลดความเครียดสนาม

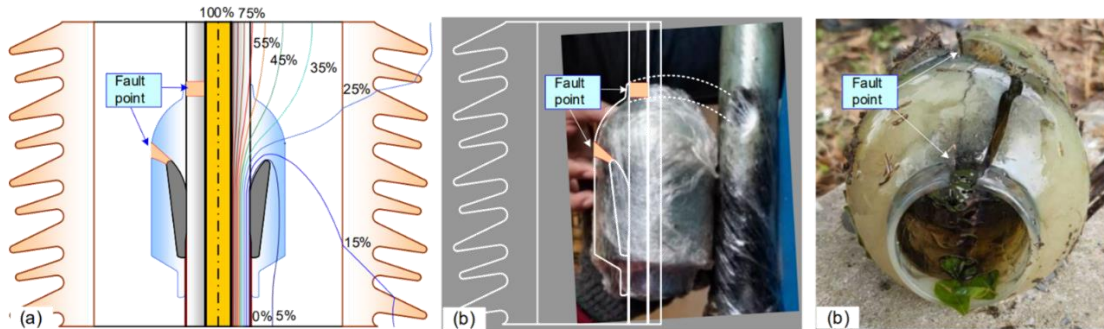
ต่อมาจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าโดยมีช่องว่างอากาศ (Air gap) ระหว่าง stress cone และ XLPE ดังรูปที่ 2.5.30 ทำให้สนามไฟฟ้าบริเวณจุด C สูงถึง 22 kV/cm และ ที่ปีกเบนสนามเป็น 23 kV/cm



รูปที่ 2.5.30 ความเครียดสนามไฟฟ้าโดยมีช่องว่างอากาศ (Air gap) ระหว่าง stress cone และ XLPE

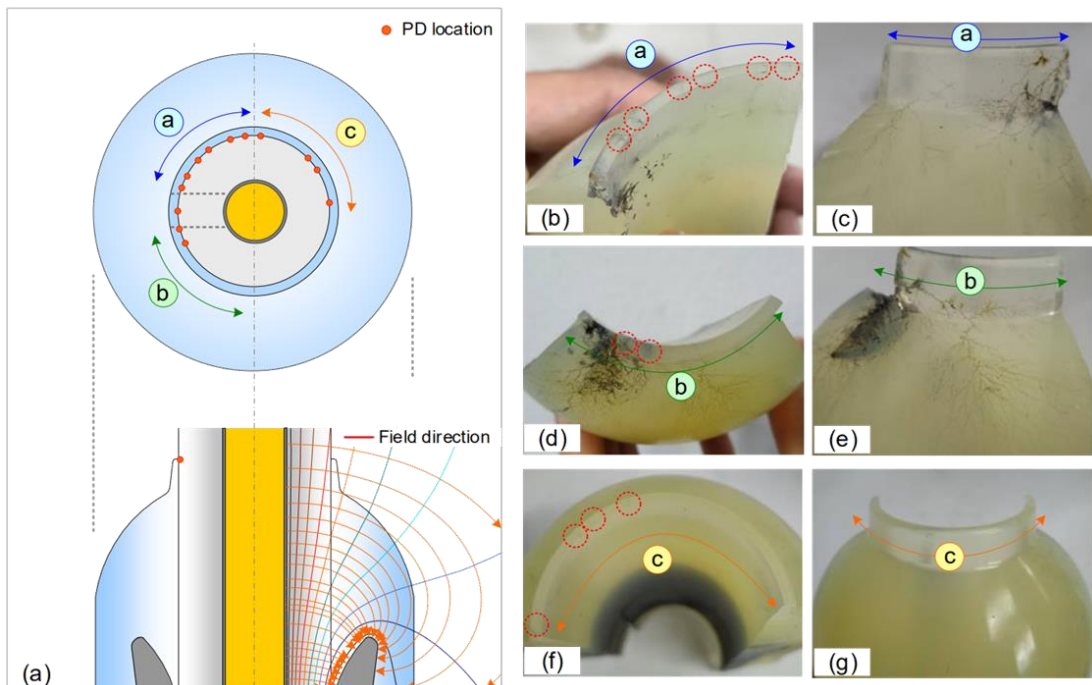
กลไกการเบรกดาวน์ของหัวต่อสายเคเบิลสามารถสรุปได้ดังนี้

1. เพื่อให้เข้าใจถึงกลไกความล้มเหลว จะต้องพิจารณาเส้นศักย์ไฟฟ้าเท่าและความเค้นสนามไฟฟ้าของกรวยลดความเครียด รวมถึงตำแหน่งที่เกิดการเบรกดาวน์ ดังรูปที่ 2.5.31 a) แสดงเส้นศักย์ไฟฟ้าเท่าที่กรวยลดความเครียดของสายเคเบิลที่มีการจ่ายไฟ ณ แรงดัน 115 kV รูปที่ 2.5.31 b) แสดงร่องรอยของกรวยลดความเครียดที่เบรกดาวน์



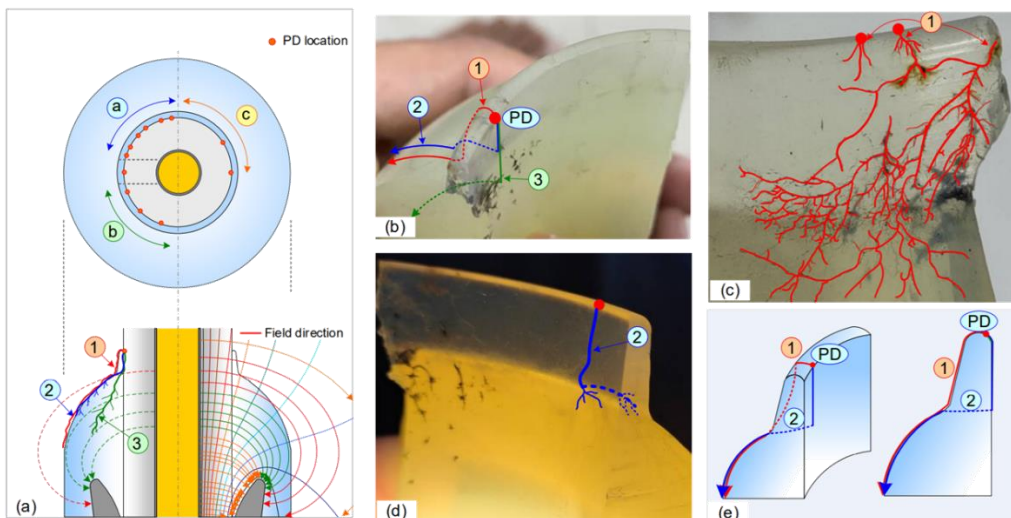
รูปที่ 2.5.31 กลไกที่ 1 เส้นศักย์ไฟฟ้าเท่าของ stress cone ที่เบรกดาวน์

2. แหล่งที่มาของเส้นทางการดิสชาร์จ (tracking) ที่ด้านบนของกรวยลดความเครียดก็ถูกนำมาพิจารณาด้วย ดังรูปที่ 2.5.32 a) แสดงตำแหน่งของจุดเกิดการดิสชาร์จ (PD location) ตลอดจนเส้นสนามไฟฟ้าเท่าและเส้นศักย์ไฟฟ้าเท่า รูปที่ 2.5.32 b) - g) แสดงร่องรอยของการดิสชาร์จดังกล่าว



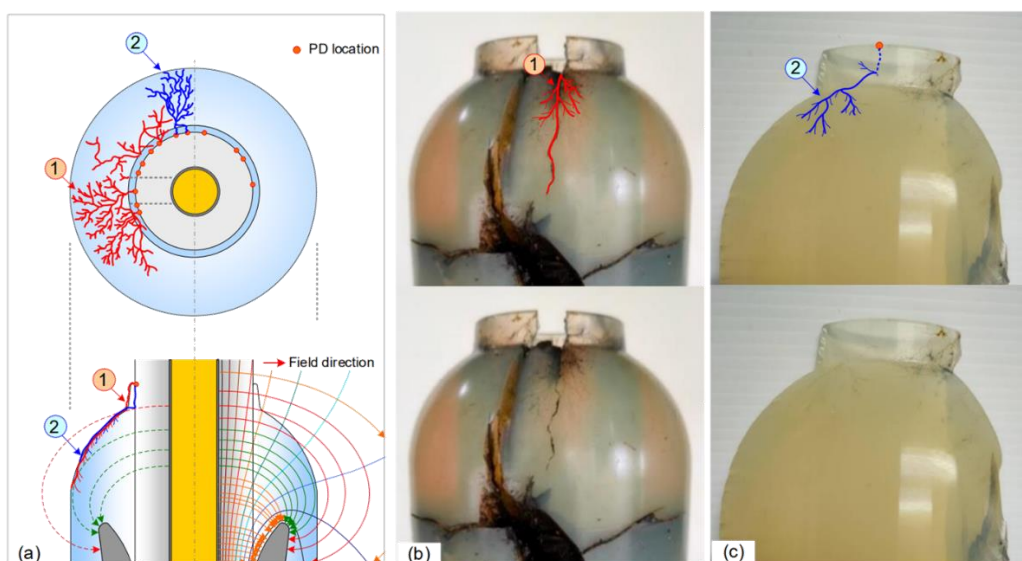
รูปที่ 2.5.32 กลไกที่ 2 ตำแหน่งของจุดเริ่มเกิดการดิสชาร์จ

3. จุดเริ่มต้นของการดิสชาร์จ ควรเริ่มจากการคายประจุบางส่วน (PD) ที่เกิดจากผิวเชื่อมต่อระหว่างกรวยลดความเครียดและฉนวน XLPE และช่องว่างอากาศระหว่าง stress cone และผิว XLPE หลังจากมีการคายประจุที่ด้านบนของกรวยความเค้นแล้ว จะเกิดดิสชาร์จได้ 3 ทางตามแนวสนามไฟฟ้า (Field direction) คือ 1 - 3 ดังแสดงในรูปที่ 2.5.33 a) - b) เส้นทางการดิสชาร์จที่ 1 เกิดขึ้นบนพื้นผิวกรวยลดความเครียดที่ติดกับน้ำมันซิลิโคน, เส้นทางการดิสชาร์จที่ 2 เกิดขึ้นระหว่างผิวด้านในของกรวยลดความเครียดกับผิว XLPE ในระยะทางที่การดิสชาร์จเกิดได้ง่ายที่สุด จากนั้นทะลุผ่านตัวฉนวนของกรวยลดความเครียดไปยังพื้นผิวด้านนอกของกรวย และ เส้นทางการดิสชาร์จที่ 3 เติบโตภายในเนื้อกรวยลดความเครียด เส้นทางการดิสชาร์จทั้งหมดแสดงในรูปที่ 2.5.33



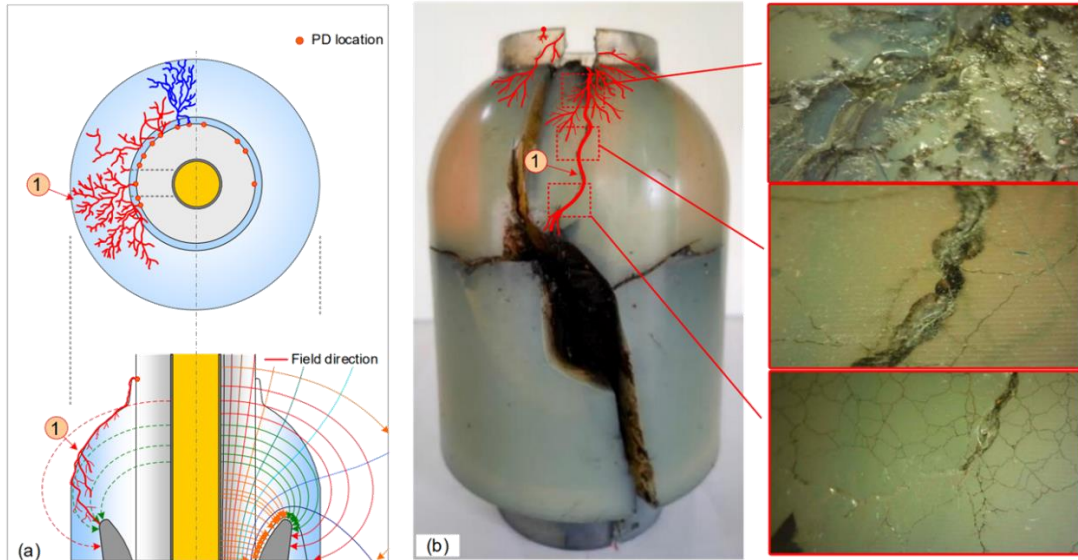
รูปที่ 2.5.33 กลไกที่ 3 เส้นทางการดิสชาร์จของ stress cone

4. รูปที่ 2.5.34 แสดงเส้นทางการดิสชาร์จที่พัฒนาขึ้นของเส้นทางที่ 1 และ 2 ดังกล่าว เป็นการเกิดดิสชาร์จบนพื้นผิวกรวยลดความเครียด (tracking)



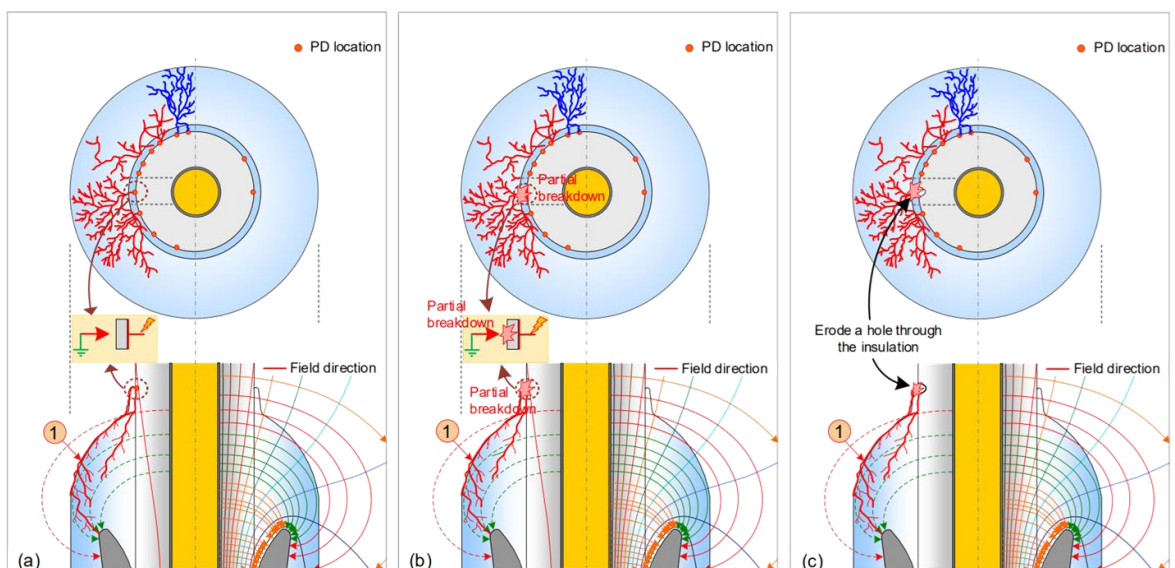
รูปที่ 2.5.34 กลไกที่ 4 แสดงเส้นทางการดิสชาร์จที่พัฒนาขึ้น

5. ระหว่างการเคลื่อนลงของการดิสชาร์จแต่ละเส้นทาง เช่น เส้นทางที่ 1 ดังรูปที่ 2.5.35 เมื่อการดิสชาร์จเข้าไปใกล้กับตำแหน่งปีกเบนสนาม (deflector) โดยมีทิศทางของการดิสชาร์จตามแนวเส้นศักย์ไฟฟ้าเท่าๆ เพื่อเพื่อเชื่อมต่อแนวการดิสชาร์จระหว่างปีกเบนสนามและปากของกรวยลดความเครียด (conductive path) ซึ่งมีร่องรอยแสดงดังรูปที่ 2.5.35



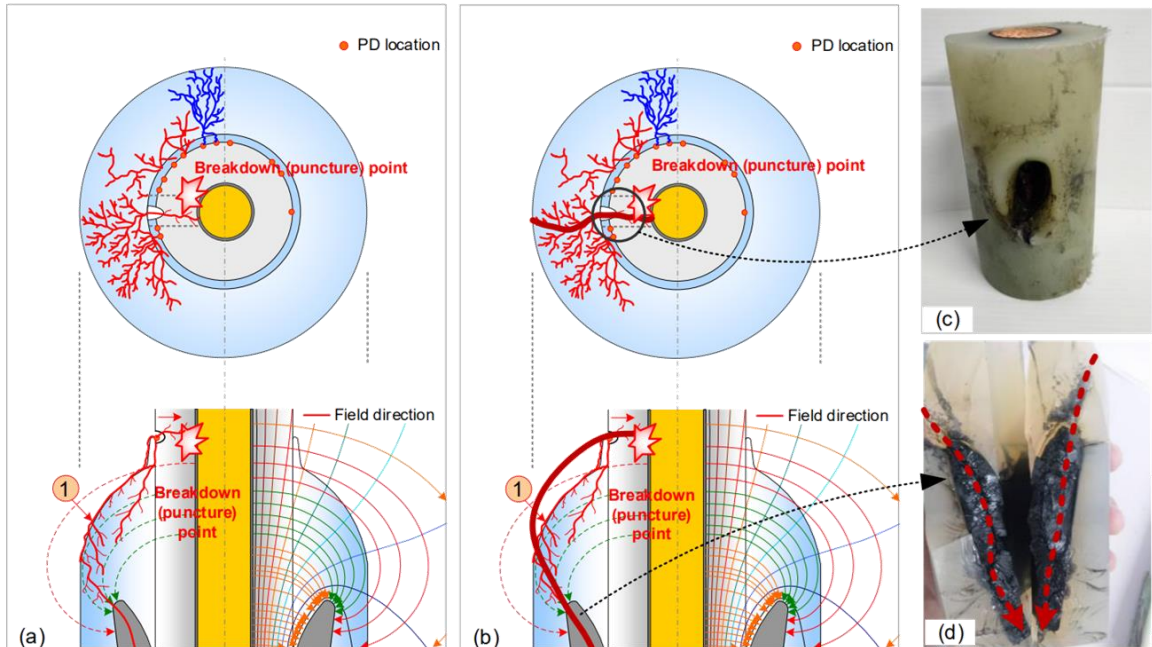
รูปที่ 2.5.35 กลไกที่ 5 การดิสชาร์จเข้าไปใกล้กับตำแหน่งปีกเบนสนาม (deflector)

6. เส้นทางนำไฟฟ้า (conductive path) ที่เกิดขึ้นทำให้เกิดสนามที่ไม่สม่ำเสมอสูง ทำให้เหมือนกับมีอเล็กโตรครวดปลายแหลมไปจ่อที่อเล็กโตรดระนาบศักย์สูง (ตัวนำทองแดงของสายเคเบิล) และคั่นด้วยฉนวน XLPE ดังรูปที่ 2.5.36 (a) จึงเกิดสนามที่ไม่สม่ำเสมอสูงขึ้น ส่งผลให้เกิด PD ขึ้นเรื่อยๆ ทำลายพื้นผิว XLPE และการดิสชาร์จนี้เกิดขึ้นเรื่อยๆ ไปจน กินเนื้อ XLPE จนบางลง ดังรูปที่ 2.5.36 (b) และ (c)



รูปที่ 2.5.36 กลไกที่ 6 เส้นทางนำไฟฟ้า (conductive path) เจาะชั้น XLPE

7. เมื่อฉนวน XLPE บางลงจนไม่สามารถทนความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดจากการใช้งานที่แรงดัน 115 kV ดังกล่าวได้แล้ว จึงเสียสภาพความเป็นฉนวน คือเกิดการเบรกดาวน์ขึ้น โดยจากร่องรอยที่ปรากฏนั้นมีทิศทางจาก ตัวนำทองแดง XLPE น้ำมันซิลิโคน กรวยลดความเครียด (stress cone) ปีกเบนสนาม (deflector) กราวด์ซีลด์



รูปที่ 2.5.37 กลไกที่ 7 การเบรกดาวน์ของหัวต่อสายเคเบิล

2.6 มาตรฐานและเอกสารที่เกี่ยวข้อง

ตารางที่ 2.6.1 มาตรฐาน IEC ที่เกี่ยวข้อง

เลขเอกสาร	เรื่อง
IEC 60270	High-voltage test techniques - Partial discharge measurements (Consolidated version)
IEC TS 62478	High voltage test techniques - Measurement of partial discharges by electromagnetic and acoustic methods
IEC TR 61294	Insulating liquids - Determination of the partial discharge inception voltage (PDIV) -Test procedure
IEC 60076-1	Power transformers - Part 1: General
IEC 60076-3	Power transformers - Part 3: Insulation levels, dielectric tests and external clearances in air (Consolidated version)
IEC/TS 61934	Electrical insulating materials and systems - partial discharges (PD) under short rise time and repetitive voltage impulses
IEC 60034-27-1	Rotating electrical machines - Part 27-1: Off-line partial discharge measurements on the winding insulation
IEC 60034-27-2	Rotating electrical machines - Part 27-2: On-line partial discharge measurements on the stator winding insulation of rotating machines
IEC 60034-18-41	Rotating electrical machines - Part 18-41: Partial discharge free electrical insulation systems (Type I) used in rotating electrical machines fed from voltage converters -Qualification and quality control tests
IEC 60502-1	Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages from 1 kV ($U_m = 1,2$ kV) up to 30 kV ($U_m = 36$ kV) - Part 1: Cables for rated voltages of 1 kV ($U_m = 1,2$ kV) and 3 kV ($U_m = 3,6$ kV)
IEC 62067	Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages above 150 kV ($U_m = 170$ kV) up to 500 kV ($U_m = 550$ kV) - Test methods and requirements
IEC 60885-2	Electrical test methods for electric cables. Part 2: Partial discharge tests
IEC 62271-1	High-voltage switchgear and controlgear - Part 1: Common specifications for alternating current switchgear and controlgear
IEC 62271-203	High-voltage switchgear and controlgear - Part 203: AC gas-insulated metal-enclosed switchgear for rated voltages above 52 kV

ตารางที่ 2.6.2 มาตรฐาน IEEE ที่เกี่ยวข้อง

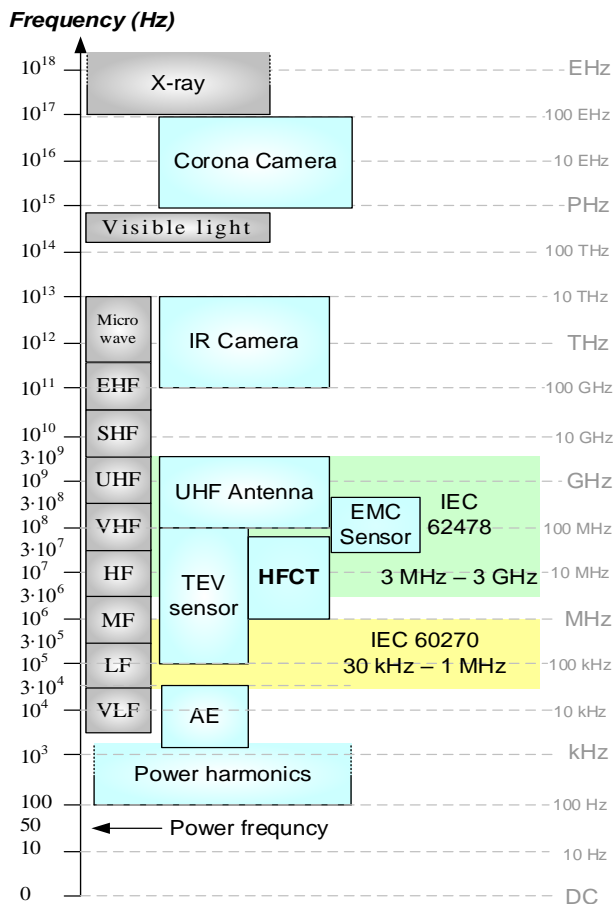
เลขเอกสาร	เรื่อง
IEEE C37.301	IEEE Standard for High-Voltage Switchgear (Above 1000 V) Test Techniques--Partial Discharge Measurements
IEEE 48	IEEE Standard for Test Procedures and Requirements for Alternating-Current Cable Terminations Used on Shielded Cables Having Laminated Insulation Rated 2.5 kV through 765 kV or Extruded Insulation Rated 2.5 kV through 500 kV
IEEE C57.113	IEEE Recommended Practice for Partial Discharge Measurement in Liquid-Filled Power Transformers and Shunt Reactors
IEEE C57.124	IEEE Recommended Practice for the Detection of Partial Discharge and the Measurement of Apparent Charge in Dry -Type Transformers
IEEE C57.127	IEEE Draft Guide for the Detection, Location and Interpretation of Sources of Acoustic Emissions from Electrical Discharges in Power Transformers and Power Reactors
IEEE C57.160	IEEE Guide for the Electrical Measurement of Partial Discharges in High Voltage Bushings and Instrument Transformers
IEEE 400.2	IEEE Guide for Field Testing of Shielded Power Cable Systems Using Very Low Frequency (VLF)(less than 1 Hz)
IEEE 400.3	IEEE Guide for Partial Discharge Testing of Shielded Power Cable Systems in a Field Environment
IEEE 400.4	IEEE Guide for Field Testing of Shielded Power Cable Systems Rated 5 kV and Above with Damped Alternating Current (DAC) Voltage
IEEE 404	IEEE Standard for Extruded and Laminated Dielectric Shielded Cable Joints Rated 2.5 kV to 500 kV
IEEE 436	IEEE Guide for Making Corona (Partial Discharge) Measurements on Electronics Transformers
IEEE 1434	IEEE Guide for the Measurement of Partial Discharges in AC Electric Machinery
IEEE 1799	IEEE Recommended Practice for Quality Control Testing of External Discharges on Stator Coils, Bars, and Windings

ตารางที่ 2.6.3 Cigré โบชัวร์ทางเทคนิคที่เกี่ยวข้อง

เลขเอกสาร	เรื่อง
182	Partial discharge detection in installed HV extruded cable systems
226	Knowledge rules for partial discharge diagnosis in service
258	Application of On-Line Partial Discharge Tests to Rotating Machines
297	Practical aspects of the detection and location of PD in power cables
366	Guide for partial discharge measurements in compliance to IEC 60270
444	Guidelines for unconventional Partial Discharge measurements
502	High-Voltage On-Site Testing with Partial Discharge Measurement
525	Risk Assessment on Defects in GIS based on PD Diagnostics
654	UHF Partial Discharge Detection System for GIS: Application Guide for Sensitivity Verification
581	Guide -Corona Electromagnetic Probe Tests (TVA)
654	UHF Partial Discharge Detection System for GIS: Application Guide for Sensitivity Verification
662	Guidelines for partial discharge detection using conventional (IEC 60270) and unconventional methods
674	Benefits of PD diagnosis on GIS condition assessment
676	Partial discharges in transformers
728	On-site Partial Discharge assessment of HV and EHV cable systems
745	Issues related to spark discharges

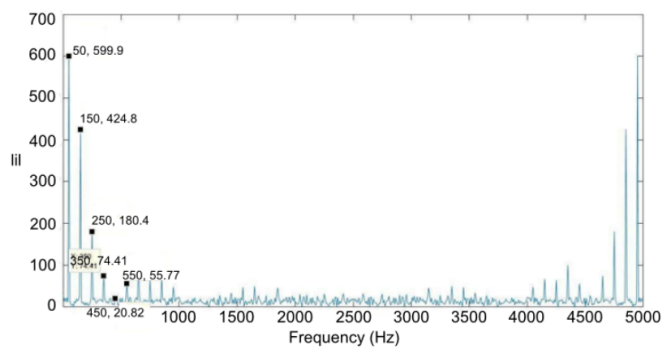
2.7 เซนเซอร์ในการวัดสัญญาณ PD

เซนเซอร์ที่ใช้ในการตรวจวัดสัญญาณ PD มีตั้งแต่เซนเซอร์ AE (Acoustic Emission Sensors) ที่ตรวจวัดทางเสียง , เซนเซอร์ TEV ที่ตรวจวัดแรงดันที่ผิวโลหะ , เซนเซอร์ HFCT ที่ตรวจวัดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และเป็นเซนเซอร์หลักที่ใช้ในงานวิจัยฉบับนี้ , เซนเซอร์ที่ต่อกับตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว เช่น EMC , เซนเซอร์สายอากาศ ตลอดจนการตรวจจับ PD ด้วยกล้องอินฟราเรด หรือ การตรวจจับปรากฏการณ์โคโรน่าด้วยกล้องโคโรน่า



รูปที่ 2.7.1 ย่านวัดสัญญาณที่ความถี่ต่างๆ

ความถี่ฮาร์มอนิกไฟฟ้าที่เป็นจำนวนเท่า 1 3 5 7 9 ... ของความถี่พลังงาน โดยทั่วไปจะสูงถึงราวๆ 1 kHz ได้แสดงดังรูปที่ 2.7.2



รูปที่ 2.7.2 FFT Spectrum ของไฟฟ้ากระแส 50 Hz

ในขณะที่สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทั้งหมดครอบคลุมช่วงความถี่ที่กว้างมาก คลื่นวิทยุเองก็ขยายออกไปในช่วงที่กว้างมากเช่นกัน การอ้างถึงส่วนต่างๆ เพื่อความสะดวกจึงกำหนดช่วงสเปกตรัมที่แตกต่างกันในพื้นที่ต่างๆ แต่ละส่วนได้รับการจัดสรรชื่อ เช่น VLF (Very Low Frequency)

รูปที่ 2.7.1 แสดงความถี่สัญญาณตั้งแต่ สัญญาณ DC จนถึงความถี่พลังงานไฟฟ้าในระบบประเทศไทยคือ 50 Hz ผ่านย่านของฮาร์มอนิคราวๆ 1 kHz ย่านสัญญาณเสียงราวๆ 400 kHz ที่เป็นย่าน VLF ไปจนถึง UHF ที่เป็นย่านในการตรวจวัด PD ที่นิยมตลอดจนย่านไมโครเวฟที่ตรวจสอบด้วยกล้องอินฟราเรด และย่านแสงอาทิตย์ที่ตรวจสอบด้วยกล้องโคโรน่า ที่จะแสดงรายละเอียดพอสังเขปต่อไป

2.7.1 ตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวและอิมพีแดนซ์วัดกระแส Cc

ตัวเก็บประจุแบบคาบเกี่ยว Cc (Coupling Capacitor) เป็นเซ็นเซอร์ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการตามมาตรฐาน IEC 60270 ซึ่งมีความโดดเด่นในการทดลองซ้ำได้เพราะใช้ในการตรวจรับรองคุณภาพอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง โดยปกติจะประกอบด้วยตัวเก็บประจุไฟฟ้าแรงสูงที่ต่อขนานกับวัตถุทดสอบ เมื่อเกิด PD ขึ้น พลังงานที่เก็บไว้ในตัวเก็บประจุแบบคาบเกี่ยวจะจ่ายกระแสไฟชาร์จส่วนหนึ่งไปชดเชยกระแส PD นั้น ยิ่งเก็บพลังงานไว้ในตัวเก็บประจุมากเท่าไร กระแสชาร์จก็จะยิ่งสูงขึ้นในกรณีของการเกิด PD , ดังนั้นค่าความจุสูงมักจะส่งผลให้มีความไวต่อสัญญาณที่สูงขึ้น รูปที่ 2.7.3 (ซ้าย) ได้แสดงรูปตัวเก็บประจุแบบคาบเกี่ยว รวมถึงเมื่อใช้ตัวเก็บประจุแบบคาบเกี่ยว เป็นเรื่องปกติที่จะสามารถรับรูปคลื่นของแรงดันไฟฟ้าได้เช่นกัน สิ่งนี้จำเป็นสำหรับการวัด PD ที่เกิดขึ้นในเวลาเดียวกันในเฟสอื่นๆ (synchronize) นอกจากนี้ยังสามารถเชื่อมต่ออิมพีแดนซ์การวัดแบบอนุกรมกับวัตถุทดสอบได้อีกด้วย เช่น CPL 543 ที่ได้แสดงดังรูปที่ 2.7.3 (ขวา) ที่ได้ใช้ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สจล. ที่ใช้ในการวัดกระแส PD รวมถึงป้องกันแรงดันไฟฟ้าเกิน $90 V_{Peak}$ ในตัว และ เมื่อทำการตรวจวัดนอกสถานที่ด้วยเครื่องมือ HV ขนาดและราคาของตัวเก็บประจุแบบคาบเกี่ยวอาจกลายเป็นปัญหาได้ ดังนั้นจึงเป็นบางกรณีที่ใช้เซ็นเซอร์ทางเลือก [50]



รูปที่ 2.7.3 ตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว (ซ้าย) อิมพีแดนซ์วัดกระแส (ขวา)

ตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว MCC 210 (ซ้าย)

แรงดันพิกัด 100 kV
 ค่าเก็บประจุไฟฟ้า 1.0 nF (+- 10%)
 ความคงทนแรงดันไฟฟ้าที่ 1 นาที 150 kV
 ประจุ PD ที่ 100 kV < 1 pC
 น้ำหนัก 10 kg
 ขนาด 45.0 x 73.6 x 45.0 cm

อิมพีแดนซ์วัดกระแส CPL 543 (ขวา)

กระแสสุดที่ทนได้ 5 A
 ช่วงความถี่สัญญาณด้านออก 20 kHz – 6 MHz
 ความจุไฟฟ้าด้านต่ำ (low-arm) 272 uF
 ขนาด 15.0 x 6.0 x 10.0 cm
 น้ำหนัก 0.7 kg

2.7.2 ตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวที่ติดตั้งใช้งานในระบบไฟฟ้า EMC

เป็นตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวที่ทำจาก อีพ็อกซีไมก้า ที่มีความทนทานมาก ตามการทดสอบตาม IEEE 1043 พิสูจน์ให้เห็นว่า EMC (Epoxy Mica Capacitors) รุ่น 16 kV แสดงดังรูปที่ 2.7.4 ทนทานได้นานกว่า 1,000 ชั่วโมงที่ 30 kVrms ตามวิธีการทางสถิติ (IEEE 930-1987) แปลเป็นการใช้งาน 60,000 ปีที่แรงดันไฟฟ้าปกติ, ซึ่งจะติดตั้งอย่างถาวรที่ระบบกำเนิดพลังงานไฟฟ้า เช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ให้ใกล้เคียงอุปกรณ์ที่จะตรวจสอบ PD มากที่สุดเพื่อความไวต่อสัญญาณไฟฟ้า อุปกรณ์ EMC 80 pF ของ Iris นี้เป็นที่นิยมในประเทศไทย ซึ่งได้รับการออกแบบมาเพื่อกีดกันความถี่พลังงาน 50/60 Hz และอนุญาตให้เฉพาะสัญญาณความถี่สูง (>40MHz) เท่านั้นที่จะผ่านได้ [51]



รูปที่ 2.7.4 ตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวที่ทำจากอีพ็อกซีไมก้า (EMC)

ข้อมูลจำเพาะอื่น ๆ :

ความจุไฟฟ้า : 80 pF \pm 4 pF

ความไวสัญญาณ PDEV : 1 pC (ตาม ASTM D1868 และ IEC 60270)

ช่วงความถี่ 50 Ω (-3dB) : 40 MHz – 350 MHz

ช่วงอุณหภูมิการทำงาน : -50 °C ถึง +130 °C

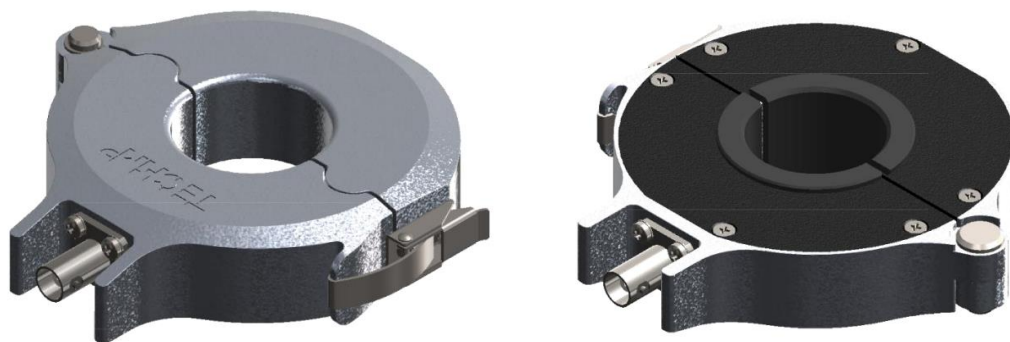
น้ำหนัก : 1.6 Kg

ความสูง : 12.7 cm

ความคงทนแรงดันไฟฟ้าที่ 1 นาที : 95 kV

2.7.3 หม้อแปลงกระแสความถี่สูง HFCT

สัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจาก PD นั้นเซ็นเซอร์แบบเหนี่ยวนำสามารถวัดปริมาณทางแม่เหล็กไฟฟ้าง่ายๆ ได้ โดยปกติแล้ว HFCT (High Frequency Current Transformer) แสดงดังรูปที่ 2.7.5 จะติดตั้งรอบๆ ตัวนำสายดินที่มีอยู่ของอุปกรณ์ที่ทดสอบ ดังนั้นไม่มีการวัดที่ศักย์ไฟฟ้าแรงสูงแต่วัดที่ศักย์ไฟฟ้าของดิน ซึ่งช่วยให้เซ็นเซอร์มีขนาดเล็กและราคาถูกลงเมื่อเทียบกับตัวเก็บประจุแบบคาบเกี่ยวแบบดั้งเดิม เหมาะสำหรับการทดสอบ PD แบบเปิด/ปิด ในระบบไฟฟ้าหลายประเภท เช่น สายเคเบิล หม้อแปลง เครื่องหมุน ฯลฯ ข้อได้เปรียบหลักคือการติดตั้งที่ง่ายเพียงคล้องสายดินของระบบไฟฟ้าที่ทดสอบ ใช้ตัวเชื่อมต่อ BNC แบบโคแอกเซียลเพื่อเชื่อมต่อแคลมป์ กับเครื่องวิเคราะห์สัญญาณ PD โดยใช้สายโคแอกเซียล 50 Ω และ ลูกศรที่แสดงทิศทางบนแคลมป์นั้นระบุชี้ของแรงดันเอาต์พุต ที่สัมพันธ์กับทิศทางกระแสอินพุต คือ เมื่อติดตั้งเซ็นเซอร์โดยลูกศรชี้ไปที่กราวด์ สัญญาณแรงดันที่ตรวจพบ จะมีเฟสเดียวกับกระแสอินพุต [52]



รูปที่ 2.7.5 หม้อแปลงกระแสความถี่สูง (HFCT)

ข้อมูลจำเพาะอื่น ๆ :

ช่วงความถี่ : 1 MHz – 80 MHz

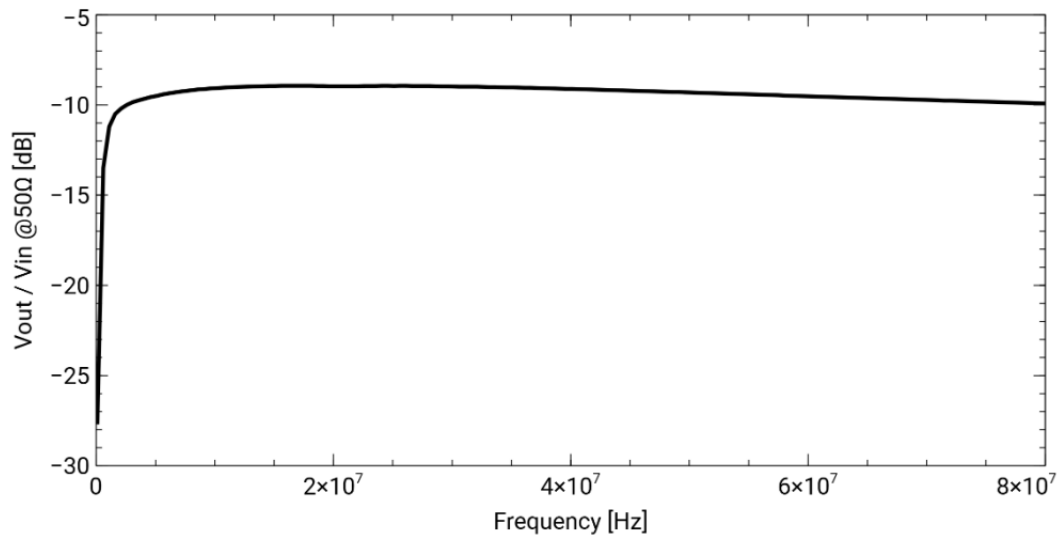
ความไวต่อสัญญาณที่ 5MHz : 19 mV/mA

โหลดอิมพีแดนซ์ : 50 Ω

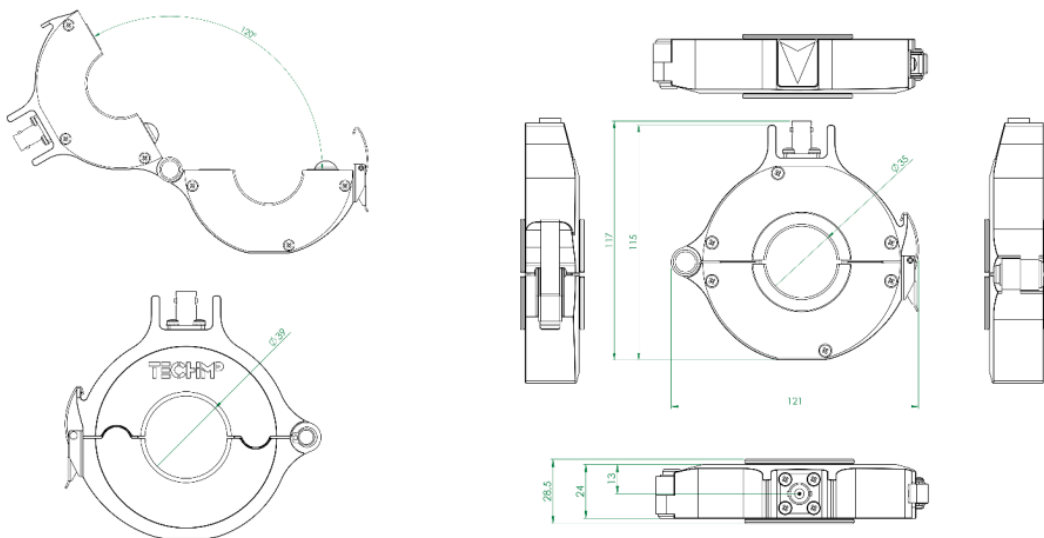
เส้นผ่านศูนย์กลางช่องคล้อง : 39 mm

อุณหภูมิที่ทำงานได้ : -20 $^{\circ}\text{C}$ ถึง 70 $^{\circ}\text{C}$

ผลตอบสนองต่อความถี่ของหม้อแปลงกระแสความถี่สูง HFCT คือการทดสอบหาช่วงความถี่ในการทำงาน (Bandwidth) ของตัวแปลงกระแสความถี่สูงหรือช่วงความถี่ในการตรวจจับสัญญาณการดิซฮาร์โมนิกบางส่วนนั่นเอง ดังนั้นช่วงความถี่ในการทำงานของตัวแปลงกระแสความถี่สูงต้องครอบคลุมส่วนประกอบความถี่ของสัญญาณการดิซฮาร์โมนิกถึงจะสามารถตรวจจับการเกิดดิซฮาร์โมนิกบางส่วนได้ ย่านวัดของ HFCT แสดงดังรูปที่ 2.7.6 สภาพะคงตัวของ การตอบสนองจะเริ่มที่ราวๆ 1 MHz ไปจนถึง 80 MHz และรูปโครงสร้างของ HFCT นี้แสดงดังรูปที่ 2.7.7



รูปที่ 2.7.6 การตอบสนองในช่วงความถี่ต่างๆ ของ HFCT



รูปที่ 2.7.7 ภาพวาดแสดงรายละเอียดโครงสร้าง

2.7.4 สายอากาศในการวัด PD

เป็นวิธีการอย่างหนึ่งสำหรับการแพร่กระจายหรือรับคลื่นวิทยุ (IEEE 145) โดยทั่วไปหมายถึงโครงสร้างซึ่งรองรับการเคลื่อนที่ของคลื่น ที่เคลื่อนที่ไประหว่างท่อนำคลื่นและอากาศว่าง [53] ในการวัด PD นี้ผู้เขียนได้ใช้สายอากาศแบบ Horn เป็นเซ็นเซอร์ตรวจจับการคายประจุบางส่วนที่ออกแบบมาเพื่อรับการปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจาก PD ที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์ไฟฟ้า เช่น GIS GIL หม้อแปลงไฟฟ้า เป็นต้น สายอากาศแบบ Horn ดังแสดงในรูปที่ 2.7.8 นี้ มีช่วงความถี่กว้างในการส่งถ่ายคลื่น (บรอดแบนด์) ที่มีการตอบสนองแบบระนาบ (flat) ซึ่งทำให้สายอากาศแบบ Horn เหมาะสมกับการใช้งานที่หลากหลาย ได้รับการปรับแต่งให้ทำงานในช่วงความถี่ที่เหมาะสมสำหรับการตรวจสอบ PD และได้รับการออกแบบมาเพื่อให้มีความไวต่อสัญญาณและอัตราขยายสูง การออกแบบที่กะทัดรัดและทนทาน รวมถึงเป็นเซ็นเซอร์แบบพาสซีฟ (ใช้งานได้ด้วยตัวเอง) ทำให้สายอากาศ Horn นี้เป็นเซ็นเซอร์ที่เหมาะสมที่สุดอย่างหนึ่ง สำหรับการติดตั้งโดยตรงบน GIS/GIL และหม้อแปลงกำลัง อย่างไรก็ตาม สามารถนำไปใช้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าได้ โดยมีเงื่อนไขว่าต้องมีช่องเปิดหรือพื้นผิวโปร่งใส, สายอากาศแบบ Horn สามารถใช้ร่วมกับกลุ่มผลิตภัณฑ์ Techimp Frequency Shifters ซึ่งออกแบบและปรับให้เหมาะสมโดยเฉพาะเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุดด้วย [52]



รูปที่ 2.7.8 สายอากาศแบบ Horn ในการวัด PD

ข้อมูลจำเพาะอื่น ๆ :

ช่วงความถี่ : 500 MHz – 3 GHz

แฟกเตอร์สายอากาศ (Antenna Factor) : 50 – 30 dB/m

อัตราส่วนแรงดันสูงสุดและต่ำสุดของคลื่นนิ่งในสาย (VSWR) 5:1

ความกว้างการยิง (Beam) 3dB : 60° - 140°

การโพลาไรซ์เซชัน : แบบเส้นตรง

อิมพีแดนซ์ : 50 Ω

ขนาด : 7.0 x 10.0 x 5.0 cm³

อุณหภูมิที่ทำงานได้ : -20 °C ถึง 650 °C

ปัจจัยสายอากาศ AF (Antenna Factor) กำหนดโดยอัตราส่วนของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ได้รับจากสายอากาศ (E) ต่อ แรงดันไฟฟ้าที่ผลิตขึ้นที่ขั้วเอาต์พุตของเสาอากาศ (V) ปัจจัยสายอากาศเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับการทดสอบ EMI/EMC (การวัดความแรงของสนามไฟฟ้า) ซึ่งข้อกำหนดของปัจจัยสายอากาศกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างความแรงของสนามไฟฟ้า (E) รอบ ๆ สายอากาศและแรงดันไฟฟ้าที่เหนี่ยวนำโดยสายอากาศนั้น (V) แสดงหน่วยเป็น dB/m และสมการที่ใช้ในการคำนวณสามารถคือ

$$\text{Antenna Factor} = \frac{\sqrt{377P_D}}{\sqrt{50P_D A_e}} = \frac{2.75}{\sqrt{A_e}} = \frac{9.73}{\lambda \sqrt{G}}$$

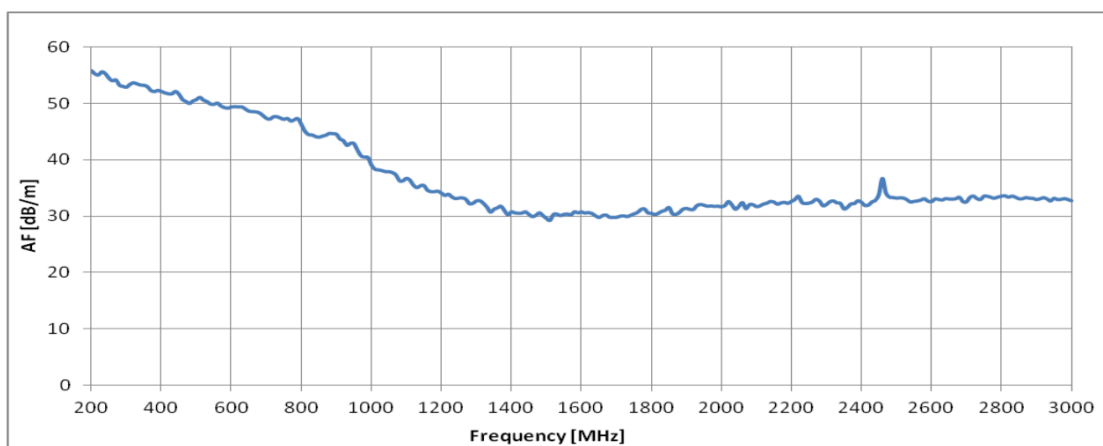
เมื่อ $A_e = \frac{\lambda^2 G}{4\pi} = \text{Effective Aperture of the Antenna}$

$P_D = \text{Power Density in Watts per unit area}$

$G = \text{Gain of the Antenna in dBi}$

$\lambda = \text{Wavelength of the Wave}$

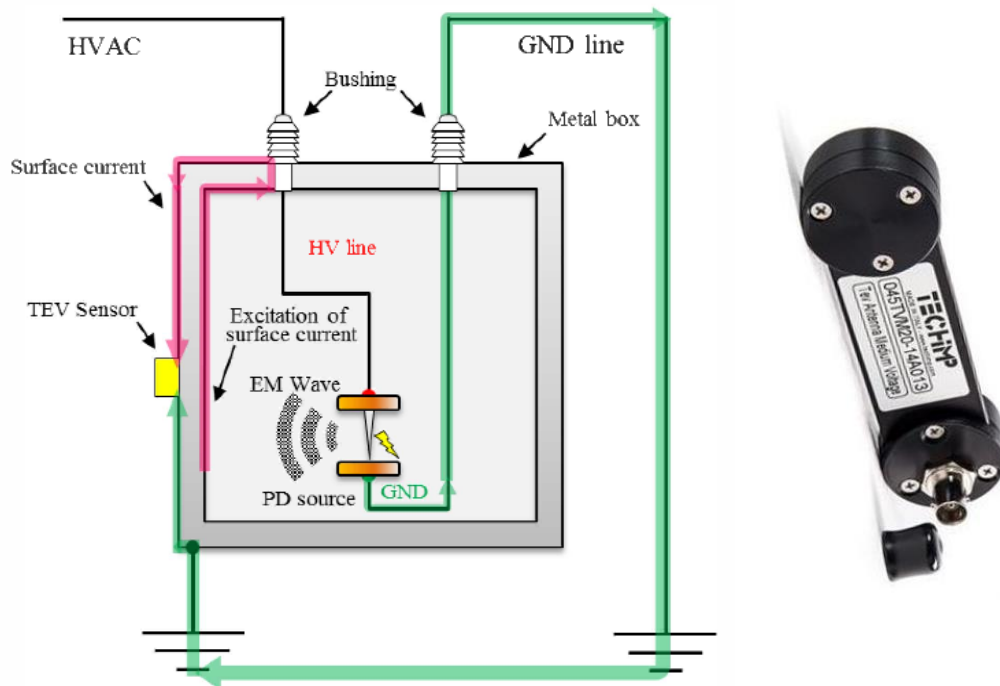
ที่ความถี่เฉพาะใดๆ ปัจจัยของสายอากาศจะมีความสัมพันธ์เชิงเส้นเสมอ กับสนามไฟฟ้าที่สายอากาศได้รับ ดังนั้นจึงสามารถใช้ตัวประกอบสายอากาศเพื่อกำหนดค่าของสนามไฟฟ้าที่ตกกระทบได้ รูปที่ 2.7.9 ได้แสดงแฟคเตอร์สายอากาศ Horn นี้ โดยเพียงแค่เพิ่มค่าตัวประกอบสายอากาศ (แสดงเป็น dB) เข้ากับค่าของแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้ (แสดงเป็น V) นี่เป็นหนึ่งในข้อได้เปรียบหลักของการใช้ปัจจัยเสาอากาศในขณะที่ทำการวัดการปล่อยสัญญาณสำหรับการทดสอบ EMI-EMC



รูปที่ 2.7.9 แฟคเตอร์สายอากาศ Horn

2.7.5 เซนเซอร์วัดแรงดันเกินชั่วขณะที่ตัวถัง TEV

เป็นเซนเซอร์ TEV (Transient Earth Voltage) แสดงดังรูปที่ 2.7.10 (ขวา) วัด PD โดยหลักการทำงานคือ การต่อตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวโดยตรงกับเคสโลหะที่ต่อลงดินของตัวถังหม้อแปลง ปลายทั้งสองด้านของเซนเซอร์ TEV สามารถเชื่อมต่อกับแม่เหล็กกับช่องใดๆ บนพื้นผิวโลหะ จะรับสัญญาณไฟฟ้าที่ได้รับจากการเกิด PD บนพื้นผิวโลหะทั้งสอง เป็นแรงดันไฟฟ้าที่เหนี่ยวนำบนพื้นผิวของโลหะตัวถังจาก PD ที่เกิดขึ้นจะเกิดการถ่ายประจุลงสู่ดิน ปริมาณของประจุที่ถ่ายโอนมีขนาด pC โดยทั่วไปการถ่ายโอนจะเกิดขึ้นในไม่กี่ ns กระแสพัลส์ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงประจุชั่วขณะนี้ จะสร้างแรงดันที่กำหนดโดยผลคูณของกระแสและอิมพีแดนซ์ของคุณลักษณะของตัวถังโลหะหม้อแปลง ซึ่งมีค่าสูงสำหรับกระแสความถี่สูงดังกล่าว แสดงดังรูปที่ 2.7.10 (ซ้าย) ด้วยการออกแบบพิเศษทำให้มีความไวต่อสัญญาณ PD สูง ซึ่งดีกว่าเซนเซอร์ TEV แบบปลายเดี่ยวอื่นๆ การออกแบบที่กะทัดรัดและทนทาน รวมถึงสามารถทำงานด้วยตัวเอง (พาสซีฟ) ทำให้ TEV เป็นเซนเซอร์ที่เหมาะสมที่สุดอย่างหนึ่ง สำหรับการติดตั้งโดยตรงบนสวิตช์เกียร์แรงดันปานกลาง



รูปที่ 2.7.10 เซนเซอร์วัดแรงดันเกินชั่วขณะที่ตัวถัง TEV

ข้อมูลจำเพาะอื่น ๆ :

ช่วงความถี่ : 0.1 MHz - 300 MHz

หลักการทำงาน : ตัวเก็บประจุแบบคาบเกี่ยว

ขนาดเซนเซอร์ : 130 x 70 x 25 mm³

การติดตั้ง : ติดกับตัวถังที่ต่อลงดินของผู้สวิตช์เกียร์

อุณหภูมิที่ทำงานได้ : -20 °C ถึง 650 °C

2.7.6 เซนเซอร์ตรวจจับทางเสียง AE

สามารถตรวจจับสภาพการใช้งานอุปกรณ์หรือบริษัทได้ด้วยหลักการตรวจหาแหล่งคลื่นสัญญาณเสียงที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของวัสดุหรือหรือการดิสชาร์จ เช่น การแตกร้าว การดิสชาร์จหรือตำแหน่งที่มีการเสื่อมสภาพ เซนเซอร์ตรวจจับคลื่นสัญญาณเสียงจะรับคลื่นสัญญาณที่เดินทางตามโครงสร้างวัสดุเพื่อแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้า ส่งเข้าสู่ระบบประมวลคลื่นสัญญาณ และแสดงรูปแบบกราฟเส้น [54] ผู้เขียนได้ใช้เซ็นเซอร์ AE แสดงดังรูปที่ 2.7.11 เพียโซอิเล็กทริกแบบพาสซีฟพร้อมความถี่แถบกว้าง ได้รับการออกแบบมาเป็นพิเศษเพื่อให้การตอบสนองความถี่คงที่ ต่อสัญญาณเสียงที่ปล่อยออกมา นอกจากนี้ยังสามารถใช้ในการใช้งานที่ต้องการการวิเคราะห์ความถี่ตลอดจนสามารถติดตั้งได้ง่ายด้วยการแม่เหล็กที่สามารถติดได้กับตัวถังหม้อแปลง หรือตู้โลหะสวิตช์เกียร์ [55]



รูปที่ 2.7.11 เซนเซอร์ตรวจจับทางเสียง AE

ข้อมูลจำเพาะอื่น ๆ :

ความถี่เรโซแนนซ์ : 150 kHz

ช่วงความถี่ : 60 kHz – 400 kHz

ความไวสัญญาณสูงสุด : > 75 dB

อัตราขยายในตัว : 26dB 5V

อิมพีแดนซ์ในตัว : 50 Ω

อุณหภูมิในการทำงาน : -20 °C ถึง 50 °C

ขนาด (เส้นผ่านศูนย์กลางxสูง) : 22x25.5 mm²

น้ำหนัก : 39 g

ระดับการป้องกัน : IP62

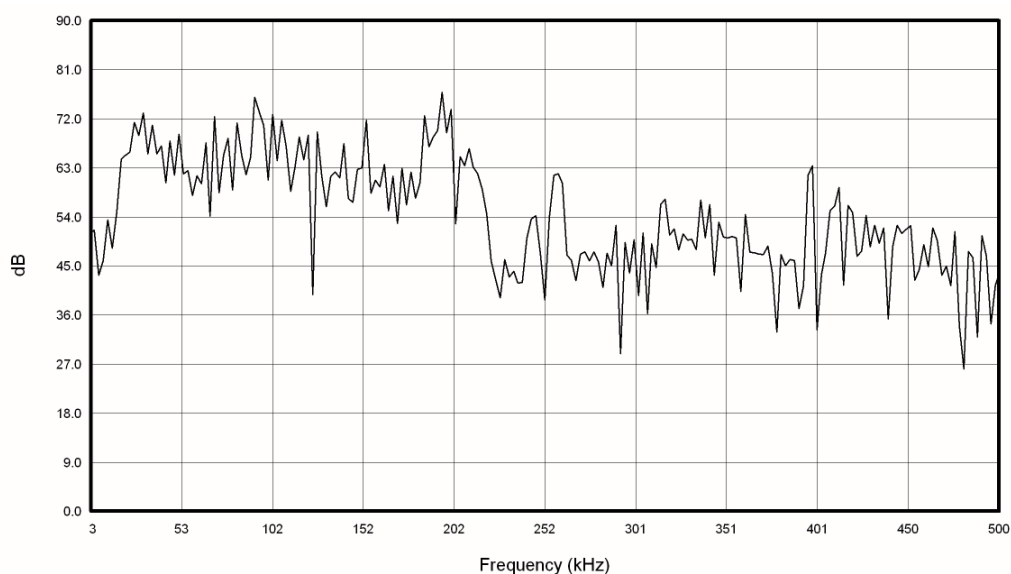
สำหรับการตรวจจับ PD โดยทั่วไปจะใช้ช่วงความถี่อัลตราโซนิก (ประมาณ 20 kHz ถึง 250 kHz) รวมถึงช่วงเสียงที่ได้ (ประมาณ 100 Hz ถึง 20 kHz) ช่วงความถี่ที่ใช้สำหรับการตรวจจับเสียง จะถูกเลือกโดยขึ้นอยู่กับระบบฉนวน วิธีการ สภาพแวดล้อม ที่ทำการวัด โดยช่วงความถี่ใช้งานของ เซ็นเซอร์เพียโซอิเล็กทริกที่ติดอยู่ที่ตัวถังหม้อแปลง อยู่ในช่วง 10 kHz ถึง 300 kHz ความเร็วเสียงใน น้ำมันสำหรับอุณหภูมิการทำงานระหว่าง 50 °C ถึง 80 °C แปรผันตั้งแต่ประมาณ 1240 m/s ถึง 1,300 m/s ส่วนในอากาศประมาณ 343 m/s ที่ 20 °C [56] และในโลหะประมาณ 5,950 m/s รูปที่ 2.7.12 แสดงความเร็วของเสียงในตัวกลางต่างๆ

Medium	v (m/s)	Medium	v (m/s)	Medium	v (m/s)
Gases		Liquids at 25°C		Solids^a	
Hydrogen (0°C)	1 286	Glycerol	1 904	Pyrex glass	5 640
Helium (0°C)	972	Seawater	1 533	Iron	5 950
Air (20°C)	343	Water	1 493	Aluminum	6 420
Air (0°C)	331	Mercury	1 450	Brass	4 700
Oxygen (0°C)	317	Kerosene	1 324	Copper	5 010
		Methyl alcohol	1 143	Gold	3 240
		Carbon tetrachloride	926	Lucite	2 680
				Lead	1 960
				Rubber	1 600

^aValues given are for propagation of longitudinal waves in bulk media. Speeds for longitudinal waves in thin rods are smaller, and speeds of transverse waves in bulk are smaller yet.

รูปที่ 2.7.12 ความเร็วของเสียงในตัวกลางต่างๆ [57]

ผลตอบสนองต่อความถี่ของเซ็นเซอร์เสียง AE คือการทดสอบหาช่วงความถี่ในการทำงาน (Bandwidth) ของการวัดคลื่นเสียงหรือช่วงความถี่ในการตรวจจับสัญญาณการดิสชาร์จบางส่วน นั่นเอง ดังนั้นช่วงความถี่ในการทำงานของ AE ต้องครอบคลุมส่วนประกอบความถี่ของสัญญาณการ ดิสชาร์จถึงจะสามารถตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนได้ ย่านวัดของ AE แสดงดังรูปที่ 2.7.13



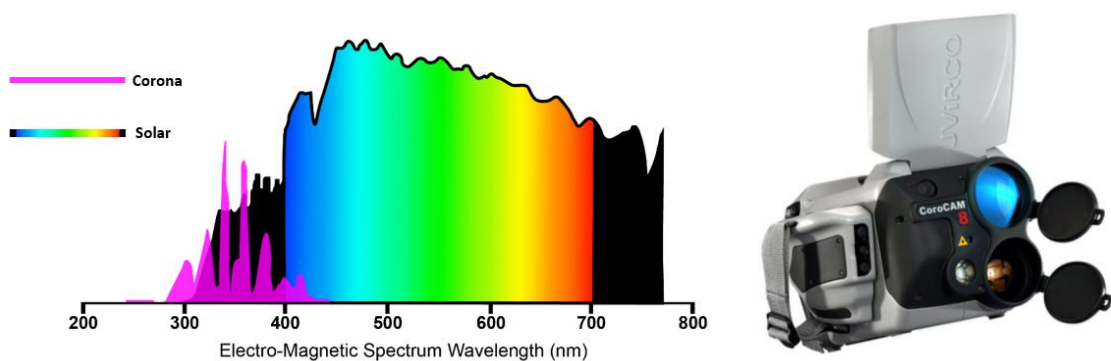
รูปที่ 2.7.13 การตอบสนองในช่วงความถี่ต่างๆ ของ AE

2.7.7 เซ็นเซอร์อื่นๆ

เซ็นเซอร์ PD แบบต่างๆ ทั้ง HFCT , TEV , AE , UHF antenna ได้ถูกกล่าวพอสังเขปไปแล้วในส่วนนี้จะกล่าวถึงกล้องตรวจจับโคโรนาและหูฟังอุลตราโซนิคนอกจากนี้แล้วยังมีเซ็นเซอร์ตรวจจับอื่นๆอีกด้วย เช่น กล้องอินฟราเรด สายอากาศ SPRIAL เป็นต้น

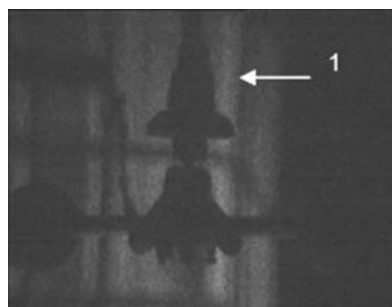
2.7.7.1 กล้องตรวจจับโคโรนา

ใช้หลักการตรวจจับพลังงานที่ปลดปล่อยออกมาจากอิเล็กตรอนของอากาศ ซึ่งปกติแล้วจะประกอบด้วย ไนโตรเจนและออกซิเจนเป็นหลัก โดยที่ขณะเกิดโคโรนาค่าสเปกตรัมของแสงจะอยู่ในช่วงอุลตราไวโอเล็ตความยาวคลื่น (λ) ประมาณ 300-400 นาโนเมตร สเปกตรัมดังกล่าวที่เกิดไอออไนซ์ขึ้น (หรือเกิดโคโรนา) แสดงดังรูปที่ 2.7.14

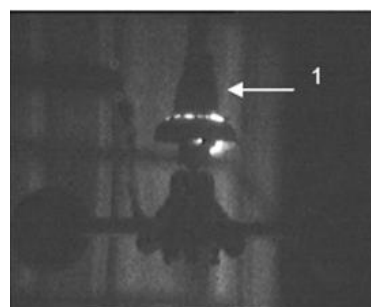


รูปที่ 2.7.14 โคโรนาและการตรวจจับโคโรนา

กล้องตรวจจับโคโรนาจะใช้เลนส์แบบพิเศษและระบบกรองตรวจจับแสงอุลตราไวโอเล็ต แล้วส่งต่อไปยังชุดออปโต-อิเล็กทรอนิกส์ ก่อนที่จะถูกขยายและส่งไปยัง CCD-detector ซึ่งทำหน้าที่สร้างภาพ 2 มิติขึ้นมา อาศัยหลักการดังกล่าวจะพบว่า เมื่อป้อนแรงดันให้กับลูกถ้วยฉนวนถึงระดับแรงดันค่าๆหนึ่ง จะสามารถสังเกตเห็นโคโรนาที่เกิดขึ้นที่ลูกถ้วยแขวนและพวงลูกถ้วยได้ดังรูปที่ 2.7.15 และรูปที่ 2.7.16 ตามลำดับโดยที่ลูกถ้วยแต่ละลูกจะมีหมายเลขกำหนดไว้ ตัวนำจะต่ออยู่กับลูกถ้วยลูกล่างสุดของพวงลูกถ้วย สำหรับลูกถ้วยประเภทอื่นๆ โคโรนาก็สามารถเกิดขึ้นได้เมื่อมีแรงดันสูงพอ โดยได้ทดลองที่ห้องปฏิบัติการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร (มทม.)

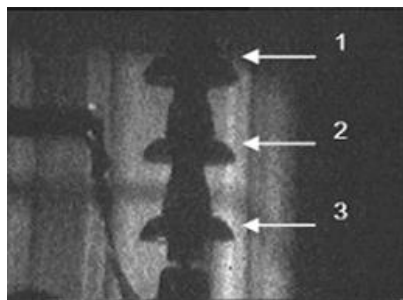


ระดับแรงดัน 10 kV

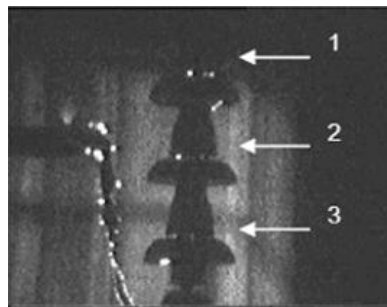


ระดับแรงดัน 40 kV

รูปที่ 2.7.15 การเกิดโคโรนาของลูกถ้วยแขวน 2 ลูก



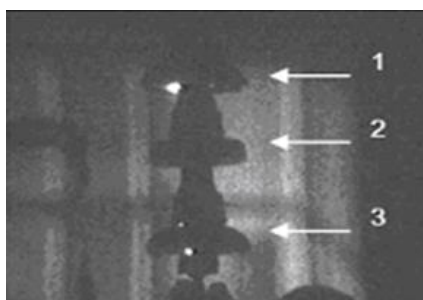
ระดับแรงดัน 35 kV



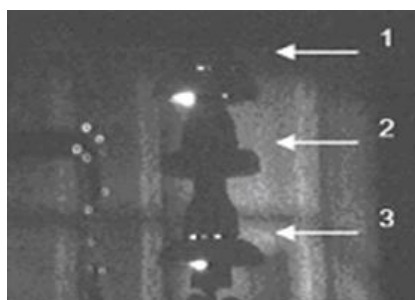
ระดับแรงดัน 75 kV

รูปที่ 2.7.16 การเกิดโคโรนาของพวงลูกถ้วยแขวน 3 ลูก

การตรวจจับโคโรนาด้วยกล้องโคโรนานั้นยังสามารถตรวจสอบการเกาะทะเลของลูกถ้วยฉนวนต่อร่วมกับลูกถ้วยที่มีสภาพสมบูรณ์ในพวงลูกถ้วยเดียวกัน โดยเมื่อป้อนแรงดันให้กับพวงลูกถ้วยที่สมบูรณ์เมื่อระดับแรงดันสูงขึ้นก็สามารถที่จะตรวจจับโคโรนาได้ แต่ถ้าระดับแรงดันตกคร่อมลูกถ้วยมากกว่าระดับแรงดันเกาะทะเล จะไม่สามารถตรวจจับโคโรนาของลูกถ้วยดังกล่าวเพราะเกิดการดิสชาร์จภายในแล้วจึงไม่ปรากฏการดิสชาร์จที่พื้นผิว เนื่องจากไม่มีความเครียดสนามไฟฟ้ามากพอดังแสดงในรูปที่ 2.7.17 และ รูปที่ 2.7.18

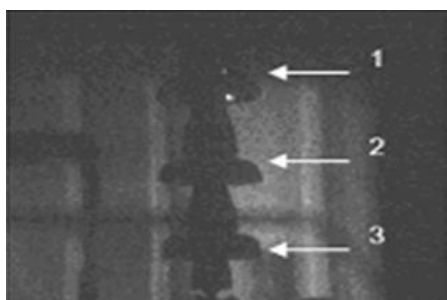


ระดับแรงดัน 15 kV

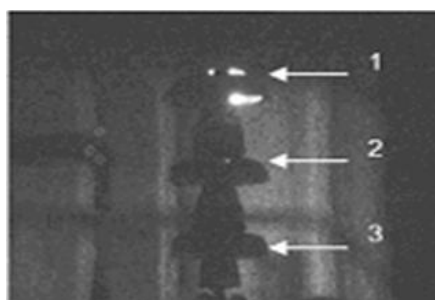


ระดับแรงดัน 40 kV

รูปที่ 2.7.17 การเกิดโคโรนาของพวงลูกถ้วยแขวน 3 ลูก โดยลูกที่ 2 เป็นลูกถ้วยเกาะทะเล



(ก) ระดับแรงดัน 15kV

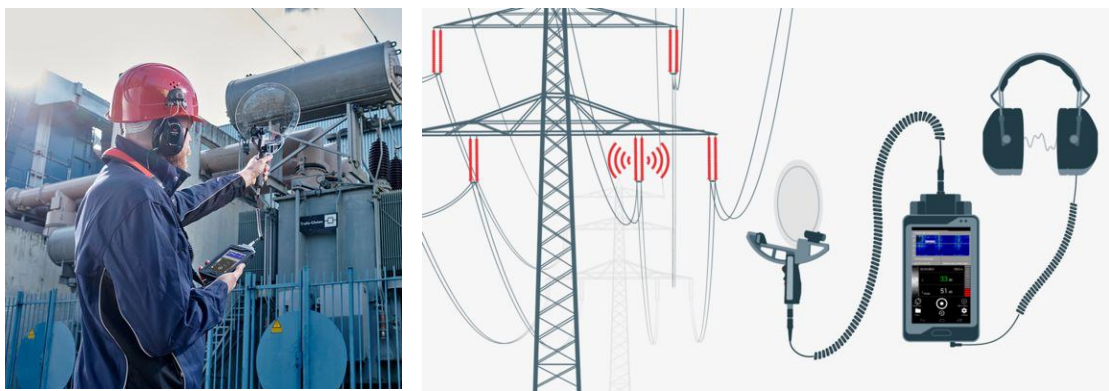


(ข) ระดับแรงดัน 40kV

รูปที่ 2.7.18 การเกิดโคโรนาของพวงลูกถ้วยแขวน 3 ลูก โดยลูกที่ 2 และ 3 เป็นลูกถ้วยเกาะทะเล

2.7.7.2 อุลตราโพรบ

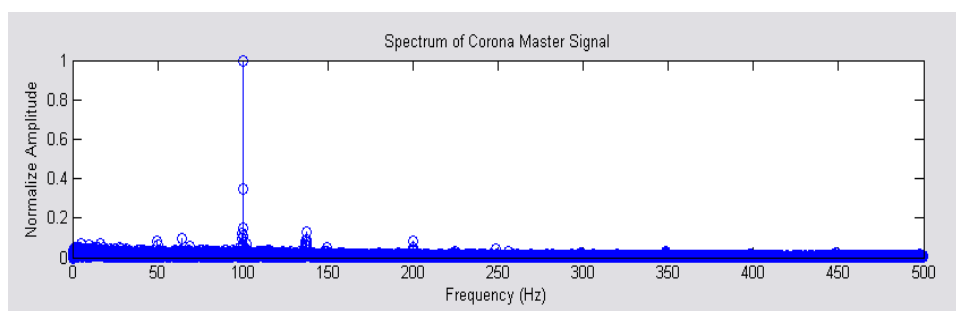
อุลตราโพรบ เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจจับคลื่นอุลตราโซนิกที่แพร่กระจายออกมาในอากาศ ดังรูปที่ 2.7.19 ซึ่งเกิดจากการสั่นไหวของสิ่งต่างๆ จากนั้นจะทำการแปลงความถี่จากย่านอุลตราโซนิกที่อยู่ระหว่าง 20 kHz-100 kHz ให้ลงมาอยู่ในช่วง 100 Hz-3 kHz ซึ่งเป็นช่วงความถี่ที่หูของมนุษย์สามารถที่จะรับฟังได้ การประยุกต์ใช้งานด้านการตรวจสอบคุณสมบัติของวัสดุทางวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงนั้น จะใช้อุลตราโพรบในการตรวจจับการสั่นไหวที่เกิดจากการแตกตัวของประจุไฟฟ้าในอากาศ ได้แก่ โครนาหรืออาร์ค โดยจะใช้งานร่วมกับอุปกรณ์รวมคลื่นอุลตราโซนิก ที่มีลักษณะเป็นจานสะท้อนคลื่นทรงพาราโบลิก ซึ่งเป็นอุปกรณ์เสริมที่ใช้ในการตรวจจับคลื่นสัญญาณอุลตราโซนิกระยะไกล โดยมีตัวรับสัญญาณที่มีความไวในการตรวจจับสูง ติดตั้งอยู่เหนือจาน



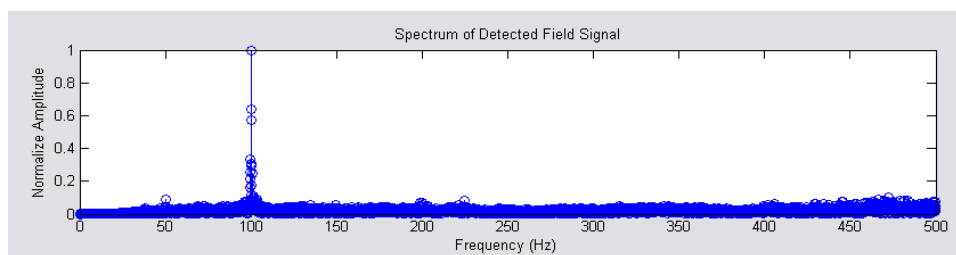
รูปที่ 2.7.19 อุลตราโพรบและการใช้งาน

การนำอุลตราโพรบมาใช้ในงานตรวจสอบ โดยการวิเคราะห์จากคลื่นอุลตราโซนิกที่ตรวจจับได้ ซึ่งอาจจะเกิดจากปรากฏการณ์ทางไฟฟ้าหรือไม่ก็ได้ การฟังเสียงที่ส่งผ่านมาทางชุดหูฟังเพื่อจำแนกชนิดของปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนั้นต้องอาศัยผู้ปฏิบัติงานที่มีความพร้อมและมีความเชี่ยวชาญจึงจะสามารถจำแนกได้อย่างถูกต้อง แต่ในหลายๆครั้งก็มักจะมีคามผิดพลาดเกิดขึ้น เพื่อให้ผู้ปฏิบัติงานสามารถจำแนกระบุสัญญาณที่ได้จากอุลตราโพรบได้ง่าย รวมทั้งมีความน่าเชื่อถือมากขึ้น จึงได้มีการนำเอาเทคนิคการจดจำรูปแบบมาใช้ ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธี ยกตัวอย่างเช่นการนำสัญญาณเสียงจากเครื่องอุลตราโพรบที่ตรวจจับได้จากการตรวจวัดที่หน้างานจริงไปทำการวิเคราะห์สเปกตรัมด้วยวิธีฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม เปรียบเทียบสเปกตรัมของสัญญาณเสียงที่ได้กับสเปกตรัมของสัญญาณเสียงโครนาต้นแบบที่สร้างขึ้นจากห้องทดลอง และทำการตัดสินใจว่าสัญญาณเสียงที่ตรวจจับได้เป็นปรากฏการณ์โครนาหรือไม่ ซึ่งจะทำให้ตัดสินใจได้ง่ายกว่าจากการใช้หูฟังโดยตรง

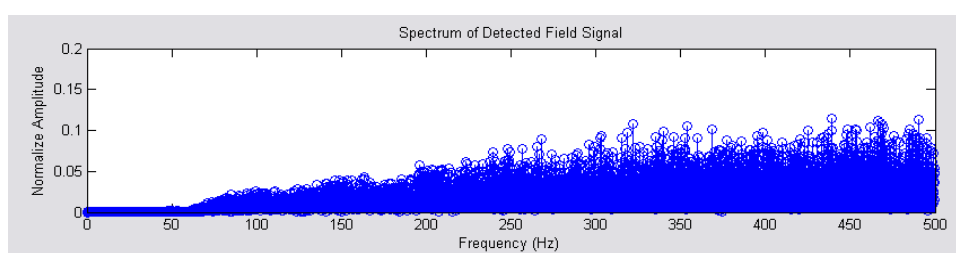
ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ด้วยคอมพิวเตอร์ โดยการเปรียบเทียบสเปกตรัมสัญญาณที่ตรวจจับได้กับสัญญาณต้นแบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.7.20 (ก) สัญญาณต้นแบบโคโรนาจากห้องปฏิบัติการ สจล. โดยจำลองจากแบบจำลองโคโรนาต่อเข้ากับหม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูงขึ้นแรงดันจนเกิดปรากฏการณ์โคโรนา รูปที่ 2.7.20 (ข) สัญญาณปรากฏการณ์โคโรนา ที่ตรวจจับได้จากเสาไฟฟ้า 12 kV รูปที่ 2.7.20 (ค) สัญญาณอุลตราโซนิกที่ตรวจจับได้ทั่วไป ซึ่งลักษณะของสเปกตรัมไม่ใกล้เคียงกับที่จำลองสัญญาณโคโรนาในห้องปฏิบัติการ เมื่อพิจารณาสเปกตรัมของสัญญาณตัวอย่างกับสเปกตรัมของสัญญาณโคโรนาต้นแบบในโดเมนความถี่แล้ว จะเห็นว่าสเปกตรัมของปรากฏการณ์โคโรนามีองค์ประกอบฮาร์โมนิกเด่นชัดอยู่ที่ตำแหน่ง 100 Hz



(ก) สัญญาณต้นแบบโคโรนาจากห้องปฏิบัติการ สจล.



(ข) สัญญาณปรากฏการณ์โคโรนา ที่ตรวจจับได้

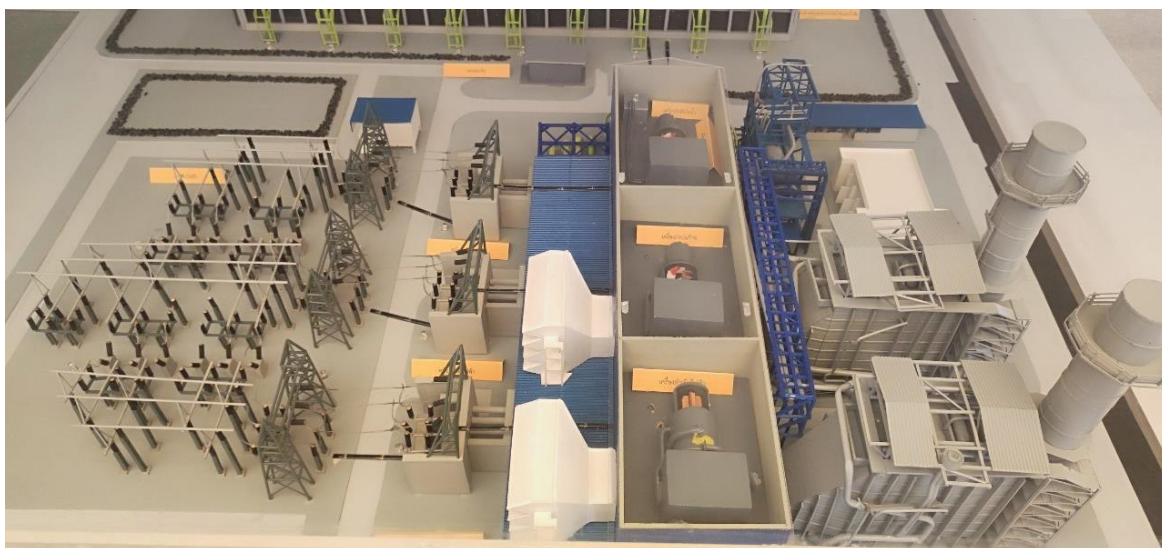


(ค) สัญญาณที่ตรวจจับได้ไม่ได้เป็นปรากฏการณ์โคโรนา

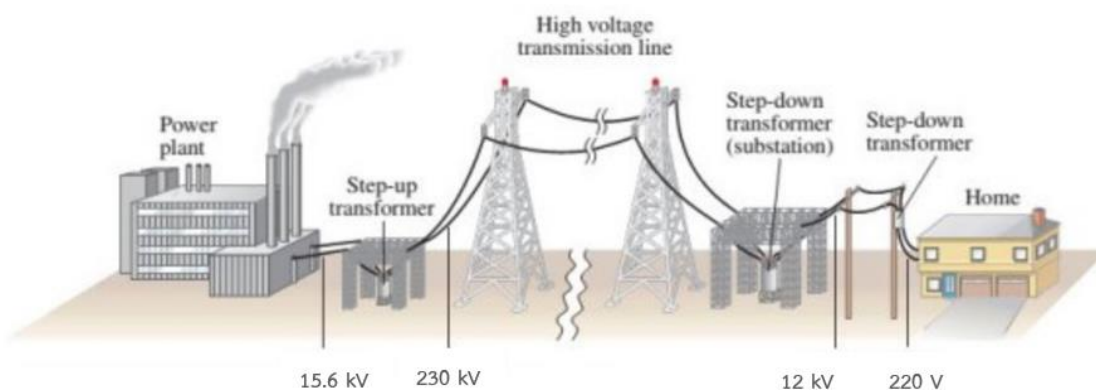
รูปที่ 2.7.20 การเปรียบเทียบสเปกตรัมสัญญาณที่ตรวจจับได้กับสัญญาณต้นแบบ

2.8 อุปกรณ์หรือบริภัณฑ์ไฟฟ้าเบื้องต้น

โครงสร้างของระบบไฟฟ้ากำลัง ประกอบด้วย ระบบผลิตกำลังไฟฟ้า, ระบบส่งกำลังไฟฟ้า และระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า **รูปที่ 2.8.1** แสดงแบบจำลองโรงไฟฟ้ากังหันแก๊ส (Gas Turbine) ทำการรับก๊าซธรรมชาติมาจากท่อส่งอัดความดันสูง ก๊าซธรรมชาตินี้จะถูกเผาในห้องเผาไหม้ เพื่อสร้างพลังงานความร้อน จากนั้นพลังงานความร้อน จะถูกนำมาใช้เพื่อสร้างไอน้ำ ทำให้เกิดการขยายตัว เกิดแรงดันและอุณหภูมิสูง ส่งเข้าไปหมุนเครื่องกังหันแก๊ส เพลลาของเครื่องกังหันแก๊สจะต่อกับเพลลาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำและได้กระแสไฟฟ้าแรงดันราว 15.6 kV จากนั้นส่งต่อไปยังหม้อแปลงไฟฟ้า เพื่อขึ้นเป็นแรงดันสูง 230 kV เพื่อส่งจ่ายในระยะทางไกล โดยผ่านลานไอสวิตช์ เพื่อควบคุมหรือตัดต่อวงจรไฟฟ้า ไปยังระบบส่งจ่ายไฟฟ้าดัง**รูปที่ 2.8.2** แสดงเสาส่งแรงสูงที่ส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าไปยังระบบจำหน่าย คือสถานีไฟฟ้าที่จะมีลานไอสวิตช์ ควบคุมหรือตัดต่อวงจร และลดระดับแรงดันลง จาก 115 kV เหลือ 12 kV จากนั้นส่งจ่ายไปยังผู้ใช้ไฟฟ้า ซึ่งบ้านพักโดยทั่วไปใช้ไฟแรงต่ำ 220 V ก็จะต้องลดแรงดันด้วยหม้อแปลงอีกครั้งหนึ่งก่อนเข้าบ้านพัก



รูปที่ 2.8.1 แบบจำลองโรงไฟฟ้ากังหันแก๊ส (Gas Turbine)



รูปที่ 2.8.2 ระบบไฟฟ้ากำลังในปัจจุบัน

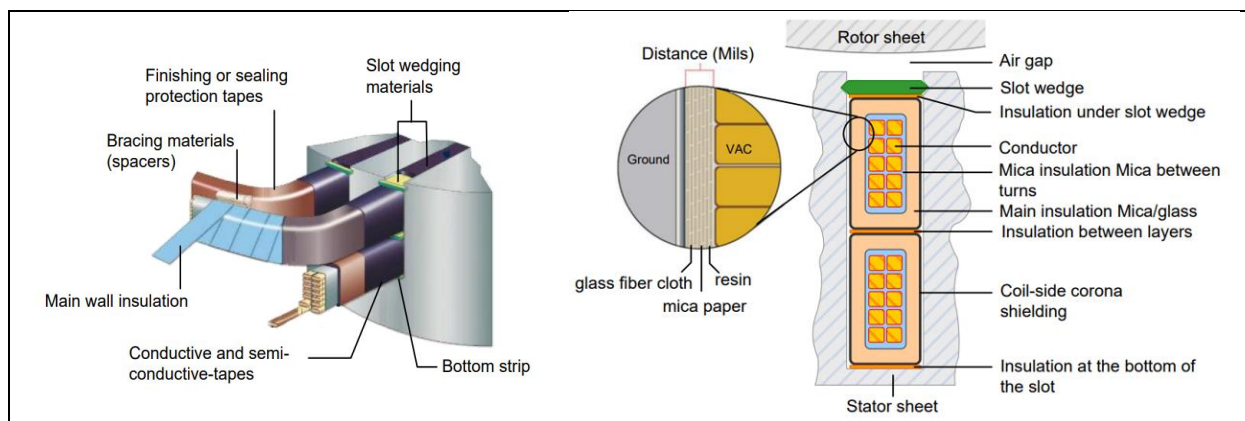
2.8.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ผลิตพลังงานไฟฟ้าโดยเพลตตันกำลังทางกลต่อเข้ากับโรเตอร์ที่มีขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก เมื่อหมุนจะเกิดแรงแม่เหล็กกระหน่ำยวนำที่ขดลวดสเตเตอร์ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าออกมา รูปที่ 2.8.3 แสดงโครงสร้างของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยขดลวดสเตเตอร์นี้รับความเครียดสนามไฟฟ้า หากฉนวนขดลวดสเตเตอร์ที่แสดงดังรูปที่ 2.8.4 ไม่สามารถรับความเครียดสนามได้จนเสียสภาพความเป็นฉนวน ก็จะเกิดลัดวงจรทำให้ไม่สามารถผลิตไฟฟ้าได้ ฉะนั้นฉนวนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจึงแข็งแรงมาก ทนต่อการเกิดดิสชาร์จมากเมื่อเทียบกับฉนวนประเภทโพลีเมอร์



รูปที่ 2.8.3 โครงสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ขดลวดสเตเตอร์จะวางอยู่ในร่องสลิตดังรูป 2.8.4 ซึ่งมีฉนวนหลักเป็นไมก้าที่มีค่าความคงทนทางไฟฟ้าสูงราวๆ 1,180 kV/cm [58 p.28] และมีส่วนอื่นด้วย เช่น ฉนวนระหว่างขด ลิ่ม(wedge) เพื่อช่วยรองรับแรงทางกลขณะหมุน ส่วนพื้นร่องนั้นจะมีการฉนวนที่น้อยกว่าในร่องสลิตเนื่องจากรับความเครียดสนามไฟฟ้าน้อยกว่า และมีการเคลือบด้วยสารกึ่งฉนวน (semi-conductive) เพื่อลดความเครียดสนามที่อาจทำให้เกิดการดิสชาร์จบางส่วน

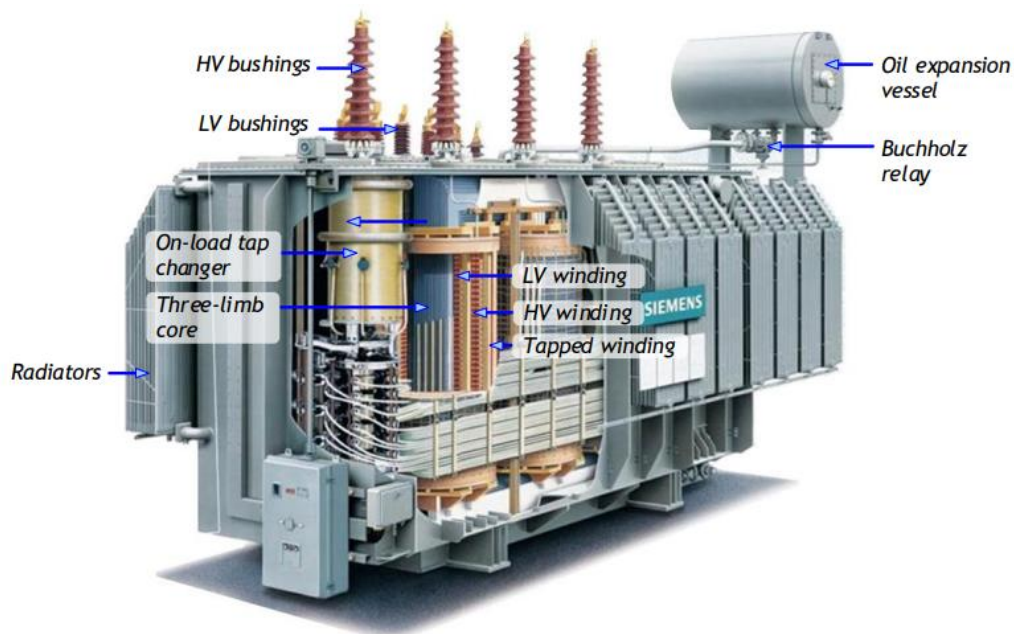


รูปที่ 2.8.4 ภาพการฉนวนของขดลวดสเตเตอร์

2.8.2 หม้อแปลง

เพิ่มหรือลดระดับแรงดันจากวงจรด้านหนึ่ง (Primary Winding) โดยกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้ามาจะสร้างเส้นแรงแม่เหล็กและแรงแม่เหล็ก (EMF) ขึ้นในแกนเหล็กซึ่งจะเคลื่อนที่ตัดกับขดลวดที่พันอยู่บนแกนเหล็กของวงจรอีกด้านหนึ่ง (Secondary Winding) ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำแรงดันไฟฟ้า (Induce EMF) ส่งถ่ายพลังงานไฟฟ้าออกมา โดยมีความถี่ไฟฟ้าเท่ากับความถี่ที่ป้อนเข้า **รูปที่ 2.8.5** แสดงโครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังซึ่งใช้การฉนวนโดยน้ำมันแร่ และกระดาดฉนวนกระดาด ที่มีค่าความคงทนทางไฟฟ้าราวๆ 150 kV/cm และ 600 kV/cm ตามลำดับ

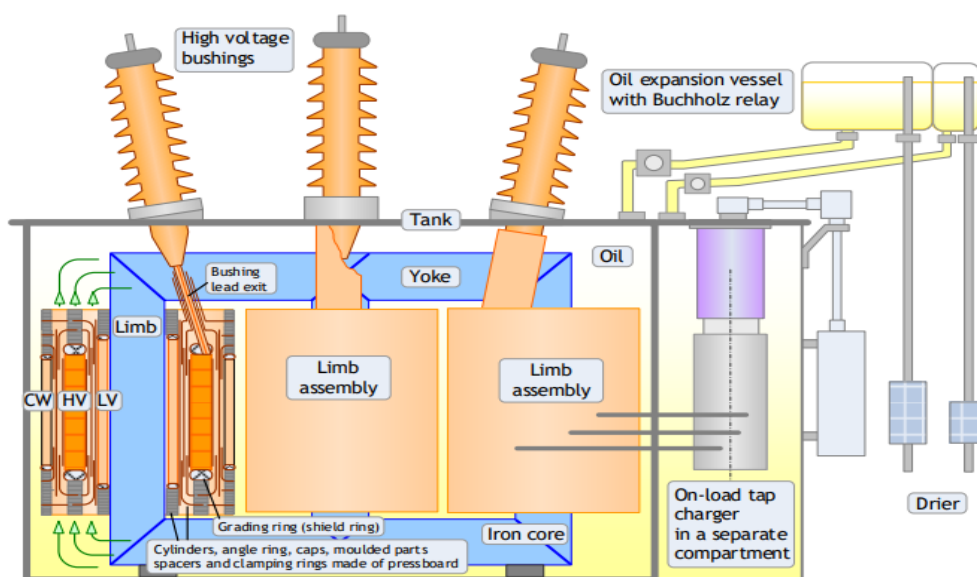
โครงสร้างหลักของหม้อแปลงคือ แกนเหล็ก ขดลวด และ ฉนวน โครงสร้างภายนอกที่สังเกตเห็นได้ง่ายคือ บุชชิ่ง ที่ทำหน้าที่เป็นฉนวนกั้นตัวถังที่มีศักย์เทียบดิน กับ สายไฟที่มีศักย์สูงกว่า จะเห็นว่า บุชชิ่ง HV จะสูงกว่า LV , ถังรองรับน้ำมันขยายตัว (conservator tank) เมื่ออุณหภูมิระหว่างวันเปลี่ยนแปลงเช่นตอนกลางวัน น้ำมันจะขยายตัวเนื่องจากความร้อนหากไม่มีพื้นที่รองรับ น้ำมันจะอัดแน่นในตัวถังอาจรั่วซึมออกมาได้ รวมถึงจ่ายน้ำมันชดเชยเมื่อหม้อแปลงเกิดรั่วซึม เพื่อให้ น้ำมันหม้อแปลงเต็มตลอดเวลา , บุชโฮลรีเลย์ ภายในบรรจุน้ำมันมีลูกลอยอยู่ เมื่อความความร้อนขึ้นผิดปกติจะเกิดฟองก๊าซขึ้นแล้วจะมาแทนที่น้ำมันส่วนบนของบุชโฮลรีเลย์ ทำให้ลูกลอยลดระดับลงจนถึงระดับสัญญาณเตือน , ระบายความร้อน เนื่องจากขดลวดเหนี่ยวนำแรงดันแม่เหล็กจากแกนเหล็กแล้วย่อมมีอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ความร้อนจากขดลวดจะถ่ายไปยังกระดาดที่จุ่มอยู่ในน้ำมันซึ่งสัมผัสกับตัวถัง จึงใช้ตัวถังหรือครีบนีพาความร้อนออกไปทางอากาศแวดล้อม ยังมีพื้นที่ผิวมาก ยิ่งระบายความร้อนได้ดี



รูปที่ 2.8.5 โครงสร้างหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

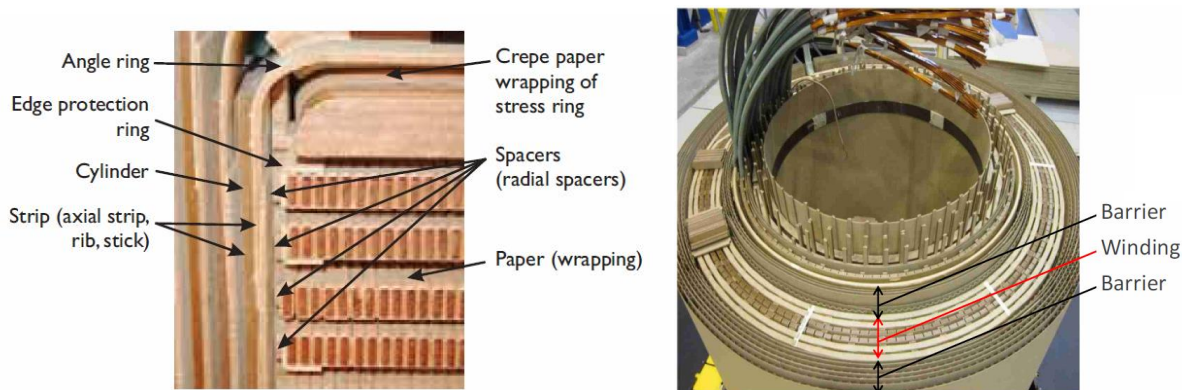
ส่วนภายนอกของหม้อแปลงอีกอย่างหนึ่งที่สำคัญได้คือ ปล่องแห้ง (Drier) ซึ่งจะมีซิลิกาเจล หรือ สารดูดความชื้นอยู่ เพราะเมื่อหม้อแปลงร้อนน้ำมันขยายตัวจะดันอากาศผ่าน conservator tank ผ่านทางปล่องแห้งนี้ ในทางกลับกัน เมื่อน้ำมันเย็นตัวก็ดึงอากาศภายนอกเข้าไปผ่านปล่องแห้งนี้ เช่นกัน เมื่ออากาศหรือก๊าซผ่านซิลิกาเจล จะถูกดูดความชื้นไป ทำให้ไม่มีความชื้นเข้าไปภายในหม้อแปลง สำหรับหม้อแปลงแล้วความชื้นอันตรายอย่างมาก เมื่อเข้าไปก็จะแยกชั้นกับน้ำมันทำให้น้ำมันทำหน้าที่ฉนวนได้ไม่ได้อย่างที่ควร แยกที่สุดคือหม้อแปลงเกิดการลัดวงจร เป็นสิ่งที่ไม่ต้องการให้เกิดขึ้น อีกทั้งน้ำมันที่อุ้มความชื้นแทรกอยู่นั้นเมื่อสัมผัสกับกระดาษแล้ว ความเป็นฉนวนของกระดาษจะลดลงจากการยุ่ยหรือเสียสภาพจากการที่โมเลกุลน้ำไปแทรกตัวอยู่กับเยื่อไฟเบอร์ของกระดาษ

ส่วนภายในตัวถังหม้อแปลง ดังแสดงในรูปที่ 2.8.6 นั้นอาจเป็นสองห้อง ห้องหนึ่งเป็นตัวเปลี่ยนแท็บชุดสวิตช์ เพื่อเพิ่มหรือลดตามจำนวนขดลวดที่ตั้งไว้ เพื่อปรับแรงดันไฟฟ้าด้านจ่ายออกให้มีเสถียรภาพเหมาะสมกับการใช้งาน อีกห้องหนึ่งเป็นส่วนของขดลวดปรับลดหรือเพิ่มแรงดันที่มีแผ่นเหล็กซิลิคอนบาง ๆ วางเรียงซ้อนกันเป็นแกนเหล็ก แนวตั้งเรียกแกนแขน (limb) แนวนอนพาดอยู่เรียกโยคหรือแอก (yoke) ยึดด้วยแคล้ม บน-ล่าง ให้แน่นหนา [59] ทำหน้าที่เป็นวงจรเส้นแรงแม่เหล็ก ถัดมาคือขดลวดที่ทำหน้าเป็นวงจรทางไฟฟ้า ขดลวดแรงต่ำจะอยู่ด้านใน แรงสูงอยู่ด้านนอก เพราะประหยัดฉนวนมากกว่า หากเอาแรงสูงอยู่ด้านในนั้นจะต้องเพิ่มฉนวนเพื่อกั้นสนามไฟฟ้าสูงที่ติดกับแกนเหล็กและเมื่อมีแรงดันเกินจะเกิดแรงกระชากขดลวด ทำให้ขดแรงสูงขยายออก ขดแรงต่ำยุบเข้าหาแกนเหล็ก รวมถึงขนาดลวดที่ไม่เท่ากัน ในหม้อแปลงพิกัดสูงมากๆ จะมีขดลวดที่สามคาบเกี่ยว (Coupling windings) เพิ่มเข้ามาเพื่อลดกระแสไม่สมดุลขณะจ่ายโหลดรวมถึงลดกระแสผิดพลาด (fault) แล้วขดลวดเหล่านี้จะถูกพันทับด้วยกระดาษเพื่อเป็นการฉนวน รวมถึงมีส่วนประกอบอื่นๆ เช่น แคลมป์ เฟลสบอร์ด ฯ เพื่อให้โครงสร้างแข็งแรง ระบบหม้อแปลงดังที่ได้กล่าวมานี้จะถูกจุ่มอยู่ในน้ำมันซึ่งทำหน้าที่เป็นฉนวนเหลวอีกชั้นหนึ่ง



รูปที่ 2.8.6 ภาพวาดแสดงรายละเอียดโครงสร้างหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

กระดาษในหม้อแปลงนั้นอาจแบ่งออกเป็น กระดาษบาง (Paper) กับกระดาษอัดแรง (Board) กระดาษอัดแรง ดังแสดงในรูปที่ 2.8.7 ที่กล่าวถึงในที่นี้จะมีความหมายครอบคลุมไปถึง press boards , transformer boards และ fuller boards กระดาษที่ใช้เป็นฉนวนโดยทั่วไปจะรู้จักกันในชื่อกระดาษครีฟ (Kraft paper) ความหนาแน่นของกระดาษขึ้นอยู่กับหน้าที่การใช้งาน กระดาษที่มีความหนาแน่นต่ำ (0.8 g/cm^3) เหมาะกับการใช้เป็นไดอิเล็กตริกของตัวเก็บประจุความถี่สูงและเป็นฉนวนของเคเบิล ความหนาแน่นปานกลาง (1 g/cm^3) ใช้เป็นไดอิเล็กตริกของตัวเก็บประจุไฟฟ้ากำลัง กระดาษที่มีความหนาแน่นสูงใช้ในตัวเก็บประจุแบบมีขั้วเพื่อเก็บพลังงาน หรือใช้ในเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง



รูปที่ 2.8.7 การใช้งานฉนวนกระดาษและเพรสบอร์ดในหม้อแปลงไฟฟ้า

ลักษณะของกระดาษฉนวนที่ใช้แบ่งออกเป็น 4 ประเภท ดังนี้

1. INSULATION PAPER (KRAFT)

ใช้เป็นฉนวนกั้นระหว่างชั้น (Layer) ของขดลวด หรือกั้นระหว่างขดลวดแรงต่ำและขดลวดแรงสูง

2. PRESS BOARD

ใช้เป็นฉนวนปิดหัวและท้ายของขดลวด ทำกระดาษรองน้ำมัน เพื่อการไหลหมุนเวียนของน้ำมัน ช่วยในการระบายความร้อน และเป็นลิ้ม ในการรองรับระหว่างขดลวดและโครงสร้างรวมถึงใช้เป็นการม้วนขึ้นรูป สำหรับพันขดลวดแรงต่ำ หรือขดลวดแรงสูง

3. CREPED PAPER

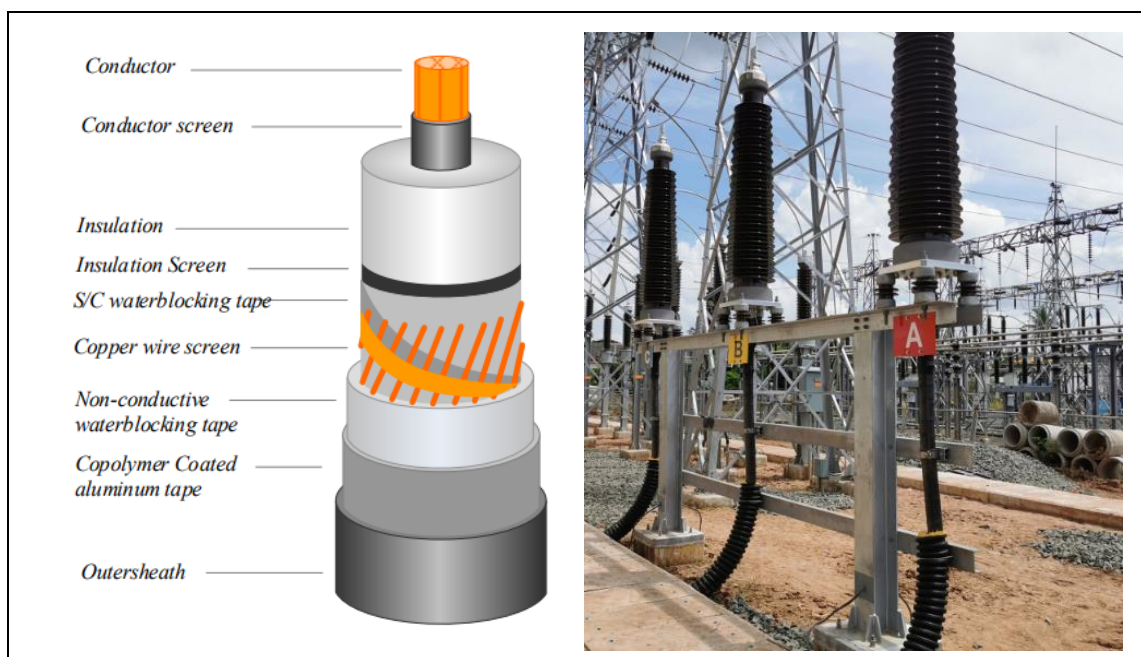
ใช้สำหรับพันสายตัวนำ ที่ต้องการความยืดหยุ่น

4. THERMOPOX

ใช้เป็นฉนวน (Insulation layer) สำหรับแผ่น foil แบบ double sides

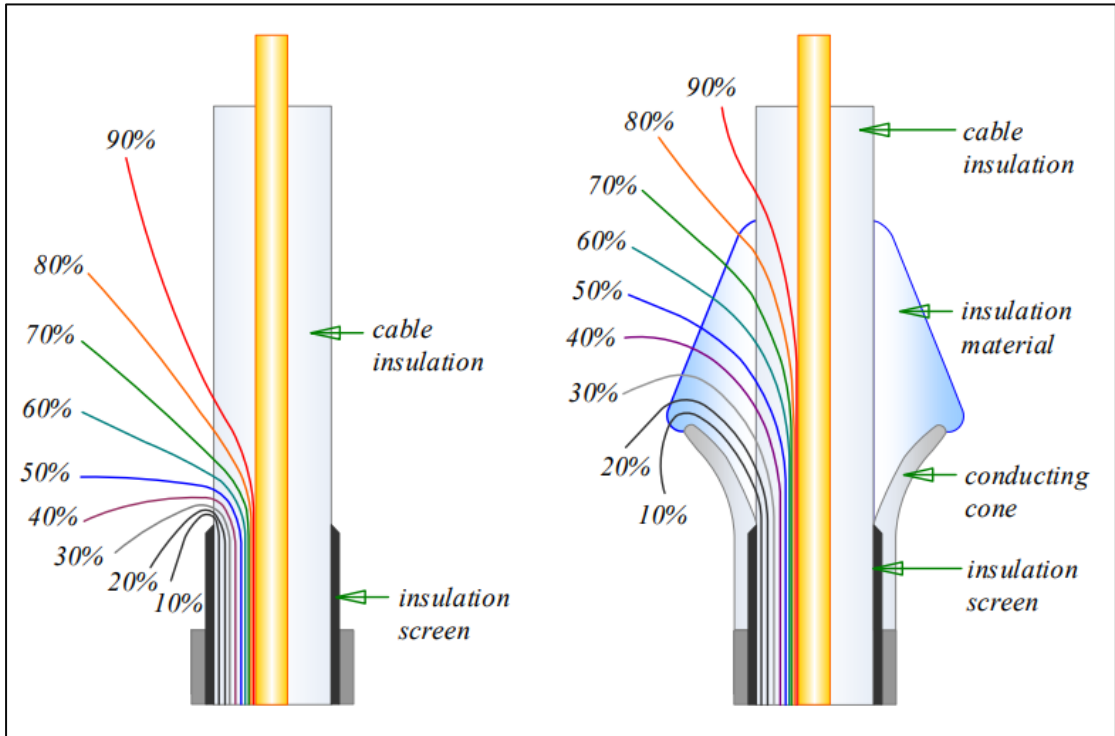
2.8.3 เคเบิลไฟฟ้าแรงสูง

นิยมฝังลงในดินเพื่อทัศนียภาพและปลอดภัย ส่งถ่ายพลังงานไฟฟ้าจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่ง ดังรูปที่ 2.8.8 (ขวา) เชื่อมจากหม้อแปลง 230 kV ขึ้นสายส่งเหนือดิน ผ่านหัวเคเบิล (Terminator) ส่วนภาพด้านซ้าย แสดงโครงสร้างของสายเคเบิลฝังดินนี้ โครงสร้างหลักของสายเคเบิลประกอบด้วย ตัวนำ ฉนวน และกราวด์ แต่เพื่อประสิทธิภาพการใช้งานในระยะยาว เนื่องจากเป็นแรงดันสูงจึงต้องมีการคำนึงผลของสนามไฟฟ้าและการฉนวนที่ปลอดภัย โดยไล่จากด้านในสุด **Conductor** : อยู่แกนกลางเป็นตัวนำ ทำหน้าที่ส่งผ่านกระแสไฟฟ้า (IEC60228 มาตรฐานแกนตัวนำ) , **Conductor screen** : เป็นชั้นกันด้วยสารกึ่งตัวนำจำพวกฟลูออโรพอลิเมอร์เพื่อเกลี่ยสนามไม่ให้มีความต่างศักย์มาก และระหว่างตัวนำกับฉนวน [60] , **Insulation** : เป็นฉนวนหลักคือ XLPE (Cross-linked polyethylene) ที่ทนต่อการกัดกร่อนและมีความเป็นฉนวนที่ดี , **Insulation screen** : เมื่อใช้งานสูงกว่า 5 kV จะต้องมีชั้นนี้ เป็นชั้นสารกึ่งตัวนำเกลี่ยสนามระหว่างฉนวนและกราวด์ , **Silicon carbide water blocking** : ฝิวคล้ายเม็ดทราย เป็นชั้นกันน้ำเพราะเมื่อน้ำซึมเข้าไปในเนื้อฉนวนแล้ว ประสิทธิภาพการฉนวนจะลดลง รวมถึงเมื่อโมเลกุลของน้ำรับความเครียดสนามไฟฟ้าจะเกิดการพัฒนาในเนื้อฉนวนเป็น water tree ที่เมื่อพัฒนาไปแล้วจะเหมือนเป็นร่องน้ำทำเชื่อมกราวด์ถึงตัวนำ เกิดการเบรกดาวน์ของฉนวน เป็นสิ่งที่ไม่ต้องการ , **Copper wire screen** : เป็นชั้นกราวด์ทำให้ศักย์ไฟฟ้าเทียบดินเพื่อความปลอดภัย เมื่อมาสัมผัสที่ฝิวสายเคเบิล , **Non-conductive water blocking** : เป็นชั้นกันน้ำเหมือน S/C tape แต่จะมีฝง Sweelable ลักษณะคล้ายแปงเป็นผงดูดน้ำ อยู่ในชั้นนี้ด้วย , **Copolymer coated aluminum** : เป็นชั้นอลูมิเนียมเพื่อป้องกันแรงกระแทกและกัดทับ , **Outer sheath** : เปลือกของเคเบิลเพื่อป้องกันการเสียดสีภายนอก



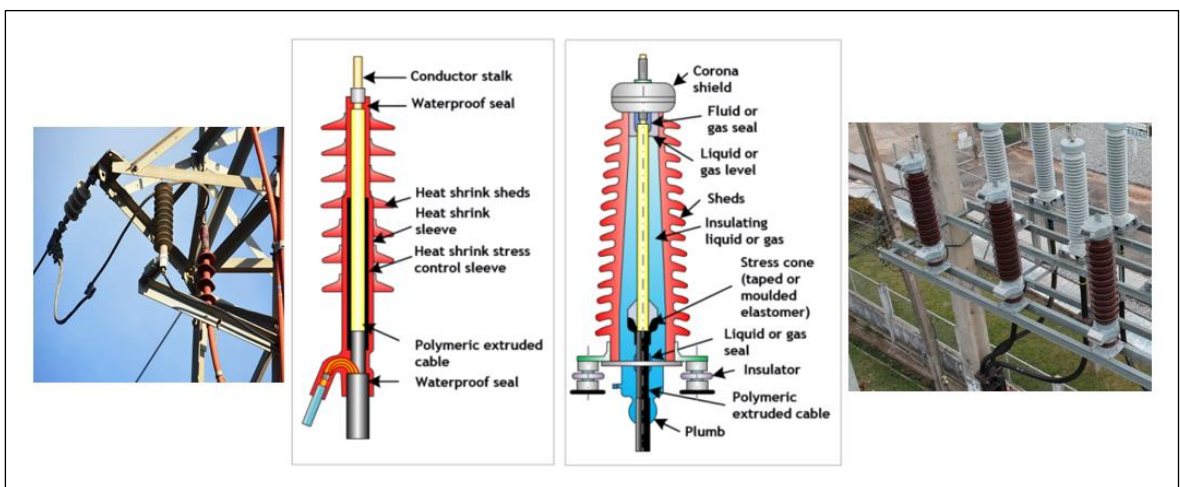
รูปที่ 2.8.8 ภาพโครงสร้างสายเคเบิลแรงสูง

หัวเคเบิลนั้นจะไม่สามารถปลอกแล้วเอาทองแดงมาเชื่อมกันได้โดยตรงเหมือนไฟแรงต่ำ เนื่องจากสนามไฟฟ้าที่สูงจึงต้องเกลี่ยสนามไฟฟ้าเพื่อป้องกันการดีสชาร์จหรือเบรกดาวน ดังรูปที่ 2.8.9 ด้านซ้ายแสดงการปลอกสายเคเบิลออกเหลือแต่ผิวฉนวน XLPE ลักษณะการเบี่ยงเบนของสนามไฟฟ้าเป็นดังภาพ หากเปรียบเทียบกับทางภาพด้านขวาแล้วจะเห็นได้ชัดเจนถึงเส้นสนามที่มีลักษณะขยายตัว ห่างกันมากขึ้น ส่งผลให้เกิดความเครียดสนามต่ำลง การดีสชาร์จเกิดได้ยากขึ้น



รูปที่ 2.8.9 ภาพสนามไฟฟ้าปลายสายเคเบิลแรงสูง

เมื่อเกลี่ยสนามแล้วก็นวนทับอีกดังรูปที่ 2.8.10 ซ้ายแสดงหัวสายเคเบิลระบบ 24 kV ขวาแสดงหัวสายเคเบิลระบบ 115 kV ครีบเหล่านี้มีเพื่อลดผลของกระแสรั่วจากตัวนำปลายสุดหัวสายเคเบิล ถึง กราวด์สายเคเบิลที่ปลอกแล้วต่อเดินไปหลักดิน



รูปที่ 2.8.10 โครงสร้างหัวสายเคเบิลแรงสูง

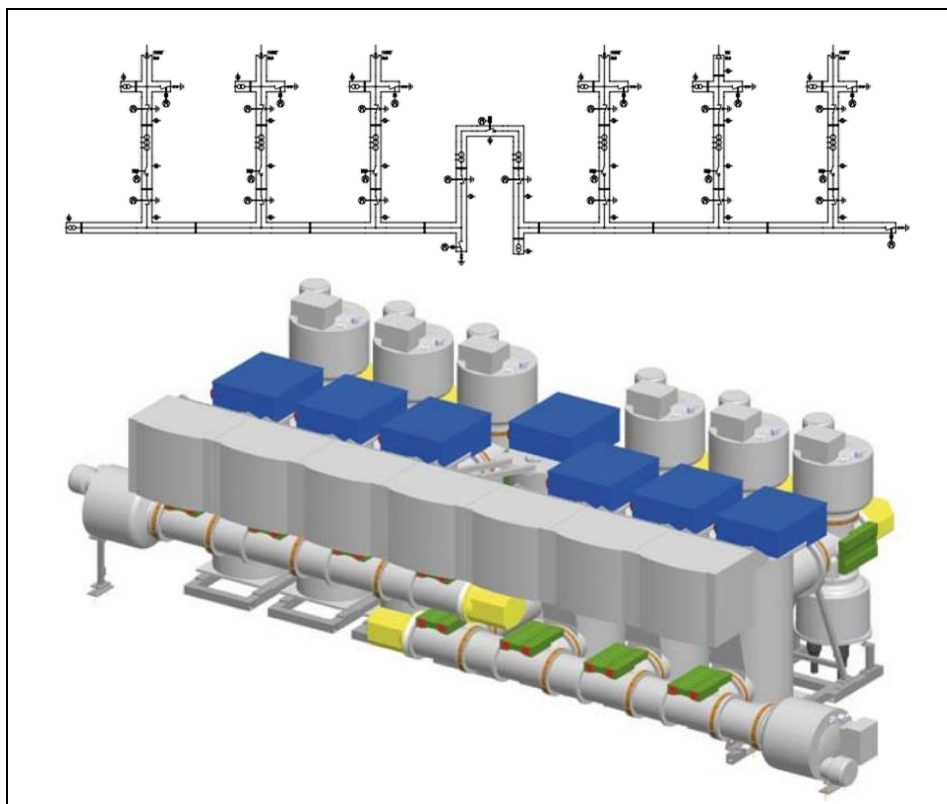
2.8.4 บริภัณฑ์ในสถานนีไฟฟ้า

ตู้สวิตช์เกียร์ เป็นบริภัณฑ์ไฟฟ้าที่พบได้ทั่วไปไปสถานที่ใช้ไฟฟ้าแรงสูง โครงสร้างได้แสดงดังรูปที่ 2.8.11-12

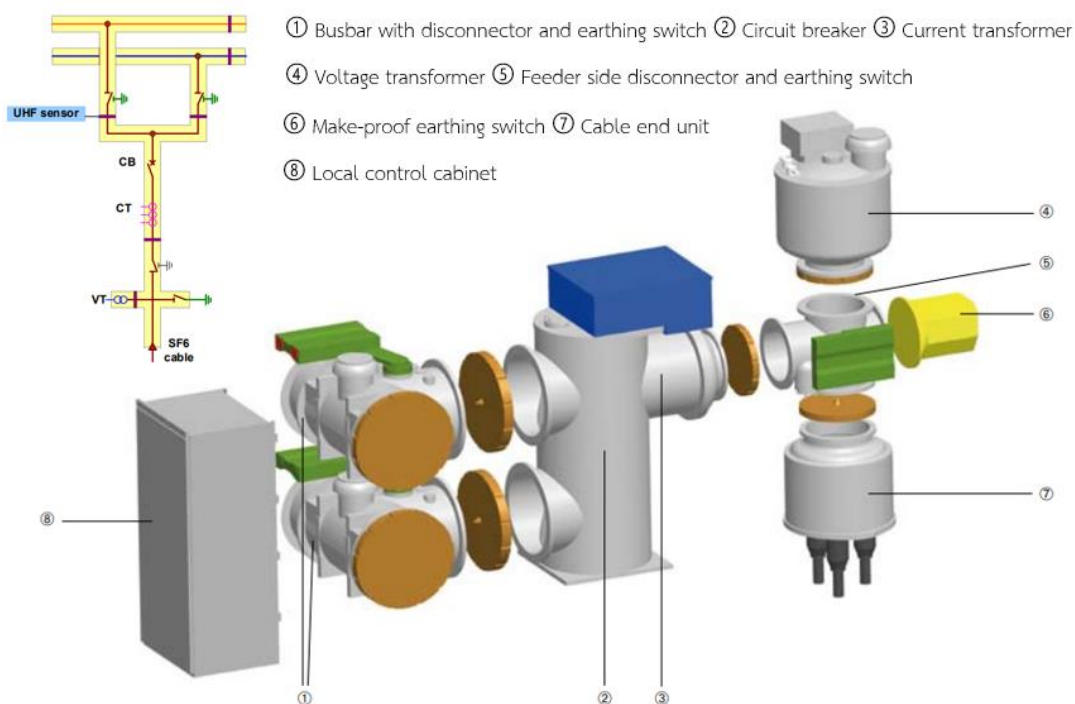


รูปที่ 2.8.12 ตู้สวิตช์เกียร์ในปัจจุบัน

ในปัจจุบันระบบ GIS มีการใช้งานเพิ่มมากขึ้น สามารถพบเห็นได้ในสถานีไฟฟ้า รูปแผนภาพ single line ของระบบ GIS ในสถานีไฟฟ้าและภาพถ่ายสามมิติแสดงดังรูปที่ 2.8.13 รวมถึงโครงสร้างของ GIS ดังกล่าวแสดงในรูปที่ 2.8.14



รูปที่ 2.8.13 แผนภาพ single line ระบบ GIS ในสถานีไฟฟ้า



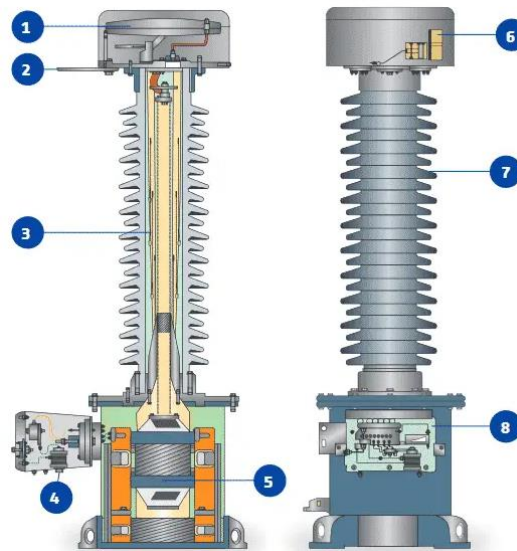
รูปที่ 2.8.14 โครงสร้างของ GIS

2.8.5 อุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง

นอกจากบริภัณฑ์หลักๆ ที่ได้แสดงเป็นเบื้องต้นแล้ว ยังควรทราบอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้าแรงสูงอีกเช่น หม้อแปลงแรงดันไฟฟ้า (potential transformer) , กักตักเสิร์จ (surge arrester) , กราวด์ และอื่นๆอีกมากมาย

2.8.5.1 หม้อแปลงแรงดันไฟฟ้า

หลักการหม้อแปลงเดียวกัน เป็นการลดแรงดันไฟฟ้าที่มีค่าสูงในระบบไฟฟ้าแรงสูงให้เป็นแรงดันไฟฟ้าแรงต่ำ เป็นแรงดันไฟฟ้าที่ใช้งานเพื่อให้เหมาะสมกับเครื่องวัดแรงดันไฟฟ้า เมื่อแรงดันไฟฟ้าที่ต้องการวัดนั้นมีค่าสูงกว่าพิสัย (Range) ของเครื่องวัด เช่น โวลต์มิเตอร์ (Voltmeter) เป็นต้น รูปที่ 2.8.15 แสดงโครงสร้างฉนวน และ รูปที่ 2.8.15 แสดงหม้อแปลงแรงดันที่ติดตั้งในสถานีไฟฟ้า



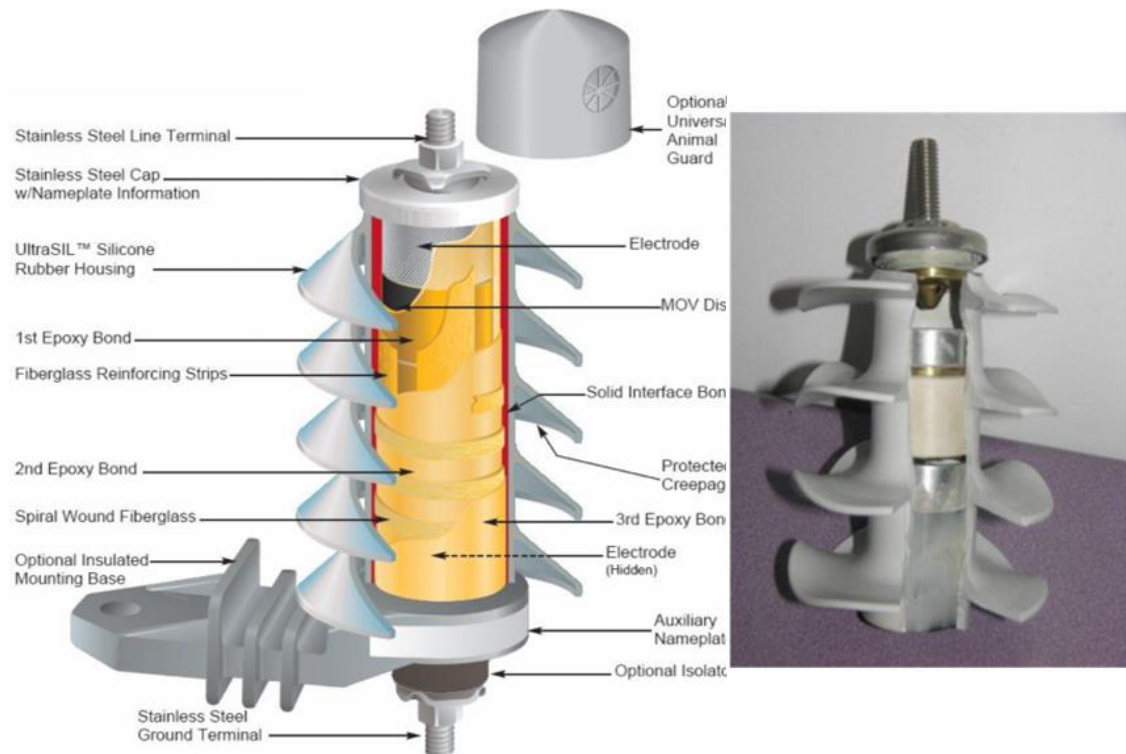
รูปที่ 2.8.15 แสดงโครงสร้างของ PT



รูปที่ 2.8.16 การติดตั้งหม้อแปลงแรงดันในสถานีไฟฟ้า

2.8.5.2 กักเก็บเสิร์จ

เป็นอุปกรณ์ที่ถูกนำมาใช้งานเพื่อจัดการกับแรงดันเกินที่เกิดขึ้นไม่ว่าจะเป็นแรงดันเกินจากสวิตชิงหรือจากฟ้าผ่าก็ตาม กักเก็บเสิร์จถูกนำมาต่อคร่อมกับอุปกรณ์ที่ต้องการป้องกัน เช่น หม้อแปลงสายเคเบิล [61] ภายในประกอบด้วยตัวต้านทานที่ไม่เป็นเชิงเส้นกล่าวคือ ณ ขณะแรงดันใช้งานกับดักเสิร์จจะแสดงพฤติกรรมเป็นฉนวน แต่เมื่อมีแรงดันเกินเกิดขึ้น ความต้านทานของกักเก็บเสิร์จจะค่อยๆ ลดลงและดิสชาร์จแรงดันเกินเหล่านั้นลงสู่กราวด์ รูปที่ 2.8.17 แสดงโครงสร้างของกักเก็บฟ้าผ่าชนิด ZnO และ รูปที่ 2.8.18 แสดงการติดตั้งใช้งานกักเก็บเสิร์จในระบบไฟฟ้า



รูปที่ 2.8.17 โครงสร้างของกักเก็บฟ้าผ่าชนิด ZnO

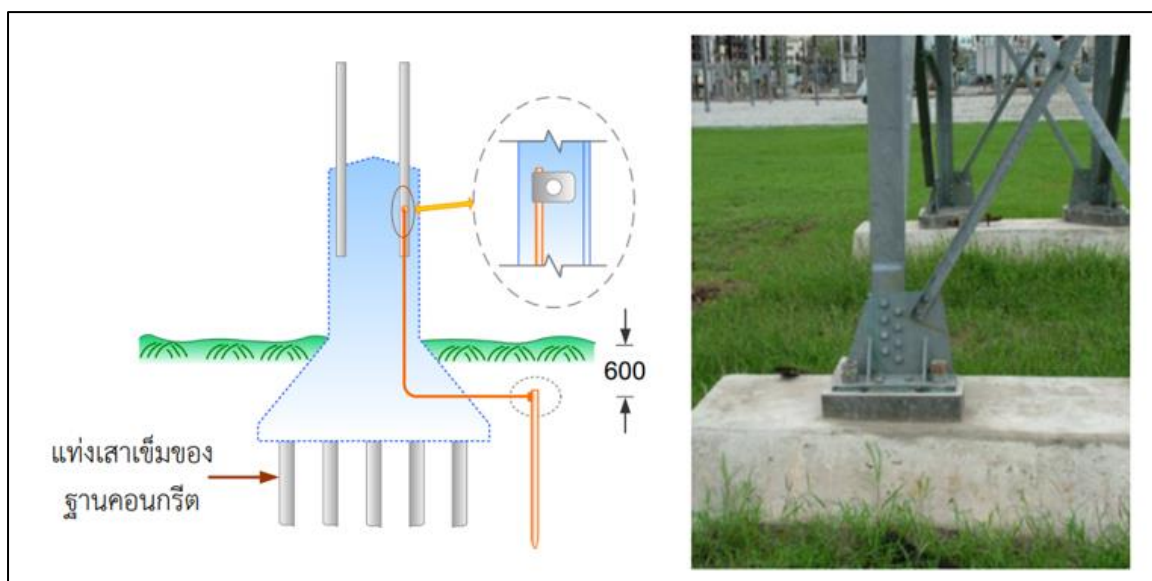


รูปที่ 2.8.18 การติดตั้งใช้งานกักเก็บเสิร์จในระบบไฟฟ้า

2.8.5.3 กราวด์

ระบบต่อลงดินประกอบด้วยสายดินและหลักดิน เช่นในระบบสายส่งและจำหน่ายควรเป็นสายทองแดงเปลือยตีเกลียวหรือสายหุ้มฉนวน 0.6/1 kV ขนาดไม่ต่ำกว่า 95 มม² ส่วนหลักดินนั้นซึ่งมีหลายชนิด ได้แก่

- 1) **แท่งกราวด์เหล็กหุ้มทองแดง** (Copper clad steel ground rod) หลักดินที่เหล็กชุบด้วยทองแดงเพื่อเพิ่มค่าความนำไฟฟ้าและยังป้องกันการผุกร่อนได้ดีอีกด้วย หลักดินชนิดนี้มีราคาค่อนข้างสูงจึงใช้ในสถานที่บางแห่งเท่านั้น เช่น ในสถานีย่อยหรือสถานที่ที่ต้องการคุณภาพการต่อลงดินสูง
- 2) **แท่งกราวด์เหล็กเคลือบสังกะสี** (Galvanized steel ground rod) ทำด้วยเหล็กอบสังกะสีเพื่อป้องกันการผุกร่อน ชนิดที่ใช้ในระบบจำหน่ายปัจจุบันเป็นชนิด Pig tail ground rod ขนาด 1.6×240 ซม. ซึ่งเป็นแบบใช้สายเหล็กยาวประมาณ 125 ซม. ต่อเชื่อมจากตัว Ground rod ปลายอีกด้านหนึ่งของสายเหล็กโค้งงอเอาไว้เพื่อความสะดวกในการต่อเข้ากับ Ground pad อีกแบบหนึ่งก็คือ แบบที่เป็นแท่งเหล็กที่ติดอยู่ที่ปลายของ Concrete stub มีความยาว 1 เมตร และฝังลึกเข้าไปภายในเสา 50 ซม. ที่ผิวส่วนบนของ Stub จะมี Ground pad ต่อเชื่อมสายดินซึ่งฝังอยู่ภายใน Stub
- 3) **แผ่นกราวด์** (Ground plate) เป็นแผ่นเหล็กอบสังกะสีติดอยู่ที่โคนเสาคอนกรีตชนิดที่มีสายดินฝังอยู่ภายใน หลักดินชนิดนี้มีพื้นที่สัมผัสดินน้อยกว่าที่กำหนดไว้ในประกาศกระทรวงมหาดไทย ดังนั้นการต่อลงดินของสาย Neutral และ Lightning arrester จึงต้องติดตั้งหลักดินชนิด Galvanized steel ขนาด 1.6×240 ซม. เพิ่มเติมโดยต่อเข้ากับ Ground pad ที่โคนเสาไฟฟ้า สายดินที่เป็นสายทองแดงจะเชื่อมยึดติดกับสตั๊ปหรือยึดติดกับส่วนของเสาโครงเหล็กโดยตรง โดยใช้แคลมป์สายดินแบบร่องเดี่ยว และการต่อหลักดินจะเป็นแบบเชื่อมด้วยความร้อนโดยที่สายส่งระบบ 115 kV ค่าความต้านทานของดินกำหนดไว้ไม่เกิน 10 โอห์ม ลักษณะการต่อลงดินแสดงดังรูป 2.8.19



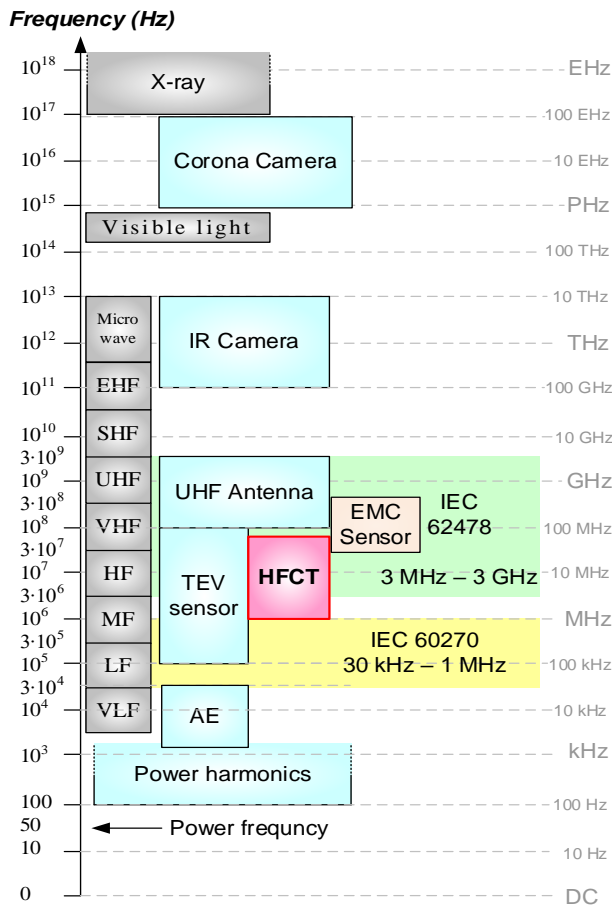
รูปที่ 2.8.19 ลักษณะการต่อลงดินของระบบสายส่ง 115 kV [41 p.56]

บทที่ 3

การทดสอบในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง

เพื่อศึกษาสัญญาณที่เกิดจากการเชื่อมมาจากจุดอื่น (cross-talk) จึงได้ดำเนินการกับวงจรวัด PD สองวงจร คือ วงจรที่ 1 และ วงจรที่ 2 โดยอยู่บนระบบกราวด์เดียวกันในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง ระยะห่างระหว่างสองวงจรมีประมาณ 20 เมตร, แบบจำลอง PD ถูกนำมาใช้เพื่อสร้างสัญญาณ PD ใส่เข้าไปในวงจรที่ 1 ในขณะที่ตรวจสอบสัญญาณ cross-talk ในวงจรที่ 2 โดยใช้เซ็นเซอร์หม้อแปลงกระแสความถี่สูง (HFCT) ในการวัดสัญญาณ PD ในวงจรที่ 1 และสัญญาณที่เกิดจากการเชื่อมมาจากจุดอื่นนี้ (cross-talk) ในวงจรที่ 2

3.1 เซ็นเซอร์ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง



รูปที่ 3.0 ช่วงความถี่ต่างๆของการวัด PD

การตรวจจับดิสชาร์จบางส่วน (PD) ในสถานีไฟฟ้าย่อยนั้นเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการป้องกันความล้มเหลวในสินทรัพย์ทางไฟฟ้า ในบรรดาเทคนิคการวัด PD ต่างๆ ที่มีอยู่: ทางแม่เหล็กไฟฟ้า ทางเสียง ทางแสง และการวิเคราะห์ผลพลอยได้ทางเคมี วิธีการทางแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลายมากที่สุดเนื่องจากประสิทธิภาพสูง, เซ็นเซอร์ PD แบบต่างๆ ใช้สำหรับตรวจจับสัญญาณ PD เช่น หม้อแปลงกระแสความถี่สูง (HFCT), เซ็นเซอร์แรงดันดินเกินชั่วคราว (TEV), เซ็นเซอร์เสียง (AE), เสาวอากาศความถี่สูงพิเศษ (UHF), กล้องอินฟราเรด (IR) และกล้องโคโรนา เป็นต้นแสดงในรูปที่ 3.0

ช่วงการวัด PD ตามมาตรฐาน IEC 60270 หรือการตรวจวัดในห้องปฏิบัติการนั้น คือ 30 kHz – 1 MHz เป็นพื้นที่สี่เหลี่ยมดังรูปที่ 3.1 และ ช่วงการวัด PD ตามมาตรฐาน IEC 62478 หรือการตรวจวัดหน้างานที่ระบบไฟฟ้าติดตั้งอยู่นั้น คือ 3 MHz – 3 GHz ที่วัดในช่วงความถี่ที่สูงกว่าเพื่อลดผลของสัญญาณรบกวนในหน้างานแต่ก็แลกมาด้วยการเปิดรับสัญญาณกว้าง ทำให้วัดซ้ำได้ยากกว่าช่วงความถี่ IEC 60270, จุดมุ่งหมายของงานวิจัยชิ้นนี้ก็เพื่อประยุกต์ใช้กับหน้างาน ดังนั้นจึงเลือกใช้ HFCT ในการบันทึกผล ซึ่งเซนเซอร์ HFCT ที่ใช้นี้มีช่วงการรับสัญญาณดังแสดงในหัวข้อ 2.7.3 คือ 1 MHz – 80 MHz ดังรูปที่ 3.0 จะเห็นว่าเป็นพื้นที่สีแดงกินพื้นที่เข้าไปในพื้นที่สี่เหลี่ยมของ IEC 62478 นอกจากนี้เซนเซอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ติดตั้งในหน้างานนั้นก็วัดอยู่ในช่วง 40 MHz – 500 MHz ซึ่งข้อดีและข้อเสียของการวัดในห้องปฏิบัติการตาม IEC 60270 และ IEC 62478 แสดงดังตาราง 3.1.1 และ 3.1.2 ตามลำดับ [62]

ตารางที่ 3.1.1 ข้อดีและข้อเสียของ IEC 60270

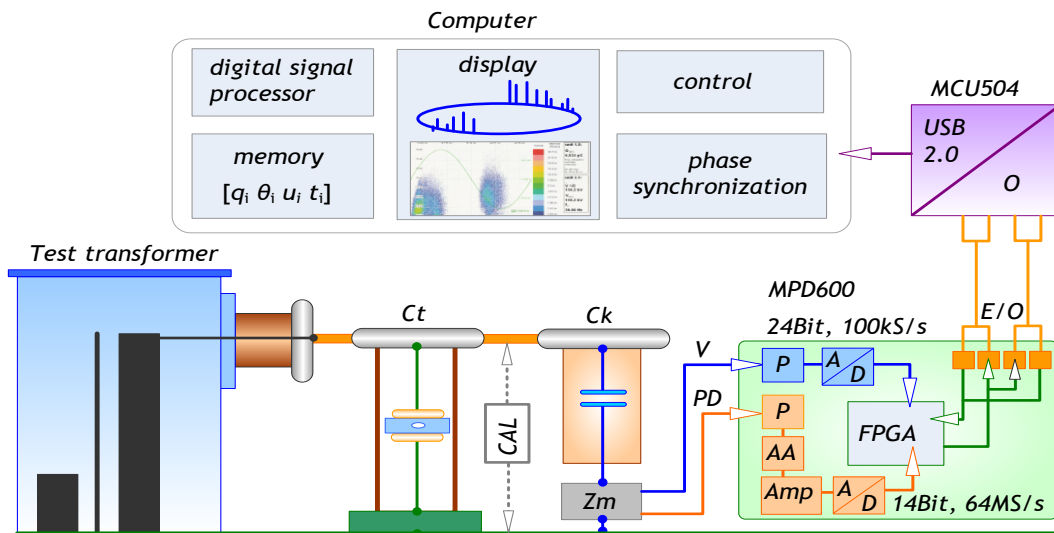
ข้อดี	ข้อเสีย
<ol style="list-style-type: none"> 1. การอ่านเทียบค่าของประจุปรากฏในหน่วย pC 2. วิธีการที่รู้จักกันแพร่หลาย ตั้งแต่ช่วงปี 1960 3. รูปแบบ PRPD อ้างอิงมีให้ใช้กันอย่างแพร่หลาย สำหรับข้อบกพร่องที่เกิดการดิสชาร์จที่แตกต่างกัน และสำหรับอุปกรณ์ส่วนอื่นๆ 4. มีขั้นตอนที่เป็นมาตรฐานสำหรับการทดสอบตามตรวจรับ ทรวยสภาพในโรงงาน และ การทดสอบที่หน้างาน 	<ol style="list-style-type: none"> 1. การรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (EMI) ทำให้การทดสอบหน้างานทำได้ยาก 2. ขนาดและความซับซ้อนของอุปกรณ์ทดสอบมีอิทธิพลต่อความไวของการวัดสัญญาณ 3. ไม่สามารถหาแหล่งที่มาของ PD ได้ 4. ในกรณีของอุปกรณ์ทดสอบขนาดใหญ่ (ที่พฤติกรรมสัญญาณการกระจายตัว) ตำแหน่งของข้อบกพร่องมีอิทธิพลอย่างมากต่อค่า PD ที่วัดได้ 5. ลดความไวในการตรวจจับสัญญาณลง กรณีที่ความจุของตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว มีค่าเก็บประจุต่ำเมื่อเทียบกับของอุปกรณ์ที่ได้รับการทดสอบ

ตารางที่ 3.1.2 ข้อดีและข้อเสียของ IEC 62478

ข้อดี	ข้อเสีย
<ol style="list-style-type: none"> 1. ลดปัญหา EMI ในหน้างาน 2. การวัดสัญญาณที่มีพฤติกรรมแบบกระจายตัวและการประเมินรูปแบบ PRPD เป็นไปได้ 3. ในกรณีส่วนใหญ่ใช้ได้กับการตรวจสอบแบบออนไลน์ เพราะไม่สามารถหยุดการเดินระบบได้ 4. รูปแบบ PRPD คล้ายกับที่ได้รับจากการวัดแบบ IEC 60270 อย่างมาก 	<ol style="list-style-type: none"> 1. ไม่สามารถสอบเทียบการอ่านค่าประจุที่ชัดเจนในหน่วย pC ได้ 2. ขั้นตอนการทดสอบที่เป็นมาตรฐานไม่พร้อมใช้งานสำหรับส่วนอุปกรณ์ไฟฟ้าทั้งหมดตอนนี้ 3. ตำแหน่งข้อบกพร่องมีอิทธิพลอย่างมากต่อค่า PD ที่วัดได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับการวัดในช่วงความถี่ VHF และ UHF

3.2 การจัดวงจรทดสอบ PD

วงจรวัด PD มีสองวงจร เป็นวงจรมายเลข 1 และวงจรมายเลข 2 บนระบบกราวด์เดียวกันในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง ได้ถูกดำเนินการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 3.2-3.4 ระยะห่างระหว่างวงจรวัด PD สองวงจรมานี้ คือประมาณ 20 เมตร ระบบรับข้อมูล เช่น เครื่องวิเคราะห์ PD มีช่วงความถี่ (bandwidth) 16 kHz – 30 MHz, ตัวเก็บประจุแบบ coupling ขนาด 1 nF และเซ็นเซอร์ HFCT ช่วงความถี่ 1 – 80 MHz ถูกนำมาใช้ในการทดลอง



เมื่อ C_t คือ แบบจำลอง PD (corona , surface , internal , etc...)

CAL คือ เครื่องสอบเทียบประจุในห้องปฏิบัติการใช้ omicron CAL 542 (Charge calibrator)

A/D คือ ตัวแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัล

C_k คือ ตัวเก็บประจุแบบคาบเกี่ยว

P คือ ส่วนป้องกัน (protection)

E/O คือ ตัวแปลงสัญญาณไฟฟ้าเป็นสัญญาณแสง (Electrical to Optical)

Z_m คือ ชุดการวัดอิมพีแดนซ์

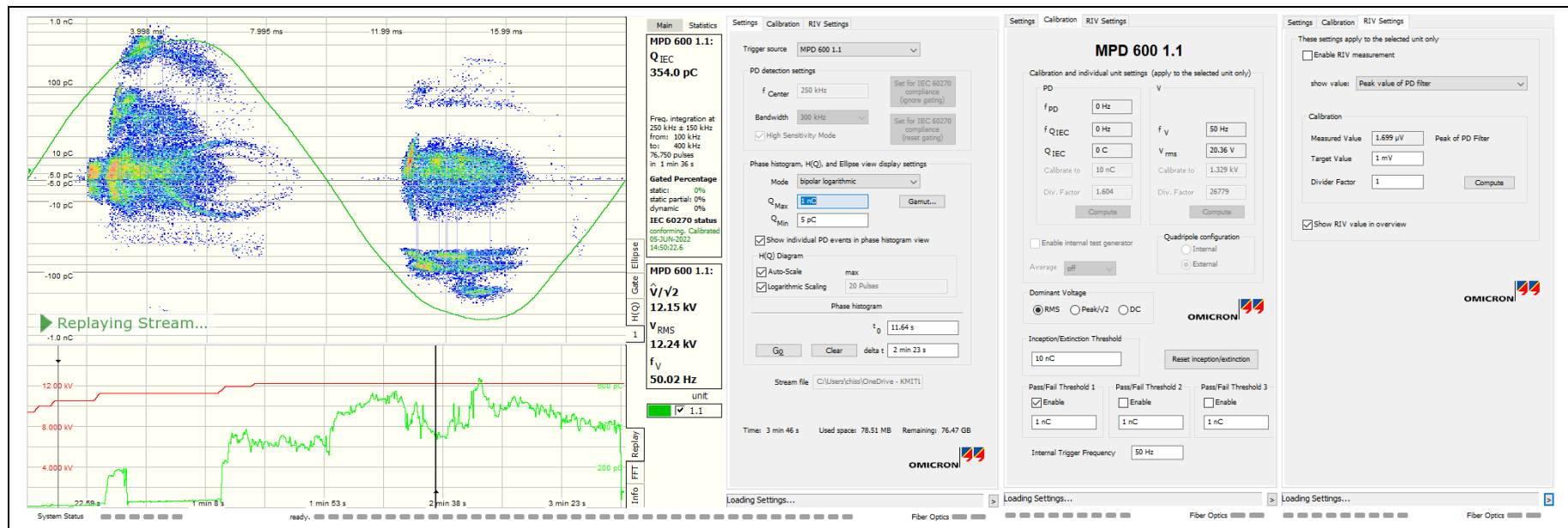
Amp คือ ตัวขยายสัญญาณแถบกว้าง (wideband)

AA คือ ตัวกรองสัญญาณให้เรียบไม่ผิดเพี้ยน (Anti-Aliasing) ขนาด 20 MHz

FPGA คือ ชุดโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (Field Programmable Gate Array)

การใช้ซอฟต์แวร์ Basic PD ในห้องปฏิบัติการ สจล.

ส่วนของซอฟต์แวร์ที่ควรทราบเบื้องต้นเพื่อการอ่านผลการทดสอบที่ได้ ดังรูปที่ 3.1 (ซ้ายบน) แสดง PRPD หากจุดไหนเกิดการดิสชาร์จซ้ำจะค่อนไปทางสีแดง และมีกราฟไซน์ 50 Hz เส้นสีเขียว ที่รับสัญญาณมาจาก MPD 600 1.1 ที่ปรับได้ในแถบ settings ที่ Trigger source , fcenter ปรับความถี่แถบกลางของแบนวิดท์ ซึ่งสัญญาณที่รับมานั้นตั้งแต่ความถี่พลังงานจนถึง 20 MHz จะเซ็ทตาม IEC 60270 หรือวัดนอกช่วงก็ได้ , Mode ในรูปที่ 3.1 (ซ้ายบน) แสดงแบบ bipolar log อาจเลือกเป็น unipolar linear ก็ได้ , Qmax และ Qmin ปรับขอบบนขอบล่างของกราฟ PRPD, Go คือการเริ่มต้นผลการทดสอบที่บันทึกมา Clear คือการเริ่มใหม่ภาย ขณะเวลานั้นๆ (เคลียร์ผลเก่า คล้ายๆ refresh) , Stream file คือจุดที่บันทึกไฟล์ผลการทดสอบนี้



รูปที่ 3.1 อินเทอร์เฟซของโปรแกรม PD ในห้องปฏิบัติการ สจล.

รูปที่ 3.1 (ซ้ายล่าง) เป็นแถบแสดงสัญญาณแรงดันหน่วยอยู่แกนซ้าย เป็น kV (สีแดง) และ ประจุหน่วยอยู่แกนขวาเป็น pC (สีเขียว) เทียบกับเวลาที่ได้บันทึกผลการทดสอบนี้ อีกทั้งยังปรับช่วงเวลาได้ (replay) โดยการลากขอบเส้นตั้งสีดำ โดยนำมาสับบริเวณลูกศร เพราะซอฟต์แวร์ไม่สามารถกล่อไปมาเหมือนวิดีโอได้ จึงปรับด้วยวิธีนี้ , การอ่านค่าแรงดันให้อ่าน $V_{peak}/\sqrt{2}$ เพราะมาตรฐานกำหนดไว้โดยมีนัยยะ คือ การเสียดสภาพของฉนวน (โดยพิจารณาเพียงแค่ผลของความเครียดสนามไฟฟ้า) นั้นจะขึ้นอยู่กับแรงดัน เมื่อแรงดันสูงมากพอทำให้เกิดการเบรกดาวน ฉนวนจะเสียดสภาพทันที โดยรับสัญญาณจาก MPD 600 ทั้งยังมีความถี่และ V_{rms} แสดงอีกด้วย, QIEC เป็นการแสดงผลโดยคิดอัตราการเกิดซ้ำ , ช่วงความถี่ที่ใช้วัดคือ 100 kHz – 400 kHz มีจุดกลางที่ 250 kHz และขยายไป ± 150 kHz ทั้งแสดงจำนวนพัลส์ที่เก็บมาพล็อตเป็นจุดในเวลา replay นี้

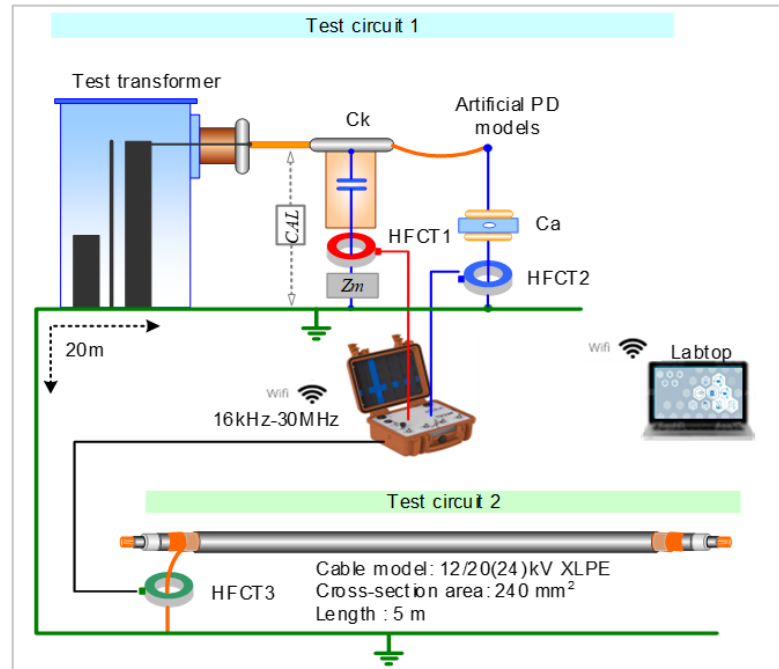
แถบ Calibration ที่แสดงดังรูปที่ 3.1 ช่อง PD สามารถอ่านค่าโดยการหยุด Go (stop replay) ดูเส้น PRPD ที่ขึ้นมา (อาจมีการดิสซาร์จหลายจุดในคาบแรงดัน) ซึ่งส่วนนี้จะแสดง f_{PD} f_{QIEC} Q_{IEC} นั้นโดยเฉลี่ย , **Calibrate to** มีการสอบเทียบประจุที่ขนาดใด , **Div. Factor** ที่คูณสัญญาณกลับจากการสอบเทียบประจุนี้ , **ช่อง V** ก็แสดงแรงดันและความถี่ขณะนั้น และ ข้อมูลการสอบเทียบแรงดัน , **Quadrupole configuration** เป็นการต่ออิมพีแดนซ์คาบเกี่ยวสัญญาณ ในที่นี้ใช้ omicron CPL 543 จึงเป็นการต่อแบบ External หากวัดจาก tap bushing หรือ ระบบ GIS จะเป็น Internal , **Dominant Voltage** เป็นการเลือกผลการแสดงในช่อง **V** มี 3 ชนิดแรงดันคือ RMS , $peak/\sqrt{2}$ และ DC , **Inception/Extinction Threshold** เป็นการกำหนดค่าเกณฑ์เพื่อแสดงผล PDIV และ PDEV ในแถบแสดงผล Info โดยสามารถตั้งค่า Pass/Fail Threshold ได้โดนกดติ๊กที่ Enable

ระบบแสดงผลยังสามารถดูการแสดงผลแบบ **Ellipse** หรือวงรีที่มีความนิยมนั้นในยุคก่อน ดังที่ได้กล่าวแล้วในหัวข้อที่ 1.7.2 ยุค 2 : การตรวจจับแบบอะนาล็อกจนถึง 1 MHz โดยใช้ **ออสซิลโลสโคป** รวมถึงมีการแสดงผล H(Q) เป็นข้อมูลของอัตราการเกิดพัลส์ คือแกนตั้งเป็นจำนวนพัลส์ที่เกิดมาพล็อตร่วมกับขนาดของพัลส์เป็น

แถบ FFT ยังทำให้เราสามารถเลือกช่วงการวัดตามความถี่ต่างๆ ตั้งแต่ ความถี่พลังงานไปจนถึง 20 MHz ซึ่งบางครั้งอาจจำเป็นในหลบสัญญาณรบกวนไปวัดที่ช่วงความถี่นอกช่วง IEC 60270 เพราะการวัดที่ความถี่สูงนั้นสัญญาณรบกวนจะต่ำลง

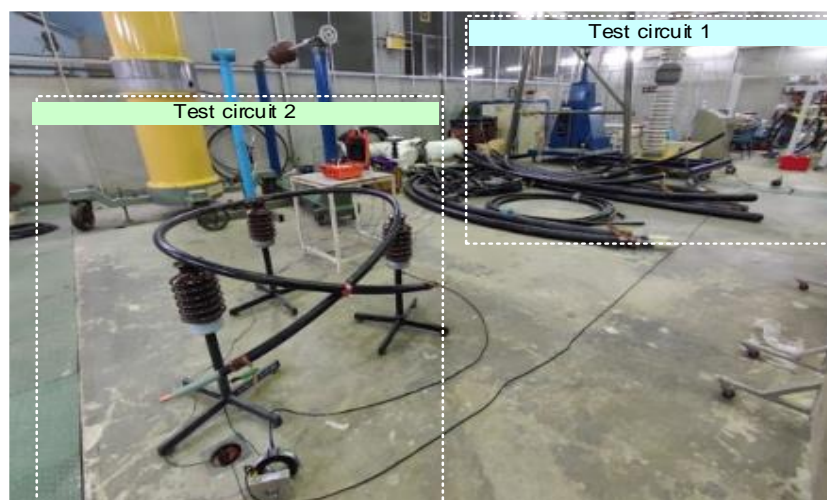
แถบ RIV (Radio Interference Voltage) เป็นส่วนของการวัดซึ่งเกินกว่าขอบเขตงานวิจัยนี้ โดยสรุปเป็นการวัดสัญญาณรบกวนวิทยุ ซึ่งมีข้อมูลที่เป็นประโยชน์ในการวัด PD เช่นกัน ดังที่ได้กล่าวแล้วในหัวข้อที่ 1.7.1 ยุค 1 : วิธีแรงดันสัญญาณรบกวนวิทยุ (RIV)

ในการทดลองได้ขึ้นแรงดันสูงผ่านหม้อแปลงทดสอบจ่ายไปยัง Ck และ Ca ดังรูปที่ 3.2 โดยทำการเปรียบเทียบประจุก่อนเก็บผลทดลองเพื่อผลทดลองที่ถูกต้อง และเก็บข้อมูลโดย HFCT 3 จุด พร้อมๆ กัน คือ กราวด์ของ Ck , Ca และ เคเบิล ในวงจรที่ 2 ซึ่งห่างจากวงจรที่ 1 ราว 20 m ตามลำดับ และรับข้อมูลโดยเครื่องวิเคราะห์สัญญาณ PD ซึ่งรับช่วงความถี่ 16 kHz – 30 MHz จากนั้นส่งสัญญาณ wifi แสดงผลที่ software ในเครื่องคอมพิวเตอร์



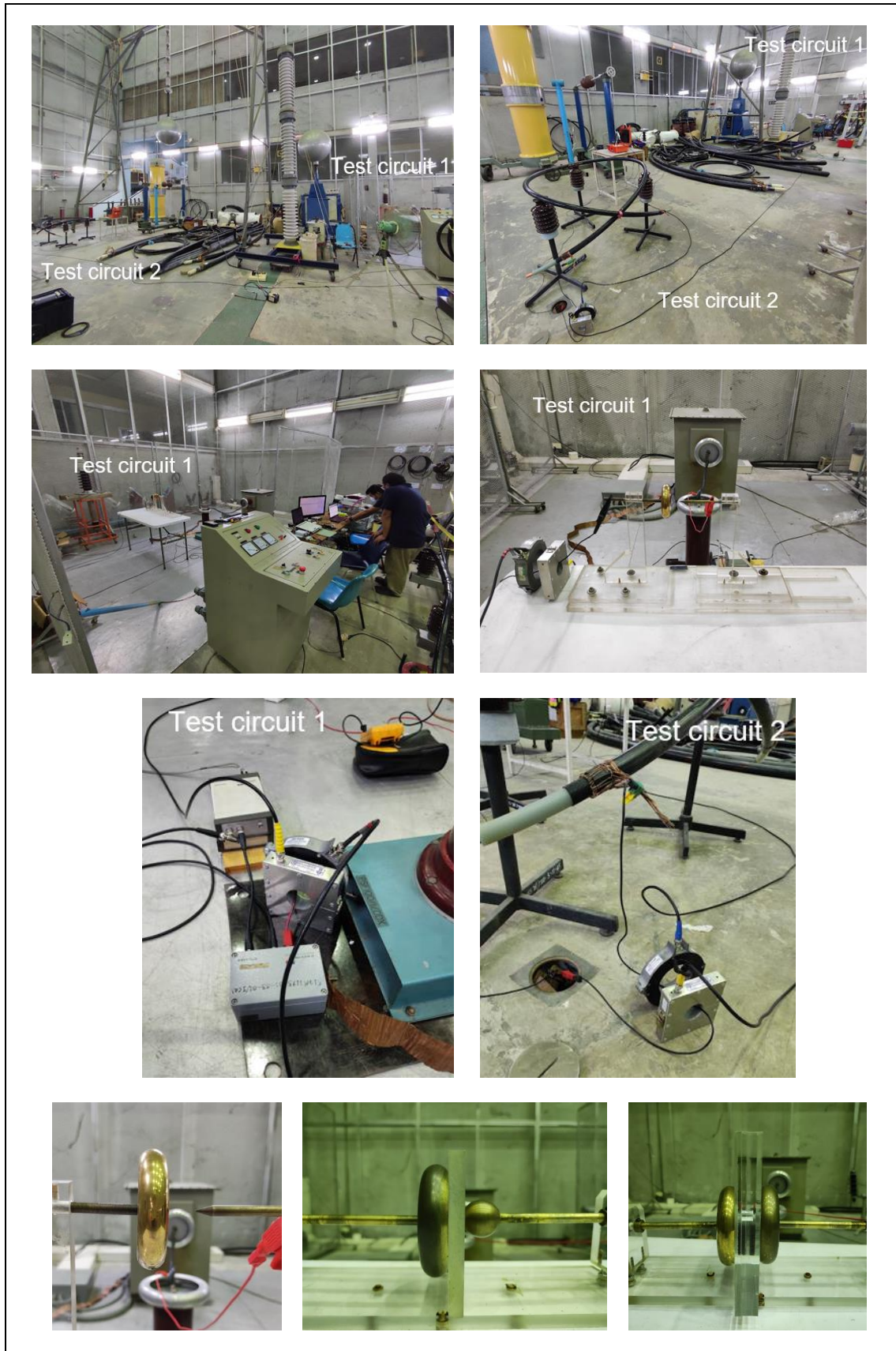
รูปที่ 3.2 แผนผังวงจรทดสอบสำหรับการวัด PD

รูปที่ 3.3 แสดงภาพถ่ายรูปวงจรที่ 2 และที่ 1 ที่ห่างกัน 20 m ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว จะเห็นได้ว่า วงจรที่ 2 นั้นเป็นเคเบิลแรงดันปานกลาง 12/20(24) kV ฉนวนด้วย XLPE พื้นที่หน้าตัด 240 mm² ยาว 5 m ลอยอยู่ไม่ได้เชื่อมต่อทางไฟฟ้ากับสิ่งใด (open circuit)



รูปที่ 3.3 การจัดวงจรทดสอบสำหรับการวัด PD

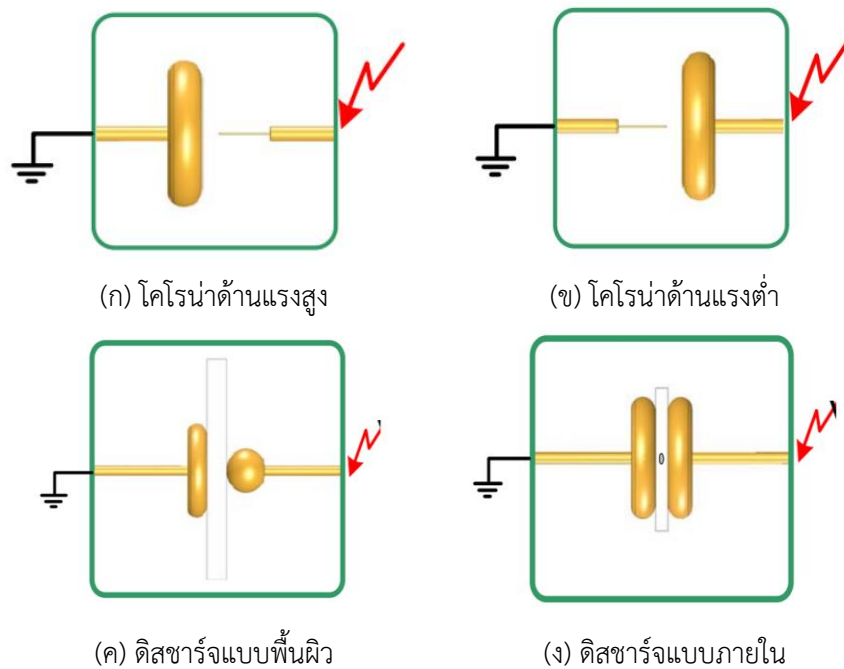
รูปที่ 3.4 แสดงภาพถ่ายการจัดวงจรทดสอบ PD ในห้องปฏิบัติการ



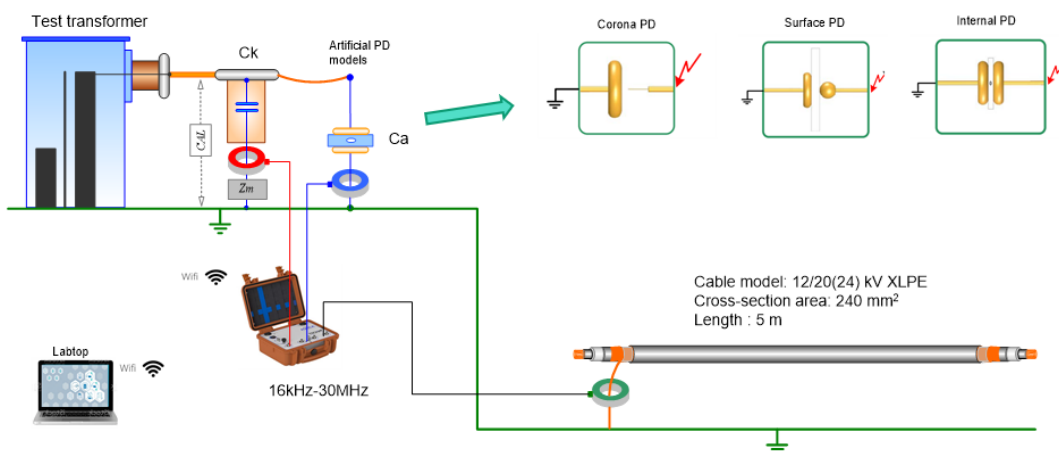
รูปที่ 3.4 ภาพถ่ายการจัดวงจรทดสอบ PD ในห้องปฏิบัติการ

3.3 แบบจำลอง PD

แบบจำลอง PD สำหรับการจำลองรูปแบบจำแนกเฟส PRPD (Phase Resolved Partial Discharge) ได้แก่ การดิสชาร์จแบบโคโรน่า การดิสชาร์จแบบพื้นผิว และการดิสชาร์จแบบภายใน **รูปที่ 3.5 (ก) และ (ข)** แสดงอิเล็กโทรดระนาบเข้มนในอากาศเพื่อสร้างโคโรน่าที่ด้านแรงดันสูงและต่ำตามลำดับ, **รูปที่ 3.5 (ค)** แสดงถึงอิเล็กโทรดทรงกลมและระนาบโดยมีแผ่นอะคริลิกที่ใช้สร้างการดิสชาร์จบนพื้นผิวคั่นอยู่, **รูปที่ 3.5 (ง)** แสดงแผ่นอะคริลิกแบบโพรงที่เติมอากาศเข้าไป โดยโพรงอากาศนี้อยู่ระหว่างอิเล็กโทรดระนาบคู่ขนาน เพื่อสร้างการดิสชาร์จแบบภายใน โดยใส่เข้าไปในวงจรทดสอบที่ 1 เพื่อเป็นแหล่งกำเนิด PD ของการทดสอบ ดัง**รูปที่ 3.6**



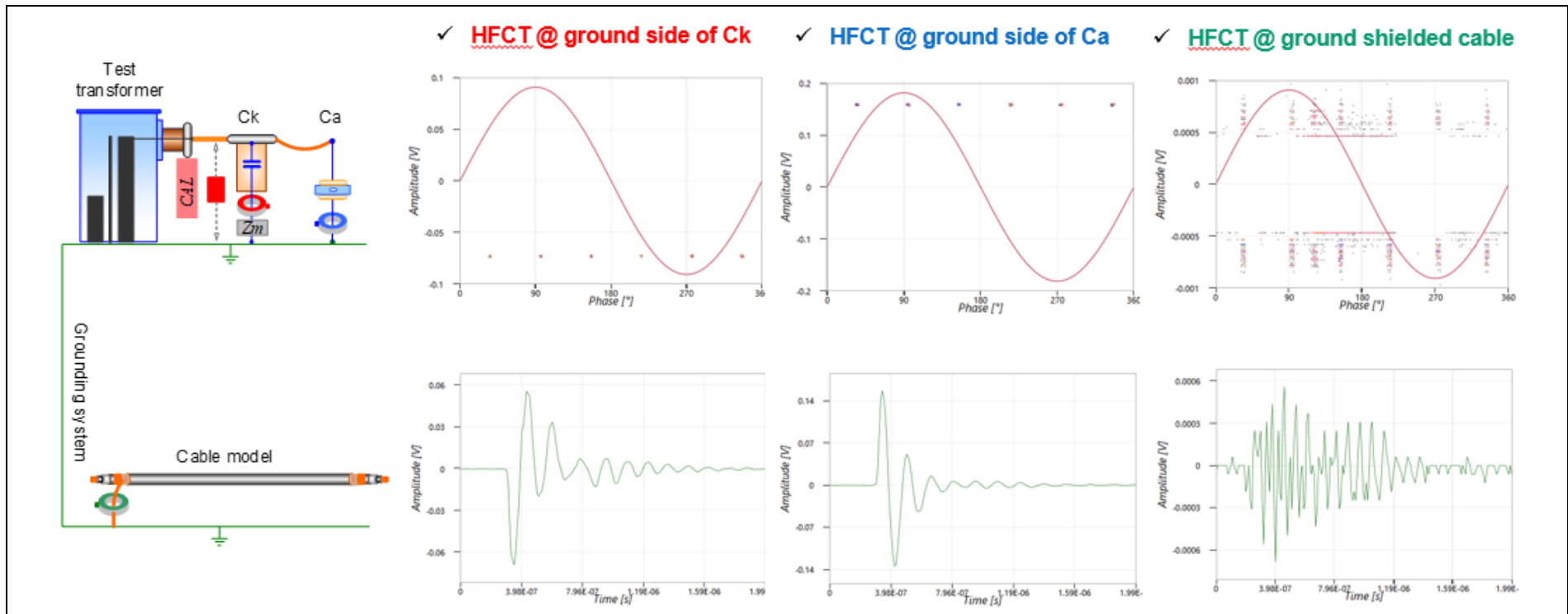
รูปที่ 3.5 แบบจำลอง PD



รูปที่ 3.6 วัตถุทดสอบ (Ca) ในวงจรทดสอบ

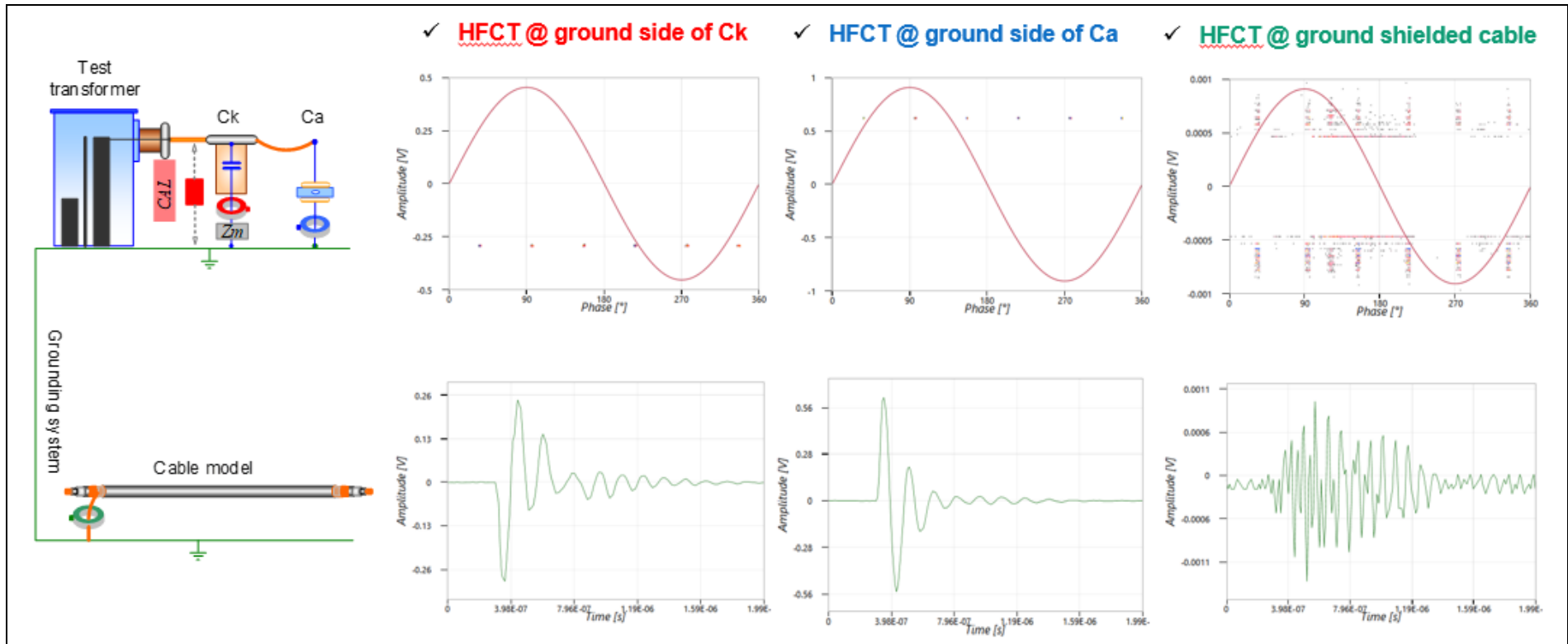
3.4 ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

ก่อนการทดลองวัดการคายประจุนั้น เริ่มการสอบเทียบประจุ โดยใช้พัลส์กระแสจากเครื่องกำเนิดพัลส์ตาม IEC 60270 ป้อนใส่เข้าไปในวงจรทดสอบหมายเลข 1 ผลลัพธ์แสดงในตารางที่ 3.3-3.5 คือแสดงรูปแบบจำแนกเฟส PRPD , ขนาด PD สูงสุด (Qm), และรูปคลื่นพัลส์, จากนั้นป้อนพัลส์กระแส PD จำลองจากแบบจำลอง PD เข้าไปในวงจรทดสอบที่ 1 ผลลัพธ์แสดงในตารางที่ 3.6 ซึ่งมีการจัดวงจรลักษณะเดียวกับการสอบเทียบประจุ โดยผลการ cross-talk PD นั้น ตรวจพบได้โดย HFCT3 ที่กราวด์สายเคเบิล (Cable) ของวงจรทดลองที่ 2 ดังที่ได้แสดงดังไว้ในรูปที่ 3.2-3.4 ตารางที่ 3.3 สอบเทียบประจุทดสอบ โดยป้อนพัลส์ PD จำลองขนาด 0.5 nC



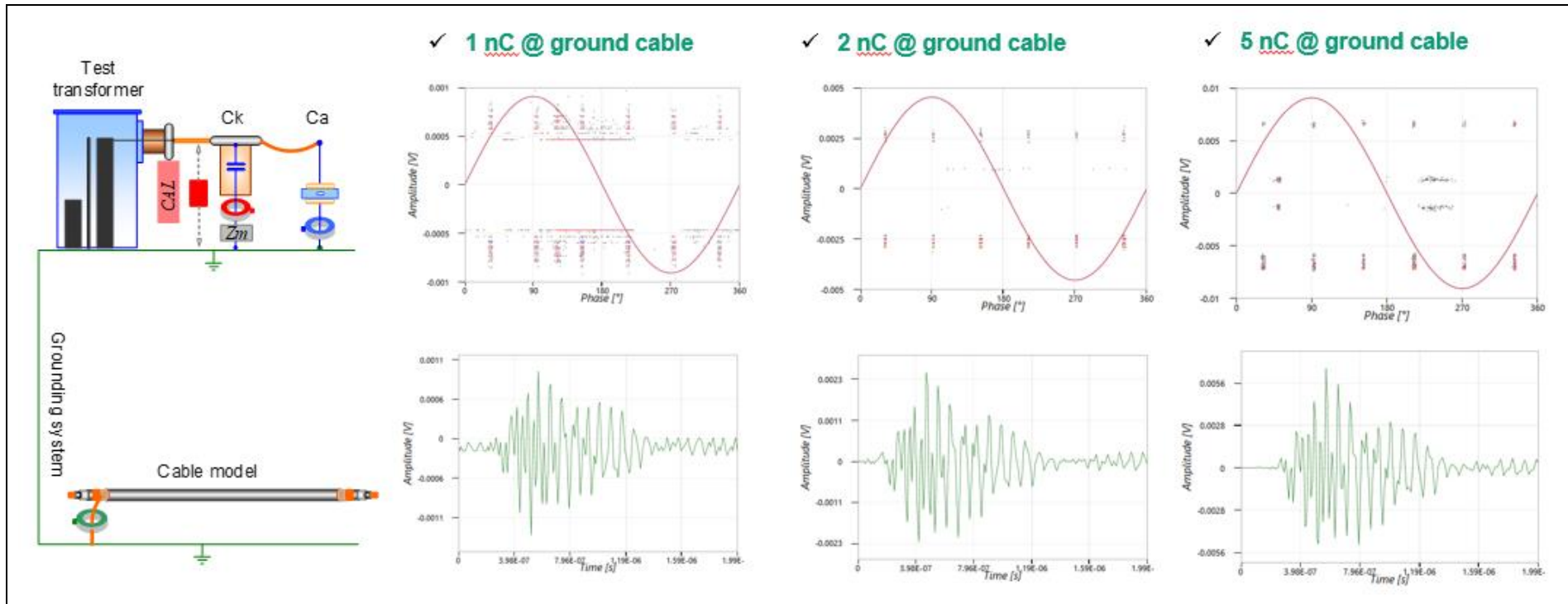
รูปแบบจำแนกเฟส PRPD และรูปคลื่นพัลส์ของทั้งสัญญาณ PD และสัญญาณ cross-talk ซึ่งเกิดขึ้นจากเครื่องกำเนิดพัลส์ตาม IEC 60270 ต่อวงจรร่วมกับแบบจำลองโคโรนาด้านแรงสูง แสดงไว้ในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 สอบเทียบประจุทดสอบ โดยป้อนพัลส์ PD จำลองขนาด 1 nC



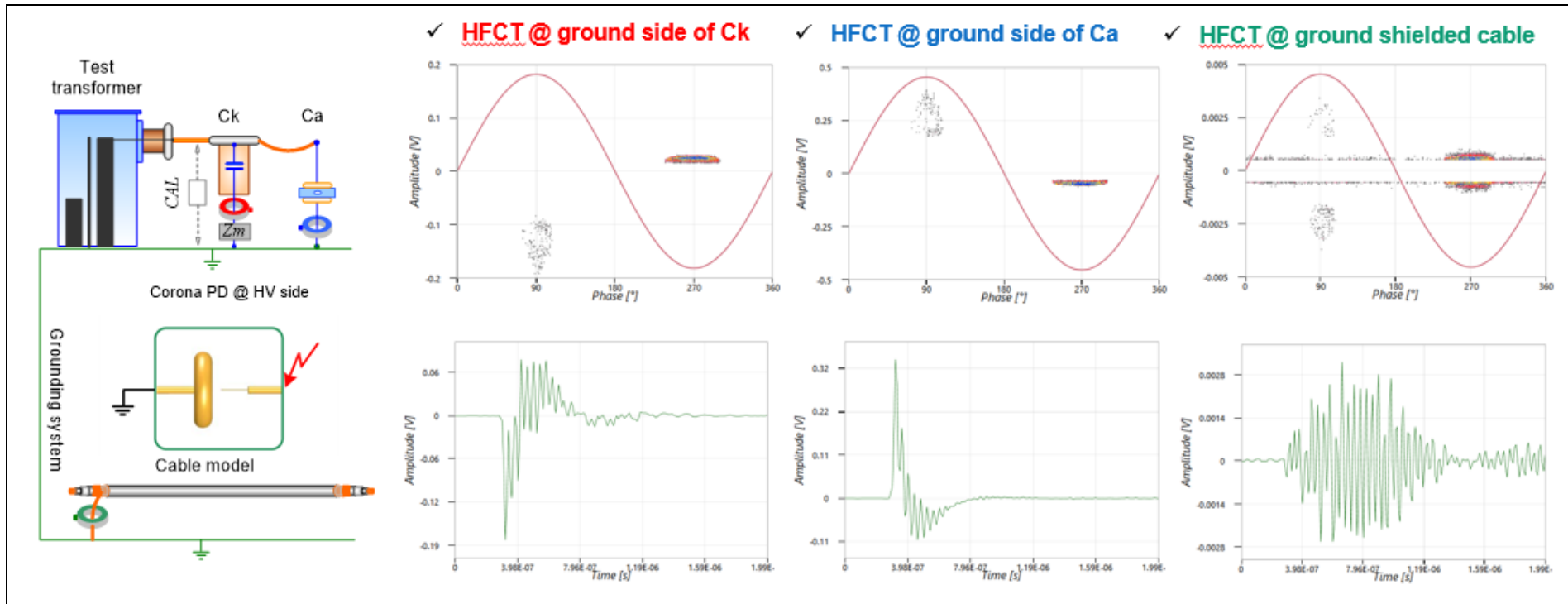
รูปแบบจำแนกเฟส PRPD และรูปคลื่นพัลส์ของทั้งสัญญาณ PD และสัญญาณ cross-talk ซึ่งเกิดขึ้นจากเครื่องกำเนิดพัลส์ตาม IEC 60270 ต่อวงจรร่วมกับแบบจำลองโคโรนาด้านแรงสูง แสดงไว้ในตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 สอบเทียบประจุทดสอบ โดยป้อน PD เพื่อดูสัญญาณ cross-talk



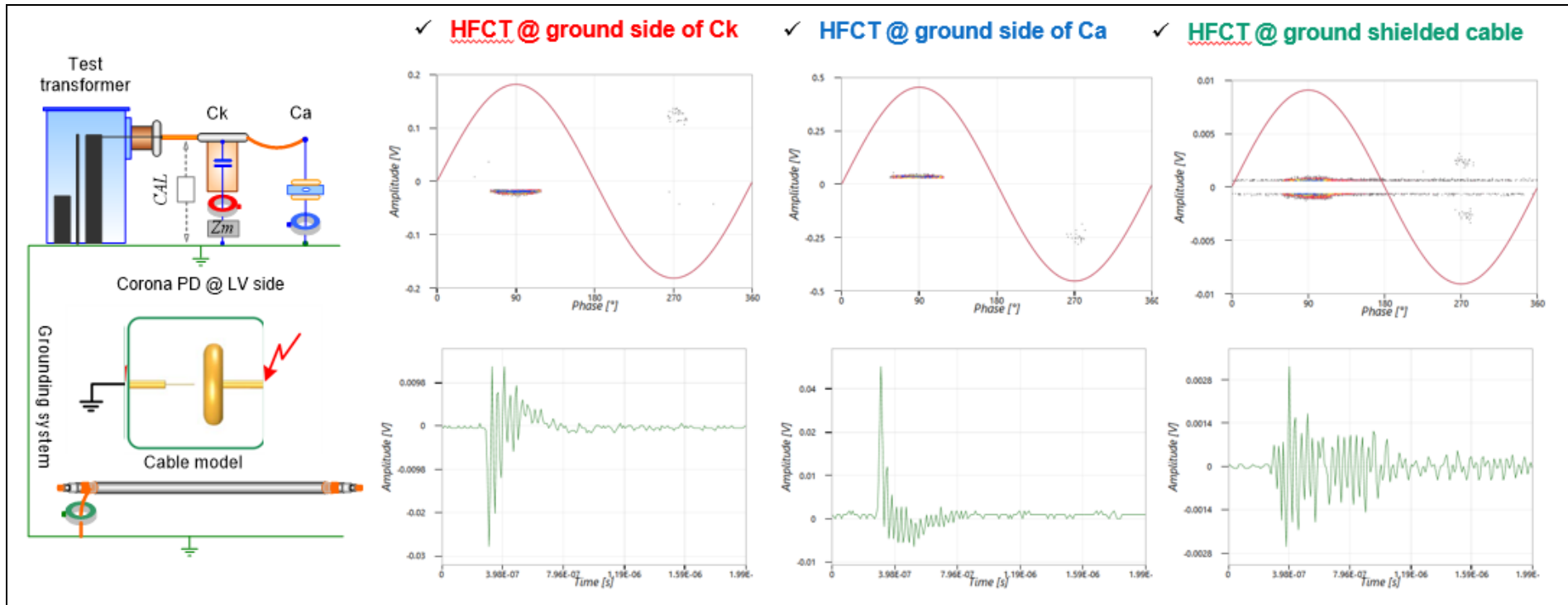
รูปแบบจำแนกเฟส PRPD และรูปคลื่นพัลส์ของทั้งสัญญาณ PD และสัญญาณ cross-talk ซึ่งเกิดขึ้นจากแบบจำลองโคโรนาด้านแรงสูง ภายใต้แรงดันทดสอบ 6 kV แสดงไว้ในตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 ผลการวัด PD แบบโคโรนาด้านแรงสูง ณ แรงดัน 6 kV



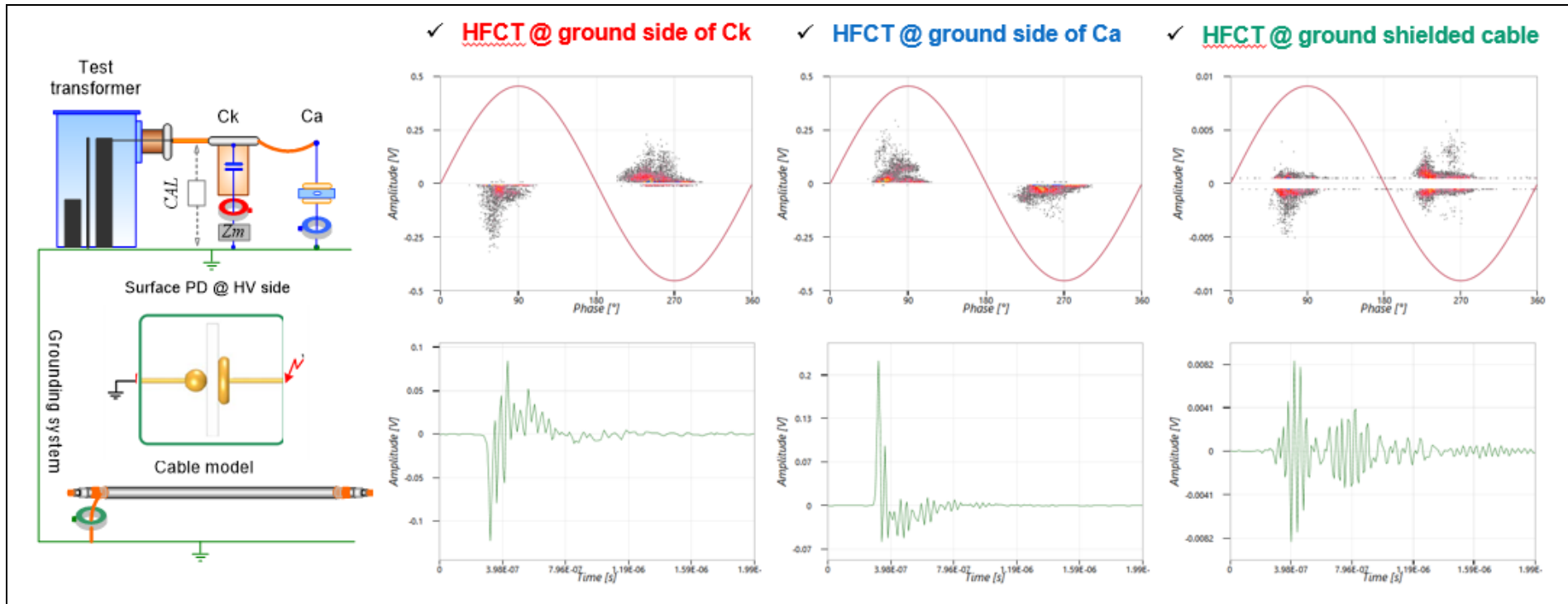
รูปแบบจำแนกเฟส PRPD และรูปคลื่นพัลส์ของทั้งสัญญาณ PD และสัญญาณ cross-talk ซึ่งเกิดขึ้นจากแบบจำลองโคโรนาด้านแรงต่ำ ภายใต้แรงดันทดสอบ 8 kV แสดงไว้ในตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.7 ผลการวัด PD แบบโคโรนาด้านแรงต่ำ ณ แรงดัน 8 kV



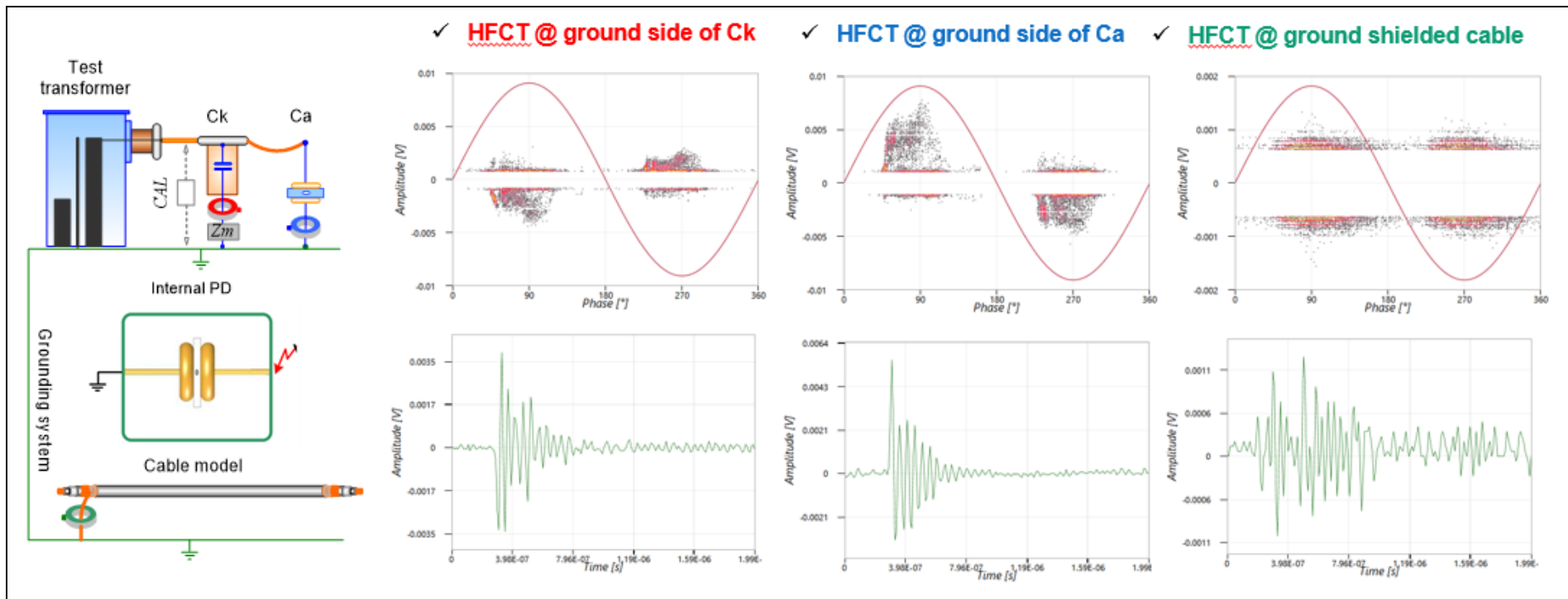
รูปแบบจำแนกเฟส PRPD และรูปคลื่นพัลส์ของทั้งสัญญาณ PD และสัญญาณ cross-talk ซึ่งเกิดขึ้นจากแบบจำลอง PD ที่พื้นผิว ภายใต้แรงดันทดสอบ 8 kV แสดงไว้ในตารางที่ 3.8

ตารางที่ 3.8 ผลการวัด PD จากแบบจำลอง PD ที่พื้นผิว ณ แรงดัน 8 kV



รูปแบบจำแนกเฟส PRPD และรูปคลื่นพัลส์ของทั้งสัญญาณ PD และสัญญาณ cross-talk ซึ่งเกิดขึ้นจากแบบจำลองการเกิด PD ภายในเนื่อฉนวน ภายใต้แรงดันทดสอบ 10 kV แสดงไว้ในตารางที่ 3.9

ตารางที่ 3.9 ผลการวัด PD จากแบบจำลองการเกิด PD ภายในเนื่อฉนวน ณ แรงดัน 10 kV



บทที่ 4

การทดสอบที่หน้างานจริง

บทนี้จะกล่าวถึงการทดสอบที่หน้างานจริงขณะมีการจ่ายไฟและไม่จ่ายไฟ โดยการทดลองในห้องปฏิบัติการในบทที่ 3 นั้นได้ถูกนำมาใช้ให้หัวข้อที่ 4.1 และได้สรุปไว้ในบทที่ 5 อีกทั้งยังแสดงการวัด PD โดยสังเขปของอุปกรณ์ไฟฟ้าหรือบริภัณฑ์ต่างๆ ในระบบไฟฟ้าอีกด้วย

4.1 การวัด PD ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขณะมีการทำงานจ่ายไฟ

การวัด PD ขณะระบบทำงานปกติหรือมีการจ่ายไฟอยู่ โดยเซ็นเซอร์ HFCT บนอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่หน้างาน สัญญาณ PD สามารถตรวจพบได้จากสายกราวด์ที่ตำแหน่งเหมาะสม ซึ่งจะแสดงตัวอย่างกรณีศึกษาการวัด PD ขณะมีการทำงานจ่ายไฟบนบัสเฟสแยก IPB (Isolate phase bus) 15.7 kV ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 211 MVA

กรณีศึกษานี้ แหล่งกำเนิด PD อยู่ภายในหม้อแปลงกระตุ้น (Exciter transformer) ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ตัวอย่างของผลการวัดแสดงในรูปที่ 4.3 โดยพบว่าการตรวจพบ cross-talk PD ที่สายกราวด์ของอุปกรณ์ตัวตัดแยกวงจรแบบแก๊ส GCB (Gas circuit breaker) นี้หมายความว่าสัญญาณ PD สามารถเดินทางในระบบกราวด์ได้ ความรู้เกี่ยวกับปรากฏการณ์ cross-talk ในระบบกราวด์สามารถช่วยในการตรวจสอบ PD และหาตำแหน่งสำหรับการวัด PD ขณะมีการทำงานจ่ายไฟได้

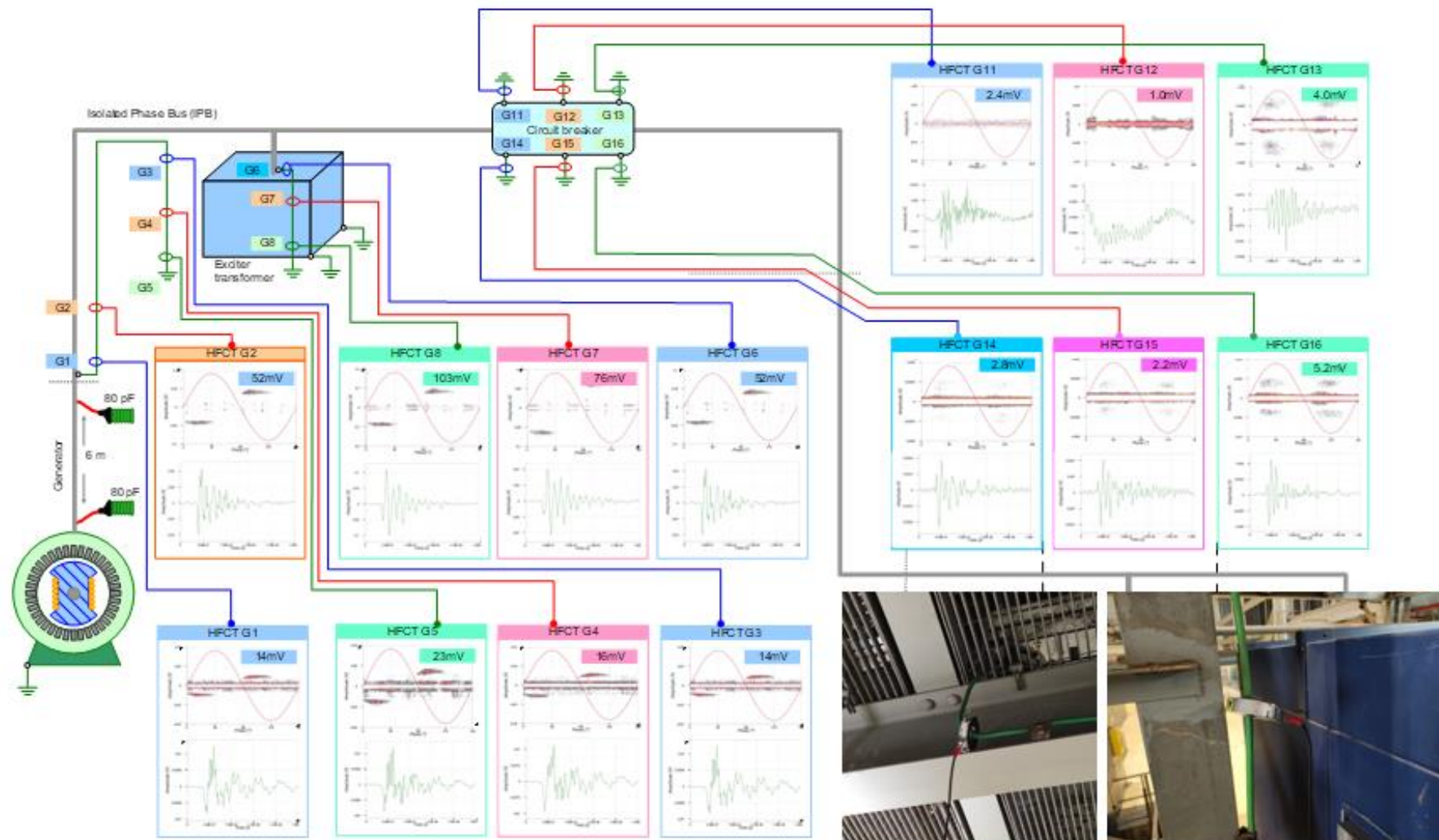


รูปที่ 4.1 แหล่งกำเนิด PD ภายในหม้อแปลงกระตุ้น (Exciter transformer)

ระบบแรงดันไฟฟ้า 15.7 kV ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 211 MVA ได้แสดงรูปถ่ายพอสังเขปดังรูปที่ 4.2 และรูปวาดวงจรการวัดของระบบผลิตไฟและผลการวัดด้วย HFCT sensor แสดงดังรูปที่ 4.3 ตลอดจนผลการวัดด้วย TEV sensor และ EMC sensor ที่ติดตั้งไว้แล้วดังรูปที่ 4.4 โดยการเก็บผลสัญญาณ PD นั้นทำในสภาพอากาศปลอดโปร่ง มีอากาศไหลผ่านและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

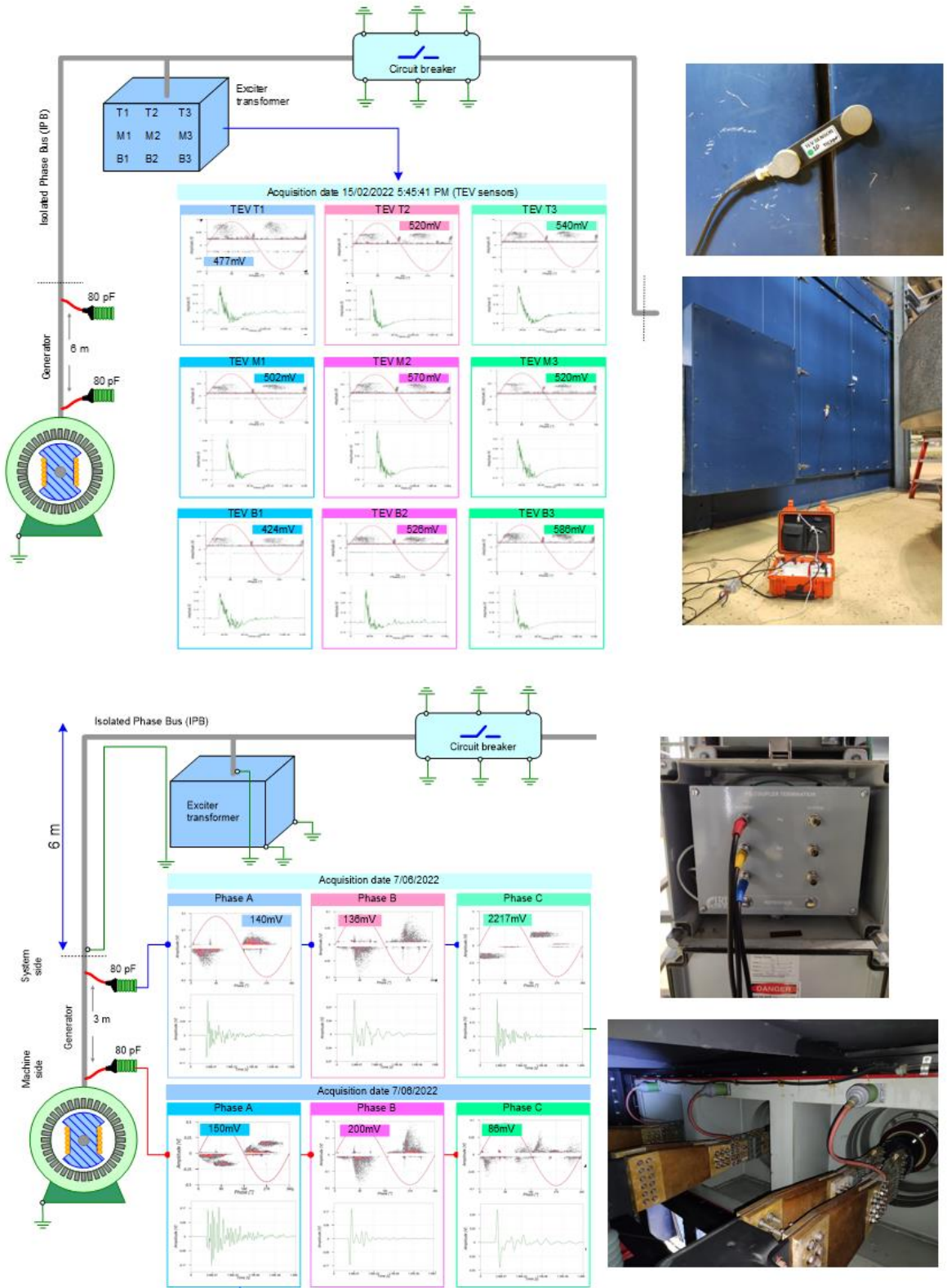


รูปที่ 4.2 รูปถ่ายการเก็บผล PD ในหน้างานจริง ของกรณีศึกษาเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 211 MVA



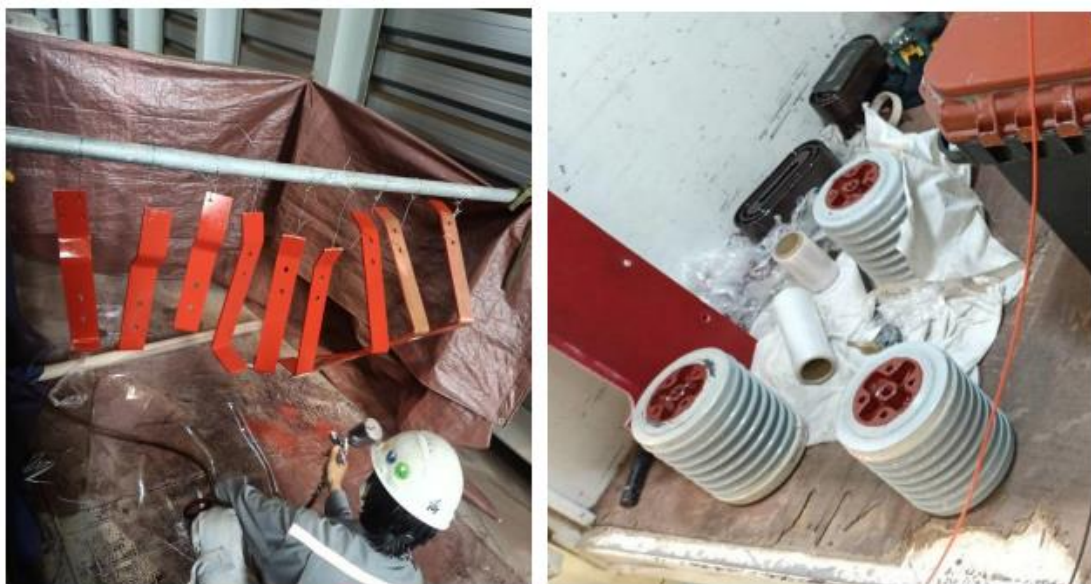
รูปที่ 4.3 การวัด PD ในหน้างานขณะมีการจ่ายไฟของระบบผลิตไฟฟ้า โดย HFCT

รูปที่ 4.4 (บน) แสดงการวัดห้องหม้อแปลง Excite ด้วย TEV บริเวณด้านหนึ่งทั้งหมด 9 จุด ในด้านนั้น ตรวจพบสัญญาณ PRPD และ รูปที่ 4.4 (ล่าง) แสดงสัญญาณจาก EMC ทางฝั่งเครื่องกำเนิด ดังภาพล่างขวา และ ห่วงออกทาง GCB จะเป็น EMC ทางระบบไฟฟ้า ซึ่งห่างกัน 3 m



รูปที่ 4.4 การวัด PD ในหน้างานขณะมีการจ่ายไฟของระบบผลิตไฟฟ้า โดย TEV และ EMC

เมื่อตรวจพบสัญญาณ PD และผลจากการดิสชาร์จ จึงได้ทำการแก้ไขการฉนวนบริเวณดังกล่าว ดังรูปที่ 4.5 และวางแผนติดตามสัญญาณ PD ต่อไป เพื่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่จะส่งผลไปถึงคุณภาพการใช้ไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟ



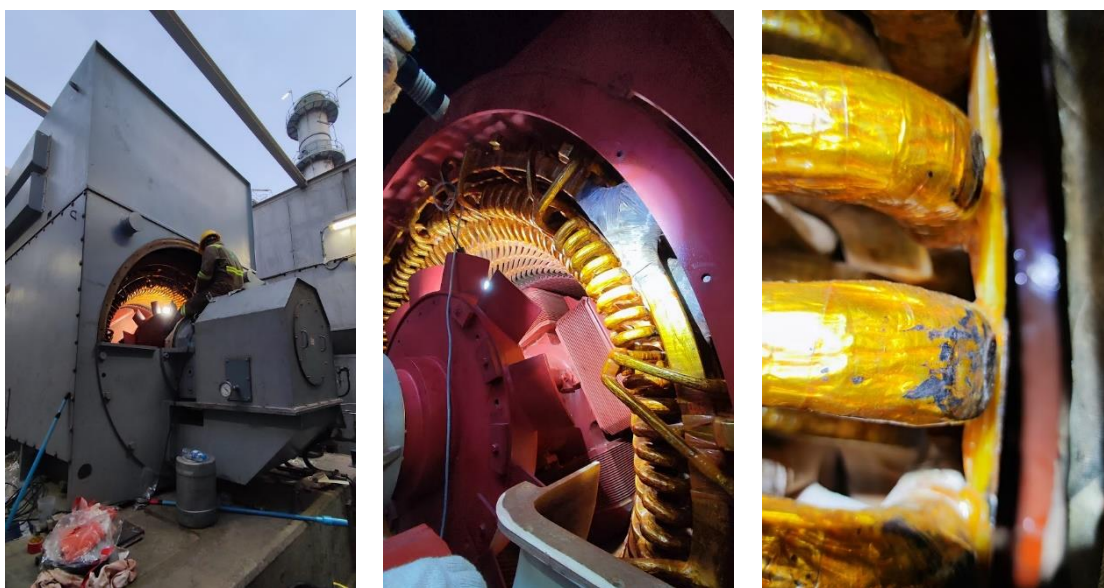
รูปที่ 4.5 การปรับปรุงแก้ไขฉนวนหลังจากตรวจพบ PD

4.2 การวัด PD ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบหยุดทำงานจ่ายไฟ

หัวข้อ 4.1 ได้แสดงการตรวจวัด PD ขณะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำงานจ่ายไฟ แต่การตรวจวัด PD นั้นยังสามารถทำแบบหยุดการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้เช่นกัน เหมือนกับการแทนที่ระบบไฟที่เกิดจากการเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยแหล่งกำเนิดไฟฟ้าภายนอก ในที่นี้ได้บรรทุกหม้อแปลง 1 เฟส 230/19 kV ดังรูปที่ 4.6 เพื่อเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าภายนอกให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีแรงดันใช้งาน 11 kV ซึ่งตรวจพบ PD ที่เกิดจากแผลบริเวณปลายขดลวดแสดงดังรูปที่ 4.7

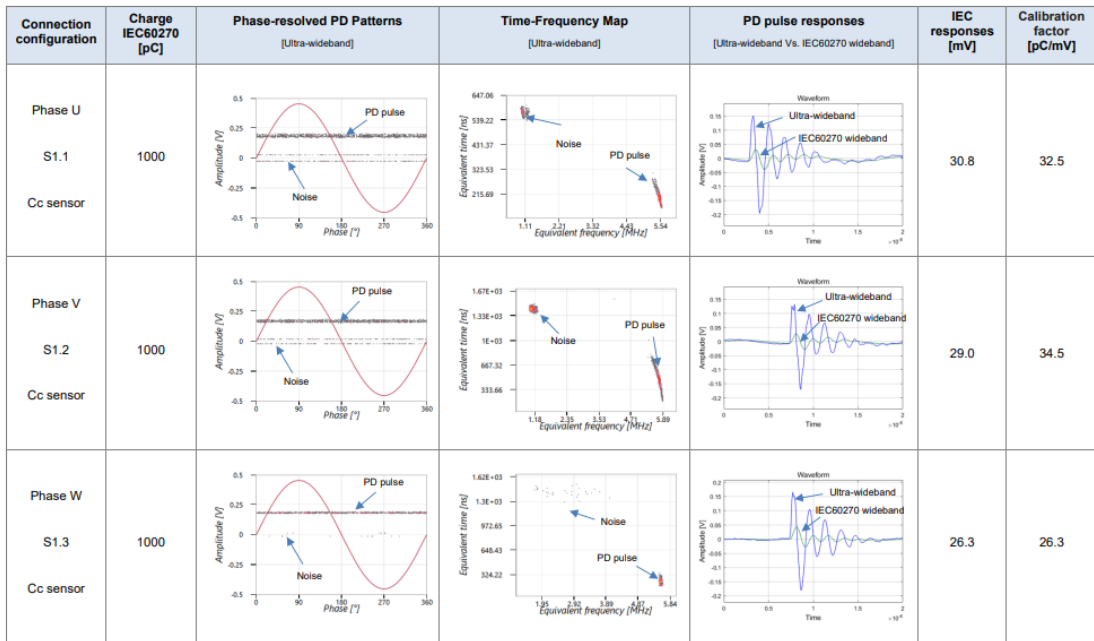


รูปที่ 4.6 การวัด PD ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบหยุดทำงานจ่ายไฟ



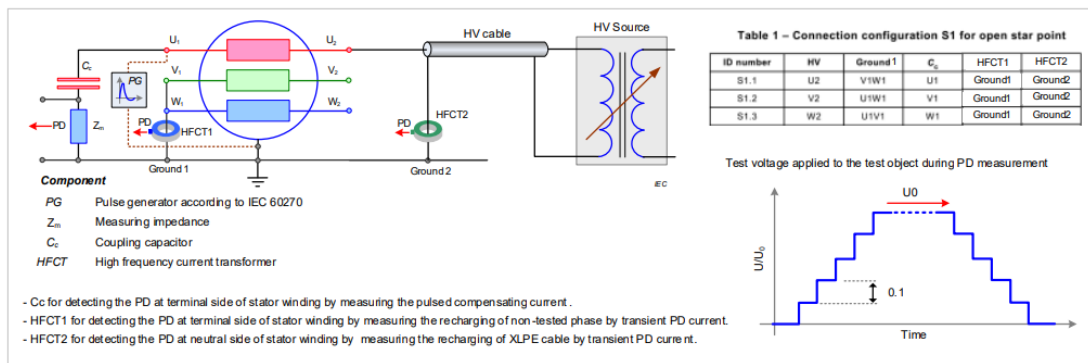
รูปที่ 4.7 แผลที่ปลายขดลวดที่เกิดจากการดิสชาร์จ

โดยก่อนการวัดค่าจะทำการสอบเทียบค่าประจุที่ทราบก่อน โดยสร้างสัญญาณจากเครื่องกำเนิดพัลส์จำลองตามมาตรฐาน IEC 60270 (Omicron CAL 542) เมื่อทราบขนาดประจุที่ลดทอนในระบบวัดแล้วจึงปรับแก้ของระบบวัดค่าให้เหมาะสม เพื่อตรวจจับสัญญาณ PD ที่เกิดขึ้นจริง รูปที่ 4.8 เป็นการป้อนสัญญาณ PD จำลอง ขนาด 1000 pC ในแต่ละเฟสขดลวดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าระบบวัดแบบเปิดกว้าง (ultra-wideband) จะวัดสัญญาณได้ขนาดที่โตกว่าแบบ IEC60270 bandwidth ในหน้างานจึงทำการวัดด้วย ultra-wideband เพื่อความเหมาะสมในการตรวจหา PD



รูปที่ 4.8 การตรวจเช็คสอบเทียบระบบวัด

จากนั้นขึ้นแรงดันตามมาตรฐาน IEC 60270, IEC 60034-27-1 และ IEEE Std 1434 โดยมี sensor ทางไฟฟ้า (Cc) และ ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (HFCT) ติดตั้งในวงจรทดสอบ แสดงดังรูปที่ 4.9

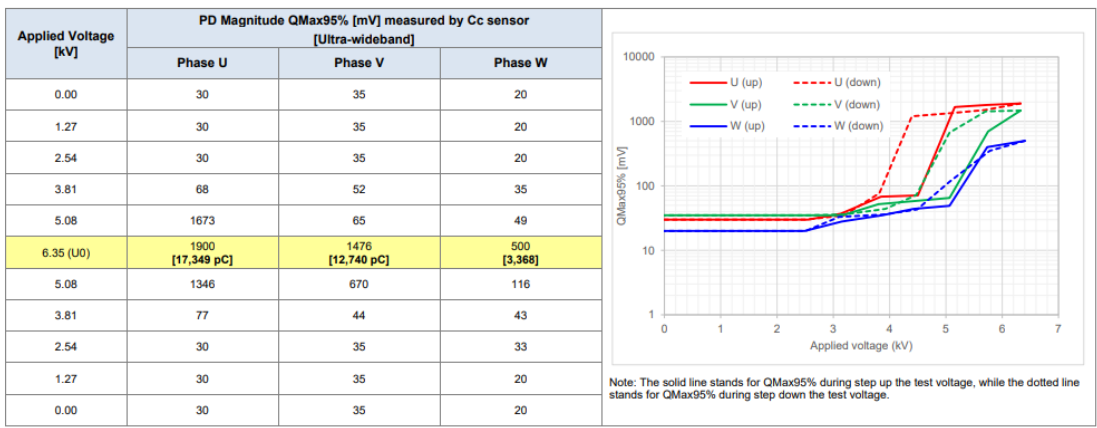


Note1: Offline PD measurement are performed according to IEC 60270-2000 +AMD1:2015 CSV, IEC 60034-27-1:2017, and IEEE Std 1434™-2014.

Note2: To reduce the noise from the power supply, the HV source will energize one phase from the neutral end, while the PD detection capacitor is at the phase terminal. The noise from the power supply may then be suppressed enough by the natural attenuation through the winding to permit useful measurements.

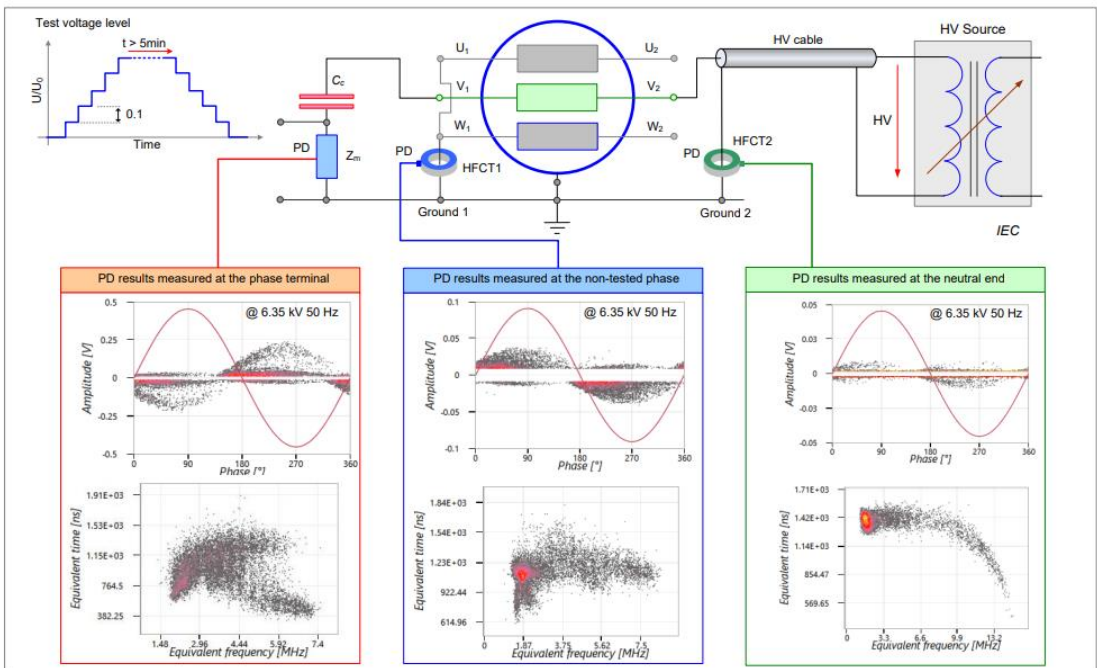
รูปที่ 4.9 วงจรทดสอบ จุดติดตั้งเซนเซอร์ และการขึ้นแรงดัน

เมื่อขึ้นแรงดันก็ตรวจวัดสัญญาณ PD จากระบบในแต่ละเฟสของขดลวดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า บันทึกค่า PDIV , PDEV , PRPD และ แรงดันทดสอบ ดังรูปที่ 4.10



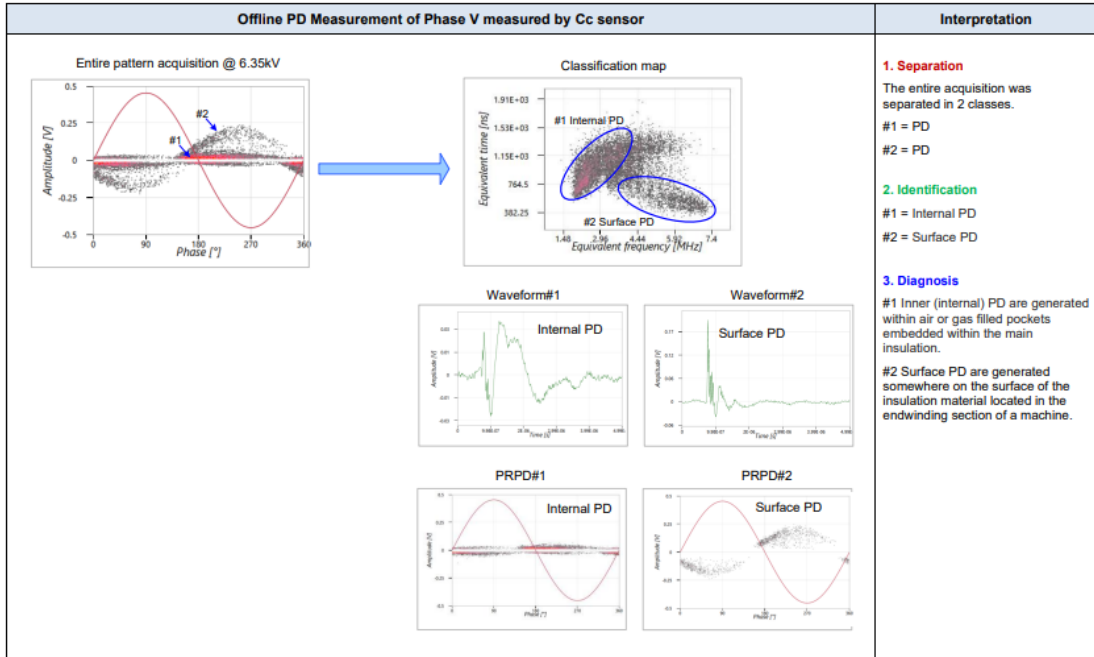
รูปที่ 4.10 ค่าของการดิสชาร์จตามแรงดันที่ป้อน

รูปตัวอย่างสัญญาณจาก Cc และ HFCT ของขดลวดเฟส V ที่แรงดันทดสอบ 1U0 (6.35 kV) แสดงดังรูปที่ 4.11 สังเกตได้ว่าสัญญาณจาก Cc จะมีขนาดสูงกว่า HFCT



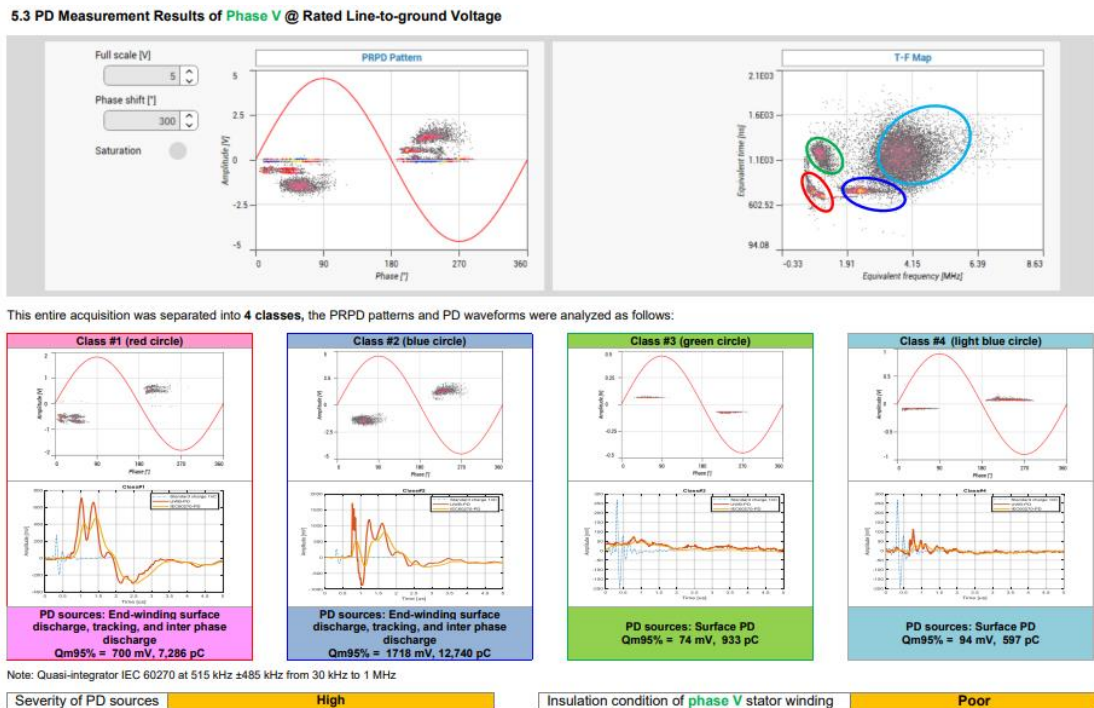
รูปที่ 4.11 ผลการวัดของขดลวดเฟส V ที่แรงดันทดสอบ 1U0

การวัดโดยตรงทางไฟฟ้า (Cc) นั้น จะมีความไวหรือสัญญาณที่ดีกว่าทางแม่เหล็กไฟฟ้า (HFCT) จึงมุ่งวิเคราะห์สัญญาณจาก Cc ดังรูปที่ 4.12 เป็นการวิเคราะห์ PRPD ที่ได้โดยแยกเป็น 2 กลุ่ม คือกลุ่มของการดิสชาร์จภายใน และ กลุ่มของการดิสชาร์จที่ผิว



รูปที่ 4.12 การวิเคราะห์ PRPD ที่ได้จากขดลวดเฟส V

ในกรณีที่ PRPD มีความซับซ้อนมาก T-F map และ พัลส์สัญญาณ PD ที่ตรวจพบ จะช่วยในการวิเคราะห์สัญญาณ PD ว่าเกิดจากสาเหตุอะไร ดังรูปที่ 4.13 ได้แสดงตัวอย่างผลการวัด offline PD ของขดลวดเฟส V เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่คล้ายกัน ซึ่งมี PRPD ซับซ้อนกว่าที่ได้กล่าวไว้ด้านบน



รูปที่ 4.13 ตัวอย่าง PRPD ของขดลวดที่มีความซับซ้อน

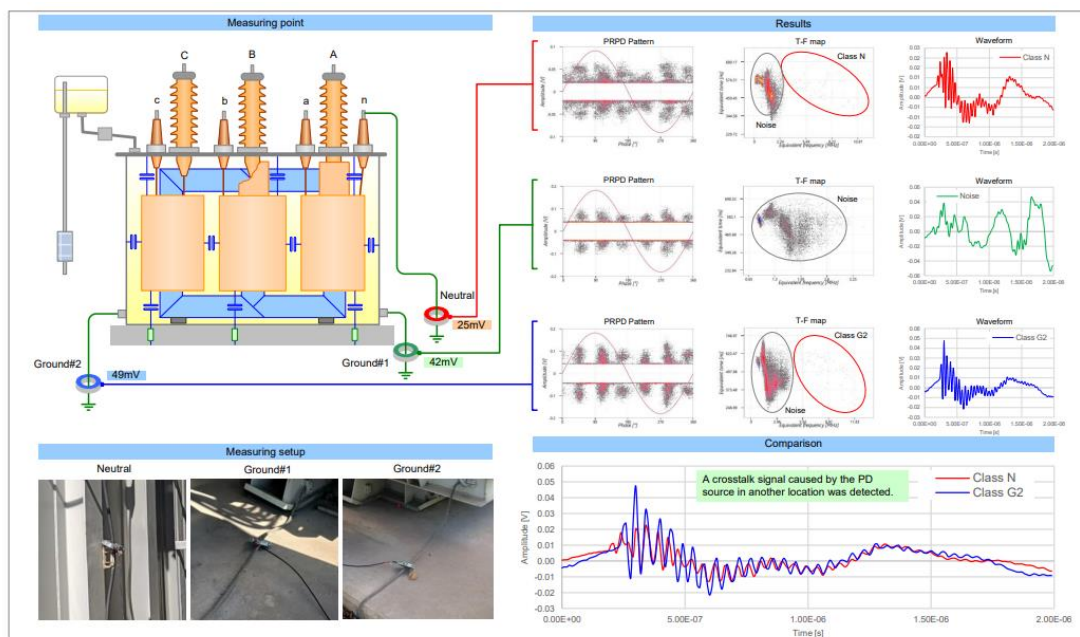
4.3 การวัด PD ในหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

หัวข้อนี้จะแสดงการวัด PD แบบขณะหม้อแปลงมีการทำงานจ่ายไฟ ซึ่งเป็นหม้อแปลงขนาด 50 MVA , 115/11 kV มีการฉนวนด้วยกระดาษและน้ำมัน ดังรูปที่ 4.14 ซึ่งทำการวัดด้วย HFCT TEV และ AE เพื่อตรวจหาสัญญาณ PD



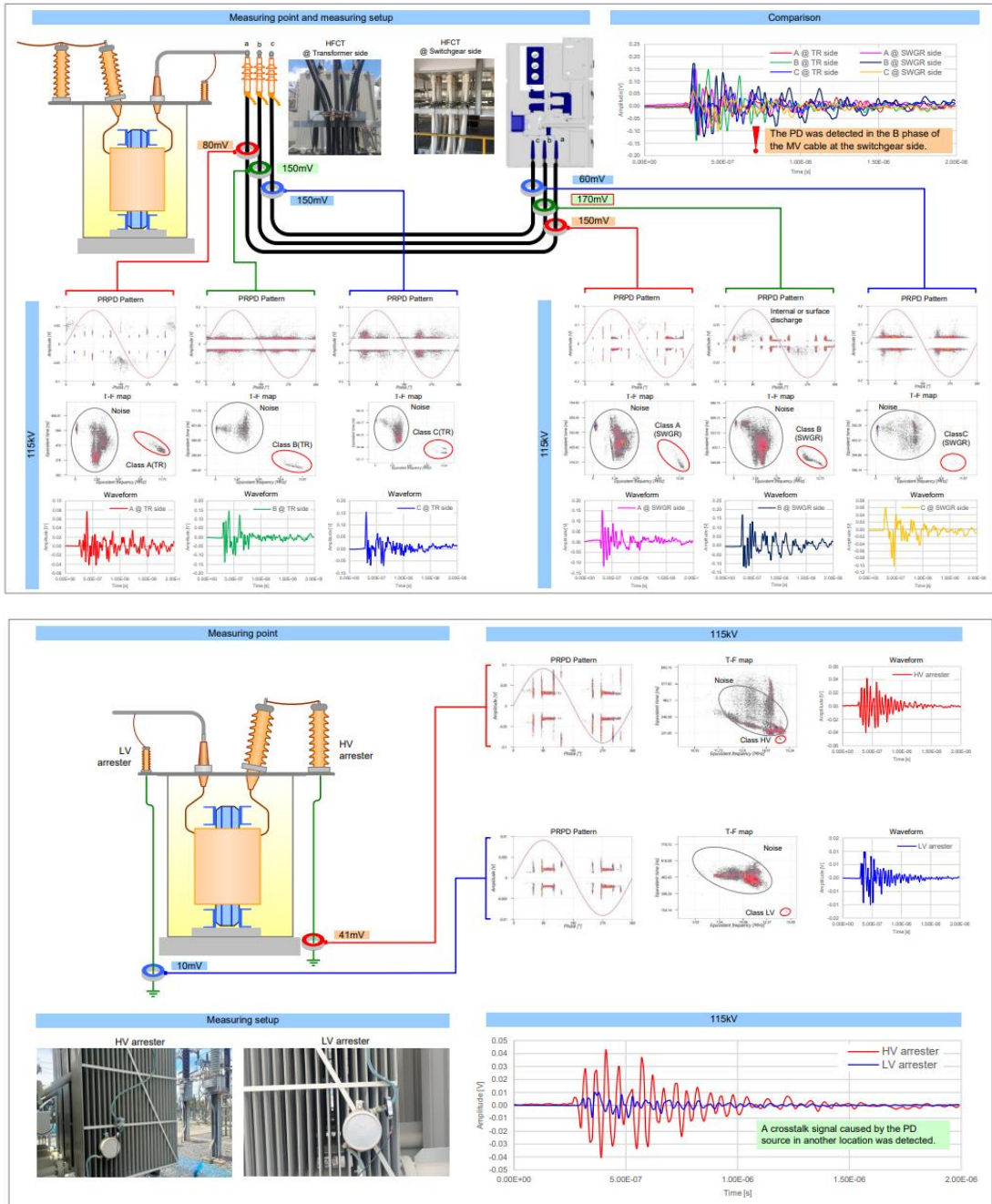
รูปที่ 4.14 หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังขนาด 50 MVA

ใช้ HFCT วัดสัญญาณที่กราวด์ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง 2 จุด มีขนาด 42 mV และ 49 mV ดังรูปที่ 4.15 มีสัญญาณคล้าย PD คือ Class N และ Class G2 ซึ่งสามารถยืนยันได้ทางรูปร่างพัลส์สัญญาณ และที่นิวทรอลขนาด 25 mV ไม่พบสัญญาณน่าสงสัยอะไร



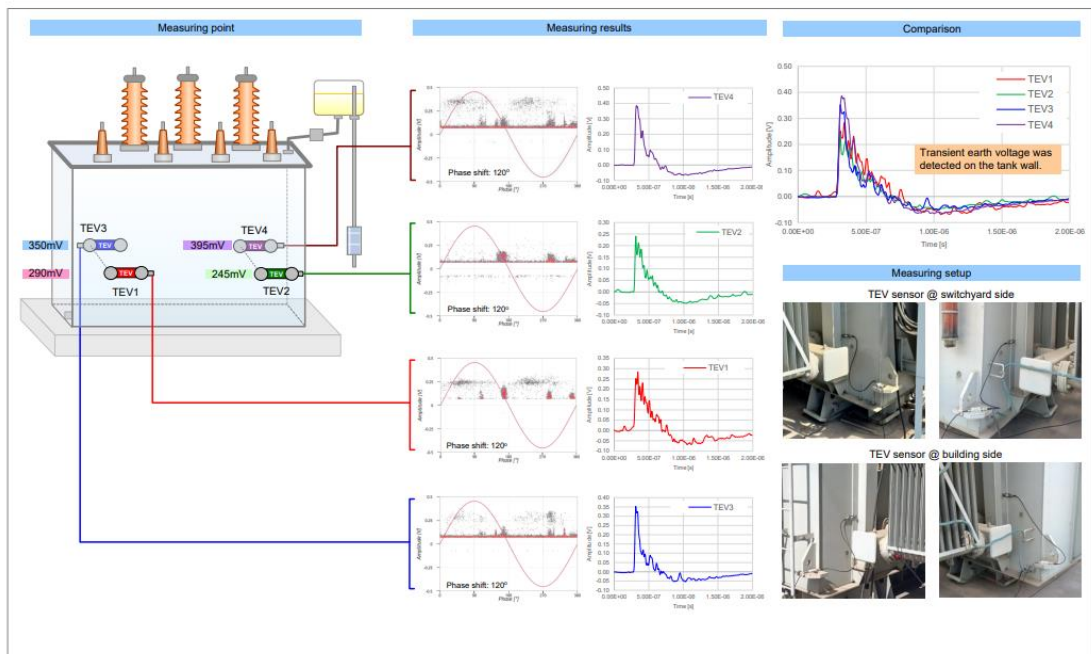
รูปที่ 4.15 HFCT คล้องที่กราวด์ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

ใช้ HFCT วัดสัญญาณที่เคเบิลฝั่งแรงต่ำของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง 3 เฟส ที่บริเวณต้นสายเคเบิลคือทางฝั่งหม้อแปลง และปลายสายคือทางฝั่งสวิตช์เกียร์ พบสัญญาณเป็นลักษณะรูปแบบ PD แสดงดังรูปที่ 4.16 (บน) และได้พล็อตเทียบรูปร่างสัญญาณทางด้านซ้ายบนของรูป เพื่อเปรียบเทียบขนาดของสัญญาณ รูปที่ 4.16 (ล่าง) วัดสัญญาณของกราวด์กับดักฟ้าผ่าพบลักษณะพัลส์ตามที่ได้ทดลองในห้องปฏิบัติการ คือ มีการสั้นอย่างมาก และ PRPD มีลักษณะเป็นสองขั้ว ตามงานวิจัยที่ได้ตีพิมพ์ รวมถึงได้พล็อตเทียบเทียบรูปร่างสัญญาณที่ได้จากกราวด์กับดักฟ้าผ่าทางแรงต่ำและแรงสูง



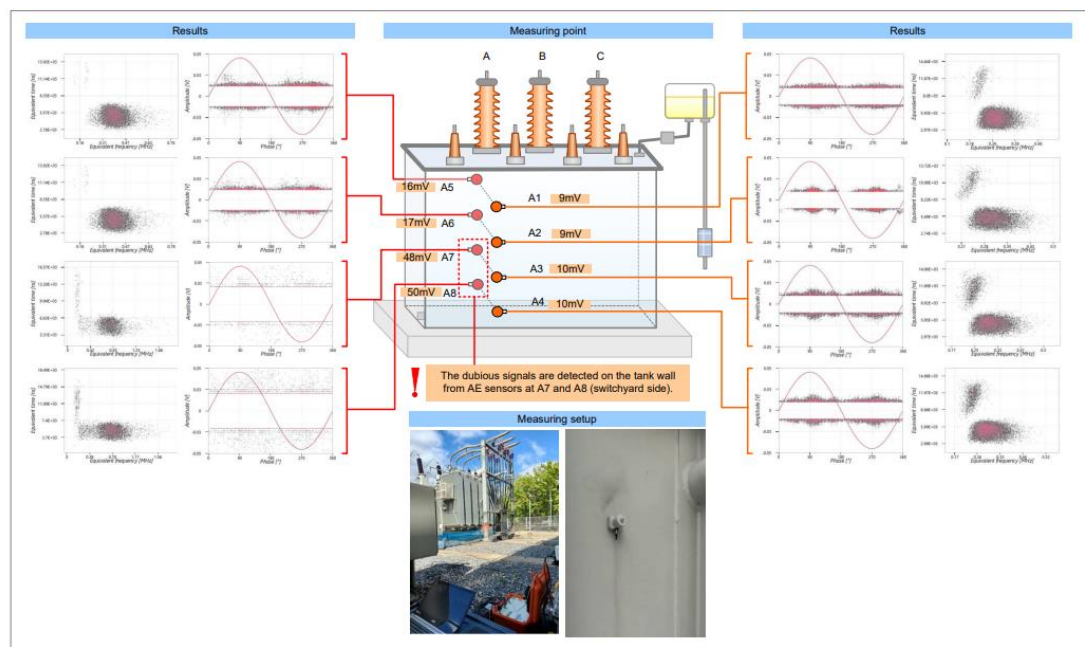
รูปที่ 4.16 HFCT คล้องที่กราวด์ของกับดักฟ้าผ่า และ สายเคเบิลฝั่งแรงต่ำ

ใช้ TEV วัดสัญญาณแรงดันที่ตัวถังหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังพบสัญญาณรูปแบบ PD แสดงดังรูปที่ 4.17 และได้พล็อตเปรียบเทียบทางมุมขวบน



รูปที่ 4.17 TEV แพะที่ตัวถังของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

ใช้ AE วัดสัญญาณเสียงตามแนวขดลวดเฟส A พบสัญญาณน่าสงสัยในจุดที่ 7 และ 8 ดังรูปที่ 4.18 ซึ่งอยู่ทางด้านแรงสูง



รูปที่ 4.18 AE แพะที่ตัวถังหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

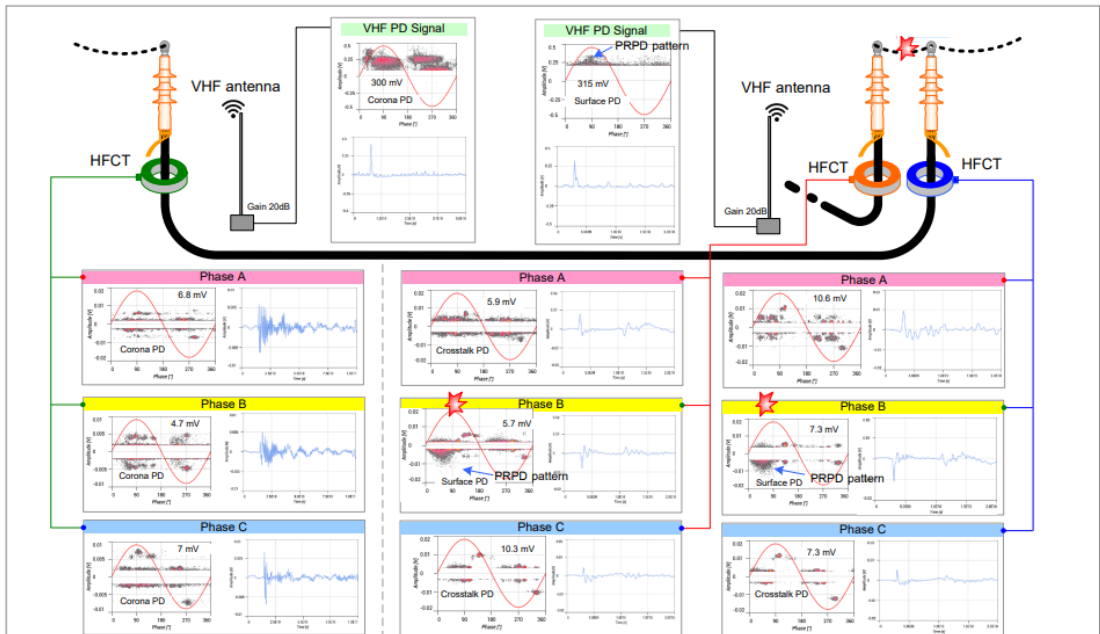
4.4 การวัด PD ในสายเคเบิลแรงดันปานกลางแบบฝังดิน

หัวข้อนี้จะแสดงการวัด PD ขณะสายเคเบิลมีการทำงานจ่ายไฟ จนดับไฟเพื่อตามสัญญาณ PD ต่อและแก้ไขแหล่งกำเนิดสัญญาณ PD โดยใช้ HFCT และ สายอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 4.19



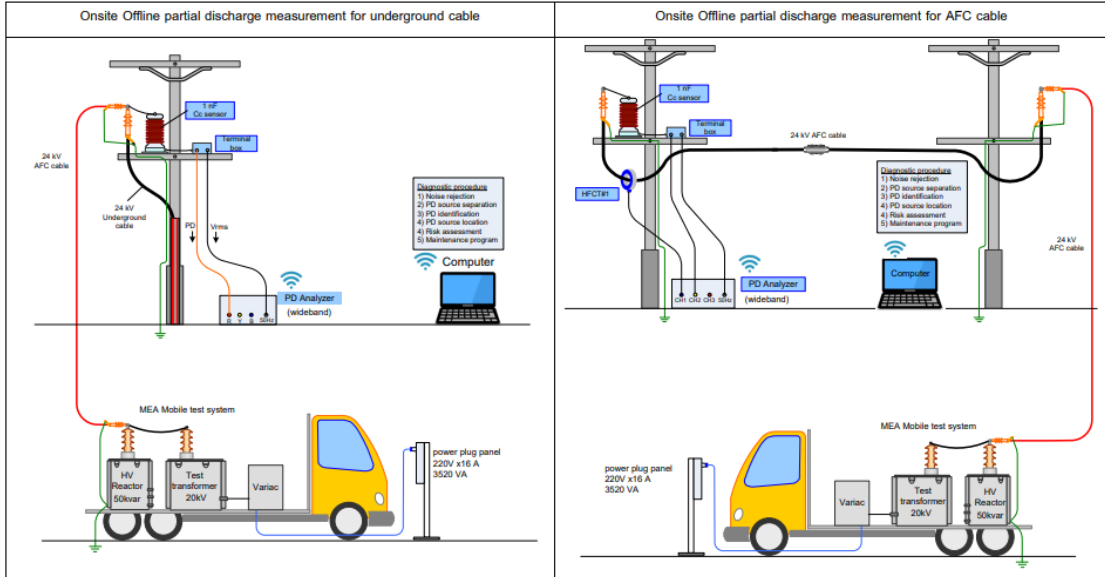
รูปที่ 4.19 การวัด PD ในสายเคเบิลแรงดันปานกลางแบบฝังดิน

สายเคเบิลดังกล่าวต้นสายจะอยู่บนเสาเดียวกับอีกรูทหนึ่ง ส่วนปลายสายจะไม่มี แสดงดังรูปที่ 4.20 โดยสายอีกรูทหนึ่งจะเกิด cross-talk ซึ่งมีสัญญาณขนาดเล็กกว่า และ ตรวจพบรูปแบบ PD ทางฝั่งต้นสายมีขนาดใหญ่กว่าปลายสาย จึงคาดว่าเกิดการดิสชาร์จฝั่งต้นสาย จึงยืนยันด้วยสายอากาศ พบสัญญาณรูปแบบ PD ขนาด 315 mV ทางฝั่งต้นสาย และ 300 mV ทางฝั่งปลายสาย



รูปที่ 4.20 ผลการวัด PD ในสายเคเบิลแรงดันปานกลางแบบฝังดิน

เมื่อตรวจพบ PD ดังกล่าวจึงทำการยืนยันด้วยการวัดแบบปลดการจ่ายไฟของสายเคเบิลนี้ และจ่ายไฟด้วยแหล่งจ่ายไฟภายนอก แสดงดังรูปที่ 4.21 ฟังซ้ายเป็นสายเคเบิลแบบฝังดิน ฟังขวาเป็นสายแบบ AFC ที่ลอยอยู่บนเสา



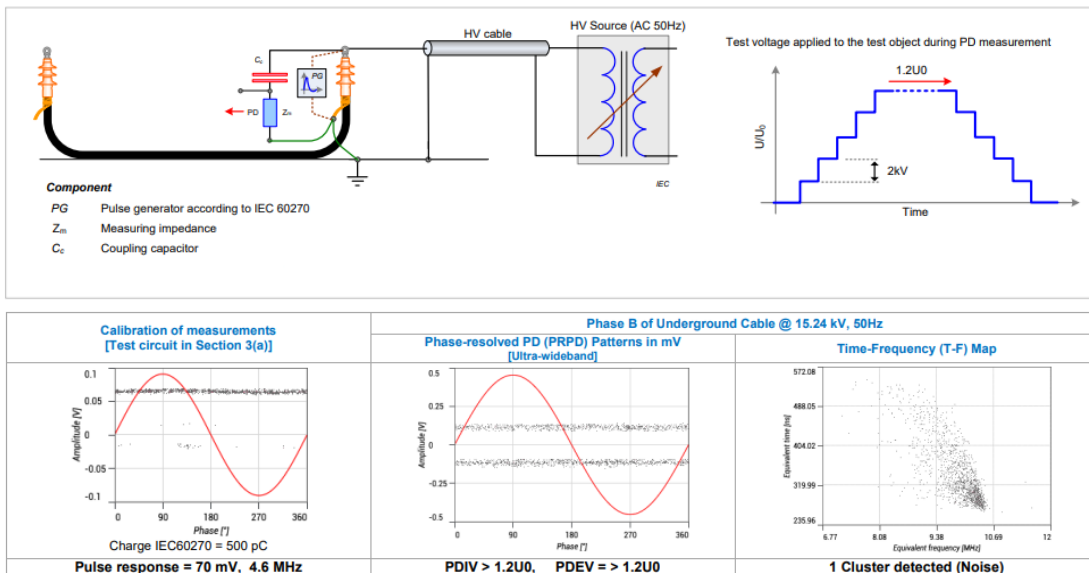
รูปที่ 4.21 ภาพการเตรียมการวัด PD แบบไม่จ่ายไฟโดยปลดสายเคเบิล

ทำการต่อวงจรดังรูปที่ 4.21 และวัดด้วย Cc โดยทำการสอบเทียบลักษณะเดียวกับที่ทำในหัวข้อ 4.2 การวัด PD ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบหยุดทำงานจ่ายไฟ และจ่ายไฟด้วยหม้อแปลงเฟสเดียว 30/19 kV แสดงดังรูปที่ 4.22



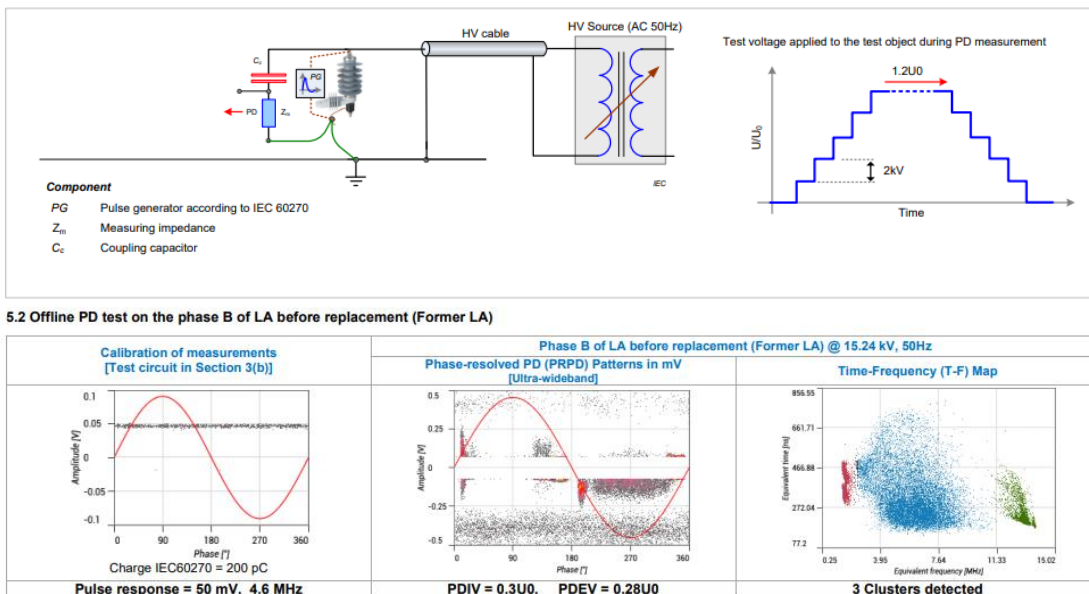
รูปที่ 4.22 การเตรียมการวัด PD แบบไม่จ่ายไฟโดยปลดสายเคเบิล

เมื่อทำการทดสอบ PD ดังรูปที่ 4.23 ตรวจหาสัญญาณไม่พบในสายเคเบิล โดยยืนยันจากการยิงพัลส์แคลขนาด 500 pC จากนั้นขึ้นแรงดันที่ 1.2U₀ ฉะนั้นสายเคเบิลนั้นปลอดภัย จึงคาดว่าน่าจะเกิดมาจากกั๊บดักฟ้าผ่านที่ต่อที่หัวสายเคเบิล



รูปที่ 4.23 การทดสอบ PD ในสายเคเบิล

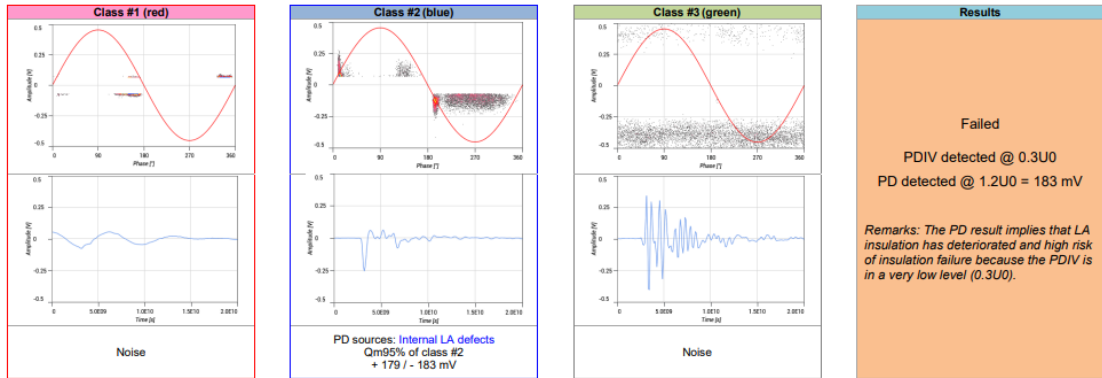
ทำการทดสอบ PD กับดักเสิร์จ ดังรูปที่ 4.24 ขึ้นแรงดันเท่ากับสายเคเบิล พบรูปแบบ PD ทางด้านลบ จึงทำการแยกวิเคราะห์ T-F map 3 กลุ่ม ดังรูปที่ 4.24



รูปที่ 4.24 การทดสอบ PD ในกั๊บดักเสิร์จ

รูปที่ 4.25 แสดงการวิเคราะห์ T-F map 3 กลุ่มดังกล่าว โดยกลุ่มแรก เป็นลักษณะของสัญญาณรบกวนที่มีความถี่ 50 Hz กลุ่มที่สองเป็นรูปแบบสัญญาณ PD ในกับดักเสิร์จ และกลุ่มที่สามเป็นสัญญาณรบกวนความถี่สูง ซึ่ง PDIV เริ่มเกิดตั้งแต่ 0.3U0

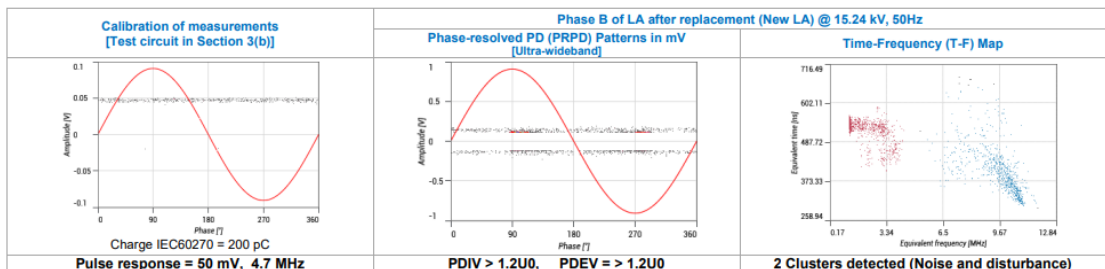
The entire acquisition of the PRPD pattern @ 15.24 kV, 50Hz was separated into sub-PRPD patterns, as shown below:



รูปที่ 4.25 การวิเคราะห์รูปแบบสัญญาณ PD ของกับดักเสิร์จ

จึงทำการแก้ไขด้วยการเปลี่ยนกับดักเสิร์จใหม่ทำการทดสอบ PD ที่แรงดัน 1.2U0 พบว่าสัญญาณรูปแบบ PD ดังกล่าวหายไป จึงถือว่าปลอดภัยต่อระบบจ่ายไฟนี้

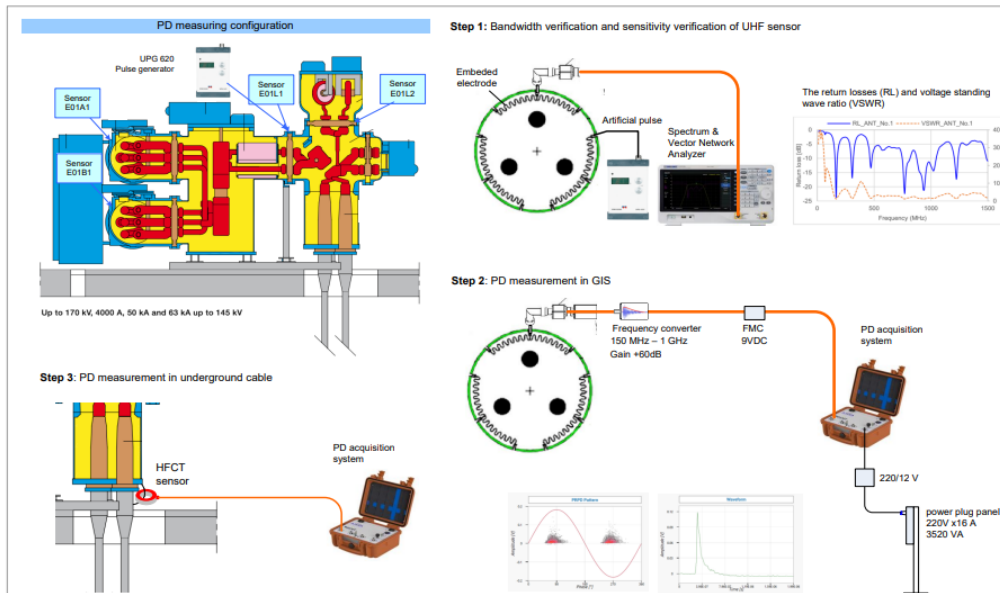
5.3 Offline PD test on the phase B of LA after replacement (New LA)



รูปที่ 4.26 ผลการทดสอบ PD เมื่อเปลี่ยนกับดักเสิร์จ

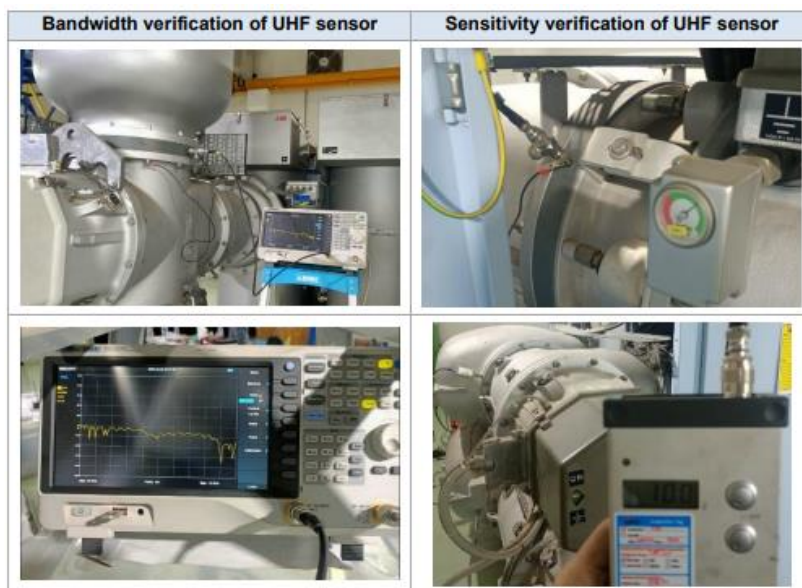
4.5 การวัด PD ใน GIS

หัวข้อนี้จะแสดงการวัด PD ขณะ GIS 115 kV มีการจ่ายไฟ โดย GIS มีโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 4.27 ซึ่งขั้นแรกจะทำการตรวจสอบช่วงสัญญาณที่เซนเซอร์ภายใน GIS นั้นรับได้ตรวจสอบเป็นการสะท้อนของคลื่น VSWR และ S11 ขั้นต่อมาทำการวัดสัญญาณ PD จากเซนเซอร์ภายใน GIS ดังกล่าว และขั้นสุดท้าย ทำการวัดสัญญาณ PD ทางกราวด์ของ GIS



รูปที่ 4.27 การวัด PD ใน GIS

รูปที่ 4.28-1 (ซ้าย) แสดงการตรวจสอบช่วงสัญญาณที่เซนเซอร์ภายใน GIS ด้วยเครื่องวิเคราะห์เครือข่าย (network analyser) รูปที่ 4.28-1 (ขวา) ตรวจสอบความสามารถในการวัดของเซนเซอร์ภายใน GIS นี้ด้วยเครื่องสอบเทียบ Omicron UPG 620



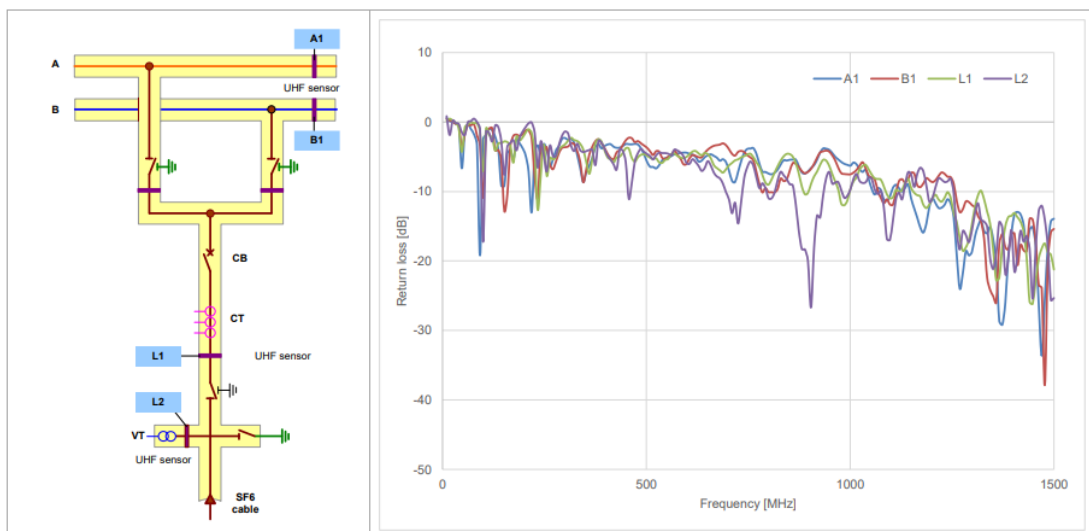
รูปที่ 4.28-1 ภาพการดำเนินการวัด PD ใน GIS

รูปที่ 4.28-2 (ซ้าย) แสดงการวัดสัญญาณ PD ใน GIS รูปที่ 4.28-2 (ขวา) แสดงการวัดสัญญาณในกราวด์เคเบิล SF6 ที่เข้า GIS



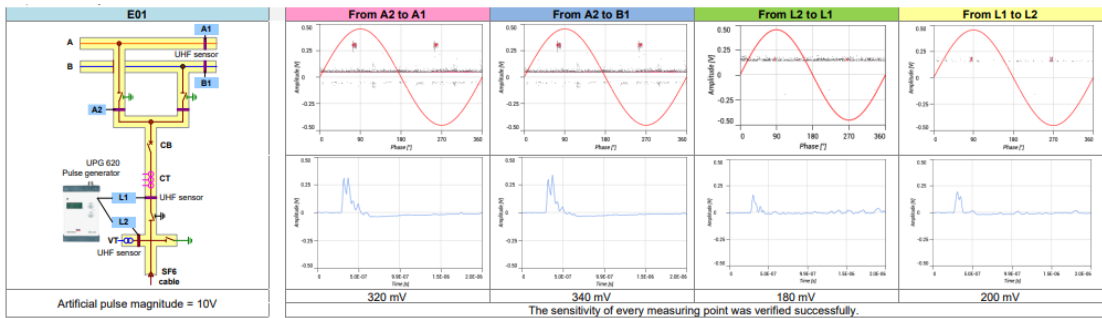
รูปที่ 4.28-2 ภาพการดำเนินการวัด PD ใน GIS

รูปที่ 4.29 แสดงช่วงการวัดของเซ็นเซอร์ UHF ที่ตำแหน่งต่างๆ (A1 – L2) โดยใช้การวิเคราะห์การสูญเสียจากการสะท้อน (return loss) ซึ่งช่วงการวัดของแสดงดัง รูปที่ 4.29 (ขวา) ย่านวัดที่มีการลดทอนต่ำ (วัดสัญญาณได้มากกว่า 90%) เป็นบริเวณที่มีค่า S11 (return loss) น้อยกว่า -10 dB สังเกตได้ว่าเซ็นเซอร์ UHF นี้สามารถวัดสัญญาณได้ดีในช่วง 1 GHz ขึ้นไป



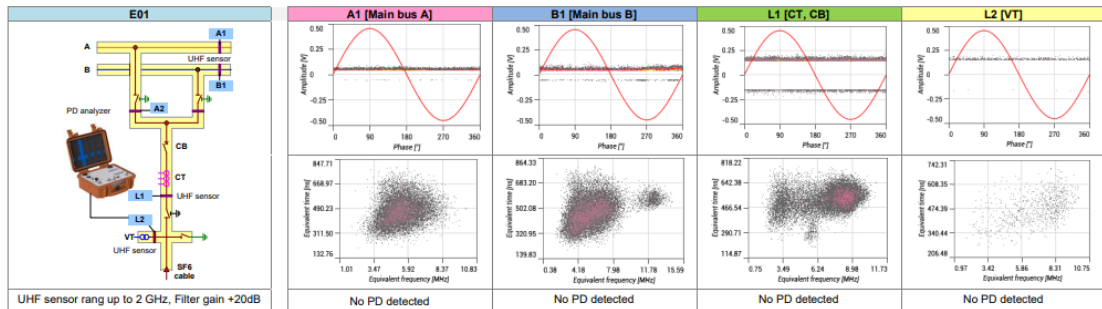
รูปที่ 4.29 การตรวจสอบช่วงการวัดของเซ็นเซอร์ UHF ใน GIS

จากนั้นทำการวัดสัญญาณ PD โดยสอบเทียบระบบวัดจากการจำลองสัญญาณด้วย Omicron UPG 620 ขนาด 10 V และตรวจวัดสัญญาณ PD จำลองนี้ที่เซนเซอร์ต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.30



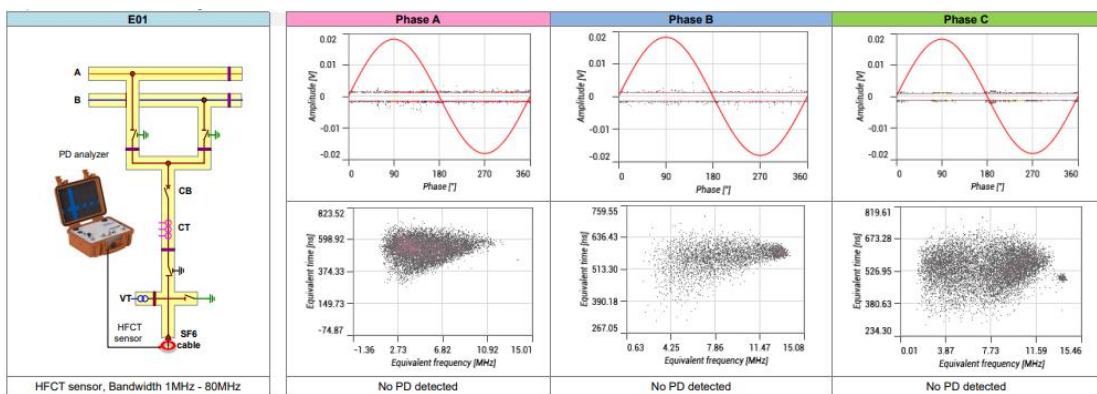
รูปที่ 4.30 ตรวจสอบสัญญาณของเซนเซอร์ UHF

ทำการวัดสัญญาณ PD ในเซนเซอร์ UHF จุดต่างๆ ไม่พบสัญญาณ PD ใน A1 (Main bus A) B1 (Main bus B) L1 (CT) และ L2 (VT) แสดงดังรูปที่ 4.31



รูปที่ 4.31 ผลการวัด PD ของเซนเซอร์ UHF ใน GIS

จากนั้นตรวจหาสัญญาณในกราวด์ของสายเคเบิลฉนวนด้วยก๊าซ SF6 ที่เข้า GIS ไม่พบสัญญาณ PD ทั้ง 3 เฟส แสดงดังรูปที่ 4.32



รูปที่ 4.32 ผลการวัด PD กราวด์ของสายเคเบิลที่เข้า GIS

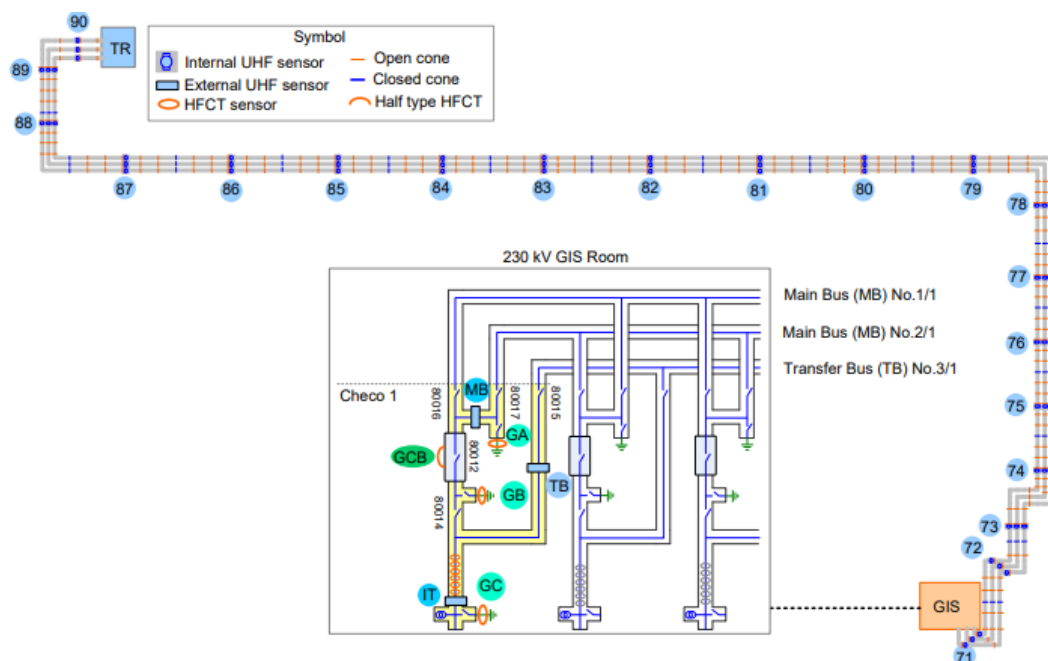
4.6 การวัด PD ใน GIL

หัวข้อนี้จะแสดงการวัด PD ขณะ GIL 230 kV มีการทำงานจ่ายไฟ ภาพการดำเนินการวัด PD แสดงดังรูปที่ 4.34 โดยใช้เซนเซอร์ที่ติดตั้งภายในท่อ GIL และ ใช้ UHF ภายนอกวัดตามจุดต่างๆ



รูปที่ 4.34 การวัด PD ใน GIL

แผนภาพของระบบ GIL ที่ทำการวัด PD แสดงดังรูปที่ 4.35 โดยมีจุดวัดตั้งแต่ 71 ที่ออกมาจาก GIS ถึงจุดวัด 90 ที่เข้าหม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูง

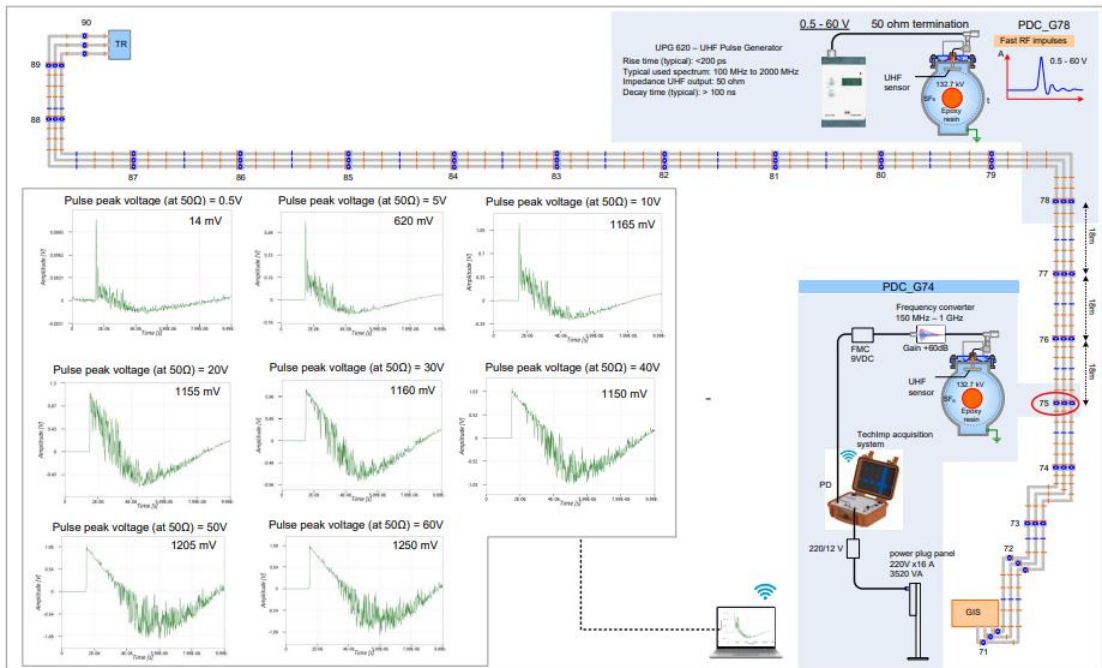


รูปที่ 4.35 แผนภาพของระบบ GIL ที่ทำการวัด PD

ทำการตรวจสอบความสามารถในการรับสัญญาณของเซนเซอร์ที่ติดตั้งภายในท่อ GIL โดยการป้อนสัญญาณสอบเทียบที่จุดวัด 78 และวัดสัญญาณสอบเทียบนี้ ที่จุดวัด 77 - 75 ซึ่งแต่ละจุดวัด

ห่างกันราว 16 เมตร แสดงดังรูปที่ 4.36 กราฟด้านซ้ายแสดงสัญญาณสอบเทียบที่ป้อนมาที่ วัดจาก จุดวัด 75 โดยปรับความแรงสัญญาณตั้งแต่ 0.5 V ถึง 60 V

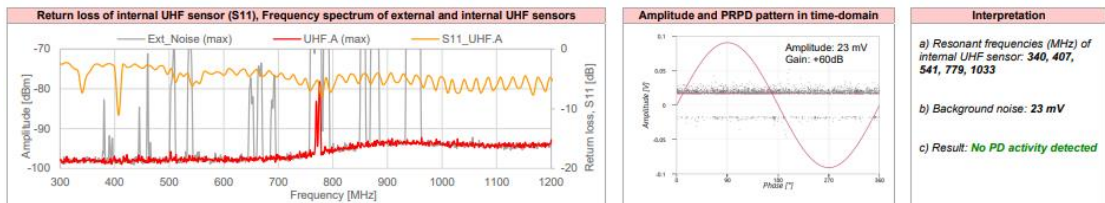
5.2 Sensor sensitivity check in time domain



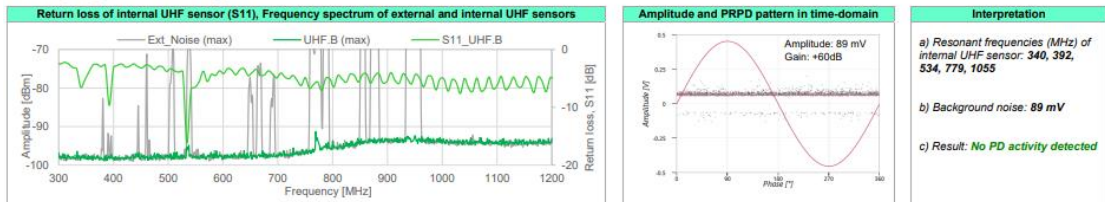
รูปที่ 4.36 ความสามารถในการรับสัญญาณของเซนเซอร์ที่ติดตั้งภายในท่อ GIL

เมื่อตรวจสอบความสามารถในการรับสัญญาณของเซนเซอร์ที่ติดตั้งภายในท่อ GIL แล้วจึงทำการวัดสัญญาณ PD ในแต่ละเซนเซอร์ที่จุดวัดต่างๆ รูปที่ 4.37 แสดงผลการวัด PD ของจุดวัดที่ 71

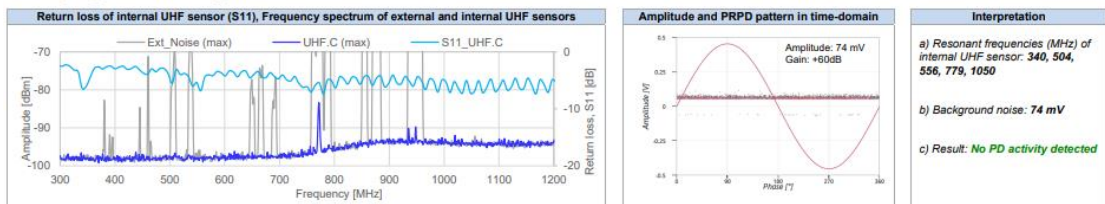
6.1 PDC_G71_PHA - Measuring point



6.2 PDC_G71_PHB - Measuring point



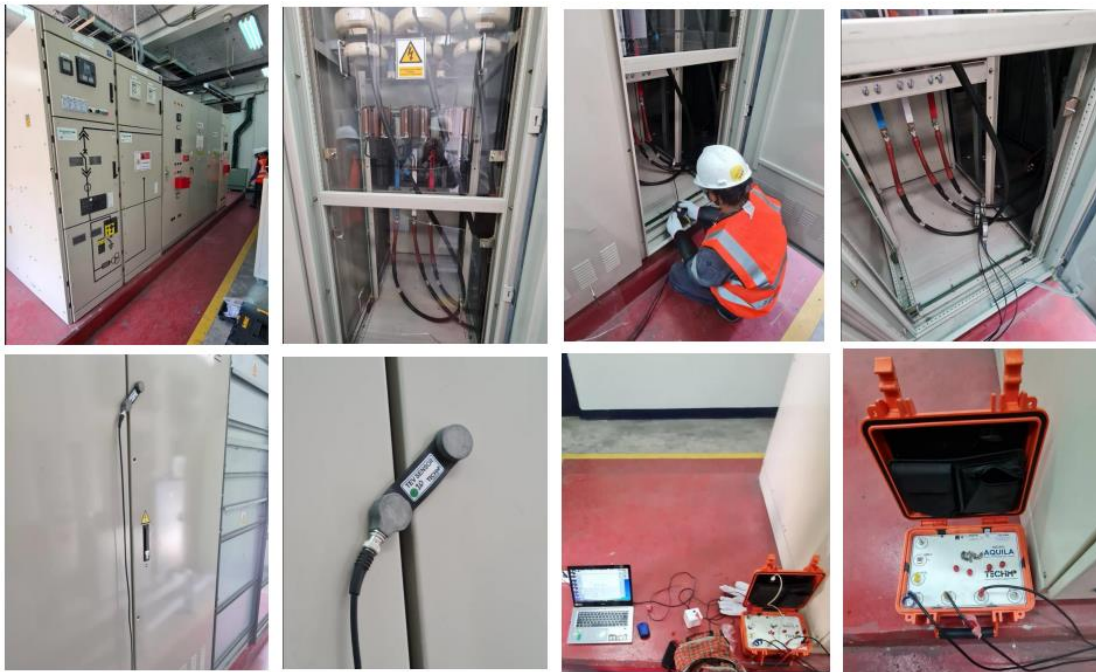
6.3 PDC_G71_PHC - measuring point



รูปที่ 4.37 ผลการวัด PD ของจุดวัดที่ 71

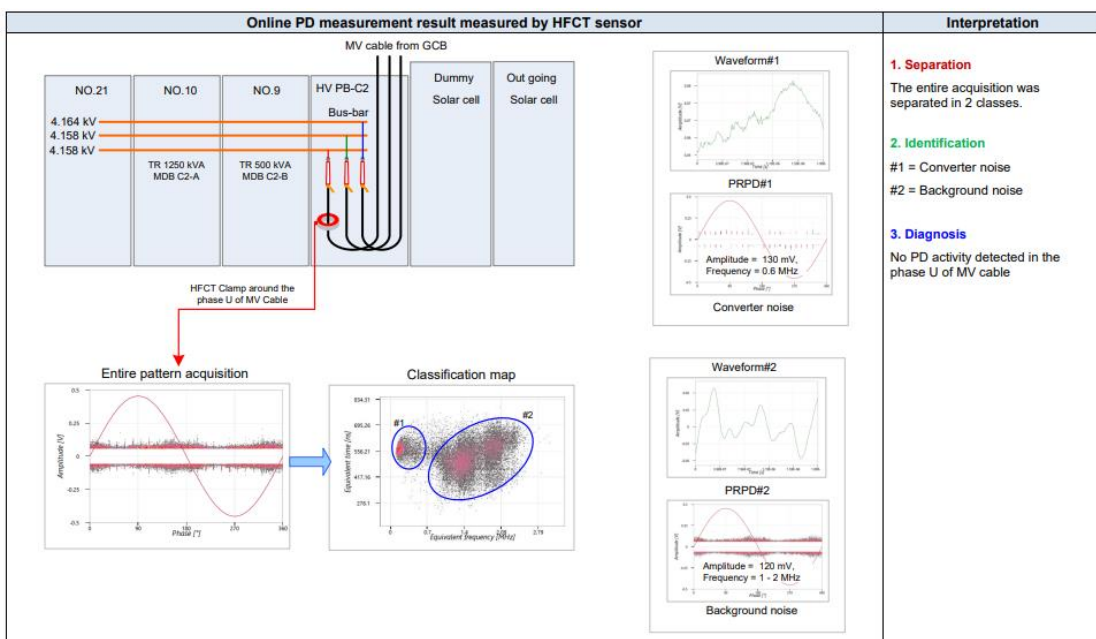
4.7 การวัด PD ในตู้สวิตช์เกียร์

หัวข้อนี้จะแสดงการวัด PD ขณะตู้สวิตช์เกียร์ 6.6 kV ทำงานจ่ายไฟอยู่ โดยใช้ HFCT และ TEV ในการตรวจหาสัญญาณ PD แสดงดังรูปที่ 4.38



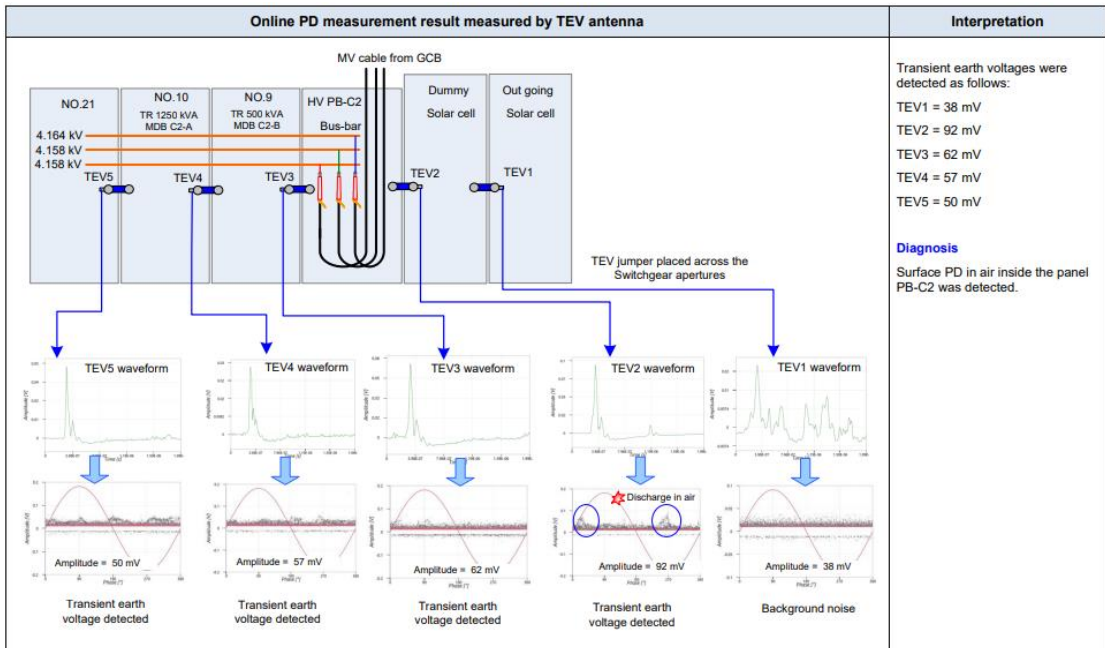
รูปที่ 4.38 การวัด PD ในตู้สวิตช์เกียร์

รูปที่ 4.39 แสดงการวัด PD ด้วย HFCT ในเฟส U ของเคเบิลที่เข้าตู้สวิตช์เกียร์นี้ ซึ่งตรวจไม่พบสัญญาณรูปแบบ PD พบแต่สัญญาณรบกวนที่มีการซิงค์เฟส



รูปที่ 4.39 การวัด PD ด้วย HFCT สายเคเบิลเข้าตู้สวิตช์เกียร์

จากนั้นการวัดด้วย TEV ตามจุดต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.40 พบสัญญาณรูปแบบ PD บริเวณ TEV 2-5 ซึ่งรูปแบบ PD จะชี้วัดที่ TEV2 และไม่พบสัญญาณรูปแบบ PD ใน TEV1



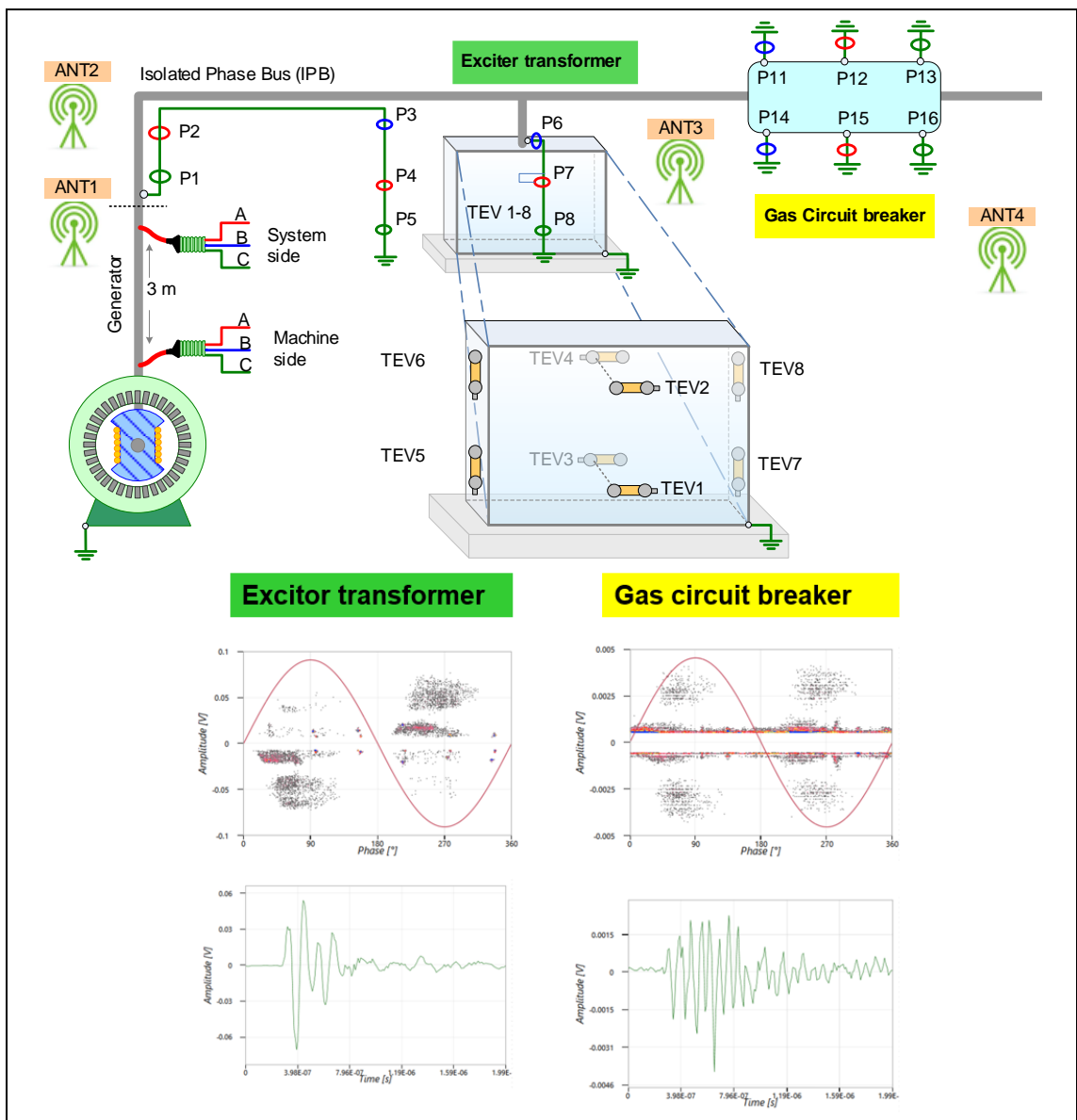
รูปที่ 4.40 การวัด PD ด้วย TEV ในตู้สวิตช์เกียร์

บทที่ 5

สรุปผลการทดสอบ

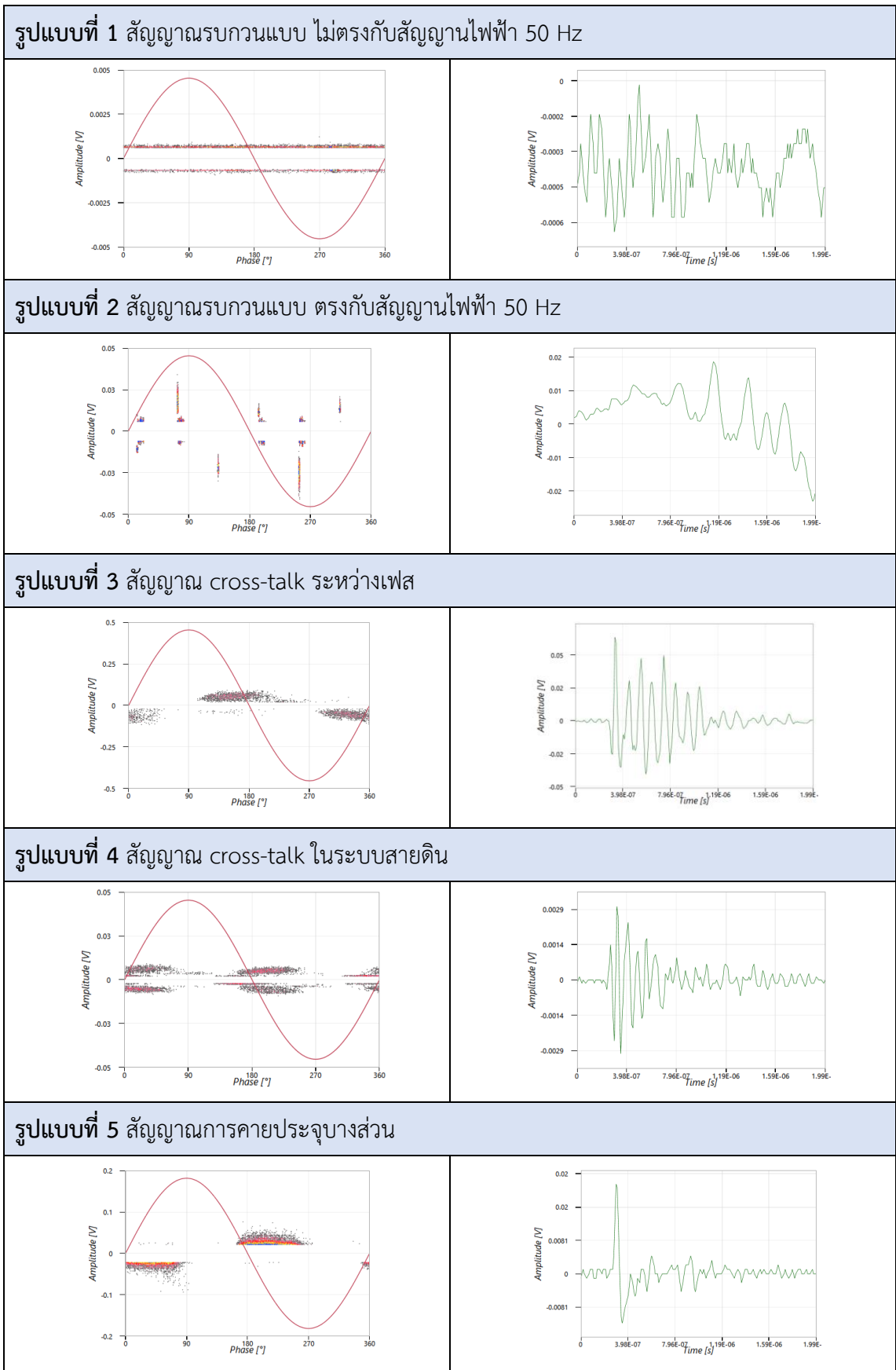
5.1 สรุปผลการทดสอบ

การศึกษาในห้องปฏิบัติการ พบว่าสัญญาณ PD สามารถเดินทางในระบบกราวด์ สัญญาณ cross-talk ให้รูปแบบจำแนกเฟส PRPD ที่เกิดแบบสองขั้ว (Bipolar) และรูปคลื่นพัลส์แสดงรูปปร่างการสั่นอย่างมาก สำหรับการวัด PD ในหน่วยงานของระบบผลิตไฟฟ้าขณะมีการทำงานจ่ายไฟ พบว่ามี การตรวจพบ PD แบบ cross-talk ที่สายกราวด์ของอุปกรณ์ GCB ดังรูปที่ 5.1 ความรู้เกี่ยวกับปรากฏการณ์ cross-talk ในระบบกราวด์สามารถช่วยในการตรวจสอบ PD และหาตำแหน่งสำหรับการวัด PD ขณะมีการทำงาน ซึ่งสามารถจำแนกรูปแบบสัญญาณ ได้ 5 รูปแบบ แสดงในตารางที่ 5.1



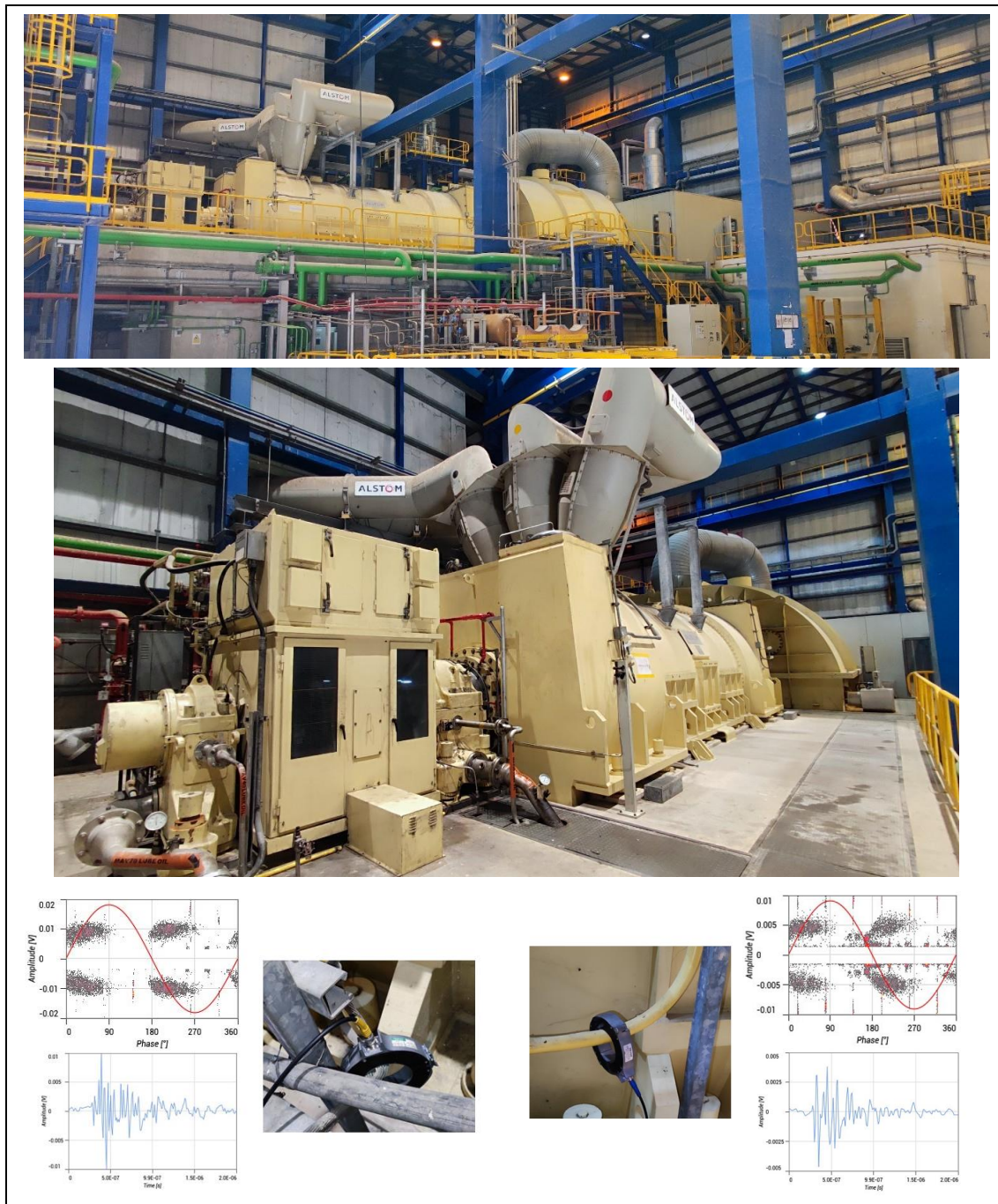
รูปที่ 5.1 สัญญาณ cross-talk PD ที่ตรวจพบ ณ GCB

ตารางที่ 5.1 รูปแบบจำแนกเฟส PRPD และรูปคลื่นพัลส์แสดงรูปร่างของสัญญาณที่ตรวจพบ



5.2 การใช้ประโยชน์ในงาน

เมื่อทราบปรากฏการณ์ cross-talk ของสัญญาณ PD แล้ว เมื่อตรวจหา PD ในระบบไฟฟ้า จะมีผลการวัดโดย HFCT จากสายกรวดมาช่วยในการวิเคราะห์ผลแสดงดังรูปที่ 5.2 ว่า PD มาจากตัวเองหรือมาจากที่อื่น หากเป็น PD ของตัวเองแล้วต้องดำเนินการติดตาม เฝ้าระวัง แก้ไข ฯ ต่อไป



รูปที่ 5.2 ตัวอย่างสัญญาณ cross-talk ในระบบไฟฟ้า

5.3 งานวิจัยในอนาคต

สำหรับงานวิจัยต่อไปในอนาคต ควรจะมีการศึกษาเทคนิค วิธีการอื่นๆ ในการตรวจหา PD เพื่อประเมินสภาพนวนซึ่งส่งผลต่อความปลอดภัยและเสถียรภาพการทำงานของอุปกรณ์ต่างๆ ที่ทำงานอยู่ในระบบไฟฟ้า หากระบบไฟฟ้ามีคุณภาพ ไม่มีปัญหาแล้วจะส่งเสริมไปถึงการพัฒนาของสังคมและเศรษฐกิจตลอดจนคุณภาพชีวิตของผู้ใช้ไฟฟ้า



รูปที่ 5.3 การตรวจสอบหา PD ของอุปกรณ์ต่างๆในระบบไฟฟ้า

เอกสารอ้างอิง

- [1] เขียรแสงเพ็ญ ช่อผูก, พลิชฐ์ วงศ์ปิติรุ่งเรือง, พัทธดนย์ สมัดไชย, พุฒิพงศ์ จิตต์มณีรัตน์, นรเศรษฐ์ พัฒนเดช, “การวินิจฉัยฉนวนของเครื่องจักรกลหมุนด้วยวิธีวัดกระแสโพลาริซ์เซชันและดีโพลาริซ์เซชัน,” **ปริญญานิพนธ์**, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, คณะวิศวกรรมศาสตร์, 2560.
- [2] วณิชชา ศรีภูวง, อธิธินพ พันธุ์เอี่ยม, ศุภกฤต คำแปง, พีรวุฒิ ยุทธโกวิท, “การประยุกต์ใช้คอนเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสสำหรับการทดสอบการตรวจจัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในหม้อแปลง,” **ปริญญานิพนธ์**, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, คณะวิศวกรรมศาสตร์, 2559.
- [3] วิลาลินี วัฒนไพบูลย์, นรเศรษฐ์ พัฒนเดช, “การวินิจฉัยปัญหาของหม้อแปลงโดยพิจารณาจากพฤติกรรมการเกิดของก๊าซในน้ำมันหม้อแปลง,” **วิทยานิพนธ์**, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, 2560.
- [4] ผู้จัดการออนไลน์, “GULF รุกธุรกิจไฟฟ้าในสหรัฐฯ ท่วม 1.5 หมื่นล้าน ฮับหุ้น 49% โรงไฟฟ้าก๊าซ,” **สื่อออนไลน์**, <https://mgronline.com/business/detail/9650000086609>.
- [5] กองมาตรฐานระบบไฟฟ้า ฝ่ายมาตรฐานและความปลอดภัย, “ระบบเคเบิลใต้ดิน Underground Cable System,” หนังสือ, การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, 2548.
- [6] ไตรทศ งานพิทักษ์, ภพ จันทรเจริญสุข, นรเศรษฐ์ พัฒนเดช, “การวัดและวิเคราะห์การเกิดดิสชาร์จบางส่วนในสายส่งฉนวนก๊าซ,” **วิทยานิพนธ์**, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, 2563.
- [7] เพทชาย นิมนสนอง, นรเศรษฐ์ พัฒนเดช, “การประเมินสภาพฉนวนของเครื่องจักรกลหมุนด้วยการวิเคราะห์ผลตอบสนองไดอิเล็กทริก,” **วิทยานิพนธ์**, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, 2564.
- [8] ปฐวีกานต์ จันทรสุกศรี, ภูริวัชร โชติประดิษฐ์, ยศวีร์ รัตนคช, พีรวุฒิ ยุทธโกวิท, “ระบบตรวจจัดการดิสชาร์จบางส่วนตามมาตรฐาน IEC 60270,” **ปริญญานิพนธ์**, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, คณะวิศวกรรมศาสตร์, 2560.
- [9] กฤษณพล ไชยพันธ์, จารุกิตติ์ บุรณประพุกษ์, ชลบุรี ปากเพียร, ณัฐชนน ภู สงขลา, พีรวุฒิ ยุทธโกวิท, “เทคนิคการระบุตำแหน่งการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิล,” **ปริญญานิพนธ์**, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, คณะวิศวกรรมศาสตร์, 2561.
- [10] วิษณุ ต่อตระกูล, เชาวน์ ชมภูอินไหว, “การตรวจจับและระบุตำแหน่งของการดิสชาร์จบางส่วนโดยใช้เทคนิคทางเสียง,” **วิทยานิพนธ์**, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, 2559.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [11] ศักดา มณีโรจน์, นรเศรษฐ พัฒนเดช, “การศึกษาเปรียบเทียบการใช้งาน น้ำมันแร่ เฮลเทอร์ธรรมชาติ และน้ำมันปาล์ม ในหม้อแปลงไฟฟ้า 22 kV,” *วิทยานิพนธ์*, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง,สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, 2564.
- [12] นิชยา โสอุบล, ชารไพลิน บรรเท็งใจ, นพพล ยอดระยับ, นรเศรษฐ พัฒนเดช, “การศึกษาดีสชาร์จบางส่วนในหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสแบบน้ำมันด้วยวิธีการแบบดั้งเดิมและแบบไม่ดั้งเดิม,” *ปริญญา นิพนธ์*, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, คณะวิศวกรรมศาสตร์, 2563.
- [13] Andreas Küchler, “**High Voltage Engineering Fundamentals – Technology – Applications**,” textbook, Springer-Verlag GmbH Germany, 2018.
- [14] E. Bennett, “An oscillograph study of corona”, *Trans AIEE*, Volume 22, June 1913, pp 1787-1828.
- [15] G.C. Stone, A. Cavallini, G. Behrmann, “A Review of the History of the Development of Partial Discharge Testing”, *Electrical Insulation Conference (EIC)*, 2022.
- [16] W. Del Mar, C.F. Hanson, “High voltage impregnated power cables”, *Trans AIEE*, June 1924, pp 947-957.
- [17] J.R. Meador, R. Kaufman, H. Brustle, “Transformer corona testing”, *IEEE Trans PAS*, Aug 1966, pp 893-900.
- [18] P. Narbut, “Transformer corona measurement using condenser bushing tap and resonant measuring circuits”, *IEEE Trans PAS*, Aug 1965, pp 652- 651.
- [19] R. Bartnikas, E.J. McMahon, “**Engineering dielectrics Volume 1: corona measurement and interpretation**”, ASTM Publication 669, 1979.
- [20] J. Johnson, M. Warren, “Detection of slot discharges in high voltage stator windings during operation”, *Trans AIEE*, Volume 70, 1951, pp 1998- 2000.
- [21] J.E. Timperley, “Incipient Fault Identification Through Neutral RF Monitoring of Large Rotating Machines”, *IEEE Trans PAS-102*, May 1983.
- [22] G. Mole, “Design and performance of a portable AC discharge detector,” *ERA Report* ,V/T 115, 1952.
- [23] F.H. Kreuger, “**Discharge detection in high voltage equipment**,” American Elsevier, 1965.
- [24] Morshuis, “*The scientific career of Frederik Hendrik Kreuger*,” *IEEE Trans DEI*, Oct. 1995, pp 711–716. American Elsevier, 1965.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [25] W. Hauschild, E. Lemke, “**High voltage test and measuring techniques,**” Springer, Second Edition, 2019.
- [26] E. Lemke, “Guide for partial discharge measurements in compliance to IEC 60270”, **Cigre Technical Brochure 366**, 2008.
- [27] R. Bartnikas and J.E. Levi, “*A simple pulse-height analyzer for partial discharge rate measurements,*” **IEEE Trans. IM**, Vol.IM-18, pp.341-345, Dec.1969.
- [28] J. Austin and R. E. James, “*On-Line Digital Computer System for Measurement of Partial Discharges in Insulation Structures,*” in **IEEE Trans. EI-11**, Dec 1976, pp. 129-139.
- [29] A. Kelen, “*The functional testing of HV generator stator insulation*”, **Cigre, Paper**, 15-03, 1976.
- [30] B. Fruth, J. Fuhr, “*Partial discharge pattern recognition – a tool for diagnosis and monitoring of aging*”, **Cigre Paper**, 15/33-12, Aug 1990.
- [31] B.H. Ward, “*Digital techniques for partial discharge measurements*”, **Committee Report**, Proc IEEE PES Summer Power Meeting, Paper 91 SM 355-8 PWRD, July 1991.
- [32] S.A. Boggs, G.C. Stone, “*Fundamental limitations in the measurement of corona and partial discharge*”, **IEEE Trans EI**, Apr 1982, pp 143-150.
- [33] M. Kurtz, G.C. Stone, D. Freeman, V. Mulhall, P. Lonseth, “*Diagnostic testing of generator insulation without service interruption*”, **Cigre Paper** 11-09, Aug 1980.
- [34] S.R. Campbell, G.C. Stone, H.G. Sedding, “*Application of pulse width analysis to partial discharge detection*”, **IEEE ISEI**, Baltimore, June 1992.
- [35] J.S. Pearson, B. Hampton, A.G. Sellers, “*A continuous UHF monitor for gas insulated substations*”, **IEEE Trans EI-26**, June 1991, pp 469-478.
- [36] T. Okamoto, T. Tanaka, “*Novel partial discharge measurement: computer-aided measurement systems*”, **IEEE Trans EI-20**, Dec 1986.
- [37] E. Gulski and F. H. Kreuger, “*Computer-aided Analysis of Discharge Patterns*”, **J. Phys. D: Appl.** 591-598., 1989. 1562-1568, 1990. Phys., Vol. 23, pp. 1569-1575., 1990.
- [38] M. Cacciari, A. Contin and G. C. Montanari, “*Use of a Mixed-Weibull Distribution for the Identification of PD Phenomena*”, **IEEE Trans. DEI-2**, Aug 1995, pp 614-628.
- [39] A. Cavallini, M. Conti, A. Contin, G.C. Montanari, F. Puletti, “*Advanced PD inference in on-field measurements. I. Noise rejection,*” **IEEE Trans. DEI**, vol. 10, no. 2, pp. 216-224, April 2003.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [40] R. Plath, “Multi-channel PD measurements”, 14th ISH, Beijing, China, Paper J-04, 2005.
- [41] นครเศรษฐ์ พัฒนเดช, “วัสดุวิศวกรรมไฟฟ้า (เล่มที่ 1) ฉนวนและวัสดุฉนวนไฟฟ้า Electrical Engineering Materials,” พิมพ์ครั้งที่3, ห้างหุ้นส่วนจำกัด มินเซอร์วิส ซัพพลาย, 2557.
- [42] สำรวย สังข์สะอาด, “วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง,” พิมพ์ครั้งที่3, สำนักพิมพ์จุฬาฯ, 2549.
- [43] พิรุณ ฤทธิ์โกวิท, “บทที่ 4 ความเครียดสนามไฟฟ้า,” สื่อการสอนระดับปริญญา, 2559.
- [44] เพทาย นิมสนอง, “การทดสอบดิสชาร์จบางส่วน Partial Discharge Testing” สื่อการบรรยาย, PEN Academy, 2566.
- [45] Kyoung-Jae Chung, “Electrical Breakdown in Gases” Slide for Nuclear Engineering, Seoul National University, 2018.
- [46] T M P Briels, J Kos, G J J Winands, E M van Veldhuizen and U Ebert, “Positive and negative streamers in ambient air: measuring diameter, velocity and dissipated energy,” J. Phys. D: Appl. Phys. 41 (2008) 234004 (11pp).
- [47] Shijun Xie, Rong Zeng, Jianming Li, and Chijie Zhuang, “Theoretical and experimental study of the formation conditions of stepped leaders in negative flashes” Physics of Plasmas, August 2015.
- [48] Takahito Ono, Dong Youn Sim and Masayoshi Esashi, “Micro-discharge and electric breakdown in a micro-gap,” J. Micromech. Microeng. 10 445, 2000.
- [49] Jianying Li, Shengtao Li and Mohammad A. Alim, “Breakdown Strength Improvement of Polyethylene Insulation used in Power System Cables,” Journal of Applied Sciences, 5: 1415-1417, 2005.
- [50] Omicron, “A Guide for Partial Discharge Measurements on medium voltage (MV) and high voltage (HV) apparatus Part 1 - Introduction,” Technical paper, 2020.
- [51] IRIS, “IRIS POWER EPOXY MICA CAPACITORS (80 pF),” Equipment detail, 2019.
- [52] TECHMP ALTANOVA GROUP, “high performance inductive PD sensors,” Equipment detail, 2020.
- [53] วิทวัส สิริฐกุล , ปาลีรัตน์ วงจำปา, “วิศวกรรมสายอากาศ ANTENNA ENGINEERING,” ซีเอ็ดยูเคชั่น, 2563.
- [54] งาม ชาติภักต์ และ ศิวกร อ่างทอง, “การศึกษารูปแบบสัญญาณอะคูสติคส์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการแตกหักของวัสดุ,” Walailak Procedia, ST.130, 2019.
- [55] QINGCHENG AE INSTITUTE, “LS 5VDC (type B),” Equipment detail, 2019.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [56] IEC TS 62478:2016, “*High voltage test techniques - Measurement of partial discharges by electromagnetic and acoustic methods,*” **Technical Specification**, 2016.
- [57] Raymond A. Serway and John W. Jewett, “**Physics for Scientists and Engineers : 10th Edition,**” United States of America, 2017.
- [58] Pooya Davari, “*High Frequency High Power Converters for Industrial Applications,*” **Thesis**, Queensland University of Technology.
- [59] พร้อมพงศ์ ม่วงศรีศักดิ์, สิทธิพงษ์ เพ็งประเดิม, “*ศึกษาระบบการป้องกันในหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง,*” **ปริญญานิพนธ์**, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยนเรศวร.
- [60] ธีรณัฏฐ์ พลแรงฤทธิ์, สรวุฒิ คูศิริวานิชกร, สัญญา ตั้งกาญจนยืนยง, สัญญา โพธิ์หอมศิริ, นรเศรษฐ์ พัฒนเดช, “*การศึกษาลักษณะเสื่อมสภาพของฉนวนในเคเบิลใต้ดินด้วยแรงดันทดสอบ DAC,*” **ปริญญานิพนธ์**, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, คณะวิศวกรรมศาสตร์, 2563.
- [61] ธีรณัฏฐ์ พลแรงฤทธิ์, สรวุฒิ คูศิริวานิชกร, สัญญา ตั้งกาญจนยืนยง, สัญญา โพธิ์หอมศิริ, นรเศรษฐ์ พัฒนเดช, “*การวัดรูปคลื่นกระแสรั่วไหลที่ไม่สมมาตรของกับดักเสิร์จอันเนื่องมาจากอิทธิพลของการได้รับกระแสอิมพัลส์แบบต่อเนื่อง,*” **วิทยานิพนธ์**, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, คณะวิศวกรรมศาสตร์, 2564.
- [62] CIGRE 662, “*Guidelines for partial discharge detection using conventional (IEC 60270) and unconventional methods,*” **Technical brochures**, 2016.

ภาคผนวก

บทความที่ 1

The Verification of HF Signal Transmission via
Grounding System for Online PD Measurement



2022 International Sustainable and Technology (ICST) | 978-1-6654-5019-8/22/\$31.00 © 2022 IEEE | DOI: 10.1109/ICST50546-2022-9630328



i⁸th iceast 2022

Chiang Mai, Thailand

8-10 JUNE 2022
<http://iceast2022.iceast.info/>

Conference Proceeding

The Verification of HF Signal Transmission via Grounding System for Online PD Measurement

Chissanupong Srinangyam
Electrical Engineering Dept.
School of Engineering

King Mongkut's Institute of Technology
Ladkrabang
Bangkok, Thailand
chissanupong.sny@gmail.com

Pittaya Pannil
Instrumentation and Control Engineering
Dept.

School of Engineering
King Mongkut's Institute of Technology
Ladkrabang
Bangkok, Thailand
pittaya.pa@kmitl.ac.th

Kittisak Thungsook
Electrical Engineering Dept.,
School of Engineering,

Rajamangala University of Technology
Rattanakosin
Bangkok, Thailand
Poochit.tue@rmutr.ac.th

Sathaporn Promwong
Telecommunication Engineering Dept.
School of Engineering
King Mongkut's Institute of Technology
Ladkrabang
Bangkok, Thailand
sathaporn.pr@kmitl.ac.th

Phethai Nimsanong
Power System Operation
and Control Section 2
Power System Control Dept. Metropolitan
Electricity Authority Bangkok, Thailand
phethai.ni@gmail.ac.th

Norasage Pattanadech
Electrical Engineering Dept.
School of Engineering
King Mongkut's Institute of Technology
Ladkrabang
Bangkok, Thailand
norasage.pa@kmitl.ac.th

Abstract — This paper discusses signal transmission in the grounding system. During online partial discharge (PD) measurement for the high voltage (HV) apparatus, various PD pulse currents recharge the dielectric of HV apparatus when a PD occurs. One of the noise typologies that affects PD patterns is called the cross-talk, that is, discharges that appear in the measured point due to coupling from another point. In order to study the cross-talk signal, the two PD measuring circuits which are circuit no.1 and circuit no.2, on the same grounding system in the HV laboratory were performed. The distance between two PD measuring circuits is about 20 meters. The artificial PD models were utilized to generate the PD signal injecting to the test circuit no.1, while the cross-talk signals were investigated in circuit no.2. The HFCT sensors were used to measure the PD signal in circuit 1 and the cross-talk signal in circuit 2. The measurement results found that the cross-talk signal transmission in grounding systems provides a bipolar PRPD pattern, and the pulse waveform shows an oscillation shape. Moreover, onsite PD measurements of the generator steam turbine were studied. It is noticeable that the knowledge about cross-talk phenomena in grounding systems can help the PD verification and location for online PD measurement.

Keywords— Cross-talk PD, HFCT, Online PD measurement, PD diagnosis, PRPD, TF-map

I. INTRODUCTION

Detection of partial discharge (PD) in the substation is essential to prevent failure in the electrical assets. Among the different PD measuring techniques available: electromagnetic, acoustic, optical, and analysis of chemical by-products [1, 2], the electromagnetic methods are the most widely implemented due to their efficacy. The different PD sensors are used to detect the PD signals, i.e., high frequency current transformer (HFCT), transient earth voltage (TEV) sensor, acoustic emission (AE) sensor, ultra high frequency (UHF) antennas, infrared cameras (IR), and corona cameras, as shown in Fig. 1.

The conventional PD measurement method specified in the standard IEC 60270 [3, 4] is commonly implemented as the reference method to ensure the quality of HV electrical assets. This method, although it is adequate for laboratory tests, is not suitable for online measurements because the background noise is quite a high magnitude when the measurements are performed in the frequency ranges indicated in this standard (below 1 MHz). In order to secure a good sensitivity in online tests, the non-conventional electromagnetic methods specified in the IEC 62478 standard were introduced [5], which operate in frequency ranges above 1 MHz, are applied.

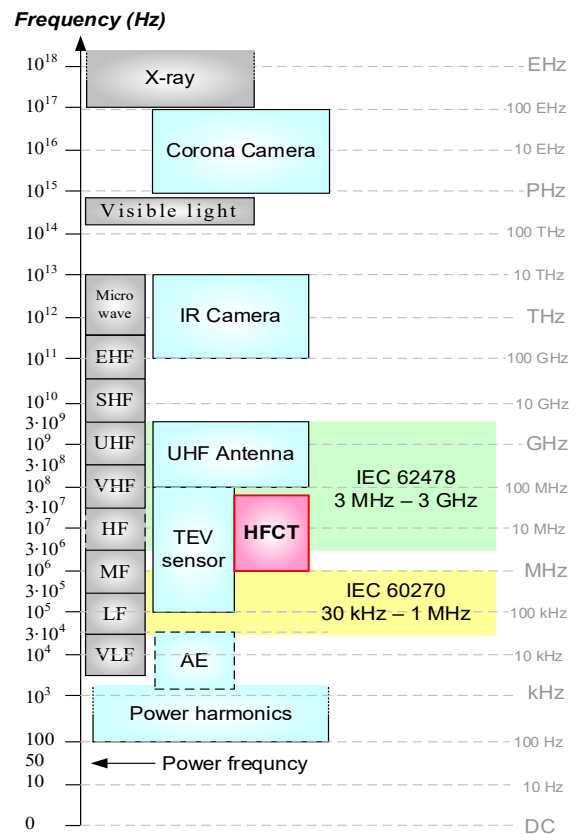


Fig. 1. The frequency ranges of PD measurement [3, 4, 6].

When corona discharge occurs, no maintenance is required, and even in the event of a surface discharge, maintenance must be carefully considered to avoid unreasonable costs. These discharges are more related to the environment than the defects inside the insulation. Moreover, the rate of deterioration is generally much lower than internal discharge [7-9]. During online PD measurement for HV equipment, at the time a PD occurs, various transient PD currents are recharging the HV equipment in the measuring circuit; one of the noise typologies that affects PD patterns is the so-called crosstalk, that is, discharges that appear in the measured point due to coupling from another point. This paper studies the crosstalk signal transmission in grounding systems using a PD calibrator and artificial PD models injecting the transient pulse current into the measuring circuit.

II. LABORATORY EXPERIMENTS

This section proposes the artificial PD model and the test circuit of this experiment.

A. PD test set up

The two PD measuring circuits, which are circuit no.1 and circuit no.2, on the same grounding system in the HV laboratory were performed as shown in Figs. 2 and 3. The distance between two PD measuring circuits is about 20 meters. The acquisition system, i.e., the PD analyzer bandwidth of 16 kHz – 30 MHz, 1 nF coupling capacitor, and HFCT sensors bandwidth of 1 – 80 MHz, were used in the experiment.

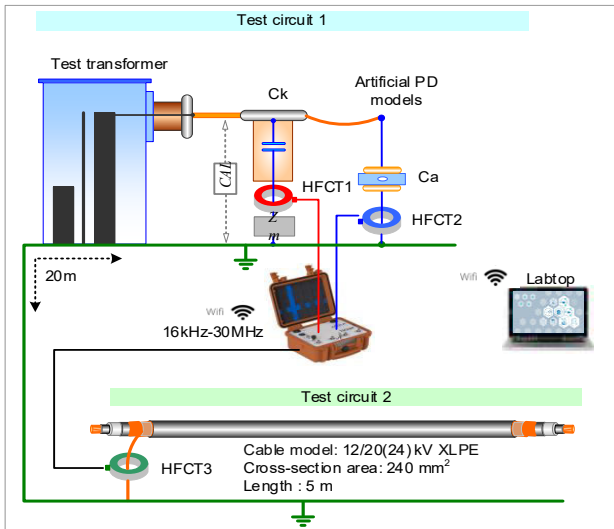


Fig. 2. Test circuit diagram for PD measurements.

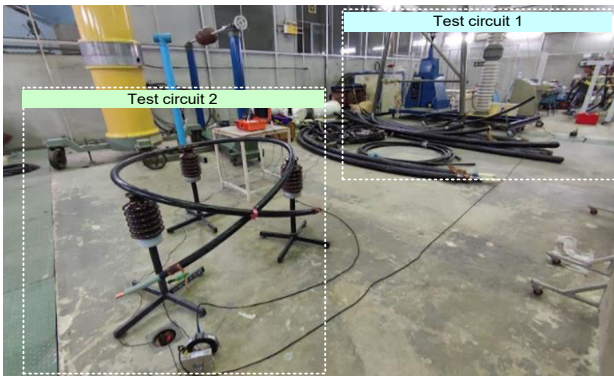


Fig. 3. Test circuit arrangement for PD measurements.

B. Artificial PD model

The PD models for simulating PD patterns were corona discharges, surface discharge, and internal discharge. Figs. 4 (a) and (b) show a needle-plane electrode in the air to create corona at high and low voltage sides, respectively. Fig. 4 (c) represents a spherical and a plane electrode with an acrylic sheet used to produce surface discharge. Fig. 4 (d) demonstrates an air-filled cavity acrylic sheet between two parallel plane electrodes to generate internal discharge.

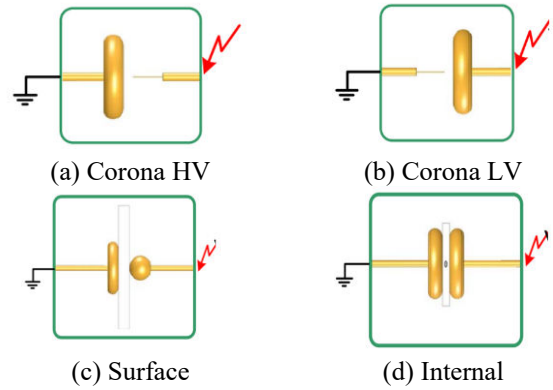


Fig. 4. Artificial PD models.

C. Results

This section presents the results of the experiment. In the first experiment, current pulses from the pulse generator as per IEC 60270 were injected into test circuit no.1; the results are shown in TABLE I, are show PRPD, maximum PD magnitude (Q_m), and pulse waveform. In the second experiment, current pulses from the artificial PD model were injected into test circuit no.1; the results are shown in TABLE II. The cross-talk PDs were invested by HFCT3 at ground shielded cable of test circuit no.2.

TABLE I. SIMULATED PD PULSE OF 1 NC

	PRPD	Pulse waveform
Ck (PD signal)		
	Q_m : -260 mV, Uni-polar	Moderately oscillate
Ca (PD signal)		
	Q_m : 600 mV, Uni-polar	Slightly oscillate
Cable (Cross talk)		
	Q_m : 0.8 mV, Bi-polar	Heavily oscillate

TABLE II - V shows the results of the second experiment conducted on corona HV, corona LV, surface, and internal, respectively. The PRPD patterns and pulse waveform of both PD signals and cross talk signals, which arise from the corona HV model in Fig. 4(a) under the test voltage of 6 kV, are illustrated in TABLE II.

TABLE II. CORONA PD AT HV SIDE

	PRPD	Pulse waveform
Ck (PD signal)		
	Qm: -200 mV, Uni-polar	Moderately oscillate
Ca (PD signal)		
	Qm: 380 mV, Uni-polar	Slightly oscillate
Cable (Cross talk)		
	Qm: ±3 mV, Bi-polar	Heavily oscillate

The PRPD patterns and pulse waveform of both PD signals and cross talk signals, which arise from the corona LV model in Fig. 4(b) under the test voltage of 8 kV, are illustrated in TABLE III.

TABLE III. CORONA PD AT LV SIDE

	PRPD	Pulse waveform
Ck (PD signal)		
	Qm: -20 mV, Uni-polar	Moderately oscillate
Ca (PD signal)		
	Qm: 50 mV, Uni-polar	Moderately oscillate
Cable (Cross talk)		
	Qm: ±3 mV, Bi-polar	Heavily oscillate

The PRPD patterns and pulse waveform of both PD signals and cross talk signals, which arise from the surface model in Fig. 4(c) under the test voltage of 8 kV, are illustrated in TABLE IV.

TABLE IV. SURFACE PD

	PRPD	Pulse waveform
Ck (PD signal)		
	Qm: -270 mV, Uni-polar	Moderately oscillate
Ca (PD signal)		
	Qm: 270 mV, Uni-polar	Slightly oscillate
Cable (Cross talk)		
	Qm: ±5 mV, Bi-polar	Heavily oscillate

The PRPD patterns and pulse waveform of both PD signals and cross talk signals, which arise from the internal model in Fig. 4(d) under the test voltage of 10 kV, are illustrated in TABLE V.

TABLE V. INTERNAL PD

	PRPD	Pulse waveform
Ck (PD signal)		
	Qm: -5 mV, Uni-polar	Moderately oscillate
Ca (PD signal)		
	Qm: 7 mV, Uni-polar	Moderately oscillate
Cable (Cross talk)		
	Qm: ±1.5 mV, Bi-polar	Heavily oscillate

III. FIELD MEASUREMENTS

For online PD measurement by HFCT sensors on field HV equipment, PD signals can be acquired from the grounded wire at a suitable position. This section shows an example of online PD measurement on a 15.7 kV isolate phase bus (IPB) of 211 MVA generator. In this case study, the PD source is located inside the exciter transformer, as shown in Fig. 5-7. The examples of measurement results are shown in TABLE VI. It was found that cross-talk PD was detected at the ground wire of gas circuit breakers (GCB) equipment. This implies that the PD signal can travel in the grounding system. The knowledge about cross-talk phenomena in grounding systems can help the PD verification and location for online PD measurement.



Fig. 5. the PD source inside the exciter transformer

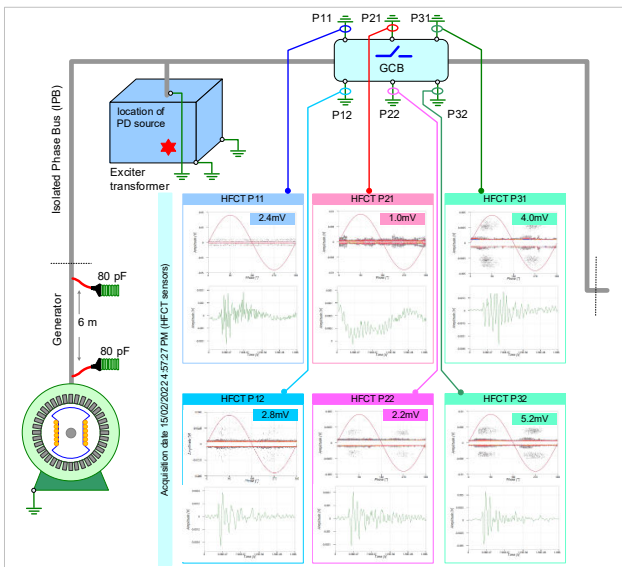


Fig. 6. Online PD field measurement of the generator system.

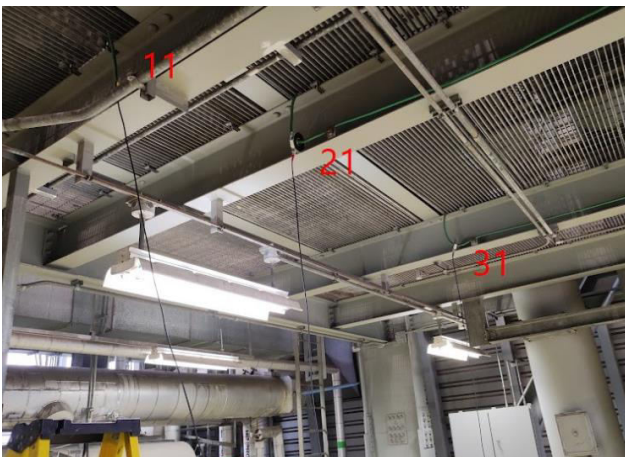


Fig. 7. The position of HFCT sensors measuring the cross-talk signal.

TABLE VI. EXAMPLE OF FIELD MEASUREMENT RESULTS

	PRPD	Pulse waveform
PD signal measured at ground exciter TR		
Cross-talk measured at ground of GCB		

IV. CONCLUSION

In laboratory studies, it was found that the PD signal can travel in the grounding system, the cross-talk signal provides a bipolar PRPD pattern, and the pulse waveform shows an oscillation shape. For the online PD measurement on-field generator system, It was found that cross-talk PD was detected at the ground wire of GCB equipment. The knowledge about cross-talk phenomena in grounding systems can help the PD verification and location for online PD measurement.

ACKNOWLEDGMENT

Authors would like to give a special thanks to Mr. Tehneht Worthong, TIS Engineering and Service CO., LTD., and ID ASSET CO., LTD. for supporting research resources.

REFERENCES

- [1] A. Haddad, D.F. Warne, "Advances in High Voltage Engineering", 2nd ed., IET Power and Energy Series, IET: London, UK, 2007; pp. 37–190.
- [2] Y. Tian, P. Lewin, A. Davies, "Comparison of on-line partial discharge detection methods for HV cable joints", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. 2002, 9, 604–615.
- [3] X. Wang, B. Li, H. Roman, O.L. Russo, K. Chin, K.R. Farmer, "Acousto-optical PD detection for transformers", IEEE Trans. Power Deliv. 2006, 21, 1068–1073.
- [4] J. Posada-Roman, J.A. Garcia-Souto, J. Rubio-Serrano, "Fiber optic sensor for acoustic detection of partial discharges in oil-paper insulated electrical systems. Sensors 2012, 12, 4793–4802.
- [5] IEC 60270. High Voltage Test Techniques - Partial Discharge Measurements, 3rd ed., International Electrotechnical Commission: Geneva, Switzerland, 2000.
- [6] E. Lemke, "Guide for Partial Discharge Measurement in Compliance to IEC 60270 Std", CIGRE Technical Brochure; CIGRE, 2008.
- [7] IEC 62478. High-Voltage Test Techniques - Measurement of Partial Discharges by Electromagnetic and Acoustic Methods. Technical specification, 1st ed., International Electrotechnical Commission: Geneva, Switzerland, 2016.
- [8] ALTANOVA, "Partial Discharge Testing & Monitoring", Products and systems. Available online: <https://www.altanova-group.com/en/products/partial-discharge-tests/altanova-catalogo> (accessed on 4 June 2022).
- [9] IEC 60034-27-1, Rotating electrical machines - Part 27-1: Off-line partial discharge measurements on the stator winding insulation of rotating electrical machines, CD, 2019.

บทความที่ 2

Online PD Measurement by Detecting the Pulsed
Compensating Current in High Voltage Equipment



IEEE International Conference on Intelligent Systems, Science, and Technology (ICAST) | 978-1-6654-5919-8/22/\$31.00 © 2022 IEEE | DOI: 10.1109/ICIA 57553-22. 9630328

i⁸th iceast 2022

Chiang Mai, Thailand

8-10 JUNE 2022
<http://iceast2022.iceast.info/>

Conference Proceeding

Online PD Measurement by Detecting the Pulsed Compensating Current in High Voltage Equipment

Chissanupong Srinangyam
 Electrical Engineering Dept.,
 School of Engineering,
 King Mongkut's Institute of
 Technology Ladkrabang
 Bangkok, Thailand.
 Chissanupong.sny@gmail.com

Pittaya Pannil
 Instrumentation and Control Engineering Dept.,
 School of Engineering,
 King Mongkut's Institute of
 Technology Ladkrabang
 Bangkok, Thailand.
 Pittaya.pa@kmitl.ac.th

Phethai Nimsanong
 Power System Operation and Control
 Section 2,
 Power System Control Dept. Metropolitan
 Electricity Authority Bangkok, Thailand.
 Phethai.ni@gmail.ac.th

Chaitawat Chuayin
 Electrical Engineering Dept.,
 School of Engineering,
 King Mongkut's Institute of
 Technology Ladkrabang
 Bangkok, Thailand.
 Chaitwat09@gmail.com

Kittisak Thungsook
 Electrical Engineering Dept.,
 School of Engineering,
 Rajamangala University of Technology
 Rattanakosin
 Bangkok, Thailand.
 Poochit.tue@rmutr.ac.th

Norasage Pattanadech
 Electrical Engineering Dept.,
 School of Engineering,
 King Mongkut's Institute of Technology
 Ladkrabang
 Bangkok, Thailand.
 Norasage.pa@kmitl.ac.th

Abstract — This paper discusses the pulsed compensating current caused by partial discharge (PD) phenomena that flows inside the electrical equipment installed in the power system. Such electrical equipment like to be the capacitive coupler in the partial discharge test circuit. In order to study the pulsed compensating current of the PD measurement, artificial PD source such as corona, surface, and internal was used in this experiment. The electrical equipment like surge arrester combined with HFCT sensor utilized to detect the PD pulse current. Furthermore, this proposed technique has been applied for online PD measurement in substations. It was found that the surge arrester could compensate for the pulse current arising from the PD source. This study will be helpful information for online PD measurement.

Keywords— Surge arrester, Partial discharge, HFCT, PRPD, Pulsed compensating current

I. INTRODUCTION

The high voltage (HV) electrical assets in substations such as GIS, GIL, rotating machines, transformers, and cable, play an essential role in the electrical power system because they contribute to the operation, security, economy, and reliability. The failure in the electrical assets, in addition to its loss, can cause oscillations in the electric power

system, damage peripheral equipment, and put at risk the physical integrity of people working in the vicinity at the instant of the failure. For example, in the case of an explosion of a bushing, cable terminator, or insulator that uses porcelain material [1].

The electrical equipment failure is associated with the inception and growth of partial discharge (PD) due to defects inside [2]. For external partial discharge, when the corona or surface discharge occurs, there is no need to carry out any maintenance action that must be considered carefully to avoid unjustified costs because the corona or surface discharge can be related to the environmental conditions more than to defects inside. Besides, it is dangerous less than internal discharge [3].

The monitoring and diagnostics of partial discharges have been carried out to prevent failure in the electrical assets. The different PD measuring techniques electromagnetic, acoustic, optical, and analysis of chemical by-products [4] were performed to solve this problem, as shown in Fig. 1. Documents such as the IEC TS 62478 [5], CIGRE WG D1.33, and WG D1.37 [6] offer good reference guidelines describing the PD problems, which are helpful alternative methods, in addition, the conventional IEC 60270 [7] method during laboratory tests is commonly implemented as the reference method to ensure the quality of HV electrical assets.

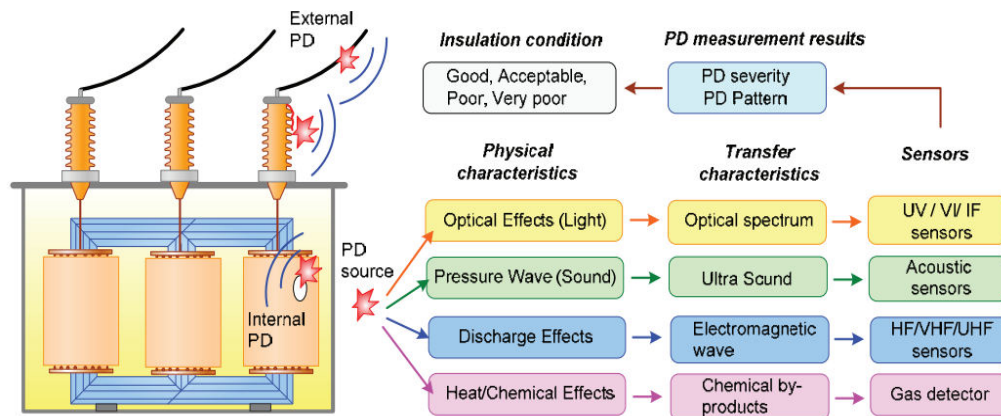


Fig. 1. Various types of PD measurement techniques.

Although the conventional method is adequate for laboratory tests, this method is unsuitable for online measurements because the background noise is quite high magnitude when the measurements are performed in the frequency ranges indicated in this standard (30 kHz - 1 MHz). The non-conventional electromagnetic methods for PD measurement specified in the technical recommendation IEC 62478 are introduced and applied in the frequency ranges above 1 MHz. It is good sensitivity in online PD measurement on-site.

Fig. 2 demonstrates the frequency ranges of conventional and non-conventional measurement methods as well as the measurement techniques widely used in various devices. This paper uses a high-frequency current transformer (HFCT) sensor, which is widely accepted and used today.

During online PD measurement for HV equipment, when a PD occurs, various transient PD currents are recharging in the measuring circuit; peripheral dielectric equipment can compensate for these PD charge transfers. The main goal of this work is to study the possibility of peripheral HV equipment such as surge arresters acting as capacitive couplers compensating the transient PD currents in the electrical equipment.

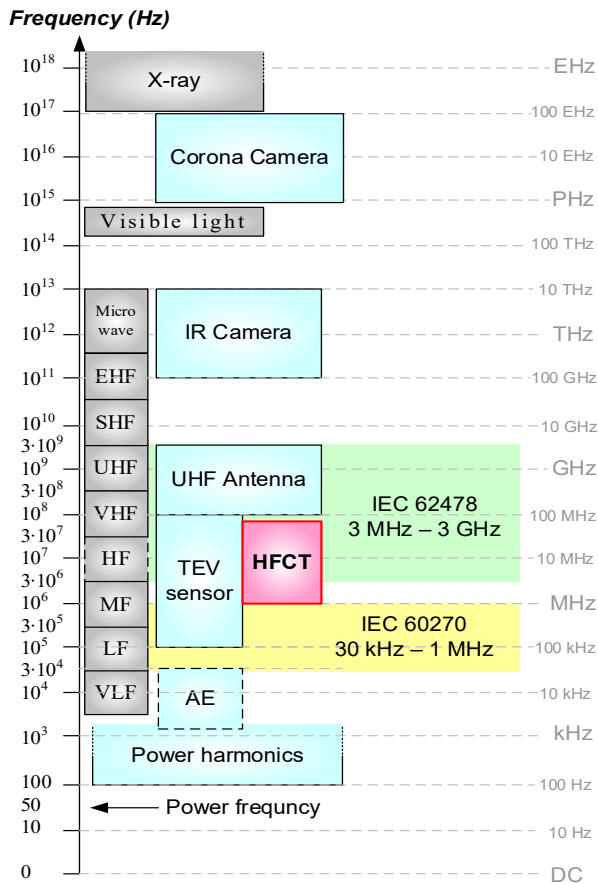


Fig. 2. The frequency ranges of PD measurement [5,7,8].

II. LABORATORY EXPERIMENTS

This section proposes the test circuit, the electrical equipment, and the artificial PD model of this experiment.

A. PD test set up

The test circuits in the experiment were performed as per IEC 60270, illustrated in Fig. 3. The PD measuring system comprises a 75 kV 40 kVA test transformer and a 100 kV 1nF coupling capacitor connected to the coupling device with a bandwidth of 20 kHz - 6 MHz and three HFCT sensors with a bandwidth of 1 MHz - 80 MHz [8]. There were three branches in the measuring circuit to acquire the compensating current signal. The HFCT sensors were clamped around the grounding wire of each branch, i.e., coupling capacitor (Ck) branch, artificial PD model (Ca) branch, and surge arrester (SA) branch. Test circuit arrangements for PD measurements are shown in Fig. 4.

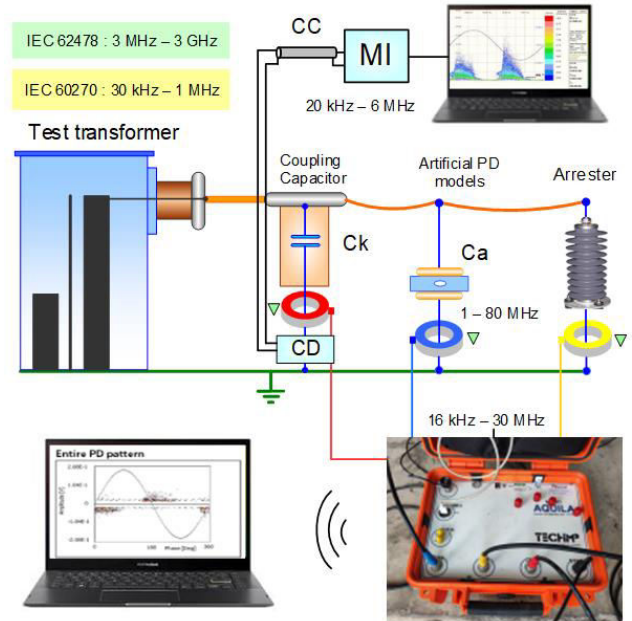


Fig. 3. Test circuit diagram for PD measurements.

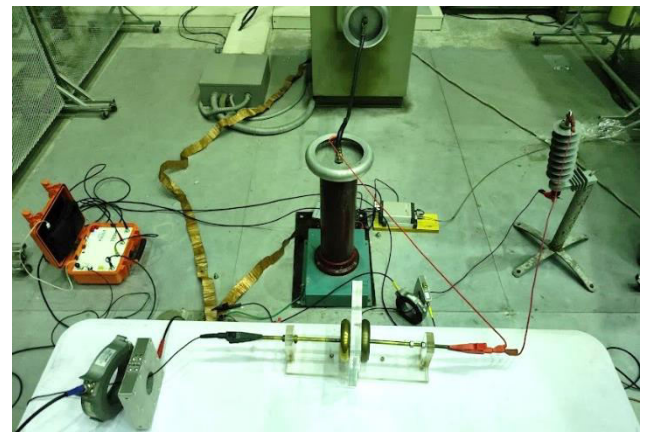


Fig. 4. Test circuit arrangement for PD measurements.

B. Electrical equipment

There are two types of surge arrester (SA) used in this experiment as follows: a substation class SA 24 kV-20 kA and distribution class with SA 24 kV-5 kA and 21 kV-10 kA, as shown in Fig. 5. The PDC analyzer 1MOD was used to measure the capacitance and dielectric response of the SA.

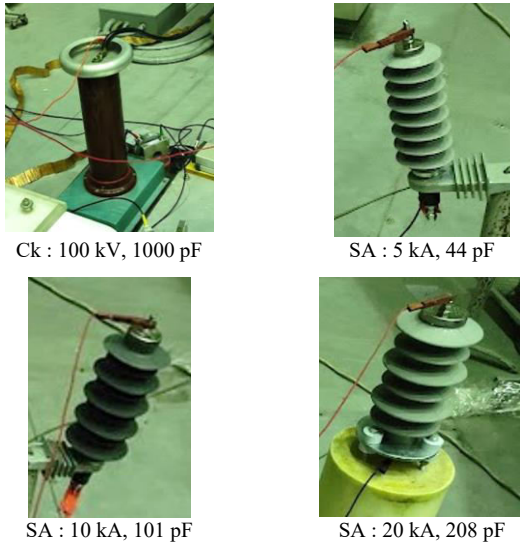


Fig. 5. The electrical equipment in the test experiment.

C. Artificial PD model

The PD models for simulating four PD patterns were corona discharges at HV side, corona discharges at LV side, surface discharge, and internal discharge. Figs. 6 (a) and (b) show a needle-plane electrode in the air to create corona at high and low voltage sides, respectively. Fig. 6 (c) represents a spherical and a plane electrode with an acrylic sheet used to produce surface discharge. Fig. 6 (d) demonstrates an air-filled cavity acrylic sheet between two parallel plane electrodes to generate internal discharge.

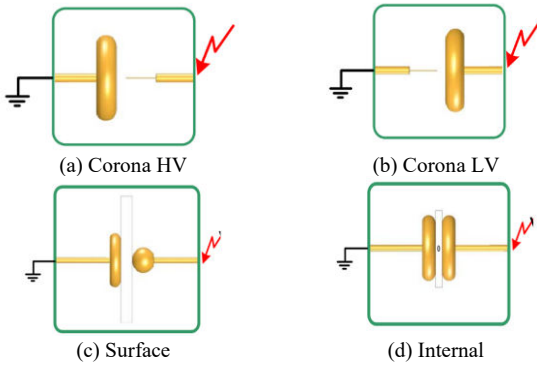


Fig. 6. Artificial PD models.

III. EXPERIMENTAL RESULTS

This section illustrates the results of PD measurement, i.e., phase-resolved PD patterns (PRDP), Time-Frequency (T-F) map, and pulse waveform. The PD measurement circuit by adding the surge arrester branch was conducted on the four types of PD models in the laboratory.

In the first experiment, the surge arrester rated 5 kA, 44 pF was used as the capacitive coupler to compensate for the transient PD currents arising from corona at the HV side. Fig. 7 shows the PRPD patterns of corona HV, which were acquired from four sets of PD sensors which are CH1) Ck combined with HFCT, CH2) Ca combined with HFCT, and CH3) SA combined with HFCT, and CH4) Ck combined with CD as per IEC 60270. The measurement locations are shown in Figs. 3-4.

The PRPD patterns of CH1 and CH2 are the results of indirect and direct circuits, respectively which provide the

polarity of PD magnitude opposite each other [8]. The CH3 shows the PRPD pattern acquired from SA combined with HFCT; it was found that the PRPD pattern is like the PRPD pattern of CH1, which is the indirect circuit. However, the PRPD pattern in the negative cycle is shown as a bipolar pattern.

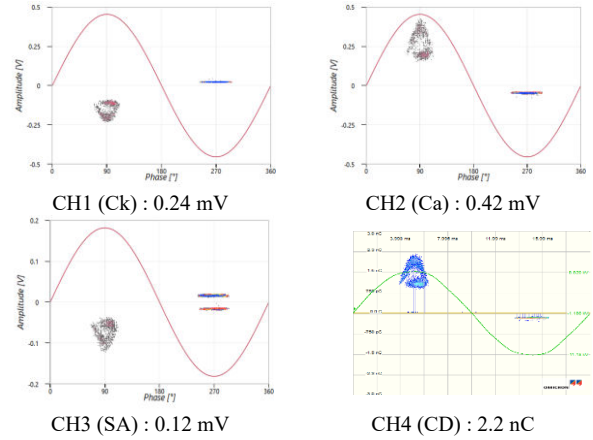


Fig. 7. The PRPD of SA 5 kA at 7.2 kV.

In order to make it easier to identify the signals, the T-F map and pulse waveform was analyzed as summarized in TABLE II. The T-F map is the equivalent time length and the equivalent frequency of pulse waveform. This paper sets the time length of 2 μ s, and the dead time is 20 μ s. It was found that the T-F map of CH3 (SA) provides a different from CH1 and CH2. Besides, the pulse waveform of CH3 (SA) is more oscillation than the pulse waveform of CH1 and CH2. This implies that there are reflection phenomena at the interface between the layer of the ZnO box inside the surge arrester. The second experiment to the fourth experiment was conducted on corona LV, surface, and internal, respectively. The PD parameters which are maximum PD magnitude, approximately frequency center (fc) of PD group in T-F map, and pulse waveform are summarized in TABLE II.

TABLE I. T-F MAP AND PULSE SHAPE AT 7.2 kV

T-F map	Pulse waveform
CH1 (Ck) : fc = 7.5 & 10.3 MHz	CH1 (Ck) : Slight oscillation
CH2 (Ca) : fc = 7.0 & 10.0 MHz	CH2 (Ca) : No oscillation
CH3 (SA) : fc = 4.3 & 14.8 MHz	CH3 (SA) : Oscillation

TABLE II SUMMARY OF THE EXPERIMENT

Equipment		PRPD		T-F map	Pulse waveform	
		Cycle + (mV)	Cycle - (mV)	Approximately fc (MHz)	Repetition rate (N/s)	Oscillation
Corona HV	Copling capacitor (5 kA) @ 7.2 kV	-30	+180	7.4 & 10.3	718	Slight
	Arrester 5 kA @ 7.2 kV	+180	+90	15.05 & 15.15	542	Yes
	Arrester 10 kA @ 7.0 kV	-70	±10	14.8 & 15.0	2139	Yes
	Arrester 20 kA @ 7.0 kV	-20	+35	11.1 & 13.6	673	Yes
Corona LV	Copling capacitor (5 kA) @ 7.6 kV	-240	+30	7.5 & 10.3	780	Slight
	Arrester 5 kA @ 7.6 kV	-10	±20	4.3 & 14.8	499	Yes
	Arrester 10 kA @ 7.6 kV	±10	+60	14.9 & 15.1	431	Yes
	Arrester 20 kA @ 7.9 kV	-40	+200	11.3 & 13.9	1240	Yes
Surface	Copling capacitor (5 kA) @ 6.5 kV	-20	+90	7.3 & 13.5	2338	Yes
	Arrester 5 kA @ 6.5 kV	±10	-70 & +100	14.9	2679	Yes
	Arrester 10 kA @ 5.7 kV	-80	-40 & +50	15.0	2060	Yes
	Arrester 20 kA @ 6.5 kV	-30	+170	14.9	2952	Yes
INT	Copling capacitor (5 kA) @ 12.4 kV	-70	+110	10.4 & 11.9	1444	Yes
	Arrester 5 kA @ 12.4 kV	+20 & -40	-50 & +80	15.2	1327	Yes
	Arrester 10 kA @ 12.5 kV	±10	±30	15.3	595	Yes
	Arrester 20 kA @ 12.6 kV	+10 & -80	-20 & +80	11.9 & 14.7	2651	Yes

Note : fc is the frequency center of the cluster PD in T-F map, and the maximum magnitude of PRPD for the PD group.

IV. FIELD MEASUREMENTS

For online PD measurement by HFCT sensors on field transformers, PD signals can be acquired from the grounded wire at a suitable position, i.e., neutral connection, main tank ground, high voltage cable, and surge arrester, as shown in Fig. 8. This section shows an example of online PD measurement on a three-phase 150 kV, 21 MVA power transformer. The PD measurement results, which are PRPD pattern and pulse waveform, are shown in TABLE III.

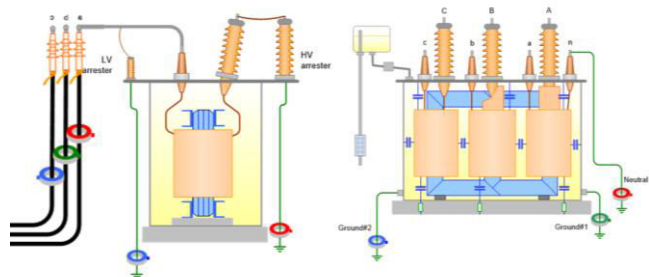


Fig. 8. HFCT measurement of power transformer with surge arrester.

TABLE III. EXAMPLE OF ONLINE PD MEASUREMENT RESULTS

	PRPD Pattern	Pulse waveform
115 kV Cable		
Neutral cable		
Surge arrester		

V. CONCLUSION

In laboratory studies, it was found that the surge arrester was able to compensate for the transient PD currents in the electrical equipment. The laboratory experiment found that the surge arrester provides PRPD pattern similar to the coupling capacitor; however, the pulse waveform of the recharging current caused by PD activities of the surge arrester is more oscillated than the pulse waveform of the recharging current of the coupling capacitor. For online PD measurement on-field transformer, it was found that the surge arrester could act as a capacitive coupler compensating the pulse current arising from the PD source.

ACKNOWLEDGMENT

Authors would like to give a special thanks to the TIS Engineering and Service CO., LTD., ID ASSET CO., LTD., for supporting research resources.

REFERENCES

- [1] H. P. Amorim, A. T. D. Carvalho, T. B. Rodrigues, J. B. S. Borges and C. F. F. de C. Cunha, "Experience with on-line insulation diagnostics of surge arresters by PD measurement in the field," 2016 IEEE International Conference on Dielectrics (ICD), 2016, pp. 472-475.
- [2] M. Tozzi, A. Cavallini, G. C. Montanari and G. L. G. Burbui, "PD detection in extruded power cables: an approximate propagation model," in IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 15, no. 3, pp. 832-840, June 2008.
- [3] IEC 60034-27-1, Rotating electrical machines - Part 27-1: Off-line partial discharge measurements on the stator winding insulation of rotating electrical machines, CD, 2019.
- [4] A. Cavallini, G. C. Montanari, A. Contin and F. Pulletti, "A new approach to the diagnosis of solid insulation systems based on PD signal inference," in IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 19, no. 2, pp. 23-30, March-April 2003.
- [5] IEC-62478. High-Voltage Test Techniques - Measurement of Partial Discharges by Electromagnetic and Acoustic Methods. Technical specification, 1st ed., International Electrotechnical Commission: Geneva, Switzerland, 2016.
- [6] CIGRE WG D1.33, "Guidelines for unconventional Partial Discharge measurements", CIGRE Technical Brochure 444, 2010.
- [7] IEC 60270. High Voltage Test Techniques - Partial Discharge Measurements, 3rd ed., International Electrotechnical Commission: Geneva, Switzerland, 2000.
- [8] ALTANOVA, "Partial Discharge Testing & Monitoring", Products and systems. Available online: <https://www.altanova-group.com/en/products/partial-discharge-tests/altanova-catalogo> (accessed on 4 June 2022).

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายชัชฌพงษ์ ศรีนางแย้ม
วัน เดือน ปีเกิด 12 พฤศจิกายน 2541
ที่อยู่ 27/39 หมู่ 10 ถนน พัทยาใต้ ต. หนองปรือ อ. บางละมุง จ. ชลบุรี 20150
ช่องทางติดต่อ Chissanupong.sny@gmail.com
ประวัติการศึกษา 2561 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
2563 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม.) สาขาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

งานวิจัยที่ตีพิมพ์

1. S. Maneerot, J. Siriworachanyadee, W. Likhitsupin, S. Likhitsupin, C. Srinangyam and N. Pattanadech “**Polarization and Depolarization Current Characteristics of Natural Ester Impregnated Pressboards with Different Periods of Impregnation**”, 2020 8th Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), 25-28 October 2020, Phuket, Thailand.
2. C. Srinangyam , P. Pannil, P. Nimsanong, C. Chuayin, K. Thungsook and N. Pattanadech “**Online PD Measurement by Detecting the Pulsed Compensating Current in High Voltage Equipment**”, 2022 8th International Conference on Engineering, Applied Sciences, and Technology (ICEAST), 8-10 June 2022, Chiang Mai, Thailand
3. C. Srinangyam , P. Pannil, K. Thungsook, S. Promwong, P. Nimsanong and N. Pattanadech “**The Verification of HF Signal Transmission via Grounding System for Online PD Measurement**”, 2022 8th International Conference on Engineering, Applied Sciences, and Technology (ICEAST), 8-10 June 2022, Chiang Mai, Thailand
4. K. Thungsook, N. Pattanadech, P. Nimsanong and C. Srinangyam “**The Bandwidth Verification of VHF Antenna and Apply for Partial Discharge Measurement**”, 2022 9th Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), 13-18 November 2022, Kitakyushu, Japan
5. N. Pattanadech , N. Phumipunepon , C. Srinangyam , S. Jeenmuang , C. Bunlaksananusorn “**Dielectric analysis of degraded stator bars of a hydro generator**”, Energy Reports Volume 8, Supplement 1, April 2022, Pages 313-321.
6. N. Pattanadech , N. Phloyemuk , P. Nimsanong, C. Srinangyam , S. Jeenmuang , C. Bunlaksananusorn “**Additional parameters for elucidation of the dielectric behavior of stator winding in high voltage motors**”, Energy Reports, Volume 8, November 2022, Pages 3629-3635.