

การออกแบบขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงเพื่อไรทลดอามท์เค้เค็สสารบางส่วน  
และพลังงานสูญเสียได้อิเล็กทริกของสายเคเบิล XLPE ขนาดแรงดัน 24 kV

THE DESIGN OF HIGH VOLTAGE CABLES TERMINATOR FOR PARTIAL  
DISCHARGE AND DIELECTRIC LOSS MEASUREMENT  
OF 24 kV XLPE CABLES

พรอมศักดิ์ อมรตกุล  
PROMSAK AMRATKUL

วิทยานิพนธ์นี้จัดทำขึ้นเพื่อเป็นส่วนหนึ่งของวิทยานิพนธ์ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2545

ISBN 974-324-035-7

การออกแบบขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงเพื่อใช้ทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วน  
และพลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกของสายเคเบิล XLPE ขนาดแรงดัน 24 kV

THE DESIGN OF HIGH VOLTAGE CABLES TERMINATOR FOR PARTIAL  
DISCHARGE AND DIELECTRIC LOSS MEASUREMENT  
OF 24 kV XLPE CABLES

พร้อมศักดิ์ อภิริติกุล

PROMSAK APIRATIKUL

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 44059  
วัน, เดือน, ปี..... 25 ต.ค. 2545

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2545

ISBN 974-324-035-7

**THE DESIGN OF HIGH VOLTAGE CABLES TERMINATOR FOR PARTIAL  
DISCHARGE AND DIELECTRIC LOSS MEASUREMENT  
OF 24 kV XLPE CABLES**

**PROMSAK APIRATIKUL**

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING  
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**2002**

**ISBN 974-324-035-7**

**COPYRIGHT 2002**

**SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

## หัวข้อวิทยานิพนธ์

การออกแบบขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงเพื่อใช้ทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนและพลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกของสายเคเบิล XLPE ขนาดแรงดัน 24 kV

นักศึกษา

นายพร้อมศักดิ์ อภิรติกุล

รหัสประจำตัว

43061184

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

พ.ศ.

2545

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์

รศ.จรงค์ษ์ บุญเส็ง

## บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการนำเสนอวิธีการออกแบบและสร้างขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงขนาด 24 กิโลโวลต์ 240 ตารางมิลลิเมตร โดยการทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนและพลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก ซึ่งเป็นปัจจัยในการควบคุมคุณภาพของฉนวนในสายเคเบิลก่อนที่จะนำไปใช้งานในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ซึ่งในการออกแบบและสร้างขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงขึ้นจะใช้วิธีการควบคุมสนามไฟฟ้าแบบ Refractive Stress Control ที่ปลายสายเคเบิลจะใช้ฉนวนกั๊ซคือ อากาศทำหน้าที่ในการควบคุมการหักเหของสนามไฟฟ้าที่ปลายสายเคเบิลในขั้วต่อสายเคเบิล โดยเพิ่มความหนาแน่นของฉนวนด้วยวิธีการอัดความดันของอากาศและการทำสุญญากาศที่บริเวณปลายสายเคเบิลในขั้วต่อสายเคเบิลที่ใช้ในการทดสอบวัดค่าดิสชาร์จบางส่วนและการทดสอบหาค่าพลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกตามมาตรฐานการทดสอบของ IEC No.270, 60502 และ 885-3 ซึ่งผลของการวัดค่าดิสชาร์จบางส่วนและพลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกมีค่าอยู่ในระดับมาตรฐานกำหนด

<b>Thesis Title</b>	The Design of High Voltage Cables Terminator for Partial Discharge and Dielectric Loss Measurement of 24 kV XLPE Cables
<b>Student</b>	Mr. Promsak Apiratikul
<b>Student ID</b>	43061184
<b>Degree</b>	Master of Engineering in Electrical Engineering
<b>Programme</b>	Electrical Engineering
<b>Year</b>	2002
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc.Prof. Chongrag Boonseng

### ABSTRACT

This thesis presents design and construction of a terminator test high voltage cables. The cable used in experiments has a rate voltage of 24 kV and a diameter of 240 mm<sup>2</sup>. A partial discharge level and the dielectric loss are important factors to indicate the insulation quality of the cable in the measurement of the partial discharge and the dielectric loss a cable connector is required. This papers present a design of the cable terminator or cable connector. The calculation is based on the refractive stress control so that the optimum electric stress can be obtained. The body of the connector is constructed using the compressed air is used as an insulating medium. In order to implement the connector, a partial discharge and the dielectric loss ( $\tan\delta$ ) of a cable are tested according to IEC standards No.60502, No.835-3 and No.270. It is found that the cable terminator or proposed can give the satisfactory and reasonably accurate results from the measurements. In addition, the cost of the construction of the connector developed is much cheaper than that of the commercial module.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้อย่างดีด้วยคำแนะนำของ รองศาสตราจารย์จรัสรัศม์ บุญเส็ง ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง ที่ให้โอกาสที่ดีในการดำเนินชีวิต อีกทั้งยังช่วยเหลือแก้ไขปัญหามากมายให้กับผู้วิจัย ขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์กนกพล นาคะวิวัฒน์ ตลอดจนคณาจารย์และเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล ที่ให้ความอนุเคราะห์เรื่องของการใช้ห้องปฏิบัติการทางวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง ตลอดจนเครื่องมือทดสอบวัดค่าต่างๆ ทางวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง และให้คำแนะนำที่ดีตลอดมา ซึ่งผู้วิจัยไม่อาจลืมได้ตลอดชีวิต

ขอกราบขอบพระคุณ คณาจารย์และเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณ คุณแม่นิอร คุณแม่วรารัตน์ อภิตติกุล คุณลุงบุญชู อภิตติกุล และ คุณลุงบัญชา อภิตติกุล ที่สนับสนุนและให้กำลังใจที่ตีมาตลอดเวลาและตลอดไป

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

พร้อมศักดิ์ อภิตติกุล

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญภาพ.....	X
สารบัญตาราง.....	XI
บทที่ 1.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของวิทยานิพนธ์.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการทำวิจัย.....	3
1.4 เปรียบเทียบกับหลักการที่มีอยู่เดิม.....	3
1.5 ขอบเขตของงานวิจัย.....	4
1.6 ขั้นตอนการศึกษา.....	4
บทที่ 2. ทฤษฎีพื้นฐาน.....	6
2.2 โครงสร้างของสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวน XLPE.....	6
2.2.1 ตัวนำ (Conductor).....	6
2.2.2 Extruded Conductor Shield (Conductive Strand-Shielding).....	6
2.2.3 Insulation คือวัสดุที่ทำหน้าที่เป็นฉนวนไฟฟ้า.....	6
2.2.4 Extruded Insulation Shield .....	7
2.2.5 Copper Shield ทำด้วยแถบโลหะแบนหรือเส้นโลหะกลม.....	7
2.2.6 Separator Tape หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Bedding Type.....	7
2.2.7 Sheath หรือเปลือกนอกทำด้วยวัสดุที่เป็นฉนวน.....	7
2.3 ทฤษฎีเบื้องต้นของการเกิดคิสซาร์จบางส่วน.....	8
2.3.1 วงจรสมมูลคิสซาร์จภายใน.....	8
2.3.2 ธรรมชาติพัลส์ของคิสซาร์จบางส่วน.....	10

# สารบัญ(ต่อ)

หน้า

2.4	หลักการตรวจจับคิซาร์จบางส่วน.....	9	
2.4.1	วงจรพื้นฐานสำหรับการตรวจจับคิซาร์จบางส่วน	2.5 เทคนิคการวัด.....	10
	คิซาร์จบางส่วน.....	13	
2.5.1	การวัดคิซาร์จบางส่วนสำหรับวัสดุทดสอบทั่วไป.....	15	
2.5.2	การวัดคิซาร์จบางส่วนสำหรับสายเคเบิล.....	15	
2.6	เทคนิคการลดสัญญาณรบกวน.....	17	
2.6.1	สัญญาณรบกวนที่มีผลกระทบในการวัดคิซาร์จบางส่วน.....	17	
2.6.2	การลดสัญญาณรบกวน.....	21	
2.7	คุณสมบัติของเครื่องตรวจจับคิซาร์จบางส่วน.....	23	
2.7.1	ข้อกำหนดของเครื่องตรวจจับคิซาร์จบางส่วนตามมาตรฐาน IEC .....	23	
2.8	การจำแนกชนิดของคิซาร์จบางส่วนในสายเคเบิล.....	23	
2.9	การเกิดเบรคดาวน์ และการนำไฟฟ้าในฉนวนของเหลว.....	26	
2.9.1	ทฤษฎีการเกิดเบรคดาวน์จากช่องว่างและฟองก๊าซ.....	28	
2.9.2	กลไกทางอุณหภูมิจากการเกิดเบรคดาวน์ในฉนวนเหลว.....	29	
2.10	การควบคุมสนามไฟฟ้าของสายเคเบิล.....	31	
2.10.1	Stress Cone เมื่อทำ Splicing และ Terminating.....	33	
บทที่ 3	ทฤษฎีและหลักการออกแบบขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูง.....	35	
3.1	บทนำ.....	35	
3.2	ความคงทนของการฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้า.....	35	
3.2.1	อิเล็กโตรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ.....	37	
3.2.2	อิเล็กโตรดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ (II, III).....	38	
3.3	สนามไฟฟ้าในวัสดุเนื้อเดียวกัน.....	43	
3.3.1	หลักเบื้องต้นเกี่ยวกับสนามไฟฟ้า.....	43	
3.4	สนามไฟฟ้าในวัสดุสารเนื้อเดียวกันและต่างชนิดกัน.....	45	
3.4.1	การหักเหแนวเส้นสนามไฟฟ้าที่รอยต่อของฉนวน.....	45	
3.4.2	ชั้นฉนวนซ้อนกัน ฉนวนไฟฟ้าสม่ำเสมอ.....	46	

# สารบัญ(ต่อ)

หน้า

3.4.3	ชั้นฉนวนที่เป็นก๊าซกับของแข็ง.....	49
3.4.4	ชั้นฉนวนชั้นที่เป็นของแข็ง.....	50
3.5	ปลอกฉนวนนำสายไฟแรงสูง (High Voltage Bushing).....	54
3.5.1	ปลอกฉนวนนำสายไฟแบบธรรมดา.....	54
3.5.2	ปลอกฉนวนนำสายไฟแบบคอนเดนเซอร์.....	55
3.5.3	ชั้นฉนวนของเหลวกับของแข็ง.....	58
3.6	การเกิดเบรคดาวน์ในฉนวนก๊าซ.....	61
3.6.1	สัมประสิทธิ์การไอออไนเซชันในก๊าซ.....	61
3.6.2	กฎของพาสเชน (Paschen's law).....	63
3.7	เบรคดาวน์ในสุญญากาศ (Breakdown in vacuum).....	68
3.7.1	ผลของระยะแกปต่อแรงดันเบรคดาวน์ในสุญญากาศ.....	68
3.7.2	ผลของความดันต่อแรงดันเบรคดาวน์ในสุญญากาศ.....	69
3.8	การออกแบบขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวน XLPE.....	70
3.8.1	การออกแบบขั้วต่อตัวนำสายเคเบิลแรงดันสูง XLPE.....	70
3.8.2	การออกแบบชุดฐานรองรับขั้วต่อตัวนำสายเคเบิลแรงดันสูง XLPE.....	73
3.8.3	การออกแบบคำนวณค่าสนามไฟฟ้าขั้วต่อตัวนำสายเคเบิลแรงดันสูง.....	75
3.8.4	การหาเส้นผ่านศูนย์กลางท่ออะคลีลิกไสและฝาปิด.....	82
3.8.5	การออกแบบและสร้างชุดลดค่าความเครียดสนามไฟฟ้า.....	87
3.9	สรุป.....	88
บทที่ 4	การวิเคราะห์หาค่าดิสชาร์จบางส่วนและพลังงานสูญเสียโคอีเล็กทริกของขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูง.....	89
4.1	บทนำ.....	89
4.2	การทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วน(PD).....	89
4.2.1	ขั้นตอนการทดสอบขั้วต่อสายเคเบิล.....	89
4.2.2	วงจรการทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนและพลังงานสูญเสียโคอีเล็กทริก.....	89
4.3	การวิเคราะห์หาค่าดิสชาร์จบางส่วนที่ขั้วต่อสายเคเบิล.....	93

# สารบัญ(ต่อ)

หน้า

4.3.1 ค่าดิสชาร์จบางส่วนของขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงที่ไม่มีสายเคเบิลต่อ และไม่มีฝาปิด.....	94
4.3.2 ค่าดิสชาร์จบางส่วนของขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงที่ไม่มีสายเคเบิลต่อและ มีฝาปิด.....	95
4.3.3 ค่าดิสชาร์จบางส่วนของขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงที่ไม่มีสายเคเบิลต่อและ ไม่มีฝาปิดพร้อมกับชุดลดโคโรนาดิสชาร์จ.....	96
4.3.4 ค่าดิสชาร์จบางส่วนของขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงที่ไม่มีสายเคเบิลต่อและ มีฝาปิดพร้อมกับชุดลดโคโรนาดิสชาร์จ.....	97
4.4 การวิเคราะห์ค่าพลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกที่ขั้วต่อสายเคเบิล.....	98
4.5 สรุป.....	104
<b>บทที่ 5 การวิเคราะห์หาค่าดิสชาร์จบางส่วน(Partial Discharge) ของสายเคเบิลแรงดันสูง XLPE.</b>	<b>105</b>
5.1. บทนำ.....	105
5.2 การคำนวณหาความยาวของสายเคเบิลที่ใช้ทดสอบ.....	105
5.2.1 จำนวนแรงดันทดสอบการเกิดดิสชาร์จบางส่วน.....	105
5.2.2 การคำนวณการปกกฉนวนสายเคเบิลแรงสูง.....	105
5.3 ผลการทดสอบสายเคเบิลแรงดันสูง XLPE.....	111
5.4 บทสรุป.....	151
<b>บทที่ 6 การวิเคราะห์หาค่าพลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก(Dielectric Loess) ของสายเคเบิลแรงดันสูง XLPE.....</b>	<b>153</b>
6.1 บทนำ.....	153
6.2 การทดสอบหาค่าคาปาซิแตนซ์(Capacitance) ของสายเคเบิล.....	153
6.3 พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก (Dielectric Loess) ของสายเคเบิล.....	157
6.3.1 พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกเนื่องจากสภาพนำไฟฟ้าแรงดันกระแสตรง..	157
6.3.2 พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกเนื่องจากกระแสสลับและวงจรมุม.....	158

## สารบัญ(ต่อ)

หน้า

6.4 ผลการวัดค่าความจุไฟฟ้าและแฟกเตอร์พลังงานเปล่าไดอิเล็กตริก.....	160
6.5 บทสรุป.....	165
บทที่ 7 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	166
7.1 สรุปผลการวิจัย.....	167
7.2 ข้อเสนอแนะ.....	167
เอกสารอ้างอิง.....	168
ภาคผนวก.....	170
ภาคผนวก ก. ....	171
ภาคผนวก ข. ....	173
ภาคผนวก ค. ....	192
ประวัติผู้เขียน.....	194

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ส่วนต่างๆของสายเคเบิลแรงสูงฉนวน XLPE.....	5
2.2 วงจรสมมูลของการเกิดคิสซาร์จบางส่วน(PD) ทั่วไป.....	8
2.3 (ก) แสดงการกระจายของประจุก่อนเกิดเบรคดาวน์ (ข) แทนผิวของฉนวนรอบโพรง อากาศด้วยค่า R และ C .....	9
2.4 วงจรสมมูลของโคโรนาคิสซาร์จและคิสซาร์จตามผิว.....	9
2.5 แรงดันคร่อมแก๊ปและกระแสที่ขั้วสายของอุปกรณ์ขณะเกิด PD.....	10
2.6 การเกิด PD ซ้ำ.....	11
2.7 ลักษณะกระแส PD ที่ตรวจจับได้ในทางปฏิบัติโดยใช้ UWB (ก) กระแส PD ที่เกิดใน Epoxy (ข) กระแส PD ที่เกิดจากปลายแหลมในก๊าซ SF <sub>6</sub> .....	12
2.8 วงจรพื้นฐานสำหรับการตรวจจับ PD.....	13
2.9 แทน PD ด้วยวงจรสมมูลแบบต่างๆ (ก) แทนวัสดุทดสอบ C <sub>1</sub> ด้วยวงจรสมมูลที่ประกอบ ด้วย C <sub>a</sub> , C <sub>b</sub> , C <sub>c</sub> และแก๊ป G (ข) แทน C <sub>c</sub> และ G ด้วยแรงดันรูปขั้น คือ $v_c \approx \Delta v_u(t)$ (ค) แทน C <sub>b</sub> และ V <sub>c</sub> ด้วยแหล่งจ่ายกระแสพัลส์ $i_b \approx q\delta(t)$ .....	14
2.10 วงจรทดสอบคิสซาร์จบางส่วนแบบต่างๆ.....	16
2.11 การเกิดคลื่นจรขณะเกิด PD ในเคเบิลยาว.....	17
2.12 การเกิดชุปเปอร์โพสิชันสัญญาณเอาต์พุตของเครื่องตรวจจับ PD แบบต่างๆ.....	18
2.13 วงจรตรวจสอบคุณสมบัติชุปเปอร์โพสิชันของเครื่องตรวจจับ PD.....	19
2.14 ไดอะแกรมพัลส์คู่ของเครื่องตรวจจับ PD แบบต่างๆ.....	19
2.15 ไดอะแกรมพัลส์คู่เมื่อเกิดการสูญเสียในเคเบิล.....	20
2.16 ตัวอย่างสัญญาณรบกวนที่ตำแหน่งต่างๆ.....	20
2.17 ตัวอย่างการลดสัญญาณรบกวน.....	21
2.18 การลดสัญญาณรบกวนด้วยวิธี “หน้าต่างเวลา”.....	22
2.19 แสดงการเกิดคิสซาร์จบางส่วนที่เกิดจากโพรงอากาศ.....	24
2.20 แสดงการเกิดคิสซาร์จบางส่วนที่เกิดจากรอยแตก.....	24
2.21 แสดงการเกิดคิสซาร์จบางส่วนที่เกิดจากเศษวัสดุและสิ่งเจือปน.....	25
2.22 แสดงการเกิดคิสซาร์จบางส่วนที่เกิดจากการขยายตัวของคาร์บอนแทรก.....	26

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.23	หยดน้ำเมื่ออยู่ในฉนวนเหลว (ซิลิโคน) ภายใต้สนามไฟฟ้ามากขึ้นเรื่อยๆ.....29
2.24	ชุดภาชนะทดสอบน้ำมันหม้อแปลง (Test Cell).....30
2.25	แสดงค่าคาปาซิแตนซ์ของสายเคเบิลแรงดันสูง.....31
2.26	แสดงสนามไฟฟ้าที่ไม่มีการแก้ไข.....32
2.27	แสดงการแก้ไขสนามไฟฟ้าแบบ Capacitive stress control.....32
2.28	แสดงการแก้ไขสนามไฟฟ้าแบบ Refractive stress control.....33
2.29	Potential Field at a Screen Termination .....33
2.30	เปรียบเทียบการมี Stress cone กับไม่มี Stress cone.....34
2.31	การกระจายสนามไฟฟ้าเมื่อใช้ Stress cone.....34
2.32	การกระจายสนามไฟฟ้าเมื่อใช้ High Permittivity Material.....34
3.1	อิเล็กโตรดที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าแบบต่างๆ กัน.....36
3.2	เปรียบเทียบแรงดันที่ทำให้เกิดเบรคดาวน์ในไดอิเล็กตริกตามลักษณะสนามไฟฟ้า.....38
3.3	สนามไฟฟ้าและเส้นศักย์เท่า.....39
3.4	เปรียบเทียบสนามไฟฟ้าของอิเล็กโตรดลักษณะต่างๆ.....40
3.5	การหักเหของสนามไฟฟ้าตรงรอยต่อของฉนวน.....45
3.6	ฉนวนต่างชนิดกันในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ.....46
3.7	ชั้นฉนวนวางซ้อนกันในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ.....46
3.8	เปรียบเทียบความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนแต่ละชั้น.....48
3.9	สายเคเบิลทรงกระบอกแกนร่วม.....50
3.10	คาปาซิเตอร์ทรงกระบอกแกนร่วมมีชั้นฉนวนซ้อน.....53
3.11	ทรงกระบอกกรอบนอกเป็นอากาศ.....53
3.12	ปลอกฉนวนนำสายไฟแบบธรรมดา ในเนื้อฉนวนไร้ชั้นโลหะเปลวแทรก.....55
3.13	ปลอกฉนวนนำสายไฟแบบคอนเดนเซอร์.....56

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.14 เปรียบเทียบแรงดันกระจายของปลายฉนวนนำสายไฟทั้งสองแบบ.....	56
3.15 ความสัมพันธ์ของ $\frac{\alpha}{p_0} = f\left(\frac{E}{p_0}\right)$ ของ H <sub>2</sub> และ N <sub>2</sub> (Nasser) p <sub>0</sub> เป็นความดันที่ °C.....	63
3.16 หาความสัมพันธ์ของพาสเซน โดยวิธีการ.....	64
3.17 เส้นโค้งของพาสเซน.....	65
3.18 ความเครียดสนามไฟฟ้าเบรคดาวน์ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ.....	67
3.19 ความเครียดสนามไฟฟ้าและแรงดันเบรคดาวน์ในสุญญากาศ.....	68
3.20 ผลของความดันก๊าซที่มีต่อแรงดันเบรคดาวน์ในสุญญากาศที่ระยะแกป 20 เซนติเมตร ระหว่างอิเล็กโทรดทำด้วย Stainless steel อะ โนดเป็นทรงกลมเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.6 .....	69
3.21 ส่วนประกอบของโครงสร้างสายเคเบิล XLPE.....	70
3.22 แบบขั้วต่อตัวนำสายเคเบิล XLPE 12/20 kV ใช้ทดสอบในขั้วต่อสายฉนวนเหลว.....	71
3.23 ขั้วต่อตัวนำสายเคเบิลแรงดันสูงกึ่งจากทองแดง.....	71
3.24 แบบขั้วต่อตัวนำสายเคเบิล XLPE 24 kV ใช้ทดสอบในขั้วต่อสายเคเบิลฉนวนก๊าซ.....	72
3.25 ขั้วต่อตัวนำสายเคเบิลแรงดันสูงกึ่งจากทองแดง.....	72
3.26 แบบฐานรองรับขั้วต่อตัวนำสายเคเบิล XLPE 12/20 kV .....	73
3.27 ชุดฐานรองรับขั้วต่อตัวนำสายเคเบิล XLPE 12/20 kV ขั้วต่อสายฉนวนเหลว.....	73
3.28 แบบฐานรองรับขั้วต่อตัวนำสายเคเบิล XLPE 24 kV ขั้วต่อสายฉนวนก๊าซ.....	74
3.29 ชุดฐานรองรับขั้วต่อตัวนำสายเคเบิล XLPE 24 kV ขั้วต่อสายฉนวนก๊าซ.....	74
3.30 องค์ประกอบการคำนวณสนามไฟฟ้าที่สายเคเบิลในลักษณะทรงกระบอกแกนร่วม.....	75
3.31 คาปาซิเตอร์ทรงกระบอกแกนร่วมมีชั้นฉนวนซ้อนของสายเคเบิล a) แรงดันกระจายใน ชั้นฉนวนของสายเคเบิล r <sub>1</sub> , r <sub>2</sub> , ..., r <sub>n</sub> b) สนามไฟฟ้ากระจายในชั้นฉนวนของสาย เคเบิล r <sub>1</sub> , r <sub>2</sub> , ..., r <sub>n</sub> .....	80
3.32 สายเคเบิลแรงดันสูงในขั้วต่อสายรอบนอกมีฉนวนเป็นอากาศ.....	80
3.33 การกระจายของสนามไฟฟ้าที่สายเคเบิล แบบ Refractive Stress Control มีลักษณะที่มี ค่าเส้นศักย์ไฟฟ้าที่สม่ำเสมอเป็นลำดับของฉนวน.....	82
3.34 ท่ออะคลีลิกใสขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 13 เซนติเมตร.....	83

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.35 แบบส่วนแรกฐานวงแหวนเหล็กหล่อที่ใช้ยึดติดกับท่ออะคลีลิกใส.....	84
3.36 แบบส่วนที่สองฝาปิดที่เจาะสำหรับรอยสายเคเบิล XLPE ขนาด 24 kV.....	84
3.37 แบบฝาปิดอัดซีดกันก๊าซซึมผ่านช่องว่างของฝาปิดในส่วนที่สอง.....	85
3.38 ฝาปิดอัดซีดกันก๊าซซึมผ่านช่องว่าง.....	85
3.39 ฝาปิดชุดทดสอบขั้วต่อสายเคเบิล XLPE 24 kV พร้อมติดตั้งเกจวัดความดันก๊าซ และสูญญากาศ.....	86
3.40 ลักษณะของฝาปิดชุดทดสอบขั้วต่อสายเคเบิล XLPE 24 kV พร้อมติดตั้งเกจวัด ความดันก๊าซและสูญญากาศ.....	86
3.41 ชุดลดความเครียดสนามไฟฟ้าทำจากอลูมิเนียม.....	87
3.42 ลักษณะของขั้วต่อสายเคเบิลสำหรับการทดสอบหาค่า PD และ Dielectric Loess.....	87
4.1 แบบของการทดสอบของขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงเพื่อหาค่าดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้น	
ก) แบบของขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงที่ไม่มีสายเคเบิลต่อและไม่มีฝาปิด	
ข) แบบของขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงที่ไม่มีสายเคเบิลต่อและมีฝาปิด	
ค) แบบของขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงที่ไม่มีสายเคเบิลต่อและไม่มีฝาปิดพร้อมกับชุดลด โคโรนาดีสชาร์จ	
ง) แบบของขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงที่ไม่มีสายเคเบิลต่อและมีฝาปิดพร้อมกับชุดลด โคโรนาดีสชาร์จ.....	90
4.2 ท่ออคลีลิกแบบไม่มีตัวลดความเครียดแบบปิดฝา( Type A).....	91
4.3 ท่ออคลีลิกแบบไม่มีตัวลดความเครียดแบบปิดฝา ( Type A).....	91
4.4 ท่ออคลีลิกแบบมีตัวลดความเครียด แบบเปิดฝา (Type B) .....	92
4.5 ท่ออคลีลิกแบบมีตัวลดความเครียด แบบปิดฝา (Type B).....	92
4.6 วงจรการทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วน(PD) ที่ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV.....	93
4.7 ค่าดิสชาร์จบางส่วน(PD) ของการทดสอบแบบ A ที่ระดับแรงดัน 12 kV	
มีค่า PD = 0 pCรูปที่ .....	94
4.8 ค่าดิสชาร์จบางส่วน(PD) ของการทดสอบแบบ A ที่ระดับแรงดัน 24 kV	
มีค่า PD = 0 pC.....	94

# สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.9 ค่าคิซหาร์จบางส่วน(PD) ของการทดสอบแบบ B ที่ระดับแรงดัน 12 kV มีค่า PD = 0 pC.....	95
4.10 ค่าคิซหาร์จบางส่วน(PD) ของการทดสอบแบบ B ที่ระดับแรงดัน 24 kV มีค่า PD = 0 pC.....	95
4.11 ค่าคิซหาร์จบางส่วน(PD) ของการทดสอบแบบ C ที่ระดับแรงดัน 12 kV มีค่า PD = 0 pC.....	96
4.12 ค่าคิซหาร์จบางส่วน(PD) ของการทดสอบแบบ C ที่ระดับแรงดัน 24 kV มีค่า PD = 0 pC.....	96
4.13 ค่าคิซหาร์จบางส่วน(PD) ของการทดสอบแบบ D ที่ระดับแรงดัน 12 kV มีค่า PD = 0 pC.....	97
4.14 ค่าคิซหาร์จบางส่วน(PD) ของการทดสอบแบบ D ที่ระดับแรงดัน 24 kV มีค่า PD = 0 pC .....	97
4.15 วงจรวัดค่าคาปาซิแตนซ์และเฟกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก .....	98
4.16 วงจร Schering bridge.....	99
4.17 เวกเตอร์ไดอาแกรมของวงจร Schering bridge.....	100
5.1 วงจรในการทดสอบฉนวนของสายเคเบิลแรงสูง XLPE.....	107
5.2 การทดสอบสายเคเบิลแรงดันสูง XLPE (24 kV/240 sq.mm) ภายในห้องปฏิบัติการ.....	108
5.3 วงจรการทำงานของ การทดสอบหาค่าคิซหาร์จบางส่วน(PD) ที่เกิดขึ้นในสายเคเบิล แรงดันสูง XLPE ขนาดแรงดัน 24 kV 240 Sq. mm.....	109
5.4 กระบวนการทดสอบวัดค่าคิซหาร์จบางส่วน(PD)ในขั้วต่อสายเคเบิล แรงดันสูง XLPE 24 kV.....	110
5.5 การทดสอบหาค่าคิซหาร์จบางส่วนแบบ Measurement Routine: 15 sec ของสายเคเบิลแรง ดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ อากาศ(Air) อัดอากาศที่ 0.5 bar ที่แรงดันทดสอบ 12 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD> 5.8 pC .....	112

# สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่

หน้า

- 5.6 การทดสอบหาค่าคิซหาร์จบางส่วนแบบ Measurement Analyzer: 2 min ของสายเคเบิล แรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ อากาศ(Air) อัดอากาศ ที่ 0.5 bar ที่แรงดันทดสอบ 12 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD< 5.0 pC .....112
- 5.7 การทดสอบหาค่าคิซหาร์จบางส่วนแบบ Measurement Routine: 15 sec ของสายเคเบิล แรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ อากาศ(Air) อัดอากาศ ที่ 1.0 bar ที่แรงดันทดสอบ 12 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD> 5.3 pC.....113
- 5.8 การทดสอบหาค่าคิซหาร์จบางส่วนแบบ Measurement Analyzer: 2 min ของสายเคเบิล แรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ อากาศ(Air) อัดอากาศ ที่ 1.0 bar ที่แรงดันทดสอบ 12 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD< 5.0 pC.....113
- 5.9 การทดสอบหาค่าคิซหาร์จบางส่วนแบบ Measurement Routine: 15 sec ของสายเคเบิล แรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ อากาศ(Air) อัดอากาศ ที่ 1.5 bar ที่แรงดันทดสอบ 12 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD> 4.8 pC.....114
- 5.10 การทดสอบหาค่าคิซหาร์จบางส่วนแบบ Measurement Analyzer: 2 min ของสายเคเบิล แรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ อากาศ(Air) อัดอากาศ ที่ 1.5 bar ที่แรงดันทดสอบ 12 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD< 5.0 pC.....114
- 5.11 การทดสอบหาค่าคิซหาร์จบางส่วนแบบ Measurement Routine: 15 sec ของสายเคเบิล แรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ อากาศ(Air) อัดอากาศ ที่ 2.0 bar ที่แรงดันทดสอบ 12 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD> 4.2 pC.....115
- 5.12 การทดสอบหาค่าคิซหาร์จบางส่วนแบบ Measurement Analyzer: 2 min ของสายเคเบิล แรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ อากาศ(Air) อัดอากาศ ที่ 2.0 bar ที่แรงดันทดสอบ 12 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD< 5.0 pC.....115
- 5.13 การทดสอบหาค่าคิซหาร์จบางส่วนแบบ Measurement Routine: 15 sec ของสายเคเบิล แรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ อากาศ(Air) อัดอากาศ ที่ 2.5 bar ที่แรงดันทดสอบ 12 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD> 2.7 pC.....116







## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.41 การทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนแบบ Measurement Routine: 15 sec ของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ ออกซิเจน(Oxygen) อัดความดันที่ 0.5 bar ที่แรงดันทดสอบ 12 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD> 5.5 pC.....	130
5.42 การทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนแบบ Measurement Analyzer: 2 min ของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ อากาศ(Air) อัดอากาศที่ 0.5 bar ที่แรงดันทดสอบ 12 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD< 5.5 pC.....	130
5.43 การทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนแบบ Measurement Routine: 15 sec ของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ ออกซิเจน(Oxygen) อัดความดันที่ 1.0 bar ที่แรงดันทดสอบ 12 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD> 4.8 pC.....	131
5.44 การทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนแบบ Measurement Analyzer: 2 min ของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ ออกซิเจน(Oxygen) อัดความดันที่ 1.0 bar ที่แรงดันทดสอบ 12 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD< 5.0 pC.....	131
5.45 การทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนแบบ Measurement Routine: 15 sec ของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ ออกซิเจน(Oxygen) อัดความดันที่ 1.5 bar ที่แรงดันทดสอบ 12 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD> 3.1 pC.....	132
5.46 การทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนแบบ Measurement Analyzer: 2 min ของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ ออกซิเจน(Oxygen) อัดความดันที่ 1.5 bar ที่แรงดันทดสอบ 12 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD< 5.0 pC.....	132

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.47 การทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนแบบ Measurement Routine: 15 sec ของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ ออกซิเจน(Oxygen) อัดความดันที่ 2.0 bar ที่แรงดันทดสอบ 12 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD> 5.5 pC.....	133
5.48 การทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนแบบ Measurement Ana'lyzer: 2 min ของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ ออกซิเจน(Oxygen) อัดความดันที่ 2.0 bar ที่แรงดันทดสอบ 12 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD< 5.0 pC.....	133
5.49 การทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนแบบ Measurement Routine: 15 sec ของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ ออกซิเจน(Oxygen) อัดความดันที่ 2.5 bar ที่แรงดันทดสอบ 12 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD> 2.2 pC.....	134
5.50 การทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนแบบ Measurement Analyzer: 2 min ของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ ออกซิเจน(Oxygen) อัดความดันที่ 2.5 bar ที่แรงดันทดสอบ 12 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD< 5.0 pC.....	134
5.51 การทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนแบบ Measurement Routine: 15 sec ของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ ออกซิเจน(Oxygen) อัดความดันที่ 3.0 bar ที่แรงดันทดสอบ 12 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD> 2.0 pC.....	135
5.52 การทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนแบบ Measurement Analyzer: 2 min ของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ ออกซิเจน(Oxygen) อัดความดันที่ 3.0 bar ที่แรงดันทดสอบ 12 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD< 5.0 pC.....	135

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.53 การทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนแบบ Measurement Routine: 15 sec ของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ ออกซิเจน(Oxygen) อัดความดันที่ 0.5 bar ที่แรงดันทดสอบ 24 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD> 6.7 pC.....	136
5.54 การทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนแบบ Measurement Analyzer: 2 mir. ของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ ออกซิเจน(Oxygen) อัดความดันที่ 0.5 bar ที่แรงดันทดสอบ 24 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD< 6.7 pC.....	136
5.55 การทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนแบบ Measurement Routine: 15 sec ของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ ออกซิเจน(Oxygen) อัดความดันที่ 1.0 bar ที่แรงดันทดสอบ 24 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD> 5.5 pC.....	137
5.56 การทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนแบบ Measurement Analyzer: 2 min ของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ ออกซิเจน(Oxygen) อัดความดันที่ 1.0 bar ที่แรงดันทดสอบ 24 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD< 5.0 pC.....	137
5.57 การทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนแบบ Measurement Routine: 15 sec ของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ ออกซิเจน(Oxygen) อัดความดันที่ 1.5 bar ที่แรงดันทดสอบ 24 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD> 4.9 pC.....	138
5.58 การทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนแบบ Measurement Analyzer: 2 min ของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ ออกซิเจน(Oxygen) อัดความดันที่ 1.5 bar ที่แรงดันทดสอบ 24 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD< 5.0 pC.....	138

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่

หน้า

- 5.59 การทดสอบหาค่าคิซซาร์จบางส่วนแบบ Measurement Routine: 15 sec ของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ ออกซิเจน(Oxygen) อัดความดันที่ 2.0 bar ที่แรงดันทดสอบ 24 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD> 3.7 pC.....139
- 5.60 การทดสอบหาค่าคิซซาร์จบางส่วนแบบ Measurement Analyzer: 2 min ของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ ออกซิเจน(Oxygen) อัดความดันที่ 2.0 bar ที่แรงดันทดสอบ 24 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD< 6.7 pC.....139
- 5.61 การทดสอบหาค่าคิซซาร์จบางส่วนแบบ Measurement Routine: 15 sec ของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ ออกซิเจน(Oxygen) อัดความดันที่ 2.5 bar ที่แรงดันทดสอบ 24 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD> 2.8 pC.....140
- 5.62 การทดสอบหาค่าคิซซาร์จบางส่วนแบบ Measurement Analyzer: 2 min ของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ ออกซิเจน(Oxygen) อัดความดันที่ 2.5 bar ที่แรงดันทดสอบ 24 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD< 5.0 pC.....140
- 5.63 การทดสอบหาค่าคิซซาร์จบางส่วนแบบ Measurement Routine: 15 sec ของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ ออกซิเจน(Oxygen) อัดความดันที่ 3.0 bar ที่แรงดันทดสอบ 24 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD> 2.0 pC.....141
- 5.64 การทดสอบหาค่าคิซซาร์จบางส่วนแบบ Measurement Analyzer: 2 min ของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ ออกซิเจน(Oxygen) อัดความดันที่ 3.0 bar ที่แรงดันทดสอบ 24 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD< 5.0 pC.....141
- 5.65 การทดสอบหาค่าคิซซาร์จบางส่วนแบบ Measurement Routine: 15 sec ของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ ออกซิเจน(Oxygen) อัดความดันที่ 0.5 bar ที่แรงดันทดสอบ 36 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD> 7.1 pC142

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.66 การทดสอบหาค่าคิซาร์จบางส่วนแบบ Measurement Analyzer: 2 min ของสายเคเบิล แรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ ออกซิเจน(Oxygen) อัดความดันที่ 0.5 bar ที่แรงดันทดสอบ 36 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD < 7.1 pC.....	142
5.67 การทดสอบหาค่าคิซาร์จบางส่วนแบบ Measurement Routine: 15 sec ของสายเคเบิล แรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ ออกซิเจน(Oxygen) อัดความดันที่ 1.0 bar ที่แรงดันทดสอบ 36 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD > 6.3 pC.....	143
5.68 การทดสอบหาค่าคิซาร์จบางส่วนแบบ Measurement Analyzer: 2 min ของสายเคเบิล แรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ ออกซิเจน(Oxygen) อัดความดันที่ 1.0 bar ที่แรงดันทดสอบ 36 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD < 6.3 pC.....	143
5.69 การทดสอบหาค่าคิซาร์จบางส่วนแบบ Measurement Routine: 15 sec ของสายเคเบิล แรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ ออกซิเจน(Oxygen) อัดความดันที่ 1.5 bar ที่แรงดันทดสอบ 36 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD > 6.0 pC.....	144
5.70 การทดสอบหาค่าคิซาร์จบางส่วนแบบ Measurement Analyzer: 2 min ของสายเคเบิล แรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ ออกซิเจน(Oxygen) อัดความดันที่ 1.5 bar ที่แรงดันทดสอบ 36 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD < 6.0 pC.....	144
5.71 การทดสอบหาค่าคิซาร์จบางส่วนแบบ Measurement Routine: 15 sec ของสายเคเบิล แรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ ออกซิเจน(Oxygen) อัดความดันที่ 2.0 bar ที่แรงดันทดสอบ 36 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD > 5.8 pC.....	145

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่

หน้า

- 5.72 การทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนแบบ Measurement Analyzer: 2 min ของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ ออกซิเจน(Oxygen) อัดความดันที่ 2.0 bar ที่แรงดันทดสอบ 36 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD< 5.8 pC.....145
- 5.73 การทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนแบบ Measurement Routine: 15 sec ของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ ออกซิเจน(Oxygen) อัดความดันที่ 2.5 bar ที่แรงดันทดสอบ 36 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD> 5.3 pC.....146
- 5.74 การทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนแบบ Measurement Analyzer: 2 min ของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ ออกซิเจน(Oxygen) อัดความดันที่ 2.5 bar ที่แรงดันทดสอบ 36 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD< 7.1 pC.....146
- 5.75 การทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนแบบ Measurement Routine: 15 sec ของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ ออกซิเจน(Oxygen) อัดความดันที่ 3.0 bar ที่แรงดันทดสอบ 36 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD> 3.3 pC.....147
- 5.76 การทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนแบบ Measurement Analyzer: 2 min ของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ ออกซิเจน(Oxygen) อัดความดันที่ 3.0 bar ที่แรงดันทดสอบ 36 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD< 3.3 pC.....147
- 5.77 การทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนแบบ Measurement Routine: 15 sec ของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ อากาศ (Air) ทำสุญญากาศที่ 20 in.Hg ที่แรงดันทดสอบ 12 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD> 5.5 .....148

# สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่

หน้า

5.78 การทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนแบบ Measurement Analyzer: 2 min ของสายเคเบิล แรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ อากาศ (Air) ทำสุญญากาศที่ 20 in.Hg ที่แรงดันทดสอบ 12 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD> 5.5 pC .....	148
5.79 การทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนแบบ Measurement Routine: 15 sec ของสายเคเบิล แรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ อากาศ (Air) ทำสุญญากาศที่ 20 in.Hg ที่แรงดันทดสอบ 24 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD> 5.8 pC.....	149
5.80 การทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนแบบ Measurement Analyzer: 2 min ของสายเคเบิล แรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ อากาศ (Air) ทำสุญญากาศที่ 20 in.Hg ที่แรงดันทดสอบ 24 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD> 5.8 pC.....	149
5.81 การทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนแบบ Measurement Routine: 15 sec ของสายเคเบิล แรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ อากาศ (Air) ทำสุญญากาศที่ 20 in.Hg ที่แรงดันทดสอบ 36 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD pC PD> 6.7 pC.....	150
5.82 การทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนแบบ Measurement Analyzer: 2 min ของสายเคเบิล แรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ อากาศ (Air) ทำสุญญากาศที่ 20 in.Hg ที่แรงดันทดสอบ 36 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD> 6.7 pC .....	150
6.1 วงจร Schering bridge.....	152
6.2 วงจรสมมูลของไดอิเล็กตริกที่แทนพลัง.....	156
6.3 วงจรสมมูลของไดอิเล็กตริก.....	158
6.4 วงจรการทำงานของ การทดสอบหาค่าพลังงานสูญเสียต่อไดอิเล็กตริกที่เกิดขึ้นในสายเคเบิล แรงดันสูง XLPE ขนาดแรงดัน 24 kV 240 Sq. mm.....	159
6.5 เครื่องวัด Capacitance and dissipation factor ( $\tan\delta$ ) bridge type 2809 a .....	162
6.6 ก) การทำสุญญากาศให้กับอุปกรณ์ทดสอบความเป็ฉนวน ข) ถังบรรจุก๊าซออกซิเจน.....	163

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 คุณสมบัติของไดอิเล็กตริกของเหลวที่นิยมใช้งานเป็นฉนวนไฟฟ้า.....	27
2.2 คุณสมบัติของฉนวนน้ำมันชนิดต่างๆที่สำคัญ.....	28
3.1 ความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าของวัสดุฉนวนขึ้นอยู่กับแฟกเตอร์ต่างๆ.....	42
3.2 Properties of Insulating Materials.....	60
3.3 ค่าคงตัว A และ B ของก๊าซต่างๆ.....	62
4.1 การทดสอบค่า Dielectric Loess ของขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงหัวที่ 1 (ไม่ปิดฝา).....	102
4.2 การทดสอบค่า Dielectric Loess ของขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูง หัวที่ 1 (ปิดฝา).....	102
4.3 การทดสอบค่า Dielectric Loess ของขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงหัวที่ 2 (ไม่ปิดฝา).....	103
4.4 การทดสอบค่า Dielectric Loess ของขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูง หัวที่ 2 (ปิดฝา).....	103
5.1 แสดงการหาค่าที่ทำให้เกิดการวาวไฟตามผิวของสายเคเบิล.....	106
5.2 ผลทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซคือ ก๊าซออกซิเจน (Oxygen) อัดความดันที่ 0.5-3.0 bar ที่แรงดันทดสอบ 12, 24, 36 kV ความถี่ 50 Hz.....	152
5.3 ผลทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนคือ การทำสุญญากาศ (Vacuum) อัดความดันที่ 0.5-3.0 bar ที่แรงดันทดสอบ 12, 24, 36 kV ความถี่ 50 Hz.....	152
6.1 ผลการทดสอบการวัดค่าคาปาซิแตนซ์ของชุดทดสอบร่วมกับสายเคเบิลในกรณีที่มีอากาศปกติ ที่ความชื้นสัมบูรณ์ที่ $38 \text{ g/m}^3$ อุณหภูมิห้อง $27.2 \text{ C}^\circ$ .....	162
6.2 ผลการทดสอบการวัดค่าคาปาซิแตนซ์ของชุดทดสอบร่วมกับสายเคเบิลในกรณี Vacuum (สุญญากาศภายในท่อ) ความชื้นสัมบูรณ์ที่ $38 \text{ g/m}^3$ อุณหภูมิห้อง $27.5 \text{ C}^\circ$ .....	163
6.3 ผลการทดสอบการวัดค่าคาปาซิแตนซ์ของชุดทดสอบร่วมกับสายเคเบิลในกรณีอัดอากาศจำนวน 2 bar ความชื้นสัมบูรณ์ที่ $38 \text{ g/m}^3$ อุณหภูมิห้อง $28\text{C}^\circ$ .....	163
6.4 ผลการทดสอบการวัดค่าคาปาซิแตนซ์ของชุดทดสอบร่วมกับสายเคเบิลในกรณีอัดก๊าซออกซิเจน ( $\text{O}_2$ ) จำนวน 2 bar ความชื้นสัมบูรณ์ $38 \text{ g/m}^3$ อุณหภูมิห้อง $28\text{C}^\circ$ .....	164
7.1 เปรียบเทียบการใช้ฉนวนและก๊าซ(Compress and Vacuum) เป็นตัวลดความเครียดสนามไฟฟ้า.....	167

# บทที่ 1

## บทนำ

เนื่องจากปัญหาสภาพเศรษฐกิจของประเทศในปัจจุบันมีปัญหาในเรื่องของค่าเงินบาทเป็นอย่างมากการที่จะนำเข้าเครื่องมือหรืออุปกรณ์การทดสอบทางวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงซึ่งในอดีตสามารถจัดซื้อหรือนำเข้ามาในประเทศก็มีราคาสูงอยู่แล้วแต่ปัจจุบันค่าของเงินยิ่งสูงเป็นเท่าตัว ฉะนั้นการศึกษาค้นคว้าวิจัยทางวิศวกรรมศาสตร์ของประเทศควรคำนึงถึงประโยชน์และการนำไปใช้งานให้เหมาะสมลดต้นทุนการผลิตที่สูงหรือการเสียคุณภาพ ค่าของผู้วิจัยจึงมุ่งถึงการผลิตหรือออกแบบสร้างอุปกรณ์การทดสอบทางสาขาที่เกี่ยวข้องและชำนาญการคือในสาขาวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง ในเรื่องของโรงงานผลิตสายเคเบิลแรงสูงของประเทศที่มีเพิ่มขึ้นในการติดตั้งสายเคเบิลแรงดันสูงฝังใต้ดินหรือเดินสายใต้น้ำ(Under Ground Cable) ให้มีความเหมาะสมกับภูมิทัศน์ที่สวยงาม การตรวจสอบก่อนการติดตั้งใช้งานจึงมีความสำคัญยิ่งตามมาตรฐานการทดสอบที่กำหนดโดยสามารถออกแบบและสร้างชุดทดสอบสายเคเบิลแรงดันสูง XLPE 24 กิโลโวลต์ขนาด 240 ตารางมิลลิเมตรเป็นชุดทดสอบต้นแบบเพื่อพัฒนาใช้กับขนาดต่างๆของสายเคเบิลแรงดันสูง

การทดสอบวัดค่าการคายประจุบางส่วนของฉนวนไฟฟ้าหรือที่เรียกว่า “การวัดค่าดิสชาร์จบางส่วน” (Partial Discharge, PD) เป็นการทดสอบความคงทนของไดอิเล็กตริกของฉนวนแข็ง (Solid Dielectric Insulation) คือฉนวน Cross-linked Polyethylene, XLPE ของสายเคเบิลแรงดันสูงที่จะนำไปใช้งานในระบบไฟฟ้าหรือในงานต่างๆ เช่น สาย Single Core และ Tree Cores โดยมีวัตถุประสงค์ในการตรวจสอบจุดผิดปกติเนื่องจากขบวนการผลิตจากโรงงาน โดยหาค่าความคงทนต่อแรงดันใช้งานในระบบไฟฟ้าที่ระดับแรงดันทดสอบต่างๆ ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูง (High Electric Stresses) เกิดขึ้นภายใต้สภาวะของการส่งจ่ายไฟฟ้ากำลังปกติ สามารถทำนายถึงอายุการใช้งานในลักษณะของการเสื่อมสภาพทางกายภาพ โดยการทดสอบแบบไม่ทำลายหรือแตกสลาย (Non-Destructive Testing) เป็นไปตามชนิดของระดับแรงดันทดสอบ เวลาการใช้งานหรือตามระดับแรงดันที่อาจเกิดขึ้นได้ภายใต้สภาวะทั่วไปของระบบไฟฟ้า

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของวิทยานิพนธ์

การนำเสนอปัญหาของงานวิจัยในวิทยานิพนธ์นี้มีจุดประสงค์ในเรื่องของการออกแบบและสร้างชุดทดสอบสายเคเบิลแรงดันสูงแบบฉนวน XLPE ที่มีใช้งานอยู่ทั่วไปในงานระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ที่มีลักษณะงานฝังสายเคเบิลใต้ดินหรือใต้น้ำและสถานีไฟฟ้าแรงสูง ในหลักการก่อนที่

จะมีการติดตั้งสายเคเบิลแรงดันสูงจะต้องมีการทำการทดสอบที่พิกัดแรงดันใช้งาน แรงดันเกินและแรงดันอิมพัลส์ในเวลาที่มาตราฐานกำหนดและการทดสอบคุณลักษณะของฉนวนในสายเคเบิล เช่น การวัดค่าคาปาซิแตนซ์และแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก (Capacitance and Tan $\delta$ ) การวัดค่าดิสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge, PD) ที่เกิดขึ้นในสายเคเบิล ซึ่งในการติดตั้งจะเป็นงานลักษณะถาวรมีการบำรุงรักษาต่ำ ซึ่งในขั้นตอนของการทดสอบจึงถือว่ามีความสำคัญมาก ฉะนั้นปัญหาของงานวิจัยนี้จึงจะนำเสนอการออกแบบและสร้างชุดทดสอบสายเคเบิลหรือขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงสำหรับการวัดค่าดิสชาร์จบางส่วนและพลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก โดยเลือกขนาดสายเคเบิลที่จะใช้ในการทดสอบที่มีใช้งานทั่วไปเป็นส่วนมากคือขนาดสายเคเบิลที่ใช้ในงานส่งจ่ายระบบไฟฟ้ากำลังในระบบ 22 kV และ 24 kV ภายในสถานีไฟฟ้าหรือระบบส่งจ่ายใต้ดินในสถานที่ที่ออกแบบใช้สายใต้ดิน จะต้องมีการทดสอบตามมาตรฐานการทดสอบต่างๆ เช่น IEC No.270, 60502 และ 885-3 ซึ่งสามารถสรุปปัญหาของงานวิจัยที่กำลังศึกษาออกเป็นหลักๆ ดังนี้

1. งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์ในการศึกษาทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง ในเรื่องของการวัดค่าดิสชาร์จบางส่วนและพลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกที่เกิดขึ้นภายในฉนวนแข็งที่นำมาประยุกต์ใช้ในการสร้างฉนวน XLPE ของสายเคเบิล
2. งานวิจัยนี้จะเป็นแนวทางในการออกแบบและสร้างขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงที่ใช้สำหรับทดสอบสายเคเบิลแรงดันสูงที่พิกัดของแรงดันใช้งานสูงขึ้น มาใช้ในการทดสอบในห้องปฏิบัติการทางวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงของประเทศ
3. งานวิจัยนี้จะช่วยลคปัญหาในการใช้งบประมาณที่สูงในการนำเข้าขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงที่ผลิตในต่างประเทศมาใช้

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

จากประสบการณ์ของผู้ทำวิจัยและท่านอาจารย์ที่ปรึกษาในเรื่องของการสอนวิชาปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง การทดสอบในเรื่องไดอิเล็กตริกของแข็งหรือฉนวนแข็งภายในห้องปฏิบัติการนั้นยังมีการเรียนการสอนที่ไม่สามารถทำให้นักศึกษามีความเข้าใจในเรื่องของการทดสอบฉนวนแข็งที่ใช้ในงานจริง จึงเลือกการทดสอบสายเคเบิลแรงดันสูงที่ประยุกต์ใช้ฉนวนแข็งเป็นฉนวน มาทำการทดสอบให้นักศึกษามีความเข้าใจมากยิ่งขึ้นและภายในโครงสร้างของสายเคเบิลเองยังมีรายละเอียดที่จะต้องศึกษาก่อนออกแบบและสร้างขั้วต่อสายเคเบิล ตั้งแต่โครงสร้างของ ตัวนำ ชั้นฉนวนหุ้มสายตัวนำ ชั้นฉนวนสารกึ่งตัวนำ ชั้นฉนวน XLPE และ ชั้นของสายชีลด์ (Shield) ใช้ในการป้องกันสนามไฟฟ้าไปรบกวนคลื่นความถี่สนามแม่เหล็กภายนอก ซึ่งสามารถสรุปเหตุผลในงานวิจัยในปัญหาที่นำเสนอใจออกเป็นดังนี้

1. งานวิจัยนี้มีปัญหาที่น่าสนใจในเรื่องของการออกแบบโครงสร้างของขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงที่ใช้ในวิธีการทดสอบตามขั้นตอนต่างๆ ตามมาตรฐานกำหนด ขั้วต่อสายเคเบิลที่ออกแบบและสร้างขึ้นสำหรับการต่อที่ปลายสายเคเบิลทั้งสองทางคือ ต้นสายและปลายสายจะต้องออกแบบขั้วต่อสายเคเบิลและสร้างขึ้น 2 ชุด เพื่อใช้สำหรับทดสอบสายเคเบิล

2. งานวิจัยนี้มีปัญหาที่น่าสนใจในเรื่องการทดสอบการวัดค่าดิสชาร์จบางส่วนที่จะเกิดขึ้นภายในสายเคเบิลแรงดันสูงที่เราไม่สามารถทำการตรวจสอบจากภายนอกได้จึงต้องมีการวัดค่าดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานหรือไม่ก่อนนำไปใช้งาน ถ้าไม่มีการตรวจสอบที่ถูกต้องตามมาตรฐานก็อาจเป็นสาเหตุของความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นต่อไป

3. งานวิจัยนี้มีปัญหาที่น่าสนใจในเรื่องการศึกษาถึงคุณลักษณะและพฤติกรรมของฉนวนที่ใช้ในการควบคุมการหักเหของสนามไฟฟ้าที่ปลายสายเคเบิลที่ใช้ทดสอบ เช่น การใช้ฉนวนเหลวคือ น้ำมันหม้อแปลง น้ำมันพีช และ น้ำบริสุทธิ์ การใช้ฉนวนก๊าซ คือ อากาศ การอัดอากาศ และการทำสุญญากาศ

### 1.3 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการทำวิจัย

งานวิจัยนี้ได้มีการตรวจสอบข้อมูลในเชิงพาณิชย์ในเรื่องของการค้าชุดทดสอบสายเคเบิลแรงดันสูงหรือขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงที่ใช้สำหรับการทดสอบแล้วพอสมควร จะใช้โครงสร้างการควบคุมการหักเหของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ปลายสายเคเบิลแรงดันสูงด้วยฉนวนเหลวคือ น้ำมันหม้อแปลง และในระดับแรงดันสูงที่มากกว่า 75 กิโลโวลต์ จะใช้ฉนวนเหลว คือ น้ำบริสุทธิ์ ยังไม่มีการออกแบบและพัฒนางานวิจัยในส่วนนี้เลยที่ใช้ฉนวนเหลวที่ทำจากน้ำมันพีช และในส่วนที่เป็นทฤษฎีและหลักการใหม่ที่จะนำมาใช้ในการออกแบบและสร้างขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงแบบใหม่ก็คือ การควบคุมสนามไฟฟ้าที่ปลายสายเคเบิลด้วยฉนวนก๊าซ คือ อากาศ โดยการอัดอากาศเข้าไป บริเวณขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงให้เป็นฉนวนที่ใช้ควบคุมการหักเหของสนามไฟฟ้าแทนฉนวนเหลว และยังมีการศึกษาในส่วนของการทำสุญญากาศในบริเวณดังกล่าวเพื่อทำหน้าที่ควบคุมการหักเหของสนามไฟฟ้า เพื่อเป็นแนวทางในการวิจัยและพัฒนานำฉนวนก๊าซมาใช้ในงาน

### 1.4 เปรียบเทียบกับหลักการของงานวิจัยที่มีอยู่เดิม

จากหลักการของงานวิจัยในเรื่องของเทคโนโลยีการทดสอบสายเคเบิลแรงดันสูง ที่อยู่ในงานอุตสาหกรรมทดสอบการใช้งานของสายเคเบิลตามมาตรฐานที่กำหนดของ IEC และ IEEE โดยนำหลักการพื้นฐานของฉนวนเหลวคือ น้ำมันหม้อแปลงมาใช้ในการควบคุมการหักเหของ

สนามไฟฟ้า จะประสบกับปัญหาของขนาดพิกัดแรงดันที่จำกัดอยู่ระดับหนึ่ง แต่การเลือกใช้ฉนวน ก๊าซคือ อากาศในการควบคุมการหักเหของสนามไฟฟ้า โดยการเพิ่มค่าความหนาแน่นของฉนวน ด้วยวิธีการอัดความดันของอากาศให้มีค่าเพิ่มมากขึ้นจะมีผลทำให้ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ของ อากาศที่ขึ้นอยู่กับความดันบรรยากาศและอุณหภูมิ

## 1.5 ขอบเขตของงานวิจัย

ในการศึกษาของวิทยานิพนธ์นี้ ได้กำหนดขอบเขตของงานวิจัยออกเป็นข้อดังนี้

1. การออกแบบและสร้างขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูง XLPE ขนาดพิกัดแรงดัน 24 kV
2. การวิเคราะห์หาค่าคิซาร์จบางส่วนและพลังงานสูญเสียโคอีเล็กตริกของที่บริเวณขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูง (Terminator Cable)
3. การวิเคราะห์หาค่าคิซาร์จบางส่วนและพลังงานสูญเสียโคอีเล็กตริกของสายเคเบิลแรงดันสูง XLPE ขนาดพิกัดแรงดัน 24 kV

## 1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

ขั้นตอนในการศึกษาวิจัยของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ผู้วิจัยได้แบ่งขั้นตอนตามลำดับของรายละเอียด จะประกอบอยู่ในแต่ละบทของวิทยานิพนธ์

1. การศึกษาแนวทางของงานวิจัยที่น่าที่จะเป็นประโยชน์ต่อสาขาวิชาเอก (วิศวกรรมไฟฟ้า) มีจุดประสงค์และขอบเขตของงานวิจัยที่มีบทสรุปที่ถูกต้องตามหลักการทฤษฎี (บทที่ 1)
2. ค้นคว้าหาความรู้ในเรื่องที่จะต้องนำมาใช้ประกอบกับงานวิจัย โดยมีพื้นฐานของทฤษฎีและหลักการที่จะต้องนำไปใช้ในการทำวิทยานิพนธ์ (บทที่ 2)
3. การออกแบบและสร้างขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูง ขั้นตอนการออกแบบและคำนวณ เทคนิคของการฉนวนบริเวณขั้วต่อสายเคเบิล (บทที่ 3)
4. การวิเคราะห์หาค่าแฟกเตอร์ต่างๆ ที่ขั้วต่อสายเคเบิล การศึกษาพฤติกรรมของค่าความเป็นฉนวนกับการกระจายของสนามไฟฟ้าที่บริเวณขั้วต่อสายเคเบิล (บทที่ 4)
5. การวิเคราะห์และทดสอบหาค่าคิซาร์จบางส่วน (Partial Discharge) ของสายเคเบิลแรงดันสูง โดยใช้ขั้วต่อสายที่ได้ออกแบบและสร้างขึ้นในการวิจัย (บทที่ 5)
6. การวิเคราะห์และทดสอบหาค่าพลังงานสูญเสียโคอีเล็กตริก (Dielectric Loss) ของสายเคเบิลแรงดันสูง โดยใช้ขั้วต่อสายที่ได้ออกแบบและสร้างขึ้นในการวิจัย (บทที่ 6)
7. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ(บทที่ 7)

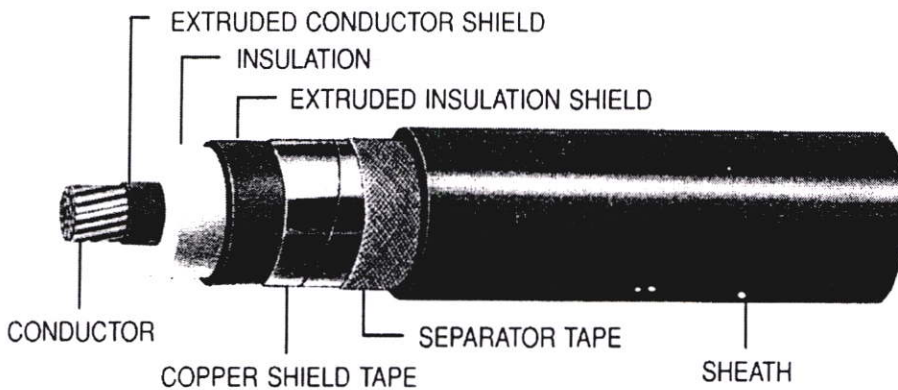
## บทที่ 2

# ทฤษฎีพื้นฐาน

### 2.1 บทนำ

วิทยานิพนธ์ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องในการทำงานวิจัยในส่วนของปัญหาเฉพาะที่จะศึกษาในเรื่องของความเข้าใจในหลักการพื้นฐานของโครงสร้างของสายเคเบิลแรงดันสูง พื้นฐานของการเกิดคิซาร์จบางส่วน หลักการตรวจสอบการเกิดคิซาร์จบางส่วน เทคนิคการวัดค่าคิซาร์จบางส่วน การจำแนกชนิดของคิซาร์จบางส่วนในสายเคเบิลแรงดันสูง

### 2.2 โครงสร้างของสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวน XLPE



รูปที่ 2.1 ส่วนต่างๆของสายเคเบิลแรงสูงฉนวน XLPE

สายตัวนำที่จะกล่าวนี้เป็นสายตัวนำที่ใช้ในระบบแรงดัน 22 kV และ 24 kV ซึ่งเป็นสายทองแดงหุ้มฉนวน XLPE การเลือกใช้ทองแดงเนื่องจากเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี ส่วนประกอบของสายเคเบิลได้จินตแสดงดังรูปที่ 2.1

#### 2.2.1 ตัวนำ (Conductor)

อาจเป็นได้ทั้งทองแดงหรืออลูมิเนียม แต่โดยส่วนมากใช้ตัวนำทองแดง ตัวนำจะทำหน้าที่นำกระแสไฟฟ้า เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวนำก็จะเกิดความร้อน ( $I^2R$ ) ถ้ามีกระแสไหลมาก ๆ หรือสายมีความต้านทานสูง ก็จะเกิดความร้อนสูง ความร้อนนี้จะกระจายผ่านส่วนต่างๆ ของสายไฟฟ้าส่วนที่ห่อหุ้มตัวนำ การระบายความร้อนนี้จะเร็วหรือช้าขึ้นอยู่กับความสามารถในการนำความร้อนของวัสดุที่ใช้หุ้มสายและอุณหภูมิของอากาศโดยรอบ

### 2.2.2 Extruded Conductor Shield (Conductive Strand-Shielding)

เป็นวัสดุกึ่งตัวนำทำหน้าที่คล้าย Stress control คือกระจายสนามไฟฟ้าไม่ให้หนาแน่น ณ จุดใดจุดหนึ่ง และยังทำหน้าที่ลดช่องว่างระหว่างสายตัวนำกับฉนวนอีกด้วย ในเคเบิลที่มีขนาด 10 kV ขึ้นไป ผิวสายตัวนำต้องเรียบและจับยึดกับฉนวนเป็นอย่างดี ดังนั้นจึงต้องทำการเคลือบผิวของสายตัวนำด้วยสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) ระหว่างผิวสายตัวนำกับฉนวน เพื่อควบคุมเส้นแรงไฟฟ้าบนผิวสายตัวนำและไม่ให้เกิดมีโพรงอากาศใดๆ บนผิวตัวนำกับฉนวนขณะที่สายตัวนำมีการโค้งงอหรือเปลี่ยนรูปร่างเนื่องจากความร้อน นอกจากนั้นเนื้อผิวนอกของฉนวน XLPE ระหว่าง Screen ต้องเคลือบผิวด้วย Semi conductor เพื่อป้องกันการเกิด Partial Discharge การเคลือบผิวสายตัวนำนอกและผิวนอกของฉนวน XLPE ด้วย Semiconductor จะกระทำในระหว่างกระบวนการหลอมละลาย (Extruding Process)

### 2.2.3 Insulation คือวัสดุที่ทำหน้าที่เป็นฉนวนไฟฟ้า

มีอยู่หลายชนิดด้วยกัน เช่น PVC, Silicone Rubber, Polyethylene and Cross-link polyethylene (XLPE) เป็นต้น ความหนาแน่นของฉนวนจะเหมาะสมกับระดับแรงดันที่ใช้ คุณสมบัติของฉนวนที่ดีควรเป็นดังนี้คือ

- 2.2.3.1 High Dielectric Strength คือมีค่าความต้านทานสูงต่อแรงดันไฟฟ้า
- 2.2.3.2 Low Dielectric Constant หรือ Specific Inductive Capacitance ถ้ามีค่าต่ำ จะให้เกิดค่า Capacitance ระหว่างสายตัวนำกับ Shield ต่ำด้วย เนื่องจากถ้า Capacitance มีค่าสูง ค่าสูญเสียก็จะสูงตามไปด้วย
- 2.2.3.3 Low Power Factor เนื่องจากกระแสลับจะทำให้เกิดค่า Leakage Current ในฉนวนเป็นผลให้เกิดค่าสูญเสียในรูปของความร้อนซึ่งเรียกว่า Dielectric Loss อัตราของ Dielectric Loss ต่อ Apparent Loss คือ Power Factor เนื่องจากค่า Dielectric Loss เป็นค่าที่ไม่ต้องการให้เกิดขึ้นในระบบ ถ้ามีค่านี้นี้ต่ำจะเป็นผลทำให้ Power factor ต่ำด้วย เราจึงอาจดูค่าของ Dielectric Loss ได้จากค่า Power factor
- 2.2.3.4 Moisture Resistance ต้องมีค่าสูงหรือค่าความต้านทานต่อความชื้นสูง เพราะถ้าความต้านทานต่อความชื้นต่ำ วัสดุก็จะดูดซึมความชื้นได้มากจะเป็นผลให้คุณสมบัติในการเป็นฉนวนไฟฟ้าลดลงและเสื่อมสภาพในที่สุด
- 2.2.3.5 High Resistance to Heat ฉนวนควรทนต่อความร้อนที่อุณหภูมิสูงๆ ได้ เมื่อสายตัวนำมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านจะเกิดความร้อนได้ดังกล่าวแล้วในตอนต้น ถ้าฉนวนทนความร้อนได้สูง สายไฟฟ้านั้นก็จะนำกระแสได้มากด้วย

2.2.3.6 High Resistance to Corona Damage ดังที่ได้กล่าวไว้ในตอนต้นว่า ระหว่างสายตัวนำกับ Shield จะมีลักษณะเป็น Capacitance และจะมีความต่างศักย์ระหว่างสายตัวนำกับ Shield ในกรณีที่เกิดมีช่องอากาศขึ้นในฉนวน (Void) จะเกิดความต่างศักย์ระหว่างผนังของช่องอากาศด้านที่อยู่ใกล้กับ Shield กับด้านที่อยู่ไกลตัวนำจะทำให้อากาศใน Void นั้นเกิด Corona Discharge ทำให้เกิดพลังงานไฟฟ้าสูญเสียอีกด้วย ฉนวนบริเวณนั้นจะเกิดความร้อนและไหม้กลายเป็น Carbon และ Void นี้ก็จะโตขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งฉนวนเกิด Breakdown และใช้ไม่ได้อีกต่อไป แต่อาการแบบนี้จะเกิดขึ้นและขยายตัวไปได้ค่อนข้างช้าในระยะแรกที่ทำให้การติดตั้งใหม่ๆ จึงไม่เกิดสภาพเช่นนี้ ในการผลิตและการใช้งานควรมีการทดสอบค่า Corona Discharge ไม่ให้มีค่ามากจนอาจเกิดอันตรายได้ในช่วงระยะเวลาอายุการใช้งานของสายไฟฟ้า

#### 2.2.4 Extruded Insulation Shield หรือ Non-Metallic Extruded Conducting Shield

เป็นชั้นบางๆหุ้มฉนวนอีกทีหนึ่งมีคุณสมบัติเป็นตัวนำ (Conductive Material) อาจเป็นสารจำพวก Carbon Impregnated Cloth Tape or Conducting Extruded Plastic ทำหน้าที่คล้ายกับ Conductor Shield โดยมีหน้าที่หลักอยู่ 3 ประการ คือ ลดการเกิด Discharge ระหว่างผิวของฉนวนกับ Ground ลดค่า Radio Frequency Interference และเพื่อความปลอดภัยต่อบุคคลอื่นอาจสัมผัสถูกสายไฟฟ้า

#### 2.2.5 Copper Shield ทำด้วยแถบโลหะแบนหรือเส้นโลหะกลม

ส่วนมากทำด้วยทองแดง อาจทำด้วย Metal Tape, Corrugated Metal, Metal Drain Wire หรือ Lead Sheath

1. ทำหน้าที่ปล่อย (Drain) กระแส Discharge ต่างๆลงดิน และยังทำหน้าที่ปรับระดับความต่างศักย์ของ Insulating Shield ให้เท่ากับดินอีกด้วย
2. ช่วยลดความเสียหายของสายอันเนื่องจาก Surge Voltage
3. สามารถออกแบบให้นำกระแสอันเนื่องจาก Fault ได้ถ้าต้องการ

#### 2.2.6 Separator Tape หรือเรียกว่า Bedding Type

ปกติทำด้วยวัสดุจำพวกผ้า ทำหน้าที่เพิ่มความแข็งแรงของเปลือกนอกและยังช่วยเพิ่มความถี่ระหว่างเปลือกนอกกับ Metal Tape กรณีที่มีสายคดโค้งหรืองอ

#### 2.2.7 Sheath หรือเปลือกนอกทำด้วยวัสดุที่เป็นฉนวน

ส่วนมากเป็น PVC หรือ PE เพื่อลดความเสียหายอันเนื่องจากการกระแทกหรือเสียดสี ถ้าเป็นกรณีของ Lead Sheath อาจไม่ต้องมี Sheath เลยก็ได้ หรือถ้ามีก็จะมีไว้ป้องกันการผุกร่อนของตะกั่วในกรณีที่น่าสายไฟฟ้านี้ไปในสภาวะแวดล้อมซึ่งอาจมีสารที่ทำปฏิกิริยากับตะกั่ว

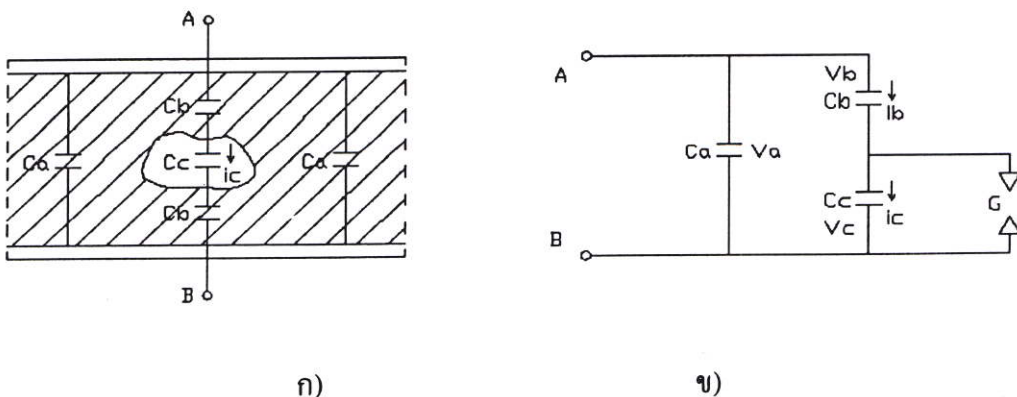
ในระบบสายใต้ดิน ส่วนที่สำคัญอีกส่วนหนึ่ง คือ หัวปลายสาย (Terminator) หรือ Pothead ส่วนมากติดตั้งอยู่บนเสาต้น Riserpole หรืออยู่ในแผงควบคุมในสถานีย่อย หรืออยู่บนนั่งร้าน (Platform) หม้อแปลงตรงบริเวณสวิตช์แรงสูง (H.V.Switch) หรือติดตั้งตามที่ต่างๆที่เราต้องการให้สายเคเบิล ไปสิ้นสุดลง เพื่อทำหน้าที่ต่อกับระบบสายอากาศ หรือเพื่อวัตถุประสงค์อื่น เมื่อ Cable มาสิ้นสุด ณ ที่นั้น เป็นผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของ Radial Stress และ Longitude Stress ถ้า Shielding ของ Cable ไม่ขาด Stress ทั้งสองอย่างนี้จะถูกควบคุมให้คงที่เสมอ และมีค่าตามที่กำหนดไว้ เมื่อ Shield ของ Cable มาสิ้นสุดลง ผลจากการเปลี่ยนแปลงของ Stress ทั้งสอง ทำให้ฉนวนเสียหายตรงจุดที่ Shield สิ้นสุดนั้น เพื่อป้องกันความเสียหายนี้ จึงจำเป็นต้องมีการทำการป้องกัน โดยแก้ไขไม่ให้ Stress ทั้งสอง ทำให้ฉนวนเสียหาย เรียกว่าการทำ Terminator ปลายสายเคเบิล

### 2.3 ทฤษฎีเบื้องต้นของการเกิดคิซาร์จบางส่วน

วิทยานิพนธ์นี้จะกล่าวถึงเฉพาะคิซาร์จบางส่วนภายในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงเท่านั้น ซึ่งมีผลกระทบต่ออายุการใช้งานของอุปกรณ์โดยตรง ปริมาณของคิซาร์จบางส่วน จะวัดในเทอมของ “ประจุที่ปรากฏ” (Apparent Charge) เนื่องจากมาตรฐานต่างๆไปนิยมการวัดปริมาณของ PD ในเทอมนี้มากที่สุด การวัด PD นี้จะไม่รวมถึงคิซาร์จตามผิวและโคโรนาคิซาร์จ ซึ่งปกติจะวัดในเทอมของ “คลื่นรบกวนวิทยุ”

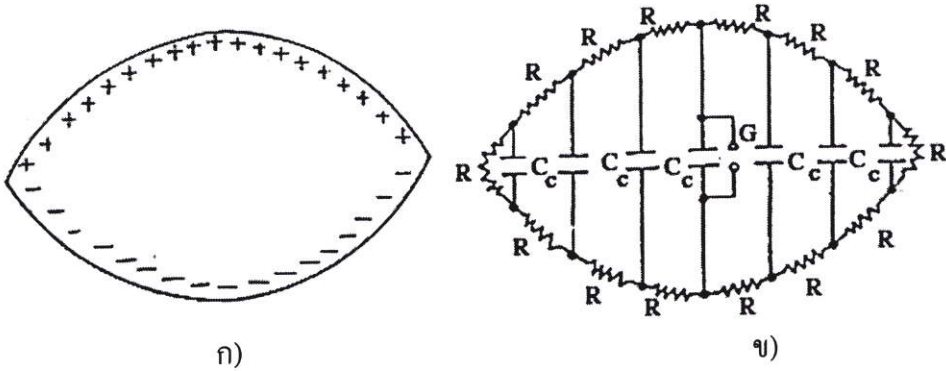
#### 2.3.1 วงจรสมมูลคิซาร์จภายใน

โดยปกติแล้ววงจรสมมูลของคิซาร์จภายในนั้นจะหมายถึง วงจรสมมูลที่ใช้กับไฟฟ้ากระแสสลับ ถ้ากล่าวถึงคิซาร์จบางส่วนอย่างลอยๆ ก็ให้หมายถึงคิซาร์จภายใน วงจรสมมูลสำหรับฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงขณะเกิด PD อาจแทนด้วยตัวเก็บประจุ  $C_a, C_b, C_c$  และแกป  $G$  ตามลำดับ โดยที่แกป  $G$  จะแทนการลัดวงจรขณะเกิด PD,  $C_a = C'_a + C''_a$  และ  $C_b = C'_b C''_b / (C'_b + C''_b)$  ดังรูปที่ 2.2 ในทางปฏิบัติจะพบว่า  $C_a \gg C_c \gg C_b$



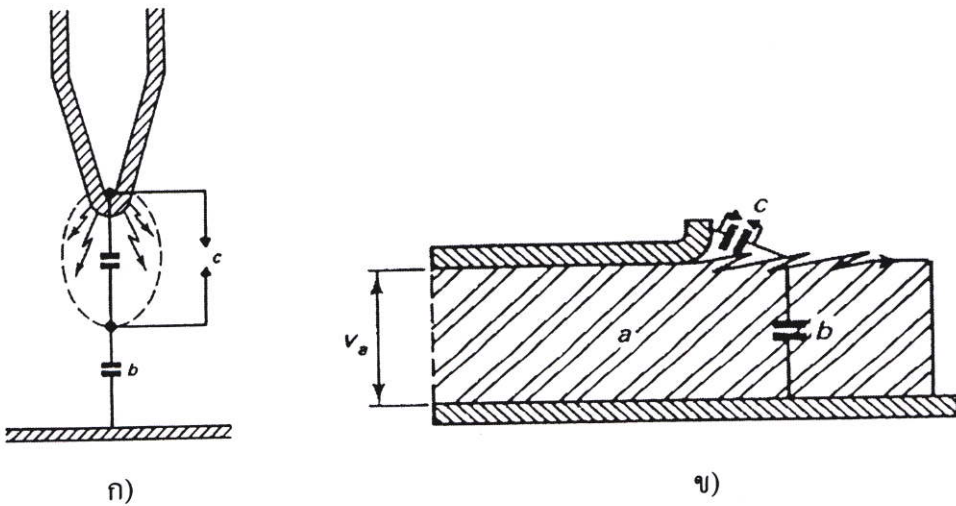
รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลของการเกิดคิซาร์จบางส่วน(PD) ทั่วไป

วงจรสมมูลในทางปฏิบัติของ PD เนื่องจากเกิดโพรงอากาศในเนื้อฉนวนแสดงดังรูปที่ 2.3 ซึ่งจะแสดงเฉพาะส่วนของโพรงอากาศและผิวฉนวนที่อยู่ติดกับโพรงอากาศเท่านั้น โดยในรูปที่ 2.3 ก) แสดงการกระจายของประจุก่อนการเกิดเบรคดาวน์ ในรูปที่ 2.3 ข) แทนผิวของฉนวนรอบโพรงอากาศด้วยความต้านทานซึ่งมีค่าสูงมาก แทนโพรงอากาศด้วยตัวเก็บประจุต่างๆ และสปาร์กแกปตรงตำแหน่งที่จะเกิดเบรคดาวน์ ดังนั้นถ้าไม่คำนึงถึงผลของความต้านทานที่ผิว ผลที่ได้จึงใกล้เคียงกับวงจรสมมูลในรูปที่ 2.2 นั่นเอง



รูปที่ 2.3 (ก) การกระจายของประจุก่อนเกิดเบรคดาวน์  
 (ข) แทนผิวของฉนวนรอบโพรงอากาศด้วยค่า R และ C

แต่อย่างไรก็ตามวงจรสมมูลในรูปที่ 2.3 สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับโคโรนาดิสชาร์จและดิสชาร์จตามผิวได้ โดยการแทนส่วนต่างๆ ของฉนวนหรืออากาศรอบๆ ด้วย  $C_a, C_b, C_c$  และแกป G ตามลำดับ ดังรูปที่ 2.4

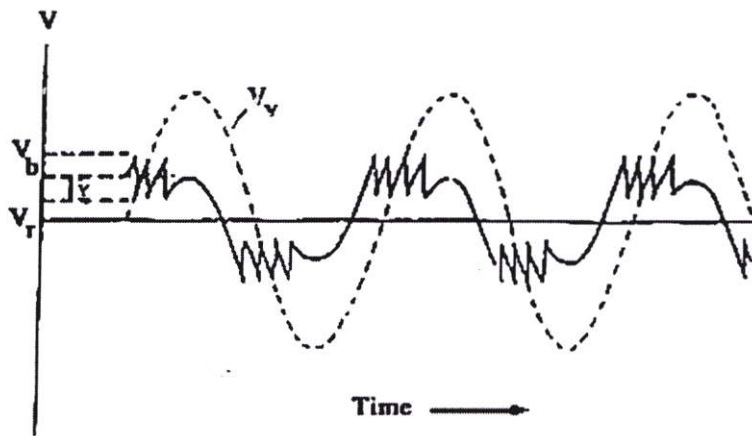


รูปที่ 2.4 วงจรสมมูลของโคโรนาดิสชาร์จและดิสชาร์จตามผิว  
 ก) การเกิดโคโรนาดิสชาร์จที่วัสดุปลายแหลม ข) การเกิดโคโรนาดิสชาร์จตามผิว



### 2.3.2.2 ลักษณะรูปร่างของกระแสคิซาร์จบางส่วน

ลักษณะรูปร่างของกระแส PD ในแกปเล็ก ๆ ในทางทฤษฎีแสดงดังรูปที่ 2.6 กล่าวคือขณะเกิด PD การไหลของกระแสผ่านแกปจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนซึ่งเคลื่อนที่ได้เร็วกว่าไอออนบวกผ่านแกปสั้นๆ เมื่ออิเล็กตรอนไหลผ่านแกปหมด กระแสจะลดลงอย่างรวดเร็วและกระแสที่ลดลงนี้จะยังคงไหลต่อไปอีกเนื่องจากการเคลื่อนที่ของไอออนบวก



รูปที่ 2.6 การเกิด PD ชั่ว ในรูปของแรงดันและกระแสที่เกิดขึ้นในหนึ่งคาบเวลา

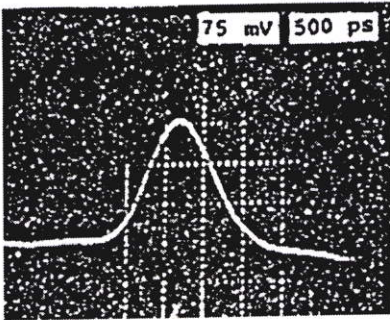
รูปที่ 2.6 แสดงลักษณะรูปร่างของกระแส PD ในทางทฤษฎีสำหรับแกปเล็ก ๆ ลักษณะรูปร่างของกระแส PD ในทางปฏิบัติ ซึ่งวัดโดยเครื่องตรวจจับ PD แบบแถบกว้างพิเศษ (Ultra-wide band detector = UWB) ใน Epoxy และปลายแหลมในก๊าซ SF<sub>6</sub> จะให้ลักษณะรูปร่างเช่นเดียวกัน ดังรูปที่ 2.7 จะพบว่าในช่วงเวลาขึ้นประมาณ 0.3 ถึง 0.8 นาโนวินาที ความกว้างของพัลส์ที่ขนาดลงครึ่งหนึ่ง ประมาณ 1.5 นาโนวินาที จากรูปที่ 2.7 สามารถประมาณลักษณะรูปร่างของกระแส PD เป็นรูป "Gaussian" คือ  $i(t)$  ได้ดังนี้

$$i(t) = I_0 \text{EXP}[-t^2 / 2\sigma^2] \quad (2.2)$$

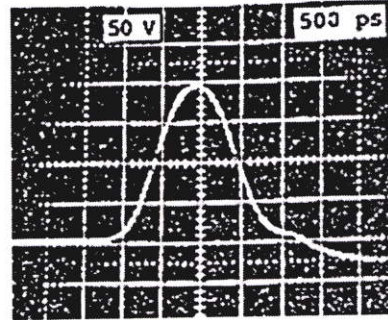
ดังนั้นสเปกตรัมความถี่ของกระแส PD คำนวณได้ดังนี้

$$I(\omega) = I_0 \sigma (2\pi)^{1/2} \text{EXP}(-\omega^2 \sigma^2 / 2) \quad (2.3)$$

โดยการกำหนดความกว้างของพัลส์เท่ากับ  $2.36\sigma$  และ  $I_0$  คือค่ายอดของกระแส PD ดังนั้น  $\sigma \approx 6.36 \times 10^{-10}$  วินาที ซึ่งการคำนวณพบว่าสเปกตรัมของความถี่มากกว่า 200 เมกะเฮิรตซ์



ก)



ข)

รูปที่ 2.7 ลักษณะกระแส PD ที่ตรวจจับได้ในทางปฏิบัติโดยใช้ UWB

- ก) กระแส PD ที่เกิดใน Epoxy
- ข) กระแส PD ที่เกิดจากปลายแหลมในก๊าซ SF<sub>6</sub>

จากการค้นคว้าเอกสารต่างๆ เกี่ยวกับช่วงเวลาการเกิด PD ในฉนวนแข็งและเหลวที่มีโพรงอากาศภายใน จะพบว่ากระแสพัลส์ของ PD จะมีช่วงเวลา  $< 5$  นาโนวินาที เพราะว่า PD เกิดในที่แคบๆ ฉนวนเนื้อเดียว เช่น ก๊าซจะมีช่วงเวลายื่น  $< 5$  นาโนวินาทีและเวลาส่วนทางคลื่นจะยาวกว่าช่วงเวลายื่น สำหรับในอากาศกระแสพัลส์ของ PD มีช่วงเวลาเกิดน้อยกว่า 100 นาโนวินาที[X]

### 2.3.2.3 พลังงานดิสชาร์จบางส่วน

พลังงานดิสชาร์จภายในของวัสดุทดสอบ สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$W = 0.7qV_1 \quad (2.4)$$

เมื่อ  $W$  คือ พลังงานดิสชาร์จ

$q$  คือ ประจุที่ปรากฏของ PD

$V_1$  คือ แรงดันเริ่มต้นเกิดดิสชาร์จบางส่วน (ค่า rms)

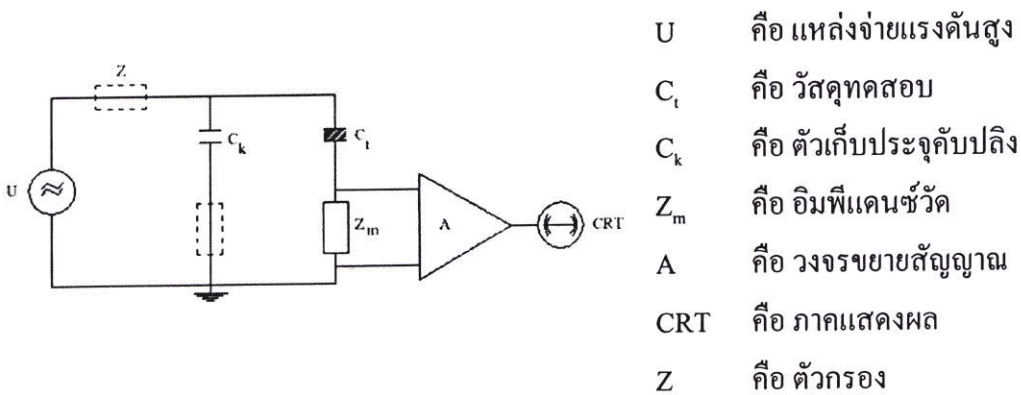
พลังงานดิสชาร์จบางส่วนนี้อาจก่อให้เกิดความเสียหายต่อระบบฉนวนได้ เช่น  $V_1 = 10$  กิโลโวลต์ และ  $q = 10$  พิโคคูลอมบ์ ดังนั้น  $W = 7 \times 10^{-8}$  จูล ซึ่งมีค่าน้อยมาก แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากพลังงานจำนวนนี้ปล่อยออกมาขณะเกิด PD ในช่วงเวลา  $< 10^{-8}$  วินาที และเกิดในที่แคบๆ ทำให้ความหนาแน่นพลังงานบริเวณนั้นสูงพอที่จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี

## 2.4 หลักการตรวจจับดิสชาร์จบางส่วน

การตรวจจับ PD สามารถทำได้หลายวิธีด้วยกัน โดยการสังเกตหรือวัดผลที่เป็นปรากฏการณ์ต่างๆ ของ PD อย่างไรก็ตามการวัดผลของ PD ในเชิงปริมาณที่ได้ผลดีที่สุดคือ การวัดผลทางไฟฟ้าโดยวิธีการตรวจจับกระแสพัลส์ที่ขั้วสายของอุปกรณ์

### 2.4.1 วงจรพื้นฐานสำหรับการตรวจจับดิสชาร์จบางส่วน

วงจรพื้นฐานสำหรับการตรวจจับ PD ด้วยวิธีตรวจจับกระแสพัลส์ที่ขั้วสายของอุปกรณ์ แสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 วงจรพื้นฐานสำหรับการตรวจจับ PD

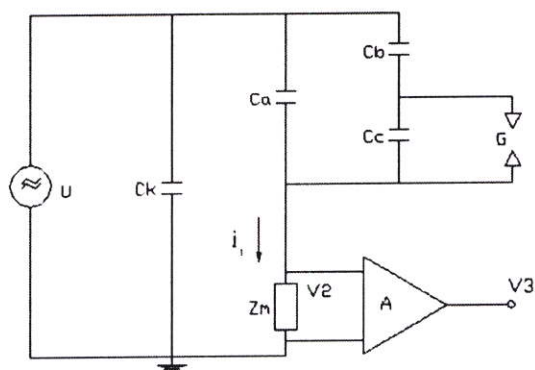
เนื่องจากอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายมีค่าสูงมากขณะเกิด PD ดังนั้นจึงต้องมีตัวเก็บประจุคัปปลิงเป็นทางผ่านของกระแสพัลส์หรือคัปปลิงสัญญาณ

### 2.4.2 การวิเคราะห์วงจรตรวจจับดิสชาร์จบางส่วน

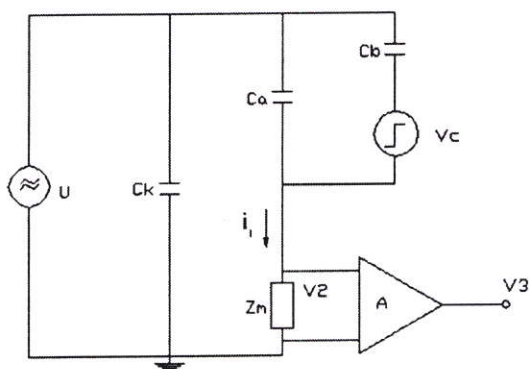
จากวงจรพื้นฐานในรูปที่ 2.8 จะแทนวัสดุทดสอบ  $C_t$  ด้วยวงจรสมมูล ซึ่งประกอบด้วย  $C_p$ ,  $C_c$  และแกป G ดังรูปที่ 2.9 ก) เนื่องจากเบรคดาวน์ของโพรงอากาศหรือแกปจะใช้เวลาในการเกิดน้อยกว่า  $10^{-7}$  วินาที ซึ่งถือว่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับคาบเวลาของแหล่งจ่าย ดังนั้นจึงอาจแทนแรงดันคร่อมโพรงอากาศหรือแกป  $v_c$  ด้วยแหล่งจ่ายแรงดันรูปขั้น ดังรูปที่ 2.9 ข) คือ

$$v_c \approx \Delta v U(t) \quad (2.5)$$

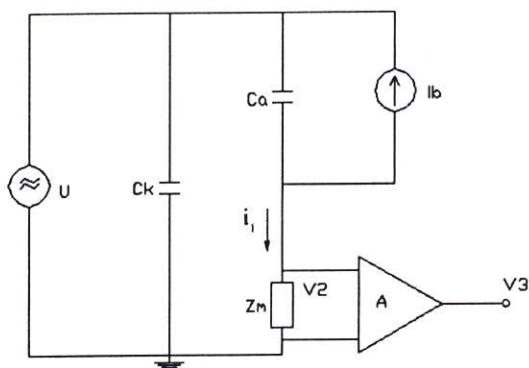
เมื่อ  $\Delta v$  คือ แรงดันตกคร่อมโพรงอากาศหรือแกป  
 $U(t)$  คือ ฟังก์ชันรูปขั้น (Unit Step Function)



ก)



ข)



ค)

### รูปที่ 2.9 แทน PD ด้วยวงจรสมมูลแบบต่างๆ

ก) แทนวัสดุทดสอบ  $C_l$  ด้วยวงจรสมมูลที่ประกอบด้วย  $C_a$ ,  $C_b$ ,  $C_c$  และแกป  $G$

ข) แทน  $C_c$  และ  $G$  ด้วยแรงดันรูปขั้น คือ  $v_c \approx \Delta v U(t)$

ค) แทน  $C_b$  และ  $V_c$  ด้วยแหล่งจ่ายกระแสพัลส์  $i_b \approx q\delta(t)$

ซึ่งวงจรในรูปที่ 2.9 ข) ก็คือ “วงจรพื้นฐานสำหรับการเปรียบเทียบ” เนื่องจากโดยปกติแล้ว  $C_a \gg C_b$  ดังนั้นเมื่อมองอิมพีแดนซ์จากแหล่งจ่ายแรงดัน  $V_c$  จะมองเห็นอิมพีแดนซ์รวมประมาณของ  $C_b$  จึงสามารถประมาณได้ว่า

$$i_b = C_b \frac{dV_c}{dt} \approx C_b \Delta V \delta(t) \quad (2.6)$$

เมื่อ  $\delta(t)$  คือ “Unit Impulse Function” ถ้านิยามให้  $q = C_b \Delta V = \int_0^{\infty} i_b dt$  คือ ประจุที่ปรากฏของ PD จากนั้นเมื่อแทนค่า  $q = C_b \Delta V$  ในสมการ (2.6) จะได้

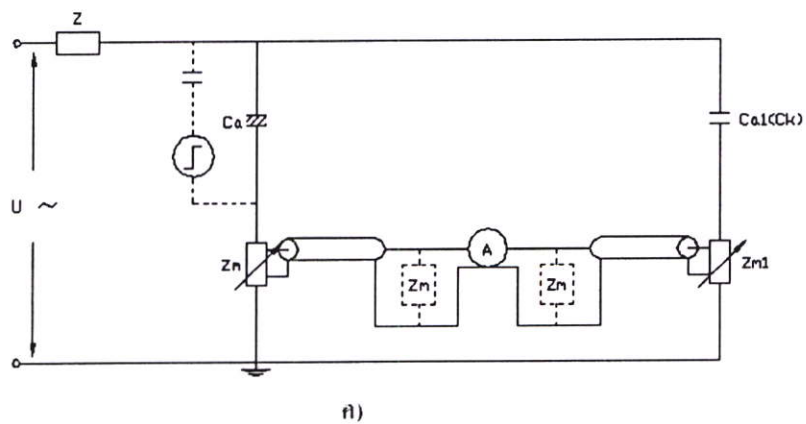
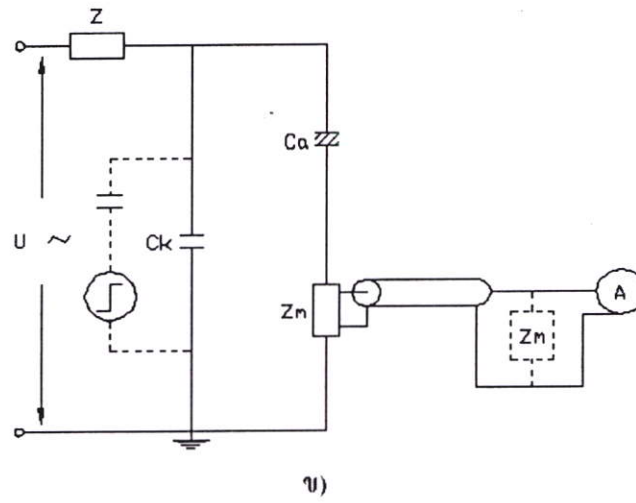
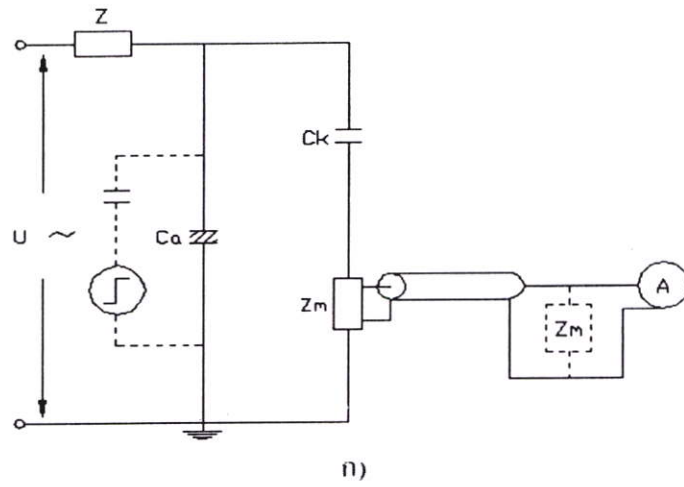
$$i_b \approx q \delta(t) \quad (2.7)$$

ในรูปที่ 2.9 ค) แทนการเกิดดิสชาร์จบางส่วนด้วยแหล่งจ่ายกระแสอิมพัลส์ ในทางปฏิบัติจะพบว่ากระแสพัลส์  $i_b$  มีช่วงเวลาเกิด  $\leq 5$  นาโนวินาที สำหรับฉนวนแข็งและเหลว

## 2.5 เทคนิคการวัดดิสชาร์จบางส่วน

### 2.5.1 การวัดดิสชาร์จบางส่วนสำหรับวัสดุทดสอบทั่วไป

โดยปกติวัสดุทดสอบทั่วไป อาจแทนได้ด้วยตัวเก็บประจุชนิดองค์ประกอบแบบลัมปีหรือตัวเก็บประจุธรรมดา วงจรทดสอบ PD ตามมาตรฐานต่างๆ จะมีลักษณะเช่นเดียวกัน ในที่นี้ใช้วงจรทดสอบตามมาตรฐาน IEC 270 [6] โดยรูปที่ 2.9 ก) และรูปที่ 2.9 ข) เป็นวงจรทดสอบแบบวิธีตรง ข้อดีของวงจรรูปที่ 2.9 ก) คือขั้วแรงดันต่ำของวัสดุทดสอบต่อลงกราวด์โดยตรง ในกรณีวัสดุทดสอบเกิดการเบรคควานอิมพีแดนซ์วัดจะไม่ได้รับความเสียหาย ข้อดีของวงจรในรูปที่ 2.10 ข) จะให้ความไวในการวัดสูงกว่าแบบแรกในกรณีที่วัสดุทดสอบมีขนาดเล็ก เนื่องจากผลของตัวเก็บประจุแบบสเตอร์จะทำให้ตัวเก็บประจุคัปปลิงมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ในรูปที่ 2.9 ค) เป็นวงจรทดสอบแบบสมมูล วงจรแบบนี้จะมีข้อได้เปรียบในเรื่องการลดสัญญาณรบกวนที่เข้ามาจากแหล่งจ่ายหรือสัญญาณแบบ “คอมมอน โหมด” นั้นเอง

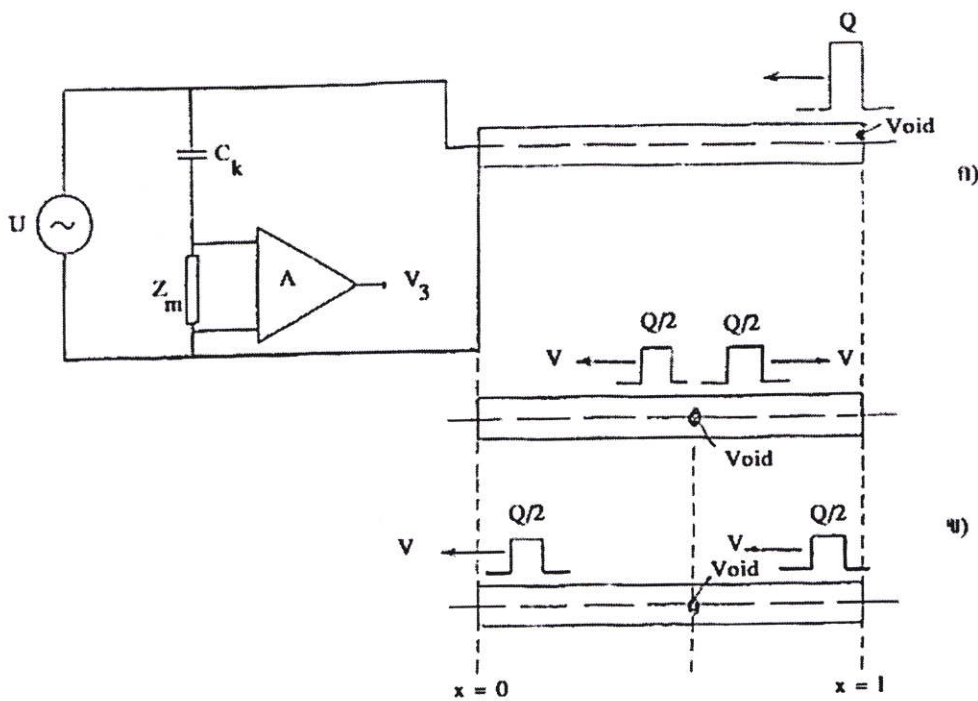


รูปที่ 2.10 วงจรทดสอบคิซาร์จบางส่วนแบบต่างๆ ตามมาตรฐาน IEC 270 [6]

การเปรียบเทียบวงจรทดสอบโดยปกติจะทำก่อนการป้อนแรงดันเข้าวงจรทดสอบ โดยใช้เครื่องเปรียบเทียบดิซซาร์จมาตรฐานในการป้อนกระแสพัลส์สั้นๆ ที่มีประจุ (Pulse Area) ซึ่งทราบค่าที่แน่นอนที่ขั้วทั้งสองของวัสดุทดสอบ (เส้นประ) หลังจากทำการเปรียบเทียบเสร็จแล้วควรเอาเครื่องเปรียบเทียบดิซซาร์จมาตรฐานออกก่อนการป้อนแรงดันเข้าวงจรทดสอบ

2.5.2 การวัดดิซซาร์จบางส่วนสำหรับสายเคเบิล

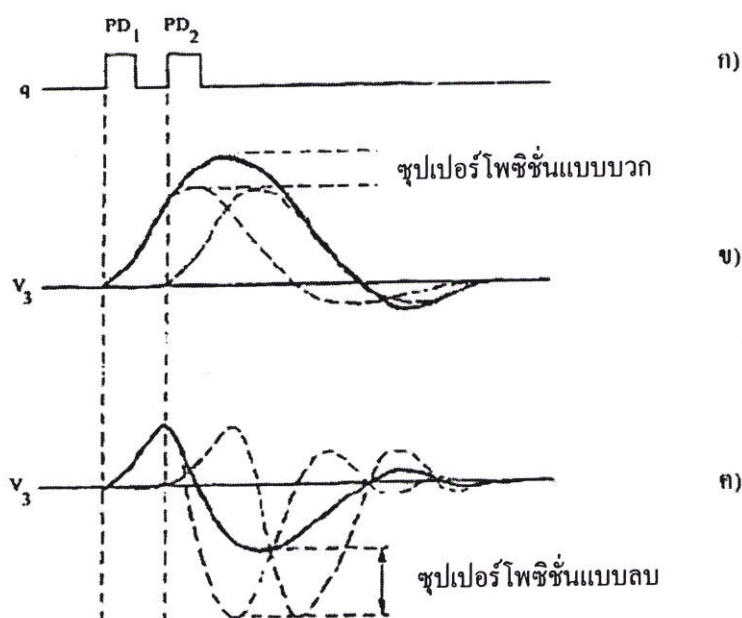
การวัดดิซซาร์จบางส่วนสำหรับเคเบิล ถ้าเป็นเคเบิลสั้น การวัด PD จะทำเช่นเดียวกับข้อ 2.5.1 แต่สำหรับเคเบิลยาวนั้นเราจะพิจารณาเคเบิลยาวเป็นลักษณะสายส่งคือ PD จะทำให้เกิดคลื่นจรเคลื่อนที่ออกไปที่ปลายทั้งสองด้านของเคเบิล วงจรทดสอบแสดงดังรูปที่ 2.11 โดยรูปที่ 2.11 ก) แสดงการเกิด PD ที่ปลายด้านไกล ( $x = 1$ ) ของเคเบิล ส่วนในรูปที่ 2.11 ข) แสดงการเกิด PD ที่จุดใดๆ ภายในเคเบิล



รูปที่ 2.11 การเกิดคลื่นจรขณะเกิด PD ในเคเบิลยาว

ขณะเกิด PD จะทำให้คลื่นจรถูกแรกเคลื่อนที่ไปที่เครื่องตรวจจับ PD โดยตรง ในขณะที่คลื่นจรที่สองจะเคลื่อนที่ไปปลายด้านไกลก่อนแล้วจึงจะสะท้อนกลับมาที่เครื่องตรวจจับ PD ในเวลาไล่เลี่ยกัน ผลอันนี้ทำให้เครื่องตรวจจับ PD วัดค่าผิดพลาดเนื่องจากผลการเกิดชูปเปอร์โพสิชันของคลื่นจรที่เกิดขึ้น ในกรณีที่คลื่นจรเกิดชูปเปอร์โพสิชันแบบบวกจะทำให้ค่าที่อ่านได้มากกว่าค่าที่เกิดขึ้นจริง (ไม่เกิน 2 เท่าของค่าปกติ) ซึ่งเป็นกรณีที่ยอมรับได้ สำหรับกรณีที่คลื่นจรเกิดชูปเปอร์โพสิชันแบบลบจะทำให้ค่า PD ที่อ่านได้น้อยกว่าค่าของ PD ที่เกิดขึ้นจริง กรณีนี้เป็นกรณี

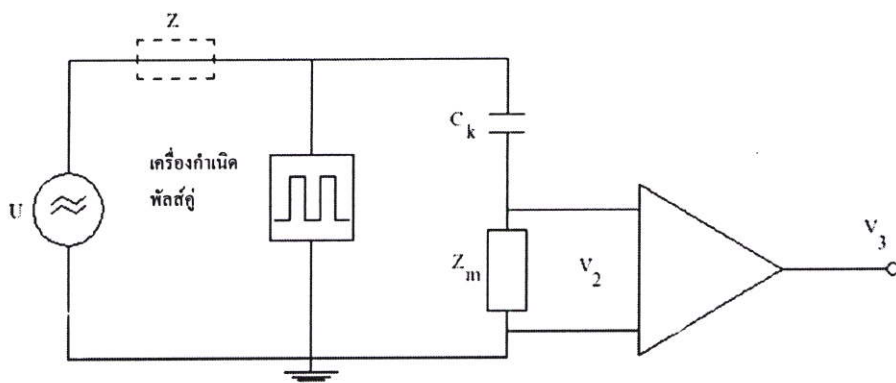
ที่ยอมรับไม่ได้ การทดสอบ PD ต้องมีการหลีกเลี่ยงผลอันนี้ วิธีการแก้ปัญหาที่ง่าย ประหยัดและเป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไป ทำให้โดยการใช้เครื่องตรวจจับ PD แบบแถบกว้าง ซึ่งให้เอาต์พุตเป็นแบบ “ $\alpha$ -response” ดังนั้นขณะที่มีการสะท้อนของคลื่นจรจะทำให้เกิดชูปเปอร์โพสิชันแบบบวกเท่านั้น แสดงดังรูปที่ 2.12 ก) ส่วนเครื่องตรวจจับ PD แบบอื่นจะให้เอาต์พุตแบบ “ $\beta$ -response” ทำให้มีโอกาสเกิดชูปเปอร์โพสิชันแบบลบได้ แสดงดังรูปที่ 2.12 ข) จึงควรหลีกเลี่ยงเครื่องตรวจจับแบบนี้ในการทดสอบสายเคเบิลยาว



รูปที่ 2.12 การเกิดชูปเปอร์โพสิชันสัญญาณเอาต์พุตของเครื่องตรวจจับ PD แบบต่างๆ

ในการทดสอบสายเคเบิล เช่น NEMA Publ. No. W8-1976 (ICEA Publ. No. 5-68-516) และ IEC Publ. No. 885-3 ได้กำหนดการตรวจสอบคุณสมบัติชูปเปอร์โพสิชันของเครื่องตรวจจับ PD สำหรับใช้ในการทดสอบเคเบิล ซึ่งวงจรทดสอบดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 2.13 โดยใช้เครื่องมือที่เรียกว่า “เครื่องกำเนิดพัลส์คู่” ในการจำลองคลื่นจรลักษณะเดียวกันกับที่เกิดในเคเบิล แต่สามารถปรับระยะเวลาของคลื่นจรทั้งสองที่เวลาต่างๆ ตั้งแต่ 0.2 ถึง 100 ไมโครวินาที แล้วเขียน “ไดอะแกรมพัลส์คู่” เพื่อดูลักษณะการเกิดชูปเปอร์โพสิชันคลื่นจรที่เวลาต่างๆ รูปที่ 2.14 ก) แสดงไดอะแกรมพัลส์คู่ที่ไม่เกิดชูปเปอร์โพสิชันแบบลบ ( $\alpha$ -response) ส่วนในรูปที่ 2.14 ข) แสดงไดอะแกรมพัลส์คู่ที่เกิดชูปเปอร์โพสิชันแบบลบในช่วงเวลา  $t_1$  ถึง  $t_2$  ( $\beta$ -response) อย่างไรก็ตาม IEC Publ. No. 885-3 ยอมให้เกิดชูปเปอร์โพสิชันแบบลบได้ไม่เกิน 10% ส่วน NEMA Publ. No. WC8-1976 ยอมให้เกิดการรวมกันแบบลบได้ไม่เกิน 15% นอกจากนี้ NEMA ยังกำหนดอีกด้วยว่า “เวลาแยกซัด”

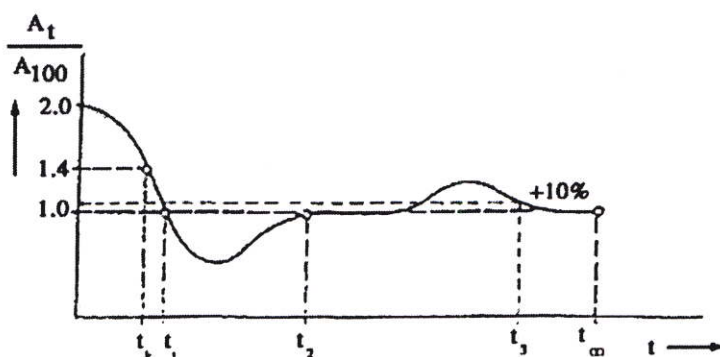
(Pulse Resolution Time) ของเครื่องตรวจจับ PD ควรมีค่าประมาณ 4 ถึง 6 ไมโครวินาที (เวลาแยกซัดจะคิดที่เวลาที่ทำให้เกิดซูปเปอร์โพสิชันแบบบวกไม่เกิน 10%)



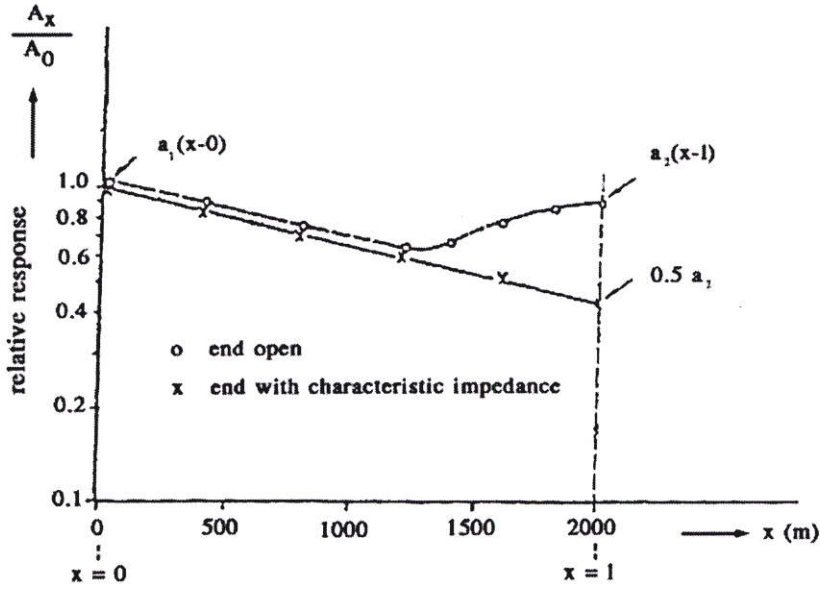
รูปที่ 2.13 วงจรตรวจสอบคุณสมบัติซูปเปอร์โพสิชันของเครื่องตรวจจับ PD

การพิจารณาว่าสายเคเบิลที่ทดสอบเป็นแบบเคเบิลยาวหรือเคเบิลสั้นนั้น จะพิจารณาที่ระยะ  $x = l_k$  เป็นเกณฑ์ คือ ถ้า  $x > l_k$  จะถือว่าเป็นเคเบิลยาว โดยที่  $l_k = 0.5 v t_k$  เมื่อ  $v$  คือ ความเร็วของคลื่นจร (150 ถึง 170 เมตรต่อไมโครวินาทีสำหรับสายเคเบิลที่มีฉนวนชนิด XLPE) และ  $t_k$  คือเวลาที่เกิดซูปเปอร์ซูปเปอร์โพสิชันแบบบวกเท่ากับ 1.4 เท่าของค่าปกติ

ในทางปฏิบัติจะพบว่า ในการทดสอบเคเบิลยาวจะมีผลการสูญเสียพลังงานของคลื่นจรเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย คือขณะที่คลื่นจรเคลื่อนที่ไปจะทำให้มีขนาดลดลงเรื่อยๆ ทำให้ค่าที่อ่านได้ผิดพลาด สำหรับ IEC Publ. No. 885-3 จะยอมให้ค่าที่อ่านได้ในกรณีนี้เมื่อรวมผลของซูปเปอร์โพสิชันเข้าไปด้วยจะต้องผิดพลาดน้อยกว่าความเป็นจริงไม่เกิน 30% ในรูปที่ 2.15 แสดงไดอะแกรมพัลส์คู่ เมื่อเกิดการสูญเสียในเคเบิลเข้าไปด้วย



รูปที่ 2.14 ไดอะแกรมพัลส์คู่ของเครื่องตรวจจับ PD แบบต่างๆ

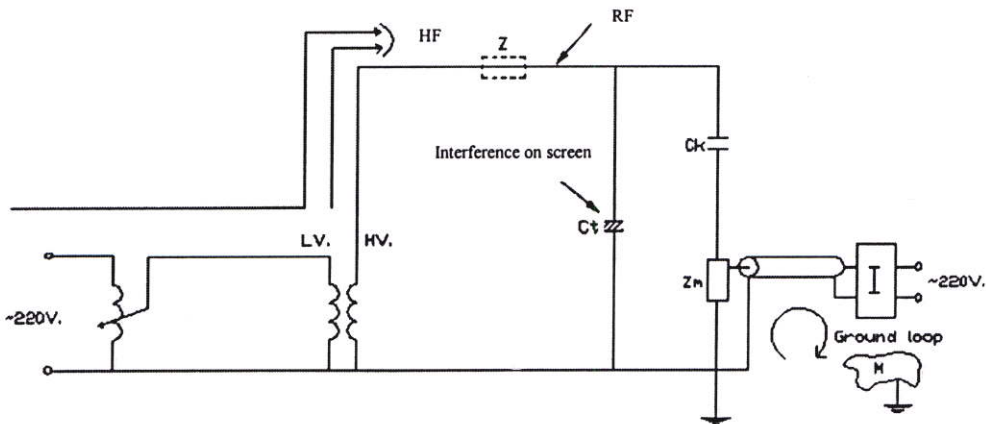


รูปที่ 2.15 ไคอะแกรมพัลส์คู่เมื่อเกิดการสูญเสียในเคเบิล

## 2.6 เทคนิคการลดสัญญาณรบกวน

### 2.6.1 สัญญาณรบกวนที่มีผลกระทบในการวัดดิซาร์จบางส่วน

สัญญาณรบกวนจะประกอบด้วย สัญญาณรบกวนที่เข้ามาทางอากาศ และทางแหล่งจ่าย นอกจากนี้ยังมีสัญญาณรบกวนเนื่องจากการดิซาร์จของอุปกรณ์ที่เป็นโลหะและวางอยู่ใกล้วงจรทดสอบหรือกราวด์ไม่ดี การเกิดกราวด์ลูป (Ground Loop) และเกิดสัญญาณออสซิลเลตเนื่องจากการเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์ไม่ดี (หลวม) เป็นต้น รายละเอียดแสดงดังรูปที่ 2.16



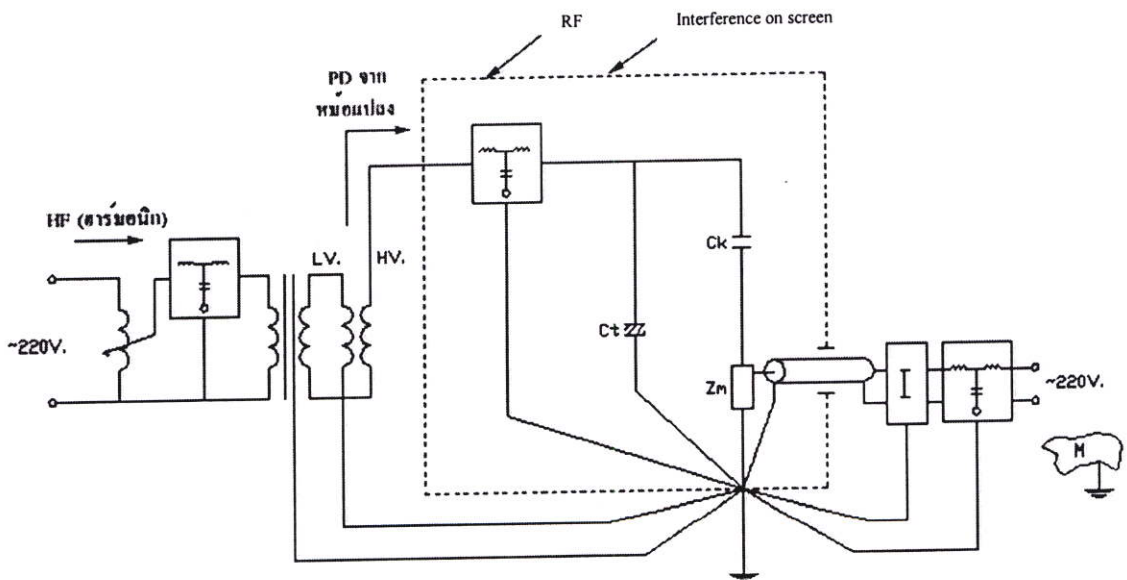
รูปที่ 2.16 ตัวอย่างสัญญาณรบกวนที่ตำแหน่งต่างๆ

- HF คือ สัญญาณรบกวนความถี่สูงที่เข้ามาจากแหล่งจ่ายได้แก่ ฮาร์มอนิกสูงๆ จากเมนโดยตรงจากอุปกรณ์พวกไคริสเตอร์ และ PD จากหม้อแปลงทดสอบ เป็นต้น
- RF คือ คลื่นรบกวนวิทยุซึ่งอาจจะเป็นคลื่นวิทยุโดยตรง คลื่นรบกวนจากอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง หรือหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่อยู่ใกล้เคียง
- EMP คือ สัญญาณรบกวนจากการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก เนื่องจากการทำงานของสวิตช์หรือ ไคริสเตอร์ Interference on screen คือ สัญญาณรบกวนที่สกรีนหรือที่ขั้วแรงดันต่ำของวัสดุทดสอบที่มีสกรีนขนาดใหญ่ เช่น เคเบิล เป็นต้น
- Ground Loop คือ การเกิดครบวงรอบของสายดิน
- Ungrounded metal (M) คือ การค้ำสารจของพวกโลหะที่ไม่ได้ต่อลงดินวางอยู่ใกล้วงจรทดสอบ

## 2.6.2 การลดสัญญาณรบกวน

### 2.6.2.1 การลดสัญญาณรบกวนโดยตรง

การลดสัญญาณความถี่สูง เช่น พวกรังฮาร์มอนิกสูงๆ จะใช้ตัวกรองแรงดันต่ำ และอาจเพิ่มหม้อแปลงขดลวดแยกช่วยด้วยก็ได้ โดยต่อไว้ทางด้านขดลวดแรงดันต่ำของหม้อแปลงทดสอบ ในกรณีที่เกิด PD ในหม้อแปลงทดสอบจะต้องใช้ตัวกรองแรงดันสูงต่อทางด้านขดลวดแรงดันสูงของหม้อแปลงทดสอบ การลดสัญญาณรบกวน RF และ EMP ซึ่งเข้ามาทางอากาศ ทำได้โดยการทดสอบในห้องชีลด์ การแก้ปัญหาเรื่องกราวด์ลูปทำได้โดยการต่อกราวด์ร่วมกันเพียงจุดเดียว ตัวอย่างการแก้ปัญหาสัญญาณรบกวนในข้อ 2.6.1 แสดงในรูปที่ 2.17 [12]



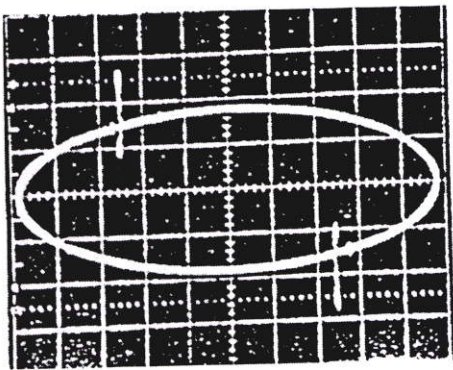
รูปที่ 2.17 ตัวอย่างการลดสัญญาณรบกวน[12]

### 2.6.2.2 การลดสัญญาณรบกวนวิธีอื่นๆ

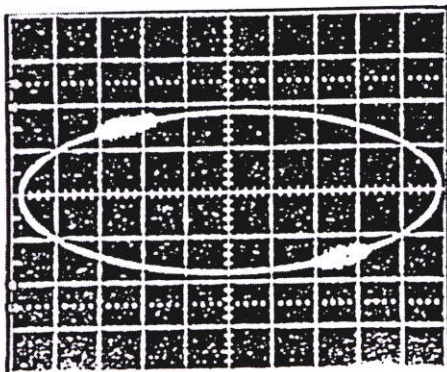
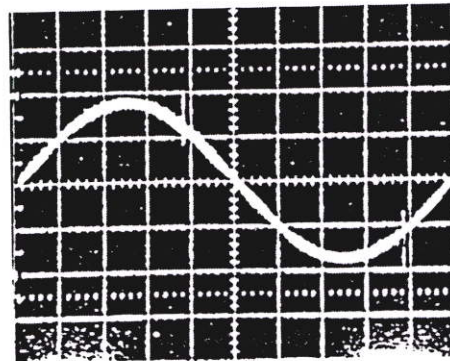
การลดสัญญาณรบกวนวิธีอื่นมีหลายวิธีด้วยกัน ที่นิยมใช้กันมากคือ

1) วงจรทดสอบแบบสมมูล ใช้ลดสัญญาณรบกวนแบบ “คอมมอน โหมด” เช่น สัญญาณรบกวนที่เข้ามาทางแหล่งจ่าย เป็นต้น

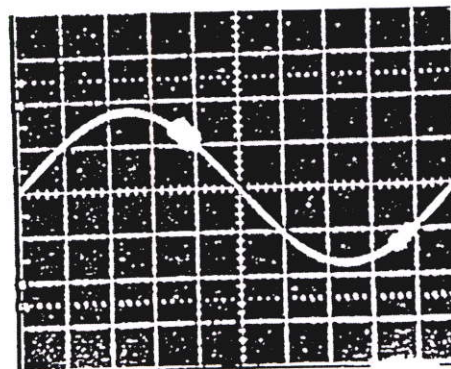
2) การลดสัญญาณรบกวนโดยวิธี “หน้าต่างเวลา” (Time Window Method) วิธีนี้เป็นที่นิยมกันมากในปัจจุบัน โดยจะลดสัญญาณรบกวนที่ซึ่งโครโนซ์กับความถี่ของแหล่งจ่ายเท่านั้น เช่น สัญญาณรบกวนเนื่องจากการทำงานของไคริสเตอร์ เป็นต้น ด้วยการสวิตซ์ตัดหรือเปิดวงจรตรงตำแหน่งที่มีสัญญาณรบกวน เพื่อไม่ให้ไปปรากฏที่เอาต์พุตของเครื่องจับ PD รูปที่ 2.18 ก) แสดงตัวอย่างสัญญาณรบกวนจากไคริสเตอร์ รูปที่ 2.18 ข) แสดงการกำจัดสัญญาณรบกวนโดยวิธี “หน้าต่างเวลา” และเพิ่มความสว่างของจอภาพ ณ ตำแหน่งนั้น เพื่อบอกตำแหน่งของ “หน้าต่างเวลา” ให้ทราบ



(ก)



(ข)



รูปที่ 2.18 การลดสัญญาณรบกวนด้วยวิธี “หน้าต่างเวลา” [12]

## 2.7 คุณสมบัติของเครื่องตรวจจับดิสชาร์จบางส่วน

### 2.7.1 ข้อกำหนดของเครื่องตรวจจับดิสชาร์จบางส่วนตามมาตรฐาน IEC 270

กำหนดให้มีคุณสมบัติโดยสรุปไว้ดังนี้ คือ

- 1) เวลาแยกชั้คของเครื่องตรวจจับ PD กำหนดไว้ใน IEC Publ. No. 270(1981) ว่าต้องไม่เกิน 100 ไมโครวินาที ในกรณีที่ไมเกิดความผิดพลาดเนื่องจากการช้อนทับของพัลส์ PD
- 2) เครื่องปรับเทียบดิสชาร์จมาตรฐาน ใช้สำหรับจ่ายกระแสพัลส์มาตรฐาน IEC Publ. No. 270(1981) กำหนดให้ใช้แรงดันที่มีช่วงเวลานำขึ้นไม่เกิน 0.1 ไมโครวินาที และลดลงด้วยค่าคงตัวเวลาอยู่ในช่วง 100 ถึง 100 ไมโครวินาที
- 3) ความไวของเครื่องตรวจจับหรือวัด PD จะต้องมีความสามารถตรวจจับพัลส์ต่ำสุดเป็นสองเท่าของสัญญาณรบกวน ซึ่งกำหนดไว้ใน IEC Publ. No. 885-2 (1981)
- 4) เครื่องกำเนิดพัลส์คู่ที่ใช้ในการตรวจสอบคุณสมบัติซูเปอร์โพสิชันของเครื่องตรวจจับ PD นั้น กำหนดไว้ใน IEC Publ. No. 885-3 ว่าต้องสามารถสร้างพัลส์ขนาดเท่ากันสองพัลส์ ซึ่งมีช่วงเวลานำขึ้นไม่เกิน 20 นาโนวินาที และมีความกว้างของพัลส์จากค่า 10% ของหน้าคลื่นถึงหางคลื่นต้องไม่เกิน 150 นาโนวินาที โดยพัลส์ทั้งสองนี้สามารถปรับระยะห่างได้อย่างน้อย 0.2 ถึง 100 ไมโครวินาที สำหรับเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ปกติประมาณ 50 ถึง 60 โอห์ม
- 5) ตัวเก็บประจุที่ใช้ในการปรับเทียบต้องมีค่าไม่เกิน 150 พิโคฟารัด (สำหรับการทดสอบ PD ในเคเบิล) เรื่องนี้กำหนดไว้ใน IEC Publ. No. 885-3 เช่นกัน
- 6) เครื่องตรวจจับดิสชาร์จบางส่วนที่ใช้ในการทดสอบเคเบิล ตามมาตรฐาน IEC ยอมให้เกิดซูเปอร์โพสิชันทางลบได้ไม่เกิน 10% ในกรณีที่เกิน 10% จะต้องนำผลอันนี้มาพิจารณาในการวัดด้วย

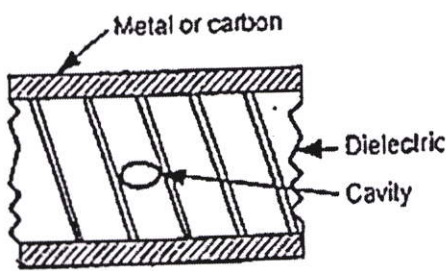
## 2.8 การจำแนกชนิดของดิสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิล

สามารถแยกออกเป็นชนิดต่างๆ ได้ดังต่อไปนี้

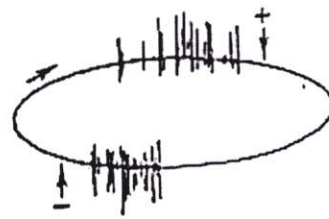
- 1) การดิสชาร์จที่เกิดจากโพรงอากาศ (Cavity) ภายในไดอิเล็กตริก

โพรงอากาศชนิดนี้มักจะพบในฉนวนแข็ง มีสาเหตุมาจากกระบวนการผลิต เช่นการหล่อ การหุ้ม การคิสซาร์จชนิดนี้จะเกิดขึ้นก่อนค่าแรงดันสูงสุด (Voltage Peak) และจะหยุดการคิสซาร์จเมื่อถึงค่าแรงดันสูงสุด ทั้งไซเคลบวกละรอบของแรงดันรูปไซน์

ตำแหน่งของการคิสซาร์จที่แสดงโดยออสซิลโลสโคป มีลักษณะเป็นเส้นตั้งฉากบนรูปวงรี ในช่วงที่แสดงผลของการคิสซาร์จบางส่วน ขนาดของการคิสซาร์จนี้จะขึ้นอยู่กับขนาดและจำนวนของโพรงอากาศ การคิสซาร์จชนิดนี้มีผลกระทบจากแรงดันและช่วงเวลาน้อยมาก กล่าวคือเมื่อแรงดันและช่วงเวลาเพิ่มขึ้น ขนาดของการคิสซาร์จบางส่วนจะไม่เปลี่ยนไปมาก จากการทดสอบที่แรงดันเริ่มต้น (Withstand) และช่วงเวลาที่กำหนด ( $\cong 10$  นาที) จากเอกสารอ้างอิงที่ [17]



ก) โพรงอากาศที่เกิดขึ้นในไดอิเล็กตริก

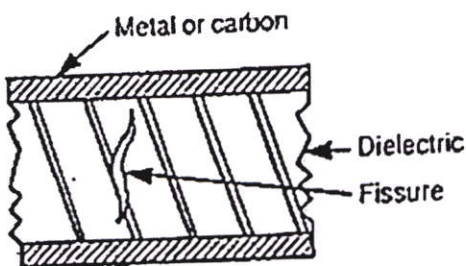


ข) ตำแหน่งของ PD บนฐานเวลารูปวงรี

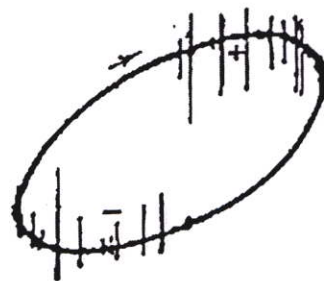
รูปที่ 2.19 การเกิดคิสซาร์จบางส่วนที่เกิดจากโพรงอากาศ

## 2) การคิสซาร์จที่เกิดจากรอยแตก (Fissure) ภายในไดอิเล็กตริก

การคิสซาร์จชนิดนี้โดยมากจะพบมากในไดอิเล็กตริกที่มีความยืดหยุ่น เช่น เทอร์โมพลาสติก รอยแตกที่เกิดขึ้นจะมีทิศทางเดียวกันกับสนามไฟฟ้า สาเหตุโดยทั่วไปจะเกิดจากสิ่งสกปรกที่เกิดขึ้นในไดอิเล็กตริกและฟองหรือโพรงอากาศที่เกิดใกล้ๆกัน และขยายตัวรวมกัน ปรากฏการณ์นี้จะพบบ่อยในสายเคเบิลที่ใช้งานไประยะหนึ่งแล้ว



ก) รอยแตกภายในไดอิเล็กตริก



ข) ตำแหน่งของ PD บนฐานเวลารูปวงรี

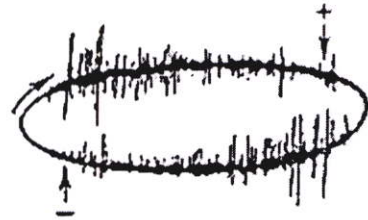
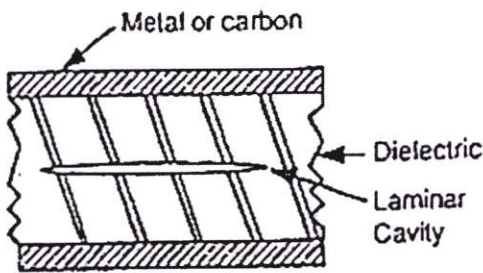
รูปที่ 2.20 การเกิดคิสซาร์จบางส่วนที่เกิดจากรอยแตก

การดิสชาร์จชนิดนี้จะเกิดขึ้นในระหว่างค่าแรงดันสูงสุด (Voltage Peak) โดยจะเกิดขึ้นก่อนและหลังค่าแรงดันสูงสุดเล็กน้อย ทั้งไซเคิลบวกและลบของแรงดันรูปคลื่นไซน์

ค่าของการดิสชาร์จบางส่วนนอกจากจะขึ้นอยู่กับแรงดันและช่วงเวลาแล้ว ยังขึ้นอยู่กับขนาดของรอยแตกด้วย ถ้าหากรอยแตกมีขนาดใหญ่ ขนาดของการดิสชาร์จก็จะมีมาก แต่เมื่อแรงดันสูงมากขึ้นในช่วงเวลา  $\approx 30$  นาที ขนาดของการดิสชาร์จจะค่อยๆลดลง

### 3) การดิสชาร์จที่เกิดจากเศษวัสดุและสิ่งเจือปน (Resin and Contaminants) ภายในไดอิเล็กตริก

เศษวัสดุและสิ่งเจือปนนี้โดยมากจะมีสาเหตุมาจากกระบวนการผลิต เศษวัสดุ (Resin) จะหมายถึงเศษวัสดุที่ใช้ทำฉนวนที่เกิดการไหม้และตกค้างจากกระบวนการผลิต เช่น เซมิคอนดักเตอร์ที่ไหม้ หรือเศษใยไฟเบอร์ ส่วนสิ่งเจือปน (Contaminants) จะหมายถึงสิ่งเจือปนภายนอก ได้แก่ ฝุ่นละออง เศษผงต่างๆ เศษวัสดุและสิ่งเจือปนจะเข้าไปแทรกอยู่ในไดอิเล็กตริก การดิสชาร์จชนิดนี้ยังรวมไปถึงส่วนที่ขรุขระและตำหนิของไดอิเล็กตริกด้วย



ก) เศษวัสดุและสิ่งเจือปนภายในไดอิเล็กตริก

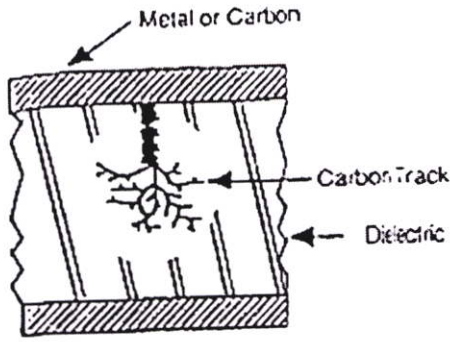
ข) ตำแหน่งของ PD บนฐานเวลารูปวงรี

## รูปที่ 2.21 การเกิดดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดจากเศษวัสดุและสิ่งเจือปน

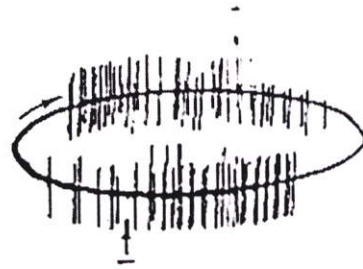
การดิสชาร์จชนิดนี้จะเกิดขึ้นในระหว่างค่าแรงดันสูงสุด คล้ายกับชนิดที่ 2 แต่จะเกิดหลังค่าแรงดันสูงสุดไปเล็กน้อยจะมีการดิสชาร์จเพิ่มมากขึ้น จะเกิดทั้งไซเคิลบวกและลบของแรงดันรูปคลื่น โดยก่อนที่จะถึงค่าแรงดันสูงสุดขนาดของการดิสชาร์จจะน้อยกว่าหลังค่าแรงดันสูงสุด

### 4) การดิสชาร์จที่เกิดจากการขยายตัวของคาร์บอนแทรค (Carbon Track)

การดิสชาร์จชนิดนี้จะเกิดในสารอินทรีย์ (Organic) ที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบของวัสดุที่ใช้ทำฉนวน เช่น ครอบสลิคโพลีเอทิลีน เอทิลีน และโพลีเมอร์ต่างๆ สาเหตุโดยทั่วไปเกิดจากการที่ไดอิเล็กตริกมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงมากทำให้เกิดรอยแตกเป็นเส้นเล็กๆ (Treeing) ภายในไดอิเล็กตริก



ก) คาร์บอนแทร็กภายในไดอิเล็กตริก



ข) ตำแหน่งของ PD บนฐานเวลารูปวงรี

## รูปที่ 2.22 การเกิดดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดจากการขยายตัวของคาร์บอนแทร็ก

การดิสชาร์จชนิดนี้จะเกิดขึ้นที่แรงดันต่ำจนถึงแรงดันสูง โดยเฉพาะก่อนที่จะถึงค่าสูงสุดขนาดของการดิสชาร์จจะมีปริมาณมาก ทั้งไซเคิลบวกและลบของแรงดันรูปคลื่นไซน์ขนาดของการดิสชาร์จจะขึ้นอยู่กับขนาดของคาร์บอนแทร็ก โดยทั่วไปการดิสชาร์จชนิดนี้จะเกิดขึ้นทุกค่าของแรงดัน ยกเว้นค่าแรงดันเท่ากับศูนย์หรือไม่มีการดิสชาร์จ ขนาดของการดิสชาร์จจะมีขนาดใหญ่และเกือบจะเท่ากันในทุกๆตำแหน่ง แรงดันและช่วงเวลามีผลต่อการขยายตัวของรอยแตกและขนาดของการดิสชาร์จ ที่แรงดันสูงมากๆจะทำให้ขนาดของการดิสชาร์จเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยที่ขนาดของการดิสชาร์จจะไม่คงที่ การทดสอบที่ซ้ำๆ จะทำให้ขนาดของคาร์บอนแทร็กขยายตัวใหญ่ขึ้น จากการจำแนกชนิดของการดิสชาร์จบางส่วน จากความบกพร่องของไดอิเล็กตริกในสายเคเบิลสามารถใช้เป็นพื้นฐานในการตั้งข้อสันนิษฐานเกี่ยวกับการดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นว่ามีสาเหตุมาจากอะไร แต่ในทางปฏิบัติจะพบว่าการแสดงผลของการดิสชาร์จบางส่วนจะประกอบไปด้วยสาเหตุหลายชนิดดังที่กล่าวมาแล้วรวมกันทั้งสัญญาณรบกวนจะภายใน ดังนั้นจึงต้องมีวงจรกรองสัญญาณรบกวน (Filter) เหล่านี้ออก เพื่อที่จะแสดงขนาดของการดิสชาร์จบางส่วนได้อย่างถูกต้อง

## 2.9 การเกิดเบรคดาวน์ และการนำไฟฟ้าในฉนวนของเหลว

สำหรับฉนวนของเหลวนั้น การใช้งานหลักๆ ในทางไฟฟ้าแรงสูงจะใช้ในการฉนวนสายเคเบิล ตัวเก็บประจุแรงสูง ฉนวนน้ำมันสำหรับหม้อแปลง และเซอร์กิตเบรคเกอร์ เป็นต้น และนอกจากคุณสมบัติการใช้งานในทางฉนวนแล้ว ฉนวนของเหลวยังต้องมีคุณสมบัติอื่นๆ เข้ามาพิจารณาอีกในการใช้งานจริง เป็นต้นว่า ฉนวนน้ำมันในหม้อแปลงนอกจากจะทำหน้าที่เป็นฉนวนแล้วยังทำหน้าที่เป็นตัวระบายความร้อนให้แก่หม้อแปลงด้วย ส่วนฉนวนในเซอร์กิตเบรคเกอร์จะเป็นตัวดับอาร์คด้วย ฉนวนของเหลวหรือสารไดอิเล็กตริกของเหลวที่นิยมใช้งานกันมากที่สุดก็คือ น้ำมัน

ปิโตรเลียมและสารพวกไฮโดรคาร์บอน สำหรับการใช้งานที่อุณหภูมิสูงๆ บางครั้งจะมีการใช้น้ำมันซิลิโคนและฟลูออรีนไฮโดรคาร์บอน ในระยะหลังๆ นี้เริ่มที่จะมีการใช้น้ำมันพีชและเอสเทอร์เป็นฉนวน โดยปกติฉนวนของเหลวจะเป็นส่วนผสมของไฮโดรคาร์บอน และจะเกิดเป็นขั้ว (Polarize) ได้ง่าย การใช้งานฉนวนของเหลวควรจะปราศจากความชื้น, สารที่เกิดจากการออกซิเดชันและสิ่งปนเปื้อนต่างๆ และการที่มีสิ่งเจือปนผสมอยู่เพียง 0.01% จะมีค่าความคงทนต่อสนามไฟฟ้าลดลงจากน้ำมันหม้อแปลงในสถานะแห้ง (ไม่มีน้ำเจือปน) ถึง 20% และถ้าน้ำมันมีสิ่งเจือปนเป็นสารอื่นจะยิ่งทำให้ความคงทนต่อสนามไฟฟ้าลดลงรวดเร็วกว่านี้มาก การพิจารณาคูสมบัติของไดอิเล็กตริกเหลวจะพิจารณากันที่สำคัญๆ อยู่ 3 ประการคือ ค่าความนำไฟฟ้า ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ( $\epsilon$ ) และค่าความคงทนต่อแรงดันเบรคดาวน์

ในการนำฉนวนเหลวมาใช้งานจริงๆ นั้น จะต้องพิจารณาคูสมบัติอื่นอีกหลายประการ ทั้งทางฟิสิกส์และเคมี เป็นต้นว่า ความถ่วงจำเพาะ ความหนืด การทนต่อความร้อน การระบายความร้อน การถูกไหม้ ฯลฯ ในทางปฏิบัติจริง การเลือกใช้ฉนวนของเหลวจะพิจารณาจุดหลักที่เสถียรภาพทางเคมีรวมไปถึงคุณสมบัติอื่นๆ เช่น พื้นที่การใช้งาน ราคา ความสะอาด อายุการใช้งาน และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของไดอิเล็กตริกของเหลวที่นิยมใช้งานเป็นฉนวนไฟฟ้า[11]

คุณสมบัติ	ชนิดของฉนวน		
	เหลว		
	น้ำมันหม้อแปลง	คลอรีน	ฟลูออรีน
ความถ่วงจำเพาะ $g/cm^3$	0.9	1.4	1.8
จุดติดไฟ $^{\circ}C$	130-180	-	-
สภาพนำความร้อน $mW/cm^{\circ}C$	1.6	1	1
ความต้านทานจำเพาะ $ohm-cm$ ที่ $85^{\circ}C$	$100 \cdot 10^{12}$	$100 \cdot 10^{12}$	$100 \cdot 10^{12}$
แฟกเตอร์พลังงานสูญเสียที่ $80^{\circ}C$ 50 Hz	$10 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-4}$
ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าตาม IEC Standard ที่ $20^{\circ}C$ kV/mm	10-25		
ผลแตกตัวขององค์ประกอบเมื่อเกิดอาร์คไฟฟ้า	ไฮโดรเจน-อะเซททีลีน	กรดไฮโดรคลอริก	กรดไฮโดรฟลูออริก

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของฉนวนน้ำมันชนิดต่างๆที่สำคัญ [11]

Property	Transformer oil	Cable oil	Capacitor oil	Askerals	Silicone oils
Breakdown strength at 20°C on 2.5 mm standard spheregap	15 kV/mm	30 kV/mm	20 kV/mm	20-25 kV/mm	30-40 kV/mm
Relative permittivity (50 Hz)	2.2-2.3	2.3-2.6	2.1	4.8	2-73.0
Tab 8 (50 Hz)	0.001	0.002	$0.25 \cdot 10^{-3}$	$0.6 \cdot 10^{-2}$	$10^{-3}$
(1 kHz)	0.0005	0.0001	$0.10 \cdot 10^{-3}$	$0.5 \cdot 10^{-2}$	$10^{-4}$
Resistivity (ohm-cm)	$10^{12}$ - $10^{13}$	$10^{12}$ - $10^{13}$	$10^{13}$ - $10^{14}$	$2 \cdot 10^{13}$	$3 \cdot 10^{14}$
Specific gravity at 20°C	0.89	0.93	0.88-0.87	1.4	1.0-1.1
Viscosity at 20°C (CS)	30	30	30	100-150	10-1000
Acid value (mg/gm of KOH)	Nil	Nil	Nil	Nil	Nil
Refractive index	1.4820	1.470	1.4740	1.60	1.50-1.60
Saponification (mg of KOH/gm of oil)	0.01	0.01	0.01	<0.01	<0.01
Expansion (20-100°C)	$7 \cdot 10^{-4}$	$7 \cdot 10^{-4}$	$7 \cdot 10^{-4}$	$7 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$
Maximum permissible water content (in ppm)	50	50	50	<30 (negligible)	<30 (negligible)

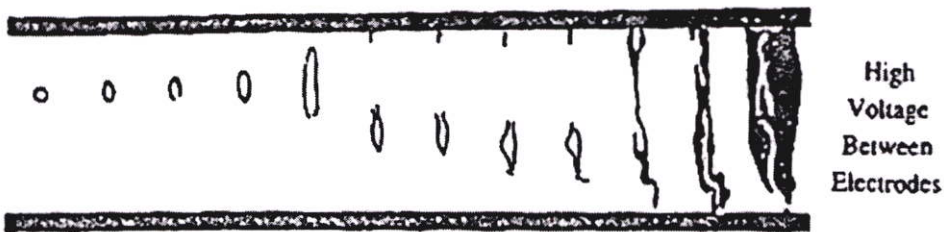
### 2.9.1 ทฤษฎีการเกิดเบรคดาวน์จากช่องว่างและฟองก๊าซ

จากการทดลองในฉนวนเหลวหลายชนิดพบว่าค่าความคงทนต่อแรงดันเบรคดาวน์ จะขึ้นกับค่าความกดดันน้ำที่กระทำกับของเหลว จึงได้มีการสันนิษฐานเกี่ยวกับปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้ว่า ชนิดของการฟอร์มตัวของฟองก๊าซที่แทรกตัวอยู่ในฉนวนเหลวนั้นมีผลอย่างมากต่อการเบรคดาวน์ และกระบวนการต่างๆ ที่คาดกันว่าจะเป็นผลให้เกิดการฟอร์มตัวของฟองก็คือ

- 1) ก๊าซที่ถูกกับเก็บไว้ที่ผิวของอิเล็กโทรด (ผิวขั้วไม่เรียบทำให้มีหลุมก๊าซ)
- 2) แรงผลัทางไฟฟ้าระหว่างประจุ ซึ่งอาจจะทำให้เกิดแรงดึงผิวขึ้น
- 3) การแยกตัวของโมเลกุลของฉนวนเหลวที่เกิดโคโรนาในบริเวณใกล้ขั้วอิเล็กโทรด

#### 4) การระเหยของฉนวนเหลวจากการเกิดโคโรนาในบริเวณใกล้ขั้วอิเล็กโทรด

ฟองก๊าซที่เกิดขึ้นหรือแทรกตัวอยู่ในฉนวนเหลวจะเปลี่ยนรูปร่างโดยยึดตัวออกตามแนวของสนามไฟฟ้า เพราะฟองเหล่านี้ไม่สามารถยึดตัวได้ ขณะที่ฟองก๊าซยึดตัวออกตามแนวแรงทางไฟฟ้าจะยังคงมีปริมาตรคงที่อยู่ตลอด การเบรคดาวนจะเกิดขึ้นเมื่อแรงดันตกคร่อมตามแนวยาวของฟองเท่ากับค่าต่ำสุดบนเส้นโค้งของ Paschen (Paschen's Curve) ตามคุณสมบัติของก๊าซที่แทรกอยู่ ดังแสดงในรูปที่ 2.23 ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงของหยดน้ำในฉนวนเหลวซิลิโคนเป็นขั้นตอนเมื่อจ่ายแรงดันคร่อมขั้วอิเล็กโทรดมากขึ้น ซึ่งในกรณีนี้จะเห็นได้ชัดว่าหยดน้ำที่ผสมอยู่จะเป็นตัวทำให้เกิดเบรคดาวนขึ้น จากเอกสารอ้างอิงที่ [11]

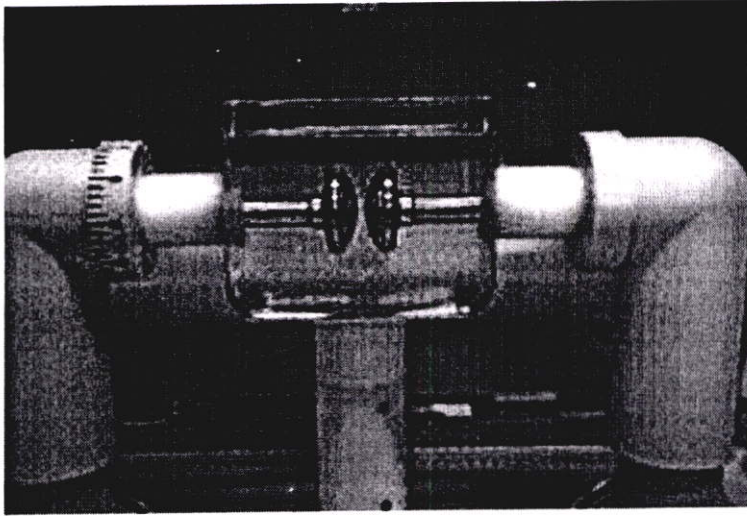


รูปที่ 2.23 หยดน้ำเมื่ออยู่ในฉนวนเหลว (ซิลิโคน) ภายใต้สนามไฟฟ้ามากขึ้นเรื่อยๆ

#### 2.9.2 กลไกทางอุณหภูมิจากการเกิดเบรคดาวนในฉนวนเหลว

เทอร์มัลเบรคดาวนเป็นอีกกลไกหนึ่งที่สามารถอธิบายการเกิดเบรคดาวนในฉนวนเหลวได้เป็นอย่างดี กลไกนี้เป็นการพิจารณาการทดลองขณะที่เกิดกระแสปริมาณมากๆ ในช่วงก่อนเกิดเบรคดาวน โดยวิเคราะห์ให้กระแสนี้เดินทางจากจุดเล็ก ๆ บนผิวคาโทด (มีความหนาแน่นกระแสตั้งแต่ 1 แอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ( $A/cm^2$ )) กระแสที่มีความหนาแน่นสูงนี้จะทำให้เกิดความร้อนขึ้นในฉนวนเหลว และทำให้เกิดฟองไอขึ้น ฟองไอนี้จะฟอร์มตัวกันขึ้น เมื่อพลังงานเกินกว่า  $10^7$  วัตต์ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ( $w/cm^3$ ) และเกิดเบรคดาวนตามมาโดยการยึดตัวของฟองก๊าซจนถึงจุดวิกฤตหรือเมื่อช่องว่างที่เกิดขึ้นยึดตัวจนเป็นสะพานระหว่างขั้วอิเล็กโทรด โดยทั้ง 2 กรณีจะสังเกตเห็นการสปาร์กเป็นประกายไฟขึ้น

การพิจารณากลไกเบรคดาวนลักษณะนี้จะได้ค่าความคงทนต่อแรงดันเบรคดาวนแปรผันกับความดัน และโครงสร้างโมเลกุลของฉนวนเหลว ตัวอย่างเช่น n-alkens จะมีค่าความคงทนต่อแรงดันเบรคดาวนขึ้นกับความยาวลูกโซ่ของโมเลกุล อย่างไรก็ตามทฤษฎีนี้จะอธิบายได้เฉพาะในกรณีที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด (Gap) ใกล้ๆกันเท่านั้น ( $\leq 100 \mu m$ ) ไม่สามารถอธิบายการเบรคดาวนที่ระยะห่างมากๆได้



รูปที่ 2.24 ชุดภาชนะทดสอบน้ำมันหม้อแปลง (Test Cell) IEC No. 156-1995

ปัจจัยหนึ่งที่มีผลอย่างมากต่อการเกิดเบรคดาวน์ของฉนวนเหลวคือระยะระหว่างอิเล็กโทรดหรือระยะห่าง (Gap Length) โดยค่าแรงดันเบรคดาวน์สามารถแสดงได้ดังสมการ

$$V_b = Ad^n \quad (2.8)$$

โดย  $d$  เป็นระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด  
 $A$  เป็นค่าคงที่  
 $n$  เป็นค่าคงที่

$A$  และ  $n$  จะหาได้จากการทดลองเท่านั้นและเราสามารถหาค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าได้ดังสมการ

$$E = \frac{V_b}{d} \quad (2.9)$$

นอกจากปัจจัยต่างๆที่ได้กล่าวไปแล้ว แรงดันเบรคดาวน์ยังขึ้นอยู่กับลักษณะของลูกคลื่นแรงดัน และช่วงเวลาที่ป้อนผ่านฉนวนเหลวอีกด้วย นั่นคือ ความคงทนต่อแรงดันเบรคดาวน์ของฉนวนเหลวจะขึ้นอยู่กับความเครียดสนามไฟฟ้าที่คงอยู่ในลักษณะต่างๆ จากการทดลองพบว่า ค่าความคงทนต่อแรงดันเบรคดาวน์ขณะจ่ายแรงดันคงตัว (ไฟฟ้ากระแสตรงและไฟฟ้ากระแสสลับ) จะมีค่าต่ำกว่าขณะจ่ายแรงดันลูกคลื่นอิมพัลส์

## 2.10 การควบคุมสนามไฟฟ้าของสายเคเบิล

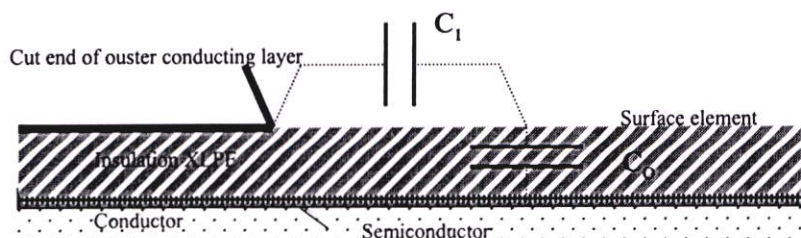
ในการทดสอบฉนวนของสายเคเบิล จะทำการป้อนแรงดันทดสอบระหว่างตัวนำและชั้นกึ่งตัวนำนอก โดยป้อนแรงดันสูงเข้าที่ตัวนำและชั้นกึ่งตัวนำนอกจะเป็นกราวด์ ในการทดสอบสายเคเบิลที่ไม่มีขั้วต่อพิเศษ ถ้าทำการทดสอบดังกล่าวจะเกิดการวาบไฟตามผิวขึ้น เนื่องจากระยะห่างระหว่างแรงดันสูงกับกราวด์น้อยมาก ปัญหาที่เกิดขึ้นนี้สามารถแก้ไขได้ โดยการเพิ่มระยะห่างระหว่างแรงดันสูงกับกราวด์ โดยการตัดชั้นกึ่งตัวนำนอกบางส่วนออก แต่ปัญหาที่จะเกิดตามมาคือ สนามไฟฟ้าที่ขอบของชั้นกึ่งตัวนำนอกจะเกิดความไม่สม่ำเสมอสูง ดังรูปที่ 2.25 (ในสายเคเบิลปกติ สนามไฟฟ้าจะกระจายอยู่อย่างสม่ำเสมอในฉนวน ระหว่างตัวนำ และชั้นกึ่งตัวนำนอก) ซึ่งจะนำไปสู่การเกิดเบรคดาวน์ในฉนวนได้ จึงจำเป็นต้องควบคุมสนามไฟฟ้าในบริเวณนั้น ให้เกิดความไม่สม่ำเสมอให้น้อยที่สุด ในการควบคุมสนามไฟฟ้าจะพิจารณาจากค่า คาปาซิแตนซ์ 2 ตัว คือ

1. ค่าคาปาซิแตนซ์ระหว่างชั้นของตัวนำที่ถูกตัดออก กับ ฉนวน ( $C_1$ )
2. ค่าคาปาซิแตนซ์ระหว่าง ฉนวนกับตัวนำ ( $C_0$ )

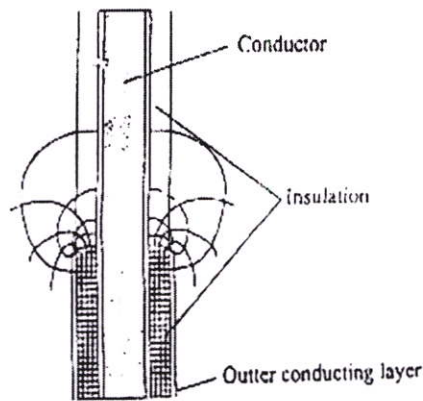
ความสัมพันธ์ระหว่างคาปาซิแตนซ์ กับแรงดันระหว่างฉนวนกับชั้นตัวนำที่ถูกตัดออกเป็นดังนี้

$$U_a \approx E_d \sqrt{\frac{C_1}{C_0}} \quad (2.10)$$

- เมื่อ  $U_a$  คือ แรงดันเริ่มต้นของการเบรคดาวน์ระหว่างฉนวนกับชั้นตัวนำที่ถูกตัดออก  
 $C_1$  คือ ค่าคาปาซิแตนซ์ระหว่างชั้นตัวนำที่ถูกตัดออกไปกับฉนวน  
 $C_0$  คือ ค่าคาปาซิแตนซ์ระหว่างฉนวนกับตัวนำ  
 $E_d$  คือ ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าเบรคดาวน์ที่ปลายชั้นของตัวนำที่ถูกตัดออก



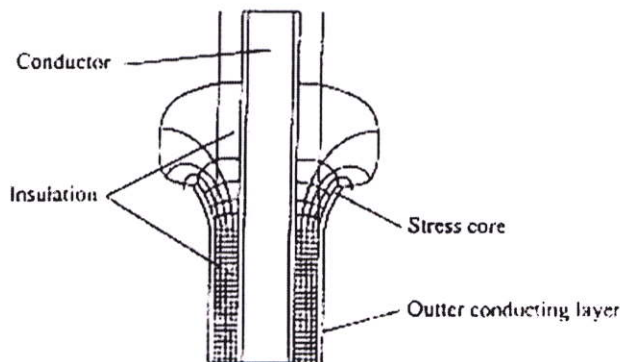
รูปที่ 2.25 แสดงค่าคาปาซิแตนซ์ของสายเคเบิลแรงดันสูง [18], [19]



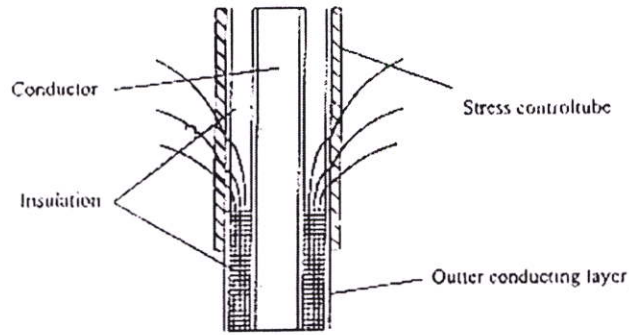
รูปที่ 2.26 แสดงสนามไฟฟ้าที่ไม่มีการแก้ไข

ถ้ารอบๆสายเคเบิลเป็นอากาศ ค่า  $C_1$  จะน้อยมากเมื่อเทียบกับ  $C_0$  จะทำให้แรงดันเริ่มต้นของการเบรคดาวน์มีค่าต่ำ ทำให้เบรคดาวน์ได้ง่าย ในการควบคุมจึงต้องทำให้อัตราส่วนระหว่าง  $C_1/C_0$  มีค่ามาก นั่นก็คือทำให้  $C_1$  เพิ่มขึ้นหรือ  $C_0$  ลดลงนั่นเอง

1. Capacitive stress control จะเป็นการลด  $C_0$  ซึ่งสามารถกระทำได้โดย การเพิ่มรัศมีของชั้นตัวนำด้านนอกที่ถูกตัดออก โดยใช้ Stress cone ดังรูปที่ 2.27
2. Refractive stress control จะเป็นการเพิ่ม  $C_1$  โดยการเติมชั้นฉนวนที่มีค่าไดอิเล็กตริกสูงๆไว้รอบสายเคเบิลดังรูปที่ 2.28



รูปที่ 2.27 แสดงการแก้ไขสนามไฟฟ้าแบบ Capacitive stress control

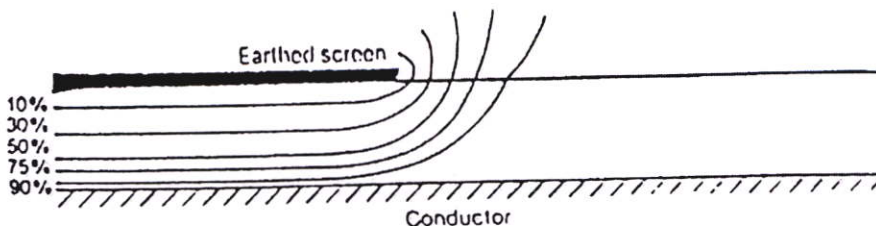


รูปที่ 2.28 แสดงการแก้ไขสนามไฟฟ้าแบบ Refractive stress control [2]

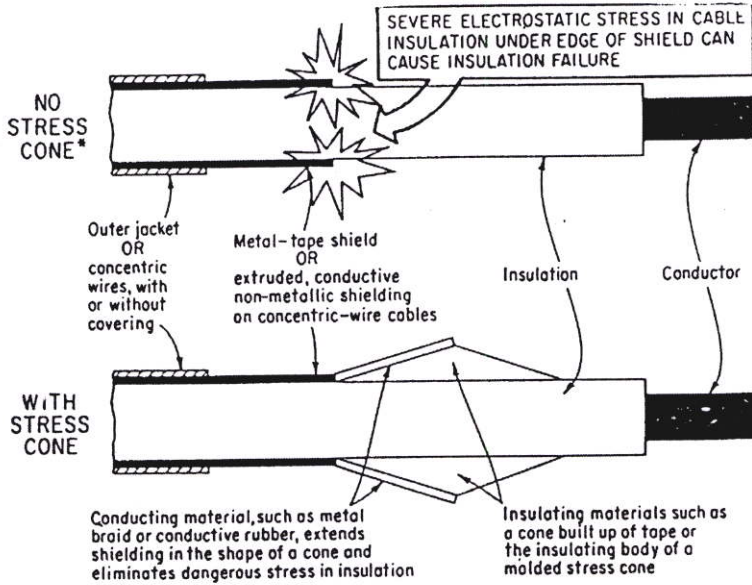
วิธีที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้เป็นแบบ Refractive stress control เพราะว่าวิธี Capacitive stress control ยุ่งยากในการคำนวณและการปฏิบัติ stress cone ในขณะที่แบบ Refractive stress control ง่ายต่อการคำนวณและการปฏิบัติ

### 2.10.1 Stress Cone เมื่อทำ Splicing และ Terminating

สายไฟฟ้าเส้นหนึ่งๆจะประกอบด้วยปลายสายอยู่สองข้างด้วยกัน ระหว่างสายตัวนำไฟฟ้า กับ Shield ซึ่งถูกต่อลงดินจะถูกคั่นด้วยฉนวนที่มีความหนาแน่นไม่มากนัก เมื่อป้อนแรงดันให้สายไฟฟ้า จะเกิดความต่างศักย์ระหว่างสายตัวนำกับ Shield ถ้าระยะห่างไม่มากพอก็จะเกิดกระแสไหลข้าม (Flashover) จากสายตัวนำนั้นไปยัง Shield ในกรณีที่ทำการต่อสายหุ้มเข้ากับสายเปลือยหรือระยะห่างสายหุ้มด้วยกัน จึงจำเป็นต้องทำให้ Shield ห่างออกจากสายตัวนำ กรณีนี้สนามไฟฟ้าจะไม่ถูกควบคุมด้วย Shield อีกต่อไป (เฉพาะช่วงที่ปก Shield ออก) สนามไฟฟ้าจะเกิดเบี่ยงเบนอย่างกระทันหันตามที่แสดงในรูปที่ 2.29 ผลของสนามไฟฟ้าเบี่ยงเบนจะมีจุดซึ่งมีสนามไฟฟ้าหนาแน่นและตรงจุดนี้เองจะทำให้ค่าของ Dielectric Strength ลดลง จะเป็นผลให้ฉนวนไฟฟ้าตรงจุดนั้นชำรุดได้ง่าย ดังแสดงในรูปที่ 2.30

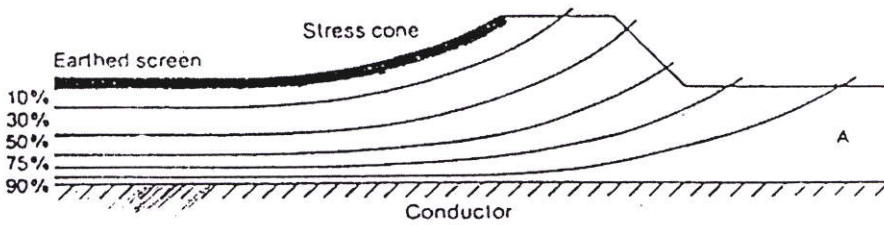


รูปที่ 2.29 Potential Field at a Screen Termination

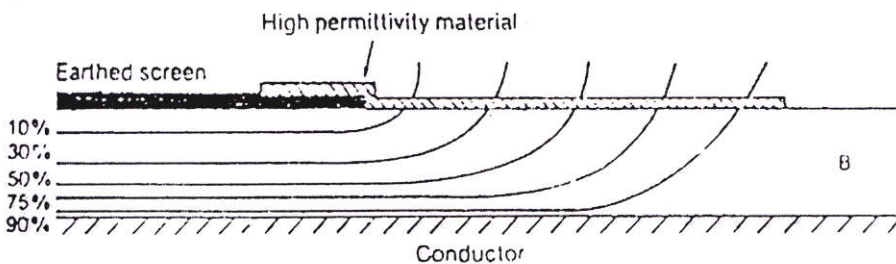


รูปที่ 2.30 เปรียบเทียบการมี Stress cone กับ ไม่มี Stress cone

ผลของการที่สนามไฟฟ้าเบี่ยงเบนนี้สามารถแก้ไขได้โดยการทำ Stress cone การทำ Stress cone อาจใช้ High Permittivity Material ทำหน้าที่แทนก็ได้ ตามที่แสดงในรูปที่ 2.32



รูปที่ 2.31 การกระจายสนามไฟฟ้าเมื่อใช้ Stress cone



รูปที่ 2.32 การกระจายสนามไฟฟ้าเมื่อใช้ High Permittivity Material

## บทที่ 3

# ทฤษฎีและหลักการออกแบบขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูง

### 3.1 บทนำ

วิทยานิพนธ์ในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการและทฤษฎีที่ใช้ในการออกแบบขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวน XLPE โดยเลือกขนาดของสายเคเบิลที่ใช้ในการทดสอบที่ระดับแรงดันใช้งาน คือ 24 กิโลโวลต์ ซึ่งใช้สายขนาด 240 ตารางมิลลิเมตร ในการออกแบบและสร้างขึ้น การเลือกฉนวนที่มีคุณสมบัติเป็นไดอิเล็กตริกในการขึ้นที่บริเวณขั้วต่อสายเพื่อทำหน้าที่ควบคุมสนามไฟฟ้าที่กระจายของสายเคเบิลที่ปลดปล่อยสายสำหรับทดสอบ ลักษณะของสนามไฟฟ้าแบบต่างๆ ทั้งในวัสดุเนื้อเดียวกันและต่างชนิดกัน ตลอดจนการออกแบบลักษณะของโครงสร้างต่างๆ ที่ใช้ประกอบกันทำหน้าที่เป็นขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูง

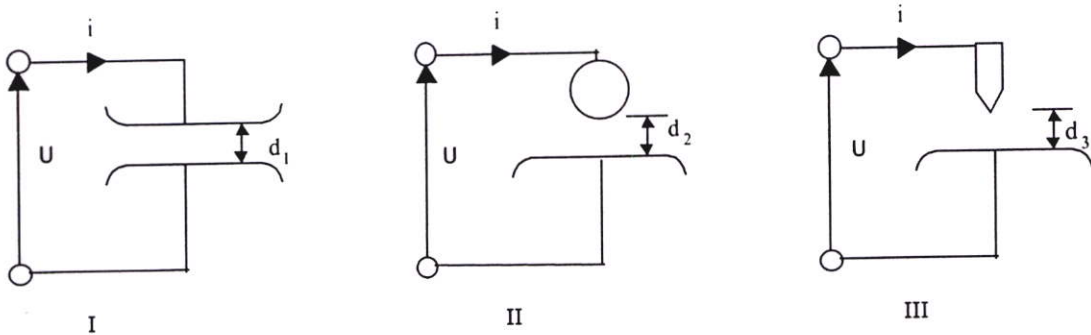
### 3.2 ความคงทนของการฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้า

การออกแบบการฉนวนให้ดีและประหยัดจำเป็นต้องใช้ความรู้เทคนิคการฉนวน ซึ่งเกี่ยวข้องกับแรงดัน ความเครียดสนามไฟฟ้าและลักษณะสมบัติของฉนวน พิกัดความคงทนของฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้า กำหนดด้วยสภาพการฉนวนเริ่มจะเปลี่ยนไปสู่สภาพนำไฟฟ้าอย่างดี ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อเกิดสปาร์ก วาบไฟหรือเบรคดาวน์ผ่านฉนวน โดยปกติสภาพนำไฟฟ้าอย่างดีนั้นจะมีแนวแคบๆ ตามเส้นทางที่เกิดเบรคดาวน์ ถ้าฉนวนนั้นเป็นก๊าซ ฉนวนเปลี่ยนเป็นสภาพนำไฟฟ้าไปและคงอยู่ได้ก็ต่อเมื่อแรงดันนั้นสูงพอที่ทำให้เกิดกระแสไหลผ่านฉนวนสูงจนเป็นอาร์ค นั่นก็หมายความว่า การเสียดสภาพการฉนวนของก๊าซนั้นไม่เป็นแบบถาวร คือ เสียดสภาพการฉนวนชั่วขณะที่มีแรงดันป้อนอยู่ ตรงกันข้ามกับการฉนวนที่เป็นของแข็งหลังจากเกิดเบรคดาวน์แล้ว สภาพการฉนวนจะเสียดไปอย่างถาวร ส่วนการฉนวนที่เป็นของเหลว การเสียดสภาพการฉนวนจะกลับคืนสู่สภาพการฉนวนดั้งเดิมหลังจากการเบรคดาวน์ หรือสปาร์กได้ผ่านพ้นไปแล้ว ทำนองเดียวกับการฉนวนที่เป็นก๊าซ

ความคงทนของการฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้า หมายถึงค่าความเครียดสนามไฟฟ้า (Electric field stress) สูงสุดที่ฉนวนนั้นสามารถทนอยู่ได้ โดยไม่เกิดความเสียหายหรือเกิดเบรคดาวน์ หรือทำให้การฉนวนเสื่อมสภาพซึ่งมีหน่วยเป็น V/cm หรือ kV/cm คือ มีหน่วยเป็นค่าแรงดันต่อหน่วยความหนาของฉนวนหรือระยะห่างของอิเล็กโตรด ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ใช้กำหนดค่า

ความคงทนของการฉนวนทางไฟฟ้า โดยทั่วไปจะหาจากสนามไฟฟ้าที่สม่ำเสมอ (uniform field) คือ เป็นสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดที่มีลักษณะเป็นแผ่นระนาบ (plate-to-plate)

ความคงทนของการฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้า  $E_b$  ขึ้นอยู่กับแฟกเตอร์ต่างๆ หลายประการ ซึ่งพอจะเขียนเป็นเกณฑ์ทั่วไปได้ว่า  $E_b = f$  (ลักษณะแห่งเรขาคณิตของอิเล็กโทรด, ลักษณะสมบัติของไดอิเล็กตริกและเวลา)



รูปที่ 3.1 อิเล็กโทรดที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าแบบต่างๆ กัน

- I) สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (Uniform field)
- II) สนามไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย (Slightly nonuniform field)
- III) สนามไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอสูง (High nonuniform field)

ถ้าป้อนแรงดันให้กับอิเล็กโทรดลักษณะต่างๆ ที่วางอยู่ในอากาศดังรูป 3.1 จะพบว่าแรงดันที่ทำให้เกิดเบรคดาวน์จะไม่เท่ากัน ถึงแม้ว่าจะจัดระยะ  $d_1$ ,  $d_2$  และ  $d_3$  ให้เท่ากันก็ตาม ค่าแรงดันที่ทำให้เกิดเบรคดาวน์สามารถวัดหาได้ง่าย ฉนวนแต่ละชนิดจะมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ามิใช่ตายตัวค่าใดค่าหนึ่ง ส่วนใหญ่จะเป็นค่าสถิติ หรือค่าโดยประมาณ มักกำหนดหรือระบุด้วยค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด  $E_{max}$  ที่เกิดขึ้น ณ จุดใดจุดหนึ่งระหว่างอิเล็กโทรดในขณะที่เบรคดาวน์เริ่มเกิดขึ้นซึ่งจะมีค่ามากหรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับแฟกเตอร์ต่างๆหลายประการ

### 3.2.1 อิเล็กโตรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

อิเล็กโตรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอหมายถึง อิเล็กโตรดที่มีสนามไฟฟ้าทุกๆ จุดในช่องระหว่างอิเล็กโตรดเท่ากัน ซึ่งคำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$E_{\max} = E = \frac{U}{d} \quad (3.1)$$

เมื่อ  $U$  คือ แรงดันที่ป้อนเข้าไประหว่างอิเล็กโตรด

$d$  คือ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรด

$E$  คือ ความเครียดสนามไฟฟ้า ณ. จุดใดๆ ระหว่างอิเล็กโตรด

$E_{\max}$  คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด

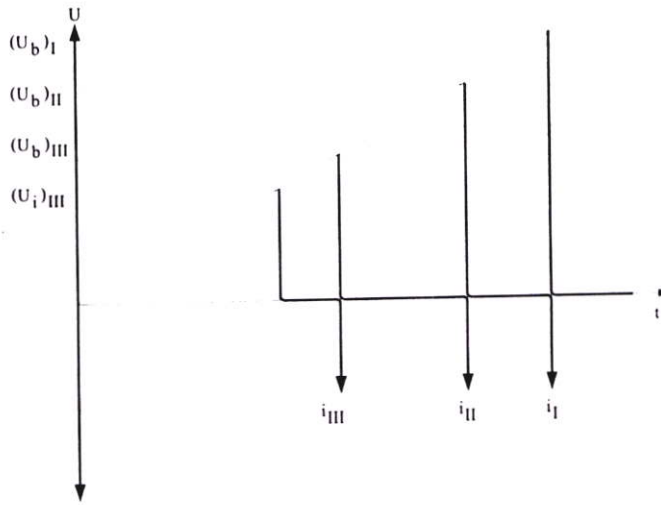
นั่นหมายความว่าเมื่อป้อนแรงดันให้กับอิเล็กโตรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ จะเกิดเบรคดาวน์หรือสปาร์ตันที่ที่ความเครียดสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรด (ซึ่งเท่ากันทุกจุด) ถึงค่าที่กำหนดค่าหนึ่งโดยประมาณและกระแสเพิ่มขึ้น อย่างมากในทันทีทันใด ค่ากระแสเบรคดาวน์นี้จะถูกจำกัดด้วยค่าอิมพีแดนซ์ของตัวจ่ายและวงจรภายนอกเท่านั้น ซึ่งก่อนจะเกิดเบรคดาวน์นั้นค่ากระแสจะวัดไม่ได้ดังในรูป 3.1 (แบบ I) และค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดจากแรงดันขณะจะเกิดเบรคดาวน์นี้ก็คือ ค่าความคงทนทางไฟฟ้าหรือความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนซึ่งคำนวณได้จาก

$$E_b = \frac{U_b}{d} \quad (3.2)$$

เมื่อ  $U_b$  คือ แรงดันที่ทำให้เกิดเบรคดาวน์ด้วยสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

$E_b$  คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ทำให้เกิดเบรคดาวน์ ซึ่งเรียกว่าความคงทนทางไฟฟ้าของการฉนวน

อย่างไรก็ตามค่า  $E_b$  นี้ของไดอิเล็กตริกชนิดหนึ่งก็มีค่าไม่คงตัวเสมอไป เพราะขึ้นอยู่กับแฟกเตอร์ต่างๆ เช่น แม้แต่ความหนาหรือระยะห่าง  $d$  ที่ไม่เท่ากับค่า  $E_b$  ก็ไม่เท่ากัน ฉะนั้นในมาตรฐานที่กำหนดค่าความคงทนทางไฟฟ้าของฉนวนมักจะกำหนดความหนาของไดอิเล็กตริกไว้ด้วยเสมอ



รูปที่ 3.2 เปรียบเทียบแรงดันที่ทำให้เกิดเบรคดาวน์ในโคอีเลคตริกตามลักษณะสนามไฟฟ้า

### 3.2.2 อีเลคโตรดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ (II, III)

อีเลคโตรดแบบนี้ความเครียดสนามไฟฟ้าแต่ละจุดมีค่าแตกต่างกันขึ้นอยู่กับตำแหน่งของจุดนั้น ความแตกต่างกัน ณ จุดต่างๆ จะมากหรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับลักษณะแห่งเรขาคณิตของอีเลคโตรดที่มีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอมากหรือน้อย ดังเช่น อีเลคโตรดในรูป 3.1 II ถ้าเขียนเส้นสนามไฟฟ้าและเส้นศักย์เท่า จะได้ดังในรูป 3.3 จะเห็นได้ว่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะเกิดขึ้นที่ผิวของอีเลคโตรดทรงกลม อาจคำนวณได้จากสมการ

$$E_{\max} = \frac{U}{d\eta^*} \quad (3.3)$$

เมื่อ  $\eta^*$  คือ แฟกเตอร์สนามไฟฟ้า (field utilization factor) มีค่านิยามว่า

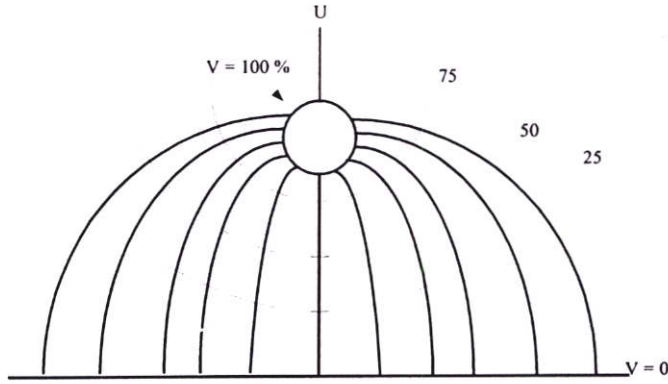
$$\eta^* = \frac{E_{\text{av}}}{E_{\max}} \leq 1$$

โดยที่  $E_{\text{av}}$  คือ ค่าเฉลี่ยของสนามไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ  $\frac{U}{d}$

จึงอาจกล่าวได้ว่า  $\eta^*$  ก็คือ ครอบงำบอกให้ทราบว่าอีเลคโตรดนั้น  $\eta^*$  มีลักษณะสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอมากน้อยเพียงใด และโดยอาศัยแฟกเตอร์สนามไฟฟ้านี้เองจึงคำนวณหาความเครียดเบรคดาวน์ของฉนวนในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอได้คือ

$$E_b = \frac{U_b}{d.\eta^*} \quad (3.4)$$

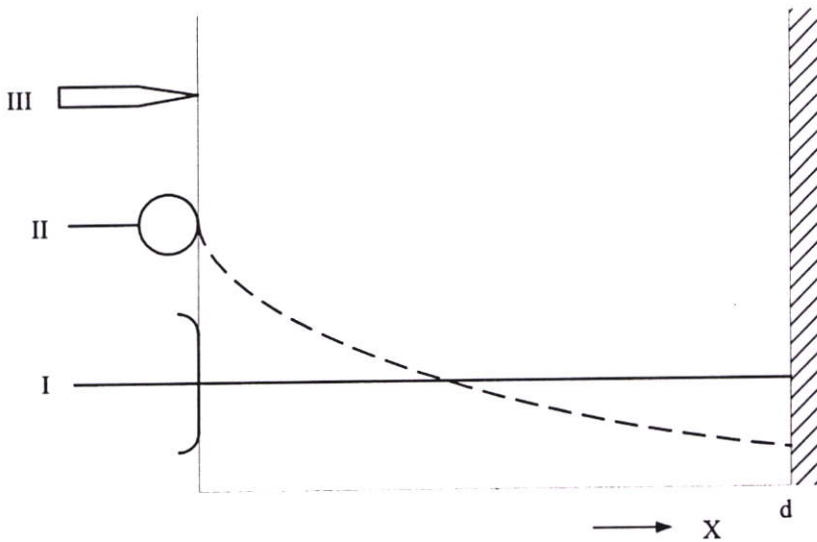
สมการนี้ใช้ได้เฉพาะกรณีทีโอเลคโตรดมีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย หรือใช้กับกรณีที่ไม่มี โคร로나หรือพรีดิสชาร์จ (Pre-discharge) เกิดก่อนเบรคดาวน์ดังอิลคโตรดในรูป 3.1 II กล่าวคือ ก่อนเกิดเบรคดาวน์จะไม่ปรากฏว่ามีกระแสไหลระหว่างอิลคโตรดเลย และลักษณะสนามไฟฟ้าจะไม่มีการเปลี่ยนแปลง จะเกิดเบรคดาวน์ทันทีที่ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงถึงค่าหนึ่ง คือ ค่าสนามไฟฟ้าวิกฤติ  $E_0$



รูปที่ 3.3 สนามไฟฟ้าและเส้นศักย์เท่า

- เส้นสนามไฟฟ้า
- -- -- เส้นศักย์เท่า

ในกรณีที่อิลคโตรดมีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง (highly nonuniform field) ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงจะอยู่ในบริเวณใกล้เคียงกับผิวอิลคโตรดที่มีพื้นผิวน้อยที่สุด เช่น ปลายแหลมดังในรูป 3.1 III เมื่อระยะห่างออกไปจากผิวอิลคโตรดค่าความเครียดสนามไฟฟ้าจะลดลงอย่างรวดเร็ว ดังในรูป 3.4 อิลคโตรดแบบนี้ถึงแม้ว่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะมีค่าถึงค่าวิกฤติแล้วก็ตาม จะไม่เกิดเบรคดาวน์แต่จะเกิดโครนา



รูปที่ 3.4 เปรียบเทียบสนามไฟฟ้าของอิเล็กโทรดลักษณะต่างๆ

ในบริเวณใกล้ๆ ฝวอิเล็กโทรด คือ บริเวณที่มีความเครียดไฟฟ้าสูงสุด ส่วนบริเวณอื่นๆ ยังมี ความเครียดสนามไฟฟ้าต่ำจะไม่เกิดโคโรนา ฉะนั้นในช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดจะเกิดดิสชาร์จที่ไม่สมบูรณ์ (คือ ไม่ตลอดแนวระหว่างวางอิเล็กโทรด) เรียกว่าดิสชาร์จบางส่วน (partial discharge) ปรากฏการณ์อาจเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องหรือเป็นช่วงๆ จึงทำให้มีกระแสไหลในวงจรที่ป้อนแรงดันให้กับอิเล็กโทรด กระแสนี้จะเกิดขึ้นและวัดได้ก่อนเกิดเบรคดาวน์เรียกว่ากระแสโคโรนา (corona current) หรือกระแสพรีดิสชาร์จดังในรูปที่ 3.1 III การเกิดโคโรนาจึงทำให้สนามไฟฟ้าแห่ง เรขาคณิตเปลี่ยนไป เพราะมีประจุค้าง (space charge) ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดยังคงคำนวณได้จากสมการ (3.3) แต่  $\eta^*$  จะเปลี่ยนไป ดังนั้นค่าความเครียดเบรคดาวน์ของการคำนวณจะ คำนวณจากสมการ (3.4) นี้อาจใช้คำนวณหาความเครียดสนามไฟฟ้าที่แรงดันโคโรนาเริ่มเกิดได้ เพราะสนามไฟฟ้าแห่งเรขาคณิตยังไม่เปลี่ยนแปลง นั่นคือ

$$E_i = \frac{U_i}{d \cdot \eta^*} \quad (3.5)$$

เมื่อ  $E_i$  คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าโคโรนาเริ่มเกิด  
 $U_i$  คือ แรงดันป้อนที่โคโรนาเริ่มเกิด (corona inception voltage)

โดยที่  $E_i$  และ  $U_i$  เป็นค่าความเครียดสนามไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่โคโรนาเริ่มเกิด ฉะนั้นสมการ (3.5) จึงใช้ได้เฉพาะกรณีที่ไม่มีประจุค้าง ระหว่างอิเล็กโทรด (free of space charge) หรือ

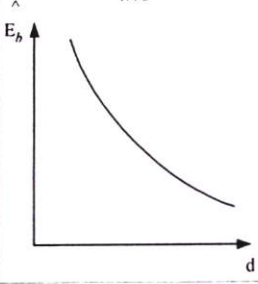
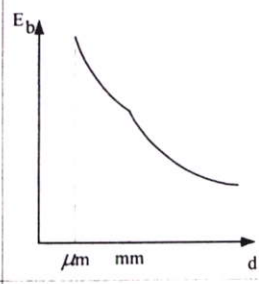
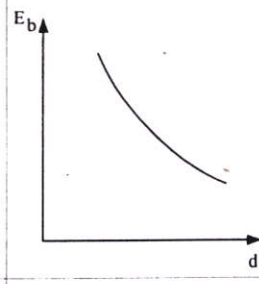
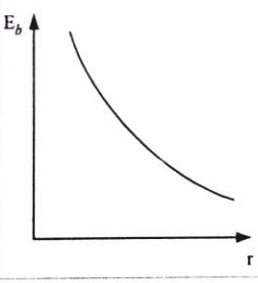
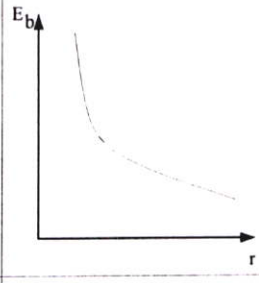
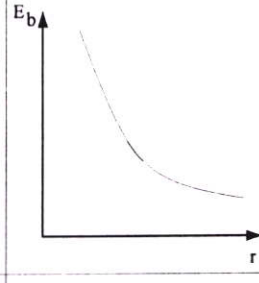
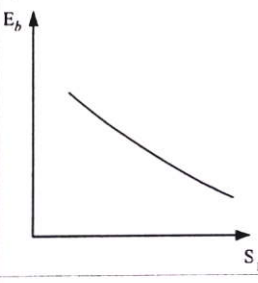
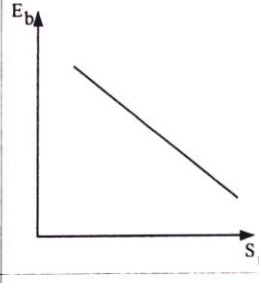
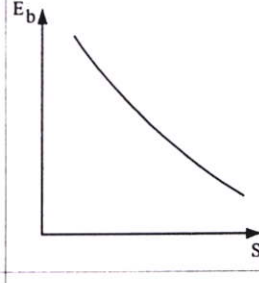
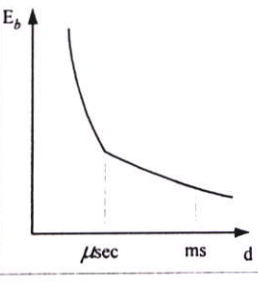
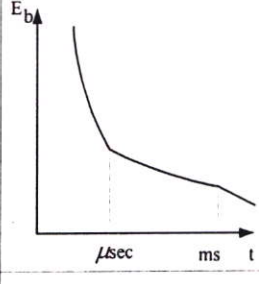
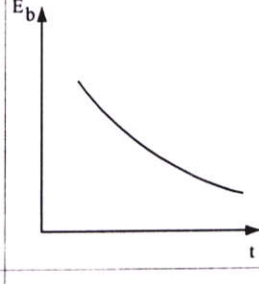
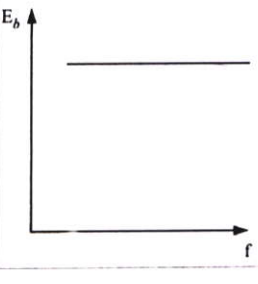
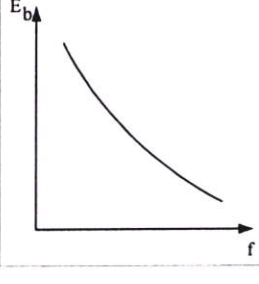
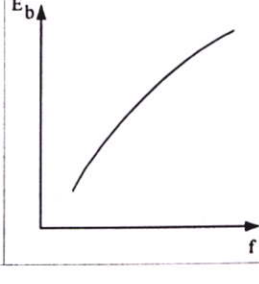
กล่าวง่ายๆ ก็คือสมการ (3.5) นี้ใช้สำหรับคำนวณหาความเครียดสนามไฟฟ้าหรือแรงดันเริ่มต้น (starting voltage threshold voltage inception voltage) ซึ่งหมายถึงแรงดันที่ทำให้เริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงในช่องระหว่างอิเล็กโทรด อาจจะเป็นเบรคดาวน (ในกรณีที่อิเล็กโทรดเป็นแบบสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอหรือไม่สม่ำเสมอเพียงเล็กน้อย) หรือเป็นแรงดันที่โคโรนาเริ่มเกิด (ในกรณีที่อิเล็กโทรดเป็นแบบสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง ค่าแรงดันเบรคดาวนจะมีค่าสูงกว่าค่าแรงดันเริ่มต้น) ค่าแรงดันเริ่มต้นจึงอาจเขียนในรูปสมการทั่วไปได้ว่า

$$U_i = E_i \cdot d \cdot \eta^* \quad (3.6)$$

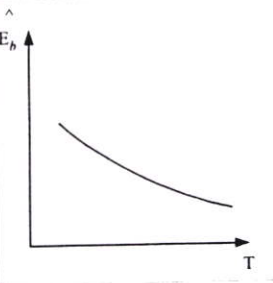
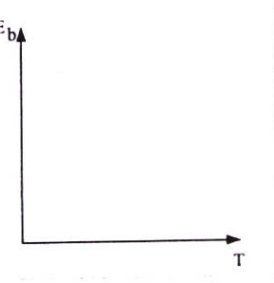
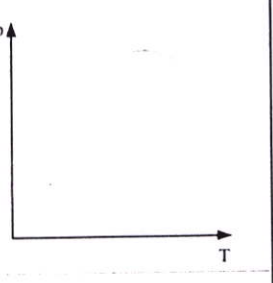
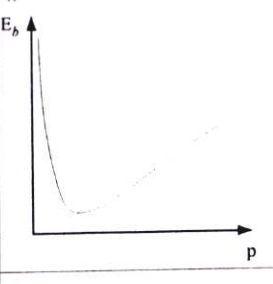
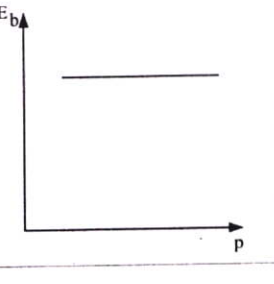
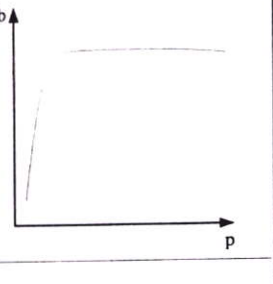
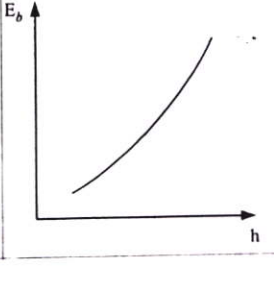
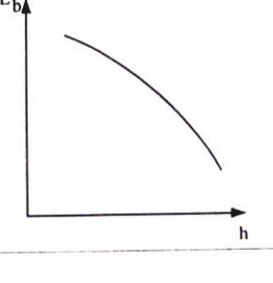
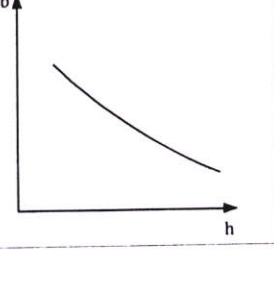
เมื่อ  $U_i$  คือ แรงดันเริ่มต้น  
 $E_i$  คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดจากแรงดันเริ่มต้น  $U_i$

ในกรณีที่อิเล็กโทรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ หรือสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย ค่า  $U_i$  คือ  $U_b$  และ  $E_i$  คือ  $E_b$  ถ้าเป็นอิเล็กโทรดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง  $U_b > U_i$  ค่าแรงดันเบรคดาวนนี้ไม่อาจจะคำนวณได้ง่ายๆ ทั้งนี้เพราะไม่ทราบถึงการกระจายของประจุค้างว่าเป็นอย่างไร ฉะนั้นการคำนวณความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของการฉนวนที่อิเล็กโทรดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง มักจะกำหนดด้วยค่าแรงดันเริ่มต้น หรือความเครียดสนามไฟฟ้าเริ่มต้น เป็นตัวบอกถึงค่าความคงทนการฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้า อย่างไรก็ตามความคงทนการฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้า นั้นนอกจากจะขึ้นอยู่กับลักษณะแห่งเรขาคณิตของอิเล็กโทรด เช่น ระยะห่างของอิเล็กโทรด , รัศมีความโค้งของอิเล็กโทรด , ลักษณะพื้นผิวของอิเล็กโทรด แล้วยังขึ้นอยู่กับแฟกเตอร์อื่นๆ อีกหลายประการ ดังที่ได้แสดงรวบรวมไว้โดยสังเขปในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ความทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าของวัสดุฉนวนขึ้นอยู่กับแฟกเตอร์ต่างๆ

ขึ้นอยู่กับผลกระทบของ	ก๊าซ ก๊าซ	ของเหลว	ของแข็ง
ระยะช่องห่าง $d$			
รัศมีความโค้งของอิเล็กโทรด $r$			
ความขรุขระของผิว			
เวลา $t$ ที่ป้อนแรงดัน			
ความถี่ $0 < f < 1$ kHz			

ตาราง 3.1 (ต่อ)

รูปคลื่นแรงดัน	ค่ายอด	ค่าอาร์ เอ็ม เอส	ค่ายอด หรือ ค่าอาร์ เอ็ม เอส แล้วแต่ส่วนผสมของก๊าซ
อุณหภูมิ T			
ความอืดอากาศ p			
ความชื้น h			

### 3.3 สนามไฟฟ้าในวัสดุสารเนื้อเดียวกัน

การคำนวณทางไฟฟ้าแรงสูงจะถูกจำกัดหรือกำหนดด้วยความเครียดสนามไฟฟ้า (Electric field stress) เป็นประการสำคัญ ฉะนั้นการออกแบบการคำนวณจึงควรจะต้องทราบรูปลักษณะและขนาดของความเครียดสนามไฟฟ้าเพื่อเลือกชนิดและรูปร่างแห่งเรขาคณิตได้เหมาะสมและประหยัดความรู้พื้นฐานที่จะนำมาใช้เกี่ยวกับเรื่องนี้ก็คือที่เรียนมาในวิชา Electric and magnetic field theory ในที่นี้จะกล่าวถึงแต่เฉพาะส่วนที่เกี่ยวข้องและจำเป็นต้องใช้อธิบายด้านเทคนิคไฟฟ้าแรงสูงเท่านั้น

#### 3.3.1 หลักเบื้องต้นเกี่ยวกับสนามไฟฟ้า

โดยรอบประจุไฟฟ้ามีอะไรสิ่งหนึ่งที่เมื่อนำเอาประจุนั้นเข้ามาในบริเวณนั้นแล้วทำให้เกิดแรงกระทำต่อประจุที่นำเข้ามา สิ่งนั้นที่เกิดจากประจุเรียกว่าสนามไฟฟ้า จะมีมากหรือน้อยอาจแสดงหรือวัดในรูปของแรงที่เกิดขึ้น ซึ่งกฎของคูลอมบ์ (Coulombs Law) ว่า ถ้ามีประจุ  $Q_1$  และ  $Q'$  มีขนาดเล็กเป็นจุดวางห่างกันเป็นระยะ  $r$  จะเกิดแรงกระทำต่อกันในแนวทิศทางต่อเชื่อมโยง

ระหว่างสองประจุนั้น สมมติว่าแรงที่เกิดจาก  $Q_1$  ซึ่งมีตำแหน่งทางเวกเตอร์เทียบกับ  $Q_2$  เป็น  $\vec{r}$  แรงที่เกิดขึ้นคำนวณได้จากสมการ

$$F_{Q_1 \rightarrow Q_2} = \frac{1}{4\pi\epsilon} \cdot \frac{Q_1 Q_2 \hat{r}}{r^2} = \frac{Q_1 Q_2 \hat{r}}{4\pi\epsilon r^2} \quad (3.7)$$

เมื่อ  $\hat{r}$  คือ เวกเตอร์ตำแหน่งสัมพัทธ์ของประจุ  $Q_2$  เมื่ออ้างอิงเทียบกับ  $Q_1$  ซึ่งมีเวกเตอร์หน่วย

$$\hat{r} = \frac{\vec{r}}{r}$$

$\epsilon$  คือ เปรอิมิตติวิตีของตัวกลาง =  $\epsilon_r \epsilon_0$

$\epsilon_0$  คือ เปรอิมิตติวิตีของสุญญากาศหรือที่ว่าง =  $8.854 \times 10^{-12}$  F/m

$\epsilon_r$  คือ เปรอิมิตติวิตีสัมพัทธ์ (ไม่มีหน่วย)

ถ้ามีประจุ  $N$  ประจุ กระจายอยู่หลายจุด ซึ่งมีเวกเตอร์ตำแหน่งต่าง กันเป็น  $\vec{r}_i$  และเวกเตอร์หน่วยเท่ากับ  $\hat{r}_i$  ( $i = 1, 2, 3 \dots N$ ) ตามตำแหน่งของ  $Q_1$  เมื่อเทียบกับ  $Q'$  แรงทั้งหมดที่กระทำต่อ  $Q'$  จะเท่ากับผลรวมทางเวกเตอร์ของแต่ละแรง นั่นคือ

$$\vec{F}_{Q'} = \sum_{i=1}^N F_{Q_1 \rightarrow Q'} = \sum_{i=1}^N \frac{Q_1 Q' \hat{r}_i}{4\pi\epsilon r_i^2} \quad (3.8)$$

สมการ (3.8) แรงที่ประจุต่างๆ กระทำต่อประจุ  $Q'$  ถ้าคิดเป็นแรงต่อหนึ่งหน่วยประจุ  $Q'$  คำนันเรียกว่าความเข้มสนามไฟฟ้า (Electric field intensity) หรือความเครียดสนามไฟฟ้า (Electric field stress)  $E$  ซึ่งเขียนได้ว่า  $\vec{F} = Q' \cdot \vec{E}$  ทั้ง  $\vec{F}$  และ  $\vec{E}$  เป็นเวกเตอร์มีทิศทางเดียวกัน นั่นคือ

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{Q'} = \frac{\vec{F}}{e} = \sum_{i=1}^N \frac{Q_1 \hat{r}_i}{4\pi\epsilon r_i^2} \quad (3.9)$$

เมื่อ  $e$  คือ ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอนเท่ากับ  $1.602 \times 10^{-19}$  คูโลมบ์ แสดงว่าความเครียดสนามไฟฟ้านั้นขึ้นอยู่กับเปอร์มิตติวิตี หรือค่าคงตัวไดอิเล็กตริก  $\epsilon$

### 3.4 สนามไฟฟ้าในวัสดุสารเนื้อเดียวกันและต่างชนิดกัน

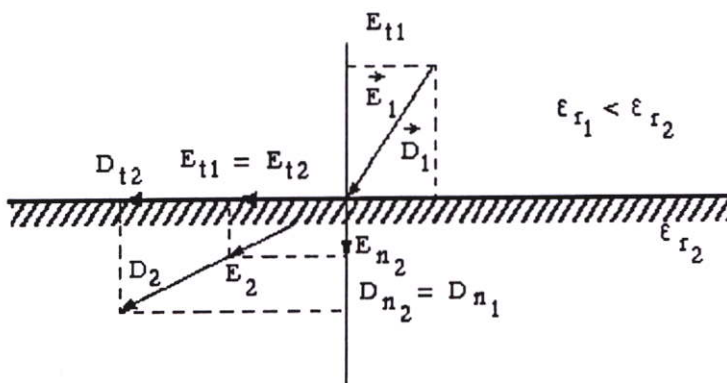
การคำนวณในทางปฏิบัติส่วนมากนอกเหนือจากหน้าที่เป็นฉนวนแล้วยังต้องทำหน้าที่เป็นตัวชี้หรือ รองรับน้ำหนักด้วยหมายความว่าโครงสร้างของฉนวนจะต้องทนต่อแรงกลได้ด้วย ฉะนั้นการคำนวณด้วยของเหลวหรือก๊าซ จึงจำเป็นต้องใช้ร่วมกับการคำนวณที่เป็นของแข็ง ฉนวนที่ใช้ต่างชนิดกันย่อมมีค่าเปอร์มิตติวิตี (permittivity) และค่าความต้านทานจำเพาะต่างกันย่อมทำให้เกิดเป็นชั้นต่อของฉนวนขึ้นเป็นผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงหรือหักเหของเส้นทางสนามไฟฟ้าและความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนต่างๆ ในกรณีที่เป็นสนามไฟฟ้าจากแรงดันกระแสตรงการกระจายของสนามไฟฟ้าจะกำหนดด้วยความต้านทานของการฉนวนและเกิดประจุค้าง

#### 3.4.1 การหักเหแนวเส้นสนามไฟฟ้าที่รอยต่อของฉนวน

โดยอาศัยหลักความจริงที่ว่า ความเครียดสนามไฟฟ้าในแนวแทนเจนต์  $E_t$  ของรอยต่อฉนวนต่างชนิดกัน มีค่าคงตัวและความหนาแน่นของเส้นฟลักซ์ไฟฟ้า  $D_n$  ในแนวตั้งฉากกับรอยต่อมีค่าคงตัว กล่าวคือ

$$E_{t1} = E_{t2} \quad \text{และ} \quad D_{n1} = D_{n2}$$

ดังในรูปที่ 3.5

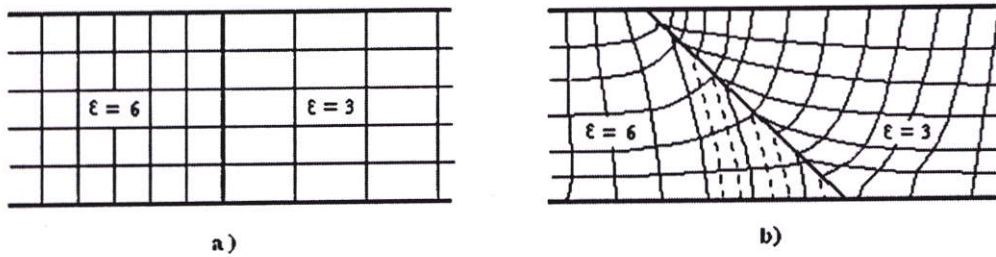


รูปที่ 3.5 การหักเหของสนามไฟฟ้าตรงรอยต่อของฉนวน

จากความสัมพันธ์  $D = \epsilon E$  และความจริงที่กล่าวไว้ในรูปที่ 3.8 จึงวิเคราะห์และเขียนความสัมพันธ์ได้ว่า

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

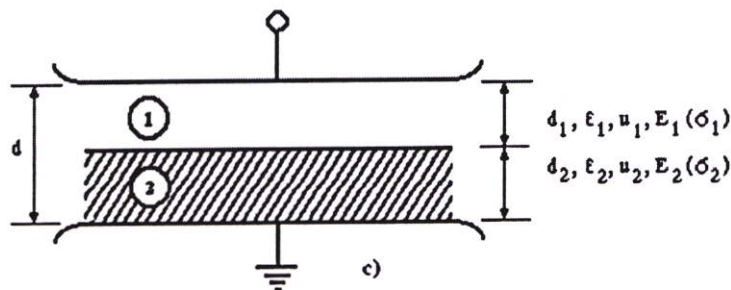
ซึ่งสรุปกล่าวได้ว่า สนามไฟฟ้า  $D$  และ  $E$  ในเนื้อสารที่มีค่า  $\epsilon_r$  ที่มีค่ามากกว่า จะหักเหห่างออกจากแนวตั้งฉากหรือหักเหเข้าหารอยต่อนั้นเอง แต่เส้นศักย์ไฟฟ้าเท่าในส่วนที่มี  $\epsilon_r$  สูง จะหักเหเข้าหาแนวตั้งฉาก ตัวอย่างแสดงเส้นสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดแผ่นระนาบขนาน ซึ่งมีฉนวนที่มีค่าเปอร์มิตติวิตีต่างกันดังรูปที่ 3.6 รูป a) แสดงถึงรอยต่อของฉนวนตั้งฉากกับระนาบของอิเล็กโทรด ส่วนในรูป b) แสดงถึงรอยต่อของฉนวนทำมุมเฉียง กับผิวระนาบของอิเล็กโทรด และจะเห็นว่าที่ปากฉลามของฉนวนที่มีค่าเปอร์มิตติวิตีต่ำจะมีเส้นศักย์ไฟฟ้าหนาแน่นกว่าบริเวณอื่นๆ ซึ่งหมายถึงว่าบริเวณนั้นจะมีค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูง โดยเฉพาะจุดตัดระหว่างผิวระนาบของอิเล็กโทรดกับแนวรอยต่อของฉนวนจะมีค่าสูงมาก จะเป็นจุดที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงกว่า  $E_0$  ก่อนและทำให้เกิดดิสชาร์จขึ้นได้ [11]



รูปที่ 3.6 ฉนวนต่างชนิดกันในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

### 3.4.2 ชั้นฉนวนซ้อนกันในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

ตามทฤษฎีการวางชั้นฉนวนระหว่างผิวอิเล็กโทรดที่ดีที่สุดก็คือ การวางไม่ให้เกิดการหักเหของเส้นสนามไฟฟ้าหรือเส้นศักย์ไฟฟ้าเท่า คือวางให้รอยต่อของฉนวนอยู่บนผิวศักย์ไฟฟ้าเท่าและหลีกเลี่ยงความเครียดสนามไฟฟ้าในแนวแทนเจนต์ ค่าสมบรูณ์ของความเครียดสนามไฟฟ้าในชั้นฉนวนแต่ละชั้นมีค่าคงตัวหรือเท่ากันตลอด เมื่อวางอยู่ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอดังในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 ชั้นฉนวนวางซ้อนกันในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ[11]

สนามไฟฟ้าและแรงดันกระจายในฉนวนทั้งสองอาจคำนวณหาได้จากสมการสนามไฟฟ้าพื้นฐาน คือ  $E = \frac{U}{d}$  เพราะเป็นสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอและใช้ความสัมพันธ์  $D = \epsilon E$  เมื่อสนามไฟฟ้าเป็นแบบกระแสสถิตย์ ฉะนั้น  $D$  จะมีค่าคงตัวและลักษณะการวางของฉนวนอยู่ในสนามไฟฟ้าเสมือนว่ามีคาปาซิเตอร์ต่ออับดับกัน ฉะนั้นประจุในคาปาซิเตอร์แต่ละชั้นจะมีค่าเท่ากันคือ

$$Q = C_1 U_1 = C_2 U_2$$

เมื่อ  $C_1$  และ  $C_2$  เป็นคาปาซิเตอร์ของฉนวนชั้นที่มี  $\epsilon_1$  และ  $\epsilon_2$  ตามลำดับ

แต่เนื่องจาก

$$C_1 \sim \frac{\epsilon_1}{d_1}$$

$$C_2 \sim \frac{\epsilon_2}{d_2}$$

ฉะนั้นอัตราส่วนของแรงดัน

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{\epsilon_2 \cdot d_1}{\epsilon_1 \cdot d_2}$$

$$U_2 = \frac{\epsilon_1 \cdot d_2}{\epsilon_2 \cdot d_1} \cdot U_1$$

แต่

$$U = U_1 + U_2$$

$$= U_1 + \frac{\epsilon_1 \cdot d_2}{\epsilon_2 \cdot d_1} \cdot U_1 = U_1 \left( 1 + \frac{\epsilon_1 \cdot d_2}{\epsilon_2 \cdot d_1} \right)$$

ฉะนั้น

$$U_1 = \frac{U}{\left( 1 + \frac{\epsilon_1 \cdot d_2}{\epsilon_2 \cdot d_1} \right)}$$

แทนค่า  $U_1$  จะได้

$$U_2 = \frac{\frac{\epsilon_1 \cdot d_1}{\epsilon_2 \cdot d_2} U}{\left( 1 + \frac{\epsilon_1 \cdot d_2}{\epsilon_2 \cdot d_1} \right)}$$

ฉะนั้นความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนทั้งสองก็คือ

$$E_1 = \frac{U_1}{d_1} = \frac{U}{d_1} \frac{1}{\left( 1 + \frac{\epsilon_1 \cdot d_2}{\epsilon_2 \cdot d_1} \right)} \quad (3.10)$$

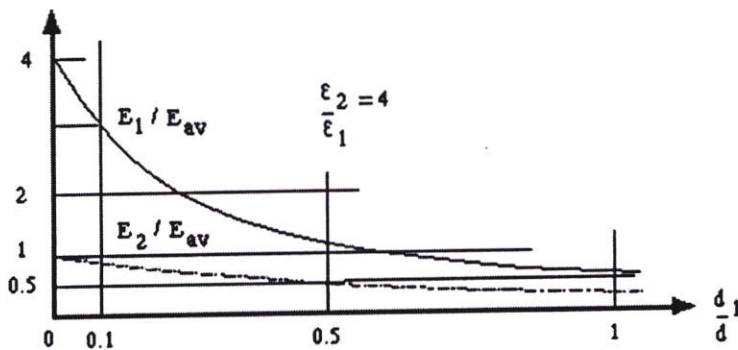
$$E_1 = \frac{U \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}}{d \frac{d_1}{d} \left( \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} - 1 \right) + 1}$$

$$E_2 = \frac{U_2}{d_2} = \frac{U \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}}{d_1 \left( 1 + \frac{\epsilon_1 d_2}{\epsilon_2 d_1} \right)}$$

$$E_2 = \frac{U}{d \frac{d_1}{d} \left( \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} - 1 \right) + 1} \quad (3.11)$$

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

จะเห็นได้ว่า ความเครียดสนามไฟฟ้า  $E_1$  จะมากกว่า  $E_2$  ตามอัตราส่วน  $\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}$  เมื่อ  $\epsilon_2 > \epsilon_1$  ถ้าเทียบความเครียดสนามไฟฟ้าในส่วนฉนวนแต่ละชั้นกับความเครียดสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอเห็นได้ว่าถ้าในส่วนฉนวนที่มีค่า  $\epsilon$  ต่ำ ยิ่งบางสนามไฟฟ้าจะสูงมากยิ่งขึ้นดังในรูป 3.8



รูปที่ 3.8 เปรียบเทียบความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนแต่ละชั้นกับค่าเฉลี่ย

### 3.4.3 ชั้นฉนวนที่เป็นก๊าซกับของแข็ง

เปอร์มิตติวิตีของก๊าซ  $\epsilon_r \simeq 1$

เปอร์มิตติวิตีของของแข็ง  $\epsilon_r \geq 2$

ชั้นอากาศบางๆ มักจะมีเกิดขึ้นในระบบอิเล็กทรอนิกส์ที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ด้วยเหตุผลทางเทคนิคที่ทำให้ต้องมีโครงสร้างในลักษณะเช่นนั้นและเป็นเหตุให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าในส่วนที่เป็นชั้นอากาศบางๆ มีค่าสูงเกินค่าความทนต่อแรงดันไฟฟ้าของก๊าซโคโรนาหรือดีสชาร์จจึงเกิดขึ้น ดังตัวอย่างเช่นอากาศซึ่ง  $\epsilon_{r1} = 1$  และ  $d = 0$  (รอยต่อ) อยู่ระหว่างชั้นของฉนวนของแข็งที่มี  $\epsilon_{r2} = 4$

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{\epsilon_2 d_1}{\epsilon_1 d_2} \rightarrow 0$$

$$U_1 = 0 \quad U_2 \approx U$$

แรงดันเกือบทั้งหมดจะตกคร่อมที่ฉนวนชั้นที่เป็นของแข็ง

แต่  $E_1 \approx \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} E_2 = 4.E_2$  โดยที่  $E_2 \approx \frac{U}{d}$

ความทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าของฉนวนของแข็งปกติจะมีค่าสูงกว่าส่วนที่เป็นก๊าซ โดยเฉพาะอากาศที่ความดันบรรยากาศ จึงไม่อาจใช้ฉนวนแข็งที่ทนความเครียดสนามไฟฟ้าสูงได้เต็มที่ถ้าหากต้องการหลีกเลี่ยงมิให้เกิดดีสชาร์จฟองอากาศหรือช่องอากาศในของแข็งทำให้เกิดการเบี่ยงเบนหรือหักเหของสนามไฟฟ้า ฉะนั้นการออกแบบสร้างจึงควรหลีกเลี่ยงการเกิดฟองอากาศหรือชั้นบางของอากาศเช่น ชั้นฉนวนของแข็งบางๆ ในกรณีที่มีก๊าซเป็นฉนวนคั่นในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ แล้วใส่ฉนวนของแข็งบางๆ คั่นเข้าไป นั่นคือ

$$\epsilon_{r1} = 1 \quad (\text{อากาศ}) \quad d_1 \rightarrow d$$

$$\epsilon_{r2} = 4 \quad (\text{ของแข็ง}) \quad d_2 \rightarrow 0$$

ฉะนั้น

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{\epsilon_2 d_1}{\epsilon_1 d_2} \quad \text{มีค่าเข้าสู่อินฟินิตี้}$$

$$U_1 = U$$

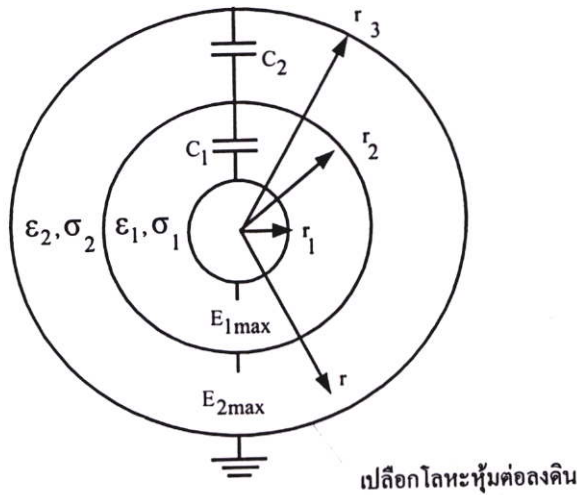
$$U_2 = 0$$

แรงดันที่ป้อนเข้าไปส่วนใหญ่จะตกคร่อมในฉนวนส่วนเป็นก๊าซ ความเครียดสนามไฟฟ้าในของแข็งจึงมีค่าต่ำความทนต่อแรงดันไฟฟ้าของการฉนวนจึงกำหนดด้วยก๊าซ

$$E_2 = \frac{\epsilon_1}{\epsilon} E_1 \quad \text{จะได้สมการคือ} \quad \frac{1}{4} E_1 \quad \text{เมื่อ} \quad E_1 \approx \frac{U}{d}$$

### 3.4.4 ชั้นฉนวนซ้อนที่เป็นของแข็ง

ฉนวนของแข็งมีอยู่หลายชนิด ซึ่งมีค่าเปอร์มิตติวิตี  $\epsilon$  ต่างกันในข้อ 3.4.3 ได้แสดงให้เห็นแล้วว่าฉนวนที่มี  $\epsilon$  ต่างกันไม่เหมาะที่จะนำมาใช้เป็นฉนวนซ้อนกันในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ เพราะทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนแต่ละชนิดมีค่าไม่เท่ากัน แต่การใช้ฉนวนที่มี  $\epsilon$  ต่างกัน เหมาะที่จะใช้กับสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ คือ จะช่วยให้ความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนแต่ละชั้นที่มี  $\epsilon$  ต่างกันนั้น มีค่าใกล้เคียงกันได้ เช่น สายเคเบิลทรงกระบอกแกนร่วม (เคเบิลแรงสูง) และ ปลอกฉนวนนำสายไฟ (Bushing) ดังแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 สายเคเบิลทรงกระบอกแกนร่วม

ที่รอยต่อของชั้นฉนวนทั้งสองไม่มีประจุอิสระกล่าวคือสภาพนำทางไฟฟ้าของฉนวน ( $\sigma$ ) เป็นศูนย์ หรือเป็นแรงดันป้อนกระแสสลับ ฉะนั้นระหว่างตัวนำของสายเคเบิลกับเปลือกโลหะจะเสมือนว่ามี คาปาซิเตอร์ต่ออันดับกัน คือ  $C_1$  และ  $C_2$  ในฉนวนชั้น 1 และ 2 ตามลำดับซึ่งสามารถคำนวณค่าคาปาซิแตนซ์ได้ดังนี้

$$C'_1 = \frac{2\pi\epsilon_1}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \quad \text{และ} \quad C'_2 = \frac{2\pi\epsilon_2}{\ln \frac{r_3}{r_2}}$$

ฉะนั้นคาปาซิแตนซ์ ผลลัพธ์คือ

$$C'_{res} = \frac{C'_1 \cdot C'_2}{C'_1 + C'_2} = \frac{2\pi\epsilon_1\epsilon_2}{\epsilon_1 \ln \frac{r_3}{r_2} + \epsilon_2 \ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (3.12)$$

เมื่อป้อนแรงดัน  $U$  เข้าที่ตัวนำในกับเปลือกโลหะ ประจุต่อหนึ่งหน่วยความยาวของเคเบิล คือ  $Q'$  จึงหาได้จาก

$$\begin{aligned} Q' &= C_{res} \cdot U \\ &= \frac{2\pi\epsilon_1\epsilon_2 U}{\epsilon_1 \ln \frac{r_3}{r_2} + \epsilon_2 \ln \frac{r_2}{r_1}} \end{aligned}$$

โดยที่ฉนวนแต่ละชั้นต่อกันแบบอันดับ ประจุของคาปาซิเตอร์แต่ละชั้นย่อมเท่ากัน นั่นคือ

$$Q'_1 = Q'_2 = Q' = C'_1 U_1 = C'_2 U_2 = C'_{res} U$$

แรงดันกระจายในชั้นฉนวนคิดแบบคาปาซิเตอร์ต่อกันแบบอันดับ ฉะนั้นที่รัศมี  $r_x$  แรงดันจะเป็น

$$U_{r_x} = \frac{C'_{res} \cdot U}{C'_{r_x}} \quad (3.13)$$

$C'_{r_x}$  คือ คาปาซิแตนซ์ที่รัศมีฉนวนเท่ากับ  $r_x$

$$U_{r_x} = \frac{r\pi\epsilon_1\epsilon_2 U}{C_{r_x} \left( \epsilon_1 \ln \frac{r_3}{r_2} + \epsilon_2 \ln \frac{r_2}{r_1} \right)} \quad (3.14)$$

ความเครียดสนามไฟฟ้าในชั้นฉนวนที่รัศมี  $r_x$  คำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$\begin{aligned} E_{r_x} &= \frac{Q}{2\pi\epsilon_x r_x} = \frac{C_{res} \cdot U}{2\pi\epsilon_x r_x} \\ E_{r_x} &= \frac{\epsilon_1\epsilon_2 U}{r_x \epsilon_x \left( \epsilon_1 \ln \frac{r_3}{r_2} + \epsilon_2 \ln \frac{r_2}{r_1} \right)} \end{aligned} \quad (3.15)$$

อัตราส่วนความเครียดสนามไฟฟ้าที่รัศมี  $r_x$  และ  $r_{x+1}$  จะได้

$$\frac{E_{r_x}}{E_{r_{x+1}}} = \frac{\epsilon_{x+1} \cdot r_{x+1}}{\epsilon_x \cdot r_x} \quad (3.16)$$

ฉะนั้น ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดในฉนวนแต่ละชั้น จะเกิดขึ้นที่รัศมีน้อยที่สุดของชั้นนั้น ดังแสดงในรูป 3.12 คือ ในฉนวนชั้น 1  $E_{\max}$  เกิดขึ้นที่  $r = r_1$ ,  $\epsilon = \epsilon_1$

$$E_{1\max} \Big|_{\substack{r=r_1 \\ \epsilon=\epsilon_1}} = \frac{\epsilon_2 U}{r_1 \left( \epsilon_1 \ln \frac{r_3}{r_2} + \epsilon_2 \ln \frac{r_2}{r_1} \right)} \quad (3.17)$$

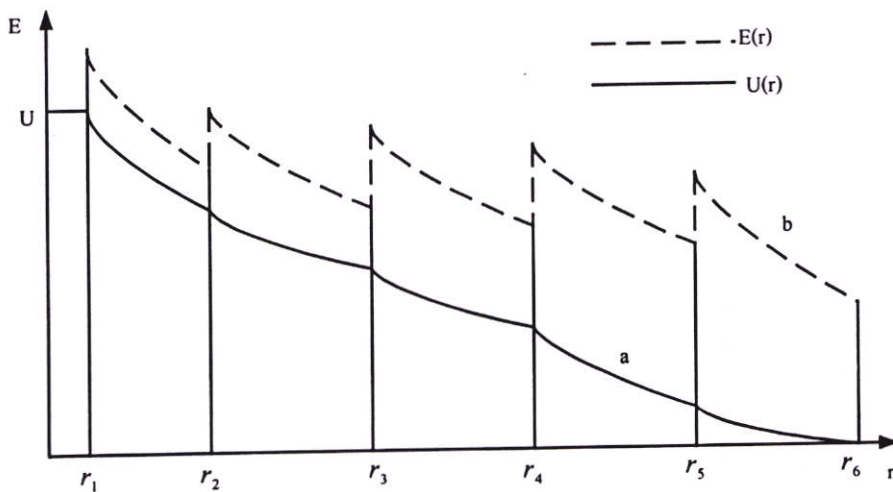
และในฉนวนชั้น 2  $E_{\max}$  เกิดขึ้นที่  $r = r_2$ ,  $\epsilon = \epsilon_2$

$$E_{2\max} \Big|_{\substack{r=r_2 \\ \epsilon=\epsilon_2}} = \frac{\epsilon_1 U}{r_2 \left( \epsilon_1 \ln \frac{r_3}{r_2} + \epsilon_2 \ln \frac{r_2}{r_1} \right)} \quad (3.18)$$

อัตราส่วนของความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด จึงเป็น

$$\frac{E_{1\max}}{E_{2\max}} = \frac{\epsilon_2 r_2}{\epsilon_1 r_1} \quad (3.19)$$

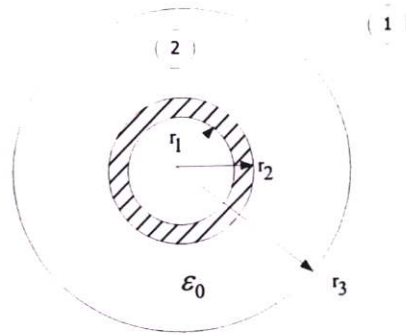
นั่นคือ ควรเลือก  $\epsilon$  ของ  $r$  น้อยๆ ควรให้มากที่สุด ถ้ามีชั้นฉนวน  $n$  ชั้น ซึ่งมีรัศมี  $r_1, r_2, \dots, r_n$  และมีไดอิเล็กตริกคงตัว  $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3, \dots, \epsilon_n$  และเพื่อให้  $E_{\max}$  ในชั้นฉนวนแต่ละชั้นมี  $E_{\max}$  เท่ากัน จะทำได้ โดยให้  $\epsilon_1 r_1 = \epsilon_2 r_2 = \epsilon_3 r_3 = \dots = \epsilon_n r_n$  ดังในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 คาปาซิเตอร์ทรงกระบอกแกนร่วมมีชั้นฉนวนซ้อน

- แรงดันกระจายในชั้นฉนวน
- สนามไฟฟ้ากระจายในชั้นฉนวน

รูปลักษณะในทางภาคปฏิบัติใช้งานมักจะพบก็คือ มีชั้นฉนวน 2 ชั้น ที่อิเล็กโตรดในจะหุ้มด้วยฉนวนมีเปอร์มิตติวิตี  $\epsilon_1$  ชั้นถัดมาถึงกระบอกนอกเป็นอากาศ ( $\epsilon_0$ ) ดังในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 ทรงกระบอกรอบนอกเป็นอากาศ

ฉนวนหุ้มสายไฟจะมีความทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าอากาศไม่ต้องกังวลว่าจะต้องให้  $E$  ที่ผิวตัวนำมีค่าต่ำๆ จึงสามารถใช้กับแรงดันที่สูงกว่าเมื่อเป็นอากาศล้วนได้ เพียงแต่ต้องดูว่าความเครียดสนามไฟฟ้าในแนวชั้น 2 ที่เป็นอากาศ คือ  $E_2$  มิให้มีค่าสูงเกินขีดความทนต่อแรงดันไฟฟ้า ซึ่งอาจคำนวณได้

$$E_2 = \frac{\epsilon_1 U}{r_2 \left( \epsilon_1 \ln \frac{r_3}{r_2} + \epsilon_2 \ln \frac{r_2}{r_1} \right)}$$

โดยที่  $\epsilon_2 = \epsilon_0$

ความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนชั้น 2 คือ อากาศ เป็น  $E_2$  ขึ้นอยู่กับ  $r_2$  จึงควรเลือก  $r_2$  ให้เหมาะสม เพื่อให้ได้ความเครียดสนามไฟฟ้า  $E_2$  ต่ำสุดเมื่อกำหนด  $r_3$  ให้ นั่นคือค่าของส่วนในสมการข้างบนจะต้องมีค่าสูงสุด ให้  $r_2 = x$  จึงหาค่า  $r_2$  ที่พอเหมาะได้จากสมการ

$$\frac{d}{dx} \left[ x \left( -\epsilon_1 \ln \frac{x}{r_3} + \epsilon_2 \ln \frac{x}{r_1} \right) \right] = 0$$

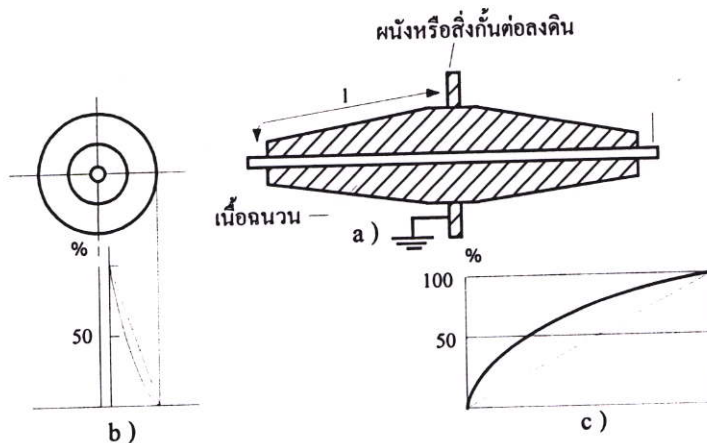
จะได้  $E_2$  ที่  $r_2$  ต่ำสุด ที่  $r_{2opt} = x$

### 3.5 ปลอกฉนวนนำสายไฟแรงสูง (High Voltage Bushing)

ปลอกฉนวนนำสายไฟ คือ ปลอกฉนวนที่หุ้มตัวนำหรือเป็นกระบอกฉนวนใช้นำสายไฟแรงสูงผ่านสิ่งกั้นที่ต่อลงดิน เช่น ฝาผนัง เพดาน ดั้งโลหะ เป็นต้น ปลอกฉนวนนำสายไฟทำหน้าที่เป็นฉนวนกั้นระหว่างตัวนำที่มีไฟฟ้ากับส่วนที่ต่อลงดิน ฉะนั้นปลอกฉนวนนำสายไฟจะต้องมีการฉนวนที่ทนต่อแรงดันไฟฟ้าใช้งานและแรงดันเกินที่อาจเกิดขึ้นได้โดยทั่วไปปลอกฉนวนนำสายไฟอาจแบ่งออกเป็นประเภท 2 ประเภท คือ ปลอกฉนวนนำสายไฟแบบธรรมดาและคอนเดนเซอร์

#### 3.5.1 ปลอกฉนวนนำสายไฟแบบธรรมดา

ปลอกฉนวนนำสายไฟในลักษณะของฉนวนแกนร่วม เนื้อฉนวนอาจเป็นปอร์ซเลน แก้ว กระดาษอัด สารสังเคราะห์หล่อ ยาง เป็นต้น ในเนื้อฉนวนไม่มีแผ่นโลหะเปลว (metallic foil) แทรกอยู่ภายในนั่นคือ เป็นปลอกฉนวนที่มีเนื้อฉนวนล้วนดังรูปที่ 3.12 ความหนาของฉนวนตามแนวรัศมี (ความหนา  $t$ ) และความยาวของฉนวนตามแนวความยาวของตัวนำจะต้องมีขนาดที่เหมาะสม สอดคล้องกับความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนและโคอีเล็กทริกที่อยู่รอบๆ ซึ่งขึ้นอยู่กับแรงดันกระจายในเนื้อฉนวนและตามผิวฉนวน ปลอกฉนวนนำสายแบบนี้ไม่เหมาะกับแรงดันใช้งานสูงๆ เพราะความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณที่ยึดกับสิ่งกั้นต่อลงดินจะมีค่าสูง ทำให้เกิดคิสซาร์จตามผิวฉนวน ปลอกฉนวนแบบธรรมดาจึงใช้กับแรงดันไม่เกิน 30 kV ถ้าต้องการใช้ที่แรงดันสูงขึ้น ปลอกฉนวนนำสายจะเป็นแบบคอนเดนเซอร์ ปลอกฉนวนนำสายไฟถ้าใช้ภายในอาคารอาจจะเป็นแบบกระดาษอัดหรือสารหล่อสังเคราะห์ ถ้าใช้นอกอาคารเปลือกนออกมักใช้ปอร์ซเลน



รูปที่ 3.12 ปลอกฉนวนนำสายไฟแบบธรรมดา ในเนื้อฉนวนไร้ชั้น โลหะเปลวแทรก

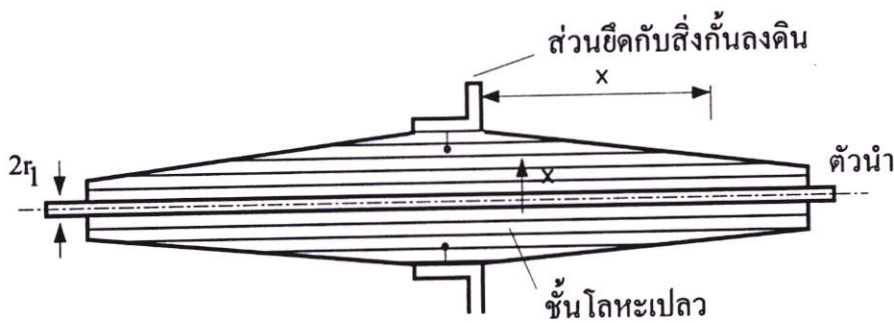
- โครงสร้างปลอกฉนวนนำสายไฟแบบธรรมดา
- แรงดันกระจายในเนื้อฉนวนตามรัศมี
- แรงดันกระจายตามผิวฉนวนในแนวตามยาว

### 3.5.2 ปลอกฉนวนนำสายไฟแบบคอนเดนเซอร์

ในเนื้อฉนวนของปลอกนำสายไฟแบบนี้จะมีแผ่นโลหะเปลวฝังแทรกเป็นชั้นๆ ในลักษณะทรงกระบอกแกนร่วมกับตัวนำ นั่นคือวางม้วนไปตามผิวฉนวนศักย์ไฟฟ้า (equipotential surface) แผ่นโลหะเปลวที่ใส่ฝังเข้าไปในเนื้อฉนวนนี้ทำให้เกิดกะเปาะเป็นชั้น เป็นตัวควบคุมการกระจายแรงดันตามผิวฉนวนให้สม่ำเสมอ เพื่อป้องกันมิให้เกิดพาร์เซิลลิสซาร์จตามผิวฉนวนในขณะใช้งาน ความยาวของแผ่นโลหะเปลวที่จะฝังเนื้อฉนวนนั้นจะต้องให้พอเหมาะเพื่อให้เกิดแรงดันกระจายสม่ำเสมอตามที่ต้องการ โดยอาศัยหลักการควบคุมสนามไฟฟ้าในฉนวนทรงกระบอกชั้นแกนร่วม ซึ่งจะมีความเครียดสนามไฟฟ้าแต่ละชั้นใกล้เคียงกันตามเงื่อนไข

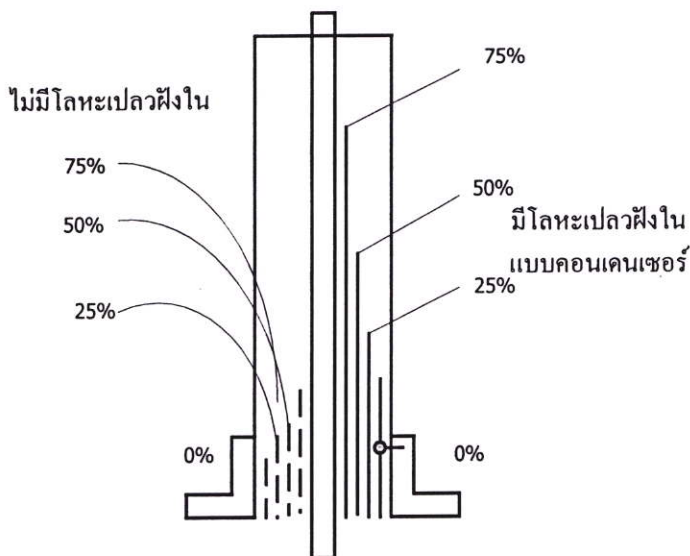
$$r_1 l_1 \epsilon_1 = r_2 l_2 \epsilon_2 = r_3 l_3 \epsilon_3 = \dots = r_n l_n \epsilon_n$$

ในกรณีของปลอกฉนวนนำสายไฟ เนื้อฉนวนแต่ละชั้นมีค่าเปอร์มิตติวิตี  $\epsilon$  เท่ากัน ( $\epsilon_1 = \epsilon_2 = \epsilon_3 = \dots = \epsilon_n$ ) ดังนั้นปลอกฉนวนนำสายไฟจึงควรทำให้  $r_1 l_1 = r_2 l_2 = r_3 l_3 = \dots = r_n l_n$  นั่นคือที่รัศมีน้อยๆ แผ่นโลหะเปลวที่ใส่จะมีความยาวมากกว่า ในชั้นที่รัศมีโตขึ้นความยาวของแผ่นโลหะเปลวจะสั้นลง ดังในรูปที่ 3.13 การทำในลักษณะนี้แรงดันตกคร่อมแต่ละชั้นจะมีค่าเท่ากัน



รูปที่ 3.13 ปลอกฉนวนนำสายไฟแบบคอนเดนเซอร์

ถ้าเปรียบเทียบแรงดันกระจายตามผิวฉนวนของปลอกฉนวนนำสายทั้งสองแบบ แบบคอนเดนเซอร์จะมีแรงดันกระจายสม่ำเสมอดีกว่า จึงใช้กับแรงดันใช้งานได้สูงกว่า ดังในรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 เปรียบเทียบแรงดันกระจายของปลายจนวนนำสายไฟทั้งสองแบบ

ความเครียดสนามไฟฟ้าตามผิวเปลือกจนวนนำสายไฟ (ตามแนวความยาวของตัวนำ) ก็คือ เกรเดียนตามผิวของจนวนนั่นเอง ซึ่งอาจคำนวณได้จากความต่างศักย์ระหว่างแผ่นโลหะเปลวที่ชั้น  $x$  คือ ที่รัศมี  $r_x$  จากแกนของตัวนำเทียบกับปีกยึด (flange) ต่อลงดิน สมมติว่าเปลือกจนวนนำสายไฟมีแรงดันกระจายในเนื้อจนวนตามแนวรัศมีมีค่าสม่ำเสมอและป้อนแรงดันระหว่างตัวนำกับปีกยึดเท่ากับ  $U$  ฉะนั้นที่ชั้นโลหะเปลว  $x$  จะมีแรงดันเทียบกับปีกยึดต่อลงดินเท่ากับ  $U_x$  นั่นคือ

$$U_x = \int_{r_x}^{r_2} E(x) dx \tag{3.20}$$

$$E(x) = \frac{Q}{2\pi\epsilon r_x l_x} = E(r_1) = \frac{Q}{2\pi\epsilon r_1 l_1}$$

ฉะนั้น

$$U_x = \int_{r_x}^{r_2} \frac{Q}{2\pi\epsilon r_x l_x} dx$$

$$= \frac{Q}{2\pi\epsilon r_1 l_1} (r_2 - r_x) = k(r_2 - r_x) \tag{3.21}$$

ถ้า  $r_x = r_2$   $U_x = 0$  จะได้  $r_x = r_1$   $U_x = U$

$$\text{ฉะนั้น } k = \frac{U}{r_2 - r_1} \quad \text{จะได้} \quad U_x = \frac{U(r_2 - r_x)}{(r_2 - r_1)} \quad (3.22)$$

ซึ่งเป็นแรงดันที่โลหะเปลวชั้น  $x$  เทียบกับปีกยึดต่อลงดิน ความเครียดสนามไฟฟ้าหรือเกรเดียนตามผิวฉนวน (ตามแนวแกนของตัวนำ) ที่ปลายกระบอกโลหะ เปลวจะเป็น

$$E_{\ell_x} = \frac{dU_x}{d\ell_x} = \frac{dU_x}{dr_x} \cdot \frac{dr_x}{d\ell_x}$$

$$\text{แต่} \quad \frac{dU_x}{dr_x} = \frac{-U}{(r_2 - r_1)}$$

$$\text{และเพราะว่า} \quad \ell_x = \frac{r_1 \ell_1}{r_x} \quad \text{ฉะนั้น} \quad \frac{d\ell_x}{dr_x} = \frac{-r_1 \ell_1}{r_x^2}$$

$$\text{ฉะนั้น} \quad E_{\ell_x} = \frac{U}{(r_2 - r_1)} \cdot \frac{r_x^2}{r_1 \ell_1} \quad (3.23)$$

ความเครียดสนามไฟฟ้าตามผิวฉนวนจะแปรตามรัศมี  $r_x$  กำลังสอง ค่าแรงดันพิคัดของปลอกฉนวนนำสายไฟจึงกำหนดด้วยเกรเดียน  $E_{\ell}$  การออกแบบสร้างจึงต้องคำนึงถึงความเครียดสนามไฟฟ้าทั้งตามแนวรัศมีและตามแนวความยาวของตัวนำปลอกฉนวนนำสายไฟแรงสูงแบบคอนเดนเซอร์ที่ประกอบด้วยกระบอกฉนวนซ้อนกันร่วมกับตัวนำ กระบอกฉนวนนี้อาจเป็นกระดาษอัด กระดาษชุบวานิช และระหว่างชั้นกระบอกฉนวนเหล่านี้บรรจุน้ำมันหม้อแปลง ทั้งหมดนี้บรรจุน้ำมันอยู่ในกระบอกปอร์ซเลน ความหนาและความยาวของกระบอกฉนวนและความหนาของชั้นน้ำมันก็คือ แก๊วระหว่างชั้นกระบอกฉนวนจะต้องคำนวณให้ความเครียดสนามไฟฟ้ากระจายสม่ำเสมอตามแนวรัศมีทั้งในน้ำมันและในกระดาษอัด เมื่อรับแรงดันกระแสสลับความถี่ต่ำและแรงดันอิมพัลส์ การฉนวนของปลอกฉนวนทำสายไฟแบบนี้ จะมีข้อดีที่น้ำมันจะไหลแทรกซึมเข้าไปในช่องว่างที่มีอยู่ น้ำมันหม้อแปลงมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าแรงสูง

### 3.5.3 ชั้นฉนวนของเหลวกับของแข็ง

ในทางภาคปฏิบัติอยู่เสมอ ที่ต้องใช้ฉนวนเหลวร่วมกับฉนวนแข็ง และอยู่ในลักษณะแทรกผสมของเหลวช่วยระบายความร้อน ส่วนของแข็งช่วยยึด เช่น สายเคเบิลแรงสูงแบบกระดาษบรรจุน้ำมันหรือหม้อแปลงที่มีทั้งกระดาษอัดและน้ำมันเป็นฉนวนหลัก กระดาษที่ใช้เป็นฉนวนแข็งเหล่านี้

นี้มีคุณสมบัติความพหุที่คู่คี่ของเหลวได้ สนามไฟฟ้าในฉนวนผสมเหล่านี้เป็นคอมเพล็กซ์ ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าจึงเป็นค่าของฉนวนผสม เพื่อให้ง่ายต่อการคิดคำนวณจึงสมมติว่าไดอิเล็กตริกผสมกันอย่างสม่ำเสมอคือ คิดเป็นความเครียดสนามไฟฟ้าค่าเฉลี่ย โดยคิดจากค่าเปอร์มิตติวิตีรวม  $\epsilon_{res}$  คือคิดเสมือนว่าไดอิเล็กตริกซ้อนกันในการทำงานเดียวกับในรูปที่ 3.11 ความหนาของชั้นฉนวนแต่ละชนิดเท่ากับ  $d_1$  และ  $d_2$  ฉะนั้นความหนาแน่นของเส้นฟลักซ์ไฟฟ้าเฉลี่ยของฉนวนแต่ละชั้นเท่ากันจะมีค่า

$$D_m = \epsilon_{res} E_m = \epsilon_1 E_{1m} = \epsilon_2 E_{2m}$$

จากสมการฉนวนซ้อนกันในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ คือ

$$E_1 = \frac{U}{d} \cdot \frac{\epsilon_2 / \epsilon_1}{\frac{d_1}{d_2} \left( \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} - 1 \right) + 1}$$

และ

$$E_2 = \frac{U}{d} \cdot \frac{1}{\frac{d_1}{d} \left( \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} - 1 \right) + 1}$$

แทนค่า  $E_1$  หรือ  $E_2$  จากสมการ (3.24) หรือ (3.25)

$$\text{จะได้ } \epsilon_{res} E_m = \epsilon_1 \frac{U}{d} \frac{\epsilon_2 / \epsilon_1}{\frac{d_1}{d} \left( \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} - 1 \right) + 1} \quad (3.24)$$

$$\epsilon_{res} E_m = \frac{U}{d} \cdot \frac{1}{\frac{d_1}{d\epsilon_1} + \frac{d}{d\epsilon_2}}$$

ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ  $E_m = \frac{U}{d}$  จะได้เปอร์มิตติวิตีผสมเป็น

$$\epsilon_{res} = \frac{1}{\frac{d_1}{d\epsilon_1} + \frac{d}{d\epsilon_2}} \quad (3.25)$$

เมื่อให้อัตราส่วนของความหนาของฉนวนแต่ละชนิด คือ  $\frac{d_1}{d}$  และ  $\frac{d_2}{d}$  แทนด้วยสัดส่วนปริมาตรสัมพันธ์  $\frac{d_1}{d} = v_1$  และ  $\frac{d_2}{d} = v_2$  จะได้

$$\text{ส่วนปริมาตรสัมพันธ์ } \frac{d_1}{d} = v_1 \text{ และ } \frac{d_2}{d} = v_2 \text{ จะได้}$$

$$\epsilon_{\text{res}} = \frac{1}{v_1/\epsilon_1 + v_2/\epsilon_2} \quad (3.26)$$

ในทำนองเดียวกันถ้ามีส่วนผสมของฉนวน  $n$  ชนิด จะหาค่าเปอร์เซ็นต์ที่ผสมได้

$$\epsilon_{\text{res}} = \frac{1}{v_1/\epsilon_1 + v_2/\epsilon_2 + v_3/\epsilon_3 + \dots + v_n/\epsilon_n} \quad (3.27)$$

เมื่อ  $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3, \dots, \epsilon_n$  เป็นเปอร์เซ็นต์ที่ดีของฉนวนองค์ประกอบ  $1, 2, 3, \dots, n$   
 $v_1, v_2, v_3, \dots, v_n$  เป็นปริมาตรสัมพันธ์ของฉนวนองค์ประกอบ  $1, 2, 3, \dots, n$   
 $\sum_1^n v_n = 1$  หรือ  $100\%$  เป็นปริมาตรรวมทั้งหมด

ตารางที่ 3.2 Properties of Insulating Materials

Insulating material	Dielectric Constant $\epsilon_r$ (air = 1) at 50 Hz	Loss factor $\text{Tan } \delta \times 10^4$		Specific Resistance At 20 °C $\Omega_{\text{cm}}$	Breakdown Strength KV / mm
		At 50 Hz	At 1 MHz		
Glass	3.5-9	5-100	5-100	$> 10^{10}$	10-40
Ceramic insulators					
Glazed porcelain	6	170-250	10-120	$> 10^{11}$	35
Steatite	6	10-30	3-20	$10^{12} - 10^{13}$	30-45
SINTERKORUND <sup>R</sup>	11	15	10	$10^{15}$	25-45
Mica-foil (made from mica, paper and shellac or asphalt)	4	200-400		$10^{13}$	17
Mineral oil (transformer oil)	2-2.5	1-5	1-5	$10^{13} - 10^{14}$	10-25
Paper (insulating paper)					
Dry	2-2.5	25-40	200-400	$10^{15}$	10-20
Soaked in oil	3-4	10-30		$10^{15}$	40-50
Acetobutyrate foil CAB	3.8-4.1	70-110	240-260	$10^{15}$	125-130
Epoxy casting resin EP	3.2-3.9	35-50	100-200	$10^{15}$	20-45
Phenolic resin moulding	5-15	100-300	50-700	$10^{15} - 10^{16}$	10-40
Polyamide PA	3.5-4	300-1000	230-270	$10^9 + 10^{14}$	50
Polyethylene PE	2.3	2-4	2-4	$10^8 - 10^{11}$	$\approx 40$
Polyethylene terephthalate PETP	3.2 3	20 7	190 110	$10^{16}$ $> 10^{15}$	160 > 100
Polycarbonate PC	3-7	30-300	60-400	$\geq 10^{16}$	25-45
Polyester casting resin UP	4	10-15	55	$10^{13} - 10^{15}$	70
Polyacetal POM	3.5-4.5	500-600	150-300	$10^{15}$	$\approx 35$
Polymethylmethacrylate PMMA	2.3-2.5		5-6	$10^{16}$	75
Polypropylene PP	2.5	1.5-2.5	1.5-2.5	$10^{16}$	$\approx 55$
Polystyrene PS	2.0	< 2	< 2	$10^{16}$	$\approx 25$
Polytetrafluorethylene TPEF	3.8-4.3	120-1500	60-1000	$10^{17}$	40
Polyvinyl chloride hard PVC	2.5-5	5-500	5-500	$10^{17}$	20-30
Silicone rubber Si				$10^{15} - 10^{16}$ $10^{13} - 10^{16}$	

\* From SIEMENS Technical Tables 1982 Edition

### 3.6 การเกิดเบรคดาวนในฉนวนก๊าซ

ก๊าซเป็นฉนวนชนิดหนึ่งที่มีความหมายและความสำคัญต่อเทคนิคการฉนวน สภาพการเป็นฉนวนของก๊าซจะเสียไปเมื่อมีดิสชาร์จในก๊าซเกิดขึ้นคำว่า “ดิสชาร์จในก๊าซ” เป็นการอธิบายปรากฏการณ์การไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านก๊าซโดยอาศัยการเคลื่อนที่ของอนุภาคประจุที่เกิดจากการไอออไนเซชันด้วยวิธีใดวิธีหนึ่ง ไอออไนเซชันจะเกิดขึ้นได้จะต้องมีสนามไฟฟ้าเป็นต้นเหตุให้อนุภาคประจุมีพลังและเคลื่อนที่ไปสู่อิเล็กโตรดได้และนั่นก็คือกระแสไหลในก๊าซดิสชาร์จในก๊าซอาจเกิดขึ้นในช่วงกว้างของความดันก๊าซและมีกระแสไหลตั้งแต่ค่าน้อยๆ เช่น  $10^{-16}$  A จนกระทั่งเป็น  $\mu\text{A}$

#### 3.6.1 สัมประสิทธิ์การไอออไนเซชันในก๊าซ

ทาวน์เซนด์ (Townsend) ได้ชี้ให้เห็นว่าจำนวนการชนเกิดไอออไนเซชันต่อหนึ่งหน่วยระยะที่อนุภาคประจุเคลื่อนที่ไปนั้นกำหนดด้วยแฟกเตอร์ที่เรียกว่า สัมประสิทธิ์การเกิดไอออไนเซชันของทาวน์เซนด์ โดยอนุภาคประจุวิ่งชนโมเลกุลในแก๊สแบ่งเป็นสัมประสิทธิ์  $\alpha$  และ  $\beta$  โดยที่  $\alpha$  เป็นสัมประสิทธิ์การชนแตกตัวด้วยอิเล็กตรอนวิ่งชนโมเลกุล ส่วน  $\beta$  เป็นสัมประสิทธิ์การชนของไอออน สัมประสิทธิ์การชนแตกตัวทั้งสองจำกัดความดังนี้

$\alpha$  : คือ (สัมประสิทธิ์การชนไอออไนเซชันที่หนึ่งของทาวน์เซนด์) เป็นค่าเฉลี่ยของการชนไอออไนเซชันของอิเล็กตรอน 1 ตัวที่เคลื่อนที่ไปในแก๊สเป็นระยะ 1 เซนติเมตร มีหน่วยเป็น  $\text{cm}^{-1}$

$\beta$  : คือ จำนวนการชนของไอออนบวกกับโมเลกุลเป็นกลาง ทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระและไอออนบวกต่อหนึ่งหน่วยระยะทางในแก๊สตามแนวสนามไฟฟ้าแต่เนื่องจากไอออนมีมวลมาก ฉะนั้นการได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้าจึงน้อย และการถ่ายทอดพลังงานเมื่อชนก็น้อยด้วย นั่นคือ  $\alpha \ll \beta$  ฉะนั้นการชนแตกตัวในก๊าซจึงมักเนื่องจากการชน  $\alpha$  ค่าสัมประสิทธิ์การชนไอออไนเซชัน  $\alpha$  ขึ้นอยู่กับความเครียดสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นของก๊าซซึ่งมีสมการดังนี้

$$\frac{\alpha}{p} = f\left(\frac{E}{p}\right) \quad (3.28)$$

ความสัมพันธ์สมการ (3.28) สำหรับก๊าซต่างๆ มีลักษณะคล้ายๆกัน ซึ่งอาจเขียนได้ด้วยสมการ

$$\frac{\alpha}{p} = A e^{-\frac{B}{E/p}} \quad (3.29)$$

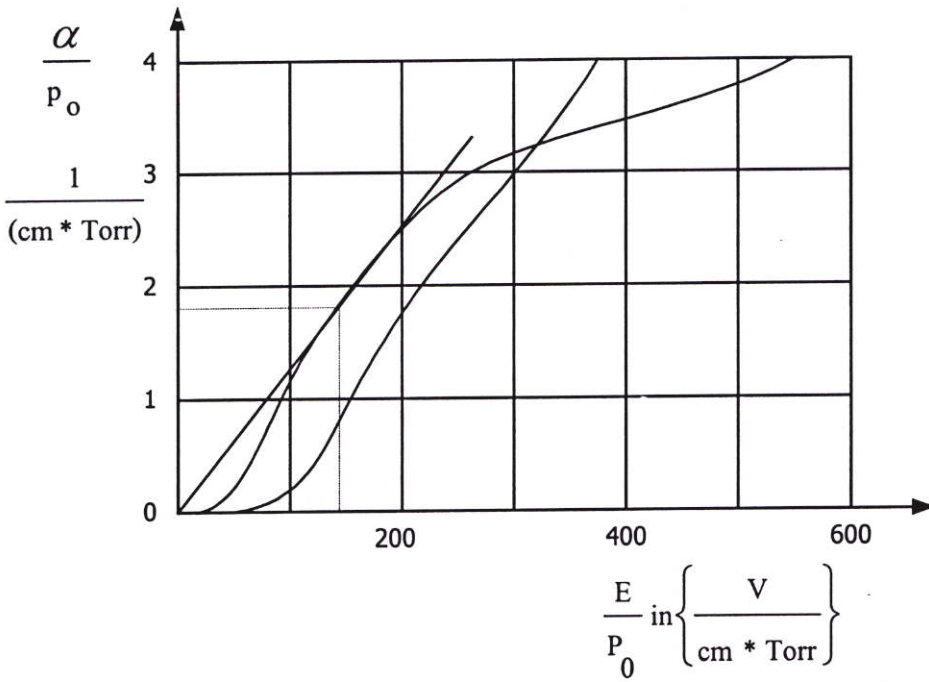
โดยที่  $B = A \cdot U_i$  และ  $A = A(T)$ ,  $A$  และ  $B$  เป็นค่าคงตัวขึ้นอยู่กับชนิดของกาย และฟังก์ชันดังกล่าวใช้ได้ในช่วงจำกัดของ  $E/p$  ดังแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ค่าคงตัว A และ B ของก๊าซต่างๆ [11]

ก๊าซ	AA (cm – Torr) <sup>-1</sup>	BB (cm – Torr) <sup>-1</sup>	ย่านที่ใช้ได้ $\frac{E}{p}$ $\left(\frac{V}{\text{cm} - \text{Torr}}\right)$
Air	15	365	100 – 800
N <sub>2</sub>	12	342	100 – 600
H <sub>2</sub>	5.1	138.8	20 – 600
He	3	34	20 – 150
Ne	4	100	100 – 400
A	14	180	100 – 600
Kr	17	240	100 – 1000
Xe	26	350	200 – 800
CO <sub>2</sub>	20	466	500 – 1000
H <sub>2</sub> O	12.9	289	150 - 1000

ค่าของ  $\frac{\alpha}{p} = f\left(\frac{E}{p}\right)$  เป็นแฟกเตอร์สำคัญที่กำหนดการเพิ่มทวิคูณของอนุภาคประจุและนำไปสู่การเบรคดาวน์ในก๊าซ ข้อสังเกตจากเส้นกราฟในรูปที่ 3.18 แสดงให้เห็นว่า  $\frac{\alpha}{p}$  นั้นมิได้เริ่มต้นที่แกน

ศูนย์ หากแต่เริ่มต้นที่ค่า  $\frac{E}{p}$  ค่าหนึ่งซึ่งแสดงถึงค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า  $E_0$  มีค่าต่ำสุด เกิดในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอที่อิเล็กโตรดวางห่างกันมากๆ ทั้งนี้เนื่องจากที่ความเครียดสนามไฟฟ้าต่ำๆ และเส้นทางเดินของอิเล็กตรอนมีระยะไกลจึงมีโอกาสมิโมเลกุลของก๊าซจับอิเล็กตรอนไว้ได้กลายเป็นไอออนลบ เครื่องที่ได้อำนาจ ไอออนไนเซชันเกิดได้ยาก เป็นการหน่วงการเกิดเบรคดาวน์ ปรากฏการณ์เช่นนี้จะเห็นได้ชัดในก๊าซอนุภาคประจุลบ (Electro negative gas)



รูปที่ 3.15 ความสัมพันธ์ของ  $\frac{\alpha}{p_0} = f\left(\frac{E}{p_0}\right)$  ของ  $H_2$  และ  $N_2$  (Nasser)  $p_0$  เป็นความดันที่

$^{\circ}C$

$$p_0 = p \cdot T_0 / T \text{ และ } T_0 = 273^{\circ}K$$

### 3.6.2 กฎของพาสเชน (Paschen's law)

กฎของพาสเชนเป็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเบรคความถี่ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ กับผลคูณของความดัน  $p$  และระยะแกป  $d$  ระหว่างอิเล็กโทรด กล่าวว่าการคำนวณจะมีค่าคงที่ ถ้าผลคูณของ  $p$  และ  $d$  มีค่าคงตัวหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ ค่าแรงดันเบรคความถี่ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมออยู่ในฟังก์ชันของผลคูณ  $p \cdot d$  เท่านั้น หรือเรียกว่ากฎนี้เป็นเพียงความสัมพันธ์ของพาสเชน ทั้งนี้เพราะว่ากฎดังกล่าวไม่เป็นจริงทุกกรณี โดยเฉพาะปรากฏการณ์ที่ใช้กับความดันสูงๆ ดังนั้นอาจเขียนเงื่อนไขการเกิดเบรคความถี่ในลักษณะทั่วไปเพื่อแทนกระบวนการข้างสองข้างหลายด้วยแฟกเตอร์หนึ่งคือ  $\Gamma$  เงื่อนไขทั่วไปจึงเขียนได้ว่า

$$\Gamma(e^{\alpha d} - 1) = 1 \tag{3.30}$$

$$\alpha d = \ln\left(\frac{1}{\Gamma} + 1\right) = K = \text{ค่าคงตัว}$$

การเปลี่ยนแปลงค่า  $\Gamma$  เล็กน้อยจะไม่มีผลการเปลี่ยนแปลงของ  $\ln\left(\frac{1}{\Gamma}+1\right)$  สัมประสิทธิ์ไอออน  
ในเซชัน  $\alpha$  มีความสัมพันธ์กับสนามไฟฟ้า  $E$  (สม่ำเสมอ) ตามสมการ (3.30) คือ

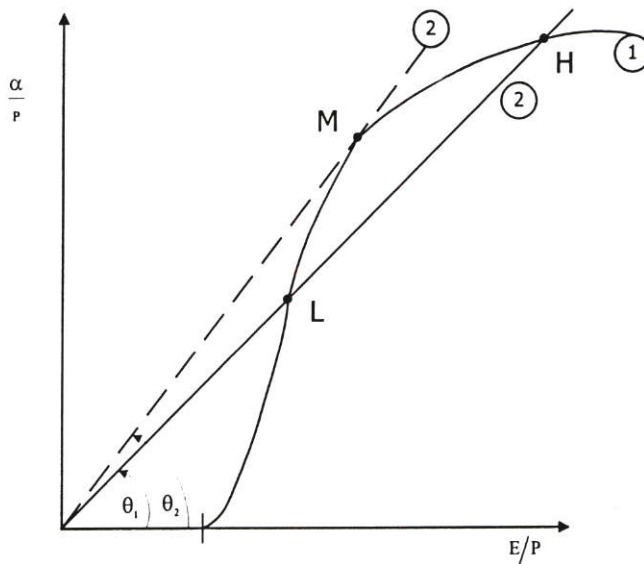
$$\frac{\alpha}{p} = f\left(\frac{E}{p}\right)$$

ฉะนั้นเอา  $pd$  คูณตลอดจะได้

$$\alpha d = p \cdot d \cdot f\left(\frac{E}{p}\right)$$

$$\alpha d = p \cdot d \cdot f\left(\frac{U}{p \cdot d}\right) = K \quad (3.31)$$

ถ้า  $U$  เป็นแรงดันเบรคความถี่จะพบว่า  $U_b$  นี้อยู่ในฟังก์ชันของ  $p \cdot d$  เท่านั้นหรือ  $U_i$  เป็นค่าแรงดัน  
เริ่มต้นจะพบว่า  $U_i$  นี้อยู่ในฟังก์ชันของ  $p \cdot d$  เท่านั้นเช่นกัน จากสมการ (3.52) ถ้าเขียนกราฟจะได้  
ดังในรูป 3.16 (เส้น 1)

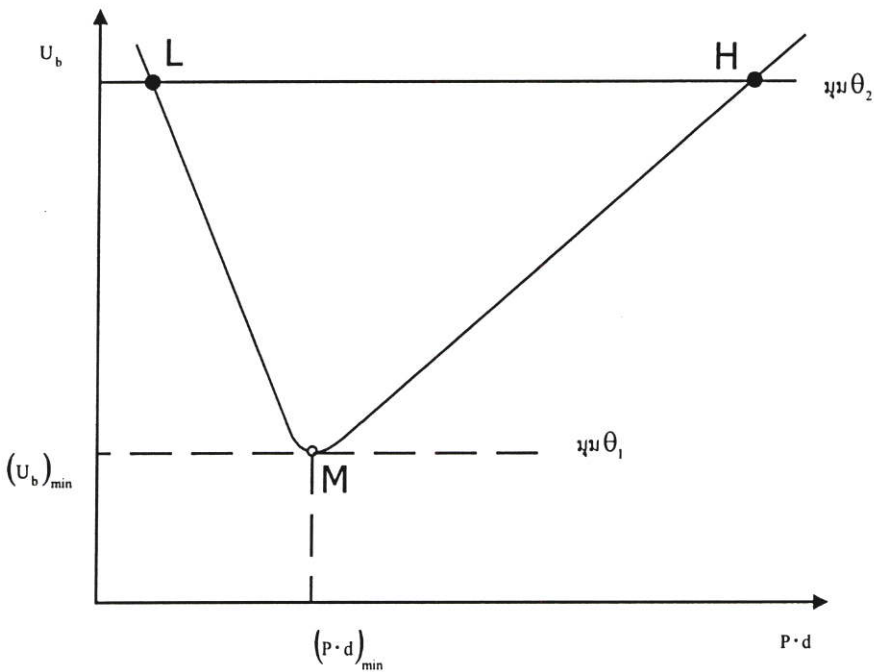


รูปที่ 3.16 หาความสัมพันธ์ของพาเซนโดยวิธีกราฟ

$$\tan \theta = \frac{\alpha/p}{E/p} \quad \text{แต่ } U = E \cdot d \text{ (สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ) ฉะนั้น} \quad \tan \theta = \frac{\alpha \cdot d}{U}$$

จะได้เส้นตรงที่มีความชันเป็น  $\tan \theta$  (เส้น 2) จะชันมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับค่าของแรงดัน  $U$  ที่ค่าแรงดันต่ำๆ จะได้ความชันสูง  $\theta$  ที่โตจนไม่ตัดเส้นโค้งเลย ก็หมายความว่าไม่มีการเบรคคาวน์เกิดขึ้น และที่แรงดันสูงๆ จะได้จุดตัดสองจุดแสดงว่ามีค่าแรงดันเบรคคาวน์สองค่า

ที่จุด  $M$  เป็นจุดที่เส้นตรงสัมผัสเส้นโค้ง แสดงถึงค่าแรงดันต่ำสุดที่จะทำให้เกิดเบรคคาวน์ได้ ที่จุดตัด  $L$  เกิดเบรคคาวน์กรณีทีระยะแถบช่องกว้างๆ  $E/p$  มีค่าต่ำความดันคงที่ และจุด  $H$  เกิดเบรคคาวน์กรณีทีช่องแถบแคบๆ แต่  $E/p$  มีค่าสูง เมื่อหาหลายๆ จุดจะได้เส้นกราฟแสดงความสัมพันธ์ของ  $U_b$  และ  $p \cdot d$  ดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 เส้นโค้งของพาสเซน

จากความสัมพันธ์ในสมการ (3.30) เขียนได้ว่า

$$\alpha / p = Ae^{\frac{-B}{E/p}} \quad (3.32)$$

$$\alpha = pAe^{\frac{-Bpd}{U}}$$

จากเงื่อนไขเบรคคาวน์สมการ (3.29) เขียนได้ว่า

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln\left(\frac{1}{\Gamma} + 1\right)$$

ฉะนั้น

$$pAc \frac{-Bpd}{U} = \frac{1}{d} \ln\left(\frac{1}{\Gamma} + 1\right)$$

ให้  $U = U_b$  จะได้

$$U_b = \frac{Bpd}{\ln \frac{Apd}{\ln\left(\frac{1}{\Gamma} + 1\right)}} \quad (3.33)$$

โดย A และ B เป็นค่าคงตัวของแต่ก๊าซตามสมการ (3.52) และค่าตามตารางที่ 3.2 จะคำนวณค่า  $U_b$  ได้ต้องทราบค่า  $\Gamma$  ซึ่งมีค่าระหว่าง  $10^{-2}$  กับ  $10^{-3}$  และจะมีผลต่อค่าแรงดันเบรคดาวน์ที่ค่า  $pd$  ต่ำๆ ที่ค่า  $pd$  สูงๆ การเปลี่ยนแปลงค่า  $p.d$  มีผลต่อค่าในส่วนน้อย ค่า  $U_b$  จึงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับ  $p.d$  แต่ที่ค่า  $p.d$  ต่ำมากๆ ค่าในส่วนจะเข้าใกล้ศูนย์ ค่า  $U_b$  จะเพิ่มขึ้นอีก แสดงว่าค่าแรงดันต่ำสุด  $U_{bmin}$  ค่า  $U_{bmin}$  นี้หาได้โดยอินทิเกรทสมการ (4.56) เทียบกับ  $p.d$  แล้วให้เท่ากับศูนย์ จะได้

$$\frac{dU_b}{d(pd)} = \frac{B}{\ln \frac{Apd}{\ln\left(\frac{1}{\Gamma} + 1\right)}} - \frac{B}{\ln \frac{Apd}{\ln\left(\frac{1}{\Gamma} + 1\right)}^2} = 0$$

นั่นคือ

$$\ln \frac{Apd}{\ln\left(\frac{1}{\Gamma} + 1\right)} = 1$$

ฉะนั้น

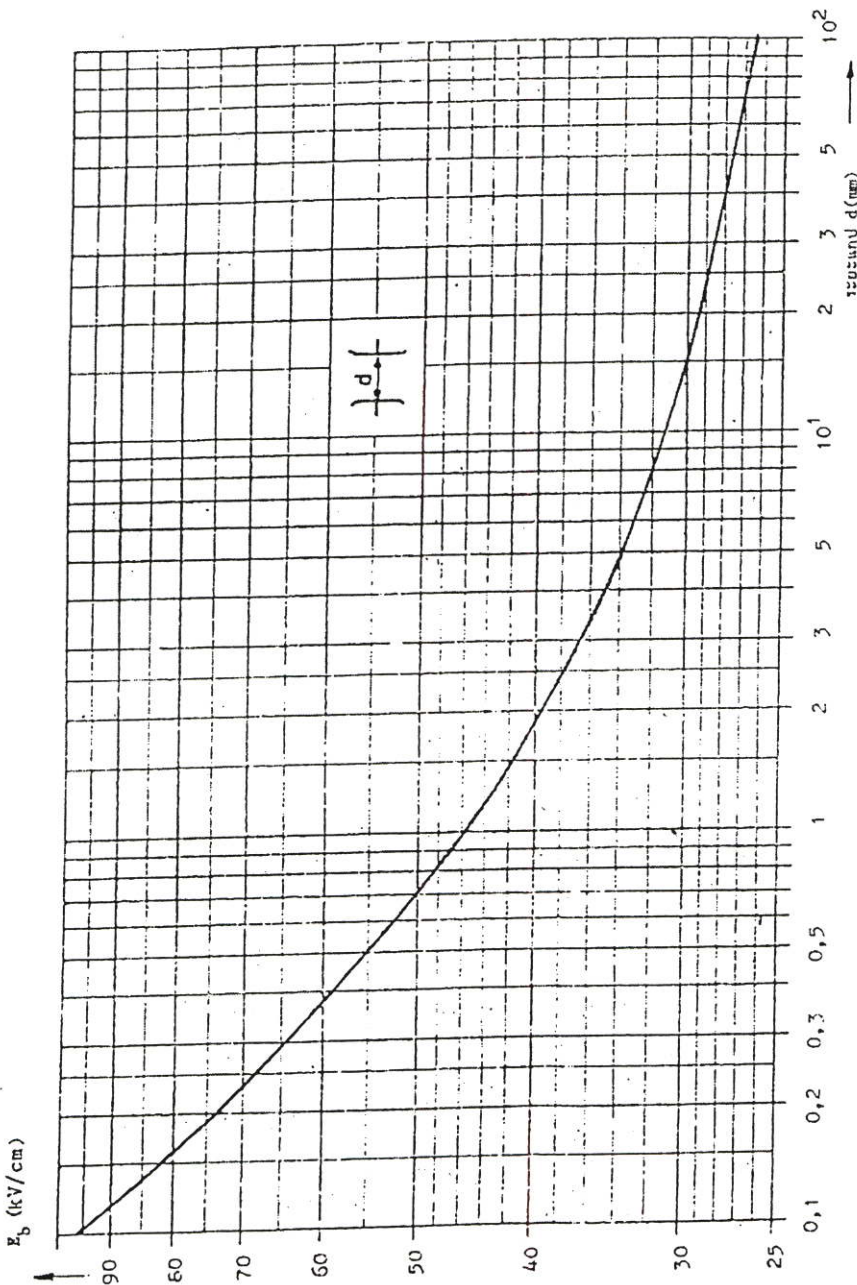
$$(pd)_{min} = \frac{e^1}{A} \ln\left(\frac{1}{\Gamma} + 1\right)$$

จะได้

$$(U_b)_{min} = 2.718 \frac{B}{A} \ln\left(\frac{1}{\Gamma} + 1\right) \quad (3.34)$$

จากการที่ทราบค่า  $(pd)$  และ  $U_{bmin}$  มีค่าต่ำ จึงนำผลนี้ไปใช้ประโยชน์ในเรื่องการทำหลอดเรืองแสงหลอดฟลูออเรสเซนต์ หลอดไฟโซเดียม หลอดก๊าซชนิดต่างๆ

การใช้กฎของพาสเชนมีขีดจำกัด มีหลายกรณีที่ปรากฏการณ์ไม่เป็นไปตามกฎนี้เช่น  $pd$  มีค่าสูงมากหรือต่ำมาก ค่าแรงดันเบรคควานี้ไม่เท่ากันแต่แปรไปตาม  $p$  เมื่อให้  $dp$  คงตัว ในช่องแคบกว้างๆ การเบรคควานี้จะเป็นแบบสตรีมเมอร์ที่มีความดันต่ำมากๆ เบรคควานี้มักเริ่มต้นจากอิเล็กโตรดเช่น เบรคควานี้ในสุญญากาศเป็นต้น ยิ่งกว่านั้นกฎของพาสเชนใช้กับก๊าซผสมไม่ได้



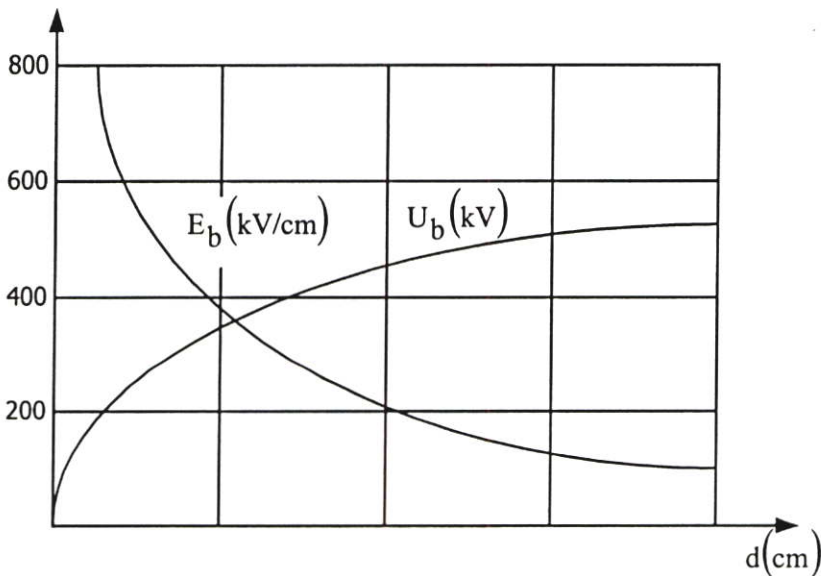
รูปที่ 3.18 ความเครียดสนามไฟฟ้าเบรคควานี้ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

### 3.7 เบรคดาวน์ในสุญญากาศ (Breakdown in vacuum)

จากพื้นฐานของการเกิดเบรคดาวน์ระหว่างอิเล็กโตรดที่มีก๊าซคั่นอยู่เกิดขึ้นได้เนื่องจากกระบวนการชนไอออไนเซชันเพิ่มทวีคูณอนุภาคประจุ เช่น อิเล็กตรอน ไอออนบวก จนกระทั่งก๊าซมีสภาพนำไฟฟ้าสูงพอกระแสเพิ่มขึ้นเป็นเอ็กซ์โพเนนเชียล และเกิดเบรคดาวน์ขึ้นเมื่อแรงดันเพิ่มขึ้นถึงค่าหนึ่ง จึงมีความคิดกันว่าถ้าหากไม่มีโมเลกุลของก๊าซให้อิเล็กตรอนชนเกิดไอออไนเซชันเสียแล้ว อะวาลานซ์ของอิเล็กตรอนจะก่อตัวขึ้นไม่ได้ เบรคดาวน์ก็จะไม่เกิดขึ้นก็เท่ากับเป็นฉนวนอย่างดี สภาวะที่ไม่มีโมเลกุลก็คือ สุญญากาศนั่นเอง

#### 3.7.1 ผลของระยะแกปต่อแรงดันเบรคดาวน์ในสุญญากาศ

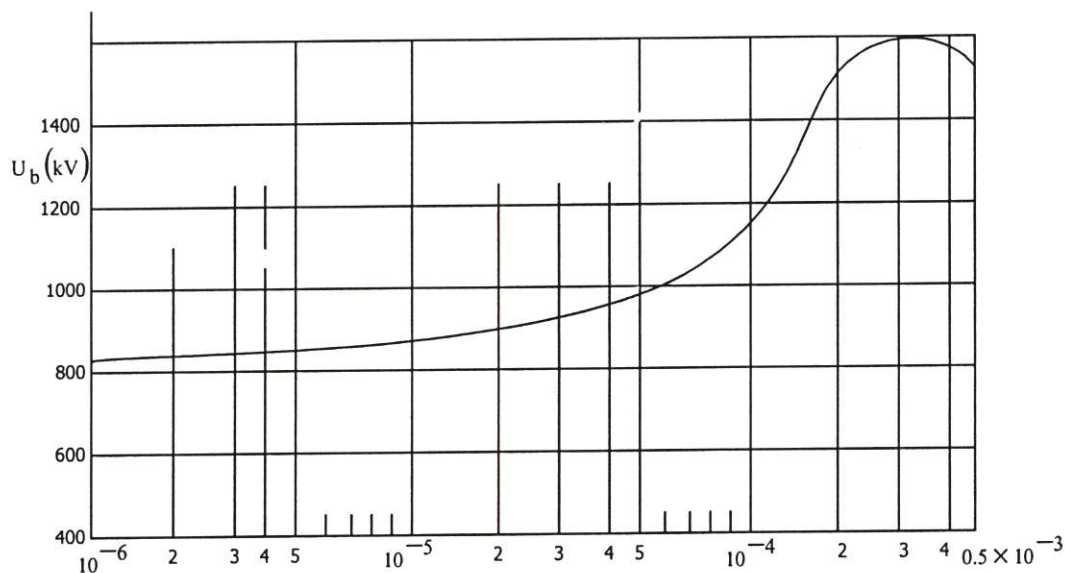
โอกาสที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ชนโมเลกุลกำหนดด้วยระยะอิสระเฉลี่ย (mean free path) ในสุญญากาศมากๆ เช่น  $10^{-4}$  Torr จะมีโมเลกุลน้อยกว่า  $3 \times 10^{12}$  โมเลกุล / ซม.<sup>3</sup> และระยะแกปเป็นเมตร ฉะนั้นที่แกปสั้นในสุญญากาศ อิเล็กตรอนจะวิ่งข้ามแกปโดยไม่มีการชนเกิดขึ้นเลย กรณีเช่นนี้เบรคดาวน์ย่อมไม่เกิดขึ้นจากอะวาลานซ์ของอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นการไอออไนเซชันในแกปที่ระยะแกปแคบๆ เช่นนี้ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงถึง 1000 kV/cm. ซึ่งแสดงถึง 1000 kV/cm ซึ่งแสดงถึงกลไกเบรคดาวน์ขึ้นอยู่กับ การปล่อยอิเล็กตรอนจากแคโทดด้วยความเครียดสนามไฟฟ้าเป็นส่วนสำคัญ แต่ถ้าระยะทางแกปห่างมากกว่า 1 mm. ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ทำให้เกิดเบรคดาวน์ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ  $\left(E_b = \frac{U_b}{d}\right)$  จะพบว่ามิต่ำลง เช่นที่ระยะ  $d = 100$  mm. ค่า  $E_b$  จะเหลือเพียง 10 kV/cm. นั่นคือแรงดันเบรคดาวน์จะไม่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับระยะแกป แต่จะเป็นสัดส่วนที่แรงดันเพิ่มน้อยลง ดังเส้นกราฟในรูป 3.19



รูปที่ 3.19 ความเครียดสนามไฟฟ้าและแรงดันเบรคดาวน์ในสุญญากาศ

### 3.7.2 ผลของความดันต่อแรงดันเบรคความในสุญญากาศ

ช่องแกปสุญญากาศที่แคบกว่า 1 มิลลิเมตร ในช่วงความดัน  $4 \times 10^{-7}$  ถึง  $1.4 \times 10^{-4}$  Torr แรงดันเบรคความจะไม่ขึ้นอยู่กับความดัน แต่ที่แกปห่างมากขึ้นความดันจะมีผลต่อค่าแรงดันเบรคความ ดังเช่นในรูปที่ 3.23 เป็นผลการทดลองที่ระยะแกป 20 เซนติเมตร ที่ความดันต่ำกว่า  $5 \times 10^{-6}$  Torr แรงดันเบรคความมีค่าคงตัว จนถึงความดันสูงกว่า  $5 \times 10^{-4}$  Torr แรงดันเบรคความเพิ่มขึ้นตามความดัน จากเอกสารอ้างอิง [3] ดังรูปที่ 3.20



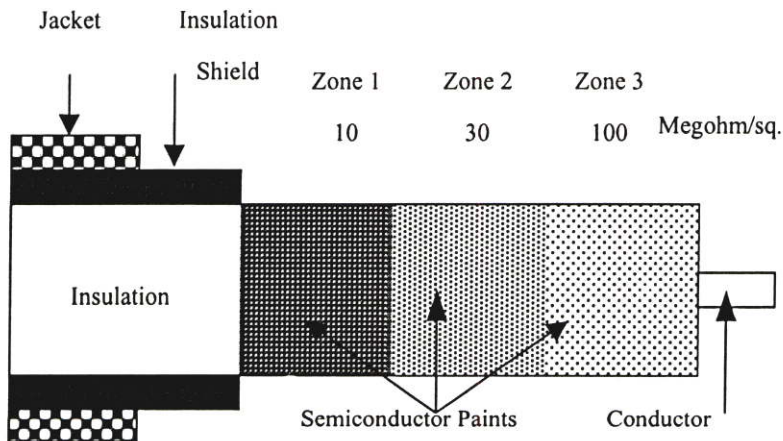
**รูปที่ 3.20** ผลของความดันก๊าซที่มีต่อแรงดันเบรคความในสุญญากาศที่ระยะแกป 20 เซนติเมตร ระหว่างอิเล็กโตรดทำด้วย Stainless steel อะโนดเป็นทรงกลมเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.6 มิลลิเมตร แคโทดเป็นระนาบ [3]

### 3.8 การออกแบบขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวน XLPE

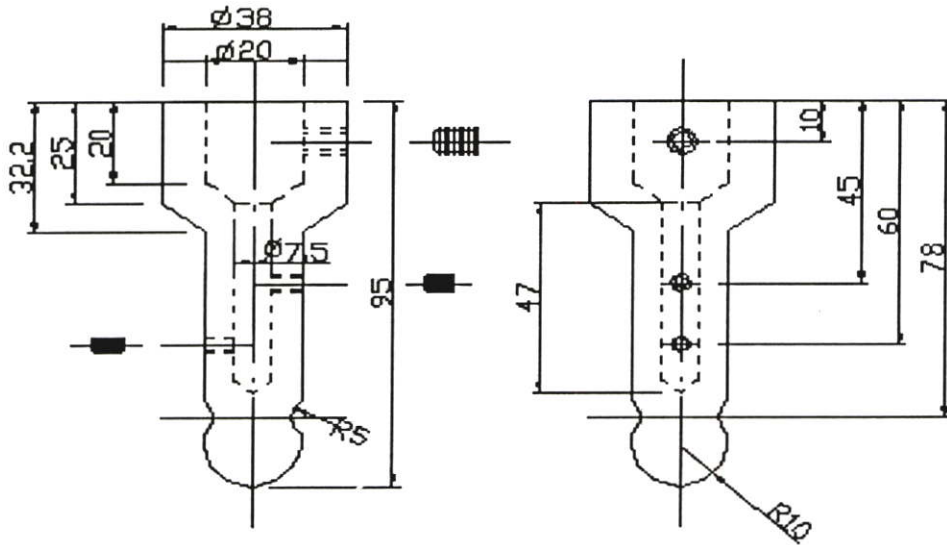
ในการออกแบบได้เลือกใช้ทฤษฎีพื้นฐานของการออกแบบชั้นฉนวนที่เป็นของแข็งที่มีอยู่หลายชั้น โดยออกแบบจากลักษณะของสายเคเบิลแรงดันสูงที่ระดับแรงดัน 24 kV ขนาดสาย 240 ตารางมิลลิเมตร จากแนวทางในการทำงานวิจัยในวิทยานิพนธ์นี้ ชั้นแรกออกแบบโดยเลือกใช้ฉนวนเหลว คือน้ำมันหม้อแปลง เป็นฉนวนที่บริเวณขั้วต่อสายเคเบิล ซึ่งสามารถวิเคราะห์ถึงปัญหาที่เกิดขึ้นมาเปรียบเทียบกับ การออกแบบขั้วต่อสายเคเบิลที่ใช้ฉนวนก๊าซในการควบคุมสนามไฟฟ้า คือ อากาศ และ ออกซิเจน ในระดับความดันที่แตกต่างกันไป ตามความเหมาะสมของปริมาณของขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูง [18], [19]

#### 3.8.1 การออกแบบขั้วต่อตัวนำสายเคเบิลแรงดันสูง XLPE

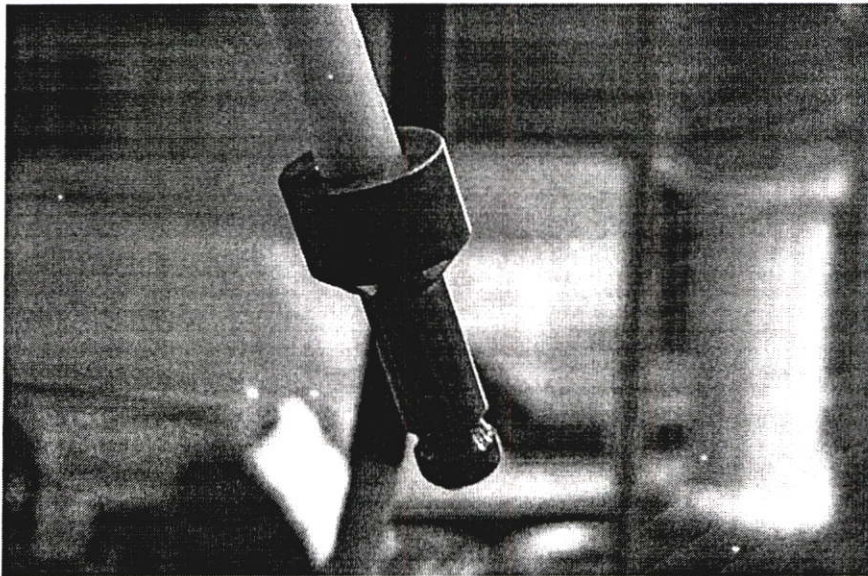
การออกแบบจะกำนังถึงเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ(Conductor)ด้านในคือทองแดงและการฉีกสายซิลด์ของสายเคเบิลออกเพื่อใช้ในการต่อสายกราวด์ โครงสร้างของสายที่ปลอกออกแบ่งเป็นโซนๆในรูปที่ 3.21 โดยทำการออกแบบขั้วต่อตัวนำสายเคเบิลที่ใช้หลักการของการลดค่าความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณรอบสายตัวนำมีขนาดความหนาของการเพิ่มพื้นที่ของทองแดงที่ใช้กลึงทำขั้วต่อตัวนำสายในรูปที่ 3.22 และ 3.23 ฐานรองรับขั้วต่อตัวนำสายเคเบิลที่ทำจากอลูมิเนียมกลึงและจะต้องมีระยะห่างของการต่อระหว่างสองส่วนที่พอดีไม่ก่อให้เกิดระยะห่างในการต่อสัมผัสที่มากเกินไป



รูปที่ 3.21 ส่วนประกอบของโครงสร้างสายเคเบิล XLPE [5]

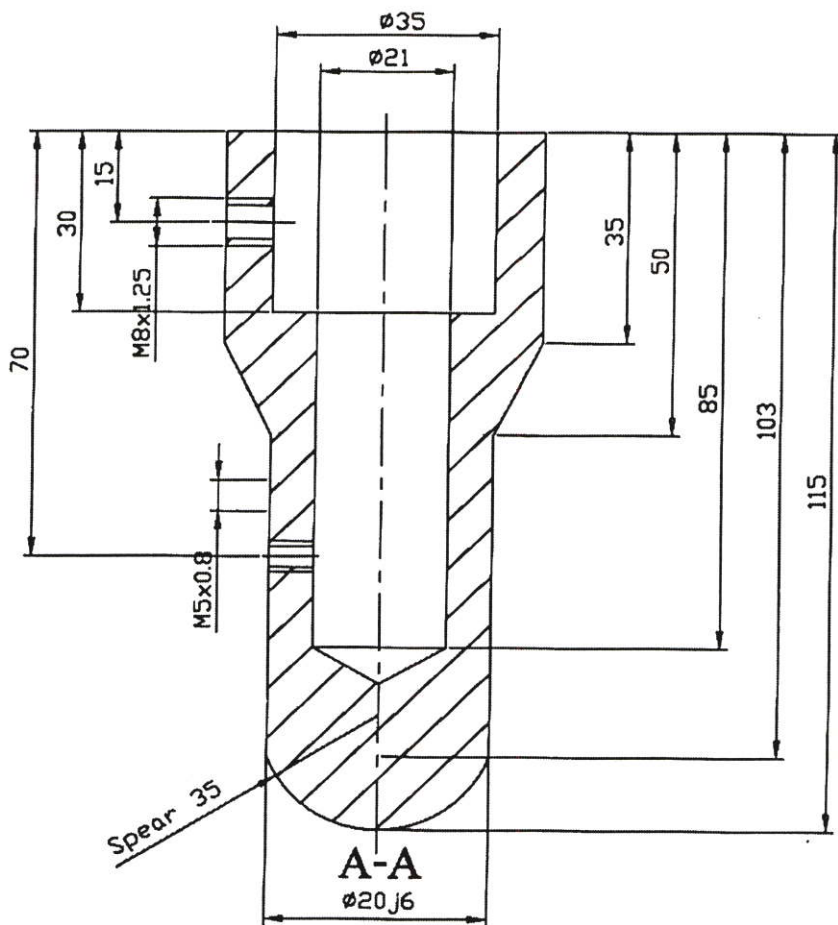


รูปที่ 3.22 แบบขั้วต่อตัวนำสายเคเบิล XLPE 12/20 kV 35 sq.mm ใช้ทดสอบในขั้วต่อสายเคเบิล  
ฉนวนเหลวคือ น้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า

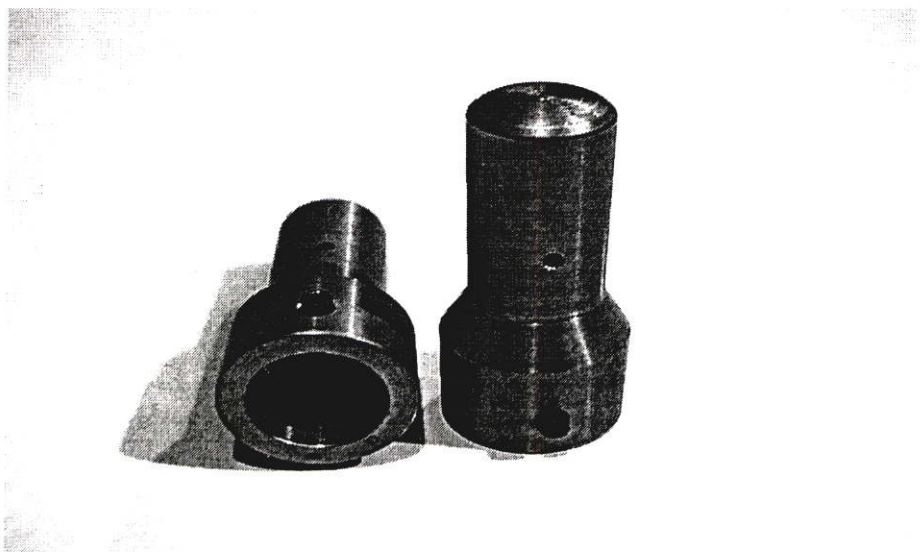


รูปที่ 3.23 ขั้วต่อตัวนำสายเคเบิลแรงดันสูงกลึงจากทองแดง

การออกแบบขั้วต่อตัวนำสายเคเบิลแรงดันสูงในงานวิจัยช่วงแรกใช้ขั้วต่อสายที่มีการฉนวนด้วยน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า ทดสอบที่แรงดันใช้งานสายปกติที่ 12/20 kV ตามขนาดสายเคเบิลดังรูปที่ 3.22 และ 3.23 ในงานวิจัยได้มีการพัฒนาการใช้ฉนวนก้ำขมาควบคุมสนามไฟฟ้าในบริเวณปลายสายที่ปลอกๆออกเพื่อทดสอบ จึงได้ออกแบบที่ระดับแรงดันใช้งาน 24 kV, 240 sq.mm. โดยที่ขั้วต่อตัวนำสายเคเบิลแรงดันสูงทำหน้าที่ในการลดความเครียดสนามไฟฟ้าที่ตัวนำสาย



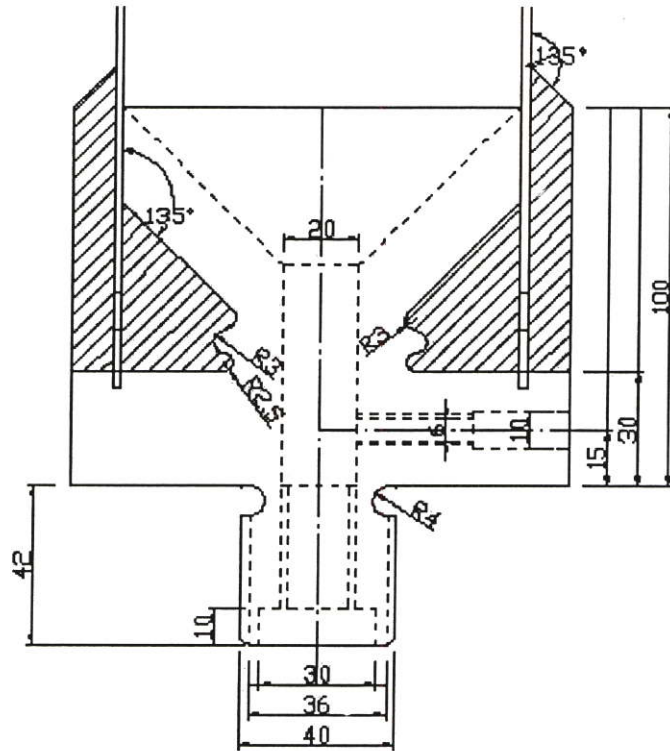
รูปที่ 3.24 แบบขั้วต่อตัวนำสายเคเบิล XLPE 24 kV, 240 sq.mm. ใช้ทดสอบในขั้วต่อสายเคเบิล  
ฉนวนก๊าซคือ อากาศและก๊าซออกซิเจน



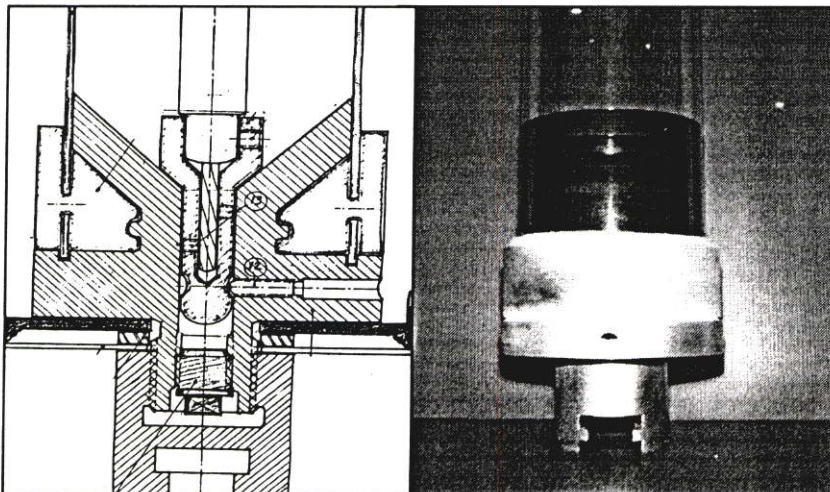
รูปที่ 3.25 ขั้วต่อตัวนำสายเคเบิลแรงดันสูงถึงจากทองแดง

### 3.8.2 การออกแบบชุดฐานรองรับขั้วต่อตัวนำสายเคเบิลแรงดันสูง XLPE

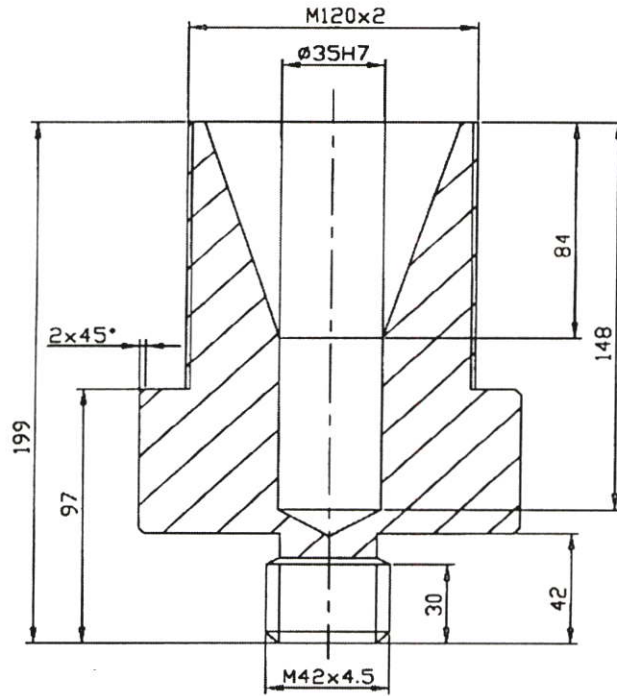
ส่วนของฐานรองรับจะต้องมีการสัมผัสกับขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงจะต้องมีการสัมผัสที่พอดีไม่ก่อให้เกิดค่าคาปาซิแตนซ์ที่จุดต่อจะทำให้เกิดค่า Partial Discharge ถ้าจุดต่อสายสัมผัสไม่พอดีกัน และในอีกหน้าที่หนึ่งจะต้องเป็นจุดต่อสายเคเบิลในการทดสอบเพื่อเชื่อมต่อแหล่งจ่ายทดสอบโดยใช้น้ำมันหม้อแปลงเป็นฉนวนสายเคเบิลในการทดสอบดังรูปที่ 3.26



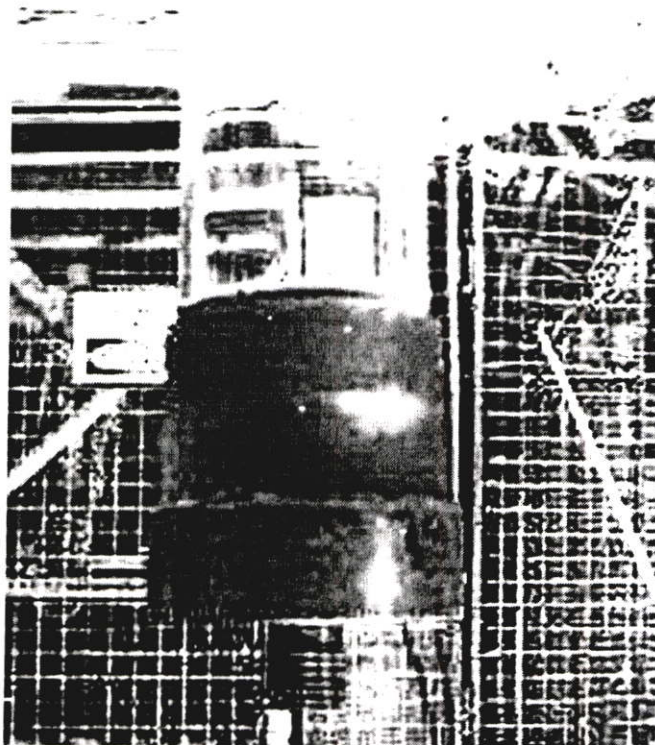
รูปที่ 3.26 แบบฐานรองรับขั้วต่อตัวนำสายเคเบิล XLPE 12/20 kV, 35 sq.mm



รูปที่ 3.27 ชุดฐานรองรับขั้วต่อตัวนำสายเคเบิล XLPE 12/20 kV ใช้ทดสอบขั้วต่อสายฉนวนเหลว



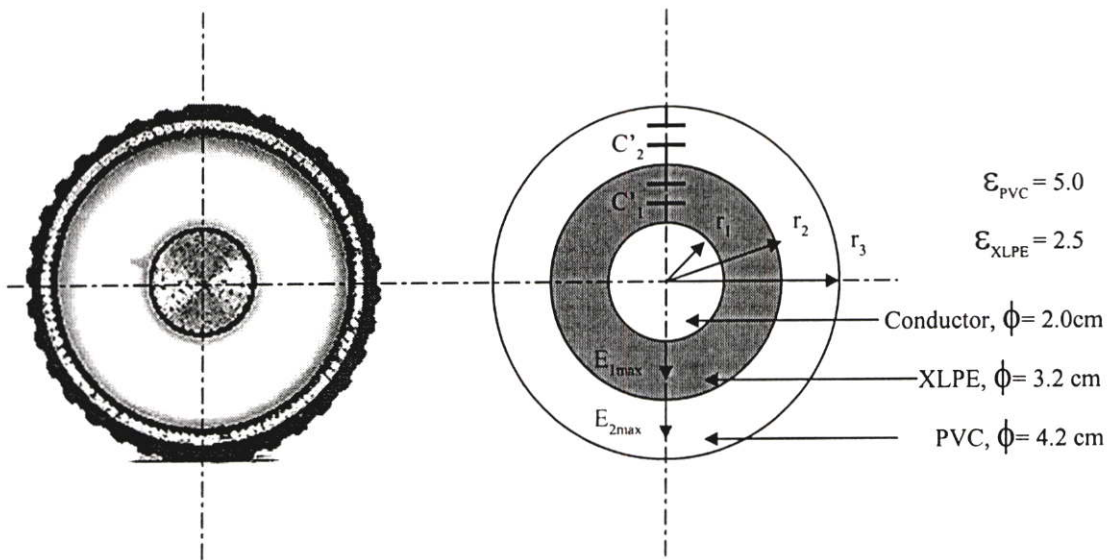
รูปที่ 3.28 แบบฐานรองรับขั้วต่อตัวนำสายเคเบิล XLPE 24 kV, 240 sq.mm



รูปที่ 3.29 ชุดฐานรองรับขั้วต่อตัวนำสายเคเบิล XLPE 24 kV, 240 sq.mm

### 3.8.3 การออกแบบคำนวณค่าสนามไฟฟ้าในตัวนำสายเคเบิลแรงดันสูง

การออกแบบคำนวณถึงฉนวนของแข็งมีอยู่หลายชนิดรอบตัวนำสายเคเบิล ซึ่งมีค่าเปอร์มิตติวิตี  $\epsilon$  ต่างกัน ซึ่งการใช้ฉนวนที่มี  $\epsilon$  ต่างกัน เหมาะที่จะใช้กับสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ คือ จะช่วยให้ความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนแต่ละชั้นที่มี  $\epsilon$  ต่างกันนั้น มีค่าใกล้เคียงกันได้ เช่น สายเคเบิลทรงกระบอกแกนร่วมดังแสดงในรูปที่ 3.33 การออกแบบที่รอยต่อของชั้นฉนวนทั้งสองไม่มีประจุอิสระ กล่าวคือสภาพนำทางไฟฟ้าของฉนวน ( $\sigma$ ) เป็นศูนย์หรือเป็นแรงดันป้อนกระแสสลับ ฉะนั้นระหว่างตัวนำของสายเคเบิลกับเปลือกโลหะจะเสมือนว่ามีค่าคาปาซิเตอร์ต่อกันคือ  $C_1$  และ  $C_2$  ในฉนวนชั้น 1 และ 2 ตามลำดับ ซึ่งสามารถคำนวณค่าคาปาซิเตอร์ได้ดังนี้



รูปที่ 3.30 องค์ประกอบการคำนวณสนามไฟฟ้าที่สายเคเบิลในลักษณะทรงกระบอกแกนร่วม

วิธีการคำนวณ หาค่า  $C_1$  และ  $C_2$  ในฉนวนชั้น XLPE และ PVC โดยกำหนดค่าเปอร์มิตติวิตีของฉนวนคือ  $\epsilon_{PVC} = 5.0$  และ  $\epsilon_{XLPE} = 2.5$  จากตารางมาตรฐานของข้อกำหนดสายเคเบิลแรงดันสูงที่ผลิตจากโรงงานผลิตสายเคเบิล เอกสารอ้างอิงที่ [21] General Cable, USA.

$$C'_1 = \frac{2\pi\epsilon_1}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \quad \text{และ} \quad C'_2 = \frac{2\pi\epsilon_2}{\ln \frac{r_3}{r_2}}$$

ฉะนั้นคาปาซิแตนซ์ผลลัพท์ คือ

$$C'_{rcs} = \frac{C'_1 \cdot C'_2}{C'_1 + C'_2} = \frac{2\pi\epsilon_1\epsilon_2}{\epsilon_1 \ln \frac{r_3}{r_2} + \epsilon_2 \ln \frac{r_2}{r_1}}$$

ฉะนั้นค่าป้าซิเตนซ์ผลลัพท์ คือ

$$C'_{res} = \frac{C'_1 \cdot C'_2}{C'_1 + C'_2} = \frac{2\pi\epsilon_1\epsilon_2}{\epsilon_1 \ln \frac{r_3}{r_2} + \epsilon_2 \ln \frac{r_2}{r_1}}$$

การออกแบบเลือกค่าที่เหมาะสมของค่าเปอร์มิตติวิตี ( $\epsilon$ ) ที่  $\epsilon_{XLPE} = 2.5$  และ  $\epsilon_{PVC} = 5.0$  และ  
ค่า  $r_1 = 1.0$  cm,  $r_2 = 1.6$  cm,  $r_3 = 2.1$  cm

$$\epsilon_1 = \epsilon_{XLPE} = 2.5 \text{ และ } \epsilon_2 = \epsilon_{PVC} = 5.0$$

$$C'_1 = \frac{2\pi\epsilon_1}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \quad \text{และ} \quad C'_2 = \frac{2\pi\epsilon_2}{\ln \frac{r_3}{r_2}}$$

$$C'_1 = \frac{2 \times \pi \times (2.5)}{\ln \frac{(1.6)}{(1.0)}} = 33.4209 \text{ F}$$

$$C'_2 = \frac{2 \times \pi \times (5.0)}{\ln \frac{(2.1)}{(1.6)}} = 115.5278 \text{ F}$$

ฉะนั้นค่าป้าซิเตนซ์ผลลัพท์  $C'_{res}$  คือ

$$C'_{res} = \frac{C'_1 \cdot C'_2}{C'_1 + C'_2} = \frac{(33.4209\text{F}) \cdot (115.5278\text{F})}{(33.4209\text{F} + 115.5278\text{F})} = 25.9219 \text{ F}$$

$$= \frac{2\pi\epsilon_1\epsilon_2}{\epsilon_1 \ln \frac{r_3}{r_2} + \epsilon_2 \ln \frac{r_2}{r_1}} = \frac{2\pi \times (2.5) \times (5.0)}{(2.5) \ln \frac{(2.1)}{(1.6)} + (5.0) \ln \frac{(1.6)}{(1.0)}}$$

$$= 25.9223 \text{ F} = 25,922.300 \text{ mF} = 25,922,300 \mu\text{F}$$

เมื่อป้อนแรงดัน  $U$  เข้าที่ตัวนำให้กับเปลือกโลหะ ประจุต่อหนึ่งหน่วยความยาวของเคเบิล คือ  $Q'$  จึงหาได้จาก

$$Q' = C_{res} \cdot U$$

$$Q' = \frac{2\pi\epsilon_1\epsilon_2 U}{\epsilon_1 \ln \frac{r_3}{r_2} + \epsilon_2 \ln \frac{r_2}{r_1}}$$

ที่แรงดัน 24 kV มีค่าประจุ ( $Q'$ ) = (25,922,300  $\mu$ F)x(24,000 Volt) = 622,128.00 C

โดยที่ฉนวนแต่ละชั้นต่อกันแบบอันดับ ประจุของคาปาซิเตอร์แต่ละชั้นย่อมเท่ากัน นั่นคือ

$$Q'_1 = Q'_2 = Q' = C'_1 U_1 = C'_2 U_2 = C'_{res} U$$

แรงดันกระจายในชั้นฉนวนคิดแบบคาปาซิเตอร์ต่อกันแบบอันดับ ฉะนั้นที่รัศมี  $r_x$  แรงดันจะเป็น

$$U_{r_x} = \frac{C'_{res} \cdot U}{C'_{r_x}}$$

จากสมการที่ 3.19 แรงดันที่รัศมี( $r_1$ ) ของตัวนำ (Conductor) คือ  $U_{r_1} = \frac{C'_{res} \cdot U}{C'_{r_1}}$

$$U_{r_1} = \frac{(25.922 \text{ F}) \times (24,000 \text{ Volt})}{(33.4209 \text{ F})} = 18,614.9385 \text{ Volt} = 18.6149 \text{ kV}$$

จากสมการที่ 3.19 แรงดันที่รัศมี( $r_2$ ) ของฉนวน XLPE คือ  $U_{r_2} = \frac{C'_{res} \cdot U}{C'_{r_2}}$

$$U_{r_2} = \frac{(25.922 \text{ F}) \times (24,000 \text{ Volt})}{(115.5248 \text{ F})} = 5,385.2333 \text{ Volt} = 5.3852 \text{ kV}$$

$C'_{r_x}$  คือ คาปาซิแตนซ์ที่รัศมีฉนวนเท่ากับ  $r_x$  หรือจะหาจากสมการที่ 3.20

$$U_{r_x} = \frac{r\pi\epsilon_1\epsilon_2 U}{C_{r_x} \left( \epsilon_1 \ln \frac{r_3}{r_2} + \epsilon_2 \ln \frac{r_2}{r_1} \right)}$$

ความเครียดสนามไฟฟ้าในชั้นฉนวนที่รัศมี  $r_x$  คำนวณได้จากความสัมพันธ์ของสมการที่ 3.21 คือ

$$E_{r_x} = \frac{Q}{2\pi\epsilon_x r_x} = \frac{C_{res} \cdot U}{2\pi\epsilon_x r_x}$$

$$E_{r_x} = \frac{\epsilon_1\epsilon_2 U}{r_x \epsilon_x \left( \epsilon_1 \ln \frac{r_3}{r_2} + \epsilon_2 \ln \frac{r_2}{r_1} \right)}$$

ความเครียดสนามไฟฟ้าในชั้นฉนวนที่รัศมีของตัวนำ (Conductor) คือ  $E_{r_1}$

$$E_{r_1} = \frac{C_{res} \cdot U}{2\pi\epsilon_1 r_1} = \frac{(25.922\text{F}) \times (24,000 \text{ Volt})}{2\pi \times (2.5) \times (1.0\text{cm})} = 39,6058 \text{ Volt/cm} = 39.6058 \text{ kV/cm}$$

ความเครียดสนามไฟฟ้าในชั้นฉนวนที่รัศมีของฉนวน XLPE คือ  $E_{r_2}$

$$E_{r_2} = \frac{C_{res} \cdot U}{2\pi\epsilon_2 r_2} = \frac{(25.922\text{F}) \times (24,000 \text{ Volt})}{2\pi \times (5.0) \times (1.6\text{cm})} = 12,376 \text{ Volt/cm} = 12.3760 \text{ kV/cm}$$

จากสมการที่ 3.21 หาอัตราส่วนความเครียดสนามไฟฟ้าที่รัศมี  $r_x$  และ  $r_{x+1}$  จะได้

$$\frac{E_{r_x}}{E_{r_{x+1}}} = \frac{\epsilon_{x+1} \cdot r_{x+1}}{\epsilon_x \cdot r_x}$$

$$\frac{E_{r_1}}{E_{r_2}} = (39.6058 \text{ kV/cm}) / (12.3760 \text{ kV/cm}) = 3.2000$$

ฉะนั้นความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดในฉนวนแต่ละชั้นจะเกิดขึ้นที่รัศมีน้อยที่สุดของชั้นนั้น ดังแสดงในรูป 3.30 คือ ในฉนวนชั้น 1  $E_{max}$  เกิดขึ้นที่  $r = r_1$ ,  $\epsilon = \epsilon_1$

$$\begin{aligned}
 E_{1\max} \Big|_{\substack{r=r_1 \\ \epsilon=\epsilon_1}} &= \frac{\epsilon_2 U}{r_1 \left( \epsilon_1 \ln \frac{r_3}{r_2} + \epsilon_2 \ln \frac{r_2}{r_1} \right)} \\
 &= \frac{(5.0) \times (24,000 \text{ Volt})}{(1.0 \text{ cm}) \left[ (2.5) \ln \frac{(2.1)}{(1.6)} + (5.0) \ln \frac{(1.6)}{(1.0)} \right]} \\
 &= 39.6170 \text{ kV/cm}
 \end{aligned}$$

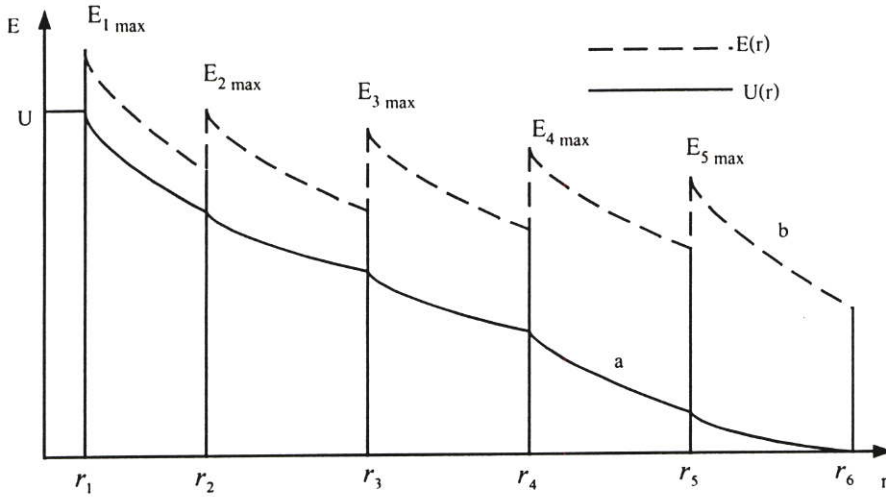
และในฉนวนชั้น 2  $E_{\max}$  เกิดขึ้นที่  $r = r_2$  ,  $\epsilon = \epsilon_2$

$$\begin{aligned}
 E_{2\max} \Big|_{\substack{r=r_2 \\ \epsilon=\epsilon_2}} &= \frac{\epsilon_1 U}{r_2 \left( \epsilon_1 \ln \frac{r_3}{r_2} + \epsilon_2 \ln \frac{r_2}{r_1} \right)} \\
 &= \frac{(2.5) \times (24,000 \text{ Volt})}{(1.6 \text{ cm}) \left[ (2.5) \ln \frac{(2.1)}{(1.6)} + (5.0) \ln \frac{(1.6)}{(1.0)} \right]} \\
 &= 12.3803 \text{ kV/cm}
 \end{aligned}$$

อัตราส่วนของความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด จึงเป็น

$$\frac{E_{1\max}}{E_{2\max}} = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \cdot \frac{r_2}{r_1} = (39.6170 \text{ kV/cm}) / (12.3803 \text{ kV/cm})$$

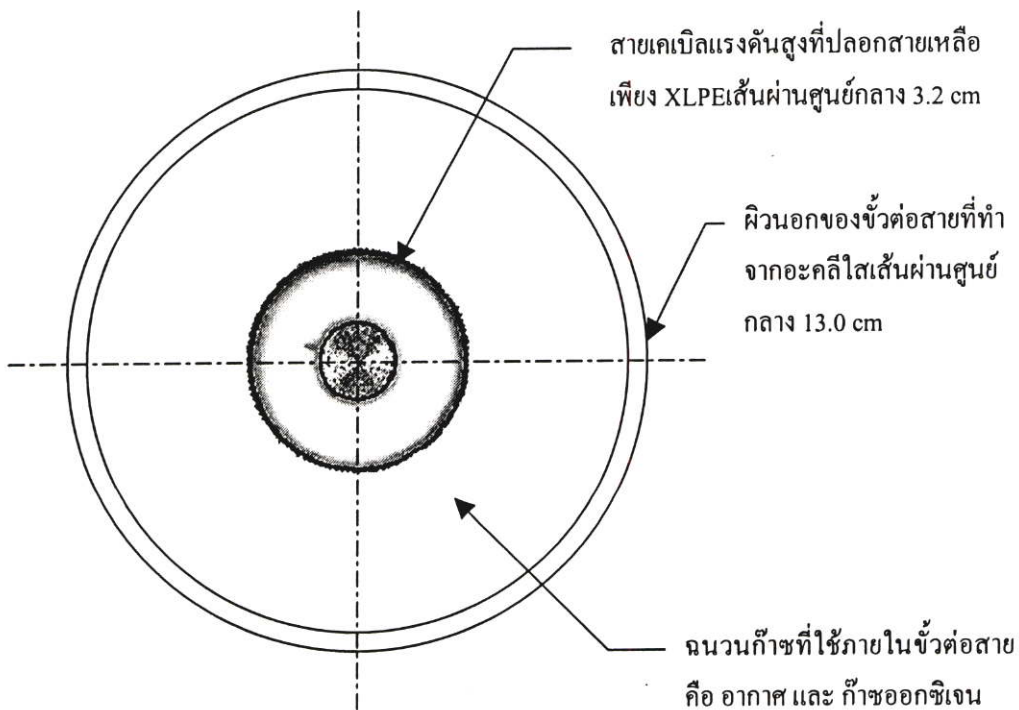
นั่นคือ ควรเลือก  $\epsilon$  ของ  $r$  น้อยๆ ควรให้มากที่สุด ถ้ามีชั้นฉนวน  $n$  ชั้น ซึ่งมีรัศมี  $r_1, r_2, \dots, r_n$  และมีไดอิเล็กตริกคงตัว  $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3, \dots, \epsilon_n$  และเพื่อให้  $E_{\max}$  ในชั้นฉนวนแต่ละชั้นมี  $E_{\max}$  เท่ากัน จะทำได้ โดยให้  $\epsilon_1 r_1 = \epsilon_2 r_2 = \epsilon_3 r_3, \dots = \epsilon_n r_n$  ดังในรูปที่ 3.31



รูปที่ 3.31 คาปาซิเตอร์ทรงกระบอกแกนร่วมมีชั้นฉนวนซ้อนของสายเคเบิล

- แรงดันกระจายในชั้นฉนวนของสายเคเบิล  $r_1, r_2, \dots, r_n$
- สนามไฟฟ้ากระจายในชั้นฉนวนของสายเคเบิล  $r_1, r_2, \dots, r_n$

รูปลักษณะในทางภาคปฏิบัติใช้งาน มักจะพบเสมออย่างหนึ่งก็คือ มีชั้นฉนวน 2 ชั้น คือ ที่อิเล็กโตรดในจะหุ้มด้วยฉนวนมีเปอร์มิตติวิตี  $\epsilon_1$  ชั้นถัดมาถึงกระบอกนอกเป็นอากาศ ( $\epsilon_0$ ) ดังในรูปที่ 3.32



รูปที่ 3.32 สายเคเบิลแรงดันสูงในขั้วต่อสายรอบนอกมีฉนวนเป็นอากาศ

ฉนวนก๊าซคือ อากาศที่มีความดันสูงที่ใช้หุ้มเพื่อลดความเครียดสนามไฟฟ้าของสายเคเบิล แรงดันสูงจะมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าอากาศ โดยไม่ต้องกังวลว่าจะต้องให้  $E$  ที่ผิวตัวนำมีค่าต่ำๆ จึงสามารถใช้กับแรงดันที่สูงกว่าเมื่อเป็นอากาศล้วนได้เพียงแต่ต้องดูว่าความเครียดสนามไฟฟ้าในแนวชั้น 2 ที่เป็นอากาศ คือ  $E_2$  มิให้มีค่าสูงเกินขีดความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$E_2 = \frac{\epsilon_1 U}{r_2 \left( \epsilon_1 \ln \frac{r_3}{r_2} + \epsilon_2 \ln \frac{r_2}{r_1} \right)}$$

โดยที่  $\epsilon_2 = \epsilon_0$  (ใช้ค่าในการคำนวณ  $\epsilon_2$  มีค่าประมาณเท่ากับ 1)

$$E_2 = \frac{(2.5)(24,000 \text{ Volt})}{(1.6 \text{ cm}) \times \left( (2.5) \ln \frac{(2.1)}{(1.6)} + (1.0 \text{ cm}) \times \ln \frac{(1.6)}{(1.0)} \right)}$$

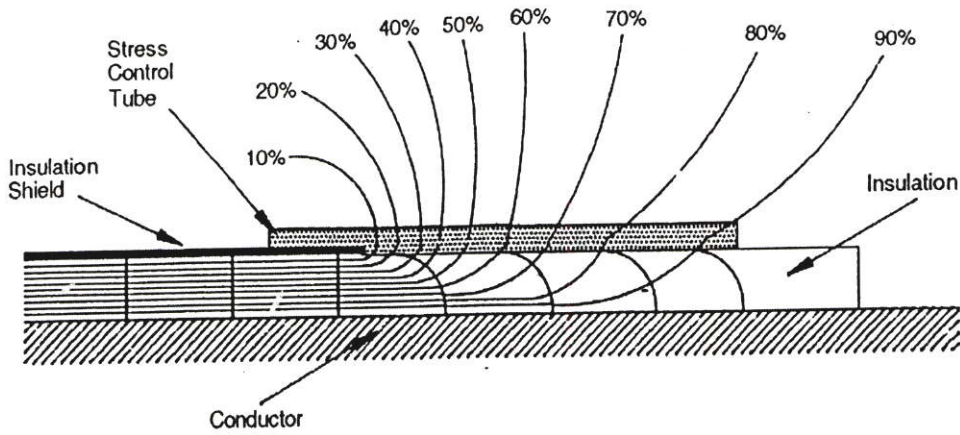
$$E_2 = 32.6143 \text{ k V/cm}$$

ความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนชั้น 2 คือ อากาศ เป็น  $E_2$  ขึ้นอยู่กับ  $r_2$  จึงควรเลือก  $r_2$  ให้เหมาะสม เพื่อให้ได้ความเครียดสนามไฟฟ้า  $E_2$  ต่ำสุดเมื่อกำหนด  $r_3$  ให้ นั่นคือค่าของส่วนในสมการข้างบนจะต้องมีค่าสูงสุด ให้  $r_2 = x$  จึงหาค่า  $r_2$  ที่พอเหมาะได้จาก

$$\frac{d}{dx} \left[ x \left( -\epsilon_1 \ln \frac{x}{r_3} + \epsilon_2 \ln \frac{x}{r_1} \right) \right] = 0$$

จะได้  $E_2$  ที่  $r_2$  ต่ำสุด ที่  $r_{2 \text{ opt}} = x$  ผลของการที่สนามไฟฟ้าเบี่ยงเบนนี้สามารถแก้ไขได้โดยการทำ Stress cone การทำ Stress cone อาจใช้ High Permittivity Material ทำหน้าที่แทนก็ได้ตามที่แสดงในรูปที่ 5 โดยการใช้น้ำมันหม้อแปลงเป็นส่วนของการทำหน้าที่ลดค่าความเครียดสนามไฟฟ้าลักษณะเดียวกับวิธีการ Stress Control ถ้าวางสายเคเบิลเป็นอากาศ ค่า  $C_1$  จะน้อยมากเมื่อเทียบกับ  $C_0$  จะทำให้แรงดันเริ่มต้นของการเบรคควานมีค่าต่ำ ทำให้เบรคควานได้ง่าย ในการควบคุมจึงต้องทำให้อัตราส่วนระหว่าง  $C_1/C_0$  มีค่ามาก นั่นก็คือทำให้  $C_1$  เพิ่มขึ้นหรือ  $C_0$  ลดลงนั่นเอง Capacitive Stress Control จะเป็นการลด  $C_0$  ซึ่งสามารถกระทำได้โดย การเพิ่มรัศมีของชั้นตัว

นำด้านนอกที่ถูกตัดออก โดยใช้ Stress cone ดังรูปที่ 6 Refractive Stress Control จะเป็นการเพิ่ม  $C_1$  โดยการเติมชั้นฉนวนที่มีค่าไดอิเล็กตริกสูงๆ ไว้รอบสายเคเบิลดังรูปที่ 6 ค่าของการกระจายสนามไฟฟ้าจะมีค่าที่ สม่ำเสมอ [2]



รูปที่ 3.33 การกระจายของสนามไฟฟ้าที่สายเคเบิล แบบ Refractive Stress Control มีลักษณะที่มีค่าเส้นศักย์ไฟฟ้าที่สม่ำเสมอเป็นลำดับของฉนวน [2]

### 3.8.4 การหาเส้นผ่านศูนย์กลางท่ออะคลิลิกและฝาปิด

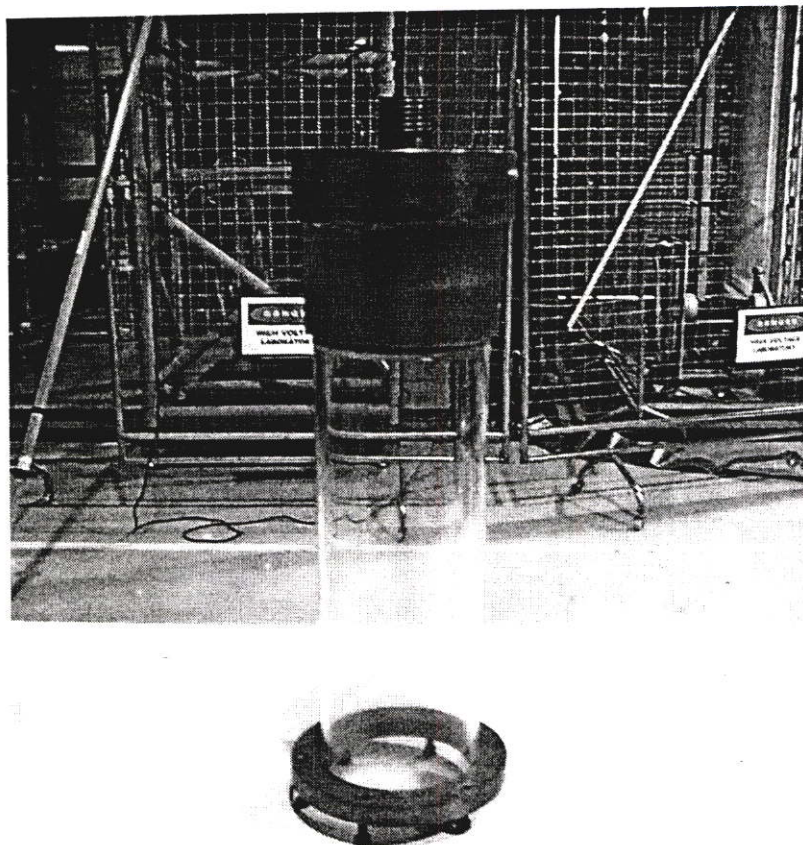
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่ออะคลิลิกใสจะขึ้นอยู่กับค่าความคงทนไดอิเล็กตริกของก๊าซเป็นสำคัญ โดยจากทฤษฎี(ที่ระยะห่าง 1 เซนติเมตร ได้ค่าประมาณ 30 -35 kV) ชุดทดลองนี้ใช้สำหรับทดสอบที่แรงดัน 24 kV และสายเคเบิลที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 4.2 เซนติเมตร ดังนั้นระยะห่างที่ปลอดภัย คือ

$$\text{ระยะห่างจากสายเคเบิล} = \frac{\text{ระดับแรงดันทดสอบ}}{\text{แรงดันเบรคดาวน์ก๊าซต่อเซนติเมตร}} \times \text{Safety factor}$$

$$\text{ระยะห่างจากสายเคเบิล} = \frac{24 \times 10^3}{30 \times 10^3} \times 5 = 4 \text{ เซนติเมตร}$$

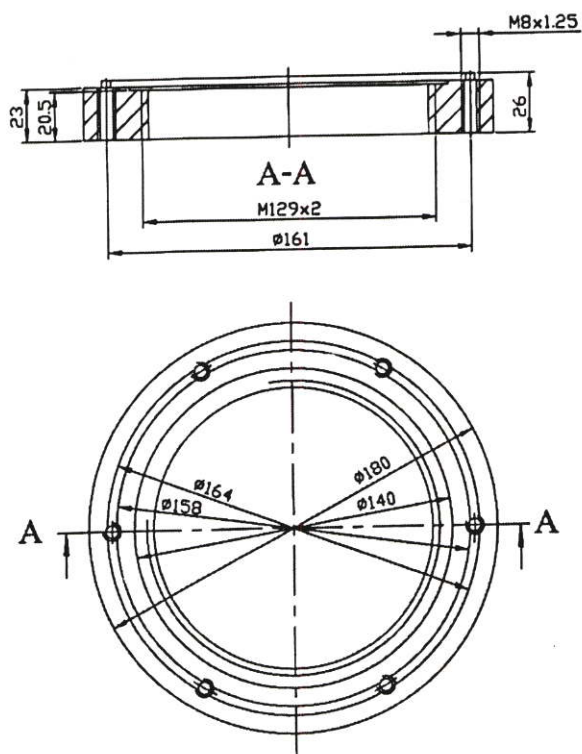
สายเคเบิลมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 4.2 เซนติเมตร กิดที่รัศมีของสายเคเบิล คือ  $4.2/2 = 2.1$  เซนติเมตรจะได้รัศมีของท่ออะคลิลิกใส  $= 4 + 2.1 = 6.1$  เซนติเมตร ดังนั้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่ออะคลิลิกใส  $= 6.1 \times 2 = 12.2$  เซนติเมตร พิจารณาเลือกใช้ท่ออะคลิลิกใสที่มีขายในท้องตลาดคือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 13 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ PVC ที่รองรับชุดทดสอบ

จะต้องมีขนาดใหญ่กว่าขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางท่ออะคลีติกไส ซึ่งเลือกขนาด 8 นิ้วเพื่อความสะดวกในการวางอะคลีติกบนที่รองรับชุดทดสอบ โดยท่ออะคลีติกและที่รองรับซึ่งเป็น PVC ซึ่งต่างก็สามารถป้องกันการวางไฟตามผิวท่อท่ออะคลีติกและท่อ PVC ได้: ท่ออะคลีติกไส ภายในท่อจะสามารถบรรจุก๊าซอยู่เพื่อใช้เป็นฉนวนไฟฟ้าเหตุผลที่ต้องใช้ท่ออะคลีติกไส เนื่องจากต้องการให้เห็นภายใน เพราะหากใช้เป็นที่รองรับ PVC ที่หากเกิดเบรคความดันจะไม่สามารถมองเห็นภายในท่อได้ แสดงดังรูปที่ 3.34 (ยาว 0.6 เมตร รัศมีใน 0.12 เมตร รัศมีนอก 0.13 เมตร)

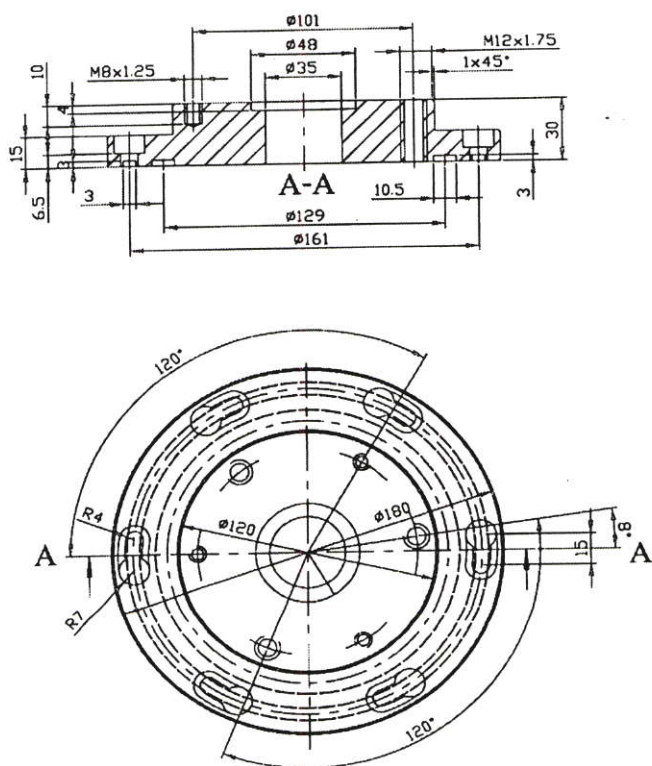


รูปที่ 3.34 ท่ออะคลีติกไสขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 13 เซนติเมตร หนา 0.5 เซนติเมตร

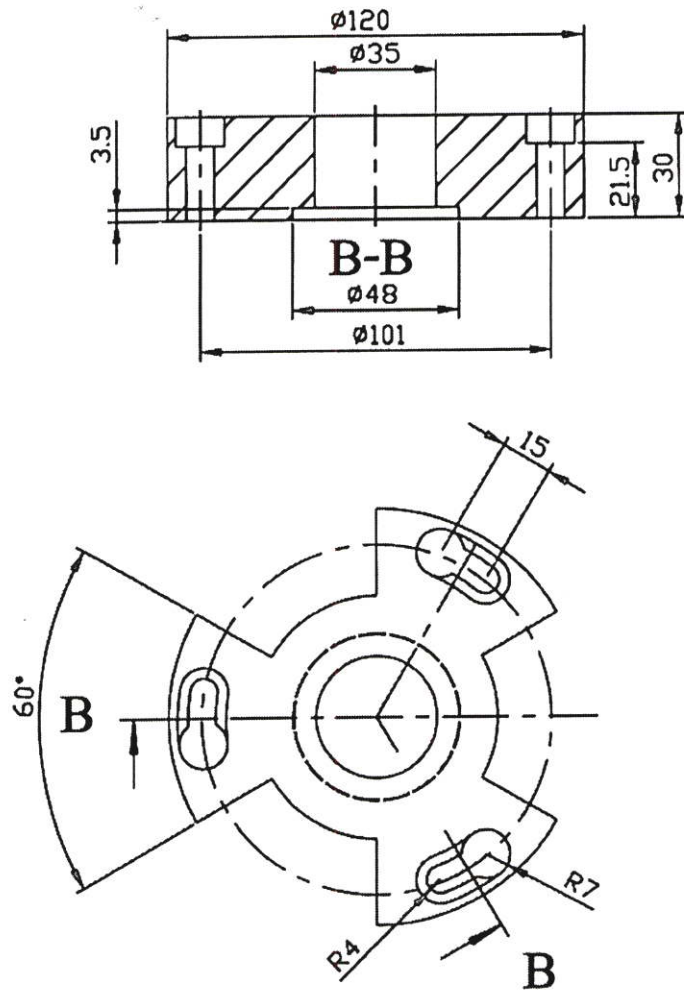
การออกแบบในส่วนของฝาปิดใช้สำหรับกดซีลกันก๊าซซีมออกจากชุดทดสอบสายเคเบิลซึ่งกึ่งจากเหล็กหล่อ จะประกบกันด้วยลักษณะของชิ้นงานสามส่วนด้วยกันคือในส่วนแรกจะเป็นฐานวงแหวนเหล็กหล่อที่ใช้ยึดติดกับท่ออะคลีติกไส ส่วนที่สองเป็นฝาปิดที่เจาะสำหรับรอยสายเคเบิลและในส่วนที่สามจะเป็นฝาปิดอัดซีลกันก๊าซซีมผ่านช่องว่างของฝาปิดในส่วนที่สอง โดยออกแบบจากเส้นผ่านศูนย์กลางของท่ออะคลีติกไส แสดงดังรูปที่ 3.35, 3.36 และ 3.37



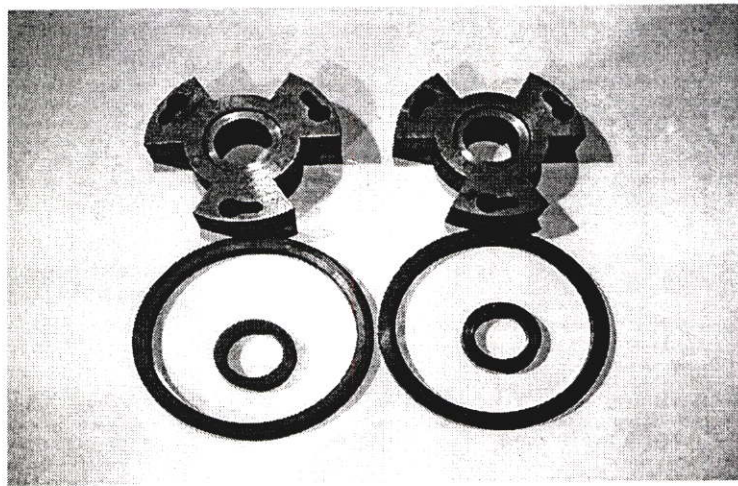
รูปที่ 3.35 แบบส่วนแรกฐานวงแหวนเหล็กหล่อที่ใช้ยึดติดกับท่ออะคริลิกใส



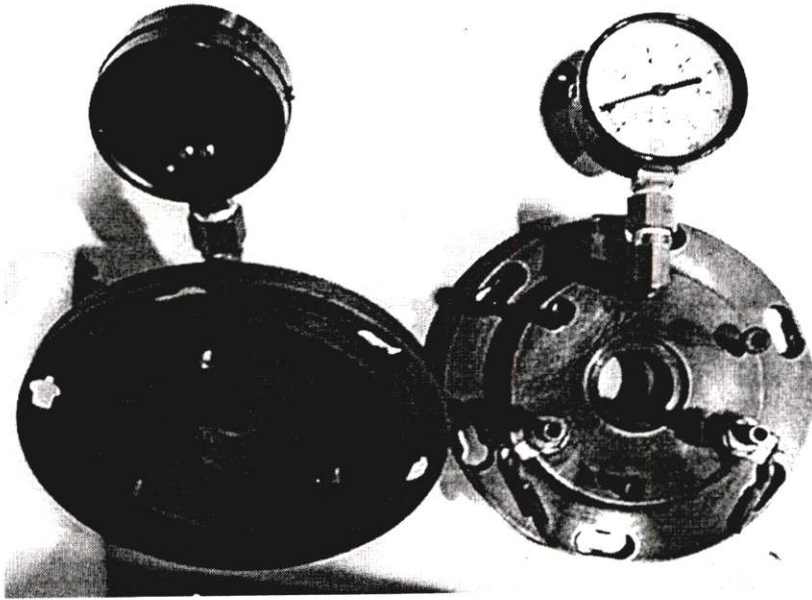
รูปที่ 3.36 แบบส่วนที่สองฝาปิดที่เจาะสำหรับรอยสายเคเบิล XLPE ขนาด 24 kV, 240 sq.mm.



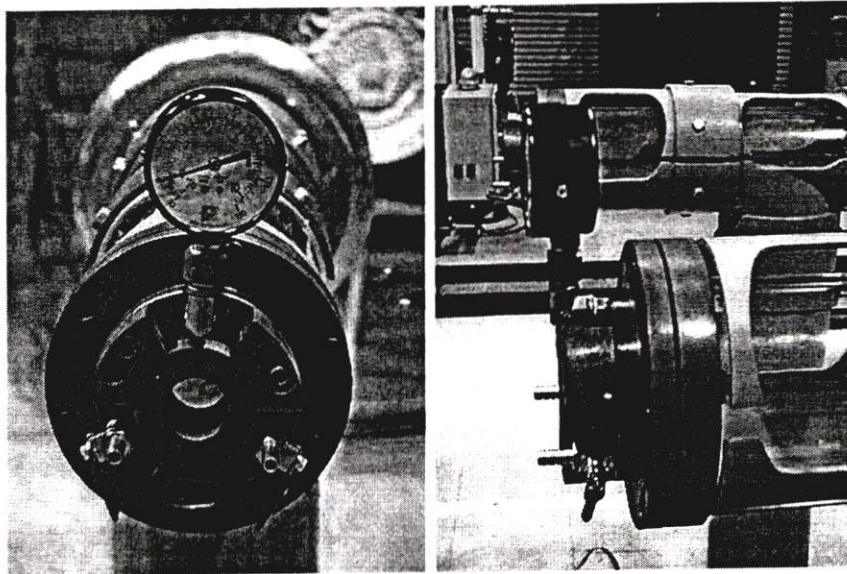
รูปที่ 3.37 แบบฝาปิดอัดซีดกันก๊าซซึมผ่านช่องว่างของฝาปิดในส่วนที่สอง



รูปที่ 3.38 ฝาปิดอัดซีดกันก๊าซซึมผ่านช่องว่าง



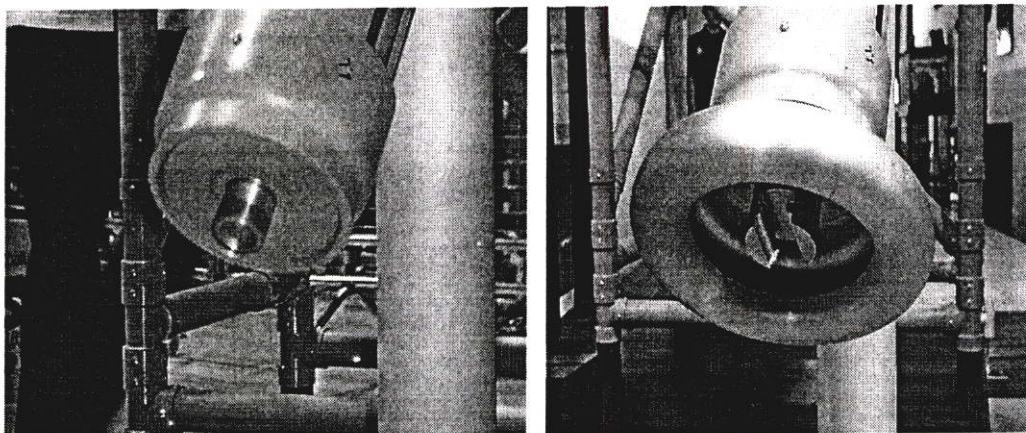
รูปที่ 3.39 ฝาปิดชุดทดสอบขั้วต่อสายเคเบิล XLPE 24 kV , 240 sq.mm. พร้อมติดตั้งเกจวัดความดันก๊าซและสูญญากาศ



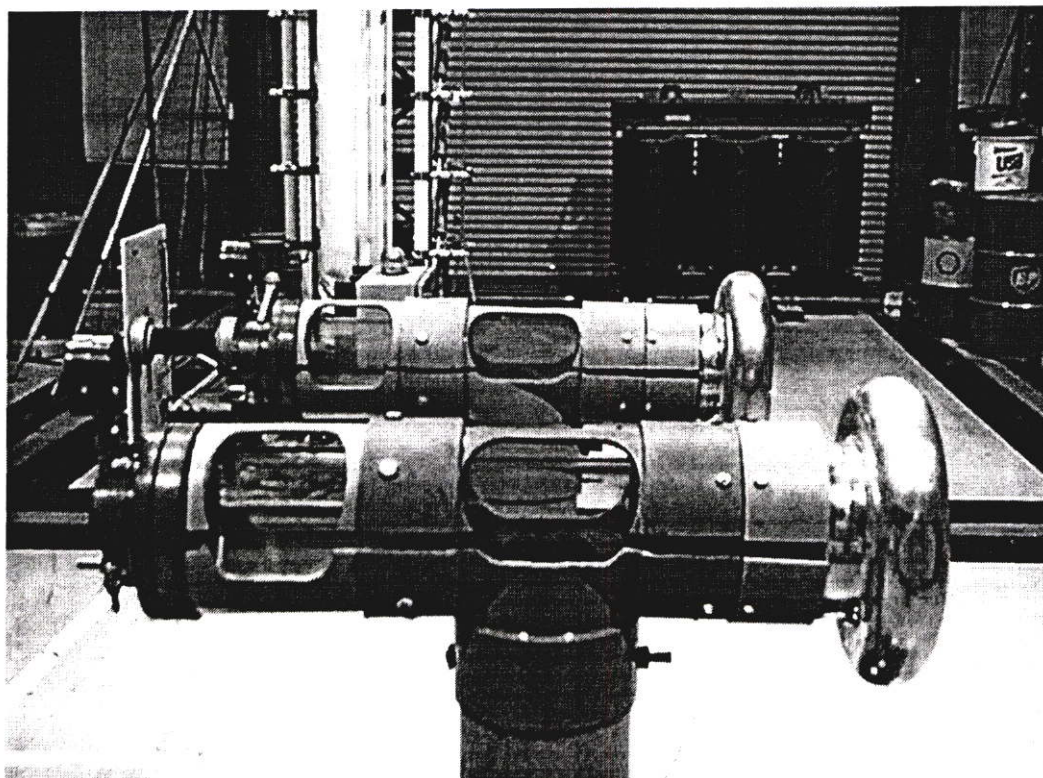
รูปที่ 3.40 ลักษณะของฝาปิดชุดทดสอบขั้วต่อสายเคเบิล XLPE 24 kV, 240 sq.mm. พร้อมติดตั้งเกจวัดความดันก๊าซและสูญญากาศ

### 3.8.5 การออกแบบและสร้างชุดลดค่าความเครียดสนามไฟฟ้า

ชุดลดค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่จุดต่อสายเคเบิลแรงดันสูงมีหน้าที่ในการเพิ่มพื้นที่ของจุดสัมผัสแรงดันสูงที่ชุดทดสอบให้มีพื้นที่มากขึ้น ค่าของความเครียดสนามไฟฟ้าลดลง ไม่ก่อให้เกิดค่าดิสชาร์จบางเนื่องจากโคโรนาดิสชาร์จหรือดิสชาร์จตามผิว



รูปที่ 3.41 ชุดลดความเครียดสนามไฟฟ้าทำจากอลูมิเนียม



รูปที่ 3.42 ลักษณะของขั้วต่อสายเคเบิลสำหรับการทดสอบหาค่า PD และ Dielectric Loess

### 3.9 สรุป

จากทฤษฎีและหลักการออกแบบขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูง XLPE ฉนวนก๊าซ ขนาดแรงดัน 24 kV, 240 sq.mm. ที่ใช้สามารถออกแบบใช้งานได้ในระดับเบื้องต้น แต่ปัญหาที่พบในการสร้างเพื่อความเหมาะสมและงบประมาณที่ไม่มากในงานวิจัยจึงเลือกใช้วัสดุอุปกรณ์ในการสร้างที่มีใช้อยู่ภายในประเทศมาเป็นต้นแบบของงานวิจัยในรูปแบบของขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันที่สมบูรณ์น่าจะอยู่ที่การเลือกใช้วัสดุที่นำมาใช้ในการฉนวนเพื่อลดค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นก็จะสามารถพิสูจน์ในทฤษฎีและหลักการในเทคนิคการออกแบบฉนวนในอุปกรณ์ทางวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง

## บทที่ 4

# การวิเคราะห์หาค่าดิสชาร์จบางส่วนและพลังงานสูญเสีย ไดอิเล็กตริกของขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูง

### 4.1 บทนำ

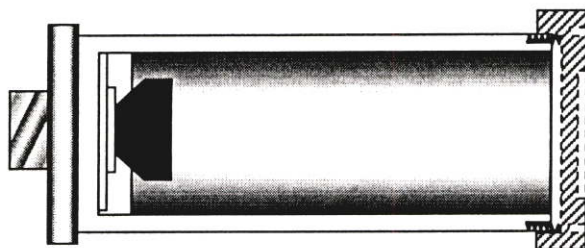
วิทยานิพนธ์ในบทนี้ต้องการที่จะนำเสนอการวิเคราะห์และทดสอบขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงที่ได้ทำการออกแบบและสร้างขึ้นใช้ในการทดสอบสายเคเบิลแรงดันสูง XLPE ที่แรงดันใช้งาน 24 kV ขนาด 240 sq.mm. โดยจะทำการวิเคราะห์และทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วน (PD) และค่าพลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก ซึ่งจะได้นำเสนอตามหัวข้อวิทยานิพนธ์ดังต่อไปนี้

### 4.2 การทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วน(PD) ของขั้วต่อสายเคเบิล

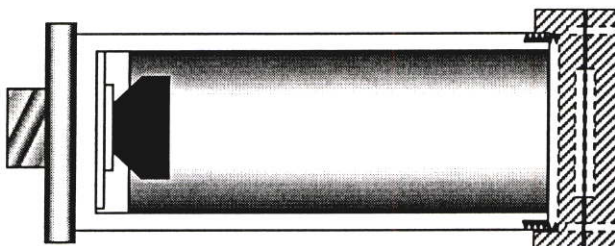
การทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนของขั้วต่อสายเคเบิลเพื่อการวิเคราะห์หาค่าของการสูญเสียที่อาจเกิดขึ้นจากขั้วต่อสายเคเบิล ซึ่งในงานวิจัยในวิทยานิพนธ์นี้ได้กำหนดขอบเขตของค่าดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นกับขั้วต่อสายเคเบิล โดยอ้างอิงข้อมูลจากขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมและห้องปฏิบัติการทางวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง ผู้วิจัยจึงขออ้างอิงจากข้อมูลการทดสอบมาตรฐานค่าดิสชาร์จบางส่วนที่  $PD \leq 1$  ใน Technical Data ของ Cable Test Termination KEV Series จากบริษัท HAEFELY TRENCH ประเทศ Switzerland [20]

#### 4.2.1 ขั้นตอนการทดสอบขั้วต่อสายเคเบิล

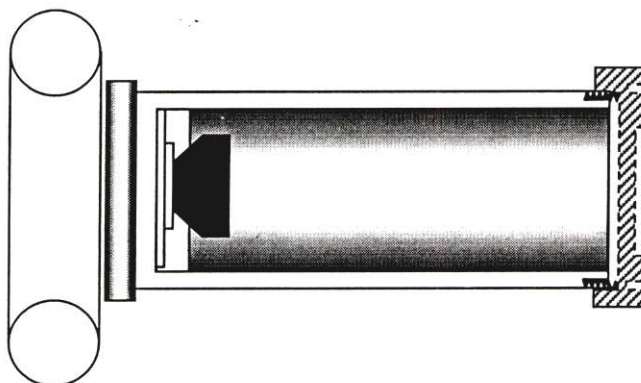
การออกแบบขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงจะทำการสร้างขั้วต่อสายขึ้นมาใช้ในการทดสอบจะประกอบไปด้วยขั้วต่อสายเคเบิล 2 หัวที่ใช้ในการทดสอบที่ต้นสายเคเบิลและปลายสายเคเบิลโดยมีลักษณะของขั้วต่อสายที่ใช้ในการทดสอบดังรูปที่ 4.1 การทดสอบเฉพาะขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงนั้นไม่ได้มีมาตรฐานกำหนดใช้ แต่ในทางปฏิบัติการทดสอบขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงกับสายเคเบิลที่ใช้ทดสอบ ก็จะต้องไม่ก่อปัญหาในการทดสอบ หรือมีผลกระทบต่อค่าที่ทำการทดสอบ เพราะค่าดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นภายในฉนวนที่วัดได้ของสายเคเบิลเองก็มีค่าสูญเสียที่ต่ำอยู่แล้ว แต่จะต้องมาวัดค่าที่เกิดจากขั้วต่อสายไปด้วย การออกแบบและนำไปทดสอบจึงต้องมีค่าการสูญเสียที่เกิดขึ้นน้อยมาก หรือเรียกอีกในลักษณะหนึ่งว่าขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงที่มีค่าการสูญเสียต่ำ (Low Loss Cable Terminator) ซึ่งในการทดสอบเพื่อวิเคราะห์หาค่าต่างๆ ที่เกิดขึ้นได้ออกแบบการทดสอบดังนี้



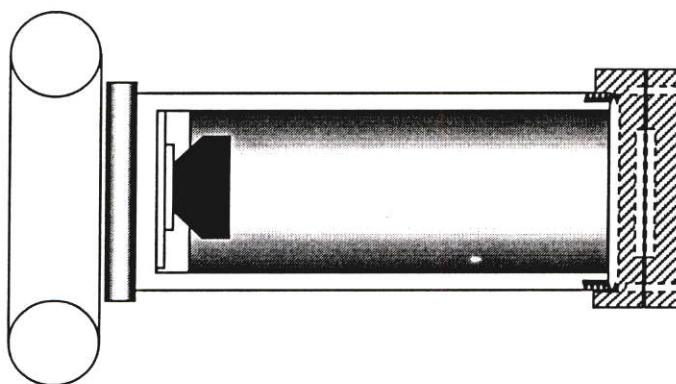
ก) Type A



ข) Type B



ค) Type C



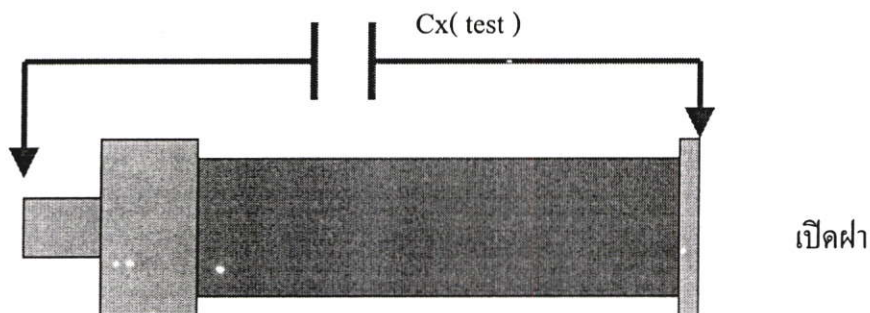
ง) Type D

รูปที่ 4.1 แบบของกรรทศอบของขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงเพื่อหาค่าดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้น

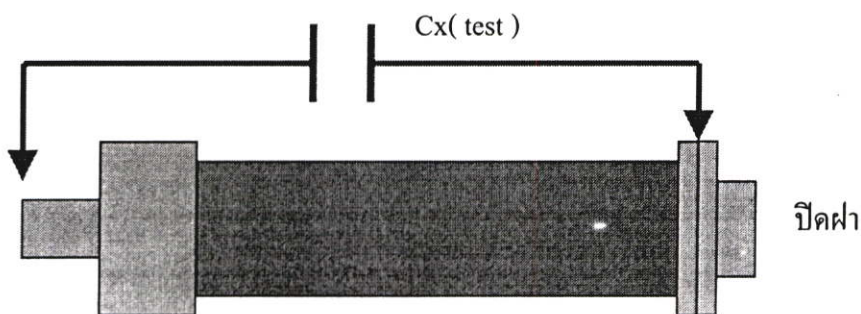
- ก) แบบของขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงที่ไม่มีสายเคเบิลต่อและไม่มีฝาปิด (Type A)
- ข) แบบของขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงที่ไม่มีสายเคเบิลต่อและมีฝาปิด (Type B)
- ค) แบบของขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงที่ไม่มีสายเคเบิลต่อและไม่มีฝาปิดพร้อมกับชุดลดโคโรนาดีสชาร์จ (Type C)
- ง) แบบของขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงที่ไม่มีสายเคเบิลต่อและมีฝาปิดพร้อมกับชุดลดโคโรนาดีสชาร์จ (Type D)

4.2.2 วงจรการทดสอบหาค่าดีสชาร์จบางส่วนและพลังงานสูญเสียไออิเล็กทรอนิกส์

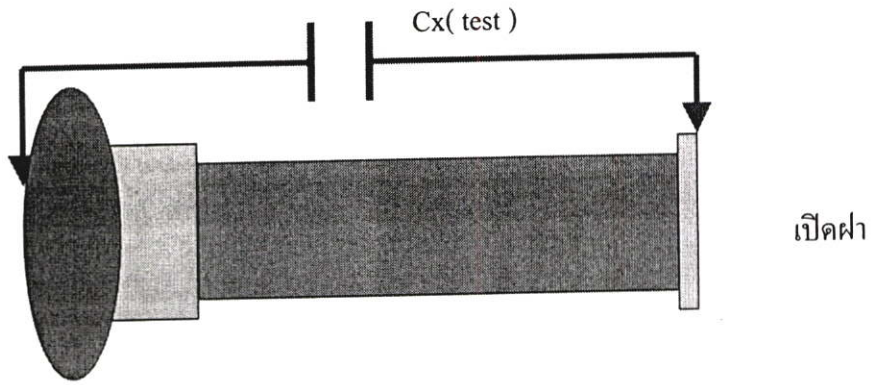
การทดสอบโดยเริ่มการเทียบเคียงขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงเป็นลักษณะของค่าคาปาซิแตนซ์ในการทดสอบหาค่าดีสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นและพลังงานสูญเสียไออิเล็กทรอนิกส์ทั้ง 2 หัว ที่ใช้ในการทดสอบสายเคเบิลต้นสายและปลายสาย ดังที่แสดงในรูปที่ 4.2, 4.3, 4.4 และ 4.5



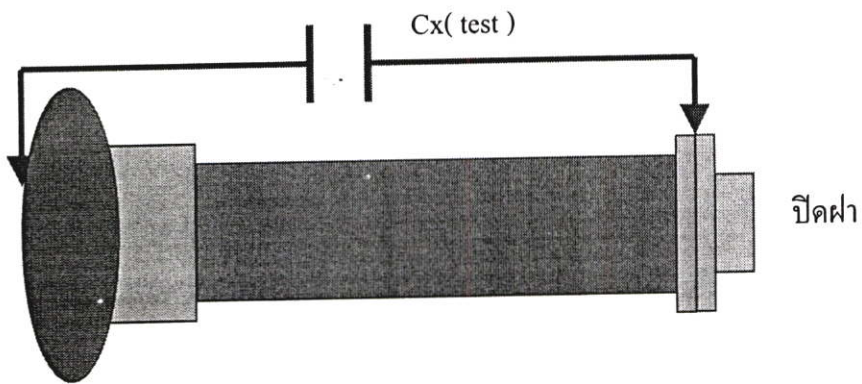
รูปที่ 4.2 ท่อออสซิลิกแบบไม่มีตัวลดความเครียดแบบปิดฝา (Type A)



รูปที่ 4.3 ท่อออสซิลิกแบบไม่มีตัวลดความเครียดแบบปิดฝา (Type B)



รูปที่ 4.4 ท่อออกคลีติกแบบมีตัวลวดความเครียด แบบเปิดฝา (Type C)



รูปที่ 4.5 ท่อออกคลีติกแบบมีตัวลวดความเครียด แบบปิดฝา (Type D)

การแบ่งแยกระดับแรงดันทดสอบชั่วคราวต่อสายเคเบิล(Terminator)และสายเคเบิลแรงดันสูง XLPE ได้ทำการทดสอบที่ระดับแรงดันมาตรฐานอ้างอิงตาม IEC 60502 ที่  $1.73U_0$  จากสายเคเบิล XLPE ที่แรงดันพิกัด 12/20(24kV) หรือ  $U_0/U_{max}$  ที่  $U_0 = 12 \text{ kV}$  แรงดันทดสอบเท่ากับ 20.76 kV

ในการทดสอบกิดที่ 100% ของแรงดันทดสอบเท่ากับ 24 kV

ทดสอบที่ 50% ของแรงดันทดสอบเท่ากับ 12 kV

ทดสอบที่ 100% ของแรงดันทดสอบเท่ากับ 24 kV

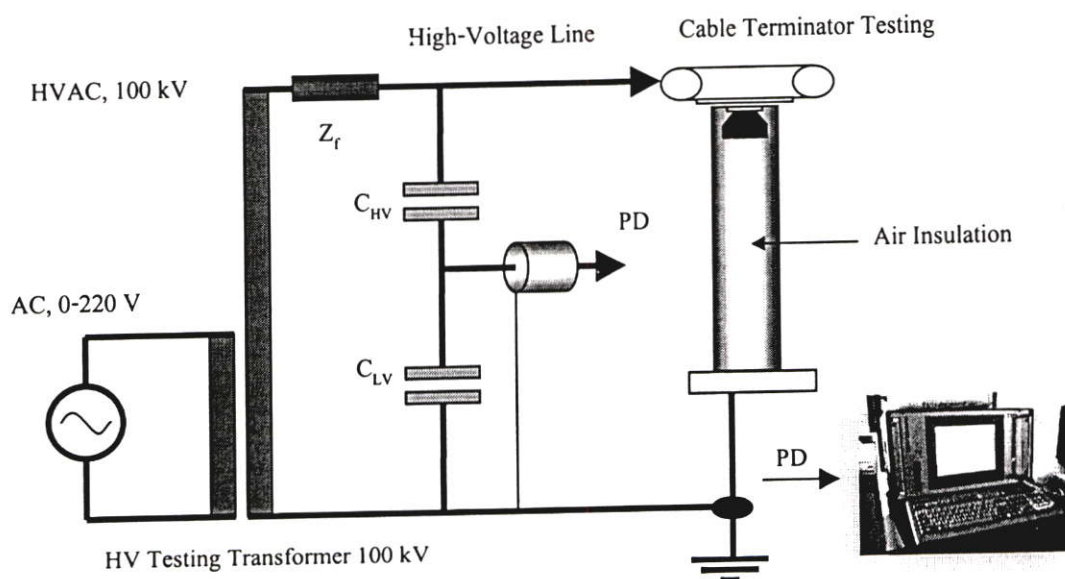
ทดสอบที่ 150% ของแรงดันทดสอบเท่ากับ 36 kV

### 4.3 การวิเคราะห์ค่าดิซชาร์จบางส่วนที่ขั้วต่อสายเคเบิล

การวิเคราะห์แบ่งแบบการทดสอบขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงออกเป็น 4 แบบด้วยกันคือ

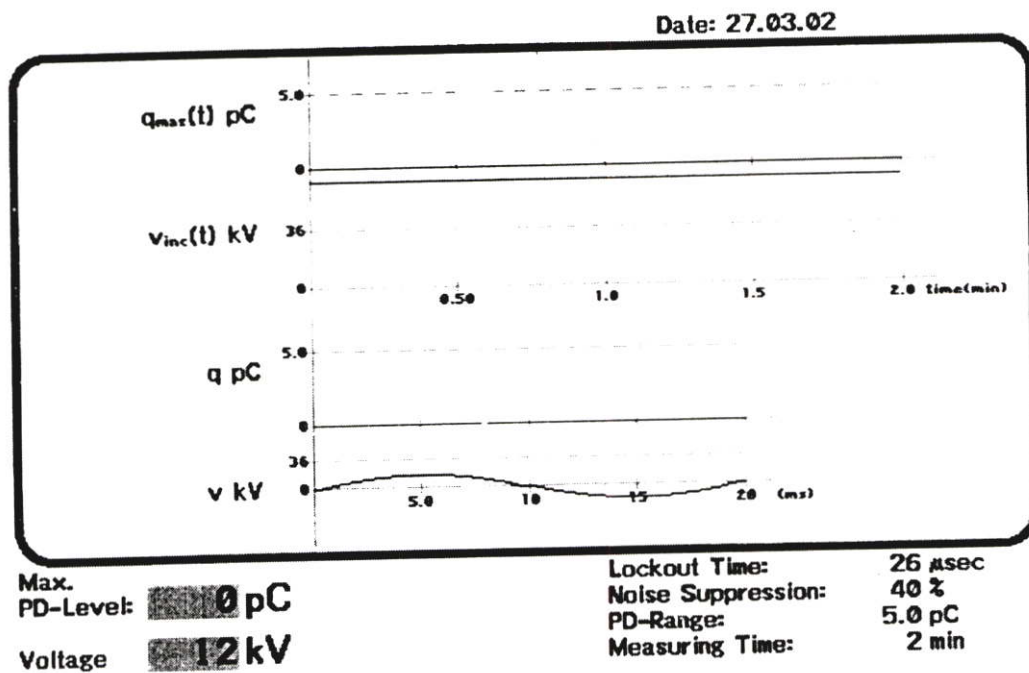
- 1) แบบของขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงที่ไม่มีสายเคเบิลต่อและไม่มีฝาปิด (แบบ A)
- 2) แบบของขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงที่ไม่มีสายเคเบิลต่อและมีฝาปิด (แบบ B)
- 3) แบบของขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงที่ไม่มีสายเคเบิลต่อและไม่มีฝาปิดพร้อมกับชุดลดโคโรนาดิซชาร์จ (แบบ C)
- 4) แบบของขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงที่ไม่มีสายเคเบิลต่อและมีฝาปิดพร้อมกับชุดลดโคโรนาดิซชาร์จ (แบบ D)

การทดสอบวัดค่าดิซชาร์จบางส่วนและไดอิเล็กตริก จะทำการทดสอบกับขั้วต่อสายที่ยังไม่ได้ใช้ร่วมกับสายเคเบิลแรงดันสูงและจะทำการทดสอบทั้ง 2 หัว คือขั้วต่อสายต้นทางและขั้วต่อสายปลายทาง โดยเครื่องวัดค่าดิซชาร์จบางส่วน(PD เครื่องวัดค่าคาปาซิแตนซ์และแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียค่าไดอิเล็กตริกหรือเรียกว่า เครื่องวัดค่าพลังสูญเสียค่าไดอิเล็กตริก ของบริษัท Haefely Trench รุ่น PD Analyzer TE-571 และ Capacitance and  $\tan\delta$  รุ่น 2809a โดยทำการทดสอบหาค่าในแบบดังกล่าวมีผลการวัดค่าแบ่งออกเป็นดังนี้

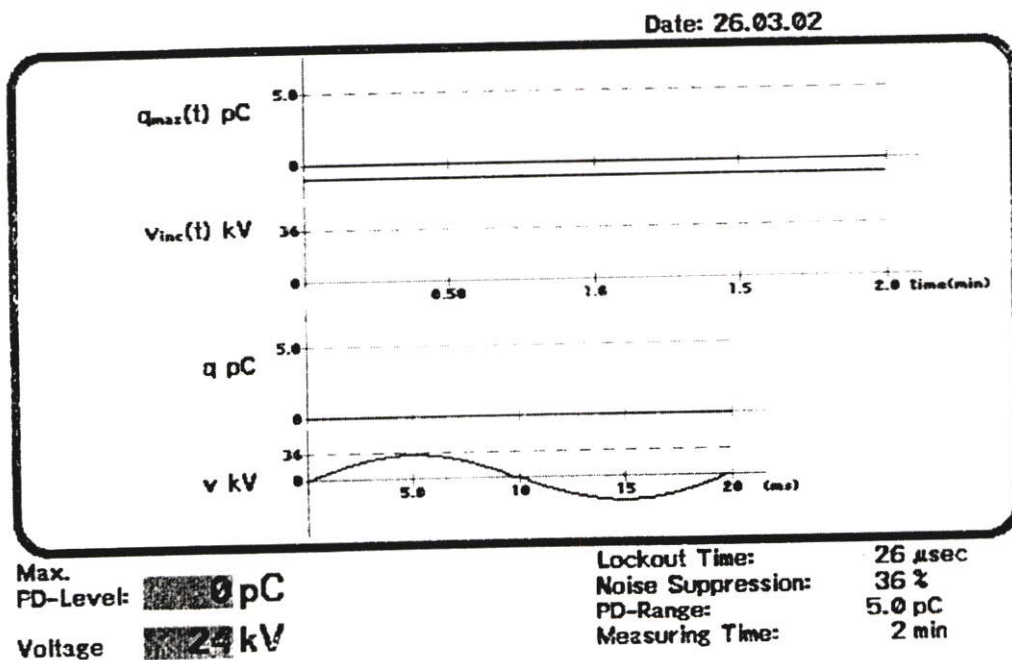


รูปที่ 4.6 วงจรการทดสอบหาค่าดิซชาร์จบางส่วน(PD) ที่ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV

4.3.1 ค่าคิซาร์จบางส่วนของขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงที่ไม่มีสายเคเบิลต่อและไม่มีฝาปิด

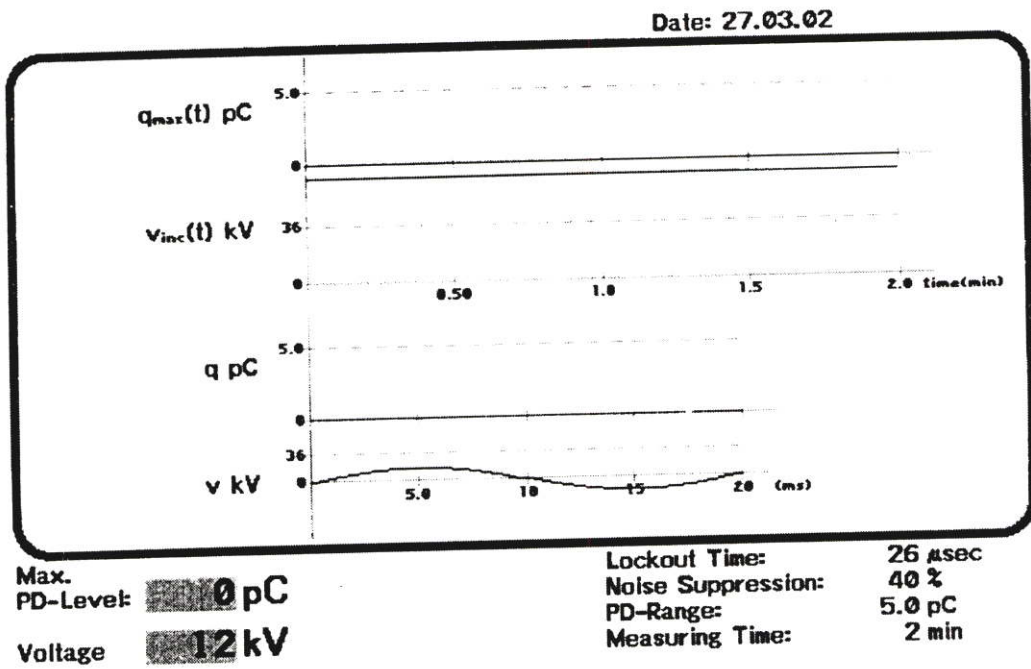


รูปที่ 4.7 ค่าคิซาร์จบางส่วน(PD) ของการทดสอบแบบ A ที่ระดับแรงดัน 12 kV มีค่า PD = 0 pC

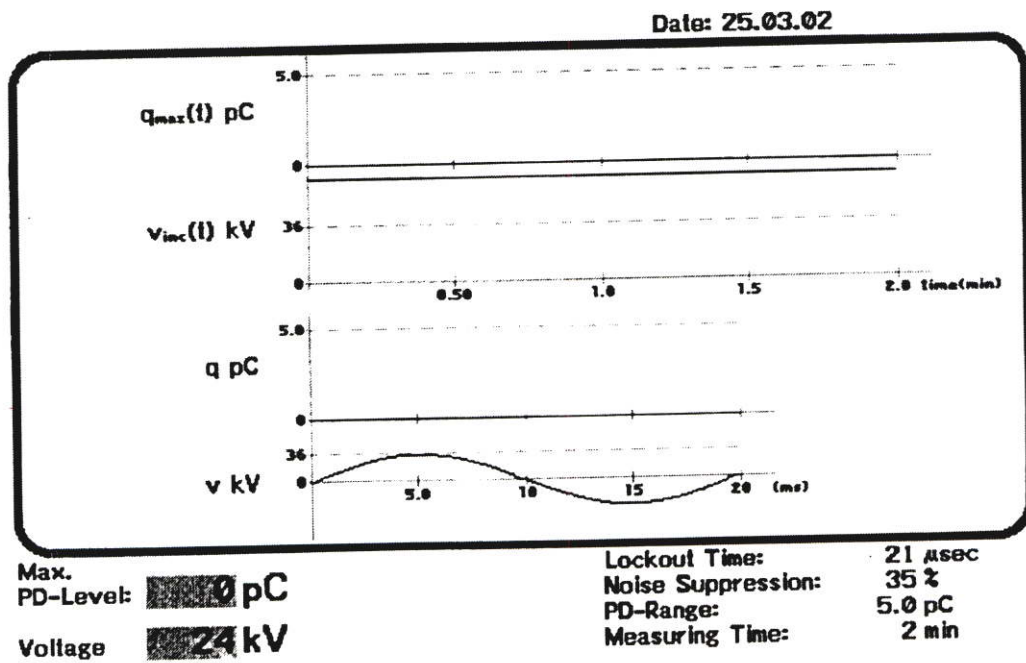


รูปที่ 4.8 ค่าคิซาร์จบางส่วน(PD) ของการทดสอบแบบ A ที่ระดับแรงดัน 24 kV มีค่า PD = 0 pC

#### 4.3.2 ค่าคิซาร์จบางส่วนของข้อต่อสายเคเบิลแรงดันสูงที่ไม่มีสายเคเบิลต่อและมีฝาปิด

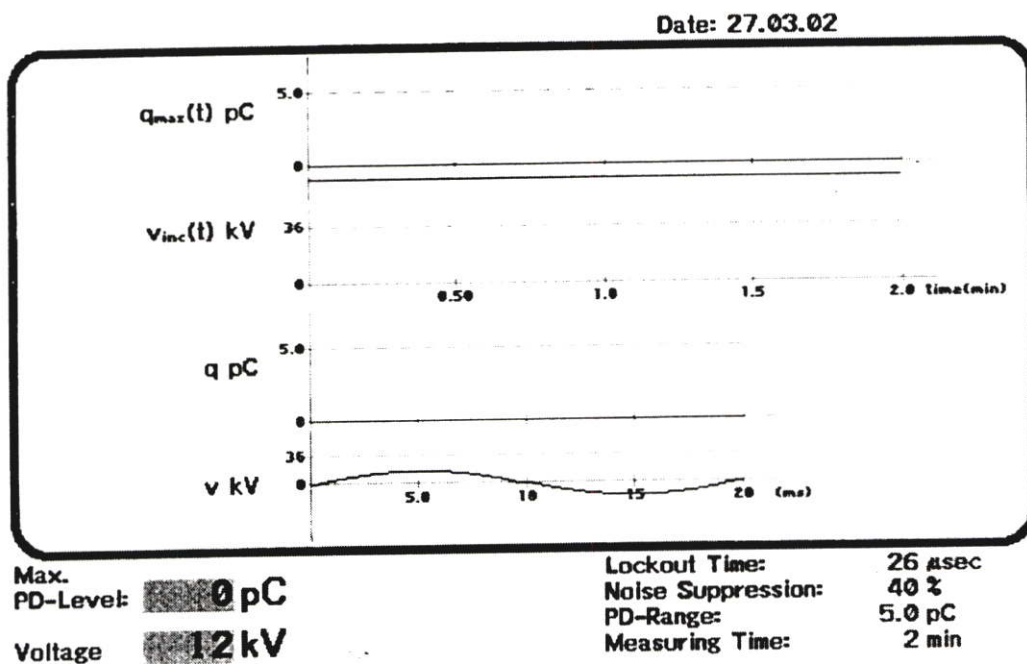


รูปที่ 4.9 ค่าคิซาร์จบางส่วน(PD) ของการทดสอบแบบ B ที่ระดับแรงดัน 12 kV มีค่า PD = 0 pC

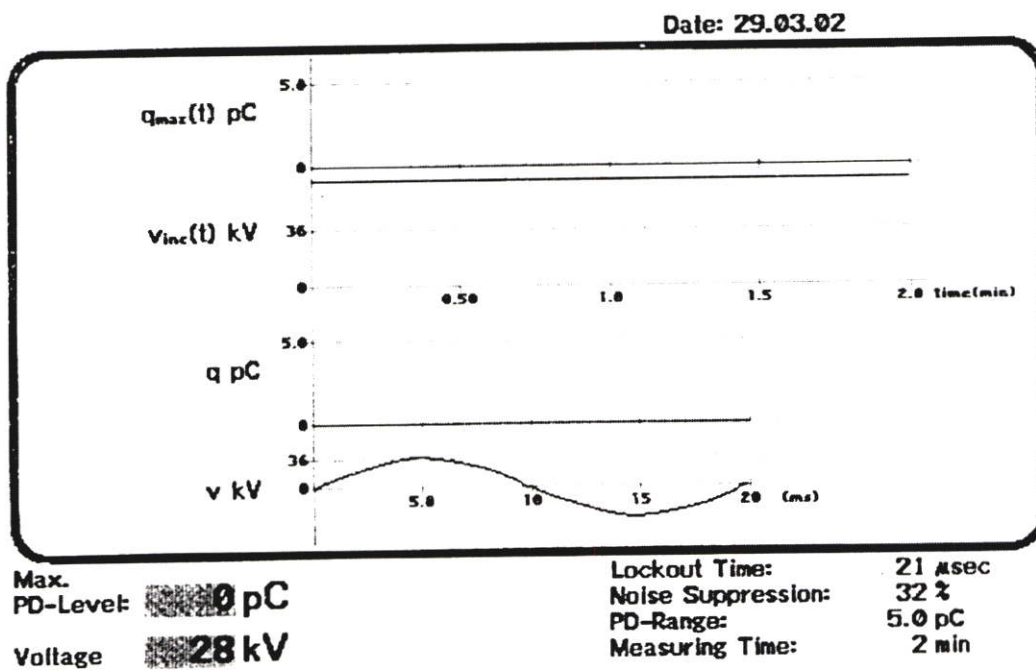


รูปที่ 4.10 ค่าคิซาร์จบางส่วน(PD) ของการทดสอบแบบ B ที่ระดับแรงดัน 24 kV มีค่า PD = 0 pC

4.3.3 ค่าดิซชาร์จบางส่วนของขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงที่ไม่มีสายเคเบิลต่อและไม่มีฝาปิด พร้อมกับชุดลดโคโรนาดิซชาร์จ

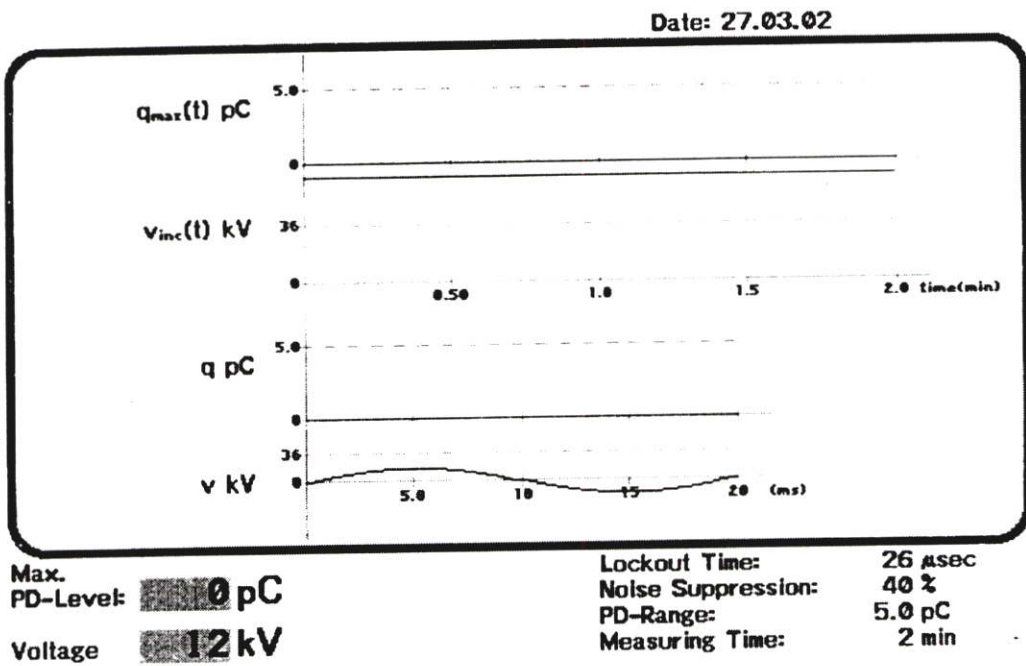


รูปที่ 4.11 ค่าดิซชาร์จบางส่วน(PD) ของการทดสอบแบบ C ที่ระดับแรงดัน 12 kV มีค่า PD = 0 pC

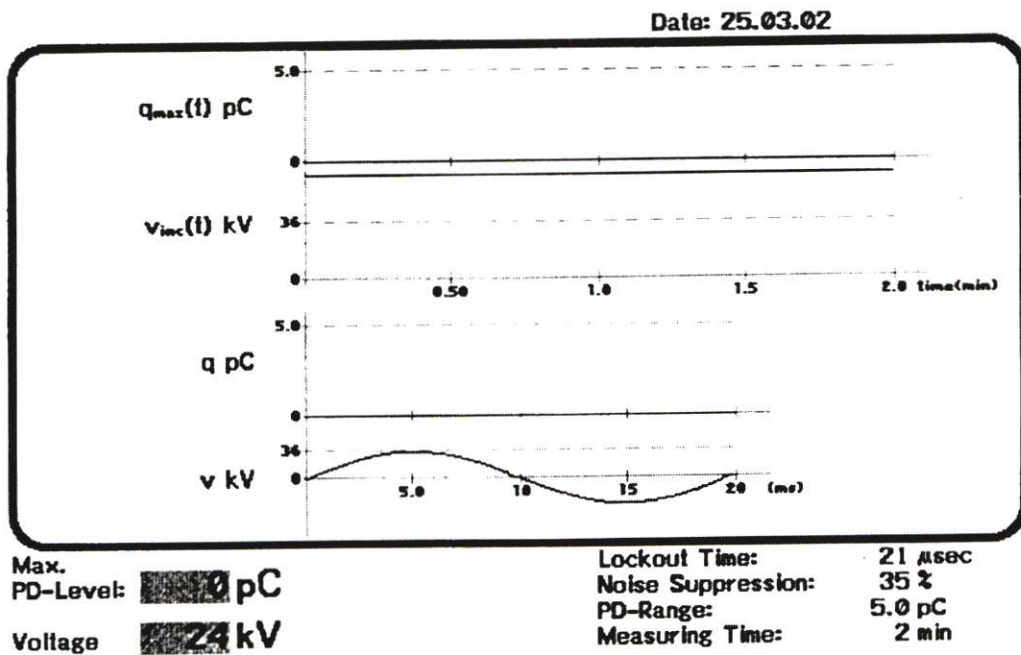


รูปที่ 4.12 ค่าดิซชาร์จบางส่วน(PD) ของการทดสอบแบบ C ที่ระดับแรงดัน 24 kV มีค่า PD = 0 pC

4.3.4 ค่าดิซชาร์จบางส่วนของขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงที่ไม่มีสายเคเบิลต่อและมีฝาปิด  
พร้อมกับชุดลดโคโรนาดิซชาร์จ



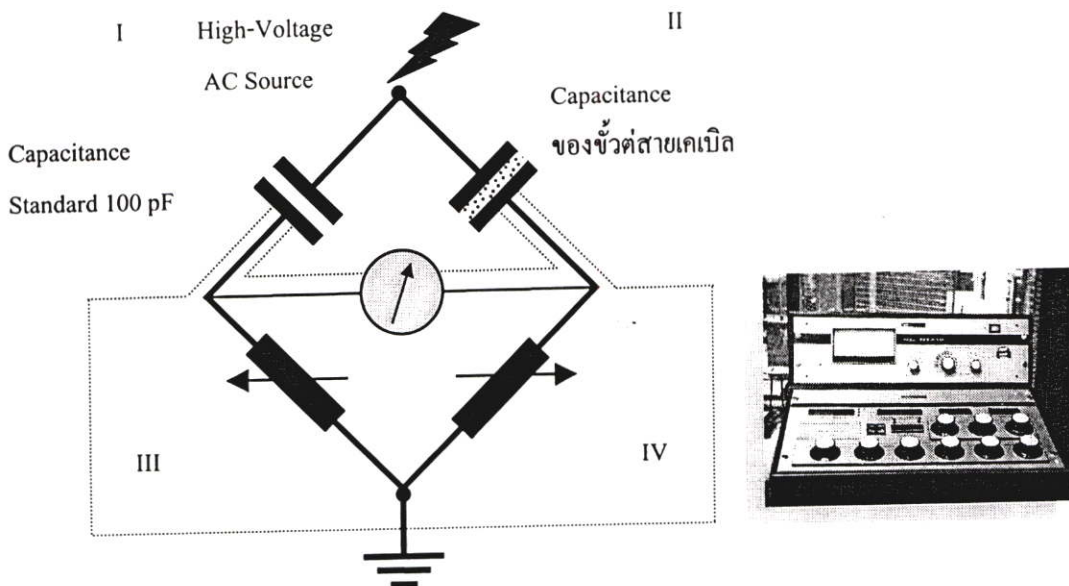
รูปที่ 4.13 ค่าดิซชาร์จบางส่วน(PD) ของการทดสอบแบบ D ที่ระดับแรงดัน 12 kV มีค่า PD = 0 pC



รูปที่ 4.14 ค่าดิซชาร์จบางส่วน(PD) ของการทดสอบแบบ D ที่ระดับแรงดัน 24 kV มีค่า PD = 0 pC

#### 4.4 การวิเคราะห์ค่าพลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกที่ขั้วต่อสายเคเบิล

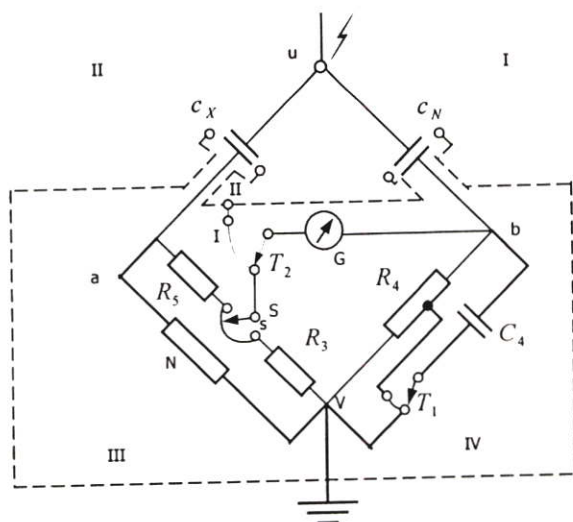
กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกของวัสดุหรืออุปกรณ์ใดๆ ที่ใช้งานกับแรงดันกระแสสลับ สามารถ คำนวณหรือประมาณค่าที่แรงดันใช้งาน  $U$  ใดๆ ได้จากสมการ  $P_d = \omega * C * U^2 * \tan \delta$  ซึ่งจำเป็นต้องทราบค่าความจุไฟฟ้า  $C$  และแฟกเตอร์พลังงานสูญเสีย  $\tan \delta$  ทั้งสองค่านี้ สามารถวัดได้ด้วยอุปกรณ์ที่เรียกว่า Schering Bridge ดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 วงจรวัดค่าคาปาซิแตนซ์และแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก

พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกในวัสดุฉนวนหรือในอุปกรณ์อาจหาได้โดยการวัดค่า  $\tan \delta$  และค่าคาปาซิแตนซ์ วิธีวัดค่าทั้งสองนี้ทำซ้ำๆ ไปที่ใช้นั้นมี 2 วิธี คือ วิธีวัดคัมมิเตอร์ และ วิธีบริดจ์ ในที่นี้จะกล่าวแต่เฉพาะวิธีบริดจ์ ซึ่งเหมาะที่จะใช้กับความถี่ในย่านปานกลาง คือ 10 ถึง  $10^6$  Hz บริดจ์ที่ใช้กันทั่วไปก็คือ Schering bridge ที่ใช้กับความถี่พลังงานตั้งแต่ 50 Hz ถึง 100 kHz

Schering bridge วัดคาปาซิแตนซ์และมุมพลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก  $\delta$  ของคาปาซิเตอร์ โดยการเปรียบเทียบกับคาปาซิเตอร์มาตรฐาน ซึ่งเป็นแบบอากาศหรือก๊าซอัด (compressed gas standard capacitor) มีพลังงานสูญเสียต่ำที่ความถี่พลังงานหรือความถี่อื่นๆ วงจรของ Schering bridge ดังแสดงในรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 วงจร Schering bridge

ในรูปที่ 4.16

$C_x$	คือ	กะแปซิเต้นซ์ของวัสดุทดสอบหรือที่ต้องการวัด
$R_x$	คือ	ความต้านทานสมมูลกับกำลังสูญเสียเปล่าในไดอิเล็กตริก
$C_N$	คือ	กะแปซิเต้นซ์มาตรฐาน
$R_3$	คือ	ความต้านทานไร้ความเหนียวนำและปรับค่าได้
$R_4$	คือ	ความต้านทานไร้ความเหนียวนำ
$C_4$	คือ	กะแปซิเต้นซ์ปรับค่าได้
G	คือ	กัลวานอมิเตอร์ความไวสูง

การปรับบริจค์ให้สมดุลทำได้โดยการปรับค่า  $R_3$  และ  $R_4$  จนกระทั่งเข็มของกัลวานอมิเตอร์ชี้ศูนย์ เมื่อบริจค์สมดุลแล้วจึงเขียนสมการได้ว่า

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{Z_3}{Z_4}$$

เมื่อ  $Z_1$ ,  $Z_2$ ,  $Z_3$  และ  $Z_4$  เป็นอิมพีแดนซ์ของส่วนวงจรแขน I, II, III และ IV ตามลำดับ คือ

$$Z_1 = \frac{R_x}{1 + j\omega C_x R_x}$$

$$Z_2 = \frac{-j}{\omega C_N}$$

$$\begin{aligned} Z_3 &= R_3 \\ Z_4 &= \frac{R_4}{1 + j\omega C_4 R_4} \end{aligned}$$

นั่นคือ 
$$\frac{R_x}{R_3(1 + j\omega C_x R_x)} = \frac{-j}{\omega C_4 R_4} (1 + j\omega C_4 R_4)$$

โดยการเทียบค่าจริงจะได้

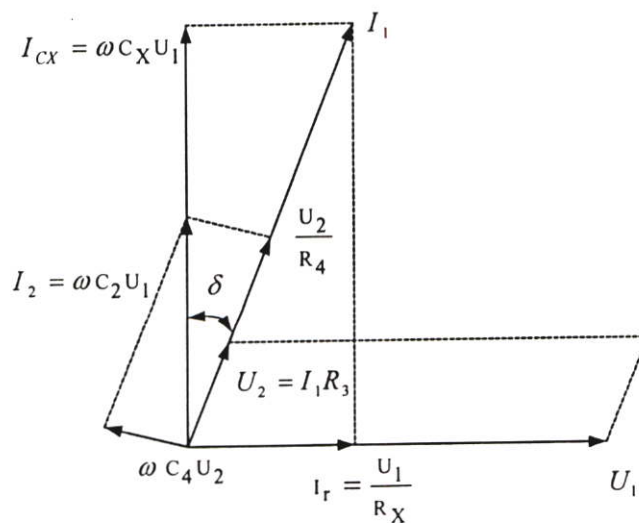
$$\frac{R_x}{1 + \omega^2 C_x^2 R_x^2} = \frac{C_4 R_3}{C_N} \quad (4.1)$$

จากรูปที่ 4.16 เมื่อ  $C_x$  และ  $R_x$  ต่อกันแบบขนาน

$$\cos \delta = \frac{\omega C_x R_x}{\sqrt{1 + \omega^2 C_x^2 R_x^2}}$$

$$\cos^2 \delta = \frac{\omega^2 C_x^2 R_x^2}{1 + \omega^2 C_x^2 R_x^2} \quad \text{แทนค่าในสมการจะได้}$$

$$C_x = \frac{C_N \cos^2 \delta}{\omega^2 C_x C_4 R_x R_3} \quad (4.2)$$



รูปที่ 4.16 เวกเตอร์ไคอาแกรมของวงจร Schering bridge

จากรูป 4.17

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\omega C_4}{1/R_4}$$

จากรูปที่ 4.17

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1/R_x}{\omega C_x} = \frac{1}{\omega C_x R_x}$$

$$\omega C_4 R_4 = \frac{1}{\omega C_x R_x}$$

$$\frac{1}{C_x R_x} = \omega^2 C_4 R_4$$

แทนค่า  $\frac{1}{C_x R_x}$  ในสมการ (4.2)

$$\text{จะได้} \quad C_x = \frac{C_N R_4 \cos^2 \delta}{R_3}$$

$$\text{นั่นคือ} \quad C_x = \frac{C_N R_4}{R_3} \quad \text{โดยประมาณ}$$

$$\text{และ} \quad \tan \delta = \omega C_4 R_4$$

ในทางภาคปฏิบัติ  $R_4$  มักจัดไว้เป็นค่าคงตัวเฉพาะที่มีสวิตช์เลือกให้เปลี่ยนได้หลายค่า เพื่อให้สามารถวัดได้ละเอียดถูกต้องในช่วงกว้างของค่า  $C$  ส่วน  $R_3$  นั้นเป็นความต้านทานที่ปรับได้ ซึ่งมีค่าสูงสุดไม่เกิน 10,000 โอห์ม ทั้งนี้เพื่อขจัดค่าสเตรคาปาซิแตนซ์ให้มีน้อยที่สุด ส่วน  $C_4$  นั้นเป็นคาปาซิแตนซ์ที่ปรับได้เช่นกัน และมีค่าสัมพันธ์โดยตรงกับค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่า  $\tan \delta$

เพื่อจัดการรบกวนจากภาคแรงสูงที่มีต่อวงจรภาคแรงต่ำ ซึ่งอาจจะดับปลิงผ่านสเตรคาปาซิแตนซ์ ฉะนั้นตั้งแต่ภาคแรงต่ำของกะเปซิเตอร์มาตรฐาน  $C_N$  และวัสดุทดสอบมาถึงอิมพีแดนซ์ของวงจร III, IV และกัลวานอมิเตอร์จะมีเกราะป้องกันแบบ 2 ชั้น (double screen shielding) และป้องกันมิให้บริดจ์เสียหายจากแรงพินเกินเนื่องจากภาคแรงสูงเกิดบกร่องขึ้นใน I หรือ II จึงใส่กับดักแรงดันเกินหรือสปาร์คแก๊ปไว้ในวงจรภาคแรงต่ำ

จากการทดสอบหาค่าพลังงานสูญเสียเปล่าโคอิเลกตริกของขั้วต่อสาย จะทำการทดสอบกับขั้วต่อสายที่ยังไม่ได้ใช้ร่วมกับสายเคเบิลแรงดันสูงและจะทำการทดสอบทั้ง 2 หัว คือขั้วต่อสายต้นทางและขั้วต่อสายปลายทาง โดยเครื่องวัดค่าคาปาซิแตนซ์และแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าโคอิเลกตริก หรือเรียกว่า เครื่องวัดค่าพลังงานสูญเสียเปล่าโคอิเลกตริก ของบริษัท Haefely Trench คือ Capacitance and  $\tan \delta$  รุ่น 2809a โดยทำการทดสอบหาค่าในแบบดังกล่าวมีผลการวัดค่าแบ่งออกเป็นดังนี้

ตารางที่ 4.1 การทดสอบค่า Dielectric Loess ของขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูง หัวที่ 1 (ไม่ปิดฝา)

Sensitivity	$U_{control}$ (kV)	$U_{test}$ (kV)	f (Hz)	$Cx_{test}$ (pF)	$\tan \delta$	Dielectric Loss ( $\mu W$ )
1	11.3	12.26	49.8	106.89	$1.832 \times 10^{-3}$	92.421
2	11.3	12.21	49.8	107.74	$1.860 \times 10^{-3}$	93.810
ค่าเฉลี่ย	11.3	12.24	49.8	107.56	$1.847 \times 10^{-3}$	93.115
1	22.6	24.61	49.9	108.42	$1.824 \times 10^{-3}$	376.085
2	22.6	24.62	49.8	108.60	$1.845 \times 10^{-3}$	381.357
3	22.4	24.44	49.8	109.70	$1.886 \times 10^{-3}$	388.043
ค่าเฉลี่ย	22.53	24.55	49.83	108.91	$1.851 \times 10^{-3}$	381.828
1	33.5	36.68	49.8	108.42	$1.838 \times 10^{-3}$	841.866
2	33.5	36.68	49.8	108.60	$1.847 \times 10^{-3}$	847.393
3	33.5	36.67	49.8	108.47	$1.875 \times 10^{-3}$	858.741
ค่าเฉลี่ย	33.5	36.70	49.83	108.49	$1.853 \times 10^{-3}$	849.333

ตารางที่ 4.2 การทดสอบค่า Dielectric Loess ของขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูง หัวที่ 1 (ปิดฝา)

Sensitivity	$U_{control}$ (kV)	$U_{test}$ (kV)	f (Hz)	$Cx_{test}$ (pF)	$\tan \delta$	Dielectric Loss ( $\mu W$ )
1	10.9	11.81	49.9	108.5	$1.892 \times 10^{-3}$	89.904
2	10.9	11.81	49.9	108.6	$1.845 \times 10^{-3}$	87.751
ค่าเฉลี่ย	10.9	11.81	49.9	107.55	$1.867 \times 10^{-3}$	88.827
1	22.0	23.93	49.9	108.80	$1.859 \times 10^{-3}$	363.683
2	22.0	23.92	49.8	108.68	$1.875 \times 10^{-3}$	366.102
3	22.0	23.92	49.8	109.70	$1.886 \times 10^{-3}$	371.706
ค่าเฉลี่ย	22.0	23.92	49.83	108.34	$1.851 \times 10^{-3}$	367.163
1	33.4	36.59	49.8	109.61	$1.827 \times 10^{-3}$	841.866
2	33.4	36.35	49.8	109.80	$1.824 \times 10^{-3}$	830.932
3	33.7	36.29	49.8	108.47	$1.835 \times 10^{-3}$	823.093
ค่าเฉลี่ย	33.5	36.35	49.83	108.74	$1.853 \times 10^{-3}$	831.963

ตารางที่ 4.3 การทดสอบค่า Dielectric Loess ของขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงหัวที่ 2 (ไม่ปิดฝา)

Sensitivity	$U_{control}$ (kV)	$U_{test}$ (kV)	f (Hz)	$Cx_{test}$ (pF)	$\tan \delta$	Dielectric Loss ( $\mu W$ )
1	11.2	12.26	49.8	106.89	$1.832 \times 10^{-3}$	92.580
2	11.2	12.21	49.8	107.74	$1.860 \times 10^{-3}$	94.321
ค่าเฉลี่ย	11.2	12.24	49.8	107.56	$1.847 \times 10^{-3}$	93.450
1	22.6	24.61	49.9	108.42	$1.824 \times 10^{-3}$	376.021
2	22.6	24.62	49.8	108.60	$1.845 \times 10^{-3}$	381.311
3	22.4	24.44	49.8	109.70	$1.886 \times 10^{-3}$	385.600
ค่าเฉลี่ย	22.53	24.55	49.83	108.91	$1.851 \times 10^{-3}$	380.977
1	33.4	36.68	49.8	108.42	$1.838 \times 10^{-3}$	842.012
2	33.5	36.68	49.8	108.60	$1.847 \times 10^{-3}$	844.870
3	33.4	36.67	49.8	108.47	$1.875 \times 10^{-3}$	852.154
ค่าเฉลี่ย	33.4	36.70	49.83	108.49	$1.853 \times 10^{-3}$	846.345

ตารางที่ 4.4 การทดสอบค่า Dielectric Loess ของขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูง หัวที่ 2 (ปิดฝา)

Sensitivity	$U_{control}$ (kV)	$U_{test}$ (kV)	f (Hz)	$Cx_{test}$ (pF)	$\tan \delta$	Dielectric Loss ( $\mu W$ )
1	11.3	12.26	49.8	106.89	$1.832 \times 10^{-3}$	91.542
2	11.3	12.21	49.8	107.74	$1.860 \times 10^{-3}$	93.100
ค่าเฉลี่ย	11.3	12.24	49.8	107.56	$1.847 \times 10^{-3}$	92.321
1	22.6	24.61	49.9	108.42	$1.824 \times 10^{-3}$	376.085
2	22.6	24.62	49.8	108.60	$1.845 \times 10^{-3}$	381.357
3	22.4	24.44	49.8	109.70	$1.886 \times 10^{-3}$	388.043
ค่าเฉลี่ย	22.53	24.55	49.83	108.91	$1.851 \times 10^{-3}$	381.828
1	33.5	36.68	49.8	108.42	$1.838 \times 10^{-3}$	839.255
2	33.5	36.68	49.8	108.60	$1.847 \times 10^{-3}$	852.264
3	33.5	36.67	49.8	108.47	$1.875 \times 10^{-3}$	853.698
ค่าเฉลี่ย	33.5	36.70	49.83	108.49	$1.853 \times 10^{-3}$	848.405

## 4.5 สรุป

ผลจากการวิเคราะห์หาค่าดิสชาร์จบางส่วนและพลังงานสูญเสียเปล่าโคอีเล็กตริกของขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูง XLPE ทั้ง 4 แบบคือ

1. แบบของขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงที่ไม่มีสายเคเบิลต่อและไม่มีฝาปิด
2. แบบของขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงที่ไม่มีสายเคเบิลต่อและมีฝาปิด
3. แบบของขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงที่ไม่มีสายเคเบิลต่อและไม่มีฝาปิดพร้อมกับชุดลดโคโรนาดิสชาร์จ
4. แบบของขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงที่ไม่มีสายเคเบิลต่อและมีฝาปิดพร้อมกับชุดลดโคโรนาดิสชาร์จ

สามารถสรุปได้ว่าการทดสอบเฉพาะขั้วต่อสายเคเบิลเพื่อหาค่าพลังงานที่สูญเสียหรือค่าดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นในบริเวณขั้วต่อสาย วิเคราะห์ได้ว่าค่าดิสชาร์จที่เกิดขึ้นกับขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงมีค่าที่วัดได้อยู่ที่  $PD = 0$  pC หรือมีค่า  $PD \leq 1$  pC ตามมาตรฐานของบริษัทที่ใช้อ้างอิงในข้อมูลทางเทคนิคของขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูง ที่ใช้ในงานทดสอบสายเคเบิลแรงดันสูง

สำหรับค่าของพลังงานสูญเสียเปล่าโคอีเล็กตริกของขั้วต่อสายนั้นไม่มีในข้อมูลอ้างอิงของบริษัท แต่ก็สามารถทำได้ตามหลักการทดสอบหาค่าคาปาซิแตนซ์และแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าโคอีเล็กตริก ซึ่งสรุปได้ว่าการเกิดพลังงานสูญเสียมีค่าใกล้เคียงกันเกือบทุกแบบใน

## บทที่ 5

# การวิเคราะห์หาค่าดิสชาร์จบางส่วน(Partial Discharge) ของสายเคเบิลแรงดันสูง XLPE

### 5.1. บทนำ

การวิเคราะห์หาค่าดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดภายในสายเคเบิลแรงดันสูงในวิทยานิพนธ์บทนี้ เป็นการทดสอบสายเคเบิลแรงดันสูง XLPE ขนาดแรงดัน 24 kV ด้วยขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงที่ออกแบบและสร้างขึ้น ใช้ฉนวนก๊าซคือ อากาศและก๊าซออกซิเจน ทำหน้าที่ในการลดความเครียดสนามไฟฟ้าที่ภายในขั้วต่อสายหรือบริเวณผิวของสายเคเบิลที่จะต้องทำการปกปิดเพื่อทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้น การวิเคราะห์ถึงคุณสมบัติของก๊าซที่สามารถเพิ่มความหนาแน่นของก๊าซโดยใช้การอัดอากาศหรือความดันของก๊าซที่สูงกว่าปกติ ซึ่งจะมีผลต่อการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้น คุณสมบัติของฉนวนก๊าซในการทำสุญญากาศ ซึ่งมีผลการทดสอบดังหัวข้อต่างๆ นี้

### 5.2 การคำนวณหาความยาวของสายเคเบิลที่ใช้ทดสอบ

#### 5.2.1 คำนวณแรงดันทดสอบการเกิดดิสชาร์จบางส่วน

การออกแบบและสร้างขั้วต่อสายเคเบิล จำเป็นต้องทราบข้อมูลเกี่ยวกับองค์ประกอบของขนาดสายเคเบิลที่จะนำมาทำการทดสอบก่อนจึงจะทำการออกแบบขั้วต่อสายเคเบิลได้ ในงานวิจัยนี้จะทำการทดสอบฉนวนของสายเคเบิลที่ระดับแรงดันที่ใช้ในการทดสอบดิสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge) ตามมาตรฐาน IEC 60885-3 โดยสายเคเบิลของ THAI-YAZAKI มีฉนวนเป็น XLPE และมีพิกัดระดับแรงดัน 24 kV จากมาตรฐานการวัดดิสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge) ตามมาตรฐาน IEC 60885-3 จะใช้แรงดันทดสอบคือ  $1.73 U_0$  ทำการคำนวณหาค่าแรงดันที่ใช้ทดสอบจะได้แรงดันทดสอบการเกิดดิสชาร์จบางส่วน  $= 1.73 U_0 = 1.73 \times 12 \text{ kV} = 21.76 \text{ kV}$

#### 5.2.2 การคำนวณการปกปิดฉนวนสายเคเบิลแรงสูง

ในการทดสอบสายเคเบิลจะต้องทราบถึงแรงดันที่จะใช้ทดสอบแล้วจะต้องทราบถึงระยะการปกปิดสายเคเบิลเพื่อทดสอบ แต่การปกปิดสายเคเบิลเพื่อทดสอบสาย XLPE 24 kV จะต้องมีระยะห่างของการปกปิดระหว่างแรงดันสูงกับกราวด์มากพอสมควร เพื่อป้องกันการเกิดการวาวไฟตามผิว จึงต้องมีการทดลองเพื่อหาระยะการปกปิดสายเคเบิลที่เหมาะสม

ตารางที่ 5.1 แสดงการหาค่าที่ทำให้เกิดการวบไฟตามผิวของสายเคเบิล

ครั้งที่	ค่าแรงดันที่ทำให้เกิดการวบไฟตามผิว (kV)	
	ระยะห่างของขั้วแรงดัน 5 cm	ระยะห่างของขั้วแรงดัน 10 cm
1	27.6	43.1
2	28.3	44.5
3	28.1	45.1
4	28.2	45.5
5	29.1	46.2
ค่าเฉลี่ย	28.26	44.88

เมื่อได้ค่าเฉลี่ยของแรงดันที่จะทำให้เกิดการวบไฟตามผิวแล้วจึงนำมาคำนวณหาค่าแรงดันที่จะทำให้เกิดการวบไฟตามผิวต่อเซนติเมตรดังนี้คือ แรงดันที่จะทำให้เกิดการวบไฟตามผิวต่อเซนติเมตร =  $28.26 \text{ kV}/5 \text{ cm} = 5.650 \text{ kV/cm}$

$$= 44.88 \text{ kV}/10 \text{ cm} = 4.488 \text{ kV/cm}$$

จากผลการคำนวณที่ได้ พิจารณาเลือกค่าแรงดันที่จะทำให้เกิดการวบไฟตามผิวน้อยที่สุดเพื่อเป็นตัวป้องกันคือเลือกใช้ค่า  $4.488 \text{ kV/cm}$  และจากที่กำหนดแรงดันทดสอบในการเกิด Partial Discharge ไว้ที่  $20.76 \text{ kV}$  นำมาใช้คำนวณหาระยะการปกสายเคเบิลเพื่อป้องกันการวบไฟตามผิวได้ดังนี้

$$4.488 \text{ kV/cm} \times \text{ความยาวที่ต้องปกสายเคเบิล} = 41.52 \text{ kV}$$

$$\text{ดังนั้นความยาวที่ต้องปกสายเคเบิล} = 41.52 / 4.488$$

$$= 9.2513 \text{ เซนติเมตร}$$

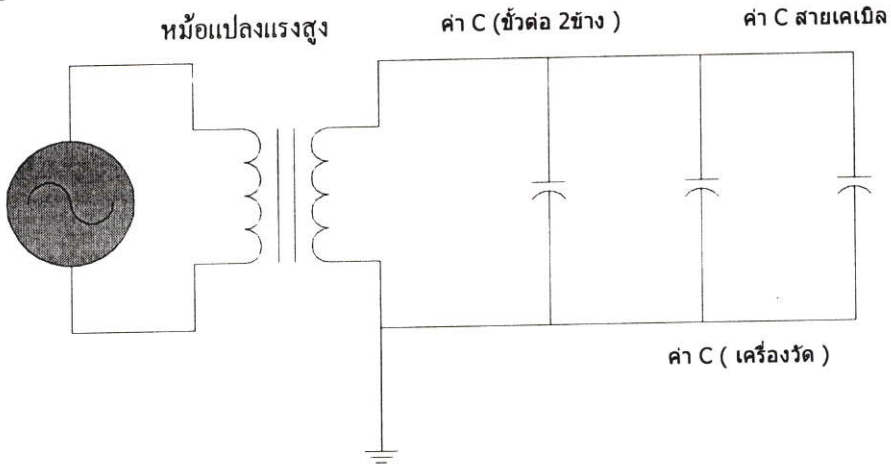
จากความยาวที่คำนวณได้นั้น เป็นความยาวในการปกสายเคเบิลน้อยที่สุด ในทางปฏิบัติจำเป็นที่จะต้องมีการคูณค่า Safety Factor ด้วย พิจารณาเลือกใช้ค่า Safety Factor ที่ 9

$$\text{ระยะการปกสายเคเบิล} = 9.251 \times 9$$

$$= 83.2590 \text{ เซนติเมตร}$$

เมื่อนำมาคำนวณหาค่าที่จะเกิดการวบไฟตามผิวจะได้เท่ากับแรงดันที่จะทำให้เกิดการวบไฟตามผิวที่การปกสาย  $83.2590 \text{ cm} = 83.2590 \times 4.488 \text{ kV} = 373.6663 \text{ kV}$

ดังนั้นจึงกำหนดการปกสายเคเบิลเพื่อทดสอบไว้ที่  $83.2590 \text{ เซนติเมตร}$  โดยหากจะเกิดการวบไฟตามผิวได้จะต้องใช้แรงดันถึง  $373.6663 \text{ kV}$  แต่แรงดันที่ใช้ทดสอบจริงคือ  $41.52 \text{ kV}$  จึงทำให้สามารถลดปัญหาการวบไฟตามผิวได้



รูปที่ 5.1 วงจรในการทดสอบฉนวนของสายเคเบิลแรงสูง XLPE

อุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบ

- สายเคเบิล THAI-YAZAKI 22/24(36) kV, ขนาด 240 Sq.mm. ฉนวน XLPE

$$V_{\text{test}} \text{ AC} = 30 \text{ kV rms}$$

- หม้อแปลงกำลังทดสอบ (MESSWANDLER BAU GMBH BAMBERG, TESTING TRANSFORMER )

I phases, rate volt 2\*0.22/10/0.22 kV

Rate current 2/11.4/0.05/15.1 A

Rate output 5 kVA

Impedance Volt 3.5%

ค่าความจุ (Capacity) ของโหลดสูงสุดที่หม้อแปลงสามารถทดสอบได้

$$I_{\text{test}} = 0.05 \text{ A}$$

$$V_{\text{test}} = 30 \text{ kV}$$

$$S_{\text{tmax}} = V_{\text{test}} I_{\text{test}} = 1.5 \text{ kVA}$$

$$S_{\text{tmax}} = 1.25 \text{ kVA} = 2\pi f C U^2 K$$

แทนค่าต่างๆ และ  $K = \text{safety factor} = 3$

$$C = \frac{S_{\text{tmax}}}{2\pi f U^2 K} = \frac{1.5 \times 10^3}{2\pi \times 50 \times (30 \times 10^3)^2 \times 3} = 1,768.38 \text{ pF}$$

ค่าความจุ (Capacity) ของเครื่องมือวัด

ในการทดสอบแรงดันสูงของขั้วต่อสายเคเบิลนั้น ได้เลือกใช้ค่าความจุ (Capacity) ที่มีในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง มีค่าความจุในการวัดแรงดันสูงคือ  $C_m = 100 \text{ pF}$

ค่าความจุ (Capacity) ของขั้วต่อสายเคเบิล (2ข้าง) จากการวัดค่าความจุของขั้วต่อสายเคเบิลจะได้ค่าดังนี้

$$\text{ขั้วต่อสายเคเบิล 1 ข้าง } C = 100 \text{ pF}$$

ดังนั้นค่าความจุของขั้วต่อสายเคเบิล 2 ข้าง คือ

$$C_A = 100 * 2 = 200 \text{ pF}$$

การคำนวณค่าความจุของสายเคเบิล ซึ่งเป็นลักษณะทรงกระบอกแกนร่วม

ค่าความจุ (Capacity) ของสายเคเบิล 22/24 kV ต่อความยาว 1 เมตร

โดยที่  $r_1$  = รัศมีตัวนำที่เป็นทองแดงของสายเคเบิลที่นำมาทดสอบ  
= 9.5 มิลลิเมตร

$r_2$  = รัศมีฉนวน XLPE ของสายเคเบิลที่นำมาทดสอบ  
= 15.5 มิลลิเมตร

ฉะนั้นความยาวสายเคเบิลมากที่สุดสามารถทดสอบได้คือ

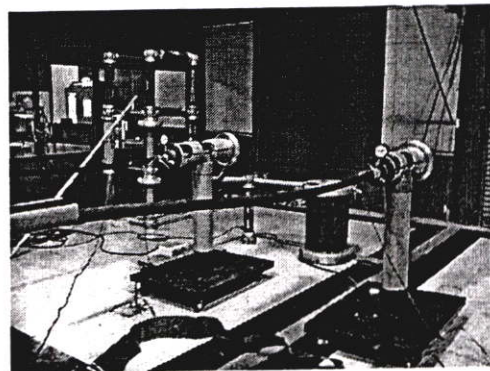
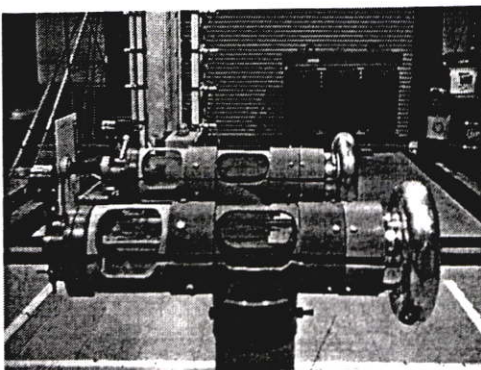
$$C = \frac{2\pi\epsilon l}{\ln(r_2/r_1)} = \frac{2\pi \times 2.5 \times 8.854 \times 10^{-12} \times 1}{\ln(15.5/9.5)} = 284.09 \text{ pF / m}$$

ค่าความจุที่หม้อแปลงสามารถจ่ายได้ = ค่าความจุรวมของโหลดรวมทั้งหมด

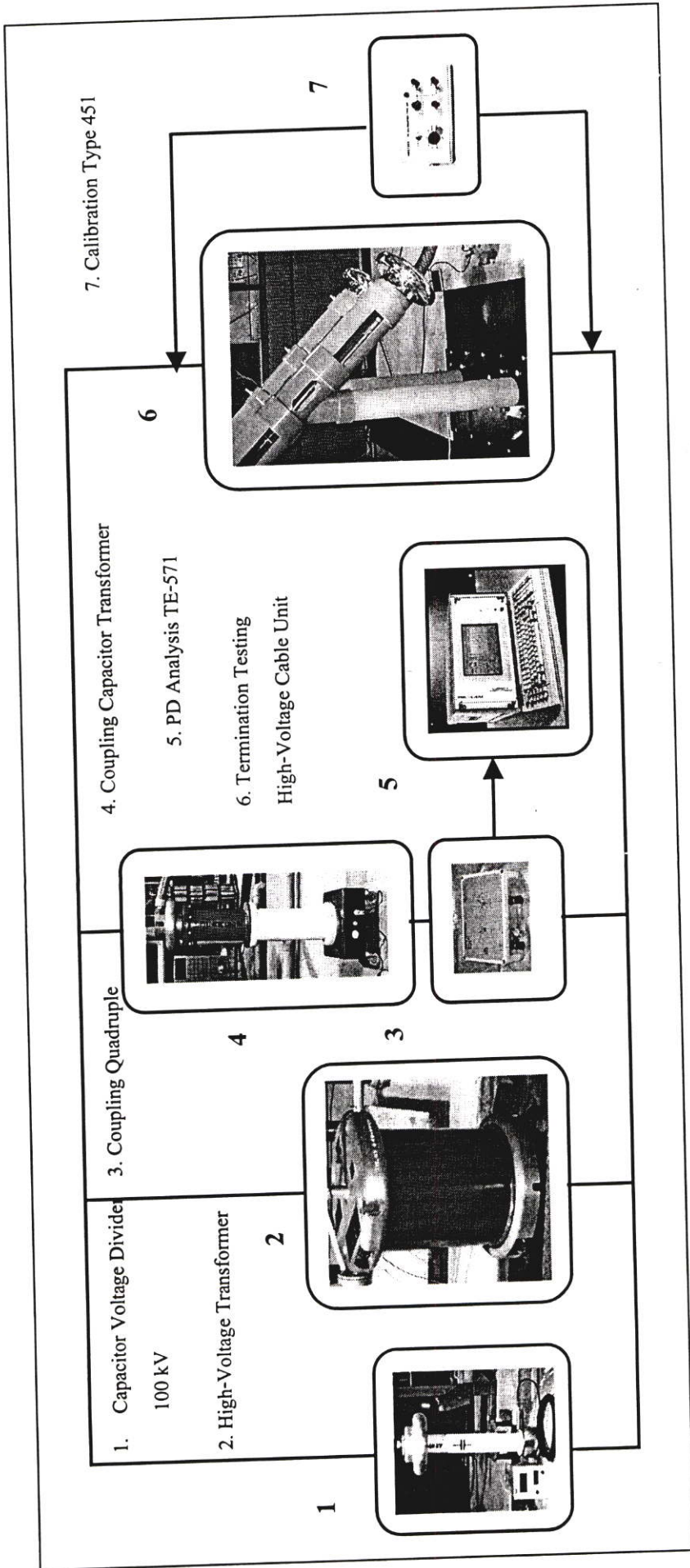
$$1768.38 \text{ pF} = (200 \text{ pF} + 100 \text{ pF}) + 284.09 \text{ pF} * L_{\text{cable-Max}}$$

$$L_{\text{cable-Max}} = 5.1687 \text{ เมตร}$$

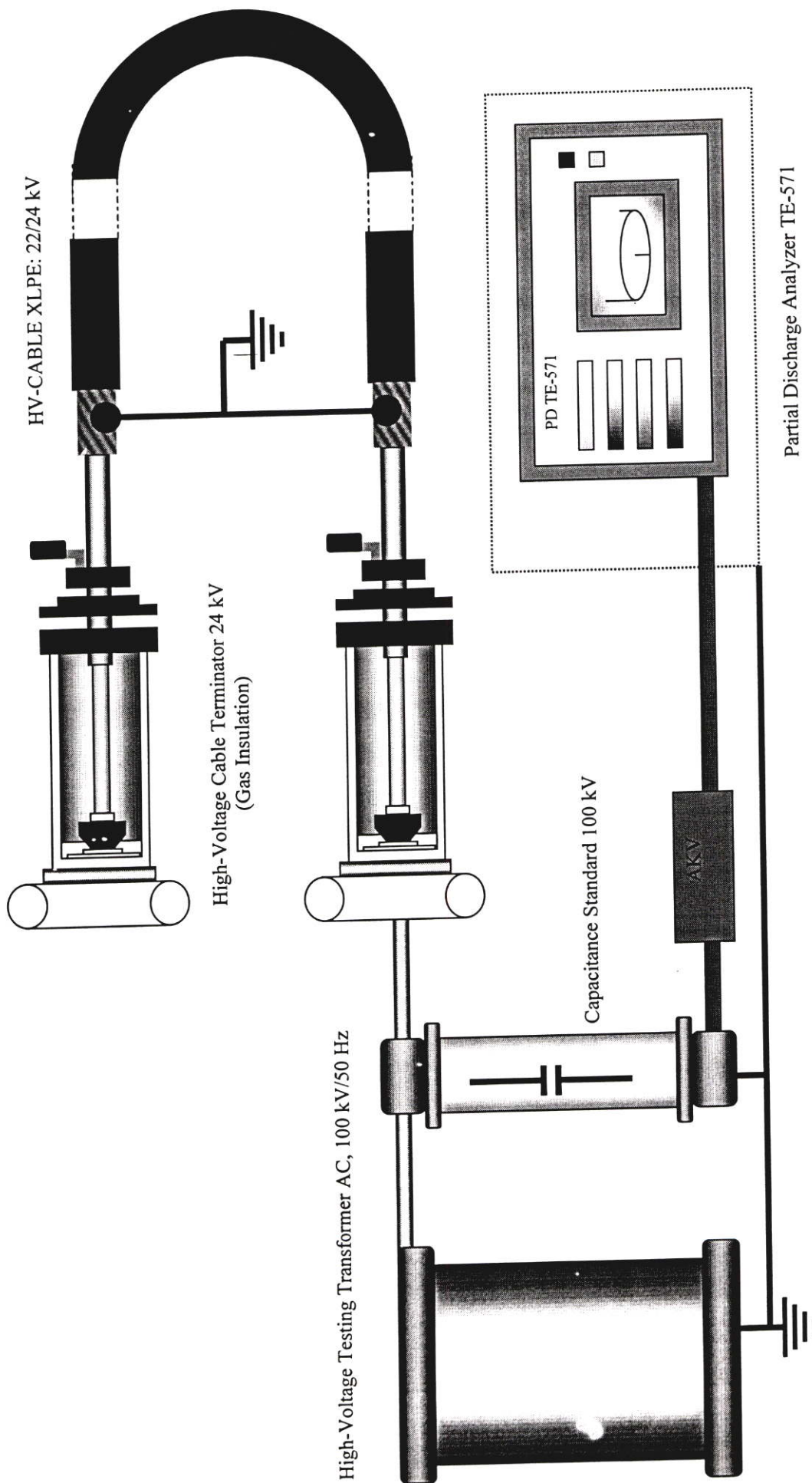
ควรใช้สายเคเบิลในการทดสอบยาวกว่า 5.1687 เมตร โครงการนี้ใช้สายเคเบิลยาว 10 เมตร



รูปที่ 5.2 การทดสอบสายเคเบิลแรงดันสูง XLPE (24 kV/240 sq.mm) ภายในห้องปฏิบัติการ



รูปที่ 5.3 กระบวนการทดสอบวัดค่าดีสตริงบางส่วน(PD)ในหัวต่อสายเคเบิลแรงดันสูง XLPE 24 kV



รูปที่ 5.4 วงจรการทำงานของการทดสอบหาค่าดิซชาร์จบางส่วน(PD) ที่เกิดขึ้นในสายเคเบิลแรงดันสูง XLPE ขนาดแรงดัน 24 kV 240 Sq. mm.

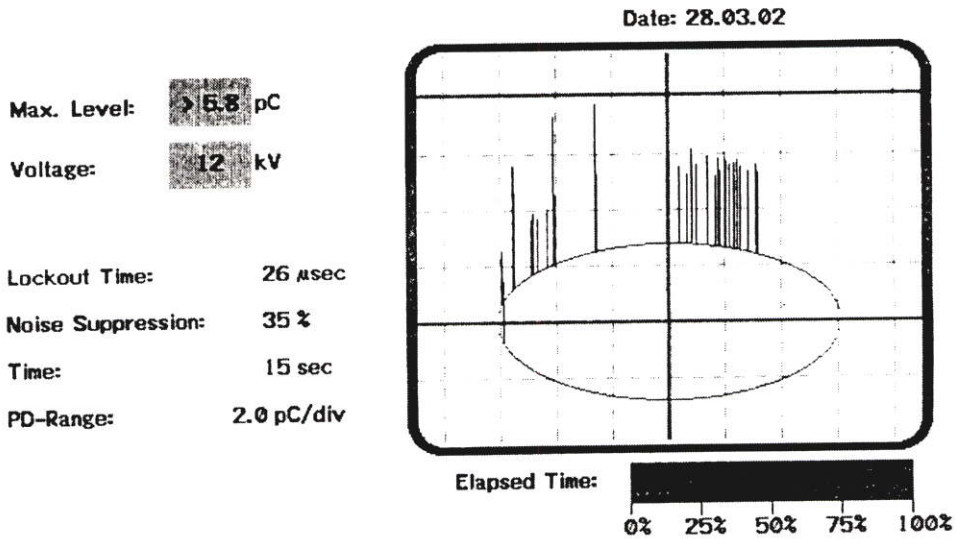
### 5.3 ผลการทดสอบสายเคเบิลแรงดันสูง XLPE

การทดสอบโดยใช้เครื่องวัดค่าดิสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge Analyzer รุ่น TE-571) ของบริษัท HAEFELY TRENCH ในการวิเคราะห์หาค่าต่างๆ ในการทดสอบและวัดค่าดิสชาร์จบางส่วนตามมาตรฐาน IEC No. 270, No.60502 ทำการทดสอบฉนวนของสายเคเบิลที่ระดับแรงดันที่ใช้ในการทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60885-3 โดยสายเคเบิลของ THAI-YAZAKI มีฉนวนเป็น XLPE และมีพิกัดระดับแรงดัน 22/24 kV ทดสอบที่ระดับแรงดันสูงสุด 40.5 kV ในเวลา 5 นาที จากมาตรฐาน IEC 60885-3 มาตรฐานการวัดดิสชาร์จบางส่วน จะใช้แรงดันทดสอบคือ  $1.73 U_0$  ทำการคำนวณหาค่าแรงดันที่ใช้ทดสอบจะได้แรงดันทดสอบการเกิดดิสชาร์จบางส่วน

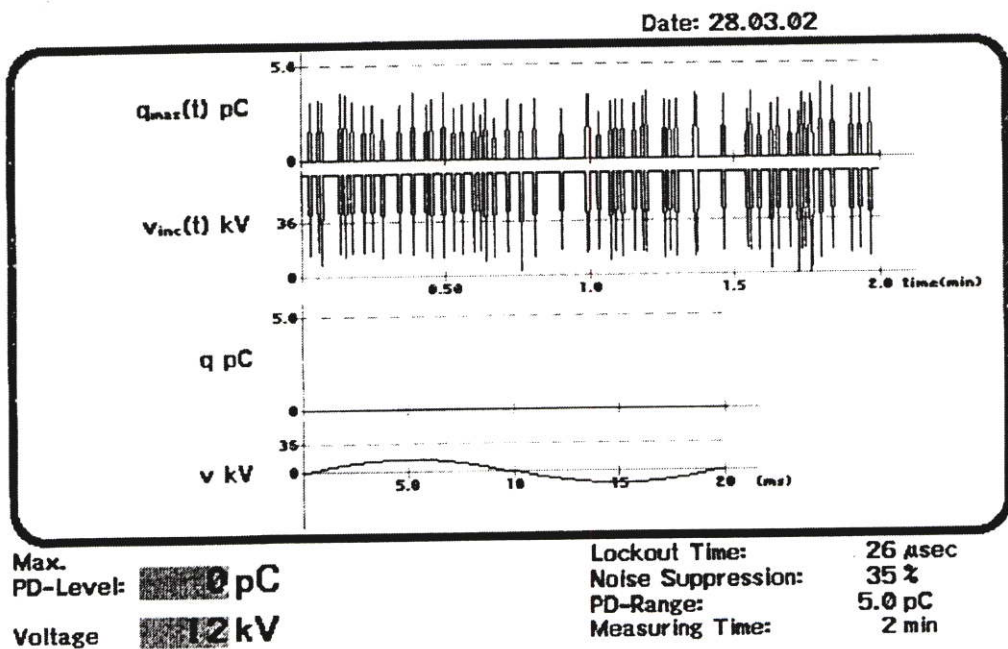
ในการทดสอบสายเคเบิลแรงดันสูงด้วยขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงที่ออกแบบสร้างเลือกใช้ฉนวนในการทำหน้าที่ลดความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณปลายสายเคเบิลที่ปลอกหรือทำการควบคุมการหักเหของสนามไฟฟ้า ในการทดสอบสายเคเบิลที่ขั้วต่อสายเคเบิลใช้แรงดันในการทดสอบที่ระดับแรงดันสูง 12 kV, 24 kV และ 36 kV โดยแบ่งลักษณะของฉนวนที่ใช้ในการทดสอบดังนี้

- 1) ฉนวนก๊าซ คือ อากาศ(Air) อัดอากาศที่ 0.5 bar
- 2) ฉนวนก๊าซ คือ อากาศ(Air) อัดอากาศที่ 1.0 bar
- 3) ฉนวนก๊าซ คือ อากาศ(Air) อัดอากาศที่ 1.5 bar
- 4) ฉนวนก๊าซ คือ อากาศ(Air) อัดอากาศที่ 2.0 bar
- 5) ฉนวนก๊าซ คือ อากาศ(Air) อัดอากาศที่ 2.5 bar
- 6) ฉนวนก๊าซ คือ อากาศ(Air) อัดอากาศที่ 3.0 bar
- 7) ฉนวนก๊าซ คือ ออกซิเจน(Oxygen) อัดอากาศที่ 0.5 bar
- 8) ฉนวนก๊าซ คือ ออกซิเจน(Oxygen) อัดอากาศที่ 1.0 bar
- 9) ฉนวนก๊าซ คือ ออกซิเจน(Oxygen) อัดอากาศที่ 1.5 bar
- 10) ฉนวนก๊าซ คือ ออกซิเจน(Oxygen) อัดอากาศที่ 2.0 bar
- 11) ฉนวนก๊าซ คือ ออกซิเจน(Oxygen) อัดอากาศที่ 2.5 bar
- 12) ฉนวนก๊าซ คือ ออกซิเจน(Oxygen) อัดอากาศที่ 3.0 bar
- 13) ฉนวนก๊าซ คือ อากาศ (Air) ทำสุญญากาศที่ 20 in.Hg

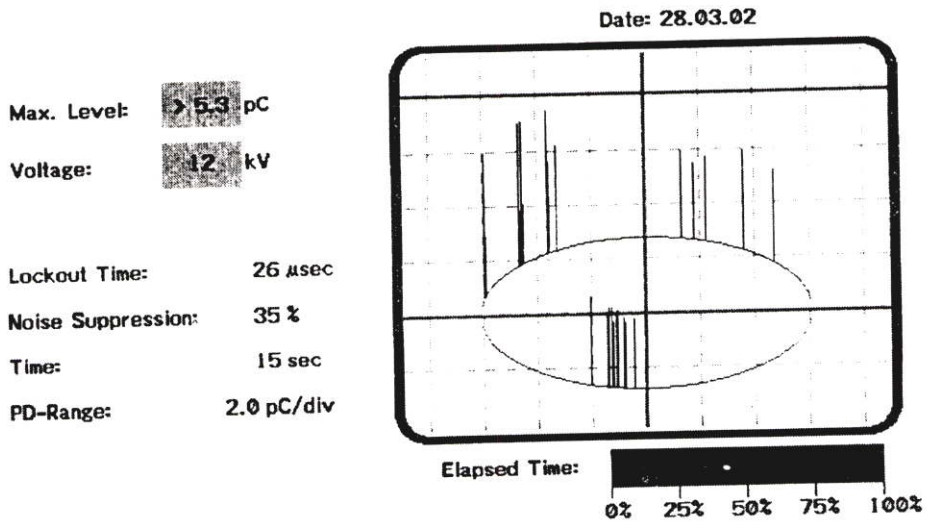
ซึ่งมีผลของการทดสอบวัดค่าดังต่อไปนี้



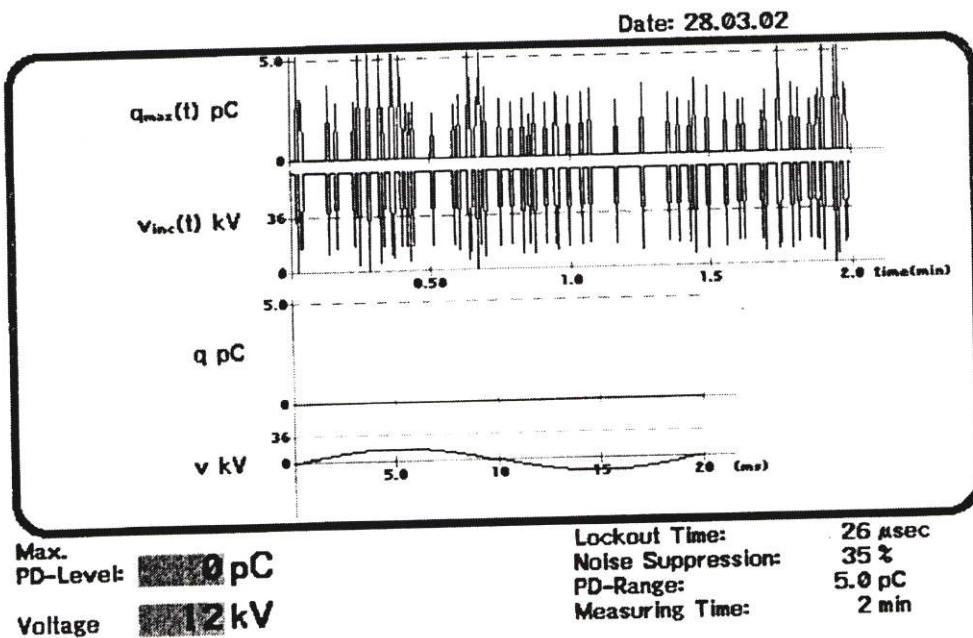
รูปที่ 5.5 การทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนแบบ Measurement Routine: 15 sec ของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ อากาศ(Air) อัดอากาศที่ 0.5 bar ที่แรงดันทดสอบ 12 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD > 5.8 pC



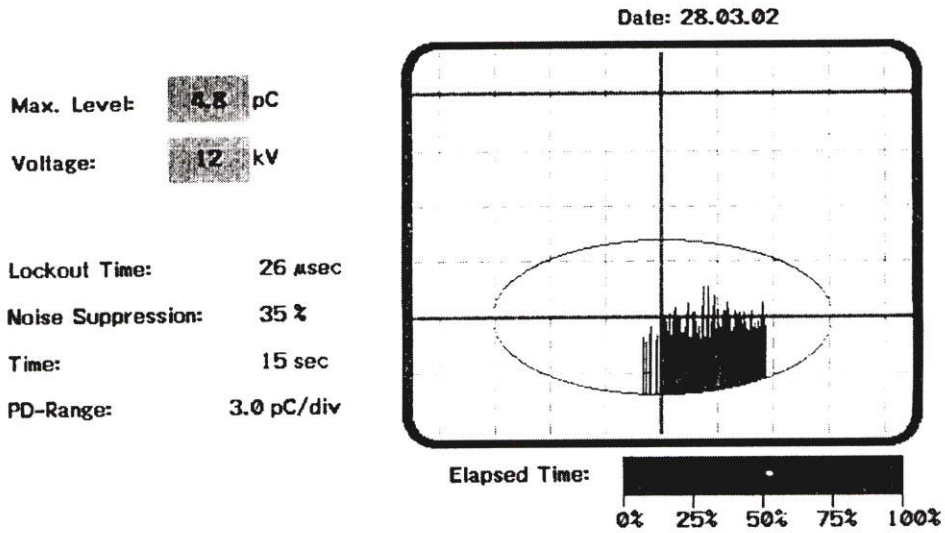
รูปที่ 5.6 การทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนแบบ Measurement Analyzer: 2 min ของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ อากาศ(Air) อัดอากาศที่ 0.5 bar ที่แรงดันทดสอบ 12 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD < 5.0 pC



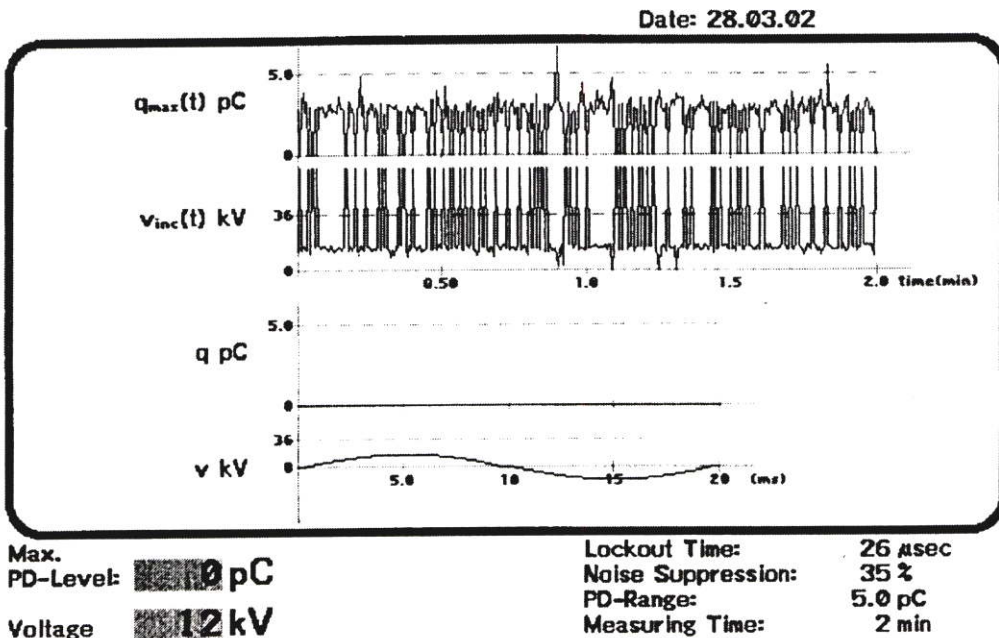
รูปที่ 5.7 การทดสอบหาค่าคิซาร์จบางส่วนแบบ Measurement Routine: 15 sec ของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ อากาศ(Air) อัดอากาศที่ 1.0 bar ที่แรงดันทดสอบ 12 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD > 5.3 pC



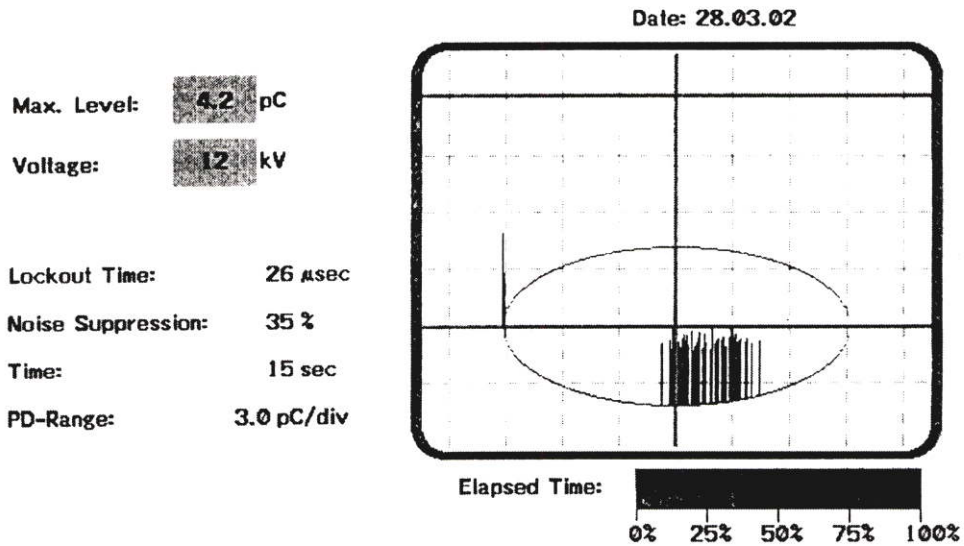
รูปที่ 5.8 การทดสอบหาค่าคิซาร์จบางส่วนแบบ Measurement Analyzer: 2 min ของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ อากาศ(Air) อัดอากาศที่ 1.0 bar ที่แรงดันทดสอบ 12 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD < 5.0 pC



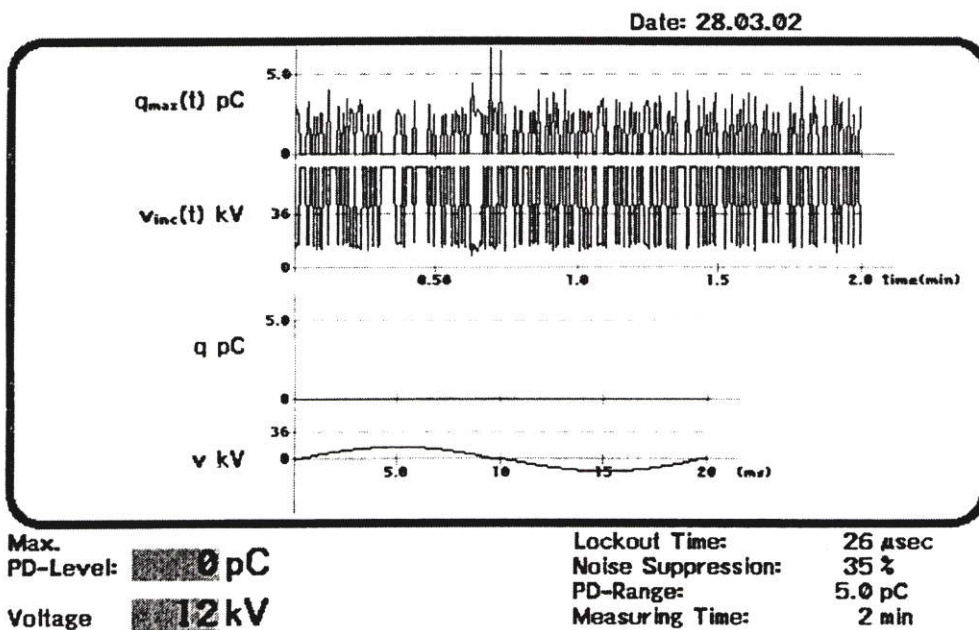
รูปที่ 5.9 การทดสอบหาค่าคิซาร์จบางส่วนแบบ Measurement Routine: 15 sec ของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ อากาศ(Air) อัดอากาศที่ 1.5 bar ที่แรงดันทดสอบ 12 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD = 4.8.pC



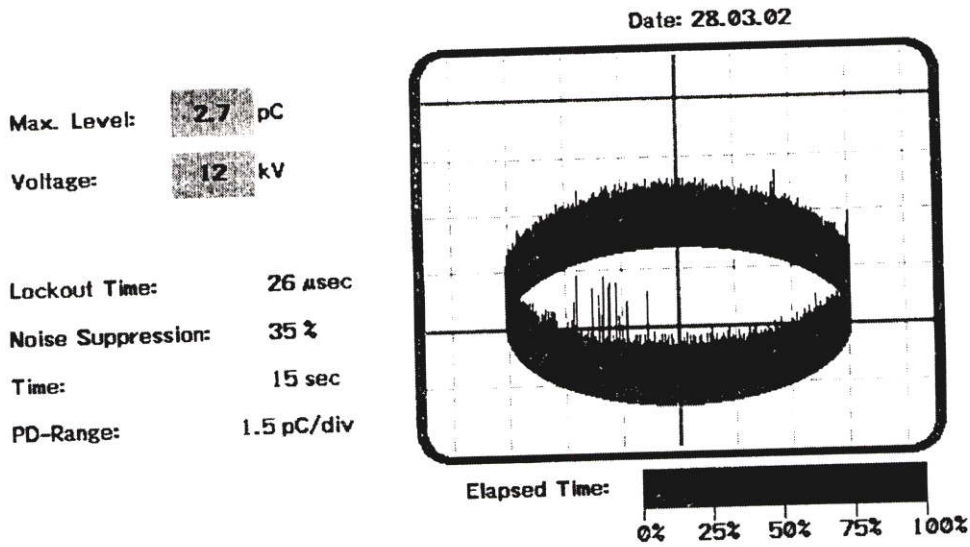
รูปที่ 5.10 การทดสอบหาค่าคิซาร์จบางส่วนแบบ Measurement Analyzer: 2 min ของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ อากาศ(Air) อัดอากาศที่ 1.5 bar ที่แรงดันทดสอบ 12 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD < 5.0 pC



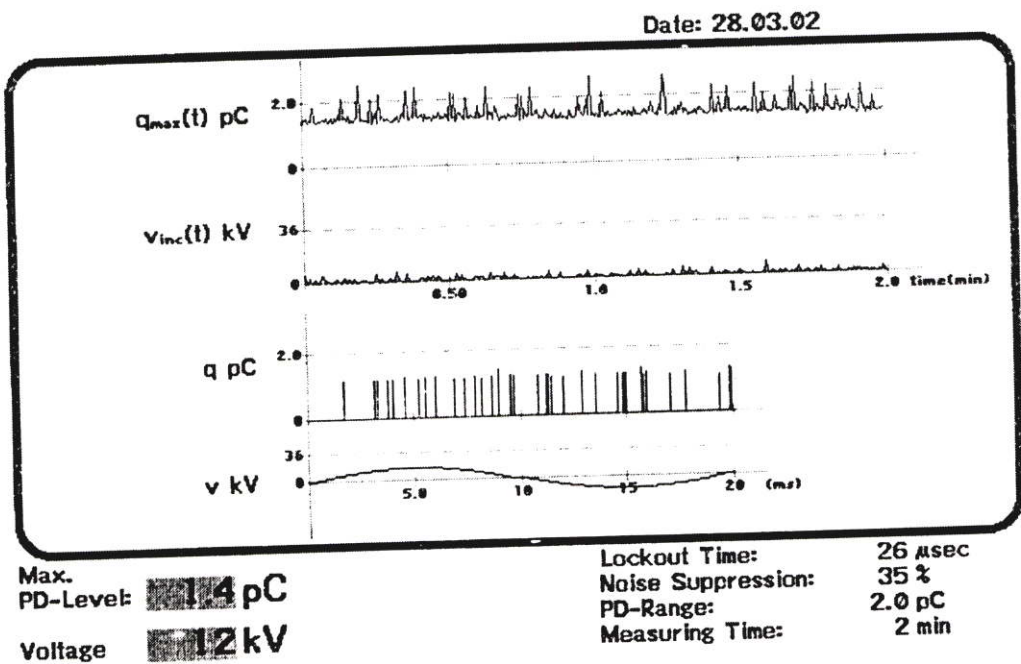
รูปที่ 5.11 การทดสอบหาค่าคิซาร์จบางส่วนแบบ Measurement Routine: 15 sec ของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ อากาศ(Air) อัดอากาศที่ 2.0 bar ที่แรงดันทดสอบ 12 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD = 4.2 pC



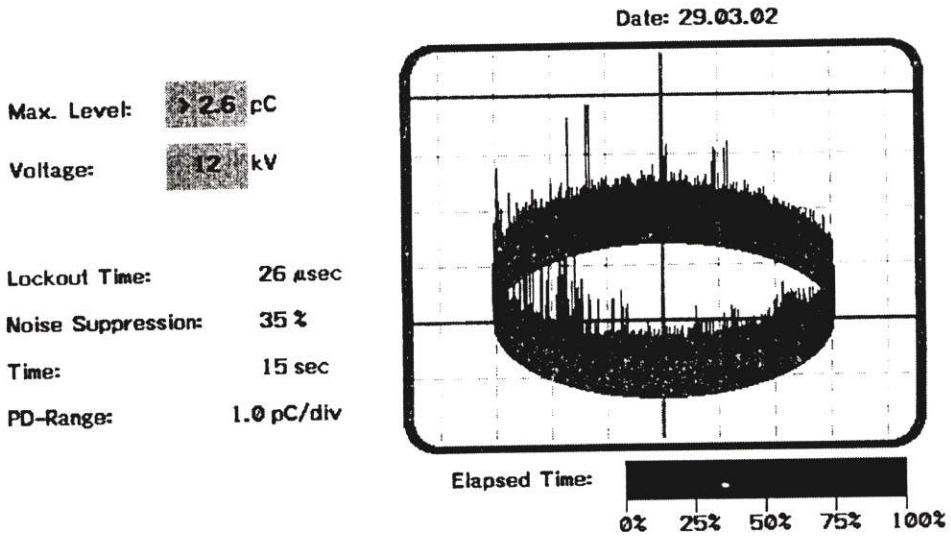
รูปที่ 5.12 การทดสอบหาค่าคิซาร์จบางส่วนแบบ Measurement Analyzer: 2 min ของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ อากาศ(Air) อัดอากาศที่ 2.0 bar ที่แรงดันทดสอบ 12 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD < 5.0 pC



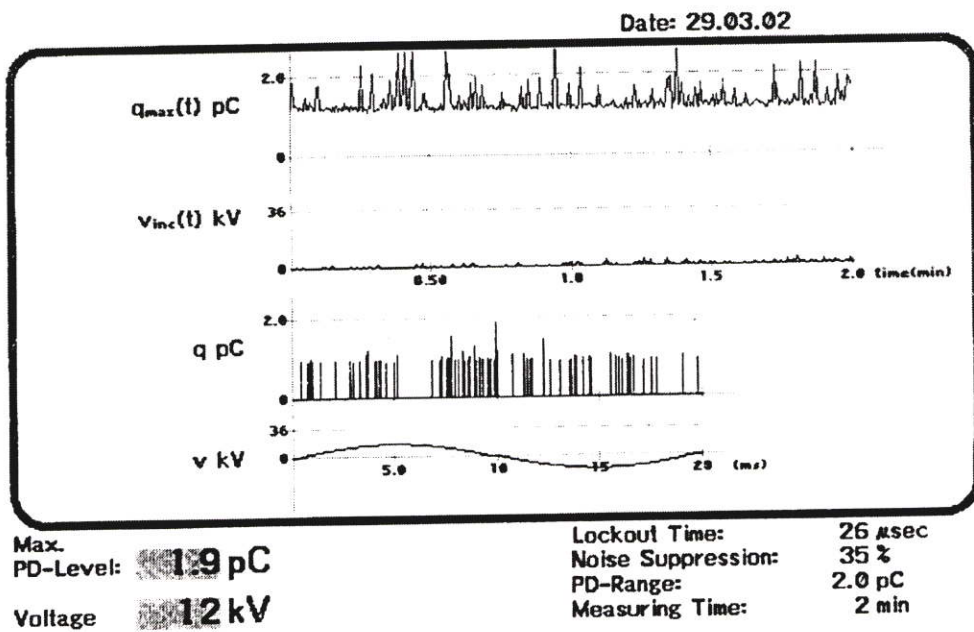
รูปที่ 5.13 การทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนแบบ Measurement Routine: 15 sec ของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ อากาศ(Air) อัดอากาศที่ 2.5 bar ที่แรงดันทดสอบ 12 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD = 2.7 pC



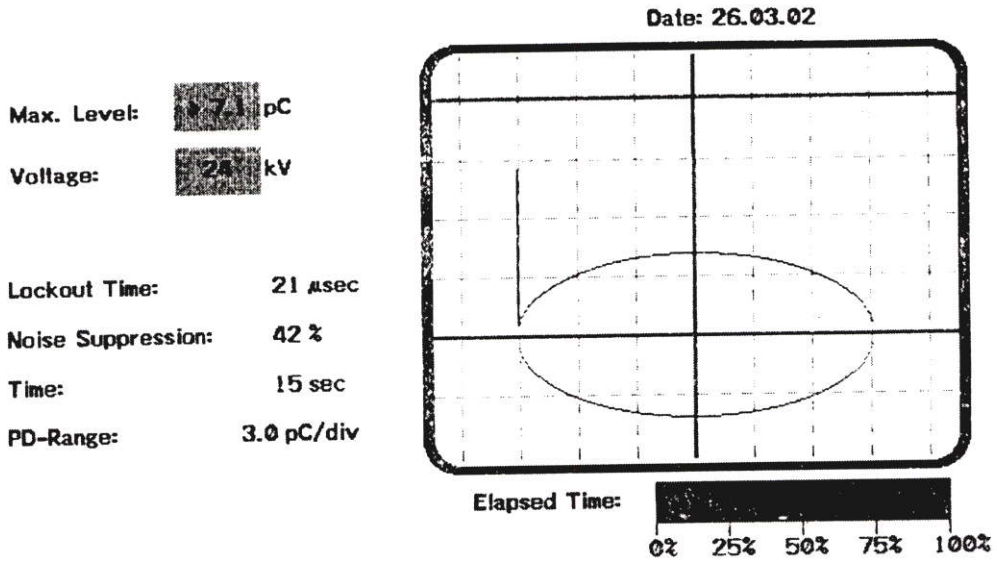
รูปที่ 5.14 การทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนแบบ Measurement Analyzer: 2 min ของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ อากาศ(Air) อัดอากาศที่ 2.5 bar ที่แรงดันทดสอบ 12 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD < 2.0 pC



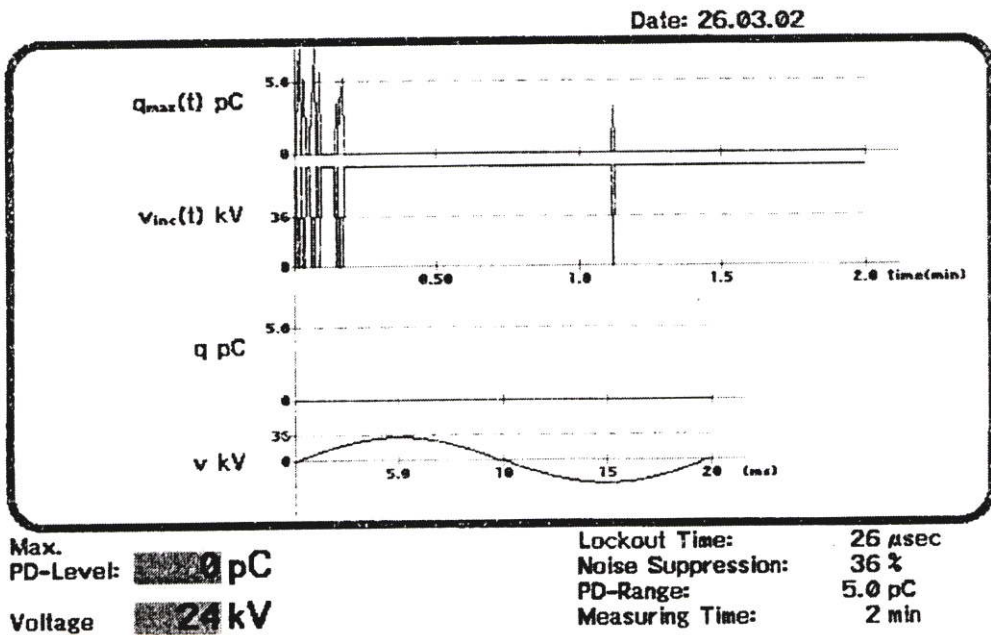
รูปที่ 5.15 การทดสอบหาค่าคิซาร์จบางส่วนแบบ Measurement Routine: 15 sec ของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ อากาศ(Air) อัดอากาศที่ 3.0 bar ที่แรงดันทดสอบ 12 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD > 2.6 pC



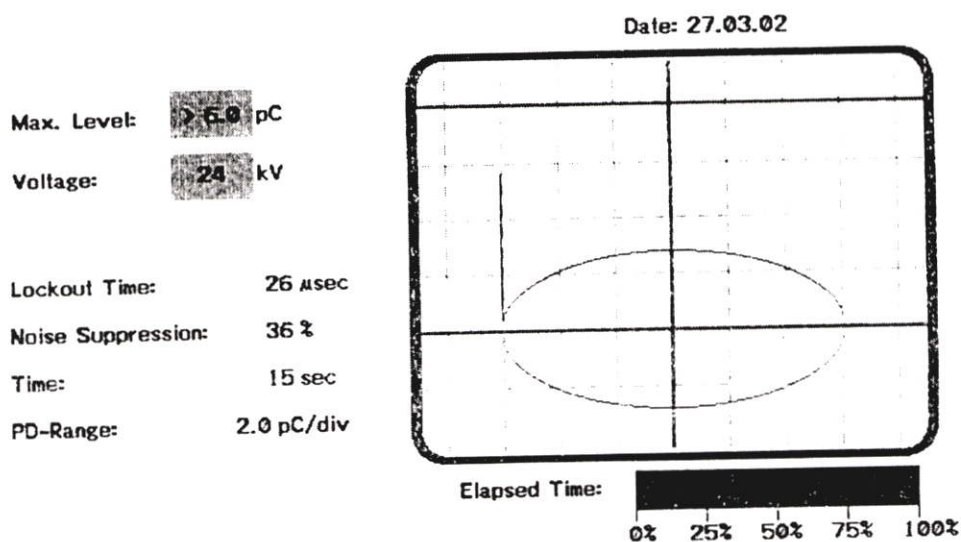
รูปที่ 5.16 การทดสอบหาค่าคิซาร์จบางส่วนแบบ Measurement Analyzer: 2 min ของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ อากาศ(Air) อัดอากาศที่ 3.0 bar ที่แรงดันทดสอบ 12 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD < 2.0 pC



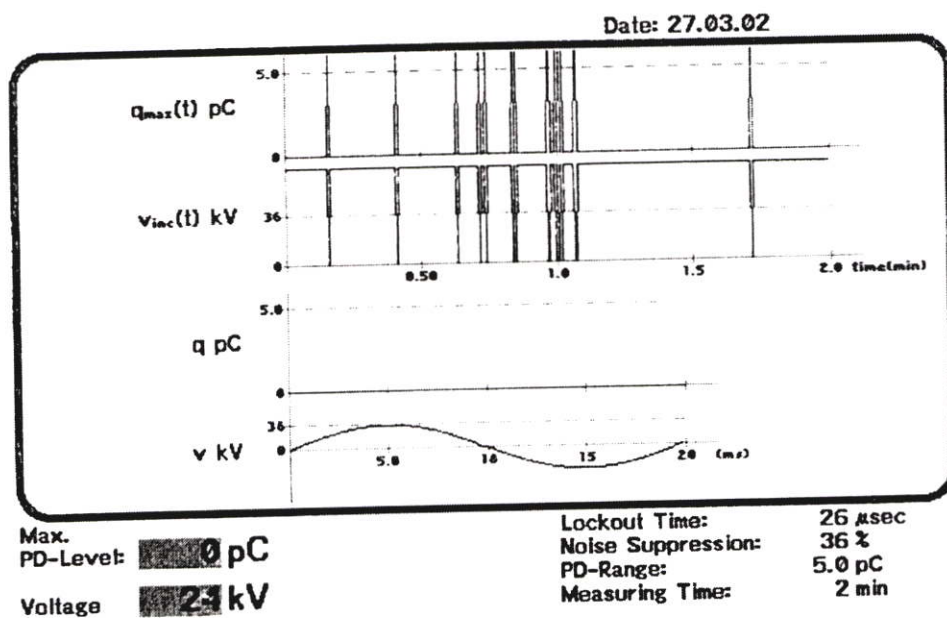
รูปที่ 5.17 การทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนแบบ Measurement Routine: 15 sec ของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ อากาศ(Air) อัดอากาศที่ 0.5 bar ที่แรงดันทดสอบ 24 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD > 7.1 pC



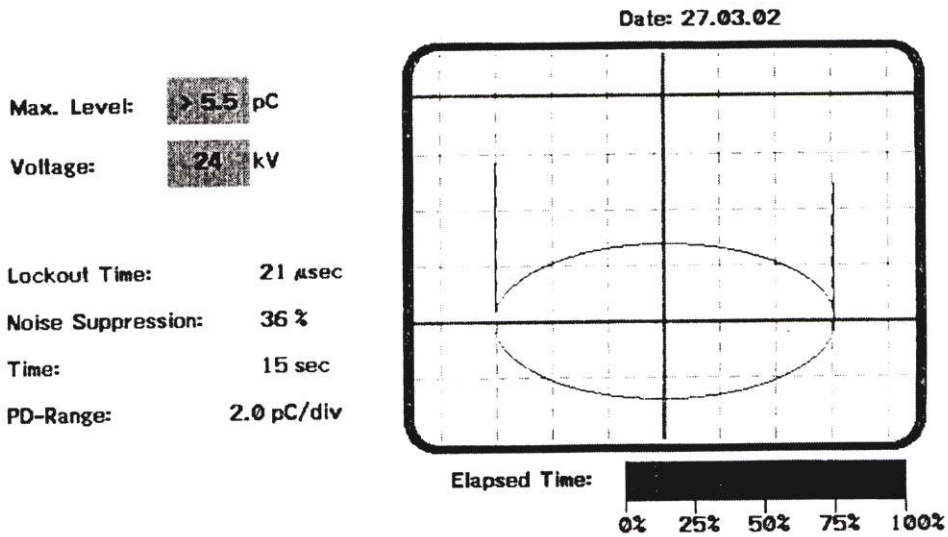
รูปที่ 5.18 การทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนแบบ Measurement Analyzer: 2 min ของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ อากาศ(Air) อัดอากาศที่ 0.5 bar ที่แรงดันทดสอบ 24 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD < 5.0 pC



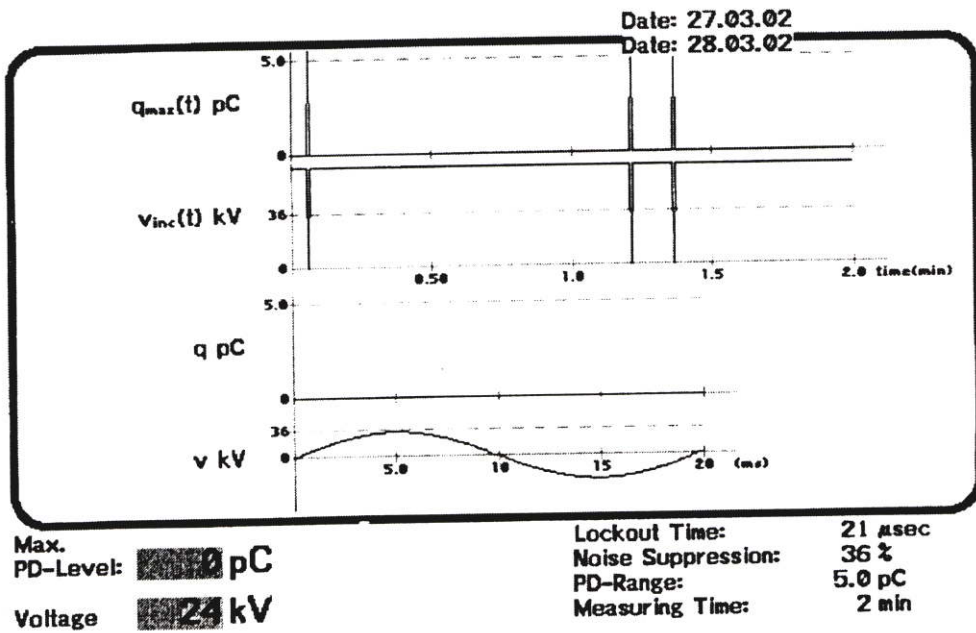
รูปที่ 5.19 การทดสอบหาค่าคิซาร์จบางส่วนแบบ Measurement Routine: 15 sec ของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ อากาศ(Air) อัดอากาศที่ 1.0 bar ที่แรงดันทดสอบ 24 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD > 6.0 pC



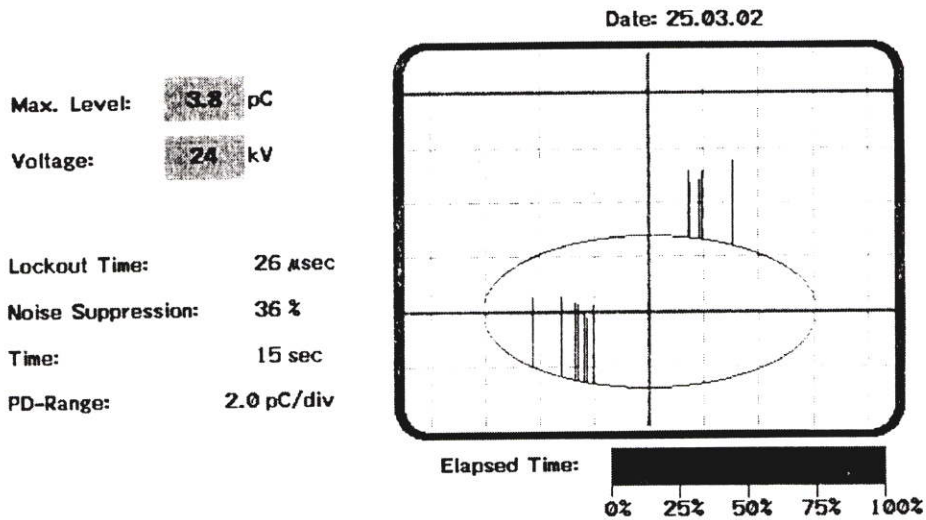
รูปที่ 5.20 การทดสอบหาค่าคิซาร์จบางส่วนแบบ Measurement Analyzer: 2 min ของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ อากาศ(Air) อัดอากาศที่ 1.0 bar ที่แรงดันทดสอบ 24 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD < 5.0 pC



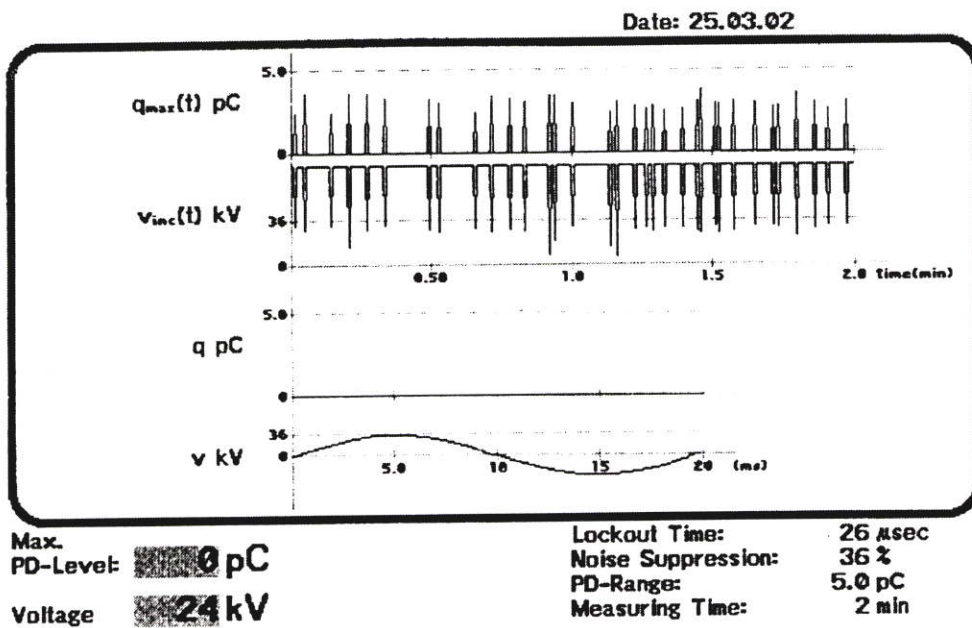
รูปที่ 5.21 การทดสอบหาค่าคิซาร์จบางส่วนแบบ Measurement Routine: 15 sec ของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ อากาศ(Air) อัดอากาศที่ 1.5 bar ที่แรงดันทดสอบ 24 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD > 5.5 pC



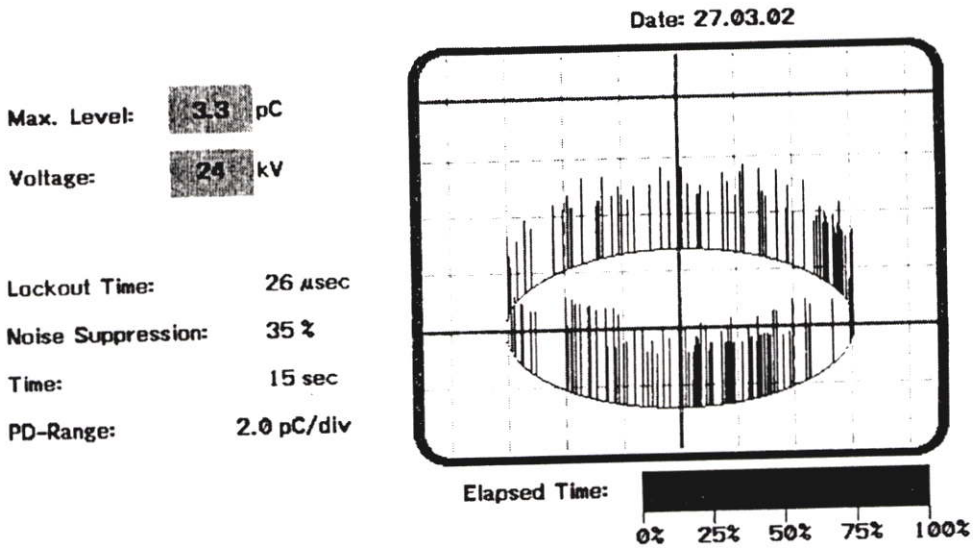
รูปที่ 5.22 การทดสอบหาค่าคิซาร์จบางส่วนแบบ Measurement Analyzer: 2 min ของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ อากาศ(Air) อัดอากาศที่ 1.5 bar ที่แรงดันทดสอบ 24 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD < 5.0 pC



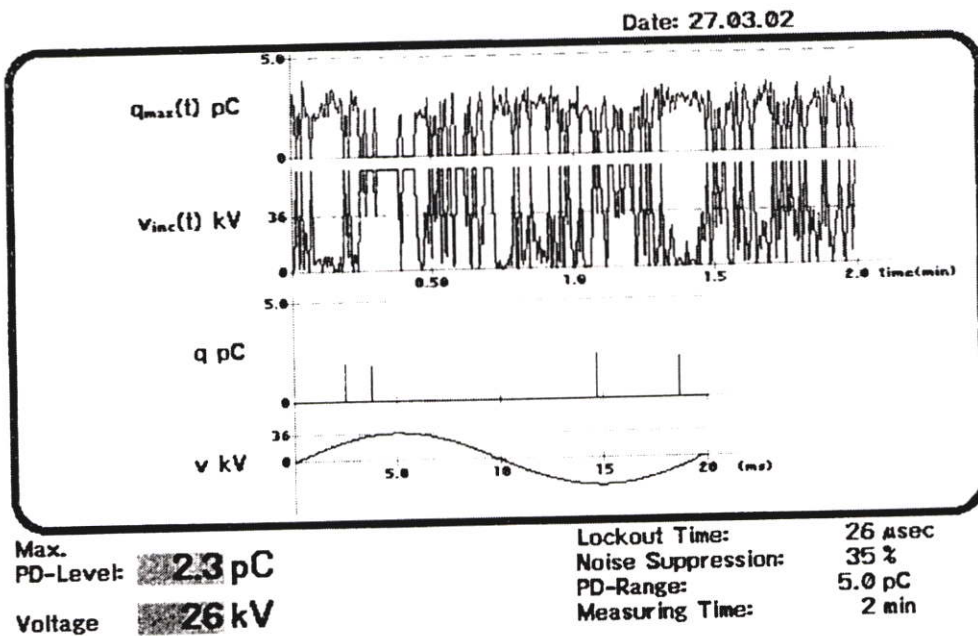
รูปที่ 5.23 การทดสอบหาค่าคิซาร์จบางส่วนแบบ Measurement Routine: 15 sec ของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ อากาศ(Air) อัดอากาศที่ 2.0 bar ที่แรงดันทดสอบ 24 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD = 3.8 pC



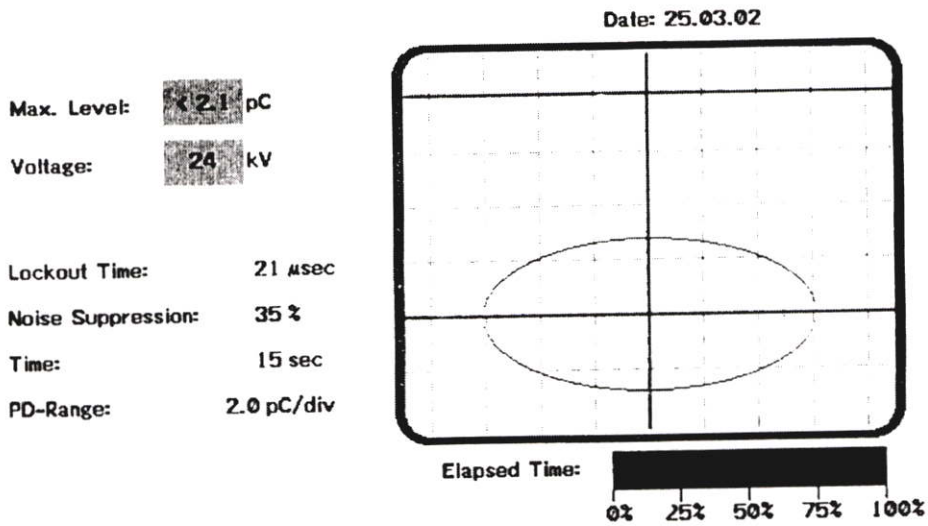
รูปที่ 5.24 การทดสอบหาค่าคิซาร์จบางส่วนแบบ Measurement Analyzer: 2 min ของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ อากาศ(Air) อัดอากาศที่ 2.0 bar ที่แรงดันทดสอบ 24 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD < 5.0 pC



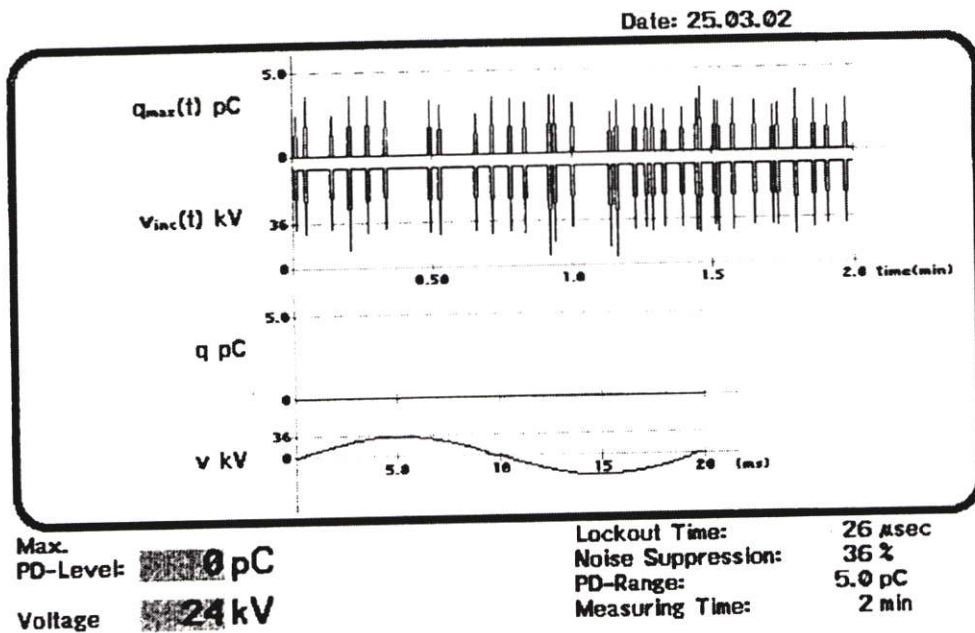
รูปที่ 5.25 การทดสอบหาค่าคิซาร์จบางส่วนแบบ Measurement Routine: 15 sec ของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ อากาศ(Air) อัดอากาศที่ 2.5 bar ที่แรงดันทดสอบ 24 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD = 3.3 pC



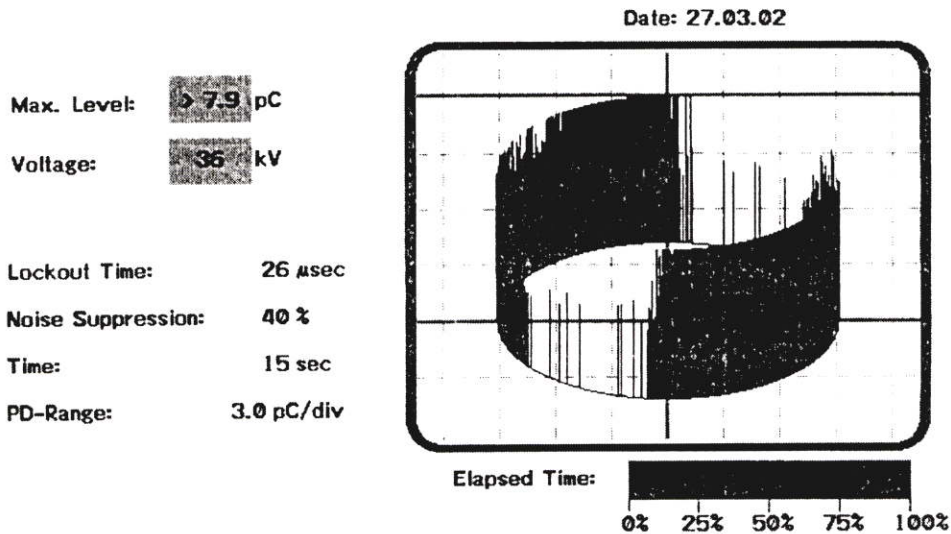
รูปที่ 5.26 การทดสอบหาค่าคิซาร์จบางส่วนแบบ Measurement Analyzer: 2 min ของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ อากาศ(Air) อัดอากาศที่ 2.5 bar ที่แรงดันทดสอบ 24 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD < 5.0 pC



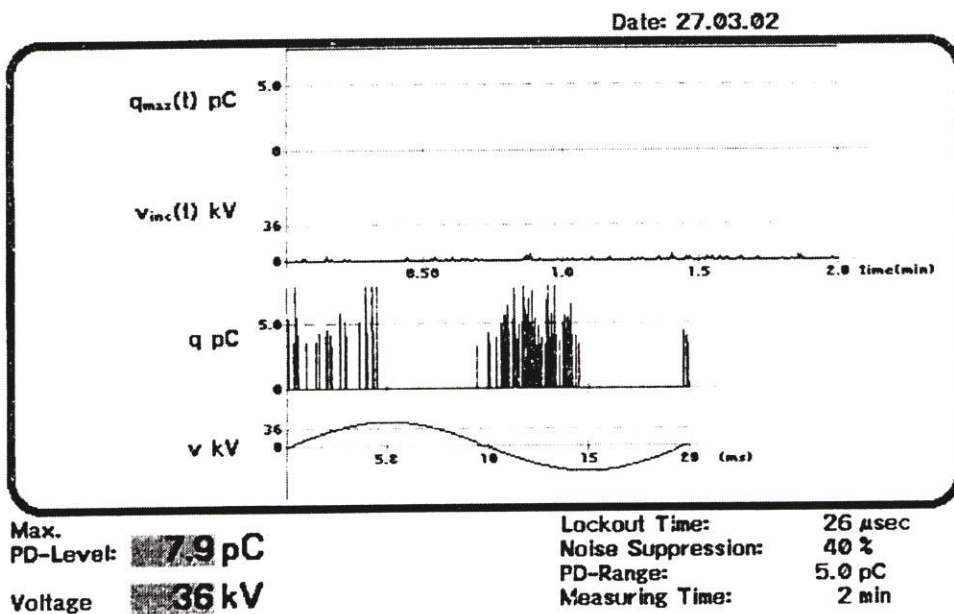
รูปที่ 5.27 การทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนแบบ Measurement Routine: 15 sec ของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ อากาศ(Air) อัดอากาศที่ 3.0 bar ที่แรงดันทดสอบ 24 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD<2.1 pC



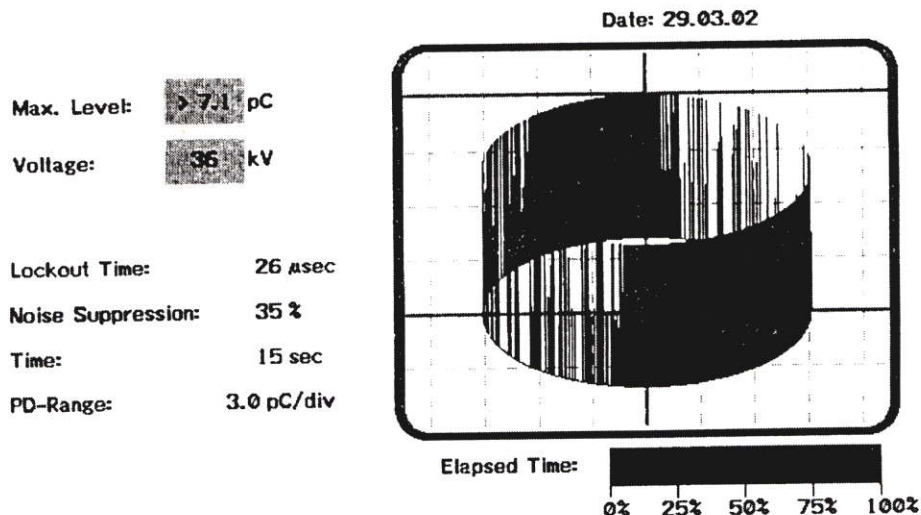
รูปที่ 5.28 การทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนแบบ Measurement Analyzer: 2 min ของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ อากาศ(Air) อัดอากาศที่ 3.0 bar ที่แรงดันทดสอบ 24 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD< 5.0 pC



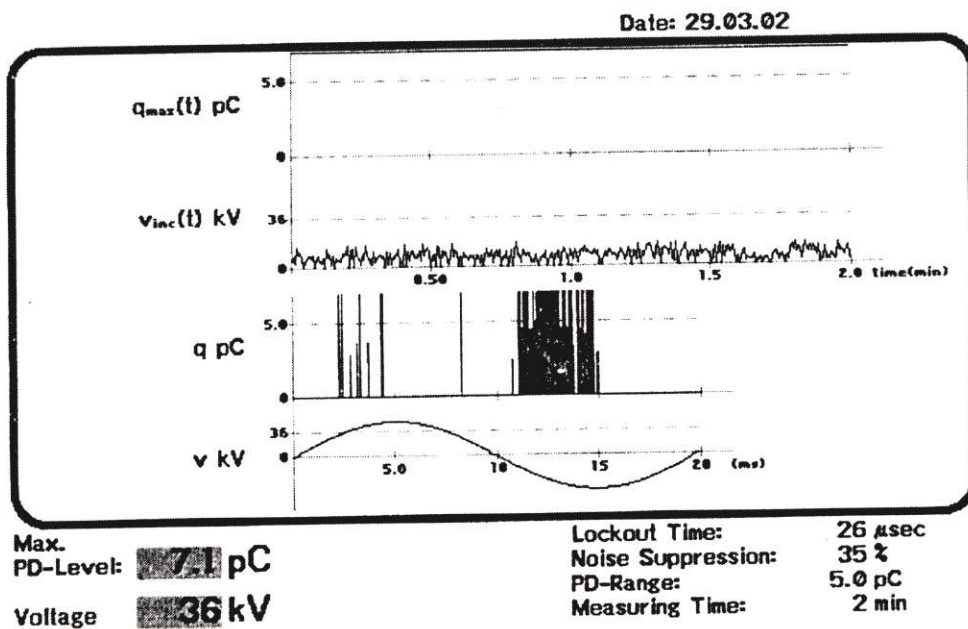
รูปที่ 5.29 การทดสอบหาค่าคิซาร์จบางส่วนแบบ Measurement Routine: 15 sec ของสายเคเบิล แรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ อากาศ(Air) อัดอากาศ ที่ 0.5 bar ที่แรงดันทดสอบ 36 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD > 7.9 pC



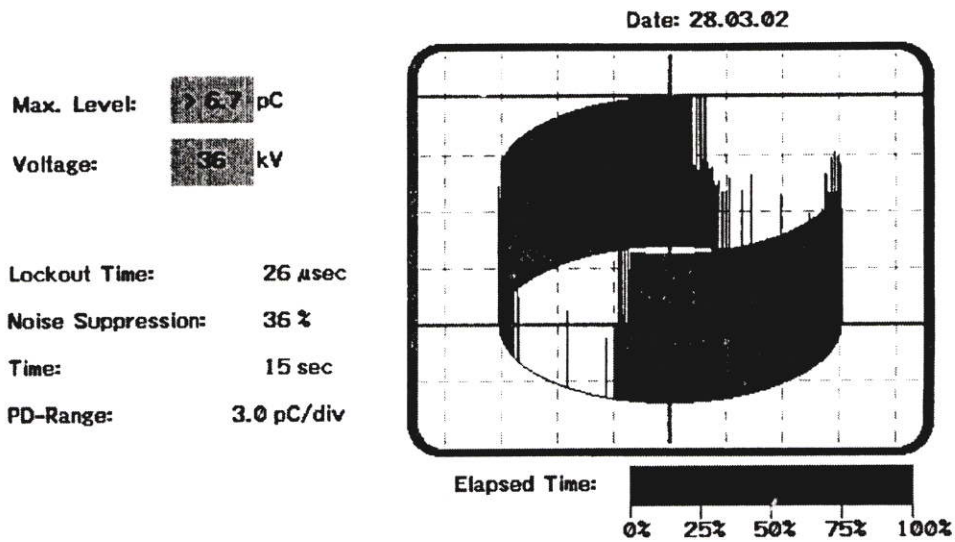
รูปที่ 5.30 การทดสอบหาค่าคิซาร์จบางส่วนแบบ Measurement Analyzer: 2 min ของสายเคเบิล แรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ อากาศ(Air) อัดอากาศ ที่ 0.5 bar ที่แรงดันทดสอบ 36 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD < 7.9 pC



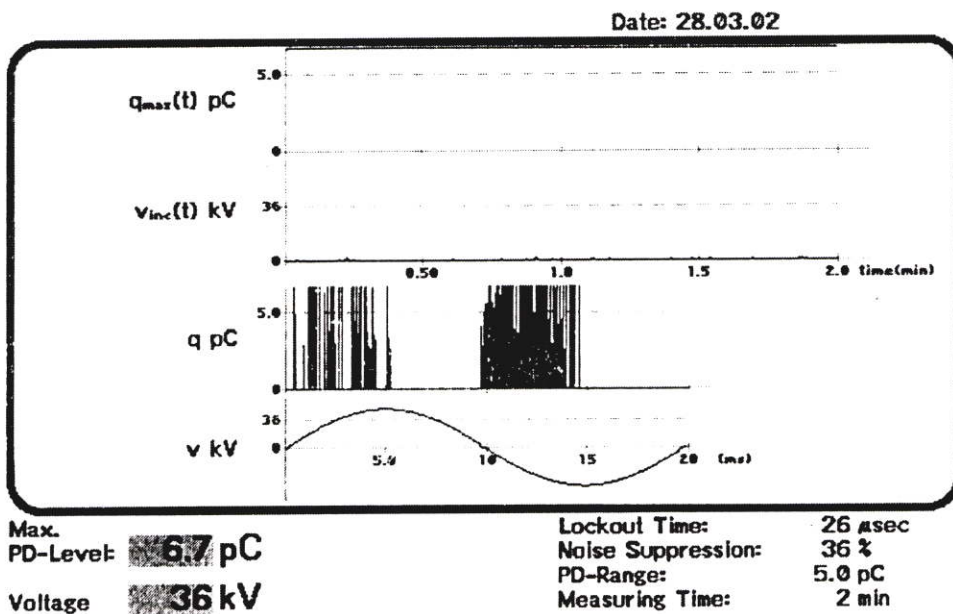
รูปที่ 5.31 การทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนแบบ Measurement Routine: 15 sec ของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ อากาศ(Air) อัดอากาศที่ 1.0 bar ที่แรงดันทดสอบ 36 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD > 7.1 pC



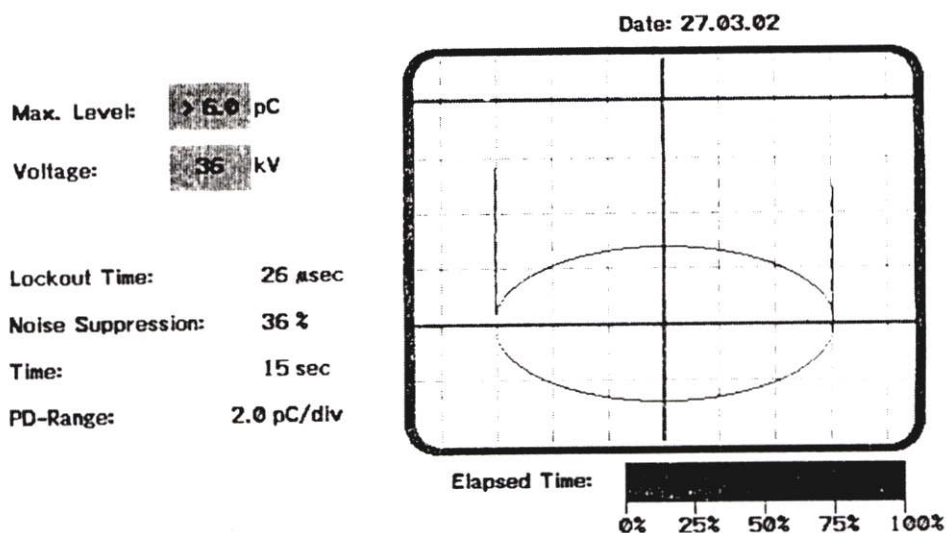
รูปที่ 5.32 การทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนแบบ Measurement Analyzer: 2 min ของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ อากาศ(Air) อัดอากาศที่ 1.0 bar ที่แรงดันทดสอบ 36 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD < 7.1 pC



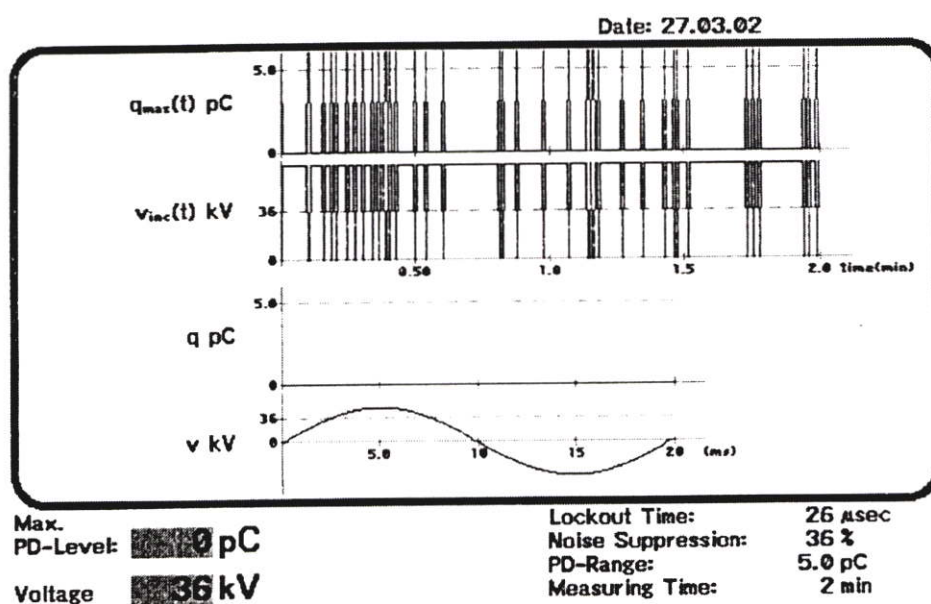
รูปที่ 5.33 การทดสอบหาค่าดิซชาร์จบางส่วนแบบ Measurement Routine: 15 sec ของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ อากาศ(Air) อัดอากาศที่ 1.5 bar ที่แรงดันทดสอบ 36 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD > 6.7 pC



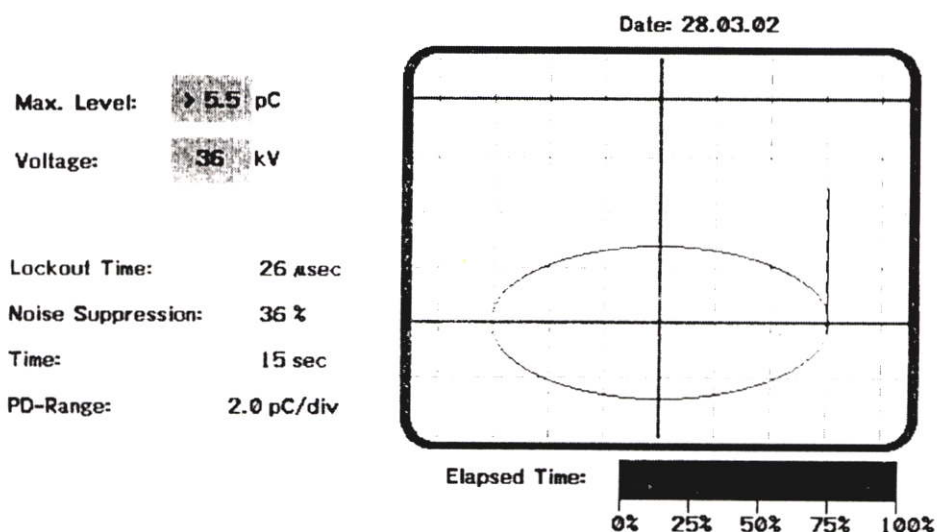
รูปที่ 5.34 การทดสอบหาค่าดิซชาร์จบางส่วนแบบ Measurement Analyzer: 2 min ของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ อากาศ(Air) อัดอากาศที่ 1.5 bar ที่แรงดันทดสอบ 36 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD < 6.7 pC



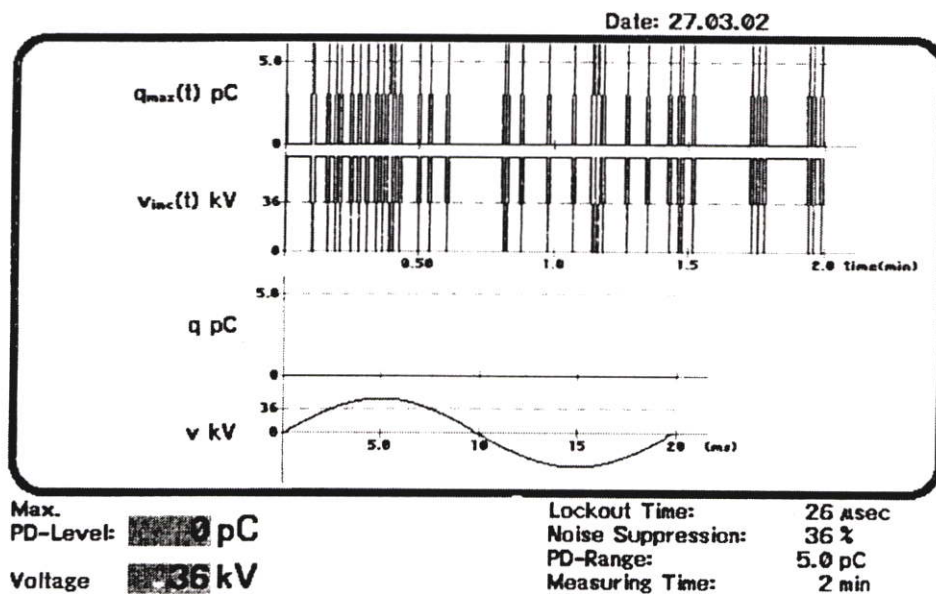
รูปที่ 5.35 การทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนแบบ Measurement Routine: 15 sec ของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ อากาศ(Air) อัดอากาศที่ 2.0 bar ที่แรงดันทดสอบ 36 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD > 6.0 pC



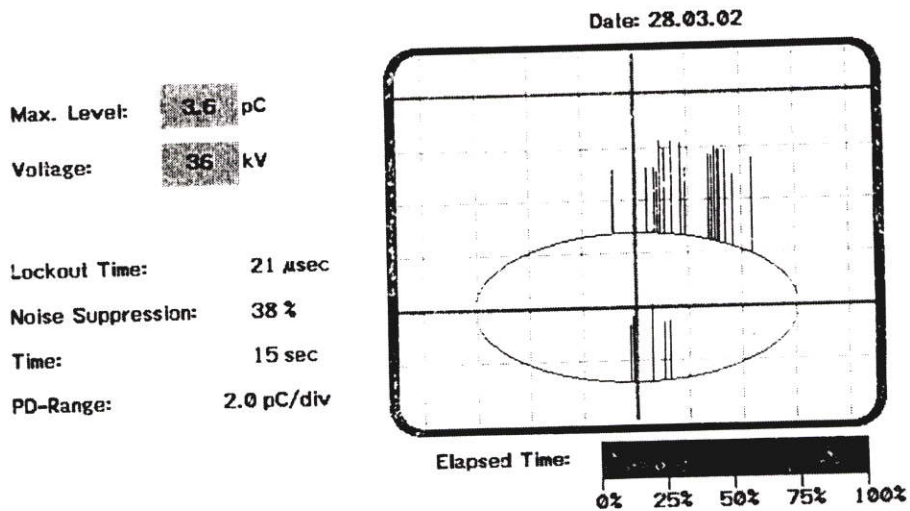
รูปที่ 5.36 การทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนแบบ Measurement Analyzer: 2 min ของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ อากาศ(Air) อัดอากาศที่ 2.0 bar ที่แรงดันทดสอบ 36 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD < 5.5 pC



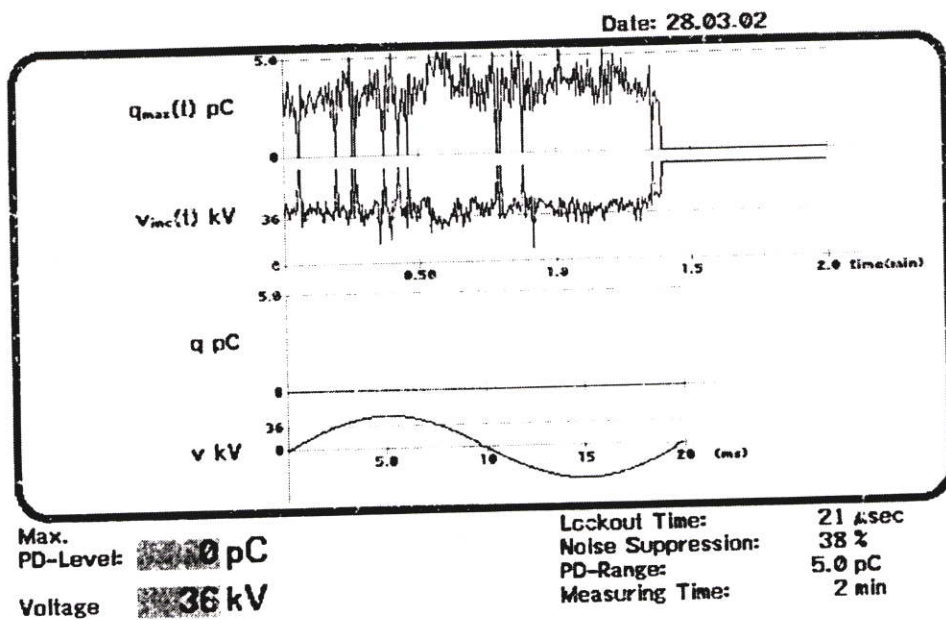
รูปที่ 5.37 การทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนแบบ Measurement Routine: 15 sec ของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ อากาศ(Air) อัดอากาศที่ 2.5 bar ที่แรงดันทดสอบ 36 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD > 5.5 pC



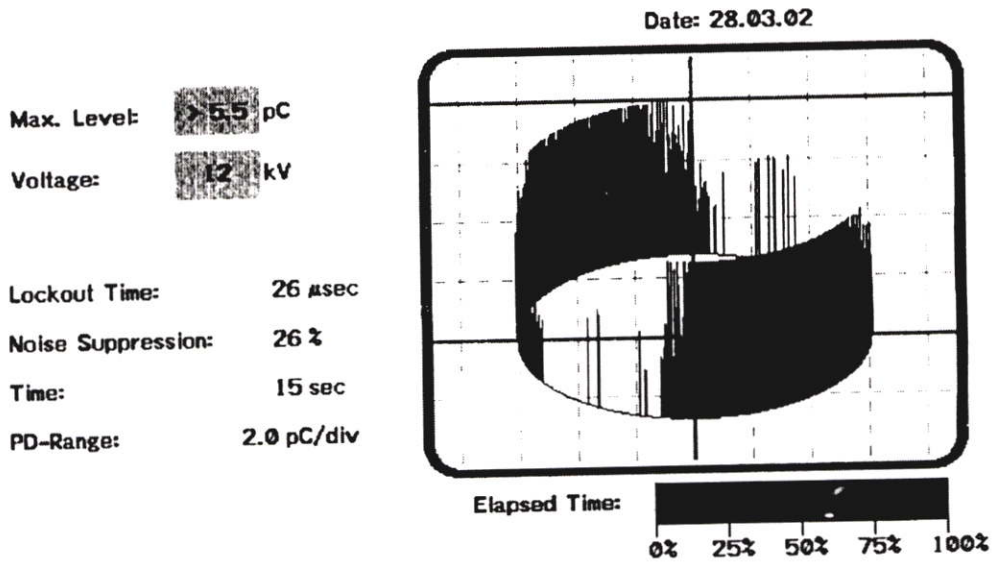
รูปที่ 5.38 การทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนแบบ Measurement Analyzer: 2 min ของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ อากาศ(Air) อัดอากาศที่ 2.5 bar ที่แรงดันทดสอบ 36 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD < 5.5 pC



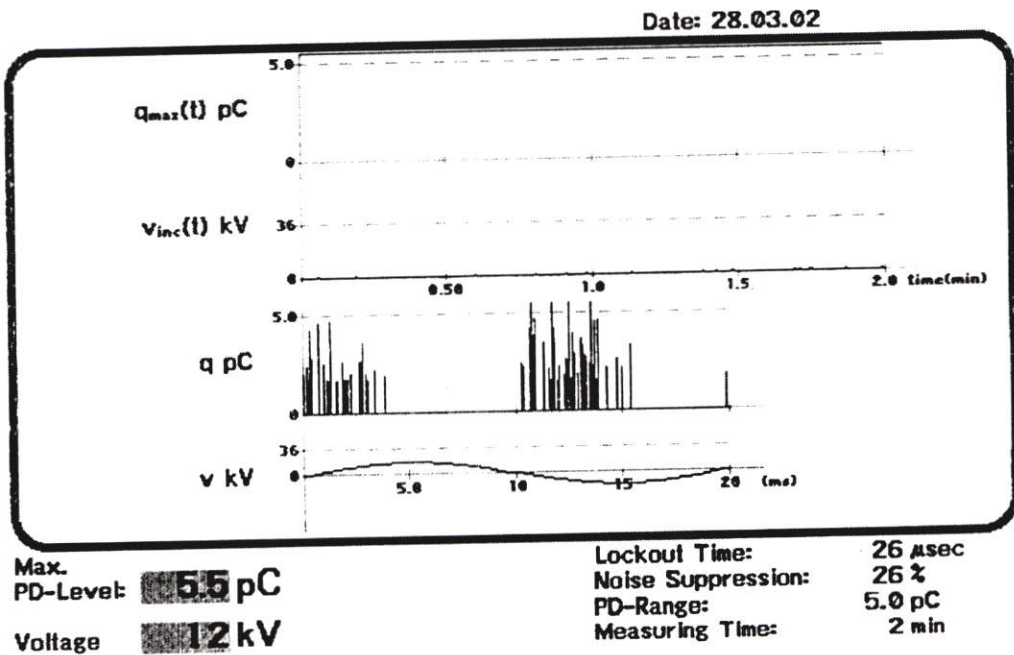
รูปที่ 5.39 การทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนแบบ Measurement Routine: 15 sec ของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ อากาศ(Air) อัดอากาศที่ 3.0 bar ที่แรงดันทดสอบ 36 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD = 3.6 pC



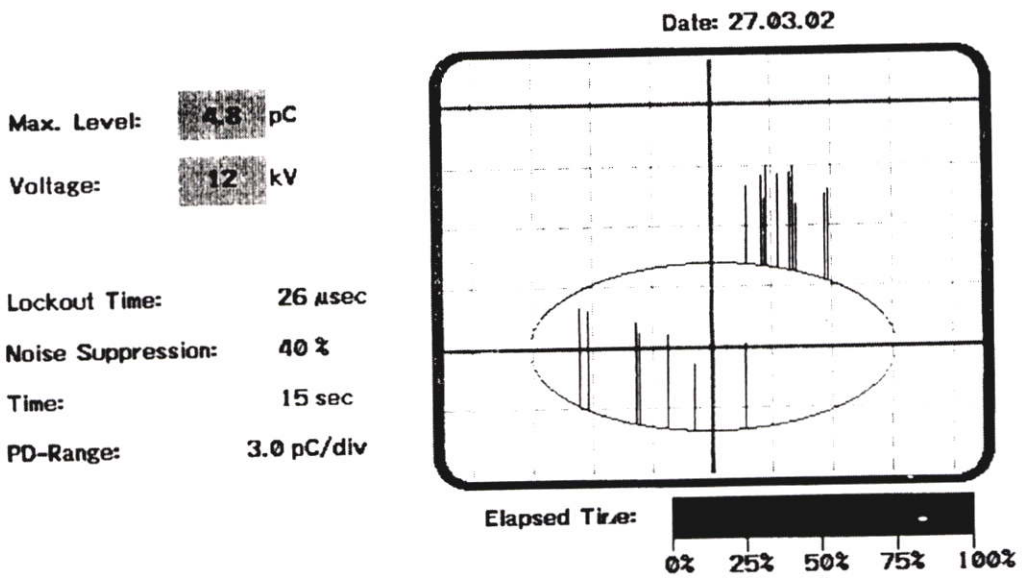
รูปที่ 5.40 การทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนแบบ Measurement Analyzer: 2 min ของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ อากาศ(Air) อัดอากาศที่ 3.0 bar ที่แรงดันทดสอบ 36 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD < 5.0 pC



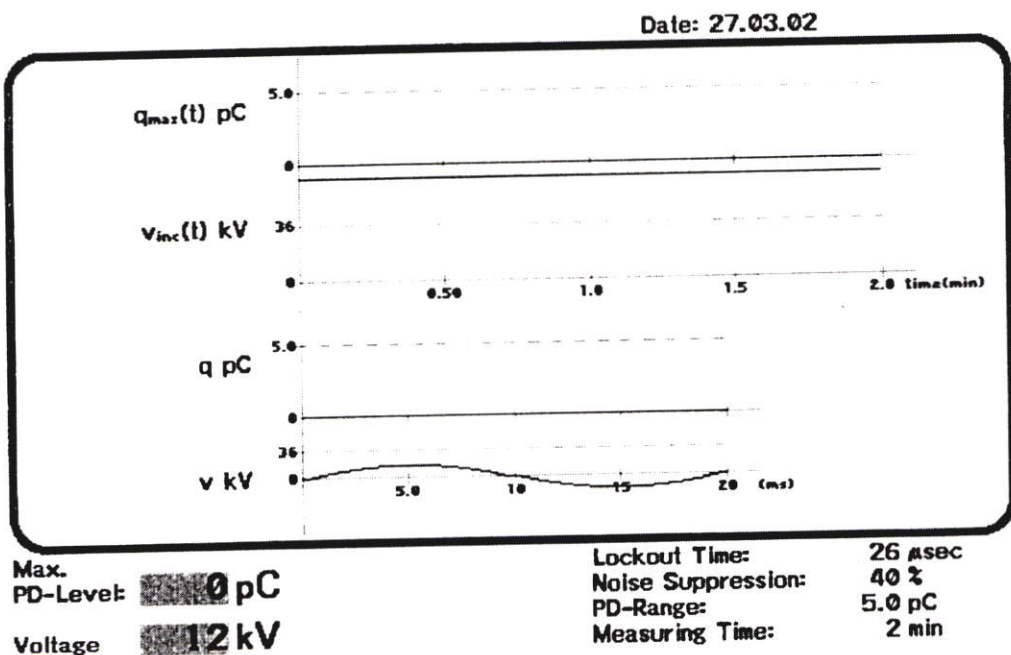
รูปที่ 5.41 การทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนแบบ Measurement Routine: 15 sec ของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ ออกซิเจน(Oxygen) อัดความดันที่ 0.5 bar ที่แรงดันทดสอบ 12 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD > 5.5 pC



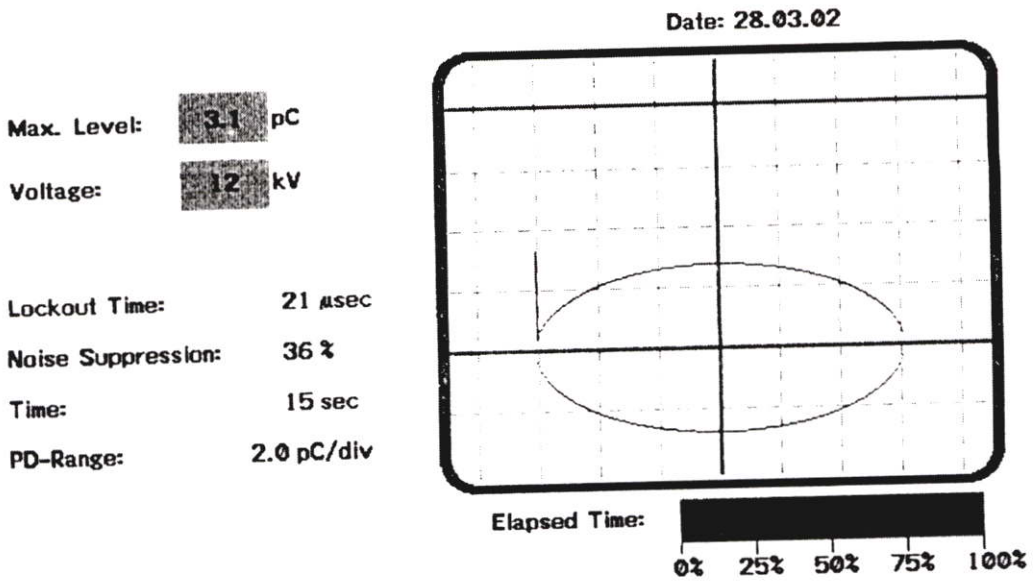
รูปที่ 5.42 การทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนแบบ Measurement Analyzer: 2 min ของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ อากาศ(Air) อัดอากาศที่ 0.5 bar ที่แรงดันทดสอบ 12 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD < 5.5 pC



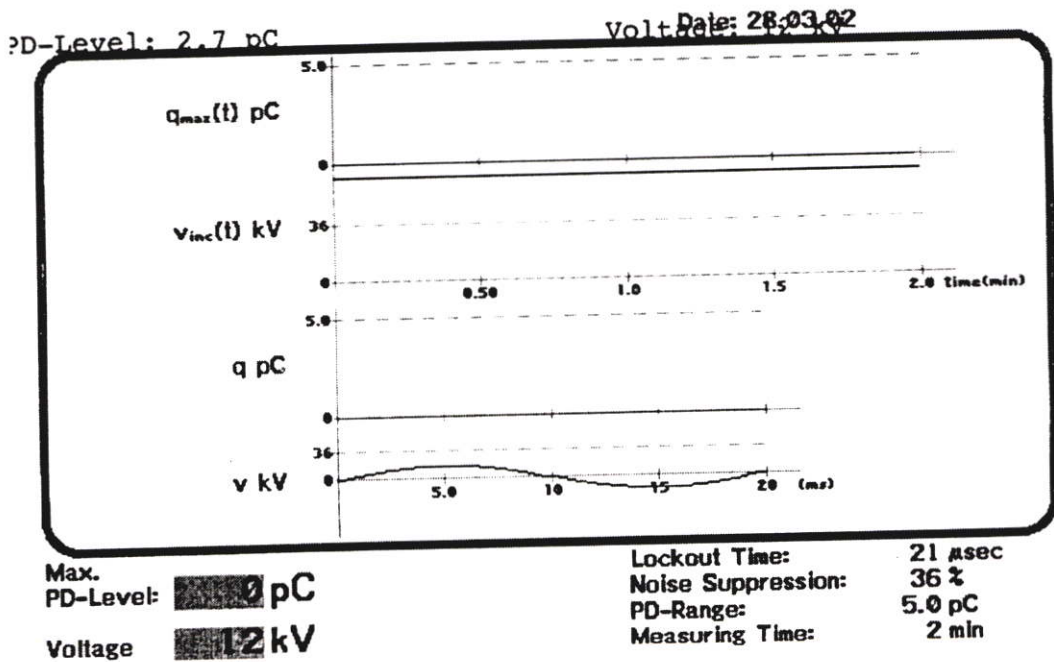
รูปที่ 5.43 การทดสอบหาค่าคิซาร์จบางส่วนแบบ Measurement Routine: 15 sec ของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ ออกซิเจน(Oxygen) อัดความดันที่ 1.0 bar ที่แรงดันทดสอบ 12 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD = 4.8 pC



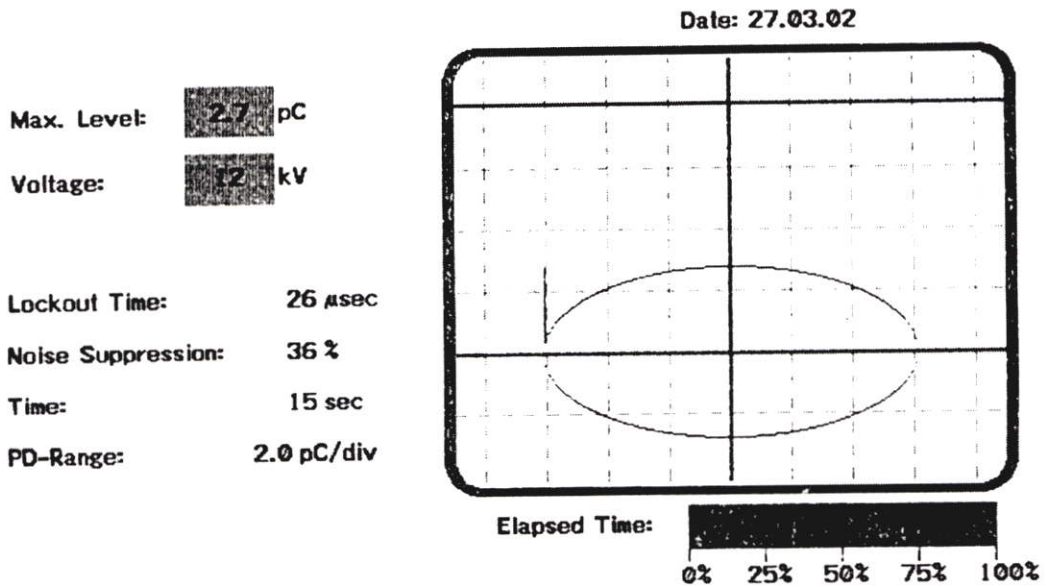
รูปที่ 5.44 การทดสอบหาค่าคิซาร์จบางส่วนแบบ Measurement Analyzer: 2 min ของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ ออกซิเจน(Oxygen) อัดความดันที่ 1.0 bar ที่แรงดันทดสอบ 12 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD < 5.0 pC



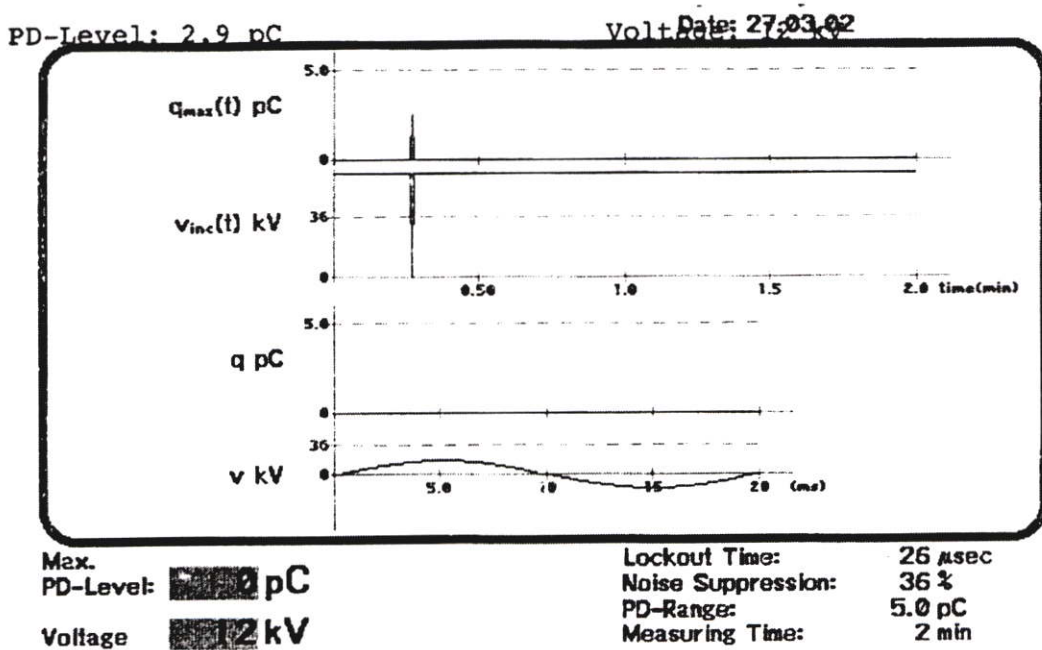
รูปที่ 5.45 การทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนแบบ Measurement Routine: 15 sec ของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ ออกซิเจน(Oxygen) อัดความดันที่ 1.5 bar ที่แรงดันทดสอบ 12 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD = 3.1 pC



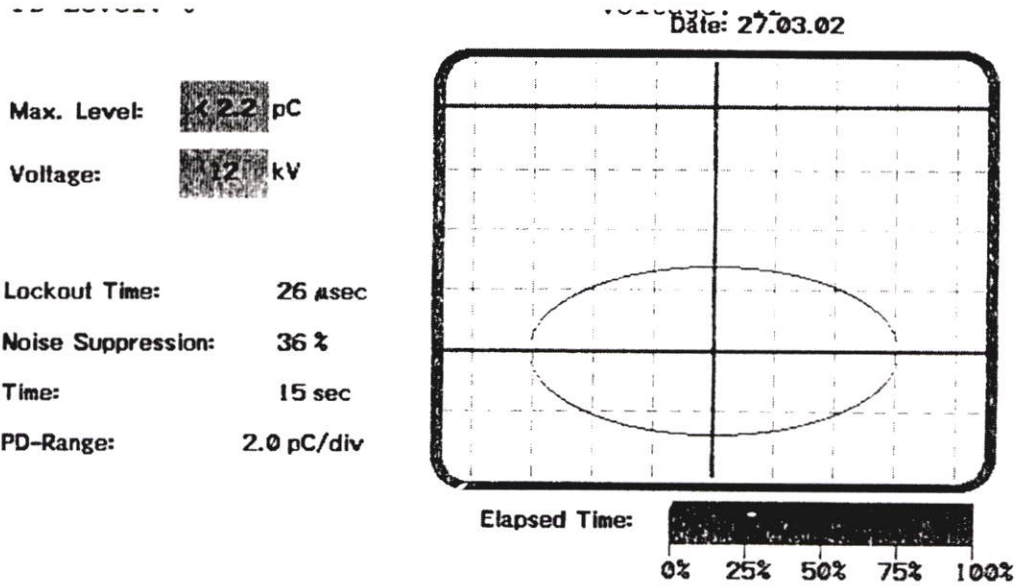
รูปที่ 5.46 การทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนแบบ Measurement Analyzer: 2 min ของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ ออกซิเจน(Oxygen) อัดความดันที่ 1.5 bar ที่แรงดันทดสอบ 12 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD < 5.0 pC



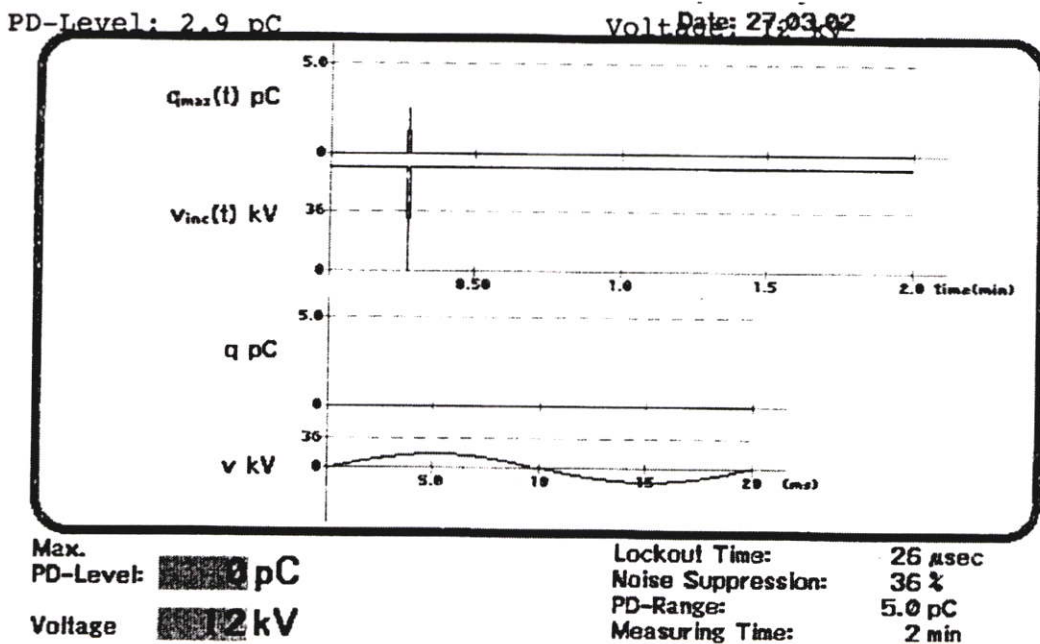
รูปที่ 5.47 การทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนแบบ Measurement Routine: 15 sec ของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ ออกซิเจน(Oxygen) อัดความดันที่ 2.0 bar ที่แรงดันทดสอบ 12 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD = 2.7 pC



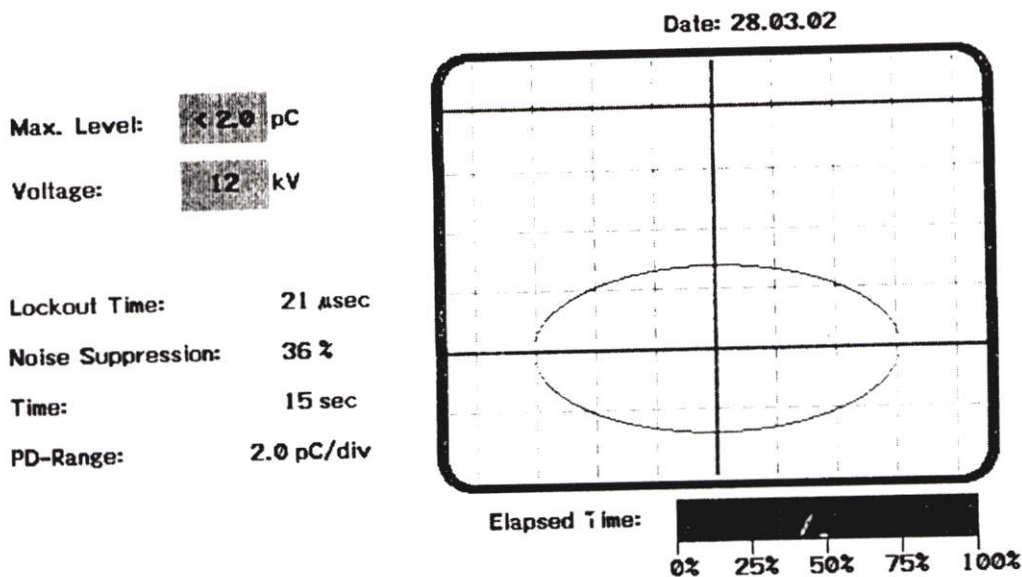
รูปที่ 5.48 การทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนแบบ Measurement Analyzer: 2 min ของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ ออกซิเจน(Oxygen) อัดความดันที่ 2.0 bar ที่แรงดันทดสอบ 12 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD < 5.0 pC



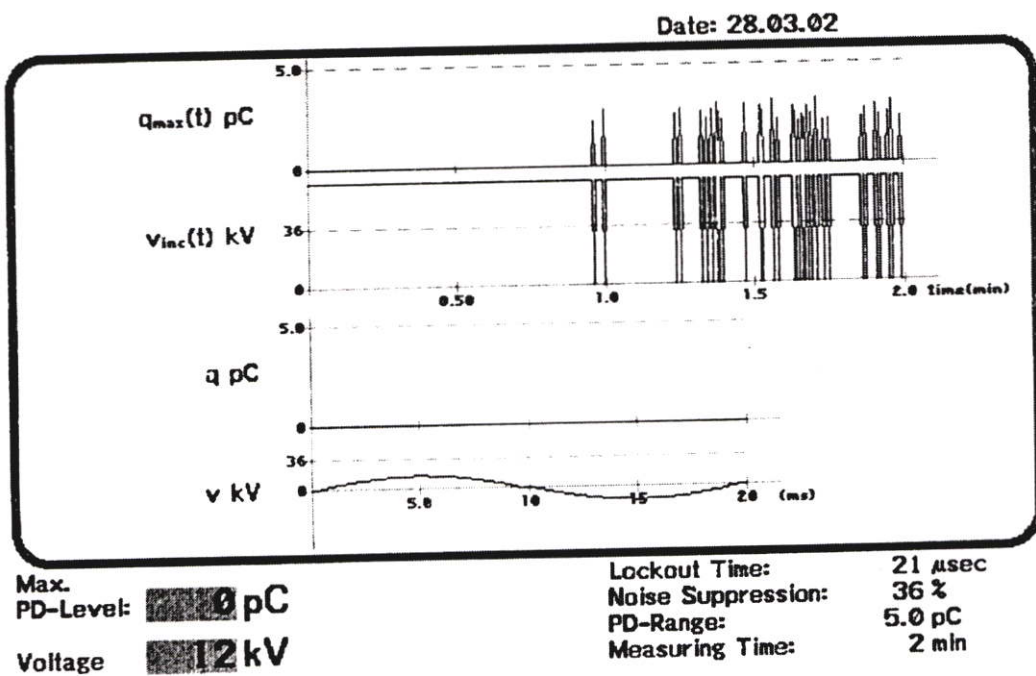
รูปที่ 5.49 การทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนแบบ Measurement Routine: 15 sec ของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ ออกซิเจน(Oxygen) อัดความดันที่ 2.5 bar ที่แรงดันทดสอบ 12 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD < 2.2 pC



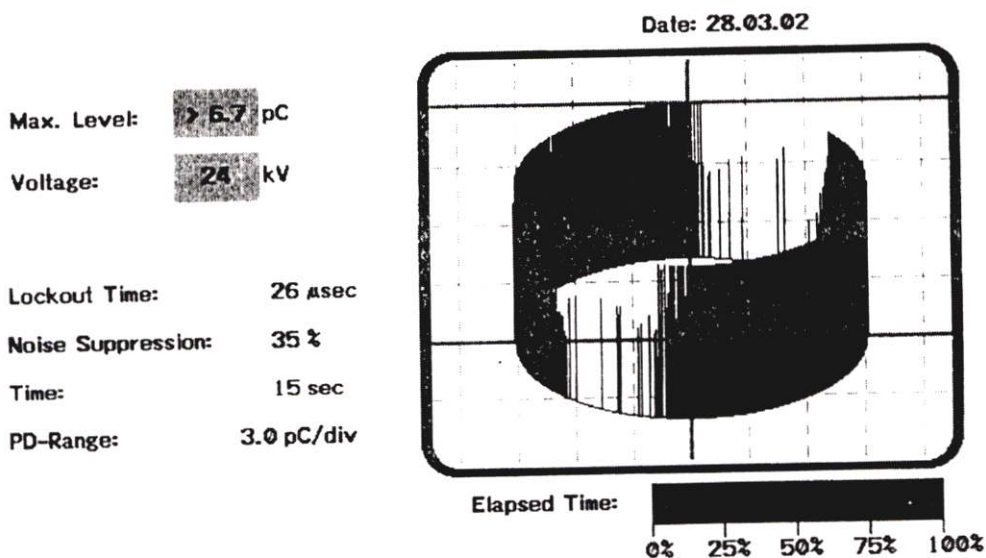
รูปที่ 5.50 การทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนแบบ Measurement Analyzer: 2 min ของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ ออกซิเจน(Oxygen) อัดความดันที่ 2.5 bar ที่แรงดันทดสอบ 12 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD < 5.0 pC



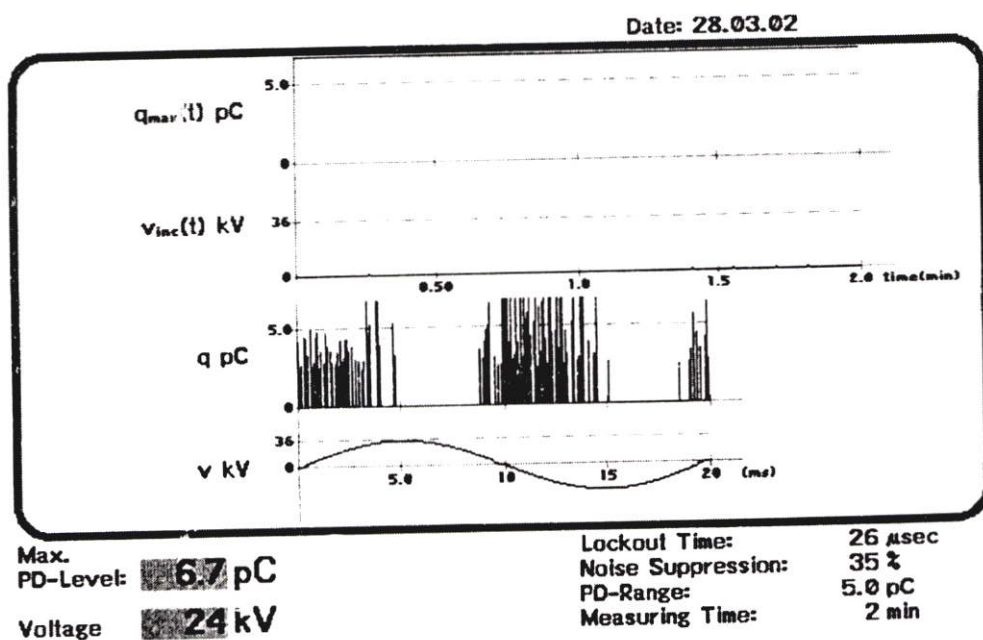
รูปที่ 5.51 การทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนแบบ Measurement Routine: 15 sec ของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ ออกซิเจน(Oxygen) อัดความดันที่ 3.0 bar ที่แรงดันทดสอบ 12 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD < 2.0 pC



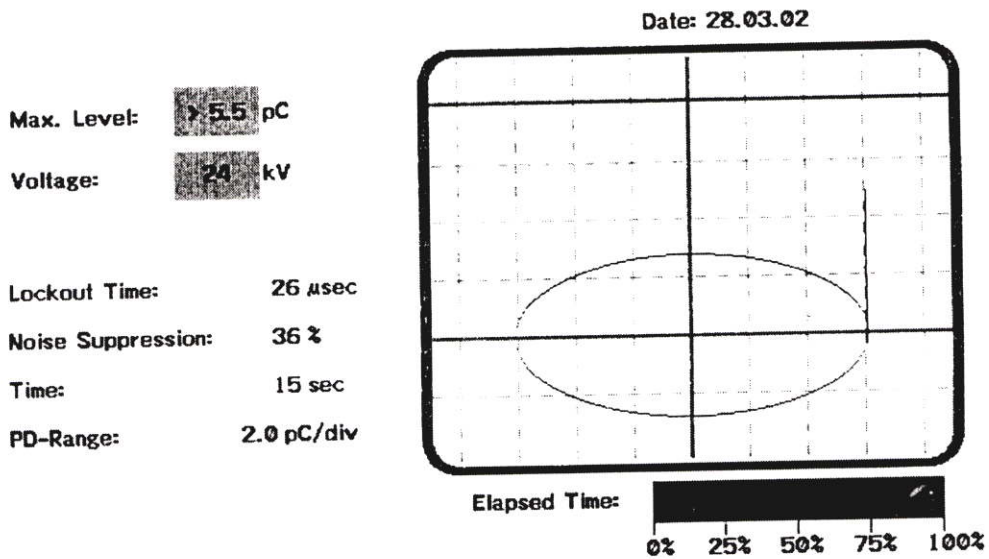
รูปที่ 5.52 การทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนแบบ Measurement Analyzer: 2 min ของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ ออกซิเจน(Oxygen) อัดความดันที่ 3.0 bar ที่แรงดันทดสอบ 12 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD < 5.0 pC



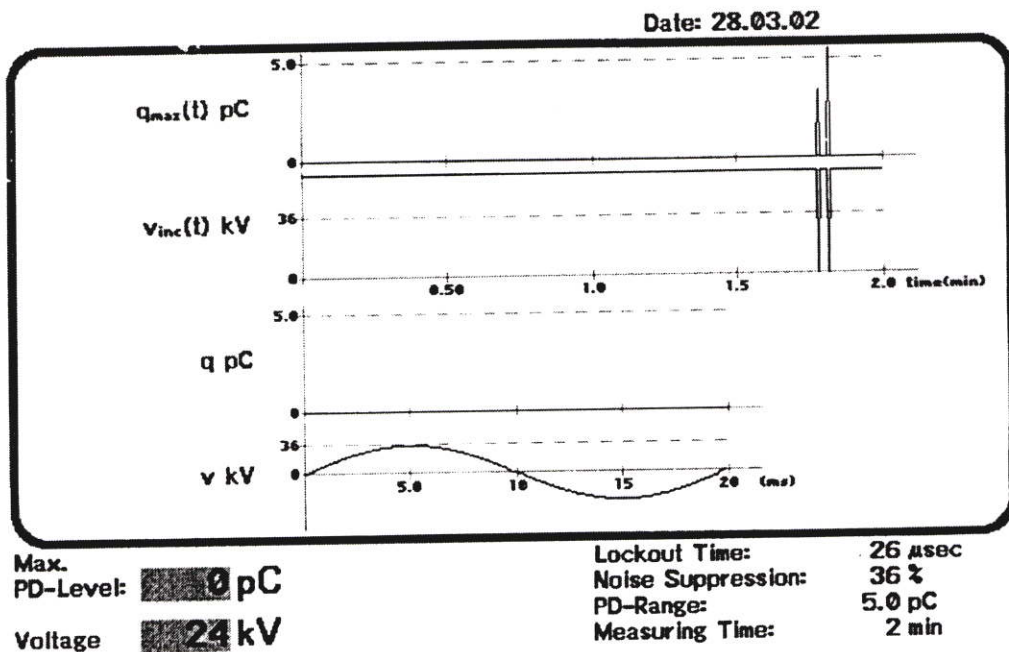
รูปที่ 5.53 การทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนแบบ Measurement Routine: 15 sec ของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ ออกซิเจน(Oxygen) อัดความดันที่ 0.5 bar ที่แรงดันทดสอบ 24 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD > 6.7 pC



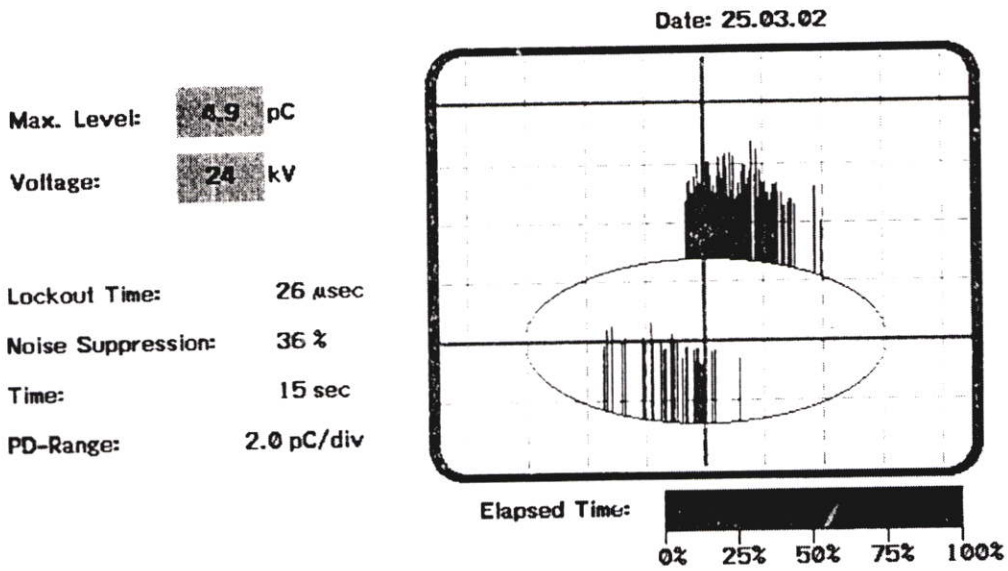
รูปที่ 5.54 การทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนแบบ Measurement Analyzer: 2 min ของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ ออกซิเจน(Oxygen) อัดความดันที่ 0.5 bar ที่แรงดันทดสอบ 24 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD < 6.7 pC



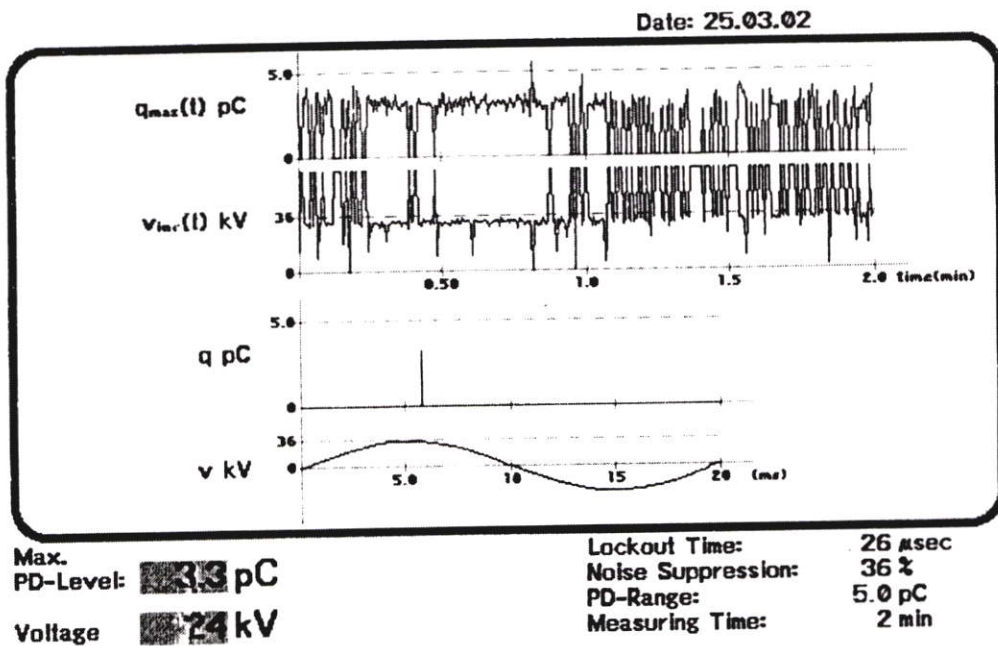
รูปที่ 5.55 การทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนแบบ Measurement Routine: 15 sec ของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ ออกซิเจน(Oxygen) อัดความดันที่ 1.0 bar ที่แรงดันทดสอบ 24 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD > 5.5 pC



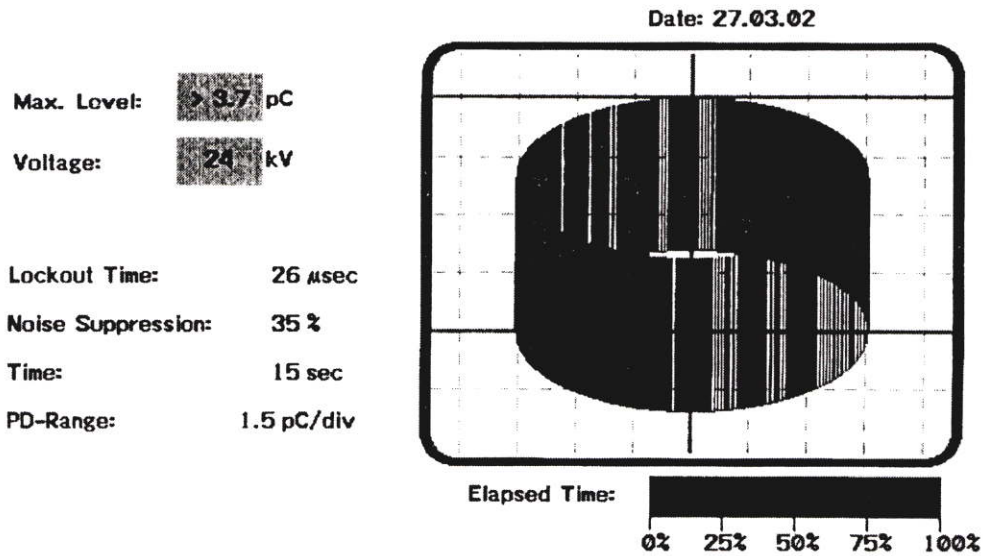
รูปที่ 5.56 การทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนแบบ Measurement Analyzer: 2 min ของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ ออกซิเจน(Oxygen) อัดความดันที่ 1.0 bar ที่แรงดันทดสอบ 24 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD < 5.0 pC



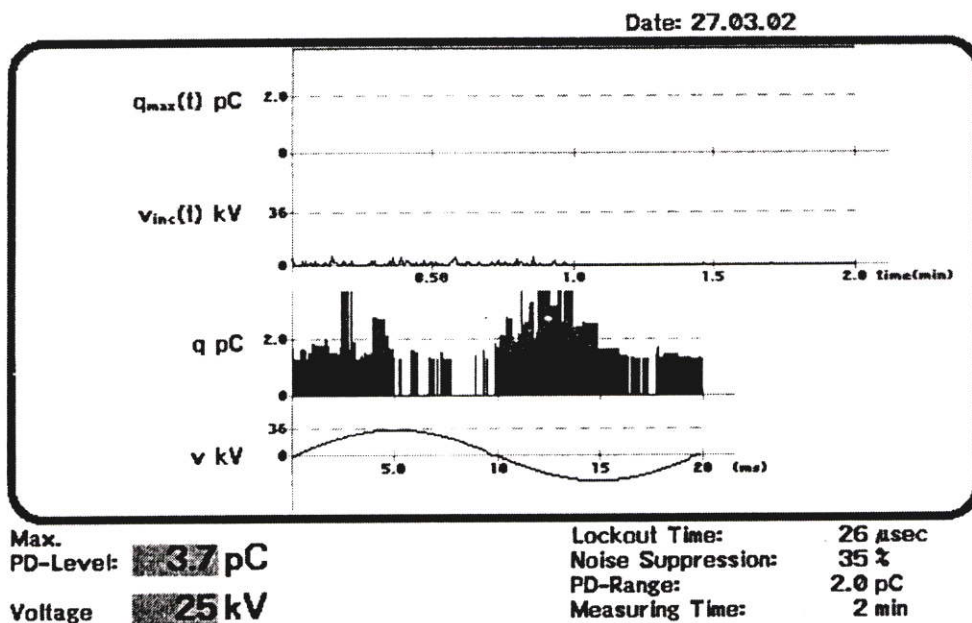
รูปที่ 5.57 การทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนแบบ Measurement Routine: 15 sec ของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ ออกซิเจน(Oxygen) อัดความดันที่ 1.5 bar ที่แรงดันทดสอบ 24 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD = 4.9 pC



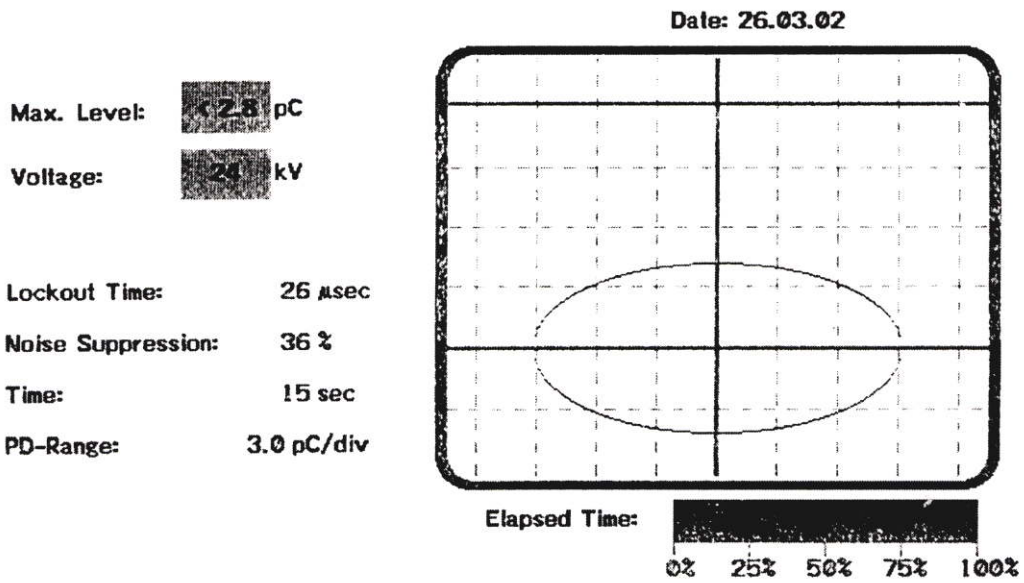
รูปที่ 5.58 การทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนแบบ Measurement Analyzer: 2 min ของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ ออกซิเจน(Oxygen) อัดความดันที่ 1.5 bar ที่แรงดันทดสอบ 24 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD < 5.0 pC



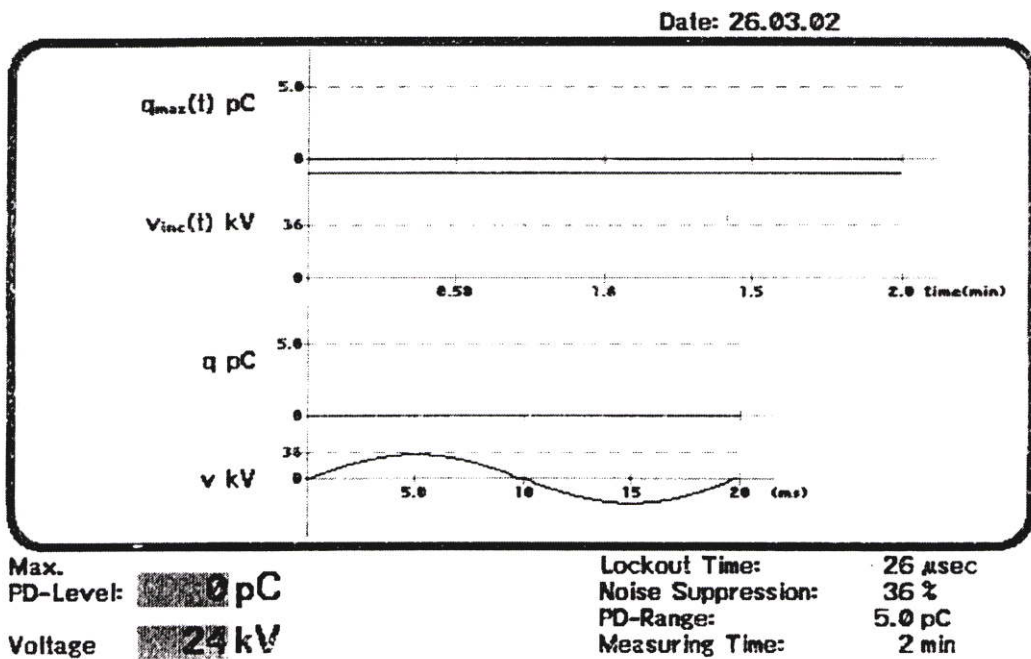
รูปที่ 5.59 การทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนแบบ Measurement Routine: 15 sec ของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ ออกซิเจน(Oxygen) อัดความดันที่ 2.0 bar ที่แรงดันทดสอบ 24.kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD> 3.7 pC



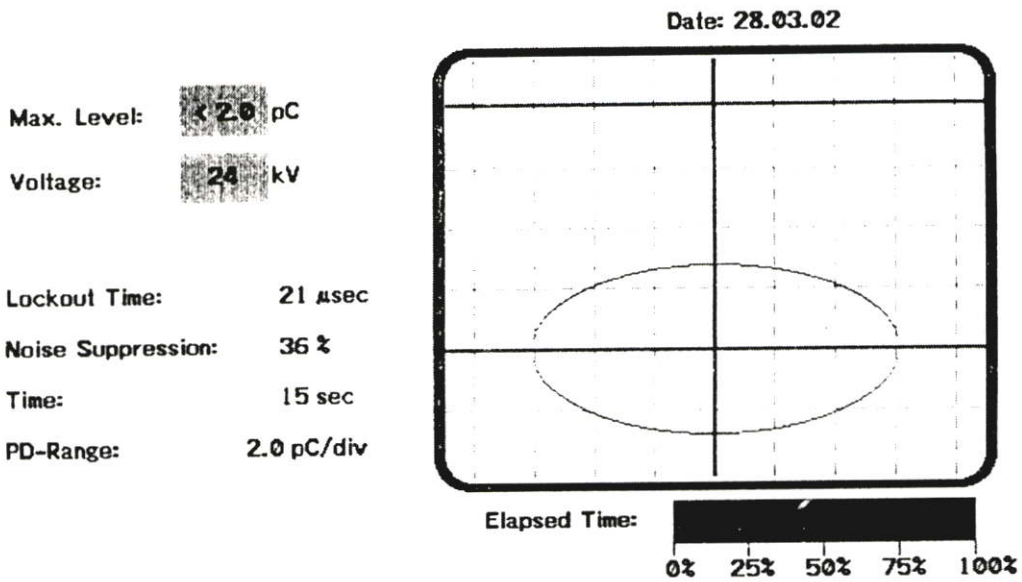
รูปที่ 5.60 การทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนแบบ Measurement Analyzer: 2 min ของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ ออกซิเจน(Oxygen) อัดความดันที่ 2.0 bar ที่แรงดันทดสอบ 24 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD< 6.7 pC



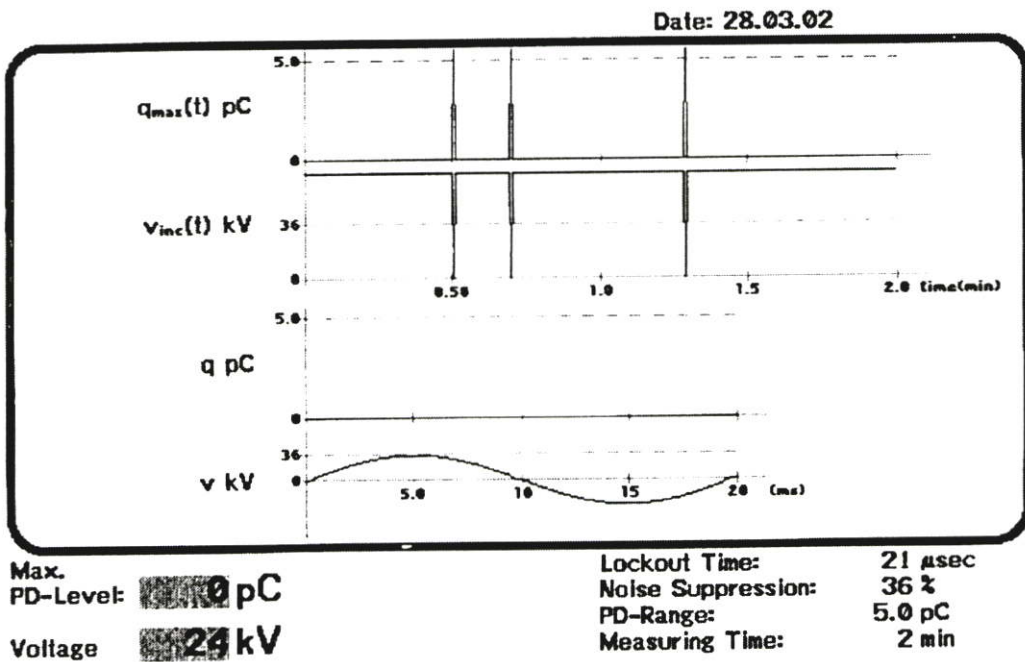
รูปที่ 5.61 การทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนแบบ Measurement Routine: 15 sec ของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ ออกซิเจน(Oxygen) อัดความดันที่ 2.5 bar ที่แรงดันทดสอบ 24 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD < 2.8 pC



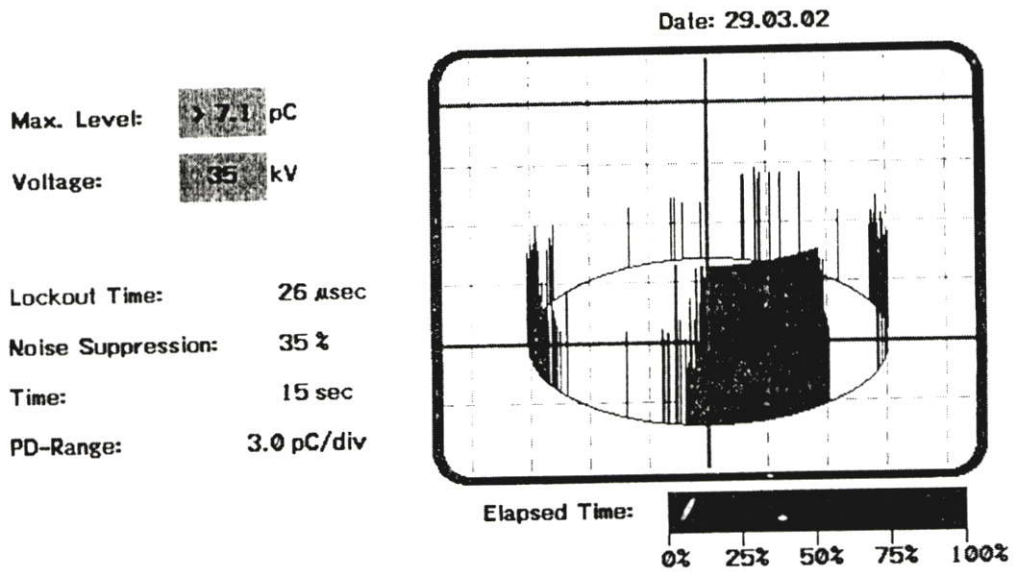
รูปที่ 5.62 การทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนแบบ Measurement Analyzer: 2 min ของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ ออกซิเจน(Oxygen) อัดความดันที่ 2.5 bar ที่แรงดันทดสอบ 24 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD < 5.0 pC



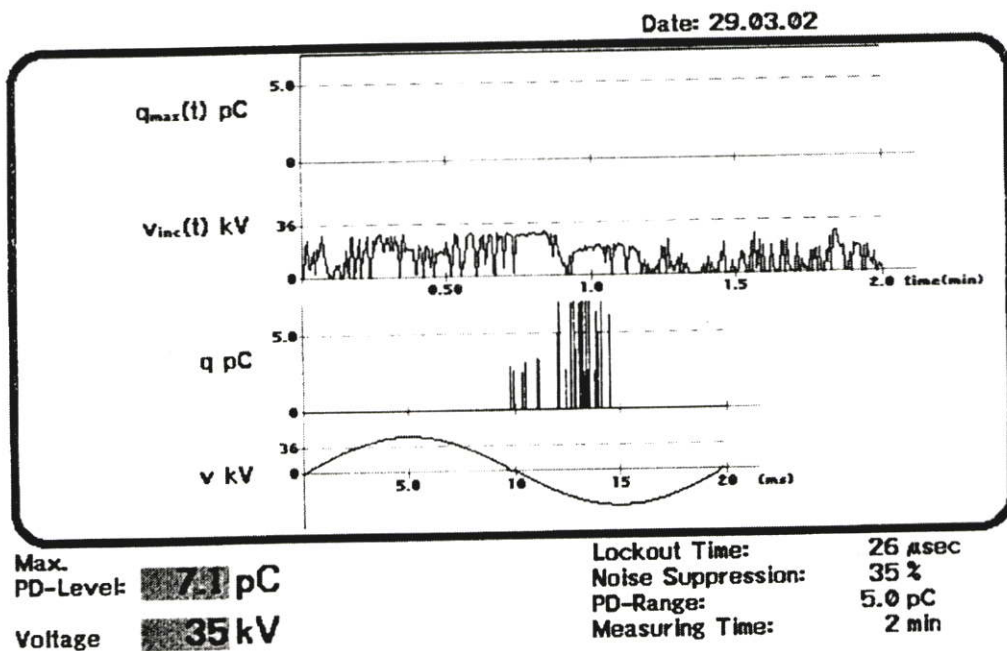
รูปที่ 5.63 การทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนแบบ Measurement Routine: 15 sec ของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ ออกซิเจน(Oxygen) อัดความดันที่ 3.0 bar ที่แรงดันทดสอบ 24 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD < 2.0 pC



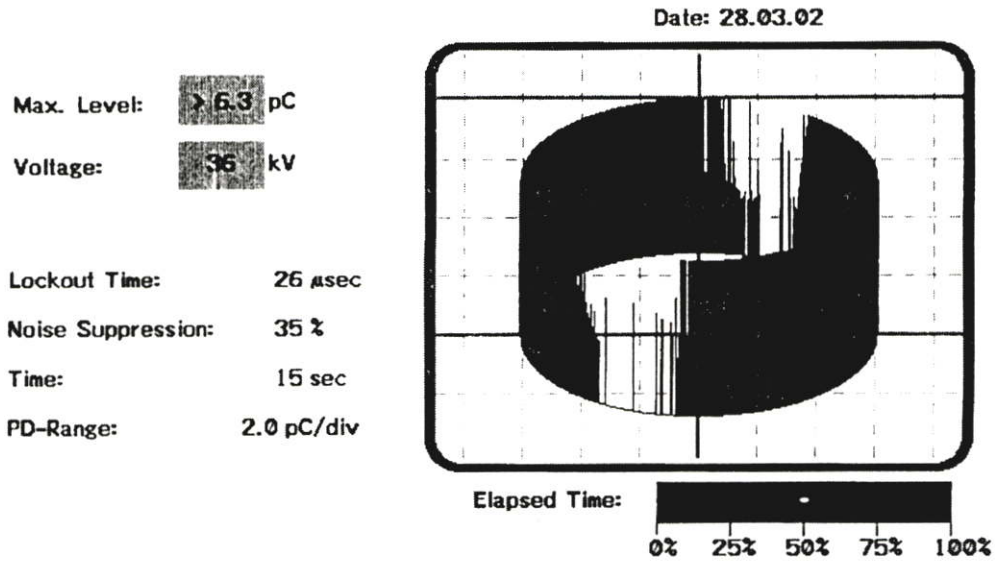
รูปที่ 5.64 การทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนแบบ Measurement Analyzer: 2 min ของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ ออกซิเจน(Oxygen) อัดความดันที่ 3.0 bar ที่แรงดันทดสอบ 24 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD < 5.0 pC



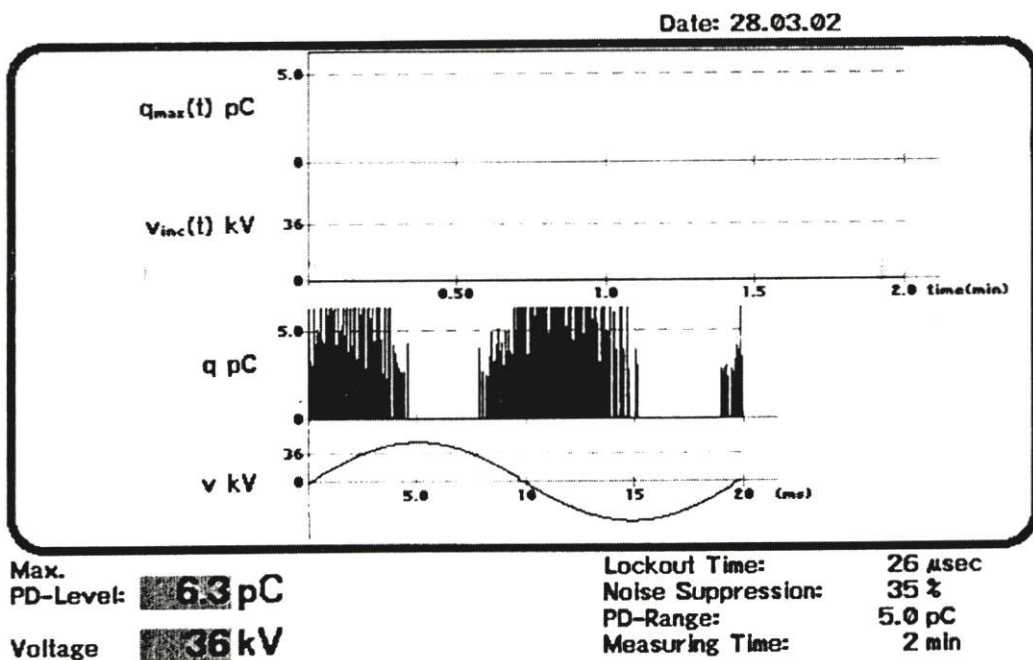
รูปที่ 5.65 การทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนแบบ Measurement Routine: 15 sec ของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ ออกซิเจน(Oxygen) อัดความดันที่ 0.5 bar ที่แรงดันทดสอบ 36 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD > 7.1 pC



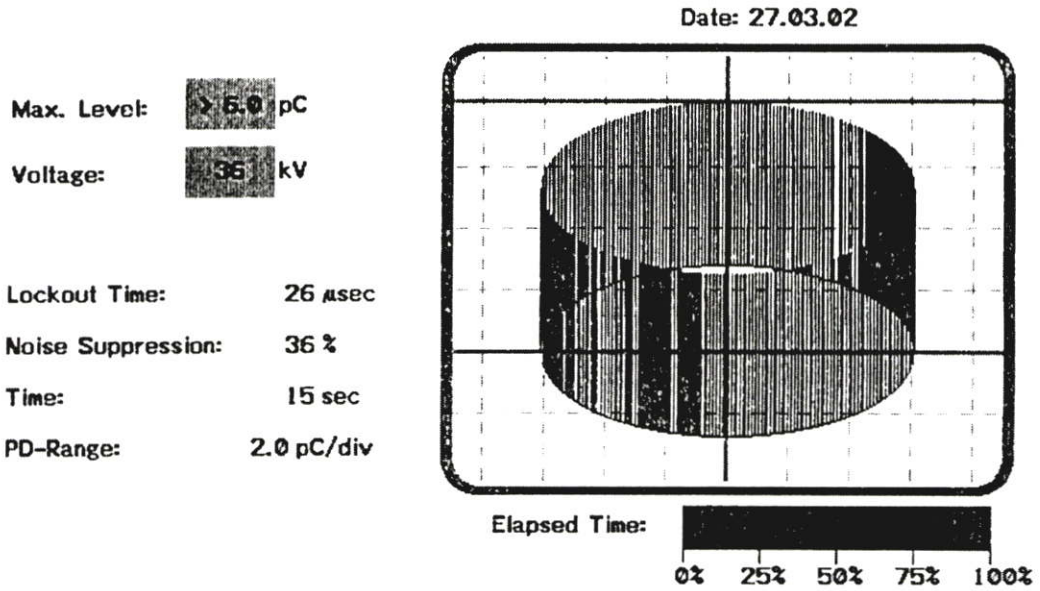
รูปที่ 5.66 การทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนแบบ Measurement Analyzer: 2 min ของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ ออกซิเจน(Oxygen) อัดความดันที่ 0.5 bar ที่แรงดันทดสอบ 36 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD < 7.1 pC



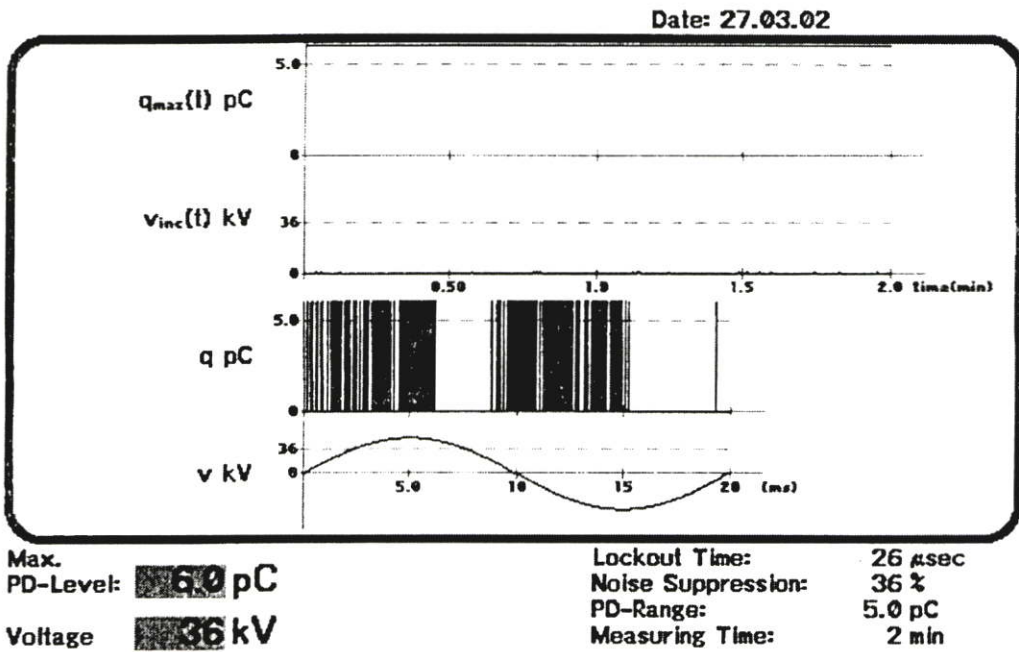
รูปที่ 5.67 การทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนแบบ Measurement Routine: 15 sec ของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ ออกซิเจน(Oxygen) อัดความดันที่ 1.0 bar ที่แรงดันทดสอบ 36 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD > 6.3 pC



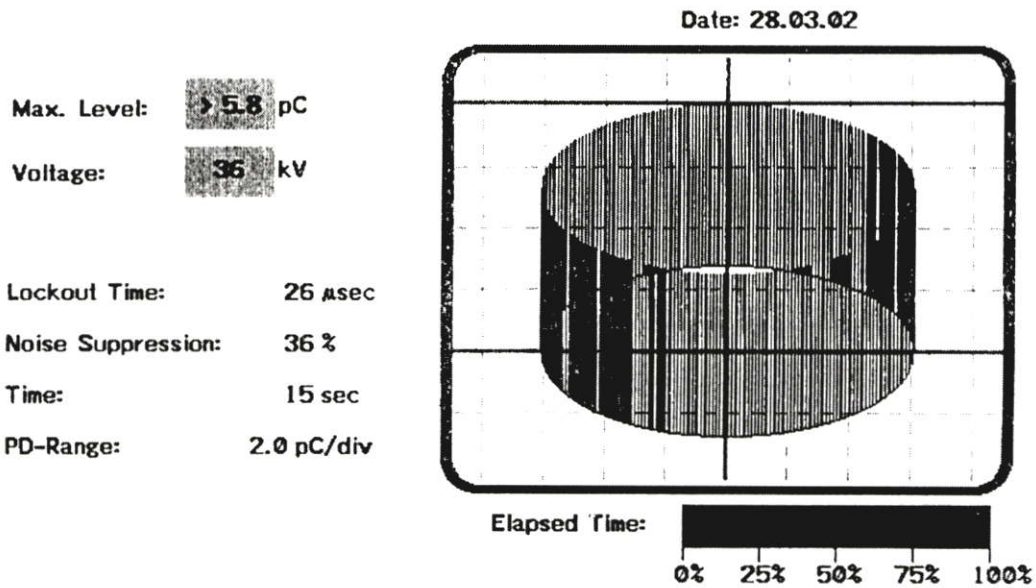
รูปที่ 5.68 การทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนแบบ Measurement Analyzer: 2 min ของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ ออกซิเจน(Oxygen) อัดความดันที่ 1.0 bar ที่แรงดันทดสอบ 36 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD < 6.3 pC



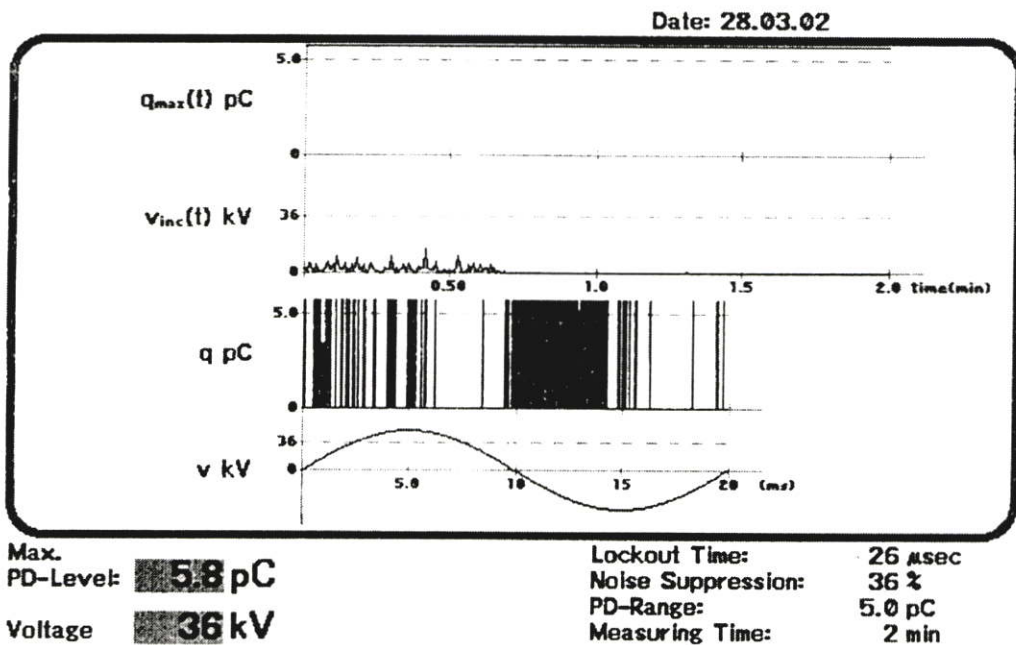
รูปที่ 5.69 การทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนแบบ Measurement Routine: 15 sec ของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ ออกซิเจน(Oxygen) อัดความดันที่ 1.5 bar ที่แรงดันทดสอบ 36 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD > 6.0 pC



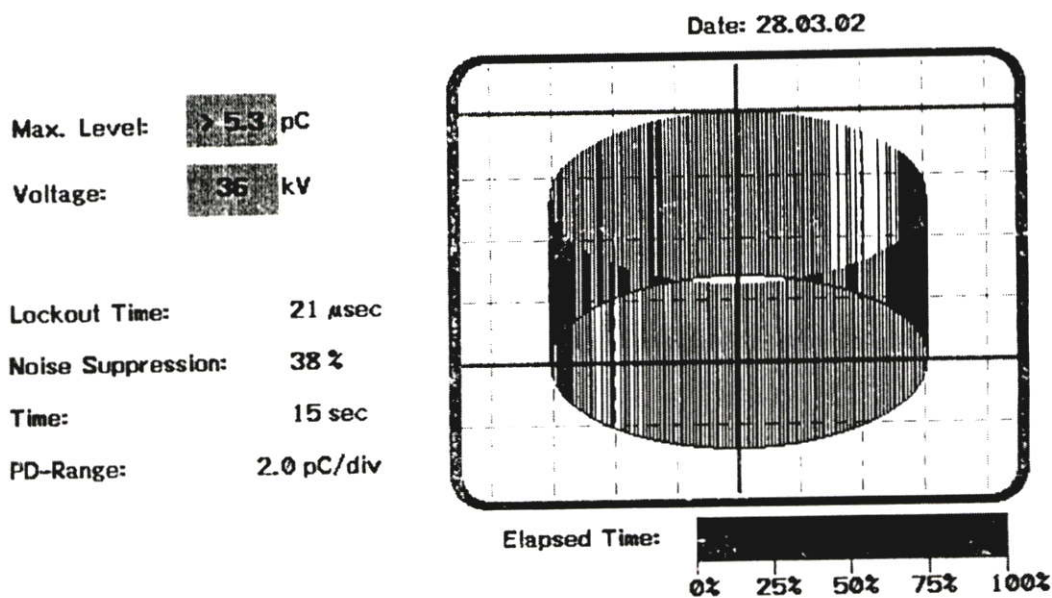
รูปที่ 5.70 การทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนแบบ Measurement Analyzer: 2 min ของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ ออกซิเจน(Oxygen) อัดความดันที่ 1.5 bar ที่แรงดันทดสอบ 36 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD < 6.0 pC



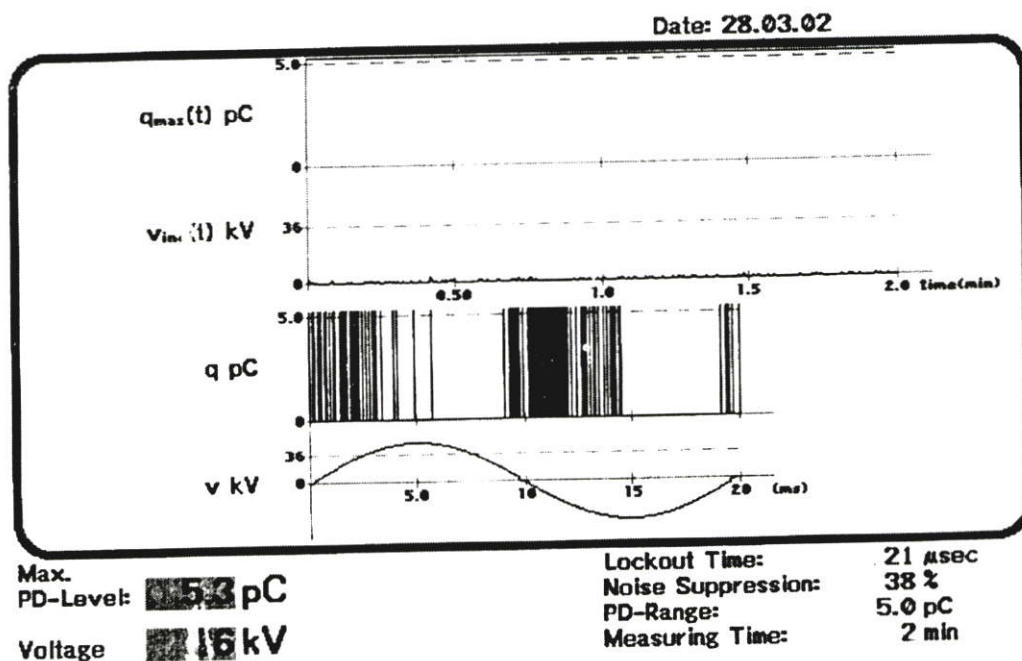
รูปที่ 5.71 การทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนแบบ Measurement Routine: 15 sec ของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ ออกซิเจน(Oxygen) อัดความดันที่ 2.0 bar ที่แรงดันทดสอบ 36 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD > 5.8 pC



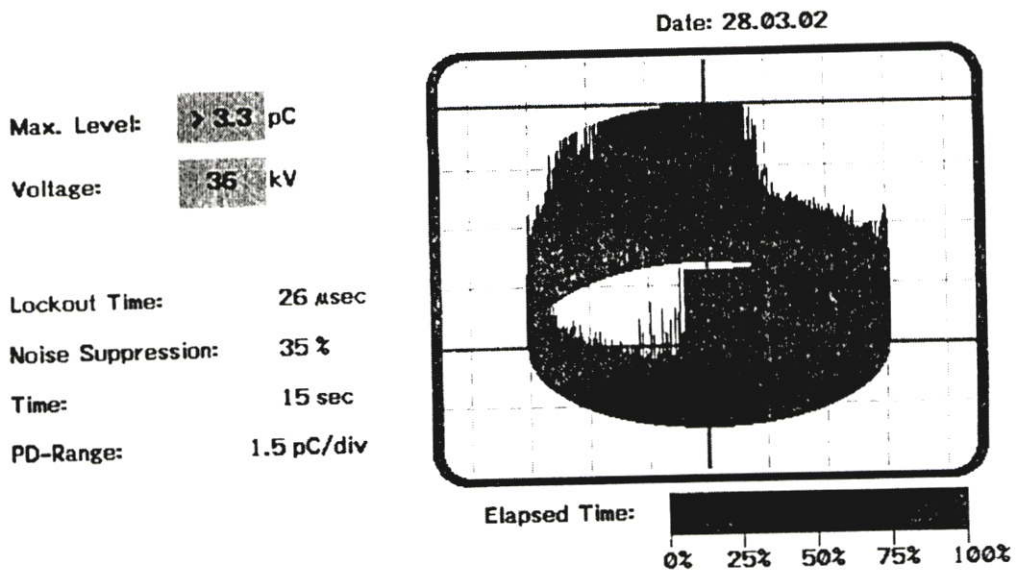
รูปที่ 5.72 การทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนแบบ Measurement Analyzer: 2 min ของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ ออกซิเจน(Oxygen) อัดความดันที่ 2.0 bar ที่แรงดันทดสอบ 36 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD < 5.8 pC



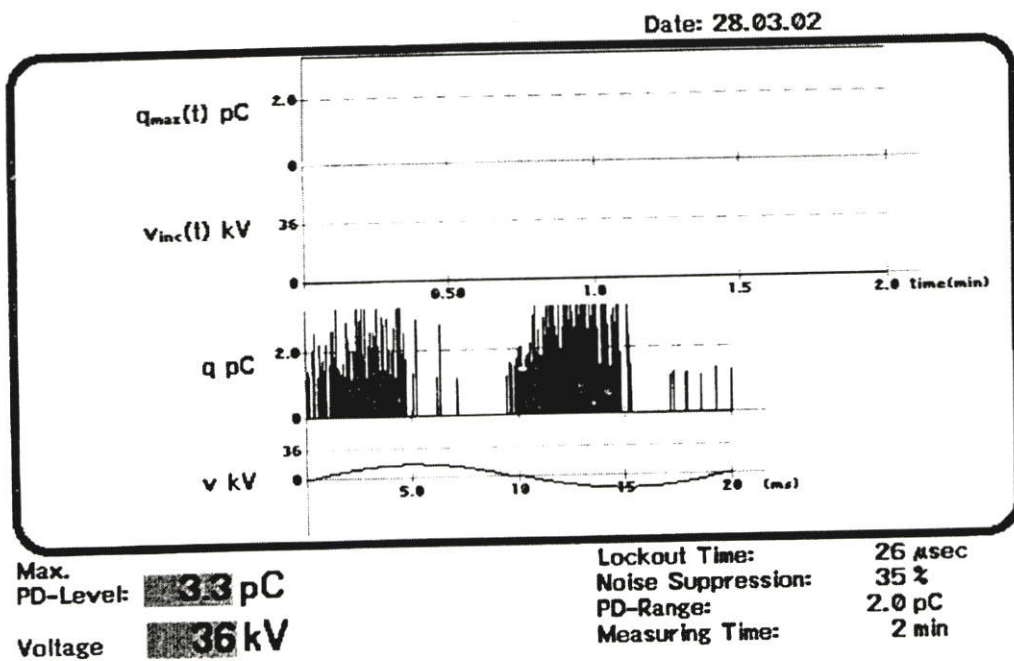
รูปที่ 5.73 การทดสอบหาค่าคิซาร์จบางส่วนแบบ Measurement Routine: 15 sec ของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ ออกซิเจน(Oxygen) อัดความดันที่ 2.5 bar ที่แรงดันทดสอบ 36 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD > 5.3 pC



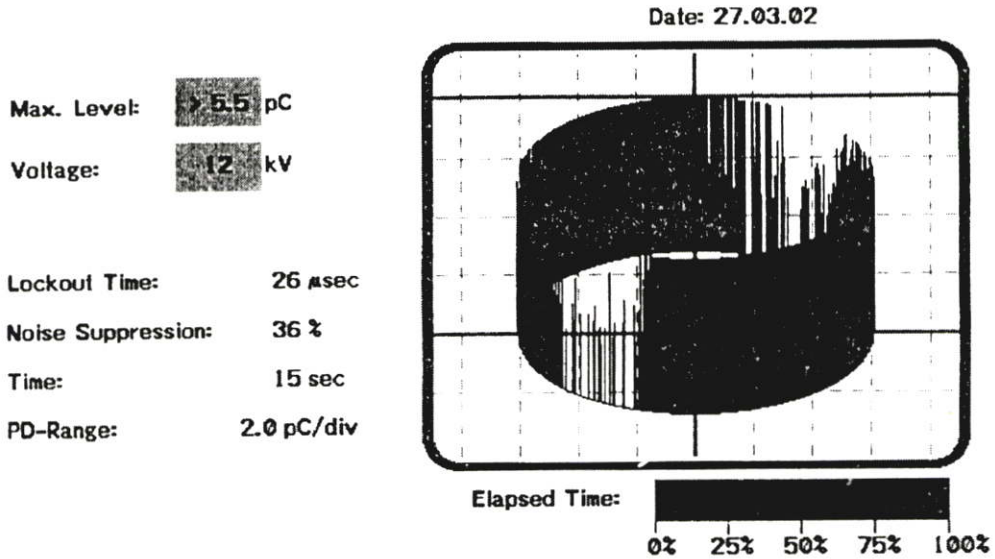
รูปที่ 5.74 การทดสอบหาค่าคิซาร์จบางส่วนแบบ Measurement Analyzer: 2 min ของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ ออกซิเจน(Oxygen) อัดความดันที่ 2.5 bar ที่แรงดันทดสอบ 36 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD < 7.1 pC



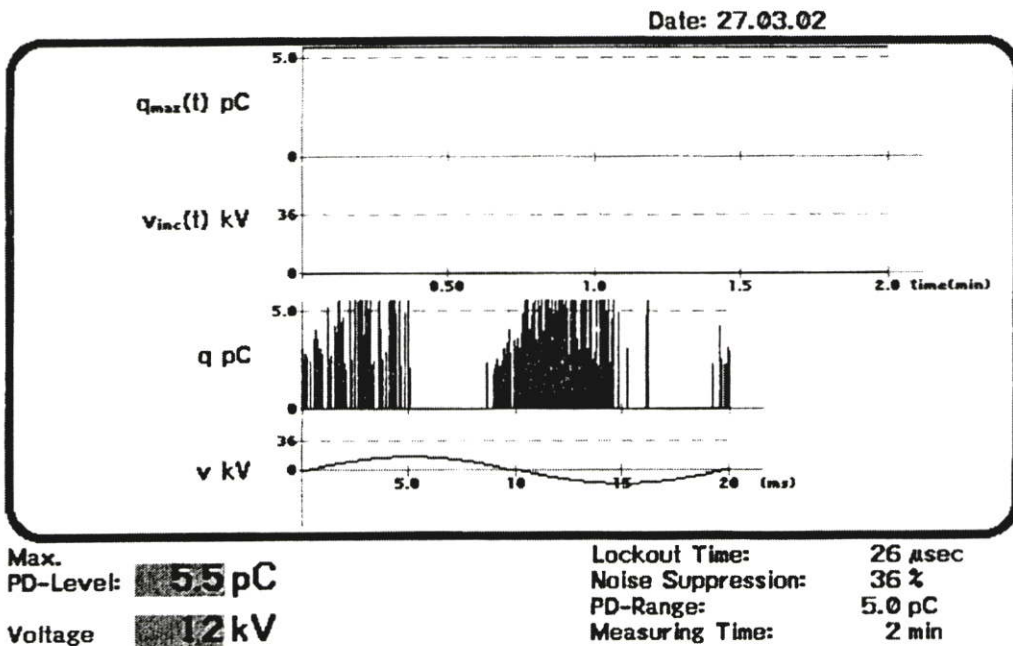
รูปที่ 5.75 การทดสอบหาค่าคิซาร์จบางส่วนแบบ Measurement Routine: 15 sec ของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ ออกซิเจน(Oxygen) อัดความดันที่ 3.0 bar ที่แรงดันทดสอบ 36 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD > 3.3 pC



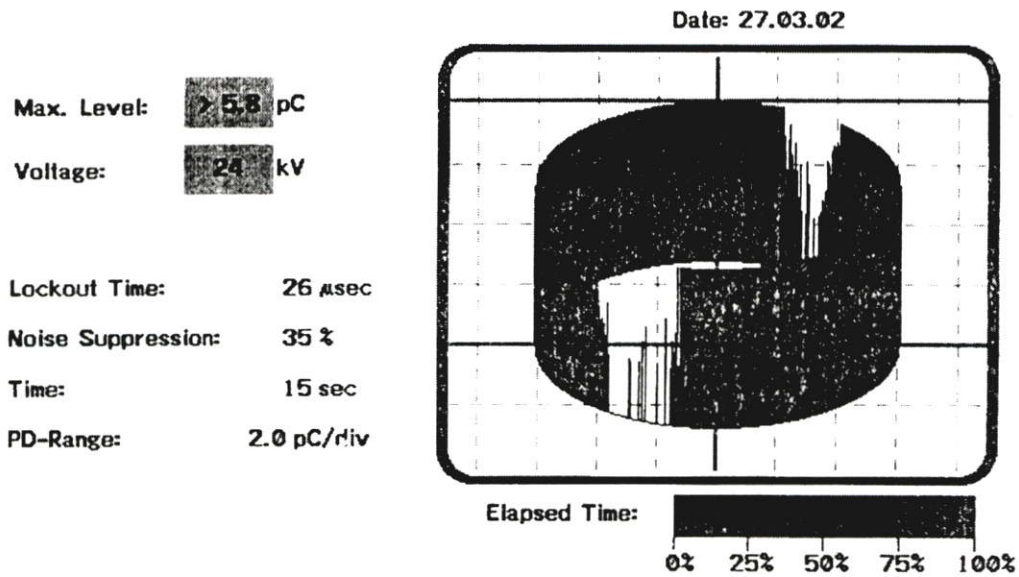
รูปที่ 5.76 การทดสอบหาค่าคิซาร์จบางส่วนแบบ Measurement Analyzer: 2 min ของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ ออกซิเจน(Oxygen) อัดความดันที่ 3.0 bar ที่แรงดันทดสอบ 36 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD < 3.3 pC



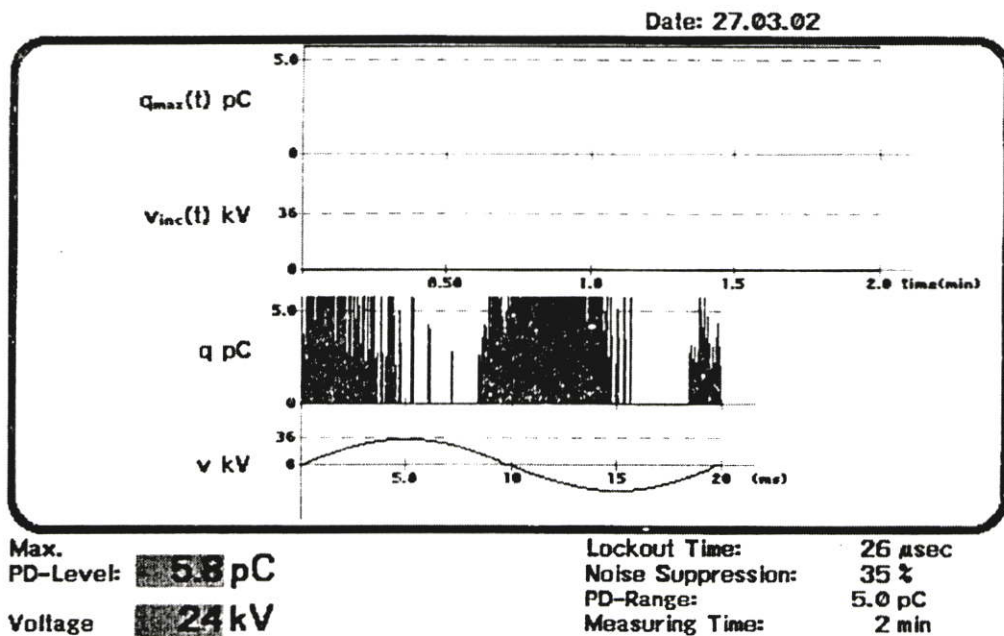
รูปที่ 5.77 การทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนแบบ Measurement Routine: 15 sec ของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ อากาศ (Air) ทำสุญญากาศที่ 20 in.Hg ที่แรงดันทดสอบ 12 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD > 5.5 pC



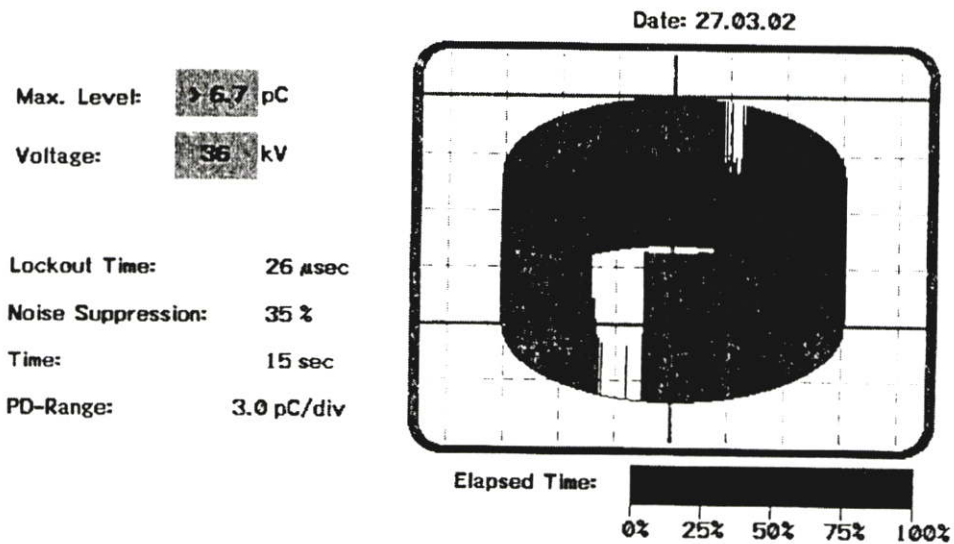
รูปที่ 5.78 การทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนแบบ Measurement Analyzer: 2 min ของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ อากาศ (Air) ทำสุญญากาศที่ 20 in.Hg ที่แรงดันทดสอบ 12 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD > 5.5 pC



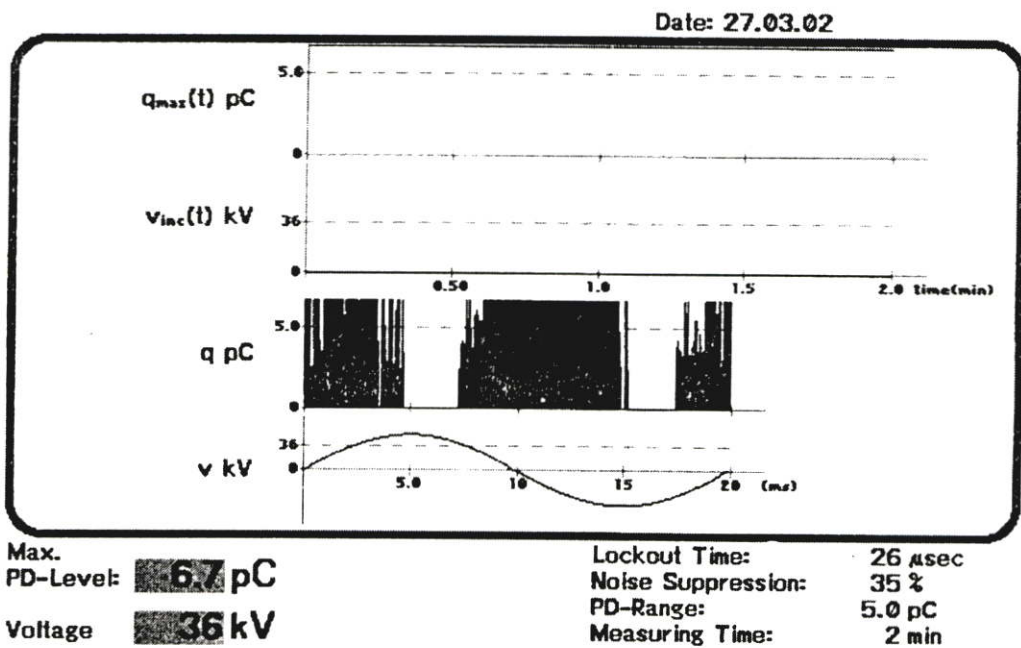
รูปที่ 5.79 การทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนแบบ Measurement Routine: 15 sec ของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ อากาศ (Air) ทำสุญญากาศที่ 20 in.Hg ที่แรงดันทดสอบ 24 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD > 5.8 pC



รูปที่ 5.80 การทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนแบบ Measurement Analyzer: 2 min ของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ อากาศ (Air) ทำสุญญากาศที่ 20 in.Hg ที่แรงดันทดสอบ 24 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD > 5.8 pC



รูปที่ 5.81 การทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนแบบ Measurement Routine: 15 sec ของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ อากาศ (Air) ทำสุญญากาศที่ 20 in.Hg ที่แรงดันทดสอบ 36 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD > 6.7 pC



รูปที่ 5.82 การทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนแบบ Measurement Analyzer: 2 min ของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ อากาศ (Air) ทำสุญญากาศที่ 20 in.Hg ที่แรงดันทดสอบ 36 kV ความถี่ 50 Hz ที่ระดับค่า PD > 6.7 pC

## 5.4 บทสรุป

การทดสอบสายเคเบิลแรงดันสูงที่ใช้ขั้วต่อสายเคเบิลที่สร้างขึ้นนี้สามารถใช้ในการทดสอบที่แรงดันสูงกระแสสลับตามค่าพิกัดมาตรฐานและยังใช้ในการทดสอบการวัดค่าดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้น ด้วยวิธีการเปรียบเทียบกับค่าของการทดสอบสายเคเบิลที่มีสภาพที่ดีจากโรงงานผลิตสายเคเบิลที่ได้มาตรฐาน มีผลการทดสอบอยู่ในระดับมาตรฐาน  $PD \leq 10 \text{ pC}$

ในการทดสอบสายเคเบิลแรงดันสูงโดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลที่มีการฉนวนด้วยก๊าซ คือ อากาศ และก๊าซออกซิเจน สามารถสรุปได้ว่า ก๊าซมีคุณสมบัติในการเป็นฉนวน การอัดอากาศหรือการเพิ่มความดันเข้าไปที่ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงสามารถเพิ่มค่าความเป็นฉนวนให้กับพื้นผิวบริเวณที่ทำการปลอกสายเพื่อการทดสอบได้ ซึ่งสรุปผลการทดสอบหาค่า PD ได้ดังตารางที่ 5.1, 5.2 และ 5.3

ตารางที่ 5.1 ผลทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซคือ อากาศ (Air) อัดความดันที่ 0.5-3.0 bar ที่แรงดันทดสอบ 12, 24, 36 kV ความถี่ 50 Hz

<b>Air Insulation</b> <i>Compressor (bar)</i>	<b>12 kV</b> <i>PD Level (pC)</i>	<b>24 kV</b> <i>PD Level (pC)</i>	<b>36 kV</b> <i>PD Level (pC)</i>
0.5 bar	> 5.8	= 7.1	> 7.9
1.0 bar	> 5.3	> 6.0	> 7.1
1.5 bar	= 4.8	> 5.5	> 6.7
2.0 bar	= 4.2	= 3.8	> 6.0
2.5 bar	= 2.7	= 3.3	> 5.5
3.0 bar	> 2.6	< 2.1	= 3.6

ตารางที่ 5.2 ผลทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซคือ ก๊าซออกซิเจน (Oxygen) อัดความดันที่ 0.5-3.0 bar ที่แรงดันทดสอบ 12, 24, 36 kV ความถี่ 50 Hz

<b>Oxygen Insulation</b> <i>Compressor (bar)</i>	<b>12 kV</b> <i>PD Level (pC)</i>	<b>24 kV</b> <i>PD Level (pC)</i>	<b>36 kV</b> <i>PD Level (pC)</i>
0.5 bar	> 5.5	> 6.7	> 7.1
1.0 bar	= 4.8	> 5.5	> 6.3
1.5 bar	= 3.1	= 4.9	> 5.0
2.0 bar	= 2.7	> 3.7	> 5.8
2.5 bar	< 2.2	< 2.8	> 5.3
3.0 bar	< 2.0	< 2.0	> 3.3

ตารางที่ 5.3 ผลทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนคือ การทำสุญญากาศ (Vacuum) อัดความดันที่ 0.5-3.0 bar ที่แรงดันทดสอบ 12, 24, 36 kV ความถี่ 50 Hz

<b>Vacuum Insulation</b> <i>(mm.Hg)</i>	<b>12 kV</b> <i>PD Level (pC)</i>	<b>24 kV</b> <i>PD Level (pC)</i>	<b>36 kV</b> <i>PD Level (pC)</i>
20 in.Hg (26.1357 mm.bar)	> 5.5	> 5.8	> 6.7

## บทที่ 6

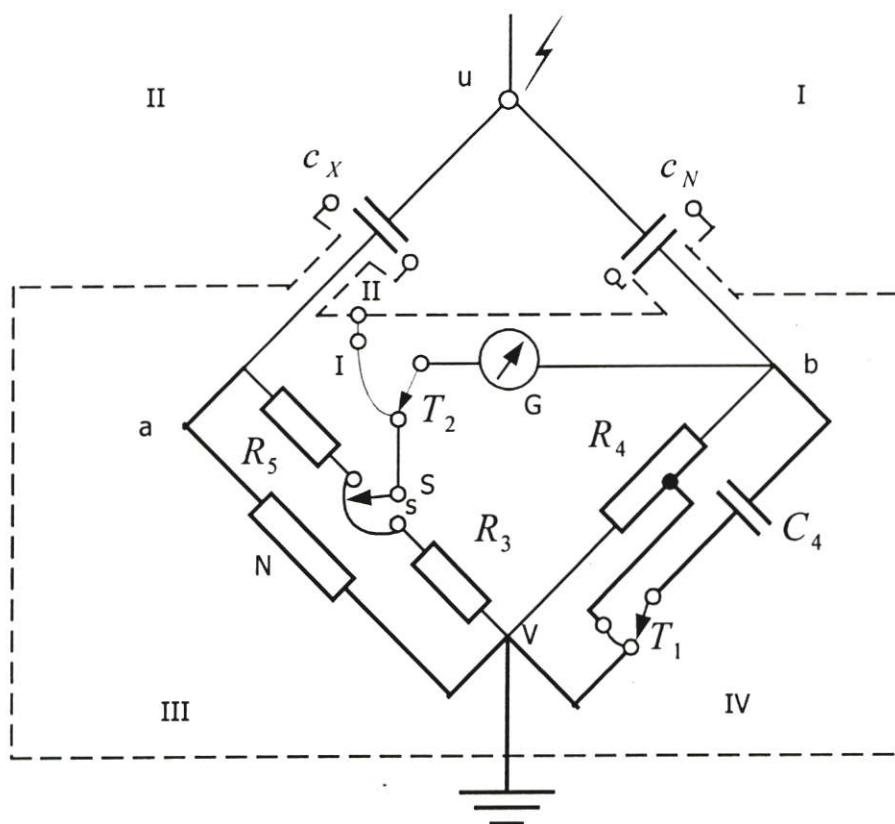
# การวิเคราะห์หาค่าพลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก (Dielectric Loss) ของสายเคเบิลแรงดันสูง XLPE

### 6.1 บทนำ

วิทยานิพนธ์บทนี้จะกล่าวถึงการวิเคราะห์หาค่าพลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกของสายเคเบิลแรงดันสูง XLPE วัสดุและอุปกรณ์ตัวอย่างทดสอบนั้นมีมากมายหลายชนิด แต่ละชนิดก็มีรายละเอียดและมาตรฐานวิธีการทดสอบแตกต่างกันออกไป ในที่นี้คือการทดสอบสายเคเบิล การทดสอบเคเบิลแรงดันสูงเคเบิลเป็นองค์ประกอบที่สำคัญประการหนึ่งในระบบจำหน่ายพลังงานไฟฟ้า เพื่อให้แน่ใจว่าเคเบิลมีความคงทนอยู่ได้ต่อสภาวะต่างๆ จึงมีการทดสอบที่สำคัญทางไฟฟ้า คือ วัดแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก  $\tan\delta$  เพื่อที่จะนำค่าต่างๆมาคำนวณหาค่า Dielectric Loss

### 6.2 การทดสอบหาค่าคาปาซิแตนซ์ (Capacitance) ของสายเคเบิล

เทคนิคการวัดค่าพลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกในวัสดุฉนวนหรือในอุปกรณ์อาจหาได้โดยการวัดค่า  $\tan\delta$  และค่าคาปาซิแตนซ์ วิธีวัดค่าทั้งสองนี้ทุกๆ ไปที่ใช้กันมี 2 วิธี คือ วิธีวัดดีมิเตอร์ และวิธีบริดจ์ ในที่นี้จะกล่าวแต่เฉพาะวิธีบริดจ์ ซึ่งเหมาะที่จะใช้กับความถี่ในย่านปานกลาง คือ 10 ถึง  $10^6$  Hz บริดจ์ที่ใช้กันทั่วไปก็คือ Schering bridge ที่ใช้กับความถี่พลังงานตั้งแต่ 50 Hz ถึง 100 kHz Schering bridge วัดคาปาซิแตนซ์และมุมพลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก  $\delta$  ของคาปาซิเตอร์โดยการเปรียบเทียบกับคาปาซิเตอร์มาตรฐาน ซึ่งเป็นแบบอากาศหรือก๊าซอัด (compressed gas standard capacitor) มีพลังงานสูญเสียเปล่าต่ำที่ความถี่พลังงานหรือความถี่อื่นๆ วงจรของ Schering bridge ดังแสดงในรูปที่ 6.1



รูปที่ 6.1 วงจร Schering bridge

ในรูปที่ 6.1

$C_x$	คือ	คาปาซิแตนซ์ของวัสดุทดสอบหรือที่ต้องการวัด
$R_x$	คือ	ความต้านทานสมมูลกับกำลังสูญเสียเปล่าในไดอิเล็กตริก
$C_N$	คือ	คาปาซิแตนซ์มาตรฐาน
$R_3$	คือ	ความต้านทานไร้ความเหนี่ยวนำและปรับค่าได้
$R_4$	คือ	ความต้านทานไร้ความเหนี่ยวนำ
$C_4$	คือ	คาปาซิแตนซ์ปรับค่าได้
$G$	คือ	กัลวานอมิเตอร์ความไวสูง

การปรับบริดจ์ให้สมดุลทำได้โดยการปรับค่า  $R_3$  และ  $R_4$  จนกระทั่งเข็มของกัลวานอมิเตอร์ชี้ศูนย์ เมื่อบริดจ์สมดุลแล้วจึงเขียนสมการได้ว่า

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{Z_3}{Z_4} \quad (6.1)$$

เมื่อ  $Z_1$ ,  $Z_2$ ,  $Z_3$  และ  $Z_4$  เป็นอิมพีแดนซ์ของส่วนวงจรแกน I, II, III และ IV ตามลำดับ คือ

$$Z_1 = \frac{R_x}{1 + j\omega C_x R_x} \quad (6.2)$$

$$Z_2 = \frac{-j}{\omega C_N} \quad (6.3)$$

$$Z_3 = R_3 \quad (6.4)$$

$$Z_4 = \frac{R_4}{1 + j\omega C_4 R_4} \quad (6.5)$$

นั่นคือ 
$$\frac{R_x}{R_3(1 + j\omega C_x R_x)} = \frac{-j}{\omega C_4 R_4} (1 + j\omega C_4 R_4)$$

โดยการเทียบค่าจริงจะได้

$$\frac{R_x}{1 + \omega^2 C_x^2 R_x^2} = \frac{C_4 R_3}{C_N} \quad (6.7)$$

ตัวอย่างเคเบิลแรงสูงที่จะใช้ทดสอบต่างดังก้าวโดยทั่วไปจะใช้ความยาวตั้งแต่ 5 เมตร ถึง 10 เมตร โดยมีการเตรียมปลายสายเคเบิลเป็นพิเศษเพื่อกันมิให้ความวาวไฟตามผิวที่ปลายสายเคเบิล ในทางปฏิบัติจึงมักใช้หัวเข้าสายเคเบิล (cable termination)

1) การหาค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียโคอีเล็กทริก  $\tan\delta$  วัดได้ด้วย Schering ที่แรงดันต่าง ๆ ตั้งแต่ 0.5 จนถึง 2.5 เท่าของแรงดันที่กำหนดของเคเบิล (แรงดันเฟสของเคเบิล)

2) การทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้านั้นทดสอบด้วยแรงดันกระแสสลับความถี่พลังงานแรงดันกระแสตรงและแรงดันอิมพัลส์ การทดสอบประจำในโรงงานมักจะทดสอบด้วยแรงดันกระแสสลับขนาด 2.5 เท่าของแรงดันที่กำหนด เป็นเวลานาน 5-10 นาที การทดสอบเฉพาะแบบจะทดสอบความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดันไฟฟ้าตามมาตรฐานกำหนด (เช่น IEC Publ. No. 71) ทั้งแรงดันกระแสสลับและแรงดันอิมพัลส์ ถ้าเคเบิลที่วางและติดตั้งเสร็จเรียบร้อยแล้วอาจทดสอบด้วยแรงดันกระแสสลับหรือแรงดันกระแสตรง ถ้าทดสอบด้วยแรงดันกระแสตรงแรงดันทดสอบเท่ากับ 4 เท่าของแรงดันระบบเป็นเวลานาน 15 นาที

โคอีเล็กทริก คือ ฉนวนไฟฟ้าที่ใช้กันระหว่างอิเล็กโทรดที่มีความต่างศักย์หรือมีแรงดันไม่เท่ากันแฟกเตอร์สูญเสียโคอีเล็กทริก  $\tan\delta$  ถือเป็นลักษณะสมบัติที่สำคัญประการหนึ่งใน 3 ประการ

ไดอิเล็กตริกคือ ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า (dielectric strength) ค่าเปอร์มิตติวิตี (Permittivity,  $\epsilon$ ) และค่าแฟกเตอร์สูญเสียไดอิเล็กตริก  $\tan\delta$

การตรวจสอบการฉนวนของอุปกรณ์หรือของระบบ ค่าแรงดันเบรกควาน์ถือว่าเป็นขีดจำกัดบน แต่การประเมินผลด้วยวิธีนี้ย่อมทำไม่ได้ เพราะการเกิดเบรกควาน์โดยเฉพาะอย่างยิ่งฉนวนแข็งย่อมหมายถึงความสูญเสียสภาพการฉนวนอย่างสมบูรณ์ ฉนวนจะถูกทำลาย ฉะนั้นจะต้องหลีกเลี่ยงการตรวจสอบที่ทำให้เกิดเบรกควาน์แต่จะใช้วิธีการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย (Non destructive test) ไดอิเล็กตริกที่สมบูรณ์ตามอุดมการณ์นั้นจะต้องไม่มีกำลังไฟฟ้าสูญเสียและค่าคงตัวไดอิเล็กตริกค่าจริงอาจเขียนได้ว่า

$$\epsilon = \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \quad (6.8)$$

เมื่อ  $\epsilon_r$  = ค่าเปอร์มิตติวิตี สัมพัทธ์  
 $\epsilon_0$  = ค่าเปอร์มิตติวิตีของสุญญากาศ =  $8.854 \times 10^{-12}$  F/m

ในทางปฏิบัติฉนวนหรือไดอิเล็กตริกย่อมมีพลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกซึ่งแบ่งออกได้เป็น 3 รูปแบบคือ

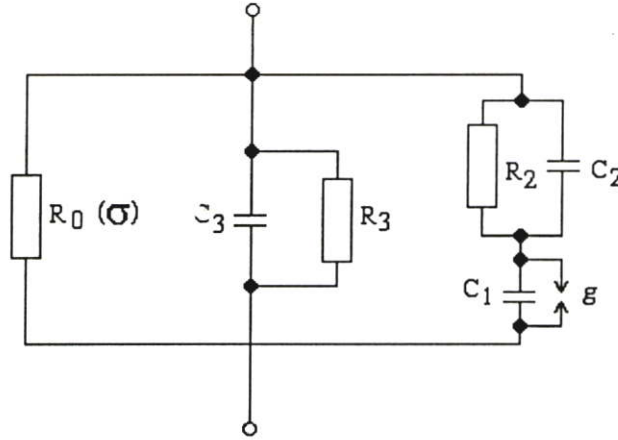
- พลังงานสูญเสียเนื่องจากสภาพนำไฟฟ้า (condition loss)
- พลังงานสูญเสียเนื่องจากโพลาริเซชัน (polarization loss)
- พลังงานสูญเสียเนื่องจากไอโอไนเซชัน (ionization) ในลักษณะของคิสซาร์จบางส่วน

(PD : partial discharge)

พลังงานสูญเสียเหล่านี้เกิดขึ้นได้ในฉนวนเมื่อป้อนแรงดันเข้าไปและจะแปรสภาพเป็นความร้อนขึ้นภายในฉนวนและจะนำความร้อนได้ดี ดังนั้นความร้อนที่เกิดขึ้นจะระบายออกไปได้ยากและเมื่อพลังงานสูญเสียเพิ่มขึ้นความร้อนก็จะยิ่งเพิ่มขึ้น ถ้าอัตราการระบายความร้อนออกยังสูงกว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของความร้อนก็จะยังอยู่ในสภาพสมดุลไม่เกิดความเสียหายต่อฉนวน แต่ถ้าอัตราการระบายความร้อนที่เกิดขึ้นออกไปไม่ทัน ความร้อนเพิ่มขึ้นอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึงค่าหนึ่งก็จะทำให้เกิดเบรกควาน์ได้ ฉะนั้นการตรวจสอบคุณภาพของการฉนวนจึงจำเป็นต้องมีการทดสอบหรือวัดพลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก ซึ่งสามารถประเมินผลได้โดยไม่เกิดการทำลายต่อวัสดุทดสอบ

### 6.3 พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก (Dielectric Loess) ของสายเคเบิล

พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกของฉนวนขึ้นอยู่กับขนาดแรงดันและสภาพแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ เวลาและคุณสมบัติของไดอิเล็กตริกเอง พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกทั้ง 3 แบบดังกล่าว



รูปที่ 6.2 วงจรสมมูลของไดอิเล็กตริกที่แทนพลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก

เนื่องจากสภาพนำไฟฟ้า โพลาริเซชันและดิสชาร์จบางส่วน ในรูปที่ 6.2 เป็นวงจรสมมูลของไดอิเล็กตริกที่แทนพลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก คือ  $R_0$  ( $\sigma$ ) แทนพลังงานสูญเสียเนื่องจากสภาพนำไฟฟ้าของฉนวน  $C_3$  จะแทนค่าความจุไฟฟ้าที่แท้จริงของไดอิเล็กตริกและ  $R_3$  จะแทนพลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกเนื่องจากโพลาริเซชัน และ  $R_2$  แทนพลังงานสูญเสียในฉนวนเนื่องจากดิสชาร์จบางส่วน ส่วน  $C_1$ ,  $C_2$  และสปาร์กแกป  $g$  แทนวงจรสมมูลของดิสชาร์จบางส่วน PD (ดูรายละเอียดเรื่องดิสชาร์จบางส่วน)

#### 6.3.1 พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกเนื่องจากสภาพนำไฟฟ้าแรงดันกระแสดตรง

ในสนามไฟฟ้าคงตัวที่มีแรงดันกระแสดตรง  $E$  ค่าความหนาแน่นของกระแส  $J$  อาจคำนวณโดยอาศัยกฎของโอห์มจากค่าความนำจำเพาะ  $\sigma$  ได้คือ

$$J = \sigma E \quad (6.9)$$

พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกต่อปริมาตรจะหาได้จากสูตร

$$P_d = EJ = \sigma E^2 \quad (6.10)$$

สภาพนำไฟฟ้า  $\sigma$  ของระบบการฉนวนซึ่งประกอบด้วย ของเหลว ของแข็งจะเป็นผลมาจากไอออนสภาพนำไฟฟ้า  $\sigma$  จึงขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ สิ่งเจือปน ปริมาณความชื้น ค่าความต้านทานกระแสรั่ว  $R_0(\sigma)$  ของการฉนวนอาจหาได้โดยการวัดค่ากระแสจากการป้อนแรงดันกระแสตรงคงที่ ผลการวัดจะขึ้นอยู่กับเวลาด้วย ฉะนั้นควรวัดค่าที่ 1 นาทีหลังจากสับสวิตช์แล้วค่าสภาพนำไฟฟ้า  $\sigma$  อาจคำนวณได้จากค่าความต้านทานที่วัดได้แรงดันที่ใช้ในการวัดปกติจะมีค่า 100 โวลต์ หรือ 1,000 โวลต์ ดูรายละเอียดในเอกสารอ้างอิง [11]

### 6.3.2 พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกเนื่องจากกระแสสลับและวงจรมุม

ในกรณีของแรงดันกระแสสลับที่มีความเครียดสนามไฟฟ้า  $\bar{E}$  ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าอาจจะคำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$\bar{J} = (\sigma + j\omega\epsilon)\bar{E} \quad (6.11)$$

ในฉนวนนอกจากพลังงานสูญเสียเนื่องจากสภาพนำไฟฟ้าแล้วยังมีพลังงานสูญเสียเนื่องจากโพลาริเซชันและไอออนไนเซชัน ฉะนั้นค่าคงตัวไดอิเล็กตริกจะมีไม่แต่ค่าจริงอย่างเดียวหากแต่มีจินตภาพด้วยค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสีย  $\tan\delta$  ของฉนวนซึ่งนิยามไว้ว่าเป็นอัตราส่วนค่ากระแสจริง  $I_a$  ต่อค่ากระแสรีแอกทีฟ  $I_b$  คือ

$$\tan\sigma = \frac{I_a}{I_b} = \frac{P_d}{P_b} \quad (6.12)$$

ซึ่งพลังงานสูญเสียประกอบด้วยองค์ประกอบทั้ง 3 ส่วนตามที่กล่าวแล้วคือ

$$P_d = P_\sigma + P_p + P_i \quad (6.13)$$

- เมื่อ  $P_d$  = พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก  
 $P_\sigma$  = พลังงานสูญเสียเนื่องจากสภาพนำไฟฟ้าของฉนวน  
 $P_p$  = พลังงานสูญเสียเนื่องจากโพลาริเซชัน  
 $P_i$  = พลังงานสูญเสียเนื่องจากไอออนไนเซชัน

ค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียจึงเขียนในลักษณะเดียวกันเป็น

$$\tan\delta = \tan\delta_\sigma + \tan\delta_p + \tan\delta_i \quad (6.14)$$

$\delta$  เป็นมุมระหว่างกระแสรวมผ่านไดอิเล็กตริกกับกระแสแอกทีฟขณะนั้นพลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกจะเขียนได้ว่า

$$P_d = P_b \tan \delta = \omega C U^2 \tan \delta \quad (6.15)$$

เมื่อ  $C$  = คือค่าความจุไฟฟ้าของวัสดุทดสอบ

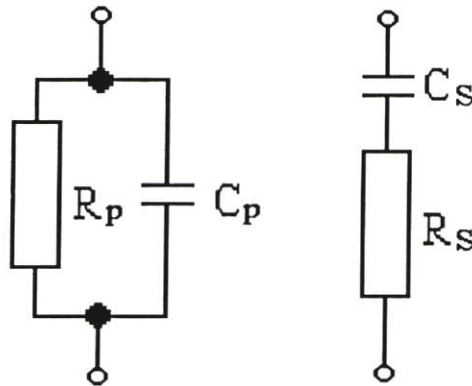
$U$  = คือแรงดันที่ป้อนที่ความถี่

ถ้าคิดเป็นพลังงานสูญเสียต่อหน่วยปริมาตรของฉนวนจะได้ว่า

$$P_d = \omega \epsilon_0 \epsilon' E^2 \tan \delta$$

เมื่อ  $E'$  คือค่าความจุไฟฟ้าของวัสดุทดสอบ และ  $\epsilon' \approx \epsilon_r$

ไดอิเล็กตริกจึงอาจเขียนแทนด้วยวงจรสมมูลได้ดังรูปที่ 6.3 ซึ่งอาจอยู่ในรูปวงจรมานาน (a) หรือวงจรถอนุกรม (b)



รูปที่ 6.3 วงจรสมมูลของไดอิเล็กตริก

(a) วงจรสมมูลขนาน

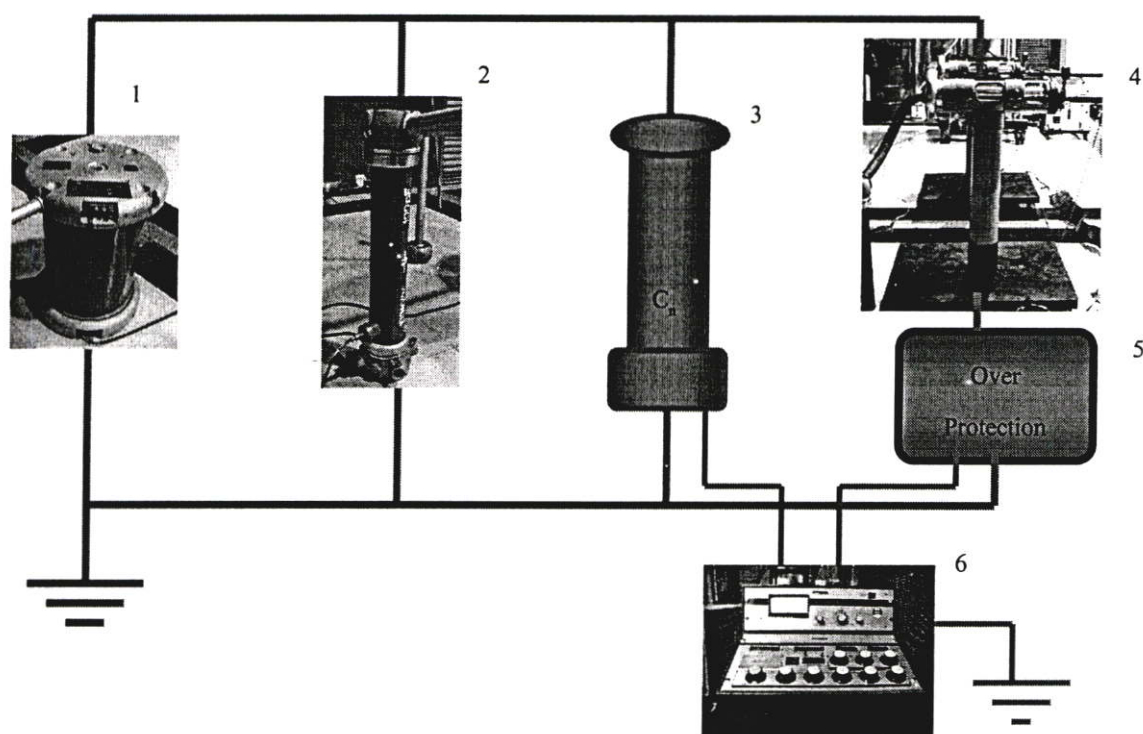
(b) วงจรสมมูลอนุกรม

แฟกเตอร์พลังงานสูญเสียสำหรับวงจรมานานจะได้  $\tan \delta = 1/\omega C_p R_p$

แฟกเตอร์พลังงานสูญเสียสำหรับวงจรถอนุกรมจะได้  $\tan \delta = \omega C_s R_s$

## 6.4 ผลการวัดค่าความจุไฟฟ้าและแฟกเตอร์พลังงานเปล่าไดอิเล็กตริก

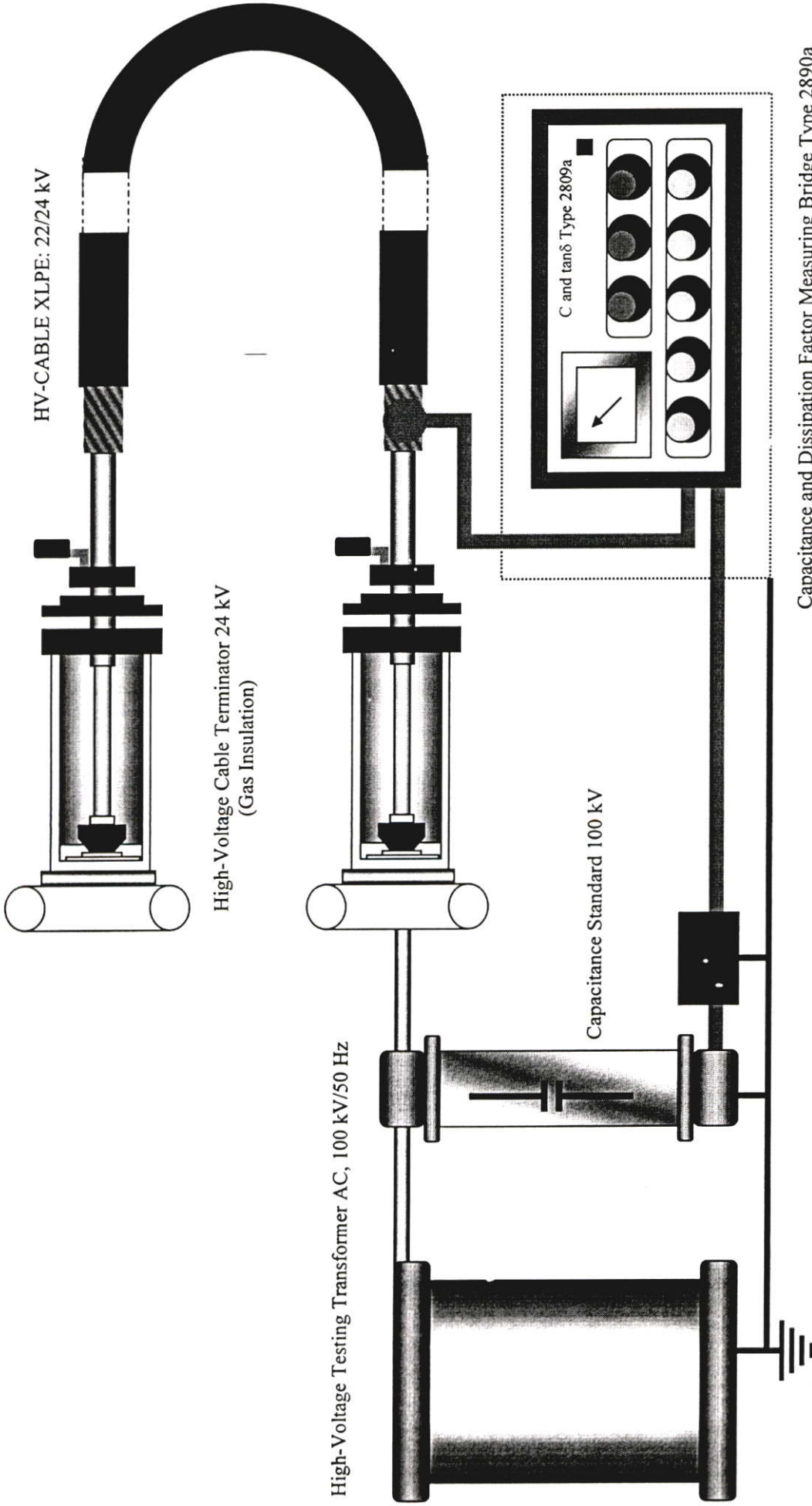
กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกของวัสดุหรืออุปกรณ์ใด ที่ใช้งานกับแรงดันกระแสสลับ สามารถคำนวณหรือประมาณค่าที่แรงดันใช้งาน  $U$  ใดๆ ได้จากสมการ  $P_d = \omega C U^2 \tan \delta$  ซึ่งจำเป็นต้องทราบค่าความจุไฟฟ้า  $C$  และแฟกเตอร์พลังงานสูญเสีย  $\tan \delta$  ทั้งสองค่านี้ สามารถวัดได้ด้วยอุปกรณ์ที่เรียกว่า Schering Bridge ดังรูปวงจรการทำงานของเครื่องวัดในรูปที่ 6.4



รูปที่ 6.4 วงจรการทำงานของการทดสอบหาค่าพลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกที่เกิดขึ้นในสายเคเบิลแรงดันสูง XLPE ขนาดแรงดัน 24 kV 240 Sq. mm

จากรูปที่ 6.4 จะประกอบด้วยอุปกรณ์การต่อวงจรดังนี้

- 1) High Voltage Tranformer 100 kV 5 kVA
- 2) ตัวเก็บประจุแรงสูงแบบกระดาษจุ่มน้ำมัน 100 pF 100 kV
- 3) ตัวเก็บประจุมาตรฐาน 100 nF
- 4) สายเคเบิล THAI – YAZAKI 22/24 kV ขนาด 240 Sq.mm. ฉนวน XLPE ( Object Test )
- 5) Over Protection
- 6) เครื่องวัด Capacitance and dissipation factor bridge type 2809 a



รูปที่ 6.5 วงจรการทำงานของการทดสอบหาค่า Capacitance and Dissipation Factor (tan $\delta$ ) ที่เกิดขึ้นในสายเคเบิลแรงดันสูง XLPE ขนาดแรงดัน 24 kV 240 Sq. mm.

### ขั้นตอนการวัดและทดสอบหาค่าพลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก

- (1) ค่อยๆจรรยาที่ 6.4 แล้วทำการ Vacuum (สุญญากาศ) ภายในท่อออสซิลลิค
- (2) ศึกษาวิธีการใช้ Schering bridge type 2809 a จากคู่มือก่อนการใช้งาน
- (3) เปิดสวิตช์เครื่องมือวัด รอเวลาเครื่อง warm up 3 นาที จากนั้นปรับค่า Cn ตามค่าที่ใช้ทดสอบ
- (4) คำนวณค่ากระแส  $I_x = U_{test} * \omega * C_x$  (Object Test) โดยแรงดันที่ป้อนจะต้องจะต้องไม่เกินขนาดกำหนดของวัสดุ และปรับสวิตช์ ตามกระแสที่คาดหมาย
- (5) เริ่มทดสอบกับวัสดุทดสอบที่ทราบค่าความจุไฟฟ้า ป้อนแรงดันที่ระดับแรงดันทดสอบ 12 kV, 24 kV และ 36 kV ของค่าแรงดันที่กำหนดของวัสดุทดสอบ วัดค่าความจุไฟฟ้า Cx ค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสีย โดยการปรับสมดุลของวงจรบริดจ์ และปรับสวิตช์ Sensitivity เพื่อความละเอียดในการวัด
- (6) ทำการทดสอบซ้ำตามข้อ 1 ถึง 5 และอัดก๊าซออกซิเจน ( $O_2$ ) เข้าไปในท่อออสซิลลิค จำนวน 1 bar และ 2 bar ก่อนการอัดก๊าซออกซิเจน ( $O_2$ ) ควรทำภายในท่อให้เป็นสุญญากาศก่อนเพื่อทำให้ความชื้นภายในท่อหมดไป
- (7) นำค่าที่ได้จากการวัดมาบันทึกในตารางที่ 6.1, 6.2 ,6.3

ตารางที่ 6.1 ผลการทดสอบการวัดค่าคาปาซิแตนซ์ของชุดทดสอบร่วมกับสายเคเบิลในกรณีที่มีอากาศปกติ ที่ความชื้นสัมบูรณ์ที่  $38 \text{ g/m}^3$  อุณหภูมิห้อง  $27.2 \text{ C}^\circ$

Sensitivity	Ucontrol (kV)	Utest (kV)	f (Hz)	Cx test (pF)	Tan $\delta$	Dielectric Loss (mW)
1	12.8	12.99	49.9	2562.20	$7.982 \cdot 10^{-4}$	10.0841
2	12.2	12.85	49.9	2568.34	$7.981 \cdot 10^{-4}$	10.6329
3	12.6	12.82	49.9	2579.54	$7.980 \cdot 10^{-4}$	10.0629
1	25.6	25.84	49.9	2568.90	$7.993 \cdot 10^{-4}$	43.0704
2	25.8	25.67	49.8	2569.67	$7.991 \cdot 10^{-4}$	43.0725
1	39.8	39.97	49.8	2570.94	$7.997 \cdot 10^{-4}$	103.186
2	37.8	38.92	49.8	2579.68	$7.999 \cdot 10^{-4}$	98.1931

ตารางที่ 6.2 ผลการทดสอบการวัดค่าคาปาซิแตนซ์ของชุดทดสอบร่วมกับสายเคเบิลในกรณี

Vacuum (สุญญากาศภายในท่อ) ความชื้นสัมบูรณ์ที่  $38 \text{ g/m}^3$  อุณหภูมิห้อง  $27.5 \text{ C}^\circ$

Sensitivity	Ucontrol (kV)	Utest (kV)	f (Hz)	Cx test (pF)	Tan $\delta$	Dielectric Loss (mW)
1	12.0	13.00	49.9	2561.70	$7.81 \cdot 10^{-4}$	10.6341
2	11.9	12.87	49.9	2566.68	$7.79 \cdot 10^{-4}$	10.4040
3	11.9	12.87	49.9	2563.59	$7.82 \cdot 10^{-4}$	10.4315
1	24.48	26.9	49.9	2574.55	$7.79 \cdot 10^{-4}$	45.5911
2	22.2	24.18	49.8	2574.59	$7.79 \cdot 10^{-4}$	36.8373
1	38.07	40.90	49.8	2594.60	$7.73 \cdot 10^{-4}$	105.398
2	38.04	40.58	49.8	2595.60	$7.74 \cdot 10^{-4}$	105.059

ตารางที่ 6.3 ผลการทดสอบการวัดค่าคาปาซิแตนซ์ของชุดทดสอบร่วมกับสายเคเบิลในกรณีอัด

อากาศจำนวน 2 bar ความชื้นสัมบูรณ์ที่  $38 \text{ g/m}^3$  อุณหภูมิห้อง  $28 \text{ C}^\circ$

Sensitivity	Ucontrol (kV)	Utest (kV)	f (Hz)	Cx test (pF)	Tan $\delta$	Dielectric Loss (mW)
1	12.2	12.89	49.9	2561.20	$7.954 \cdot 10^{-4}$	10.6331
2	12.1	12.75	49.9	2563.80	$7.952 \cdot 10^{-4}$	10.5321
3	12.1	12.81	49.9	2563.40	$7.956 \cdot 10^{-4}$	10.6020
1	24.52	24.88	49.9	2564.60	$7.956 \cdot 10^{-4}$	39.6781
2	24.28	24.75	49.8	2567.82	$7.957 \cdot 10^{-4}$	39.6509
3	24.25	24.71	49.8	2570.65	$7.955 \cdot 10^{-4}$	39.6398
1	38.80	39.92	49.8	2571.80	$7.959 \cdot 10^{-4}$	102.4743
2	37.25	38.72	49.8	2577.20	$7.957 \cdot 10^{-4}$	97.4048
3	37.15	38.58	49.8	2579.57	$7.961 \cdot 10^{-4}$	95.9504

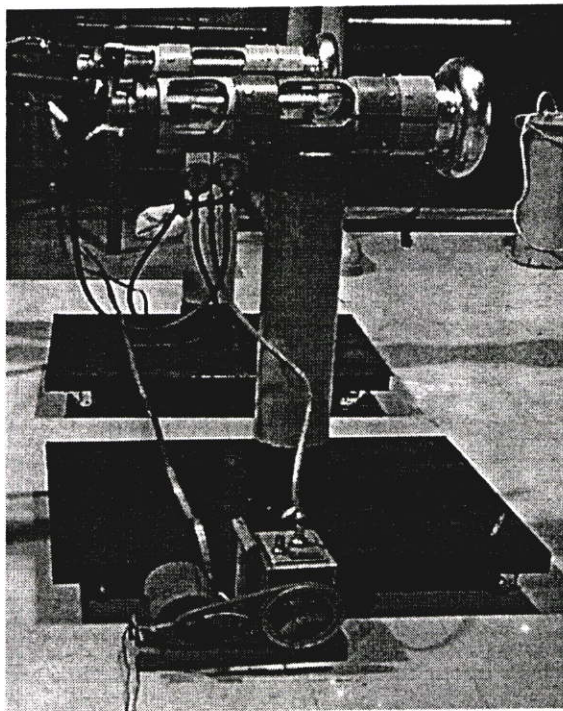
ตารางที่ 6.4 ผลการทดสอบการวัดค่าคาปาซิแตนซ์ของชุดทดสอบร่วมกับสายเคเบิลในกรณีอัด  
ก๊าซออกซิเจน ( $O_2$ ) จำนวน 2 bar ความชื้นสัมบูรณ์ที่  $38 \text{ g/m}^3$  อุณหภูมิห้อง  $28 \text{ C}^\circ$

Sensitivity	Ucontrol (kV)	Utest (kV)	f (Hz)	Cx test (pF)	Tan $\delta$	Dielectric Loss (mW)
1	12.1	12.88	49.9	2560.64	$7.78 \cdot 10^{-4}$	10.3820
2	12.1	12.86	49.9	2563.35	$7.78 \cdot 10^{-4}$	10.3505
3	12.1	12.84	49.9	2563.36	$7.76 \cdot 10^{-4}$	10.9215
1	24.26	24.88	49.9	2579.24	$7.76 \cdot 10^{-4}$	38.9211
2	23.60	24.75	49.8	2578.50	$7.75 \cdot 10^{-4}$	34.9612
1	38.50	39.88	49.8	2596.60	$7.75 \cdot 10^{-4}$	100.5290
2	38.80	40.25	49.8	2595.75	$7.73 \cdot 10^{-4}$	102.4325

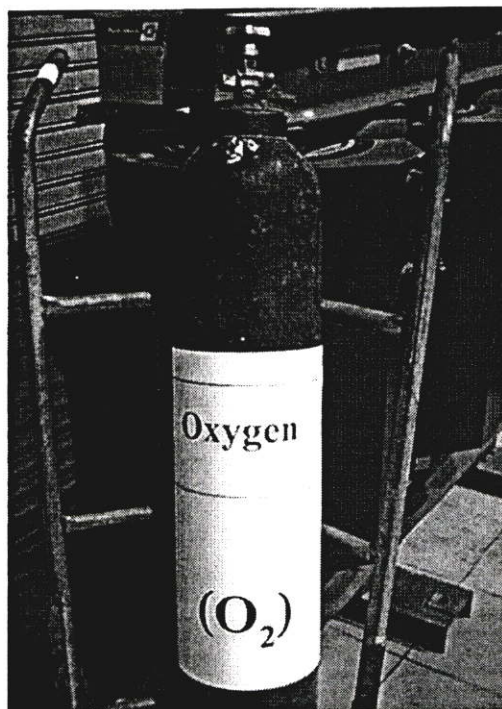
จากตารางที่ 6.1 ,6.2 , 6.3 เป็นตาราง แสดงผลการทดสอบการวัดค่าคาปาซิแตนซ์ของชุดทดสอบ  
ร่วมกับสายเคเบิล ที่แรงดัน 12 , 24 , 36 kV ในกรณี Vacuum , อัดก๊าซออกซิเจน 1bar และ 2 bar



รูปที่ 6.6 เครื่องวัด Capacitance and dissipation factor ( $\tan \delta$ ) bridge type 2809 a



(ก)



(ข)

รูปที่ 6.7 ก) การทำสุญญากาศให้กับอุปกรณ์ทดสอบความเป็นฉนวน

ข) ถังบรรจุก๊าซออกซิเจน ( $O_2$ ) เพื่อใช้ในการบรรจุให้กับอุปกรณ์ทดสอบความเป็นฉนวน

## 6.5 บทสรุป

จากการทดสอบหาค่าพลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกที่เกิดขึ้นกับสายเคเบิลแรงดันสูงพบว่าค่าพลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกที่เกิดขึ้นจากการคำนวณนั้นมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงไม่มาก เมื่อทำการปรับค่าความเป็นฉนวนของก๊าซ โดยการปรับค่าความหนาแน่นของก๊าซที่บริเวณหัวต่อสายเคเบิล โดยทำการเพิ่มและลดความดันของก๊าซค่าพลังงานสูญเสียนั้นๆ ก็ไม่เปลี่ยนแปลงมากนักแต่จะต้องอยู่ในค่าตามมาตรฐานกำหนด

## บทที่ 7

# บทสรุปและวิจารณ์ผลการวิจัย

### 7.1 สรุปผลการวิจัย

จากผลการทดลองที่ได้จะชี้ให้เห็นถึงการเปรียบเทียบของขนาดของสัญญาณ PD ที่เกิดขึ้นแตกต่างกัน เนื่องจากชนิดของฉนวนที่นำมาทดสอบมีความเครียดเป็นสำคัญ จากผลการทดลองเห็นได้ว่าค่า PD ที่เกิดขึ้นจะลดน้อยลงเมื่อมีฉนวนที่ดีขึ้นคือ การใช้ก๊าซออกซิเจนเป็นตัวลดความเครียดสนามไฟฟ้า ค่า PD จะมีค่าต่ำลงเมื่อมีการอัดก๊าซที่มีปริมาณเพิ่มขึ้น แต่ทั้งนี้อาจมีผลของสัญญาณรบกวนภายนอกเข้ามาสู่ระบบการตรวจวัดในการทดสอบสูงมาก ดังนั้นหากไม่สามารถวิเคราะห์หรือแบ่งแยกได้ว่าสัญญาณที่เกิดขึ้นเป็นสัญญาณชนิดใดก็อาจทำให้เข้าใจผิดว่าขนาดของ PD มีค่าสูงเกินกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนด จะพบว่าสัญญาณรบกวนจากภายนอกจะมีขนาดสูงมากและจะเกิดขึ้นเป็นบางช่วงของการทดสอบ นอกจากนี้ค่า PD ที่วัดได้ในรูปฐานวงรี จะเป็นค่า PD ของก๊าซร่วมกับค่า PD ของสายเคเบิลรวมไปถึงค่า PD ที่เกิดขึ้น ในหม้อแปลงทดสอบ และคาปาซิเตอร์ด้วย

จากผลการทดสอบหาค่าคาปาซิแตนซ์ (Cx test) ของชุดทดสอบที่ได้จากการทดสอบในบทที่ 6 จะเห็นได้ว่า การลดความเครียดของสนามไฟฟ้าแบบสุญญากาศ (Vacuum) และแบบการอัดก๊าซออกซิเจน ( $O_2$ ) ที่ความดันอากาศ 1 bar และ 2 bar จะมีค่า คาปาซิแตนซ์อยู่ในช่วง 2550-2600 pF ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับการคำนวณค่าคาปาซิแตนซ์ของสาย ตามการคำนวณคือ 284.09 pF/m ใช้สายขนาด 10 เมตรค่าคาปาซิแตนซ์ของสายที่ได้จากการคำนวณคือ 2840.9pF ซึ่งมีค่าต่างจากการวัดไม่มากนักจากวงจรจะเห็นได้ว่า สามารถใช้ทดสอบสายเคเบิลได้โดยสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการวัดค่าต่าง ๆ ได้ เช่น การวัดค่าดิสชาร์จบางส่วน การวัดค่า คาปาซิแตนซ์ การวัดเฟลคเตอร์สูญเสียการวัดคาสุญเสียไดอิเล็กตริก และการวัดค่าอื่น ๆ ของสายเคเบิลได้

อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่าชุดทดลองนี้จะสามารถใช้งาน ในการทดสอบสายเคเบิลได้แต่ก็ยังมีข้อบกพร่องอยู่เช่นกัน เนื่องจากเมื่อมีการอัดก๊าซเข้าไปภายในท่อที่ความดันสูง ๆ จะมีก๊าซซึมออกมาเพียงเล็กน้อย (เมื่ออัดก๊าซเข้าท่อเสร็จแล้วใช้เวลาประมาณ 20 นาที ความดันในท่อจะคงที่ ที่ 2 bar) เมื่อต้องการวัดหลายครั้งหรือใช้เวลานาน จำเป็นที่จะต้องมาอัดก๊าซใหม่ และก็ยังมีความยุ่งยากในการประกอบฝาครอบ ทำให้เสียเวลาในการประกอบฝาครอบก่อนที่จะทดสอบจากการตรวจเช็คและแก้ไขพบว่าส่วนฝาครอบที่อะคลิลิกสามารถทนความดันภายในท่อได้ไม่มีก๊าซซึมออกมา แต่ส่วนด้านเบ้ารับ Terminator หรือส่วนรับ High Voltage ซึ่งยึดติดกับท่ออะคลิลิกโดยการหล่อเรซิน พบว่ามีก๊าซซึมออกมาระหว่างผิวของเบ้ารับกับเรซิน จะเกิดขึ้นเมื่ออัดก๊าซสูงถึง 4 – 5 bar

**ตารางที่ 7.1** เปรียบเทียบการใช้ น้ำมันและก๊าซ(Compress and Vacuum) เป็นตัวลดความเครียด  
สนามไฟฟ้า

ชนิดของตัวลดความเครียด	
Oil Insulation	Air Compress and Vacuum Insulation
การฟอร์มตัวของฟองก๊าซที่แทรกในฉนวนเหลว	ไม่มีผลต่อการเกิดฟองก๊าซ
ความชื้นที่ผสมอยู่ในน้ำมันทำให้ค่าความคงทนต่อการเบรคดาวน์ลดลง	ภายในท่อเป็นสุญญากาศและก๊าซที่ทำการอัดเป็นก๊าซออกซิเจนบริสุทธิ์จึงไม่มีความชื้น
ค่าความคงทนต่อการเบรคดาวน์ลดลงจากการเกิดปฏิกิริยาของฉนวนน้ำมันเมื่อทำการทดสอบหลายครั้ง	การทดสอบหลายครั้งไม่มีผลกับค่าความคงทนต่อการเบรคดาวน์และยังสามารถปรับค่าความคงทนโดยการปรับความดันภายในท่อ
ฝุ่นผงอาจลงไปปะปนกับน้ำมันทำให้คุณภาพของน้ำมันต่ำลง	ออกแบบให้มีฝาครอบเป็นแบบปิดฝุ่นผงไม่สามารถเข้าไปภายในได้
น้ำมันหม้อแปลงมีราคาแพงและไม่สามารถหาซื้อโดยทั่วไป	ก๊าซออกซิเจนมีราคาถูกและยังสามารถหาซื้อได้โดยทั่วไป (การ Vacuum ไม่มีค่าใช้จ่าย)

## 7.2 ข้อเสนอแนะ

ดังนั้นแนวทางการพัฒนาชุดทดสอบนี้ โดยการออกแบบในลักษณะของโครงสร้างที่จุดต่อของตัวนำสายเคเบิลที่มีอุปกรณ์ในการป้องกันความดันอากาศซึมเข้าบริเวณที่เป็นตัวนำของสายเคเบิล และในส่วนของฝาที่ใช้ในการปิดขั้วต่อสายเคเบิลจะต้องออกแบบให้สามารถใช้กับขนาดสายเคเบิลที่มีพิกัดแรงดันใช้งานเพิ่มขึ้นในอีกระดับหนึ่ง เช่น 36 kV, 48 kV

## เอกสารอ้างอิง

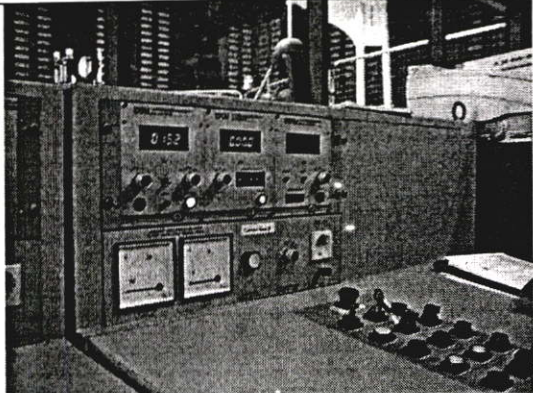
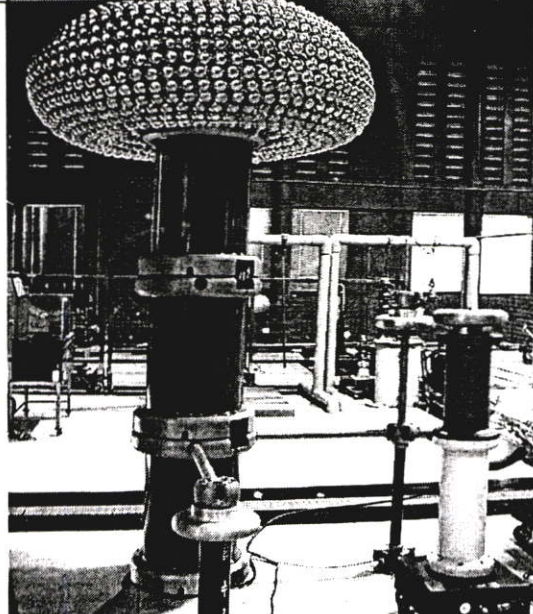

- [1.] F.H. Kreuger, Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment, Technical University, Delft, 1981.
- [2] R. Bartnikas, K. D. Srivastava, Power and Communication Cable Theory and Applications, Mc Graw Hill, 1999.
- [3] E. Kuffel and W. S. Zaengl, Fundamental of High-Voltage Engineering, Department of Electrical Engineering, Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, Switzerland, 1984.
- [4] N. Ab.ned, O. Morel, N. Srinivas “Partial Discharge Measurement in Transmission Cable Terminations” IEEE Transec. On Dielectric and Electrical Insulation, Nov., 1993, p.p. 14-24
- [5] J. C. Chan, P. Duffy, L. J. Hiiivala, Partial Discharge Part VIII, “ PD Testing of Solid Dielectric Cable” IEEE Electrical Insulation Magazine Sep./Oct. 1991 Vol.7 No.5 pp. 9-20
- [6] IEC Standard Publication No. 270, Second edition, “Partial Discharge Measurements” 1981.
- [7] IEC Standard Publication No. 885-3, First edition, “Electrical test methods for electric cables. Part 3: Test methods for partial discharge measurement lengths of extruded power cable” 1988.
- [8] IEC Standard Publication No. 60502-1, First edition, “ Power cable with extruded insulation and their accessories for rated voltage from 1 kV up to 30 kV” 1998.
- [10] C. Boonseng, P. Apiratikul and K. Nakaviwat, “ A High Voltage Cables Terminator for Partial Discharge and Dielectric Loss Measurement”, IEEE 2002 International Symposium on Electrical Insulation ISEI’2002, April 7-10 2002, Boston Massachusetts USA, pp62-65.
- [11] ตำรวย สังข์สะอาด. “วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง” ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, มกราคม 2528.
- [12] ตำรวย สังข์สะอาด, ณรงค์ ทองฉิม, “การพัฒนาออกแบบสร้างระบบตรวจหาตำแหน่งที่เกิดดิซชาร์จบางส่วนในสายเคเบิลแรงสูงโดยใช้คอมพิวเตอร์พื้นฐาน”, กาประชุมทางวิศวกรรมไฟฟ้ากำลังปี2000, 2542.

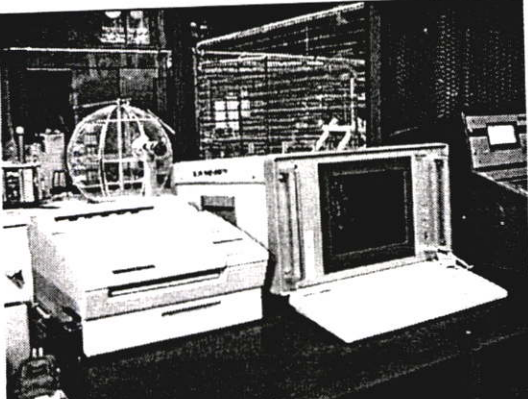

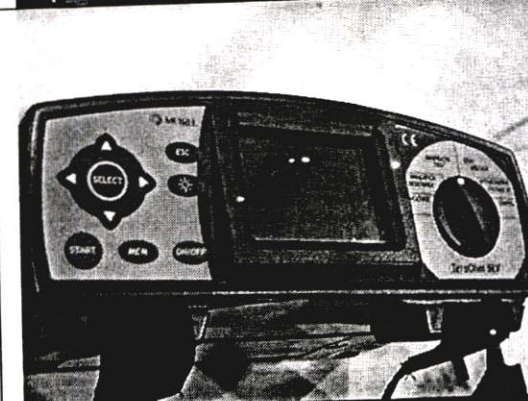
- [13] ชำนาญ ห่อเกียรติ, “วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง” ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2532.
- [14] สุรพล คำรงกิตติกุล, “วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง” ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยวิทยาลัยเชียงใหม่, 2535.
- [15] ศิริวัฒน์ โภธิเวชกุล, “เอกสารประกอบคำสอนวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง” ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2542.
- [16] จงรักษ์ บุญเส็ง, “เอกสารประกอบคำสอนวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง” ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2544.
- [17] จงรักษ์ บุญเส็ง, “การวัดค่าดิสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิลแรงดันสูง” บทความทางวิชาการ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2534
- [18] พร้อมศักดิ์ อภิตติกุล จงรักษ์ บุญเส็ง และ กนกพล นาคะวิวัฒน์ “ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูง XLPE สำหรับการทดสอบดิสชาร์จบางส่วน ตอนที่ 1: การออกแบบและสร้างขั้วต่อสายเคเบิล” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 24, 22-23 พฤศจิกายน 2544, หน้า 77-82.
- [19] พร้อมศักดิ์ อภิตติกุล จงรักษ์ บุญเส็ง และ กนกพล นาคะวิวัฒน์ “ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูง XLPE สำหรับการทดสอบดิสชาร์จบางส่วน ตอนที่ 2: การทดสอบดิสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิล” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 24, 22-23 พฤศจิกายน 2544, หน้า 83-88.

**ภาคผนวก**

## ภาคผนวก ก.

## รูปถ่ายชิ้นงานและอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบ

รูปถ่าย	รายละเอียด
	<p>High Voltage Control Unit HAEFELY TRENCH</p>
	<p>AC High Voltage Transformer Output 300 kV/50Hz HAEFELY TRENCH</p> <p>And Standard Capacitor 100 pF 100 kV HAEFELY TRENCH</p>
	<p>Digital Metering High Voltage HVAC, HVDC, and Impulse HAEFELY TRENCH</p>

รูปถ่าย	รายละเอียด
	<p>Partial Discharge Analyzer TE-571 HAEFELY TRENCH</p>
	<p>Capacitance and Dissipation Factor Measurement Type 2809a HAEFELY TRENCH</p>
	<p>High Voltage Diagnostic Tester (TesraOhm 5 kV) METREL</p>
	<p>ชุดทดสอบไดอิเล็กตริกของก๊าซใช้ในการ ทดสอบที่ความดันสูงที่ 0-5 bar และ สุญญากาศที่ 0-30 in. Hg. HAEFELY TRENCH</p>

## ภาคผนวก ข.

### ผลงานที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ที่ได้รับการตีพิมพ์

1. C. Boonseng, P. Apiratikul and K. Nakaviwat, “ A High Voltage Cables Terminator for Partial Discharge and Dielectric Loss Measurement”, IEEE 2002 International Symposium on Electrical Insulation ISEI'2002, April 7-10 2002, Boston Massachusetts USA, pp62-65.
2. พร้อมศักดิ์ อภิริติกุล จงรักษ์ บุญเส็ง และ กนกพล นาคะวิวัฒน์ “ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูง XLPE สำหรับการทดสอบดิสชาร์จบางส่วน ตอนที่ 1: การออกแบบและสร้างขั้วต่อสายเคเบิล” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 24, 22-23 พฤศจิกายน 2544, หน้า 77-82.
3. พร้อมศักดิ์ อภิริติกุล จงรักษ์ บุญเส็ง และ กนกพล นาคะวิวัฒน์ “ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูง XLPE สำหรับการทดสอบดิสชาร์จบางส่วน ตอนที่ 2: การทดสอบดิสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิล” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 24, 22-23 พฤศจิกายน 2544, หน้า 83-88.



# CONFERENCE RECORD OF THE 2002 IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ELECTRICAL INSULATION

The Boston Park Plaza Hotel  
Boston, Massachusetts

April 7-10, 2002

Sponsored by the IEEE



DIELECTRICS AND ELECTRICAL  
INSULATION SOCIETY

## A High Voltage Cables Terminator for Partial Discharge and Dielectric Loss Measurement

C. Boonseng and P. Apiratikul

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520 Thailand  
kbjongru@kmitl.ac.th

K. Nakaviwat

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering  
Rajamangala Institute of Technology, Patthumthanee 12110 Thailand

**Abstract:** This paper presents a design of the cable connector used in partial discharge and dielectric loss tests. The body of the connector is constructed using the acrylic tube and PVC, and the oil is used as an insulating medium. In order to implement the connector, partial discharges and the dielectric loss ( $\tan \delta$ ) of a cable are tested according to IEC standards. It is found that the cable connector proposed can give the satisfactory and reasonably accurate results from the measurements. In addition, the cost of the construction of the connector developed is cheaper than that of the commercial module.

### INTRODUCTION

Nowadays, electrical solid insulations have been used extensively in electrical power devices; particularly in cables. Most solid insulations are developed from polymeric materials. There are two important electrical characteristics for polymeric insulations, which are the partial discharge level and the dielectric loss ( $\tan \delta$ )[1,2]. It is necessary for cable manufacturers to perform tests on the partial discharge level as well as on the dielectric loss. In order to perform such tests, a cable connector is required [1,2,3,4]. The cable connector is available from the commercial sectors. However, it is difficult for small laboratories to acquire such a device due to the price. This paper is aimed to present a development and a construction of the cable connector using local components available in Thailand. Three types of insulating materials: air, palm oil (vegetable cooking oil) and transformer oil, are used in the connector. The Connector, then, is implemented in partial discharge and dielectric loss tests for an underground cable. Results measured from the tests are shown.

### CONSTRUCTIONS OF A CABLE CONNECTOR

When performing partial discharge tests and dielectric loss tests for a cable, outer parts of the cable have to be taken off. The conductor of the cable, then, is covered by a terminator and is connected to terminals of a transformer which is a supply for performing partial discharge tests and dielectric

loss tests. The requirement of the cable termination is that the termination needs a sufficient clearance distance between the conductor and the ground part. The inner part of the connector was designed to have a sufficient length to cover all the bare conductor of the cable. The inner part was filled with the insulating medium. The material used for the inner part was acrylic tube so that the inner part was transparent for checking a level of the insulating medium. A solid cylindrical aluminium was connected at the end of the inner part of the connector in order to provide a socket for one terminal from the transformer. The joint between the acrylic tube and the cylindrical aluminium was sealed using polyester resin in order to reduce the electric stress around the joint, and also protected the leakage of the insulating medium. At the joint between the inner part and the terminal from the transformer, a stress control device in a shape of toroid was placed.

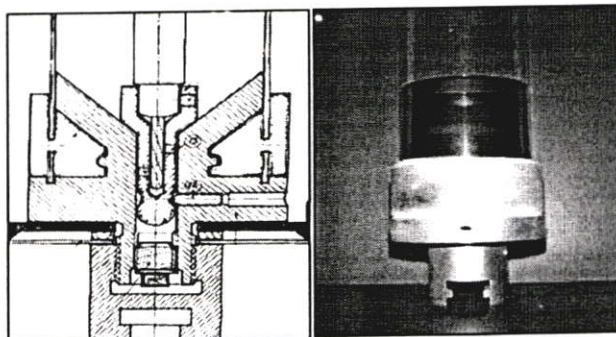


Figure 1. The joint between the acrylic tube and the cylindrical aluminium at the inner part of the connector

The outer part of the connector was PVC, and this was a base to support the inner part of the connector. Figures 1 and 2 show the detail of the constructed cable connector while Figure 4 illustrates an arrangement of the connector for performing cable tests.

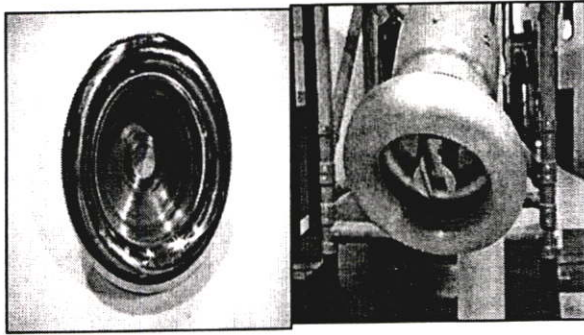


Figure 2. The electric stress control

**PARTIAL DISCHARGE TESTS AND MEASUREMENT FOR A CABLE**

Partial discharge tests were performed in order to implement the constructed cable connector [3,5]. The cable used in the tests was the XLPE 12/20 kV underground cable. Three types of insulating materials for the cable connector were used : air, palm oil and transformer oil. Partial discharge tests were performed at the voltage levels of 12 kV and 21 kV. Experimental results are shown in Figures 6,7 and 8. From these Figures, it can be found that the discharge levels obtained when using the palm oil and the transformer oil as an insulating medium for the cable connector are in the acceptable level without an excessive noise.

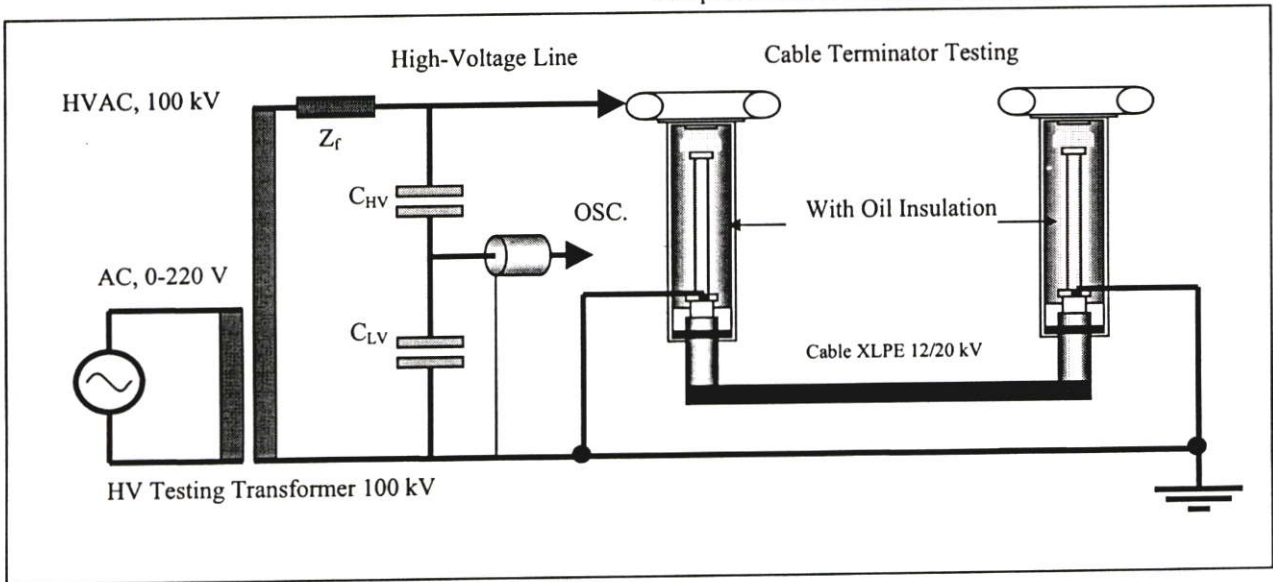


Figure 4. Schematic diagram for cable tests

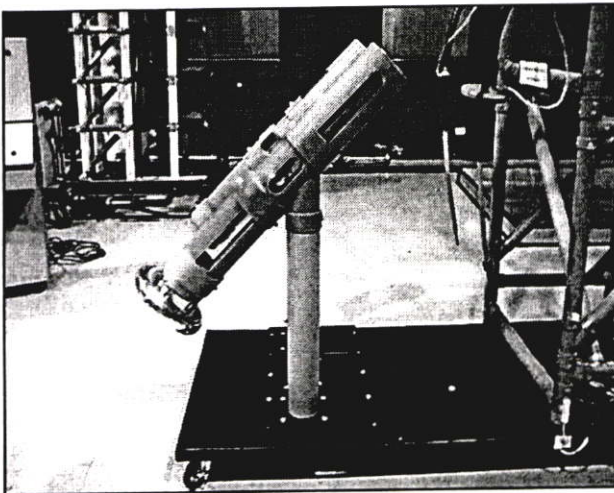


Figure 3. The constructed cable connector

The discharge level obtained when using the air as an insulation for the connector is higher than the normal discharge level for a cable. This is due to the excessive noise from the corona discharges within the connector.

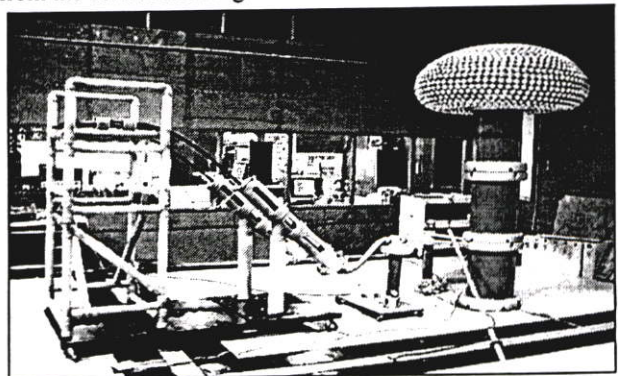


Figure 5. An arrangement of the cable connector in cable tests

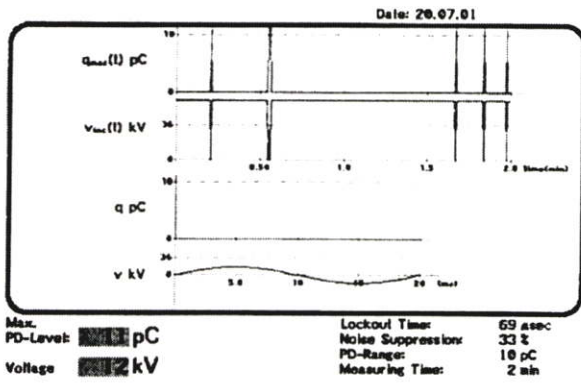


Figure 6. Partial discharge results with air as an insulating material at 12 kV, PD-Level: 11 pC

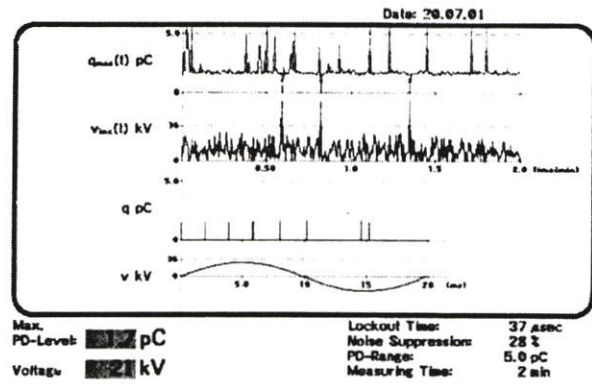


Figure 9. Partial discharge results with palm oil as an insulating material 21 kV, PD-Level: 1.7pC

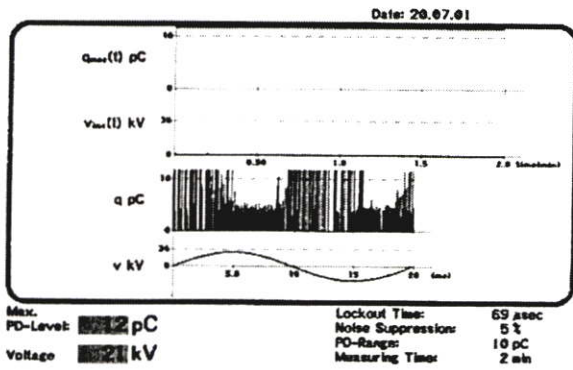


Figure 7. Partial discharge results with air as an insulating material at 21 kV PD-Level: 12pC

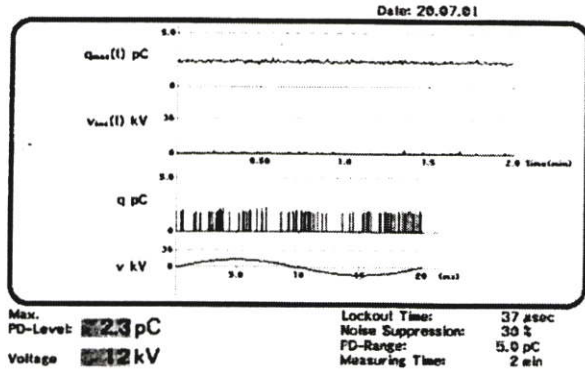


Figure 10. Partial discharge results with transformer oil as an insulating material at 12 kV PD-Level: 2.3pC

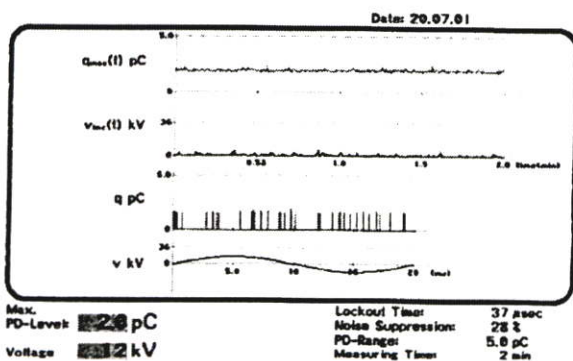


Figure 8. Partial discharge results with air as an insulating material at 12 kV, PD-Level: 2.0pC

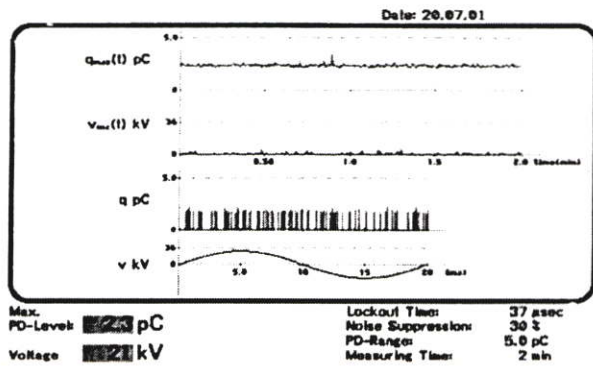


Figure 11. Partial discharge results with transformer oil as an insulating material at 21kV PD-Level: 2.3pC

## DIELECTRIC LOSS TESTS FOR A CABLE

The cable connector was employed in dielectric loss tests on the XLPE cable as well. The insulating medium for the connector as well as the test voltage levels were the same as those employed in the partial discharge tests. Experimental results are shown in Tables 1,2 and 3.

Table 1. Dielectric loss tests with air as an insulation

$U_{\text{control}}$ (kV)	$U_{\text{test}}$ (kV)	$C_{X_{\text{test}}}$ (pF)	$\text{Tan } \delta$
5.1	4.854	1105.95	$1.011 \cdot 10^{-3}$
5.1	5.258	1105.88	$1.023 \cdot 10^{-3}$
10.1	10.78	1105.47	$1.008 \cdot 10^{-3}$
10.1	10.86	1106.63	$1.011 \cdot 10^{-3}$
12	11.75	1104.66	$1.015 \cdot 10^{-3}$
12	12.43	1106.13	$1.013 \cdot 10^{-3}$
20.76	21.56	1105.97	$1.984 \cdot 10^{-3}$
20.76	21.58	1106.35	$2.132 \cdot 10^{-3}$
20.76	21.58	1105.95	$2.215 \cdot 10^{-3}$
20.76	21.63	1106.69	$2.211 \cdot 10^{-3}$

Table 2. Dielectric loss tests with palm oil as an insulation

$U_{\text{control}}$ (kV)	$U_{\text{test}}$ (kV)	$C_{X_{\text{test}}}$ (pF)	$\text{Tan } \delta$
5.1	5.328	1108.55	$0.624 \cdot 10^{-3}$
5.1	5.235	1108.12	$0.653 \cdot 10^{-3}$
10.1	11.14	1107.95	$0.757 \cdot 10^{-3}$
10.1	11.15	1108.34	$0.854 \cdot 10^{-3}$
12	12.95	1108.45	$0.805 \cdot 10^{-3}$
12	12.15	1108.43	$0.807 \cdot 10^{-3}$
20.76	21.56	1107.63	$0.945 \cdot 10^{-3}$
20.76	21.63	1107.75	$0.942 \cdot 10^{-3}$
20.76	22.57	1108.55	$0.985 \cdot 10^{-3}$
20.76	22.05	1108.90	$0.948 \cdot 10^{-3}$

Table 3. Dielectric loss tests with transformer oil as an insulation

$U_{\text{control}}$ (kV)	$U_{\text{test}}$ (kV)	$C_{X_{\text{test}}}$ (pF)	$\text{Tan } \delta$
5.1	4.854	1325.95	$0.406 \cdot 10^{-3}$
5.1	5.462	1324.88	$0.430 \cdot 10^{-3}$
10.1	11.54	1426.86	$0.510 \cdot 10^{-3}$
10.1	11.64	1434.86	$0.519 \cdot 10^{-3}$
12	12.66	1421.26	$0.586 \cdot 10^{-3}$
12	12.43	1428.29	$0.595 \cdot 10^{-3}$
20.76	21.56	1421.06	$0.650 \cdot 10^{-3}$
20.76	21.63	1332.13	$0.682 \cdot 10^{-3}$
20.76	21.68	1330.86	$0.643 \cdot 10^{-3}$
20.76	21.65	1330.88	$0.775 \cdot 10^{-3}$

## CONCLUSIONS

A cable connector has been constructed for using with a partial discharge detector and a Schering bridge. Components used in the connector are available from local suppliers in Thailand. The connector proposed in this paper, has been implemented in partial discharge tests and dielectric loss tests for the XLPE cable. Three insulating mediums: air, palm oil and transformer oil, have been used in the connector. It has been found that the results obtained from partial discharge tests and dielectric loss tests using the developed connector are in the satisfactory level. Further work will be a study of the electric field distribution using numerical methods so that the optimum design of the connector can be obtained.

## ACKNOWLEDGEMENT

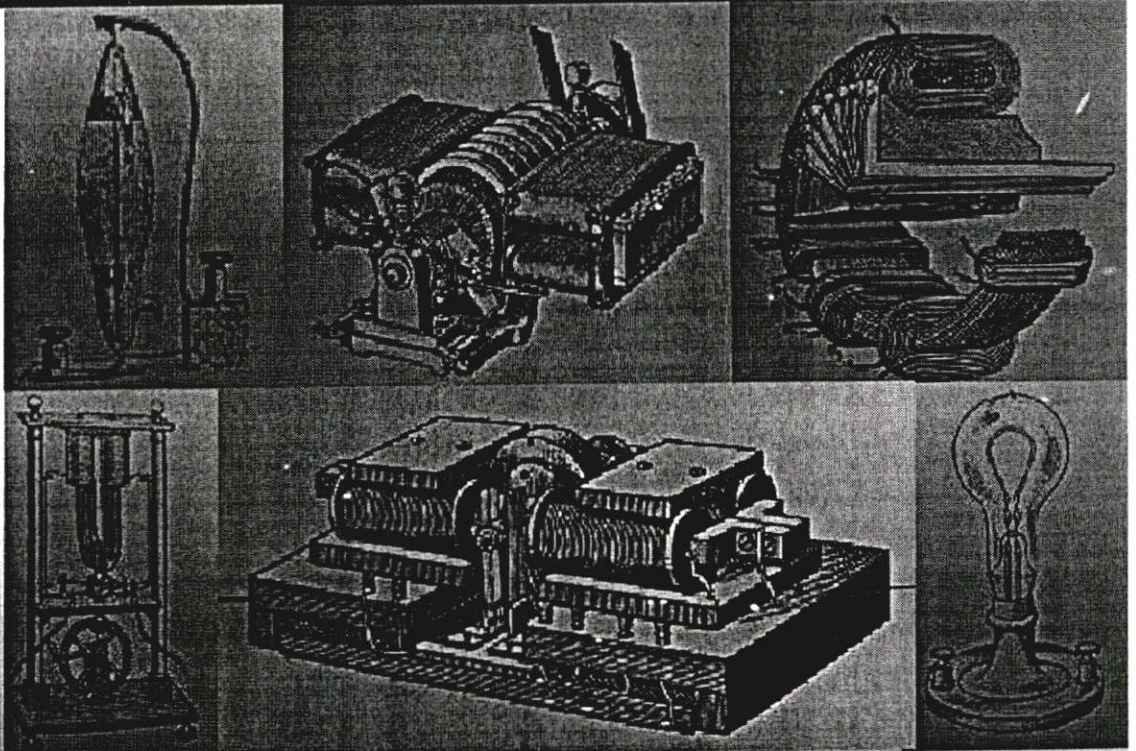
Authors would like to acknowledge the support for instruments and measurements from the staff of the High Voltage Engineering Laboratory, Department of Electrical Engineering, Rajamangala Institute of Technology, Pathumthanee.

## REFERENCES

- [1] Haefely catalogue 'Cable test terminations'
- [2] Bungay E.W. and McAllister D. 'Electric cables handbook' BSP Professional books, 2<sup>nd</sup> edition, 1990
- [3] Kreuger F.H. 'Partial discharge detection in high voltage equipment' Delft University, 1981
- [4] Chan J.C., Duffy P. and Hiivala L.J. 'PD testing of solid dielectric cable' IEEE Electrical Insulation magazine, September/October 1991, pp. 9-20
- [5] IEC standard No. 270 'Partial discharge Measurements', 1981

# การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 24

## 24th Electrical Engineering Conference (EECON-24)



22 - 23 พฤศจิกายน 2544

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

## ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูง XLPE สำหรับการทดสอบคิซาร์จบางส่วน

### ตอนที่ 1: การออกแบบและสร้างขั้วต่อสายเคเบิล

#### Terminator for Partial Discharge Testing of XLPE High Voltage Cables

#### Part I: Design and Construction of a Terminator

พร้อมศักดิ์ อภิรติกุล\* จงรักษ์ บุญเต็ง\* กนกพล นาคะวิวัฒน์\*\*

\*ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ถ.ฉลองกรุง ลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

\*\*ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล รัตนโกสินทร์ นวมัยยิก ถนนลาดพร้าว อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110

โทรศัพท์ +66(0)-2549-3569 โทรสาร +66(0)-2549-3422 e-mail: apiratikul@hotmail.com

#### บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นกรนำเสนอวิธีการออกแบบและสร้างชุดทดสอบสายเคเบิลแรงดันขนาด 12/20 กิโลโวลต์ 35 ตารางมิลลิเมตร การทดสอบคิซาร์จบางส่วนและพลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกเป็นปัจจัยในการควบคุมคุณภาพของฉนวนในสายเคเบิล ซึ่งในการทดสอบจะใช้ขั้วต่อสายเคเบิลที่ออกแบบและสร้างขึ้นมาใช้ในการทดสอบเองนี้ จะใช้วิธีการควบคุมสนามไฟฟ้าของสายเคเบิลแบบ Refractive Stress Control กับสายเคเบิล ด้วยการที่ติดตั้งของการออกแบบ และในโครงสร้างของขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงจะใช้วัสดุพีวีซีและน้ำมันหม้อแปลงเป็นฉนวนใช้ในการควบคุมสนามไฟฟ้าเพื่อทดสอบสายเคเบิลมาตรฐานการทดสอบของ IEC No.270, 60502, และ 885-3 โดยผลการทดสอบมีเหตุผลที่น่าพอใจและยอมรับได้ตามมาตรฐาน ซึ่งในการวัดคิซาร์จบางส่วนและพลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกอยู่ในระดับมาตรฐาน และยังมีส่วนเสริมในเรื่องของงบประมาณที่น้อยในการออกแบบและสร้างขั้วต่อสายเคเบิลสำหรับทดสอบสายเคเบิลเมื่อเปรียบเทียบกับเชิงพาณิชย์

#### Abstract

This paper presents design and construction of a terminator test is high voltage cables. The cable used in experiments has a rate voltage of 12/20 kV and a diameter of 35 mm<sup>2</sup>. A partial discharge level and the dielectric loss are important factors to indicate the insulation quality of the cable. In the measurement of the partial discharge and the dielectric loss a cable connector is required. This paper present a design of the cable terminator. The calculation is based on the refractive stress control so that the optimum electric stress can be obtained. The body of the connector is constructed using the PVC and the oil is used as an insulating medium. In

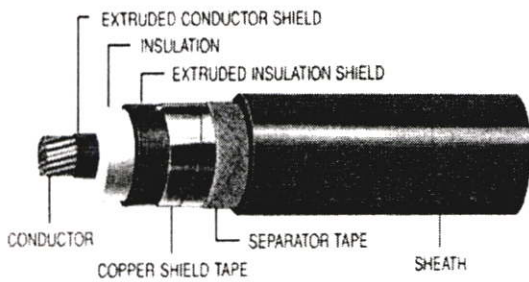
order to implement the connector, a partial discharge and the dielectric loss (tanδ) of a cable are tested according to IEC standards No.60502, No.835-3 and No.270. It is found that the proposed cable terminator cans give the satisfactory and reasonably accurate results from the measurements. In addition, the cost of the construction of the connector developed is much cheaper than that of the commercial module.

#### 1. บทนำ

เนื่องจากปัญหาสภาพเศรษฐกิจของประเทศในปัจจุบันมีปัญหาในเรื่องของค่าเงินบาทเป็นอย่างมากการที่จะนำเข้าเครื่องมือหรืออุปกรณ์การทดสอบทางวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงซึ่งในอดีตสามารถจัดซื้อหรือนำเข้ามาในประเทศก็มีราคาสูงอยู่แล้วแต่ปัจจุบันค่าของเงินยังสูงเป็นเท่าตัว ฉะนั้นการศึกษาค้นคว้าวิจัยทางวิศวกรรมศาสตร์ของประเทศควรคำนึงถึงประโยชน์และการนำไปใช้งานให้เหมาะสมลดต้นทุนการผลิตที่สูงหรือการเสียบุคลากรค่า ในส่วนของโรงงานผลิตสายเคเบิลแรงสูงของประเทศที่มีเพิ่มขึ้นในการติดตั้งสายเคเบิลแรงดันสูงฝังใต้ดินหรือเคเบิลสายใต้น้ำ(Under Ground Cable) ให้มีความเหมาะสมกับภูมิทัศน์ที่สวยงาม การตรวจสอบก่อนการติดตั้งใช้งานจึงมีความสำคัญยิ่งตามมาตรฐานการทดสอบที่กำหนดโดยสามารถออกแบบและสร้างชุดทดสอบสายเคเบิลแรงดันสูง XLPE 12/20 กิโลโวลต์ขนาด 35 ตารางมิลลิเมตรเป็นชุดทดสอบต้นแบบเพื่อพัฒนาใช้กับขนาดต่างๆของสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวน XLPE และในส่วนของการทดสอบคิซาร์จบางส่วนจะมีการนำเสนอในรายละเอียดและขั้นตอนในการทดสอบจะกล่าวในตอนต่อไป ของบทความเรื่องนี้ที่จะนำเสนอรายละเอียดการทดสอบคิซาร์จบางส่วนในสายเคเบิลต่อไป

2. ทฤษฎีและหลักการพื้นฐาน

สายเคเบิลแรงดันสูงฉนวน Cross-linked Polyethylene ผลิตขึ้นจาก Ethylene Gas ซึ่งได้เปลี่ยนแปลงเป็น Low Density Polyethylene ทำให้ส่วนเล็กภายใต้แรงกดดันประมาณ 50,000 psi XLPE เป็น Homo Polymer ชนิดหนึ่งที่มีโครงสร้างเป็นส่วนเล็กๆ เชื่อมโยงทางเคมี โดยโมเลกุล Carbon ของ Polyethylene โดยค่า 1 โมเลกุลจะมี Carbon atom ประมาณ 1,000-4,000 atom ทำการเชื่อมโยงถึงกันเป็นลูกโซ่ XLPE มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าเหมือน PE ทุกประการเมื่อทำการ Bonding ระหว่างโมเลกุลของ PE แล้วทำให้ XLPE มีคุณสมบัติทางกล ทางกายภาพและความร้อน มีค่า Tensile Strength ต่ำกว่า PE เดิมที่อุณหภูมิสูงฉนวน XLPE จะผลิตขึ้นโดยกระบวนการที่ต่อเนื่องที่รวมทั้งการ Extrusion ฉนวนและ Screening layer ไปพร้อมกันตั้งแต่ต้นจนจบกระบวนการฉนวน XLPE ซึ่งจะมีลักษณะของโครงสร้างสายเคเบิลแรงดันสูงดังรูปที่ 1



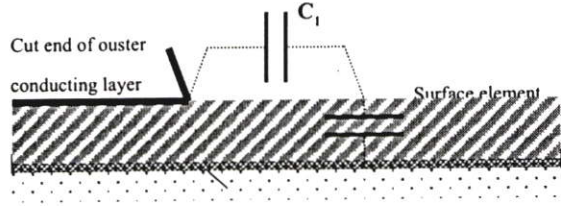
รูปที่ 1 ส่วนประกอบของสายเคเบิลแรงดันสูง XLPE

2.1 การควบคุมการหักเหของสนามไฟฟ้า (Refractive Stress Control)

ในหลักการออกแบบจุดต่อเชื่อมสายเคเบิลแรงดันสูงจะเลือกใช้วิธีการทดสอบฉนวนสายเคเบิล ซึ่งใช้แรงดันทดสอบระหว่างตัวนำกับชั้นกึ่งตัวนำ (Semiconductor) ที่มีหน้าที่เป็นสายกราวด์ในการทดสอบสายเคเบิลที่ไม่มีข้อต่อพิเศษ ถ้าทำการทดสอบลักษณะดังกล่าวจะเกิดการวาวไฟตามผิว (Flashover) เนื่องจากระยะห่างระหว่างแรงดันสูงกับสายชิลด์หรือต่อสายลงกราวด์น้อยมาก ปัญหาที่เกิดขึ้นนี้สามารถแก้ไขได้โดยการเพิ่มระยะห่างระหว่างแรงดันสูงกับส่วนของกราวด์ โดยการติดตั้งสายกึ่งตัวนำด้านนอกบางส่วนซึ่งจะนำไปสู่ ค่าสนามไฟฟ้าที่ขอบของสายกึ่งตัวนำด้านนอกจะเกิดค่าสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง ในรูปของค่าคาปาซิแตนซ์ที่เกิดขึ้นที่สายเคเบิลแรงดันสูงดังรูปที่ 2 จากทฤษฎีการหาค่าสนามไฟฟ้าของรูปทรงกระบอกซ้อนกัน จากแบบลักษณะของอิเล็กโทรดของสายเคเบิลได้ดังสมการที่ (1) เพื่อป้องกันการเกิดโคโรนาที่จุดต่อสายเคเบิลและคิซซารข้างบางส่วน

เมื่อ  $r_1$  = รัศมีภายใน (Cm)  $r_2$  = รัศมีภายนอก (Cm)  
 $r_x$  = รัศมีเฉลี่ยใดๆ (Cm)  $E_{rx}$  = สนามไฟฟ้าที่รัศมีใดๆ (kV/Cm)

$$E_{rx} = \frac{V}{r_x^2 \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)} \quad (r_1 \leq r_x \leq r_2) \quad (1)$$

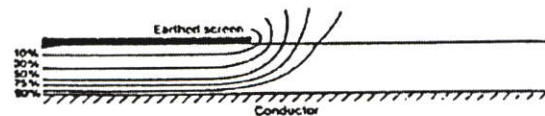


รูปที่ 2 ลักษณะการเกิดค่าคาปาซิแตนซ์ในสายเคเบิล

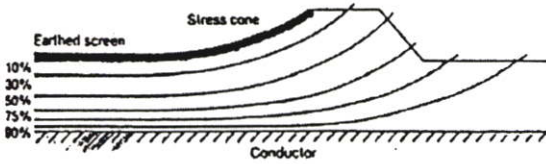
ปกติค่าสนามไฟฟ้าของสายเคเบิลจะกระจายอย่างสม่ำเสมอในฉนวนระหว่างตัวนำและชั้นสารกึ่งตัวนำนอก แต่การปกอกสายเคเบิลแรงดันสูงสำหรับการทดสอบจะทำให้เกิดลักษณะดังรูปที่ 2 ซึ่งจะไปสู่การเบรคความในฉนวนได้เนื่องจากค่าความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณที่เกิดการแยกระหว่างสายตัวนำและสายชิลด์ จึงจำเป็นต้องควบคุมสนามไฟฟ้าในบริเวณนั้นให้เกิดความไม่สม่ำเสมอที่น้อยที่สุด โดยวิธีการควบคุมการหักเหของสนามไฟฟ้า โดยจะพิจารณาค่าคาปาซิแตนซ์ 2 ตัวคือ ตัวที่หนึ่ง ค่าคาปาซิแตนซ์ระหว่างชั้นของตัวนำที่ถูกตัดออกจากฉนวน ( $C_1$ ) ตัวที่สองค่าคาปาซิแตนซ์ระหว่างฉนวนกับตัวนำ ( $C_0$ ) ความสัมพันธ์ระหว่างคาปาซิแตนซ์กับแรงดันระหว่างฉนวนกับชั้นสารกึ่งตัวนำที่ถูกตัดออกเป็นดังสมการ

$$U_n \cong E_d \sqrt{C_1 / C_2} \quad (2)$$

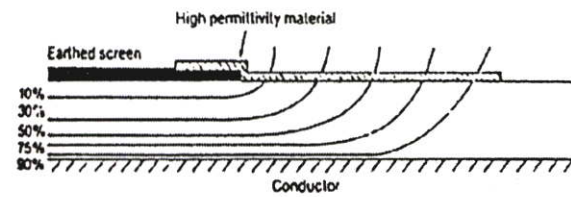
เมื่อทำ Splicing และ Terminating สายไฟฟ้าเส้นหนึ่งๆจะประกอบด้วยปลายสายอยู่สองข้างด้วยกัน ระหว่างสายตัวนำไฟฟ้ากับ Shield ซึ่งถูกต่อลงดินจะถูกคั่นด้วยฉนวนที่มีความหนาแน่นไม่มากนัก เมื่อป้อนแรงดันให้สายไฟฟ้า จะเกิดความต่างศักย์ระหว่างสายตัวนำกับ Shield ถ้าระยะห่างไม่มากพอที่จะเกิดกระแสไหลข้าม (Flashover) จากสายตัวนำนั้นไปยัง Shield ในกรณีทำการต่อสายหุ้มเข้ากับสายเปลือยหรือระห่างสายหุ้มด้วยกัน จึงจำเป็นต้องทำให้ Shield ห่างออกจากสายตัวนำ กรณีนี้สนามไฟฟ้าจะไม่ถูกควบคุมด้วย Shield อีกต่อไป สนามไฟฟ้าจะเกิดเบี่ยงเบนอย่างกะทันหันตามที่แสดงในรูปที่ 3 ผลของสนามไฟฟ้าเบี่ยงเบนจะมีจุดซึ่งมีสนามไฟฟ้าหนาแน่นและตรงจุดนี้เองจะทำให้ค่าของ Dielectric Strength ลดลง และจะเป็นผลให้ฉนวนไฟฟ้าตรงจุดนั้นชำรุดได้ง่าย



รูปที่ 3 การกระจายของสนามไฟฟ้าที่สายเคเบิลแรงดันสูงแบบ Potential Field at a Screen Termination โดยมีลักษณะที่มีค่าเส้นศักย์ไฟฟ้าสูง

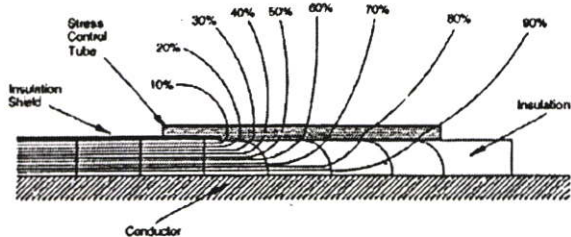


รูปที่ 4 การกระจายของสนามไฟฟ้าที่สายเคเบิลแรงดันสูง แบบ Stress Cone มีลักษณะที่มีค่าเส้นศักย์ไฟฟ้าที่สม่ำเสมอ



รูปที่ 5 การกระจายของสนามไฟฟ้าที่สายเคเบิลแรงดันสูง แบบ High Permittivity Material มีลักษณะที่มีค่าเส้นศักย์ไฟฟ้าที่สม่ำเสมอดี

ผลของการที่สนามไฟฟ้าเบี่ยงเบนนี้สามารถแก้ไขได้โดยการทำให้ Stress cone การทำให้ Stress cone อาจใช้ High Permittivity Material ทำหน้าที่แทนก็ได้ตามที่แสดงในรูปที่ 5 โดยการใช้น้ำมันหม้อแปลงเป็นส่วนของการทำหน้าที่ลดค่าความเครียดสนามไฟฟ้าลักษณะเดียวกับวิธีการ Stress Control ถ้าวางสายเคเบิลเป็นอากาศ ค่า  $C_1$  จะน้อยมากเมื่อเทียบกับ  $C_0$  จะทำให้แรงดันเริ่มต้นของการเบรคความมีค่าต่ำ ทำให้เบรคความได้ง่ายในการควบคุมจึงต้องทำให้อัตราส่วนระหว่าง  $C_1/C_0$  มีค่ามาก นั่นก็คือทำให้  $C_1$  เพิ่มขึ้นหรือ  $C_0$  ลดลงนั่นเอง Capacitive Stress Control จะเป็นการลด  $C_0$  ซึ่งสามารถกระทำได้โดย การเพิ่มรัศมีของชั้นตัวนำด้านนอกที่ถูกตัดออกโดยใช้ Stress cone ดังรูปที่ 6 Refractive Stress Control จะเป็นการเพิ่ม  $C_1$  โดยการเติมชั้นฉนวนที่มีค่าไดอิเล็กตริกสูงๆไว้รอบสายเคเบิลดังรูปที่ 6 ค่าของการกระจายสนามไฟฟ้าจะมีค่าที่ สม่ำเสมอ

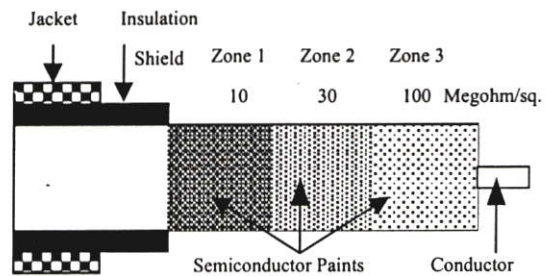


รูปที่ 6 การกระจายของสนามไฟฟ้าที่สายเคเบิล แบบ Refractive Stress Control มีลักษณะที่มีค่าเส้นศักย์ไฟฟ้าที่สม่ำเสมอเป็นลำดับของฉนวน

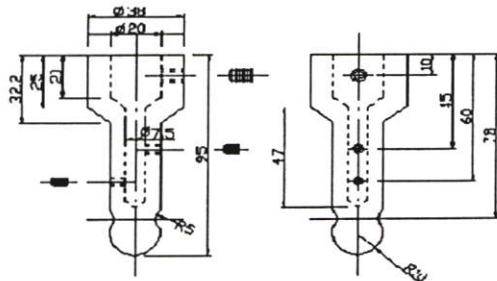
### 3. ออกแบบและสร้างชุดทดสอบสายเคเบิลแรงสูง

#### 3.1 การออกแบบและสร้างขั้วต่อนำสายเคเบิลแรงดันสูง

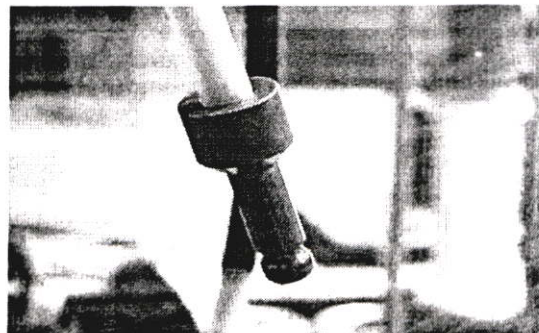
การออกแบบจะคำนึงถึงเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ(Conductor)ด้านในคือทองแดง และการฉีกสายซิลด์ของสายเคเบิลออกเพื่อใช้ในการต่อสายกราวด์ โครงสร้างของสายที่ปลอกออกแบ่งเป็นโซนๆในรูปที่ 7 โดยทำการออกแบบขั้วต่อตัวนำสายเคเบิลที่ใช้หลักการของการลดค่าความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณรอบสายตัวนำมีขนาดความหนาของการเพิ่มพื้นที่ของทองแดงที่ใช้ถึงขั้วต่อตัวนำสายในรูปที่ 8 และ 9 กับฐานรองรับขั้วต่อตัวนำสายเคเบิลที่ทำจากลูมิเนียมกลึงและจะต้องมีระยะห่างของ เกรตต่อระหว่างสองส่วนที่พอดีไม่ก่อให้เกิดระยะห่างในการต่อสัมผัสที่มากเกินไป



รูปที่ 7 ส่วนประกอบของโครงสร้างสายเคเบิล XLPE



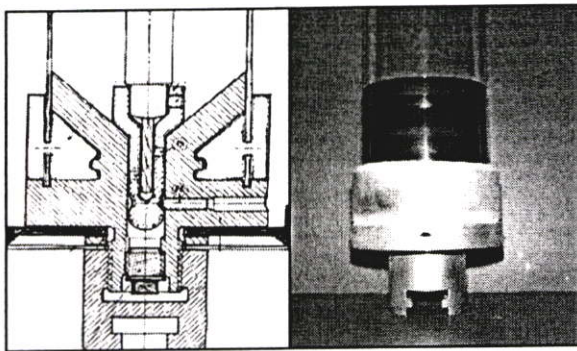
รูปที่ 8 แบบขั้วต่อตัวนำสายเคเบิลแรงดันสูง 12/20 kV



รูปที่ 9 ขั้วต่อตัวนำสายเคเบิลแรงดันสูงถึงจากทองแดง

**3.2 การออกแบบและสร้างชุดฐานรองรับขั้วต่อตัวนำสายเคเบิลแรงดันสูง**

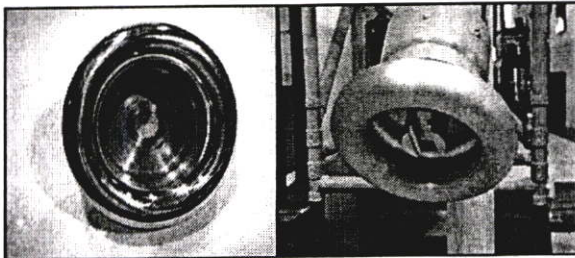
ในส่วนของฐานรองรับจะต้องมีการสัมผัสกับขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูง จะต้องมีการสัมผัสที่พอดีไม่ก่อให้เกิดค่าคาปาซิแตนซ์ที่จุดต่อจะทำให้เกิดค่า Partial Discharge ถ้าจุดต่อสายสัมผัสไม่พอดีกัน และในอีกหน้าที่หนึ่งจะต้องเป็นจุดต่อสายเคเบิลในการทดสอบเพื่อเชื่อมต่อแหล่งจ่ายทดสอบ โดยใช้น้ำมันหม้อแปลงเป็นฉนวนสายเคเบิลในการทดสอบดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 ฐานรองรับขั้วต่อสายเคเบิลแรงสูง 12/20 kV

**3.3 การออกแบบและสร้างชุดลดค่าความเครียดสนามไฟฟ้า**

ชุดลดค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่จุดต่อสายเคเบิลแรงดันสูงมีหน้าที่ในการเพิ่มพื้นที่ของจุดสัมผัสแรงดันสูงที่จุดทดสอบให้มีพื้นที่ที่มาก ค่าของสนามความเครียดสนามไฟฟ้าลดลง ไม่ก่อให้เกิดค่าดีสชาร์จเนื่องจากโคโรนา



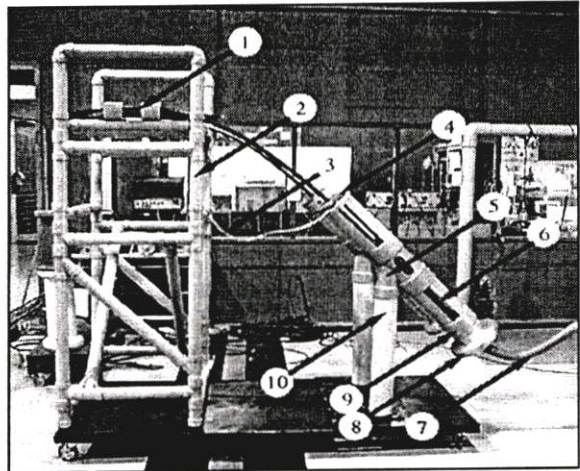
รูปที่ 11 ชุดลดความเครียดสนามไฟฟ้าทำจากอลูมิเนียม

**4. การทดลองชุดทดสอบสายเคเบิลแรงดันสูง**

การทดสอบ Terminator Testing High-Voltage Cable ตามมาตรฐานการทดสอบจะต้องทำการทดสอบแรงดันสูงกระแสสลับและการทดสอบฉนวนของสายเคเบิล การทดสอบหาค่าคาปาซิแตนซ์และพลังงานสูญเสียของไดอิเล็กตริก วัดค่าดีสชาร์จบางส่วน โดยแบ่งขั้นตอนการทดสอบดังนี้

**4.1 การเตรียมส่วนประกอบของชุดทดสอบสายเคเบิล**

ส่วนประกอบหลักจะแบ่งออกเป็น 8 ส่วนหลักๆ จากรูปที่ 12 เป็นดังนี้



รูปที่ 12 ชุดทดสอบสายเคเบิลแรงดันสูง XLPE 12/20 kV

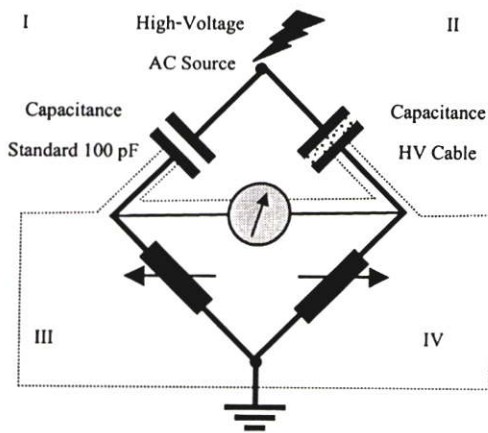
- ส่วนที่ 1: สายเคเบิลแรงสูง XLPE 12/20(24) kV ความยาว 10 เมตร เป็นสายเคเบิลที่ใช้ทำการทดสอบหาค่าตามมาตรฐาน
- ส่วนที่ 2: ชั้นวางสายมีไว้เพื่ออำนวยความสะดวกในกรณีที่ต้องการทดสอบสายที่มีความยาวไม่มากโดยสามารถรับน้ำหนักสายได้ประมาณ 20-30 กิโลกรัมและความสูงของชั้นวางสายนี้จะถูกออกแบบให้สายเคเบิลสามารถงอลงมาได้ในท่ออะคลิลิกใสได้สายเคเบิลจะอยู่กึ่งกลางท่ออะคลิลิกใสพอดี
- ส่วนที่ 3: สายกราวด์ใช้สำหรับต่อร่วมกับกราวด์ของวงจรทดสอบทั้งหมดในการทดสอบจะต้องกราวด์ทุกจุดในวงจรรวมทั้งจุดเดียวกันโดยด้านหนึ่งของสายกราวด์จะร้อยภายในท่อ PVC ¼ นิ้ว ซึ่งอยู่ภายในท่อ PVC 2 นิ้วที่ทำเป็นชั้นวางสายอีกชั้นหนึ่งแล้วไปลงที่ฐานของชุดทดสอบส่วนปลายอีกด้านหนึ่งจะไปต่อที่ Screen หรือ Shield ของสายเคเบิล ดังรูปที่ 12
- ส่วนที่ 4: ฝาไม้ใช้ปิดฝาเพื่อป้องกันฝุ่นผงลงไปน้ำมัน
- ส่วนที่ 5: ท่อ PVC ขนาด 6 นิ้ว ใช้ประกอบท่ออะคลิลิกใสที่อยู่ภายใน จากรูปจะเห็นว่าใช้ข้อต่อ PVC 3 ทางแบบ 45 องศา เหตุผลที่ต้องใช้ข้อต่อมุม 45 องศาเนื่องจากเป็นมุมที่สามารถใส่สายลงมาจากชั้นวางสายได้สะดวกรวมทั้งเป็นข้อต่อที่มีขายอยู่ทั่วไปในท้องตลาด
- ส่วนที่ 6: ท่ออะคลิลิกใสภายในท่อจะมีน้ำมันบรรจุอยู่เพื่อใช้เป็นฉนวนไฟฟ้าเหตุผลที่ต้องใช้ท่ออะคลิลิกใสเนื่องจากต้องการให้เห็นภายในเพราะหากใช้เป็นที่ท่อ PVC ที่หากเกิดเบรคควาจะไม่สามารถมองเห็นภายในท่อได้
- ส่วนที่ 7: ตัวนำสำหรับใช้ต่อจากหม้อแปลงเข้าสู่ชุดทดสอบสายเคเบิล โดยลักษณะของตัวนำนี้จะสามารถงอไปมาได้ เพื่อความสะดวกในการใช้งานโดยจะนำไปคล้องเข้ากับเบ้ารับซึ่งสามารถใช้งานอย่างได้สะดวกรวมทั้งไม่เลื่อนหลุดง่ายลักษณะฐานรองรับและแหวนรอง
- ส่วนที่ 8: ชุดลดความเครียดสนามไฟฟ้าทำจากอลูมิเนียม

4.2 การทดลองชุดทดสอบสายเคเบิลด้วยแรงดันสูงกระแสสลับ

ทำการทดสอบฉนวนของสายเคเบิลที่ระดับแรงดันที่ใช้ในการทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60885-3 โดยสายเคเบิลมีฉนวนเป็น XLPE และมีพิคกิ้งระดับแรงดัน 12/20 kV (24) kV ทดสอบที่ระดับแรงดันสูงสุด 30 kV ในเวลา 5 นาที จากมาตรฐาน IEC 60885-3 มาตรฐานการวัดคิสร่างบางส่วน (Partial Discharge) จะใช้แรงดันทดสอบคือ 1.73 U<sub>0</sub> ทำการคำนวณหาค่าแรงดันที่ใช้ทดสอบจะได้แรงดันทดสอบการเกิดคิสร่างบางส่วน ดังสมการที่ (3) (U<sub>0</sub> = พิกคิงของแรงดันต่ำสุดของการใช้งาน)

$$= \sqrt{3} * U_0 \tag{3}$$

$$= 1.73 \times 12 \text{ kV} = 20.76 \text{ kV}$$



รูปที่ 13 วงจรการวัดค่าคาปาซิแตนซ์แบบ Schering Bridge

4.3 การทดสอบวัดค่าคาปาซิแตนซ์และหาค่าพลังงานสูญเสียต่อไอเล็กตริก

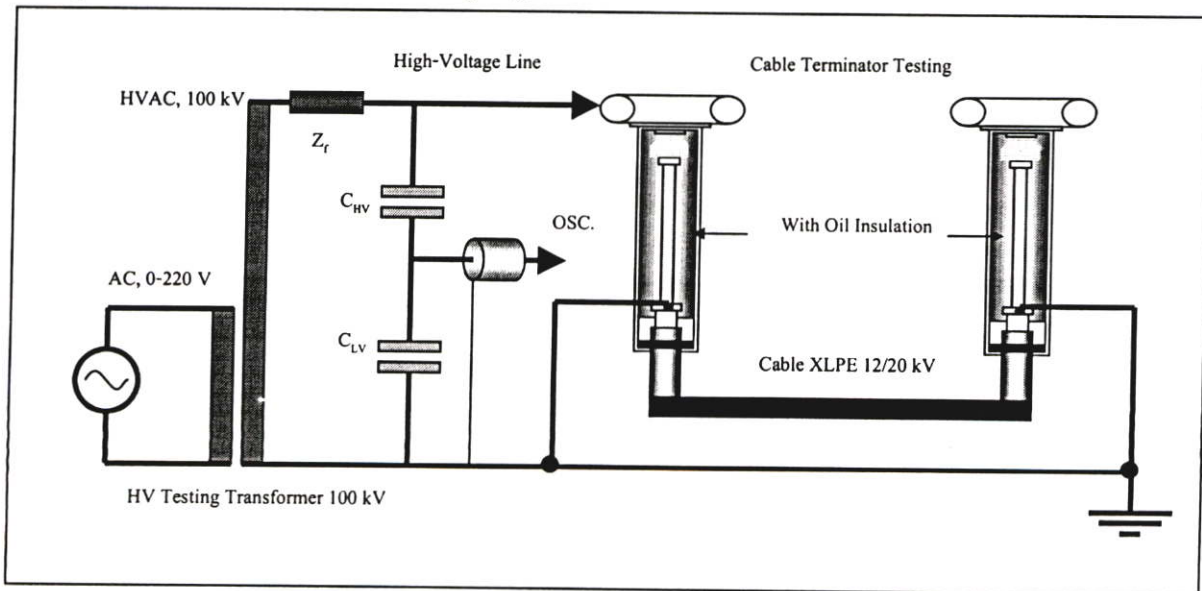
ทดสอบที่อุณหภูมิเฉลี่ย 31 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศ 760 มม.ปรอท ความชื้นสัมพัทธ์ 60% ค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียจึงเขียนในลักษณะเดียวกันคือ tanδ และ δ เป็นมุมระหว่างกระแสรวมผ่านไอเล็กตริกกับกระแสแอกทีฟ ฉะนั้นพลังงานสูญเสียต่อไอเล็กตริกในตารางที่ 1 จะเขียนสมการได้ว่า P<sub>d</sub> = P<sub>0</sub> \* tanδ = ω \* C \* U<sup>2</sup> \* tanδ, (4)

เมื่อ C<sub>x test</sub> = คือค่าความจุไฟฟ้าของวัสดุทดสอบ

U<sub>test</sub> = คือแรงดันที่ใช้ในการทดสอบ

ตารางที่ 1 ผลการวัดค่าคาปาซิแตนซ์และพลังงานสูญเสียต่อไอเล็กตริก

U <sub>control</sub> (kV)	U <sub>test</sub> (kV)	C <sub>x test</sub> (pF)	Tan δ	P <sub>d</sub> (μW)
5.1	4.854	1325.95	7.906*10 <sup>-3</sup>	0.077
5.1	5.462	1324.88	7.690*10 <sup>-3</sup>	0.095
10.1	11.54	1426.86	4.266*10 <sup>-3</sup>	0.254
10.1	11.64	1434.86	4.242*10 <sup>-3</sup>	0.259
12	12.66	1421.26	5.115*10 <sup>-3</sup>	0.366
12	12.43	1428.29	5.212*10 <sup>-3</sup>	0.361
20.76	21.56	1421.06	5.625*10 <sup>-3</sup>	1.167
20.76	21.63	1332.13	4.882*10 <sup>-3</sup>	0.955
20.76	21.68	1330.86	4.843*10 <sup>-3</sup>	0.951
20.76	21.65	1330.88	4.775*10 <sup>-3</sup>	0.935



รูปที่ 14 วงจรการทดลองชุดทดสอบสายเคเบิลแรงดันสูง 12/20 kV กับแหล่งจ่ายแรงดันสูงกระแสสลับ 100 kV, 50 Hz

## 5. สรุปและวิจารณ์ผลการทดสอบ

การออกแบบและสร้างชุดทดสอบสายเคเบิลแรงดันสูงที่สร้างขึ้นนี้สามารถใช้ในการทดสอบสายเคเบิลที่แรงดันสูงกระแสสลับตามค่าที่กักมาตรฐานและยังใช้ในการทดสอบวัดค่าปาซิแทนซ์และแฟกเตอร์ของพลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก การวัดค่าดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้น ด้วยวิธีการเปรียบเทียบกับค่าของการทดสอบสายเคเบิลที่มีสภาพที่ดีจากโรงงานผลิตสายเคเบิลที่ได้มาตรฐาน มีผลการทดสอบอยู่ในระดับมาตรฐาน

## 6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนการออกแบบและสร้างชุดทดสอบสายเคเบิลแรงดันสูงและอุปกรณ์การทดสอบและวัดค่าแรงดันสูงและค่าดิสชาร์จบางส่วนจากอาคารปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ศูนย์กลางสถาบันเทคโนโลยีราชมงคล ต.คลองหก อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี คณะผู้วิจัยจึงขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

## 7. เอกสารอ้างอิง

1. ตำรวจ สังข์สะอาด, ณรงค์ ทองฉิม, "การพัฒนาออกแบบสร้างระบบตรวจหาตำแหน่งที่เกิดดิสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิลแรงดันสูงโดยใช้คอมพิวเตอร์พื้นฐาน", 2541  
การประชุมทางวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง ปี2000,2542.
2. ทวีชัย วงศ์ศักดิ์ไพโรจน์, สมพร สะวังจู, "ข้อต่อสายเคเบิลแบบน้ำ" ปรินญาณิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, ปีการศึกษา 2541. 2541
3. กานต์ แสงทอง, เกรียงไกร ชากร, "ชุดทดลองค่าดิสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิล XLPE 12/20 kV" ปรินญาณิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล, ปีการศึกษา 2544
4. F.H. Kreuger, Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment, Technical University, Delft, 1981.
5. N. Ahmed, O. Morel, N. Srinivas "Partial Discharge Measurement in Transmission Cable Terminations" IEEE Transec. On Dielectric and Electrical Insulation, Nov., 1993, p.p. 14-24
6. N. Ahmed and N. Srinivas "On-line PD Detection in Cable", IEEE Tran.on Dielectric and Electr. Insulation Vol. 5, No.2, 1998.
7. J. C. Chan, P. Duffy, L. J. Hiiivala, Partial Discharge Part VIII, " PD Testing of Solid Dielectric Cable" IEEE Electrical Insulation Magazine Sep./Oct. 1991 Vol.7 No.5 pp. 9-20, 1991

## 8. ประวัติผู้เขียนบทความ



พร้อมศักดิ์ อภิรติกุล การศึกษาระดับวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากสถาบันเทคโนโลยีราชมงคล ปัจจุบันเป็นนักศึกษาระดับปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง มีความสนใจในงานวิจัยเกี่ยวกับเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงและการศึกษาคุณลักษณะและพฤติกรรมการเกิดดิสชาร์จบางส่วนของฉนวนแข็ง ฉนวนเหลวและฉนวนก๊าซ



จงรักษ์ บุญเต็ง การศึกษาระดับวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปัจจุบันดำรงตำแหน่งผู้ช่วยศาสตราจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง มีความสนใจในงานวิจัยสาขาวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงและการออกแบบระบบด้านคุณภาพไฟฟ้าในโรงงานอุตสาหกรรม



กนกพล นาคะวิวัฒน์ การศึกษาระดับวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปัจจุบันดำรงตำแหน่งอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล มีความสนใจในงานวิจัยเกี่ยวกับสาขาวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงและการทดสอบฉนวนอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง การจัดการใช้พลังงานและงานวิจัยการอนุรักษ์พลังงานในอาคารและโรงงานอุตสาหกรรม

## ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูง XLPE สำหรับการทดสอบดิสชาร์จบางส่วน

### ตอนที่ 2: การทดสอบดิสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิล

#### Terminator for Partial Discharge Testing of XLPE High Voltage Cables

#### Part II: Partial Discharge Tests for XLPE High Voltage Cables

พร้อมศักดิ์ อภิรติกุล\* จงรัชย์ บุญเส็ง\* กนกพล นาคะวิวัฒน์\*\*

\*ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ถ.ฉลองกรุง ลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

\*\*ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล อ.รังสิต-นครนายก ต.คลองหก อ.ชัยบุรี จ.ปทุมธานี 12110

โทรศัพท์ +66(0)-2549-3569 โทรสาร +66(0)-2549-3422 e-mail: apiratikul@hotmail.com

#### บทคัดย่อ

บทความนี้ต้องการนำเสนอการทดสอบวัดค่าดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นภายในฉนวนไฟฟ้าภายในสายเคเบิลแรงดันสูงฝังใต้ดิน โดยที่สายเคเบิลที่ใช้ในการทดสอบมีขนาดพิกัดแรงดันใช้งานกระแสสลับ 12/20 กิโลโวลต์ 35 ตารางมิลลิเมตร ซึ่งการทดสอบทำได้ตามมาตรฐาน IEC No.60520, IEC No.835-3 และมาตรฐาน IEC No. 270 จากการทดสอบขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงที่ได้สร้างและพัฒนาขึ้นใช้ทดสอบ มีผลการทดสอบที่แสดงให้เห็นว่า การทดสอบวัดค่าดิสชาร์จบางส่วนมีค่าระดับดิสชาร์จบางส่วน  $< 5$  pC ต่ำกว่ามาตรฐานกำหนดและไม่เกิดลักษณะของสัญญาณรบกวนเข้ามาที่ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูง

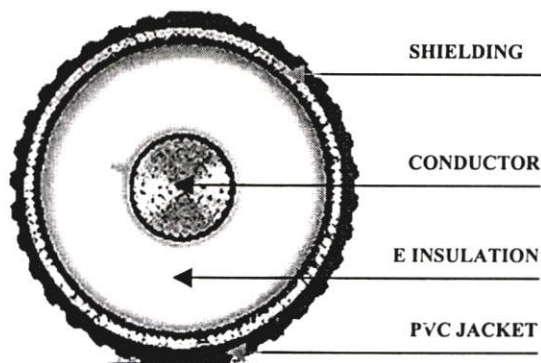
#### Abstract

This paper presents partial discharge test of electrical insulation in XLPE underground high voltage cables. The cable used in experiments has a rate voltage of 12/20 kV and a diameter of 35 mm<sup>2</sup>. Tests are performed according to IEC Standard No.60502, No.835-3 and No.270. The cable terminator used in partial discharge tests has been developed. It is found that the results obtained from partial discharge tests are in a satisfactory partial discharge level  $< 5$  pC with out away excessive noises from the cable terminator.

#### 1. บทนำ

การทดสอบวัดค่าการคายประจุบางส่วนของฉนวนไฟฟ้าหรือที่เรียกว่า "การวัดค่าดิสชาร์จบางส่วน" (Partial Discharge, PD) เป็นการทดสอบความคงทนของไดอิเล็กตริกของฉนวนแข็ง (Solid Dielectric Insulation) คือฉนวน XLPE ของสายเคเบิลแรงดันสูงที่จะนำไปใช้งานในระบบไฟฟ้าหรือในงานต่างๆ เช่น สาย Single Core และ Tree Cores โดยมีวัตถุประสงค์ในการตรวจสอบจุดผิดปกติเนื่องจากขบวนการผลิตจากโรงงาน โดยหาค่าความคงทนต่อแรงดันใช้งานในระบบไฟฟ้าที่ระดับแรง

ดันทดสอบต่างๆ ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูง (High Electric Stresses) เกิดขึ้นภายใต้สภาวะของการส่งจ่ายไฟฟ้ากำลังปกติ สามารถทำนายถึงอายุการใช้งานในลักษณะของการเสื่อมสภาพทางกายภาพ โดยการทดสอบแบบไม่ทำลายหรือแตกสลาย (Non-Destructive Testing) เป็นไปตามชนิดของระดับแรงดันทดสอบ เวลาการใช้งานหรือตามระดับแรงดันที่อาจเกิดขึ้นได้ภายใต้สภาวะทั่วไปของระบบไฟฟ้า ดังที่กล่าวมานี้ จะอ้างอิงจากรายละเอียดของเรื่องขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงในตอนที่ 1 การออกแบบและสร้างขั้วต่อสายเคเบิลสำหรับทดสอบดิสชาร์จบางส่วน



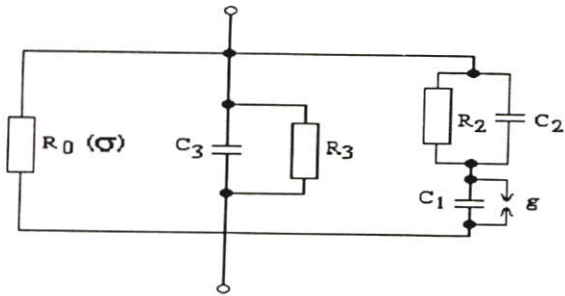
รูปที่ 1 โครงสร้างของสายเคเบิลฉนวน XLPE 12/20 kV

#### 2. ทฤษฎีและหลักการพื้นฐาน

##### 2.1 พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก (Dielectric Losses, $P_d$ )

การทดสอบการวัดค่าคาปาซิแตนซ์และค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก (Capacitance and Dissipation Factor,  $\tan\delta$ ) ของสายเคเบิลแรงดันสูงประเภทฉนวน XLPE ขนาดแรงดันกระแสสลับใช้งาน 12/20 กิโลโวลต์ (kV) 35 ตารางมิลลิเมตร (mm<sup>2</sup>) เพื่อหาค่ากำลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกที่ฉนวนของสายเคเบิลมีค่าไม่เกินกว่ามาตรฐานกำหนด และเพื่อใช้ในการคำนวณค่าของภาระทางไฟฟ้าในรูปของตัวเก็บประจุ

ทดสอบ โดยใช้เครื่องวัดค่าปาซิแคเนสและค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าโคอิเล็กทรอนิกส์ตามมาตรฐานการทดสอบเพื่อศึกษาค่าของพลังงานสูญเสียเปล่าโคอิเล็กทรอนิกส์ของสายเคเบิลแรงดันสูง ในสภาพก่อนนำไปติดตั้งใช้งานและทดสอบสภาพหลังการใช้งานตามสภาวะสิ่งแวดล้อมและอายุการใช้งาน พลังงานสูญเสียเปล่าโคอิเล็กทรอนิกส์ของฉนวนไฟฟ้าขึ้นอยู่กับขนาดของแรงดันไฟฟ้าและสภาพแวดล้อมเช่น อุณหภูมิที่เกิดขึ้นเนื่องจากความร้อนหรือความชื้นในธรรมชาติที่เกิดขึ้นตลอดจนเวลาการใช้งานจะมีผลต่อสภาพของฉนวนในโคอิเล็กทรอนิกส์นั้น โดยจะประกอบด้วยพลังงานใน 3 แบบคือ พลังงานสูญเสียเนื่องจากสภาพความนำไฟฟ้า (Condition Loss) พลังงานสูญเสียเนื่องจากโพลาริเซชัน และพลังงานสูญเสียเนื่องจากไอออไนเซชัน (Ionization Loss) จากพลังงานดังกล่าวอาจเขียนแทนด้วยวงจรสมมูลของพลังงานสูญเสียเปล่าโคอิเล็กทรอนิกส์ คือ  $R_0(\sigma)$  แทนพลังงานสูญเสียเนื่องจากสภาพนำไฟฟ้าของฉนวน  $C_3$  จะแทนค่าความจุไฟฟ้าที่แท้จริงของโคอิเล็กทรอนิกส์และ  $R_3$  จะแทนพลังงานสูญเสียโคอิเล็กทรอนิกส์เนื่องจากโพลาริเซชันและ  $R_2$  แทนพลังงานสูญเสียในฉนวนเนื่องจากดิซชาร์จบางส่วน ส่วน  $C_1, C_2$  และสปาร์กแก๊ป  $g$  แทนวงจรสมมูลของดิซชาร์จบางส่วน



รูปที่ 2 วงจรสมมูลของการเกิดดิซชาร์จบางส่วนที่ฉนวน

พลังงานสูญเสียโคอิเล็กทรอนิกส์เนื่องจากสภาพนำไฟฟ้าแรงดันกระแสตรงในสนามไฟฟ้าคงตัวที่มีแรงดันกระแสตรง  $E$  ค่าความหนาแน่นของกระแส  $J$  คำนวณโดยอาศัยกฎของโอห์มจากค่าความนำจำเพาะ  $\sigma$  ได้คือ

$$J = \sigma E \tag{1}$$

พลังงานสูญเสียโคอิเล็กทรอนิกส์ต่อปริมาตรจะหาได้จากสูตร

$$P_d = EJ = \sigma E^2 \tag{2}$$

สภาพนำไฟฟ้า( $\sigma$ )ของระบบการฉนวนซึ่งประกอบด้วย ของเหลว ของแข็งจะเป็นผลมาจากไอออนสภาพนำไฟฟ้า  $\sigma$  จึงขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ สิ่งเจือปน ปริมาณความชื้น ค่าความต้านทานกระแสรั่ว  $R_0(\sigma)$  ของการฉนวนอาจหาได้โดยการวัดค่ากระแสจากการป้อนแรงดันกระแสตรงที่ผลการวัดจะขึ้นอยู่กับเวลาด้วย พลังงานสูญเสียโคอิเล็กทรอนิกส์จากกระแสสลับและวงจรสมมูลในกรณีของแรงดันกระแสสลับที่มีความถี่ความถี่สนามไฟฟ้า  $\bar{E}$  ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าอาจจะคำนวณได้จากความสัมพันธ์ของสมการที่ (3) เพื่อหาค่าความหนาแน่นกระแส

$$\bar{J} = (\sigma + j\omega\epsilon)\bar{E} \tag{3}$$

ในฉนวนนอกจากพลังงานสูญเสียเนื่องจากสภาพนำไฟฟ้าแล้วยังมีพลังงานสูญเสียเนื่องจากโพลาริเซชันและไอออนไนเซชัน ฉะนั้นค่าคงตัวโคอิเล็กทรอนิกส์จะมีใช้แต่ค่าจริงอย่างเดียวหากแต่มีจินตภาพด้วยค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าโคอิเล็กทรอนิกส์  $\tan\delta$  ของฉนวนซึ่งนิยามไว้ว่าเป็นอัตราส่วนค่ากระแสแฉงจริง  $I_a$  ต่อค่ากระแสแฉงเอกทิฟ  $I_b$  คือ

$$\tan \delta = \frac{I_a}{I_b} = \frac{P_d}{P_b} \tag{4}$$

ซึ่งพลังงานสูญเสียประกอบด้วยองค์ประกอบทั้ง 3 ส่วนตามสมการคือ

$$P_d = P_\sigma + P_p + P_i \tag{5}$$

เมื่อ  $P_d$  = พลังงานสูญเสียโคอิเล็กทรอนิกส์

$P_\sigma$  = พลังงานสูญเสียเนื่องจากสภาพนำไฟฟ้า

$P_p$  = พลังงานสูญเสียเนื่องจากโพลาริเซชัน

$P_i$  = พลังงานสูญเสียเนื่องจากไอออนไนเซชัน

ค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียจึงเขียนในลักษณะเดียวกันคือ

$$\tan\delta = \tan\delta_\sigma + \tan\delta_p + \tan\delta_i \tag{6}$$

$\delta$  เป็นมุมระหว่างกระแสรวมผ่านโคอิเล็กทรอนิกส์กับกระแสแฉงเอกทิฟ ฉะนั้นพลังงานสูญเสียเปล่าโคอิเล็กทรอนิกส์จะเขียนได้ว่า

$$P_d = P_b \cdot \tan\delta = \omega \cdot C \cdot U^2 \cdot \tan\delta_i \tag{7}$$

เมื่อ  $C$  = คือค่าความจุไฟฟ้าของวัสดุทดสอบ

$U$  = คือแรงดันที่ป้อนที่ความถี่

ถ้าคิดเป็นพลังงานสูญเสียต่อหน่วยปริมาตรของฉนวนจะได้ว่า

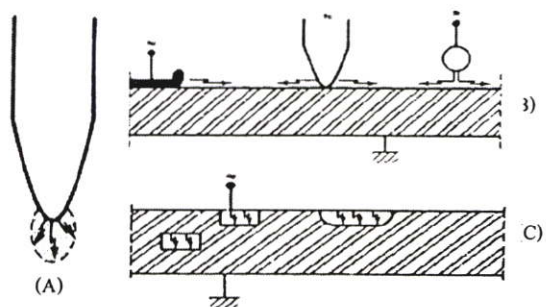
$$P_d = \omega \cdot \epsilon_0 \cdot U^2 \cdot \tan\delta \tag{8}$$

### 2.2 การเกิดดิซชาร์จบางส่วนในสายเคเบิลแรงดันสูง

ดิซชาร์จบางส่วนเป็นปัญหาที่สำคัญของฉนวนไฟฟ้าเพราะจะเป็นเหตุให้ฉนวนไฟฟ้าเสื่อมสภาพได้เร็วกว่าปกติ เกิดพลังงานไฟฟ้าสูญเสียและยังมีผลกระทบต่อระบบอิเล็กทรอนิกส์และระบบระบบสื่อสารอีกด้วย โดยทั่วไปดิซชาร์จบางส่วนแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท คือ

1. External Discharge หรือโคโรนาดิซชาร์จ (Corona Discharge) เกิดจากการที่สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ บนตัวนำที่มีลักษณะแหลมคมหรือมีขอบคม ที่อยู่ในอากาศหรือก๊าซที่มีความดันปกติเมื่อความเครียดของสนามไฟฟ้ามีค่าสูงเกินค่าวิกฤติ (Critical) ผลของ Corona คือ มีเสียง มีแสง และมีกลิ่นไอโอโซน มีความถี่สูงถึง 100 MHz ซึ่งจะรบกวนต่อระบบสื่อสารและอิเล็กทรอนิกส์ เรียกว่าเป็น RIV (Radio Influence Voltage) และเกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียตลอดเวลาที่เกิด Corona ลักษณะของ Corona Discharge
2. Surface Discharge หรือดิซชาร์จตามผิว เกิดขึ้นระหว่างผิวของตัวนำไฟฟ้ากับผิวของวัสดุฉนวนและเกิดได้เมื่อค่าปาซิแคเนสต่อตามผิวมีค่าสูงและแรงดันที่ป้อนมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ดังนั้น ดิซชาร์จประเภทนี้จึงเกิดกับไฟฟ้ากระแสสลับและกรณีแรงดันกระชอก (Impulse Voltage) เท่านั้น ตัวอย่างการเกิด Surface Discharge เช่นที่ปลายเคเบิลบริเวณที่ปกฉนวนออกและที่ถูด้วยฉนวนไฟฟ้าที่ใช้ฉนวนเป็นชั้น

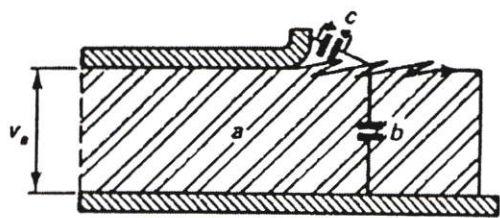
3. Internal Discharge หรือคิสซาร์ภายใน เกิดขึ้นได้ภายในวัสดุทั้งที่เป็นของแข็งและของเหลวที่มีฟองอากาศอยู่ภายใน ฉนวนที่มีสิ่งเจือปนอยู่จะเป็นเหตุให้เกิดก๊าซขึ้นหลังจากการเกิดเบรคความถี่ครั้งแรก ฉนวนที่มีฟองอากาศหรือมีสิ่งเจือปนอยู่ภายในก็จะเกิดคิสซาร์ขึ้นได้ดังกล่าวและจะเป็นเหตุให้อายุการใช้งานของฉนวนสั้นลง ลักษณะของคิสซาร์ภายใน โดยแบ่งลักษณะของการเกิดคิสซาร์บางส่วนออกเป็นลักษณะดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 การเกิดคิสซาร์บางส่วนใน 3 ลักษณะคือ (A) External Discharge หรือ Corona Discharge (B) Surface Discharge (C) Internal Discharge

2.3 การวัดค่าคิสซาร์ของบางส่วนในสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวน XLPE

การจำลองลักษณะของโคอิเล็กทริกของฉนวนคือจุด a เป็นเนื้อฉนวน XLPE ที่ชั้นกลางด้วยตัวนำสายเคเบิลคือทองแดงกับสายชิลด์ (Shielding) ทำให้เกิดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าหรือแรงดันตกคร่อมที่เนื้อฉนวนคือ  $V_a$  ภายในของสายเคเบิลเองกับโครงสร้างของสายชิลด์ก็เกิดค่าคาปาซิแตนซ์อนุกรมกันที่จุด b ในรูปของคาปาซิแตนซ์ที่ฉนวนและจุด c ในรูปของคาปาซิแตนซ์ในอากาศดังรูปที่ 4

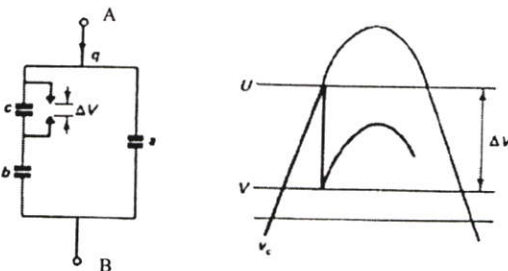


รูปที่ 4 การจำลองลักษณะของโคอิเล็กทริกของฉนวนในสายเคเบิล

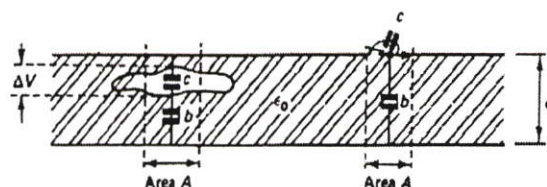
การทดสอบวัดค่าคิสซาร์ในสายเคเบิลมีวัตถุประสงค์หลักคือ การตรวจสอบสภาพที่ดีของฉนวนมีค่าคิสซาร์บางส่วนอยู่ในระดับมาตรฐานหรือไม่ เพื่อขจัดปัญหาของการติดตั้งสายเคเบิลก่อนการใช้งานจริง เช่น ในการติดตั้งฝังใต้ดินหรือใทะเลลึก โดยหลักการของการตรวจสอบจะมองปัญหาของสายเคเบิลจากการผลิตของโรงงานผลิตสายเคเบิลนั้นอาจมีปัญหาเนื่องจากการกรรมวิธีการผลิตเป็นสาเหตุให้เกิดโพรงอากาศ (Void) ในสายเคเบิลดังในรูปที่ 5 ที่เกิดขึ้นในฉนวนแข็งของสายเคเบิลโดยเป็นการจำลองให้เห็นความชัดเจน ในการวิเคราะห์การเกิดคิสซาร์ในโพรงอากาศ (Void Discharge) ภายในโคอิเล็กทริกผสมของฉนวนแข็งกับ

ฉนวนก๊าซ ซึ่งค่าของเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ ( $\epsilon_0$ ) ที่มีค่ามากกว่าภายในโพรงอากาศดังในรูปที่ 6 การเกิดคิสซาร์บางส่วนมีผลให้เกิดการขยายวงกว้างขึ้นในเนื้อฉนวนมีความเสื่อมสภาพ โดยมองโพรงอากาศด้วยค่าคาปาซิแตนซ์ที่จุด c ต่อขนานอยู่กับแกปคิสซาร์ในลักษณะของค่าคาปาซิแตนซ์ในส่วนที่ไม่มีโพรงอากาศที่จุด a และอนุกรมกับค่าคาปาซิแตนซ์ในจุด b ที่มีแรงดันตกคร่อม  $\Delta V$  หากค่าแรงดันตกคร่อมนี้จากสมการที่ (9)

$$\Delta V = \frac{V_{AB} * C_b}{C_b + C_c} \tag{9}$$



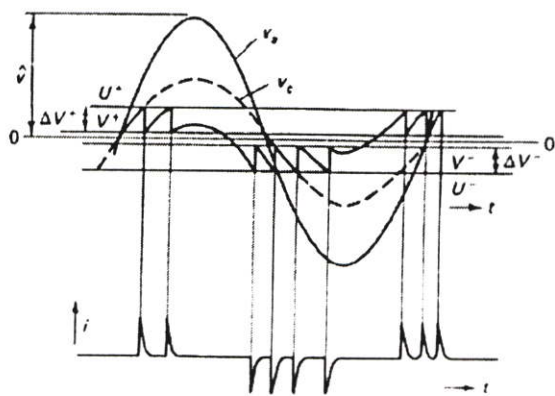
รูปที่ 5 วงจรสมมูลของฉนวนแข็งที่มีโพรงอากาศและลักษณะของการเกิดแรงดันคิสซาร์ที่เกิดขึ้นตกคร่อมค่าคาปาซิแตนซ์ที่จุด c มีขนาด  $\Delta V$



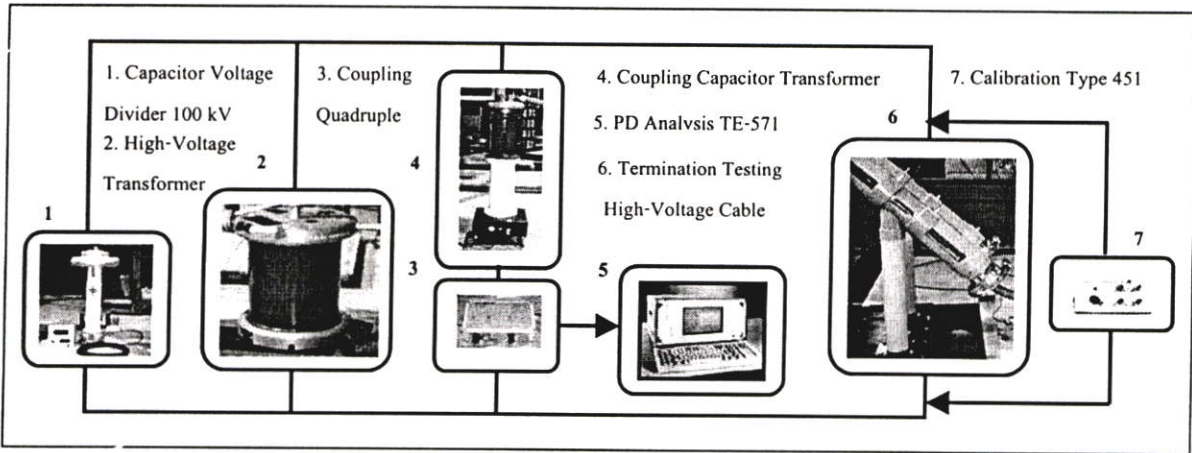
รูปที่ 6 ลักษณะของโคอิเล็กทริกของฉนวนในสายเคเบิลที่มีโพรงอากาศ

ในลักษณะของโคอิเล็กทริกที่มีค่าของแรงดันสูงตกคร่อมจะเกิดค่าของตัวประจุ (Charge, q) สามารถคำนวณหาได้จากโครงสร้างหรือความสัมพันธ์ของพื้นที่ (Area) และค่าของระยะห่างของโคอิเล็กทริกค่าของความซึมซาบสัมพัทธ์ของฉนวนในอากาศและสูญญากาศ ( $\epsilon_r$  และ  $\epsilon_0$ )

$$q \cong \epsilon_0 \epsilon_r * A * \Delta V * (1/d) \tag{10}$$



รูปที่ 7 ลักษณะของแรงดันและกระแสคิสซาร์ในโพรงอากาศ ( $\Delta V, i$ ) ภายใต้แรงดันตกคร่อมค่าคาปาซิแตนซ์ที่เกิดจากแรงดันกระแสตัว ( $V_a$ )



รูปที่ 8 กระบวนการทดสอบวัดค่าดีสชาร์จบางส่วน(PD)ในชุดทดสอบสายเคเบิลแรงดันสูง XLPE 12/20 kV

3. การออกแบบวงจรการทดสอบวัดค่าดีสชาร์จบางส่วน

3.1 วัดค่าดีสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิลแรงดันสูง

อุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบสายเคเบิล THAI-YAZAKI 12/20 (24) kV, ขนาด 35 Sq.mm. ใช้แรงดันทดสอบ  $V_{test} AC = 30 kV rms$  ในเวลา 5 นาที จากหม้อแปลงทดสอบ 1 phase, rate volt:  $2 \times 0.22 / 100 / 0.22 kV$ , rate current  $2 / 11.4 / 0.05 / 15.1 A$ , rate output 5 kVA, Impedance Volt 3.5% ค่าความจุ (Capacity) ของโหลดสูงสุดที่หม้อแปลงสามารถทดสอบได้

$$S = \frac{U^2}{X_c} = U^2 \omega C \quad (11)$$

และจาก  $\omega = 2\pi f$  จะได้  $S = 2\pi f C U^2$   $I_{test} \text{ สูงสุด} = 0.05 A$ ,  $V_{test} \text{ สูงสุด} = 30 kV$ ,  $S_{max} = V_{test} I_{test} = 1.5 kVA = 2\pi f C U^2 (S.F.)$

แทนค่าต่างๆ และเลือกค่าประมาณ S.F. = safety factor = 3

$$C_1 = \frac{S_{1max}}{2\pi f U^2 (S.F.)} = \frac{1.5 \times 10^3}{2\pi \times 50 \times (30 \times 10^3)^2 \times 3} = 1,768.38 \text{ pF}$$

ค่าความจุ (Capacity) ของเครื่องมือวัดในการทดสอบวัดแรงดันสูงของขั้วต่อสายเคเบิลนั้นมีค่าความจุในการวัดแรงดันสูงคือ  $C_m = 100 \text{ pF}$  ค่าความจุ (Capacity) ของขั้วต่อสายเคเบิล (2ข้าง) จากการวัดค่าความจุของขั้วต่อสายเคเบิล จะได้ค่าดังนี้ ขั้วต่อสายเคเบิล 1 ข้าง  $C = 100 \text{ pF}$  ดังนั้นค่าความจุของขั้วต่อสายเคเบิล 2 ข้าง คือ  $C_A = 100 \times 2 = 200 \text{ pF}$  ค่าความจุ (Capacity) ของสายเคเบิล 12/20 (24) kV ต่อความยาว 1 เมตร

$$C = \frac{2\pi \epsilon l}{\ln(r_2/r_1)} = \frac{2\pi \times 2.5 \times 8.854 \times 10^{-12} \times 1}{\ln(9/3.5)} = 147.257 \text{ pF/m}$$

โดยที่  $r_1$  = รัศมีตัวนำที่เป็นทองแดงของสายเคเบิลท = 3.5 มิลลิเมตร  $r_2$  = รัศมีฉนวน XLPE ของสายเคเบิล = 9 มิลลิเมตร ฉะนั้นความยาวสายเคเบิลมากที่สุดที่สามารถทดสอบได้คือ ค่าความจุที่หม้อแปลงสามารถจ่ายได้ = ค่าความจุรวมของโหลดรวมทั้งหมด

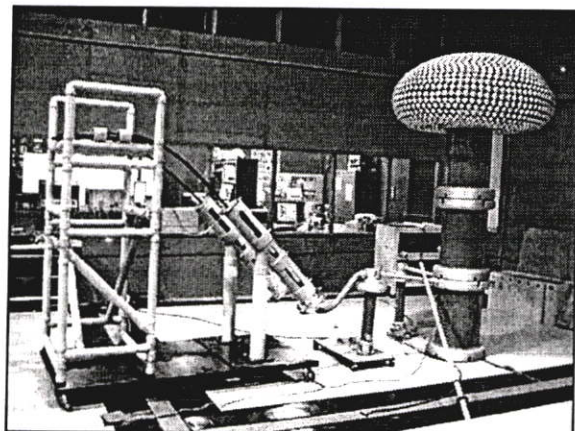
$$1768.38 \text{ pF} = 200 \text{ pF} + 100 \text{ pF} + 147.257 \text{ pF} \cdot L_{cable-MAX}$$

$$L_{cable-MAX} = 9.972 \text{ เมตร} \therefore \text{ดังนั้นเลือกใช้เคเบิลยาว 10 เมตร}$$

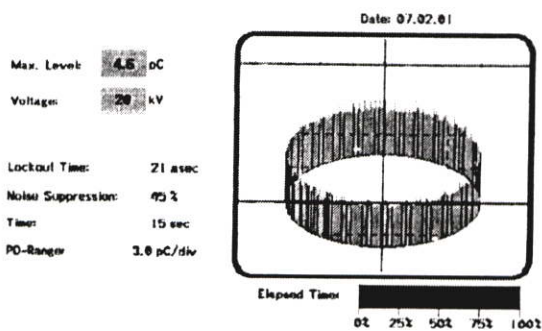
4. ผลการทดลองชุดทดสอบสายเคเบิลแรงดันสูง XLPE

4.1 การทดสอบวัดค่าดีสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิลแรงดันสูง

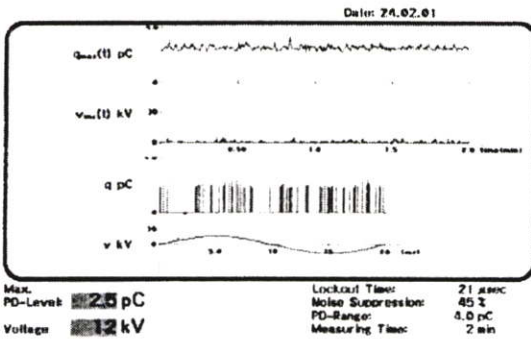
โดยใช้เครื่องวัดค่าดีสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge Analyzer รุ่น TE-571 ของบริษัท HAEFELY TRENCH ในการวิเคราะห์หาค่าต่างๆ ในการทดสอบและวัดค่าดีสชาร์จบางส่วนตามมาตรฐาน IEC No. 270



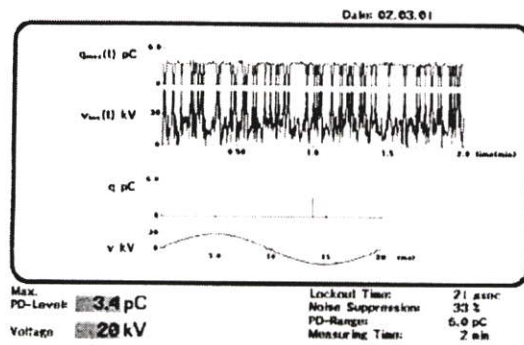
รูปที่ 9 การทดสอบวัดค่าดีสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิลแรงดันสูง



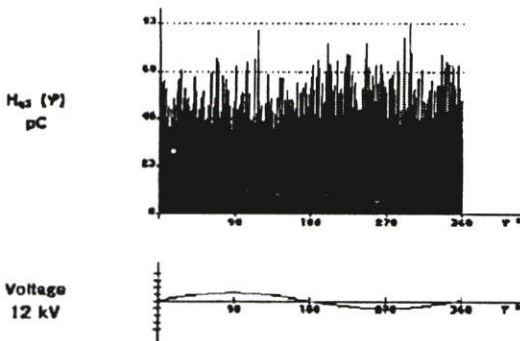
รูปที่ 10 ค่าดีสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิลแรงดันสูง 12/20 kV ที่แรงดันทดสอบกระแสสลับ 20 kV ในเวลา 15 Sec มีค่าเท่ากับ 4.5 pC



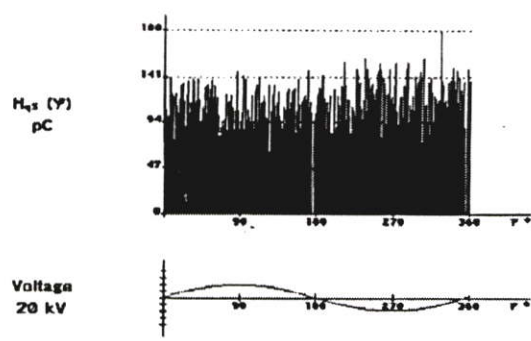
รูปที่ 11 ค่าคิซาร์จบางส่วนในสายเคเบิล 12/20 kV ที่แรงดันทดสอบกระแสสลับ 12 kV มีค่าเท่ากับ 2.5 pC



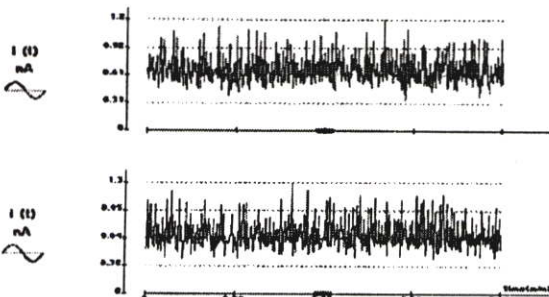
รูปที่ 15 ค่าคิซาร์จบางส่วนในสายเคเบิล 12/20 kV ที่แรงดันทดสอบกระแสสลับ 20 kV มีค่าเท่ากับ 3.4 pC



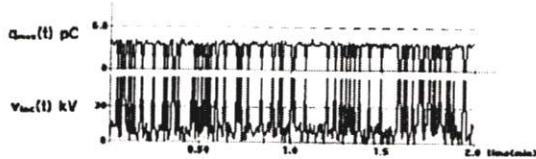
รูปที่ 12 ค่าคิซาร์จบางส่วนแบบการแยกเฟส  $H_{qs}$  ที่แรงดันทดสอบกระแสสลับ 12 kV ระหว่างมุมเฟส( $\phi$ )  $0-360^\circ$  อิงค่ากับค่าประจุบางส่วน (pC) เท่ากับ 46-69 pC/1 องศา



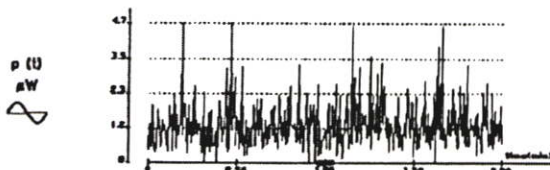
รูปที่ 16 ค่าคิซาร์จบางส่วนแบบการแยกเฟส  $H_{qs}$  ที่แรงดันทดสอบกระแสสลับ 20 kV ระหว่างมุมเฟส( $\phi$ )  $0-360^\circ$  อิงค่ากับค่าประจุบางส่วน (pC) เท่ากับ 94-141 pC/1 องศา



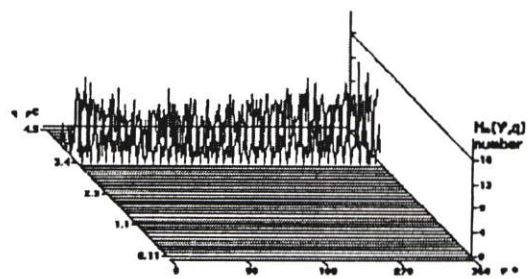
รูปที่ 13 ค่ากระแสคิซาร์จบางส่วนในสายเคเบิล 12/20 kV ที่แรงดันทดสอบกระแสสลับ 20 kV มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.6 nA



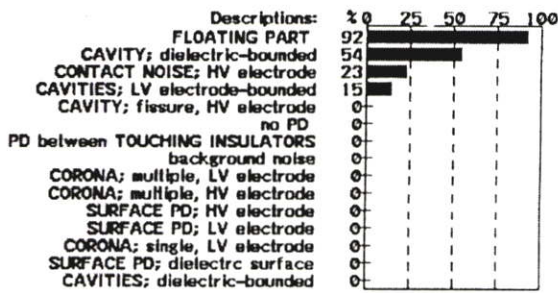
รูปที่ 17 ค่าคิซาร์จบางส่วนในสายเคเบิลแรงดันสูง 12/20 kV ที่แรงดันทดสอบกระแสสลับ 20.76 kV มีค่าเท่ากับ 4.5 pC



รูปที่ 14 ค่ากำลังไฟฟ้าที่เกิดจากคิซาร์จบางส่วนในสายเคเบิลแรงดันสูง 12/20 kV เฉลี่ยเท่ากับ 1.2-2.3  $\mu$ W



รูปที่ 18 เปรียบเทียบค่าคิซาร์จบางส่วน (pC) ในลักษณะ 3 มิติเทียบกับองศาของเฟสแรงดันและความถี่ของการเกิดประจุ  $H_{qs}(\varphi, q)$



รูปที่ 19 การวินิจฉัยสาเหตุของการเกิดคัสซาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นจากการเชื่อมต่อนี้ไม่ดีประมาณ 92% จากโพรงอากาศในไดอิเล็กทริก 54% จากสัญญาณรบกวนทางด้าน HV 23% และ ในโพรงอากาศทางด้าน LV 15%

5. สรุปและวิจารณ์ผลการวัดค่า PD ในสายเคเบิลแรงดันสูง

บทความนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาการวัดค่าคัสซาร์จบางส่วน(PD) ในสายเคเบิลแรงดันสูง ฉนวน XLPE ขนาดพิกัดแรงดัน 12/20 kV โดยการสร้างชุดทดสอบสายเคเบิลแรงดันสูงมาใช้ในการต่อสายเคเบิลใช้ในการทดสอบวัดค่าคัสซาร์จบางส่วนที่สามารถใช้งานได้ในระดับมาตรฐานการทดสอบสายเคเบิลที่อยู่ในสภาพที่ดี ได้ตามมาตรฐานข้อกำหนดในการใช้งานของสายเคเบิลที่ไม่เกิน 5 pC ผลจากการทดสอบวัดค่าตามมาตรฐานได้ค่าคัสซาร์จบางส่วนที่ 4.5 pC คณะผู้วิจัยมีจุดประสงค์ที่จะมีการพัฒนาต่อไปในเรื่องของชุดทดสอบสายเคเบิลแรงดันสูงให้มีค่าคัสซาร์จบางส่วนที่ต่ำกว่าจุดนี้ แต่ยังคงอยู่ในช่วงของการพัฒนา และผู้วิจัยจะนำเสนอในบทความทางวิชาการสาขาวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งต่อไป

6. กิตติกรรมประกาศ

บทความนี้ได้รับความอนุเคราะห์จากห้องปฏิบัติการวิจัยวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ศูนย์กลางสถาบันเทคโนโลยีราชมงคล ต.คลองหก อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี การใช้เครื่องมือทดสอบและเครื่องวัดค่าคาปาซิแตนซ์ คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

7. เอกสารอ้างอิง

1. ตำรวจ สังข์สะอาด, ณรงค์ ทองฉิม, "การพัฒนาออกแบบสร้างระบบตรวจหาค่าแรงดันที่เกิดคัสซาร์จบางส่วนในสายเคเบิลแรงสูงโดยใช้คอมพิวเตอร์พื้นฐาน", การประชุมทางวิศวกรรมไฟฟ้ากำลังปี2000,2542
2. ทวีชัย วงศ์ศักดิ์โพธิ์โรจน์, สมพร สะวังจู, "ข้อต่อสายเคเบิลแบบน้ำ" วิทยุยานพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, ปีการศึกษา 2541
3. กานต์ แสงทอง, เกียรติกร ชากร, "ชุดทดลองค่าคัสซาร์จบางส่วนในสายเคเบิล XLPE 12/20 kV" วิทยุยานพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล, ปี 2544

4. F.H. Kreuger, Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment, Technical University, Delft, 1981.
5. N. Ahmed, O. Morel, N. Srinivas "Partial Discharge Measurement in Transmission Cable Terminations" IEEE Transec. On Dielectric and Electrical Insulation, Nov., 1993, p.p. 14-24
6. J. C. Chan, P. Duffy, L. J. Hiivala, Partial Discharge Part VIII, " PD Testing of Solid Dielectric Cable" IEEE Electrical Insulation Magazine Sep./Oct. 1991 Vol.7 No.5 pp. 9-20

8. ประวัติผู้เขียนบทความ



**พร้อมศักดิ์ อภิรติกุล** การศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากสถาบันเทคโนโลยีราชมงคล ปัจจุบันเป็นนักศึกษาระดับปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง มีความสนใจในงานวิจัยเกี่ยวกับเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงและการศึกษาคุณลักษณะและพฤติกรรมการเกิดคัสซาร์จบางส่วนของไดอิเล็กทริกฉนวนแข็ง ฉนวนเหลวและฉนวนก๊าซ



**จงรักษ์ นูญเนื่อง** การศึกษาระดับวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปัจจุบันมีตำแหน่งเป็นผู้ช่วยศาสตราจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง มีความสนใจในงานวิจัยสาขาวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงและการออกแบบระบบด้านคุณภาพไฟฟ้า

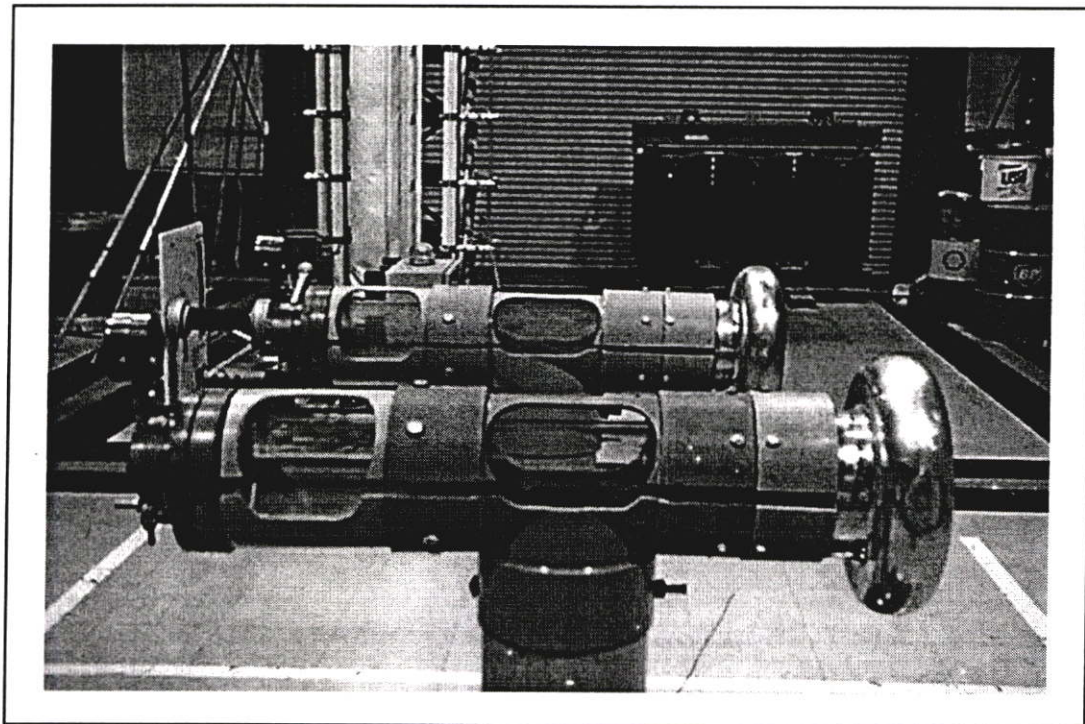


**กนกพล นาคะวิวัฒน์** การศึกษาระดับวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปัจจุบันดำรงตำแหน่งอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล มีความสนใจในงานวิจัยเกี่ยวกับสาขาวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง การทดสอบฉนวนอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง การออกแบบและจัดการพลังงานทดแทน

ภาคผนวก ค.

## ข้อมูลทางด้านเทคนิคของงานวิจัย

# HIGH VOLTAGE CABLE TEST TERMINATORS



## Technical Data

Rated Voltage at 50 Hz (kV)	36 kV
PD Level at rated voltage (pC)	$\leq 1$ pC
Insulation Air compressor per terminators (I)	5.0 bar
Insulation Vacuum per terminators (II)	20 mm.Hg
Weight (2 Unit)	20 kg
Max. Terminator diameter over (mm)	130 mm
Max. Cable diameter over (mm)	35 mm
Max. Conductor diameter over (mm)	20 mm
Terminator length (mm)	650 mm
Terminator height (mm)	1200 mm
Terminator width (mm)	1000 mm



King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
Bangkok, Thailand. [[www.kmitl.ac.th](http://www.kmitl.ac.th)]

## ประวัติผู้เขียน



นายพร้อมศักดิ์ อภิรติกุล เกิดเมื่อวันที่ 9 เมษายน 2518 [apiratikul@hotmail.com]

ภูมิลำเนาเดิมอยู่ที่ อำเภอบางปลาหม้อ จังหวัดสุพรรณบุรี

ปีพ.ศ. 2537 สำเร็จการศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพจาก

สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตนนทบุรี สาขาไฟฟ้ากำลัง

ปีพ.ศ. 2539 สำเร็จการศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูงจาก

สถาบันเทคโนโลยีราชมงคลวิทยาเขตเทคนิคกรุงเทพฯ สาขาไฟฟ้ากำลัง

ปีพ.ศ. 2541 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีจาก

สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง

ปีพ.ศ. 2545 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโทจากบัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง คณะวิศวกรรมศาสตร์

สาขาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง

ปีพ.ศ.2541-ปัจจุบัน ปฏิบัติหน้าที่ในตำแหน่งอาจารย์ สังกัดภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล

งานวิจัยที่สนใจ เกี่ยวกับการศึกษาเทคโนโลยีทางวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง การศึกษา

คุณสมบัติและพฤติกรรมการเกิดคิซาร์จของฉนวนแข็ง ฉนวนเหลว และ ฉนวนก๊าซ