



การออกแบบและสร้างขั้วต่อสายเคเบิลใต้ดิน XLPE แรงดันสูงพิกัด 24 kV
เพื่อทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนโดยใช้ก๊าซ SF₆ เป็นสารฉนวน

ลงทะเบียนวันที่	18 มี.ค. 2554
เลขทะเบียน	116609
เลขหมู่	อพ TK ๑๒๑๑ ท ๗๗ ก
หัวข้อเรื่อง	1. ศาสดาเดวิด - วจนีย์ 2. สาขาไฟฟ้าใต้ดิน - วจนีย์

ทง ลานธารทอง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
พ.ศ. 2553

DESIGN AND CONSTRUCTION OF HIGH VOLTAGE UNDERGROUND CABLE
TERMINATOR XLPE 24 kV FOR MEASUREMENT TESTING OF
PARTIAL DISCHARGE USING SF₆ INSULATOR

THONG LANTHARTHONG

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILMENT OF THE REQUIREMENTS FOR
THE DEGREE OF MASTER OF ENGINEERING
IN ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
RAJAMANGALA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY THANYABURI

2010

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นงานวิจัยที่เกิดจากการค้นคว้าและวิจัยขณะที่ข้าพเจ้าศึกษาอยู่ในคณะ
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ดังนั้นงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ถือ
เป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีและข้อความต่างๆในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
ข้าพเจ้าขอรับรองว่าไม่มีการคัดลอกหรือนำงานวิจัยของผู้อื่นมานำเสนอในชื่อของข้าพเจ้า

ทง ถานธารทอง



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การออกแบบและสร้างขั้วต่อสายเคเบิลใต้ดิน XLPE แรงดันสูง
พิกัด 24 kV เพื่อทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนโดยใช้ก๊าซ SF₆
เป็นสารฉนวน

DESIGN AND CONSTRUCTION OF HIGH VOLTAGE
UNDERGROUND CABLE TERMINATOR XLPE 24 kV FOR
MEASUREMENT TESTING OF PARTIAL DISCHARGE
USING SF₆ INSULATOR

นักศึกษา

นายทอง ลานธารทอง

รหัสประจำตัว

114870402005-2

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

ปีการศึกษา

2553

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมชัย หิรัญวโรดม

วัน เดือน ปี ที่สอบ

19 มิถุนายน 2553

สถานที่สอบ

ห้องประชุมภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ดร.วันชัย ทรัพย์สิงห์)

..... กรรมการ

(ดร.บุญยัง ปลั่งกลาง)

..... กรรมการ

(ดร.วินัย พฤกษ์วัน)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมชัย หิรัญวโรดม)

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมชัย หิรัญวโรดม)

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบและสร้างขั้วต่อสายเคเบิลใต้ดิน XLPE แรงดันสูงพิกัด 24 kV เพื่อทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนโดยใช้ก๊าซ SF ₆ เป็นสารฉนวน
นักศึกษา	นายทอง ถานธารทอง
รหัสประจำตัว	114870402005-2
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา	2553
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชัย หิรัญวิโรดม

บทคัดย่อ

งานวิจัยนำเสนอการออกแบบและสร้างขั้วต่อสายเคเบิลใต้ดิน XLPE แรงดันสูงพิกัด 24 kV เพื่อทำการทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนโดยใช้สารฉนวนก๊าซ SF₆ ที่มีความคงทนต่อแรงดันพังทลายสูงทำให้สามารถลดขนาดของขั้วต่อลง

การออกแบบคำนึงถึงมิติและรูปร่างของขั้วต่อสายต้องไม่ก่อให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าที่สูงกว่าแรงดันพังทลายของฉนวน SF₆ โดยคำนวณหาค่าสนามไฟฟ้าโดยวิธีสมการวิเคราะห์และระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์คู่ขนานกันเพื่อจำลองการกระจายของความเครียดสนามไฟฟ้า (E_{max}) ที่เกิดขึ้นในขั้วต่อสายเคเบิล เพื่อให้ทราบค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด และนำมาสู่การออกแบบขั้วต่อสายเคเบิลแรงสูง

ผลจากการทดสอบการใช้งานทดสอบสายเคเบิลตามมาตรฐาน IEC 60502-2 ซึ่งกำหนดค่าพาร์เซิลดิสชาร์จสูงสุดไม่เกิน 10 pC พบว่าสามารถใช้ก๊าซ SF₆ มาใช้เป็นฉนวนได้ โดยระบบทดสอบคือสายเคเบิลและขั้วต่อ 3 ตัวอย่างคือ สายขนาด 240 mm², 185 mm² และ 150 mm² พบว่ามีค่าพาร์เซิลดิสชาร์จสูงสุดเพียง 4.12 pC, 4.56pC และ 4.82 pC ตามลำดับ ซึ่งมีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานการทดสอบ ดังนั้นขั้วต่อสายมีขนาดเล็กลง น้ำหนักลดลง และใช้งานในห้องทดสอบแทนขั้วต่อสายประเภทฉนวนอื่นๆได้

คำสำคัญ : ขั้วต่อสายเคเบิล ดิสชาร์จบางส่วน ความเครียดสนามไฟฟ้า การฉนวน เคเบิลแรงสูงใต้ดิน

Thesis Title : DESIGN AND CONSTRUCTION OF HIGH VOLTAGE UNDERGROUND CABLE TERMINATOR XLPE 24 kV FOR MEASUREMENT TESTING OF PARTIAL DISCHARGE USING SF₆ INSULATOR

Student Name : Mr. Thong Larntarntong

Student ID : 114870402005-2

Degree Award : Master of Engineering

Study Program : Electrical Engineering

Academic Year : 2010

Thesis Advisor : Assistant Professor Dr. Somchai Hiranvarodom

Abstract

The research aims to design and construct the 24 kV high voltage underground cable (XLPE) terminals for testing the partial discharge of SF₆ gas insulators which resist to high breakdown voltage. The experiment will result in reducing in the dimensions of the terminals.

In design, the dimensions and the shapes of the terminals were taken in toconsiderations. Moreover the electrical field stress of the designed terminals must not be higher than the breakdown voltage of the SF₆ gas insulators. This could be experimented by analyzing using Analytic equations and finite elements method in order to simulate the electric field stress (E max) occurring in the terminals and also to examine the maximum rate of the electric field stress. The data was gained and led to the design of the terminals.

The results of IEC 60502 -2 standard cable testing with maximum partial discharge not over 10 pC revealed that SF₆ gas could be used as insulation. According to the testing system using 3 examples of cables and terminals; 240 mm², 185 mm² and 150 mm², it was found that the maximum partial discharge conformed with standard testing, so that the dimensions and the weight of the terminals were reduced and could be applied in the laboratory to replace the other insulation.

KEYWORDS: Cable Terminator, Partial Discharge, Electric Field Stress, Insulation, High Voltage Under Ground Cable

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเพราะผู้วิจัยได้รับความช่วยเหลือจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมชัย หิรัญวิโรดม ในฐานะอาจารย์ที่ปรึกษา และอาจารย์พร้อมศักดิ์ อภิรติกุล ที่ได้กรุณาชี้แนะ และให้ แรงคิด ต่างๆที่เป็นประโยชน์กับงานวิจัยและในการนี้ขอกราบ ขอบพระคุณคณาจารย์ในสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ ประสาทวิชาความรู้ในวิทยาการต่างๆ และมอบ โอกาสทางการเรียนรู้มาโดยตลอด ผู้วิจัยขอกราบ ขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านมา ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ นรเศรษฐ พัฒนเดช คุณเพทาย นิมสนอง สาขา วิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และ อาจารย์ธนากร น้ำหอมจันทร์ อาจารย์ประจำสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย ที่กรุณาให้ความรู้เกี่ยวกับโปรแกรม COMSOL Multiphysics ในการ วิเคราะห์ไฟในลัทธิลิเมนต์ และเอกสาร ข้อมูลต่างๆ ตลอดจนข้อเสนอแนะทั้งในภาคทฤษฎีและภาค การปฏิบัติ อันเป็นประโยชน์ ในการทดสอบขั้วต่อสายเคเบิลใต้ดิน XLPE แรงดันสูง พิกัด 24 kV ขนาดสาย 240 Sq.mm ,185 Sq.mm ,150 Sq.mm จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ คุณกฤษณะ หวังสะอาดจากบริษัท สายไฟฟ้าไทย-ยาซากิ จำกัด คุณสานิต สมบูรณ์ จากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค เขต2 (ภาคกลาง) จ.ชลบุรี ที่กรุณาอนุเคราะห์ให้คำแนะนำ ในการ ปอกสายเคเบิลใต้ดิน XLPE แรงดันสูง พิกัด 24 kV ขนาดสาย 240 Sq.mm ,185 Sq.mm ,150 Sq.mm อย่างถูกวิธี และคุณสมบัติ แสงอำยวน จากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตที่อนุเคราะห์ให้ใช้ห้อง Lab High Voltage ในการทดสอบหาค่า Partial Discharge และ Dielectric Loss

ท้ายที่สุดนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณบุคคลที่เป็นกำลังใจคือคุณ รัตนา ลานธารทอง ที่ดูแลบุตร-ธิดา และผู้วิจัยเป็นอย่างดีตลอดเวลา เป็นผลให้สามารถทำงานวิจัยได้ประสบผลสำเร็จ

ทง ลานธารทอง

19 มิถุนายน 2553

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญรูป	ช
สารบัญตาราง	ฐ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 สมมุติฐานการวิจัย	2
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.5 วิธีการวิจัย	2
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 คำนำ	4
2.2 โครงสร้างของสายเคเบิลแรงสูงฉนวน XLPE	4
2.3 ทรงกระบอกซ้อนกัน	6
2.4 ระเบียบวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์	10
2.5 ทฤษฎีเบื้องต้นของการเกิดดิสชาร์จบางส่วน	17
2.6 การจำแนกชนิดของดิสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิล	22
2.7 หลักการตรวจจับดิสชาร์จบางส่วน	25
2.8 เทคนิคการวัดดิสชาร์จบางส่วน	27
2.9 เทคนิคการลดสัญญาณรบกวน	33
2.10 คุณสมบัติของเครื่องตรวจจับดิสชาร์จบางส่วน	35
2.11 ทฤษฎีการเกิดเบรกดาวน์	36
2.12 ฉนวนก๊าซ SF ₆	58
2.13 การควบคุมสนามไฟฟ้าของสายเคเบิล	63
2.14 ไดอิเล็กตริก	66
2.15 พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก	67

ห้ามฉีก ตัด หรือทำให้เสียหาย
ผู้ใดพบเห็น กรุณาส่งคืนได้ที่
โทรศัพท์ 0-2549-3079
สำนักวิทยบริการและเทคโนโลยีสารสนเทศ
มทร.ธัญบุรี
ต.คลองหก อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.16 การวัดค่าความจุไฟฟ้าและแฟกเตอร์พลังงานสูญเสีย	70
2.17 สรุป	74
บทที่ 3 การคำนวณและการออกแบบขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูง XPLE	75
3.1 การคำนวณแรงดันทดสอบการเกิดดีสชาร์จบางส่วน	75
3.2 การคำนวณการปกกฉนวนสายเคเบิลแรงสูง	75
3.3 ขั้นตอนการปกกฉนวนสายเคเบิลแรงสูง	95
3.4 การออกแบบการลดสนามไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอ	99
3.5 การออกแบบหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่ออะคริลิก	101
3.6 การควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้า	102
3.7 การออกแบบชุดฐานรองรับขั้วต่อตัวนำสายเคเบิลแรงดันสูง XPLE	120
3.8 การออกแบบและสร้างชุดลดค่าความเครียดสนามไฟฟ้า	121
3.9 แบบของขั้วต่อสายเคเบิลแรงสูง	121
3.10 แบบของหน้าแปนกระบอกอะคริลิกใส	122
3.11 แบบของฝาครอบกระบอกอะคริลิกใส	122
3.12 แบบของตัวซิลด์ก๊าซเพื่อไม่ให้ก๊าซรั่ว	123
3.13 หลักการของการใส่โอริงซิลด์ก๊าซ	123
3.14 การอัดอากาศที่ค่าความปลอดภัย	123
3.15 สรุป	125
บทที่ 4 การทดสอบวัดค่า PD	126
4.1 อุปกรณ์การวัดหาค่า Partial Discharge (PD)	126
4.2 ขั้นตอนการทดสอบขั้วต่อสายเคเบิล	126
4.3 การวิเคราะห์ค่าดีสชาร์จบางส่วนที่ขั้วต่อสายเคเบิล	127
4.4 ผลการทดสอบหาค่าดีสชาร์จบางส่วน	128
4.5 การหาค่าความจุไฟฟ้าและแฟกเตอร์พลังงานสูญเสีย	133
4.6 สรุป	135
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	136
5.1 สรุปผลการทดลอง	136
5.2 วิเคราะห์เปรียบเทียบชนิดฉนวนที่ใช้ในขั้วต่อสายในการทดสอบ	137
5.3 ข้อเสนอแนะ	138

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
เอกสารอ้างอิง	139
ภาคผนวก	140
ก งานวิจัยที่ตีพิมพ์เผยแพร่	141
ประวัติผู้เขียน	168

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 (ก) แสดง โมเลกุลของ PE	4
(ข) แสดง โมเลกุลของ XLPE หลังผ่านกระบวนการ Vulcanizing	
2.2 สายเคเบิลแรงสูงฉนวน XLPE	5
2.3 ทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม	7
2.4 การเปรียบเทียบความสนามไฟฟ้ากระจาย $E(r)$ และค่าสูงสุด E_{max} ของอิเล็กโตรด 3 แบบ	8
2.5 แสดง U_b และ E_{r1} ในเทอมของ r_1 และแสดง E_b และ E_{r1}	10
2.6 การวิเคราะห์หาผลเฉลยบน แผ่นอลูมิเนียมด้วยการใช้วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์	11
2.7 วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ ในระบบ 2 มิติ	13
2.8 แสดงคิซซาร์จบางส่วนชนิดต่างๆ	18
2.9 วงจรสมมูล PD ทั่วไป	19
2.10 (ก) แสดงการกระจายของประจุก่อนเกิดเบรกดาวน์	19
(ข) แทนผิวของฉนวนรอบโพรงอากาศด้วยค่า R และ C	19
2.11 วงจรสมมูลของโคโรนาคิซซาร์จและคิซซาร์จตามผิว	19
2.12 แรงดันคร่อมแก๊ปและกระแสที่ขั้วสายของอุปกรณ์ขณะเกิด PD	20
2.13 การเกิด PD ชั่ว	21
2.14 แสดงลักษณะรูปร่างของกระแส PD ในทางทฤษฎีสำหรับแก๊ปเล็กๆ	21
2.15 ลักษณะกระแส PD ที่ตรวจจับได้ในทางปฏิบัติโดยใช้ UWB	22
2.16 แสดงการคิซซาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นจากโพรงอากาศ	23
2.17 แสดงการคิซซาร์จบางส่วนที่เกิดจากรอยแตก	23
2.18 แสดงการคิซซาร์จบางส่วนที่เกิดจากเศษวัสดุและสิ่งเจือปน	24
2.19 แสดงการคิซซาร์จบางส่วนที่เกิดจากการขยายตัวของคาร์บอนแทรค	24
2.20 วงจรพื้นฐานสำหรับการตรวจจับคิซซาร์จบางส่วน	25
2.21 รูปคลื่นกระแสและแรงดันทดสอบของ PD	26
2.22 การแสดงผลของ PD	28
2.23 วงจรทดสอบคิซซาร์จบางส่วนแบบต่าง ๆ	29
2.24 การเกิดคลื่นจรรยาณะเกิด PD ในเคเบิลยาว	29
2.25 การเกิดชุปเปอร์โพสิชันสัญญาณเอาต์พุตของเครื่องตรวจจับ PD แบบต่าง ๆ	30
2.26 วงจรตรวจสอบคุณสมบัติชุปเปอร์โพสิชันของเครื่องตรวจจับ PD	31

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.27 ไดอะแกรมพัลส์คู่ของเครื่องตรวจจับ PD แบบต่าง ๆ	32
2.28 ไดอะแกรมพัลส์คู่เมื่อเกิดการสูญเสียในสายเคเบิล	32
2.29 ตัวอย่างสัญญาณรบกวนที่ตำแหน่งต่างๆ	33
2.30 ตัวอย่างการลดสัญญาณรบกวน	34
2.31 การลดสัญญาณรบกวนด้วยวิธี “หน้าต่างเวลา”	35
2.32 สภาพการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในไนโตรเจนที่ 1 bar 20 °C	37
2.33 หาคความสัมพันธ์ของพาสเซนโดยวิธีกราฟ	39
2.34 เส้นโค้งของพาสเซน	40
2.35 เส้นโค้งพาสเซน ของอากาศที่ 20 °C	43
2.36 เส้นโค้งพาสเซน ของไนโตรเจน 25 °C	43
2.37 เส้นโค้งพาสเซน ของSF ₆ ที่ 25 °C	44
2.38 ดิสชาร์จแบบกระบวนการ β	46
2.39 การสร้างอิเล็กตรอนอิสระโดยกระบวนการ γ	50
2.40 ความเครียดสนามไฟฟ้าเบรกดาวน์ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ	52
2.41 ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของก๊าซ SF ₆ ในฟังก์ชันความดัน	53
2.42 สัมประสิทธิ์ไอออไนเซชันของอากาศ	55
2.43 ความเครียดสนามไฟฟ้าเบรกดาวน์ของอากาศในอิเล็กโตรดทรงกระบอกแกนร่วม	57
2.44 ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า E ₀ ของอากาศในสนามไฟฟ้าของอิเล็กโตรดทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม	58
2.45 โมเลกุลของก๊าซ SF ₆	59
2.46 แรงดันเบรกดาวน์ของก๊าซ SF ₆ เปรียบเทียบกับอากาศและน้ำมันหม้อแปลง	60
2.47 เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ของแรงดันเบรกดาวน์ (U _b) กับผลคูณของความดันกับระยะแกป (p.d)	61
2.48 ตัวอย่างแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของแกปดิสชาร์จในก๊าซนีออน	62
2.49 แสดงค่าคาปาซิแตนซ์ของสายเคเบิล	64
2.50 แสดงสนามไฟฟ้าที่ไม่มีการแก้ไข	65
2.51 แสดงการแก้ไขสนามไฟฟ้าแบบ Capacitive stress control	65
2.52 แสดงการแก้ไขสนามไฟฟ้าแบบ Refractive stress control	66

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.53 วงจรสมมูลของไดอิเล็กตริกที่แทนพลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกเนื่องจากสภาพนำไฟฟ้าโพลาไรเซชันและดิสซาร์จบางส่วน	67
2.54 วงจรสมมูลของไดอิเล็กตริก	70
2.55 วงจรวัด C และ tgδ ด้วย Schering Bridge	71
2.56 เวกเตอร์ไดอะแกรมของวงจร Schering bridge	72
3.1 หน้าแรกของ Program COMSOL Multiphysics 3.3	76
3.2 หน้าเริ่มต้นการใช้งาน	76
3.3 แบบสายเคเบิลXLPE พร้อมขั้วต่อสายเคเบิล	77
3.4 ส่วนประกอบต่างๆของวัสดุที่จะทำการกำหนดค่าของวัสดุ	77
3.5 กำหนดคุณสมบัติของส่วนที่ 1 คืออะลูมิเนียม	78
3.6 กำหนดคุณสมบัติของส่วนที่ 2 คือ ทองแดง	79
3.7 กำหนดคุณสมบัติของส่วนที่ 3 คือ XLPE	79
3.8 กำหนดคุณสมบัติของส่วนที่ 4 คือ อากาศ	80
3.9 กำหนดคุณสมบัติของส่วนที่ 5 คือ อะคลีติก	80
3.10 กำหนดคุณสมบัติของส่วนที่ 6 คือ ทองแดง	81
3.11 กำหนดคุณสมบัติของส่วนที่ 7 คือ PE	81
3.12 กำหนดคุณสมบัติของส่วนที่ 8 คือ Semiconductor-conducting	82
3.13 กำหนดคุณสมบัติของส่วนที่ 9 คือ บรรยากาศปกติ	82
3.14 กำหนดค่าแรงดัน 24 kV	83
3.15 Ground	83
3.16 ผลการ Simulations	84
3.17 Cross-Section Plot Parameters	84
3.18 ผลการวางไฟตามผิว XLPE ที่ระยะ 30 mm	85
3.19 ระยะปลายสาย จาก XLPE ถึง Semiconductor ห่างกัน 40 mm	85
3.20 ผลการวางไฟตามผิว XLPE ที่ระยะ 40 mm	86
3.21 ระยะปลายสาย จาก XLPE ถึง Semiconductor ห่างกัน 50 mm	86
3.22 ผลการวางไฟตามผิว XLPE ที่ระยะ 50 mm	87
3.23 ระยะปลายสาย จาก XLPE ถึง Semiconductor ห่างกัน 60 mm	87
3.24 ผลการวางไฟตามผิว XLPE ที่ระยะ 60 mm	88

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.25 ระยะปลายสาย จาก XLPE ถึง Semiconductor ห่างกัน 70 mm	88
3.26 ผลการรวบไฟตามผิว XLPE ที่ระยะ 70 mm	89
3.27 ระยะปลายสาย จาก XLPE ถึง Semiconductor ห่างกัน 80 mm	89
3.28 ผลการรวบไฟตามผิว XLPE ที่ระยะ 80 mm	90
3.29 ระยะปลายสาย จาก XLPE ถึง Semiconductor ห่างกัน 90 mm	90
3.30 ผลการรวบไฟตามผิว XLPE ที่ระยะ 90 mm	91
3.31 ระยะปลายสาย จาก XLPE ถึง Semiconductor ห่างกัน 100 mm	91
3.32 ผลการรวบไฟตามผิว XLPE ที่ระยะ 100 mm	92
3.33 ระยะปลายสาย จาก XLPE ถึง Semiconductor ห่างกัน 140 mm	92
3.34 ผลการรวบไฟตามผิว XLPE ที่ระยะ 140 mm	93
3.35 ระยะปลายสาย จาก XLPE ถึง Semiconductor ห่างกัน 160 mm	93
3.36 ผลการรวบไฟตามผิว XLPE ที่ระยะ 160 mm	94
3.37 เปรียบเทียบการเกิดการรวบไฟตามผิวจาก โพรแกรม	94
3.38 วัฏระยะที่จะปอกสายเคเบิล ที่ได้จาก Simulations	95
3.39 การลอกผิวเปลือกนอก (Sheath)	95
3.40 ทำการลอกผิวเปลือกนอก(Sheath) ออก	96
3.41 Copper Shield Type	96
3.42 ลักษณะการเก็บ Copper Shield Type	96
3.43 วัดความยาวที่จะปอก Semiconductor-conducting tape	97
3.44 การกรีดที่ผิวของ Semiconductor-conducting tape	97
3.45 ใช้ไขควงปากแบนงัดที่ปลายสาย	97
3.46 การลอก Semiconductor-conducting tape ออก	98
3.47 ตัด Semiconductor-conducting tape ที่ลอกออก	98
3.48 กว๊น Insulation Shield	99
3.49 งัด Insulation Shield ออก	99
3.50 การแสดงการกระจายของเส้นศักย์ไฟฟ้าในสายเคเบิลที่ตัดชั้นกึ่งตัวนำนอก บางส่วนออก	100
3.51 อิเล็กโตรดทรงกระบอกซ้อนกัน	101
3.52 องค์ประกอบการคำนวณสนามไฟฟ้าที่สายเคเบิลในลักษณะทรงกระบอกซ้อนกัน	102

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.53 ความเค้นสนามไฟฟ้าที่สาย 240 sq.mm.	103
3.54 ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิว Er_2 ฉนวนก๊าซ คือ อากาศที่สายขนาด 240 sq.mm	104
3.55 ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิว Er_3 ฉนวนก๊าซ คือ อากาศที่สายขนาด 240 sq.mm	105
3.56 ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิว Er_2 ฉนวนก๊าซ คือ สุญญากาศที่สายขนาด 240 sq.mm	106
3.57 ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิว Er_3 ฉนวนก๊าซ คือ สุญญากาศที่สายขนาด 240 sq.mm	117
3.58 ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิว Er_2 ฉนวนก๊าซ คือ SF ₆ ที่สายขนาด 240 sq.mm	108
3.59 ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิว Er_3 ฉนวนก๊าซ คือ SF ₆ ที่สายขนาด 240 sq.mm	108
3.60 ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิว Er_2 ฉนวนก๊าซ คือ อากาศที่สายขนาด 185 sq.mm	110
3.61 ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิว Er_3 ฉนวนก๊าซ คือ อากาศที่สายขนาด 185 sq.mm	110
3.62 ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิว Er_2 ฉนวนก๊าซ คือ สุญญากาศที่สายขนาด 185 sq.mm	111
3.63 ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิว Er_3 ฉนวนก๊าซ คือ สุญญากาศที่สายขนาด 185 sq.mm	112
3.64 ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิว Er_2 ฉนวนก๊าซ คือ SF ₆ ที่สายขนาด 185 sq.mm	113
3.65 ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิว Er_3 ฉนวนก๊าซ คือ SF ₆ ที่สายขนาด 185 sq.mm	114
3.66 ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิว Er_2 ฉนวนก๊าซ คือ อากาศที่สายขนาด 185 sq.mm	115
3.67 ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิว Er_3 ฉนวนก๊าซ คือ อากาศที่สายขนาด 150 sq.mm	116
3.68 ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิว Er_2 ฉนวนก๊าซ คือ สุญญากาศที่สายขนาด 150 sq.mm	117
3.69 ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิว Er_3 ฉนวนก๊าซ คือ สุญญากาศที่สายขนาด 150 sq.mm	118
3.70 ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิว Er_2 ฉนวนก๊าซ คือ SF ₆ ที่สายขนาด 150 sq.mm	119
3.71 ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิว Er_3 ฉนวนก๊าซ คือ SF ₆ ที่สายขนาด 150 sq.mm	119
3.72 แบบและภาพฐานรองรับขั้วต่อตัวนำสายเคเบิลแรงดันสูง XLPE	120
3.73 ตัวลดความเครียดสนามไฟฟ้าที่ปลายขั้วต่อสาย	121
3.74 แบบและภาพของขั้วต่อสายเคเบิลแรงสูง	121
3.75 แบบและภาพของหน้าแปนกระบอกอะคริลิกใส	122
3.76 แบบและภาพของฝาครอบกระบอกอะคริลิกใส	122
3.77 แบบและภาพของตัวซีลด์ก๊าซ	123
3.78 แบบภาพการใส่โอริง	123
4.1 วงจรในการทดสอบ	127
4.2 ผลการทดสอบขั้วต่อสายเคเบิล ฉนวนก๊าซ คือ อากาศที่สายขนาด 240 sq.mm	128
4.3 ผลการทดสอบขั้วต่อสายเคเบิล ในสภาวะสุญญากาศ ที่สายขนาด 240 sq.mm	128

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.4 ผลการทดสอบขั้วต่อสายเคเบิล ฉนวนก๊าซ คือ SF ₆ ที่สายขนาด 240 sq.mm	129
4.5 ผลการทดสอบขั้วต่อสายเคเบิล ฉนวนก๊าซ คือ อากาศ ที่สายขนาด 185 sq.mm	129
4.6 ผลการทดสอบขั้วต่อสายเคเบิล ในสถานะสุญญากาศ ที่สายขนาด 185 sq.mm	129
4.7 ผลการทดสอบขั้วต่อสายเคเบิล ฉนวนก๊าซ คือ SF ₆ ที่สายขนาด 185 sq.mm	130
4.8 ผลการทดสอบขั้วต่อสายเคเบิล ฉนวนก๊าซ คือ อากาศ ที่สายขนาด 150 sq.mm	130
4.9 ผลการทดสอบขั้วต่อสายเคเบิล ในสถานะสุญญากาศ ที่สายขนาด 150 sq.mm	131
4.10 ผลการทดสอบขั้วต่อสายเคเบิล ฉนวนก๊าซ คือ SF ₆ ที่สายขนาด 150 sq.mm	132
4.11 วงจร Schering Bridge เพื่อหาค่าความจุไฟฟ้าและแฟกเตอร์พลังงานสูญเสีย ไดอิเล็กตริกห้องปฏิบัติการ ไฟฟ้าแรงสูง การไฟฟ้าฝ่ายผลิต	133
5.1 เปรียบเทียบการเกิดพาร์เซิลดิสชาร์จในสายทั้ง 3 ขนาด	137

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ข้อดี และข้อเสียของไฟไนต์เอลิเมนต์	17
2.2 สภาพการเคลื่อนที่ของไอออนบวก (b^+) และไอออนลบ (b^-) ของก๊าซต่างๆ	39
2.3 แสดงค่าแรงดันเบรกควาน์ค่าต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับความดันและชนิดของก๊าซ	44
2.4 ความเครียดสนามไฟฟ้าเบรกควาน์ของอากาศ	54
2.5 แสดงคุณสมบัติของก๊าซ SF ₆	62
3.1 คุณสมบัติของวัสดุจาก Materials Library ของโปรแกรม COMSOL MULTIPHYSICS 3.3	80
4.1 ผลการทดสอบคิซาร์จบางส่วนในสายเคเบิลแรงดันสูง XLPE ขนาดสาย 240 sq.mm	132
4.2 ผลการทดสอบคิซาร์จบางส่วนในสายเคเบิลแรงดันสูง XLPE ขนาดสาย 185 sq.mm	132
4.3 ผลการทดสอบคิซาร์จบางส่วนในสายเคเบิลแรงดันสูง XLPE ขนาดสาย 150 sq.mm	133
4.4 ผลการทดสอบการวัดค่าคาปาซิแตนซ์ของชุดทดสอบร่วมกับสายเคเบิล ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 66% อุณหภูมิห้อง 31 °C	134
5.1 เปรียบเทียบค่า (PD)	136
5.2 ความคงทนต่อแรงดันเบรกควาน์ของก๊าซ SF ₆ เมื่อผสมกับก๊าซอื่น	138

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากประเทศไทยมีการพัฒนาและขยายการลงทุนทำให้มีผู้ใช้ไฟฟ้ารายใหญ่เกิดขึ้นจำนวนมาก ทั้งในส่วนภาคธุรกิจอุตสาหกรรม ธุรกิจ ห้างสรรพสินค้า โรงแรม การคมนาคมขนส่ง และการศึกษา ทำให้ความต้องการใช้ไฟฟ้าในประเทศมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นจึงต้องขยายระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเพื่อให้สามารถส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้เพียงพอกับความต้องการของผู้ใช้ไฟฟ้า และมีคุณภาพตามมาตรฐานสากล สายเคเบิลแรงสูงก็เป็นองค์ประกอบที่สำคัญประการหนึ่งในระบบจำหน่ายพลังงานไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งสายเคเบิลแรงสูงนั้นเป็นสายที่ให้ประสิทธิภาพสูงในการใช้งานสูง แต่ก็มีข้อเสียอยู่บ้าง เช่น น้ำหนักมากมีขนาดใหญ่และสายเคเบิลแรงสูงยังใช้จ่ายไฟฟ้าที่แรงดันสูงซึ่งอาจทำให้เกิดอันตรายในชีวิตและทรัพย์สินของผู้ใช้ได้ ดังนั้นทั้งอุปกรณ์และการติดตั้งต้องไม่ก่อให้เกิดความผิดพลาด ทำให้มีปัญหาในการติดตั้งและเมื่อติดตั้งแล้วก็ถ้ามีการผิดพลาดก็ตรวจเช็คและซ่อมแซมยากดังนั้นทุกขั้นตอนในการติดตั้งต้องให้มั่นใจว่าได้คุณภาพมากที่สุดจึงต้องมีการสร้างอุปกรณ์ที่ใช้ตรวจสอบคุณภาพของสายเคเบิลแรงสูงเพื่อเช็คที่สายเคเบิลไม่ได้เสียหายเราจึงคิดและสร้างหัวต่อสายเคเบิลได้คิน XLPE แรงดันสูงพิกัด 24 kV เพื่อทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนโดยประยุกต์ใช้ก๊าซ SF₆ เป็นสารฉนวน เพื่อเป็นการทดสอบและตรวจเช็คคุณภาพของสายเคเบิลแรงสูงก่อนนำไปใช้งานเนื่องจากสายไฟฟ้าแรงสูงมีขนาดค่อนข้างใหญ่และน้ำหนักมากจึงไม่เหมาะที่จะทำการติดตั้งบนอากาศโดยใช้เสาไฟฟ้าอีกทั้งการติดตั้งบนอากาศยังใช้พื้นที่เยอะและมีปัญหาในการติดตั้งเนื่องจากมีตึกสูงใหญ่เกิดขึ้นมากมายตามสถานที่ที่เป็นเขตชุมชนเมืองและอีกทั้งยังบดบังทัศนียภาพที่สวยงามจึงได้มีการคิดติดตั้งสายไฟฟ้าโดยใช้การเดินฝังไว้ใต้ดินดังนั้นถ้าเกิดการเสียหายของสายไฟจะทำให้ยากต่อการตรวจเช็คและซ่อมแซมหรือแม้แต่จะติดตั้งใหม่ก็ยากเช่นกันเพื่อให้แน่ใจว่าสายเคเบิลที่ผลิตจากโรงงานผลิตสายไฟฟ้านั้นว่าผ่านกระบวนการผลิตสายไฟฟ้าที่ได้คุณภาพตามมาตรฐานหรือไม่และมีความคงทนอยู่ได้ต่อสภาวะต่างๆ ได้ดังนั้นจึงต้องมีการตรวจสอบสภาพของฉนวนสายเคเบิลก่อนที่จะฝังใต้ดินก่อนใช้งานเพื่อความมั่นใจในการวางระบบว่าจะไม่เกิดปัญหาจากฉนวนของสายเคเบิลชำรุด โดยปกติการทดสอบฉนวนของสายเคเบิลนั้นจะ ได้ทำการทดสอบมาจากโรงงานผู้ผลิตสายเคเบิลและสายทุกเส้นที่จะต้องส่งมอบให้กับลูกค้านั้นต้องผ่านการตรวจสอบสภาพฉนวนของสายเคเบิลทุกเส้น การทดสอบฉนวนของสายเคเบิลนี้ ก็คือการทดสอบวัดหาค่าดิสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge, PD) ในสายเคเบิลแรงดันสูงที่เป็นฉนวนประเภท XLPE

ดิสชาร์จบางส่วนเป็นปัญหาที่สำคัญของฉนวนไฟฟ้าเพราะจะเป็นสาเหตุให้ฉนวนไฟฟ้าเสื่อมสภาพได้เร็วกว่าปกติ เกิดพลังงานไฟฟ้าสูญเสีย และยังมีผลกระทบต่อระบบอิเล็กทรอนิกส์และ

รบกวนระบบสื่อสารอีกด้วย จึงจำเป็นต้องมีการวัดหรือตรวจจับ PD ก่อนนำสายไฟฟ้าไปใช้งานว่ามี PD เกิดค่าที่มาตรฐานกำหนดไว้หรือไม่ โดยการวัดด้วยเครื่องตรวจจับ PD ซึ่งจัดเป็นวิธีการทดสอบ คุณสมบัติของอุปกรณ์แบบไม่ทำลายและเป็นข้อกำหนดที่สำคัญของมาตรฐานการทดสอบในปัจจุบัน และการออกแบบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงจึงต้องป้องกันหรือหลีกเลี่ยงไม่ให้มี PD เกิดขึ้น หรือเลือกใช้เทคนิคการฉนวนที่เหมาะสม

1.2 วัดดูประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อใช้งานด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงในเรื่อง Partial Discharge และ Dielectric Loss ที่เกิดขึ้น ภายในโครงสร้างของฉนวนของสายเคเบิล เพื่อทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนโดยใช้ก๊าซ SF₆ เป็นสารฉนวน

1.2.2 เพื่อใช้เป็นแนวทางการออกแบบขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงสำหรับห้องปฏิบัติการทางวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงลดการทำเข้าจากต่างประเทศ

1.2.3 เพื่อศึกษาและทำความเข้าใจในทฤษฎีและหลักการเกิด Partial Discharge

1.3 สมมุติฐานการวิจัย

การศึกษาดังปัญหาของ Partial Discharge ที่เกิดขึ้นภายใน โครงสร้างฉนวนของสาย Cable โดยใช้ก๊าซ SF₆ เป็นสารฉนวนเทียบกับฉนวนที่เป็นสุญญากาศและความดันอากาศ โดยการวิจัยครั้งนี้ มุ่งหวังว่าก๊าซ SF₆ จะมีผลการเป็นวัสดุฉนวนที่มีผลที่ดีกว่าฉนวนสุญญากาศและฉนวนความดันอากาศ โดยทำการทดลองสร้างขั้วต่อสายเพื่อใช้ฉนวนทั้ง 3 แบบ แล้วนำมาทดสอบเพื่อหาค่า Partial Discharge เปรียบเทียบของการฉนวนทั้ง 3 ชนิด

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

1.4.1 การออกแบบและสร้างขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูง XLPE ขนาดพิกัดแรงดัน 24 kV ขนาด 150 mm², 185 mm² และ 240 mm² เพื่อทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนโดยใช้ก๊าซ SF₆ เป็นสารฉนวน

1.4.2 การวิเคราะห์หาค่าดิสชาร์จบางส่วนและพลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกของสายเคเบิลแรงสูง XLPE ขนาดพิกัดแรงดัน 24 kV ขนาด 150 mm², 185 mm² และ 240 mm²

1.5 วิธีการวิจัย

1.5.1 ค้นคว้าและศึกษาข้อมูลจากบทความ วารสาร และต่างๆ ที่สามารถศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับ ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

1.5.2 การออกแบบ และสร้างขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูง

1.5.3 การวิเคราะห์และทดสอบหาค่าดิซชาร์จบางส่วน (Partial Discharge) ของสายเคเบิลแรงดันสูง โดยใช้ขั้วต่อสายที่ได้ออกแบบและสร้างขึ้นในงานวิจัย

1.5.4 การวิเคราะห์และทดสอบหาค่าพลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก (Dielectric Loss) ของสายเคเบิลแรงดันสูง โดยใช้ขั้วต่อสายที่ได้ออกแบบและสร้างขึ้นในงานวิจัย

1.5.5 สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 สามารถศึกษาออกแบบและสร้างขั้วต่อสายเคเบิลแรงสูงสำหรับห้องปฏิบัติการทางวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง

1.6.2 สามารถนำไปวิเคราะห์ค่า Partial Discharge

1.6.3 สามารถวิเคราะห์ค่า Partial Discharge ของสายเคเบิลที่มีการฉนวนด้วยก๊าซคือ อากาศสุญญากาศ และก๊าซ SF₆

1.6.4 สามารถลดงบประมาณที่จะนำเข้าจากต่างประเทศ

บทที่ 2

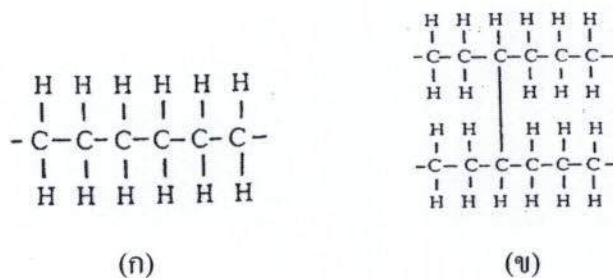
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 คำนำ

ก่อนที่จะทำการออกแบบสร้าง จะต้องทราบถึงหลักการและลักษณะเกิดดิสชาร์จบางส่วน และหลักการออกแบบพื้นฐานเกี่ยวกับส่วนประกอบต่างๆ ของขั้วต่อสายเคเบิล เช่น ทฤษฎีการเกิดดิสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge) และความเครียดสนามไฟฟ้า คุณสมบัติของฉนวนก๊าซใช้ก๊าซ SF₆ เป็นฉนวน เพื่อใช้ในการพิจารณาศึกษาผลกระทบของการออกแบบสร้างขั้วต่อสายเคเบิลซึ่งจะกล่าวในบทที่ 2 นี้

2.2 โครงสร้างของสายเคเบิลแรงสูงฉนวน Cross Linked Polyethylene (XLPE) [1]

ประมาณต้นๆ ปี ค.ศ. 1960 มีการผลิต Cable แรงดันต่ำ แรงดันกลาง และสาย Control โดยใช้ Cross Linked Polyethylene (XLPE) เป็นฉนวน โดยผลิตขึ้นจาก Ethylene Gas ซึ่งได้เปลี่ยนเป็น Low Density Polyethylene ทำให้เป็นส่วนเล็กๆ ภายใต้อุณหภูมิประมาณ 50,000 psi XLPE เป็น Homo Polymer ชนิดหนึ่งที่มีโครงสร้างที่เชื่อมโยงทางเคมี โดยอนุภาคโมเลกุล Carbon ของ Polyethylene (1 โมเลกุลจะมี Carbon Atom ประมาณ 1,000-1,400 อะตอม) ทำการเชื่อมโยงถึงกันเป็นลูกโซ่ (Cross Bonding) ภายใต้อุณหภูมิกระบวนการ Vulcanizing Process ดังรูปที่ 2.1(ก) แสดงให้เห็น โมเลกุลของ PE ซึ่งประกอบด้วย C-Atom และ H-Atom เกาะกันเป็นลูกโซ่ (Chain) และในรูปที่ 2.1 (ข) แสดงให้เห็น โมเลกุลของ XLPE ภายหลังจากผ่านกระบวนการ Vulcanizing แล้ว C-Atom จะเชื่อมโยงถึงกัน



รูปที่ 2.1 (ก) แสดงโมเลกุลของ PE [1]

(ข) แสดงโมเลกุลของ XLPE หลังผ่านกระบวนการ Vulcanizing

2.2.1 ฉนวน XLPE

XLPE มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าเหมือนกับ PE (Polyethylene) ทุกประการเมื่อทำการ Bonding ระหว่างโมเลกุลของ PE แล้วทำให้ XLPE มีคุณสมบัติทางกล ทางกายภาพ ทนความร้อน และมี Tensile Strength ดีกว่า PE เดิมที่อุณหภูมิสูง ฉนวน XLPE ผลิตขึ้น โดยกระบวนการที่ต่อเนื่อง ที่รวมการ Extrusion ของฉนวนและ Screening Layer ไปพร้อมกันตั้งแต่ต้นจนจบกระบวนการ การ ทำให้เกิด Cross Linking ที่โมเลกุลของ PE สามารถทำได้ดังนี้

1) การใช้ Peroxide

การใช้ Peroxide เช่น Dicumyl Peroxide เข้าร่วมกระบวนการ การผลิต Cross Linking จะเกิดขึ้นหลังจากทำการขับของเหลวออก ทำให้เกิดเป็น Cross Linking อาจทำได้ 2 วิธี โดยวิธีแรกใช้ความร้อนชื้น (Steam Curing) เป็นตัวหลอมละลาย PE กับสาร Peroxide ใช้ความร้อนที่ 210 องศาเซลเซียส ภายใต้ความกดดันที่ 18-20 bar วิธีที่สองใช้ความร้อนแห้ง (Dry Curing) เป็นตัวหลอมละลายใช้ความร้อนที่ 210 องศาเซลเซียส ภายใต้ความกดดันที่ 5-10 bar สาร Peroxide จะทำปฏิกิริยาทางเคมีกับโมเลกุลของ PE ทำให้ C-Atom ของ PE เกาะกันเป็นลูกโซ่ มีลักษณะเป็นวงๆ เกิดเป็น Cross Linking

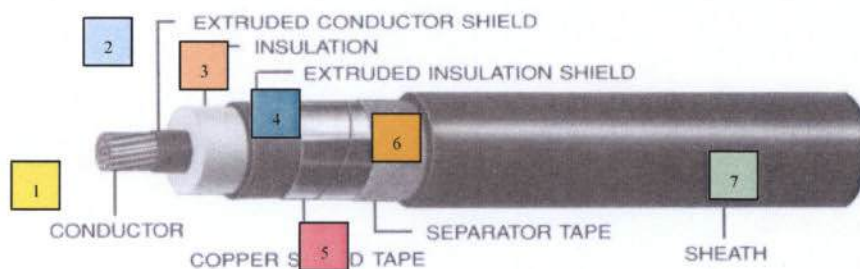
2) การใช้ระบบ Sioplass

โดยการผสมโมเลกุลของ Silane เข้าไปใน Polyethylene เมื่อส่วนผสมนี้ทำปฏิกิริยาเคมีกับน้ำหรือไอน้ำ ความดันต่ำ ทำให้เกิดการเกาะตัวไม่เหมาะที่จะผลิต Cable ฉนวนหนาๆ เพราะจะต้องใช้เวลานานมากในการขับน้ำออกจากฉนวนนั้น การทำฉนวน XLPE ด้วยระบบนี้จึงนิยมผลิต CABLE สำหรับใช้ในระดับแรงดันต่ำและปานกลาง ซึ่งมีฉนวนไม่หนามากนัก

ฉนวน XLPE มีคุณสมบัติดีกว่าฉนวน PE ฉนวน XLPE จะเปลี่ยนรูปได้น้อยมากที่อุณหภูมิสูง ขณะที่ฉนวน PE จะหลอมละลายที่อุณหภูมิประมาณ 110 องศาเซลเซียส ฉนวน XLPE มีคุณสมบัติทางกลที่ดีในอุณหภูมิสูงทั้งยังทนต่อน้ำมันและสารเคมี นอกจากนั้นสามารถทนต่ออุณหภูมิสูงขณะมีการลัดวงจรและทนต่อกระแสลัดวงจรได้ดีอีกด้วย

2.2.2 โครงสร้างสายเคเบิลแรงสูงฉนวน XLPE

สายชนิดนี้จัดเป็นสาย Fully Insulated มีโครงสร้างดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 สายเคเบิลแรงสูงฉนวน XLPE [1]

1) ตัวนำ (Conductor)

ส่วนใหญ่เป็นทองแดงตีเกลียว ซึ่งอาจจัดอยู่ในรูปแบบของ Copper Concentric Strand ทำหน้าที่เป็นทางเดิน ของกระแสไฟฟ้า

2) ชีลด์ของตัวนำ (Conductor Shield)

ทำด้วยสารกึ่งตัวนำ มีหน้าที่ช่วยให้สนามไฟฟ้าระหว่างตัวนำกับฉนวนกระจายอย่างสม่ำเสมอในแนวรัศมี ช่วยลดการเกิด Break down ได้

3) ฉนวน (Insulation)

เป็นชั้นที่ห่อหุ้มชีลด์อีกทีหนึ่ง ทำด้วยฉนวน XLPE ทำหน้าที่ฉนวนกันศักย์ไฟฟ้าระหว่างตัวนำกับดิน (ground)

4) ชีลด์ของฉนวน (Insulation Shield)

เป็นชั้นของ Semi-Conducting Tape พันทับชั้นของฉนวนจากนั้นก็หุ้มด้วยชั้นของ Copper Tape อีกทีหนึ่ง ชีลด์ของฉนวนนี้ทำหน้าที่ จำกัดสนามไฟฟ้า ให้อยู่เฉพาะภายในสายเคเบิล เป็นการป้องกันการรบกวนระบบสื่อสาร นอกจากนี้การต่อชีลด์ลงดิน จะช่วยลดอันตราย จากการสัมผัสถูกสายเคเบิลด้วย และทำให้เกิดการกระจายของแรงดันอย่างสม่ำเสมอเวลาใช้งาน

5) Copper Shield Tape

ทำด้วยโลหะแบนหรือเส้นโลหะกลม

6) Separator

หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Bedding Tape โดยปกติทำด้วยวัสดุจำพวกผ้า ทำหน้าที่เพิ่มความแข็งแรงของเปลือกนอกและยังช่วยเพิ่มความถี่ระหว่างเปลือกนอกกับ Metal Tape กรณีที่มีสายตัดโค้งหรืองอ

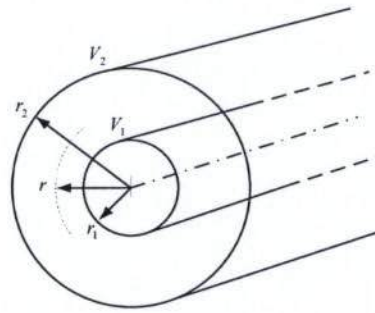
7) เปลือกนอก (Sheath)

อาจเป็น Polyvinyl Chloride หรือ Polyethylene ก็ได้แล้วแต่ลักษณะงาน ถ้าเป็นงานกลางแจ้ง มักใช้ Polyvinyl Chloride เพราะเมื่อเกิดการติดไฟ ขณะที่ Polyethylene มักใช้งานในร่ม เนื่องจากทนต่อสภาพดินฟ้าอากาศ สายชนิดนี้สามารถเดินลอย ในอากาศหรือฝังดินก็ได้ แต่นิยมฝังใต้ดิน เนื่องจากมีความแข็งแรง ทนทานสามารถทนต่อความชื้นได้ดี

2.3 ทรงกระบอกซ้อนกัน

เมื่ออิเล็กทรอนิกส์ลักษณะเป็นทรงกระบอกซ้อนกัน เส้นฟลักซ์ไฟฟ้าจะอยู่ในแนวรัศมีและพื้นผิวของทรงกระบอกก็คือ พื้นผิวศักย์ไฟฟ้าเท่า ดังนั้นโดยอาศัยอินทิกรัลสมการที่สี่ของแมกซ์เวลล์ $Q = \int_S \vec{D} \cdot d\vec{A}$ สำหรับทรงกระบอกซ้อนกันมีความยาว l รัศมี r ($r_1 \leq r \leq r_2$)

ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ทรงกระบอกซ้อนกัน [2]

เมื่อ $E = D/\epsilon$ จะหาค่าสนามไฟฟ้าที่รัศมี r ได้คือ

$$E_r = \frac{Q}{2\pi\epsilon l} \cdot \frac{1}{r} \quad (2.1)$$

และแรงดันที่ป้อนระหว่างทรงกระบอกทั้งสองคือ

$$U = \int_{r_1}^{r_2} E_r dr = \frac{Q}{2\pi\epsilon l} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r} \quad (2.2)$$

$$U = \frac{Q}{2\pi\epsilon l} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (2.3)$$

จึงจะได้ความเค้นสนามไฟฟ้าที่ $r_1 < r < r_2$

$$E_r = \frac{U}{r \ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (2.4)$$

ฉะนั้นความเค้นสนามไฟฟ้าสูงสุด E_{\max} จะเกิดขึ้นที่ผิวของทรงกระบอกอันใน นั่นคือ

$$E_{\max} = E_{r_1} = \frac{U}{r_1 \ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (2.5)$$

จากนิยามแฟกเตอร์สนามไฟฟ้า $\eta^* = E_{av} / E_{max}$

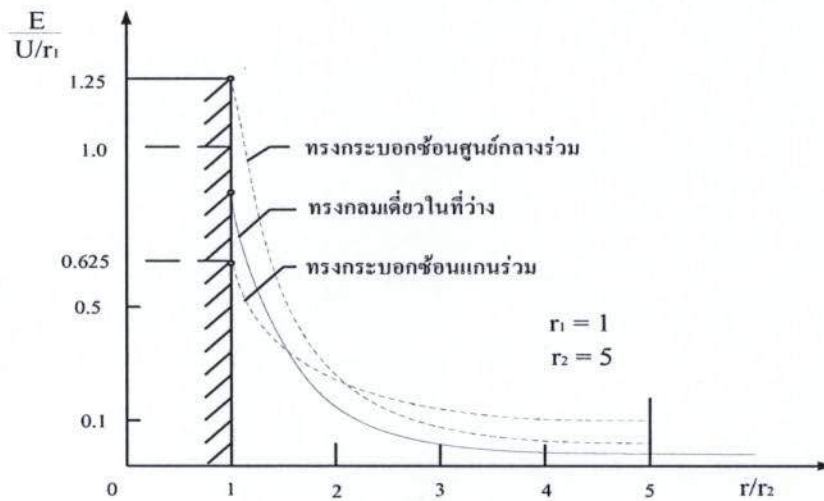
โดยที่
$$E_{av} = \frac{U}{r_2 - r_1} \quad (2.6)$$

ฉะนั้น
$$\eta^* = \frac{r_1 \ln \frac{r_2}{r_1}}{r_2 - r_1} \quad (2.7)$$

ความจุไฟฟ้าของทรงกระบอกซ้อนกันแกนร่วมคำนวณจาก $Q = CU$ ในสมการ (2.3) ได้

$$C = \frac{2\pi\epsilon\ell}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (2.8)$$

ความเครียดสนามไฟฟ้ากระจาย และความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดของอิเล็กโทรดทั้ง 3 แบบ เปรียบเทียบกับความเครียดสนามไฟฟ้าของทรงกลมเดี่ยว ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 การเปรียบเทียบความเครียดสนามไฟฟ้ากระจาย $E(r)$ และค่าสูงสุด E_{max} ของอิเล็กโทรด 3 แบบ [2]

จากการเปรียบเทียบสนามไฟฟ้าสูงสุด E_{\max} ซึ่งเป็นตัวกำหนดขนาดของมิติของระบบระหว่างอิเล็กโตรดทรงกลมกับอิเล็กโตรดทรงกระบอก จะพบว่าอิเล็กโตรดแบบทรงกระบอกซ้อนกันแนบกัน มีค่า E_{\max} ต่ำกว่า จึงเหมาะกับการใช้งานในระบบไฟฟ้าแรงสูง เช่น เคเบิล และสวิตช์เกียร์ที่ใช้ก๊าซเป็นฉนวน

2.3.1 มิติที่เหมาะสม (Optimum Dimension) ของทรงกลมซ้อนและทรงกระบอกซ้อน

การออกแบบให้มีมิติที่พอเหมาะหมายถึงมิติที่เล็กที่สุดแต่สามารถทนต่อแรงดันได้สูงสุดตัวอย่างอิเล็กโตรดทรงกระบอกซ้อนกันแนบกัน หรือทรงกลมซ้อนศูนย์กลางร่วม ถ้ากำหนดขนาดอิเล็กโตรดอันนอกให้ คือ กำหนดรัศมี r_2 ให้ หากอิเล็กโตรดทรงกระบอกหรือทรงกลมอันใน มีรัศมีใกล้เคียงกับอิเล็กโตรดอันนอก ระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรดนอกกับใน คือ $d = r_2 - r_1$ จะน้อยย่อมทำให้เกิดเบรกดาวน์ได้ง่าย แต่ถ้าลดขนาดรัศมีของอิเล็กโตรดให้เล็กลงเพื่อให้ได้ระยะช่องแคบมากขึ้น การลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอันในให้เล็กลงมากๆ ย่อมทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิวตัวนำอันในสูงมากขึ้น จนความเครียดสนามไฟฟ้าถึงค่าวิกฤติ จะทำให้เกิดโคโรน่าได้ง่าย แสดงว่าต้องมีระยะช่องแคบที่พอเหมาะอันหนึ่ง คือ รัศมีอยู่ระหว่าง 0 กับ r_2 ที่จะทำให้ระบบทนแรงดันเบรกดาวน์ได้สูงสุด โดยไม่เกิดโคโรน่าก่อน

2.3.2 ทรงกระบอกซ้อนกันแนบกันที่พอเหมาะ

ในกรณีของอิเล็กโตรดทรงกระบอกซ้อนกันแนบกัน แรงดันเบรกดาวน์คือ

$$U_b = E_b \cdot r_1 \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (2.9)$$

มิติที่เหมาะสมของ r_1 เมื่อกำหนดให้ r_2 คงตัว หาได้โดย

$$\left. \frac{dU_b}{dr_1} \right|_{r_2 \text{ คงตัว}} = 0 \quad (2.10)$$

$$\frac{dU_b}{dr_1} = E_b \left(\ln \frac{r_2}{r_1} \right) = 0 \quad (2.11)$$

$$\text{ทรงกระบอกซ้อนกันแนบกันได้} \quad \left(\frac{r_2}{r_1} \right) = e \quad (2.12)$$

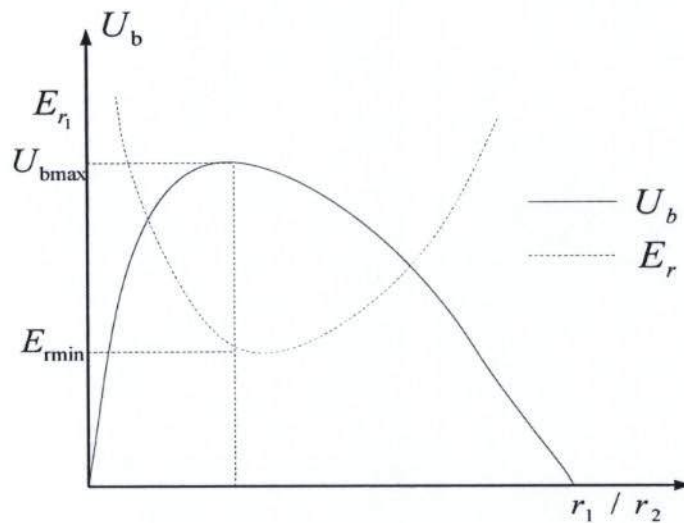
$$\text{และ} \quad E_{r_1 \text{ opt}} = E_{r_1 \text{ max}} = \frac{U}{r_1} \quad (2.13)$$

นั่นคือ

$$U_{b \max} = E_b r_1 \quad (2.14)$$

ความสัมพันธ์ U_b และ E_r ในเทอม r_1/r_2 ของทรงกระบอกซ้อนแกนร่วมแสดงในรูปที่ 2.4 จะเห็นว่า $r_1/r_2 = 1/e = 0.368$ จะเป็นค่ามิติที่พอเหมาะคือ จะได้ค่าแรงดันเบรกดาวน์ U_b มีค่าสูงสุดหรือความเครียดสนามไฟฟ้า E_r จะมีค่าต่ำสุด

ข้อสังเกต ในรูปที่ 2.5 แสดงค่า U_b และ E_r อยู่ในเทอมของ r_1/r_2 โดยสมมติว่า E_b มีค่าคงตัวแต่ในทางภาคปฏิบัติจริงค่า E_b ยังขึ้นอยู่กับ r_1 ด้วยคือ E_b ของ r_1 เล็กจะมีค่าสูงกว่า E_b ของ r_1 ที่มีค่าโต ฉะนั้นยอดสูงสุด $E_b = f(r_1)$ จะเลื่อนไปทาง r_1 ที่เล็กลง



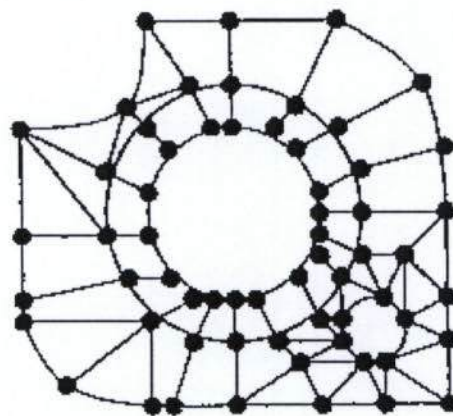
รูปที่ 2.5 แสดง U_b และ E_r ในเทอมของ r_1 และแสดง E_b และ E_r เมื่อกำหนดให้ r_2 คงตัวของทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม [2]

2.4 ระเบียบวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ [3]

ระเบียบวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์เป็นวิธีการคำนวณที่ค่อนข้างใหม่ซึ่งการพัฒนาเริ่มมาจากแรงผลักดันของงานวิจัยทางด้านอวกาศ และการบิน ทั้งนี้เพราะว่ารูปร่างชิ้นงานต่างๆ ของงานทางด้านนี้ค่อนข้างที่จะสลับซับซ้อนทำให้การคำนวณออกแบบเป็นไปด้วยความยากลำบากความสามารถของวิธีการไฟไนต์อิลิเมนต์หลังจากที่ได้ประยุกต์ขึ้นเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้พิสูจน์ให้เห็นเด่นชัดในการออกแบบชิ้นงานและโครงสร้างที่มีรูปร่างลักษณะซับซ้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพในปัจจุบันนี้วิธีการไฟไนต์อิลิเมนต์ได้เริ่มนำมาประยุกต์กับงานทางด้านอื่นๆ โดยมีวัตถุประสงค์หลักคือ เพื่อลดค่าใช้จ่ายที่ปกติจำเป็นต้องใช้ไปในการทดลองหรือเพื่อใช้กับงานที่ไม่สามารถทำการทดลองอย่างสมบูรณ์ได้ อาทิ เช่น การคำนวณสภาวะของอากาศผ่านลำตัวรถยนต์

เครื่องบิน และกระสวยอวกาศ การคำนวณอุณหภูมิบนเครื่องยนต์ของรถยนต์เครื่องบิน และสถานีอวกาศ เป็นต้น จากประสิทธิภาพของวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สามารถแก้ปัญหาต่างๆ ดังกล่าว ทำให้วิธีการนี้เริ่มเป็นที่ยอมรับในหมู่วิศวกรนักออกแบบทั่วไปอย่างไรก็ตามการใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์โปรแกรมคอมพิวเตอร์จำเป็นต้องใช้ด้วยความรอบคอบและระมัดระวังผู้ใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์โปรแกรมคอมพิวเตอร์จำเป็นต้องมีความรู้พื้นฐานของ วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์อย่างเพียงพอ

2.4.1 วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method, FEM) คืออะไร ในการแก้ปัญหาใดปัญหาหนึ่งปัญหานั้นจะประกอบด้วยสมการเชิงอนุพันธ์และเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดมาให้ ค่าผลเฉลยแม่นยำตรง (Exact Solution) ของปัญหาดังกล่าวจะประกอบด้วยค่าของตัวแปรต่างๆ กัน ตามตำแหน่งต่างๆ บนรูปร่างลักษณะของปัญหานั้นหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือค่าผลเฉลยแม่นยำตรงจะประกอบด้วยค่าต่างๆ จำนวนมากมายเช่นนี้ซึ่งสำหรับปัญหาในทางปฏิบัติจะทำได้หลักการก็คือทำการเปลี่ยนค่าทั้งหมดที่มีจำนวนอนันต์ค่านั้นมาเป็นค่าโดยประมาณที่มีจำนวนที่นับได้ (Finite) ด้วยการแทนรูปร่างลักษณะของปัญหาด้วยเอลิเมนต์ซึ่งมีขนาดต่างๆ กันดังเช่นแสดงในตัวอย่างของแผ่นอะลูมิเนียมในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 การแบ่งแผ่นอะลูมิเนียมออกเป็นหลายเอลิเมนต์ที่จำกัดเพื่อวิเคราะห์หาผลเฉลยด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ [3]

วิธีการดังกล่าวข้างต้นนี้เป็นนัยว่าผลเฉลยของแต่ละเอลิเมนต์นั้นจำเป็นต้องสอดคล้อง (satisfy) กับสมการเชิงอนุพันธ์ และเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดมาให้ในปัญหานั้นๆ ซึ่งหมายความว่าหลักการของวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์จะเริ่มต้นจากการพิจารณาเอลิเมนต์ทีละ เอลิเมนต์ โดยทำการสร้างสมการสำหรับแต่ละเอลิเมนต์ที่ตั้งอยู่บนรากฐานที่ว่าสมการที่สร้างขึ้นมานั้น จำเป็นต้องสอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหาที่ทำอยู่นั้น จากนั้นจึงนำสมการของแต่ละเอลิเมนต์ที่สร้างขึ้นมาได้มาประกอบกันเข้าก่อให้เกิดระบบสมการชุดใหญ่ซึ่งในความหมายทางกายภาพก็คล้ายกับการนำทุกเอลิเมนต์มา

ประกอบรวมเข้าด้วยกันก่อให้เกิดเป็นรูปร่างลักษณะทั้งหมดของปัญหาที่แท้จริง จากนั้นจึงทำการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่ให้มาลงไปในระบบสมการชุดใหญ่แล้วจึงทำการแก้สมการดังกล่าว ซึ่งจะก่อให้เกิดผลเฉลยโดยประมาณที่ต้องการ ณ ตำแหน่งต่างๆ ของปัญหานั้น

จากคำอธิบายนี้จะเห็นได้ว่าความแม่นยำของค่าผลเฉลยโดยประมาณที่คำนวณออกมาได้นั้น จะขึ้นอยู่กับขนาดและจำนวนของอิเลเมนต์ที่ใช้ในการแก้ปัญหานั้น ความแม่นยำของผลเฉลยยังขึ้นอยู่กับวิธีการสมมุติรูปแบบของฟังก์ชันการประมาณภายใน (Interpolation Functions) ที่ใช้กับแต่ละอิเลเมนต์นั้น กล่าวคือ ฟังก์ชันการประมาณภายในที่สมมุติขึ้นมานั้นมีความใกล้เคียงกับผลเฉลยแม่นยำของปัญหานั้นมากน้อยเพียงใด ลักษณะการกระจายของฟังก์ชันการประมาณภายในของอิเลเมนต์อาจสมมุติให้อยู่ในหลายรูปแบบ อาทิเช่น รูปแบบการกระจายเชิงเส้นตรง (Linear Distribution) เป็นต้น ส่วนขนาด (Magnitude) ของฟังก์ชันการประมาณภายในนี้จะขึ้นอยู่กับค่าที่จุดต่อ (Nodes) ของอิเลเมนต์ ยกตัวอย่างเช่น หากค่าอุณหภูมิที่จุดต่อที่อยู่ปลายมุมทั้งสามของอิเลเมนต์รูปสามเหลี่ยมมีค่าเท่ากับ 30, 40 และ 50 องศาเซลเซียสตามลำดับ และหากอิเลเมนต์รูปสามเหลี่ยมนี้ให้ฟังก์ชันการประมาณภายในที่อยู่ในรูปแบบของลักษณะการกระจายแบบเชิงเส้นตรงแล้วอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ในอิเลเมนต์รูปสามเหลี่ยมนี้จะแปรผันเป็นรูปเชิงเส้นตรงโดยมีการกระจายของอุณหภูมิระหว่าง 30 ถึง 50 องศาเซลเซียส เป็นต้น

2.4.2 การประยุกต์ใช้ไฟไนต์อิเลเมนต์ในงานวิศวกรรมไฟฟ้า เริ่มแรกในปี 1986 ได้มีผู้ประยุกต์นำเอาหลักการมาใช้ในการแก้ปัญหาทางด้านสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic, Em) เป็นงานพื้นฐานไปสู่งานด้านวิศวกรรมไฟฟ้าเพื่อวิเคราะห์สนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอ และอื่นๆ อีกมากมายอย่างการแก้สมการคลื่น (Wave Equation)

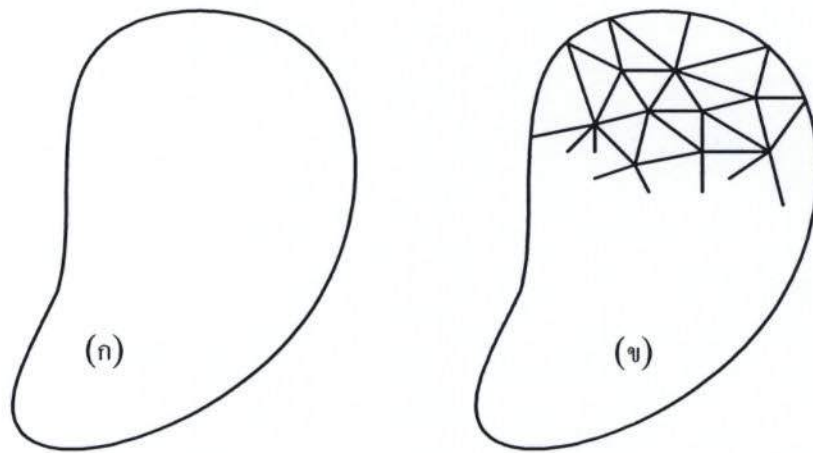
ในเทคโนโลยีทางด้านไฟฟ้าแรงสูงนั้น มีความสนใจลักษณะการกระจายของสนามไฟฟ้า โครงสร้างของอิเล็กโทรด (Electrode) ในแบบต่างๆ ซึ่งเป็นปัญหาในการออกแบบสร้างอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง หากมีการวิเคราะห์ที่เที่ยงตรงแล้วการออกแบบและการนำไปใช้งานก็มีประสิทธิภาพสูง และประหยัดค่าใช้จ่ายได้มากที่สุด

วิธีการไฟไนต์อิเลเมนต์สามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ที่เรียกว่า “ฟังก์ชันการประมาณค่าภายใน (Interpolation Functions)” ซึ่งการคำนวณจะต้องทำหลายขั้นตอน และใช้เวลามากเพื่อกระทำการที่เข้าไปเข้ามาด้วยเหตุนี้ผู้ใช้งานจึงต้องใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณเพื่อให้มีประสิทธิภาพและทันสมัยทำให้มีความรวดเร็วมากยิ่งขึ้น

2.4.3 หลักการเบื้องต้นของไฟไนต์อิเลเมนต์ วิศวกรมีความจำเป็นมากที่จะต้องทำความเข้าใจกับการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าสิ่งหนึ่งที่สำคัญจำเป็นต้องทราบก็คือลักษณะการกระจายของสนามไฟฟ้า การคำนวณหาความเข้มของสนามไฟฟ้าที่จุดต่างๆ เพื่อจะนำไปออกแบบตัวอุปกรณ์ทางไฟฟ้า

หลักการของไฟไนต์อิเลเมนต์ จะ ทำการแบ่งรูปทรงโครงสร้างที่ยาก และซับซ้อนออกเป็นชิ้นส่วนเล็กๆ ที่เรียกว่า “อิเลเมนต์ (Element)” ตามชนิดของการวิเคราะห์ภายในขอบเขตของชิ้นงาน

โดยทั่วไปนิยมการวิเคราะห์แบบสามเหลี่ยม 2 มิติ ชิ้นส่วนเล็กๆ ในแต่ละรูปนั้นจะต้องไม่ทับซ้อนกัน
พิจารณาดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ ในระบบ 2 มิติ [3]

- เมื่อ (ก) คือ ขอบเขตของปัญหาที่ต้องการวิเคราะห์
(ข) คือ การแบ่งขอบเขตปัญหาออกเป็น โครงข่าย (Mesh)

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 2.7 (ก) เป็นขอบเขตงานหรือวัสดุที่ต้องการวิเคราะห์ ซึ่งในระบบหนึ่ง นั้นประกอบไปด้วย

1) ระบบ (System) ลักษณะทางกายภาพของงานหรือวัสดุที่ผู้ใช้งานจะนำมาวิเคราะห์อาจเป็น ของแข็ง (Solids), ของเหลว (Liquids), ก๊าซ (Gases), อากาศ (Air) หรือส่วนผสมอันเนื่องมาจากวัสดุ สองชนิด

2) โดเมน (Domain) ตัวแปรที่มีการเปลี่ยนแปลงภายในขอบเขตของระบบ ลักษณะส่วนมาก จะมีการเปลี่ยนแปลงตามระยะของจุดที่ต่างกัน

3) สมการบังคับ (Governing) ความสัมพันธ์ของตัวแปรที่จะบอกให้ทราบการเปลี่ยนแปลง ของปริมาณต่างๆ ในลักษณะที่ต่อเนื่อง และไม่ต่อเนื่องที่เกิดจากคุณสมบัติทางกายภาพจากมวล โมเมนตัม หรือพลังงาน ก็ขึ้นอยู่กับระบบที่ใช้ในการพิจารณาสมการเช่น สมการอนุพันธ์การสมดุล เป็น คณิต

4) เงื่อนไข (Loading Condition) เงื่อนไขจากข้อกำหนดภายในจาก แรง (Force), อุณหภูมิ (Temperature), กระแส (Current), สนาม (Field) และอื่นๆ ตัวแปรเหล่านี้ล้วนแล้วมีผลกระทบซึ่งกัน และกันทั้งสิ้น เป็นเหตุให้มีการเปลี่ยนแปลงสถานะในระบบ การกระตุ้นจากโหลดภายในขอบเขตที่ เกิดขึ้นกับผลกระทบอื่น นั้นเป็นเงื่อนไขที่เราเรียกว่า “Boundary Condition”

สำหรับรูปที่ 2.7 (ข) เป็นการแบ่งขอบเขตงานออกเป็นสามเหลี่ยม 2 มิติ ส่วนย่อยๆ ที่เรียกว่า “อิลิเมนต์ (Element)” การพิจารณาในแต่ละสามเหลี่ยมย่อยจากจุดที่ทราบค่าอาศัยการประมาณค่าแบบฟังก์ชันการประมาณค่าภายในจากนั้นก็หาความสัมพันธ์ของสมการบังคับออกมาในรูปเมตริกซ์พิจารณาหาสัมประสิทธิ์เมตริกซ์ (Coefficient Matrix) ให้อยู่ในลักษณะของพิกัด (x, y, z) หรือเรียกว่า “สัมประสิทธิ์โกลบอล (Global Coefficient)”

จากนั้นก็แทนค่าเงื่อนไขเริ่มต้น (Initial Condition) หรือเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition) เพราะปัญหาที่สำคัญส่วนมากที่ศึกษาในทางวิศวกรรม จะเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงของปริมาณต่างๆ ในลักษณะที่ต่อเนื่อง และไม่ต่อเนื่อง เช่น เวลา, ระยะทาง, อุณหภูมิ, ศักย์ไฟฟ้า สมการและเงื่อนไขที่ต้องการหาจะอยู่ในรูปของโหนด (x, y) 2 มิติ หากเป็นโหนด (x, y, z) ก็คือ ระบบวิเคราะห์ 3 มิติ ในการหาผู้ใช้งานจะพิจารณาจากโหนดทราบค่าไปหาโหนดที่ไม่ทราบค่าต่อไปจนครบ จากผลต่างสืบเนื่องของโหนดใกล้เคียง

การแบ่งจำนวนอิลิเมนต์นั้นจะต้องใช้ประสบการณ์ในการแบ่งให้เกิดความเหมาะสมกับงาน หากแบ่งน้อยเกินไป ค่าที่ได้ออกมาก็จะผิดพลาดมาก หากแบ่งมากไปถึงแม้จะได้ค่าที่ละเอียดจริง แต่ก็ใช้ระยะเวลาในการคำนวณยาวนานทำให้เสียเวลา ฉะนั้นการแบ่งจะต้องให้เหมาะสมในการนี้ จึงพัฒนาเอาคอมพิวเตอร์มาช่วยในการวิเคราะห์ในการคำนวณเพื่อความรวดเร็ว และผลของคำตอบที่เที่ยงตรงยิ่งขึ้น

2.4.4 สมการเชิงอนุพันธ์

สมการเชิงอนุพันธ์ที่ใช้ในการหาค่ากระจายของศักย์ไฟฟ้า สามารถประดิษฐ์ขึ้นได้โดยเริ่มจากกฎของเกาส์ (Gauss's Law) ดังแสดงดังนี้

$$\nabla \cdot D = \rho_v \quad (2.16)$$

โดย ρ_v แทนความหนาแน่นของประจุเชิงปริมาตร (Volume Charge Density) และ D แทนความหนาแน่นของฟลักซ์ไฟฟ้า (Electric Flux Density) ดังนี้

$$D = \epsilon E \quad (2.17)$$

โดย ϵ แทนค่าเพอร์มิตติวิตีของกลาง และ E แทนค่าความเข้มของสนามไฟฟ้า (Electric Field Intensity) ซึ่งสัมพันธ์กับค่าศักย์ไฟฟ้า V โดย

$$E = -\nabla V \quad (2.18)$$

แทนค่าในสมการก่อให้เกิดสมการเชิงอนุพันธ์ซึ่งอยู่ในรูปแบบของสมการปัวส์ซอง (Poisson's Equation) ดังนี้

$$\nabla \cdot \nabla V = -\frac{\rho_v}{\epsilon} \quad (2.19)$$

ในระบบพิกัด x-y (Cartesian Coordinates) นั้นสามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยอันดับสอง (Second-Order Partial Differential Equation) ได้คือ

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} = -\frac{\rho_v}{\epsilon} \quad (2.20)$$

เงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions) สำหรับปัญหาของการหาการกระจายศักย์ไฟฟ้า โดยปกติจะประกอบด้วย

1) การกำหนดค่าศักย์ไฟฟ้า V_s ที่มีค่าคงที่ตลอดขอบช่วงใดช่วงหนึ่ง โดยที่ V_s แทนค่าของศักย์ไฟฟ้าที่ขอบนั้น

$$V_s = V_o \quad (2.21)$$

2) การกำหนดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าให้เป็นศูนย์ตลอดขอบช่วงใดช่วงหนึ่งดังนี้

$$\nabla V_s = 0 \quad (2.22)$$

2.4.5 วิธีการไฟไนต์อิลิเมนต์กับปัญหาของแข็ง ควรจะนำความรู้ความเข้าใจวิธีการสร้างสมการไฟไนต์อิลิเมนต์ตลอดจนขั้นตอนพื้นฐานนำมาประยุกต์เพื่อการคำนวณหาผลลัพธ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นกับปัญหาทางด้านของแข็ง เช่น การเคลื่อนตัว ณ ตำแหน่งต่างๆอันเกิดจากการยืด และหดตัวตลอดจนความเครียดและความเค้นที่เกิดขึ้นตามมาวิธีการไฟไนต์อิลิเมนต์ได้เริ่มพัฒนาจากการแก้ปัญหาทางด้านของแข็งโดยสร้างสมการไฟไนต์อิลิเมนต์จากวิธีการหาค่าต่ำสุดของพลังงานศักย์รวมที่เกิดขึ้นอันเนื่องมาจากแรงภายนอกที่มากระทำ ในการใช้วิธีการดังกล่าวผู้ใช้งานได้สมมุติลักษณะการกระจายของการเคลื่อนตัว (Displacement) ซึ่งเป็นตัวแปรตัวหนึ่งบนอิลิเมนต์ แล้วจึงทำการแก้ปัญหาเพื่อหาผลลัพธ์ของการเคลื่อนตัว ณ จุดต่อต่างๆ และจากนั้นจึงทำการคำนวณหาความเครียด และความเค้น วิธีการเช่นนี้บางครั้งเรียกกันว่า วิธีการใช้การเคลื่อนตัว (Displacement Method) ในขณะที่เดียวกันในช่วงแรกๆของการพัฒนาวิธีการไฟไนต์อิลิเมนต์นี้อีกเช่นกัน ได้มีการใช้

หลักการอื่นๆในการสมมุติตัวแปรที่ต่างกันบนอิลิเมนต์เช่นการสมมุติการกระจายของความเค้น โดยเรียกกันว่าวิธีการใช้แรง (Force Method) และการสมมุติตัวแปรซึ่งประกอบด้วยการกระจายของความเค้นและการเคลื่อนตัวไปพร้อมๆกันบนอิลิเมนต์ซึ่งเรียกว่าวิธีการผสม (Mixed Method) เป็นต้น

ในปัจจุบันการสร้างสมการไฟไนต์อิลิเมนต์ที่สามารถทำความเข้าใจได้โดยง่ายและใช้กันมากในการประดิษฐ์โปรแกรมไฟไนต์อิลิเมนต์ต่างๆไปจะเป็นการใช้วิธีการแรกซึ่งคือการสมมุติลักษณะของการกระจายของการเคลื่อนตัวของอิลิเมนต์ดังนั้นผู้ใช้งานจะใช้วิธีการนี้มาประยุกต์ในการสร้างสมการไฟไนต์อิลิเมนต์เพื่อใช้กับปัญหาในหลายรูปแบบ เริ่มตั้งแต่การคำนวณการเคลื่อนตัว และความเค้นที่เกิดขึ้นในปัญหาโครงสร้างเหล็กท่อน ปัญหาแผ่นระนาบ ปัญหาที่มีความสมมาตรรอบแกนใดแกนหนึ่ง ปัญหาการโค้งของคาน ปัญหาการยึดหยุ่นใน สามมิติ รวมไปถึงวิธีการแก้ปัญหาทางพลศาสตร์ ปัญหาต่างๆเหล่านี้มีลำดับขั้นตอนในการแก้ที่แตกต่างกันไปโดยขึ้นอยู่กับสมมุติฐานที่ใช้ในปัญหานั้นๆ

จากที่กล่าวมาแล้วนั้นผู้ใช้งานจะเห็นได้ว่าวิธีการไฟไนต์อิลิเมนต์ซึ่งเป็นคณิตศาสตร์ประยุกต์ได้ถูกนำมาใช้ในการแก้ปัญหาที่ซับซ้อน โดยขยายวงกว้างไปทุกสาขาแล้วแต่ผู้ที่คิดประยุกต์นำไปใช้นั้นก็มีทั้งข้อดีและข้อเสีย

ตารางที่ 2.1 ข้อดีและข้อเสียของไฟไนต์อิลิเมนต์

ข้อดี	ข้อเสีย
<ol style="list-style-type: none"> 1. สามารถใช้ได้กับรูปทรงได้หลายรูปทรงหรือรูปทรงที่ยู่ยากโดยใช้การแบ่งเป็นอิลิเมนต์สามเหลี่ยม 2 มิติ ในการแทนค่าทั้ง ขอบเขต (Boundary) 2. สามารถใช้ได้กับขอบเขตปัญหาทั้งแบบเชิงเส้น (Linear) และแบบไม่เชิงเส้น(Non Linear) ได้ 3. สามารถใช้ได้กับปัญหาที่เป็นสารเนื้อเดียวและสารเนื้อผสม 4. สามารถใช้กับ Higher-Order Element ได้ 5. สามารถใช้ได้กับปัญหาขอบเขตได้เกือบจะทุกกรณี 	<ol style="list-style-type: none"> 1. ในการ Simulation รูปทรงที่อยู่ยาก สลับซับซ้อนนั้น เครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการ Simulation ต้องมีหน่วยความจำ (Ram) ที่มากพอในการสำรองข้อมูลในการคำนวณ (โดยเฉพาะรูป 3 มิติ) 2. ในการวาดรูปทรงของวัตถุที่มีความซับซ้อนนั้นจะมีเส้นโค้งจำนวนมาก จะทำให้การแบ่งขอบเขต (Boundary) มีมาก เป็นผลให้การสร้างโครงข่าย (Mesh) มากตามไปด้วย จึงอาจเกิดการผิดพลาดในการ Simulation ได้ง่าย และเวลาในการคำนวณจะช้ามากถ้ามีจำนวน โครงข่ายมาก 3. ในการตรวจสอบความถูกต้องของรูปทรงที่มีความซับซ้อนนั้นสามารถทำได้ยาก

2.5 ทฤษฎีเบื้องต้นของการเกิดคิสซาร์จบางส่วน [4]

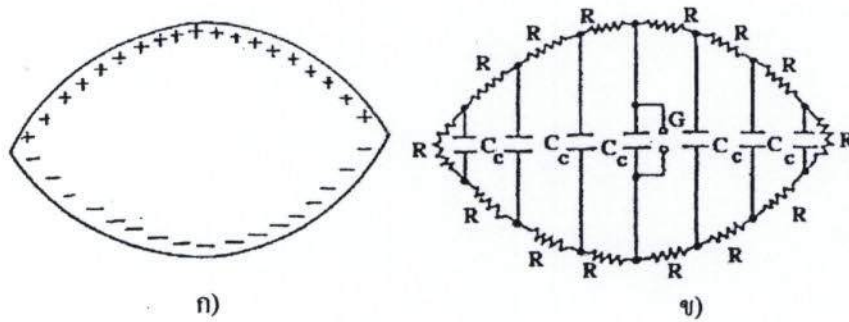
คิสซาร์จบางส่วน หรือ พาร์เชียลคิสซาร์จ คือ คิสซาร์จเบรกดาวน์ที่ไม่สมบูรณ์พลังงานที่ทำให้เกิดคิสซาร์จนั้น ไม่มากพอที่จะทำให้ฉนวนเปลี่ยนสภาพไปเป็นสภาพนำไฟฟ้าได้ตลอดแนว อิเล็กโตรดจึงเรียกว่า คิสซาร์จบางส่วน เพราะฉนวนของอิเล็กโตรดด้านหนึ่งหรือทั้งสองด้าน ซึ่งอาจเป็นของแข็ง ของเหลว หรือก๊าซ ยังเป็นฉนวนที่สมบูรณ์มั่นคงอยู่ Kreuger ได้ให้คำอธิบายไว้ว่า “คิสซาร์จบางส่วนเป็นคิสซาร์จทางไฟฟ้าที่ไม่เชื่อมโยงถึงกันระหว่างอิเล็กโตรด”

คิสซาร์จบางส่วนจะเกิดขึ้นในระบบฉนวนที่มีลักษณะไม่สม่ำเสมอสูง หรือฉนวนที่มีความไม่สม่ำเสมอ หรือไม่ต่อเนื่องกัน หรือมีสิ่งเจือปน ซึ่งทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าบางจุดในฉนวนมีค่าสูงกว่าค่าความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤติ แต่ไม่อาจทำให้เกิดเบรกดาวน์โดยสมบูรณ์ได้ หากแต่เกิดเพียงบางส่วนเท่านั้น และยังสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งในสนามไฟฟ้ากระแสสลับ และสนามไฟฟ้ากระแสตรงภายใต้สนามไฟฟ้ากระแสสลับ คิสซาร์จจะเกิดขึ้นซ้ำๆ ไซเคิลของแรงดันโดยปกติจะเกิดขึ้นขณะที่แรงดันที่ป้อนเพิ่มขึ้นจากศูนย์ไปสู่ค่ายอด ดังนั้นคิสซาร์จบางส่วนอาจแบ่งออกได้เป็น 3 แบบคือ

1) โครนาคิสซาร์จ (Corona Discharge) เกิดจากการที่สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ บนตัวนำที่มีลักษณะแหลมคมหรือมีขอบคม ที่อยู่ในอากาศหรือก๊าซที่มีความดันปกติเมื่อความเครียดของสนามไฟฟ้ามีค่าสูงเกินค่าวิกฤติ (Critical)

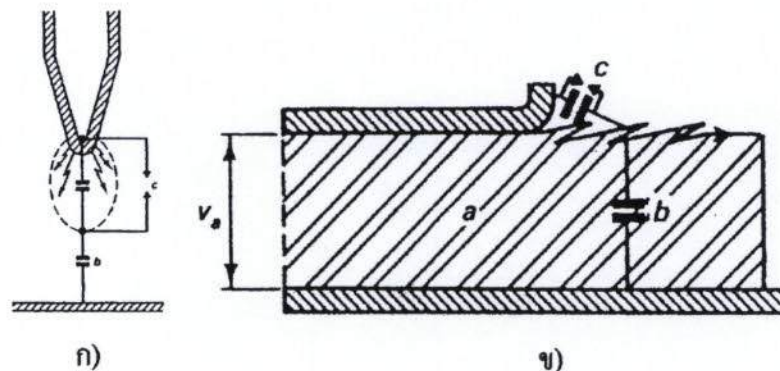
2) คิสซาร์จตามผิว (Surface Discharge) เกิดขึ้นระหว่างผิวของตัวนำไฟฟ้ากับผิวของวัสดุฉนวนและเกิดได้เมื่อค่าคาปาซิแตนซ์ตามผิวมีค่าสูงและแรงดันที่ป้อนมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ดังนั้น Discharge ประเภทนี้จึงเกิดกับไฟฟ้ากระแสสลับและกรณีแรงดันกระชอก (Impulse Voltage) เท่านั้น ตัวอย่างการเกิด Surface Discharge เช่นที่ปลายเคเบิลบริเวณที่ปกคลุมฉนวนออก

3) คิสซาร์จภายใน (Internal Discharge) เกิดขึ้นได้ภายในวัสดุทั้งที่เป็นของแข็งและของเหลวที่มีฟองอากาศอยู่ภายใน ฉนวนที่มีสิ่งเจือปนอยู่จะเป็นเหตุให้เกิดก๊าซขึ้นหลังจากการเกิดเบรกดาวน์ครั้งแรก ฉนวนที่มีฟองอากาศหรือมีสิ่งเจือปนอยู่ภายในก็จะเกิดคิสซาร์จขึ้นได้ดังกล่าว และจะเป็นเหตุให้อายุการใช้งานของฉนวนสั้นลง



รูปที่ 2.10 (ก) แสดงการกระจายของประจุก่อนเกิดเบรกดาวน์
 (ข) แทนผิวของฉนวนรอบโพรงอากาศด้วยค่า R และ C [4]

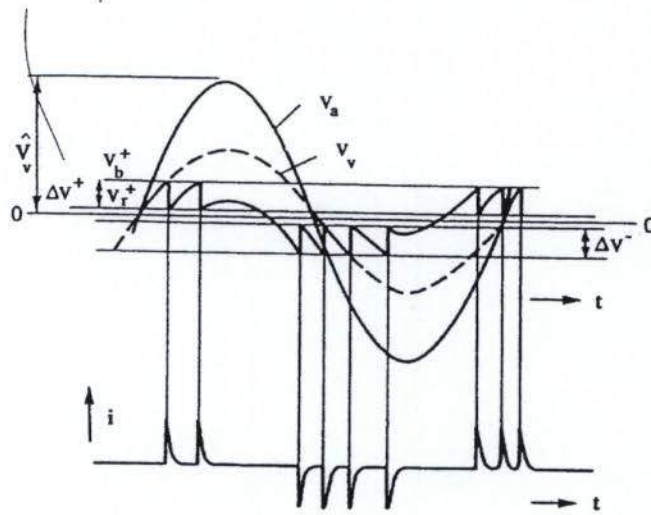
แต่อย่างไรก็ตามวงจรสมมูลในรูปที่ 2.9 สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับโคโรนาดิสชาร์จและ
 ดิสชาร์จตามผิวได้ โดยการแทนส่วนต่างๆ ในฉนวนหรืออากาศรอบๆ ด้วย C_s, C_b, C_c และแกป G
 ตามลำดับ ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 วงจรสมมูลของโคโรนาดิสชาร์จและดิสชาร์จตามผิว [4]

2.5.2 ธรรมชาติพัลส์ของดิสชาร์จบางส่วน

การเกิดดิสชาร์จซ้ำ ในทางปฏิบัติ PD อาจเกิดซ้ำๆ ได้หลายครั้งในแต่ละคาบเวลา ดัง
 รูปที่ 2.12 โดยที่ V_a คือแรงดันคร่อมขั้วของอุปกรณ์ V_b คือแรงดันเบรกดาวน์ของโพรงอากาศหรือ
 แกป V_r คือแรงดันหลังการเบรกดาวน์โพรงอากาศหรือแกป V_v คือแรงดันคร่อมโพรงอากาศหรือ
 แกปถ้าไม่มีการเกิด PD เลข และ i คือกระแสที่ขั้วสายของอุปกรณ์



รูปที่ 2.12 แรงดันคร่อมแกปและกระแสที่ขั้วสายของอุปกรณ์ขณะเกิด PD [4]

จำนวนครั้งการเกิด PD สามารถคำนวณได้จากรูปที่ 2.13 โดยสมมุติว่า PD เกิดแบบสมมาตรกับแกนเวลา ดังนั้นจำนวน PD ต่อครั้งคาบเวลา N คำนวณดังนี้

$$N = \frac{[(\hat{V}_v - V_r) - Y]}{V_b - V_r} \quad (2.23)$$

โดยที่ N คือ จำนวนครั้งการเกิด PD ต่อครั้งคาบเวลา

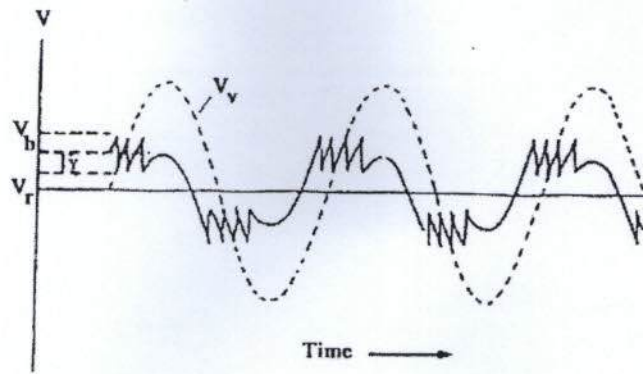
V_b คือ แรงดันเบรกคาวน์ของโพรงอากาศหรือแกป

V_r คือ แรงดันหลังการเกิดเบรกคาวน์ของโพรงอากาศหรือแกป

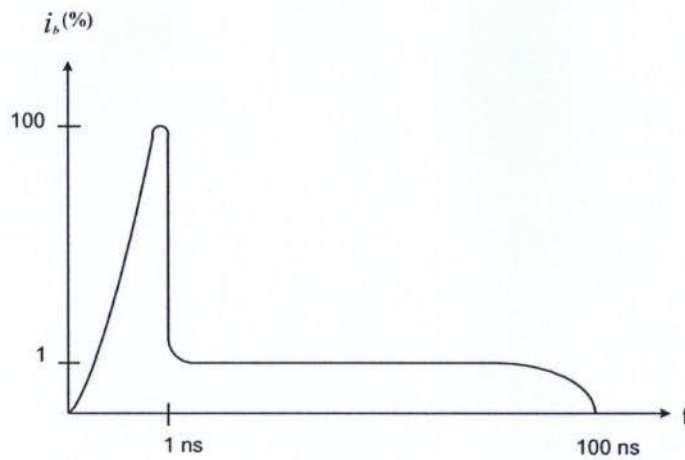
V_v คือ ค่ายอดของแรงดันคร่อมโพรงอากาศหรือแกปถ้าไม่มีการเกิดของ PD เลย ซึ่งเท่ากับ $[C_v / (C_b + C_v)]$ เท่าของค่ายอดแรงดันคร่อมวัสดุทดสอบ

Y คือ แรงดันใดๆ ซึ่งมีค่า $0 \leq Y \leq (V_b - V_r)$

ลักษณะรูปร่างของกระแสดิซชาร์จบางส่วน ลักษณะรูปร่างของกระแส PD ในแกปเล็กในทางทฤษฎีแสดงดังรูปที่ 2.11 กล่าวคือขณะเกิด PD การไหลของกระแสผ่านแกปจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนซึ่งเคลื่อนที่ได้เร็วกว่าไอออนบวกผ่านแกปสั้นๆ เมื่ออิเล็กตรอนไหลผ่านแกปหมดกระแสจะลดลงอย่างรวดเร็วและกระแสที่ลดลงนี้ก็จะยังคงไหลต่อไปอีกเนื่องจากการเคลื่อนที่ของไอออนบวก



รูปที่ 2.13 การเกิด PD ซ้ำ [4]



รูปที่ 2.14 แสดงลักษณะรูปร่างของกระแส PD ในทางทฤษฎีสำหรับแกปเล็ก ๆ [4]

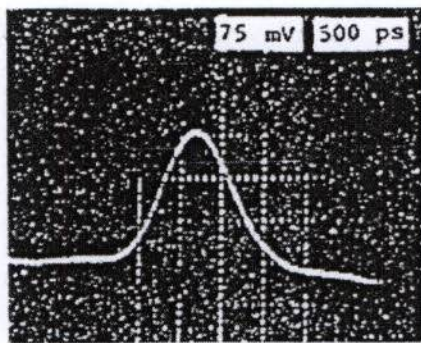
ลักษณะรูปร่างของกระแส PD ในทางปฏิบัติซึ่งวัดด้วยเครื่องตรวจจับ PD แบบแถบกว้างพิเศษ (Ultra - Wide Band Detector = UWB) ใน Epoxy และปลายแหลมในก๊าซ SF₆ จะให้ลักษณะรูปร่างเช่นเดียวกัน ดังรูปที่ 2.15 จะพบว่า มีช่วงเวลาขึ้นประมาณ 0.3 ถึง 0.8 นาโนวินาที ความกว้างของพัลส์ที่ขนาดลงครึ่งหนึ่งประมาณ 1.5 นาโนวินาที จากรูปที่ 2.14 สามารถประมาณลักษณะรูปร่างของกระแส PD เป็นรูป "Gaussian" คือ $i(t)$ ได้ดังนี้

$$i(t) = I_0 \text{EXP} \left[-t^2 / 2\sigma^2 \right] \quad (2.24)$$

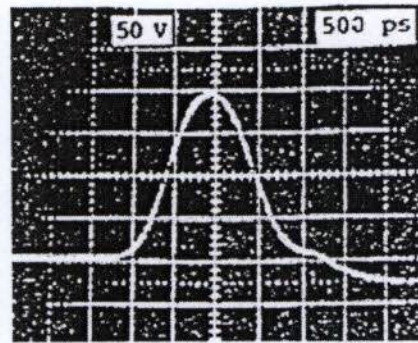
ดังนั้นสเปกตรัมความถี่ของกระแส PD คำนวณได้ดังนี้

$$I(W) = I_0 \sigma (2\pi)^{1/2} \text{EXP}(-W^2 \sigma^2 / 2) \quad (2.25)$$

โดยกำหนดความกว้างของพัลส์เท่ากับ 2.36σ และ I_0 คือ ค่ายอดของกระแส PD ดังนั้น $\sigma \approx 6.36 \times 10^{-10}$ วินาที ซึ่งมีความถี่มากกว่า 200 MHz.



ก)



ข)

รูปที่ 2.15 ลักษณะกระแส PD ที่ตรวจจับได้ในทางปฏิบัติโดยใช้ UWB [5]

- ก) กระแส PD ที่เกิดใน Epoxy
- ข) กระแส PD ที่เกิดจากปลายแหลมในก๊าซ SF₆

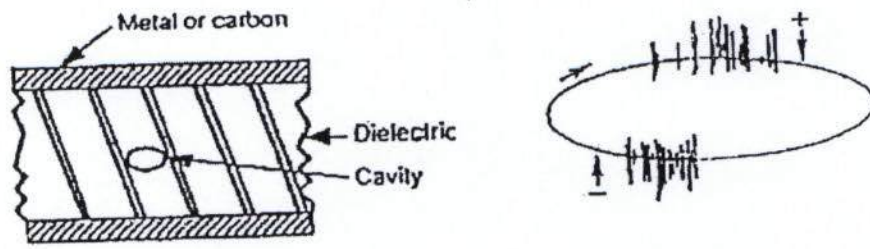
อย่างไรก็ตามจากการค้นคว้าเอกสารต่างๆ เกี่ยวกับช่วงเวลาการเกิด PD ในฉนวนแข็งและเหลวที่มีโพรงอากาศภายใน จะพบว่ากระแสพัลส์ของ PD จะมีช่วงเวลา < 5 นาโนวินาที เพราะว่า PD เกิดในที่แคบๆ ฉนวนเนื้อเดียว เช่น ก๊าซจะมีช่วงเวลายาวขึ้น < 5 นาโนวินาทีและเวลาส่วนทางคลื่นจะยาวกว่าช่วงเวลายาวขึ้น สำหรับในอากาศกระแสพัลส์ของ PD มีช่วงเวลาเกิดน้อยกว่า 100 นาโนวินาที

2.6 การจำแนกชนิดของดิสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิล [5],[6]

สามารถแยกออกเป็นชนิดต่างๆ ได้ดังต่อไปนี้

2.6.1 การดิสชาร์จที่เกิดจากโพรงอากาศ (Cavity) ภายในไดอิเล็กตริก

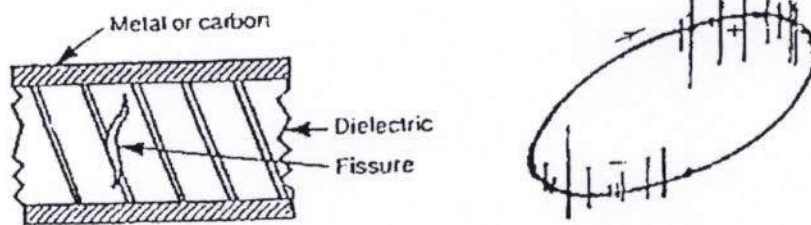
โพรงอากาศชนิดนี้มักจะมีพบในฉนวนแข็งมีสาเหตุมาจากกระบวนการผลิต เช่น การหล่อ การหุ้ม การดิสชาร์จชนิดนี้จะเกิดขึ้นก่อนค่าแรงดันสูงสุด (Voltage Peak) และจะหยุดการดิสชาร์จเมื่อถึงค่าแรงดันสูงสุด ทั้งนี้เกิดบวกและลบของแรงดันรูปไซน์ ตำแหน่งของการดิสชาร์จที่แสดงโดยออสซิลโลสโคป มีลักษณะเป็นเส้นตั้งฉากบนรูปวงรีในช่วงที่แสดงผลของการดิสชาร์จบางส่วน ขนาดของการดิสชาร์จจะขึ้นอยู่กับขนาดและจำนวนของโพรงอากาศ การดิสชาร์จชนิดนี้มีผลกระทบจากแรงดันและช่วงเวลาน้อยมาก กล่าวคือเมื่อแรงดันและช่วงเวลาเพิ่มขึ้น ขนาดของการดิสชาร์จบางส่วนจะไม่เปลี่ยนไปมาก จากการทดสอบที่แรงดันเริ่มต้น (Withstand) และช่วงเวลาที่กำหนด ($\cong 10$ นาที)



ก) โครงสร้างที่เกิดขึ้นในไดอิเล็กตริก ข) ตำแหน่งของ PD บนฐานเวลารูปวงรี
รูปที่ 2.16 แสดงการดิซชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นจากโพรงอากาศ [5]

2.6.2 การดิซชาร์จที่เกิดจากรอยแตก (Fissure) ภายในไดอิเล็กตริก

การดิซชาร์จชนิดนี้โดยมากจะพบมากในไดอิเล็กตริกที่มีความยืดหยุ่น เช่น เทอร์โมพลาสติกที่รอยแตกที่เกิดขึ้นจะมีทิศทางเดียวกันกับสนามไฟฟ้า สาเหตุโดยทั่วไปจะเกิดจากสิ่งสกปรกที่เกิดขึ้นในไดอิเล็กตริกและฟองหรือโพรงอากาศที่เกิดใกล้ๆ กัน และขยายตัวรวมกัน ปรากฏการณ์นี้จะพบบ่อยในสายเคเบิลที่ใช้งานไประยะหนึ่งแล้ว การดิซชาร์จชนิดนี้จะเกิดขึ้นในระหว่างค่าแรงดันสูงสุด (Voltage Peak) โดยจะเกิดขึ้นก่อนและหลังค่าแรงดันสูงสุดเล็กน้อย ทั้งไซเคิลบวกและลบของแรงดันรูปคลื่นไซน์ ค่าของการดิซชาร์จบางส่วนนอกจากจะขึ้นอยู่กับแรงดันและช่วงเวลาแล้วยังขึ้นอยู่กับขนาดของรอยแตกด้วย ถ้าหารอยแตกมีขนาดใหญ่ ขนาดของการดิซชาร์จจะมีมาก แต่เมื่อแรงดันสูงมากขึ้นในช่วงเวลา ≈ 30 นาที่ ขนาดของการดิซชาร์จจะค่อยๆ ลดลง



ก) รอยแตกภายในไดอิเล็กตริก ข) ตำแหน่งของ PD บนฐานเวลาที่เกิดจากรอยแตก

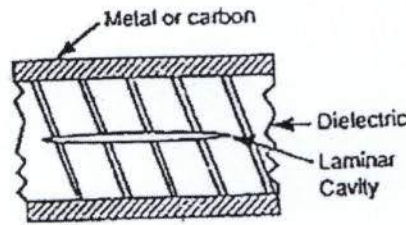
รูปที่ 2.17 แสดงการดิซชาร์จบางส่วนที่เกิดจากรอยแตก [5]

2.6.3 การดิซชาร์จที่เกิดจากเศษวัสดุและสิ่งเจือปน (Resin and Contaminants)

ภายในไดอิเล็กตริก

เศษวัสดุและสิ่งเจือปนนี้โดยมากจะมีสาเหตุมาจากกระบวนการผลิต เศษวัสดุ (Resin) จะหมายถึง เศษวัสดุที่ใช้ทำฉนวนที่เกิดการไหม้และตกค้างจากกระบวนการผลิต เช่น เซมิคอนดักเตอร์ที่ไหม้หรือเศษใยไฟเบอร์ ส่วนสิ่งเจือปน (Contaminants) จะหมายถึงสิ่งเจือปนภายนอก ได้แก่ ฝุ่นละออง เศษผงต่างๆ เศษวัสดุและสิ่งเจือปนจะเข้าไปแทรกอยู่ในไดอิเล็กตริก การดิซชาร์จชนิดนี้

ยังรวมไปถึงส่วนที่ขรุขระและตำหนิของ ไดอิเล็กตริกด้วย การดิสราร์จชนิดนี้จะเกิดขึ้นในระหว่างค่าแรงดันสูงสุด คล้ายกับชนิดที่ 2 แต่จะเกิดหลังค่าแรงดันสูงสุด ไปเล็กน้อยจะมีการดิสราร์จเพิ่มมากขึ้น การดิสราร์จจะเกิดทั้งไขเคลือบและลบ แรงดันรูปไซน์ โดยก่อนที่จะถึงค่าแรงดันสูงสุดของการดิสราร์จจะน้อยกว่าหลังค่าแรงดันสูงสุด



ก) เศษวัสดุที่ปนเปื้อนเป็น ไดอิเล็กตริก

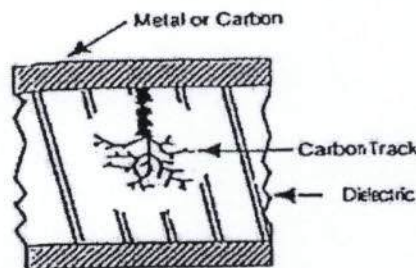


ข) ตำแหน่งของ PD บนฐานวงรี

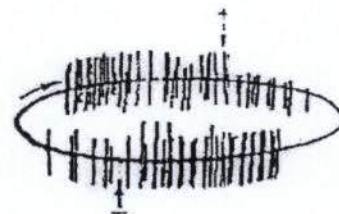
รูปที่ 2.18 แสดงการดิสราร์จบางส่วนที่เกิดจากเศษวัสดุและสิ่งเจือปน [5]

2.6.4 การดิสราร์จที่เกิดจากการขยายตัวของคาร์บอนแทรค (Carbon Track)

การดิสราร์จชนิดนี้จะเกิดในสารอินทรีย์ (Organic) ที่มีคาร์บอนและองค์ประกอบของวัสดุที่ใช้ทำฉนวน เช่น ครอบสลักโพลีเอทีลิน และ โพลีเมอร์ต่างๆ สาเหตุโดยทั่วไปเกิดจากการที่ไดอิเล็กตริกมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงมากทำให้เกิดรอยแตกเป็นเส้นเล็กๆ (Treeing) ภายในไดอิเล็กตริก การดิสราร์จชนิดนี้จะเกิดขึ้นที่แรงดันต่ำจนถึงแรงดันสูง โดยเฉพาะก่อนที่จะถึงค่าสูงสุดขนาดของการดิสราร์จจะมีปริมาณมาก ทั้งไขเคลือบและลบของแรงดันรูปคลื่นไซน์ ขนาดของการดิสราร์จจะขึ้นอยู่กับขนาดของคาร์บอนแทรค โดยทั่วไปการดิสราร์จชนิดนี้จะเกิดขึ้นทุกค่าของแรงดัน ยกเว้นค่าแรงดันเท่ากับศูนย์หรือไม่มีการดิสราร์จ ขนาดของดิสราร์จจะมีขนาดใหญ่และเกือบจะเท่ากันในทุกๆตำแหน่ง แรงดันและช่วงเวลามีผลต่อการขยายตัวของรอยแตกและขนาดของการดิสราร์จ ที่แรงดันสูงมากๆ จะทำให้ขนาดของการดิสราร์จเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วโดยที่ขนาดของการดิสราร์จจะไม่คงที่ การทดสอบที่ซ้ำๆ จะทำให้ขนาดของคาร์บอนแทรคขยายตัวใหญ่ขึ้น



ก) คาร์บอนแทรคภายใน ไดอิเล็กตริก



ข) ตำแหน่งของ PD บนฐานเวลารูปวงรี

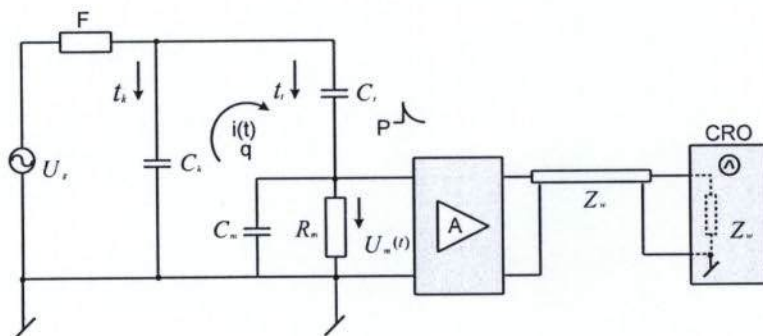
รูปที่ 2.19 แสดงการดิสราร์จบางส่วนที่เกิดจากการขยายตัวของคาร์บอนแทรค [5]

จากการจำแนกชนิดของการดิซาร์จบางส่วน จากความบกพร่องของไดโอดเล็กทรอนิกส์ในสายเคเบิลสามารถใช้เป็นพื้นฐานในการตั้งข้อสันนิษฐานเกี่ยวกับการดิซาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นว่ามีสาเหตุมาจากอะไร แต่ในทางปฏิบัติจะพบว่า การแสดงผลของการดิซาร์จบางส่วนจะประกอบได้ด้วยสาเหตุหลายชนิดดังที่กล่าวมาแล้วร่วมกันทั้งสัญญาณรบกวนจากภายใน ดังนั้นจึงต้องมีวงจรกรองสัญญาณรบกวน (Filter) เหล่านี้ ออกเพื่อที่จะแสดงขนาดของการดิซาร์จบางส่วนได้อย่างถูกต้องยิ่งขึ้น

2.7 หลักการตรวจจับดิซาร์จบางส่วน

การตรวจจับ PD สามารถทำได้หลายวิธีด้วยกัน โดยการสังเกตหรือวัดผลที่ปรากฏการณ์ต่างๆ ของ PD อย่างไรก็ตามการวัดผลของ PD ในเชิงปริมาณที่ได้ผลดีที่สุดคือ การวัดผลทางไฟฟ้า โดยวิธีการตรวจจับกระแสพัลส์ที่ขั้วสายของอุปกรณ์

วงจรพื้นฐานสำหรับวัดดิซาร์จบางส่วน PD จะประกอบด้วยตัวจ่ายแรงดันทดสอบ U_g คือ หม้อแปลงทดสอบป้อนแรงดันให้กับวัสดุทดสอบ และตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว C_k ผ่านตัวกรองความถี่สูง F ดังวงจรในรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 วงจรพื้นฐานสำหรับการตรวจจับดิซาร์จบางส่วน [5]

U_g คือ ตัวจ่ายแรงดันสูงกระแสสลับป้อนให้กับตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว C_k และวัสดุทดสอบ P

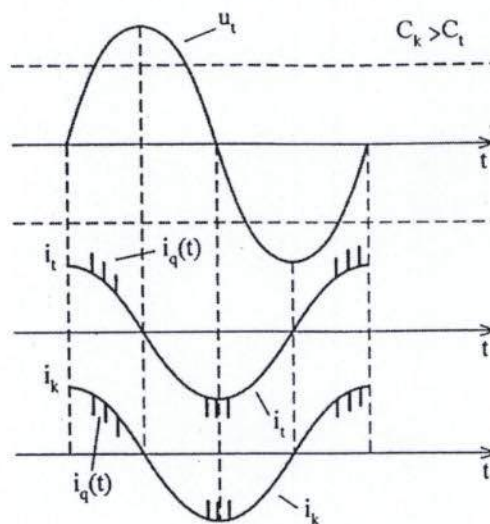
F คือ ตัวกรองประกอบด้วยอิมพีแดนซ์ที่มีค่าความถี่สูง นั่นคือ ตัวกรองจะทำหน้าที่ไม่ให้คลื่นรบกวนความถี่สูงจากตัวจ่ายเข้าไปรบกวนวงจรทดสอบ แต่ยอมให้กระแสทดสอบความถี่ต่ำไหลผ่านไปได้ ในเวลาเดียวกัน F จะทำหน้าที่กันมิให้สัญญาณดิซาร์จบางส่วน (PD) จากวัสดุทดสอบไหลหนีออกไปทางตัวจ่ายแรงดันได้ ตัวกรองนี้ อาจประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำ L หรือประกอบด้วยตัวเก็บประจุ C เป็นวงจรก็ได้

C_k คือ ตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว มีค่าความจุไฟฟ้าประมาณเท่าๆ กับค่าความจุไฟฟ้าของวัสดุทดสอบ หรือใหญ่กว่า ในเชิงปฏิบัติ C_k จะมีค่าความจุไฟฟ้าประมาณ 1000 pF เพื่อให้มีค่าอิมพีแดนซ์พอสที่กระทำให้กระแสดิซชาร์จบางส่วน $i(t)$ ซึ่งมีค่า $< 100 \mu A$ และเป็นพัลส์แคบๆ ไหลได้ครบวงจรเป็นกระแสที่วัดได้ ตามที่ได้กล่าวแล้วว่า เมื่อเกิดดิซชาร์จในโพรงก้ำของฉนวน จะทำให้แรงดันที่ขั้วทดสอบ A-B ตกไปเท่ากับ δU และเป็นเหตุให้เกิดการถ่ายเทประจุจากตัวเก็บประจุ C_k เข้าไปทดแทนนั่นคือ จะมีกระแสไหลวน $i(t)$ ที่สามารถตรวจจับ หรือวัดได้ (Measurable Current) ซึ่งมีลักษณะเป็นพัลส์ ซ้อนอยู่บนรูปคลื่นกระแสที่ป้อนให้กับวัสดุทดสอบ i_t และตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว i_k ($C \frac{dU}{dt}$) กระแสทั้งสองจะมีมุมเฟสหน้าหน้าแรงดันที่ป้อนประมาณ 90° ถ้าไม่มีค่าตัวเก็บประจุสเตรย์ขนานกับ C_k กระแสพัลส์ PD $i(t)$ ที่ซ้อนบนรูปคลื่นกระแสป้อนนี้จะมีขนาดเท่ากันแต่ขั้วตรงกันข้าม ดังรูปที่ 2.21

การวัดที่ถูกต้อง ค่าความต้านทานวัด R_m ดังรูปที่ 2.20 จะต้องสมคู่กัน (match) กับเคเบิลวัดที่มี Z_w แรงดันที่วัดที่ CRO หรือเครื่องบันทึกทรานเซียนด์ ก็คือ

$$U_m(t) = (i_t + i) Z_w R_m / (R_m + Z_w) \quad (2.26)$$

ถ้าค่าเก็บประจุวัสดุทดสอบน้อย แรงดันที่ได้จากกระแส PD นี้ $i(t)$ จะจำแนกจากกระแสประจุ $i(t)$ ได้ชัดเจน



รูปที่ 2.21 รูปคลื่นกระแสและแรงดันทดสอบของ PD [5]

- | | | |
|-------|-----|---------------------------------|
| u_t | คือ | แรงดันที่ป้อน |
| i_t | คือ | กระแสที่ป้อนกับวัสดุทดสอบ C_t |

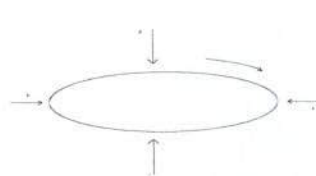
- i_k คือ กระแสที่จ่ายให้กับตัวเก็บประจุค่า C_k
- $i_q(t)$ คือ กระแสพัลส์ดิสชาร์จบางส่วน (PD) ที่วัดได้

กระแสพัลส์ PD คือ $i(t)$ ในแต่ละครึ่งไซเคิลของแรงดันที่ป้อน จะมีจำนวนพัลส์เล็กน้อย ขึ้นอยู่กับขนาดแรงดันทดสอบ และลักษณะตำแหน่งของการเกิดผิวดร็อก ถ้าวัสดุทดสอบมีจุดผิวดร็อกหลายแห่ง จำนวนพัลส์ PD จะมีมากขึ้น ซึ่งมีช่วงห่างระหว่างพัลส์เป็น μs หรือเร็วกว่านั้น โดยทั่วไปจะสังเกตเห็นอัตราการเกิดดิสชาร์จ มีค่าสูงมากที่สุดเมื่ออัตราการเปลี่ยนของแรงดัน dU/dt มีค่าสูงสุด ฉะนั้น ขั้วของพัลส์จะไม่ขึ้นอยู่กับขั้วของแรงดันทดสอบ U , แต่ขึ้นอยู่กับเครื่องหมายการเปลี่ยนแปลง dU/dt ตรงกันข้าม ในกรณีดิสชาร์จโคโรนา ซึ่งเป็นดิสชาร์จบางส่วน เกิดภายนอก จะเกิดที่ขั้วของแรงดันทดสอบ และเครื่องหมายของพัลส์ PD จะสอดคล้องกับเครื่องหมาย (ขั้ว) ของแรงดันทดสอบที่ป้อน

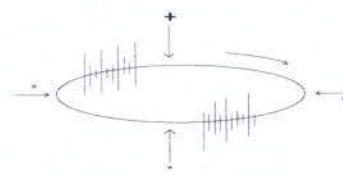
ในรูปที่ 2.20 เป็นวงจรที่ใส่แอมพลิฟายเออร์ที่มีแบนด์วิดท์สูงมาก จะมีผลให้การวัดคลาดเคลื่อนในการนี้จึงใส่ตัวเก็บประจุ C_m ประมาณ 10 pF ที่ต่อระหว่างปลายล่าง C_i กับดิน และขนานกับ R_m จึงเป็นทางเบี่ยงของสัญญาณประกอบที่มีความถี่สูงมากๆ ของ $i(t)$ ฉะนั้นถ้า $i(t)$ เป็นพัลส์สั้นๆ C_m จะทำการอินทิเกรตกระแสและ R_m ที่ใส่ไว้จะมีผลให้เกิดการหน่วงด้วยเวลาคงตัว $R_m C_i C_k / (C_i + C_k)$

2.8 เทคนิคการวัดดิสชาร์จบางส่วน [5]

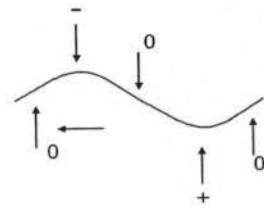
การวัดค่า PD อาจวัดด้วยมิเตอร์ความถี่สูงออกมาเป็น Micro-Volts (V) Picocoulomb (pC) ได้ แต่จะทราบเพียงขนาดของ PD เท่านั้น วิธีที่นิยมใช้แสดงผลวัด PD ในปัจจุบัน คือ การแสดงผลบนจอออสซิลโลสโคป ซึ่งอาจแสดงได้ 2 แบบ คือ ให้รูปพัลส์ของ PD ปรากฏบนฐานเวลารูปอิลิปส์ ซึ่งมีเครื่องหมายแสดงตำแหน่งยอดบวก ยอดลบ และตำแหน่งศูนย์ของรูปแรงดันทดสอบ ดังรูปที่ 2.22 ก , ข หรือแสดงในรูปคลื่นพัลส์ PD ปรากฏบนฐานเวลารูปคลื่นไซน์ดังรูปที่ 2.22 ค , ง การแสดง PD บนฐานเวลารูปคลื่นไซน์มีผลดีที่วัดขนาดได้ถูกต้อง และสังเกตตำแหน่งที่เกิดได้แน่นอน การแสดงบนฐานเวลารูปอิลิปส์มีข้อดี คือ แยกได้ว่า PD เกิดจากสาเหตุอะไร



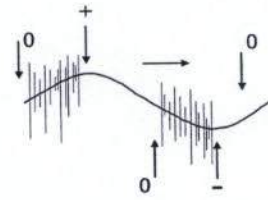
ก) ฐานเวลารูปอิลิปส์



ข) ตัวอย่าง PD บนฐานเวลารูปอิลิปส์



ก) ฐานเวลารูปคลื่นไซน์

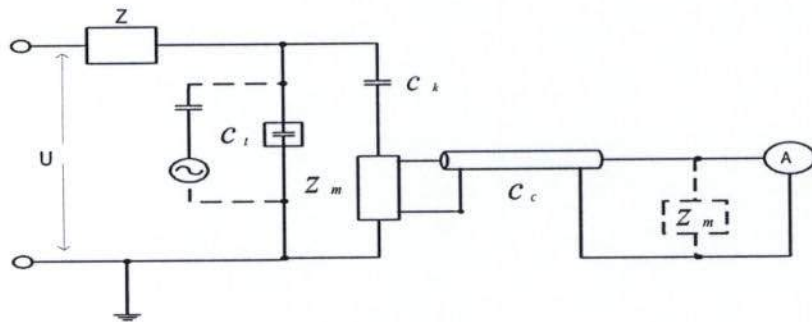


ง) ตัวอย่าง PD บนฐานเวลารูปคลื่นไซน์

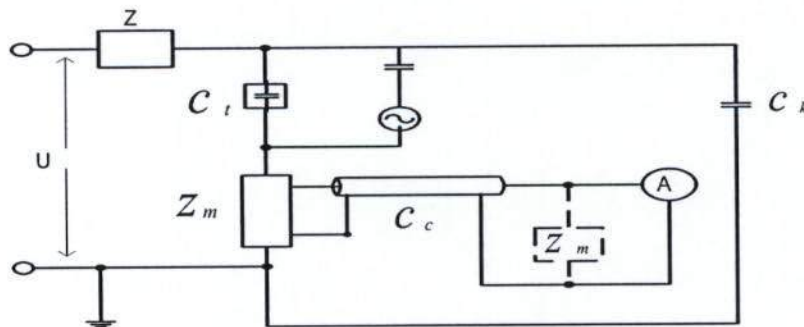
รูปที่ 2.22 การแสดงผลของ PD [5]

2.8.1 การวัดคิซาร์จบางส่วนสำหรับวัสดุทดสอบทั่วไป

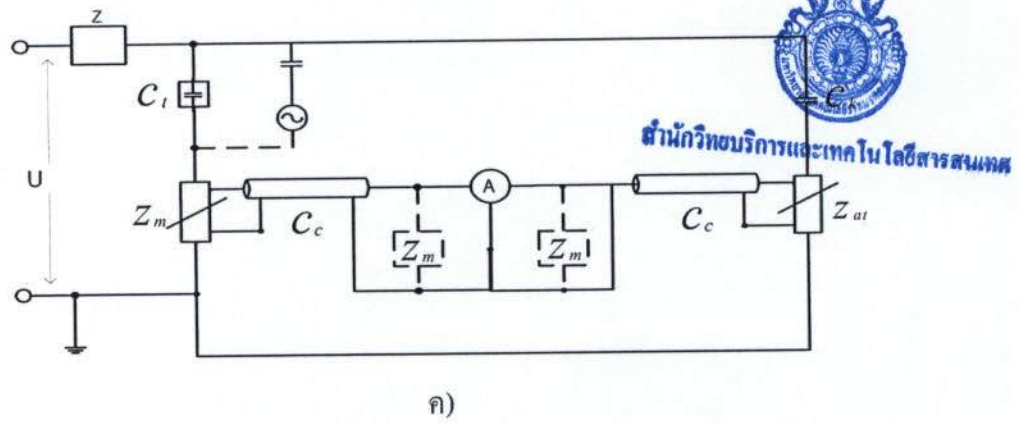
โดยปกติวัสดุทดสอบทั่วไป อาจแทนได้ด้วยตัวเก็บประจุชนิดองค์ประกอบแบบลัมปี หรือตัวเก็บประจุธรรมดา วงจรทดสอบ PD ตามมาตรฐานต่าง ๆ จะมีลักษณะเช่นเดียวกัน ในที่นี้ใช้ วงจรทดสอบตามมาตรฐาน IEC [IEC Publ.No.270 (1981)] โดยรูปที่ 2.23 ก) และรูปที่ 2.23 ข) เป็น วงจรทดสอบแบบวิธีตรง ข้อดีของวงจรรูปที่ 2.23 ก) คือขั้วแรงดันต่ำของวัสดุทดสอบต่อลงกราวด์ โดยตรงในกรณีวัสดุทดสอบเกิดการเบรคความโน้มถ่วงที่เค้นชั่วคราวจะไม่ได้รับความเสียหาย ข้อดีของวงจร รูปที่ 2.24 ข) จะให้ความไวในการวัดสูงกว่าแบบแรกในกรณีที่วัสดุทดสอบมีขนาดเล็ก เนื่องจากผล ของตัวเก็บประจุแบบสเตอเรย์จะทำให้ค่าความจุของตัวเก็บประจุเปลี่ยนแปลงมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ในรูปที่ 2.23 ก) เป็นวงจรทดสอบแบบสมมูล วงจรแบบนี้จะมีข้อได้เปรียบในเรื่องการลดสัญญาณรบกวนที่ เข้ามาจากแหล่งจ่ายหรือสัญญาณแบบ “คอมมอน โหมด” นั้นเอง



ก)



ข)

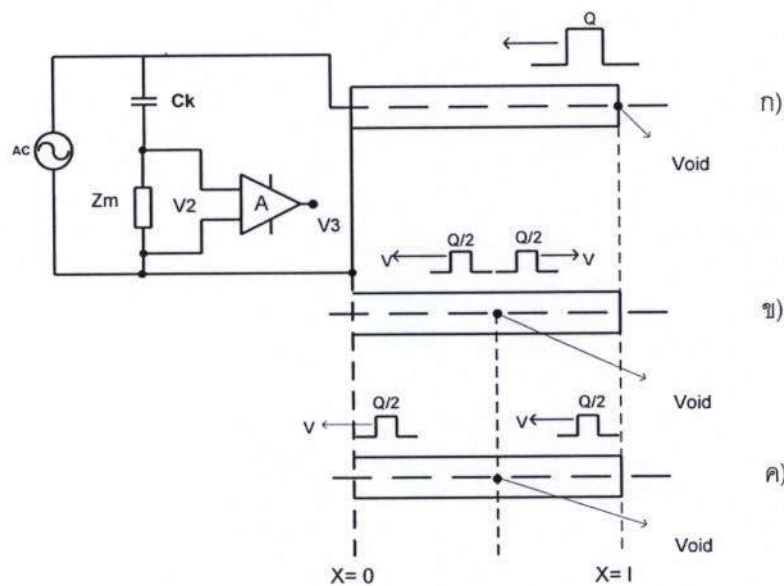


รูปที่ 2.23 วงจรทดสอบดิสซาร์จบางส่วนแบบต่าง ๆ [5]

การปรับเทียบวงจรทดสอบโดยปกติจะทำก่อนการป้อนแรงดันเข้าวงจรทดสอบ โดยใช้เครื่องปรับเทียบดิสซาร์จมาตรฐานในการป้อนกระแสพัลส์สั้น ๆ ที่มีประจุ (Pulse Area) ซึ่งทราบค่าที่แน่นอนที่ขั้วทั้งสองวัสดุทดสอบ (เส้นประ) หลังจากทำการปรับเทียบเสร็จแล้วควรเอาเครื่องปรับเทียบดิสซาร์จมาตรฐานออกก่อนการป้อนดันเข้าวงจรทดสอบ

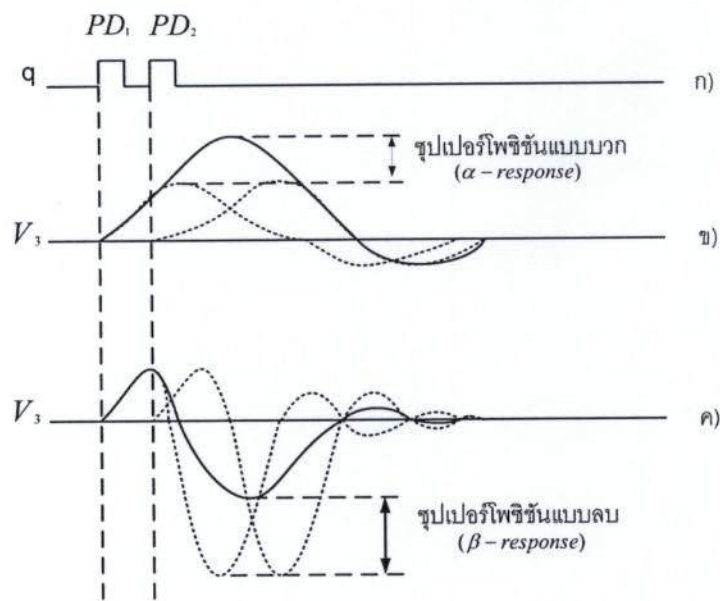
2.8.2 การวัดดิสซาร์จบางส่วนสำหรับสายเคเบิล

การวัดดิสซาร์จบางส่วนสำหรับเคเบิล ถ้าเคเบิลสั้น การวัด PD จะทำเช่นเดียวกับข้อ 2.8.1 แต่สำหรับเคเบิลยาวนั้นเราจะพิจารณาเคเบิลยาวเป็นลักษณะสายส่ง คือ PD จะทำให้เกิดคลื่นจรเคลื่อนที่ออกไปที่ปลายทั้งสองด้านของเคเบิล วงจรทดสอบดังรูปที่ 2.24 โดยรูปที่ 2.24 ก) แสดงการเกิด PD ที่ปลายด้านไกล ($x=1$) ของเคเบิล ส่วนในรูปที่ 2.24 ข) แสดงการเกิด PD ที่จุดใด ๆ ภายในเคเบิล



รูปที่ 2.24 การเกิดคลื่นจรขณะเกิด PD ในเคเบิลยาว [5]

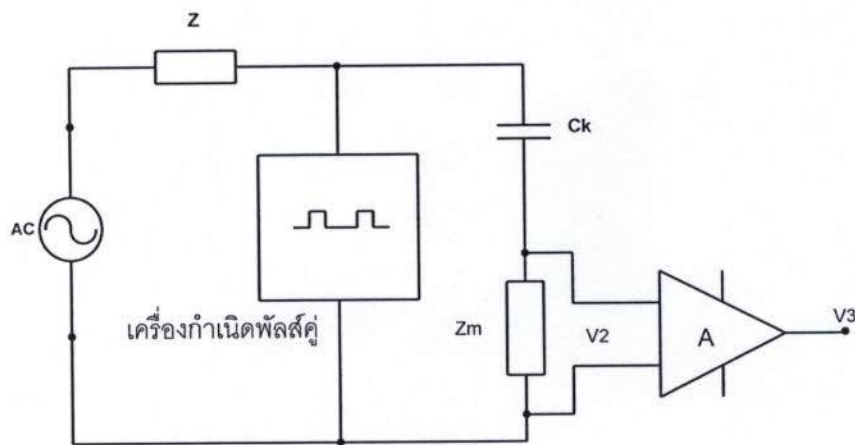
ขณะเกิด PD จะทำให้คลื่นจรถูกแรกเคลื่อนที่ไปที่เครื่องตรวจจับ PD โดยตรง ในขณะที่คลื่นจรถูกที่สองจะเคลื่อนที่ไปที่ปลายด้านไกลก่อนแล้วจึงจะสะท้อนกลับมาที่เครื่องตรวจจับ PD ในเวลาที่ใกล้เคียงกัน ผลอันนี้ทำให้เครื่องตรวจจับ PD วัดค่าผิดพลาดเนื่องจากผลการเกิดชุปเปอร์โพสิชันของคลื่นจรที่เกิดขึ้น ในกรณีที่คลื่นจรเกิดชุปเปอร์โพสิชันแบบบวกจะทำให้ค่าที่อ่านได้มากกว่าค่าที่เกิดขึ้นจริง (ไม่เกิน 2 เท่าของค่าปกติ) ซึ่งเป็นกรณีที่ยอมรับได้ สำหรับกรณีที่คลื่นจรเกิดชุปเปอร์โพสิชันแบบลบจะทำให้ค่า PD ที่อ่านได้น้อยกว่าค่าของ PD ที่เกิดขึ้นจริง กรณีนี้เป็นกรณีที่ยอมรับไม่ได้ การทดสอบ PD ต้องมีการหลีกเลี่ยงผลอันนี้ วิธีการแก้ปัญหาที่ง่าย ประหยัด และเป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไป ทำให้โดยการใช้เครื่องตรวจจับ PD แบบแถบกว้าง ซึ่งให้เอาต์พุตเป็นแบบ “ α -response” ดังนั้นขณะที่มีการสะท้อนของคลื่นจรจะทำให้เกิดชุปเปอร์โพสิชันแบบบวกเท่านั้น แสดงดังรูปที่ 2.25 ข) ส่วนเครื่องตรวจจับ PD แบบอื่นจะให้เอาต์พุตแบบ “ β -response” ทำให้มีโอกาสเกิดชุปเปอร์โพสิชันแบบลบได้ แสดงดังรูปที่ 2.25 ค) จึงควรหลีกเลี่ยงเครื่องตรวจจับแบบนี้ในการทดสอบสายเคเบิลยาว



รูปที่ 2.25 การเกิดชุปเปอร์โพสิชันสัญญาณเอาต์พุตของเครื่องตรวจจับ PD แบบต่าง ๆ [5]

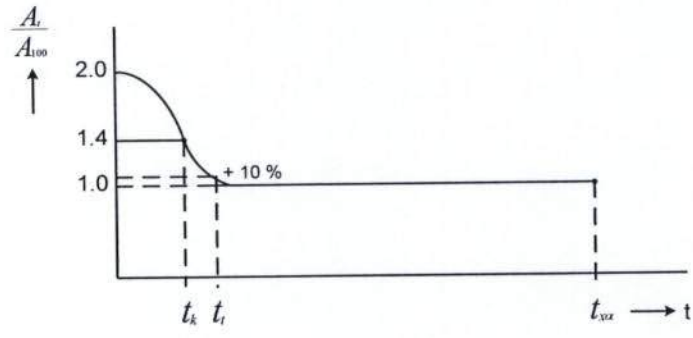
ในการทดสอบสายเคเบิล เช่น NEMA Publ.No.W8-1976 (ICEA Publ.No.5-68-516) และ IEC Publ.No.885-3 (ฉบับร่าง) ได้กำหนดการตรวจสอบคุณสมบัติชุปเปอร์โพสิชันของเครื่องตรวจจับ PD สำหรับการทดสอบเคเบิล ซึ่งวงจรทดสอบดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 2.26 โดยใช้เครื่องมือที่เรียกว่า “เครื่องกำเนิดพัลส์คู่” ในการจำลองคลื่นจรลักษณะเดียวกันกับที่เกิดในเคเบิล แต่สามารถปรับระยะเวลาของคลื่นจรทั้งสองที่เวลาต่าง ๆ ที่เวลาต่าง ๆ ตั้งแต่ 0.2 ถึง 100 ไมโครวินาที

แล้วเขียน “ไดอะแกรมพัลส์คู่” เพื่อคุณลักษณะการเกิดชุปเปอร์โพสิชันคลื่นจรที่เวลาต่าง ๆ รูปที่ 2.27 ก) แสดงไดอะแกรมพัลส์คู่ที่ไม่เกิดชุปเปอร์โพสิชันแบบลบ (α - response) ส่วนในรูปที่ 2.27 ข) แสดงไดอะแกรมพัลส์คู่ที่เกิดชุปเปอร์โพสิชันแบบลบในช่วงเวลา t_1 ถึง t_2 (β - response) อย่างไรก็ตาม IEC Publ.No.885-3 (ฉบับร่าง) ขอมให้เกิดชุปเปอร์โพสิชันแบบลบได้ไม่เกิน 10% ส่วน NEMA Publ.No.WC8-1976 ขอมให้เกิดการรวมกันแบบลบได้ไม่เกิน 15% นอกจากนี้ NEMA ยังกำหนดอีกด้วยว่า “เวลาแยกซัด” (Pulse Resolution Time) ของเครื่องตรวจจับ PD ควรมีค่าประมาณ 4 ถึง 6 ไมโครวินาที (เวลาแยกซัดจะคิดที่เวลาที่ให้เกิดชุปเปอร์โพสิชันแบบบวกไม่เกิน 10%)

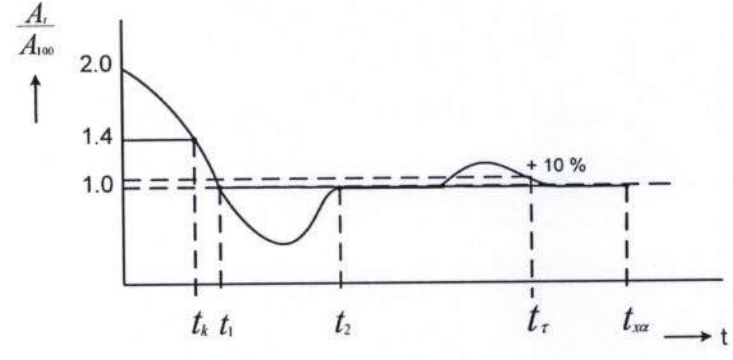


รูปที่ 2.26 วงจรตรวจสอบคุณสมบัติชุปเปอร์โพสิชันของเครื่องตรวจจับ PD [5]

การพิจารณาว่าสายเคเบิลที่ทดสอบเป็นแบบเคเบิลยาวหรือเคเบิลสั้นนั้น จะพิจารณาที่ระยะ $X = 1_k$ เป็นเกณฑ์ คือถ้า $X > 1_k$ จะถือว่าเป็นเคเบิลยาว โดยที่ $1_k = 0.5 v t_k$ เมื่อ v คือความเร็วของคลื่นจร (150 ถึง 170 เมตรต่อไมโครวินาทีสำหรับสายเคเบิลที่มีฉนวนชนิด XLPE) และ t_k คือเวลาที่เกิดชุปเปอร์โพสิชันแบบบวกเท่ากับ 1.4 เท่าของค่าปกติ ในทางปฏิบัติจะพบว่า ในการทดสอบเคเบิลยาว จะมีผลการสูญเสียพลังงานของคลื่นจรเข้ามาเกี่ยวข้องกับด้วย คือขณะที่คลื่นจรเคลื่อนที่ไปจะทำให้มีขนาดลดลงเรื่อย ๆ ทำให้ค่าที่อ่านได้ผิดพลาด สำหรับ IEC Publ.No.885-3 (ฉบับร่าง) จะขอมให้ค่าที่อ่านได้ในกรณีนี้เมื่อรวมผลของชุปเปอร์โพสิชันเข้าด้วยจะต้องผิดพลาดน้อยกว่าความเป็นจริงไม่เกิน 30% ในรูปที่ 2.28 แสดงไดอะแกรมพัลส์คู่ เมื่อเกิดการสูญเสียในสายเคเบิลเข้าไปด้วย

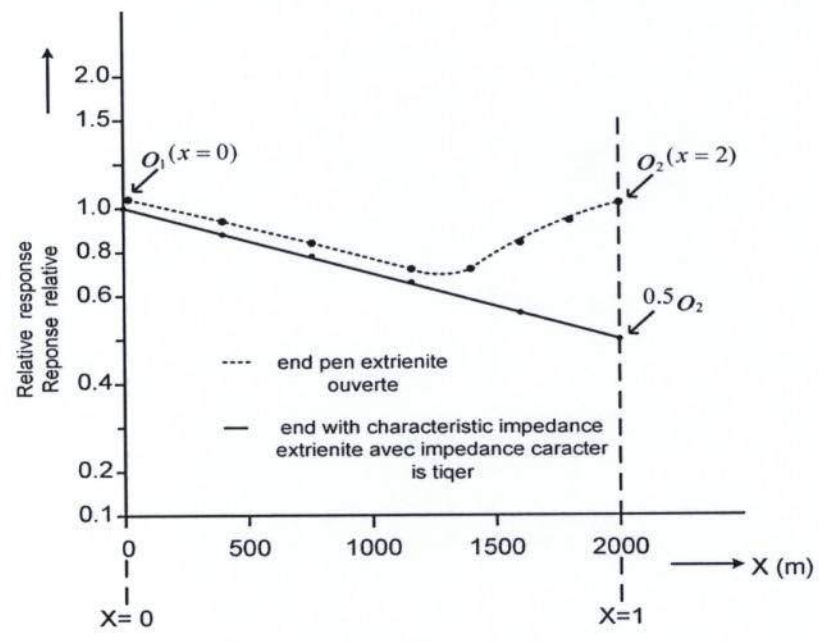


ก)



ข)

รูปที่ 2.27 ไคอะแกรมพัลส์คู่ของเครื่องตรวจจับ PD แบบต่าง ๆ [5]

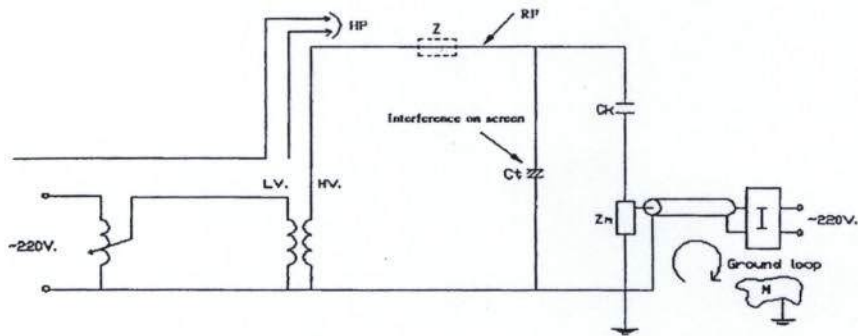


รูปที่ 2.28 ไคอะแกรมพัลส์คู่เมื่อเกิดการสูญเสียในสายเคเบิล [5]

2.9 เทคนิคการลดสัญญาณรบกวน [5],[7]

2.9.1 สัญญาณรบกวนที่มีผลกระทบในการวัดคิซาร์จบางส่วน

สัญญาณรบกวนประกอบด้วยสัญญาณรบกวนที่เข้ามาทางอากาศและทางแหล่งจ่าย นอกจากนี้ยังมีสัญญาณรบกวนเนื่องจากการคิซาร์จของอุปกรณ์ที่เป็น โลหะและวางอยู่ใกล้วงจรทดสอบหรือกราวด์ไม่ดี การเกิดกราวด์ลูป (Ground Loop) และเกิดสัญญาณออสซิลเลตเนื่องจากการเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์ไม่ดี (หลวม) เป็นต้น รายละเอียดแสดงดังรูปที่ 2.29



รูปที่ 2.29 ตัวอย่างสัญญาณรบกวนที่ตำแหน่งต่างๆ [5]

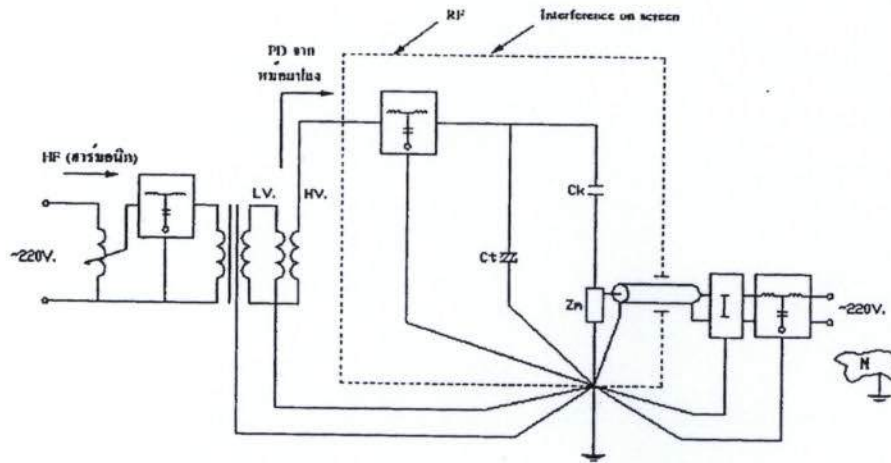
- HF คือ สัญญาณรบกวนความถี่สูงที่เข้ามาจากแหล่งจ่ายได้แก่ ฮาร์มอนิกสูงๆ จากเมน โดยตรงจากอุปกรณ์พวกไทรสเตอร์ และ PD จากหม้อแปลงทดสอบ เป็นต้น
- RF คือ คลื่นรบกวนวิทยุซึ่งอาจจะเป็นคลื่นวิทยุโดยตรง คลื่นรบกวนจากอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงหรือหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่อยู่ใกล้เคียง
- EMP คือ สัญญาณรบกวนจากการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก เนื่องจากการทำงานของสวิทช์หรือไทรสเตอร์
- Interference on screen คือ สัญญาณรบกวนที่สกรีน หรือที่ขั้วแรงดันต่ำของวัสดุทดสอบที่มีสกรีนขนาดใหญ่ เช่น เคเบิล เป็นต้น
- Ground Loop คือ การเกิดครบวงจรของสายดิน
- Ungrounded metal (N) คือ การคิซาร์จของพวกโลหะที่ไม่ได้ต่อลงดินวางอยู่ใกล้วงจรทดสอบ

2.9.2 การลดสัญญาณรบกวน

1) การลดสัญญาณรบกวนโดยตรง

การลดสัญญาณความถี่สูง เช่น พวกรฮาร์มอนิกสูงๆ จะใช้ตัวกรองแรงดันต่ำและอาจจะเพิ่มหม้อแปลงขดลวดแยกช่วยด้วยก็ได้ โดยต่อไว้ทางด้านขดลวดแรงดันต่ำของหม้อแปลงทดสอบ ในกรณีที่เกิด PD ในหม้อแปลงทดสอบจะต้องใช้ตัวกรองแรงดันสูงต่อทางด้านขดลวด

แรงดันสูงหม้อแปลงทดสอบ การลดสัญญาณรบกวน RF และ EMP ซึ่งเข้ามาทางอากาศทำได้โดยการทดสอบในห้องชีลด์ การแก้ปัญหาเรื่องกราวด์รูปทำได้โดยการต่อกราวด์ร่วมกันเพียงจุดเดียว ตัวอย่างการแก้ปัญหาสัญญาณรบกวน แสดงในรูปที่ 2.30



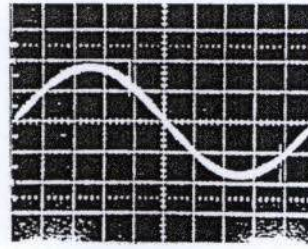
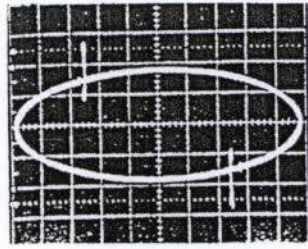
รูปที่ 2.30 ตัวอย่างการลดสัญญาณรบกวน [5]

2) การลดสัญญาณรบกวนวิธีอื่นๆ

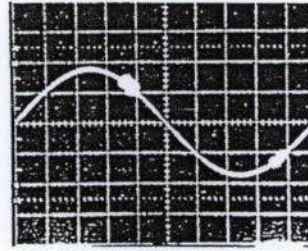
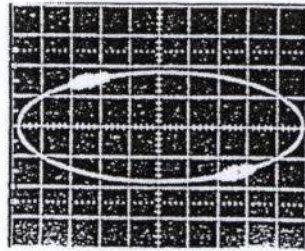
การลดสัญญาณรบกวนวิธีอื่นมีหลายวิธีด้วยกัน ที่นิยมใช้กันมากคือ

ก. วงจรทดสอบแบบสมมูล ใช้ลดสัญญาณรบกวน “คอมมอน โหมด” เช่น สัญญาณรบกวนที่เข้ามาทางแหล่งจ่าย เป็นต้น

ข. การลดสัญญาณรบกวนโดยวิธี “หน้าต่างเวลา” (Time Window Method) วิธีนี้เป็นที่นิยมกันมากในปัจจุบัน โดยจะลดสัญญาณรบกวนที่ซิงโครไนซ์กับความถี่ของแหล่งจ่ายเท่านั้น เช่น สัญญาณรบกวนเนื่องจากการทำงานของไทรสเตอร์ เป็นต้น ด้วยการสวิตช์ ตัดหรือเปิดวงจรตรงตำแหน่งที่มีสัญญาณรบกวน เพื่อไม่ให้ไปปรากฏที่เอาต์พุตของเครื่องจับ PD รูปที่ 2.31 ก) แสดงตัวอย่างสัญญาณรบกวนจากไทรสเตอร์ รูปที่ 2.31 ข) แสดงการกำจัดสัญญาณรบกวนโดยวิธี “หน้าต่างเวลา” และเพิ่มความสว่างของจอภาพ ณ ตำแหน่งนั้นเพื่อบอกตำแหน่งของ “หน้าต่างเวลา” ให้เราทราบ



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.31 การลดสัญญาณรบกวนด้วยวิธี “หน้าต่างเวลา” [5]

2.10 คุณสมบัติของเครื่องตรวจจับคิสซาร์จบางส่วน [5]

ข้อกำหนดของเครื่องตรวจจับคิสซาร์จบางส่วนตามมาตรฐาน IEC

กำหนดให้มีคุณสมบัติโดยสรุปไว้ดังนี้ คือ

1) เวลาแยกชุดของเครื่องตรวจจับ PD กำหนดไว้ใน IEC Publ.No.270 (1981) ว่าต้องไม่เกิน 100 ไมโครวินาที ในกรณีที่ไมเกิดความผิดพลาดเนื่องจากการซ้อนทับของพัลส์ PD

2) เครื่องเปรียบเทียบคิสซาร์จมาตรฐานใช้สำหรับจ่ายกระแสพัลส์มาตรฐาน IEC Publ.No.270 (1981) กำหนดให้ใช้แรงดันที่มีช่วงเวลาขึ้นไม่เกิน 0.1 ไมโครวินาที และลดลงด้วยค่าคงตัวเวลาอยู่ในช่วง 100 ถึง 1000 ไมโครวินาที

3) ความไวของเครื่องตรวจจับหรือวัด PD จะต้องมีความสามารถตรวจจับพัลส์ต่ำสุดเป็นสองเท่าของสัญญาณรบกวนซึ่งกำหนดไว้ใน IEC Publ.No.885-2 (1981)

4) เครื่องกำหนดพัลส์คู่ที่ใช้ในการตรวจสอบคุณสมบัติซูเปอร์โพสิชันของเครื่องตรวจจับ PD นั้นกำหนดไว้ใน IEC Publ.No 885-3 (ฉบับร่าง) ว่าต้องสามารถสร้างพัลส์ขนาดเท่ากันสองพัลส์ ซึ่งมีช่วงเวลาขึ้นไม่เกิน 20 นาโนวินาที และมีความกว้างของพัลส์จากค่า 10% ของหน้าคลื่นถึงหางคลื่นต้องไม่เกิน 150 นาโนวินาที โดยพัลส์ทั้งสองนี้สามารถปรับระยะห่างได้อย่างน้อย 0.2 ถึง 100 ไมโครวินาที สำหรับเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ปกติประมาณ 50 ถึง 60 โอห์ม

5) ตัวเก็บประจุที่ใช้การเปรียบเทียบต้องมีค่าไม่เกิน 150 พิโคฟารัด (สำหรับการทดสอบ PD ในเคเบิล) เรื่องนี้กำหนดไว้ใน IEC Publ.No.885-3 เช่นกัน

6) เครื่องตรวจจับดิสชาร์จบางส่วนที่ใช้ในการทดสอบเคเบิลตามมาตรฐาน IEC ขอมให้ เกิดรูปเปอร์โพซิชั่นทางลบได้ไม่เกิน 10% ในกรณีที่เกิดเกิน 10% จะต้องนำผลอันนี้มาพิจารณาในการวัด ค่าว

2.11 ทฤษฎีการเกิดเบรกดาวน์ [2]

2.11.1 การเบรกดาวน์ อาจแบ่งออกได้ 2 แบบ คือ

1) เบรกดาวน์สมบูรณ์ (Complete Breakdown) หมายถึง การเกิดเบรกดาวน์ตลอดแถบ เชื่อมโยงระหว่างอิเล็กโทรด ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อวัสดุฉนวนเสียสภาพการฉนวนหมดสิ้น หลังจากเบรก ดาวน์เกิดขึ้นในฉนวนแล้วแรงดันจะเหลือน้อยมาก มีกระแสไหลมากตามแนวที่เกิดเบรกดาวน์ กระแสเบรกดาวน์นี้จะจำกัดด้วยความต้านทานภายในของตัวจ่ายแรงดัน ช่วงเวลาที่เบรกดาวน์เกิดขึ้น จะเป็นเวลาเดียวกันกับอาร์คเริ่มเกิด

2) เบรกดาวน์เพียงบางส่วน (Partial Breakdown) หรือเบรกดาวน์ไม่สมบูรณ์เกิดขึ้นใน ระบบการฉนวนที่มีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง (แฟลคเตอร์สนามไฟฟ้า η มีค่าต่ำ) เบรกดาวน์เพียง บางส่วนอาจเกิดก่อนเบรกดาวน์สมบูรณ์ได้ เป็นการเกิดไอออไนเซชันในแถบเพียงบางส่วน บางทีก็ เรียกว่า พาร์เชียลดิสชาร์จ (Partial Discharge) เช่น ดิสชาร์จแบบโคโรน่า

2.11.2 การเคลื่อนที่ของอนุภาค

อนุภาคประจุเคลื่อนที่อย่างไม่มีการเบียด (จากพลังความร้อน) ถ้าไม่มีสนามไฟฟ้าเมื่อมี สนามไฟฟ้าจะทำให้เกิดแรงกระทำขึ้นบนประจุเหล่านั้น ความเครียดสนามไฟฟ้า E จะทำให้เกิดแรง กระทำบนอนุภาคประจุ คือ $Q \cdot E$ อนุภาคประจุเหล่านั้นจะเคลื่อนที่อย่างไม่มีการเบียด เกิดการเคลื่อนที่ ของประจุก็คือ มีกระแสไหลนั่นเอง ความหนาแน่นของกระแสก็คือ

$$J = |N^+ \cdot Q^+ \cdot v^+| + |N^- \cdot Q^- \cdot v^-| \quad (2.27)$$

เมื่อ N^+ และ N^- คือ อนุภาคประจุบวกและประจุลบตามลำดับ
 Q^+ และ Q^- คือ ประจุของอนุภาค
 v^+ และ v^- คือ ความเร็วครีฟท์ (Drift Velocity)

ในการอัดก๊าซที่มีความหนาแน่น ความเร็วครีฟท์จะมีค่าต่ำเมื่อเทียบกับความเร็วเนื่องจากความร้อน สภาพการเคลื่อนที่ของอนุภาคพิจารณาจากการชนกัน ความเร็วของการเคลื่อนที่ของอนุภาคเป็น สัดส่วนโดยตรงกับความเครียดสนามไฟฟ้า

$$v = \mu \cdot E \quad (2.28)$$

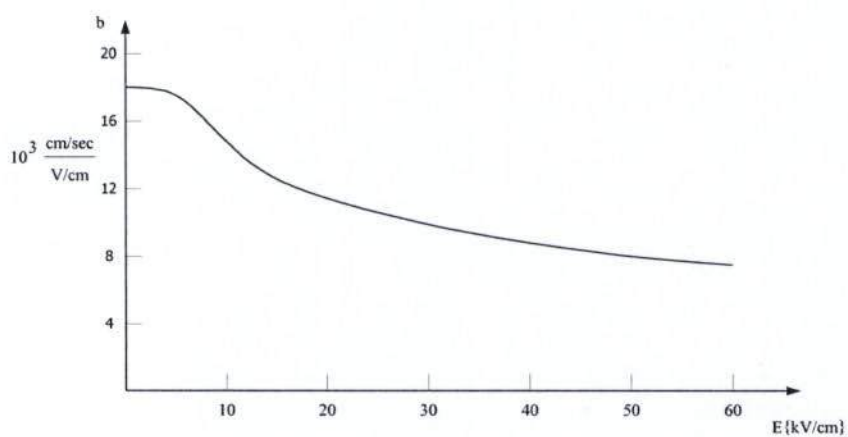
เมื่อ b คือ สภาพการเคลื่อนที่ (Mobility) ของอนุภาค

สภาพการเคลื่อนที่ของไอออนของการส่วนใหญ่จะมีค่าคงที่ที่ความเครียดสนามไฟฟ้าต่ำๆ (เช่น ที่บรรยากาศความเครียดสนามไฟฟ้าถึงหลาย kV/cm) ที่ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงๆ ค่าสภาพการเคลื่อนที่ของอนุภาคจะขึ้นอยู่กับความเครียดสนามไฟฟ้าเล็กน้อย ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของก๊าซด้วย ดังในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สภาพการเคลื่อนที่ของไอออนบวก (b^+) และไอออนลบ (b^-) ของก๊าซต่างๆ ที่ 1 bar $20^\circ C$ และ $E = 1 kV/cm$

ก๊าซ	b^+ cm^2/sec	b^- cm^2/sec
H ₂	6.7	7.9
N ₂	1.6	1.6
O ₂	1.4	1.8
CO ₂	1.1	1.3
He	5.1	6.3

สภาพการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนขึ้นอยู่กับความเครียดสนามไฟฟ้า ดังในรูปที่ 2.32



รูปที่ 2.32 สภาพการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในไนโตรเจนที่ 1 bar $20^\circ C$ [2]

2.11.3 กลไกการเกิดเบรกดาวน์ (Breakdown Mechanisms)

การเกิดเบรกดาวน์ในก๊าซ หมายถึง การเปลี่ยนสภาพการฉนวนไปสู่สภาพนำไฟฟ้า คือเป็นช่วงต่อ (Transition) ระหว่างสถานะภาพที่กระแสไหลประทังตัวเองไม่ได้ (Nonself-Sustained) ไปสู่สถานะภาพที่กระแสไหลประทังตัวเองได้ (Self-Sustained) ช่วงต่อดังกล่าวจะเกิดขึ้นได้เมื่อในแก๊ปมีจำนวนอิเล็กตรอนหรือไอออนในอวสานลานซ์มากพอที่จนทำให้แก๊ปมีสภาพนำไฟฟ้าสูง และโดยทฤษฎีแล้วกระแสไหลเป็นค่าอนันต์ คือ กระแสจะถูกจำกัดด้วยค่าของวงจรภายนอกเท่านั้น กระแสที่ไหลในแก๊ปนี้จะไหลต่อไปได้ถึงแม้ว่าจะตัดต้นกำเนิดรังสีต่อคาโอด (เช่น รังสีอุลตราไวโอเลต) เพื่อสร้าง N_0 และ I_0 ออก หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือแรงดันที่ทำให้เกิดเบรกดาวน์คงเดิมไม่ว่า N_0 กับ I_0 จะต่างกัน) ซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์ของกระแสไหลในแก๊ปกับแรงดันที่ป้อน จะเห็นได้ว่าระดับกระแสอิมิตัว I_{01}, I_{02} มีระดับต่างกันขึ้นอยู่กับความเข้มของรังสีต่อคาโอดที่ระดับกระแสอิมิตัว I_0 ค่าหนึ่ง ขนาดแรงดันที่ป้อนไม่มีผลต่อกระแสที่ไหลในแก๊ปจนถึงค่าแรงดันหนึ่งกระแสจะเริ่มเพิ่มขึ้นเป็นเอกซโปเนนเชียลในย่านนี้เรียกว่า ทาว์นเซนต์ดีสซาร์จ ถ้าเพิ่มแรงดันต่อไปอีกกระแสเพิ่มขึ้นเกินเอ็กซ์โปเนนเชียล จนแรงดันถึงค่าหนึ่ง เรียกว่าเบรกดาวน์ เกิดขึ้นที่แรงดันเดียวกันไม่ว่า I_0 จะเป็นเท่าใด และกระแสไหลในแก๊ปประทังตัวเองได้จำนวนอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นทำให้กระแสไหลประทังตัวเองอยู่ได้นั้น เกิดจากกระบวนการต่างๆ ที่กล่าวมาแล้ว ซึ่งมีกระบวนการที่สำคัญได้แก่

- อิเล็กตรอนขั้นที่สอง (Secondary Electron) เป็นอิเล็กตรอนปล่อยจากคาโทดโดยการวิ่งชนของไอออนบวก

- ไอออนไนเซชันในก๊าซเนื่องจากพลังโฟตอน

- ปล่อยอิเล็กตรอนออกจากคาโทดโดยโฟตอนไฟฟ้า (Photoelectric Emission)

1) กฎของพาสเชน (Paschen's Law) เป็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน เบรกดาวน์ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ กับผลคูณของความดัน p และระยะแก๊ป d ระหว่างอิเล็กโตรด กล่าวว่ค่าแรงดันเบรกดาวน์จะมีค่าคงที่ ถ้าผลคูณของ p และ d มีค่าคงตัว หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ ค่าแรงดันเบรกดาวน์ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมออยู่ในฟังก์ชันของผลคูณ $p \cdot d$ เท่านั้น บางตำราจะเรียกกฎนี้เป็นเพียงความสัมพันธ์ของพาสเชน ทั้งนี้เพราะว่ากฎดังกล่าวไม่เป็นจริงทุกกรณี โดยเฉพาะปรากฏการณ์ที่ใช้กับความดันสูงๆ อย่างไรก็ตามในปัจจุบันนี้ยังมีผู้นิยมใช้เป็นกฎอยู่อีกมากจากเงื่อนไขการเกิดเบรกดาวน์ของก๊าซในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอของทาว์นเซนต์ตามสมการ (2.29) มีว่า

$$\begin{aligned} \Gamma(e^{\alpha d} - 1) &= 1 \\ \alpha d &= \ln\left(\frac{1}{\Gamma} + 1\right) = K = \text{ค่าคงตัว} \end{aligned} \quad (2.29)$$

โดย Γ คือตัวประกอบการเกิดเบรกดาว์นจากกระบวนการขั้นที่สองของทาวเซนต์
 การเปลี่ยนแปลงค่า Γ เล็กน้อยจะไม่มีผลการเปลี่ยนแปลงของ $\ln\left(\frac{1}{\Gamma}+1\right)$ สัมประสิทธิ์ไอออนไน
 เซชัน α มีความสัมพันธ์กับสนามไฟฟ้า E (สม่ำเสมอ) คือ

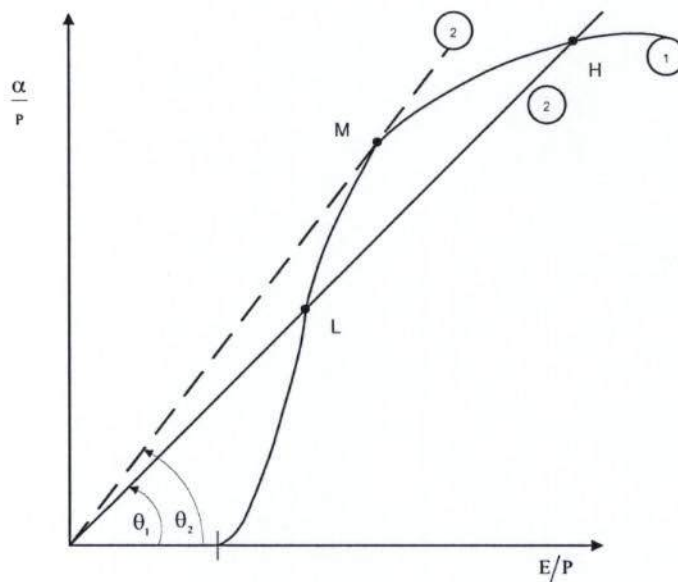
$$\frac{\alpha}{p} = f\left(\frac{E}{p}\right) \quad (2.30)$$

ฉะนั้นเอา pd คูณตลอดจะได้

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

$$\alpha d = p \cdot d \cdot f\left(\frac{U}{p \cdot d}\right) = K \quad (2.31)$$

ถ้า U เป็นแรงดันเบรกดาว์น จะพบว่า U_b นี้อยู่ในฟังก์ชันของ $p \cdot d$ เท่านั้น
 หรือ U_i เป็นค่าแรงดันเริ่มคืน จะพบว่า U_i นี้อยู่ในฟังก์ชันของ $p \cdot d$ เท่านั้นเช่นกัน
 จากสมการ (2.31) ถ้าเขียนกราฟจะได้ดังในรูปที่ 2.33 (เส้น 1)



รูปที่ 2.33 หาความสัมพันธ์ของพาสเซนต์โดยวิธีกราฟ [2]

จากรูปที่ 2.33

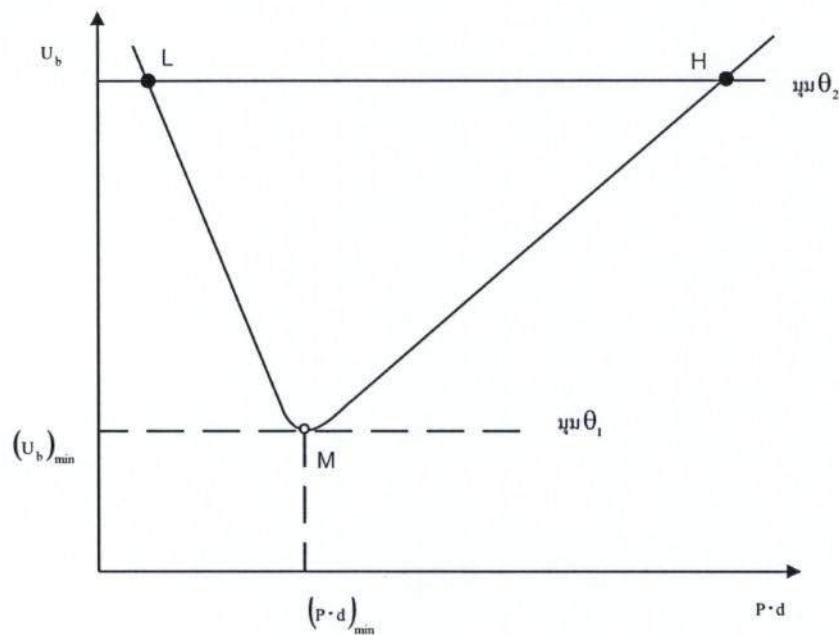
$$\tan \theta = \frac{\alpha/p}{E/p} \quad (2.32)$$

แต่ $U = E \cdot d$ (สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ)

ฉะนั้น
$$\tan \theta = \frac{\alpha \cdot d}{U} \quad (2.33)$$

จะได้เส้นตรงที่มีความชันเป็น $\tan \theta$ (เส้น 2) จะชันมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับค่าของแรงดัน U ที่ค่าแรงดันต่ำๆ จะให้ความชันสูง θ ที่โตจนไม่ตัดเส้นโค้งเลย ก็หมายความว่าไม่มีการเบรกดาวนเกิดขึ้น และที่แรงดันสูงๆ จะได้จุดตัดสองจุดแสดงว่ามีค่าแรงดันเบรกดาวนสองค่า

ที่จุด M เป็นจุดที่เส้นตรงสัมผัสเส้นโค้ง แสดงถึงค่าแรงดันต่ำสุดที่จะทำให้เกิดเบรกดาวนได้ ที่จุดตัด L เกิดเบรกดาวนกรณีที่มีช่องแกว่งกว้างๆ E/p มีค่าต่ำความดันคงที่ และจุด H เกิดเบรกดาวนกรณีที่มีช่องแกว่งแคบๆ แต่ E/p มีค่าสูง เมื่อหาหลายๆ จุดจะได้เส้นกราฟแสดงความสัมพันธ์ของ U_b และ $p \cdot d$ ดังรูปที่ 2.34



รูปที่ 2.34 เส้น โค้งของพาสเซน [2]

จากความสัมพันธ์ในสมการ (2.31) เขียนได้ว่า

$$\alpha/p = Ae^{\frac{-B}{E/p}} \quad (2.34)$$

$$\alpha = pAe^{\frac{-Bpd}{U}} \quad (2.35)$$

จากเงื่อนไขเบรกดาวน์ เขียนได้ว่า

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln\left(\frac{1}{\Gamma} + 1\right) \quad (2.36)$$

ฉะนั้น

$$pAe^{\frac{-Bpd}{U}} = \frac{1}{d} \ln\left(\frac{1}{\Gamma} + 1\right) \quad (2.37)$$

ให้ $U = U_b$ จะได้

$$U_b = \frac{Bpd}{\ln\left(\frac{1}{\Gamma} + 1\right)} \quad (2.38)$$

โดย A และ B เป็นค่าคงตัวของก๊าซแต่ละชนิดและค่าตามตารางที่ 2.3 จะคำนวณค่า U_b ได้ต้องทราบค่า Γ ซึ่งมีค่าระหว่าง 10^{-2} กับ 10^{-3} และจะมีผลต่อค่าแรงดันเบรกดาวน์ที่ค่า p.d ต่างๆ ที่ค่า p.d สูงๆ การเปลี่ยนแปลงค่า p.d มีผลต่อ ค่าในส่วนน้อย ค่า U_b จึงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับ p.d แต่ที่ค่า p.d ต่ำมากๆ ค่าในส่วนจะเข้าใกล้ศูนย์ ค่า U_b จะเพิ่มขึ้นอีก แสดงว่าค่าแรงดันต่ำสุด U_{bmin} ค่า U_{bmin} นี้หาได้โดย หาค่าอนุพันธ์สมการ (2.38) เทียบกับ p.d แล้วให้เท่ากับศูนย์ จะได้

$$\frac{dU_b}{d(pd)} = \frac{B}{\ln\left(\frac{1}{\Gamma} + 1\right)} - \frac{B}{\ln\left(\frac{1}{\Gamma} + 1\right)^2} = 0 \quad (2.39)$$

นั่นคือ

$$\ln\left(\frac{1}{\Gamma} + 1\right) = 1 \quad (2.40)$$

$$\text{ฉะนั้น} \quad (pd)_{\min} = \frac{e^1}{A} \ln\left(\frac{1}{\Gamma} + 1\right) \quad (2.41)$$

$$\text{จะได้} \quad (U_b)_{\min} = 2.718 \frac{B}{A} \ln\left(\frac{1}{\Gamma} + 1\right) \quad (2.42)$$

จากการที่ทราบค่า $p \cdot d$ และ $U_{b \min}$ มีค่าต่ำ จึงนำผลนี้ไปใช้ประโยชน์ในเรื่องการทำหลอดเรืองแสงหลอดฟลูออเรสเซนต์ หลอดไฟโซเดียม หลอดก๊าซดิสชาร์จ ดังตารางที่ 2.3

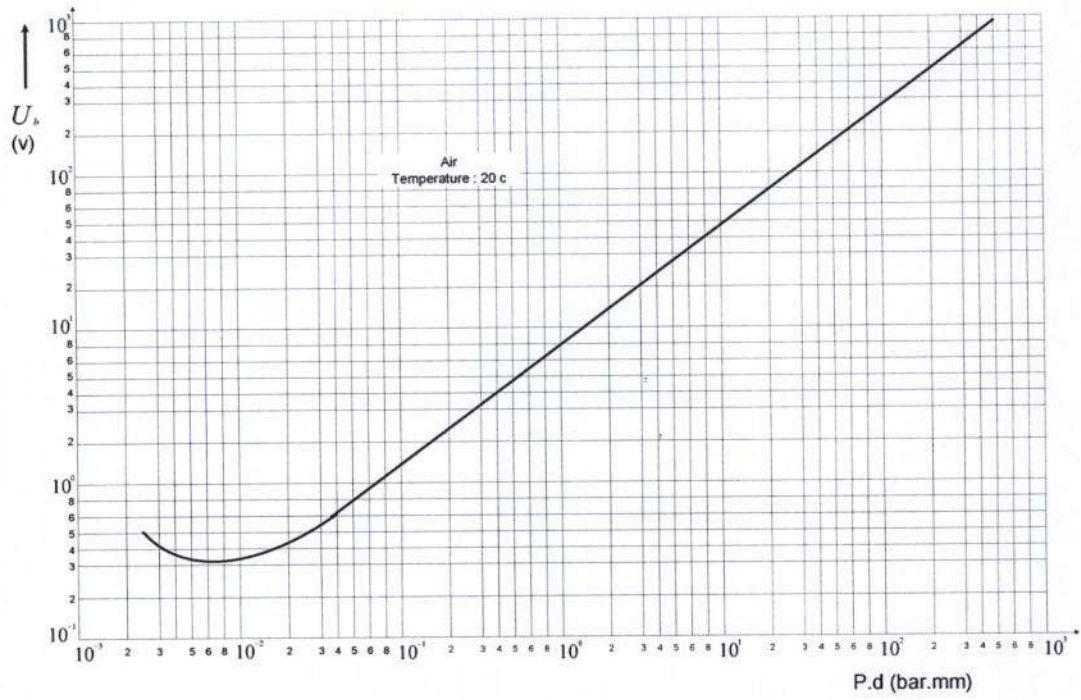
ตารางที่ 2.3 ค่าแรงดันเบรกควานต่ำสุดเมื่อเทียบกับความดันและชนิดของก๊าซ

ชนิดก๊าซ	$(pd)_{\min}$ Torr.cm	$U_{b \min}$ Volt
อากาศ	0.55	352
ไนโตรเจน (N ₂)	0.65	240
ไฮโดรเจน (H ₂)	1.05	230
ออกซิเจน (O ₂)	0.7	450
ซัลฟลูเฮกซาฟลูออไรด์ (SF ₆)	0.26	507
คาร์บอนไดออกไซด์ (CO ₂)	0.51	420
ฮีเลียม (He)	4.0	155
นีออน (Ne)	4.0	245
โซเดียม (Na)	0.05	320

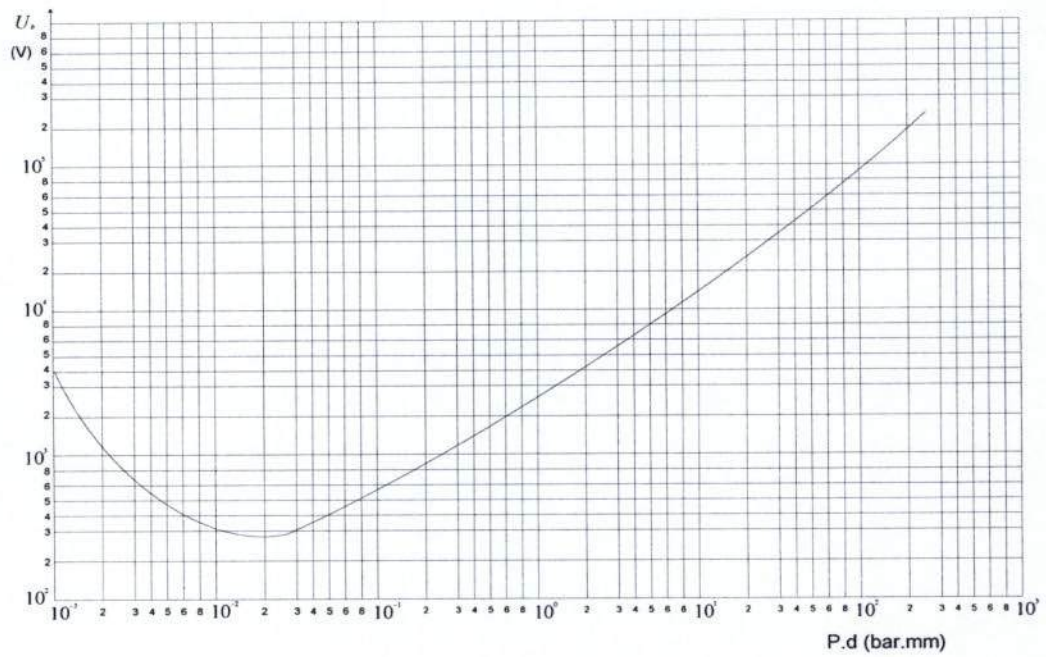
แสดงว่าที่ค่าแรงดันต่ำกว่า $U_{b \min}$ ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอไม่สามารถทำให้เกิดเบรกควานได้ ไม่ว่าจะทำให้แก๊ปกว้างหรือความดันต่ำลงเพียงใด ตัวอย่างเส้นโค้งพาสเซนของอากาศและ SF₆ ดังแสดงในรูปที่ 2.35 และ 2.37 ตามลำดับ

ขีดจำกัดการใช้กฎของพาสเซน

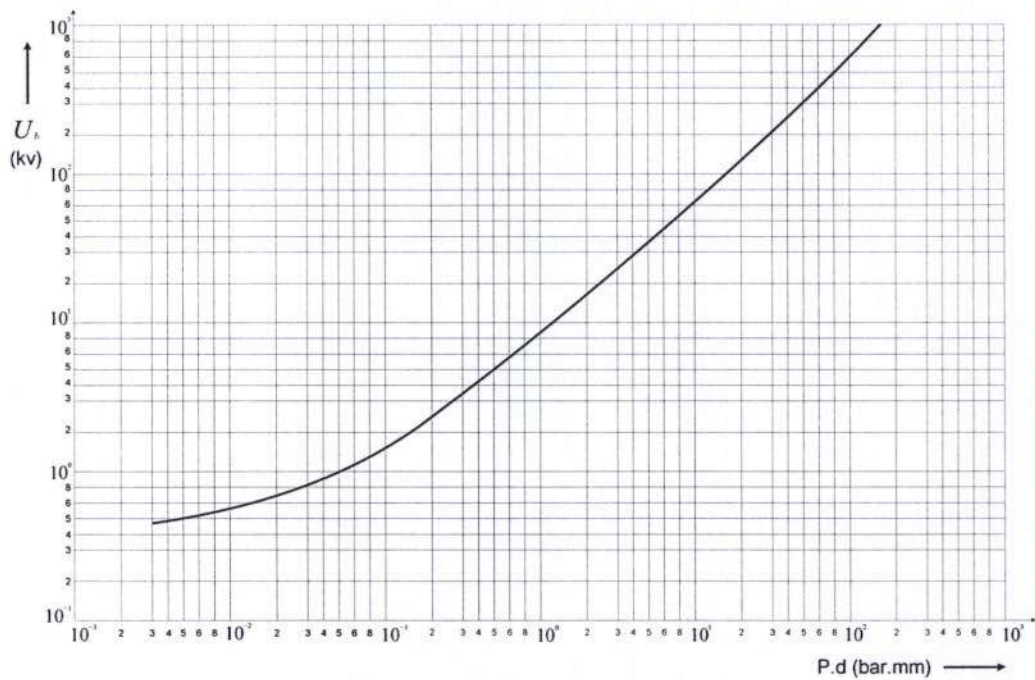
การใช้กฎของพาสเซนมีขีดจำกัด มีหลายกรณีที่ปรากฏการณ์ไม่เป็นไปตามกฎนี้ เช่น $p \cdot d$ มีค่าสูงมากหรือต่ำมาก ค่าแรงดันเบรกควานไม่เท่ากัน แต่แปรไปตาม p เมื่อให้ $p \cdot d$ คงตัว ในช่องแก๊ปกว้างๆ การเบรกควานจะเป็นแบบสตรีมเมอร์ ที่มีความดันต่ำมากๆ เบรกควานมักเริ่มต้นจากอิเล็กโตรด เช่น เบรกควานในสุญญากาศ เป็นต้น ยิ่งกว่านั้นกฎของพาสเซนใช้กับก๊าซผสมไม่ได้



รูปที่ 2.35 เส้นโค้งพาสเซน ของอากาศที่ 20 ° C [2]



รูปที่ 2.36 เส้นโค้งพาสเซน ของไนโตรเจน 25 ° C [2]



รูปที่ 2.37 เส้นโค้งพาสเชน ของ SF₆ ที่ 25 °C [2]

2) ทฤษฎีกลไกการเบรกดาวน์ของทาวน์เซนต์ (Townsend Breakdown Mechanism) นั้นเกิดขึ้นจากจำนวนอิเล็กตรอนที่เพิ่มขึ้นเป็นลำดับต่อเนื่องในแก๊สระหว่างอิเล็กโทรด และเชื่อว่ากระบวนการเพิ่มทวีคูณของอิเล็กตรอนเกิดจากไอออนไนเซชันกระบวนการขั้นต้น (Primary or α Process) และไอออนไนเซชันกระบวนการขั้นสอง (Secondary Process) เกิดจากการไอออนไนเซชันโดยไอออนบวกชนโมเลกุลของแก๊ส (β Process) แต่ในปัจจุบันนี้กระบวนการ β นั้นไม่มีความหมายในการทำให้เกิดเบรกดาวน์กระบวนการขั้นสองที่มีความสำคัญต่อกลไกเบรกดาวน์ คือกระบวนการ γ (γ - Process) อันเป็นกระบวนการที่เพิ่มทวีคูณของอิเล็กตรอนปล่อยหลุดจากคาโอด ที่ในทีนี้จะวิเคราะห์ทฤษฎีของทาวน์เซนต์ในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ กล่าวคือทุกจุดในแก๊สมีความเครียดสนามไฟฟ้าเท่ากันทุกจุดมีสัมประสิทธิ์การไอออนไนเซชันค่าคงตัว และผลของประจุค้าง (Space Charge) ที่มีต่อสนามไฟฟ้านั้นมีค่าน้อยจึงไม่คำนึงถึง

ก. กระบวนการขั้นต้น (α - Process or Primary Process)

จำนวนอิเล็กตรอนในอะวาลานซ์ในแก๊สที่ระยะ x จากคาโอด

$$N_x = N_0 e^{\alpha x} \quad (2.43)$$

เมื่อ N_0 = จำนวนอิเล็กตรอนที่ปล่อยจากคาโอดต่อวินาที

N_x = จำนวนอิเล็กตรอนที่ระยะ x จากคาโอด

จำนวนอิเล็กตรอนที่วิ่งไปถึงคาโอด ($x = d$) ต่อวินาที เป็น

$$N_d = N_0 e^{\alpha d} \quad (2.44)$$

อิเล็กตรอนแต่ละตัวที่ออกจากคาโอดจะสร้างอิเล็กตรอนขึ้นใหม่ $e^{\alpha d} - 1$ ซึ่งมีจำนวนเท่ากับจำนวนไอออนบวกที่เกิดขึ้นและวิ่งมาถึงคาโอด และเขียนเป็นสมการกระแสจะได้

$$I = I_0 e^{\alpha d} \quad (2.45)$$

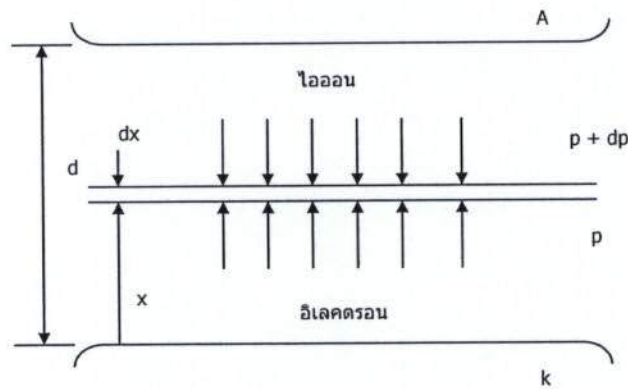
จะเห็นว่าจำนวนอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นเป็นเอ็กซ์โปเนนเชียลและจะต้องมีอิเล็กตรอนเริ่มต้นออกจากคาโอดจำนวน N_0 ต่อวินาทีที่ได้จากการส่องรังสีเข้าไปที่คาโอด จึงเรียกว่า การคายประจุที่ประທံตัวเองไม่ได้ (Nonself - Discharge) เพราะถ้าเอาต้นกำเนิดที่สร้างอิเล็กตรอนเริ่มต้น N_0 ออกเสีย

กระบวนการไอออนไนเซชันก็จะหยุด ฉะนั้นลำพังกระบวนการนี้ก็ยังไม่สามารถทำให้เกิดเบรกดาวน์ หากจะต้องมีกระบวนการขึ้นสองมาเสริม

กระบวนการขึ้นสองเป็นกระบวนการซ้อนสืบเนื่องจากกระบวนการขึ้นต้น กล่าวคือไอออนบวกที่เกิดจากอิเล็กตรอนแยกตัวมาจากโมเลกุลที่เป็นกลางจะวิ่งไปชนอะตอมของก๊าซหรือคาโทด ถ้าไอออนบวกนี้มีพลังงานสูงมากพอก็จะทำให้เกิดไอออนไนเซชันในก๊าซ เรียกว่ากระบวนการ β ถ้าไอออนบวกชนคาโทดแล้วทำให้อิเล็กตรอนหลุดจากคาโทดได้เรียกกระบวนการ γ จำนวนอิเล็กตรอนที่เกิดจากกระบวนการขึ้นสองจึงอาจเขียนอธิบายด้วยสัมประสิทธิ์ที่สองของทาวน์เซนต์ คือ β หรือ γ

ข. กระบวนการไอออนไนเซชัน $\alpha - \beta$

ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอคงในรูปที่ 2.38 ให้ N_0 เป็นจำนวนอิเล็กตรอนที่ปล่อยหลุดออกจากคาโอดการส่องรังสีเข้าไปที่คาโอดต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่และต่อหน่วยเวลาและให้ p เป็นจำนวนไอออนบวกหรือจำนวนครั้งไอออนไนเซชันที่เกิดขึ้นในช่องระหว่าง $x = 0$ (คาโอด) กับ $x = x$ ต่อหน่วยเวลา และ q เป็นจำนวนไอออนบวกหรือจำนวนครั้ง ไอออนไนเซชันที่เกิดขึ้นในช่องระหว่าง $x = x$ กับ $x = d$ ต่อหน่วยพื้นที่และเวลา



รูปที่ 2.38 คิสซาร์จแบบกระบวนกร β [2]

จำนวนอิเล็กตรอนที่เข้าไปในระนาบที่ระยะ x จากคาโทดจะเป็น $(N_0 + p)$ ในช่องปริมาตรย่อยซึ่งหนา dx จำนวนอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นใหม่จากไอออนไนเซชัน คือ

$$(N_0 + p)\alpha dx$$

และจากอาโนดหรือระนาบบนจะมีไอออน q เคลื่อนที่ในทิศทางไปสู่คาโทด ในช่องปริมาตรย่อยซึ่งหนา dx ไอออนนี้จะชนกับโมเลกุลของก๊าซและเกิดไอออนไนเซชันด้วยอัตรา β ต่อหนึ่งหน่วยระยะทางในแนวสนามไฟฟ้า จำนวนอิเล็กตรอนและจำนวนไอออนบวกที่เกิดขึ้นต่อวินาทีจากไอออน q เป็น

$$q = \beta dx$$

β คือ สัมประสิทธิ์การชนไอออนไนเซชันที่สองของทาวน์เซนต์ อันหมายถึงจำนวนอิเล็กตรอนที่เกิดจากไอออนหนึ่งตัวชนอะตอมของก๊าซต่อหน่วยระยะทางตามแนวสนามไฟฟ้า ดังนั้นจำนวนไอออนไนเซชันทั้งหมดในช่องระหว่าง x กับ $x + d$ ต่อวินาที คือ

$$(N_0 + p)\alpha dx + q\beta dx \tag{2.46}$$

ซึ่งเทียบเท่ากับจำนวนอิเล็กตรอนที่สร้างขึ้นใหม่ในช่วงความหนา dx

$$dp = \{(N_0 + p)\alpha + q\beta\}dx \tag{2.47}$$

และจำนวนอิเล็กตรอนจากระนาบ $x + dx$ คือ $p + dp + N_0$

แต่จำนวนอิเล็กตรอนที่วิ่งไปถึงอาโนดรวมเป็น

$$N = N_0 + p + q \quad (2.48)$$

ซึ่งค่า q อาจเขียนได้ในเทอมของ N, N_0 และ p แล้วแทนใน (2.47) จะได้

$$\begin{aligned} dp &= \{ \alpha(N_0 + p) + \beta(N - N_0 - p) \} dx \\ &= \{ (N_0 + p)(\alpha - \beta) + \beta N \} dx \end{aligned} \quad (2.49)$$

แยกตัวแปรแล้วอินทิเกรตจาก $x = 0$ และ $p = 0$ ถึง $x = d$ และ $p = N - N_0$ จะได้

$$\int_{p=0}^{p=N-N_0} \frac{dp}{N_0 + p + N\beta/(\alpha - \beta)} = \int_{x=0}^{x=d} (\alpha - \beta) dx \quad (2.50)$$

จะได้ผลลัพธ์

$$\ln \frac{N_0 + N - N_0 + \beta N/(\alpha - \beta)}{N_0 + \beta N/(\alpha - \beta)} = (\alpha - \beta)d \quad (2.51)$$

หรือ เขียนเป็นเอ็กซ์โปเนนเชียลจะได้

$$N \left(1 + \frac{\beta}{\alpha - \beta} \right) = \left\{ N_0 + \frac{N\beta}{(\alpha - \beta)} \right\} e^{(\alpha - \beta)d} \quad (2.52)$$

จัดรูปแบบใหม่จะได้

$$\frac{N}{N_0} = \frac{(\alpha - \beta)e^{(\alpha - \beta)d}}{\alpha - \beta^{(\alpha - \beta)d}} \quad (2.53)$$

นี่คือจำนวนอิเล็กตรอนทั้งหมดที่วิ่งไปถึงอาโนดต่อวินาที ที่ได้จากการชนไอออนไนเซชันจะ
กระแส

$$\frac{I}{I_0} = \frac{(\alpha - \beta)e^{(\alpha - \beta)d}}{\alpha - \beta e^{(\alpha - \beta)d}} \quad (2.54)$$

เงื่อนไขการเปลี่ยนไปสู่สถานะภาพที่กระแสไหลประทั้งตัวเองอยู่ได้ (Self-Sustained Current) เมื่อกระแสเพิ่มขึ้นเป็นอนันต์ เมื่อส่วนในสมการ(2.34) เป็นศูนย์ถึงสภาพนั้นค่า I_0 หรือ N_0 จะไม่มีผลต่อ I และ N แม้จะเอาต้นกำเนิดครั้งที่สร้าง I_0 หรือ N_0 ออก กระแสและการไอออนในเซชันยังคงสภาพอยู่ได้ต่อไปโดยไม่จำกัด และช่วงต่อของสภาวะที่ไม่กลับคืนสู่สภาพเดิมเช่นนี้เรียกว่า เบรกควาน์ของก๊าซ เงื่อนไขที่การเบรกควาน์จะเกิดขึ้น คือ

$$\alpha - \beta e^{(\alpha - \beta)d} = 0 \quad (2.55)$$

$$\beta e^{(\alpha - \beta)d} = \alpha \quad (2.56)$$

หรือ

$$\frac{\alpha}{\beta} = \frac{e^{\alpha d}}{e^{\beta d}} \quad (2.57)$$

แต่ $\alpha \gg \beta$

ฉะนั้นในสมการ (2.56) และ (2.57) จึงอาจแทน $(\alpha - \beta)$ ด้วย α ได้ และเงื่อนไขการเกิดเบรกควาน์จึงเป็น

$$\frac{\alpha}{\beta} = e^{\alpha d} \quad (2.58)$$

ซึ่งเรียกว่าเงื่อนไขการเบรกควาน์ของทาวนด์เซนต์ (Townsend's Breakdown Criterion)

อย่างไรก็ตามเงื่อนไขนี้ไม่สามารถเกิดขึ้นได้ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ กระบวนการ β ไม่อาจนำมาอธิบายการทำให้เกิดเบรกควาน์ในก๊าซได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในก๊าซที่มีความดันสูงแม้แต่ที่มีความดันบรรยากาศ ด้วยเหตุผลพอสรุปได้ดังนี้คือ

ไอออนบวกไม่อาจทำให้เกิดไอออนในเซชันในก๊าซได้อย่างมีประสิทธิภาพที่ความเครียดสนามไฟฟ้าเบรกควาน์ เพราะจะเกิดได้ต้องใช้พลังงานตามทฤษฎีถึงสองเท่า แต่โอกาสเช่นนั้นมีน้อยมาก ถ้ากลไกการไอออนในเซชันตามกระบวนการ β เป็นส่วนที่ทำให้เกิดเบรกควาน์ โลหะผิว

ของคาโทดจะไม่มีผลต่อค่าแรงดันเริ่มเกิด เบรกดาวน์ แต่ผลของการทดลองแสดงให้เห็นว่าเวอร์ค ฟังก์ชันของโลหะที่ทำคาโทดมีผลอย่างมากต่อค่าแรงดันเบรกดาวน์ กลไกการเบรกดาวน์ตาม กระบวนการ β ต้องใช้เวลาการเคลื่อนที่ของไอออนข้ามแก๊ปมากกว่าเวลาเกิดเบรกดาวน์ที่วัดได้ ฉะนั้นกระบวนการขั้นสองที่มีความสำคัญต่อการสร้างอิเล็กตรอนเพื่อทำให้เกิดเบรกดาวน์ จึงเป็นแบบ ไอออนบวกวิ่งชนคาโทด (γ)

ค. กระบวนการขั้นสองแบบ γ (γ - Process)

ถ้าให้ N_0' = จำนวนอิเล็กตรอนที่เกิดจากกระบวนการขั้นสองที่คาโทด คือ

$x=0$ ต่อวินาที

N_0'' = จำนวนอิเล็กตรอนรวมทั้งหมดที่ออกจากคาโทดต่อวินาที

ฉะนั้น

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

แต่อิเล็กตรอนแต่ละตัวที่ออกจากคาโทดจะชนไอออนไนซ์เท่ากับ $e^{\alpha d} - 1$ ครั้ง จำนวนครั้งของการชนไอออนไนซ์ในแก๊ปทั้งหมดจะเป็น

$$N_0' = N_0'' (e^{\alpha d} - 1) \quad (2.59)$$

จะมีอิเล็กตรอนเกิดขึ้นจากกระบวนการขั้นสองออกจากคาโทดเป็น

$$N_0' = \gamma N_0'' (e^{\alpha d} - 1) \quad (2.60)$$

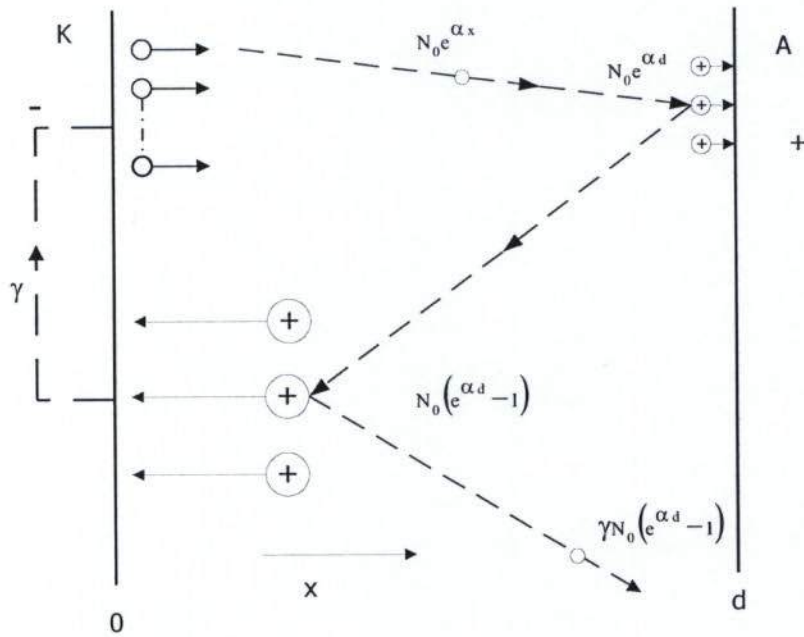
เมื่อ γ เป็นสัมประสิทธิ์ไอออนไนเซชันที่สองของทาวน์เซนต์

$$\text{ดังนั้น} \quad N_0'' = N_0 + \gamma N_0'' (e^{\alpha d} - 1) \quad (2.61)$$

$$N_0'' = \frac{N_0}{1 - \gamma (e^{\alpha d} - 1)} \quad (2.62)$$

คังไดอะแกรมในรูปที่ 2.39 จึงได้สมการของกระแสเป็น

$$\frac{N_d}{N_0} = \frac{I}{I_0} = \frac{e^{\alpha d}}{1 - \gamma (e^{\alpha d} - 1)} \quad (2.63)$$



รูปที่ 2.39 การสร้างอิเล็กตรอนอิสระโดยกระบวนการ γ [2]

ดังนั้นเงื่อนไขที่จะเกิดเบรกดาวน์ก็เมื่อกระแสเพิ่มกระแสเพิ่มเป็นอนันต์ คือ ตัวส่วนในสมการ เป็น ศูนย์ นั่นคือ

$$\gamma(e^{\alpha d} - 1) = 1 \quad (2.64)$$

มีลักษณะคล้ายกับเงื่อนไขของกระบวนการ β ดังสมการ (2.58) ในขณะที่ใกล้เบรกดาวน์ค่า $e^{\alpha d} \gg 1$ จะเป็นสมการ (2.65)

$$\frac{N_d}{N_0} = \frac{I}{I_0} = \frac{e^{\alpha d}}{1 - \gamma e^{\alpha d}} \quad (2.65)$$

เงื่อนไขในสมการ (2.65) จะเป็น

$$\gamma e^{\alpha d} = 1 \quad (2.66)$$

ง. เงื่อนไขการเกิดเบรกดาวน์ของทาว์นเซนต์

กระบวนการชั้นสองดังที่กล่าวมาแล้วพบว่ามีเงื่อนไขที่เกิดขึ้นคล้ายกัน กระบวนการชั้นสองที่สร้างอิเล็กตรอนอิสระในแกปอาจมีกระบวนการอื่นๆ ที่เสริมการเบรกดาวน์

เช่น ไอออนไนเซชัน เกิดจากพลังงานโฟตอนที่ปล่อยออกมาจากโมเลกุลในสภาพตื่นกระตุ้นกลับสู่สภาพปกติ หรือเกิดอิเล็กตรอนอิสระจากโมเลกุลในสภาพเมตา-เสถียรแพร่กระจายไปยังคาโทด และกระบวนการขึ้นสองอื่นๆ ซึ่งมีเงื่อนไขการเกิดเบรกดาวน์ในลักษณะเดียวกัน ดังนั้นอาจเขียนเงื่อนไขการเกิดเบรกดาวน์ในลักษณะทั่วไปเพื่อแทนกระบวนการขึ้นสองทั้งหลายด้วยแฟกเตอร์หนึ่งคือ Γ เงื่อนไขทั่วไปจึงเขียนได้ว่า

$$\Gamma(e^{\alpha d} - 1) = 1 \quad (2.67)$$

เมื่อ

$$\Gamma = \frac{\beta}{\alpha} + \gamma_i + \gamma_{ph} + \gamma_m + \dots \quad (2.68)$$

2.11.4 ความเครียดสนามไฟฟ้าเบรกดาวน์ E_b

ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอความเครียดสนามไฟฟ้าที่ทำให้เกิดเบรกดาวน์อาจหาได้ง่าย จากค่าแรงดันเบรกดาวน์ E_b หารด้วยระยะแกป d คือ

$$E_b = \frac{U_b}{d} \quad (2.69)$$

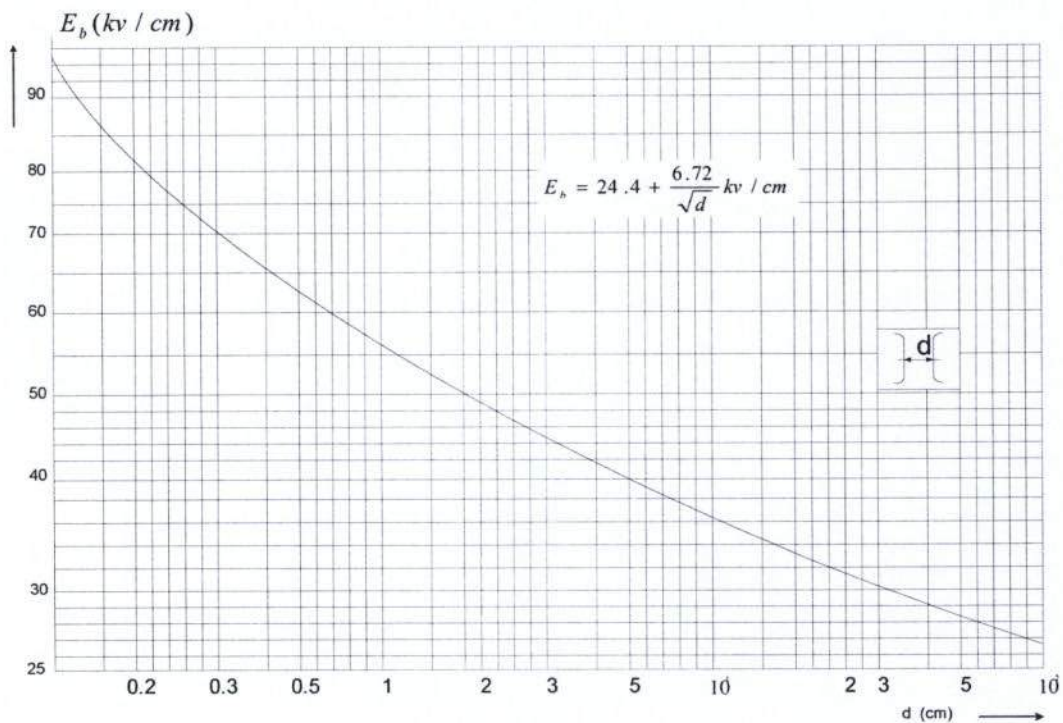
จะได้

$$E_b = \frac{B_p}{\ln \frac{A_{pd}}{\ln \left(\frac{1}{\tau} + 1 \right)}} \quad (2.70)$$

ซึ่งขึ้นอยู่กับระยะแกป d และจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะแกปแคบลง ผลอันนี้อาจอธิบายได้ด้วยสมการ (2.68) ในตารางที่ 2.3 แสดงค่าความเครียดสนามไฟฟ้าเบรกดาวน์ของอากาศในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอที่ได้จากอิเล็กโตรด Rogowski Profile ที่สภาวะมาตรฐาน 760 mmHg 20°C ดังเส้นกราฟในรูปที่ 2.40

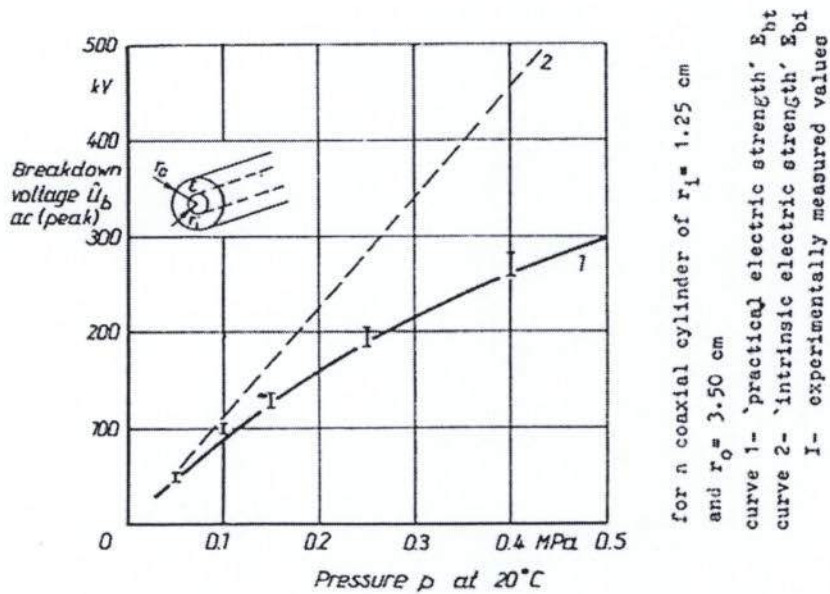
ตารางที่ 2.4 ความเครียดสนามไฟฟ้าเบรกดาวน์ของอากาศ [2]

d (cm)	E_b (kV/cm)	d(cm)	E_b (kV/cm)
0.1	96.0	8.0	32.1
0.2	73.3	9.0	31.7
0.3	64.1	10.0	31.4
0.4	58.8	15.0	30.0
0.5	55.2	20.0	29.4
0.6	52.2	25.0	28.9
0.7	49.9	30.0	28.6
0.8	48.1	35.0	28.3
0.9	46.5	40.0	28.0
1.0	45.4	45.0	27.8
2.0	39.5	50.0	27.7
3.0	36.7	55.5	27.5
4.0	35.0	60.0	27.3
5.0	34.0	65.0	27.2
6.0	33.2	80.0	26.9
7.0	32.6	90.0	26.7



รูปที่ 2.40 ความเครียดสนามไฟฟ้าเบรกดาวน์ของอากาศในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ [2]

ในรูปที่ 2.41 แสดงค่าความเครียดสนามไฟฟ้าเบรกดาวน์ E_b ในเทอมความดันของก๊าซ SF_6 ซึ่งบรรจุในโคแอ็กเซียลเคเบิลในฟังก์ชันของความดันก๊าซ



รูปที่ 2.41 ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของก๊าซ SF_6 ในฟังก์ชันความดัน [8]

2.11.5 เบรกดาวน์ในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ (Breakdown in no Uniform Field)

ในแก๊ปที่มีแฟลคเตอร์สนามไฟฟ้า (Field Utilization Factor $\eta = \frac{E_{av}}{E_{max}}$) มากกว่า 20% ขึ้นไป การเกิดเบรกดาวน์ในอากาศจะมีลักษณะคล้ายคลึงกับที่เกิดในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ แต่ถ้าสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอมากกว่านี้ ($\eta < 20\%$) จะมีปรากฏการณ์ที่แตกต่างไปจากสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอเกิดขึ้น จะมีโคโรนาเกิดขึ้นในบริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูง และเกิดขึ้นที่แรงดันต่ำกว่าแรงดันเบรกดาวน์ โคโรนานี้อาจคงสภาพอยู่ได้ในบางจุดโดยไม่เกิดเบรกดาวน์ จากการวิจัยลักษณะเบรกดาวน์ในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอของก๊าซ SF_6 ที่ความดันตั้งแต่ 0.2 บาร์ ถึง 6 บาร์ จะพบว่าในสนามไฟฟ้าทุกรูปแบบทุกความดันก๊าซ ถ้าแฟลคเตอร์สนามไฟฟ้ามีค่ามากกว่า 40% ($\eta > 40\%$) โคโรนาจะไม่เกิดขึ้นก่อนเบรกดาวน์ คือจะเกิดเบรกดาวน์โดยตรงจะเห็นได้ว่าสนามไฟฟ้าของอิเล็กโตรดที่มี η ยิ่งต่ำความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด (E_{max}) ที่ผิวอิเล็กโตรดมีน้อยจะยังมีค่ามาก และความเครียดสนามไฟฟ้าจะลดลงอย่างรวดเร็ว ฉะนั้นไอออนไนเซชันจะเกิดขึ้นได้เฉพาะบริเวณผิวอิเล็กโตรดที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงเท่านั้น ที่ระยะห่างออกไปความเครียดสนามไฟฟ้าต่ำเกินไปที่จะเกิดไอออนไนเซชัน จึงไม่อาจเกิดเบรกดาวน์ได้ ฉะนั้นจะมีโคโรนาเกิดขึ้นที่บริเวณผิวอิเล็กโตรดที่มีรัศมีเล็กก่อนที่เกิดเบรกดาวน์ และจัดเป็นเบรกดาวน์แบบโคโรนา (Corona Breakdown) เมื่อมีโคโรนาเกิดขึ้น สนามไฟฟ้าในแก๊ปจะบิดเบือนไปจากสนามไฟฟ้าที่เป็นแบบอิเล็ก

โทรสแตติกส์หรือสนามไฟฟ้าที่คำนวณจากเรขาคณิตของแกป แรงดันเบรกดาวน์แบบโคโรนาจะยุ่งยากต่อการคำนวณ อาจกล่าวได้ในเชิงสัมพันธ์เปรียบเทียบทั่วๆ ไปได้ ซึ่งจะได้กล่าวในข้อต่อๆ ไป อย่างไรก็ตามแรงดันโคโรนาเริ่มเกิดนั้นสามารถคำนวณได้ถ้าทราบรูปลักษณะของสนามไฟฟ้าในแกป ในที่นี้จะได้แสดงวิธีการคำนวณแรงดันเบรกดาวน์โดยตรงหรือแรงดันโคโรนาเริ่มเกิดในอากาศและก๊าซ SF₆ ให้ดูเป็นตัวอย่าง ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอมีความสัมพันธ์ของแรงดันเบรกดาวน์กับผลคูณ p · d (กฎของพาสเชน) ในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอความสัมพันธ์ลักษณะนี้จะเป็น $U_b = f(p \cdot r)$ ซึ่งเรียกว่ากฎแห่งความคล้ายคลึงกัน และจะชี้ให้เห็นว่าในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ นั้นแรงดันเริ่มต้นขึ้นอยู่กับขั้วแรงดันที่ป้อนให้กับอิเล็กโทรดที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด

2.11.6 คำนวณแรงดันเบรกดาวน์ในอากาศ

1) ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ $\eta^* = 1$ ฉะนั้นจากสมการ (2.14) จะได้

$$U_b = E_b \cdot d \quad (2.71)$$

ค่า E_b ของอากาศหาได้จากตาราง หรือเส้นกราฟในรูปที่ 2.35 ซึ่งเขียนแทนได้ด้วยสมการ

$$d(E_b - E_c)^2 = \frac{K}{C} \quad (2.72)$$

$$\begin{aligned} \text{โดย } E_c &= 24.4 \text{ kV/cm} \\ \frac{K}{C} &= 45.1 \text{ kV}^2/\text{cm} \end{aligned}$$

$$\text{ฉะนั้นจะได้ } E_b = 24.4 + \frac{6.72}{\sqrt{d}} \text{ kV/cm} \quad (2.73)$$

d เป็น cm

จากเงื่อนไขเบรกดาวน์

$$\alpha d = K \quad (2.31)$$

ฉะนั้น จะได้

$$\alpha = C(E - E_c)^2 \quad (2.74)$$

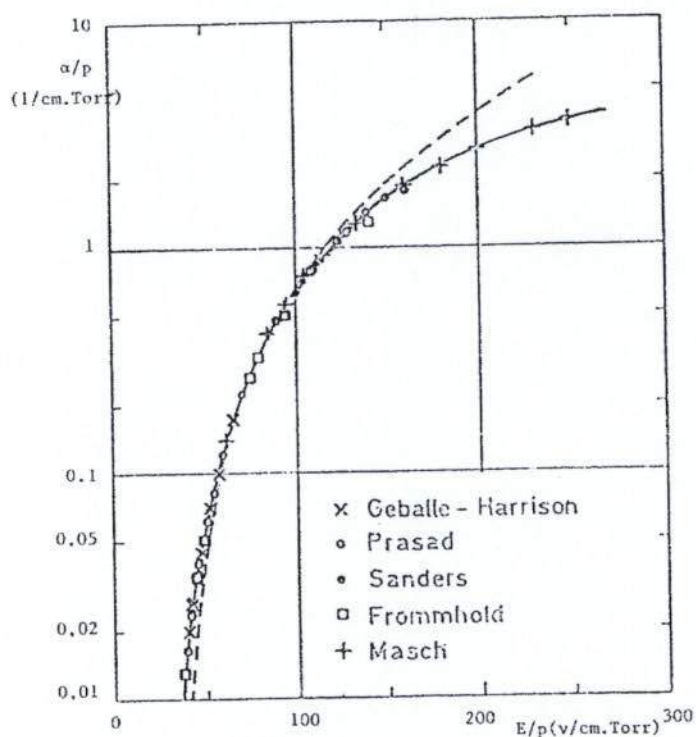
ซึ่งสอดคล้องกับสมการของชูมันน์ (Schumann's Equation) ที่ได้จากเส้นกราฟ จากวัดสัมประสิทธิ์ $\frac{\alpha}{p}$ ของอากาศดังในรูปที่ 2.42 จะได้ค่า $C = 0.191 \text{ kV}^{-1}$ และ E_c เท่ากับ 24.4 kV/cm ดังนั้น

จากสมการทั่วไปจึงเขียน $\frac{\alpha}{p}$ ของอากาศได้ว่า

$$\frac{\alpha}{p} = 0.191 \left\{ \frac{E}{p} - 24.4 \right\}^2 \quad (2.75)$$

$$\frac{\alpha}{p} = \exp \left\{ \text{Pol} \left(\frac{E}{p} \right) \right\} \quad (2.76)$$

สมการของชูมันน์ $\frac{\alpha}{p} = 1.43 \cdot 10^{-4} \left\{ \frac{E}{p} - 32.5 \right\}^2$



รูปที่ 2.42 สัมประสิทธิ์ไอออไนเซชันของอากาศ [2]

ที่ความดันอากาศ p และระยะแกป d (สนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอ) ค่าแรงดันเบรกควาน้อาจหาได้โดยใช้เงื่อนไข $\alpha d = K$ แทนในสมการ (2.74) จะได้

$$U_b = 24.4 \, pd + 2.29 \sqrt{(pd) + K} \quad (2.77)$$

Zaengl ได้วิเคราะห์ค่า K จากเส้นกราฟ $\frac{\alpha}{p}$ ของชูมันน์ และได้ค่า K ของอากาศเท่ากับ 8.63

ฉะนั้น สมการ (2.77) จึงเป็น

$$U_b = 24.4 \text{ pd} + 6.72\sqrt{\text{pd}} \text{ kV} \quad (2.78)$$

ค่าแรงดันเบรกดาวน์ที่หาจากสมการนี้ถูกต้องใกล้เคียงกันมากกับค่าที่ได้จากการทดลอง

2) ในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ

จากสมการ คือ $\int_0^{x_c} \alpha \{E(x), p\} dx = x$ ถ้าทราบฟังก์ชันของ $E(x)$ ก็จะสามารถหาค่าแรงดันเบรกดาวน์ได้ หรือหาจากความสัมพันธ์ในสมการ (2.73) $U_b = E_b \cdot d \cdot \eta^*$ เมื่อ

ทราบรูปลักษณะทางเรขาคณิตของอิเล็กโตรดก็จะหาค่า η^* ได้ และอ่านค่า E_b จากกราฟดังเช่นในรูปที่ 2.40 และ 2.41 แสดงค่า E_b ของอากาศในสนามไฟฟ้าของทรงกระบอกแบบแกนร่วมและแบบขนานกัน หาแรงดันเริ่มต้น U_i ในสนามไฟฟ้าแบบทรงกระบอกแกนร่วมในสนามไฟฟ้าอิเล็กโตรดแบบทรงกระบอกแกนร่วม ซึ่งมีรัศมีกระบอกนอกเท่ากับ r_2 และตัวนำกระบอกในมีรัศมี r_1 สนามไฟฟ้า ณ. จุดใดๆ ระหว่าง r_1 กับ r_2 ($r_1 < r < r_2$)

จากเงื่อนไขเบรกดาวน์จะเกิดขึ้นเมื่อ $E_{\max} = E_i = E_b$ และการอินทิเกรตไปตามแนวที่สั้นที่สุดจาก r_1 (ที่มี E_{\max}) ไปหา r_2 เป็นระยะวิกฤตคือ x_c ณ. จุดนั้น α เป็นศูนย์จึงได้

$$\int_{r_1}^{r_c} \alpha(E) dr = K \quad (2.79)$$

แทนค่าความสัมพันธ์จากสมการ (2.68) $\frac{\alpha}{p} = C \left\{ \frac{E}{p} - \left(\frac{E}{p} \right)_c \right\}^2$ จะได้

$$pC \int_{r_1}^{r_c} \left\{ \frac{E}{p} - \left(\frac{E}{p} \right)_c \right\}^2 dr = K \quad (2.80)$$

แทนค่า $E = E_r = \frac{E_i r_1}{r}$ (จาก $E_r = E_{\max} \frac{r_1}{r}$)

$$\text{จะได้} \quad \int_{r_1}^r \left\{ \frac{E_i r_1}{pr} - \left(\frac{E}{p} \right)_c \right\}^2 dr = \frac{K}{pC} \quad (2.81)$$

ผลของการอินทิเกรตสมการนี้จะได้

$$\left(\frac{E_i}{p} \right)^2 \left(1 - \frac{r_1}{r_c} \right) - 2 \frac{E_i}{p} \left(\frac{E}{p} \right)_c \ln \left(\frac{r_c}{r_1} \right) + \left(\frac{E}{p} \right)_c^2 \left(\frac{r_c}{r_1} - 1 \right) = \frac{K}{pCr_1} \quad (2.82)$$

แต่ตามสมการ (2.51) $E_c \cdot r_c = E_i \cdot r_1$ ฉะนั้นหาค่า r_1 ได้

$$r_1 = \frac{K/(pC)}{\left(\frac{E_i}{p}\right)^2 - \left(\frac{E}{p}\right)_c^2 - 2 \frac{E_i}{p} \cdot \left(\frac{E}{p}\right)_c \ln\left(\frac{E_i}{E_c}\right)} \quad (2.83)$$

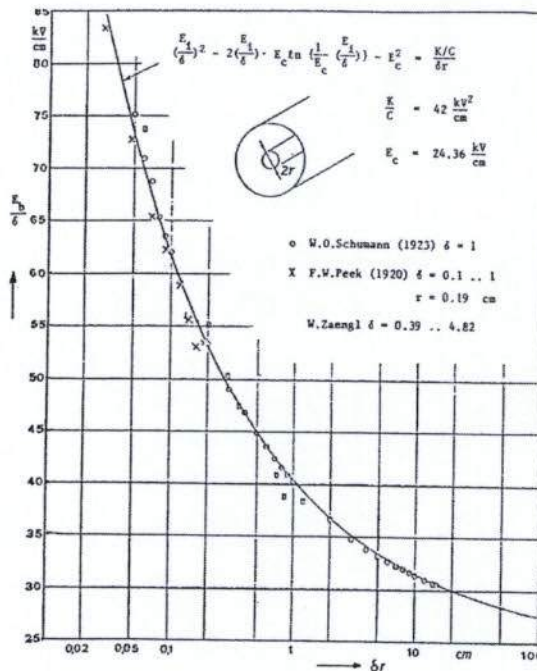
จะเห็นได้ว่าความเครียดสนามไฟฟ้าเบรกดาวน์ E_b หรือโคโรนาเริ่มเกิด E_i ขึ้นอยู่กับรัศมีตัวนำ กระบอกในแต่ไม่ขึ้นอยู่กับ r_2 ในสมการ (2.83) แทนค่า $\left(\frac{E}{p}\right)_c$ และ $\frac{K}{pC}$ จะได้ค่า E_i/p ของแต่ละค่า

r_1 ดังรูปที่ 2.43 และ 2.44

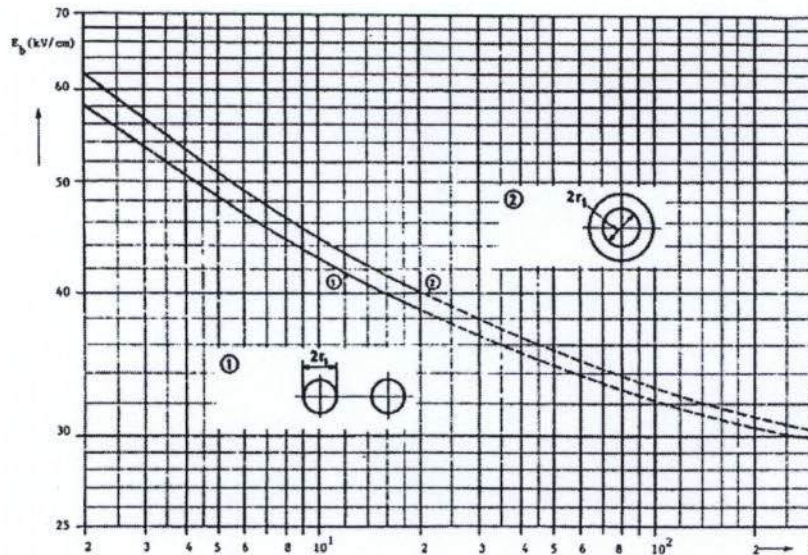
ในกรณีของทรงกระบอกแกนร่วมนี้ค่า E_i อาจใช้สูตรสำเร็จของพีค (Peek's Empirical Formula)

$$E_i = E_b = E_c \left\{ 1 + \frac{C'}{\sqrt{r_1}} \right\} \text{ kV/cm} \quad (2.84)$$

เมื่อ r_1 เป็น cm และ $E_c = 31 \text{ kV/cm}$ $C' = 0.308 \text{ cm}^2$



รูปที่ 2.43 ความเครียดสนามไฟฟ้าเบรกดาวน์ของอากาศในอิลีกโตรดทรงกระบอกแกนร่วม [2]



รูปที่ 2.44 ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า E_b ของอากาศในสนามไฟฟ้าของอิเล็กโตรดทรงกระบอก
ซื่อนแกนร่วม [2]

2.12 ฉนวนก๊าซ SF₆ [2]

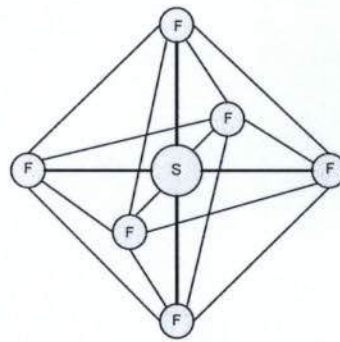
ปัจจุบันก๊าซ SF₆ (Sulphur Hexafluoride) ได้รับความสนใจและมีบทบาทสำคัญต่อเทคโนโลยีแห่งการฉนวนใหม่ในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง เพราะก๊าซ SF₆ มีคุณสมบัติการฉนวนทางไฟฟ้าที่ดี มีความมั่นคงต่อแรงดันไฟฟ้าที่สูงที่ความดันค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับการฉนวนด้วยก๊าซอัดชนิดอื่นๆ (มีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าที่ความดันบรรยากาศประมาณ 2.5 เท่าของอากาศ) มีเสถียรภาพมั่นคงต่อความร้อนและปฏิกิริยาเคมี การเลือกใช้ก๊าซเป็นฉนวนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงขึ้นอยู่กับแฟกเตอร์ต่างๆ หลายประการที่สำคัญ คือ ต้องมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าที่ความดันไม่สูงมากนัก กลั่นตัวเป็นของเหลวที่อุณหภูมิต่ำ เพื่อตอบสนองปฏิกิริยาเคมี ไม่เป็นพิษ ไม่ติดไฟ และถ่ายเทความร้อนได้ดี ทั้งนี้คุณสมบัติการดับการอาร์คของก๊าซ SF₆ คือ เป็นมีสัมประสิทธิ์ไอออไนเซชัน (Ionization Coefficient) ต่ำมากเมื่อเทียบกับอากาศ ก๊าซที่มีสัมประสิทธิ์ไอออไนเซชันต่ำย่อมหมายถึงอัตราการเพิ่มทวีคูณของอิเล็กตรอนในก๊าซนั้นต่ำ นั่นคือค่าแรงดันเบรกดาวน์จะมีค่าสูง ทั้งนี้เพราะว่าโมเลกุลของก๊าซ SF₆ มีคุณสมบัติจับตัวอิเล็กตรอนอิสระที่เคลื่อนที่อยู่ในสนามไฟฟ้าได้ กล่าวคืออิเล็กตรอนอิสระที่เกิดจากการไอออไนเซชันจะไปเกาะอยู่โมเลกุลที่เป็นกลางทำให้โมเลกุลของก๊าซกลายเป็นไอออนลบจึงเรียกว่า SF₆ เป็นก๊าซไฟฟ้าลบ (Electronegative Gas) ไอออนลบจะมีน้ำหนักเท่ากับไอออนบวก ซึ่งเคลื่อนที่ได้ช้า พลังงานที่ได้จากการเคลื่อนที่ในสนามไฟฟ้าไม่สูงพอที่จะทำให้เกิดไอออไนเซชันจากการชนของไอออนลบได้ จึงเท่ากับว่าอัตราการเกิดหรือเพิ่มขึ้นของอิเล็กตรอนอิสระถูกหน่วงหรือชะลอให้ช้าลง อะวาลันซ์อิเล็กตรอนวิกฤตจึงเกิดได้ยาก การเกาะตัวของอิเล็กตรอนบนโมเลกุลกลายเป็นไอออนลบนี้เองที่เป็นแฟกเตอร์สำคัญประการหนึ่งที่ทำให้

ให้ก๊าซ SF_6 มีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูงซึ่งเป็นสัดส่วนกับความดันก๊าซอัด และจะมีค่าแรงดันเบรกดาวน์สูง มีการแตกตัวที่อุณหภูมิ 2000 องศาเคลวิน (1726.85 องศาเซลเซียส) จึงทำให้แรงดันคร่อมอาร์คต่ำพลังงานที่เปลี่ยนเป็นความร้อนจึงต่ำด้วยและปริมาณความร้อนจากลำอาร์คจะถูกถ่ายทอดออกไปอย่างรวดเร็ว ทำให้สภาพของการอาร์คกลับคืนสู่สภาพการเป็นฉนวนได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งเวลาคงตัวของก๊าซ SF_6 ในการดับอาร์คเร็วมากเป็น ไมโครวินาที เร็วกว่าอากาศประมาณ 100 เท่า จากลักษณะคุณสมบัติดังกล่าวจะเห็นว่าก๊าซ SF_6 มีคุณสมบัติแห่งการฉนวนครบถ้วน

2.12.1 ก๊าซ SF_6

1) คุณสมบัติทางฟิสิกส์และเคมีของก๊าซ SF_6

เป็นสารประกอบของโปลิอะตอมิกโมเลกุลของกำมะถัน ดังรูปที่ 2.45 เป็นก๊าซไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส ไม่เป็นพิษ ไม่ติดไฟ และไม่ช่วยให้ไฟติด เป็นก๊าซที่เฉื่อยต่อปฏิกิริยาเคมีกับสารอื่น และจะคงสภาพเดิมแม้ว่าจะถูกทำให้ร้อนถึง $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ ภายในถึงที่มิดชิดปราศจากออกซิเจนและความชื้น คุณสมบัติทั่วไปของก๊าซ SF_6 สรุปได้ดังตารางที่ 2.5



รูปที่ 2.45 โมเลกุลของก๊าซ SF_6 [2]

ตารางที่ 2.5 คุณสมบัติของก๊าซ SF_6 [2]

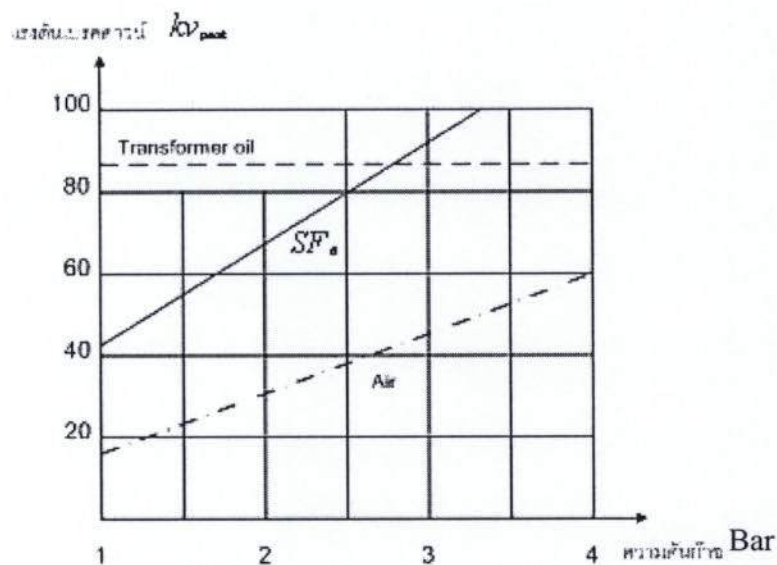
คุณสมบัติของก๊าซ SF_6	
น้ำหนักโมเลกุล	146.06
จุดหลอม	$-50.8\text{ }^{\circ}\text{C}$
อุณหภูมิของจุด	$-63.6\text{ }^{\circ}\text{C}$
อุณหภูมิกวิกฤต	$-54\text{ }^{\circ}\text{C}$
ความดันวิกฤต	36.75 atm
ความหนาแน่นวิกฤต	0.73 กิโลกรัมต่อลิตร
ความหนาแน่นไอ	6.16 กรัมต่อลิตร

ตารางที่ 2.5 คุณสมบัติของก๊าซ SF₆ (ต่อ) [2]

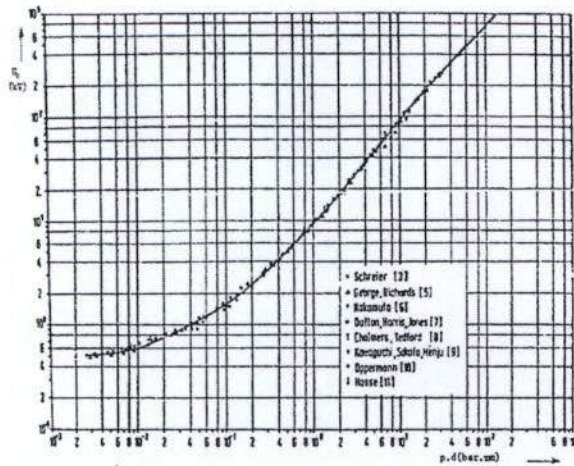
คุณสมบัติของก๊าซ SF ₆	
ความหนาแน่นของเหลว	1.56 กิโลกรัมต่อลิตร
ความดันไอที่ 20 °C	20.74 atm
สภาพนำความร้อนที่	7.1×10^{-5} cal/cm/°C/sec
เปอร์มิตติวิตี ϵ_r	1.00191
ปริมาตรการละลายในน้ำคิดเทียบที่ °C และ 1 atm ที่ 20 °C	6.31 cm ³ SF ₆
°C และ 1 atm ที่ 50 °C	3.52 cm ³ SF ₆
ปริมาตรการละลายในน้ำมันคิดเทียบที่ °C และ 1 atm ที่ 20 °C	0.408 cm ³ SF ₆ / cm ³ oil
°C และ 1 atm ที่ 50 °C	0.302 cm ³ SF ₆ / cm ³ oil

2) คุณสมบัติทางไฟฟ้าของก๊าซ SF₆

ก๊าซ SF₆ มีความหนาแน่นประมาณ 5 เท่าของอากาศ ซึ่งนับว่าเป็นก๊าซที่มีน้ำหนักมาก จึงทำให้มีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าก๊าซอื่นๆ ที่ใช้เป็นฉนวนก๊าซ SF₆ จะมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าที่ความดันบรรยากาศประมาณ 2.5 เท่าของอากาศ และจะมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าได้เท่ากับน้ำมันหม้อแปลงเมื่อ SF₆ มีความดันอัดประมาณ 3 bar. ดังกราฟเปรียบเทียบในรูปที่ 2.46



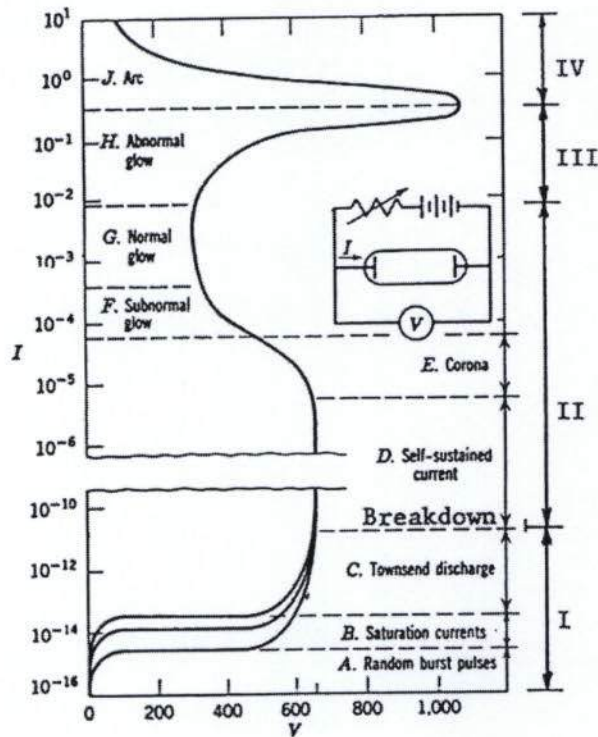
รูปที่ 2.46 แรงดันเบรกดาวน์ของก๊าซ SF₆ เปรียบเทียบกับอากาศและน้ำมันหม้อแปลง [2]



รูปที่ 2.47 เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ของแรงดันเบรกดาวน์ (U_b) กับผลคูณของความดันกับระยะแกป ($p.d$) [2]

2.12.2 การเกิดดิสชาร์จในก๊าซ (Gaseous Discharge) [2]

ลักษณะสมบัติของวัสดุฉนวนมีความสำคัญยิ่งต่อเทคนิคการฉนวนด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง โดยเฉพาะในช่วงต่อที่เปลี่ยนสภาพจากฉนวนไปสู่สภาพนำไฟฟ้า เกณฑ์ของสภาวะทั้งสองกำหนดด้วยความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน หรือความหนาแน่นของกระแสกับความเครียดสนามไฟฟ้าในสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอ ก๊าซเป็นฉนวนชนิดหนึ่งที่มีความหมายและความสำคัญต่อเทคนิคการฉนวน สภาพการเป็นฉนวนของก๊าซจะเสียไปเมื่อมีดิสชาร์จในก๊าซเกิดขึ้น คำว่า ดิสชาร์จในก๊าซเป็นการอธิบายปรากฏการณ์การไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านก๊าซโดยอาศัยการเคลื่อนที่ของอนุภาคประจุ (อิเล็กตรอน, ไอออน) ที่เกิดจากการไอออไนเซชันด้วยวิธีใดวิธีหนึ่ง ไอออไนเซชันจะเกิดขึ้นได้จะต้องมีสนามไฟฟ้าเป็นต้นเหตุให้อนุภาคประจุมีพลังและเคลื่อนที่ไปสู่อิเล็กโตรดได้ และนั่นก็คือกระแสไหลในก๊าซ ดิสชาร์จในก๊าซอาจเกิดขึ้นในช่วงกว้างของความดันก๊าซ และมีกระแสไหลตั้งแต่ค่าน้อย ๆ เช่น 10^{-16} A จนกระทั่งเป็นไมโครแอมป์หรือเป็นแอมป์ ดังเช่นผลการทดลองวัดกระแสดิสชาร์จในแกปอิเล็กโตรดแผ่นระนาบขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร มีระยะแกป 50 เซนติเมตร ที่ความดันก๊าซนีออน 1 Torr ดังลักษณะกระแสแรงดันในรูปที่ 2.48



รูปที่ 2.48 ตัวอย่างแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของแก๊สดีสชาร์จในก๊าซนีออน [2]

ก๊าซนีออนนอกจากจะใช้ประโยชน์ในด้านการฉนวนแล้ว ยังใช้ประโยชน์จากการเกิดดีสชาร์จอีกด้วย เช่น หลอดไฟบรรจุก๊าซ หลอดเรืองแสง หลอดป้องกันแรงดันเกิน หลอดไดโอด หลอดไทรแอดรอน เป็นต้น ดีสชาร์จในก๊าซที่คาโทดเพื่อจุดมุ่งประสงค์ (การกรองด้วยไฟฟ้า) ดีสชาร์จในก๊าซมีกระแสต่าง ๆ คือ อาร์คเพื่อเรียงกระแส (เรกติไฟเออร์) และพลาสมาฟิสิกส์ เป็นต้น ในที่นี้จะกล่าวถึงเทคนิคการฉนวนด้วยก๊าซ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อก๊าซจะเปลี่ยนสภาพไปสู่สภาพนำไฟฟ้านั้นเกิดขึ้นได้อย่างไร ซึ่งอาจพิจารณาได้จากลักษณะกระแสแรงดัน ดังรูปที่ 2.48 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่ไหลในก๊าซกับแรงดันที่ป้อนให้กับอิเล็กโตรดที่มีก๊าซคั่นอยู่ ซึ่งมีลักษณะเป็นหลักการที่ใช้กับก๊าซอื่น ๆ ได้ด้วย การเกิดดีสชาร์จในก๊าซมักเป็นจุดเริ่มต้นของกระบวนการต่างๆ ที่นำไปสู่การเกิดเบรกดาวน์ของการฉนวนได้ ลำดับขั้นของกระบวนการดีสชาร์จอาจแบ่งออกได้เป็น 4 ช่วงด้วยกัน คือ

1) ช่วง I ดีสชาร์จแบบทาวนด์เซนส์

เป็นช่วงที่เรียกว่า ดีสชาร์จที่ประทุตัวเองไม่ได้ (Nonself Sustained Discharge) เขตของช่วงนี้กำหนดด้วยแรงดันเริ่มต้น (Ignition Voltage, Threshold Voltage) เมื่อฉายแสงรังสีเข้าไปที่แคโทด (เช่น รังสีแสงอุลตราไวโอเลต หรือ เอ็กซ์เรย์) กระแสจะเพิ่มขึ้นตามแรงดันที่ป้อนในขณะเริ่มต้นแล้วกระแสจะอิ่มตัว (ย่าน B) เนื่องจากอิเล็กตรอนที่ออกจากแคโทดหรือเกิดขึ้นในก๊าซทั้งหมดวิ่งไปถึงแอโนดหมด ในช่วงนี้กระแสจะไม่เพิ่มตามแรงดันที่เพิ่ม จนกระทั่งถึงค่าหนึ่งกระแส

จะเริ่มเพิ่มขึ้นอีกในลักษณะเอ็กซ์โปเนนเชียล เรียกย่านนี้ว่าคิซาร์จแบบทาวน์เซนต์ ถ้าหากเพิ่มแรงดันต่อไปอีกกระแสจะเพิ่มมากกว่าเอ็กซ์โปเนนเชียลจนถึงจุดหนึ่งแรงดันคร่อมแกปจะหดตัวและกระแสไหลเพิ่มขึ้นมากมายซึ่งจำกัดด้วยวงจรรายนอกเท่านั้น จุดนี้เรียกว่า เบรกดาวน์ (Breakdown) เมื่อเกิดเบรกดาวน์แล้วคิซาร์จสามารถประทุตัวเองได้ (Self Sustained Discharge) คือจะมีกระแสไหลต่อไปได้ถึงแม้ว่าจะเอาต้นกำเนิดฉายแสงหรือรังสีไปยังคาโทดออกก็ตาม

2) ช่วง II คิซาร์จเรืองแสงปกติ (Normal Glow Discharge)

หลังจากเกิดเบรกดาวน์แล้ว ถ้าปล่อยให้กระแสเพิ่มขึ้นต่อไปโดยตัดความดันทานของวงจรรายนอกออก แรงดันคร่อมแกปคิซาร์จจะยุบลงจนเหลือต่ำสุด ย่าน F และ G เรียกว่าย่านคิซาร์จเรืองแสงปกติ คิซาร์จเรืองแสงย่านนี้อาจให้คงสภาพอยู่ได้ โดยมากจะเกิดที่ความดันก๊าซต่ำ ในอากาศที่ความดันบรรยากาศอาจเกิดได้ในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงเท่านั้น

3) ช่วง III คิซาร์จเรืองแสงไม่ปกติ (Abnormal Glow Discharge)

หลังจากถึงย่านคิซาร์จเรืองแสงปกติแล้ว ถ้ากระแสเพิ่มขึ้นต่อไปอีกเป็นเอ็กซ์โปเนนเชียลเรียกว่า คิซาร์จเรืองแสงไม่ปกติ เกิดไอออไนเซชันจากความร้อนในก๊าซและที่ผิวโลหะ

4) ช่วง IV คิซาร์จแบบอาร์ค

ถ้าปล่อยให้กระแสเพิ่มขึ้นต่อไปอีกในที่สุดจะเกิดปรากฏการณ์ของคิซาร์จใหม่ทีเรียกว่า อาร์คคิซาร์จจะมีอิเล็กตรอนหลุดจากคาโทดด้วยความร้อนและมีแสงจ้าจากลำอาร์ค จากปรากฏการณ์ดังกล่าว จุดปลายของช่วง I และค่าแรงดันเริ่มต้น (U_1 หรือ U_0) จะมีความสำคัญต่อเทคนิคการฉนวน เพราะเป็นเกณฑ์ที่จะบ่งบอกถึงการเสียสภาพความคงทนการฉนวนของวัสดุฉนวนทั้งหลาย

2.13 การควบคุมสนามไฟฟ้าของสายเคเบิล

ในการทดสอบฉนวนของสายเคเบิล จะทำการป้อนแรงดันทดสอบ ระหว่างตัวนำและชั้นกึ่งตัวนำนอก โดยป้อนแรงดันสูงเข้าที่ตัวนำ และชั้นกึ่งตัวนำนอกจากเป็นกราวด์ ในการทดสอบสายเคเบิลที่ไม่มีขั้วต่อที่พิเศษ ถ้าทำการทดสอบดังกล่าวจะเกิดการวาวไฟตามผิวขึ้น เนื่องจากระยะห่างระหว่างแรงดันสูงกับกราวด์น้อยมาก ปัญหาที่เกิดขึ้นนี้สามารถแก้ไขได้ โดยการเพิ่มระยะห่างระหว่างแรงดันสูงกับกราวด์ โดยการตัดชั้นกึ่งตัวนำนอกบางส่วนออก แต่ปัญหาที่เกิดขึ้นตามมาคือ สนามไฟฟ้าที่ขอบของชั้นกึ่งกระแสตัวนำนอกจะเกิดความไม่สม่ำเสมอสูง ดังรูปที่ 2.49 (ในสายเคเบิลปกติ สนามไฟฟ้าจะกระจายอยู่อย่างสม่ำเสมอในฉนวน ระหว่างตัวนำและชั้นกึ่งตัวนำนอก) ซึ่งจะนำไปสู่การเกิดเบรกดาวน์ในฉนวนได้ จึงจำเป็นต้องควบคุมสนามไฟฟ้าบริเวณนั้น ให้เกิดความไม่สม่ำเสมอให้น้อยที่สุด

ในการควบคุมสนามไฟฟ้าจะพิจารณาจากค่า คาปาซิแตนซ์ 2 ตัวคือ

- 1) ค่าคาปาซิแตนซ์ระหว่างชั้นของตัวนำที่ถูกตัดออก กับ ฉนวน (C_1)
- 2) ค่าคาปาซิแตนซ์ระหว่าง ฉนวนกับตัวนำ (C_0) ความสัมพันธ์ระหว่างคาปาซิแตนซ์ กับ แรงดันระหว่างฉนวนกับชั้นตัวนำที่ถูกตัดออก เป็นดังนี้

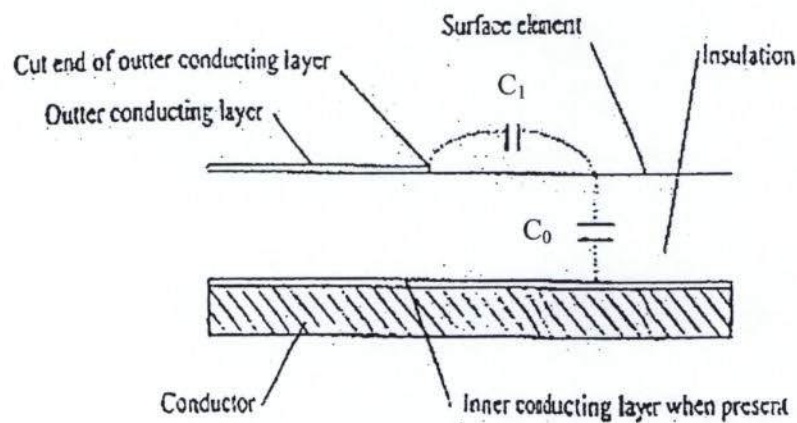
$$U_a \approx E_d \sqrt{\frac{C_1}{C_0}} \quad (2.85)$$

เมื่อ U_a คือ แรงดันเริ่มต้นของการเบรกดาวน์ระหว่างฉนวนกับชั้นตัวนำที่ถูกตัดออก

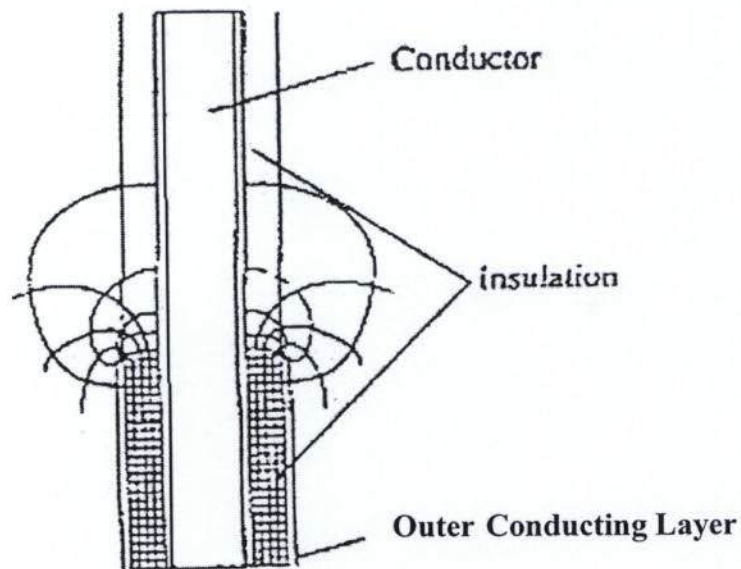
C_1 คือ ค่าคาปาซิแตนซ์ระหว่างชั้นตัวนำที่ถูกตัดออกไปกับฉนวน

C_0 คือ ค่าคาปาซิแตนซ์ระหว่างฉนวนกับตัวนำ

E_d คือ ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าเบรกดาวน์ที่ปลายชั้นของตัวนำที่ถูกตัดออก



รูปที่ 2.49 ค่าคาปาซิแตนซ์ของสายเคเบิล

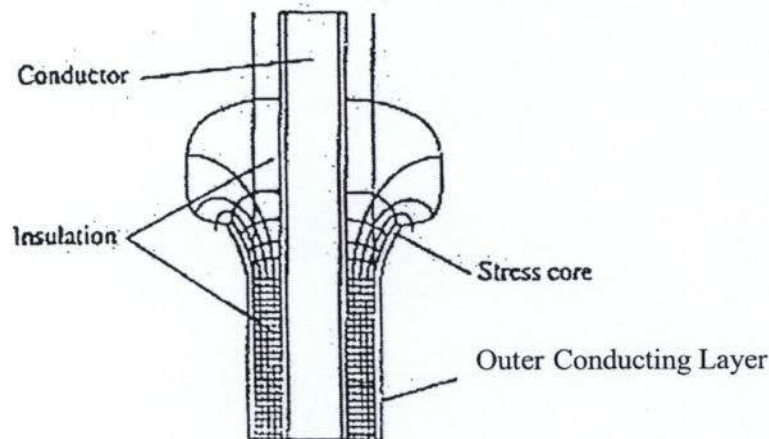


รูปที่ 2.50 สนามไฟฟ้าที่ไม่มีการแก้ไข [5]

ถ้ารอบ ๆ สายเคเบิลเป็นอากาศ ค่า C_1 จะน้อยมากเมื่อเทียบกับ C_0 จะทำให้แรงดันเริ่มต้นของการเบรกดาวนมีค่าต่ำ ทำให้เบรกดาวนได้ง่าย ในการควบคุมจึงต้องทำให้อัตราส่วนระหว่าง C_1/C_0 มีค่ามากนั่นก็คือทำให้ C_1 เพิ่มขึ้นหรือ C_0 ลดลงนั่นเอง

2.13.1 Capacitive Stress Control

จะเป็นการลด C_0 ซึ่งสามารถกระทำได้โดย การเพิ่มรัศมีของชั้นตัวนำด้านนอกที่ถูกตัดออก โดยใช้ Stress Cone ดังรูปที่ 2.51

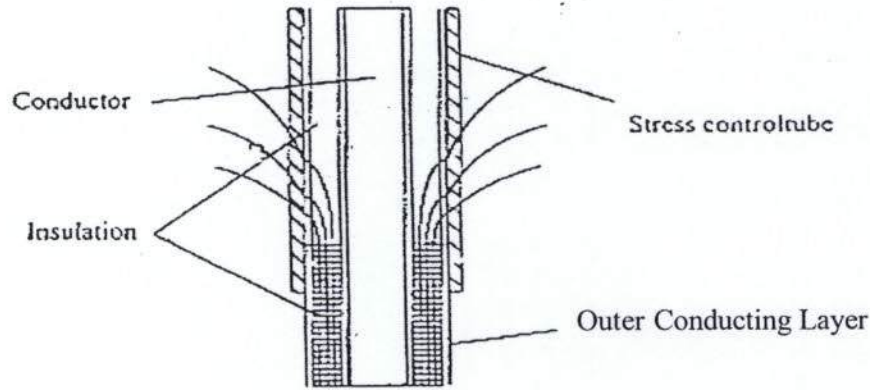


รูปที่ 2.51 การแก้ไขสนามไฟฟ้าแบบ Capacitive Stress Control [5]

2.13.2 Refractive Stress Control

จะเป็นการเพิ่ม C_1 โดยการเติมชั้นฉนวนที่มีค่าไดอิเล็กตริกสูง ๆ ไว้รอบสายเคเบิล

ผังรูปที่ 2.52



รูปที่ 2.52 การแก้ไขสนามไฟฟ้าแบบ Refractive Stress Control [2]

2.14 ไดอิเล็กตริก [2]

ไดอิเล็กตริก คือ ฉนวนไฟฟ้าที่ใช้กันระหว่างอิเล็กโทรด ที่มีความต่างศักย์หรือมีแรงดันไม่เท่ากัน หรือเป็นความคงทนแรงดันได้สูงขึ้น ค่าแฟกเตอร์สูญเสียไดอิเล็กตริก $\tan\delta$ ถือเป็นลักษณะสมบัติที่สำคัญประการหนึ่งใน 3 ประการ ไดอิเล็กตริก คือ ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า (dielectric strength) ค่าเปอร์มิตติวิตี (Permittivity, ϵ) และค่าแฟกเตอร์สูญเสียไดอิเล็กตริก $\tan\delta$

การตรวจสอบการฉนวนของอุปกรณ์หรือของระบบ ค่าแรงดันเบรกดาวน์ถือว่าเป็นขีดจำกัดบน แต่การประเมินผลด้วยวิธีนี้ย่อมทำไม่ได้ เพราะการเกิดเบรกดาวน์โดยเฉพาะอย่างยิ่งฉนวนแข็งย่อมหมายถึงความ สูญเสียสภาพการฉนวนอย่างสมบูรณ์ ฉนวนจะถูกทำลาย ฉะนั้นจะต้องหลีกเลี่ยงการตรวจสอบที่ทำให้เกิด เบรกดาวน์ แต่จะใช้วิธีการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย (Non Destructive Test) ไดอิเล็กตริกที่สมบูรณ์ตามอุดมการณ์นั้นจะต้องไม่มีกำลังไฟฟ้าสูญเสีย และค่าคงตัวไดอิเล็กตริกค่าจริงอาจเขียนได้ว่า

$$\epsilon = \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \quad (2.86)$$

เมื่อ ϵ_r = ค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์
 ϵ_0 = ค่าเปอร์มิตติวิตีของสุญญากาศ = 8.0854×10^{-12} F/m

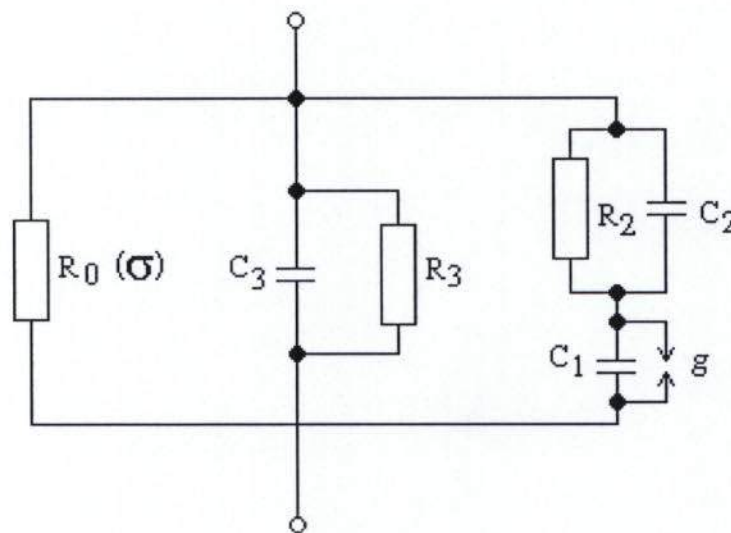
ในทางปฏิบัติฉนวนหรือไดอิเล็กตริกย่อมมีพลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกซึ่งแบ่งออกได้เป็น 3 รูปแบบ คือ

- พลังงานสูญเสียเนื่องจากสภาพนำไฟฟ้า (Condition Loss)
- พลังงานสูญเสียเนื่องจากโพลาไรเซชัน (Polarization Loss)
- พลังงานสูญเสียเนื่องจากไอโอไนเซชัน (Ionization)

ในลักษณะของคิซาร์จบางส่วน (PD : Partial Discharge) พลังงานสูญเสียเหล่านี้เกิดขึ้นได้ในฉนวนเมื่อป้อนแรงดันเข้าไป และจะแปรสภาพเป็นความร้อนขึ้นภายในฉนวน ฉนวนส่วนมากจะนำความร้อนได้ดี ดังนั้นความร้อนที่เกิดขึ้นจะระบายออกไปได้ยากและเมื่อพลังงานสูญเสียเพิ่มขึ้น ความร้อนก็จะยิ่งเพิ่มขึ้น ถ้าอัตราการระบายความร้อนออกยังสูงกว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของความร้อน ก็จะยังอยู่ในสภาพสมดุลไม่เกิดความเสียหายต่อฉนวน แต่ถ้าระบายความร้อนที่เกิดขึ้นออกไปไม่ทัน ความร้อนเพิ่มขึ้นอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนถึงค่าหนึ่งก็จะทำให้เกิดเบรกดาวน์ได้ ฉะนั้นการตรวจสอบคุณภาพของการฉนวนจึงจำเป็นต้องมีการทดสอบหรือวัดพลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก ซึ่งสามารถประเมินผลได้โดยไม่เกิดการทำลายต่อวัสดุทดสอบ

2.15 พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก [2]

พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกของฉนวนขึ้นอยู่กับขนาดแรงดันและสภาพแวดล้อมเช่น อุณหภูมิ เวลาและคุณสมบัติของไดอิเล็กตริกเอง พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกทั้ง 3 แบบดังกล่าวข้างต้น อาจเขียนแทนด้วยวงจรสมมูลในรูปที่ 2.53



รูปที่ 2.53 วงจรสมมูลของไดอิเล็กตริกที่แทนพลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกเนื่องจากสภาพนำไฟฟ้า โพลาไรเซชันและคิซาร์จบางส่วน [2]

ในรูปที่ 2.53 เป็นวงจรสมมูลของไดโอดีคริกที่แทนพลังงานสูญเสียไดโอดีคริก คือ R_0 (σ) แทนพลังงานสูญเสียเนื่องจากสภาพนำไฟฟ้าของฉนวน C_3 จะแทนค่าความจุไฟฟ้าที่แท้จริงของไดโอดีคริกและ R_3 จะแทนพลังงานสูญเสียไดโอดีคริกเนื่องจากโพลาไลเซชัน และ R_2 แทนพลังงานสูญเสียในฉนวนเนื่องจากดิสชาร์จบางส่วน ส่วน C_1 , C_2 และสปาร์กแกป g แทนวงจรมูลของดิสชาร์จบางส่วน PD (ดูรายละเอียดเรื่องดิสชาร์จบางส่วน)

2.15.1 พลังงานสูญเสียไดโอดีคริกเนื่องจากสภาพนำไฟฟ้าแรงดันกระแสตรง

ในสนามไฟฟ้าคงตัวที่มีแรงดันกระแสตรง E ค่าความหนาแน่นของกระแส J อาจคำนวณโดยอาศัยกฎของโอห์มจากค่าความนำจำเพาะ σ ได้คือ

$$J = \sigma E \quad (2.87)$$

พลังงานสูญเสียไดโอดีคริกต่อปริมาตรจะหาได้จากสูตร

$$P_d = EJ = \sigma E^2 \quad (2.88)$$

สภาพนำไฟฟ้า σ ของระบบการฉนวนซึ่งประกอบด้วย ของเหลว ของแข็งจะเป็นผลมาจากไอออนสภาพนำไฟฟ้า σ จึงขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ สิ่งเจือปน ปริมาณความชื้น ค่าความต้านทาน กระแสรั่ว R_0 (σ) ของการฉนวนอาจหาได้โดยการวัดค่ากระแสจากการป้อนแรงดันกระแสตรงคงที่ ผลการวัดจะขึ้นอยู่กับเวลาด้วย ฉะนั้นควรวัดค่าที่ 1 นาทีหลังจากสับสวิทช์แล้ว ค่าสภาพนำไฟฟ้า σ อาจคำนวณได้จากค่าความต้านทานที่วัดได้ แรงดันที่ใช้ในการวัดปกติจะมีค่า 100 โวลต์ หรือ 1,000 โวลต์

2.15.2 พลังงานสูญเสียไดโอดีคริกเนื่องจากกระแสสลับและวงจรมูล

ในกรณีของแรงดันกระแสสลับที่มีความถี่สนามไฟฟ้า \bar{E} ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าอาจจะคำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$\bar{J} = (\sigma + j\omega\epsilon)\bar{E} \quad (2.89)$$

ในฉนวนนอกจากพลังงานสูญเสียเนื่องจากสภาพนำไฟฟ้าแล้วยังมีพลังงานสูญเสียเนื่องจากโพลาไรเซชันและไอออนโนเซชัน ฉะนั้นค่าคงตัวไดโอดีคริกจะมีไม่แต่ค่าจริงอย่างเดียว หากแต่มีจินตภาพด้วยค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสีย $\epsilon\omega$ ของฉนวนซึ่งนิยามไว้ว่าเป็นอัตราส่วนค่ากระแสจริง I_r ต่อค่ากระแสรีแอกทีฟ I_r คือ

$$\operatorname{tg} \sigma = \frac{I_a}{I_b} = \frac{P_d}{P_b} \quad (2.90)$$

ซึ่งพลังงานสูญเสียประกอบด้วยองค์ประกอบทั้ง 3 ส่วนตามที่กล่าวแล้วคือ

$$P_d = P_{\sigma} + P_p + P_I \quad (2.91)$$

- เมื่อ P_d = พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก
 P_{σ} = พลังงานสูญเสียเนื่องจากสภาพนำไฟฟ้าของฉนวน
 P_p = พลังงานสูญเสียเนื่องจากโพลาริเซชัน
 P_I = พลังงานสูญเสียเนื่องจากไอออนไนเซชัน

ค่าแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียจึงเขียนในลักษณะเดียวกันเป็น

$$\operatorname{tg} \delta = \operatorname{tg} \delta_{\sigma} + \operatorname{tg} \delta_p + \operatorname{tg} \delta_I \quad (2.92)$$

δ เป็นมุมระหว่างกระแสรวมผ่านไดอิเล็กตริกกับกระแสเสรีเอกที่พ
 ฉะนั้นพลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกจะเขียนได้ว่า

$$P_d = P_p \operatorname{tg} \delta = \omega C U^2 \operatorname{tg} \delta_I \quad (2.93)$$

เมื่อ C = คือค่าความจุไฟฟ้าของวัสดุทดสอบ

U = คือแรงดันที่ป้อนที่ความถี่

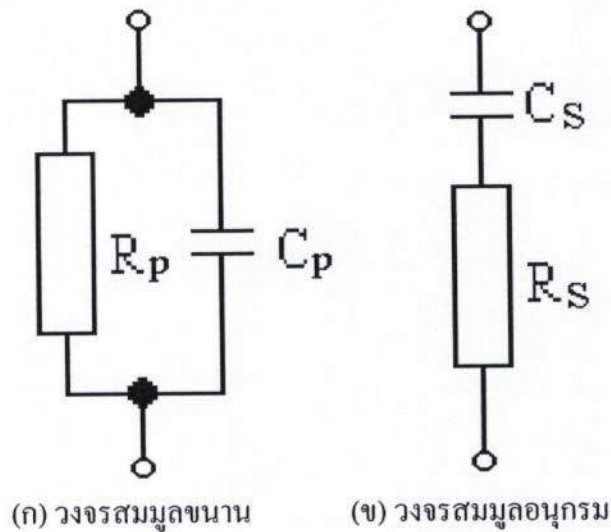
ถ้าคิดเป็นพลังงานสูญเสียต่อหน่วยปริมาตรของฉนวนจะได้ว่า

$$P_d = \omega \epsilon_0 \epsilon' E^2 \operatorname{tg} \delta \quad (2.94)$$

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

ไดอิเล็กตริกจึงอาจเขียนแทนด้วยวงจรมุมได้ดังรูปที่ 2.54 ซึ่งอาจอยู่ในรูปวงจรมุม

(ก) หรือ วงจรอนุกรม (ข)



(ก) วงจรสมมูลขนาน

(ข) วงจรสมมูลอนุกรม

รูปที่ 2.54 วงจรสมมูลของไดอิเล็กตริก

แฟกเตอร์พลังงานสูญเสียสำหรับวงจขนานจะได้

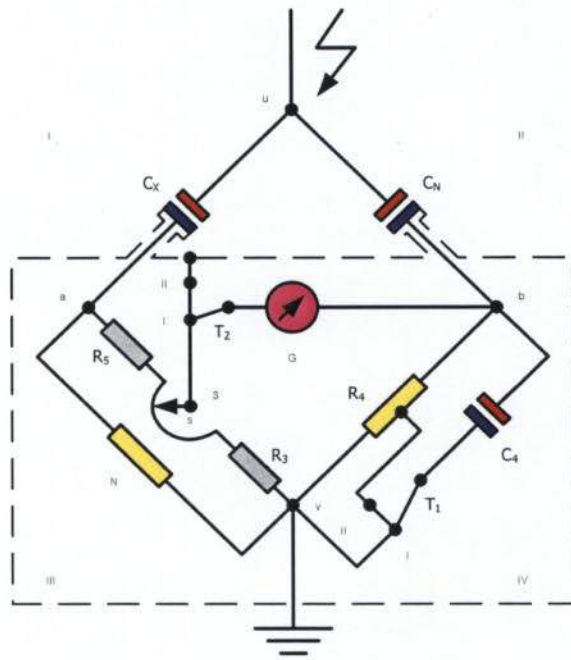
$$\operatorname{tg} \delta = 1 / \omega C_p R_p \quad (2.95)$$

แฟกเตอร์พลังงานสูญเสียสำหรับวงจอนุกรมจะได้

$$\operatorname{tg} \delta = \omega C_s R_s \quad (2.96)$$

2.16 การวัดค่าความจุไฟฟ้าและแฟกเตอร์พลังงานสูญเสีย [2]

กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกของวัสดุหรืออุปกรณ์ใดๆ ที่ใช้งานกับแรงดันกระแสสลับ สามารถคำนวณหรือประมาณค่าที่แรงดันใช้งาน U ใดๆ ได้จากสมการ $P_d = \omega C U^2 \operatorname{tg} \delta$ ซึ่งจำเป็นต้องทราบค่าความจุไฟฟ้า C และแฟกเตอร์พลังงานสูญเสีย $\operatorname{tg} \delta$ ทั้งสองค่านี้ สามารถวัดได้ด้วยอุปกรณ์ที่เรียกว่า Schering Bridge ดังรูปที่ 2.55



รูปที่ 2.55 วงจรวัด C และ tgδ ด้วย Schering Bridge [2]

- เมื่อ
- C_x = ค่าความจุไฟฟ้าของวัสดุทดสอบ
 - R_x = ค่าความต้านทานสมมูลที่แทนพลังงานสูญเสียในวัสดุทดสอบ
 - C_N = ตัวเก็บประจุมาตรฐาน
 - R_3, C_4 = กัลวานอมิเตอร์ความไวสูงเป็นตัวชี้ว่าวงจรสมดุลหรือไม่
 - R_4 = ความต้านทานไร้ความเหนี่ยวนำ
 - C_4 = กระเป๋าดัชนีปรับค่าได้
 - G = กัลป์วานอมิเตอร์ความไวสูง

เมื่อปรับวงจรปรับค่าได้สมดุลแล้ว (กัลวานอมิเตอร์ชี้ศูนย์) จะได้ความสัมพันธ์

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{Z_3}{Z_4} \quad (2.97)$$

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

$$Z_1 = \frac{R_x}{1 + j\omega C_x R_x} \quad (2.98)$$

$$Z_2 = \frac{-j}{\omega C_N} \quad (2.99)$$

$$Z_3 = R_3 \quad (2.100)$$

$$Z_4 = \frac{R_4}{1 + j\omega C_4 R_4} \quad (2.101)$$

นั่นคือ

$$\frac{R_x}{R_3(1 + j\omega C_x R_x)} = \frac{-j}{\omega C_4 R_4} (1 + j\omega C_4 R_4) \quad (2.102)$$

โดยการเทียบค่าจริงจะได้

$$\frac{R_x}{1 + \omega^2 C_x^2 R_x^2} = \frac{C_4 R_3}{C_N} \quad (2.103)$$

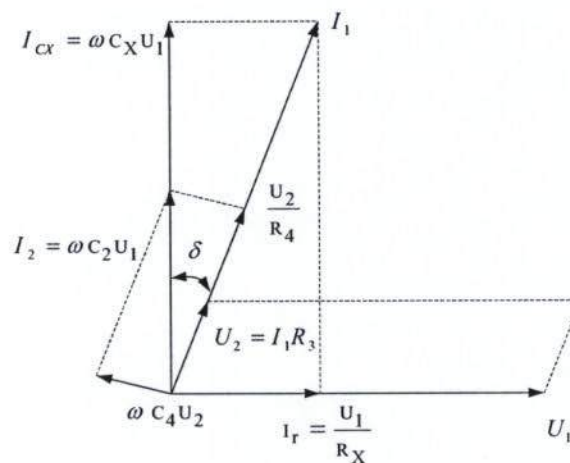
จากรูปที่ 2.55 เมื่อ C_x และ R_x ต่อกันแบบขนาน

$$\cos \delta = \frac{\omega C_x R_x}{\sqrt{1 + \omega^2 C_x^2 R_x^2}} \quad (2.104)$$

$$\cos^2 \delta = \frac{\omega^2 C_x^2 R_x^2}{1 + \omega^2 C_x^2 R_x^2} \quad (2.105)$$

แทนค่าในสมการจะได้

$$C_x = \frac{C_N \cos^2 \delta}{\omega^2 C_x C_4 R_x R_3} \quad (2.106)$$



รูปที่ 2.56 เวกเตอร์ไดอะแกรมของวงจร Schering Bridge [2]

จากรูปที่ 2.56

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\omega C_4}{1/R_4} \quad (2.107)$$

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1/R_x}{\omega C_x} = \frac{1}{\omega C_x R_x} \quad (2.108)$$

$$\omega C_4 R_4 = \frac{1}{\omega C_x R_x} \quad (2.109)$$

$$\frac{1}{C_x R_x} = \omega^2 C_4 R_4 \quad (2.110)$$

แทนค่า $\frac{1}{C_x R_x}$ ในสมการ (2.106)

$$\text{จะได้} \quad C_x = \frac{C_N R_4 \cos^2 \delta}{R_3} \quad (2.111)$$

$$\text{นั่นคือ} \quad C_x = \frac{C_N R_4}{R_3} \quad (2.112)$$

โดยประมาณ

$$\text{และ} \quad \tan \delta = \omega C_4 R_4 \quad (2.113)$$

ในทางภาคปฏิบัติ R_4 มักจัดไว้เป็นค่าคงตัวเฉพาะที่มีสวิตช์เลือกให้เปลี่ยนได้หลายค่า เพื่อให้สามารถวัดได้ละเอียดถูกต้องในช่วงกว้างของค่า C ส่วน R_3 นั้นเป็นความต้านทานที่ปรับได้ ซึ่งมักมีค่าสูงสุดไม่เกิน 10,000 โอห์ม ทั้งนี้เพื่อจำกัดค่าสเตรคาปาซิแตนซ์ให้มีน้อยที่สุด ส่วน C_4 นั้นเป็นคาปาซิแตนซ์ที่ปรับได้เช่นกัน และมีค่าสัมพันธ์โดยตรงกับค่าเฟกเตอร์พลังงานสูญเสีย $\tan \delta$

เพื่อจัดการรบกวนจากภาคแรงสูงที่มีต่อวงจรภาคแรงต่ำ ซึ่งอาจจะดับปลิงผ่านสเตรคาปาซิแตนซ์นั้น ตั้งแต่ภาคแรงต่ำของกะปาซิเตอร์มาตรฐาน C_N และวัสดุทดสอบมาถึงอิมพีแดนซ์ของวงจร III, IV และกัลวานอมิเตอร์จะมีเกราะป้องกันแบบ 2 ชั้น (Double Screen Shielding) และ ป้องกันมิให้บริดจ์เสียหายจากแรงดันเกินเนื่องจากภาคแรงสูงเกิดบกร่องขึ้นใน I หรือ II จึงใส่กับดักแรงดันเกินหรือสปาร์กแกปไว้ในวงจรภาคแรงต่ำ

2.17 สรุป

การใช้เคเบิลฉนวนแข็งในระบบไฟฟ้าแรงสูงนิยมใช้ XLPE เป็นฉนวนและต้องมีการทดสอบการเกิดพาร์เซิลดิสชาร์จที่เกิดขึ้นก่อนนำไปใช้ทุกครั้ง ในการทดสอบต้องมีการประกอบเคเบิลทดสอบเข้ากับชุดวัดพาร์เซิลดิสชาร์จโดยใช้ขั้วต่อสาย โดยไม่ทำให้เกิดพาร์เซิลดิสชาร์จเพิ่มขึ้นซึ่งทำให้ผลการวัดผิดพลาด การออกแบบขั้วต่อสายโดยทฤษฎีพบว่ารูปทรงกระบอกซ้อนกันร่วม เป็นรูปทรงที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากมีความเครียดสนามไฟฟ้าต่ำที่สุดจากทุกแบบที่พิจารณา เมื่อพิจารณาร่วมกับการออกแบบทรงกระบอกในและนอกเพื่อให้ได้มิติที่เหมาะสมที่สุดที่รัศมีทรงกระบอกในไม่เล็กเกินไปจนเกิดความเครียดสนามไฟฟ้าเกินจนเกิดโคโรน่า และต้องไม่ใหญ่จนเกิดการเบรคดาวน์ผ่านฉนวนที่กั้นระหว่างทรงกระบอกทั้งสอง ในการออกแบบต้องมีการคำนวณสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นสูงสุดในทรงกระบอกทั้งสอง โดยเป็นการคำนวณโดยสมการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับวิธีการเชิงตัวเลขแบบ ไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยเป็นการทวนสอบซึ่งกันและกัน เพราะในรูปทรงที่ซับซ้อนจะใช้ได้แต่วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เท่านั้น ฉนวนที่นำมาใช้ในขั้วต่อสายเป็นก๊าซ SF₆ ซึ่งมีค่าความคงทนต่อแรงดันเบรคดาวน์ที่ความดันบรรยากาศสูงกว่าอากาศ 2.5 เท่า และที่ความดัน 3 บรรยากาศจะมีความคงทนต่อแรงดันเบรคดาวน์เท่าหรือมากกว่าน้ำมันหม้อแปลง ไม่มีสี ไม่มีกลิ่นไม่เป็นพิษ ไม่ติดไฟ นับว่ามีความเหมาะสมที่นำมาใช้เป็นสารฉนวนอย่างยิ่ง ในการพิจารณาคุณภาพของฉนวนอีกวิธีการที่สำคัญคือการวัดค่าสูญเสียไดอิเล็กตริก โดยวิธีการวัดโดยเซียร์ริงบริดจ์ ซึ่งมีความแม่นยำและเหมาะสม ค่าค่าสูญเสียไดอิเล็กตริกที่ต่ำแสดงถึงสภาพการเป็นฉนวนที่ดี

บทที่ 3

การคำนวณและการออกแบบขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูง XLPE

การออกแบบและสร้างขั้วต่อสายเคเบิล จำเป็นต้องทราบข้อมูลเกี่ยวกับองค์ประกอบของขนาดสายเคเบิลที่จะนำมาทำการทดสอบก่อนจึงจะทำการออกแบบขั้วต่อสายเคเบิลได้ และจะต้องทราบถึงระยะเวลาการปกสายเคเบิลเพื่อทดสอบ

3.1 การคำนวณหาแรงดันทดสอบการเกิดดิสชาร์จบางส่วน

ในงานวิจัยนี้จะทำการทดสอบฉนวนของสายเคเบิลที่ระดับแรงดันที่ใช้ในการทดสอบดิสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge) ตามมาตรฐาน IEC 60502-2 โดยสายเคเบิลของ THAI-YAZAKI มีฉนวนเป็น XLPE และมีพิกัดระดับแรงดัน 12/20 kV (24) kV จากมาตรฐานการวัดดิสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge) จะใช้แรงดันทดสอบคือ $1.73 U_0$ ทำการคำนวณหาค่าแรงดันที่ใช้ทดสอบจะได้

$$\begin{aligned}\text{แรงดันทดสอบการเกิดดิสชาร์จบางส่วน} &= 1.73 U_0 \\ &= 1.73 \times 12 \text{ kV} \\ &= 20.76 \text{ kV}\end{aligned}$$

และแรงดันสูงสุดที่ใช้ทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60502-2 คือ $2U_0$ เท่ากับ 24 kV

3.2 การคำนวณการปกฉนวนสายเคเบิลแรงสูง

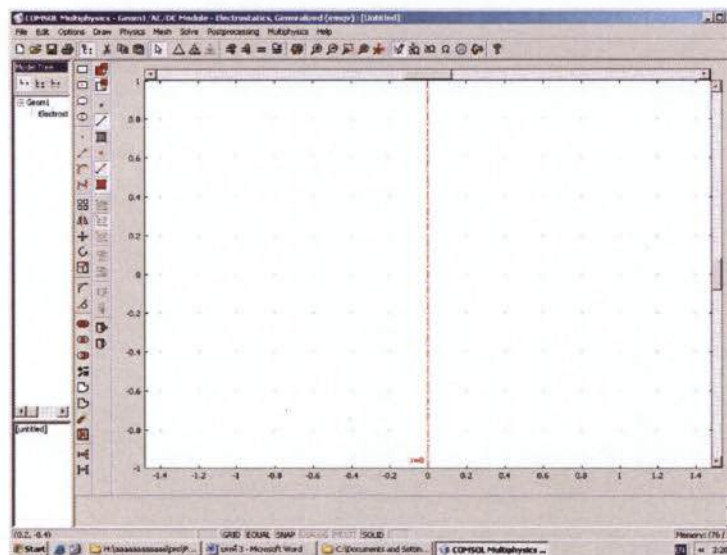
ในการทดสอบสายเคเบิล จะต้องทราบถึงแรงดันที่ใช้ทดสอบแล้วจะต้องทราบถึงระยะเวลาการปกสายเคเบิลเพื่อทดสอบ แต่การปกสายเคเบิลเพื่อทดสอบสาย XLPE 12/20 (24) kV จะต้องมีการห้วงของการปกระหว่างแรงดันสูงกับกรวดมากพอสมควร เพื่อป้องกันการเกิดการวาวไฟตามผิว จึงต้องมีการทดลองเพื่อหาระยะเวลาการปกสายเคเบิลที่เหมาะสม ในงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม COMSOL Multiphysics 3.3 วิเคราะห์การเกิดการวาวไฟตามผิว และนำผลของการ Simulations มาเปรียบเทียบระยะที่จะทำการปกสายเคเบิลเพื่อทดสอบ โดยมีขั้นตอนการหาระยะเวลาการปกดังนี้

3.2.1 เริ่มจากเปิด Program COMSOL Multiphysics 3.3 จะปรากฏ Program ขึ้นมาตามรูปที่ 3.1 คลิกที่ New > Space Dimension : ให้เลือก Axial Symmetry (2D)



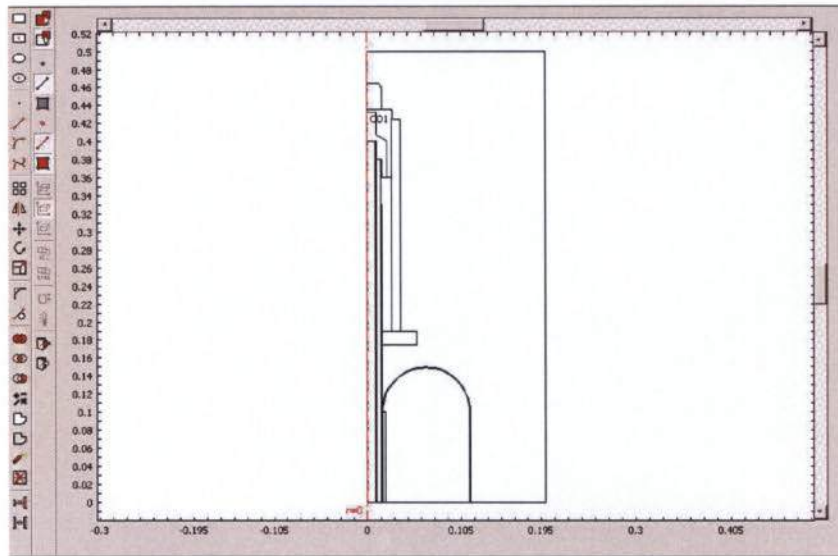
รูปที่ 3.1 หน้าแรกของ Program COMSOL Multiphysics 3.3

3.2.2 ดับเบิ้ลคลิกที่ AC/DC Module แล้วคลิกเลือก Electrostatics, Generalized จากนั้นคลิก OK จะปรากฏหน้าจอเริ่มต้นการใช้งาน



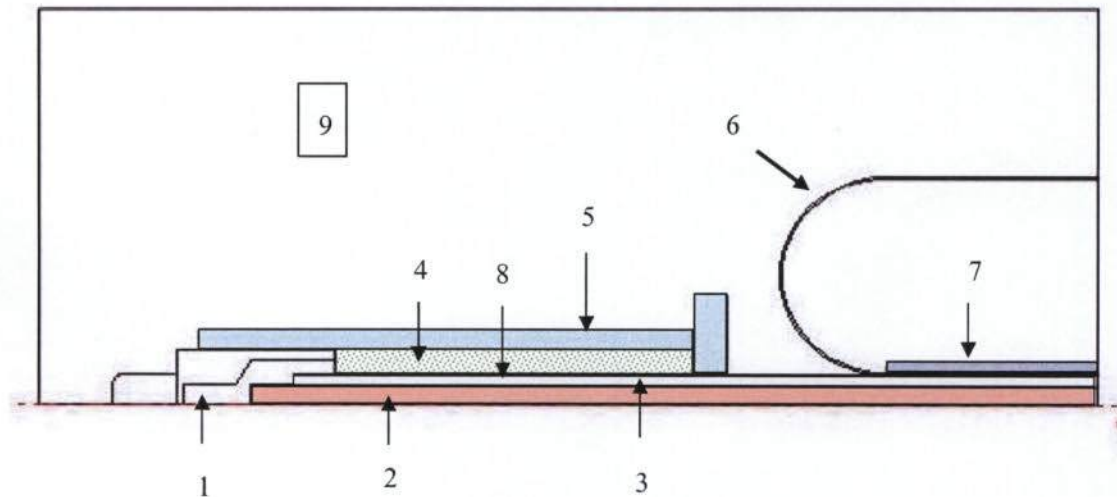
รูปที่ 3.2 หน้าเริ่มต้นการใช้งาน

3.2.3 ทำการเขียนแบบสายเคเบิลXLPE พร้อมขั้วต่อสายเคเบิล



รูปที่ 3.3 แบบสายเคเบิลXLPE พร้อมขั้วต่อสายเคเบิล

3.2.4 เมื่อทำการเขียนแบบเสร็จแล้วให้คลิกที่ menu Physics --> Subdomains Settings (F8) แล้วกำหนดค่าของวัสดุแต่ละชั้นดังรูป



รูปที่ 3.4 ส่วนประกอบต่างๆของวัสดุที่จะทำการกำหนดค่าของวัสดุ

จากรูปที่ 3.4 สามารถอธิบายส่วนประกอบต่างๆของวัสดุต่างๆได้ดังนี้

ส่วนที่ 1 : อลูมิเนียม ส่วนที่ 2 : ทองแดง

ส่วนที่ 3 : XLPE ส่วนที่ 4 : อากาศ , สุญญากาศ , SF₆

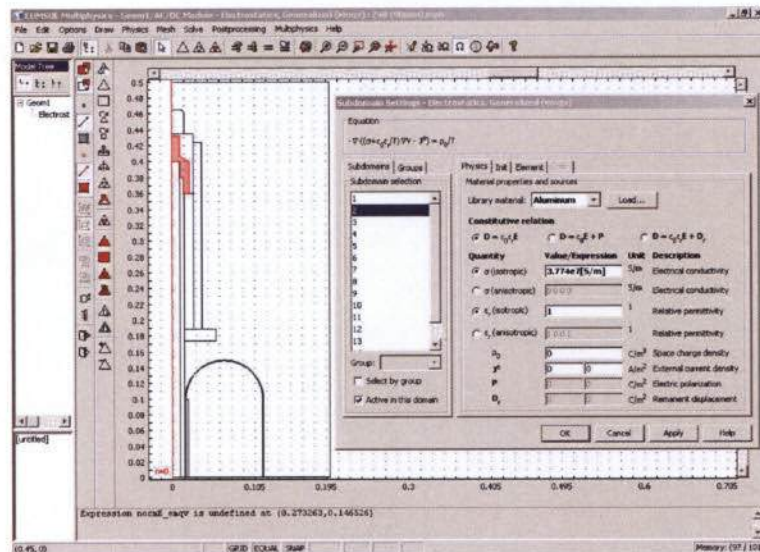
ส่วนที่ 5 : อะคริลิก ส่วนที่ 6 : ทองแดง

ส่วนที่ 7 : PE ส่วนที่ 8 : Semi-Conducting Layer
 ส่วนที่ 9 : บรรยากาศปกติ

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของวัสดุจาก Materials Library ของโปรแกรม COMSOL MULTIPHYSICS 3.3

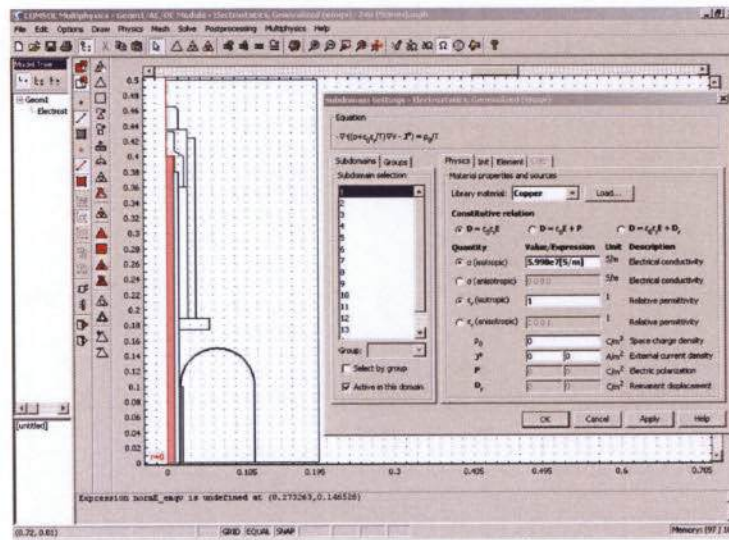
วัสดุ	ค่าความนำ(σ) S/m	ϵ_r
อลูมิเนียม	3.774e7	1
ทองแดง	5.998e7	1
XLPE	1e-15	2.3
อะครีลิก	0	3
ทองแดง	5.998e7	1
PE	0.1	2.3
Semi-Conducting Layer	100	10
บรรยากาศปกติ	1e-15	1.00054

3.2.5 กำหนดคุณสมบัติของส่วนที่ 1 คือ อะลูมิเนียม โดยให้สภาพนำไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 3.774e7 และค่าเปอร์มิตติวิตีมีค่าเท่ากับ 1 จากนั้นคลิก Apply



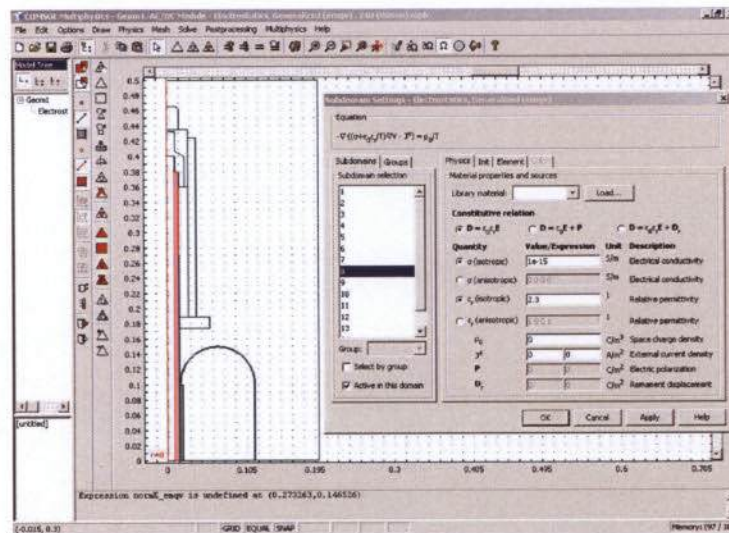
รูปที่ 3.5 กำหนดคุณสมบัติของส่วนที่ 1 คือ อะลูมิเนียม

3.2.6 กำหนดคุณสมบัติของส่วนที่ 2 คือ ทองแดง โดยให้สภาพนำไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ $5.998e7$ และค่าเปอร์มิตติวิตีมีค่าเท่ากับ 1 จากนั้นคลิก Apply



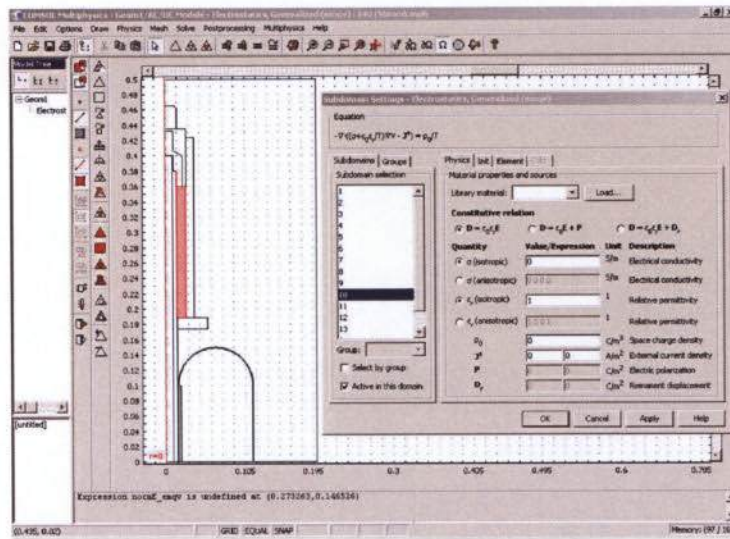
รูปที่ 3.6 กำหนดคุณสมบัติของส่วนที่ 2 คือ ทองแดง

3.2.7 กำหนดคุณสมบัติของส่วนที่ 3 คือ XLPE โดยให้สภาพนำไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ $1e-15$ และค่าเปอร์มิตติวิตีมีค่าเท่ากับ 2.3 จากนั้นคลิก Apply



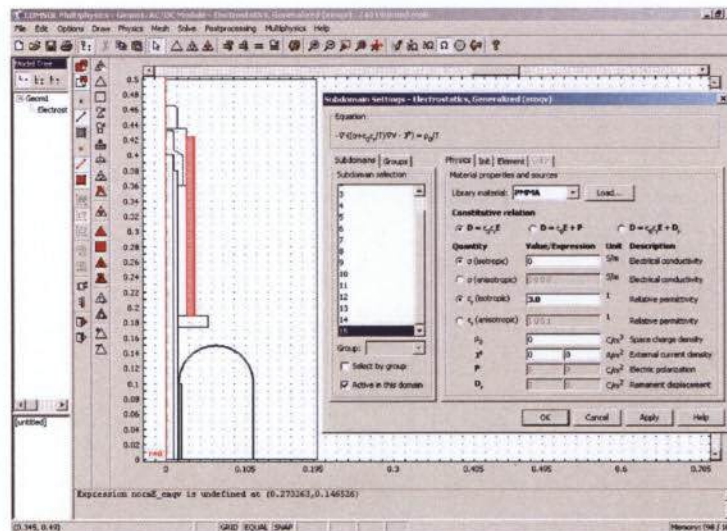
รูปที่ 3.7 กำหนดคุณสมบัติของส่วนที่ 3 คือ XLPE

3.2.8 กำหนดคุณสมบัติของส่วนที่ 4 คือ อากาศ โดยให้สภาพนำไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ $1e-15$ และค่าเปอร์มิตติวิตีมีค่าเท่ากับ 1.00054 จากนั้นคลิก Apply



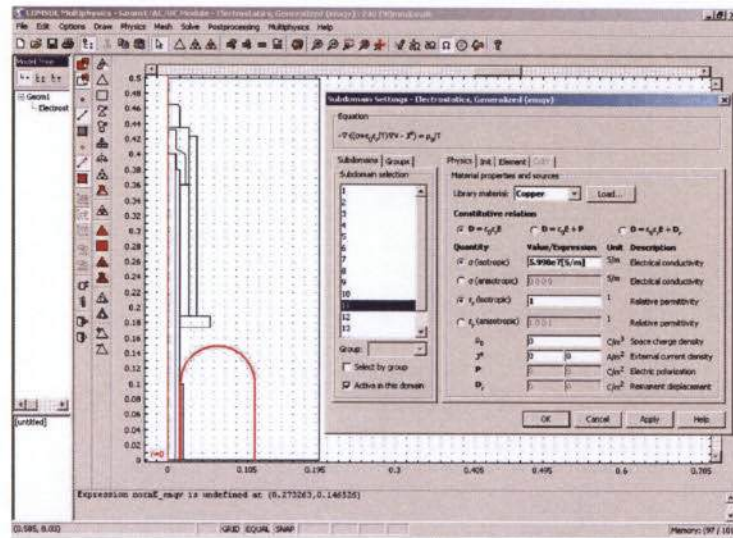
รูปที่ 3.8 กำหนดคุณสมบัติของส่วนที่ 4 คือ อากาศ

3.2.9 กำหนดคุณสมบัติของส่วนที่ 5 คือ อะคริลิก โดยให้สภาพนำไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 0 และค่าเปอร์มิตติวิตีมีค่าเท่ากับ 3.0 จากนั้นคลิก Apply



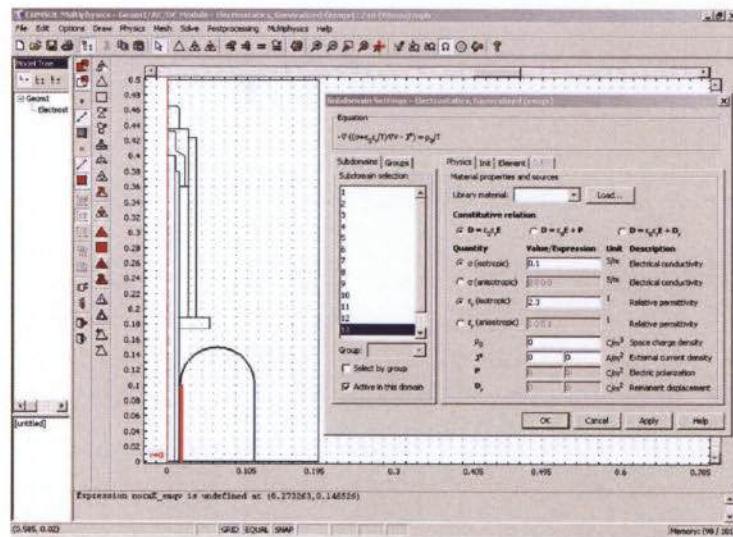
รูปที่ 3.9 กำหนดคุณสมบัติของส่วนที่ 5 คือ อะคริลิก

3.2.10 กำหนดคุณสมบัติของส่วนที่ 6 คือ ทองแดง โดยให้สภาพนำไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 5.998e7 และค่าเปอร์มิตติวิตีมีค่าเท่ากับ 1 จากนั้นคลิก Apply



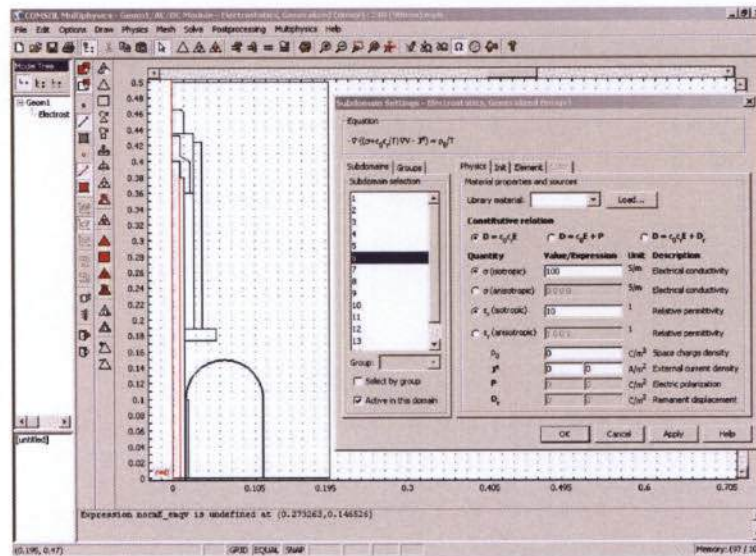
รูปที่ 3.10 กำหนดคุณสมบัติของส่วนที่ 6 คือ ทองแดง

3.2.11 กำหนดคุณสมบัติของส่วนที่ 7 คือ PE โดยให้สภาพนำไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 0.1 และค่าเปอร์มิตติวิตีมีค่าเท่ากับ 2.3 จากนั้นคลิก Apply



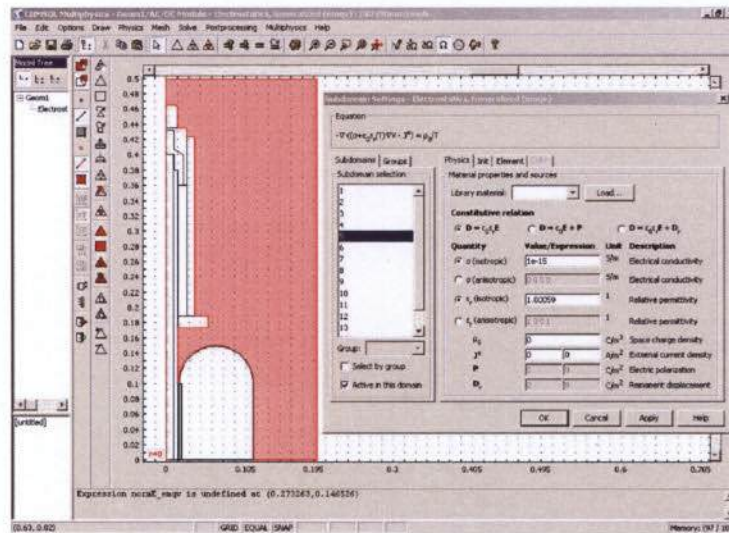
รูปที่ 3.11 กำหนดคุณสมบัติของส่วนที่ 7 คือ PE

3.2.12 กำหนดคุณสมบัติของส่วนที่ 8 คือ Semi-Conducting โดยให้สภาพนำไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 100 และค่าเปอร์มีตติวิตีมีค่าเท่ากับ 10 จากนั้นคลิก Apply



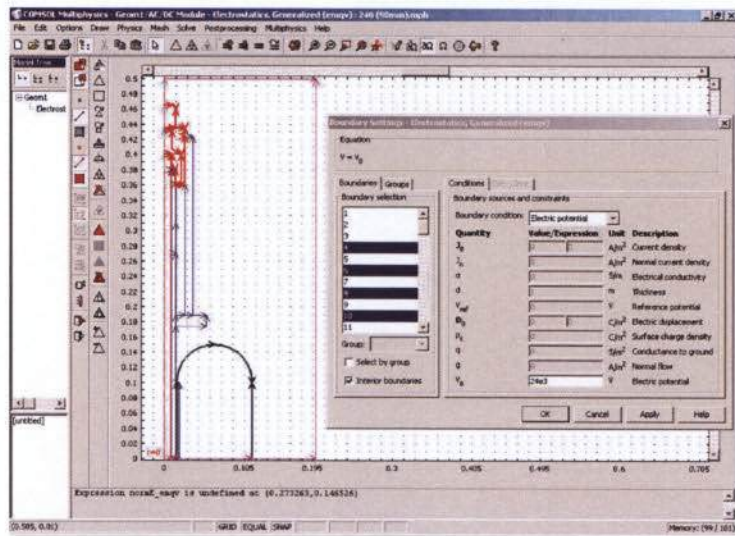
รูปที่ 3.12 กำหนดคุณสมบัติของส่วนที่ 8 คือ Semi-Conducting

3.2.13 กำหนดคุณสมบัติของส่วนที่ 9 คือ บรรยากาศปกติโดยให้สภาพนำไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 1e-15 และค่าเปอร์มีตติวิตีมีค่าเท่ากับ 1.00054 จากนั้นคลิก Apply

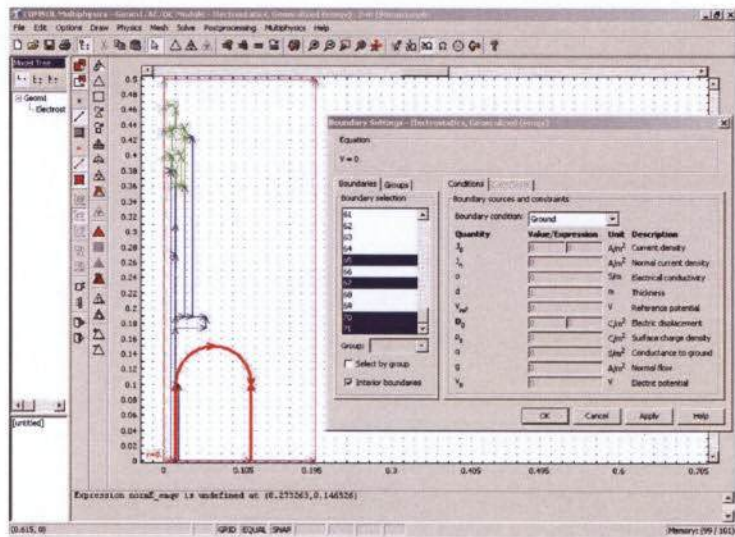


รูปที่ 3.13 กำหนดคุณสมบัติของส่วนที่ 9 คือ บรรยากาศปกติ

3.2.14 คลิกที่ Menu Physics --> Boundary Settings (F7) แล้วกำหนดค่าแรงดัน และ Ground

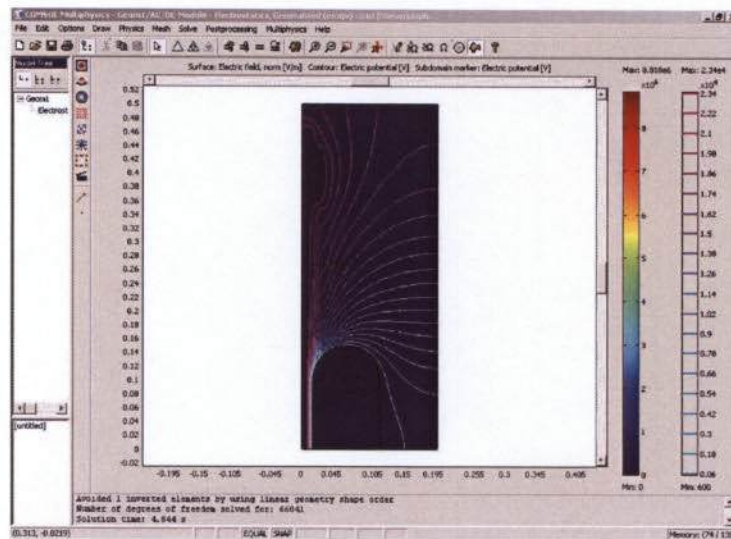


รูปที่ 3.14 กำหนดค่าแรงดัน 24 kV



รูปที่ 3.15 Ground

3.2.15 คลิกที่ menu Solve --> Solve Problem



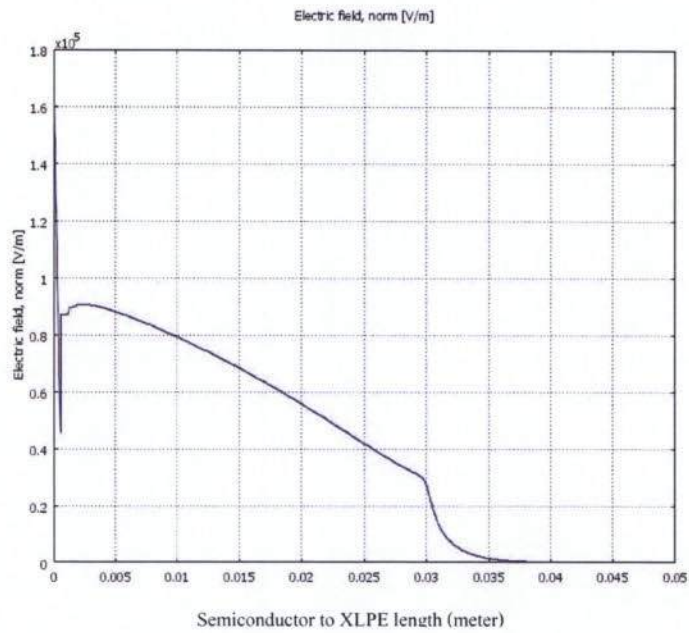
รูปที่ 3.16 ผลการ Simulations

3.2.16 คลิกที่ Menu Post Processing > Cross-Section Plot Parameters > click the Line/Extrusion Tab ที่ y-axis data เลือก predefined quantities ให้เป็น Electric field, norm และ กำหนดค่าที่ CROSS-SECTION LINE ตามระยะจาก XLPE ถึง Semiconductor คือ r0:0.15 r1:0.015 z0:0.33 z1:0.38 Line resolution: 1000 จากนั้นคลิก OK จะได้ Electric field บริเวณผิว XLPE ตามรูป 3.18



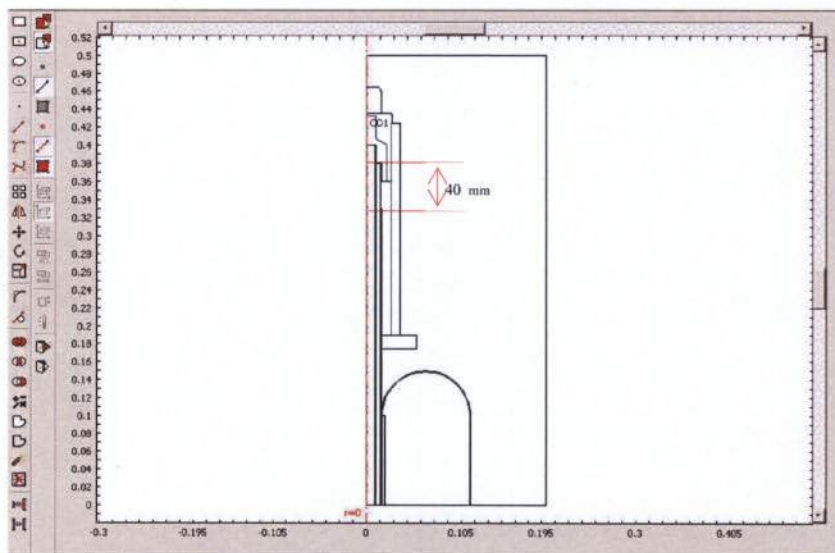
รูปที่ 3.17 Cross-Section Plot Parameters

3.2.17 แสดงผลการวางไฟตามผิว XLPE ที่ได้จากโปรแกรมระยะปลายสาย จาก XLPE ถึง Semiconductor ห่างกัน 30 mm



รูปที่ 3.18 ผลการวางไฟตามผิว XLPE ที่ระยะ 30 mm

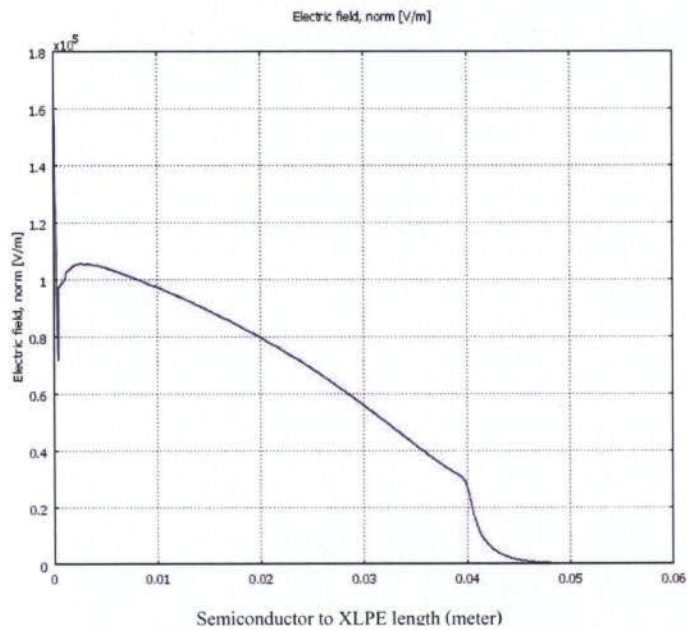
3.2.18 ทำการเปลี่ยนระยะปลายสาย จาก XLPE ถึง Semiconductor ห่างกัน 40 mm และคลิกที่ Menu Solve --> Solve Problem



รูปที่ 3.19 ระยะปลายสาย จาก XLPE ถึง Semiconductor ห่างกัน 40 mm

3.2.19 ทำตามข้อ 3.2.16 จากนั้นคลิก OK จะได้ Electric field บริเวณผิว XLPE ตามรูปที่

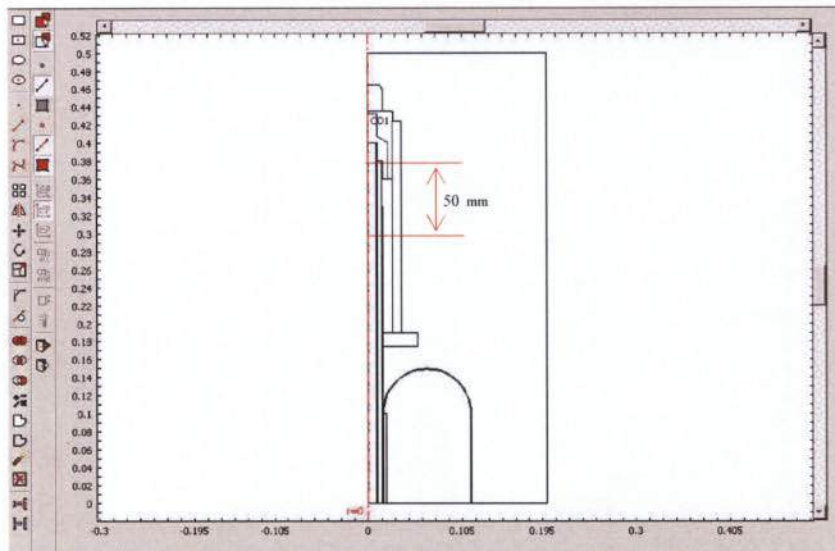
3.20



รูปที่ 3.20 ผลการรวบไฟตามผิว XLPE ที่ระยะ 40 mm

3.2.20 ทำการเปลี่ยนระยะปลายสาย จาก XLPE ถึง Semiconductor ห่างกัน 50 mm และคลิก

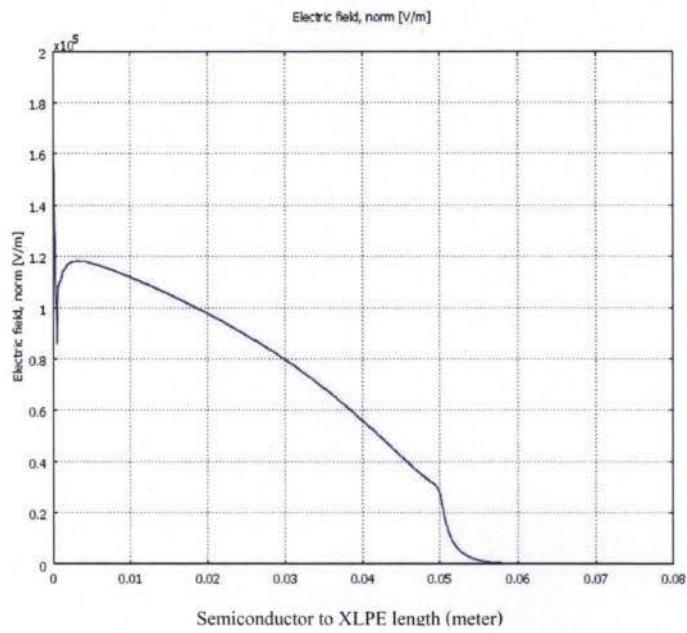
ที่ Menu Solve --> Solve Problem



รูปที่ 3.21 ระยะปลายสาย จาก XLPE ถึง Semiconductor ห่างกัน 50 mm

3.2.21 ทำตามข้อ 3.2.16 จากนั้นคลิก OK จะได้ Electric field บริเวณผิว XLPE ตามรูปที่

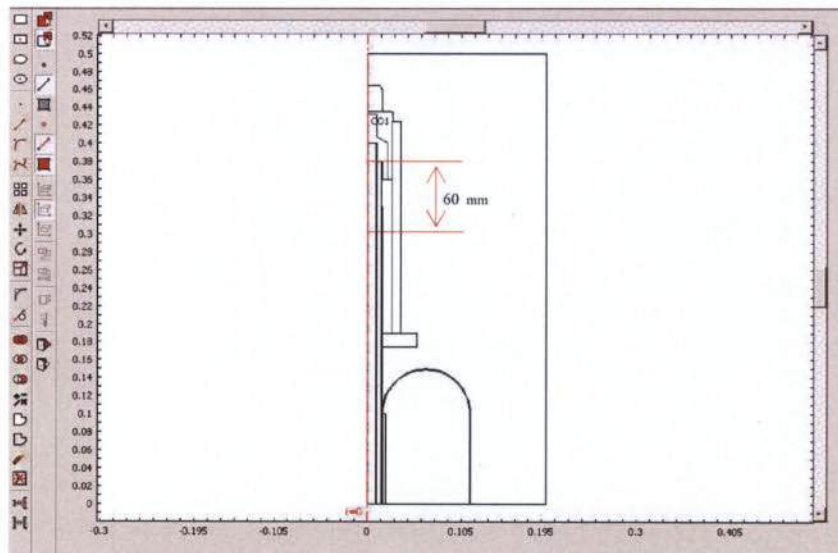
3.22



รูปที่ 3.22 ผลการรวบไฟตามผิว XLPE ที่ระยะ 50 mm

3.2.22 ทำการเปลี่ยนระยะปลายสาย จาก XLPE ถึง Semiconductor ห่างกัน 60 mm และคลิก

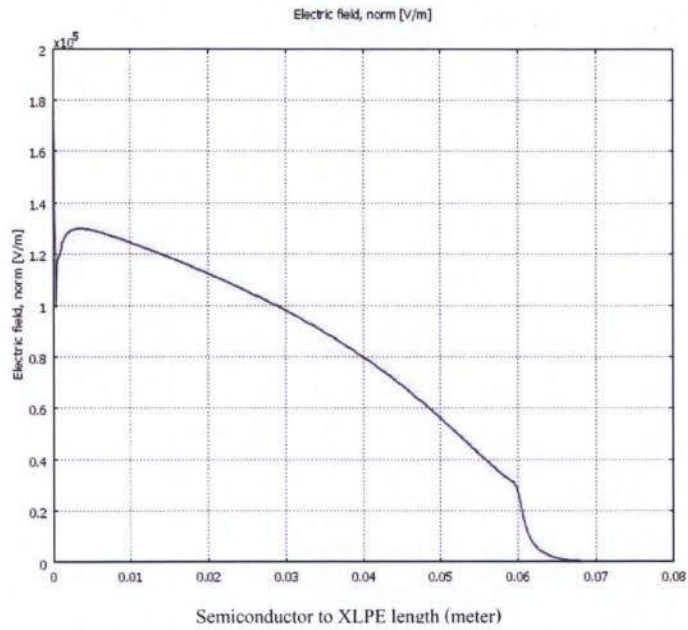
ที่ Menu Solve --> Solve Problem



รูปที่ 3.23 ระยะปลายสาย จาก XLPE ถึง Semiconductor ห่างกัน 60 mm

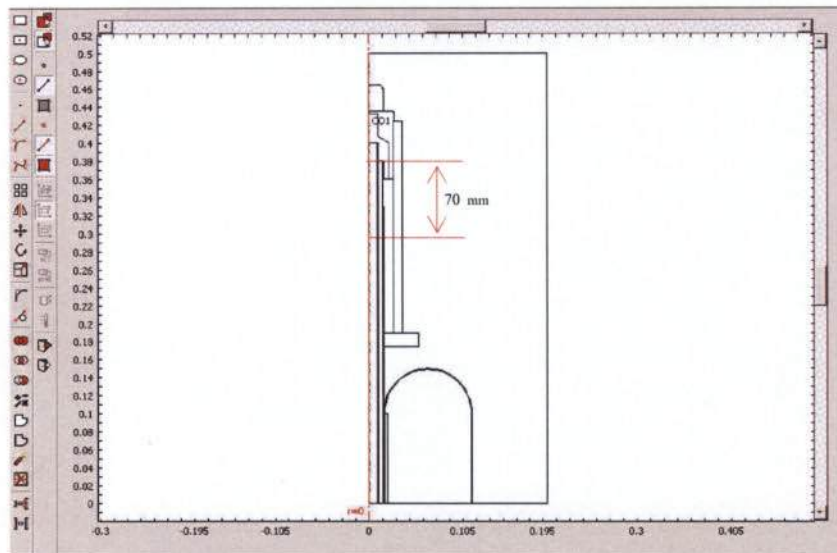
3.2.23 ทำตามข้อ 3.2.16 จากนั้นคลิก OK จะได้ Electric field บริเวณผิว XLPE ตามรูปที่

3.24



รูปที่ 3.24 ผลการวางไฟตามผิว XLPE ที่ระยะ 60 mm

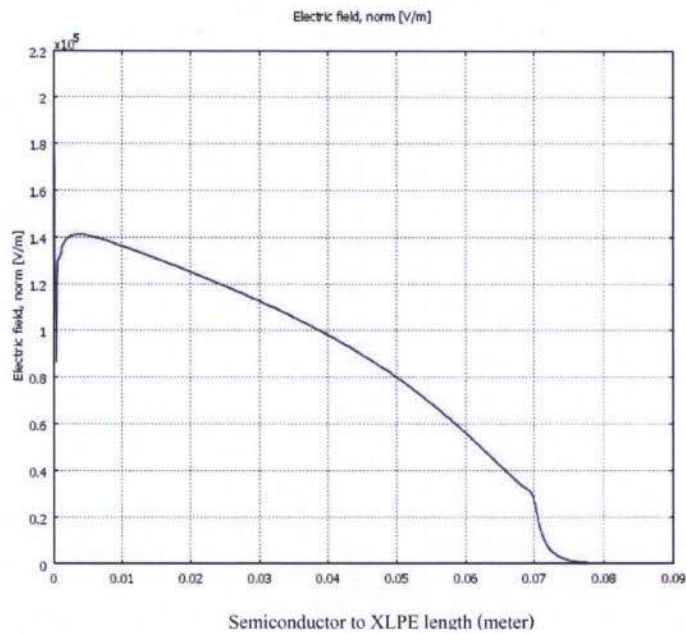
3.2.24 ทำการเปลี่ยนระยะปลายสาย จาก XLPE ถึง Semiconductor ห่างกัน 70 mm และคลิกที่ Menu Solve --> Solve Problem



รูปที่ 3.25 ระยะปลายสาย จาก XLPE ถึง Semiconductor ห่างกัน 70 mm

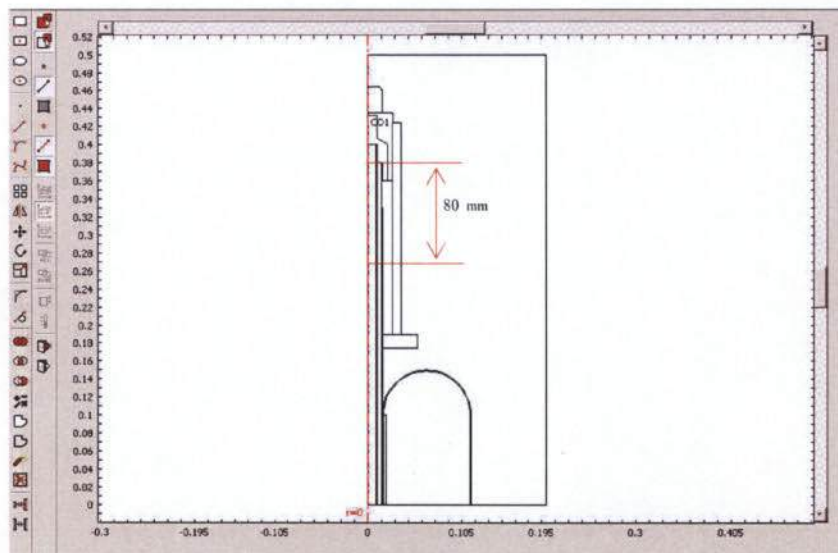
3.2.25 ทำตามข้อ 3.2.16 จากนั้นคลิก OK จะได้ Electric field บริเวณผิว XLPE ตามรูปที่

3.26



รูปที่ 3.26 ผลการวางไฟตามผิว XLPE ที่ระยะ 70 mm

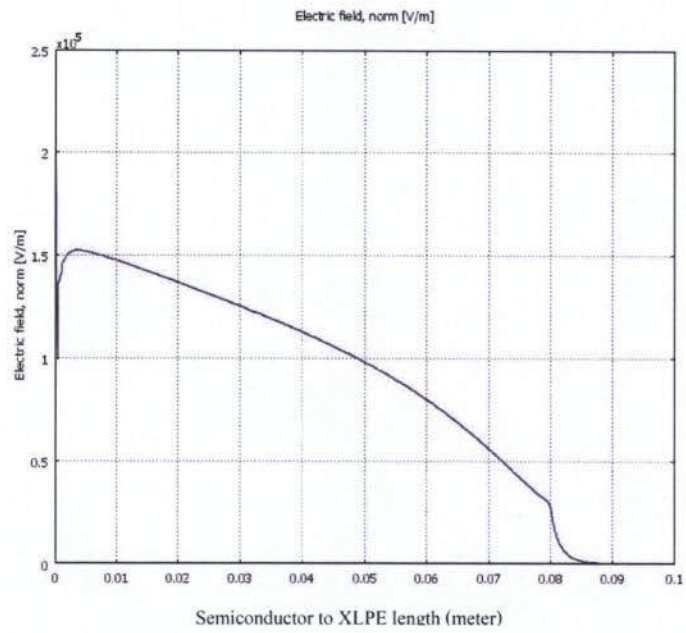
3.2.26 ทำการเปลี่ยนระยะปลายสาย จาก XLPE ถึง Semiconductor ห่างกัน 80 mm และคลิกที่ Menu Solve --> Solve Problem



รูปที่ 3.27 ระยะปลายสาย จาก XLPE ถึง Semiconductor ห่างกัน 80 mm

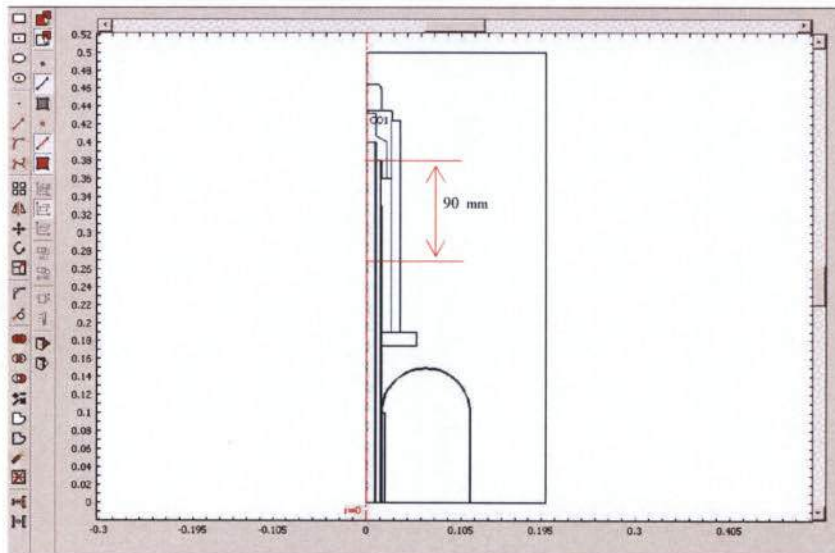
3.2.27 ทำตามข้อ 3.2.16 จากนั้นคลิก OK จะได้ Electric field บริเวณผิว XLPE ตามรูปที่

3.28



รูปที่ 3.28 ผลการรวบไฟตามผิว XLPE ที่ระยะ 80 mm

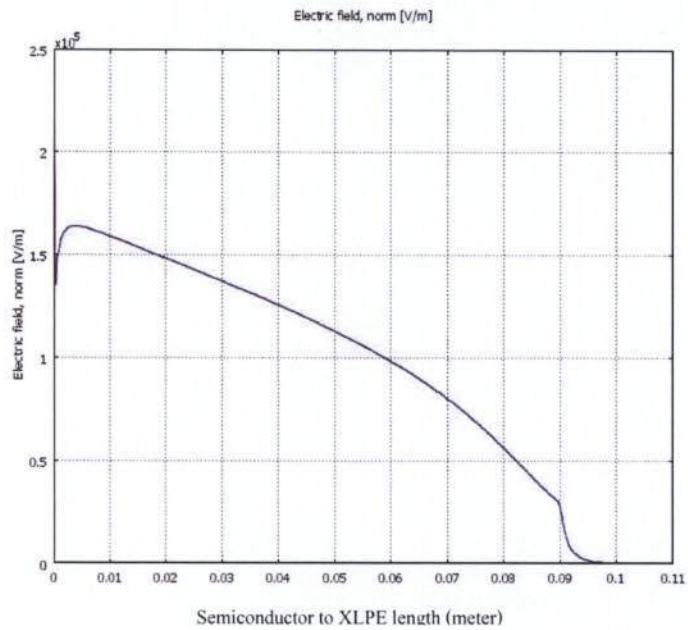
3.2.28 ทำการเปลี่ยนระยะปลายสาย จาก XLPE ถึง Semiconductor ห่างกัน 90 mm และคลิกที่ Menu Solve --> Solve Problem



รูปที่ 3.29 ระยะปลายสาย จาก XLPE ถึง Semiconductor ห่างกัน 90 mm

3.2.29 ทำตามข้อ 3.2.16 จากนั้นคลิก OK จะได้ Electric field บริเวณผิว XLPE ตามรูปที่

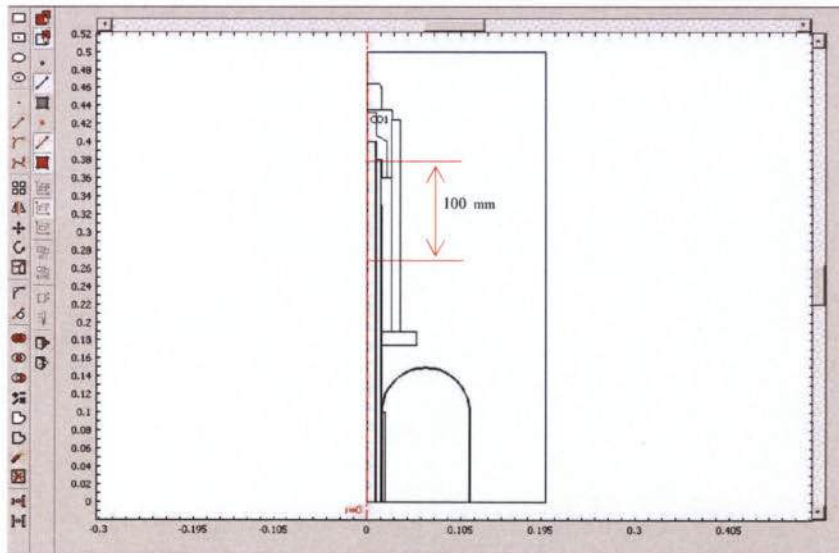
3.30



รูปที่ 3.30 ผลการวางไฟตามผิว XLPE ที่ระยะ 90 mm

3.2.30 ทำการเปลี่ยนระยะปลายสาย จาก XLPE ถึง Semiconductor ห่างกัน 100 mm และคลิก

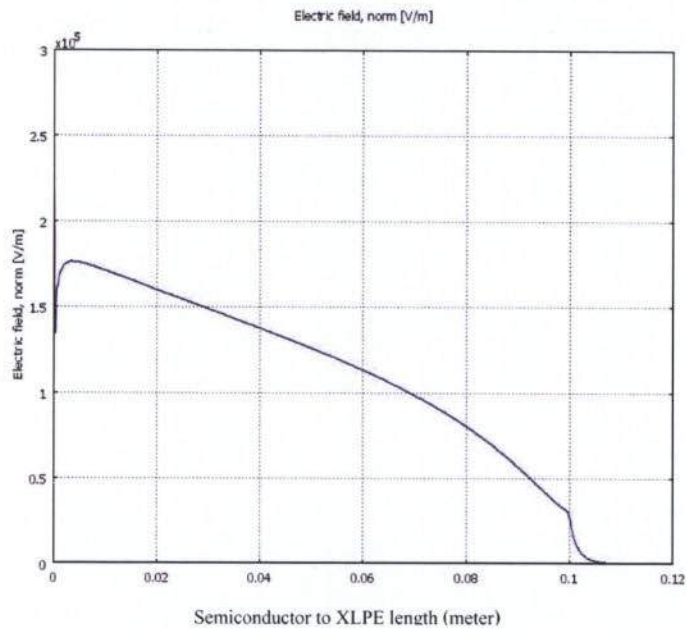
ที่ Menu Solve --> Solve Problem



รูปที่ 3.31 ระยะปลายสาย จาก XLPE ถึง Semiconductor ห่างกัน 100 mm

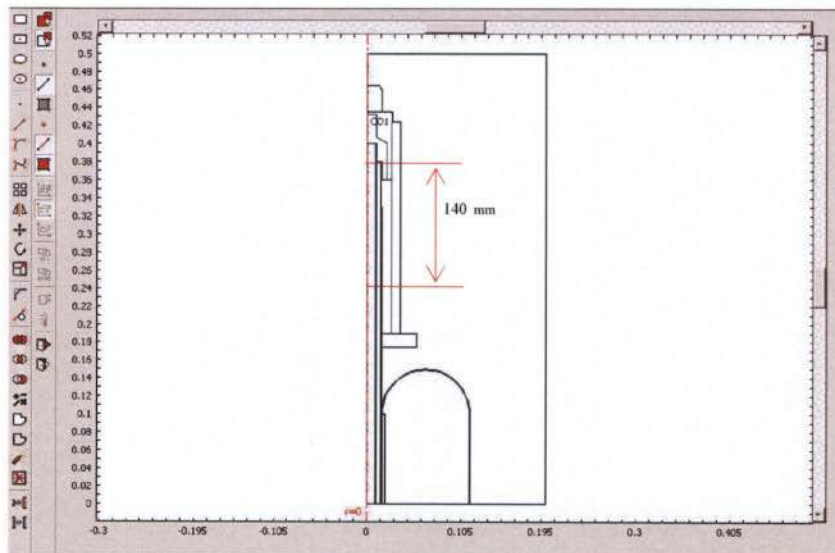
3.2.31 ทำตามข้อ 3.2.16 จากนั้นคลิก OK จะได้ Electric field บริเวณผิว XLPE ตามรูปที่

3.32



รูปที่ 3.32 ผลการวางไฟตามผิว XLPE ที่ระยะ 100 mm

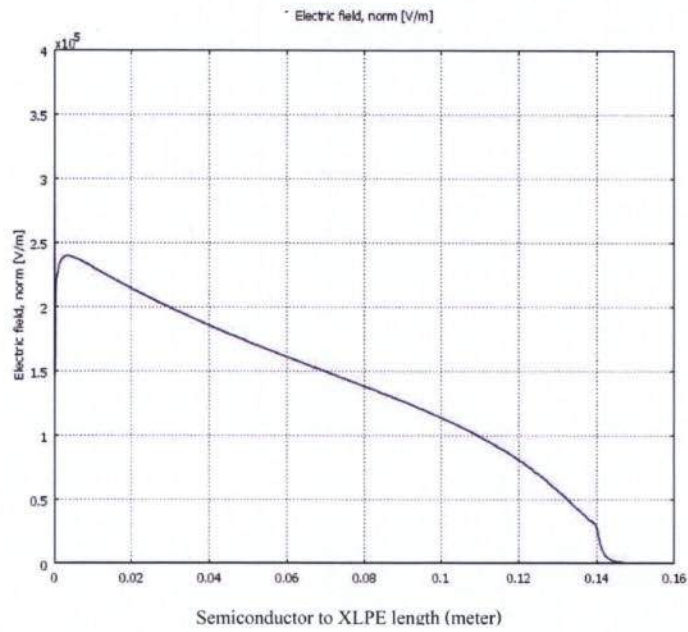
3.2.32 ทำการเปลี่ยนระยะปลายสาย จาก XLPE ถึง Semiconductor ห่างกัน 140 mm และคลิกที่ Menu Solve --> Solve Problem



รูปที่ 3.33 ระยะปลายสาย จาก XLPE ถึง Semiconductor ห่างกัน 140 mm

3.2.33 ทำตามข้อ 3.2.16 จากนั้นคลิก OK จะได้ Electric field บริเวณผิว XLPE ตามรูปที่

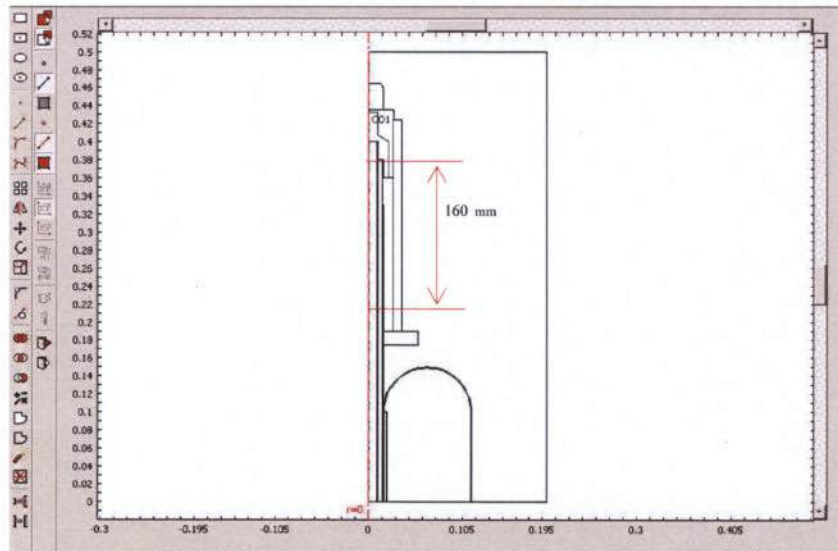
3.34



รูปที่ 3.34 ผลการวางไฟตามผิว XLPE ที่ระยะ 140 mm

3.2.34 ทำการเปลี่ยนระยะปลายสาย จาก XLPE ถึง Semiconductor ห่างกัน 160 mm และคลิก

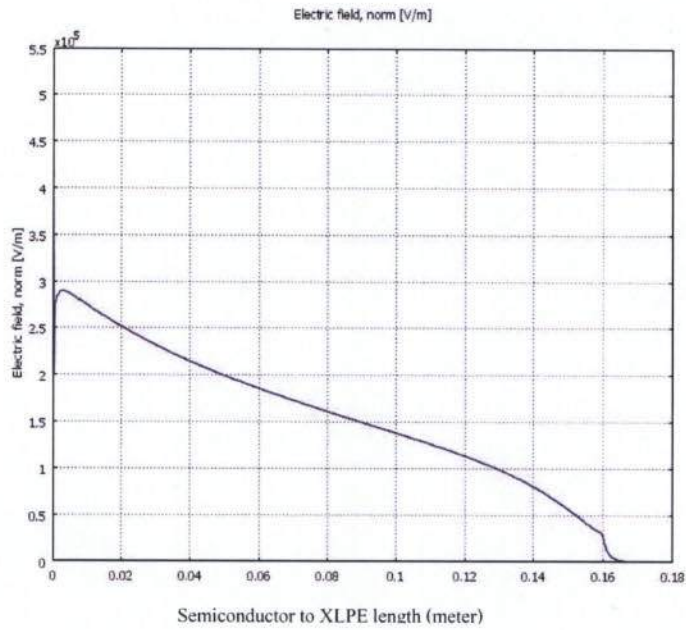
ที่ Menu Solve --> Solve Problem



รูปที่ 3.35 ระยะปลายสาย จาก XLPE ถึง Semiconductor ห่างกัน 160 mm

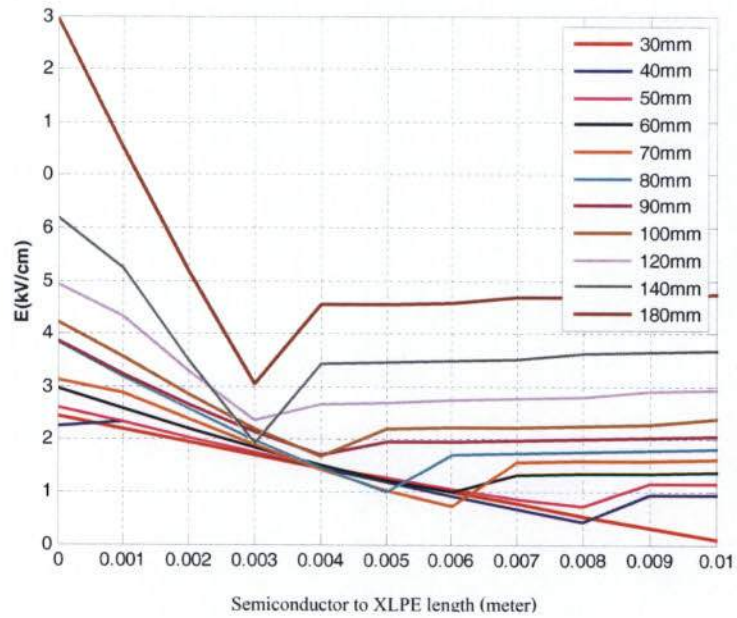
3.2.35 ทำตามข้อ 3.2.16 จากนั้นคลิก OK จะได้ Electric field บริเวณผิว XLPE ตามรูปที่

3.36



รูปที่ 3.36 ผลการวางไฟตามผิว XLPE ที่ระยะ 160 mm

3.2.36 นำผลที่ได้จากโปรแกรมมาเปรียบเทียบการเกิดการวางไฟตามผิว จะได้ดังรูปที่ 3.37 เลือกระยะที่ปกคลุม Semi conductor คือ 90 mm



รูปที่ 3.37 เปรียบเทียบการเกิดการวางไฟตามผิวจากโปรแกรม

3.3 ขั้นตอนการปกกฉนวนสายเคเบิลแรงสูง

เมื่อทราบระยะการปกสายเคเบิลในการทดสอบจากโปรแกรม COMSOL Multiphysics 3.3 จึงทำการปก โดยขั้นตอนการปกสายเคเบิลมีดังนี้

3.3.1. ทำการวัดระยะที่จะปกสายเคเบิลที่ได้จากผล Simulations แล้วใช้ เทปพันสายไฟพัน ระยะที่วัดไว้ (ควรใช้เทปที่มีสีแตกต่างจากสีของสายเคเบิลจะทำให้เห็นตำแหน่งที่ชัดเจน) ดังรูปที่

3.38



รูปที่ 3.38 วัดระยะที่จะปกสายเคเบิล ที่ได้จาก Simulations

3.3.2 . ใช้มีดคัดเตอร์กรีดลงบนผิวเปลือกนอก (Sheath) กดส่วนปลายของใบมีดคัดเตอร์ลงบนผิวเปลือกนอก (Sheath) ให้ใกล้ถึงส่วนที่เป็น Separator Tape โดยกรีดออกเป็นสองแนวในลักษณะแนวมุม 0 องศา และมุม 180 องศา เนื่องจากตอนลอกผิวเปลือกนอก (Sheath) จะต้องลอกออกทีละส่วน ดังรูปที่ 3.39



รูปที่ 3.39 การลอกผิวเปลือกนอก (Sheath)

3.3.3. เมื่อกรีดผิวเปลือกนอก (Sheath) ใช้ไขควงปากแบนงัดทางด้านปลายสายของผิวเปลือกนอก (Sheath) ให้เผยขึ้นแล้วทำการลอกออกตามระยะที่วัดไว้ จะเห็น Separator Tape ดังรูปที่ 3.40



รูปที่ 3.40 ทำการลอกผิวเปลือกนอก(Sheath) ออก

3.3.4. ทำการตัด Separator Tape ออกจะเห็น Copper Shield Tape (เป็นกราวด์ของสายไฟ) ดังรูปที่ 3.41



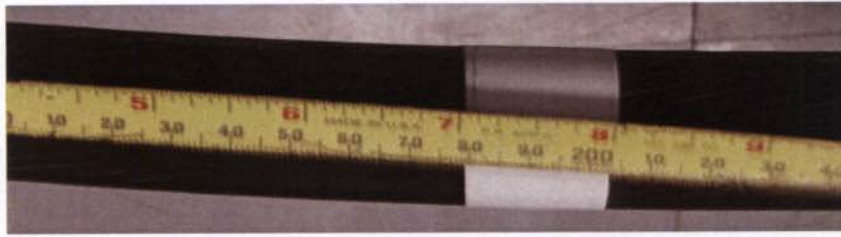
รูปที่ 3.41 Copper Shield Tape

3.3.5. ทำการเก็บ Copper Shield Tape (เป็นกราวด์ของสายไฟ) ให้เรียบร้อยเพื่อที่จะเตรียมการปกสายในส่วนของ Insulation Shield ดังรูปที่ 3.42



รูปที่ 3.42 ลักษณะการเก็บ Copper Shield Tape

3.3.6. ทำการวัดความยาวที่จะปอก Semi-Conducting Tape แล้วกำหนดตำแหน่งที่จะปอก Semi-Conducting Tape ออก (ระยะการปอกที่ได้จากการ Simulations) ดังรูปที่ 3.43



รูปที่ 3.43 วัดความยาวที่จะปอก Semi-Conducting Tape

3.3.7. นำปลายตัดเตอร์กรีดลงบนผิวของ Semi-Conducting Tape ให้ลึกลงไปในเนื้อ Semi-Conducting Tape พอประมาณให้สามารถลอกออกได้ แต่อย่าให้ถึง Insulation Shield เพราะจะทำให้เป็นรอย เพราะถ้า Insulation Shield เป็นรอย จะทำให้เกิด Partial Discharge (PD) ในการทดสอบได้ ดังรูปที่ 3.44



รูปที่ 3.44 การกรีดที่ผิวของ Semi-Conducting Tape

3.3.8. ใช้ไขควงปากแบนงัดที่ปลายสายของส่วน Semi-Conducting Tape ให้เผยออกดังรูปที่ 3.45



รูปที่ 3.45 ใช้ไขควงปากแบนงัดที่ปลายสาย

3.3.9. ทำการลอก Semi-Conducting Tape ออกตามรอยที่กรีดไว้เมื่อลอกออกจนถึงระยะที่ได้วัดความยาวไว้ ดังรูปที่ 3.46



รูปที่ 3.46 การลอก Semi-Conducting Tape ออก

3.3.10. ใช้มีดคัดเตอร์กรีดให้รอบเพื่อที่จะตัด Semi-Conducting Tape ที่ลอกออก ก็จะเห็น Insulation Shield ดังรูปที่ 3.47



รูปที่ 3.47 ตัด Semi-Conducting Tape ที่ลอกออก

3.3.11. ใช้คัดเตอร์ควั่น Insulation Shield ให้รอบจากนั้นจึงกรีดตามแนวยาวเพื่อให้ Insulation Shield เป็นรอยและแกะ Insulation Shield ที่หุ้มทองแดงออก ดังรูปที่ 3.48



รูปที่ 3.48 คั้วน Insulation Shield

3.3.12. ใช้ไขควงปากแบนงัดที่ปลายสายของด้าน Insulation Shield ที่คั้วนไว้ให้เผยอขึ้น จากนั้นใช้คีมบิดออกจะเห็นทองแดงของสายเคเบิลดังรูปที่ 3.49

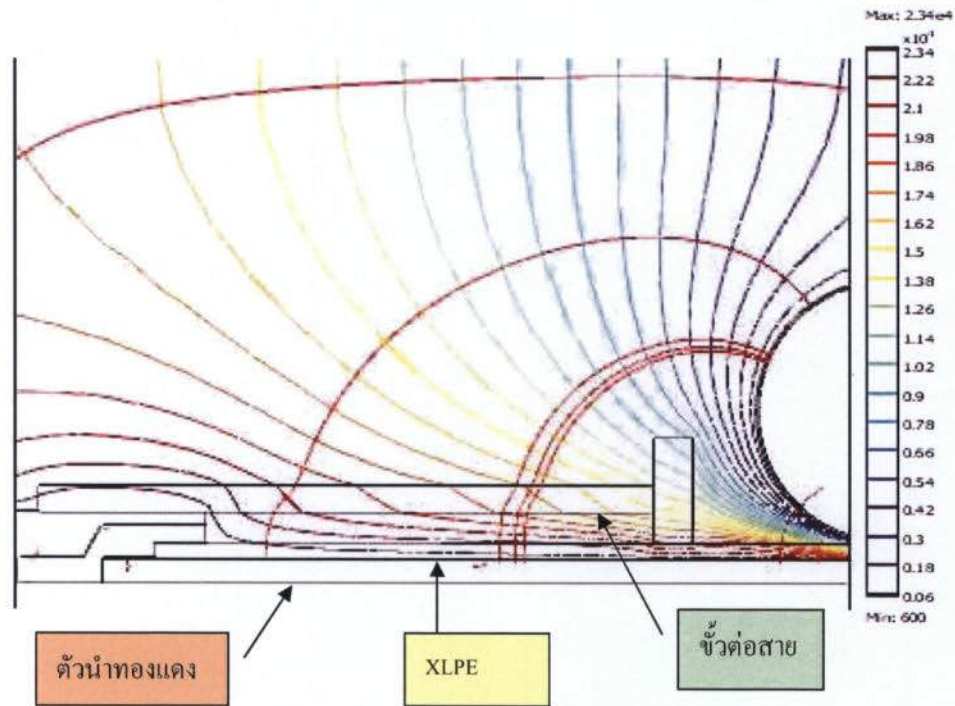


รูปที่ 3.49 งัด Insulation Shield ออก

3.4 การออกแบบการลดสนามไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอ

จากการที่มีการปกสายเคเบิลเพื่อป้องกันการรบกวนไฟตามผิวนั้นจะส่งผลต่อการกระจายของสนามไฟฟ้าภายในสายเคเบิล ซึ่งเป็นผลสืบเนื่องมาจากการปกชั้นกึ่งตัวนำนอกรอกออกไป ทำให้เกิดความไม่สม่ำเสมอสูงบริเวณขอบของชั้นกึ่งตัวนำนอกรอก และจะนำไปสู่การเกิดเบรกดาวน์ที่บริเวณชั้นกึ่งตัวนำนอกรอกได้ในที่สุด

แต่จากการที่มีการปกสายเคเบิลให้มีระยะห่างระหว่างแรงดันสูงกับกราวด์เพื่อป้องกันการเกิดการรบกวนไฟตามผิว ซึ่งในการปกสายนั้นจำเป็นที่จะต้องปกชั้นกึ่งตัวนำนอกรอกไปด้วย ปัญหาที่จะเกิดขึ้นตามมาคือสนามไฟฟ้าที่ขอบของชั้นกึ่งตัวนำนอกรอกจะเกิดความไม่สม่ำเสมอสูง (ในสายเคเบิลปกติสนามไฟฟ้าจะกระจายอยู่อย่างสม่ำเสมอในฉนวน ระหว่างตัวนำและชั้นกึ่งตัวนำนอกรอก) ซึ่งจะนำไปสู่การเบรกดาวน์ในฉนวนได้ จึงจำเป็นต้องควบคุมสนามไฟฟ้าบริเวณนั้นให้เกิดความไม่สม่ำเสมอให้น้อยที่สุด โดยวิธีการควบคุมสนามไฟฟ้า



รูปที่ 3.50 แสดงการกระจายของเส้นศักย์ไฟฟ้าในสายเคเบิลที่ตัดชั้นกึ่งตัวนำนอกบางส่วนออก

การเกิดสนามไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอในบริเวณชั้นกึ่งตัวนำนอกนั้นอาจจะทำให้เกิดการดีสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge) ได้ และจะนำไปสู่การเกิดเบรกดาวน์อย่างสมบูรณ์ (Completed Breakdown) ซึ่งจะทำให้สายเคเบิลที่นำมาทดสอบนั้นเกิดความเสียหายได้ การแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นนี้สามารถทำได้ โดยการยึดเส้นศักย์ไฟฟ้าที่หนาแน่นบริเวณขอบของชั้นกึ่งตัวนำนอกออกไป ซึ่งจะทำให้สนามไฟฟ้าในบริเวณขอบของชั้นกึ่งตัวนำนอกหลังจากยึดเส้นศักย์ไฟฟ้าแล้วมีค่าความไม่สม่ำเสมอลดลง ในการยึดเส้นศักย์ไฟฟ้านั้นสามารถใช้น้ำบริสุทธิ์, น้ำมัน, หรือสารฉนวนอย่างอื่นก็ได้ ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ฉนวนก๊าซ SF_6 เป็นตัวช่วยในการยึดเส้นศักย์ไฟฟ้า เพื่อให้ฉนวนของสายเคเบิลมีความเครียดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอขึ้น หลังจากทำการยึดเส้นศักย์ไฟฟ้าในฉนวนของสายเคเบิลแล้ว จะทำให้สนามไฟฟ้าบริเวณของชั้นกึ่งตัวนำนอกนั้นมีความไม่สม่ำเสมอลดลง ซึ่งจะทำให้ไม่เกิดการดีสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge) ขึ้นในชั้นฉนวน XLPE ของสายเคเบิล หรือเกิดขึ้นน้อยลง การควบคุมสนามไฟฟ้าโดยวิธี Refractive Stress Control โดยการเพิ่มเติมชั้นฉนวนที่มีค่าไดอิเล็กตริกสูงๆ ไว้รอบสายเคเบิล เหมือนกับการหุ้มฉนวนที่ตัวสายเคเบิล โดยในการเลือกฉนวนนั้นจะใช้ฉนวนก๊าซ SF_6 ที่มีค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ที่ประมาณ 1.00191 อาจเปลี่ยนแปลงได้ขึ้นอยู่กับสภาพของอุณหภูมิ การฉนวนทางไฟฟ้าแรงสูงจะมีการใช้วัสดุฉนวนหลายชนิดประกอบกัน ซึ่งฉนวนต่างๆ ที่ใช้จะมีค่าเปอร์มิตติวิตีต่างกัน ไปการที่ต้องใช้วัสดุฉนวนต่างชนิดสาเหตุสำคัญคือคุณสมบัติทางกลศาสตร์ การวิเคราะห์การกระจายสนามไฟฟ้าที่ถูกต้องต้องใช้กรรมวิธีเชิงตัวเลขคำนวณหรือทำการ

ทดลอง จากสภาพก๊าซ SF₆ ที่มีค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ที่ประมาณ 1.00191 จึงสามารถนำมาเป็นฉนวนห่อหุ้มเพื่อลดการกระจายสนามไฟฟ้าให้ได้มากที่สุด ซึ่งจะมีการลดการกระจายสนามไฟฟ้าใกล้เคียงกับฉนวน XLPE ซึ่งจะกล่าวถึงในส่วนของการออกแบบหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่ออะคลิลิคต่อไป

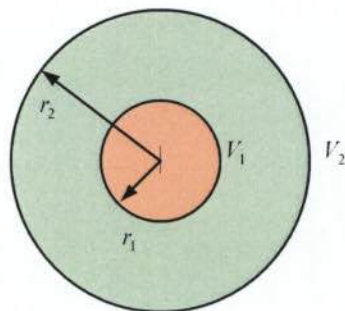
3.5 การออกแบบหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่ออะคลิลิค

มิติที่เหมาะสมของทรงกระบอกซ้อนกันแกนร่วม คือ มิติที่เล็กที่สุดที่สามารถทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ได้สูงสุดและไม่เกิดโคโรน่า แรงดันเบรกดาวน์ของอิเล็กโตรดทรงกระบอกซ้อนกันแกนร่วมหาได้จากและทฤษฎีทรงกระบอกซ้อนกันแกนร่วมที่เหมาะสมนั้นจะคำนวณขนาดของกระบอกได้ โดยหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของขั้วต่อสายเคเบิลได้ จากสมการที่ 3.1

$$\left(\frac{r_1}{r_2} \right)_{opt} = \frac{1}{e} \quad (3.1)$$

โดยที่ r_1 คือ รัศมีของอิเล็กโตรดใน

r_2 คือ รัศมีของอิเล็กโตรดนอก



รูปที่ 3.51 อิเล็กโตรดทรงกระบอกซ้อนกันแกนร่วม

เส้นผ่านศูนย์กลางของขั้วต่อสายเคเบิล จากรูป 52 สามารถหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของขั้วต่อสายเคเบิลได้ จากสมการที่ 3.1 โดย r_1 คือรัศมีของตัวนำมีค่าเท่ากับ 0.95 cm และ r_2 คือรัศมีของขั้วต่อสายจะได้

$$\begin{aligned} r_{2opt} &= r_1 \times e \\ &= 0.95 \times \left(\frac{1}{0.368} \right) \\ &= 2.5 \text{ cm} \end{aligned}$$

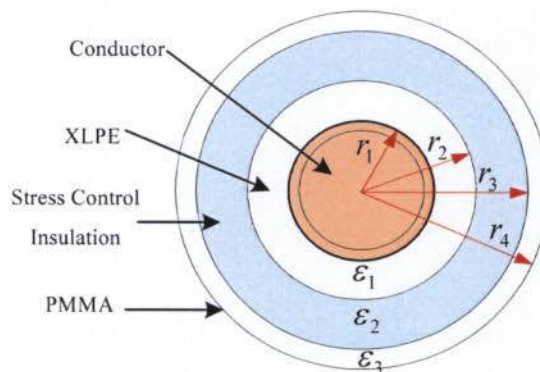
ดังนั้นเส้นผ่านศูนย์กลางของขั้วต่อสายเท่ากับ $2.5 \text{ cm} \times 2 = 5 \text{ cm}$

3.6 การควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้า

สนามไฟฟ้าในฉนวนเคเบิลแรงสูง การใช้งานที่มีค่า ϵ_r ต่างกันเหมาะที่จะใช้กับสมการไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ ซึ่งจะช่วยให้ความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนแต่ละชั้นที่มีค่า ϵ_r ต่างกันให้มีค่าใกล้เคียงกัน ความเครียดสนามไฟฟ้าในเนื้อฉนวนที่รัศมีใดๆ คำนวณได้จากสมการที่ 3.2

$$E(r) = \frac{2\pi U}{\left(\frac{1}{\epsilon_1} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\epsilon_2} \ln \frac{r_3}{r_2} + \frac{1}{\epsilon_3} \ln \frac{r_4}{r_3} \right)} \times \left(\frac{1}{2\pi r \epsilon_i} \right) \quad (3.2)$$

- โดยที่ $E(r)$ คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนที่รัศมี r (kV/cm)
 U คือ แรงดันไฟฟ้าที่ป้อน (kV)
 $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ คือ เปรอริมิคตีวดีของฉนวนชั้นที่ 1, 2 และ 3
 r_1 คือ รัศมีของตัวนำ (mm)
 r_2, r_3, r_4 คือ รัศมีของฉนวนชั้นที่ 1, 2 และ 3 (cm)



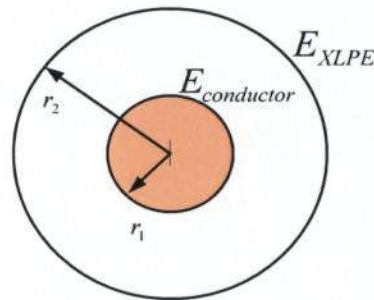
รูปที่ 3.52 องค์ประกอบการคำนวณสนามไฟฟ้าที่สายเคเบิลในลักษณะทรงกระบอกแกนร่วม

จากสมการที่ 3.2 สามารถคำนวณหาความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิว XLPE (E_{r_2}) และที่ผิวของขั้วต่อสายด้านใน คือ (E_{r_3}) โดยใช้แรงดันทดสอบสูงสุดตามมาตรฐาน IEC 60502-2 คือ แรงดัน 24 KV

3.6.1 การออกแบบและการควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้า (สายขนาด 240 sq.mm)

ค่าความเค้นสนามไฟฟ้า (Electric stress) ของสายเคเบิล ที่พื้นผิวตัวนำและพื้นผิวฉนวน XLPE สามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ 3.3

$$E_r = \frac{U}{r \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \quad (3.3)$$



รูปที่ 3.53 ความเค้นสนามไฟฟ้าที่สาย 240 sq.mm

โดยที่ E_r คือ ความเค้นสนามไฟฟ้าที่พื้นผิวรัศมี r

r_1 คือ รัศมีของตัวนำ

r_2 คือ รัศมีของ XLPE

ความเค้นสนามไฟฟ้าที่พื้นผิวตัวนำและพื้นผิว XLPE หาได้จากสมการ 3.3 คือ

$$\begin{aligned} E_{conductor} &= \frac{24000}{0.95 \ln\left(\frac{1.5}{0.95}\right)} \\ &= 55.309 \text{ kV/cm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_{XLPE} &= \frac{24000}{1.5 \ln\left(\frac{1.5}{0.95}\right)} \\ &= 35.029 \text{ kV/cm} \end{aligned}$$

1) ใช้อากาศควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้า
ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่รัศมีของตัวนำ คือ E_n หาได้จาก

$$E_{(r_1)} = \left(\frac{(2\pi \times 24000)}{\left(\frac{1}{2.3} \ln \frac{1.5}{0.95} + \frac{1}{1.00054} \ln \frac{2.5}{1.5} + \frac{1}{3} \ln \frac{3}{2.5} \right)} \right) \times \left(\frac{1}{2\pi \times 0.95 \times 2.3} \right)$$

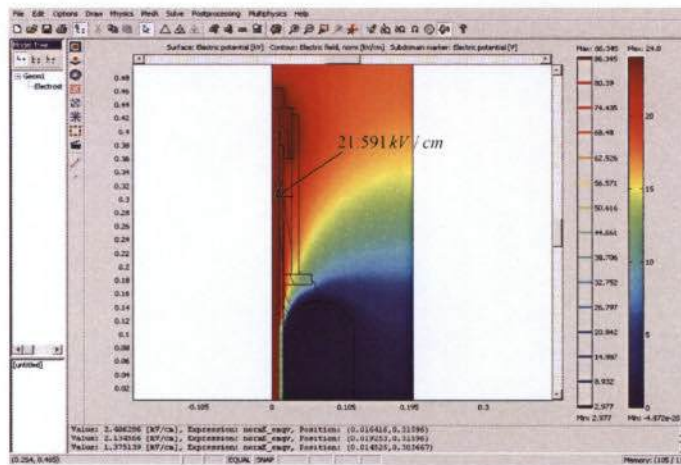
$$= 14.266 \text{ kV/cm}$$

ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่รัศมีของฉนวน XLPE คือ E_{r_2} หาได้จาก

$$E_{(r_2)} = \left(\frac{(2\pi \times 24000)}{\left(\frac{1}{2.3} \ln \frac{1.5}{0.95} + \frac{1}{1.00054} \ln \frac{2.5}{1.5} + \frac{1}{3} \ln \frac{3}{2.5} \right)} \right) \times \left(\frac{1}{2\pi \times 1.5 \times 1.00054} \right)$$

$$= 20.769 \text{ kV/cm}$$

และผลการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์การกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิว XLPE (E_{r_2}) ใน Program COMSOL Multiphysics 3.3 จะได้ดังรูปที่ 3.54 ค่า $E_{r_2} = 21.591 \text{ kV/cm}$



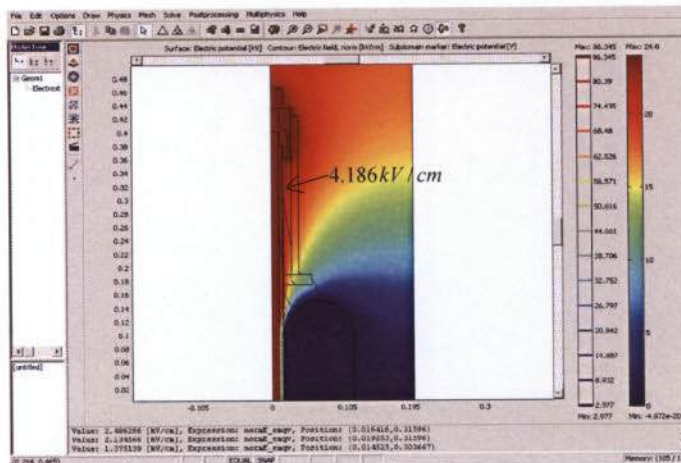
รูปที่ 3.54 ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิว E_{r_2} ฉนวนก๊าซ คือ อากาศที่สายขนาด 240 sq.mm

นำค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับค่าคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จาก Program COMSOL Multiphysics 3.3 ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าในชั้นฉนวนที่รัศมีของฉนวน XLPE มีค่าใกล้เคียงกัน และ ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่รัศมีของฉนวน อากาศคือ E_{r_3} หาได้จาก

$$E(r_3) = \left(\frac{(2\pi \times 24000)}{\left(\frac{1}{2.3} \ln \frac{1.5}{0.95} + \frac{1}{1.00054} \ln \frac{2.5}{1.5} + \frac{1}{3} \ln \frac{3}{2.5} \right)} \right) \times \left(\frac{1}{2\pi \times 2.5 \times 3} \right)$$

$$= 4.156 \text{ kV/cm}$$

และผลการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์การกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิวภายในขั้วต่อสายเคเบิล (E_{r_3}) ใน Program COMSOL Multiphysics 3.3 จะได้ดังรูปที่ 3.55 ค่า $E_{r_3} = 4.186 \text{ kV/cm}$



รูปที่ 3.55 ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิว E_{r_3} จนวนก๊าซ คือ อากาศที่สายขนาด 240 sq.mm

นำค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับค่าคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จาก Program COMSOL Multiphysics 3.3 ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าในชั้นฉนวนที่รัศมีของผิวภายในขั้วต่อสายเคเบิลมีค่าใกล้เคียงกัน

2) ใช้สมการควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้า

ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่รัศมีของตัวนำ คือ E_{r_1} หาได้จาก

$$E(r_1) = \left(\frac{(2\pi \times 24000)}{\left(\frac{1}{2.3} \ln \frac{1.5}{0.95} + \frac{1}{1} \ln \frac{2.5}{1.5} + \frac{1}{3} \ln \frac{3}{2.5} \right)} \right) \times \left(\frac{1}{2\pi \times 0.95 \times 2.3} \right)$$

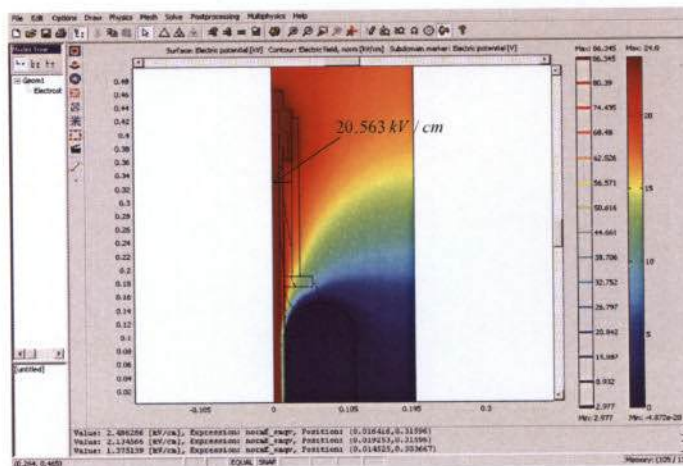
$$= 14.267 \text{ kV/cm}$$

ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่รัศมีของฉนวน XLPE คือ E_{r_2} หาได้จาก

$$E_{(r_2)} = \left(\frac{2\pi \times 24000}{\left(\frac{1}{2.3} \ln \frac{1.5}{0.95} + \frac{1}{1} \ln \frac{2.5}{1.5} + \frac{1}{3} \ln \frac{3}{2.5} \right)} \right) \times \left(\frac{1}{2\pi \times 1.5 \times 1} \right)$$

$$= 20.774 \text{ kV/cm}$$

และผลการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์การกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิว XLPE (E_{r_2}) ใน Program COMSOL Multiphysics 3.3 จะได้ดังรูปที่ 3.56 ค่า $E_{r_2} = 20.563 \text{ kV/cm}$



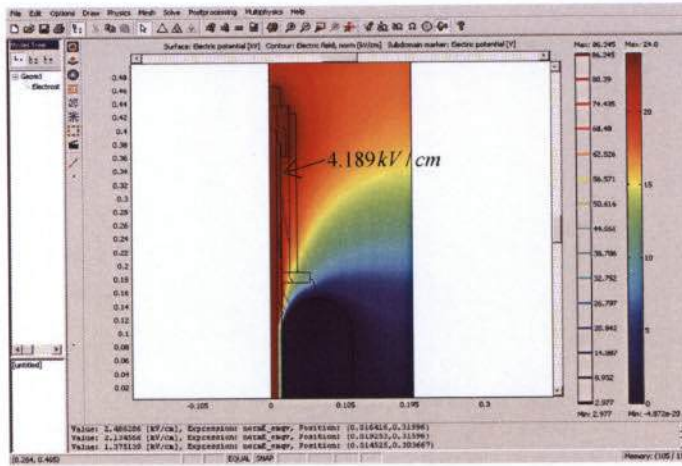
รูปที่ 3.56 ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิว E_{r_2} ฉนวนก๊าซ คือ สูญญากาศที่สายขนาด 240 sq.mm

นำค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับผลการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จาก Program COMSOL Multiphysics 3.3 ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าในชั้นฉนวนที่รัศมีของฉนวน XLPE มีค่าใกล้เคียงกัน และ ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่รัศมีของสูญญากาศคือ E_{r_3} หาได้จาก

$$E_{(r_3)} = \left(\frac{2\pi \times 24000}{\left(\frac{1}{2.3} \ln \frac{1.5}{0.95} + \frac{1}{1} \ln \frac{2.5}{1.5} + \frac{1}{3} \ln \frac{3}{2.5} \right)} \right) \times \left(\frac{1}{2\pi \times 2.5 \times 3} \right)$$

$$= 4.154 \text{ kV/cm}$$

และผลการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์การกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิวภายในหัวต่อสายเคเบิล (E_{r_3}) ใน Program COMSOL Multiphysics 3.3 จะได้ดังรูปที่ 3.57 ค่า $E_{r_3} = 4.189 \text{ kV/cm}$



รูปที่ 3.57 ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิว E_{r_3} ฉนวนก๊าซ คือ สูญญากาศที่สายขนาด 240 sq.mm

นำค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับค่าคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จาก Program COMSOL Multiphysics 3.3 ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าในชั้นฉนวนที่รัศมีของผิวภายใน ขั้วต่อสายเคเบิลมีค่าใกล้เคียงกัน

3) ใช้ก๊าซ SF_6 ควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้า
ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่รัศมีของตัวนำ คือ E_{r_1} หาได้จาก

$$E_{(r_1)} = \left(\frac{(2\pi \times 24000)}{\left(\frac{1}{2.3} \ln \frac{1.5}{0.95} + \frac{1}{1.00191} \ln \frac{2.5}{1.5} + \frac{1}{3} \ln \frac{3}{2.5} \right)} \right) \times \left(\frac{1}{2\pi \times 0.95 \times 2.3} \right)$$

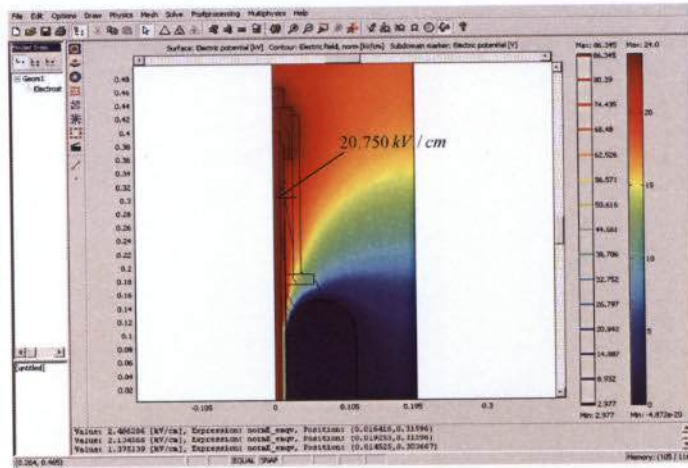
$$= 14.279 \text{ kV/cm}$$

ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่รัศมีของฉนวน XLPE คือ E_{r_2} หาได้จาก

$$E_{(r_2)} = \left(\frac{(2\pi \times 24000)}{\left(\frac{1}{2.3} \ln \frac{1.5}{0.95} + \frac{1}{1.00191} \ln \frac{2.5}{1.5} + \frac{1}{3} \ln \frac{3}{2.5} \right)} \right) \times \left(\frac{1}{2\pi \times 1.5 \times 1.00191} \right)$$

$$= 20.760 \text{ kV/cm}$$

และผลการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์การกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิว XLPE (E_{r_2}) ใน Program COMSOL Multiphysics 3.3 จะได้ดังรูปที่ 3.58 ค่า $E_{r_2} = 20.750 \text{ kV/cm}$



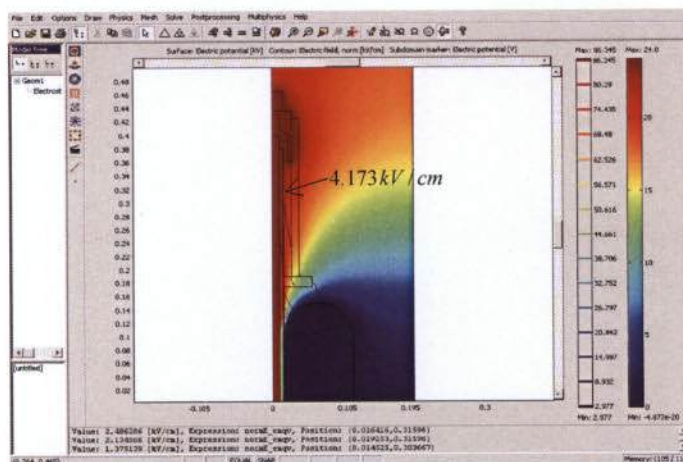
รูปที่ 3.58 ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิว E_{r_2} ฉนวนก๊าซ คือ SF₆ ที่สายขนาด 240 sq.mm

นำค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการวิเคราะห์ที่เปรียบเทียบกับค่าการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์จาก Program COMSOL Multiphysics 3.3 ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าในชั้นฉนวนที่รัศมีของฉนวน XLPE มีค่าใกล้เคียงกัน ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่รัศมีของฉนวน ก๊าซ SF₆ คือ E_{r_3} หาได้จาก

$$E_{(r_3)} = \left(\frac{2\pi \times 24000}{\left(\frac{1}{2.3} \ln \frac{1.5}{0.95} + \frac{1}{1.00191} \ln \frac{2.5}{1.5} + \frac{1}{3} \ln \frac{3}{2.5} \right)} \right) \times \left(\frac{1}{2\pi \times 2.5 \times 3} \right)$$

$$= 4.160 \text{ kV/cm}$$

และผลการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์การกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิวภายในขั้วต่อสายเคเบิล (E_{r_3}) ใน Program COMSOL Multiphysics 3.3 จะได้ดังรูปที่ 3.59 ค่า $E_{r_3} = 4.173 \text{ kV/cm}$



รูปที่ 3.59 ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิว E_{r_3} ฉนวนก๊าซ คือ SF₆ ที่สายขนาด 240 sq.mm

นำค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับกรคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จาก Program COMSOL Multiphysics 3.3 ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าในชั้นฉนวนที่รัศมีของผิวภายใน ขั้วต่อสายเคเบิลมีค่าใกล้เคียงกัน

3.6.2 การออกแบบและการจำลองการกระจาย สนามไฟฟ้า (สาย 185 sq.mm) ความเค้น สนามไฟฟ้าที่พื้นผิวดำนำและพื้นผิว XLPE หาได้จากสมการ 3.3 คือ

$$E_{conductor} = \frac{24000}{0.85 \ln\left(\frac{1.45}{0.85}\right)}$$

$$= 52.866 \text{ kV/cm}$$

$$E_{XLPE} = \frac{24000}{1.5 \ln\left(\frac{1.45}{0.85}\right)}$$

$$= 30.990 \text{ kV/cm}$$

1) ใช้อากาศควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้า ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่รัศมีของ ตัวนำ คือ E_{r_1} หาได้จาก

$$E(r_1) = \left(\frac{(2\pi \times 24000)}{\left(\frac{1}{2.3} \ln \frac{1.45}{0.85} + \frac{1}{1.00054} \ln \frac{2.5}{1.45} + \frac{1}{3} \ln \frac{3}{2.5} \right)} \right) \times \left(\frac{1}{2\pi \times 0.85 \times 2.3} \right)$$

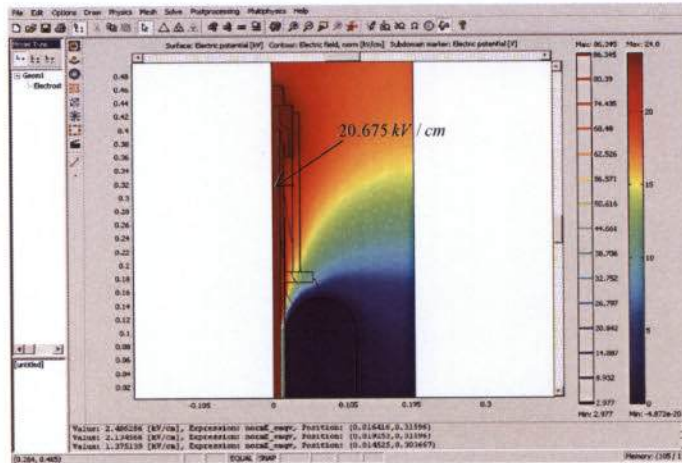
$$= 14.659 \text{ kV/cm}$$

ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่รัศมีของฉนวน XLPE คือ E_{r_2} หาได้จาก

$$E(r_2) = \left(\frac{(2\pi \times 24000)}{\left(\frac{1}{2.3} \ln \frac{1.45}{0.85} + \frac{1}{1.00054} \ln \frac{2.5}{1.45} + \frac{1}{3} \ln \frac{3}{2.5} \right)} \right) \times \left(\frac{1}{2\pi \times 1.45 \times 1.00054} \right)$$

$$= 19.754 \text{ kV/cm}$$

และผลการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์การกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิว XLPE (E_{r_2}) ใน Program COMSOL Multiphysics 3.3 จะได้ดังรูปที่ 3.60 ค่า $E_{r_2} = 20.675 \text{ kV/cm}$



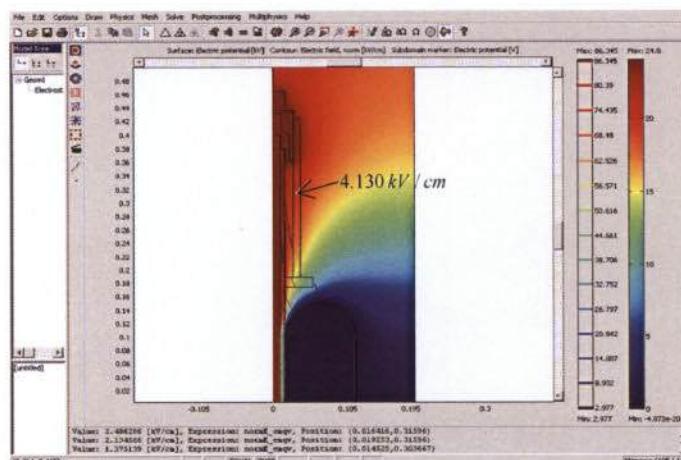
รูปที่ 3.60 ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิว (E_2) ฉนวนก๊าซ คือ อากาศที่สายขนาด 185 sq.mm

นำค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับค่าคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จาก Program COMSOL Multiphysics 3.3 ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าในชั้นฉนวนที่รัศมีของฉนวน XLPE มีค่าใกล้เคียงกัน ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่รัศมีของฉนวน อากาศ คือ E_3 หาได้จาก

$$E_3 = \left(\frac{(2\pi \times 24000)}{\left(\frac{1}{2.3} \ln \frac{1.45}{0.85} + \frac{1}{1.00054} \ln \frac{2.5}{1.45} + \frac{1}{3} \ln \frac{3}{2.5} \right)} \right) \times \left(\frac{1}{2\pi \times 2.5 \times 3} \right)$$

$$= 3.821 \text{ kV/cm}$$

และผลการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์การกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิวภายในขั้วต่อสายเคเบิล (E_3) ใน Program COMSOL Multiphysics 3.3 จะได้ดังรูปที่ 3.61 ค่า $E_3 = 4.130 \text{ kV/cm}$



รูปที่ 3.61 ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิว E_3 ฉนวนก๊าซ คือ อากาศที่สายขนาด 185 sq.mm

นำค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จาก Program COMSOL Multiphysics 3.3 ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าในชั้นฉนวนที่รัศมีของผิวภายใน ขั้วต่อสายเคเบิลมีค่าใกล้เคียงกัน

2) ใช้สุญญากาศ ควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้า

ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่รัศมีของตัวนำ คือ E_{r_1} หาได้จาก

$$E_{(r_1)} = \left(\frac{(2\pi \times 24000)}{\left(\frac{1}{2.3} \ln \frac{1.45}{0.85} + \frac{1}{1} \ln \frac{2.5}{1.45} + \frac{1}{3} \ln \frac{3}{2.5} \right)} \right) \times \left(\frac{1}{2\pi \times 0.85 \times 2.3} \right)$$

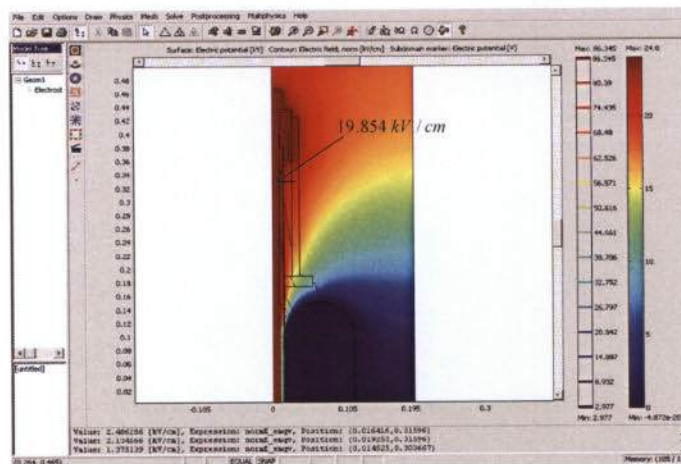
$$= 14.654 \text{ kV/cm}$$

ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่รัศมีของฉนวน XLPE คือ E_{r_2} หาได้จาก

$$E_{(r_2)} = \left(\frac{(2\pi \times 24000)}{\left(\frac{1}{2.3} \ln \frac{1.45}{0.85} + \frac{1}{1} \ln \frac{2.5}{1.45} + \frac{1}{3} \ln \frac{3}{2.5} \right)} \right) \times \left(\frac{1}{2\pi \times 1.45 \times 1} \right)$$

$$= 19.758 \text{ kV/cm}$$

และผลการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์การกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิว XLPE (E_{r_2}) ใน Program COMSOL Multiphysics 3.3 จะได้ดังรูปที่ 3.62 ค่า $E_{r_2} = 19.854 \text{ kV/cm}$



รูปที่ 3.62 ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิว E_{r_2} ฉนวนก๊าซ คือ สุญญากาศที่สายขนาด 185 sq.mm

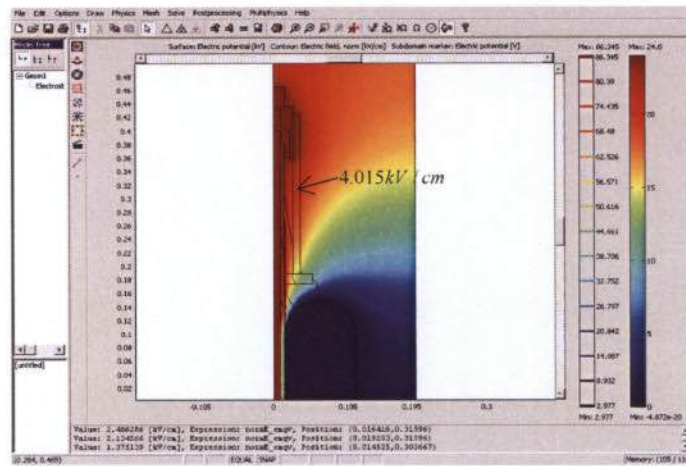
นำค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จาก Program COMSOL Multiphysics 3.3 ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าในชั้นฉนวนที่รัศมีของฉนวน XLPE

มีค่าใกล้เคียงกัน และ ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่รัศมีของฉนวนสูญญากาศ คือ E_{r_3} หาได้จาก

$$E(r_3) = \left(\frac{2\pi \times 24000}{\left(\frac{1}{2.3} \ln \frac{1.45}{0.85} + \frac{1}{1} \ln \frac{2.5}{1.45} + \frac{1}{3} \ln \frac{3}{2.5} \right)} \right) \times \left(\frac{1}{2\pi \times 2.5 \times 3} \right)$$

$$= 3.819 \text{ kV/cm}$$

และผลการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์การกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิวภายในขั้วต่อสายเคเบิล (E_{r_3}) ใน Program COMSOL Multiphysics 3.3 จะได้ดังรูปที่ 3.63 ค่า $E_{r_3} = 4.015 \text{ kV/cm}$



รูปที่ 3.63 ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิว E_{r_3} ฉนวนก๊าซ คือ สูญญากาศที่สายขนาด 185 sq.mm

นำค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์จาก Program COMSOL Multiphysics 3.3 ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าในชั้นฉนวนที่รัศมีของผิวภายในขั้วต่อสายเคเบิลมีค่าใกล้เคียงกัน

3) ใช้ก๊าซ SF₆ ควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้า

ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่รัศมีของตัวนำ คือ E_{r_1} หาได้จาก

$$E(r_1) = \left(\frac{2\pi \times 24000}{\left(\frac{1}{2.3} \ln \frac{1.45}{0.85} + \frac{1}{1.00191} \ln \frac{2.5}{1.45} + \frac{1}{3} \ln \frac{3}{2.5} \right)} \right) \times \left(\frac{1}{2\pi \times 0.85 \times 2.3} \right)$$

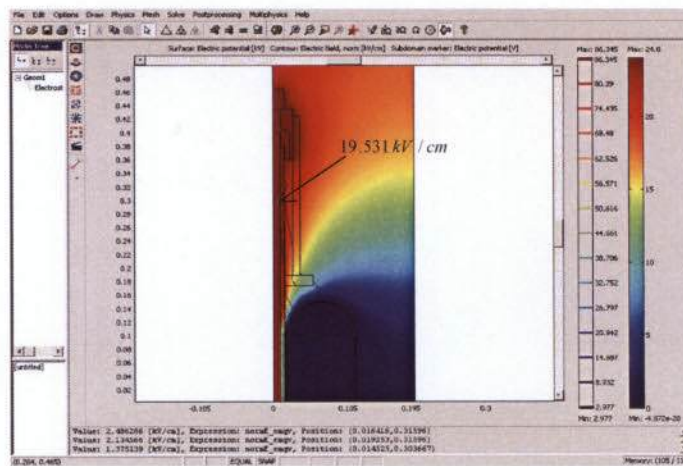
$$= 14.672 \text{ kV/cm}$$

ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่รัศมีของฉนวน XLPE คือ E_{r_2} หาได้จาก

$$E(r_2) = \left(\frac{(2\pi \times 24000)}{\left(\frac{1}{2.3} \ln \frac{1.45}{0.85} + \frac{1}{1.00191} \ln \frac{2.5}{1.45} + \frac{1}{3} \ln \frac{3}{2.5} \right)} \right) \times \left(\frac{1}{2\pi \times 1.45 \times 1.00191} \right)$$

$$= 19.745 \text{ kV/cm}$$

และผลการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์การกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิว XLPE (E_{r_2}) ใน Program COMSOL Multiphysics 3.3 จะได้ดังรูปที่ 3.64 ค่า $E_{r_2} = 19.531 \text{ kV/cm}$



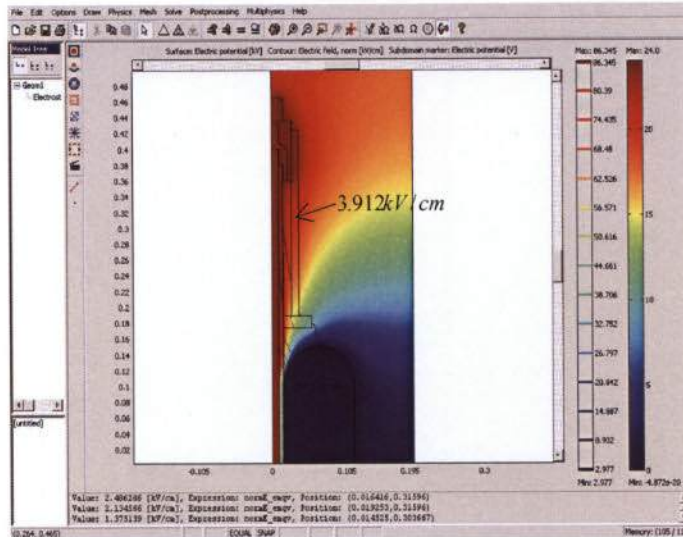
รูปที่ 3.64 ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิว E_{r_2} ฉนวนก๊าซ คือ SF₆ ที่สายขนาด 185 sq.mm

นำค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับค่าการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จาก Program COMSOL Multiphysics 3.3 ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าในชั้นฉนวนที่รัศมีของฉนวน XLPE มีค่าใกล้เคียงกัน และ ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่รัศมีของฉนวน ก๊าซ SF₆ คือ E_{r_3} หาได้จาก

$$E(r_3) = \left(\frac{(2\pi \times 24000)}{\left(\frac{1}{2.3} \ln \frac{1.45}{0.85} + \frac{1}{1.00191} \ln \frac{2.5}{1.45} + \frac{1}{3} \ln \frac{3}{2.5} \right)} \right) \times \left(\frac{1}{2\pi \times 2.5 \times 3} \right)$$

$$= 3.824 \text{ kV/cm}$$

และผลการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์การกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิวภายในขั้วต่อสายเคเบิล (E_{r_3}) ใน Program COMSOL Multiphysics 3.3 จะได้ดังรูปที่ 3.65 ค่า $E_{r_3} = 3.912 \text{ kV/cm}$



รูปที่ 3.65 ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิว E_{r_3} ฉนวนก๊าซ คือ SF₆ ที่สายขนาด 185 sq.mm

นำค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับค่าจากการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จาก Program COMSOL Multiphysics 3.3 ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าในชั้นฉนวนที่รัศมีของผิวภายใน ขั้วต่อสายเคเบิลมีค่าใกล้เคียงกัน

3.6.3 การออกแบบและการจำลองการกระจาย สนามไฟฟ้า (สาย 150 sq.mm) ความเค้นสนามไฟฟ้าที่พื้นผิวดำนำและพื้นผิว XLPE หาได้จากสมการ 3.3 คือ

$$E_{conductor} = \frac{24000}{0.75 \ln\left(\frac{1.35}{0.75}\right)}$$

$$= 54.441 \text{ kV/cm}$$

$$E_{XLPE} = \frac{24000}{1.35 \ln\left(\frac{1.35}{0.75}\right)}$$

$$= 30.245 \text{ kV/cm}$$

1) ใช้โอกาสควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้า
ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่รัศมีของตัวนำ คือ E_{r_1} หาได้จาก

$$E(r_1) = \left(\frac{2\pi \times 24000}{\left(\frac{1}{2.3} \ln \frac{1.35}{0.75} + \frac{1}{1.00054} \ln \frac{2.5}{1.35} + \frac{1}{3} \ln \frac{3}{2.5} \right)} \right) \times \left(\frac{1}{2\pi \times 0.75 \times 2.3} \right)$$

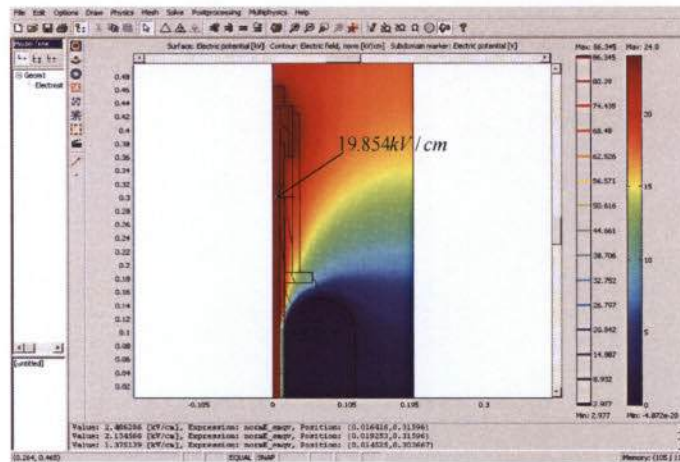
$$= 14.925 \text{ kV/cm}$$

ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่รัศมีของฉนวน XLPE คือ E_{r_2} หาได้จาก

$$E(r_2) = \left(\frac{2\pi \times 24000}{\left(\frac{1}{2.3} \ln \frac{1.35}{0.75} + \frac{1}{1.00054} \ln \frac{2.5}{1.35} + \frac{1}{3} \ln \frac{3}{2.5} \right)} \right) \times \left(\frac{1}{2\pi \times 1.35 \times 1.00054} \right)$$

$$= 19.060 \text{ kV/cm}$$

และผลการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์การกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิว XLPE (E_{r_2}) ใน Program COMSOL Multiphysics 3.3 จะได้ดังรูปที่ 3.66 ค่า $E_{r_2} = 19.854 \text{ kV/cm}$



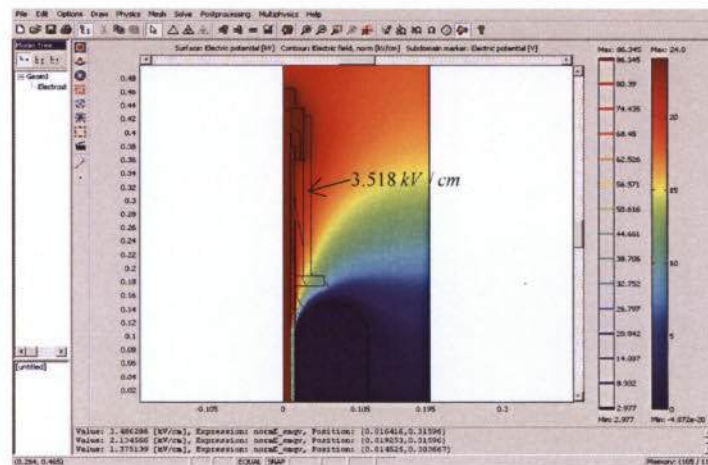
รูปที่ 3.66 ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิว E_{r_2} ฉนวนก๊าซ คือ อากาศที่สายขนาด 150 sq.mm

นำค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับค่าการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์จาก Program COMSOL Multiphysics 3.3 ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าในชั้นฉนวนที่รัศมีของฉนวน XLPE มีค่าใกล้เคียงกัน และค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่รัศมีของฉนวนอากาศคือ E_{r_3} หาได้จาก

$$E(r_3) = \left(\frac{(2\pi \times 24000)}{\left(\frac{1}{2.3} \ln \frac{1.35}{0.75} + \frac{1}{1.00054} \ln \frac{2.5}{1.35} + \frac{1}{3} \ln \frac{3}{2.5} \right)} \right) \times \left(\frac{1}{2\pi \times 2.5 \times 3} \right)$$

$$= 3.432 \text{ kV/cm}$$

และผลการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์การกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิวภายในขั้วต่อสายเคเบิล (E_{r_3}) ใน Program COMSOL Multiphysics 3.3 จะได้ดังรูปที่ 3.67 ค่า $E_{r_3} = 3.518 \text{ kV/cm}$



รูปที่ 3.67 ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิว E_{r_3} ฉนวนก๊าซ คือ อากาศที่สายขนาด 150 sq.mm

นำค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับค่าการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์จาก Program COMSOL Multiphysics 3.3 ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าในชั้นฉนวนที่รัศมีของผิวภายในขั้วต่อสายเคเบิลมีค่าใกล้เคียงกัน

- 2) ให้สูญญากาศ ควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้า
- ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่รัศมีของตัวนำ คือ E_{r_1} หาได้จาก

$$E(r_1) = \left(\frac{(2\pi \times 24000)}{\left(\frac{1}{2.3} \ln \frac{1.35}{0.75} + \frac{1}{1} \ln \frac{2.5}{1.35} + \frac{1}{3} \ln \frac{3}{2.5} \right)} \right) \times \left(\frac{1}{2\pi \times 0.75 \times 2.3} \right)$$

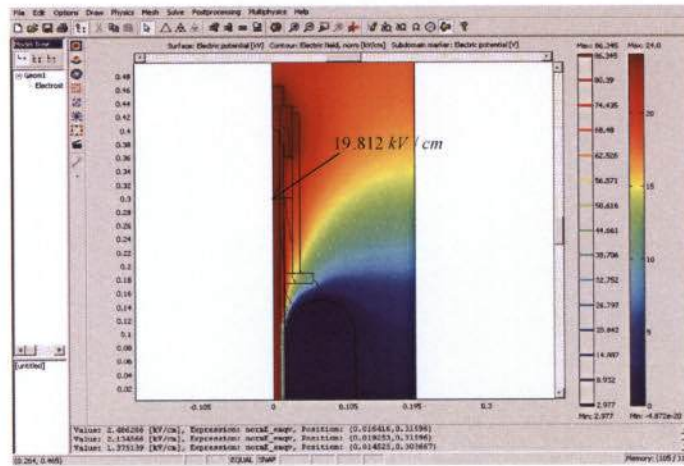
$$= 14.919 \text{ kV/cm}$$

ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่รัศมีของฉนวน XLPE คือ E_{r_2} หาได้จาก

$$E(r_2) = \left(\frac{2\pi \times 24000}{\left(\frac{1}{2.3} \ln \frac{1.35}{0.75} + \frac{1}{1} \ln \frac{2.5}{1.35} + \frac{1}{3} \ln \frac{3}{2.5} \right)} \right) \times \left(\frac{1}{2\pi \times 1.35 \times 1} \right)$$

$$= 19.0641 \text{ kV/cm}$$

และผลการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์การกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิว XLPE (E_{r_2}) ใน Program COMSOL Multiphysics 3.3 จะได้ดังรูปที่ 3.68 ค่า $E_{r_2} = 19.812 \text{ kV/cm}$



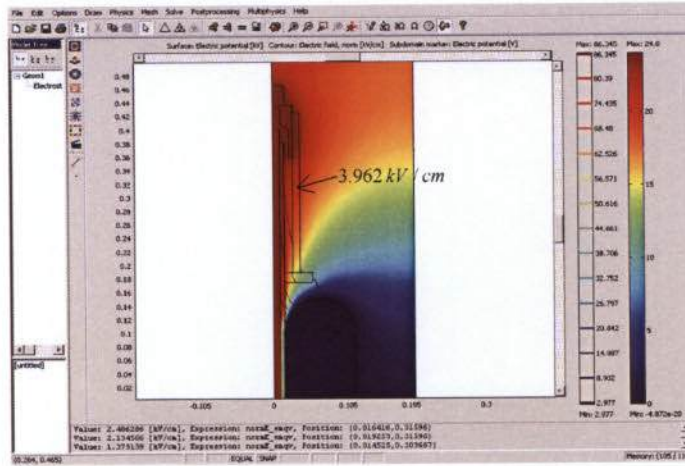
รูปที่ 3.68 ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิว E_{r_2} ฉนวนก๊าซ คือ สูญญากาศที่สายขนาด 150 sq.mm

นำค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับค่าการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จาก Program COMSOL Multiphysics 3.3 ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าในชั้นฉนวนที่รัศมีของฉนวน XLPE มีค่าใกล้เคียงกัน และ ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่รัศมีของฉนวนสูญญากาศ คือ E_{r_3} หาได้จาก

$$E(r_3) = \left(\frac{2\pi \times 24000}{\left(\frac{1}{2.3} \ln \frac{1.35}{0.75} + \frac{1}{11} \ln \frac{2.5}{1.35} + \frac{1}{3} \ln \frac{3}{2.5} \right)} \right) \times \left(\frac{1}{2\pi \times 2.5 \times 3} \right)$$

$$= 3.431 \text{ kV/cm}$$

และผลการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์การกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิวภายในหัวต่อสายเคเบิล (E_{r_3}) ใน Program COMSOL Multiphysics 3.3 จะได้ดังรูปที่ 3.69 ค่า $E_{r_3} = 3.962 \text{ kV/cm}$



รูปที่ 3.69 ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิว E_3 จนวนก๊าซ คือ สูญญากาศที่สายขนาด 150 sq.mm

นำค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับค่าคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์อิเลเมนต์จาก Program COMSOL Multiphysics 3.3 ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าในชั้นฉนวนที่รัศมีของผิวภายใน ขั้วต่อสายเคเบิลมีค่าใกล้เคียงกัน

3) ใช้ก๊าซ SF₆ ควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้า

ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่รัศมีของตัวนำ คือ E_{r_1} หาได้จาก

$$E(r_1) = \left(\frac{2\pi \times 24000}{\left(\frac{1}{2.3} \ln \frac{1.35}{0.75} + \frac{1}{1.00191} \ln \frac{2.5}{1.35} + \frac{1}{3} \ln \frac{3}{2.5} \right)} \right) \times \left(\frac{1}{2\pi \times 0.75 \times 2.3} \right)$$

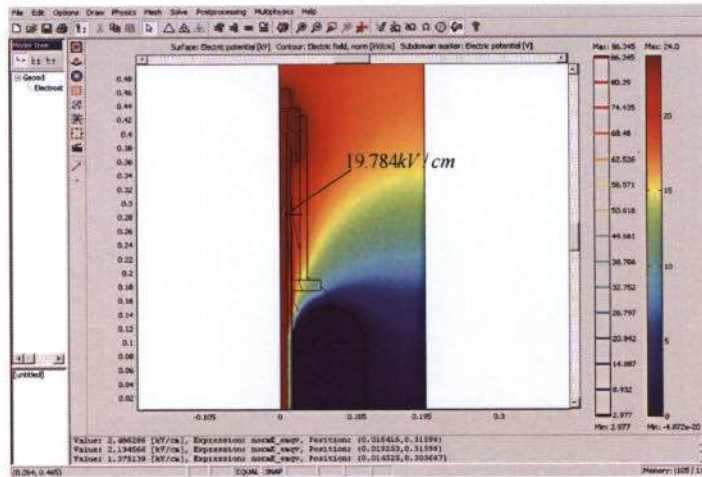
$$= 14.938 \text{ kV/cm}$$

ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่รัศมีของฉนวน XLPE คือ E_{r_2} หาได้จาก

$$E(r_2) = \left(\frac{2\pi \times 24000}{\left(\frac{1}{2.3} \ln \frac{1.35}{0.75} + \frac{1}{1.00191} \ln \frac{2.5}{1.35} + \frac{1}{3} \ln \frac{3}{2.5} \right)} \right) \times \left(\frac{1}{2\pi \times 1.35 \times 1.00191} \right)$$

$$= 19.051 \text{ kV/cm}$$

และผลการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์อิเลเมนต์การกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิว XLPE (E_{r_2}) ใน Program COMSOL Multiphysics 3.3 จะได้ดังรูป 3.70 ค่า $E_{r_2} = 19.784 \text{ kV/cm}$



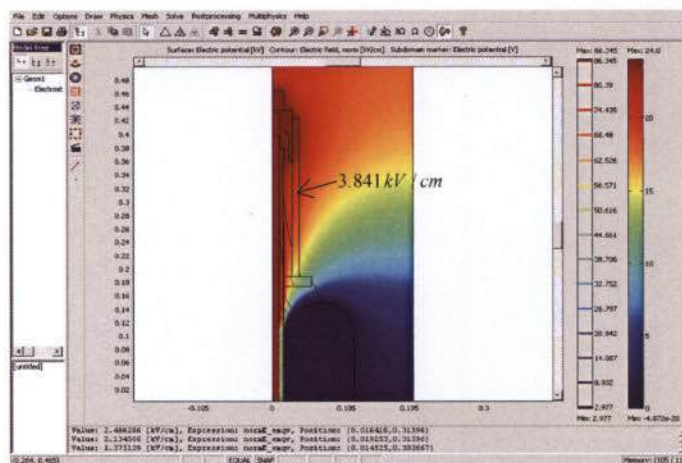
รูปที่ 3.70 ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิว E_{r_2} ฉนวนก๊าซ คือ SF₆ ที่สายขนาด 150 sq.mm

นำค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จาก Program COMSOL Multiphysics 3.3 ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าในชั้นฉนวนที่รัศมีของฉนวน XLPE มีค่าใกล้เคียงกัน และ ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่รัศมีของฉนวน ก๊าซ SF₆ คือ E_{r_3} หาได้จาก

$$E_{(r_3)} = \left(\frac{2\pi \times 24000}{\left(\frac{1}{2.3} \ln \frac{1.35}{0.75} + \frac{1}{1.00191} \ln \frac{2.5}{1.35} + \frac{1}{3} \ln \frac{3}{2.5} \right)} \right) \times \left(\frac{1}{2\pi \times 2.5 \times 3} \right)$$

$$= 3.435 \text{ kV/cm}$$

และผลการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์การกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิวภายในขั้วต่อสายเคเบิล (E_{r_3}) ใน Program COMSOL Multiphysics 3.3 จะได้ดังรูป 3.721 ค่า $E_{r_3} = 3.841 \text{ kV/cm}$



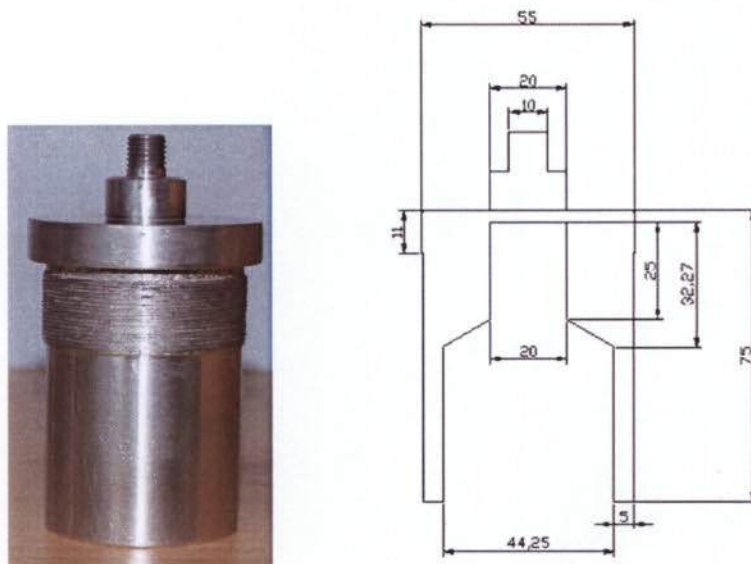
รูปที่ 3.71 ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิว E_{r_3} ฉนวนก๊าซ คือ SF₆ ที่สายขนาด 150 sq.mm

นำค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับค่าคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จาก Program COMSOL Multiphysics 3.3 ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าในชั้นฉนวนที่รัศมีของผิวภายใน ขั้วต่อสายเคเบิลมีค่าใกล้เคียงกัน

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ก๊าซ SF₆ ควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้าซึ่งทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าประมาณ 87.8 kV/cm เนื่องจากขั้วต่อสายที่มีขนาดรัศมีเท่ากับ 2.5 cm ดังนั้น จากค่าความเครียดสนามไฟฟ้า E_{r2} และ E_{r3} พบว่าสามารถใช้ในการทดสอบได้โดยไม่เกิดการเบรกดาวน์ในฉนวนก๊าซที่เป็นก๊าซ SF₆ และไม่เกิดโคโรนาในงานวิจัยนี้เลือกใช้ท่ออะคริลิกใสเป็นวัสดุฉนวนสำหรับขั้วต่อสาย ซึ่งทนความเครียดสนามไฟฟ้าได้ประมาณ 350 kV/cm โดยเลือกเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 cm และความหนา 5 mm

3.7 การออกแบบชุดฐานรองรับขั้วต่อตัวนำสายเคเบิลแรงดันสูง XPLE

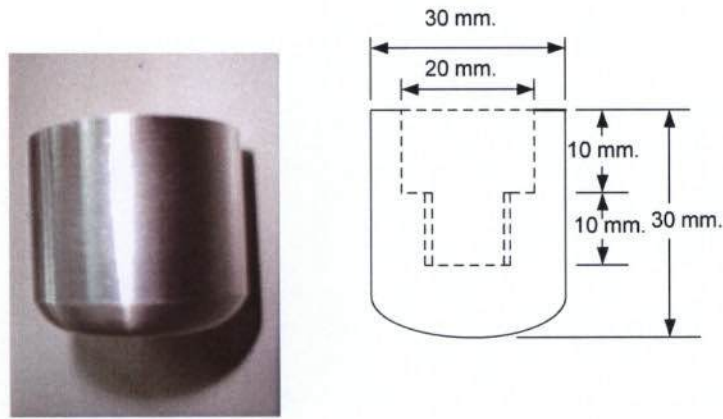
จากทฤษฎีทรงกระบอกซ้อนกันแน่นที่พอเหมาะนั้นจะคำนวณขนาดของกระบอกได้ $r_2 = 2.5$ cm หรือเส้นผ่านศูนย์กลางมีค่าเท่ากับ 5 cm ส่วนของฐานรองรับจะต้องมีการสัมผัสกับขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงจะต้องมีการสัมผัสที่พอดีไม่ก่อให้เกิดค่าคาปาซิแตนซ์ที่จุดต่อจะทำให้เกิดค่า Partial Discharge ถ้าจุดต่อสายสัมผัสไม่พอดีกัน และในอีกหน้าที่หนึ่งจะต้องเป็นจุดต่อสายเคเบิลในการทดสอบเพื่อเชื่อมต่อแหล่งจ่าย ซึ่งใช้ลูมิเนียมกลึงดังรูปที่ 3.72



รูปที่ 3.72 แบบและภาพฐานรองรับขั้วต่อตัวนำสายเคเบิลแรงดันสูง XLPE

3.8 การออกแบบและสร้างชุดลดค่าความเครียดสนามไฟฟ้า

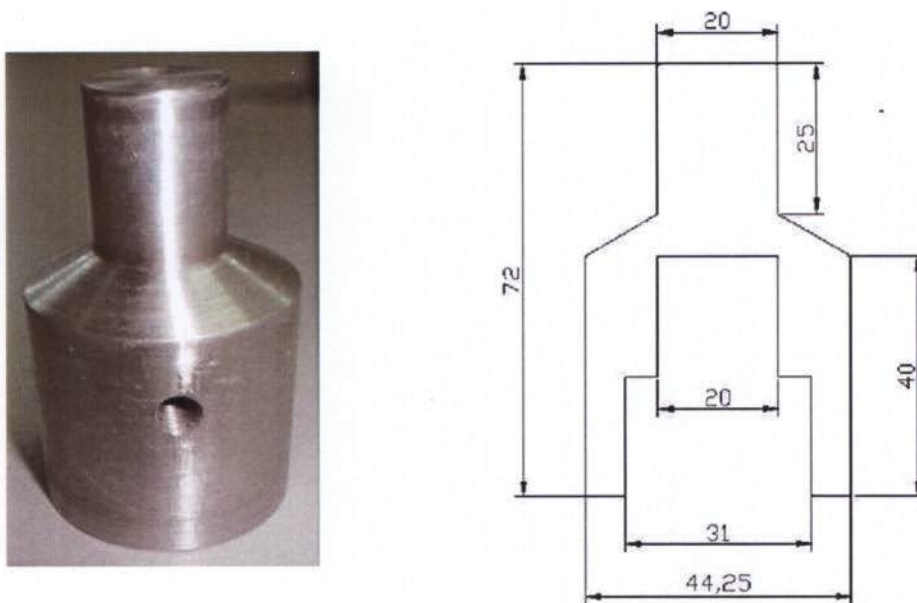
ชุดลดค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่จุดต่อสายเคเบิลแรงดันสูงมีหน้าที่ในการเพิ่มพื้นที่ของจุดสัมผัสแรงดันสูงที่ชุดทดสอบให้มีพื้นที่ที่มาก ค่าของความเครียดสนามไฟฟ้าลดลง ไม่ก่อให้เกิดค่าดิซชาร์จบางส่วน เนื่องจากโคโรนาดิซชาร์จหรือดิซชาร์จตามผิว



รูปที่ 3.73 ตัวลดความเครียดสนามไฟฟ้าที่ปลายขั้วต่อสาย

3.9 แบบของขั้วต่อสายเคเบิลแรงสูง

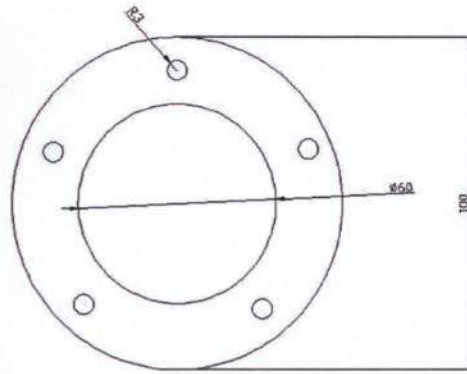
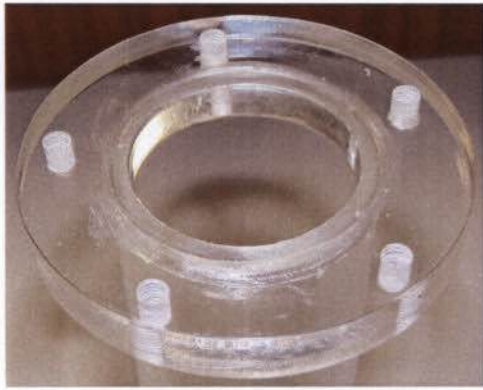
การออกแบบขั้วต่อสายซึ่งกลึงมาจากอลูมิเนียมเพื่อให้เป็นโลหะชนิดเดียวกับฐานรองรับ ขั้วต่อตัวนำสายเคเบิลแรงดันสูงและให้สัมผัสกับฐานรองรับขั้วต่อให้มากที่สุดดังรูปที่ 3.74



รูปที่ 3.74 แบบและภาพของขั้วต่อสายเคเบิลแรงสูง

3.10. แบบของหน้าแปนกระบอกอะคริลิกใส

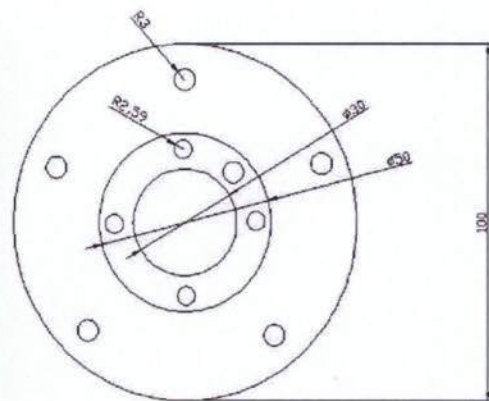
การออกแบบในส่วนที่ติดกับกระบอกอะคริลิกใสเพื่อใช้สำหรับยึดฝาครอบขั้วต่อสายเคเบิลแรงสูงซึ่งใช้อะคริลิกใสที่มีความหนา 15 mm โดยน้ำยาเป็นตัวเชื่อมประสานกับกระบอกอะคริลิกใส แสดงดังรูปที่ 3.75



รูปที่ 3.75 แบบและรูปของหน้าแปนกระบอกอะคริลิกใส

3.11 แบบของฝาครอบกระบอกอะคริลิกใส

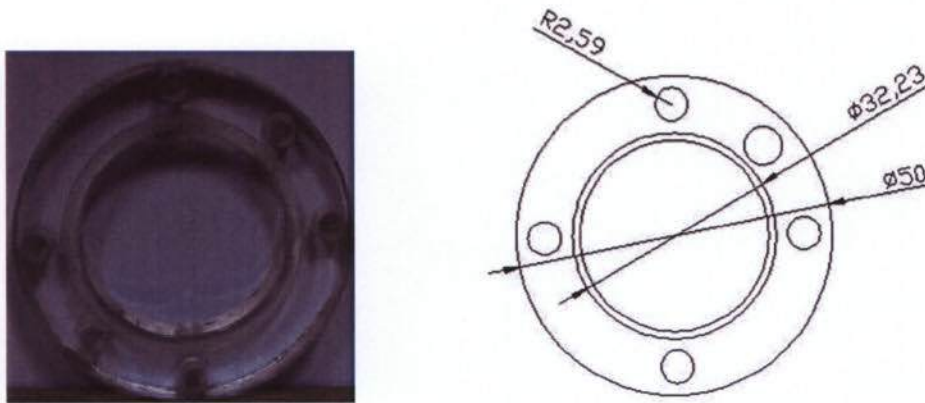
การออกแบบฝาครอบก็ใช้อะคริลิกใสเช่นกัน แต่ตรงส่วนฝาจะมีการติดตั้งเกจวัดความดันและวาล์วสำหรับอัดก๊าซที่สำคัญจะมีซิลิกาซึบติดกับส่วนนี้ด้วย



รูปที่ 3.76 แบบและรูปของฝาครอบกระบอกอะคริลิกใส

3.12. แบบของตัวซีลก๊าซเพื่อไม่ให้ก๊าซรั่ว

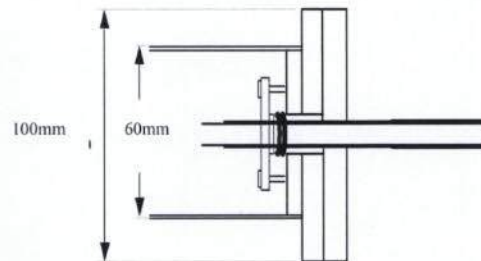
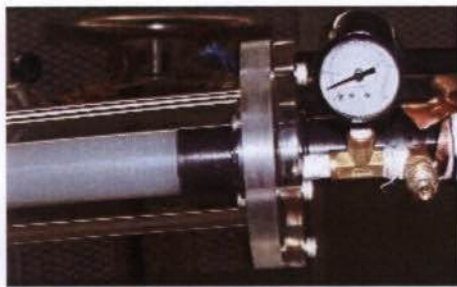
การออกแบบในส่วนที่ชิดกับฝาปิดใช้สำหรับกดซีลค้ำกันก๊าซซึ่งมีออกมาจากชุดทดสอบสายเคเบิลแรงสูงซึ่งกึ่งจากอะคริลิกใส จะลักษณะมีเขี้ยวไว้สำหรับดันโอริง แสดงดังรูปที่ 3.77



รูปที่ 3.77 แบบและรูปของตัวซีลก๊าซ

3.13 หลักการของการใส่โอริงซีลก๊าซ

คือใส่อะคริลิกใสจากรูป 3.77 เป็นตัวดัน โอริงดังรูปที่ 3.78



รูปที่ 3.78 แบบรูปการใส่โอริง

3.14 การอัดอากาศที่ค่าความปลอดภัย

โดยทั่วไปแล้วค่าความปลอดภัยหมายถึง ตัวเลขที่นำไปหารค่าความต้านแรงดึงหรือความต้านแรงดึงครากของวัสดุ เพื่อให้ได้ความเค้นใช้งาน (Working Stress) ในชิ้นส่วนที่กำลังออกแบบ ซึ่งเรียกสั้นๆว่า ความเค้นออกแบบ (Design Stress) หรือความเค้นใช้งาน ให้ค่าตัวแปรค่าความปลอดภัย N_y เท่ากับ 3

กระบอกอะคริลิกใสจัดเป็นภาชนะความดันผนังบาง ภาชนะผนังบางหมายถึง ภาชนะความหนาของผนังมีค่าน้อย เมื่อเทียบกับรัศมีความโค้ง สำหรับส่วนความเค้นที่เกิดขึ้นตามแนวของทรงกระบอก เรียกความเค้นแนวแกน (Longitudinal Stress) มีค่าน้อยกว่าความเค้นในแนวเส้นรอบวงครึ่ง นั่นคือ

$$\sigma_l = \frac{Pr}{2t} \quad (3.4)$$

เมื่อ

$$\sigma_l = \text{ความเค้นในแนวแกนทรงกระบอก (N/m}^2\text{)}$$

$$P = \text{ความดันอากาศ (N/m}^2\text{)}$$

$$r = \text{รัศมีของกระบอก (m)}$$

$$t = \text{ความหนาของกระบอก (m)}$$

จากตารางคุณสมบัติของพลาสติกบางชนิดจะได้ค่า $\sigma_{\text{อะคริลิก}} = 37.922 \text{ MPa}$

$$\text{ดังนั้น} \quad \sigma_l = \frac{37.922}{3} \text{ MPa} \quad (\text{Safety Factor} = 3)$$

$$= 12.64 \text{ MPa}$$

จากสมการที่ 3.4

จะได้

$$\begin{aligned} P &= \frac{2t\sigma_l}{r} \\ &= \frac{2 \times (5 \times 10^{-3} \text{ m}) \times (12.64 \text{ MPa})}{0.5 \text{ m}} \\ &= 252.8 \text{ MPa} \end{aligned}$$

เมื่อ P_{atm} คือ ความดันบรรยากาศ มีค่ามาตรฐานที่ระดับน้ำทะเลประมาณ 14.7 Psi หรือ 101.3 kPa ซึ่งเปรียบเทียบกับกับความสูงของน้ำ 10.34 m และปรอท 760 mm

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น การอัดอากาศที่ค่าความปลอดภัย} &= \frac{252.8 \text{ MPa}}{101.3 \text{ kPa}} \\ &= 2.496 \text{ bar} \end{aligned}$$

3.15 สรุป

แรงดันที่ใช้ในการทดสอบมีค่า 20.76 kV และแรงดันที่ใช้ทดสอบสูงสุดมีค่า 24 kV ตามมาตรฐาน IEC 60502-2 ในการทดสอบต้องมีการปกอสายเคเบิลออกเพื่อติดตั้งขั้วต่อสาย โดยสิ่งที่ต้องคำนึงถึงคือต้องไม่ทำให้เกิดพาร์เซิลลิสซาร์จในขั้วต่อสาย ซึ่งจะทำการที่วัดได้ผิดพลาด โดยการปกอสายเคเบิลต้องระวังอย่างมากไม่ให้เกิดพื้นผิวตัวนำที่ขรุขระจากรอยปกเพราะจะทำให้สนามไฟฟ้าที่พื้นผิวนั้นสูงจนเป็นเหตุของพาร์เซิลลิสซาร์จได้และระยะห่างของชั้น Semiconductor layer กับ XLPE ก็เป็นอีกตัวแปรที่มีผลต่อการเกิดพาร์เซิลลิสซาร์จได้เช่นกัน การออกแบบรัศมีของกระบอกอะคริลิกใช้ทฤษฎีมิติที่เหมาะสมของทรงกระบอกซ้อนกันร่วมได้รัศมีภายใน ของกระบอกเท่ากับ 25 มิลลิเมตรจึงได้เลือกกระบอกที่มีรัศมีภายนอก 30 มิลลิเมตร และจากการทดลองคำนวณสนามไฟฟ้าจากสมการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับ ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขแบบ ไฟไนต์อีลิเมนต์ พบว่าระยะห่างตั้งแต่ 30 มิลลิเมตรจนถึงระยะ 160 มิลลิเมตรเพื่อหาความยาวของกระบอกอะคริลิกนั้นพบว่าไม่มีสนามไฟฟ้าที่มีค่าเกินแรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์ของทุกชั้นฉนวนที่ทุกระยะความห่าง แต่เมื่อพิจารณาร่วมกับความสะดวกในการประกอบสายเข้ากับขั้วต่อและความประหยัดที่จะไม่ต้องปกอสายเคเบิลให้ยาวเกินไปแล้ว จึงเลือกให้ใช้ระยะห่าง 90 มิลลิเมตร ตัวกระบอกมีความยาว 250 มิลลิเมตร จะทำให้ไม่เกิดพาร์เซิลลิสซาร์จ การประกอบทำได้ง่าย ไม่สิ้นเปลืองสาย ขนาดกะทัดรัด และจากการคำนวณความแข็งแรงของกระบอกที่หนา 5 มิลลิเมตรพบว่าทนแรงอัดอากาศที่ค่าความปลอดภัยได้ 2.496 bar ซึ่งแรงอัดอากาศที่จะใช้งานอยู่ที่ไม่เกิน 2 bar

บทที่ 4

การวิเคราะห์หาค่าดิสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge) และหา Dielectric Loss ของสายเคเบิลแรงดันสูง XLPE

การวิเคราะห์หาค่าดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดภายในสายเคเบิลแรงดันสูง ในวิทยานิพนธ์บทนี้ เป็นการทดสอบสายเคเบิลแรงดันสูง XLPE ขนาดแรงดัน 24 kV ด้วยขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงที่ ออกแบบและสร้างขึ้น โดยใช้ก๊าซ SF₆ เป็นฉนวน โดยทำหน้าที่ในการลดความเครียดสนามไฟฟ้า ภายในขั้วต่อสาย หรือ บริเวณผิวของสายเคเบิลที่จะต้องทำการปกปิดเพื่อทดสอบหาค่าดิสชาร์จ บางส่วนที่เกิดขึ้น การวิเคราะห์ถึงคุณสมบัติของก๊าซ ที่สามารถเพิ่มความหนาแน่นของก๊าซ โดยการอัดความดันของก๊าซที่สูงกว่าปกติซึ่งจะมีผลต่อการทดสอบดิสชาร์จบางส่วน

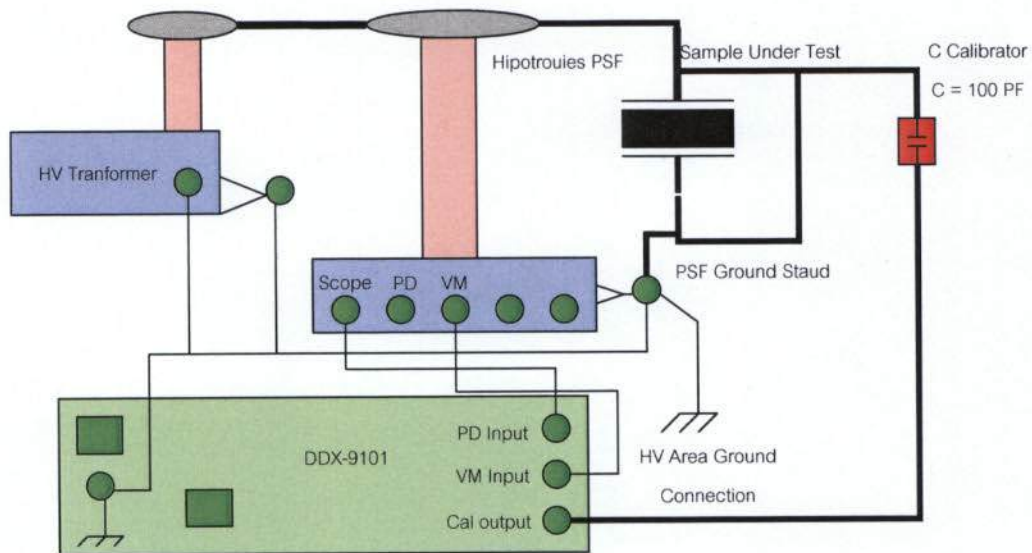
4.1 อุปกรณ์การวัดหาค่า Partial Discharge (PD)

1. เครื่องวัดหาค่า PD
2. เครื่องกำเนิดสัญญาณพัลส์
3. คาปาซิเตอร์มาตรฐานขนาด 100 pF
4. หม้อแปลงทดสอบขนาด 10/100 kV
5. ขั้วต่อสายเคเบิลที่สร้างขึ้นมาทดสอบพร้อมสาย
6. สาย XLPE แรงดัน 12/20 (24) kV ขนาดพื้นที่หน้าตัด 240 sq.mm , 185 sq.mm และ

150 sq.mm

4.2 ขั้นตอนการทดสอบขั้วต่อสายเคเบิล

ในการวัดหาค่า PD จะยึดเอาการทดสอบตามมาตรฐานการทดสอบของ IEC 60502-2 กล่าวคือ สายเคเบิลแรงดันสูงขนาดพิกัด 12/20(24)KV โดยปล่อยค่าแรงดันตามมาตรฐาน IEC 60502-2 ที่ $2U_0$ มีค่าเท่ากับ 24 kV ให้นานเป็นเวลา 10 Sec แล้วทำการทดสอบค่า PD ออกมาที่พิกัดแรงดันที่ $\sqrt{3}U_0$ จากนั้นก็อ่านค่า PD ออกมาจากจอของเครื่องวัด PD ซึ่งเครื่องจะแสดงผลของพิกัดแรงดันและ Partial Discharge (PD) มีค่าเป็นเท่าไร และ บอกสัญญาณรบกวนด้วยว่ามีมากน้อยแค่ไหนถ้าสัญญาณรบกวนมากก็จะมีผลต่อค่า PD ที่วัดได้ด้วย



รูปที่ 4.1 วงจรในการทดสอบ

4.3 การวิเคราะห์ค่าดิสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิลแรงดันสูง XLPE ที่ประกอบข้อต่อสายเคเบิล ขนาดเล็ก

การทดสอบโดยใช้เครื่องวัดค่าดิสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge Analyzer) ของบริษัท HAEFELY TRENCH ในการวิเคราะห์วัดค่าต่างๆ ในการทดสอบและวัดค่าดิสชาร์จบางส่วนตามมาตรฐาน IEC No. 270, No.60502 ทำการทดสอบฉนวนของสายเคเบิลที่ระดับแรงดันที่ใช้ในการทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60502-2 โดยสายเคเบิลของ THAI-YAZAKI มีฉนวนเป็น XLPE ขนาด 240 , 185 , 150 ตารางมิลลิเมตรและมีพิคที่ระดับแรงดัน 12/20 kV ทดสอบที่ระดับแรงดันสูงสุด 24 kV ในเวลา 10 Sec จากมาตรฐาน IEC 60502-2 มาตรฐานการวัดดิสชาร์จบางส่วน จะใช้แรงดันทดสอบคือ $1.73 U_0$ ทำการคำนวณหาค่าแรงดันที่ใช้ทดสอบจะได้แรงดันทดสอบการเกิดดิสชาร์จบางส่วน

ในการทดสอบสายเคเบิลแรงดันสูงด้วยข้อต่อสายเคเบิลแรงดันสูงที่ออกแบบสร้างเลือกใช้ฉนวนในการทำหน้าที่ลดความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณปลายสายเคเบิลที่ปลอกหรือทำการควบคุมการหักเหของสนามไฟฟ้า ในการทดสอบสายเคเบิลที่ข้อต่อสายเคเบิลโดยเริ่มใช้แรงดันในการทดสอบที่ระดับแรงดัน 0 kV แล้วไล่ระดับขึ้นไปเรื่อยๆ จนกว่าข้อต่อสายเคเบิลแรงดันสูงจะได้ค่ามาตรฐานโดยแบ่งลักษณะของฉนวนที่ใช้ในการทดสอบดังนี้

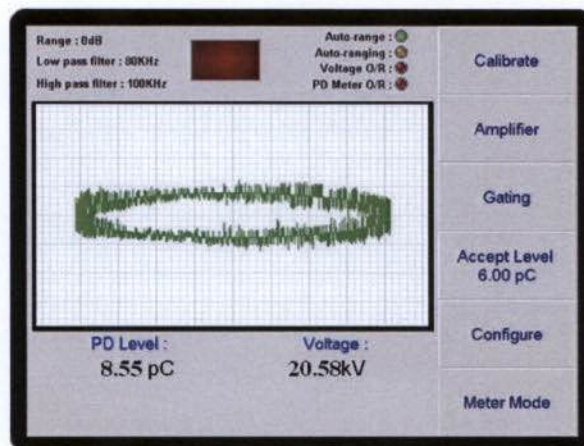
- 1) ฉนวนก๊าซ คือ อากาศ(Air) อัดอากาศที่ 1.8 bar
- 2) ฉนวนก๊าซคือสุญญากาศ $\approx 3 \times 10^{-4}$ Torr โดยใช้เครื่องทำสุญญากาศในเครื่องทำความเย็น
- 3) ฉนวนก๊าซ คือ SF₆ อัดอากาศที่ 1.8 bar

4.4 ผลการทดสอบค่าดิสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิลแรงดันสูง XLPE ที่ประกอบด้วย ขั้วต่อสายเคเบิล ขนาดเล็ก

ซึ่งมีผลของการทดสอบวัดค่าดังต่อไปนี้

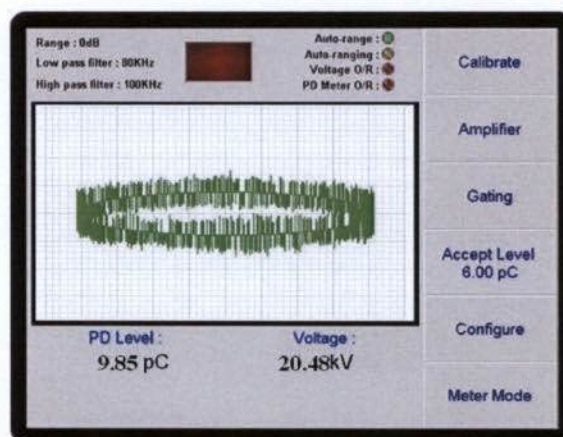
4.4.1 ผลของการทดสอบที่สายขนาด 240 sq.mm

1) การทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ อากาศ (Air) อัดอากาศที่แรงดันในกระบอก 1.8 bar ที่แรงดันทดสอบ 20.58 kV ความถี่ 50 Hz ผลการทดสอบได้ระดับค่า PD = 8.55 pC



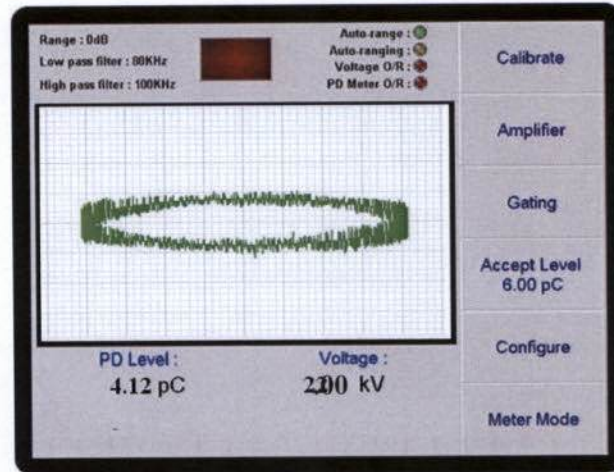
รูปที่ 4.2 ผลการทดสอบขั้วต่อสายเคเบิล ฉนวนก๊าซ คือ อากาศที่สายขนาด 240 sq.mm

2) การทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ สุญญากาศ ที่แรงดันทดสอบ 20.48 kV ความถี่ 50 Hz ผลการทดสอบได้ระดับค่า PD = 9.85 pC



รูปที่ 4.3 ผลการทดสอบขั้วต่อสายเคเบิล ในสถานะสุญญากาศ ที่สายขนาด 240 sq.mm

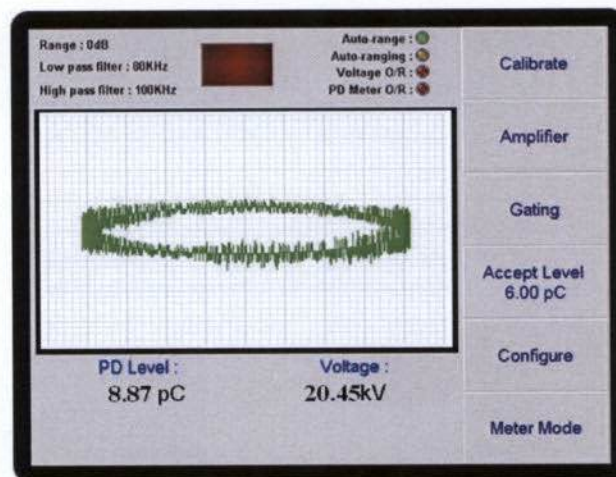
3) การทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ SF₆ อัดก๊าซที่แรงดันในกระบอก 1.8 bar ที่แรงดันทดสอบ 22 kV ความถี่ 50 Hz ผลการทดสอบได้ระดับค่า PD = 4.12 pC



รูปที่ 4.4 ผลการทดสอบขั้วต่อสายเคเบิล ฉนวนก๊าซ คือ SF₆ ที่สายขนาด 240 sq.mm

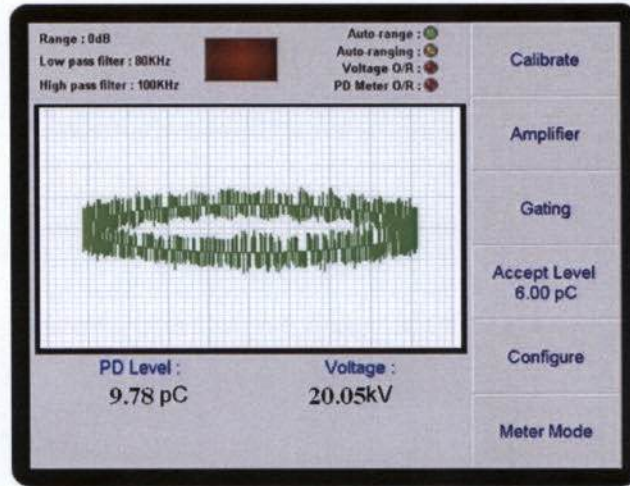
4.4.2 ผลของการทดสอบที่สายขนาด 185 sq.mm

1) การทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ อากาศ (Air) อัดอากาศที่แรงดันในกระบอก 1.8 bar ที่แรงดันทดสอบ 20.45 kV ความถี่ 50 Hz ผลการทดสอบได้ระดับค่า PD = 8.87pC



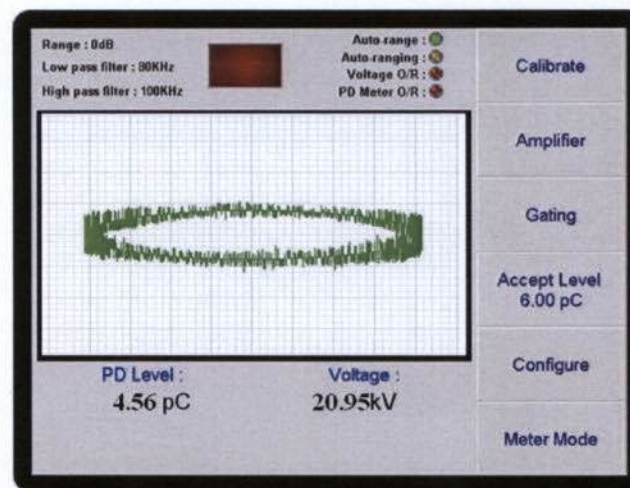
รูปที่ 4.5 ผลการทดสอบขั้วต่อสายเคเบิล ฉนวนก๊าซ คือ อากาศ ที่สายขนาด 185 sq.mm

2) การทดสอบหาค่าคิซาร์จบางส่วนของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ สูญญากาศ ที่แรงดันทดสอบ 20.05 kV ความถี่ 50 Hz ผลการทดสอบได้ระดับค่า PD = 9.78 pC



รูปที่ 4.6 ผลการทดสอบขั้วต่อสายเคเบิล ในสถานะสูญญากาศ ที่สายขนาด 185 sq.mm

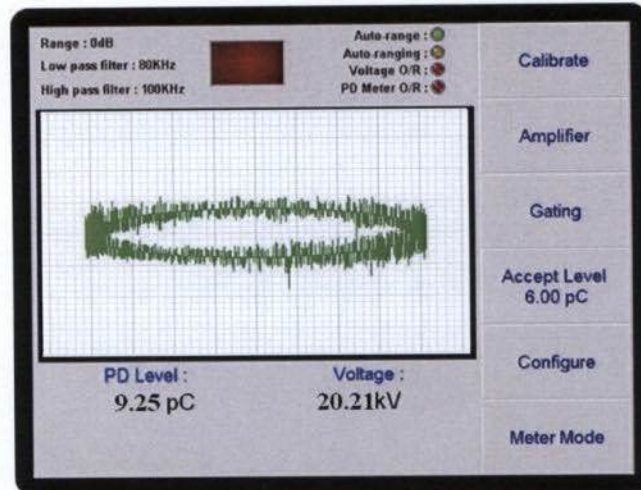
3) การทดสอบหาค่าคิซาร์จบางส่วนของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ SF₆ อัดก๊าซที่แรงดันในกระบอก 1.8 bar ที่แรงดันทดสอบ 20.95 kV ความถี่ 50 Hz ผลการทดสอบได้ระดับค่า PD = 4.56 pC



รูปที่ 4.7 ผลการทดสอบขั้วต่อสายเคเบิล ฉนวนก๊าซ คือ SF₆ ที่สายขนาด 185 sq.mm

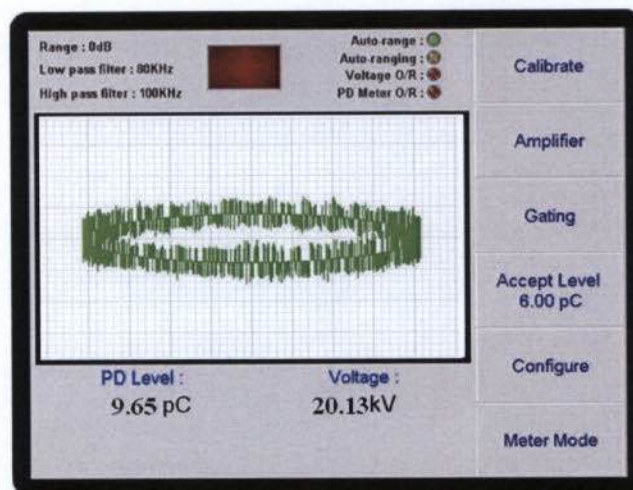
4.4.3 ผลของการทดสอบที่สายขนาด 150 sq.mm

1) การทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ อากาศ (Air) อัดอากาศที่แรงดันในกระบอก 1.8 bar ที่แรงดันทดสอบ 20.21 kV ความถี่ 50 Hz ผลการทดสอบได้ระดับค่า PD = 9.25 pC



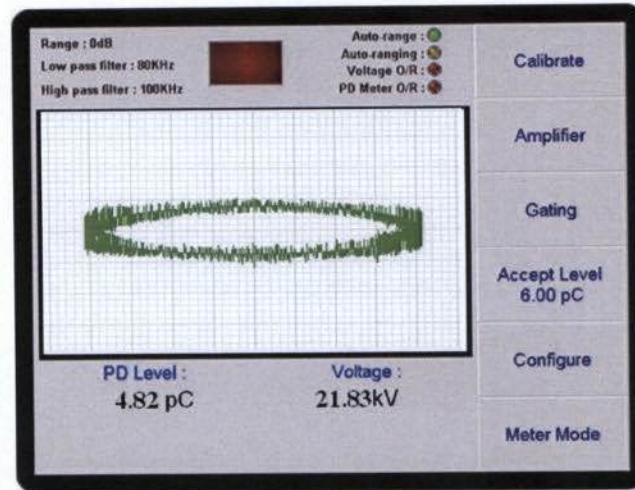
รูปที่ 4.8 ผลการทดสอบขั้วต่อสายเคเบิล ฉนวนก๊าซ คือ อากาศ ที่สายขนาด 150 sq.mm

2) การทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ สุญญากาศ ที่แรงดันทดสอบ 20.13 kV ความถี่ 50 Hz ผลการทดสอบได้ระดับค่า PD = 9.65 pC



รูปที่ 4.9 ผลการทดสอบขั้วต่อสายเคเบิล ในสภาวะสุญญากาศ ที่สายขนาด 150 sq.mm

3) การทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนของสายเคเบิลแรงดันสูง 24 kV โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวนก๊าซ คือ SF₆ อัดก๊าซที่แรงดันในกระบอก 1.8 bar ที่แรงดันทดสอบ 21.83 kV ความถี่ 50 Hz ผลการทดสอบได้ระดับค่า PD = 4.82 pC



รูปที่ 4.10 ผลการทดสอบขั้วต่อสายเคเบิล ฉนวนก๊าซ คือ SF₆ ที่สายขนาด 150 sq.mm

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิลแรงดันสูง XLPE ขนาดสาย 240 sq.mm

ฉนวน	ดิสชาร์จบางส่วน(P.D)	แรงดันที่ป้อน (kV)
อากาศความดัน 1.8 bar.	8.55 pC	20.58 kV
สุญญากาศ	9.85 pC	20.48 kV
ก๊าซ SF ₆ 1.8 bar.	4.12 pC	22.00 kV

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิลแรงดันสูง XLPE ขนาดสาย 185 sq.mm

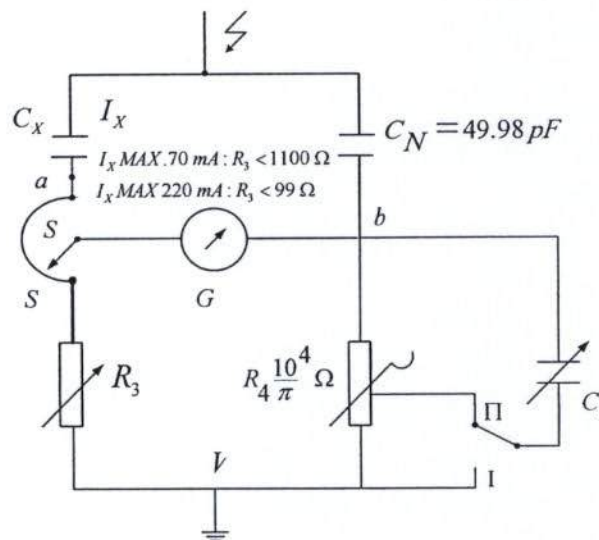
ฉนวน	ดิสชาร์จบางส่วน (P.D)	แรงดันที่ป้อน (kV)
อากาศความดัน 1.8 bar.	8.87 pC	20.45 kV
สุญญากาศ	9.78 pC	20.05 kV
ก๊าซ SF ₆ 1.8 bar.	4.56 pC	20.95 kV

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบคิซาร์จบางส่วนในสายเคเบิลแรงดันสูง XLPE ขนาดสาย 150 sq.mm

ฉนวน	คิซาร์จบางส่วน (P.D)	แรงดันที่ป้อน (kV)
อากาศความดัน 1.8 bar.	9.25 pC	20.21 kV
สูญญากาศ	9.65 pC	20.13 kV
ก๊าซ SF ₆ 1.8 bar.	4.82 pC	21.83 kV

4.5 การหาค่าความจุไฟฟ้าและแฟกเตอร์ พลังงานสูญเสีย

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



COMMUTATOR $\tan \delta$ ON POS II : $TAN \delta = C_4 (\mu F)$

$$C_x = \frac{C_y (pF) R_1}{R_1 + S}$$

$$DIELECTRIC LOSS (W) = \frac{10^{-2} \cdot \pi \cdot C \times U^2 \cdot TAN \delta}{10^4 + TAN^2 \delta} \left| \begin{array}{l} C \dots pF \\ U^X \dots XV \\ TAN \delta \end{array} \right|$$

รูปที่ 4.11 วงจร Schering Bridge เพื่อหาค่าความจุไฟฟ้าและแฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง การไฟฟ้าฝ่ายผลิต

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบการวัดค่าคาปาซิแตนซ์ของชุดทดสอบร่วมกับสายเคเบิล ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 66% อุณหภูมิห้อง 31° C

การฉนวน Type of Insulation	ขนาด (Size)	TEST VOLTAGE (U) ...KV.	C_4 (μF)	R_3 (Ω)	s (Ω)	$TAN\sigma$ (%)	C_X (pF)	DIELECTRIC LOSS (W)	REMARK
Compressed Air 1.8 Bar	150	10	0.02824	73	0.69	0.02824	2158.05	0.01914	S
		24	0.12608	73	0.63	0.12608	2159.81	0.4927	
	185	10	0.07466	66	0.54	0.07466	23.92.12	0.056107	
		24	0.02070	66	0.49	0.2070	23.93.92	0.89670	
	240	10	0.13108	58	0.49	0.13108	2719.97	0.1120068	
		24	0.2879	58	0.35	0.2879	2726.5001	1.4203881	
Vacuum	150	10	0.26308	73	0.49	0.26308	2165.90	0.179008	
		24	0.55308	73	0.195	0.55308	2174.63	2.17636	
	185	10	0.27770	66	0.39	0.27770	2397.52	0.209163	
		24	0.087725	66	0.185	0.087725	2404.96	2.122486	
	240	10	0.29232	58	0.28	0.29232	2729.7748	0.250681	
		24	0.42237	58	0.174	0.42237	2734.7488	2.09008	
F6 1.8 Bar	150	10	0.16254	73	0.63	0.12448	2161.78	0.084539	
		24	0.12448	73	0.68	0.12448	2160.31	0.4866	
	185	10	0.05353	66	0.555	0.05353	2391.59	0.040219	
		24	0.10578	66	0.54	0.10578	2392.12	0.45788	
	240	10	0.46345	58	0.475	0.46345	2720.6717	0.396103	
		24	0.08708	58	0.41	0.08708	2723.6993	0.429186	

4.6 สรุป

การทดสอบสายเคเบิลแรงดันสูงที่ใช้ขั้วต่อสายเคเบิลที่สร้างขึ้นนี้สามารถใช้ในการทดสอบสายเคเบิลที่แรงดันสูงกระแสสลับตามค่าพิกัดมาตรฐาน IEC-60502-2 และยังใช้ในการทดสอบการวัดค่าดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นด้วยวิธีการเปรียบเทียบกับค่าของการทดสอบสายเคเบิลที่มีสภาพที่ดีจากโรงงานผลิตสายเคเบิลที่ทดสอบได้มาตรฐานมาแล้ว มีผลการทดสอบอยู่ในระดับมาตรฐาน IEC 60885-3 คือ $PD < 10 \text{ pC}$

ในการทดสอบสายเคเบิลแรงดันสูง XLPE โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลที่มีการฉนวนด้วยก๊าซคืออากาศ และก๊าซ SF_6 สามารถสรุปได้ว่า ก๊าซมีคุณสมบัติในการเป็นฉนวน การอัดอากาศหรือก๊าซ SF_6 การเพิ่มความดันเข้าไปที่ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูง สามารถเพิ่มค่าความเป็นฉนวนให้กับพื้นผิวบริเวณส่วนที่ทำการปลอกสาย เพื่อใช้ลดความเครียดของสนามไฟฟ้าในการทดสอบ และจากการออกแบบและสร้างขั้วต่อสายเคเบิลนี้สามารถที่จะทำการทดสอบสายเคเบิลได้ถึงสามขนาดด้วยกันคือ ขนาด 240 sq.mm, 185 sq.mm และ 150 sq.mm

ผลการวัดค่าการเกิดพาร์เซิลดิสชาร์จในสายเคเบิลที่นำมาทดสอบพบว่าทุกขนาดของสายที่ทำการทดสอบพบว่าเมื่อขั้วต่อสายเปลี่ยนเป็นฉนวน SF_6 ค่าพาร์เซิลดิสชาร์จ จะต่ำกว่าแบบอื่น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการออกแบบขั้วต่อสายโดยใช้ก๊าซ SF_6 นั้นมีประสิทธิภาพที่ดี ในส่วนของการวัดสภาพฉนวนจากแฟกเตอร์สูญเสีย หรือ Loss Tangent นั้นมีค่าต่ำมากทุกตัวอย่างที่ทดสอบแสดงถึงสภาพฉนวนที่ดี

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดสอบสายเคเบิลฉนวน XLPE พิกัดแรงดัน 12/20 (24) kV ขนาดสาย 240 sq.mm 185 sq.mm และ 150 sq.mm แบ่งการทดลองออกเป็น 3 แบบ คือ

- 1) ทดสอบขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงแบบฉนวนก๊าซ คืออากาศ(Air) อัดอากาศที่ 1.8 bar
- 2) ทดสอบขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงแบบสภาวะ สุญญากาศ
- 3) ทดสอบขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงแบบฉนวนก๊าซ คือ ก๊าซ SF₆ อัดที่ ความดัน 1.8 bar

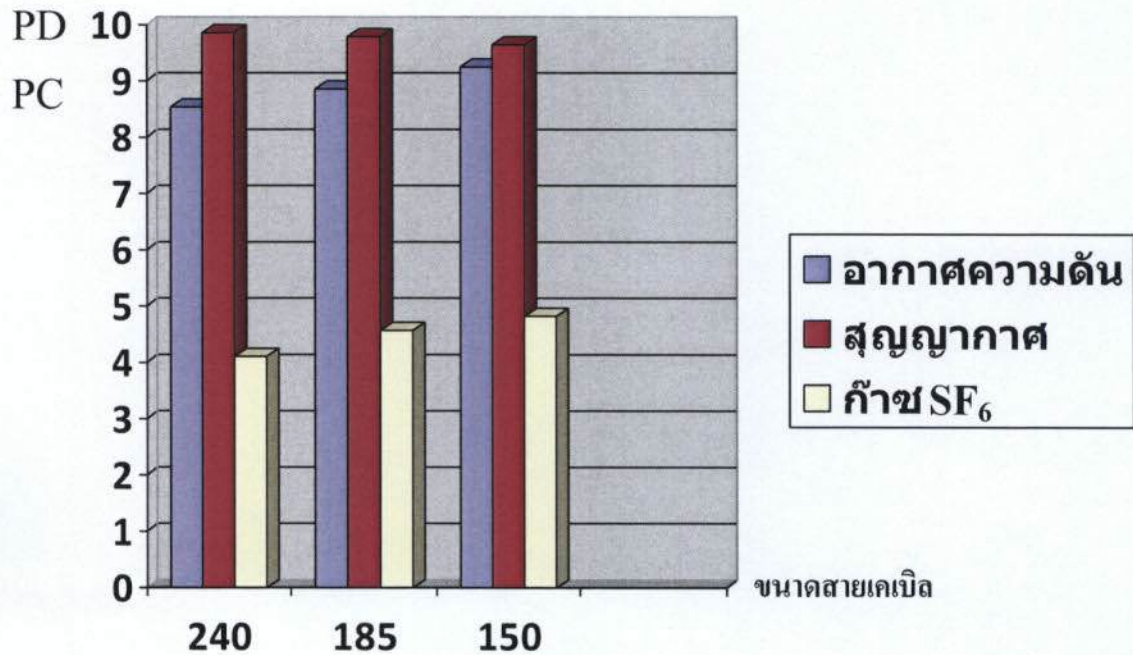
ดังนั้นค่าที่จากการทดสอบ ได้บันทึกผลลงตามในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 เปรียบเทียบค่า Partial Discharge (PD)

ขนาดสายเคเบิล XLPE	ฉนวน	ดิสชาร์จบางส่วน(P.D)	แรงดันที่ป้อน (kV)
240 sq.mm	อากาศความดัน 1.8 bar.	8.55 pC	20.58 kV
	สุญญากาศ	9.85 pC	20.48 kV
	ก๊าซ SF ₆ 1.8 bar.	4.12 pC	22.00 kV
185 sq.mm	อากาศความดัน 1.8 bar.	8.87 pC	20.45 kV
	สุญญากาศ	9.78 pC	20.05 kV
	ก๊าซ SF ₆ 1.8 bar.	4.56 pC	21.95 kV
150 sq.mm	อากาศความดัน 1.8 bar.	9.25 pC	20.21 kV
	สุญญากาศ	9.65 pC	20.13 kV
	ก๊าซ SF ₆ 1.8 bar.	4.82 pC	21.73 kV

จากการทดสอบการใช้ขั้วต่อสายที่สร้างขึ้นสามารถสรุปได้ว่าค่า PD ที่ได้จากการทดสอบที่ขนาดสาย 240 Sq.mm นั้นวัดค่า PD สายเคเบิลแรงดันสูง XLPE ที่ใช้ฉนวนก๊าซ SF₆ = 4.12 pC เป็นค่าที่ดีที่สุด แต่ทั้งสามสถานะของฉนวนนั้น คือ ความดันอากาศ สถานะสุญญากาศ และก๊าซ SF₆ ได้ค่า PD ตรงตามมาตรฐาน IEC-60885-3 คือมีค่า PD < 10 pC ส่วนที่ขนาดสายขนาด 185 Sq.mm และ 150 Sq.mm ก็เช่นกันค่า PD ที่วัดได้ดีที่สุดก็คือ ในสถานะก๊าซ SF₆ เป็นฉนวน คือที่ขนาดสาย 185 Sq.mm มีค่า PD = 4.56 pC ส่วนขนาดสาย 150 Sq.mm มีค่า PD = 4.82 pC ทั้งสามสถานะของ

สายทั้งสองขนาดมีค่า PD ที่ตรงตามมาตรฐาน IEC-60885-3 เช่นกัน คือมีค่า PD < 10 pC ดังนั้นขนาดสายเคเบิลทั้งสามขนาด จึงสรุปได้ว่าค่าที่ได้จากการทดสอบนั้นเป็นค่าที่ได้ตรงและถูกต้องตามมาตรฐาน IEC-60885-3 ได้ทั้งสามขนาดสาย และทั้งสามสถานะของการฉนวน และมีค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริกต่ำมาก โดยเมื่อเปรียบเทียบกับฉนวนทั้งสามสถานะมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก



รูปที่ 5.1 เปรียบเทียบการเกิดพาร์เซิลลิสซาร์จในสายทั้ง 3 ขนาด

5.2 วิเคราะห์เปรียบเทียบชนิดฉนวนที่ใช้ในขั้วต่อสายในการทดสอบ

ฉนวนก๊าซ SF₆ มีความทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ สูงกว่าอากาศ 2 เท่าที่ 1 บาร์ และที่ 1.8 บาร์ มีค่า 3 เท่าของอากาศที่ 1 บาร์ ดังรูปที่ 2.46

และคุณสมบัติที่ดีและสำคัญอีกประการคือเมื่อก๊าซ SF₆ ปนเปื้อนด้วยก๊าซอื่น มีผลทำให้ความทนต่อแรงดันเบรกดาวน์มีค่าต่ำลง ไม่เกิน 15 เปอร์เซ็นต์ เท่านั้นดังตารางที่ 5.2

ฉนวนสุญญากาศนั้นเมื่อนำมาใช้จะต้องออกแบบให้ระยะห่างระหว่าง Anode และ Cathode ให้แคบจึงจะทำให้ความทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ได้สูงดังรูปที่ 2.34

ตารางที่ 5.2 ความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ของก๊าซ SF₆ เมื่อผสมกับก๊าซอื่น

Mixture Ratio	Breakdown Strength (kV/cm)
100% SF ₆ gas	89.0
1% SF ₆ /99% Nitrogen	80.0
10% SF ₆ /90% Nitrogen	78.0
20% SF ₆ /80% Nitrogen	76.5
40% SF ₆ /60% Nitrogen	75.6
10% SF ₆ /90% CO ₂	76.5
20% SF ₆ /80% CO ₂	76.5
40% SF ₆ /60% CO ₂	75.5
10% SF ₆ /90% Air	77.0
20% SF ₆ /80% Air	76.5
40% SF ₆ /60% Air	75.6

ซึ่งในการออกแบบขั้วต่อสายให้เกิดเงื่อนไขนี้ทำได้ยาก และถ้าระยะห่างมากก็ต้องชดเชยด้วยการทำให้เป็นสุญญากาศให้มากขึ้นอีกมีผลให้โครงสร้างต้องมีน้ำหนักมากขึ้น การป้องกันการรั่วซึมทำได้ยากมากขึ้น

ดังนั้นพบว่าจากฉนวนทั้ง 3 ที่ทดสอบ ก๊าซ SF₆ มีความเหมาะสมที่สุด กล่าวคือ การออกแบบไม่ยุ่งยาก แรงอัดก๊าซ SF₆ ใช้งานไม่สูงเพียง 1.8 บาร์ ทนต่อการปนเปื้อนจากก๊าซที่มีในบรรยากาศได้ โดยความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ลดลงไม่เกิน 15 เปอร์เซ็นต์

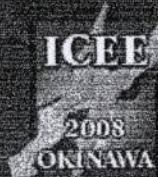
5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 งานวิจัยที่ทดสอบจากผลการทดลองที่ได้สามารถให้ข้อเสนอแนะที่จะเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนางานวิจัยนี้ให้ดียิ่งขึ้น จากการสร้างขั้วต่อสายเคเบิลโดยใช้ฉนวนก๊าซ SF₆ เป็นสารฉนวนที่ช่วยลดความเครียดสนามไฟฟ้าที่บริเวณขั้วต่อสาย ขั้วต่อสายในงานวิจัยนี้จะมีลักษณะในการทนแรงอัดของปริมาณก๊าซได้ไม่ดีเท่าที่ควร มีปัญหาเรื่องการรั่วซึมของก๊าซ ดังนั้นในการพัฒนางานวิจัยนี้ต่อไปในอนาคตควรจะต้องออกแบบโครงสร้างของขั้วต่อสายให้สามารถทนต่อแรงอัดของก๊าซได้สูงขึ้น

5.3.2 ในการปกอสายเคเบิล XLPE ต้องใช้ความชำนาญและความระมัดระวังเป็นอย่างมาก เพราะถ้าฉนวน XLPE เกิดรอยขึ้น จะทำให้การทดสอบสายเคเบิล XLPE เกิดค่าดิสชาร์จบางส่วนและอาจจะนำไปสู่การเบรกดาวน์ทำให้ไม่สามารถเช็คได้ว่าสายไม่ได้คุณภาพจากผู้ผลิตจริงหรือเกิดจากความผิดพลาดในกระบวนการทดสอบ

5.3.3. การทดสอบควรทดสอบในตอนกลางคืนเพราะจะทำให้สัญญาณรบกวนน้อยลง เนื่องจากเป็นเวลาที่มีการใช้อุปกรณ์ต้นเหตุของการเกิดสัญญาณรบกวนนั้นน้อยทำให้ได้ค่าความเป็นจริงมากที่สุด หรือทดสอบในห้องที่มีการควบคุมสัญญาณรบกวน

ภาคผนวก ก
งานวิจัยที่ตีพิมพ์เผยแพร่



ICEE 2008 OKINAWA

The International Conference on Electrical Engineering 2008

July 6-10, 2008

Okinawa Convention Center, Japan

<http://www.icee-okinawa.org>

Organized by

The Institute of Electrical Engineers of Japan (IEEJ)

Co-organized by

The Korean Institute of Electrical Engineers (KIEE),
The Chinese Society for Electrical Engineering (CSEE), and
The Hong Kong Institution of Engineers (HKIE)



ICEE 2008 Secretariat

■ Address: Horai Horizon Bldg 8FL, 8-2

■ Fax: +81 3-3221-3704

Gobancho, Chiyoda-ku Tokyo 100-0076, JAPAN

■ E-mail: icee2008@ieee.or.jp



Welcome Message

Committee

Technical Papers

Acknowledgements

Oral Papers

HVI: High Voltage, Insulation & Sensing Technology (1)

July 8 (Tue.) 14:00-18:30 Conference Room B7

O-135 TAGAMI, Naoki OHKI, Yoshimichi TANAKA, Toshikatsu IMAI, Takahiro HARADA,
Miyuki OCHI, Mitsukazu

Interface between Filler and Resin in Epoxy/Clay Nanocomposites Cured with Acid Anhydride

O-136 OHKI, Yoshimichi HIRAI, Naoshi KANEKO, Shuhei OKABE, Shigemitsu

Applicability of Biodegradable Polymers to Electrical Insulation

O-137 KUDO, Yusuke SASAI, Haruki KOGOSHI, Sumio MURATA, Yuji

Necessary Driving Condition of AC Ionizer for Low-Potential Charge Elimination

O-138 HOHZAN, Kazuyoshi HONDA, Seiji FUKAO, Kazushi

Development of Portable Partial Discharge Monitor for Generatorstator Windings in Hydro Power Stations

O-139 LANTHARTHONG, Thong NEDPHOGRAW, Supawud HIRANVARODOM,

Somchai APIRATIKUL, Promsak

Analysis of Electric field and Modeling Design of High Voltage Cable Terminators for Partial Discharge Testing Using SF6 Insulator

O-140 NEDPHOGRAW, Supawud THONGKEAW, Somkieat PLANGKLANG,

Boonyang APIRATIKUL, Promsak

The Analysis of high-Voltage Electric Field Stress in Lp and Ls coils of Tesla Transformer for Studying the Efficiency Design

O-141 BAGHERI, Mehdi VAKILIAN, Mehdi HEKMATI, Arsalan

Simulation and Comparison of Impulse Voltage Distribution in Continuous, Intershield and Interleaved Disc Winding in Power Transformer

No. O-139

Analysis of Electric field and Modeling Design of High Voltage Cable terminators for PD Testing Using SF₆ Insulator

T.Lantharthong^{1,2} and S.Nedphograw¹

¹Department of Electrical Engineering , Faculty of Engineering
Rajamangala University of Technology Phra Nakhon (North Bangkok), Thailand.
Email: Supawudn_p_g@hotmail.com., Sup_EP37@rmutp.ac.th

S.Hiranvarodom² and P.Apiratikul²

²Department of Electrical Engineering , Faculty of Engineering
Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Thailand.

Abstract

This paper presents the analysis of electric field by using FEMLAB simulation tool to find the optimal electric field and component designs. Design of Cable terminator is tested by finding PD Value with IEC standard. This paper also proposes the electric stress when we design the cable terminator includes SF₆ insulator. The modeling design is very useful for High Voltage engineers to find the optimal solution of Cable terminator design.

keywords : Insulation, Electric Field Stress, Tesla Transformer

1. Introduction

Because of the country has a lot of improvement in distribute the electricity power. Underground Cable is a part of system. The testing to find the Partial Discharge inside the cable so that the stem of the High Voltage Cable XLPE is important for testing analysis. From the several study of the Stem Model which is connect to the High Voltage Cable. The example has model by analyze the High Voltage Electric Field from the calculation. But in this article would lead for analytical for finding Electric Field that happen in the cable so that it would be improve the stem model. From the oil transformer insulation and other insulation substance to be the insulation substance in the past to be the insulation which is using gas SF₆ to be insulation substance in the stem connection to High Voltage Cable that has present in this research.

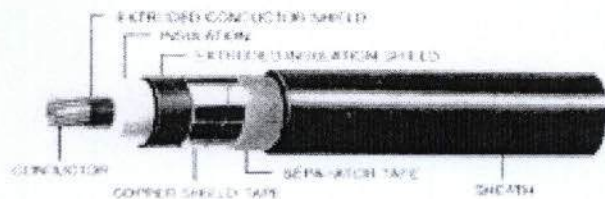


Figure 1: Structure inside the High Voltage Cable

In the consistent of insulation against electric voltage is the highest electric filed stress can endure without damage or lose the insulation state. In general, there could find from the regular electric field

From the first equation 1

$$E_{\max} = \frac{U}{d\eta^*} \quad (1)$$

By E_{\max} : is highest Electric Field Stress (kV/mm.)

U : is Electric Voltage (kV)

d : is the distance between electrons (mm)

η^* : is Electric Field Factor

Electric Field in the high voltage cable, to be use the insulation that has the value E_r that difference is suite for the irregular electric equation so that it would help the electric field stress in each insulation to have E_r value differently to be similar. The damage of electric field in the insulation that can count from the 2nd Equation

$$E_{r_x} = \frac{\epsilon_1 \epsilon_2 U}{r_x \epsilon_x \left(\epsilon_1 \ln \frac{r_3}{r_2} + \epsilon_2 \ln \frac{r_2}{r_1} \right)} \quad (2)$$

By E_{r_x} : is the Electric Filed Stress in the insulation at r_x (kV/mm.)

U : is Electric voltage that provide (kV)

ϵ_1, ϵ_2 : is Permittivity of the insulation 1 and 2

r_1 : is the radius of the conductor (mm.)

r_2, r_3 : is the Radius of the insulation 1 and 2

2. The Calculation of Electric Field Theory

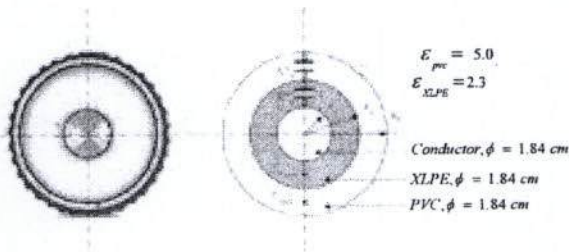


Figure 2: Showing the structure in the period that has the electric field stress in the high voltage cable XLPE

The diameter of the stem cable from figure, can finding the diameter of the stem cable from the 3rd equation. By r_1 is the radius of the conductor is worthy 9.2 mm > and r_2 is the radius of the stem so that it would be (High Voltage Engineering Book, Dr. Sumreuy Sungsaard)

$$\begin{aligned} r_2 &= r_1 \times e \\ &= 9.2 \times e \\ &= 25.01 \text{ mm} \end{aligned}$$

Instead the 2nd equation

$$\begin{aligned} Er_2 &= \frac{2.3 \times 1 \times 24000}{16 \times 1 \left(2.3 \ln \left(\frac{25.01}{16} \right) + 1 \ln \left(\frac{16}{9.2} \right) \right)} \\ &= 2.18 \text{ kV/mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Er'_3 &= \frac{2.3 \times 1.00191 \times 24000}{25.01 \times 1 \left(2.3 \ln \left(\frac{25.01}{16} \right) + 1 \ln \left(\frac{16}{9.2} \right) \right)} \\ &= 1.395 \text{ kV/mm} \end{aligned}$$

Suppose $r_3 = 50$ mm. Cause of his will create the stem connection which would have a radius equal to 50 mm. so that:

$$\begin{aligned} Er_3 &= \frac{2.3 \times 1 \times 24000}{50 \times 1 \left(2.3 \ln \left(\frac{50}{16} \right) + 1 \ln \left(\frac{16}{9.2} \right) \right)} \\ &= 348.69 \text{ kV/mm} \end{aligned}$$

From the Electric Field Stress Er_2 and Er_3 will find that can be use in the test without breakdown. This research is chose to use the stem model connect with the clear acrylic to be the insulation material for stem connection, which is durable for

the electric field stress around 35 kV/mm. By using the diameter 60 mm. and 5 mm. thick

3. Analysis of the Electric Field in the High Voltage Cable

The length of cable stem, consider from the voltage testing and the peel line system between the conductor and the ground. By the high voltage that uses to test according to the standard IEC 60502-2 is $2U_0$ equal to 24 kV. For the peel system distance, from the model of electric field stress distribute. It would be the distance of peel system equal 6.5 cm. According to the Figure by consider from contour of electric field between the tip of line system and ground. While consider with the tip of electric line system so that the all distance of a peel line system will equal to 9.5 cm. And when the oil transformer is control the distribution of the electric field in the whole distance at the tip of line system. It would be length at 20 cm.

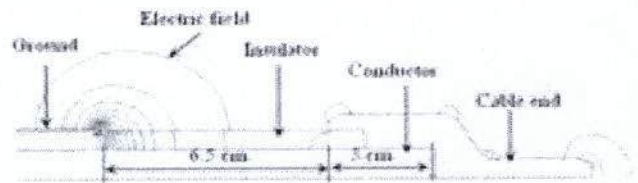


Figure 3: Contour of Electric Field at the tip of cable line

The model of electric distribution of the component. This project has bring the rule of finite element to help in the analysis of electric field stress distribute. By using 2 dimensions of analysis and without thinking the result of left purgative left. Use FEMLAB program which is high voltage in the test that is 24 kV and the value E_r from the result of electric distribution model from several component of the line system that design according the 3rd -4th picture

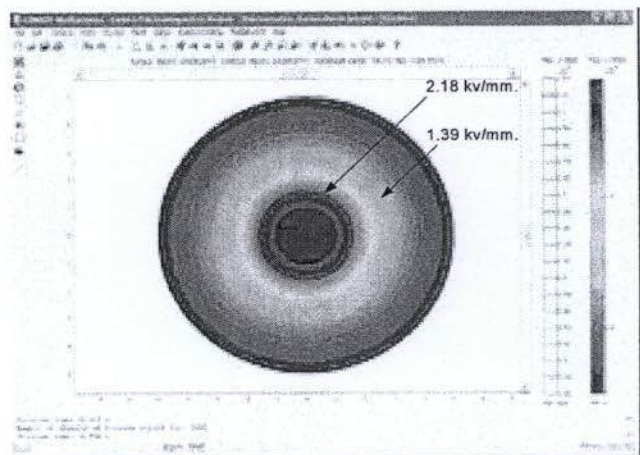


Figure 4: Show Simulations Electric Field Analysis

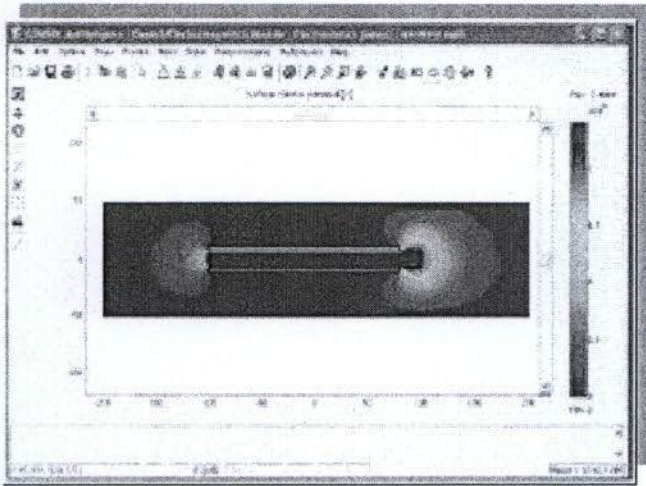


Figure 5: Show Simulations Electric Field Analysis

According to the theory of cylinder overlap axle that suitable. It can calculate the side of cylinder $r_2 = 25.01$ mm. or the diameter would worthy 50.02 mm. that is very difficulty in establishment. Because the area of cylinder face is less and difficult to insulate the gas pressure meter which is space and valve for air pressure and the important thing is cannot seal for gas inside. So that the suitable for the create and comfortable for the model so the design of the high voltage cable stem to be the diameter equal to 100 mm. The main test of the finite element program that model of electric field equal to 100 mm. The result that the value of the electric field would be insider the radius, its show that the cylinder that has 100 mm. diameters can be use

The model of the base support for the high voltage XLPE. A part of base support will have the touching with the high voltage cable stem. It should has a suitable point which would not built up the capacitance at the connection point so that it would be Partial Discharge. If the connection point is not match and the other task would be the cable connection point for testing to connect with the distributor. It's use as the aluminum from the picture 5-8

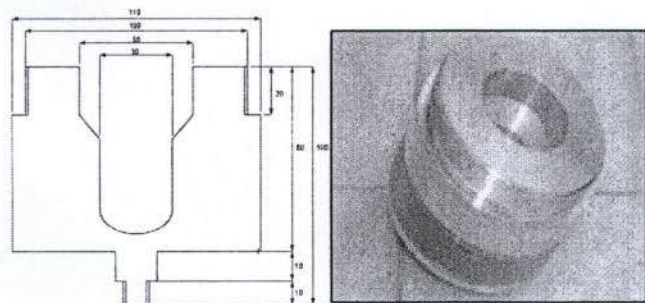


Figure 6: Show the pattern and the base supporter for the high voltage cable terminator

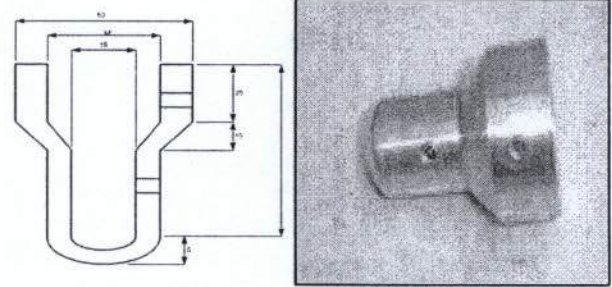


Figure 7: Show the pattern and high voltage cable terminator

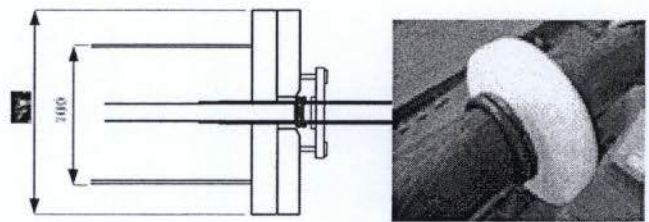


Figure 8: Show the pattern and Sail Gas SF₆ that leak out from the connection cylinder.

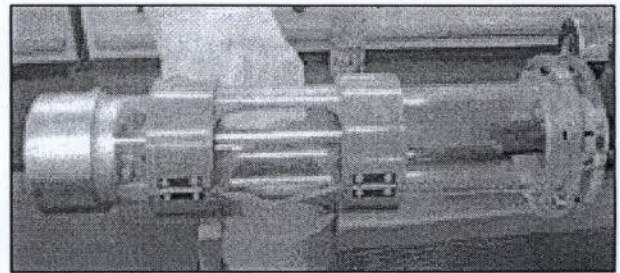


Figure 9: Show the pattern and line connection which is using gas SF₆ to be insulation

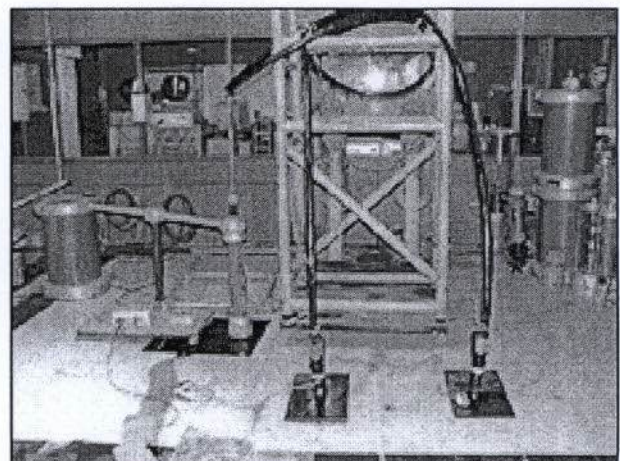


Figure 10: Show the circle of line connection which is using gas SF₆ to be insulation testing for finding the partial discharge value in the high voltage cable in the side of 24 kV

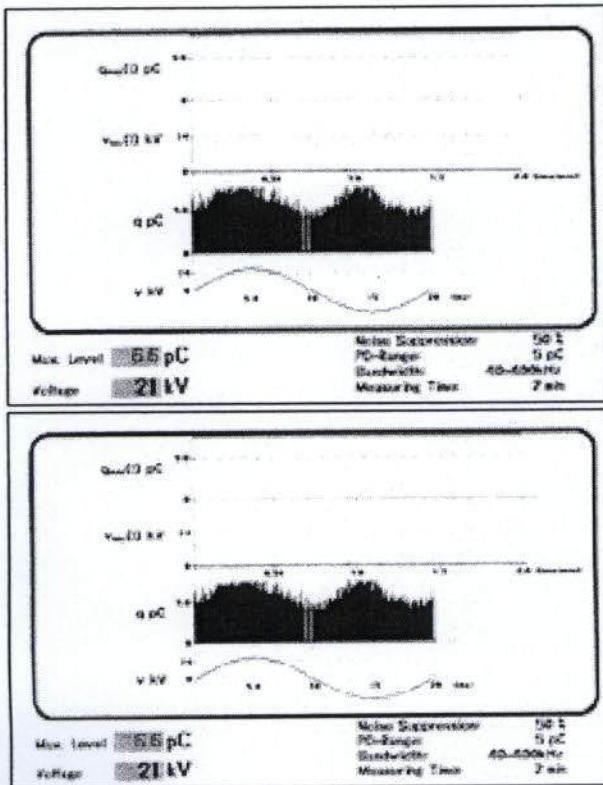


Figure 11: Show the example of the testing in the Partial Discharge Model

4. Summary of the Analysis

From the analysis finding the result of Electric Field Stress which occurs in the cable would make the line connection model in this research is easily done. Including help to know the distance of the cable peel which would mixture with the line system that has design from the analysis of electric field. It is easy to create the high voltage cable connection model for testing partial discharge which is using SF₆ to be insulation. It would be the improvement and innovative of the partial discharge measure that more effective for the future use.

5. References

- [1] Somruey Sangsaard ,High Voltage Engineering Book, Chulalongkorn University, 2549
- [2] Kuffel, E., & Abdullah, M., High-Voltage Engineering, Pergamon Press, 1977
- [3] N.Ahmed,O.Morel, N.Srinivas "Partial discharge measurement in Transmission cable Termination" IEEE Transec. On Dielectric and Electrical Insulation ,Nov.,1993, p.p 14-24
- [4] C. Boonseng, P. Apiratikul and K. Nakaviwat, " A High Voltage Cables Terminator for Partial Discharge and Dielectric Loess Measurement", IEEE 2002 International Symposium on Electrical Insulation ISEI'2002, April 7-10 2002, Boston Massachusetts USA, pp62-65.

6. Biographies (Optional)



Thong Lantharthong received his B.s.Tech (Electrical Technology) and M.s.Tech (Electrical Technology) degrees from Rajamangala Institute of Technology and King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok (KMUTNB). and M.Eng (Electrical Engineering) student at RMUTT. He has worked as lecturer at the Department of Electrical Power Engineering in RMUTP.,Thailand, His main research interests are applications of highvoltage Technology and highvoltage applications



Supawud Nedphograw received his B.Eng. and M.Eng. degrees in Electrical Engineering from Rajamangala University of Technology Thanyaburi (RMUTT.), King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMUTL.) He has worked as lecturer at the Department of Electrical Power Engineering of RMUTT. since June 1998. In November 2006 he worked as lecturer and Head ,Department of Electrical Power Engineering in RMUTP, Thailand. His main research interests are applications of highvoltage Technology, highvoltage applications and Power energy saving.



Asist.Prof.Dr. Somchai Hiranvarodom received his B.s.Tech(Electrical Technology) and Ph.D (Electrical Engineering),UNN, Newcastle,England. He has worked as lecturer at the Department of Electrical Power Engineering and Dean, Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi (RMUTT.) Thailand His main research interests are applications of Photovoltaic in Rural area, Solar Energy



Promsak Apiratikul received his B.Eng. and M.Eng.degrees in Electrical Engineering from Rajamangala University of Technology Thanyaburi (RMUTT.), King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMUTL.) &D.Eng (Electrical Engineering) Student at Kasetsart University (KU.),Thailand. He has worked as lecturer at the Department of Electrical Power Engineering of RMUTT.Thailand. His main research interests are applications of high voltage Technology , highvoltage applications



รวมเรื่องเด่น ฉบับสมบูรณ์

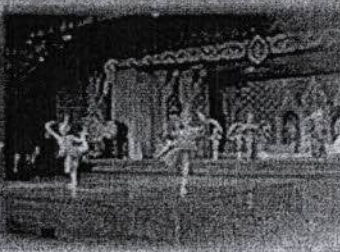
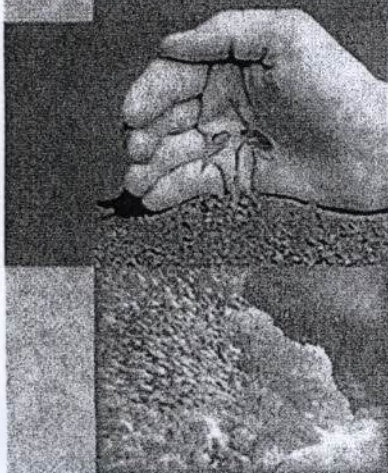
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ครั้งที่ 1



ถ่ายทอดงานวิจัยสู่สังคม เพื่อการพัฒนาอย่างยั่งยืน

ระหว่างวันที่ 27-29 สิงหาคม 2551

โรงแรมธรรมรินทร์ ธนา จังหวัดตรัง



หมวดเกษตรศาสตร์และชีววิทยา

ศ.ดร.เปี่ยมศักดิ์ เมนะเสวต	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศ.ดร.วินัย ประดอมพ์กาญจน์	มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์
ศ.ดร.อุทัยรัตน์ ณ นคร	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รศ.ดร.กังวาลย์ จันทโรชิตี	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รศ.ดร.ประทักษ์ ตาบทิพย์วรรณ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รศ.ดร.นงนุช รักสกุลไทย	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รศ.ดร.ชัยภูมิ บัญชาศักดิ์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รศ.ดร.นิรัตน์ กองรัตนานันท์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รศ.ดร.สุภาพร อสิริโยดม	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รศ.ดร.สมชัย จันทรสว่าง	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รศ.ดร.จารุมาศ เมฆสัมพันธ์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รศ.ดร.เชษฐพงษ์ เมฆสัมพันธ์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รศ.แสงเทียน อัจฉิมางกูร	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รศ.ชัชวีร์ แก้วสุรลิขิต	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ศ.ดร.สุทธวัฒน์ เบญจกุล	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
รศ.ดร.สายัณห์ สดุดี	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
รศ.ดร.สมหมาย เขี้ยววาริ์สัจจะ	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
รศ.ดร.วุฒิพร พรหมขุนทอง	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
รศ.ดร.พูนสุข ประเสริฐสรรพ	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
รศ.ดร.ฉลอง วัชรภากร	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รศ.เทอดศักดิ์ คำเหม็ง	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รศ.ดร.เทอดชัย เวียรศิลป์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รศ.ดร.ตัณษัย จตุรดิษฐา	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รศ.ดร.สุชน ตั้งทวีวัฒน์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รศ.ดร.เกรียงไกร โชประการ	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
รศ.ดร.ทวนทอง จุฑาเกตุ	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
รศ.ดร.สุนีย์รัตน์ ศรีปารยะ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
รศ.ดร.สมพร ณ นคร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

รศ.ดร.สุวัจน์ ธีญรส	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
รศ.มุกดา สุขสวัสดิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ผศ.ดร.ธีรวุฒิ เลิศสุทธิขวาด	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ผศ.ดร.สุวิทย์ สุวรรณโณ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
รศ.ดร.เดือนตา ขาญศิลป์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
รศ.ดร.กิตติมา มั่นทรานนท์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
รศ.ประพศุติ พรหมสมบูรณ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
รศ.ดร.รัชนี พนเจริญสวัสดิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลด้านนา
รศ.ดร.อนุชา จันทบูรณ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลด้านนา
รศ.ดร.อัญชลี สงวนพงษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รศ.เกษภา อิศหะ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
รศ.ดร.เกษม สร้อยทอง	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หมวดศึกษาศาสตร์

ศ.ดร.สุวิมล ว่องวานิช	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รศ.ดร.สุชาดา บวรกิตติวงศ์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รศ.ดร.อวยพร เรืองตระกูล	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รศ.ดร.ดวงกมล ไตรวิจิตรคุณ	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รศ.ดร.ไพแสง รักวานิช	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รศ.ดร.เพ็ญขวัญ ชมปรีดา	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รศ.ดร.ณรงค์ สมพงษ์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รศ.ดร.นาคยา ปิณฑานนท์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รศ.ดร.พรทิพย์ ไชยโส	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รศ.สุรัชย์ ประเสริฐสรวย	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รศ.ดร.ศรัณยา บุญนาค	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
รศ.ดร.สุวิมล เขียวแก้ว	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
รศ.ดร.ดวงมณี จงรักษ์	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
รศ.ดร.ม่องศรี วาณิชย์สุภวงศ์	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
รศ.ชুমศักดิ์ อินทร์รักษ์	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

รศ.สมแก้ว รุ่งเลิศเกรียงไกร	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
รศ.อำพร วิริยโกศล	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
รศ.ดร.ทรงศรี สรณสถาพร	มหาวิทยาลัยมหิดล
รศ.ดร.ทัศนาศ แสงศักดิ์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
รศ.ดร.คมเพชร ฉัตรศุกกุล	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
รศ.ดร.ชูชีพ อ่อนโคกสูง	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
รศ.ดร.ศิริชัย ชินะตั้งกูร	มหาวิทยาลัยศิลปากร
รศ.ดร.กฤษณา รัตนพฤษช์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รศ.ดร.รวีพร คูเจริญไพศาล	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รศ.นิตยา เจริญประเสริฐ	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รศ.บุญสวาท พฤษภิกานนท์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รศ.ชูศรี เที้ยศิริเพชร	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รศ.ชัยยศ สันติวงษ์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รศ.ดร.พฤติพงษ์ เล็กศิริรัตน์	มหาวิทยาลัยทักษิณ
รศ.อนันท์ อารีย์พงษ์	มหาวิทยาลัยทักษิณ
รศ.ศุภวดี บุญญวงษ์	มหาวิทยาลัยทักษิณ
รศ.ดร.อัศวิน พรหมโสภิตา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ผศ.สมศรี มุสิกวงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
รศ.ดร.ชนนกรณ์ กุณฑลบุตร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รศ.ดร.สุนันทา เลานันท์	มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา

หมวดวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์

ศ.ดร.บัณฑิต จริโมภาส	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รศ.ดร.พันธุ์ปิติ เปี่ยมสง่า	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รศ.ดร.วิชัย กิจวัตรเวทย์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รศ.ดร.กฤษณะ ไวยมัย	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รศ.ดร.ประทีป ดวงเดือน	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รศ.ดร.ศิริกัลยา สุวจิตตานนท์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

รศ.ดร.รัชฎูญะ เกียรติวัฒน์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รศ.ดร.ประคนเดช นีละคุปต์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รศ.ดร.อภิญา ดวงจันทร์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รศ.ดร.อนันต์ ผลเพิ่ม	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รศ.ดร.วรากร ไม้เรียง	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รศ.ดร.พีรยุทธ์ ชาญเศรษฐีกุล	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รศ.ดร. รัชฎูญา นิยมภา	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รศ.สุรศักดิ์ สงวนพงษ์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รศ.มนตรี พิรุณเกษตร	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รศ.ดร.สินชัย กมลวิวงศ์	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
รศ.ดร.กิติเชษฐ ศรีดิษฐ์	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
รศ.ดร.ชูศักดิ์ ลิมสกุล	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
รศ.ดร.พีรพงศ์ ทิมสกุล	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
รศ.ดร.ชูเกียรติ คุปตานนท์	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
รศ.ดร.เล็ก สีคง	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
รศ.ดร.ฉัตรชัย กลิ่นทิกุล	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ผศ. ดร.พนาลี ชีวกิตการ	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ศ.ดร.ประดิษฐ์ เทอดฑูต	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ศ.ดร.ทนางเกียรติ เกียรติศิริโรจน์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รศ.ดร.สมใจ กาญจนวงศ์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รศ.ดร.สมบัติ ชีระตระกูลชัย	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รศ.ดร.ปริญญา จินดาประเสริ	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รศ.ดร.ธนู ฤยฉาย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.วิบูลย์ ชื่นแขก	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.ประยุทธ อัครเอกตาดิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.สุรพล ราษฎร์นุ้ย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.ชัยพร วงศ์พิศาล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.สุเทพ บุตรดี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.วรา วราวิทย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ศ.ดร.ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศ.ดร.สมชาย วงศ์วิเศษ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

รศ.ดร.โกสินทร์ จำนงไทย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร.ชัย จาตุรพิทักษ์กุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร.ธำรงรัตน์ อมรรักษา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร.รักษ์ ดำนังรักษ์	มหาวิทยาลัยนเรศวร
รศ.ดร.เสวียน เปรมประสิทธิ์	มหาวิทยาลัยนเรศวร
รศ.สุชาติ เย็นวิเศษ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
รศ.มนัส อนุศิริ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
รศ.ไพจิตร อังศิริวัฒน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
รศ.วัฒนาพร เชื้อนสุวรรณ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ศ.ดร.ถวิล พึ่งมา	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ศ.ดร.วิวัฒน์ กิรานนท์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.ชชาติ ปิณฑวิรุจน์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.มนัส สังวรศิลป์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.สมเกียรติ สุขเกษ	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.ชัยวุฒิ ฉัตรอุทัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.ชนินทร์ บุญลักษณะนุสรณ์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.มงคล มงคลวงศ์โรจน์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.วันชัย ธีรรูจา	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.รัตติกกร วรากุลศิริพันธ์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.วรพงศ์ ตั้งศรีรัตน์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.ปราโมทย์ วาดเขียน	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.โยธิน เปรมปรางค์รัชต์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.จรรยา วงศ์เพชรธรรม	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.วีระเชษฐ ชันเงิน	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.สุรพันธ์ เอื้อไพบูลย์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.สมผล โกศลวิตร	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.วิจิตร กิณเรศ	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.สุริภณ สมควรวพานิชย์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.ชวลิต เบญจางคประเสริฐ	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.วิภา แสงพิสิทธิ์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

รศ.ดร.ไกรสิน ส่วงวัฒนา
รศ.ดร.อิทธิชัย อรุณศรีแสงชัย
รศ.ดร.กิตติ ไพฑูรย์วัฒนกิจ
รศ.ดร.จงกล งามวิวิทย์
รศ.ดร.สมศักดิ์ ชุมช่วย
รศ.ดร.สมชาติ จิรวินิจกร
รศ.ดร.วิสุทธิ ฐิติรุ่งเรือง
รศ.ดร.ปานมนัส ศิริสมบูรณ์
รศ.ดร.นพดล สหชัยเสรี
รศ.พิชัย สดภิบาล

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



75.	เครื่องปิดผนึกด้วยพลาสติกด้วยฟิล์มโพลีพรอพิลีนแบบอัตโนมัติ / Automatic Machine for Sealing A Plastic Cup by Polypropylene film. อนินท์ มีมนต์, สมศักดิ์ อธิโรโสภณกุล, นิพนธ์ กิจชะระภูมิ และ ศักดิ์ชัย จันทศรี	803
76.	แรงลมในเขตพื้นที่ชายฝั่งของอำเภอเมืองสงขลา / WIND LOAD OF SONGKLA COASTAL. จรรยา เจริญเนตรกุล	811
77.	การวิเคราะห์หาค่าศักยภาพการประหยัดพลังงานไฟฟ้าและประสิทธิภาพของเครื่องปรับอากาศหลังการทำความสะอาด / Potential of energy savings and Energy Efficiency Ratio Analysis after the air-conditioner coils cleaning. ประมุข อุณหเลขกะ และ สันติ อิศวศรีพงษ์ธร.....	825
78.	วงจรกรองความถี่โหมดแรงดันหลายหน้าที่สามอินพุตหนึ่งเอาต์พุตโดยใช้ CCCDTA เพียงตัวเดียว / Three-Input Single-Output Voltage-Mode Universal Biquad Filter Using Single CCCDTA. วินัย ไจกล้ำ และ มนต์รี ศิริปรัชญานันท์	833
79.	ความต้องการจัดหาพัสดุภาครัฐโดยวิธีตกลงราคาด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์ / Needs for Thai government Inventory management based on electronic shopping approach อรอุษา ขำเกลี้ยง	842
80.	วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงโดยใช้สวิตช์เดี่ยวสำหรับเตาหุงต้มชนิดเหนียวน้ำ / A High-Frequency AC Converter with a Single Switch for Induction Cooker. สายชล ชุตเจือจิ้น, วิเชียร ทรัพย์รัตนศิริ, สายัณห์ เกลี้ยงสิน และ ชยันต์ คุ้มภัย.....	851
81.	การออกแบบและสร้างขั้วต่อสายเคเบิลใต้ดิน XLPE แรงดันสูงพิกัด 24 kV เพื่อทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนโดยประยุกต์ใช้ก๊าซ SF ₆ เป็นสารฉนวน / The Design and Construction of High Voltage Underground Cable Terminator XLPE 24 kV for testing the Partial Discharge Measurement by the Application of SF ₆ gas Insulation. ทอง ลานธารทอง, สมชัย นีร์ญวโรดม และ พร่อมศักดิ์ อภิรติกุล	859
82.	การศึกษามลกระทบขดเหนียวน้ำของหม้อแปลงเตสลาเพื่อหามิติที่เหมาะสม / The study of an effect of coupling inductance in Tesla Transformer for the best dimension. สมเกียรติ ทองแก้ว, บุญยัง ปลั่งกลาง และ พร่อมศักดิ์ อภิรติกุล	872
83.	เครื่องต้นแบบระบบการพิมพ์สกรีนแบบกึ่งอัตโนมัติ / A Prototype Semi automation Screen Printing Machine จันทร์ประภา พ่วงสุวรรณ, เอกชัย โถเหล็ก และ อนินท์ มีมนต์.....	884
84.	ระบบบำบัดน้ำเสียในครัวเรือนเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ / Water Treatment System From Household Hazardous. วัลลภ ภูผา, ศุภวุฒิ เนตรโพธิ์แก้ว และ อรุณ ชลิ่งสุทธิ	891
85.	การกัดกร่อนเนื่องจากกรดซัลฟูริกของมอร์ตาร์ผสมโดโลไมต์และมอร์ตาร์ผสมหินฝุ่น / Corrosion due to Sulfuric Acid of Mortar mixed with Dolomite and Quarry Dust. ประชุม คำพุ่ม, กิตติพงษ์ สุวีโร และ ประภาส วันทอง.....	909

การออกแบบและสร้างหัวต่อสายเคเบิลใต้ดิน XLPE แรงดันสูงพิกัด 24 kV
เพื่อทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนโดยประยุกต์ใช้ก๊าซ SF₆ เป็นสารฉนวน

The Design and Construction of High Voltage Underground Cable Terminator XLPE 24 kV
for testing the Partial Discharge Measurement by the Application of SF₆ gas Insulation

ทง ลานธารทอง สมชัย หิรัญวารอดม และ พร่อมศักดิ์ อภิรัติกุล

Thong Lantanthong Somchai Hiranvarodom and Promsak Apiratikool

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบและสร้างหัวต่อสายเคเบิลใต้ดิน XLPE แรงดันสูงพิกัด 24 kV เพื่อทำการทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนโดยประยุกต์ใช้สารฉนวนก๊าซ SF₆ โดยมีการคำนวณหาค่าสนามไฟฟ้าและออกแบบโดยนำระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์มาประยุกต์ใช้ในการออกแบบเพื่อจำลองการกระจายของความเครียดสนามไฟฟ้า (E_{max}) ที่เกิดขึ้นในหัวต่อสายเคเบิลในสภาวะที่ยังไม่มีสารฉนวน เพื่อให้ทราบค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด และนำมาสู่การออกแบบรวมถึงประยุกต์ใช้สารฉนวนโดยสารฉนวนที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้คือฉนวนก๊าซ SF₆ ซึ่งมีคุณลักษณะสมบัติเป็นฉนวนที่ดีในทางไฟฟ้า และเพื่อคำนวณหามิติที่เหมาะสมของหัวต่อสายซึ่งใช้ฉนวนก๊าซเป็นตัวควบคุมสนามไฟฟ้าบริเวณปลายสายเคเบิล หัวต่อสายเคเบิลที่ได้จากการออกแบบสามารถใช้ในการทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนได้ตามมาตรฐาน IEC 60270 ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ประยุกต์และพัฒนาการออกแบบหัวต่อสายชนิดใช้สารฉนวนประเภทน้ำมันหม้อแปลงมาเป็นฉนวนก๊าซ SF₆ ทั้งนี้เพื่อศึกษาวิจัยหาผลที่ได้จากการสร้างหัวต่อสายชนิดใช้สารฉนวนประเภทก๊าซ รวมทั้งเป็นการพัฒนาแนวทางและวิธีการที่เหมาะสมในการทดสอบวัดหาค่าดิสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิลแรงดันสูงต่อไปได้ในอนาคต

คำสำคัญ : หัวต่อสายเคเบิลใต้ดิน, ดิสชาร์จบางส่วน, ความเครียดสนามไฟฟ้า, สารฉนวน, สนามไฟฟ้า, สายเคเบิล, สายเคเบิลแรงดันสูง

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thunyaburi

_Corresponding author. E-mail : thong2499@hotmail.com

ABSTRACT

This research aimed to design and construct the XLPE 24 kV high voltage cable terminator in order to find out the partial discharge with the application of SF₆ gas insulation. Then, it was calculated to find out the electric field parameter and designed to simulate the distribution of electric field stress at the cable terminator in non-insulation condition by the application of finite elements method. Moreover, the experiment after aimed to find out the optimum parameter of Electric field Stress and the application of insulation called SF gas insulation which is a good insulator. In addition, the appropriate dimension of cable terminator with gas insulation to control the electric field at the end of underground cable was calculated. This designed cable terminator can be used to examine the partial discharge according to IEC 60270 Standard. In this research, the researcher applied the SF gas insulation with the cable terminator instead of transformer oil. The researcher also studied the output of the cable terminator with gas insulation for developing appropriate method to test the partial discharge of high voltage in the future.

Key words : Cable Terminator , Partial Discharge , Electric Field Stress, Insulation, Electric Field Underground Cable , High Voltage Underground Cable

1. คำนำ

จากปัญหาอุปสรรคการทดสอบทางวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงมีราคาสูงเมื่อนำเข้ามาในประเทศ ประกอบกับในประเทศไทยสามารถผลิตสายเคเบิลแรงดันสูงได้ดินแบบ XLPE หรือเดินสายใต้น้ำ ดังนั้นการตรวจสอบฉนวนที่หุ้มสายเคเบิลที่ผลิตออกมาจากโรงงานอุตสาหกรรมสายเคเบิลมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทำการทดสอบสายตามค่ามาตรฐานการทดสอบกำหนด สำหรับในงานวิจัยนี้จะได้นำเสนอวิธีการและการออกแบบเพื่อทำการทดสอบการหาค่าดิสชาร์จบางส่วนตามค่ามาตรฐาน IEC 60270 ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการออกแบบสร้างชุดขั้วต่อสายเพื่อทำการทดสอบสายเคเบิลแรงดันสูง XLPE ขนาดพิกัด 24 กิโลโวลท์ ขนาดของสายที่ทำการทดสอบ 240 ตารางมิลลิเมตร เป็นชุดทดสอบการวัดหาค่าดิสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge) และเป็นการทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของไดอิเล็กตริกของฉนวนแข็ง (Solid Dielectric Insulation) ที่เป็นฉนวนประเภท XLPE ของสายเคเบิลแรงสูง โดยในชุดขั้วต่อสายจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องลดค่าความเครียดสนามไฟฟ้าภายในชุดขั้วต่อสายเพื่อให้ค่าดิสชาร์จบางส่วนในส่วนของขั้วต่อสายมีค่าน้อยที่สุดหรือไม่มีเลยเพื่อให้ได้ค่าดิสชาร์จบางส่วนที่ทำการวัดภายในสายเป็นค่าดิสชาร์จบางส่วนของสายอย่างแท้จริง โดยปัจจัยสำคัญในการตรวจสอบความผิดปกติและสิ่งบกพร่องเนื่องจากขบวนการผลิตจากโรงงานซึ่งเป็นการทดสอบแบบไม่ทำลายและสามารถทำนายถึงอายุการใช้งานในลักษณะของการเสื่อมสภาพทางกายภาพของสายเคเบิล ทั้งนี้ในการออกแบบขั้วต่อสายในลักษณะที่ผ่านมานั้นจะออกแบบใช้

น้ำมันหม้อแปลงเป็นสารฉนวนแต่ในงานวิจัยนี้เป็นการออกแบบสร้างและพัฒนาสารฉนวนเพื่อศึกษาผลที่ได้จากการใช้ฉนวนก๊าซเป็นฉนวนที่ช่วยลดค่าความเครียดสนามไฟฟ้าภายในขั้วต่อสายเพื่อให้ได้ค่าการวัดดิสชาร์จบางส่วนเป็นค่าที่ถูกต้องและแม่นยำที่สุด โดยในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบโดยใช้หลักการใช้ทฤษฎีของไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) ในการวิเคราะห์หาค่าของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นก่อน ทั้งนี้เพื่อศึกษาพฤติกรรมในการเกิดค่าความเครียดสนามไฟฟ้า (Electric Field Stress) ของขั้วต่อสายในขณะป้อนแรงดันสูงเข้าที่ขั้วอิเล็กโตรด เพื่อนำไปสู่การออกแบบขนาดและรูปแบบของขั้วต่อสาย รวมถึงการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ

2. อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

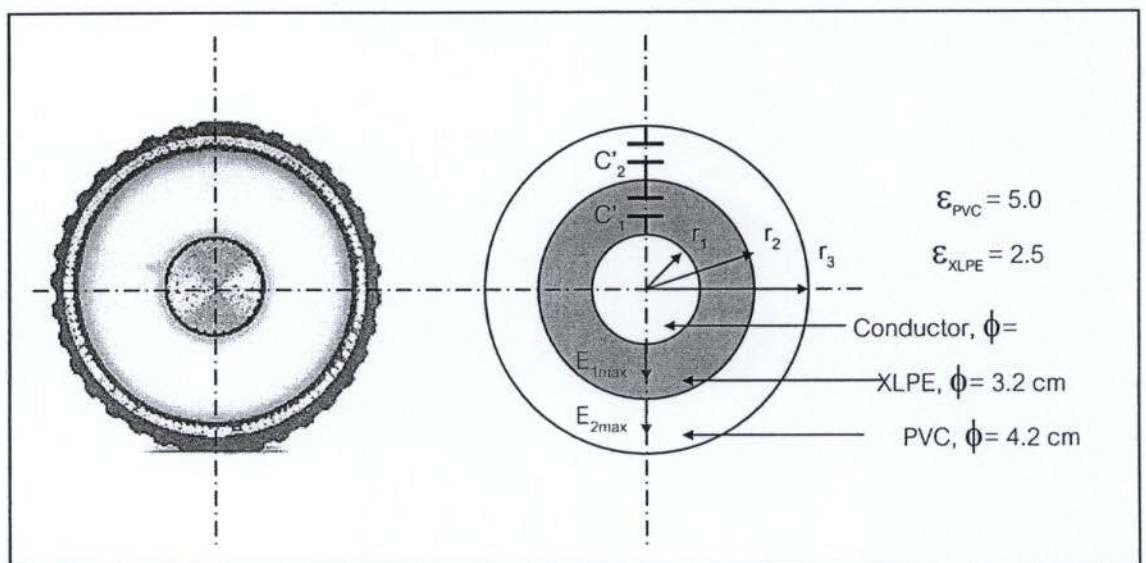
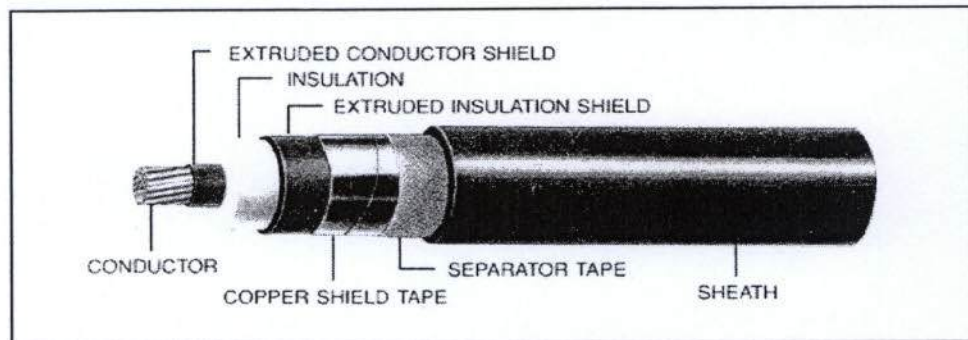
1. คั้นคว่ำและศึกษาข้อมูลจากบทความ วารสาร และตำรา ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับทฤษฎีที่ใช้ในการสร้างขั้วต่อสายเคเบิลใต้ดิน XLPE แรงดันสูงพิกัด 24 KV
2. จำลองวงจรขั้วต่อสายแรงดันสูงพิกัด 24 KV 240 Sq mm. ด้วยโปรแกรม MathLab และ FemLab
3. ออกแบบส่วนประกอบและโครงสร้างต่างๆ ของขั้วต่อสายและแรงดันสูง
4. ทำการทดสอบหาคุณลักษณะการทำงานของขั้วต่อสาย
5. เก็บผลที่ได้จากการจำลอง และการทดลองมาเปรียบเทียบกัน
6. สรุปผลการวิจัยและการทดลอง

การวัดดิสชาร์จบางส่วน (PD)

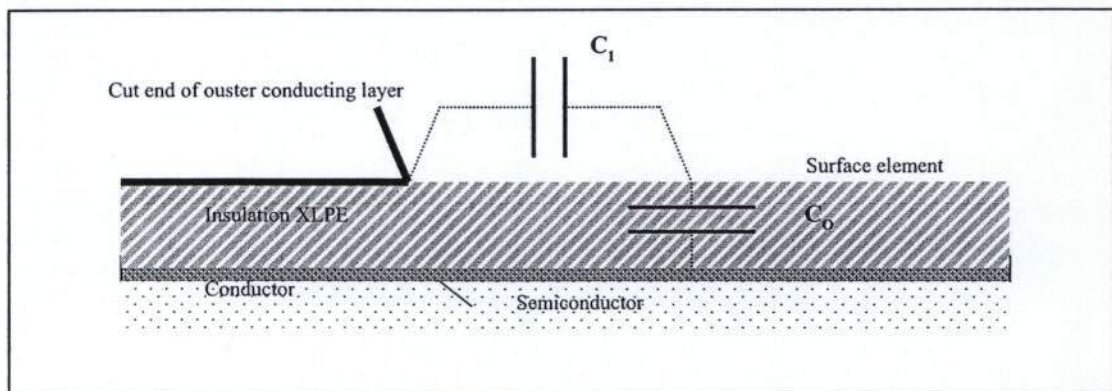
ในสมัยเริ่มแรกที่มีการทดสอบวัสดุฉนวนและอุปกรณ์ไฟฟ้ามักจะใช้วิธีวัดความต้านทาน แฟคเตอร์ พลังงานสูญเสีย $\tan \delta$ และทดสอบหาค่าแรงดันเบรคดาวน์ พบว่าค่า $\tan \delta$ นั้นขึ้นอยู่กับขนาดแรงดัน จึงใช้เป็นเงื่อนไขในการกำหนดคุณภาพของการฉนวน การค้นคว้าวิจัยต่อมาพบว่า โพรงรอยร้าว รอยแตก หรือการฉนวนที่ไม่สมบูรณ์ภายในจะทำให้เกิดการดิสชาร์จบางส่วนขึ้น (PD)

ดิสชาร์จบางส่วนอาจทำให้เกิดผลได้หลายอย่าง เช่น แสง เสียง รั้งสี ปฏิกริยาเคมี และผลทางไฟฟ้า เป็นต้น ผลของดิสชาร์จทำให้เกิดพลังงานสูญเสียและยังก่อให้เกิดความเสียหายต่อระบบการฉนวน ทำให้อนวนเสื่อมสภาพเร็ว อายุการใช้งานของอุปกรณ์สั้นลง และนำไปสู่การเบรคดาวน์ในที่สุด ฉะนั้นผู้วิจัยได้ออกแบบการฉนวนอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง จึงถือเอา PD เป็นแฟกเตอร์สำคัญที่บอกถึงคุณภาพของอุปกรณ์ จึงพยายามหลีกเลี่ยงไม่ให้เกิด PD ขึ้น โดยออกแบบลักษณะอิเล็กโตรดที่ปราศจากความเครียดสนามไฟฟ้าสูงเกินกว่าขีดความคงทนของฉนวน อย่างไรก็ตามในการฉนวนอุปกรณ์แรงสูงหลายๆ มีความยุ่งยากซับซ้อน PD อาจเกิดขึ้นโดยมิได้ตั้งใจ หรืออาจมีความบกพร่องใน

กระบวนการผลิต หรือคุณภาพของฉนวนไม่ได้ตามที่กำหนด จึงจำเป็นต้องมีการตรวจวัด การเกิด PD อาจมีสาเหตุได้หลายรูปแบบ การทราบสาเหตุและตำแหน่งที่เกิดขึ้นแน่นอนจะช่วยให้แก้ไขปรับปรุงการฉนวนได้ถูกต้องรวดเร็ว



รูปที่ 1 องค์ประกอบการคำนวณสนามไฟฟ้าที่สายเคเบิลในลักษณะทรงกระบอกแกนร่วม



รูปที่ 2 แสดงค่าคาปาซิแตนซ์ของสายเคเบิลแรงดันสูง

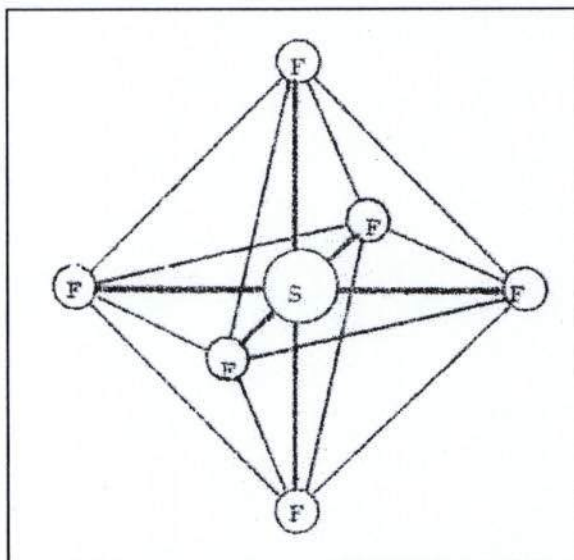
ฉนวนก๊าซใช้ก๊าซ SF₆ เป็นฉนวน

ปัจจุบันก๊าซ SF₆ (Sulphur Hexafluoride) ได้รับความสนใจและมีบทบาทสำคัญต่อเทคโนโลยีของการฉนวนใหม่ในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง เพราะก๊าซ SF₆ มีคุณสมบัติในการเป็นฉนวนทางไฟฟ้าที่ดี มีความมั่นคงต่อแรงดันไฟฟ้าที่สูงที่ความดันค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับการใช้ก๊าซชนิดอื่น ๆ มาใช้เป็นฉนวน มีเสถียรภาพมั่นคงต่อความร้อนและปฏิกิริยาเคมี

การเลือกใช้ก๊าซเป็นฉนวนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงขึ้นอยู่กับแฟคเตอร์ต่างๆ หลายประการที่สำคัญ คือ ต้องมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าที่ความดันของก๊าซไม่สูงมากนัก กลั่นตัวเป็นของเหลวที่อุณหภูมิต่ำ เจือยต่อปฏิกิริยาเคมี ไม่เป็นพิษ ไม่ติดไฟ และถ่ายเทความร้อนได้ดี จากลักษณะสมบัติดังกล่าวจะเห็นว่า ก๊าซ SF₆ มีคุณสมบัติของการเป็นฉนวนครบถ้วน

คุณสมบัติทางฟิสิกส์และเคมีของก๊าซ SF₆

ก๊าซ SF₆ เป็นสารประกอบของโบลิอะตอมมิคโมเลกุลของกำมะถัน ดังรูปที่ 3 เป็นก๊าซไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส ไม่เป็นพิษ ไม่ติดไฟ และไม่ช่วยให้ไฟติด เป็นก๊าซที่เจือยต่อปฏิกิริยาเคมีกับสารอื่น และจะคงสภาพเดิมแม้ว่าจะถูกทำให้ร้อนถึง 500 °C ภายในอุปกรณ์ที่มีการปิดมิดชิดปราศจากออกซิเจนและความชื้น ซึ่งเป็นคุณสมบัติทั่วไปของก๊าซ SF₆ สรุปได้ดังตารางที่ 1



รูปที่ 3 โมเลกุลของ SF₆

ตารางที่ 1 แสดงคุณสมบัติของก๊าซ SF₆

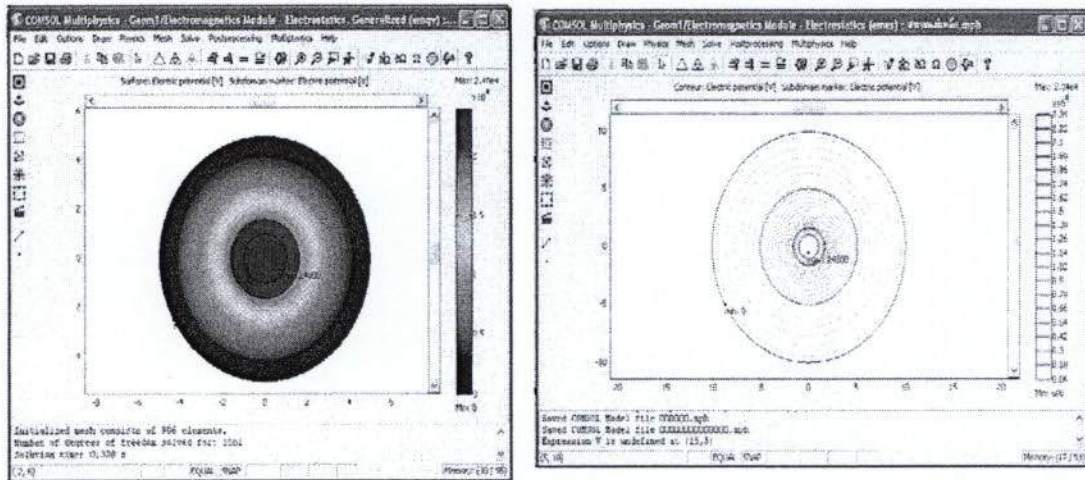
คุณสมบัติของก๊าซ SF ₆	
น้ำหนักโมเลกุล	146.06
จุดหลอม	-50.8 °C
อุณหภูมิของจุด	-63.6 °C
อุณหภูมิวิกฤต	-54 °C
ความดันวิกฤต	36.75 atm
ความหนาแน่นวิกฤต	0.73 กิโลกรัมต่อลิตร
ความหนาแน่นไอ	6.16 กรัมต่อลิตร
ความหนาแน่นของเหลว	1.56 กิโลกรัมต่อลิตร
ความดันไอที่ 20 °C	20.74 atm
สภาพนำความร้อนที่	7.1×10^{-5} cal/cm ² /°C/sec
เปอร์มิตติวิตี ϵ_r	1.00191
ปริมาตรการละลายในน้ำคิดเทียบกับ °C และ 1 atm ที่ 20 °C ที่ 50 °C	6.31 cm ³ SF ₆ 3.52 cm ³ SF ₆
ปริมาตรการละลายในน้ำมันคิดเทียบกับ °C และ 1 atm ที่ 20 °C ที่ 50 °C	0.408 cm ³ SF ₆ / cm ³ oil 0.302 cm ³ SF ₆ / cm ³ oil

คุณสมบัติทางไฟฟ้าของก๊าซ SF₆

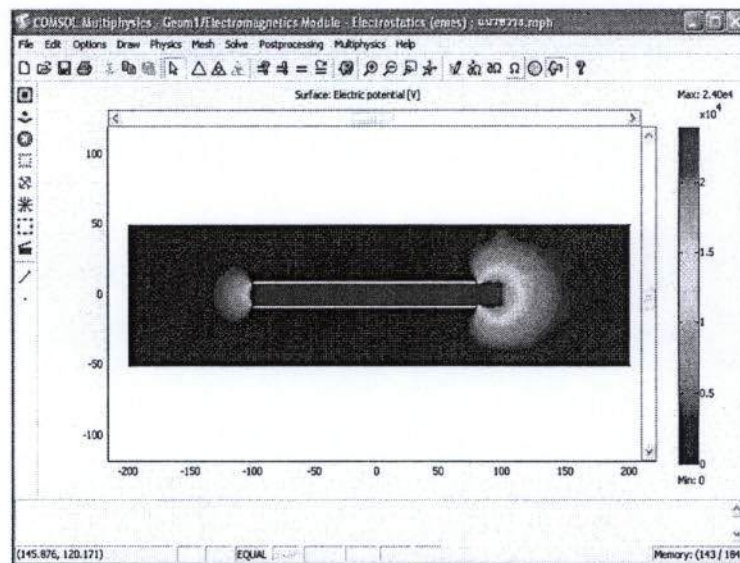
ก๊าซ SF₆ มีความหนาแน่นประมาณ 5 เท่าของอากาศ ซึ่งนับว่าเป็นก๊าซที่มีน้ำหนักมาก จึงทำให้มีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าก๊าซอื่นๆ ที่ใช้เป็นฉนวน ก๊าซ SF₆ จะมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าที่ความดันบรรยากาศประมาณ 2.5 เท่าของอากาศ และจะมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าได้เท่ากับน้ำมันหม้อแปลงเมื่อ SF₆ มีความดันอัดประมาณ 3 bar

คุณสมบัติของก๊าซ SF₆ ที่สำคัญอีกประการหนึ่งคือ ก๊าซ SF₆ มีสัมประสิทธิ์ไอออไนเซชัน (ionization coefficient) ต่ำมากเมื่อเทียบกับอากาศ ก๊าซที่มีสัมประสิทธิ์ไอออไนเซชันต่ำย่อมหมายถึงอัตราการเพิ่มทวีคูณของอิเล็กตรอนในก๊าซนั้นต่ำ นั่นคือค่าแรงดันเบรกดาวนจ์จะมีค่าสูง ทั้งนี้เพราะว่าโมเลกุลของก๊าซ SF₆ มีคุณสมบัติจับตัวอิเล็กตรอนอิสระที่เคลื่อนที่อยู่ในบริเวณที่มีสนามไฟฟ้ากระจายอยู่ได้ กล่าวคืออิเล็กตรอนอิสระที่เกิดจากการไอออไนเซชันจะไปเกาะอยู่โมเลกุลที่เป็นกลางทำให้โมเลกุลของก๊าซกลายเป็นไอออนลบจึงเรียกว่า SF₆ เป็นก๊าซไฟฟ้าลบ (electronegative gas)

ผลการวิเคราะห์ค่าการเกิดความเครียดสนามไฟฟ้าแรงสูงที่ป้อนภายในขั้วต่อสายเพื่อทำการ
ออกแบบ



รูปที่ 4 แสดงค่าศักย์สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในขั้วต่อสายจากการใช้โปรแกรม FEMLAB วิเคราะห์



รูปที่ 5 แสดงค่าเส้นศักย์ของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงจากการใช้โปรแกรม
FEMLAB วิเคราะห์

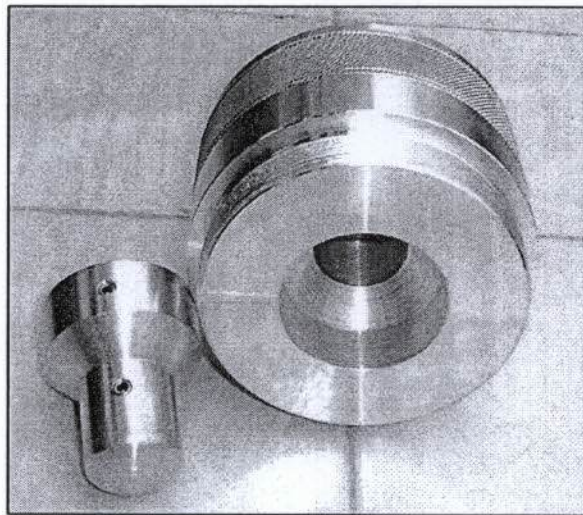
แนวความคิดทฤษฎีที่ใช้

งานวิจัยนี้ได้มีการตรวจสอบข้อมูลในเชิงพาณิชย์ในเรื่องของการค้าทดสอบสายเคเบิลแรงดันสูงหรือ
ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงที่ใช้สำหรับการทดสอบแล้วพอสมควร จะใช้โครงสร้างการควบคุมการหักเหของ
สนามไฟฟ้าที่เกิดปลายสายเคเบิลแรงดันสูงด้วยฉนวนเหลวคือ น้ำมันหม้อแปลงและในระดับแรงดันสูงที่มี
มากกว่า 75 กิโลโวลต์ จะใช้ฉนวนเหลว คือ น้ำมันบริสุทธิ์ ยังไม่มีการออกแบบและพัฒนางานวิจัยในส่วนนี้เลยที่
ใช้ฉนวนเหลวที่ทำจากก๊าซ SF_6 และในส่วนที่เป็นทฤษฎีและหลักการใหม่ที่จะนำมาใช้ในการออกแบบและ

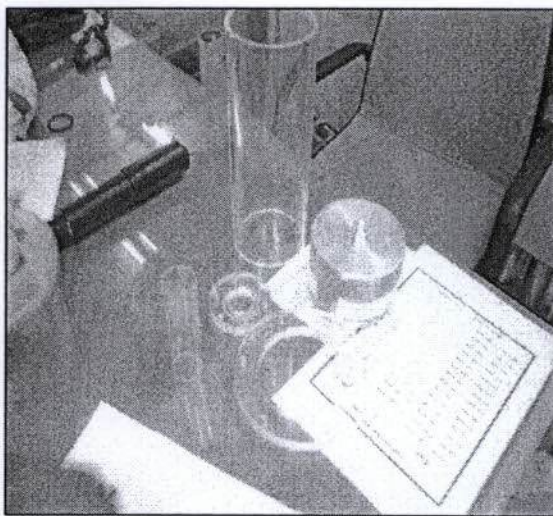
สร้างหัวต่อสายเคเบิลแรงดันสูงแบบใหม่ก็คือ การควบคุมสนามไฟฟ้าที่ปลายสายเคเบิลด้วยฉนวนก๊าซ คือ ก๊าซ SF_6 โดยการอัดก๊าซ SF_6 เข้าไปบริเวณหัวต่อสายเคเบิลแรงดันสูงให้เป็นฉนวนที่ใช้ควบคุมการหักเหของสนามไฟฟ้าแทนฉนวนเหลวและยังมีการศึกษาเกี่ยวกับการทำสภาวะสุญญากาศในบริเวณดังกล่าวเพื่อทำหน้าที่ควบคุมการหักเหของสนามไฟฟ้า เพื่อเป็นแนวทางในการวิจัยและพัฒนาการนำฉนวนก๊าซมาใช้งาน

ลักษณะงานที่ดำเนินการออกแบบสร้าง

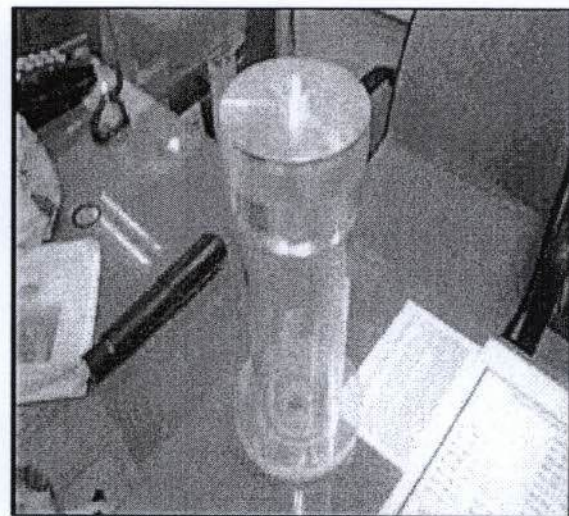
รูปที่ 6 ก แสดงการนำอะลูมิเนียมก้อนมาถึง ขึ้นรูปเป็นหัวต่อสายเคเบิลแรงสูงทรงกระบอกขึ้นด้านขวามือเป็นลักษณะของหัวต่อสายมีขนาด 100 มิลลิเมตร ด้านหน้าของหัวต่อสายเคเบิลเป็นส่วนที่จะเอาหัวต่อสายเคเบิลสวมเข้าไป ด้านซ้ายมือของหัวต่อสายเป็นหัวต่อสายเคเบิลที่จะต่อให้สายเคเบิลแรงดันสูงกับหัวต่อสายทำการยึดติดกัน



รูปที่ 6 ก



รูปที่ 6 ข

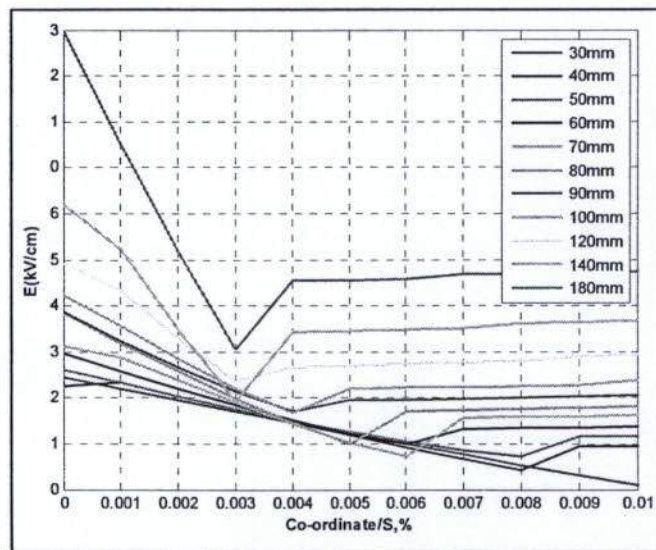


รูปที่ 6 ค

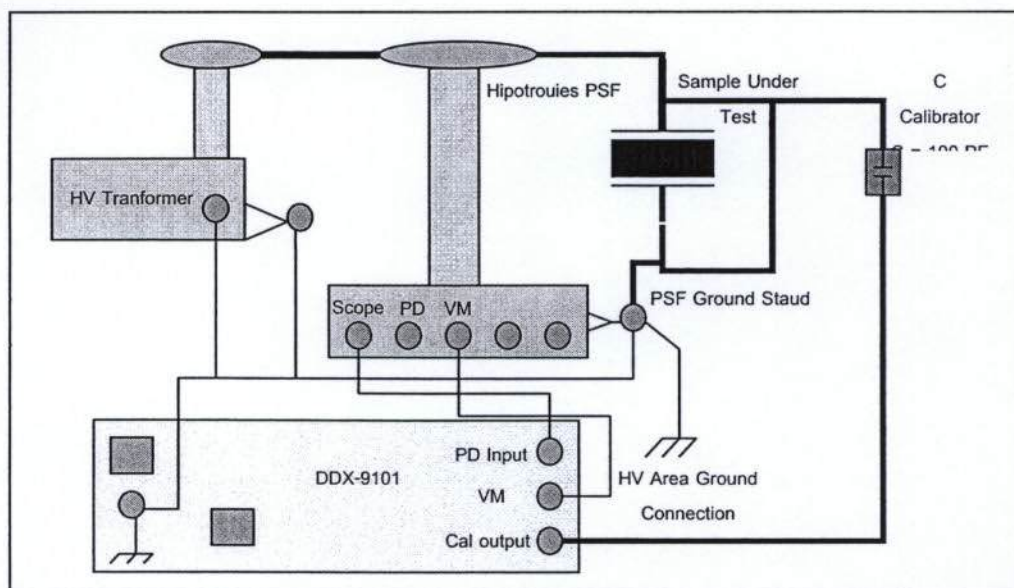
จากรูปที่ 6 ก.,ข.,ค. เป็นระบบกาะคริลิกใสที่จะมาครอบปิดหัวต่อสายและป้องกัน ฉนวนก๊าซ SF_6 รั่วอีก ด้วยโดยรัศมีของทรงกลมอะคริลิกใสจะมีขนาดหิมค่าสนามไฟฟ้าออกมาเพื่อออกแบบหาขนาดอะคริลิกใสให้มีขนาดที่เหมาะสม

การหาระยะในการปกสายเคเบิลแรงดันสูง

การหาระยะในการปกสายเคเบิลแรงดันสูง XLPE แรงดันสูงพิกัด 24 kV ขนาดสาย 240 โดยใช้โปรแกรม COMSOL Multiphysics ทำการคำนวณโดยเปลี่ยนระยะปลายสาย จาก XLPE ถึง Semi ห่างกัน 40 mm.,50 mm, 60 mm, 70 mm, 80 mm, 90 mm, 100 mm, 120 mm, 140 mm, 180 mm ตามลำดับ นำผลที่ได้จากโปรแกรมมาเปรียบเทียบการเกิดการวบไฟตามผิว จะได้ดังรูป 7 ระยะที่ปกคือ 90 mm



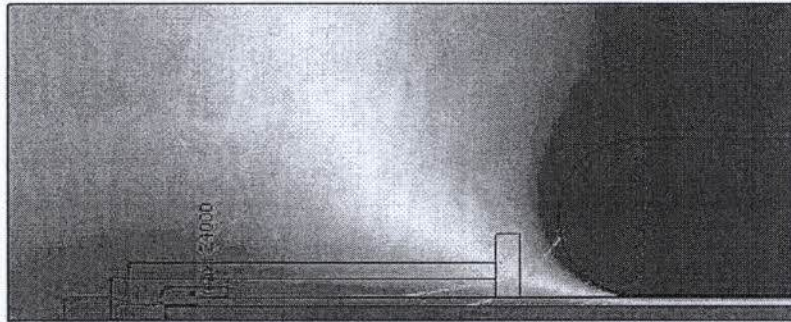
รูปที่ 7 ระยะในการปกสายเคเบิลแรงดันสูง XLPE วงจรในการทดสอบ



รูปที่ 8 วงจรในการทดสอบ

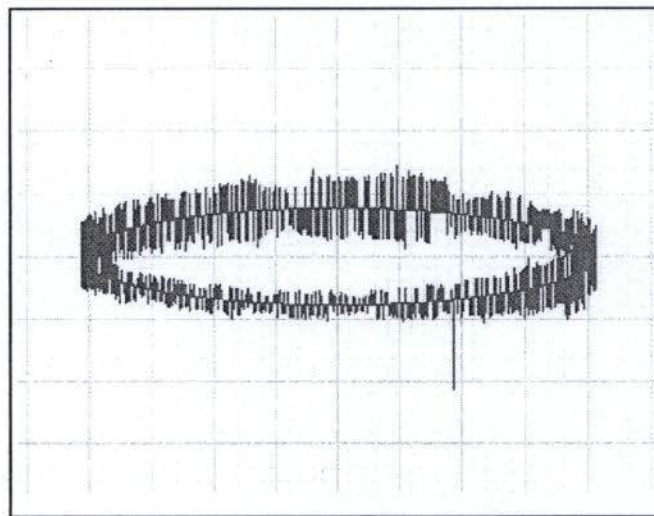
3. ผลการทดลอง

จากการกระจายสนามไฟฟ้าที่หัวต่อสายเคเบิลใต้ดิน โดยการจำลองใช้โปรแกรม COMSOL Multiphysics



รูปที่ 9 แสดงการจำลองโดยใช้โปรแกรม COMSOL Multiphysics

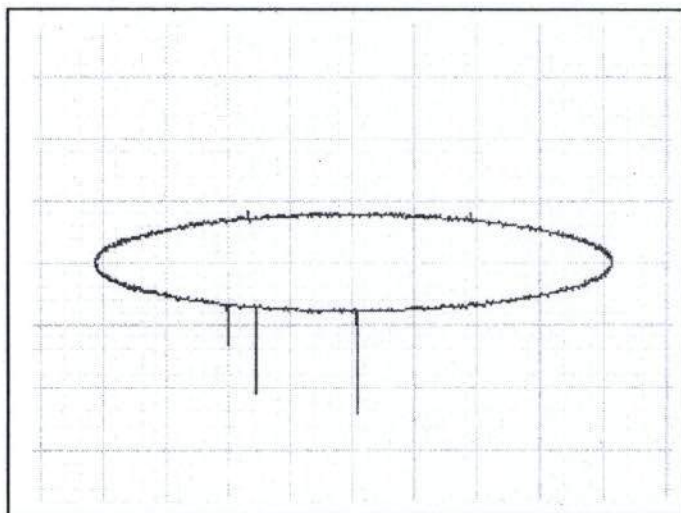
ในการทดสอบสายเคเบิลแรงดันสูงด้วยหัวต่อสายเคเบิลแรงดันสูงที่ออกแบบสร้างเลือกใช้ฉนวนในการทำหน้าทีลดความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณปลายสายเคเบิลที่ปลอกหรือทำการควบคุมการหักเหของสนามไฟฟ้าเพื่อหาค่าดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดภายในสายเคเบิล ทดสอบ ณ ห้องปฏิบัติการ HV ลาดกระบัง โดยการทดสอบซึ่งมีผลของการทดสอบดังนี้



PD Detector 1 - 6/08/2008 01:24:02 PM

Discharge =29.94 pC, Voltage =5.38 kV

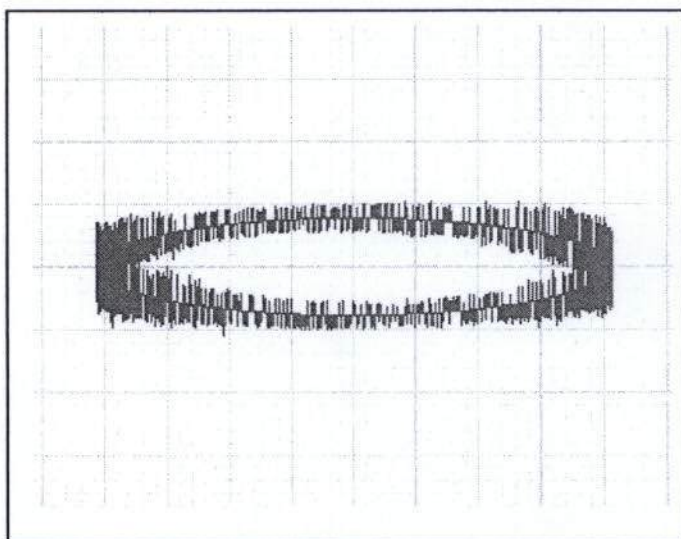
รูปที่ 10 ฉนวนก๊าซ คือ อากาศ(Air) ที่แรงดันในระบบ 1.8 bar



PD Detector 1 - 6/08/2008 02:54:22 PM

Discharge =25.11pC, Voltage =2.94 kV

รูปที่ 11 ฉนวนก๊าซ คือ สูญภาค ที่แรงดันในกระบอก 1.8 bar



PD Detector 1 - 6/08/2008 02:54:22 PM

Discharge =4.12 pC, Voltage =22.00 kV

รูปที่ 12 ฉนวนก๊าซ คือ SF6 ที่แรงดันในกระบอก 1.8 bar

4. สรุป

การทดสอบสายเคเบิลแรงดันสูงที่ใช้ขั้วต่อสายเคเบิลที่สร้างขึ้นนี้สามารถใช้ในการทดสอบที่แรงดันสูงกระแสสลับตามค่าพิกัดมาตรฐานและยังใช้ในการทดสอบวัดค่าดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นด้วยวิธีการเปรียบเทียบกับค่าของการทดสอบสายเคเบิลที่มีสภาพที่ดีจากโรงงานผลิตสายเคเบิลที่ได้มาตรฐาน มีผลการทดสอบในระดับมาตรฐาน $PD \leq 5 \text{ pC}$ ในการทดสอบสายเคเบิลแรงดันสูง โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลที่มีการฉนวนด้วยก๊าซ คือ FS 6 สามารถสรุปได้ว่าก๊าซมีคุณสมบัติในการเป็นฉนวน การอัดก๊าซ FS 6 หรือการเพิ่มความดันเข้าไปที่ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงสามารถเพิ่มค่าความเป็นฉนวนให้กับพื้นผิวบริเวณที่ทำการปลอกสายเพื่อการทดสอบได้

5. วิจารณ์

ขั้วต่อสายเป็นอุปกรณ์ประกอบการทดลองนี้สามารถใช้งานได้ดีตามเกณฑ์ที่กำหนด แต่ในการทดสอบสายเคเบิลก็ยังมีข้อบกพร่องอยู่เช่นกัน เนื่องจากเมื่อมีการอัดก๊าซ FS 6 หรืออากาศเข้าไปภายในท่อของขั้วต่อสายที่ความดันสูงๆ จะมีก๊าซซึมออกมาเล็กน้อยการทดลองจะต้องทำการวัดหลายครั้ง จำเป็นที่จะต้องอัดก๊าซใหม่ เมื่อก๊าซมีความดันไม่เป็นไปตามที่กำหนด การประกอบฝาครอบของขั้วต่อสายจะต้องใช้เวลานาน เพราะจะต้องตรวจเช็คการซึมของก๊าซหรือไม่ทุกครั้งประกอบ

6. เอกสารอ้างอิง

1. IEC Standard Publication No. 270, Second edition, "Partial Discharge Measurements
2. IEC Standard Publication No.885-3, First edition, "Electrical test methods for electric cables. Part3 :Test methods for partial discharge measurement lengths of extruded power cable"1988.
3. IEC Standard Publication No.885-3, First edition, "Power cable with extruded insulation and their accessories for rated voltage from 1kV up to 30kV"1998
4. สำรวัย สังข์สะอาด. "วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,มกราคม 2528, กรุงเทพฯ
5. จงรักษ์ บุญเลี้ยง, "การวัดค่าดิสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิลแรงสูง"บทความทางวิชาการสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2534
6. พร้อมศักดิ์ อภิรติกุล จงรักษ์ บุญเลี้ยง และกนกพล นาคะวิวัฒน์" ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูง XLPE สำหรับการทดสอบดิสชาร์จ
บางส่วน ตอนที่ 1:การออกแบบและสร้างขั้วต่อสายเคเบิล" การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 24, 22-23 พฤศจิกายน 2544,หน้า77-82.

7. พร้อมศักดิ์ อภิรติกุล จงรักษ์ บุญเส็ง และกนกพล นาคะวิวัฒน์" ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูง XLPE สำหรับการทดสอบดิสชาร์จ

บางส่วน ตอนที่ 1:การออกแบบและสร้างขั้วต่อสายเคเบิล" การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 24, 22-23 พฤศจิกายน

2544, หน้า83-88.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ - นามสกุล	นายทอง ลานธารทอง
วัน เดือน ปีเกิด	28 พฤษภาคม 2499
ที่อยู่	131/131 หมู่บ้านวิจิตรนคร ถ.พระราม2 แขวงท่าข้าม เขตบางขุนเทียน กรุงเทพฯ
ประวัติการศึกษา	ครุศาสตรบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ครุศาสตรมหาบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ประวัติการทำงาน	
ปัจจุบัน	รองคณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี ราชมงคลพระนคร
ความชำนาญ	การออกแบบวงจรควบคุมเชิงดิจิทัล การคำนวณในระบบไฟฟ้าแรงสูง

ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์

T. Lantharthong and S. Nedphograw S. Hiranvarodom and P. Apiratikul, **Analysis of Electric field and Modeling Desing of High Voltage Cable terminators for PD Testing Using SF₆ Insulator**, The International Conference on Electrical Engineering 2008, July 6-10, 2008, Okinawa Convention Center, Japan.

ทอง ลานธารทอง สมชัย หิรัญวโรดม และพร้อมศักดิ์ อภริติกุล, การออกแบบและสร้าง ขั้วต่อสายเคเบิลใต้ดิน XLPE แรงดันสูงพิกัด 24 kV เพื่อทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนโดย ประยุกต์ใช้ก๊าซ SF₆ เป็นสารฉนวน, การประชุม “มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลวิชาการ ครั้งที่ 1”, ระหว่างวันที่ 27 – 29 สิงหาคม 2551, ครัง.



ศูนย์วิทยบริการและเทคโนโลยีสารสนเทศ