

การออกแบบสร้างขั้วต่อสายแบบ Stress cone เพื่อใช้ในการทดสอบ
หาคิซาร์จบางส่วนในสายเคเบิลใต้ดินแรงดันสูง

A DESIGN AND CONSTRUCTION OF STRESS CONE TERMINATOR
FOR PARTIAL DISCHARGE MEASUREMENT
OF HIGH VOLTAGE UNDERGROUND CABLE

ปฏิภาณ เกิดลาภ
PATIPHAN KERDLAP

๒๕๕๑
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. ๒๕๕๑

KMITL-2008-EN-M-020-260

**การออกแบบสร้างขั้วต่อสายแบบ Stress cone เพื่อใช้ในการทดสอบ
หาดีสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิลใต้ดินแรงดันสูง**

**A DESIGN AND CONSTRUCTION OF STRESS CONE TERMINATOR
FOR PARTIAL DISCHARGE MEASUREMENT
OF HIGH VOLTAGE UNDERGROUND CABLE**



ปฏิภาณ เกิดลาภ

PATIPHAN KERDLAP

เลขานุ.....
เลขทะเบียน.....**82666**
วัน,เดือน,ปี.....**21 ก.ค. 2551**

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2551

KMITL-2008-EN-M-020-269

**A DESIGN AND CONSTRUCTION OF STRESS CONE TERMINATOR
FOR PARTIAL DISCHARGE MEASUREMENT
OF HIGH VOLTAGE UNDERGROUND CABLE**

PATIPHAN KERDLAP

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

2008

KMITL-2008-EN-M-020-269

COPYRIGHT 2008

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบสร้างขั้วต่อสายแบบ Stress cone เพื่อใช้ในการทดสอบหาคิซซาร์จบางส่วนในสายเคเบิลใต้ดินแรงดันสูง
นักศึกษา	นายปฏิภาณ เกิดลาภ
รหัสประจำตัว	46060306
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2551
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการศึกษา และออกแบบสร้างขั้วต่อสายแบบ stress cone เพื่อใช้ทดสอบหาคิซซาร์จบางส่วนในสายเคเบิลใต้ดินแรงดันสูง พิกัด 12/20(24) กิโลโวลต์ โดยใช้ชุปเปอร์ดีนในลอนกถึงขึ้นรูปสำหรับควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้า ซึ่งควบคุมแบบ capacitive stress control บริเวณปลายสายเคเบิล โดยนำระเบียบวิธีไฟไนต์อิเลเมนต์มาใช้ในการจำลองหาขนาดของ stress cone และการกระจายของสนามไฟฟ้า โดยขั้วต่อสายแบบ stress cone ที่ออกแบบสร้างมีขนาดสั้นกว่าขั้วต่อสายแบบทฤษฎีมิติที่เหมาะสม ถึง 40 เปอร์เซ็นต์ และไม่ต้องใช้ฉนวนควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้า สามารถทดสอบหาคิซซาร์จบางส่วนได้ใกล้เคียงกับขั้วต่อสายแบบทฤษฎีมิติที่เหมาะสม และใช้ในการทดสอบหาค่าคิซซาร์จบางส่วนในสายเคเบิลได้ตามมาตรฐาน IEC 60270 เนื่องจากขั้วต่อสายมีขนาดเล็ก ใช้งานง่าย ต้นทุนการสร้างต่ำ ใช้ระยะในการลอกสายเคเบิลที่สั้น เป็นการลดความเสี่ยงเปลืองสายเคเบิลจากการทดสอบ

คำสำคัญ: คิซซาร์จบางส่วน, ขั้วต่อสายเคเบิล, ขั้วต่อสายแบบ stress cone, สายเคเบิลใต้ดิน

Thesis Title	A Design and Construction of Stress Cone Terminator for Partial Discharge Measurement of High Voltage Underground Cable
Student	Mr.Patiphan Kerdlap
Student ID.	46060306
Degree	Master of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2008
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Siriwat Potivejkul

ABSTRACT

This thesis presents the study and the design of stress cone type terminator in order to measure the partial discharge of the high voltage underground cable with the 12/20(24) kV. The material used in this research is superlene nylon for controlling the electric stress at the end of the cable by Capacitive Stress Control method. The finite element method is applied to simulate the size of stress cone and to analyze the distribution of electric field. The length of the stress cone type terminator is 40 % shorter than the optimized oil tube terminator. Moreover, without the insulation to control the electric stress, the testing result is close to the testing result of optimized oil tube terminator. The stress cone type terminator can be used to test for the partial discharge according to IEC 60270. The advantages of this cable terminator are compact size, easy usage, low cost and require shorter time for cable peeling. Therefore, the cost of cable can be decreased.

Keywords: partial discharge, cable terminator, stress cone, underground cable

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ. ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้ และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุก ๆ ท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้กับข้าพเจ้า

ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือ อุปกรณ์ และเอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ บริษัท จรุงไทยไวร์แอนด์เคเบิล จำกัด (มหาชน) ที่เอื้อเฟื้อสายเคเบิล อุปกรณ์ ข้อมูลและสถานที่ทดสอบ รวมทั้งคำแนะนำด้านมาตรฐานการทดสอบ

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่เอื้อเฟื้อ อุปกรณ์ และสถานที่ทดสอบ

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณครอบครัวของข้าพเจ้าที่ให้กำลังใจ และมหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย ที่ให้กำลังใจ และให้การสนับสนุนในทุกเรื่อง ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

ปฎิภาณ เกิดลาภ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	2
1.5 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการแบบพื้นฐาน.....	3
1.6 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.7 ขั้นตอนการศึกษา.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐาน.....	5
2.1 การตรวจจับดิสชาร์จบางส่วน	5
2.1.1 ดิสชาร์จบางส่วน PD คืออะไร.....	5
2.1.2 ผลกระทบของดิสชาร์จบางส่วน.....	5
2.1.3 วงจรสมมูลของดิสชาร์จบางส่วน.....	6
2.1.4 การต่อวงจรระบบวัดดิสชาร์จบางส่วนในวงจรทดสอบ.....	7
2.1.5 เครื่องตรวจจับ PD แบบใช้คอมพิวเตอร์เป็นฐาน.....	9
2.2 เทคนิคการวัดดิสชาร์จบางส่วน.....	11
2.3 เทคนิคการลดสัญญาณรบกวน.....	13
2.3.1 สัญญาณรบกวนที่มีผลกระทบในการวัดดิสชาร์จบางส่วน.....	13
2.3.2 การลดสัญญาณรบกวน.....	14
2.4 การจำแนกชนิดของดิสชาร์จบางส่วน.....	15
2.5 โครงสร้างของสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวน XLPE.....	16

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6 วัสดุฉนวนแข็ง.....	19
2.7 ความคงทนของฉนวนทางไฟฟ้า.....	19
2.8 สนามไฟฟ้าในฉนวนเคเบิลแรงสูง.....	20
2.9 การควบคุมสนามไฟฟ้าของสายเคเบิล.....	25
2.9.1 Stress cone เมื่อทำ Splicing และ Terminating.....	27
บทที่ 3 การออกแบบสร้างขั้วต่อสายเคเบิลใต้ดินแรงดันสูงสำหรับทดสอบหาดีสชาร์จบางส่วน.....	29
3.1 บทนำ.....	29
3.2 การออกแบบขั้วต่อสายเคเบิลใต้ดินแรงดันสูงสำหรับทดสอบหาดีสชาร์จบางส่วน.....	29
3.2.1 การออกแบบขั้วต่อปลายสาย.....	30
3.2.2 การออกแบบหาระยะการปกอสายเคเบิล.....	35
3.2.3 การจำลองการกระจายสนามไฟฟ้า.....	36
3.2.4 การออกแบบ Stress cone.....	38
3.3 การออกแบบความยาวของขั้วต่อสายเคเบิลแบบ Stress cone เปรียบเทียบกับขั้วต่อสายแบบ Heat shrinkable cable terminations.....	42
3.4 สรุปผลการออกแบบ.....	44
บทที่ 4 การทดสอบและการวิเคราะห์ผลการทดสอบ.....	45
4.1 บทนำ.....	45
4.2 ขั้นตอนการทดสอบหาดีสชาร์จบางส่วน.....	45
4.2.1 วงจรทดสอบหาดีสชาร์จบางส่วน.....	46
4.2.2 แรงดันทดสอบ.....	48
4.2.3 พิกัดกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงทดสอบ.....	48
4.3 การทดสอบหาดีสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิล.....	50
4.3.1 การทดสอบขั้วต่อสายเคเบิลที่ออกแบบโดยใช้ Stress cone ในห้องปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง.....	50
4.3.2 การทดสอบหาดีสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิลโดยใช้ขั้วต่อสายที่ออกแบบโดยใช้ Stress cone เปรียบเทียบกับขั้วต่อสายที่ออกแบบด้วยหลักการเดิม.....	55

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3.3 การทดสอบหาดีสซาร์จบางส่วนในสายเคเบิลโดยใช้ขั้วต่อสายที่ออกแบบโดยใช้ Stress cone เปรียบเทียบกับขั้วต่อสายที่ออกแบบด้วยหลักการทฤษฎีมิติที่เหมาะสม.....	61
4.3.4 การทดสอบหาดีสซาร์จบางส่วนในสายเคเบิลโดยใช้ขั้วต่อสายที่ออกแบบโดยใช้ Stress cone เปรียบเทียบกับขั้วต่อสายที่ใช้ในภาคอุตสาหกรรม.....	64
4.3.4.1 การทดสอบหาดีสซาร์จบางส่วนในสายเคเบิลโดยการเปรียบเทียบการทดสอบโดยใช้ฉนวนน้ำมันหม้อแปลง.....	64
4.3.4.2 การทดสอบหาดีสซาร์จบางส่วนในสายเคเบิลโดยการเปรียบเทียบการทดสอบโดยใช้ขั้วต่อสายแบบ Heat shrinkable cable terminations.....	70
4.4 สรุปผลการทดสอบ.....	74
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	75
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	75
5.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา.....	77
เอกสารอ้างอิง.....	78
ภาคผนวก.....	81
ภาคผนวก ก. อุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบ.....	82
ภาคผนวก ข. รายละเอียดขั้วต่อสายของ Heat Shrinkable Cable Termination.....	88
ภาคผนวก ค. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	93
ประวัติผู้เขียน.....	99

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การเปรียบเทียบลักษณะการแสดงผล PD บนฐานเวลาแบบวงรีและรูปแบบการกระจาย $H_n(\phi, q)$	10
3.1 ผลการจำลองสนามไฟฟ้าเปรียบเทียบกับระยะการปกสายเคเบิล.....	35
3.2 ผลการจำลองสนามไฟฟ้ากับการปรับมุมที่องศาต่างๆ.....	39
3.3 เปรียบเทียบการออกแบบที่ใช้หลักการเดิม หลักการมิติที่เหมาะสมของทรงกระบอก ซ้อนกันร่วมและหลักการที่นำเสนอ.....	42
3.2 เปรียบเทียบการออกแบบด้วยหลักการที่นำเสนอกับขั้วต่อสายที่ใช้งานในภาคอุตสาหกรรม (Heat shrinkable cable terminations)	44
4.1 ค่าความจุไฟฟ้าของวัสดุฉนวนและอุปกรณ์ไฟฟ้า.....	49
4.2 ผลการทดสอบหา PD ในสายเคเบิล พิกัด 12/20 (24) kV ขนาด 240 sq.mm โดยใช้ขั้วต่อสายที่ออกแบบโดยไม่มี Stress cone.....	54
4.3 ผลการทดสอบหา PD ในสายเคเบิล พิกัด 12/20 (24) kV ขนาด 240 sq.mm โดยใช้ขั้วต่อสายที่ออกแบบโดยใช้ Stress cone(ขั้วต่อปลายสายแบบทรงกลม).....	55
4.4 ผลการทดสอบหา PD ในสายเคเบิล พิกัด 12/20 (24) kV ขนาด 240 sq.mm โดยใช้ ขั้วต่อสายที่ออกแบบโดยใช้ Stress cone (ขั้วต่อปลายสายแบบทรงกระบอก)	59
4.5 ผลการทดสอบหา PD ในสายเคเบิล พิกัด 12/20 (24) kV ขนาด 240 sq.mm โดยใช้ ขั้วต่อสายที่ออกแบบด้วยหลักการเดิม.....	60
4.6 ผลการทดสอบหา PD ในสายเคเบิล พิกัด 12/20 (24) kV ขนาด 240 sq.mm โดยใช้ ขั้วต่อสายที่ออกแบบด้วยหลักการทฤษฎีมิติที่เหมาะสม.....	62
4.7 เปรียบเทียบผลการทดสอบหา PD ในสายเคเบิล พิกัด 12/20 (24) kV ขนาด 240 sq.mm โดยใช้ขั้วต่อสายที่ออกแบบโดยใช้ Stress cone ขั้วต่อสายที่ออกแบบด้วยหลักการ ทฤษฎีมิติที่เหมาะสม และขั้วต่อสายที่ออกแบบด้วยหลักการเดิม.....	63
4.8 ผลการทดสอบหา PD ในสายเคเบิล พิกัด 12/20 (24) kV ขนาด 240 sq.mm โดยใช้ ขั้วต่อสายที่ออกแบบโดยใช้ Stress cone.....	68
4.9 ผลการทดสอบหา PD ในสายเคเบิล พิกัด 12/20 (24) kV ขนาด 240 sq.mm โดยใช้ ขั้วต่อสายที่ใช้อยู่ในภาคอุตสาหกรรม.....	70

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.10 ผลการทดสอบหา PD ในสายเคเบิล พิกัด 12/20 (24) kV ขนาด 240 sq.mm โดยใช้ ขั้วต่อสายที่ใช้อยู่ในภาคอุตสาหกรรม (Heat shrinkable cable terminations).....	72
4.11 เปรียบเทียบผลการทดสอบหา PD ในสายเคเบิล พิกัด 12/20 (24) kV ขนาด 240 sq.mm โดยขั้วต่อสายที่ออกแบบโดยใช้ Stress cone กับขั้วต่อสายที่ใช้ในอุตสาหกรรม.....	73
5.1 คุณสมบัติของขั้วต่อสายแบบ Stress cone สำหรับทดสอบดิสชาร์จบางส่วน ในสายเคเบิลใต้ดินแรงดันสูง พิกัด 12/20 (24) kV ขนาด 240 sq.mm.....	77

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 รูปแบบของคิซาร์จบางส่วน (PD).....	5
2.2 วงจรสมมูลของวัสดุที่มีโพรงก๊าซและเกิดคิซาร์จบางส่วนภายใน.....	6
2.3 วงจรทดสอบตรวจจับคิซาร์จบางส่วน (PD) แบบตรง.....	8
2.4 เครื่องตรวจจับคิซาร์จบางส่วน (PD) โดยใช้คอมพิวเตอร์เป็นฐาน.....	9
2.5 วงจรทดสอบคิซาร์จบางส่วนแบบต่างๆ ตามมาตรฐาน IEC 60270.....	12
2.6 ตัวอย่างสัญญาณรบกวนที่ตำแหน่งต่างๆ.....	13
2.7 ตัวอย่างการลดสัญญาณรบกวน.....	14
2.8 ลักษณะสัญญาณคิซาร์จบางส่วนแบบต่างๆ.....	15
2.9 ส่วนต่างๆ ของสายเคเบิลแรงสูงฉนวน XLPE.....	16
2.10 สายเคเบิลทรงกระบอกซ้อนกัน.....	20
2.11 เคเบิลแรงสูงทรงกระบอกซ้อนกันมีชั้นฉนวนซ้อนหลายชั้น.....	22
2.12 ตัวนำในหุ้มฉนวน.....	22
2.13 U_b และ E_{r1} ในเทอมของ r_1 เมื่อกำหนด r_2 ให้คงตัวของทรงกระบอกซ้อนกัน.....	24
2.14 ค่าคาปาซิแตนซ์ของสายเคเบิลแรงดันสูง.....	25
2.15 สนามไฟฟ้าที่ไม่มีกระแส.....	26
2.16 การแก้ไขสนามไฟฟ้าแบบ Capacitive stress control.....	26
2.17 การแก้ไขสนามไฟฟ้าแบบ Refractive stress control.....	27
2.18 Potential Field at a Screen Termination.....	27
2.19 เปรียบเทียบการมี Stress cone กับ ไม่มี Stress cone.....	28
2.20 การกระจายสนามไฟฟ้าเมื่อใช้ Stress cone.....	28
2.21 การกระจายสนามไฟฟ้าเมื่อใช้ High Permittivity Material.....	28
3.1 ขนาดขั้วต่อปลายสายแบบทรงกระบอก.....	30
3.2 ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ปลายสาย.....	31
3.3 ความเครียดสนามไฟฟ้าที่แก้ไขได้โดยใช้ฉนวนเล็กโตรดริลด์.....	32
3.4 ขั้วต่อปลายสายแบบทรงกระบอกสำหรับสายเคเบิลพิกัด 12/20 (24) kV 240 sq.mm.....	32
3.5 แบบขั้วต่อปลายสายแบบทรงกลมสำหรับสายเคเบิลพิกัด 12/20 (24) kV 240 sq.mm.	33
3.6 ขนาดขั้วต่อปลายสายแบบทรงกลมสำหรับสายเคเบิลพิกัด 12/20 (24) kV 240 sq.mm.	33
3.7 ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ปลายสายแบบทรงกลม.....	34

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.8 การประกอบขั้วต่อปลายสายสำหรับสายเคเบิลพิกัด 12/20 (24) kV 240 sq.mm.	34
3.9 ความยาวของขั้วต่อสายเคเบิลจากผลการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้า	36
3.10 ระยะความยาวของการปกสายเคเบิล.....	36
3.11 ระยะการปกสาย.....	37
3.12 ผลการจำลองสนามไฟฟ้าบริเวณปลายสายเคเบิลไม่มี Stress cone.....	38
3.13 การเข้าหัวของขั้วต่อสายที่ปลายสายเคเบิลไม่มี Stress cone.....	38
3.14 การประกอบขั้วต่อปลายสายและ Stress cone สำหรับการจำลอง.....	40
3.15 ผลการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณปลายสายเคเบิลเมื่อใส่ Stress cone.....	40
3.16 ขนาดของ Stress cone ที่ได้จากการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้า.....	41
3.17 ขั้วต่อสายแบบ Stress cone ที่กลิ้งขึ้นรูปโดยใช้ซูบเปอร์ดีนไนลอน.....	41
3.18 ขั้วต่อสายแบบ Stress cone.....	43
3.19 ขั้วต่อสาย Heat shrinkable cable terminations.....	43
4.1 การประกอบขั้วต่อสายแบบ Stress cone กับขั้วต่อปลายสาย.....	46
4.2 วงจรทดสอบตรวจจับ PD แบบ CD ต่ออนุกรมกับ C_k ตามมาตรฐาน IEC 60270.....	47
4.3 วงจรการทดสอบหาดีสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิลแบบวิธีตรงตามมาตรฐาน IEC 60270.....	50
4.4 การทดสอบหาดีสชาร์จบางส่วนโดยใช้ขั้วต่อสายที่ออกแบบโดยใช้ Stress cone.....	53
4.5 ผลการทดสอบหาดีสชาร์จบางส่วนโดยใช้ขั้วต่อสายที่ออกแบบโดยไม่มี Stress cone.....	53
4.6 ผลการทดสอบหาดีสชาร์จบางส่วนโดยใช้ขั้วต่อสายที่ออกแบบเมื่อใส่ Stress cone.....	54
4.7 วงจรการทดสอบหาดีสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิลแบบวิธีตรงตามมาตรฐาน IEC 60270.....	55
4.8 การทดสอบหา PD ในสายเคเบิลโดยใช้ขั้วต่อสายที่ออกแบบโดยใช้ Stress cone.....	58
4.9 ผลการทดสอบหา PD ในสายเคเบิลโดยใช้ขั้วต่อสายที่ออกแบบโดยใช้ Stress cone.....	58
4.10 การทดสอบหา PD ในสายเคเบิลโดยใช้ขั้วต่อสายที่ออกแบบด้วยหลักการเดิม.....	59
4.11 ผลการทดสอบหา PD ในสายเคเบิล พิกัด 12/20 (24) kV ขนาด 240 sq.mm ยาว 10 เมตร โดยใช้ขั้วต่อสายที่ออกแบบด้วยหลักการเดิม.....	60
4.12 การทดสอบหา PD ในสายเคเบิลโดยใช้ขั้วต่อสายแบบหลักการทฤษฎีมิติที่เหมาะสม.....	61
4.13 ผลการทดสอบหา PD ในสายเคเบิล พิกัด 12/20 (24) kV ขนาด 240 sq.mm ยาว 10 เมตร โดยใช้ขั้วต่อสายที่ออกแบบด้วยหลักการทฤษฎีมิติที่เหมาะสม.....	62
4.14 วงจรการทดสอบหาดีสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิลแบบวิธีตรงตามมาตรฐาน IEC 60270...64	64

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.15 การใช้ขั้วต่อสายแบบ Stress cone เพื่อทดสอบหา PD ในสายเคเบิล.....	67
4.16 การต่อขั้วต่อสายแบบ Stress cone เพื่อทดสอบหา PD ในสายเคเบิล.....	67
4.17 ผลการทดสอบหา PD ในสายเคเบิลโดยใช้ขั้วต่อสายแบบ Stress cone.....	68
4.18 การทดสอบหา PD ในสายเคเบิลโดยใช้ขั้วต่อสายที่ใช้อยู่ในภาคอุตสาหกรรม.....	69
4.19 ผลการทดสอบหา PD ในสายเคเบิลโดยใช้ขั้วต่อสายที่ใช้อยู่ในภาคอุตสาหกรรม.....	69
4.20 การทดสอบหา PD ในสายเคเบิลโดยใช้ขั้วต่อสายที่ใช้อยู่ในภาคอุตสาหกรรม (Heat Shrinkable Cable Terminations)	71
4.21 ผลการทดสอบหา PD ในสายเคเบิลโดยใช้ขั้วต่อสายที่ใช้อยู่ในภาคอุตสาหกรรม (Heat Shrinkable Cable Terminations).....	71

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันการไฟฟ้านครหลวงได้ติดตั้ง และส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าด้วยสายเคเบิลในบริเวณเมืองหลวงหรือที่มีชุมชนหนาแน่นมีที่ว่างไม่พอที่จะเดินสายส่งแรงสูงได้ หรือบริเวณที่มีความเสี่ยงต่อการเกิดฟ้าผ่า บริเวณที่ที่ดินมีราคาแพง โดยเฉพาะย่านธุรกิจหนาแน่น หรือในกรณีที่ต้องการความสวยงามของพื้นที่ และเพิ่มความมั่นคงให้กับระบบไฟฟ้า

สายเคเบิลใต้ดินก่อนที่จะนำมาติดตั้ง จะต้องมีการตรวจสอบให้มีคุณภาพตามที่มาตรฐานกำหนด การทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge : PD) เป็นรายการหนึ่งที่จะต้องมีการตรวจสอบคุณภาพจากผู้ผลิตเสมอ เนื่องจากการเกิดดิสชาร์จบางส่วนแต่ละครั้งจะมีพลังงานถ่ายเทให้กับพื้นผิวฉนวนในลักษณะชกกระทก เป็นเหตุให้เกิดความร้อนเพิ่มขึ้นเฉพาะจุดส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมี ทำให้ฉนวนเสียเป็นจุดๆ และเกิดความผิพรองขยายตัวมากขึ้น และอาจนำไปสู่การเกิดเบรกควาน้อย่างสมบูรณ์ได้ ส่งผลให้อายุการใช้งานของฉนวนจะสั้นลง ดิสชาร์จบางส่วนที่พบบ่อยในสายเคเบิล คือ ดิสชาร์จบางส่วนภายใน (Internal Discharge หรือ Cavity Discharge) หมายถึง ดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นในเนื้อฉนวนแข็งหรือฉนวนเหลว ที่มีโพรงหรือฟองก๊าซ หรือมีสิ่งเจือปนแปลกปลอมที่มีค่าเปอร์มิตติวิตีต่ำกว่าในเนื้อฉนวนหลัก [1] ทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าในโพรงหรือสิ่งเจือปนดังกล่าวมีค่าสูงกว่าฉนวนรอบๆ ซึ่งจะทำให้ฉนวนโดยรอบเสียหาย การฉนวนเสื่อมสภาพ และอาจนำไปสู่การเกิดเบรกควานได้ในที่สุด

ในการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิล จะทำการป้อนแรงดันทดสอบระหว่างตัวนำและชั้นกึ่งตัวนำนอก โดยป้อนแรงดันสูงเข้าที่ตัวนำและชั้นกึ่งตัวนำนอกจะเป็นกราวด์ การทดสอบสายเคเบิลที่ไม่มีขั้วต่อสาย ในการทดสอบดังกล่าวจะเกิดการวางไฟตามผิวขึ้น เนื่องจากระยะห่างระหว่างแรงดันสูงกับกราวด์น้อยมาก สามารถแก้ไขได้โดยการเพิ่มระยะห่างระหว่างแรงดันสูงกับกราวด์ โดยการตัดชั้นกึ่งตัวนำนอกบางส่วนออก ส่งผลให้สนามไฟฟ้าที่ขอบของชั้นกึ่งตัวนำนอกเกิดความไม่สม่ำเสมอสูง ซึ่งจะนำไปสู่การเกิดเบรกควานในฉนวนได้ จึงจำเป็นต้องควบคุมสนามไฟฟ้าในบริเวณนั้นให้เกิดความไม่สม่ำเสมอที่น้อยที่สุด [2]

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า มีการออกแบบและสร้างขั้วต่อสายเคเบิลสำหรับทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วน เพื่อทดแทนการนำเข้าจากต่างประเทศซึ่งมีราคาสูง [3-8] แต่ยังมีขนาดใหญ่และมีความยาวมาก เป็นการสิ้นเปลืองสายเคเบิลในการทดสอบ และสิ้นเปลืองฉนวนที่นำมาควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้า ต่อมาได้มีการพัฒนาออกแบบขั้วต่อสายเคเบิลให้มีขนาดเล็กลงเพื่อ

ความสะดวกในการใช้งาน ซึ่งยังคงใช้ฉนวนน้ำมันหม้อแปลงในการควบคุมความเครียดอยู่ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการออกแบบขั้วต่อสายเคเบิลสำหรับทดสอบหาคิซาร์จบางส่วน โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ ช่วยในการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้า

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

จากปัญหาที่กล่าวข้างต้น พบว่าขั้วต่อสายเคเบิลมีความจำเป็นสำหรับการทดสอบคิซาร์จบางส่วนในสายเคเบิลเป็นอย่างมาก เนื่องจากขั้วต่อสายจะช่วยควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณปลายสายเคเบิล ป้องกันการเกิดการวาวไฟตามผิวฉนวนและป้องกันการเกิดเบรกดาวน์ของฉนวนในการทดสอบ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ พัฒนาการออกแบบและสร้างขั้วต่อสายสำหรับทดสอบคิซาร์จบางส่วนในสายเคเบิล สำหรับสายเคเบิลใต้ดินแรงดันสูงฉนวน XLPE พิกัด 12/20(24) kV 240 sq.mm. โดยใช้ Stress cone ซึ่งใช้วิธีการควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้าแบบ Capacitive stress control เพื่อความสะดวกในการใช้งาน ลดความสูญเสียสายเคเบิลจากการปกอสาย ไม่ต้องใช้ฉนวนน้ำมันหม้อแปลงเพื่อควบคุมการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้า มีต้นทุนการสร้างที่ต่ำลง และสามารถนำไปทดสอบในสถานที่ติดตั้งได้ในอนาคต

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

ศึกษาหลักการออกแบบขั้วต่อสาย ซึ่งหลักการออกแบบ Stress cone ใช้การจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าด้วย ระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ เพื่อให้ได้ขนาดขั้วต่อสายเคเบิลมีขนาดเหมาะสม และเป็นการช่วยลดขั้นตอนในการออกแบบ ซึ่งใช้วิธีการควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้าแบบ Capacitive stress control เพื่อให้ขั้วต่อสายเคเบิลสำหรับทดสอบคิซาร์จบางส่วน ออกแบบโดยไม่ต้องใช้ฉนวนน้ำมันหม้อแปลงควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้า

1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

เมื่อพิจารณาลักษณะของขั้วต่อสายเคเบิลสำหรับทดสอบคิซาร์จบางส่วน ซึ่งส่วนใหญ่ นิยมใช้ลักษณะเป็นทรงกระบอกซ้อนกันแน่น จะนั้นสามารถใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ ในการออกแบบขั้วต่อสายให้มีขนาดที่เหมาะสมได้ ซึ่งสามารถนำมาใช้กับปัญหาที่มีรูปร่างลักษณะต่างๆ โดยสามารถจำลองรูปร่างลักษณะที่แท้จริง และสามารถกำหนดเงื่อนไขหรือขอบเขตได้ [20] จากหลักการเดิมการออกแบบส่วนใหญ่ นิยมใช้การควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้าแบบ Refractive Stress Control ซึ่งหลักการที่นำเสนอออกแบบ โดยใช้หลักการควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้าแบบ

Capacitive Stress Control โดยนำระเบียบวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ เพื่อช่วยจำลองการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณปลายสายเคเบิล โดยพิจารณาพร้อมกับฉนวนที่ใช้ในการควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้า ซึ่งจะช่วยให้ได้ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่แท้จริง แทนการทดสอบการวางไฟตามผิวฉนวน และหลักการออกแบบขั้วต่อสายเคเบิล แบ่งออกเป็น 4 ส่วน คือการออกแบบขั้วต่อปลายสาย ความยาวของระยะการปกสายเคเบิล การจำลองการกระจายสนามไฟฟ้า และการออกแบบ Stress cone

1.5 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการแบบพื้นฐาน

จากหลักการเดิมในการออกแบบเส้นผ่านศูนย์กลางของขั้วต่อสายเคเบิล จะพิจารณาที่แรงดันเบรกดาวน์ของฉนวนที่นำมาควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้าที่ปลายสายเคเบิล [3-6] หรือพยายามทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนแต่ละชั้นมีค่าใกล้เคียงกัน [7-8] และใช้ค่า Safety factor สูงๆ เข้ามาช่วยในการออกแบบ เพื่อป้องกันการเบรกดาวน์ของฉนวนขณะทำการทดสอบ [3-8] ซึ่งทำให้ขั้วต่อสายมีขนาดใหญ่ ล้นเปลือกฉนวนที่นำมาควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้า ต่อมาได้พัฒนาการออกแบบ โดยใช้หลักการมิติที่เหมาะสมของทรงกระบอกซ้อนกัน [9-11] คือ มิติที่เล็กที่สุดที่สามารถทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ได้สูงสุด และไม่เกิดโคโรนา เพื่อลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง และลดการใช้ฉนวน

ส่วนในงานวิจัยนี้จะทำการจำลองการวางไฟตามผิวฉนวน โดยจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์จากโปรแกรม FEMLAB [20] พิจารณาความยาวจากการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิวฉนวนสายเคเบิลร่วมกับฉนวนที่ใช้ในการควบคุมการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้า โดยเลือกใช้ซูเปอร์สตีโนลอนกลิ้งขึ้นรูปเป็นขั้วต่อสายเคเบิลแบบ Stress cone เนื่องจากซูเปอร์สตีโนลอนเป็นวัสดุ ที่แข็ง เหนียว สามารถกลิ้งขึ้นรูปได้ง่ายและมีค่าเปอร์มิตติวิตีใกล้เคียงกับฉนวนของสายเคเบิลที่ใช้ในการทดสอบ

1.6 ขอบเขตการวิจัย

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการออกแบบ และสร้างขั้วต่อสายเคเบิลใต้ดินแรงดันสูง สำหรับทดสอบหาคุณสมบัติบางส่วนพิกัด 12/20(24) kV ขนาด 240 sq.mm. โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ ช่วยในการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้า ซึ่งใช้วิธีการควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้าแบบ Capacitive stress control ทำการทดสอบหาค่าคุณสมบัติบางส่วนในขั้วต่อสายเคเบิลที่ได้สร้างขึ้น และ ทดสอบเปรียบเทียบผลการทดสอบหาคุณสมบัติบางส่วนในสายเคเบิลระหว่าง

ขั้วต่อสายที่สร้างขึ้นกับหลักการทฤษฎีมิติที่เหมาะสมของทรงกระบอกซ้อนกันและขั้วต่อสายที่ใช้ในภาคอุตสาหกรรม

1.7 ขั้นตอนของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บท ดังนี้

บทที่ 1 กล่าวถึง ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา สมมติฐานของการศึกษา ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย ขอบเขตของการวิจัย และขั้นตอนการศึกษา

บทที่ 2 กล่าวถึง หลักการและทฤษฎีการออกแบบ ซึ่งประกอบด้วย ทฤษฎีเบื้องต้นของคิซซาร์จบางส่วน หลักการตรวจจับคิซซาร์จบางส่วน เทคนิคการวัดคิซซาร์จบางส่วน เทคนิคการลดสัญญาณรบกวน การจำแนกชนิดของคิซซาร์จบางส่วนในสายเคเบิล โครงสร้างของสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวน XLPE วัสดุฉนวนแข็ง ความคงทนของการฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้า สนามไฟฟ้าในฉนวนเคเบิลแรงสูง การควบคุมสนามไฟฟ้าของสายเคเบิล

บทที่ 3 กล่าวถึง ทฤษฎีพื้นฐานในการออกแบบและสร้างขั้วต่อสายเคเบิล ประกอบด้วย การออกแบบขั้วต่อปลายสายเคเบิลใต้ดินแรงดันสูง และการจำลองการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้า การหาระยะการปกสายเคเบิล และการออกแบบขนาดของ Stress cone

บทที่ 4 กล่าวถึง การทดสอบและการวิเคราะห์ผลการทดสอบ ซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนการทดสอบหาคิซซาร์จบางส่วนในสายเคเบิลโดยใช้ขั้วต่อปลายสายเคเบิลที่ออกแบบโดยใช้ Stress cone และทำการทดสอบเปรียบเทียบกับขั้วต่อสายเคเบิลที่ออกแบบด้วยหลักการเดิม ขั้วต่อสายเคเบิลออกแบบด้วยหลักการทฤษฎีมิติที่เหมาะสม ขั้วต่อสายที่ใช้ในภาคอุตสาหกรรม และสรุปผลการทดลอง

บทที่ 5 กล่าวถึง สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

บทที่ 2

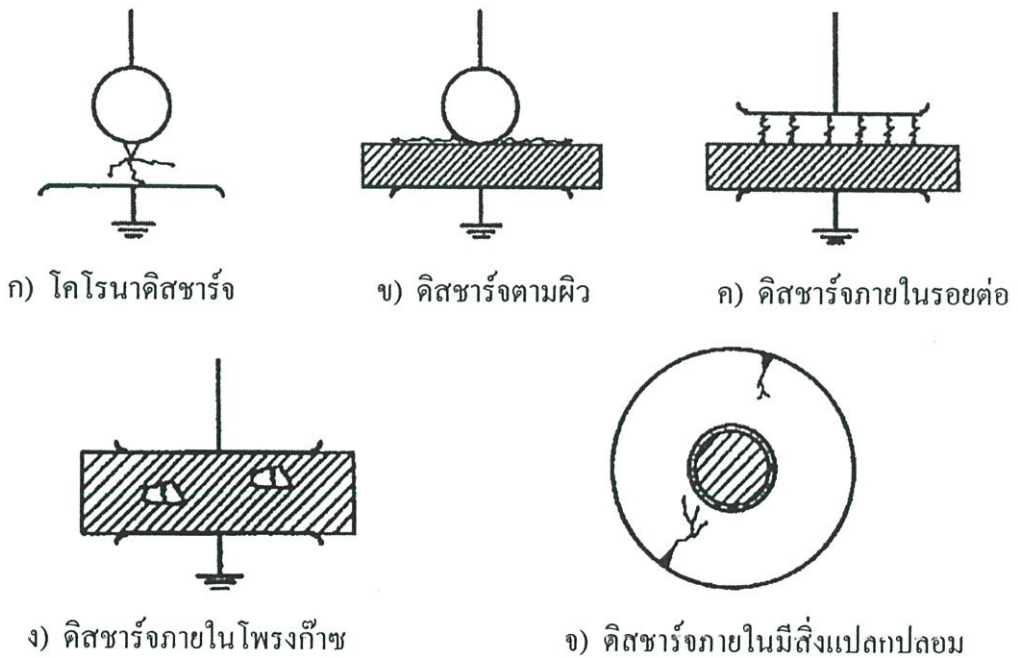
ทฤษฎีพื้นฐาน

2.1 การตรวจจับดิซชาร์จบางส่วน (Partial Discharge : PD) [14,15]

2.1.1 ดิซชาร์จบางส่วน PD คืออะไร

ดิซชาร์จบางส่วน คือ ดิซชาร์จเบรกควาน์ที่ไม่สมบูรณ์ พลังงานที่ทำให้เกิดดิซชาร์จนั้นไม่มากพอที่จะทำให้ฉนวนเปลี่ยนสภาพไปเป็นสภาพนำไฟฟ้าได้ตลอดแนวระหว่างอิเล็กโตรด เรียกว่า ดิซชาร์จบางส่วน เพราะฉนวนของอิเล็กโตรดด้านหนึ่ง หรือทั้งสองด้านอาจเป็นของแข็ง ของเหลว หรือก๊าซ ยังเป็นฉนวนที่สมบูรณ์มั่นคงอยู่

ดิซชาร์จบางส่วน อาจแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด คือ โครโนดิซชาร์จ ดิซชาร์จตามผิว และดิซชาร์จภายใน ในที่นี้จะอธิบายถึงดิซชาร์จบางส่วนแบบภายใน ภาพรวมของดิซชาร์จบางส่วน (PD) ทั้ง 3 รูปแบบ แสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 รูปแบบของดิซชาร์จบางส่วน (PD)

2.1.2 ผลกระทบของดิซชาร์จบางส่วน

ดิซชาร์จบางส่วนแต่ละครั้งจะมีพลังงานถ่ายเทให้กับพื้นผิวฉนวน ในลักษณะชนกระแทก เป็นเหตุให้เกิดความร้อนเพิ่มขึ้นเฉพาะจุด เป็นผลให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมี ทำให้ฉนวนเสื่อม

เป็นจุดๆ และอาจนำไปสู่การเบรคความอย่างสมบูรณ์ได้ ทำให้ฉนวนเสียหาย อายุการใช้งานของฉนวนจะสั้นลง

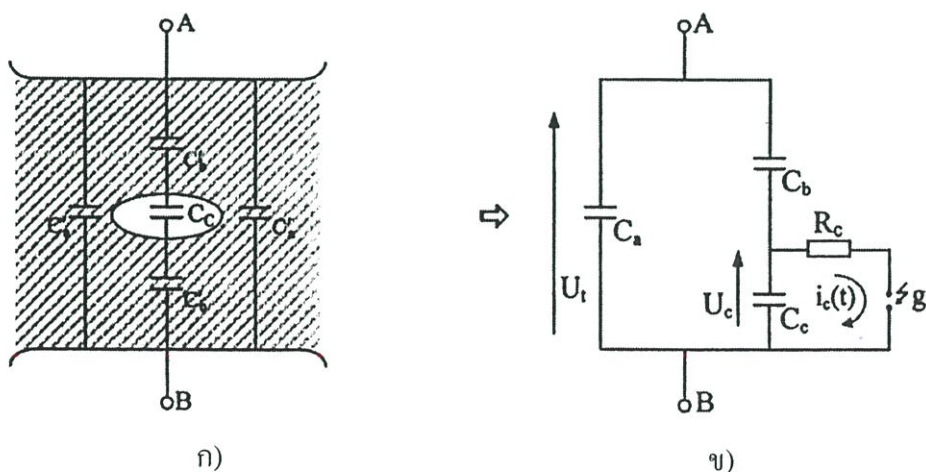
ฉะนั้นเพื่อให้อายุการใช้งานของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงใช้งานได้ยาวนาน ไม่ก่อให้เกิดคลื่นรบกวนวิทยุ การออกแบบฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าจะต้องมีคุณภาพดีพอ ความเครียดสนามไฟฟ้าที่แรงดันใช้งานปกติจะต้องต่ำกว่าความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤติของฉนวน จะต้องไม่มีดิสชาร์จบางส่วน แม้จะมีแรงดันเกินเนื่องจากแรงดันกระเพื่อมเกิดขึ้น

2.1.3 วงจรสมมูลของดิสชาร์จบางส่วน

การเกิดดิสชาร์จบางส่วนภายในขึ้นในเนื้อฉนวน หรือในอุปกรณ์ซึ่งไม่สามารถสังเกตเห็นได้ด้วยตา ฉะนั้น เพื่อให้สามารถตรวจจับหรือวัดค่าดิสชาร์จบางส่วนในฉนวนได้ จึงมีการเขียนวงจรสมมูลของฉนวนที่มีดิสชาร์จบางส่วนขึ้น ไม่ว่าจะเป็ดิสชาร์จบางส่วนชนิดใดก็สามารถเขียนวงจรสมมูลได้ เพื่อให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจ จึงใช้วงจรสมมูลสำหรับฉนวนที่มีโพรงก๊าซ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์การเกิดและหาปริมาณดิสชาร์จบางส่วนภายใน ดังวงจรสมมูลของฉนวนในรูปที่ 2.2

ในรูปที่ 2.2 ก) แสดงวัสดุฉนวน มีโพรงก๊าซในเนื้อฉนวน และฉนวนวางอยู่ระหว่างอิเล็กโตรด A-B โพรงก๊าซจะเขียนแทนด้วยความจุไฟฟ้า C_c ส่วนฉนวนที่ต่ออนุกรมกับโพรงก๊าซหรือ C_c เขียนแทนด้วยความจุไฟฟ้า C_b ส่วนที่ต่ออนุกรมกับ C_c นี้จะรวมกันได้เป็น C_a ส่วนฉนวนที่สมบูรณ์คืออยู่โดยรอบของ C_c จะให้ค่าเป็น C_a' และรวมกันในส่วนนี้จะได้เป็น C_a ดังรูปที่ 2.2 ข) ซึ่งค่าความจุไฟฟ้าของวัสดุทดสอบ C_t จะมีค่าโดยประมาณเท่ากับ C_a ซึ่งมีค่ามากกว่า C_b มากๆ นั่นคือ

$$C_t \approx C_a \gg C_c > C_b$$



รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลของวัสดุที่มีโพรงก๊าซและเกิดดิสชาร์จบางส่วนภายใน

ถ้าป้อนแรงดัน U_t ที่ขั้ว A-B ทำให้แรงดันตกคร่อมโพรงก๊าซมีค่าสูงกว่าค่าแรงดันเบรกควานซ์ของโพรงก๊าซที่แทนด้วย C_c ก็จะเกิดเบรกควานซ์ในโพรงก๊าซ ซึ่งเขียนแทนด้วยแกป g (เอาตัวจ่ายแรงดันออก) มีความต้านทาน R_c ต่ออนุกรมอยู่เป็นตัวจำกัดกระแสคิซาร์จ $i_c(t)$ ซึ่งมีลักษณะเป็นพัลส์ช่วงกว้างเป็นนาโนวินาที และทำให้เกิดแรงดันตก δU_c ที่โพรงก๊าซเกิดการปล่อยประจุออกมาเป็น

$$\Delta q_c = \delta U_c C_c \quad (2.1)$$

กระแส $i_c(t)$ นี้ไหลอยู่ภายในที่ไม่สามารถวัดได้ แต่การคิซาร์จของ C_c ทำให้เกิดการถ่ายเทประจุของ C_b และ C_a ในวงจรสมมูล เป็นผลให้เกิดแรงดันตกที่ขั้ว A-B เท่ากับ δU_t ซึ่งหาได้จากประจุใน C_c คือ

$$\delta U_t = \frac{C_b \delta U_c}{C_b + C_a} \quad (2.2)$$

ค่าแรงดันตกนี้ไม่ให้ข้อมูลอะไรเกี่ยวกับ δq_c เลย แต่เป็นสัดส่วนกับ $C_b \delta U_c$ แต่ δU_t นี้วัดได้เป็นพัลส์รูปขั้น ขึ้นอยู่กับ $i_c(t)$

เมื่อแทนค่า

$$\delta U_c = \frac{\delta q_c}{C_c}$$

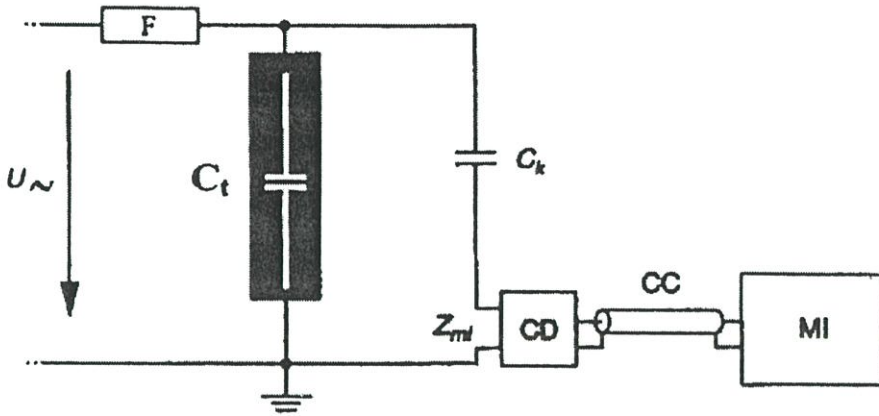
จะได้

$$\delta U_t = \frac{C_b \delta q_c}{C_c (C_b + C_a)} \quad (2.3)$$

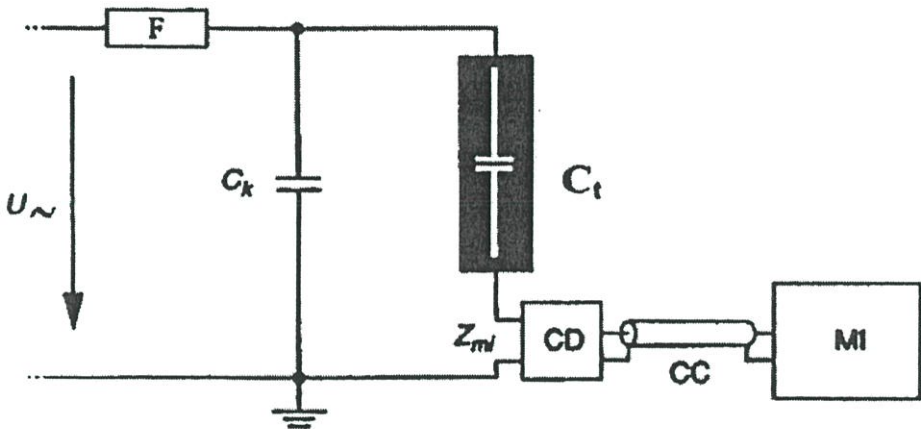
ค่าของ δU_t มีค่าเพียงเป็นมิลลิโวลต์ถึงโวลต์ ในขณะที่ δU_c มีค่าเป็นกิโลโวลต์ แต่โดยที่ไม่ทราบค่า C_c และ C_b จึงไม่อาจหาความสัมพันธ์ของ δU_t กับ δU_c และ δq_c ได้อย่างไรก็ตาม การคิซาร์จในโพรงก๊าซ C_c เป็นผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงถ่ายเทประจุหรือกระแสในวงจรภายนอกที่สามารถตรวจวัดได้

2.1.4 การต่อวงจรระบบวัดคิซาร์จบางส่วนในวงจรทดสอบ

การต่อวงจรระบบวัด PD ในวงจรทดสอบ จะมีความแตกต่างตรงที่การต่ออิมพีแดนซ์วัด Z_m ซึ่งมาตรฐานการวัด PD ฉบับใหม่คือ IEC 60270 เรียกว่าอุปกรณ์คัปเปิล (coupling device) CD ประกอบเป็นอิมพีแดนซ์วัด Z_{mi} ต่อที่ต้นระบบวัดแบ่งเป็น 2 แบบดังในรูปที่ 2.3 ก) และ ข) ซึ่งเป็นวงจรตรวจจับ PD วิธีตรง (straight detection circuit)



ก) CD ต่ออนุกรมกับ C_k



ข) CD ต่ออนุกรมกับ C_t

รูปที่ 2.3 วงจรทดสอบตรวจจับดิสชาร์จบางส่วน (PD) แบบตรง

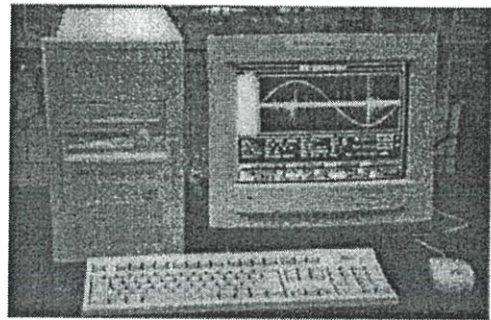
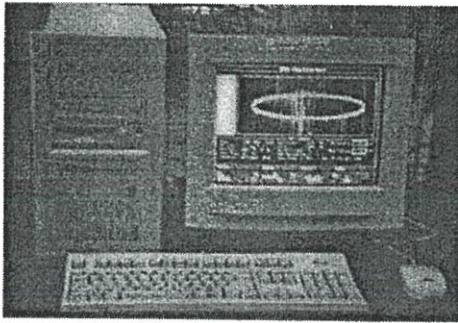
- จากรูป
- U_{\sim} คือ แรงสูงตัวจ่าย
 - F คือ ตัวกรอง
 - Z_m คือ อิมพีแดนซ์ป้อนเข้าของระบบ
 - CC คือ เคเบิลวัด
 - C_t คือ ค่าเก็บประจุวัสดุทดสอบ
 - C_k คือ ค่าเก็บประจุคาบเกี่ยว
 - CD คือ อุปกรณ์คาบเกี่ยว

ความแตกต่างของวงจรแบบ ก) และแบบ ข) คือ แบบ ก) ตัวคาบเกี่ยว CD ต่ออนุกรมกับ C_k ที่มีสัคย์เป็นดิน เป็นแบบที่ใช้กันมากในทางปฏิบัติ ไม่เสี่ยงต่อการเกิดเบรกดาวน์ เพราะทราบค่าแรงดันที่กำหนดของ C_k แต่ความไวในการวัดจะน้อยกว่าแบบ ข) เพราะ PD ที่เกิดขึ้นในวัสดุทดสอบ C_t แบบ ข) จะมีความไวสูงกว่า เพราะตัวคาบเกี่ยว CD ต่ออนุกรมโดยตรงกับวัสดุ

ทดสอบ C_k ค่าเก็บประจุสตรีทั้งหลายด้านแรงสูงกับดินจะเพิ่มค่า C_k ทำให้ความไวของวงจรวัด PD สูงขึ้น แต่มีข้อเสียที่เสี่ยงต่อการเกิดเบรกควานที่วัสดุทดสอบ จะทำให้เครื่องวัด PD เสียหายได้

2.1.5 เครื่องตรวจจับ PD แบบใช้คอมพิวเตอร์เป็นฐาน

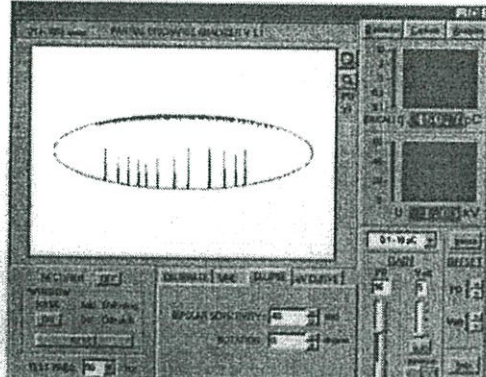
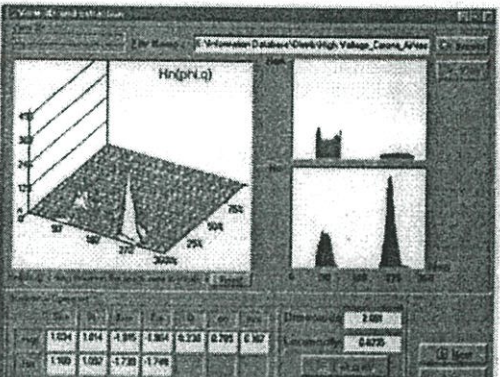
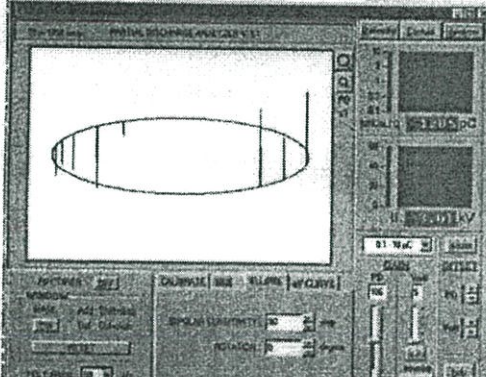
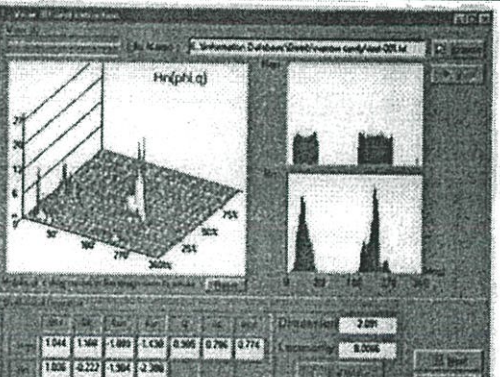
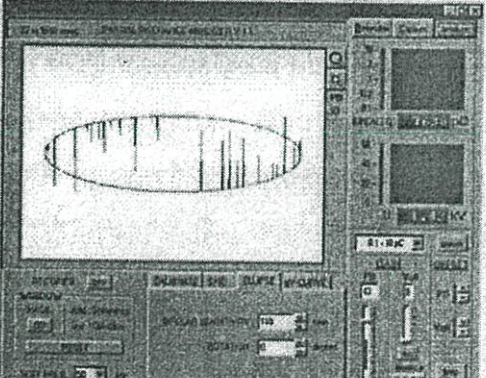
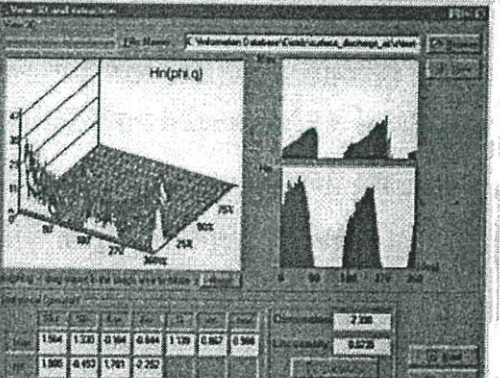
ความเจริญก้าวหน้าด้านเทคโนโลยี เช่น คอมพิวเตอร์ช่วยให้วิศวกรสามารถพัฒนาเครื่องตรวจจับดิสชาร์จบางส่วน ได้สะดวกและมีประสิทธิภาพสูง โดยใช้คอมพิวเตอร์เป็นฐานช่วยให้สามารถวิเคราะห์สาเหตุ ดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงเป็นประเภทใด ง่ายต่อการระบุตำแหน่งที่เกิดดิสชาร์จบางส่วนในเคเบิล เครื่องตรวจจับดิสชาร์จบางส่วน ดังกล่าว เป็นไปตามมาตรฐาน IEC 60270 ดังตัวอย่างเครื่องตรวจจับดิสชาร์จบางส่วนใช้คอมพิวเตอร์เป็นฐานที่ติดตั้งใช้ตรวจจับดิสชาร์จบางส่วนในกักแรงสูง เป็นการทดสอบประจำในโรงงานอุตสาหกรรม ดังรูปที่ 2.4 ซึ่งเป็นผลการพัฒนาเครื่องตรวจจับดิสชาร์จบางส่วน



รูปที่ 2.4 เครื่องตรวจจับดิสชาร์จบางส่วน (PD) โดยใช้คอมพิวเตอร์เป็นฐาน

เครื่องตรวจจับดิสชาร์จบางส่วน ใช้คอมพิวเตอร์เป็นฐาน จะบันทึกข้อมูลลงในไฟล์ คำนวณหาเมตริกซ์กระจาย และแสดงผลแบบ 3 มิติ ตัวอย่างการตรวจจับดิสชาร์จบางส่วน ทั้ง 3 แบบ แสดงผลแบบวงรี และ 3 มิติ ดังแสดงในตารางที่ 2.1

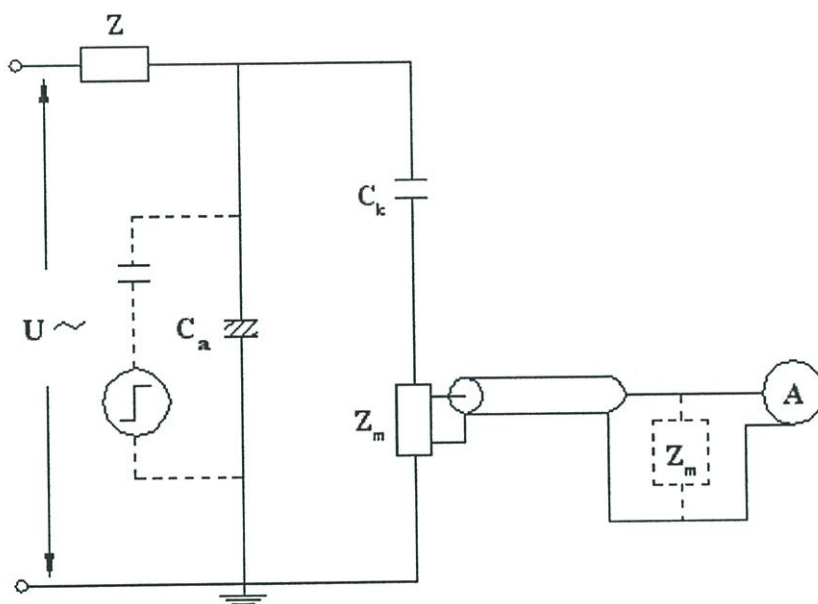
ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบลักษณะการแสดงผล PD บนฐานเวลาแบบวงรี และรูปแบบการกระจาย $H_n(\phi, q)$

ชนิด PD	การแสดงผล PD บนฐานเวลาแบบวงรี	การแสดงผล PD ในรูปแบบการกระจาย $H_n(\phi, q)$
โคโรนา		
ดิสชาร์จภายใน		
ดิสชาร์จตามผิว		

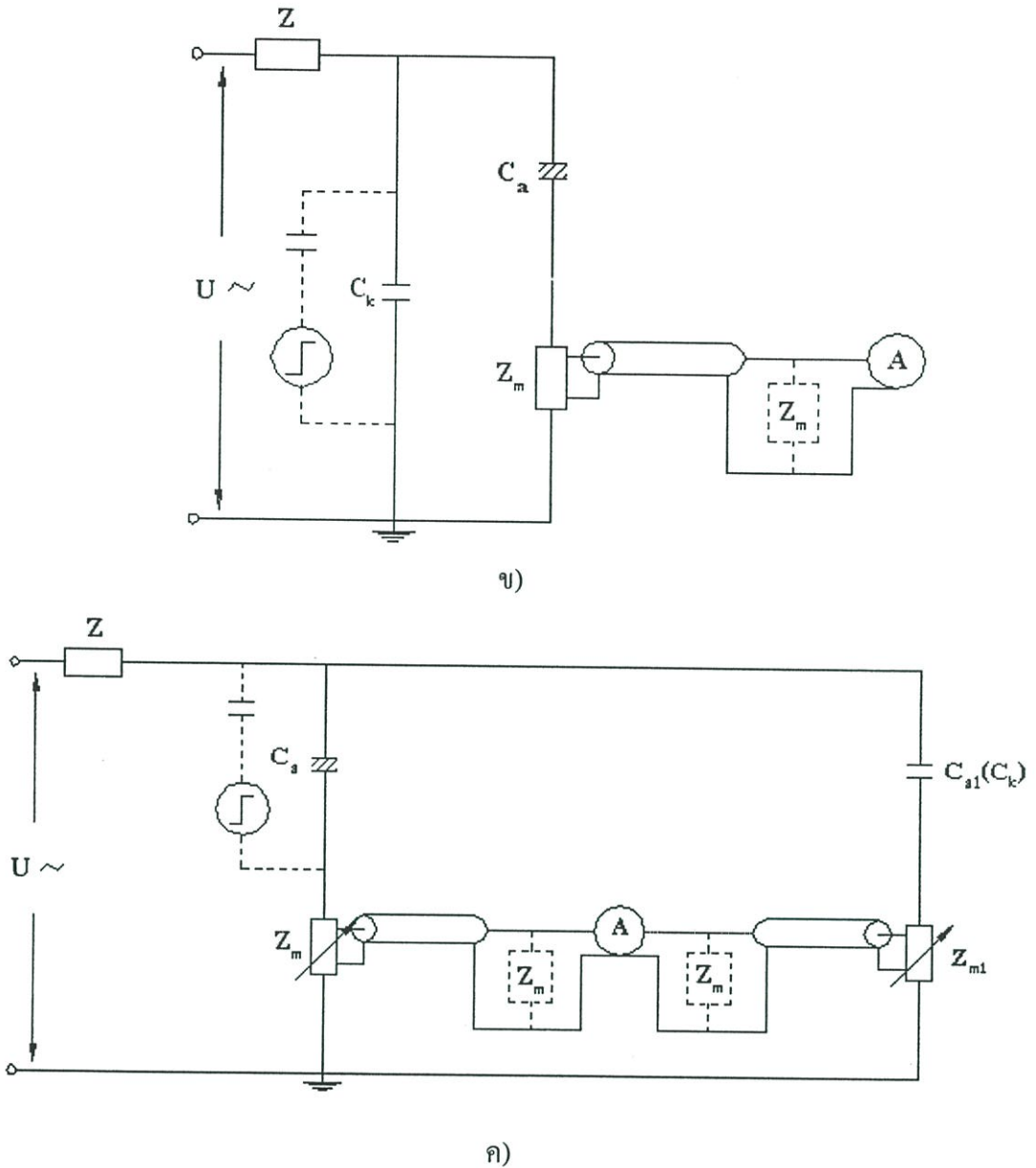
- โคโรนา : แสดงบนฐานเวลารูปวงรี PD จะเกิดที่มุมเฟส 270° ที่ U_1 เมื่อ U สูงขึ้น PD จะเกิดในช่วง 90° ด้วย
- ดิสชาร์จภายใน : แสดงบนฐานเวลารูปวงรี PD จะเกิดที่มุมเฟส $0 - 90^\circ$ และ $180^\circ - 270^\circ$
- ดิสชาร์จตามผิว : แสดงบนฐานเวลารูปวงรี PD จะเกิดที่มุมเฟส $0-90^\circ$ และ $180^\circ - 270^\circ$

2.2 เทคนิคการวัดดิสชาร์จบางส่วน [3]

การวัดดิสชาร์จบางส่วนสำหรับวัสดุทดสอบทั่วไป อาจแทนได้ด้วยตัวเก็บประจุชนิดองค์ประกอบแบบลัมปีหรือตัวเก็บประจุธรรมดา ซึ่งในการวัดดิสชาร์จบางส่วนสำหรับเคเบิล ถ้าเป็นเคเบิลสั้นการวัดดิสชาร์จบางส่วนทำการวัดโดยวงจรทดสอบ PD ตามมาตรฐานต่างๆ จะมีลักษณะเช่นเดียวกัน ในที่นี้ใช้วงจรทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60270 โดยรูปที่ 2.5 ก) และรูปที่ 2.5 ข) เป็นวงจรทดสอบแบบวิธีตรง ข้อดีของวงจรรูปที่ 2.5 ก) คือขั้วแรงดันต่ำของวัสดุทดสอบต่อลงกราวด์โดยตรง ในกรณีวัสดุทดสอบเกิดการเบรกดาวน์อิมพีแดนซ์ชั่วคราวจะไม่ได้รับความเสียหาย ข้อดีของวงจรในรูปที่ 2.5 ข) จะให้ความไวในการวัดสูงกว่าแบบแรกในกรณีที่วัสดุทดสอบมีขนาดเล็ก เนื่องจากผลของตัวเก็บประจุแบบสเตรย์จะทำให้ตัวเก็บประจุดับปลิงมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ในรูปที่ 2.5 ค) เป็นวงจรทดสอบแบบสมดุล วงจรแบบนี้จะมีข้อได้เปรียบในเรื่องการลดสัญญาณรบกวนที่เข้ามาจากแหล่งจ่ายหรือสัญญาณแบบ “คอมมอน โหมด” นั่นเอง



ก)



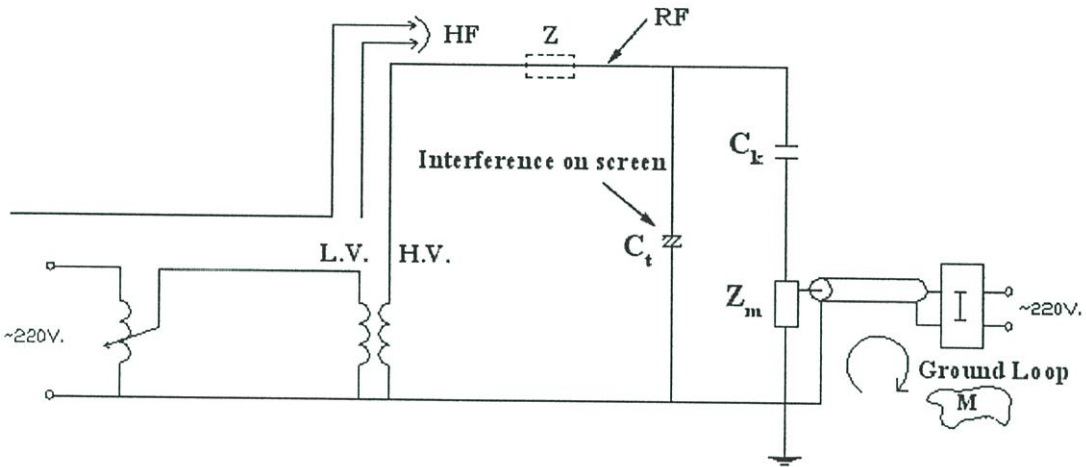
รูปที่ 2.5 วงจรทดสอบดิสชาร์จบางส่วนแบบต่างๆ ตามมาตรฐาน IEC 60270

การปรับเทียบวงจรทดสอบโดยปกติจะทำก่อนการป้อนแรงดันเข้าวงจรทดสอบ โดยใช้เครื่องปรับเทียบดิสชาร์จมาตรฐานในการป้อนกระแสพัลส์สั้นๆ ที่มีประจุ (Pulse Area) ซึ่งทราบค่าที่แน่นอนที่ขั้วทั้งสองของวัสดุทดสอบ (เส้นประ) หลังจากทำการปรับเทียบเสร็จแล้ว ควรเอาเครื่องปรับเทียบดิสชาร์จมาตรฐานออกก่อนการป้อนแรงดันเข้าวงจรทดสอบ

2.3 เทคนิคการลดสัญญาณรบกวน [3]

2.3.1 สัญญาณรบกวนที่มีผลกระทบในการวัดคิซาร์จบางส่วน

สัญญาณรบกวนจะประกอบด้วย สัญญาณรบกวนที่เข้ามาทางอากาศ และทางแหล่งจ่าย นอกจากนี้ยังมีสัญญาณรบกวนเนื่องจากการคิซาร์จของอุปกรณ์ที่เป็น โลหะและวางอยู่ใกล้วงจรทดสอบหรือกราวด์ไม่ดี การเกิดกราวด์ลูป (Ground Loop) และเกิดสัญญาณออสซิลเลตเนื่องจากการเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์ไม่ดี (หลวม) เป็นต้น รายละเอียดแสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ตัวอย่างสัญญาณรบกวนที่ตำแหน่งต่างๆ

HF คือ สัญญาณรบกวนความถี่สูงที่เข้ามาจากแหล่งจ่ายได้แก่ ฮาร์มอนิกสูงๆ จากเมนโดยตรงจากอุปกรณ์พวกไครสเตอร์ และ PD จากหม้อแปลงทดสอบ เป็นต้น

RF คือ คลื่นรบกวนวิทยุซึ่งอาจจะเป็นคลื่นวิทยุโดยตรง คลื่นรบกวนจากอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง หรือหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่อยู่ใกล้เคียง

EMP คือ สัญญาณรบกวนจากการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก เนื่องจากการทำงานของสวิตช์หรือไครสเตอร์

Interference on screen คือ สัญญาณรบกวนที่สกรีนหรือที่ขั้วแรงดันต่ำของวัสดุทดสอบที่มีสกรีนขนาดใหญ่ เช่น เคเบิล เป็นต้น

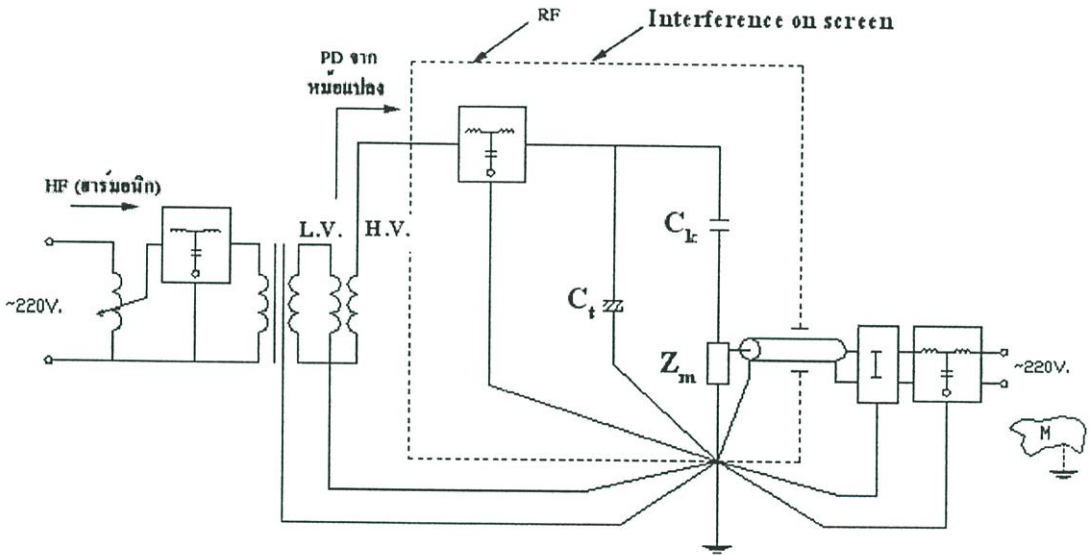
Ground Loop คือ การเกิดครบวงจรของสายดิน

Ungrounded metal (M) คือ การคิซาร์จของพวกโลหะที่ไม่ได้ต่อกับดินวางอยู่ใกล้วงจรทดสอบ

2.3.2 การลดสัญญาณรบกวน

1. การลดสัญญาณรบกวนโดยตรง

การลดสัญญาณความถี่สูง เช่น พวกรังสีไมโครสูงๆ จะใช้ตัวกรองแรงดันต่ำ และอาจจะเพิ่มหม้อแปลงขดลวดแยกช่วยด้วยก็ได้ โดยต่อไว้ทางด้านขดลวดแรงดันต่ำของหม้อแปลงทดสอบ ในกรณีที่เกิด PD ในหม้อแปลงทดสอบจะต้องใช้ตัวกรองแรงดันสูงต่อทางด้านขดลวดแรงดันสูงของหม้อแปลงทดสอบ การลดสัญญาณรบกวน RF และ EMP ซึ่งเข้ามาทางอากาศ ทำได้โดยการทดสอบในห้องชีลด์ การแก้ปัญหาเรื่องกราวด์รูปทำได้โดยการต่อกราวด์ร่วมกันเพียงจุดเดียว ตัวอย่างการแก้ปัญหาสัญญาณรบกวน แสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ตัวอย่างการลดสัญญาณรบกวน

2. การลดสัญญาณรบกวนวิธีอื่นๆ

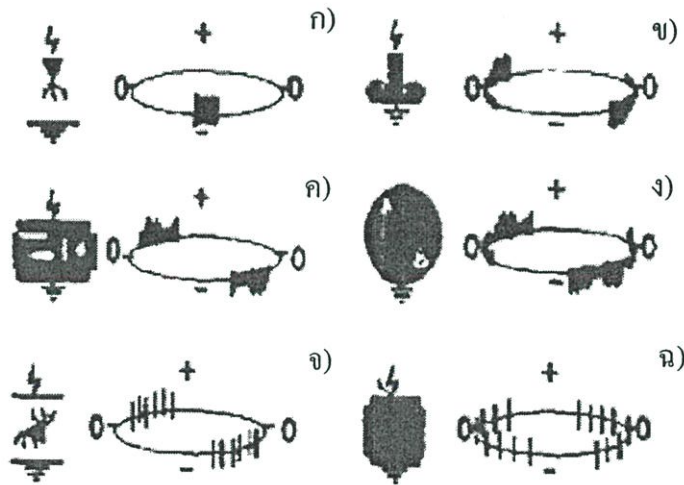
การลดสัญญาณรบกวนวิธีอื่นมีหลายวิธีด้วยกัน ที่นิยมใช้กันมากคือ

- 1) วงจรทดสอบแบบสมมูล ใช้ลดสัญญาณรบกวนแบบ “คอมมอน โหมด” เช่น สัญญาณรบกวนที่เข้ามาทางแหล่งจ่าย เป็นต้น
- 2) การลดสัญญาณรบกวนโดยวิธี “หน้าต่างเวลา” (Time Window Method) วิธีนี้เป็นที่นิยมกันมากในปัจจุบัน โดยจะลดสัญญาณรบกวนที่ซิงโครไนซ์กับความถี่ของแหล่งจ่ายเท่านั้น เช่น สัญญาณรบกวนเนื่องจากการทำงานของไคริสเตอร์ เป็นต้น

2.4 การจำแนกชนิดของดิสชาร์จบางส่วน [9-11, 16]

ดิสชาร์จบางส่วน โดยทั่วไปแบ่งออกได้เป็น 6 ชนิด คือ

1. Corona Discharge เกิดขึ้นบริเวณปลายอิเล็กโทรดแหลมหรือขอบคมที่อยู่ในฉนวนก๊าซหรือฉนวนเหลว
2. Surface Discharge เกิดขึ้นที่ผิวของฉนวนที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าตามแนวผิวสูง
3. Internal Discharge เกิดขึ้นในโพรงหรือฟองก๊าซในเนื้อฉนวน
4. Electric tree เกิดจากขอบคมของตัวนำหรือจากโพรงหรือฟองก๊าซในฉนวนแข็ง
5. Floating Part discharges เกิดขึ้นในกรณีที่มีโลหะที่อยู่ใกล้ฉนวนจรดสอบไม่ได้ทำการต่อลงกราวด์
6. Contact noise เกิดขึ้นจากการต่อกราวด์ในวงจรทดสอบไม่ดี



รูปที่ 2.8 ลักษณะสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนแบบต่างๆ

โดยทั่วไปการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในฉนวนสายเคเบิล จะหมายถึง ดิสชาร์จบางส่วนภายใน [14-15] ซึ่งสามารถแยกออกเป็นชนิดต่างๆ ได้ดังต่อไปนี้ [17]

1) การดิสชาร์จที่เกิดจากโพรงอากาศภายในไดอิเล็กตริก

โพรงอากาศชนิดนี้มักจะพบในฉนวนแข็ง มีสาเหตุมาจากกระบวนการผลิต เช่น การหล่อ การหุ้ม ดิสชาร์จชนิดนี้จะเกิดขึ้นก่อนค่าแรงดันสูงสุด และจะหยุดดิสชาร์จเมื่อถึงค่าแรงดันสูงสุด เกิดขึ้นทั้งในไซเคิลบวกและไซเคิลลบของแรงดันรูปไซน์

2) การดิสชาร์จที่เกิดจากรอยแตกภายในไดอิเล็กตริก

การดิสชาร์จชนิดนี้โดยมากจะพบมากในไดอิเล็กตริกที่มีความยืดหยุ่น เช่น เทอร์โมพลาสติก รอยแตกที่เกิดขึ้นจะมีทิศทางเดียวกันกับสนามไฟฟ้า สาเหตุโดยทั่วไปจะเกิด

จากสิ่งสกปรกที่เกิดขึ้นในไดอิเล็กตริกและฟองหรือโพรงอากาศที่เกิดใกล้ๆ กัน และขยายตัวรวมกัน ปรากฏการณ์นี้จะพบบ่อยในสายเคเบิลที่ใช้งานไประยะหนึ่งแล้ว

3) การดิสชาร์จที่เกิดจากเศษวัสดุและสิ่งเจือปนภายในไดอิเล็กตริก

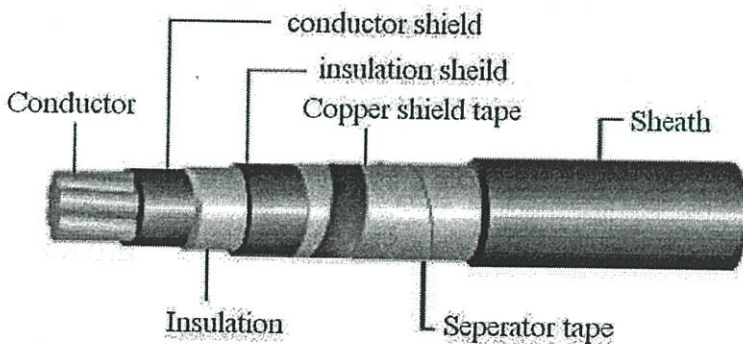
เศษวัสดุและสิ่งเจือปนนี้โดยมากจะมีสาเหตุมาจากกระบวนการผลิต เศษวัสดุ จะหมายถึงเศษวัสดุที่ใช้ทำฉนวนที่เกิดการไหม้และตกค้างจากกระบวนการผลิต เช่น เซมิคอนดักเตอร์ที่ไหม้ หรือเศษใยไฟเบอร์ ส่วนสิ่งเจือปน จะหมายถึงสิ่งเจือปนภายนอก ได้แก่ ฝุ่นละออง เศษผงต่างๆ เศษวัสดุและสิ่งเจือปนจะเข้าไปแทรกอยู่ใน ไดอิเล็กตริก การดิสชาร์จชนิดนี้ยังรวมไปถึงส่วนที่ขรุขระ และตำหนิของไดอิเล็กตริกด้วย

4) การดิสชาร์จที่เกิดจากการขยายตัวของคาร์บอนแทรค

การดิสชาร์จชนิดนี้จะเกิดในสารอินทรีย์ ที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบของวัสดุที่ใช้ทำฉนวน เช่น ทรอสลิงค์โพลีเอทีลีน เอทีลีน และโพลีเมอร์ต่างๆ สาเหตุโดยทั่วไปเกิดจากการที่ไดอิเล็กตริกมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงมากทำให้เกิดรอยแตกเป็นเส้นเล็กๆ ภายในไดอิเล็กตริก

2.5 โครงสร้างของสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวน XLPE [3]

สายตัวนำที่จะกล่าวนี้เป็นสายตัวนำที่ใช้ในระบบแรงดัน 22 kV และ 24 kV ซึ่งเป็นสายทองแดงหุ้มฉนวน XLPE การเลือกใช้ทองแดงเนื่องจากเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี ส่วนประกอบของสายเคเบิลได้ดินแสดงดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ส่วนต่างๆ ของสายเคเบิลแรงสูงฉนวน XLPE

2.5.1 ตัวนำ (Conductor)

อาจเป็นทองแดงหรืออลูมิเนียม แต่โดยส่วนมากใช้ตัวนำทองแดง ตัวนำจะทำหน้าที่นำกระแสไฟฟ้า เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวนำก็จะเกิดความร้อน (I^2R) ถ้ามีกระแสไหลมากๆ หรือสายมีความต้านทานสูง ก็จะเกิดความร้อนสูง ความร้อนจะกระจายผ่านส่วนต่างๆ ของ

สายไฟฟ้าส่วนที่ห่อหุ้มตัวนำ การระบายความร้อนนี้จะเร็วหรือช้าขึ้นอยู่กับความสามารถในการนำความร้อนของวัสดุที่ใช้หุ้มสายและอุณหภูมิของอากาศโดยรอบ

2.5.2 Extruded Conductor Shield (Conductive Strand-Shielding)

เป็นวัสดุที่ห่อหุ้มตัวนำทำหน้าที่คล้าย Stress control คือกระจายสนามไฟฟ้าไม่ให้หนาแน่น ณ จุดใดจุดหนึ่ง และยังทำหน้าที่ลดช่องว่างระหว่างสายตัวนำกับฉนวนอีกด้วย ในเคเบิลที่มีขนาด 10 kV ขึ้นไป ผิวสายตัวนำต้องเรียบและจับยึดกับฉนวนเป็นอย่างดี ดังนั้นจึงต้องทำการเคลือบผิวของสายตัวนำด้วยสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) ระหว่างผิวสายตัวนำกับฉนวน เพื่อควบคุมเส้นแรงไฟฟ้าบนผิวสายตัวนำและไม่ให้เกิดมีโพรงอากาศใดๆ บนผิวตัวนำกับฉนวนขณะที่สายตัวนำมีการโค้งงอหรือเปลี่ยนรูปร่างเนื่องจากความร้อน นอกจากนั้นเนื้อผิวนอกของฉนวน XLPE ระหว่าง Screen ต้องเคลือบผิวด้วย Semiconductor เพื่อป้องกันการเกิด Partial Discharge

2.5.3 Insulation

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

- 2.5.3.1 High Dielectric Strength คือมีค่าความต้านทานสูงต่อแรงดันไฟฟ้า
- 2.5.3.2 Low Dielectric Constant หรือ Specific Inductive Capacitance ถ้ามีค่าต่ำ จะให้เกิดค่า Capacitance ระหว่างสายตัวนำกับ Shield ต่ำด้วย เนื่องจากถ้า Capacitance มีค่าสูง ค่าสูญเสียก็จะสูงตามไปด้วย
- 2.5.3.3 Low Power Factor เนื่องจากกระแสสลับจะทำให้เกิดค่า Leakage Current ในฉนวนเป็นผลให้เกิดค่าสูญเสียในรูปของความร้อน เรียกว่า Dielectric Loss อัตราของ Dielectric Loss ต่อ Apparent Loss คือ Power Factor เนื่องจากค่า Dielectric Loss เป็นค่าที่ไม่ต้องการให้เกิดขึ้นในระบบ ถ้ามีค่านี้ต่ำจะเป็นผลทำให้ Power factor ต่ำด้วย เราจึงอาจดูค่าของ Dielectric Loss ได้จากค่า Power factor
- 2.5.3.4 Moisture Resistance ต้องมีค่าสูงหรือค่าความต้านทานต่อความชื้นสูง เพราะถ้าความต้านทานต่อความชื้นต่ำ วัสดุก็จะดูดซับความชื้นได้มาก จะเป็นผลให้คุณสมบัติในการเป็นฉนวนไฟฟ้าลดลงและเสื่อมสภาพในที่สุด
- 2.5.3.5 High Resistance to Heat ฉนวนควรทนต่อความร้อนที่อุณหภูมิสูงๆ ได้ เมื่อสายตัวนำมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านจะเกิดความร้อน ดังกล่าวแล้วในตอนต้น ถ้าฉนวนทนความร้อนได้สูง สายไฟฟ้าจะนำกระแสได้มากด้วย

2.5.3.6 High Resistance to Corona Damage ระหว่างสายตัวนำกับ Shield จะมีลักษณะเป็น Capacitance และจะมีความต่างศักย์ระหว่างสายตัวนำกับ Shield ในกรณีที่เกิดมีช่องอากาศขึ้นในฉนวน (Void) จะเกิดความต่างศักย์ระหว่างผนังของช่องอากาศด้านที่อยู่ใกล้กับ Shield กับด้านที่อยู่ใกล้ตัวนำจะทำให้อากาศใน Void นั้นเกิด Corona Discharge ทำให้เกิดพลังงานไฟฟ้าสูญเสียอีกด้วย ฉนวนบริเวณนั้นจะเกิดความร้อนและไหม้กลายเป็น Carbon และ Void นี้ก็จะโตขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งฉนวนเกิด Breakdown และใช้ไม่ได้อีกต่อไป แต่อาการแบบนี้จะเกิดขึ้นและขยายตัวไปได้ค่อนข้างช้าในระยะแรกที่ทำกรติดตั้งใหม่ๆ จึงไม่เกิดสภาพเช่นนี้ในการผลิตและการใช้งานควรมีการทดสอบค่า Corona Discharge ไม่ให้มีค่ามากจนอาจเกิดอันตรายได้ในช่วงระยะเวลาอายุการใช้งานของสายไฟฟ้า

2.5.4 Extruded Insulation Shield หรือ Non-Metallic Extruded Conducting Shield

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

2.5.5 Copper Shield

ทำด้วยแถบโลหะแบนหรือเส้นโลหะกลม ส่วนมากทำด้วยทองแดง อาจทำด้วย Metal Tape, Corrugated Metal, Metal Drain Wire หรือ Lead Sheath ทำหน้าที่ปล่อย (Drain) กระแส Discharge ต่างๆ ลงดิน และยังทำหน้าที่ปรับระดับความต่างศักย์ของ Insulating Shield ให้เท่ากับดินอีกด้วย ช่วยลดความเสียหายของสายอันเนื่องจาก Surge Voltage

2.5.6 Separator Tape หรือเรียกว่า Bedding Type

ปกติทำด้วยวัสดุจำพวกผ้า ทำหน้าที่เพิ่มความแข็งแรงของเปลือกนอกและยังช่วยเพิ่มความถี่ระหว่างเปลือกนอกกับ Metal Tape กรณีที่มีสายคัดโค้งหรืองอ

2.5.7 Sheath หรือเปลือกนอกทำด้วยวัสดุที่เป็นฉนวน

ส่วนมากเป็น PVC หรือ PE เพื่อลดความเสียหายอันเนื่องจากการกระแทกหรือเสียดสี

2.6 วัสดุฉนวนแข็ง [13]

ฉนวนแข็งนอกจากจะทำหน้าที่เป็นฉนวนทางไฟฟ้าแล้วบางส่วนยังต้องทำหน้าที่ยึดหรือรับแรงกลอันเกิดจากน้ำหนักของโครงสร้าง หรือแรงกลไดนามิกส์ที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าอีกด้วย ฉนวนแข็งที่ดีนั้นจะต้องมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูง มีความต้านทานสูงทุกระดับแรงดัน มีพลังงานสูญเสียเปล่าในไดอิเล็กตริกต่ำ ปลอดภัยจากฟองก๊าซและความชื้น และไม่ดูดซึมความชื้น ทนความร้อนได้สูง และทนต่อปฏิกิริยาเคมีได้ดี และไม่เป็นพิษเมื่อติดไฟ ฉนวนแข็งที่มีใช้งานทางด้านไฟฟ้าแรงสูง ได้แก่ กระดาษ ไมก้า แก้ว เซรามิก ยาง อีพ็อกซี-เรซิน โพลีเมอร์ และก๊าซอัดเคเบิลชนิดฉนวนกระดาษยังคงนิยมใช้อยู่ เพราะเคเบิลชนิดนี้มีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าได้ดี มีพลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกต่ำ อายุการใช้งานยาวนาน

การฉนวนเคเบิลแรงต่ำและแรงดันสูง มักใช้ฉนวนพีวีซี (PVC) พีอี (PE) และพีอีครอสลิง (XLPE) แต่ฉนวนพีวีซีไม่เหมาะสำหรับการฉนวนเคเบิลแรงดันสูง เพราะมีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสูง และพลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกมีค่าสูงด้วย ส่วนฉนวนพีอีจะมีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกต่ำ พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกต่ำทนต่อแรงดันได้สูง

โพลีเอทิลีน (Polyethylene , PE)

PE เป็นสารเทอร์โมพลาสติกที่มีคุณสมบัติเด่นเป็นพิเศษในการเป็นฉนวนทางไฟฟ้า โดยคุณสมบัติของการเป็นฉนวนไม่ได้ขึ้นอยู่กับความถี่ของแรงดัน และอุณหภูมิขณะใช้งาน กระบวนการทำง่ายและราคาไม่แพง อาทิเช่น ชูบเปอร์สึนไนลอน โพลีเอทิลีน(PE) สามารถนำมาใช้งานได้กว้างขวาง โดยเฉพาะ XLPE สามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิสูงถึง 125 องศาเซลเซียส เปรียบเทียบกับ PE ซึ่งสามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิสูงสุดไม่เกิน 75 องศาเซลเซียส ดังนั้น XLPE สามารถใช้งานเป็นฉนวนของสายเคเบิลได้ดีที่ความหนาแน่นกระแสที่สูง ส่วน PE นั้นมักจะนำมาทำเป็นเปลือกนอก (Jacket) ของเคเบิล PE ทุกชนิดปกติแล้วจะมีความคงทนต่อความชื้นและปฏิกิริยาเคมีได้ดีมาก มีสภาพต้านทานถึง 10^{16} โอห์ม-เซนติเมตร และมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าได้สูงถึง 500 - 550 V/mil (1 V/mil = 39.4 V/mm) PE มีค่าเปอร์มิททิวิตี้ (ϵ_r) เท่ากับ 2.25 ส่วน XLPE มีค่าเปอร์มิททิวิตี้ (ϵ_r) ที่ (50 Hz – 1 MHz) เท่ากับ 2.3 และมีค่า $\tan \delta$ ตั้งแต่ 0.0003 – 0.0015

2.7 ความคงทนของฉนวนทางไฟฟ้า (dielectric strength) [14-15]

ความคงทนของการฉนวนทางไฟฟ้า หมายถึง ค่าความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้า (Electric field stress) สูงสุดที่ฉนวนนั้นสามารถทนอยู่ได้ โดยไม่เกิดความเสียหายหรือเกิดเบรกดาวน์ หรือทำให้การฉนวนเสื่อมสภาพ ซึ่งมีหน่วยเป็น V/cm หรือ kV/cm คือ มีหน่วยเป็นค่าแรงดันต่อความหนาของฉนวน หรือระยะห่างของอิเล็กโตรด ความเครียดสนามไฟฟ้ากำหนดค่า

ความคงทนของการฉนวนทางไฟฟ้า โดยทั่วไปจะหาจากสนามไฟฟ้าที่สม่ำเสมอ (Uniform field) คือ เป็นสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดที่มีลักษณะเป็นแผ่นระนาบวางขนานกัน (plate-to-plate)

ความคงทนของการฉนวนต่อความเครียดสนามไฟฟ้า E_b ขึ้นอยู่กับแฟกเตอร์ต่างๆ หลายประการ ซึ่งพอจะเขียนเป็นเกณฑ์ทั่วไปได้ว่า

E_b = ฟังก์ชัน (ลักษณะสนามไฟฟ้า, ลักษณะสมบัติของฉนวน และเวลา)

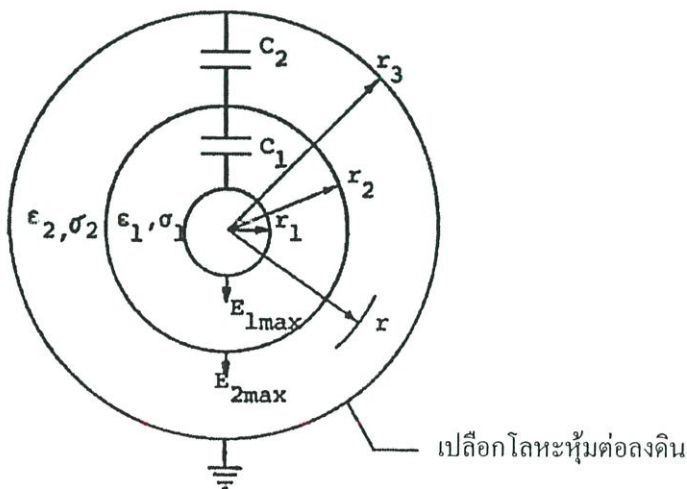
- ลักษณะสนามไฟฟ้า ขึ้นอยู่กับรูปลักษณะของอิเล็กโทรด (electrode configuration)

- ลักษณะสมบัติของฉนวน จะหมายถึงคุณสมบัติทางไฟฟ้า ทางกล ทางความร้อน และทางเคมี

- เวลาในที่นี้หมายถึง ช่วงเวลาที่แรงดันคงอยู่ที่ทำให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าแก่ฉนวน หรือกล่าวในอีกนัยหนึ่งก็คือ ขึ้นอยู่กับรูปแบบรูปคลื่นแรงดันนั่นเอง

2.8 สนามไฟฟ้าในฉนวนเคเบิลแรงสูง [14-15]

ฉนวนของแรงมีอยู่หลายชนิด ซึ่งมีค่าเปอร์มิตทิวิตี ϵ ต่างกัน ฉนวนที่มี ϵ ต่างกัน ไม่เหมาะที่จะนำมาใช้เป็นฉนวนซ้อนกันในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ เพราะทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนแต่ละชนิดมีค่าไม่เท่ากัน แต่การใช้ฉนวนที่มี ϵ ต่างกัน เหมาะที่จะใช้กับสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ คือ จะช่วยให้ความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนแต่ละชั้นที่มี ϵ ต่างกันนั้นมีค่าใกล้เคียงกันได้ เช่น สายเคเบิลแรงสูงทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม และปลอกฉนวนนำ (Bushing) ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 สายเคเบิลทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม

ที่รอยต่อของชั้นฉนวนทั้งสองไม่มีประจุอิสระ กล่าวคือสภาพนำทางไฟฟ้าของฉนวน (σ) เป็นศูนย์ หรือเป็นแรงดันป้อนกระแสสลับ ฉะนั้นระหว่างตัวนำของสายเคเบิลกับเปลือกโลหะจะเสมือนว่า มีค่าความจุไฟฟ้าต่อหน่วยความยาวต่ออันดับกัน คือ C_1 และ C_2 ในฉนวนชั้น 1 และ 2 ตามลำดับ ซึ่งสามารถคำนวณค่าความจุไฟฟ้าต่อหน่วยความยาวได้ดังนี้

$$\begin{aligned} C'_{res} &= \frac{C'_1 C'_2}{C'_1 + C'_2} \\ &= \frac{2\pi\epsilon_1\epsilon_2}{\epsilon_1 \ln \frac{r_3}{r_2} + \epsilon_2 \ln \frac{r_2}{r_1}} \end{aligned} \quad (2.4)$$

ความเครียดสนามไฟฟ้าในชั้นฉนวนที่รัศมี r_x คำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$E_{r_x} = \frac{\epsilon_1\epsilon_2 U}{r_x \epsilon_x \left(\epsilon_1 \ln \frac{r_3}{r_2} + \epsilon_2 \ln \frac{r_2}{r_1} \right)} \quad (2.5)$$

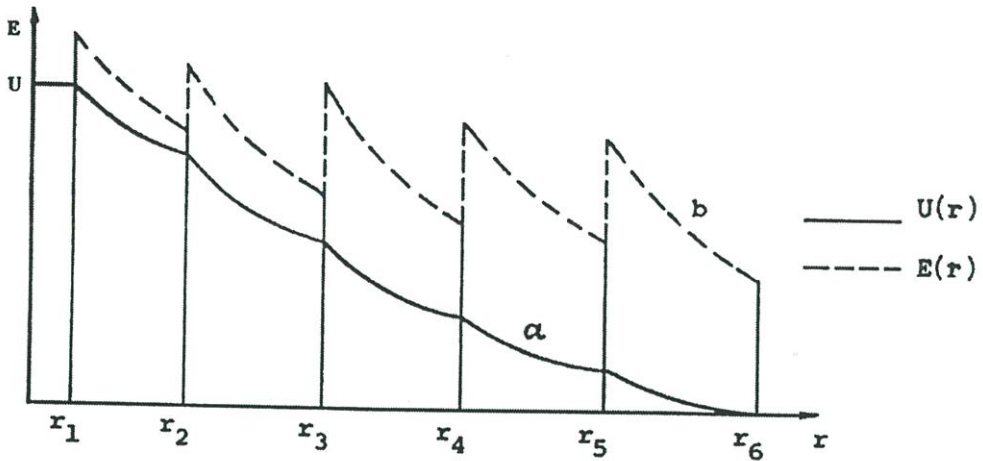
อัตราส่วนของความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด จึงเป็น

$$\frac{E_{1\max}}{E_{2\max}} = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \cdot \frac{r_2}{r_1}$$

นั่นคือ ควรเลือก ϵ ของ r น้อยๆ ควรให้มากที่สุด ถ้ามีชั้นฉนวน n ชั้น ซึ่งมีรัศมี r_1, r_2, \dots, r_n และมีไดอิเล็กตริกคงตัว $\epsilon_1, \epsilon_2, \dots, \epsilon_n$ และเพื่อให้ E_{\max} ในชั้นฉนวนแต่ละชั้นมี E_{\max} เท่ากัน จะทำได้โดยให้

$$\epsilon_1 r_1 = \epsilon_2 r_2 = \epsilon_3 r_3 = \dots = \epsilon_n r_n \quad (2.6)$$

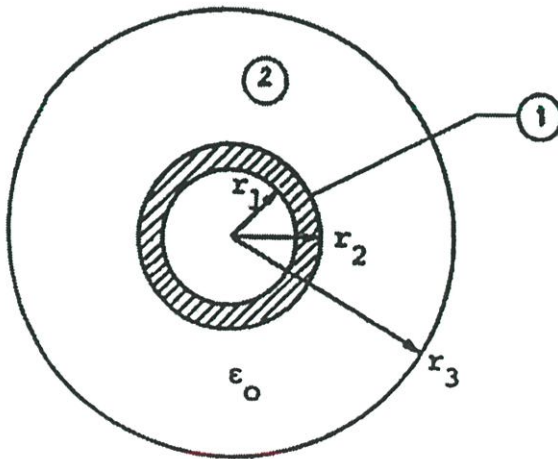
ดังในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 เคเบิลแรงสูงทรงกระบอกซ้อนกันและมีชั้นฉนวนซ้อนหลายชั้น

- แรงดันกระจายในชั้นฉนวน
- สนามไฟฟ้ากระจายในชั้นฉนวน

รูปลักษณะในทางภาคปฏิบัติใช้งาน มักจะพบเสมออย่างหนึ่งก็คือ มีชั้นฉนวน 2 ชั้น คือ ที่อเล็กโตรดใน จะหุ้มด้วยฉนวนมีเปอร์มีตติวิตี ϵ_1 ชั้นถัดมากระบอกนอกเป็นอากาศ (ϵ_0) เนื่องจาก $\epsilon_2 = \epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ แสดงดังในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ตัวนำในหุ้มฉนวน

ฉนวนหุ้มสายไฟจะมีความทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าอากาศ ไม่ต้องกังวลว่าจะต้องให้ E ที่ผิวตัวนำมีค่าต่ำๆ จึงสามารถใช้กับแรงดันที่สูงกว่าเมื่อเป็นอากาศล้วนได้ เพียงแต่ต้องดูว่าความเครียดสนามไฟฟ้าในแนวชั้น 2 ที่เป็นอากาศ คือ E_2 มิให้มีค่าสูงเกินขีดความทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้า ซึ่งอาจคำนวณได้

$$E_2 = \frac{\varepsilon_1 U}{r_2 \left(\varepsilon_1 \ln \frac{r_3}{r_2} + \varepsilon_2 \ln \frac{r_2}{r_1} \right)} \quad (2.7)$$

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

$$\frac{d}{dx} \left[x \left(\varepsilon_1 \ln \frac{r_3}{r_2} + \varepsilon_2 \ln \frac{x}{r_1} \right) \right] = 0 \quad (2.8)$$

การออกแบบให้ได้มิติที่เหมาะสมหมายถึงมิติที่เล็กที่สุด แต่สามารถทนต่อแรงดันได้สูงสุด ตัวอย่างอิลีคโตรดทรงกระบอกซ้อนกันแกนร่วม ถ้ากำหนดอิลีคโตรดอันนอกให้ คือ กำหนดรัศมี r_2 ให้ หากอิลีคโตรดทรงกระบอกอันในมีรัศมีใกล้เคียงกับอิลีคโตรดอันนอก ระยะห่างระหว่างอิลีคโตรดนอกกับใน คือ $d = r_2 - r_1$ จะน้อย ย่อมจะทำให้เกิดเบรกดาวน์ได้ง่าย แต่ถ้าลดขนาดรัศมีของอิลีคโตรดในให้เล็กลง เพื่อให้ได้ระยะช่องแคบมากขึ้น การลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอันในให้เล็กลงมากๆ ย่อมทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิวตัวนำอันในสูงมากขึ้น จนความเครียดสนามไฟฟ้าถึงค่าวิกฤต จะทำให้เกิดโคโรนาได้ง่าย แสดงว่าจะต้องมีระยะช่องแคบที่เหมาะสมอันหนึ่ง คือ รัศมีระหว่าง 0 กับ r_2 ที่จะทำให้ระบบทนแรงดันเบรกดาวน์ได้สูงสุด โดยไม่เกิดโคโรนาก่อน ในกรณีของอิลีคโตรดทรงกระบอกซ้อนกันแกนร่วม แรงดันเบรกดาวน์ คือ

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

มิติที่เหมาะสมของ r_1 เมื่อกำหนด r_2 ให้ จะหาได้โดย

$$\left. \frac{dU_b}{dr_1} \right|_{r_2 \text{ const.}} = 0$$

$$\frac{dU_b}{dr_1} = E_b \left(\ln \frac{r_2}{r_1} - 1 \right) = 0$$

ทรงกระบอกซ้อนกันแน่นได้

$$\left(\frac{r_2}{r_1} \right)_{opt} = e \quad (2.10)$$

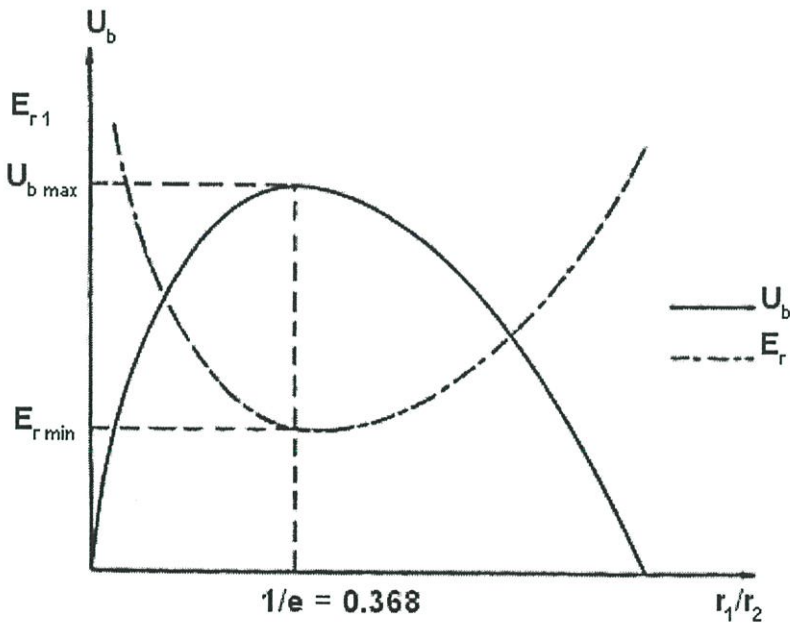
และ

$$E_{r_{opt}} = E_{r_{min}} = \frac{U}{r_1}$$

นั่นคือ

$$U_{b_{max}} = E_b r_1 \quad (2.11)$$

ความสัมพันธ์ U_b และ E_r ในเทอม r_1/r_2 ของทรงกระบอกซ้อนกันแน่น แสดงในรูปที่ 2.13 จะเห็นได้ว่า $r_1/r_2 = 1/e = 0.368$ จะเป็นค่ามิติที่เหมาะสม คือ จะได้ค่าแรงดันเบรกคาวน์ U_b มีค่าสูงสุด หรือความเครียดสนามไฟฟ้า E_r จะมีค่าต่ำสุด



รูปที่ 2.13 U_b และ E_r ในเทอมของ r_1 เมื่อกำหนด r_2 ให้คงตัวของทรงกระบอกซ้อนกันแน่น

ข้อสังเกตในรูปที่ 2.13 แสดงค่า U_b และ E_r อยู่ในเทอมของ r_1/r_2 โดยสมมติว่า E_b มีค่าคงตัว แต่ในทางภาคปฏิบัติจริง ค่า E_b ยังขึ้นอยู่กั r_1 ด้วย คือ E_b ของ r_1 เล็กจะมีค่าสูงกว่า E_b ของ r_1 ที่มีค่าโต ฉะนั้นยอดสูงสุด $E_b = f(r_1)$ จะเลื่อนไปทาง r_1 ที่เล็กลง

2.9 การควบคุมสนามไฟฟ้าของสายเคเบิล [3, 9-12]

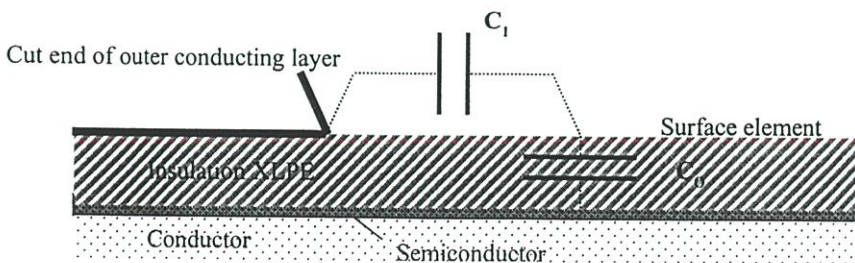
ในการปกขึ้นกึ่งตัวนำนอกออกเพื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างตัวนำและกราวด์ จะส่งผลให้สนามไฟฟ้าที่ขึ้นกึ่งตัวนำนอกเกิดความไม่สม่ำเสมอสูง จึงต้องมีการควบคุมสนามไฟฟ้าในบริเวณนั้นให้เกิดความไม่สม่ำเสมอที่น้อยที่สุด โดยการนำฉนวนที่มีค่าเปอร์มิตติวิตีสูงมาควบคุมการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้า ในการทดสอบฉนวนของสายเคเบิล จะทำการป้อนแรงดันทดสอบระหว่างตัวนำและชั้นกึ่งตัวนำนอก โดยป้อนแรงดันสูงเข้าที่ตัวนำและชั้นกึ่งตัวนำนอกจะเป็นกราวด์ ในการทดสอบสายเคเบิลที่ไม่มีขั้วต่อพิเศษ ถ้าทำการทดสอบดังกล่าวจะเกิดการวางไฟตามผิวขึ้น เนื่องจากระยะห่างระหว่างแรงดันสูงกับกราวด์น้อยมาก ปัญหาที่เกิดขึ้นนี้สามารถแก้ไขได้โดยการเพิ่มระยะห่างระหว่างแรงดันสูงกับกราวด์ โดยการตัดชั้นกึ่งตัวนำนอก (Insulation shield) บางส่วนออก แต่ปัญหาที่จะเกิดตามมา คือ สนามไฟฟ้าที่ขอบของชั้นกึ่งตัวนำนอกจะเกิดความไม่สม่ำเสมอสูง (ในสายเคเบิลปกติ สนามไฟฟ้าจะกระจายอยู่อย่างสม่ำเสมอในฉนวน ระหว่างตัวนำและชั้นกึ่งตัวนำนอก) ซึ่งนำไปสู่การเกิดเบรกดาวน์ในฉนวนได้ จึงจำเป็นต้องควบคุมสนามไฟฟ้าในบริเวณนั้น ให้เกิดความไม่สม่ำเสมอที่น้อยที่สุด ในการควบคุมสนามไฟฟ้าจะพิจารณาจากค่าคาปาซิแตนซ์ 2 ตัว คือ

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

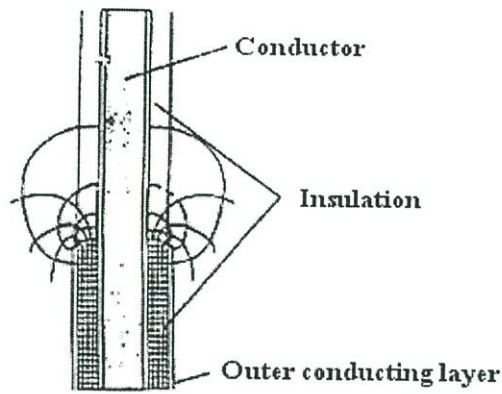
ความสัมพันธ์ระหว่างคาปาซิแตนซ์ กับแรงดันระหว่างฉนวนกับชั้นตัวนำที่ถูกตัดออกเป็นดังนี้

$$U_a \approx E_d \sqrt{\frac{C_1}{C_0}} \quad (2.12)$$

- เมื่อ U_a คือ แรงดันเริ่มต้นของการเบรกดาวน์ระหว่างฉนวนกับชั้นตัวนำที่ถูกตัดออก
 C_1 คือ ค่าคาปาซิแตนซ์ระหว่างชั้นตัวนำที่ถูกตัดออกไปกับฉนวน
 C_0 คือ ค่าคาปาซิแตนซ์ระหว่างฉนวนกับตัวนำ
 E_d คือ ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าเบรกดาวน์ที่ปลายชั้นของตัวนำที่ถูกตัดออก



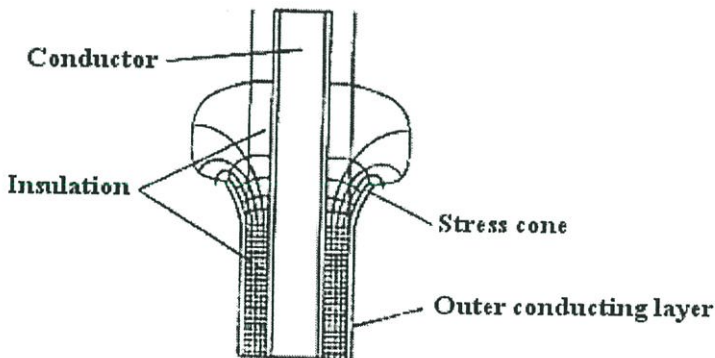
รูปที่ 2.14 ค่าคาปาซิแตนซ์ของสายเคเบิลแรงดันสูง



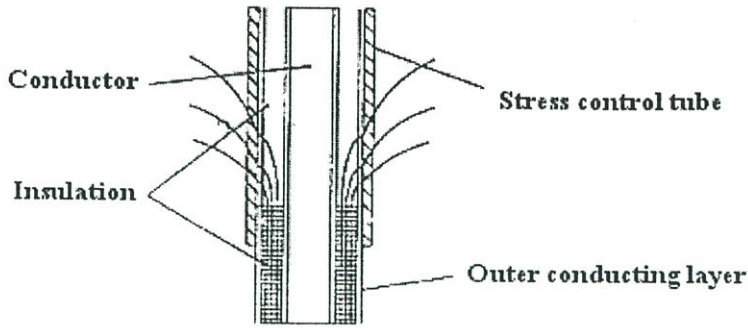
รูปที่ 2.15 สนามไฟฟ้าที่ไม่มีการแก้ไข

ถ้ารอบๆ สายเคเบิลเป็นอากาศ ค่า C_1 จะน้อยมากเมื่อเทียบกับ C_0 จะทำให้แรงดันเริ่มต้นของการเบรกดาวนมีค่าต่ำ ทำให้เบรกดาวนได้ง่าย ในการควบคุมจึงต้องทำให้อัตราส่วนระหว่าง C_1/C_0 มีค่ามาก นั่นก็คือทำให้ C_1 เพิ่มขึ้นหรือ C_0 ลดลงนั่นเอง

1. Capacitive stress control จะเป็นการลด C_0 ซึ่งสามารถกระทำได้โดย การเพิ่มรัศมีของชั้นตัวนำด้านนอกที่ถูกตัดออก โดยใช้ Stress cone ดังรูปที่ 2.16
2. Refractive stress control จะเป็นการเพิ่ม C_1 โดยการเติมชั้นฉนวนที่มีค่าไดอิเล็กตริกสูงๆ ไว้รอบสายเคเบิลดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.16 การแก้ไขสนามไฟฟ้าแบบ Capacitive stress control

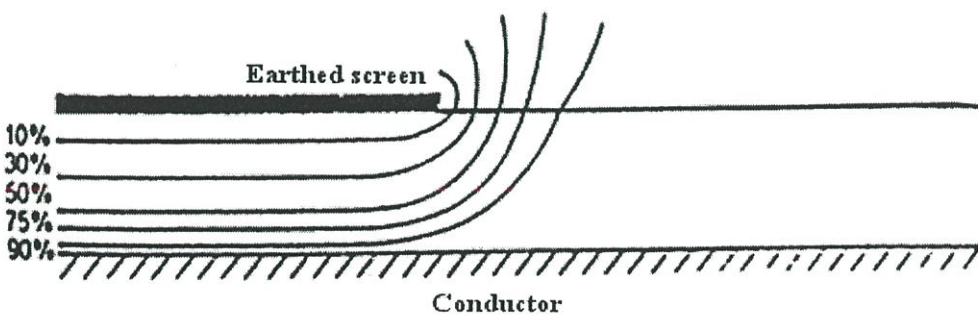


รูปที่ 2.17 การแก้ไขสนามไฟฟ้าแบบ Refractive stress control

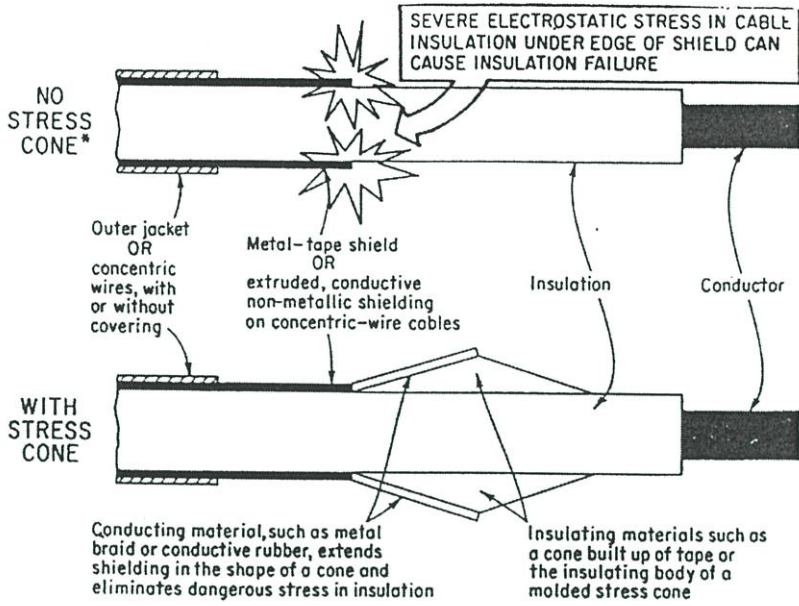
วิธีนำมาใช้ในงานวิจัยนี้เป็นการแก้ไขสนามไฟฟ้าแบบ Capacitive stress control เพื่อเป็นการศึกษาพัฒนาการออกแบบการแก้ไขสนามไฟฟ้าโดยการใช้ Stress cone มาควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบริเวณที่ตัดชั้นกึ่งตัวนำออก

2.9.1 Stress cone เมื่อทำ Splicing และ Terminating

สายไฟฟ้าเส้นหนึ่งจะประกอบด้วยปลายสายอยู่สองข้างด้วยกัน ระหว่างสายตัวนำไฟฟ้ากับ Shield ซึ่งถูกต่อลงดินจะถูกคั่นด้วยฉนวนที่มีความหนาแน่นไม่มากนัก เมื่อป้อนแรงดันให้สายไฟฟ้า จะเกิดความต่างศักย์ระหว่างสายตัวนำกับ Shield ถ้าระยะห่างไม่มากพอก็จะเกิดกระแสไหลข้าม (Flashover) จากสายตัวนำนั้นไปยัง Shield ในกรณีที่ทำการต่อสายหุ้มเข้ากับสายเปลือยหรือระหว่างสายหุ้มด้วยกัน จึงจำเป็นต้องทำให้ Shield ห่างออกจากสายตัวนำ กรณีนี้สนามไฟฟ้าจะไม่ถูกควบคุมด้วย Shield อีกต่อไป (เฉพาะช่วงที่ปก Shield ออก) สนามไฟฟ้าจะเกิดเบี่ยงเบนอย่างกะทันหันตามที่แสดงในรูปที่ 2.18 ผลของสนามไฟฟ้าเบี่ยงเบนจะมีจุดซึ่งมีสนามไฟฟ้าหนาแน่นและตรงจุดนี้เองจะทำให้ค่าของ Dielectric strength ลดลง จะเป็นผลให้ฉนวนไฟฟ้าตรงจุดนั้นชำรุดได้ง่าย ดังแสดงในรูปที่ 2.19

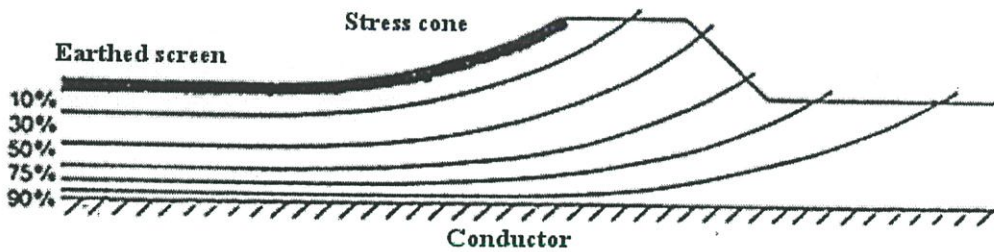


รูปที่ 2.18 Potential Field at a Screen Termination

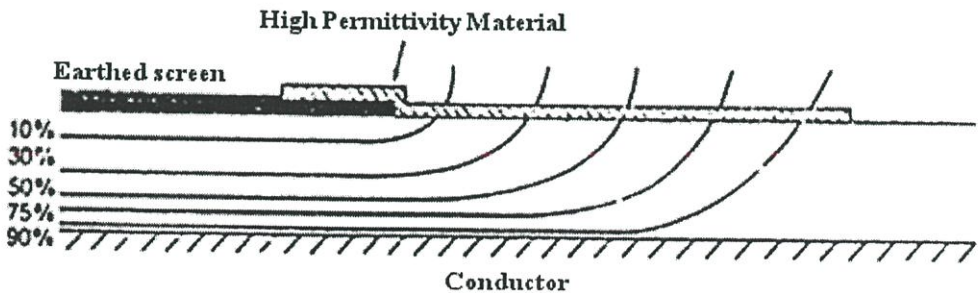


รูปที่ 2.19 เปรียบเทียบการมี Stress cone กับไม่มี Stress cone

ผลของการที่สนามไฟฟ้าเบี่ยงเบนนี้สามารถแก้ไขได้โดยการทำ Stress cone แสดงดังรูปที่ 2.20 หรืออาจใช้ High Permittivity Material ทำหน้าที่แทนก็ได้ แสดงดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.20 การกระจายสนามไฟฟ้าเมื่อใช้ Stress cone



รูปที่ 2.21 การกระจายสนามไฟฟ้าเมื่อใช้ High Permittivity Material

บทที่ 3

การออกแบบสร้างขั้วต่อสายเคเบิลใต้ดินแรงดันสูง

สำหรับทดสอบหาคิศจาร้จบางส่วน

3.1 บทนำ

วิทยานิพนธ์ในบทนี้จะกล่าวถึง การออกแบบสร้างขั้วต่อสายเคเบิลใต้ดินแรงดันสูงสำหรับทดสอบหาคิศจาร้จบางส่วนในสายเคเบิลใต้ดินแรงดันสูง พิกัด 12/20 (24) กิโลโวลต์ ขนาด 240 ตารางมิลลิเมตร โดยหลักการออกแบบขั้วต่อสายเคเบิล ประกอบด้วย การออกแบบขั้วต่อปลายสาย การออกแบบหาระยะการปกอสายเคเบิล การจำลองการกระจายสนามไฟฟ้าในขั้วต่อสายเคเบิล และการออกแบบขั้วต่อสายแบบ Stress cone

3.2 การออกแบบขั้วต่อสายเคเบิลใต้ดินแรงดันสูงสำหรับทดสอบหาคิศจาร้จบางส่วน

ขั้วต่อสายเคเบิลมีความจำเป็นสำหรับการทดสอบคิศจาร้จบางส่วนในสายเคเบิลเป็นอย่างมาก เนื่องจากขั้วต่อสายเคเบิลจะช่วยในการควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณปลายสายเคเบิล ป้องกันการเกิดการวาวไฟตามผิวฉนวน และป้องกันการเกิดเบรกควาน์ของฉนวนในการทดสอบ

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า ในการออกแบบเส้นผ่านศูนย์กลางของขั้วต่อสายเคเบิลจะพิจารณาที่แรงดันเบรกควาน์ของฉนวนที่นำมาควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้าที่ปลายสายเคเบิล [3-6] หรือพยายามทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนแต่ละชั้นมีค่าใกล้เคียงกัน ทำการออกแบบโดยการเลือกใช้ค่า Safety factor สูงๆ มาช่วยในการออกแบบเพื่อป้องกันการเบรกควาน์ของฉนวนขณะทำการทดสอบ [7-8] ซึ่งทำให้ขั้วต่อสายมีขนาดใหญ่และมีขนาดยาว ส่งผลทำให้ต้องใช้ความยาวในการปกอสายมาก ซึ่งเป็นการสิ้นเปลืองสายเคเบิลในการทดสอบ สิ้นเปลืองฉนวนที่นำมาควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้า ใช้พื้นที่ในการทดสอบมาก ไม่สะดวกในการใช้งาน และมีราคาสูง

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ พัฒนาการออกแบบและสร้างขั้วต่อสายสำหรับทดสอบหาค่าคิศจาร้จบางส่วนในสายเคเบิล สำหรับสายเคเบิลใต้ดินแรงดันสูงฉนวน XLPE พิกัด 12/20(24) kV 240 sq.mm. โดยใช้ Stress cone ซึ่งใช้วิธีการควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้าแบบ capacitive stress control เพื่อต้องการอำนวยความสะดวกในการใช้งาน ลดระยะเวลาในการปกอสายเคเบิล ลดความสูญเสียสายเคเบิลจากการปกอสาย ไม่ต้องใช้ฉนวนน้ำมันหม้อแปลงเพื่อควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้า ซึ่งฉนวนน้ำมันหม้อแปลงเวลาทดสอบจะต้องมีการระมัดระวังเรื่องฝุ่นละออง และยังส่งผลทำให้อุปกรณ์หรือขั้วต่อสายเปื้อน สกปรกได้ง่าย การออกแบบขั้วต่อสายแบบ Stress cone

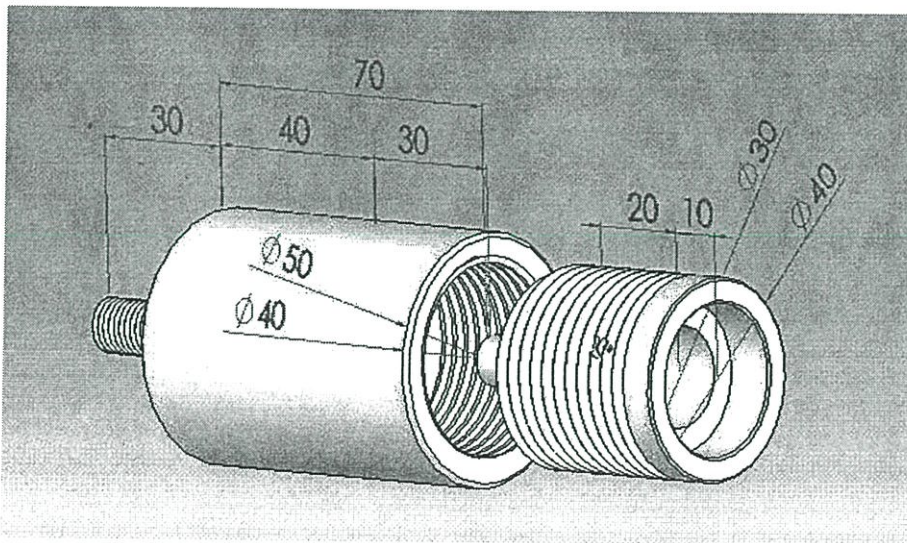
มีต้นทุนการสร้างที่ต่ำลง และสามารถนำไปทดสอบในสถานที่ติดตั้งได้ในอนาคต การออกแบบ ขั้วต่อสายเคเบิล แบ่งออกเป็น 4 ส่วน ดังนี้

1. การออกแบบขั้วต่อปลายสาย
2. การออกแบบการหาระยะการปกสายเคเบิล
3. การจำลองการกระจายสนามไฟฟ้า
4. การออกแบบ Stress cone

3.2.1 การออกแบบขั้วต่อปลายสาย

การออกแบบขั้วต่อปลายสาย จะพิจารณาจากขนาดของตัวนำสายเคเบิลและความหนาของฉนวนสายเคเบิล โดยอ้างอิงขนาดตามมาตรฐาน IEC 60502-2 [19] สายเคเบิลได้ดินแรงดันสูงฉนวน XLPE พิกัด 12/20 (24) kV ขนาด 240 sq.mm. มีเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำสายเคเบิล 17.5 mm. และ ฉนวน XLPE มีความหนา 5.5 mm. ในการออกแบบขั้วต่อปลายสายแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ การออกแบบโดยใช้หลักการทรงกระบอกซ้อนกันแกนร่วม และหลักการทรงกลม

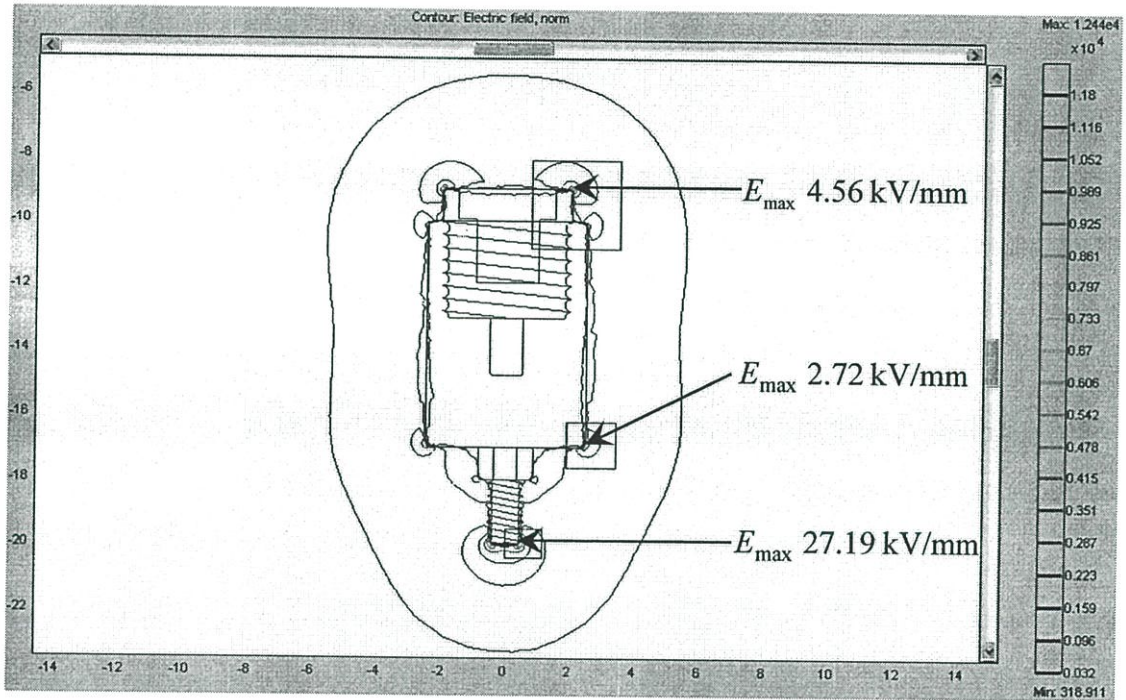
การออกแบบขั้วต่อปลายสายแบบทรงกระบอก ออกแบบโดยใช้ทองแดงถึงขั้นรูป เนื่องจากเป็นวัสดุชนิดเดียวกับตัวนำไฟฟ้าของสายเคเบิลที่ใช้ในการออกแบบและมีความสามารถนำกระแสไฟฟ้าได้ดี แสดงดังรูปที่ 3.1-3.4



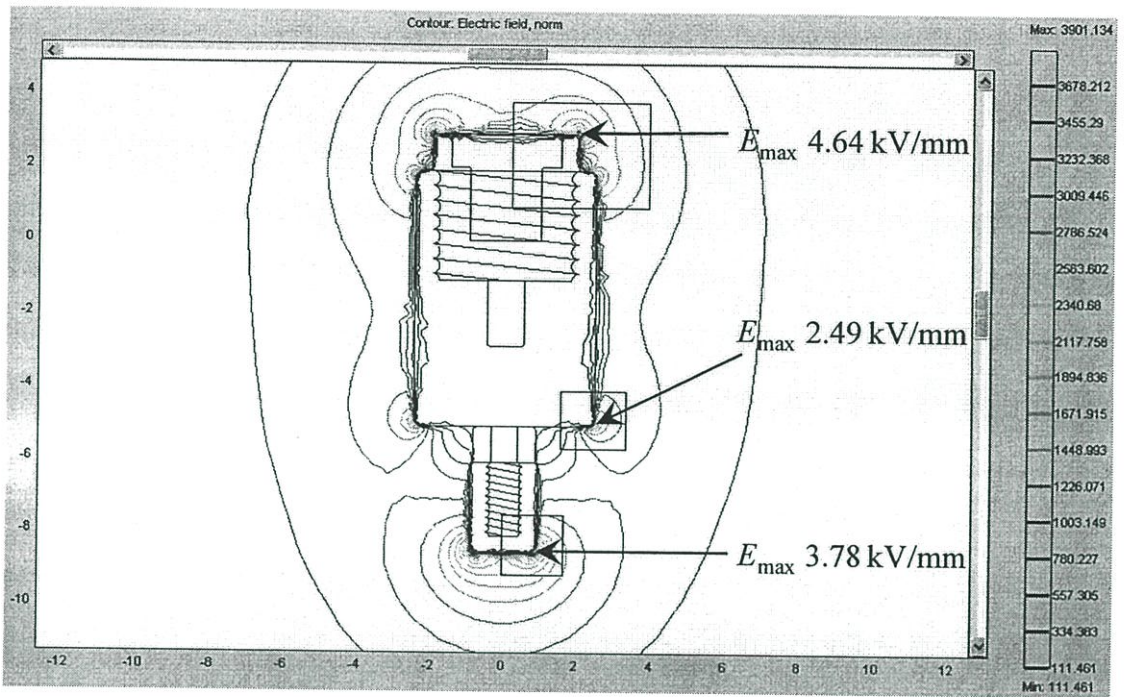
รูปที่ 3.1 ขนาดขั้วต่อปลายสายแบบทรงกระบอก

การจำลองการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าที่ขั้วต่อปลายสายที่ได้ออกแบบแสดงดังรูปที่ 3.2 จากการจำลองพบว่า มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงถึง 27.19 kV/mm ที่บริเวณขอบคมของเกลียวน็อต ส่วนบริเวณขอบโค้งของปลายสายมีค่าความเครียดสนามไฟฟ้า 4.56 kV/mm และ 2.72

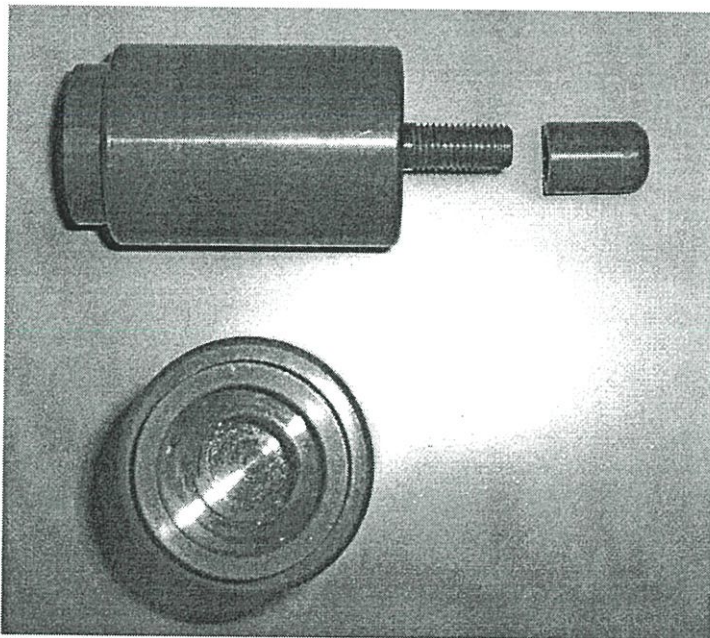
kV/mm ตามลำดับ ความเครียดสนามไฟฟ้าที่สูงมากบริเวณเกลียวน็อตอาจส่งผลให้เกิดโคโรนา
 ดิสชาร์จได้ ซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยใช้โอเล็ก โตรคซีลด์ ลดหรือควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้า ที่
 ขั้วแรงสูง (high voltage terminal) ไม่ให้เกินค่าวิกฤต เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดดิสชาร์จโคโรนา [15]
 บริเวณเกลียวน็อต ซึ่งจะทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าที่บริเวณโอเล็ก โตรคซีลด์มีค่าลดลงเหลือ 3.78
 kV/mm แสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.2 ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ปลายสาย

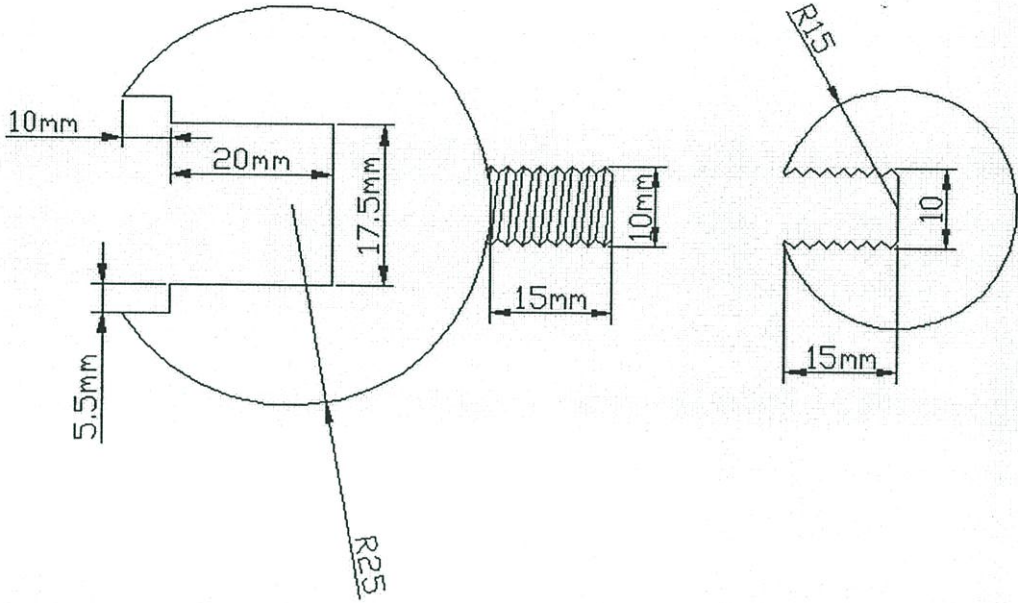


รูปที่ 3.3 ความเครียดสนามไฟฟ้าที่แก้ไขได้โดยใช้ฉนวนโพลีเอทิลีน

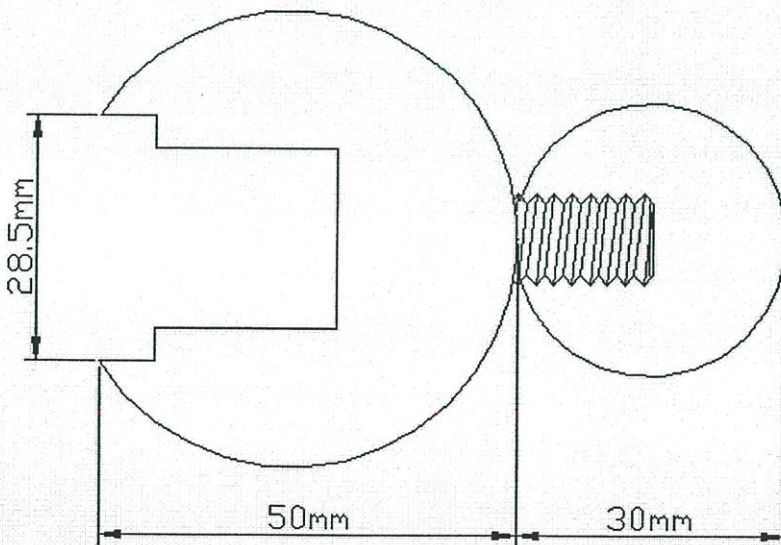


รูปที่ 3.4 ขั้วต่อปลายสายแบบทรงกระบอกสำหรับสายเคเบิลพิกัด 12/20 (24) kV 240 sq.mm.

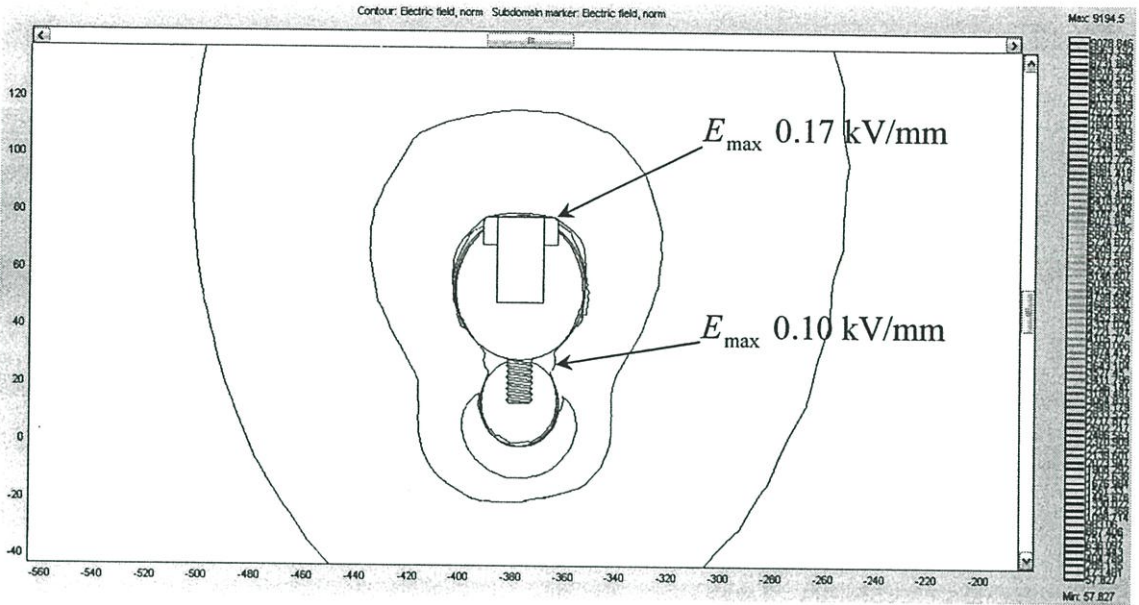
การออกแบบขั้วต่อปลายสายแบบทรงกลม เพื่อให้ความเครียดสนามไฟฟ้าที่บริเวณปลายสายเคเบิลมีค่าลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับขั้วต่อปลายสายแบบทรงกระบอก โดยที่ขั้วต่อปลายสายเคเบิลแรงดันสูง ทำหน้าที่ในการลดความเครียดสนามไฟฟ้าที่ตัวนำสายเคเบิล การออกแบบขนาดขั้วต่อปลายสายเคเบิลแรงดันสูงแบบทรงกลม แสดงดังรูปที่ 3.5 – 3.8



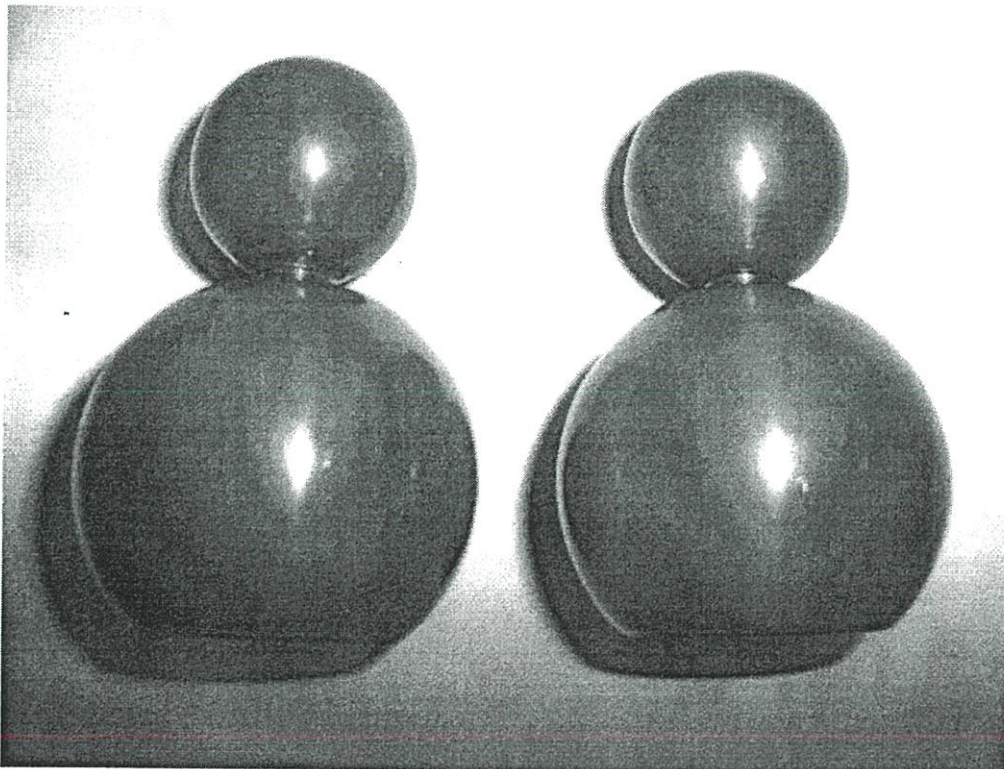
รูปที่ 3.5 แบบขั้วต่อปลายสายแบบทรงกลมสำหรับสายเคเบิลพิกัด 12/20 (24) kV 240 sq.mm.



รูปที่ 3.6 ขนาดขั้วต่อปลายสายแบบทรงกลมสำหรับสายเคเบิลพิกัด 12/20 (24) kV 240 sq.mm.



รูปที่ 3.7 ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ปลายสายแบบทรงกลม



รูปที่ 3.8 การประกอบขั้วต่อปลายสายสำหรับสายเคเบิลพิกัด 12/20 (24) kV 240 sq.mm.

3.2.2 การออกแบบหาระยะการปกสายเคเบิล

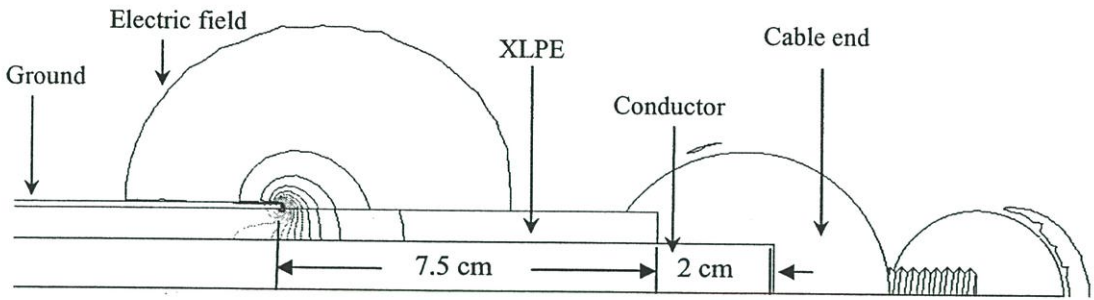
การออกแบบความยาวระยะการปกสายเคเบิล จะพิจารณาจากแรงดันทดสอบและระยะปกสายระหว่างตัวนำกับกราวด์ โดยแรงดันสูงสุดที่ใช้ทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน IEC 60502-2 [19] ส่วนระยะการปกสายหาได้จากการจำลองการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้า โดยใช้การจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์จากโปรแกรม FEMLAB [20] ระยะปกสายเคเบิลที่ได้จากการจำลองเมื่อนำมาพิจารณาร่วมกับขนาดของปลายสายที่ได้ออกแบบก็จะทราบความยาวของการปกสายเคเบิลได้

เดิมในการออกแบบจะทำการทดสอบวบไฟตามผิวนวนและใช้ค่า Safety factor สูงๆ เข้ามาช่วยในการออกแบบเพื่อป้องกันการเกิดการวบไฟตามผิวนวน ซึ่งทำให้ขั้วต่อสายมีความยาวมาก ส่งผลให้ต้องใช้ความยาวในการปกสายเคเบิลมากเช่นกัน เป็นการสิ้นเปลืองสายเคเบิลในการทดสอบ ในงานวิจัยนี้ใช้การจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณที่ปกสายเคเบิลด้วยไฟไนต์อิลิเมนต์บนโปรแกรม FEMLAB [20] โดยพิจารณาความยาวการปกสายจากความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิวนวนสายเคเบิลร่วมกับจนวนที่ใช้ในการควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้า ซึ่งจะทำให้ทราบความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิวนวนของสายเคเบิลในขณะที่ทดสอบจริง โดยสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะต้องมีค่าไม่มากเกินไปกว่าที่จนวนสายเคเบิลจะทนได้

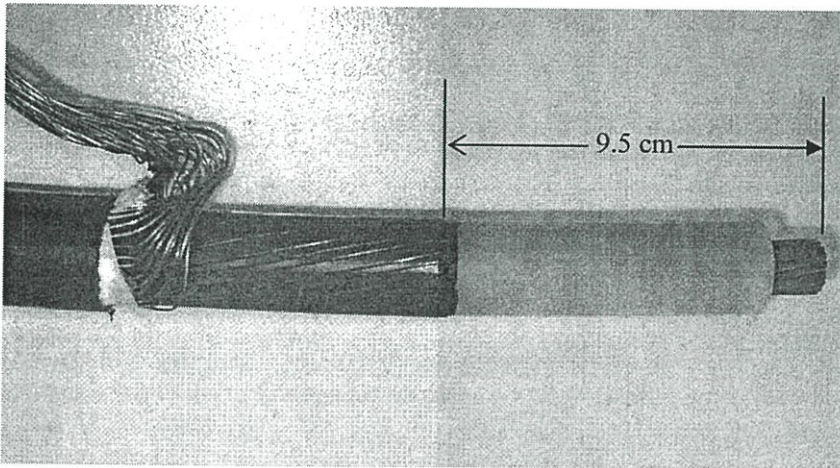
โดยแรงดันทดสอบสูงสุดตามมาตรฐาน IEC 60502-2 [19] คือ $2U_0$ สำหรับสายเคเบิลพิกัด 12/20 (24) kV แรงดันทดสอบจะเท่ากับ 24 kV โดยการจำลองการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าเพื่อหาความยาวระยะปกสายจำลองในลักษณะที่สายเคเบิลประกอบเข้ากับขั้วต่อปลายสาย ผลจากการจำลองในตารางที่ 3.1 ประกอบด้วยค่าสนามไฟฟ้าเปรียบเทียบกับระยะของการปกสาย และผลการจำลองสนามไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 3.9

ตารางที่ 3.1 ผลการจำลองสนามไฟฟ้าเปรียบเทียบกับระยะการปกสายเคเบิล

ระยะปกสายเคเบิล (mm)	ค่าสนามไฟฟ้า (kV/mm)
65	15.3
75	14.7
85	10.2
95	8.51
105	8.40
115	8.36
125	8.27



รูปที่ 3.9 ความยาวของข้อต่อสายเคเบิลจากผลการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้า



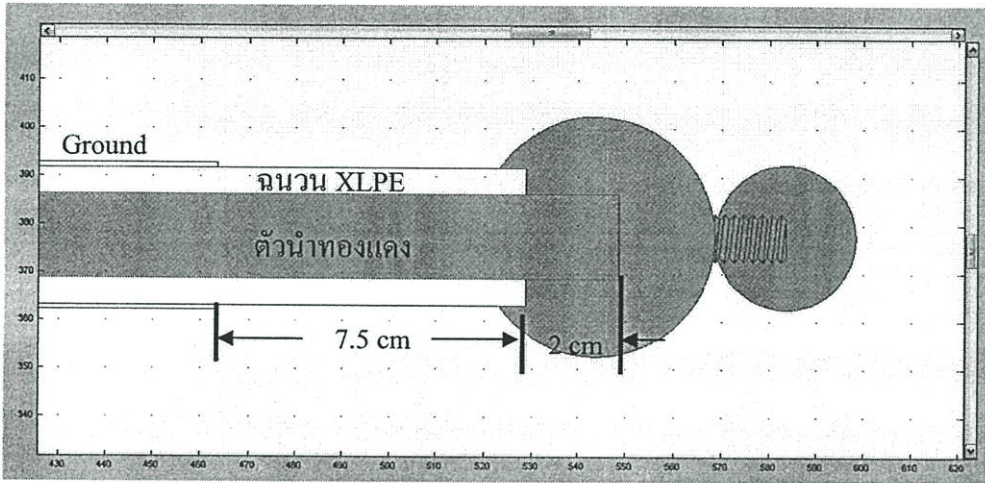
รูปที่ 3.10 ระยะความยาวของการปกสายเคเบิล

จากผลการจำลองระยะการปกสายเคเบิล เมื่อเทียบกับค่าสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้น บริเวณชั้นกึ่งตัวนำนอก ซึ่งในการเลือกใช้งานต้องคำนึงถึงความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้น และต้องเป็นระยะที่ปลอดภัยจากการทดสอบ ถ้าเกิดระยะการปกสายเคเบิลสั้นไป อาจส่งผลทำให้เกิดการเกิดวาบไฟตามผิวฉนวนได้ ในการออกแบบเลือกใช้ระยะการปกสายเคเบิลที่ระยะความยาว 9.5 เซนติเมตร

3.2.3 การจำลองการกระจายสนามไฟฟ้า

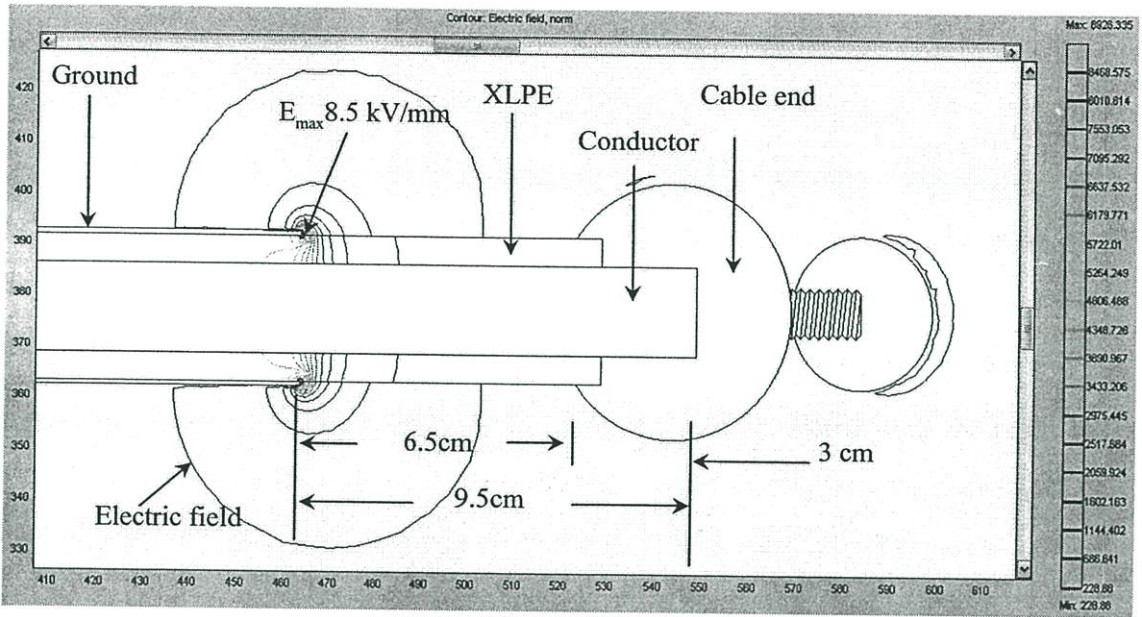
การจำลองการกระจายสนามไฟฟ้า พิจารณาจากแรงดันทดสอบ และระยะห่างระหว่างตัวนำกับกราวด์ โดยแรงดันสูงสุดที่ใช้ทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60502-2 [19] ในระบบสาย 12 kV คือ $2U_0$ เท่ากับ 24 kV ส่วนระยะการปกสาย ได้จากการจำลองการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ช่วยในการวิเคราะห์การกระจายความเครียดสนามไฟฟ้า โดยใช้โปรแกรม FEMLAB 3.1 [20] จากการจำลองได้ระยะการปกชั้นกึ่งตัวนำนอก

ของสายเคเบิลเท่ากับ 7.5 เซนติเมตร โดยพิจารณาความเครียดสนามไฟฟ้าระหว่างปลายสาย และ กราวด์ ที่จะทำให้นวนเกิดการเบรกดาวน์ [18] เมื่อพิจารณาร่วมกับขนาดของปลายสาย ดังนั้น ระยะการปกสายทั้งหมด เท่ากับ 9.5 เซนติเมตร ดังรูปที่ 3.11

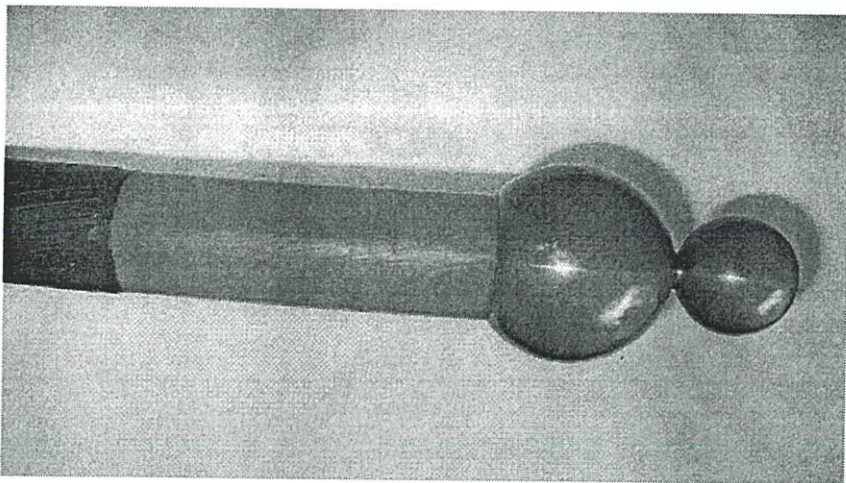


รูปที่ 3.11 ระยะการปกสาย

การออกแบบขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงได้นำไฟไนต์อิเลเมนต์มาช่วยในการวิเคราะห์การกระจายความเครียดสนามไฟฟ้า ซึ่งวิเคราะห์แบบ 2 มิติ และไม่คำนึงถึงผลของประจุตกค้าง (ที่รอยต่อของชั้นฉนวนทั้งสองไม่มีประจุอิสระ กล่าวคือสภาพนำทางไฟฟ้าของฉนวนเป็นศูนย์ หรือเป็นแรงดันป้อนกระแสสลับ [14-15] โดยใช้โปรแกรม FEMLAB [20] การจำลองการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าจะทำการจำลองการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าเพื่อช่วยในการออกแบบทั้งการหาค่าความเครียดสนามไฟฟ้าในเนื้อฉนวน การออกแบบรูปลักษณะของปลายสายที่เหมาะสม รวมไปถึงการออกแบบความยาวของระยะการปกสายเคเบิล ซึ่งการจำลองการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าในส่วนต่างๆ ของขั้วต่อสายที่ได้ออกแบบใช้แรงดันทดสอบสูงสุดตามมาตรฐาน IEC 60502-2 คือ 24 kV ในการจำลองจะต้องกำหนดค่าเปอร์มิตติวิตี (ϵ_r) ของสารฉนวน [18] ซึ่งฉนวนของสายเคเบิลที่เลือกใช้เป็นฉนวน XLPE มีค่า ($\epsilon_r = 2.3$) และทดสอบที่ระดับแรงดันตามมาตรฐานที่ 24 kV ผลการจำลองการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าภายในขั้วต่อสายเคเบิล แสดงดังรูปที่ 3.12 เป็นการจำลองการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าร่วมกับสถานะภายนอกของขั้วต่อสายเคเบิล คือ ฉนวนอากาศ



รูปที่ 3.12 ผลการจำลองสนามไฟฟ้าบริเวณปลายสายเคเบิลไม่มี Stress cone



รูปที่ 3.13 การเข้าหัวของขั้วต่อสายที่ปลายสายเคเบิลไม่มี Stress cone

3.2.4 การออกแบบ Stress cone

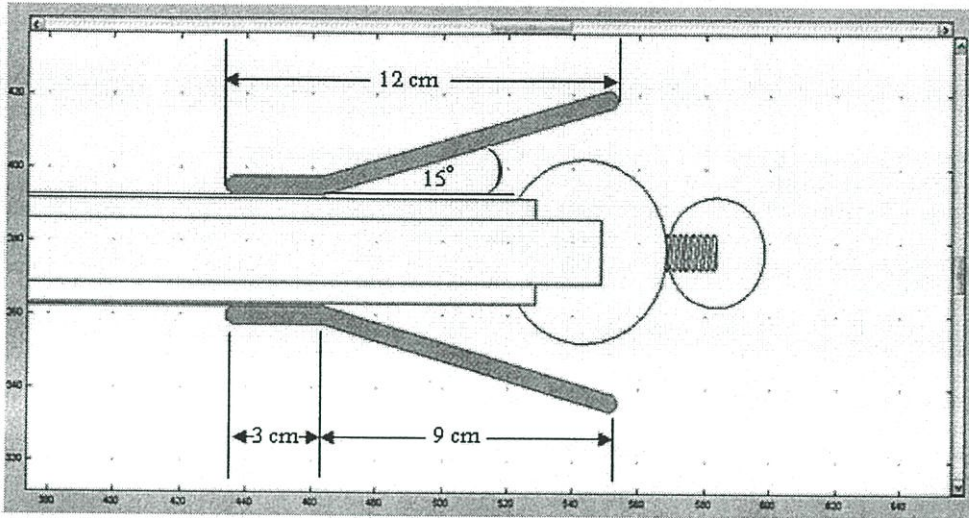
ในการทดสอบฉนวนของสายเคเบิล จะทำการป้อนแรงดันทดสอบระหว่างตัวนำและชั้นกึ่งตัวนำนอก โดยป้อนแรงดันสูงเข้าที่ตัวนำและชั้นกึ่งตัวนำนอกจะเป็นกราวด์ ในการทดสอบสายเคเบิลที่ไม่มีขั้วต่อพิเศษ ถ้าทำการทดสอบดังกล่าวจะเกิดการวาวไฟตามผิวขึ้น เนื่องจากระยะห่างระหว่างแรงดันสูงกับกราวด์น้อยมาก ปัญหาที่เกิดขึ้นนี้สามารถแก้ไขได้ โดยการเพิ่มระยะห่างระหว่างแรงดันสูงกับกราวด์ โดยการตัดชั้นกึ่งตัวนำนอกบางส่วนออก แต่ปัญหาที่จะเกิดตามมาคือ สนามไฟฟ้าที่ขอบของชั้นกึ่งตัวนำนอกจะเกิดความไม่สม่ำเสมอสูง ซึ่งจะนำไปสู่การ

เกิดเบรกควาน์ในฉนวนได้ จึงจำเป็นต้องควบคุมสนามไฟฟ้าในบริเวณนั้น ให้เกิดความไม่สม่ำเสมอที่น้อยที่สุด

การจำลองหาขนาดของ Stress cone จะต้องกำหนดค่าเปอร์มิตติวิตี (ϵ_r) ของสารฉนวน [18] ซึ่งฉนวนที่นำมาควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้าเลือกใช้ PE ซึ่งเป็นชนิดซูบเปอร์ลีน โพลีน มีค่า ($\epsilon_r = 2.25$) และทดสอบที่ระดับแรงดันตามมาตรฐานที่ 24 kV จากผลการจำลองระยะของการปกสายที่เข้าร่วมกับขั้วต่อปลายสายที่ออกแบบ จะเห็นได้ว่ามีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดเกิดขึ้นที่บริเวณของชั้นกึ่งตัวนำนอก เมื่อพิจารณาจากการใช้ Stress cone เพื่อช่วยในการลดความเครียดสนามไฟฟ้าที่บริเวณของชั้นกึ่งตัวนำนอก ซึ่งในการออกแบบใช้ Stress cone เพื่อลดความเครียดสนามไฟฟ้านั้น จะต้องมีการพิจารณาถึงขนาด และความยาว รวมถึงขนาดมุมของ Stress cone ด้วย จากผลการออกแบบ Stress cone ทำให้ขนาดของ Stress cone มีความยาว 12 เซนติเมตร มีความหนา 5 มิลลิเมตร และมีมุมขนาด 15 องศา ซึ่งขนาดความยาวที่ได้จากการจำลองจะต้องพิจารณาถึงความเครียดสนามไฟฟ้าที่ขั้วต่อปลายสาย ส่วนความหนาของ Stress cone ไม่มีผลต่อความเครียดสนามไฟฟ้า และขนาดของมุมที่ได้จากการจำลอง จะพบว่า ขนาดมุมที่กว้างมากจะส่งผลทำให้การควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้าได้ไม่ดีพอ จึงส่งผลทำให้การจำลองต้องทำให้มุมมีขนาดที่แคบลงถึงจะทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นลดลงได้ การจำลองมุมของ Stress cone ต้องอาศัยการปรับค่ามุมที่องศาต่างๆ เทียบกับค่าสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้น เพื่อให้ได้ค่าสนามไฟฟ้าลดลง ขนาดของมุมและสนามไฟฟ้าแสดงดังตารางที่ 3.2

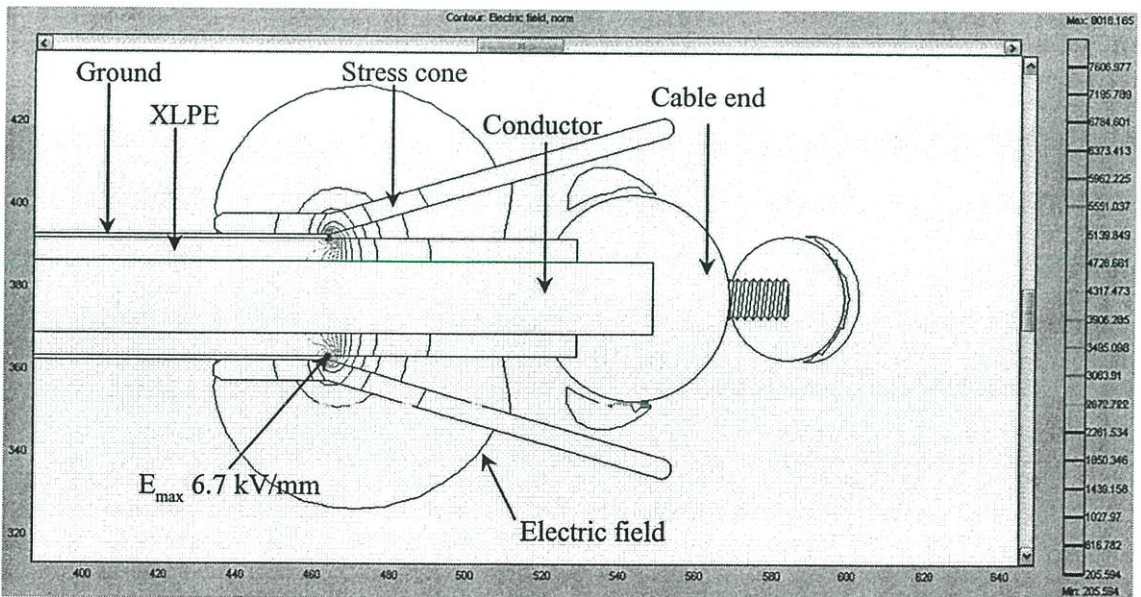
ตารางที่ 3.2 ผลการจำลองสนามไฟฟ้ากับการปรับมุมที่องศาต่างๆ

มุม (องศา)	ค่าสนามไฟฟ้า (kV/mm)
5	10.4
10	8.15
15	6.71
20	9.5
30	14.7
60	16.36

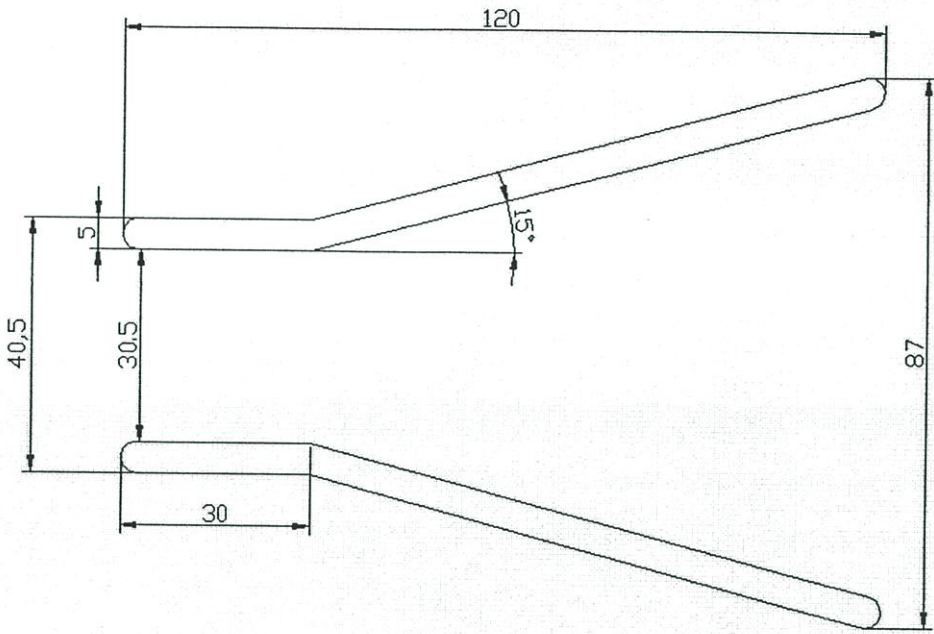


รูปที่ 3.14 การประกอบขั้วต่อปลายสายและ Stress cone สำหรับการจำลอง

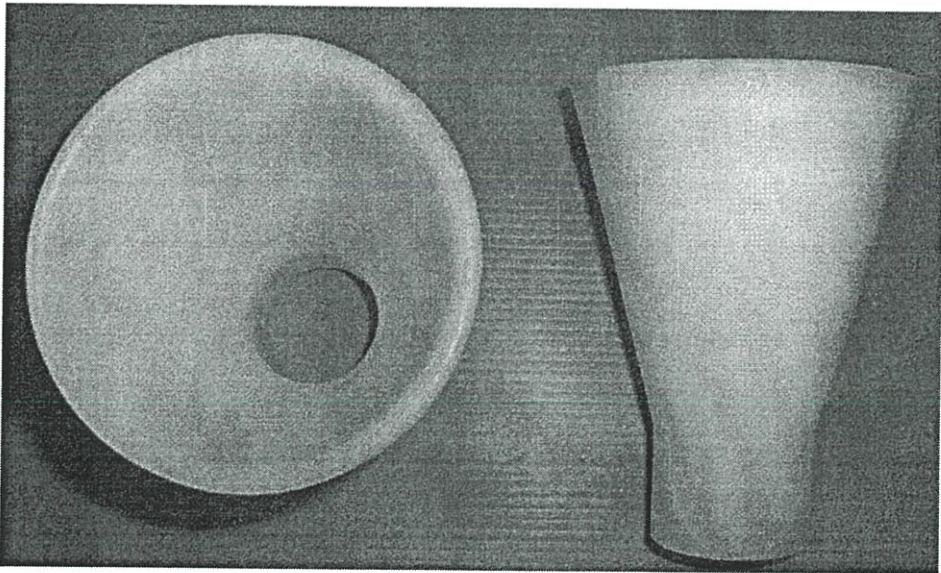
ผลการจำลองการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าเมื่อทำการใส่ Stress cone เพื่อควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้าในส่วนต่างๆ ของขั้วต่อสายเคเบิล แสดงดังรูปที่ 3.15 และขนาดของ Stress cone ที่ได้จากการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.15 ผลการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณปลายสายเคเบิลเมื่อใส่ Stress cone



รูปที่ 3.16 ขนาดของ Stress cone ที่ได้จากการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้า



รูปที่ 3.17 Stress cone ที่กลิ้งขึ้นรูปโดยใช้ซูเปอร์ลีนไนลอน

จากผลการจำลองการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้า ในขณะที่ยังไม่มี Stress cone ดังรูปที่ 3.12 เมื่อทำการจำลองโดยการนำ Stress cone มาควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 3.15 พบว่าค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด (E_{max}) เท่ากับ 8.5 kV/mm. ที่บริเวณปลายของชั้นกึ่งตัวนำนอก (Insulation shield) ที่ปกกออก ซึ่งเมื่อใส่ Stress cone ทำให้ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นลดลง เท่ากับ 6.7 kV/mm.

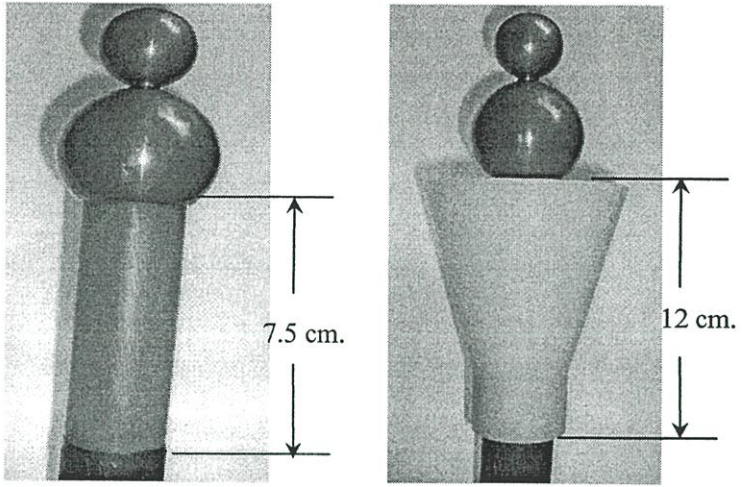
ตารางที่ 3.3 เปรียบเทียบการออกแบบที่ใช้หลักการเดิม หลักการทฤษฎีมิติที่เหมาะสมของทรงกระบอกซ้อนกันและหลักการที่นำเสนอ

การออกแบบ	หลักการเดิม	หลักการทฤษฎีมิติที่เหมาะสม	หลักการที่นำเสนอ
พื้นที่หน้าตัดสายเคเบิล(sq.mm)	240	240	240
รัศมีของคาน้ำสายเคเบิล(mm)	8.75	8.75	8.75
ความยาวขั้วต่อสาย (cm.)	100	20	12
ค่าเปอร์เซ็นต์ความเครียดของฉนวน	2.2	2.2	2.25
วัสดุฉนวน	น้ำมันหม้อแปลง	น้ำมันหม้อแปลง	ซูเปอร์ลินไนลอน
ลักษณะของการนำไปใช้งาน	ใช้ระยะการปกสายยาว และมีขนาดใหญ่	ต้องระวังฝุ่นตกลงในน้ำมัน ทำให้อุปกรณ์สกปรก	สะดวก ใช้งานง่าย ถอดเปลี่ยนได้ง่ายไม่สกปรก

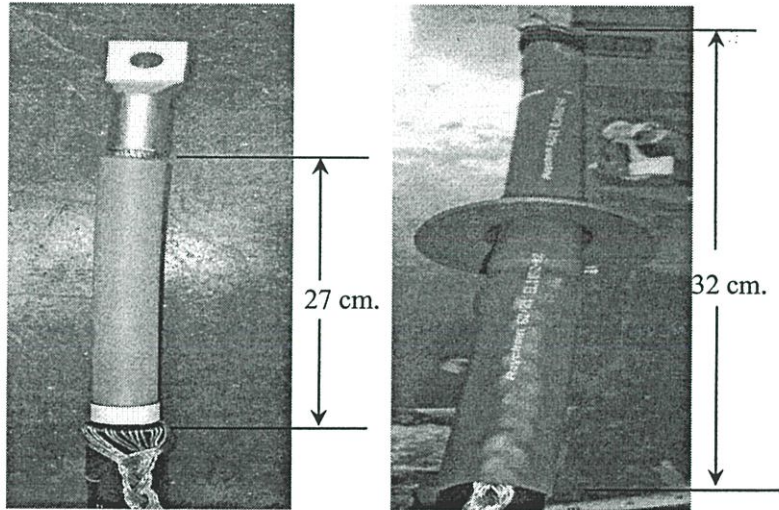
เปรียบเทียบการออกแบบความยาวของขั้วต่อสายเคเบิล จากเดิมในการออกแบบ จะทำการทดสอบวาวไฟตามฉนวนและใช้ค่า Safety factor สูงๆ เข้ามาช่วยในการออกแบบเพื่อป้องกันการเกิดการวาวไฟตามฉนวน ซึ่งทำให้ขั้วต่อสายมีความยาวมาก ส่งผลให้ต้องใช้ความยาวในการปกสายเหมือนกัน สิ้นเปลืองสายเคเบิลในการทดสอบ งานวิจัยนี้จะทำการจำลองการวาวไฟตามฉนวน โดยจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟในออลิเมนต์จากโปรแกรม FEMLAB พิจารณาความยาวจากการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าที่ฉนวนสายเคเบิลร่วมกับฉนวนที่ใช้ในการควบคุมการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้า โดยเลือกใช้ซูเปอร์ลินไนลอนกลึงขึ้นรูปเป็นขั้วต่อสายแบบ Stress cone เนื่องจากซูเปอร์ลินไนลอนเป็นวัสดุที่แข็ง เหนียว สามารถกลึงขึ้นรูปได้ง่าย

3.3 การออกแบบความยาวของขั้วต่อสายเคเบิลแบบ Stress cone เปรียบเทียบกับขั้วต่อสายแบบ Heat shrinkable cable terminations

พิจารณาการออกแบบด้วยหลักการที่นำเสนอ คือการใช้ Stress cone ช่วยในการควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้าที่บริเวณชั้นกึ่งตัวนำนอกที่ได้ทำการปกออกเพื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างตัวนำกับกราวด์ เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการเบรกดาวน์ในการทดสอบขั้วต่อสายเคเบิล จากผลการออกแบบ Stress cone แสดงดังรูปที่ 3.18 ที่ได้จะต้องมีการเปรียบเทียบผลการออกแบบกับขั้วต่อสายเคเบิลที่ใช้งานในภาคอุตสาหกรรม โดยจะใช้ขั้วต่อสายแบบที่ใช้ความร้อนในการเข้าหัวต่อสาย หรือเรียกว่า Heat shrinkable cable terminations ดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.18 ขั้วต่อสายแบบ Stress cone



รูปที่ 3.19 ขั้วต่อสาย Heat shrinkable cable terminations

ตารางที่ 3.4 เปรียบเทียบการออกแบบขั้วต่อสายแบบ Stress cone กับขั้วต่อสายที่ใช้งานใน
ภาคอุตสาหกรรม (Heat shrinkable cable terminations)

การออกแบบ	ขั้วต่อสายแบบ Heat shrinkable cable terminations	ขั้วต่อสายแบบ Stress cone
พื้นที่หน้าตัดสายเคเบิล(sq.mm)	240	240
รัศมีของตัวนำสายเคเบิล(mm)	8.75	8.75
ความยาวขั้วต่อสาย (cm.)	32	12
ค่าเปอร์เซ็นต์ตัวของฉนวน	2.2-3.2	2.25
ฉนวนของขั้วต่อสายเคเบิล	ยาง	ซูเปอร์ลีนไนลอน
ลักษณะของการนำไปใช้งาน	ใช้ระยะการปกสายยาว ความยุ่งยาก ในการประกอบ ต้องระวังความสะอาด	สะดวก และนำไปใช้งานง่าย ถอดเปลี่ยนได้ง่าย ไม่ สกปรก

3.4 สรุปผลการออกแบบ

ขั้วต่อสายสำหรับทดสอบหาคิซซาร์จบางส่วนในสายเคเบิลได้ดินแรงดันสูงฉนวน XLPE พิกัด 12/20 (24) kV ขนาด 240 sq.mm. ที่ออกแบบโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ในการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้าทำให้ขั้วต่อสายที่ใช้ Stress cone ในการควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้ามีขนาดความยาว 12 เซนติเมตร ซึ่งไม่ต้องใช้ฉนวนน้ำมันหม้อแปลงสำหรับควบคุมการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณที่ทำการปกสาย โดยใช้ระยะปกสายเคเบิลสำหรับการทดสอบเพียง 9.5 เซนติเมตร

ผลจากการออกแบบโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เมื่อเปรียบเทียบกับขั้วต่อสายเคเบิลที่ออกแบบโดยใช้ฉนวนน้ำมันหม้อแปลงสำหรับควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้า ออกแบบโดยใช้เทคนิคเดิม [3-6] พบว่า สามารถลดขนาดความยาวของขั้วต่อสายเคเบิลลงได้ การใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ช่วยในการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้าในการออกแบบทำให้ความยาวของขั้วต่อสายเคเบิลลดลง 88 เปอร์เซ็นต์ เป็นการลดความสิ้นเปลืองสายเคเบิลจากการทดสอบ และเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการออกแบบด้วยหลักการทฤษฎีมิติที่เหมาะสม [9-11] ความยาวของขั้วต่อสายลดลง 40 เปอร์เซ็นต์

บทที่ 4

การทดสอบและการวิเคราะห์ผลการทดสอบ

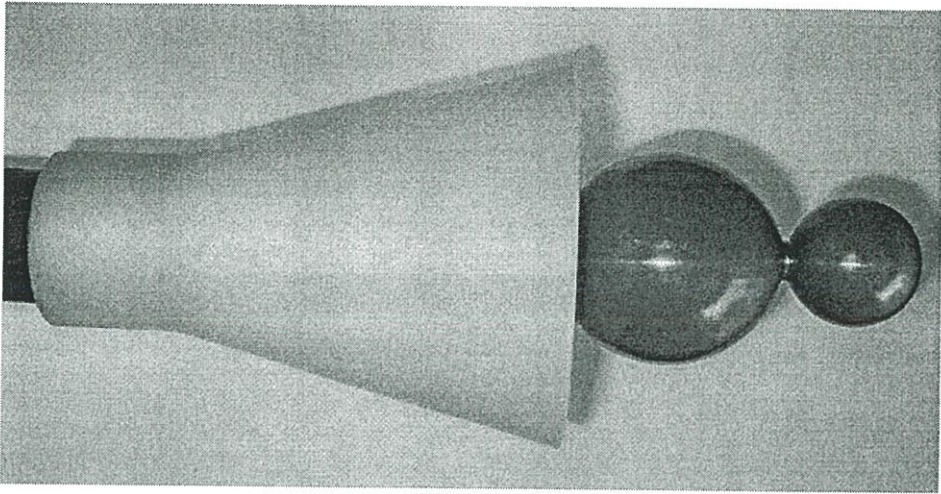
4.1 บทนำ

วิทยานิพนธ์ในบทนี้ต้องการที่จะนำเสนอกระบวนการทดสอบหาค่าดิซชาร์จบางส่วนในสายเคเบิล โดยใช้ขั้วต่อสายที่ได้จากการออกแบบและสร้างขึ้น ใช้ในการทดสอบสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวน XLPE ที่ระดับแรงดันใช้งาน 24 kV ขนาด 240 sq.mm. โดยจะทำการวิเคราะห์และทดสอบหาค่าดิซชาร์จบางส่วน (Partial Discharge) ในสายเคเบิล โดยขั้นตอนการทดสอบแบ่งเป็น 4 ขั้นตอน คือ การทดสอบขั้วต่อสายเคเบิลที่ออกแบบโดยใช้ Stress cone ในห้องปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง การทดสอบเปรียบเทียบระหว่างขั้วต่อสายที่นำเสนอกับขั้วต่อสายที่ออกแบบด้วยหลักการเดิม การทดสอบเปรียบเทียบระหว่างขั้วต่อสายที่นำเสนอกับขั้วต่อสายที่ออกแบบด้วยหลักการทฤษฎีมิติที่เหมาะสม และการทดสอบเปรียบเทียบระหว่างขั้วต่อสายที่นำเสนอกับขั้วต่อสายที่ใช้ในภาคอุตสาหกรรม

4.2 ขั้นตอนการทดสอบหาค่าดิซชาร์จบางส่วน

การทดสอบหาค่าดิซชาร์จบางส่วนของขั้วต่อสายเคเบิล เพื่อการวิเคราะห์ขั้วต่อสายเคเบิลที่ออกแบบโดยไม่ใช้ฉนวนน้ำมันในการควบคุมการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้า ซึ่งในงานวิจัยในวิทยานิพนธ์นี้ได้กำหนดขอบเขตของค่าดิซชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้น โดยอ้างอิงข้อมูลจากขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมและห้องปฏิบัติการทางวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง ผู้วิจัยจึงขออ้างอิงจากข้อมูลการทดสอบมาตรฐานค่าดิซชาร์จบางส่วน ตามมาตรฐาน IEC 60270 [21]

การออกแบบขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูง จะทำการสร้างขั้วต่อสายขึ้นมาโดยใช้การจำลองการกระจายของความเครียดสนามไฟฟ้าด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และเลือกใช้ซูเปอร์ลีนไพลอนกลิ้งขึ้นรูปเป็น Stress cone ที่ใช้ในการควบคุมการกระจายของสนามไฟฟ้า การออกแบบขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงจะทำการสร้างขั้วต่อสายขึ้นมาใช้ในการทดสอบจะประกอบไปด้วยขั้วต่อสายเคเบิล 2 หัว ที่ใช้ในการทดสอบที่ต้นสายเคเบิลและปลายสายเคเบิล โดยลักษณะของขั้วต่อสายแบบ Stress cone ที่ใช้ในการทดสอบ แสดงดังรูปที่ 4.1

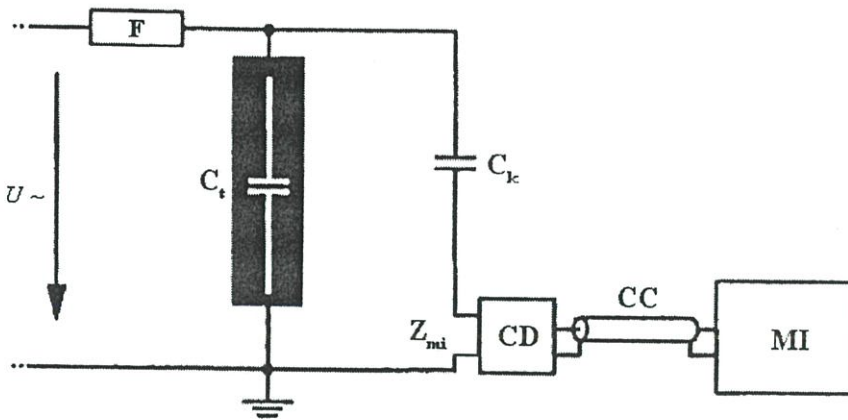


รูปที่ 4.1 การประกอบหัวต่อสายแบบ Stress cone กับหัวต่อปลายสาย

ผลของดิสชาร์จบางส่วน คือ ดิสชาร์จบางส่วนแต่ละครั้งจะมีพลังงานถ่ายเทให้กับพื้นผิวฉนวน ในลักษณะชนกระแทก เป็นเหตุให้เกิดความร้อนเพิ่มขึ้นเฉพาะจุด เป็นผลให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมี ทำให้ฉนวนเสียเป็นจุดๆ และเกิดผิพร่องขยายตัวมากขึ้น ซึ่งอาจนำไปสู่การเบรกดาวน์อย่างสมบูรณ์ได้ ทำให้ฉนวนเสียหาย อายุการใช้งานของฉนวนจะสั้นลง [14-15] จึงจำเป็นต้องมีการทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิลก่อนนำไปใช้งาน โดยหัวข้อนี้จะอธิบายถึง วงจรที่ใช้ในการทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วน และระดับแรงดันที่ใช้ในการทดสอบ

4.2.1 วงจรทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วน

การทดสอบจะใช้วงจรทดสอบตรวจจับ PD วิธีตรง (Straight detection circuit) ตามมาตรฐาน IEC 60270 [21] แบบ CD ต่ออนุกรมกับ C_k เป็นแบบที่ใช้กันมากในทางปฏิบัติ เนื่องจากไม่เสี่ยงต่อการเกิดเบรกดาวน์ เพราะทราบค่าแรงดันที่กำหนดของ C_k ซึ่งเป็นการป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดแก่เครื่องวัด PD วงจรทดสอบตรวจจับ PD วิธีตรง แบบ CD ต่ออนุกรมกับ C_k แสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 วงจรทดสอบตรวจจับ PD แบบ CD ต่ออนุกรมกับ C_k ตามมาตรฐาน IEC 60270 [21]

โดยที่

$U \sim$	คือ	แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูง
F	คือ	ตัวกรอง
C_t	คือ	ค่าเก็บประจุวัสดุทดสอบ
C_k	คือ	ค่าเก็บประจุคาบเกี่ยว
Z_{mi}	คือ	อิมพีแดนซ์ป้อนเข้าของระบบ
CD	คือ	อุปกรณ์คาบเกี่ยว
CC	คือ	เคเบิลวัด

หลักการทํางานและคุณสมบัติที่สำคัญของอุปกรณ์ในวงจรทดสอบ

1) แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูง U ใช้ในการจ่ายแรงดันให้วงจรทดสอบและมีพิกัดกำลังไฟฟ้าเพียงพอที่จะจ่ายโหลดได้ เช่น หม้อแปลงทดสอบ ซึ่งควรเป็นหม้อแปลงทดสอบที่ปลอด PD ที่แรงดันทดสอบ เป็นต้น

2) ตัวกรองสัญญาณ F ใช้ในการกรองสัญญาณรบกวนจากแหล่งจ่าย เช่น ฮาร์มอนิกส์ และ PD ที่เกิดภายในหม้อแปลงทดสอบที่ใช้เป็นแหล่งจ่าย และหน้าที่สำคัญอีกประการหนึ่งคือ ป้องกัน PD จากวงจรทดสอบไหลย้อนลงกราวด์ผ่านทางแหล่งจ่าย ตัวกรองดังกล่าวต้องทนแรงดันทดสอบได้และปราศจาก PD ที่แรงดันทดสอบ ตัวอย่างตัวกรอง เช่น ตัวเหนี่ยวนำ (High voltage inductor) หรือตัวกรองชนิดผ่านแถบความถี่ต่ำ (High voltage low-pass filter) เป็นต้น ดังนั้นในกรณีที่ใช้หม้อแปลงทดสอบที่ปราศจาก PD ที่แรงดันทดสอบเป็นแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าแรงสูง อาจจะไม่จำเป็นต้องใช้ตัวกรองสัญญาณอีก เนื่องจากอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงทดสอบมีคุณสมบัติเป็นตัวเหนี่ยวนำอยู่แล้ว

3) ตัวเก็บประจุคัปปลิง C_k ใช้เป็นส่วนเชื่อมต่อหรือคัปปลิงสัญญาณความถี่สูงให้ครบวงจรระหว่าง C_i , C_k และ CD ซึ่งมีอิมพีแดนซ์ต่ำสำหรับ PD ดังนั้นตัวเก็บประจุคัปปลิงต้องเป็นชนิดที่มีค่าความเหนี่ยวนำภายในต่ำ ปราศจาก PD ที่แรงดันทดสอบ

4) อุปกรณ์รับสัญญาณ CD และเครื่องมือวัด MI อุปกรณ์ทั้งสองส่วนนี้จะทำงานร่วมกันคือทำหน้าที่อินทิเกรต (Integrate) กระแสพัลส์ i_i ที่ไหลในวงจรทดสอบ เนื่องจากการเกิด PD โดยมีสายนำสัญญาณ CC เป็นสายที่เชื่อมต่อระหว่าง CD กับ MI อุปกรณ์รับสัญญาณจะทำหน้าที่สำคัญอีกประการหนึ่งคือ เป็นตัวกรองกระแสความถี่ต่ำ (50 ถึง 400 เฮิร์ตซ์) และฮาร์มอนิกส์ต่าง ๆ จากแหล่งจ่ายแรงดันทดสอบมิให้เข้าไปที่เครื่องมือวัดได้ ส่วนเครื่องมือวัด MI จะทำหน้าที่สำคัญ 3 ประการ คือ เป็นวงจรขยายสัญญาณ (Amplified) เป็นวงจรกรองสัญญาณชนิดผ่านแถบ เพื่อลดสัญญาณรบกวนความถี่ต่ำที่มาจากแหล่งจ่ายแรงดันทดสอบกับสัญญาณรบกวนความถี่สูงที่มาจากคลื่นวิทยุ และเป็นอุปกรณ์แสดงผล PD

4.2.2 แรงดันทดสอบ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการออกแบบสร้างขั้วต่อสายสำหรับทดสอบหาคิสซาร์จบางส่วนในเคเบิล พิกัด 12/20 (24) kV ขนาด 240 sq.mm. ตามมาตรฐาน IEC 60502-2 [21] โดยสายเคเบิลของ บริษัท จรุงไทยไวร์แอนด์เคเบิล จำกัด มีฉนวนเป็น XLPE และมีพิกัดระดับแรงดัน 24 kV จากมาตรฐานการวัดคิสซาร์จบางส่วน (Partial Discharge) ตามมาตรฐาน IEC 60270 กำหนดให้จ่ายแรงดันทดสอบที่ $2U_0$ คงที่เป็นเวลา 10 วินาที แล้วลดระดับแรงดันลงจนเหลือ $1.732 U_0$ แล้วทำการทดสอบหาคิสซาร์จบางส่วน ทำการคำนวณหาค่าแรงดันที่ใช้ทดสอบจะได้แรงดันทดสอบการเกิดคิสซาร์จบางส่วน คือ $1.732 U_0 = 1.732 \times 12 \text{ kV} = 20.78 \text{ kV}$ ฉะนั้นแรงดันทดสอบสำหรับสายเคเบิลพิกัด 12/20 (24) [U_0/U_m] kV คือ จ่ายแรงดันไฟฟ้า 24 kV คงที่เป็นเวลา 10 วินาที แล้วลดระดับแรงดันลงจนเหลือ 20.78 kV แล้วทำการทดสอบหาคิสซาร์จบางส่วนในสายเคเบิล

4.2.3 พิกัดกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงทดสอบ [14-15]

การทดสอบอุปกรณ์หรือวัสดุฉนวนทางด้านไฟฟ้าแรงสูง อาจถือได้ว่าอุปกรณ์หรือวัสดุฉนวนมีลักษณะเป็นตัวเก็บประจุไฟฟ้า คือ มีค่าเก็บประจุ ฉะนั้น โหลดของหม้อแปลงทดสอบจึงเป็นแบบตัวเก็บประจุ กระแสจึงเป็นแบบเก็บประจุ ฉะนั้น เพื่อไม่ให้เกิดความเสียหายต่อหม้อแปลงทดสอบ พิกัดกำลังไฟฟ้าขณะทดสอบไม่ควรเกินพิกัดกำลังของหม้อแปลงทดสอบ

ความจุทางไฟฟ้าหรือค่าเก็บประจุ ที่เป็นโหลดของหม้อแปลง ประกอบด้วยความจุทางไฟฟ้าของวัสดุทดสอบ อุปกรณ์วัด และสายต่อ รวมทั้งค่าความจุไฟฟ้าสเตรย์ (Stray capacitance) ฉะนั้นกำลังไฟฟ้าที่จะต้องใช้ในการทดสอบอาจคำนวณได้จากสมการ

$$S_i = \omega C U_i^2 \quad (4.1)$$

$$= 2\pi f C U_i^2 \times 10^{-9} \text{ kVA}$$

โดยที่ C คือ ค่าความจุไฟฟ้ารวม เป็น pF
 U_i คือ แรงดันทดสอบ เป็น kV_{rms}
 f คือ ความถี่ของแรงดัน เป็น Hz

กำลังไฟฟ้าที่กำหนดของหม้อแปลงทดสอบ ควรจะต้องมีค่าสูงกว่ากำลังไฟฟ้าที่จะต้องป้อนให้กับโหลด และควรจะต้องคำนึงถึงแฟกเตอร์ความปลอดภัย (Safety factor) ด้วย เพื่อให้อายุการใช้งานของหม้อแปลงทดสอบใช้ได้นานๆ ค่าความจุไฟฟ้าของวัสดุทดสอบอาจประมาณได้จากตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าความจุไฟฟ้าของวัสดุฉนวนและอุปกรณ์ไฟฟ้า

วัสดุฉนวนและอุปกรณ์ไฟฟ้า	ค่าความจุไฟฟ้า (pF)
- ลูกถ้วยฉนวนธรรมดา	10...100
- ปลอกฉนวนตัวนำ	150...400
- หม้อแปลงกระแส	200...600
- เคเบิลแรงสูง (ต่อความยาว 1 เมตร)	150...300
- หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง 1 MVA	ประมาณ 1000
100 MVA	ประมาณ 10,000
- อุปกรณ์วัดแรงดัน (voltage divider)	50...500
- สายต่อวงจรแรงสูง (ต่อเมตร)	5...15

นอกจากนี้ ถ้ามีความจุไฟฟ้าอื่นที่ต่ออยู่ในวงจรทางด้านแรงสูง ก็ถือเป็นโหลดของหม้อแปลงทดสอบ ต้องนำมาคิดด้วย เช่น ตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว หรือคัปปลิง (Coupling) ที่ใช้ในกรณีวัดคิซาร์จบางส่วน ปกติมีค่า 100 pF และตัวเก็บประจุของอุปกรณ์วัดแรงดัน เป็นต้น

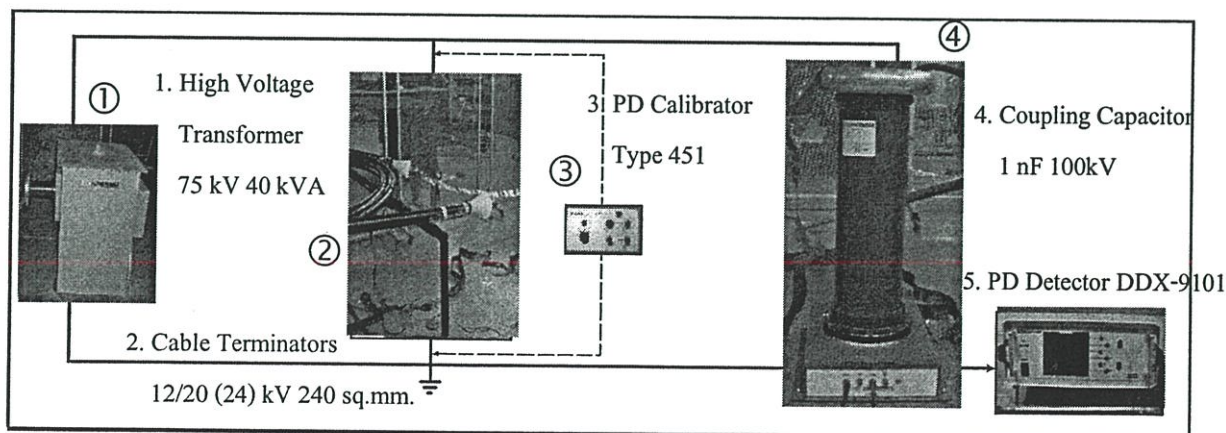
4.3 การทดสอบหาดีสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิล

การทดสอบหาดีสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิล โดยใช้ขั้วต่อสายสำหรับทดสอบหาดีสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิลใต้ดินแรงสูงฉนวน XLPE พิกัด 12/20 (24) kV 240 sq.mm. ที่ออกแบบสร้างขึ้น แบ่งเป็นการทดสอบ 4 ส่วน คือ

1. การทดสอบขั้วต่อสายเคเบิลที่ออกแบบโดยใช้ Stress cone ในห้องปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง
2. ทดสอบหาดีสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิล โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลที่ออกแบบโดยใช้ Stress cone เปรียบเทียบกับขั้วต่อสายที่ออกแบบด้วยหลักการเดิม [3-6]
3. ทดสอบหาดีสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิลเปรียบเทียบกับขั้วต่อสายที่ออกแบบด้วยหลักการทฤษฎีมิติที่เหมาะสม [9-11] เพื่อเป็นการทดสอบเบื้องต้นเกี่ยวกับหลักการที่ใช้ในการออกแบบขั้วต่อสายเคเบิลว่าสามารถใช้ในการทดสอบหาดีสชาร์จบางส่วนได้หรือไม่ เกิดการเบรคความในเนื้อฉนวน หรือเกิดการวาวไฟตามผิวฉนวน เกิดขณะทำการทดสอบหรือไม่
4. ทดสอบหาดีสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิล โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลที่ออกแบบโดยใช้ Stress cone เปรียบเทียบกับขั้วต่อสายที่ใช้อยู่ในภาคอุตสาหกรรม เพื่อเป็นการทดสอบการใช้งานจริงในภาคอุตสาหกรรมสายเคเบิลแรงสูงของขั้วต่อสายที่ออกแบบสร้างขึ้น

4.3.1 การทดสอบขั้วต่อสายเคเบิลที่ออกแบบโดยใช้ Stress cone ในห้องปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง

การทดสอบหาดีสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิลโดยใช้ขั้วต่อสายที่ออกแบบโดยใช้ Stress cone เป็นการทดสอบขั้วต่อสายเคเบิลว่าสามารถใช้ในการทดสอบหาดีสชาร์จบางส่วนได้หรือไม่ ทดสอบ ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง การต่อวงจรการทดสอบแบบวิธีตรง แสดงดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 วงจรการทดสอบหาดีสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิลแบบวิธีตรงตามมาตรฐาน IEC 60270

รายละเอียดอุปกรณ์ทดสอบ ประกอบด้วย

1. High-Voltage Transformer 75 kV 40 kVA
2. Cable Terminators 12/20 (24) kV 240 sq.mm.
3. PD Calibrator Type 451
4. Coupling Capacitor 1 nF 100kV
5. PD Detector DDX-9101

หม้อแปลงทดสอบที่ใช้ในการทดสอบ พิกัด 75 kV 40 kVA เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจจะเกิดแก่หม้อแปลงทดสอบ จึงจำเป็นต้องหาความยาวของสายเคเบิลที่จะใช้ในการทดสอบให้เหมาะสมกับพิกัดของหม้อแปลงทดสอบ โดยความจุทางไฟฟ้าหรือค่าเก็บประจุ ที่เป็นโหลดของหม้อแปลง ประกอบด้วยความจุทางไฟฟ้าของวัสดุทดสอบ อุปกรณ์วัด และสายต่อแรงสูง กำลังไฟฟ้าที่จะต้องใช้ในการทดสอบอาจคำนวณได้จากสมการที่ 4.1

$$S_t = \omega C_t U_t^2$$

โดยที่ S_t คือ พิกัดกำลังของหม้อแปลงทดสอบ

C_t คือ ความจุไฟฟ้ารวมทางด้านโหลดของหม้อแปลงทดสอบ

U_t คือ แรงดันทดสอบ

ฉะนั้น ความจุไฟฟ้ารวมทางด้านโหลดของหม้อแปลงทดสอบ จะได้

$$\begin{aligned} C_t &= \frac{S_t}{\omega U_t^2} \\ &= \frac{(40 \times 10^3)}{2\pi \times 50 \times (24 \times 10^3)^2} \end{aligned}$$

$$C_t = 220,000 \text{ pF}$$

จากค่าความจุไฟฟ้ารวมทางด้านโหลดของหม้อแปลงทดสอบที่ระดับแรงดันทดสอบ จะสามารถหาความยาวของสายเคเบิลที่ใช้ในการทดสอบได้ ดังนี้

$$C_t = C_{HV \text{ cable}} + C_{coupling} + C_{HV \text{ lead}} \quad (4.2)$$

โดยที่ C_t	คือ ค่าความจุไฟฟ้ารวมทางด้านโหนดของหม้อแปลงทดสอบ
$C_{HV\ cable}$	คือ ค่าความจุไฟฟ้าของสายเคเบิลใต้ดินแรงสูงที่ใช้ในการทดสอบ
$C_{coupling}$	คือ ค่าความจุไฟฟ้าของอุปกรณ์คาบเกี่ยว (Coupling Capacitor)
$C_{HV\ lead}$	คือ ค่าความจุไฟฟ้าของสายต่อวงจรแรงสูง

จากสมการที่ 4.2 โดยที่ ค่าความจุไฟฟ้าของอุปกรณ์คาบเกี่ยวในห้องทดสอบ ประมาณ 1000 pF และค่าความจุไฟฟ้าของสายต่อวงจรแรงสูงความยาวประมาณ 10 เมตร จากตารางที่ 4.1 มีความจุไฟฟ้าประมาณ 150 pF ซึ่งสามารถหาความยาวของสายเคเบิลที่ใช้ในการทดสอบได้จากสมการ

$$C_{HV\ cable} = C_t - C_{coupling} - C_{HV\ lead}$$

$$= 220,000\text{ pF} - 1000\text{ pF} - 150\text{ pF}$$

จะได้

$$C_{HV\ cable} = 218,850\text{ pF}$$

จากตารางที่ 4.1 ค่าความจุไฟฟ้าของเคเบิลแรงสูง ประมาณ 300 pF/m ฉะนั้น ความยาวของสายเคเบิลที่ใช้ในการทดสอบ จะเท่ากับ

$$l_{cable} = \frac{218,850\text{ pF}}{300\text{ pF/m}}$$

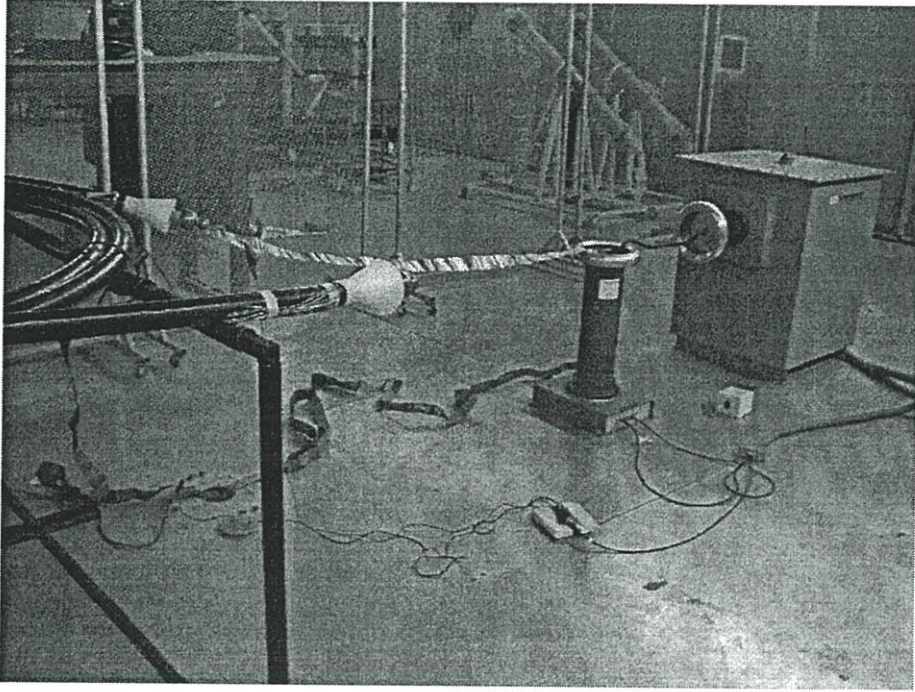
$$= 729.5\text{ m}$$

จากความยาวของสายเคเบิลที่สามารถใช้ทดสอบด้วยหม้อแปลงทดสอบดังกล่าว ฉะนั้นจะสามารถทำการทดสอบสายเคเบิลที่ความยาว 10 เมตร ตามมาตรฐาน IEC 60502-2 (type test) ได้โดยไม่เกิดความเสียหายแก่หม้อแปลงทดสอบ ฉะนั้นความจุไฟฟ้ารวมของวงจรทดสอบจะเท่ากับ

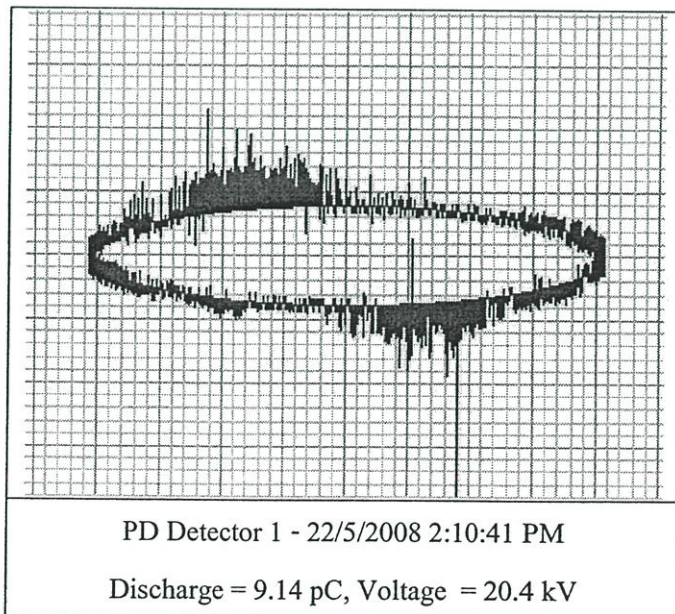
$$C_t = (300\text{ pF} \times 10) + 1000\text{ pF} + 150\text{ pF}$$

$$\text{ฉะนั้นความจุไฟฟ้ารวมของวงจรทดสอบ} = 4,150\text{ pF}$$

การทดสอบหาดีสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิลโดยใช้หัวต่อสายที่ออกแบบโดย Stress cone ทำการทดสอบที่ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง แสดงดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 การทดสอบหาดีสชาร์จบางส่วนโดยใช้หัวต่อสายที่ออกแบบโดยใช้ Stress cone

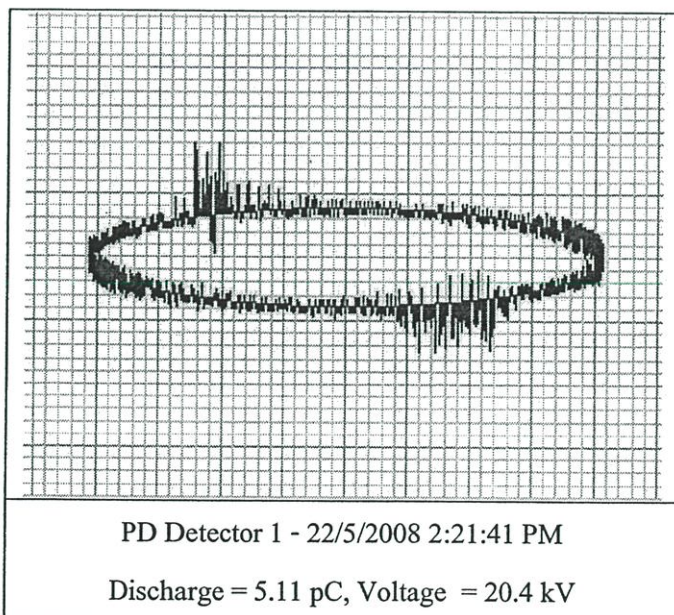


รูปที่ 4.5 ผลการทดสอบหาดีสชาร์จบางส่วนโดยใช้หัวต่อสายที่ออกแบบโดยไม่มี Stress cone

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบหา PD ในสายเคเบิล พิกัด 12/20 (24) kV ขนาด 240 sq.mm โดยใช้
 ขั้วต่อสายที่ออกแบบโดยไม่มี Stress cone

Description	Result	
Length of test sample	10	M
Calibration pulse	10	pC
Noise suppression	1	%
Test voltage rise to $2U_0$	24	kV
Test voltage at $1.732U_0$	20.4	kV
The magnitude of the discharge at $2U_0$	9.14	pC

การทดสอบโดยวัดค่าดิสชาร์จบางส่วนกับขั้วต่อปลายสายที่ออกแบบอย่างเดียว โดยไม่ได้ Stress cone ผลการทดสอบหาดีสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิลได้ดินแรงดันสูงจนวน XLPE พิกัด 12/20 (24) kV ขนาด 240 sq.mm ความยาว 10 เมตร ที่พิกัดแรงดัน 20.4 kV มีค่า PD 9.14 pC จากฐานเวลารูปอิลิปส์ และผลการทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนกับขั้วต่อสายที่ออกแบบ โดยทำการสวมใส่ Stress cone เข้ากับขั้วต่อปลายสายเคเบิล แสดงดังรูปที่ 4.6 และตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.6 ผลการทดสอบหาดีสชาร์จบางส่วน โดยใช้ขั้วต่อสายที่ออกแบบเมื่อใส่ Stress cone

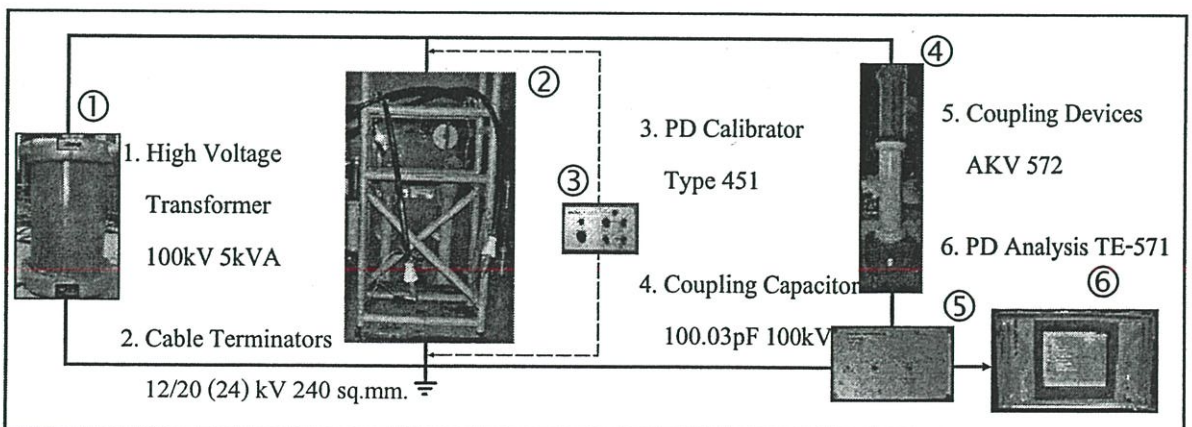
ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบหา PD ในสายเคเบิล พิกัด 12/20 (24) kV ขนาด 240 sq.mm โดยใช้
 ขั้วต่อสายที่ออกแบบโดยใช้ Stress cone (ขั้วต่อปลายสายแบบทรงกลม)

Description	Result	
Length of test sample	10	M
Calibration pulse	10	pC
Noise suppression	1	%
Test voltage rise to $2U_0$	24	kV
Test voltage at $1.732U_0$	20.4	kV
The magnitude of the discharge at $2U_0$	5.11	pC

การ Calibrate ทำได้โดยการป้อน Range ที่ต้องการวัด โดยในการทดสอบเริ่มที่ 10 pC ทำการวัดค่าดิซชาร์จบางส่วนค่าที่ได้อยู่ในช่วงที่ไม่เกิน Range ที่ตั้งไว้ และผลการทดสอบหาดิซชาร์จบางส่วนในสายเคเบิล พิกัด 12/20 (24) kV ขนาด 240 sq.mm ความยาว 10 เมตร โดยใช้ขั้วต่อสายแบบ Stress cone ที่พิกัดแรงดัน 20.4 kV มีค่า PD 5.11 pC จากฐานเวลารูปอิลิปส์

4.3.2 การทดสอบหาดิซชาร์จบางส่วนในสายเคเบิลโดยใช้ขั้วต่อสายที่ออกแบบโดยใช้ Stress cone เปรียบเทียบกับขั้วต่อสายที่ออกแบบด้วยหลักการเดิม

การทดสอบหาดิซชาร์จบางส่วนในสายเคเบิลโดยใช้ขั้วต่อสายที่ออกแบบโดยใช้ Stress cone เปรียบเทียบกับขั้วต่อสายที่ออกแบบด้วยหลักการเดิม [3-6] เพื่อเป็นการทดสอบขั้วต่อสายเคเบิลว่าสามารถใช้ในการทดสอบหาดิซชาร์จบางส่วนได้หรือไม่ ทดสอบ ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล รัชบุรี วจรการทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60270 [21] แสดงดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 วจรการทดสอบหาดิซชาร์จบางส่วนในสายเคเบิลแบบวิธีตรงตามมาตรฐาน IEC 60270

รายละเอียดอุปกรณ์ทดสอบ ประกอบด้วย

1. High-Voltage Transformer 100kV 5kVA
2. High Voltage Cable 12/20 (24) kV 240 sq.mm. with Terminations Unit
3. PD Calibrator Type 451
4. Coupling Capacitor 100.03pF 100kV
5. Coupling Devices AKV 572
6. PD Analysis TE-571

หม้อแปลงทดสอบที่ใช้ในการทดสอบ (MWB MESSWANDLER – BAU AG TESTING TRANSFORMER) พิกัด 100 kV 5 kVA เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจจะเกิดแก่หม้อแปลงทดสอบ จึงจำเป็นต้องหาความยาวของสายเคเบิลที่จะใช้ในการทดสอบให้เหมาะสมกับพิกัดของหม้อแปลงทดสอบ โดยความจุทางไฟฟ้าหรือค่าเก็บประจุ ที่เป็นโหลดของหม้อแปลง ประกอบด้วยความจุทางไฟฟ้าของวัสดุทดสอบ อุปกรณ์วัด และสายต่อแรงสูง กำลังไฟฟ้าที่จะต้องใช้ในการทดสอบอาจคำนวณได้จากสมการที่ 4.1

$$S_t = \omega C_t U_t^2$$

โดยที่ S_t คือ พิกัดกำลังของหม้อแปลงทดสอบ
 C_t คือ ความจุไฟฟ้ารวมทางด้านโหลดของหม้อแปลงทดสอบ
 U_t คือ แรงดันทดสอบ

ฉะนั้น ความจุไฟฟ้ารวมทางด้านโหลดของหม้อแปลงทดสอบ จะได้

$$\begin{aligned} C_t &= \frac{S_t}{\omega U_t^2} \\ &= \frac{(5 \times 10^3)}{2\pi \times 50 \times (24 \times 10^3)^2} \end{aligned}$$

$$C_t = 27,631 \text{ pF}$$

จากค่าความจุไฟฟ้ารวมทางด้านโหลดของหม้อแปลงทดสอบที่ระดับแรงดันทดสอบ จะสามารถหาความยาวของสายเคเบิลที่ใช้ในการทดสอบได้ จากสมการที่ 4.2 ดังนี้

$$C_t = C_{HV \text{ cable}} + C_{coupling} + C_{HV \text{ lead}}$$

โดยที่ C_t	คือ ค่าความจุไฟฟ้ารวมทางด้านโหนดของหม้อแปลงทดสอบ
$C_{HV\ cable}$	คือ ค่าความจุไฟฟ้าของสายเคเบิลใต้ดินแรงสูงที่ใช้ในการทดสอบ
$C_{coupling}$	คือ ค่าความจุไฟฟ้าของอุปกรณ์คาบเกี่ยว (Coupling Capacitor)
$C_{HV\ lead}$	คือ ค่าความจุไฟฟ้าของสายต่อวงจรแรงสูง

จากสมการที่ 4.2 โดยที่ ค่าความจุไฟฟ้าของอุปกรณ์คาบเกี่ยวประมาณ 100 pF [15] และค่าความจุไฟฟ้าของสายต่อวงจรแรงสูงความยาวประมาณ 10 เมตร จากตารางที่ 4.1 มีความจุไฟฟ้าประมาณ 150 pF ซึ่งสามารถหาความยาวของสายเคเบิลที่ใช้ในการทดสอบได้ ดังนี้

$$\begin{aligned} C_{HV\ cable} &= C_t - C_{coupling} - C_{HV\ lead} \\ &= 27,631\text{ pF} - 100\text{ pF} - 150\text{ pF} \end{aligned}$$

จะได้

$$C_{HV\ cable} = 27,381\text{ pF}$$

จากตารางที่ 4.1 ค่าความจุไฟฟ้าของเคเบิลแรงสูง ประมาณ 300 pF/m ฉะนั้น ความยาวของสายเคเบิลที่ใช้ในการทดสอบ จะเท่ากับ

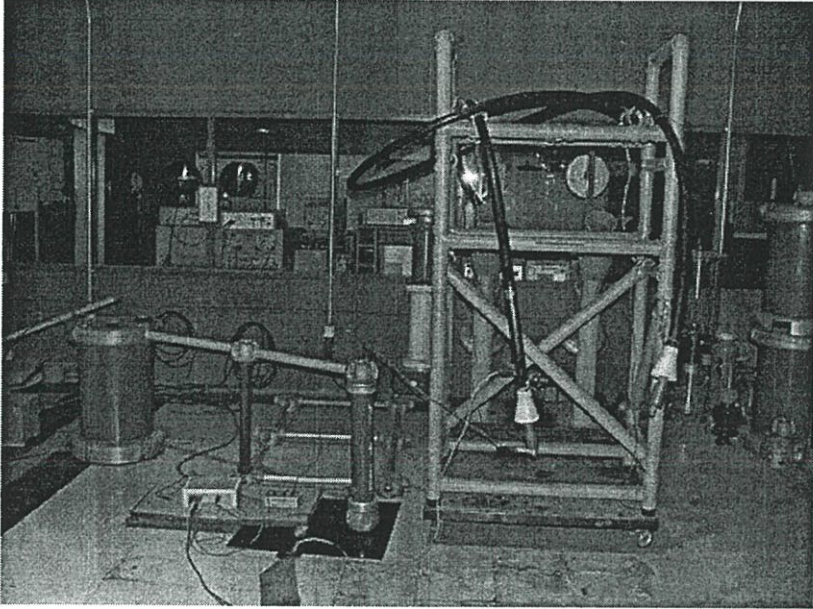
$$\begin{aligned} l_{cable} &= \frac{27,381\text{ pF}}{300\text{ pF/m}} \\ &= 91\text{ m} \end{aligned}$$

จากความยาวของสายเคเบิลที่สามารถใช้ทดสอบด้วยหม้อแปลงทดสอบดังกล่าว ฉะนั้นจะสามารถทำการทดสอบสายเคเบิลที่มีความยาว 10 เมตร ตามมาตรฐาน IEC 60502-2 (type test) ได้โดยไม่เกิดความเสียหายแก่หม้อแปลงทดสอบ ฉะนั้นความจุไฟฟ้ารวมของวงจรทดสอบจะเท่ากับ

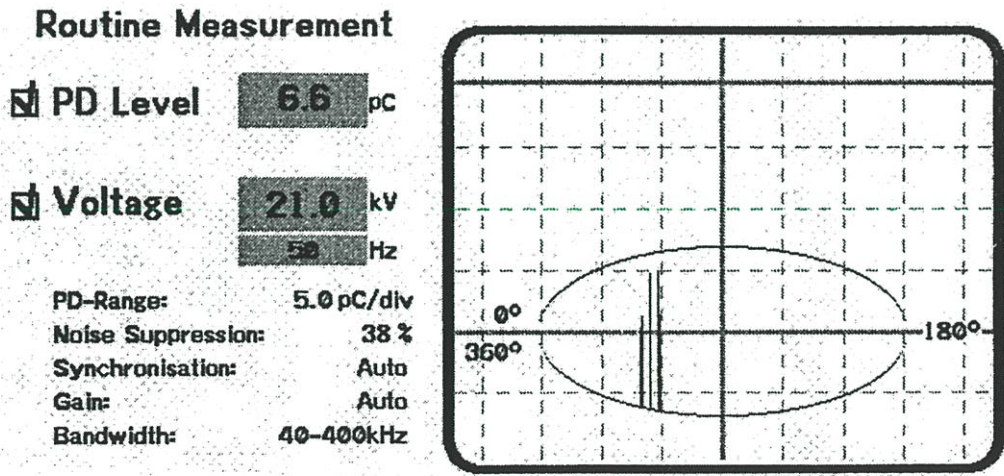
$$C_t = (300\text{ pF} \times 10) + 100\text{ pF} + 150\text{ pF}$$

$$\text{ฉะนั้นความจุไฟฟ้ารวมของวงจรทดสอบ} = 3,250\text{ pF}$$

การทดสอบหาพิสัยจางบางส่วนในสายเคเบิลโดยใช้หัวต่อสายที่ออกแบบโดยใช้ Stress cone โดยใช้หัวต่อปลายสายแบบทรงกระบอก [11-12] แสดงดังรูปที่ 4.8 และผลการทดสอบหาพิสัยจางบางส่วนในสายเคเบิลโดยใช้หัวต่อสายที่ออกแบบโดยใช้ Stress cone แสดงดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.8 การทดสอบหา PD ในสายเคเบิลโดยใช้หัวต่อสายที่ออกแบบโดยใช้ Stress cone

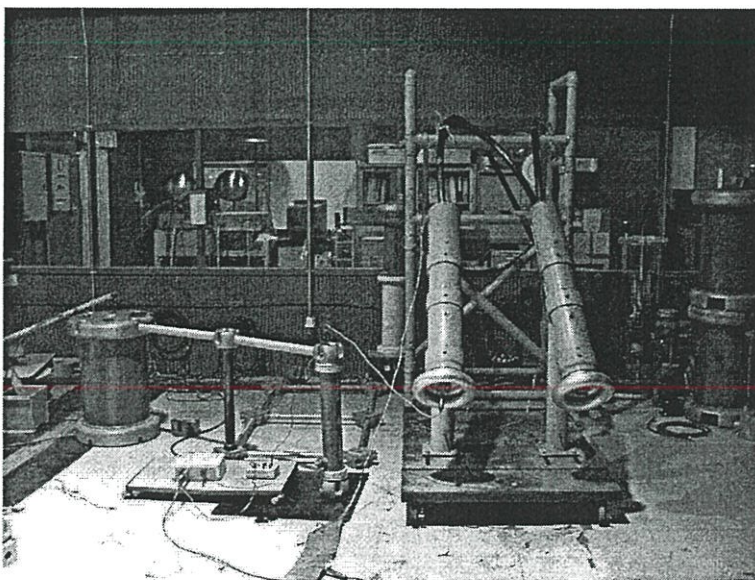


รูปที่ 4.9 ผลการทดสอบหา PD ในสายเคเบิลโดยใช้หัวต่อสายที่ออกแบบโดยใช้ Stress cone

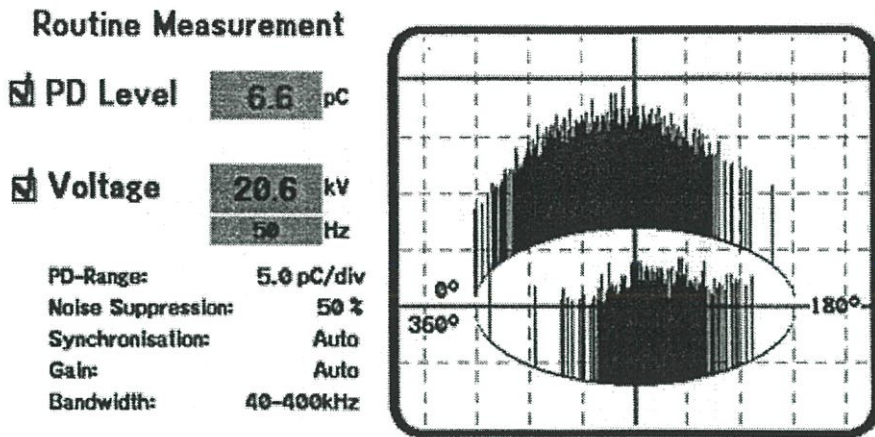
ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบหา PD ในสายเคเบิล พิกัด 12/20 (24) kV ขนาด 240 sq.mm โดยใช้
 ขั้วต่อสายที่ออกแบบโดยใช้ Stress cone (ขั้วต่อปลายสายแบบทรงกระบอก)

Description	Result	
Length of test sample	10	M
Calibration pulse	10	pC
Noise suppression	38	%
Test voltage rise to $2U_0$	24	kV
Test voltage at $1.732U_0$	21.0	kV
The magnitude of the discharge at $2U_0$	6.6	pC

ผลการทดสอบหาดีสชาร์จบางส่วนในขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวน XLPE โดยใช้ขั้วต่อสายที่ออกแบบโดยใช้ Stress cone แสดงดังรูปที่ 4.9 และตารางที่ 4.4 โดยขั้วต่อสายเคเบิลที่ออกแบบมีความยาวของ Stress cone 12 เซนติเมตร ใช้ระยะการปกสายยาว 9.5 เซนติเมตร
 เปรียบเทียบการทดสอบหาดีสชาร์จบางส่วนโดยใช้หลักการเดิม แสดงดังรูปที่ 4.10 ผลการทดสอบหาดีสชาร์จบางส่วนในขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวน XLPE พิกัด 12/20 (24) kV ขนาด 240 sq.mm ความยาว 10 เมตร โดยใช้หลักการเดิม ที่แรงดัน 21.1 kV มีค่า PD 7.2 pC จากฐานเวลารูปอิลิปส์แสดงในรูปที่ 4.11 และตารางที่ 4.5 โดยขั้วต่อสายเคเบิลที่ออกแบบด้วยหลักการเดิม [3-6] มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร ความยาว 100 เซนติเมตร ใช้ความยาวปกสาย 41.62 เซนติเมตร



รูปที่ 4.10 การทดสอบหา PD ในสายเคเบิลโดยใช้ขั้วต่อสายที่ออกแบบด้วยหลักการเดิม [3-6]



รูปที่ 4.11 ผลการทดสอบหา PD ในสายเคเบิล พิกัด 12/20 (24) kV ขนาด 240 sq.mm ยาว 10 เมตร โดยใช้ขั้วต่อสายที่ออกแบบด้วยหลักการเดิม

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบหา PD ในสายเคเบิล พิกัด 12/20 (24) kV ขนาด 240 sq.mm โดยใช้ขั้วต่อสายที่ออกแบบด้วยหลักการเดิม

Description	Result	
Length of test sample	10	m
Calibration pulse	10	pC
Noise suppression	50	%
Test voltage rise to $2U_0$	24	kV
Test voltage at $1.732U_0$	20.6	kV
The magnitude of the discharge at $2U_0$	6.6	pC

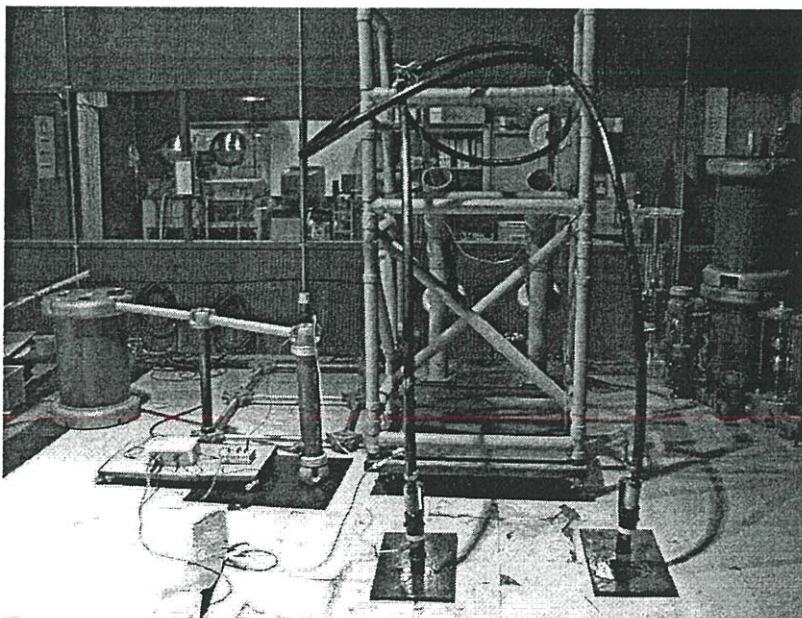
การทดสอบหาคิซซาร์จบางส่วนในสายเคเบิลเลือกใช้ Calibration pulse ที่ 10 pC โดยในการทดสอบเริ่มปรับค่า PD ตั้งแต่ย่านการวัดที่สูงแล้วจึงลดระดับย่านการวัดลง เนื่องจากไม่ทราบค่าที่แน่นอน ซึ่งย่านของ PD ที่ 10 pC เป็นย่านที่สามารถตรวจจับค่าคิซซาร์จบางส่วนได้และค่าของคิซซาร์จบางส่วนที่ได้อยู่ในช่วงของการตั้งค่า Calibration pulse ที่ 10 pC

ผลการทดสอบหาคิซซาร์จบางส่วนในสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวน XLPE พิกัด 12/20 (24) kV ขนาด 240 sq.mm ความยาว 10 เมตร โดยใช้ขั้วต่อสายที่ออกแบบด้วยหลักการเดิม ที่ระดับแรงดัน 20.6 kV มีค่า PD 6.6 pC จากฐานเวลารูปอิลิปส์ในรูปที่ 4.11 โดย PD เกิดขึ้นทุกค่าของแรงดัน ยกเว้นค่าแรงดันเท่ากับศูนย์ ซึ่งสามารถจำแนกได้ว่าเกิดการคิซซาร์จที่เกิดจากการขยายตัวของคาร์บอนแทรก

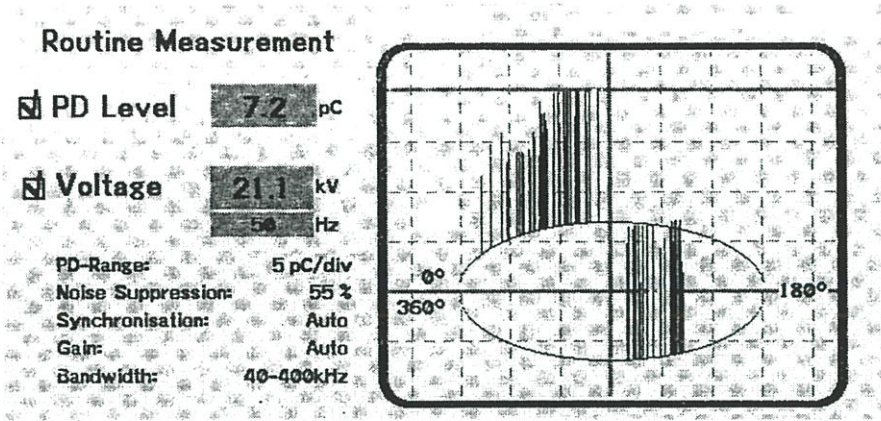
จากผลการทดสอบหาดีสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิลโดยใช้ขั้วต่อสายที่ออกแบบโดยใช้ Stress cone เปรียบเทียบกับขั้วต่อสายที่ออกแบบด้วยหลักการเดิม โดยใช้สายเคเบิล พิกัด 12/20 (24) kV ขนาด 240 sq.mm. ยาว 10 เมตร พบว่าขั้วต่อสายที่ออกแบบโดยใช้ Stress cone สามารถใช้ในการทดสอบหาดีสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิลได้โดยไม่เกิดการเบรคความถี่ในฉนวนสายเคเบิล และไม่เกิดการวบไฟตามผิวฉนวนขณะทำการทดสอบ โดยผลที่ได้จากการทดสอบมีปริมาณดีสชาร์จบางส่วนใกล้เคียงกับการทดสอบหาดีสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิลโดยใช้ขั้วต่อสายที่ออกแบบด้วยหลักการเดิม แต่ผลการทดสอบที่ PD Analysis TE-571 แสดงผลนั้นไม่ตรงกัน โดยการทดสอบโดยใช้ขั้วต่อสายโดยใช้ Stress cone แสดงให้เห็นว่าเกิดจากโพรงอากาศภายในขั้วต่อสาย ซึ่งอาจเกิดจากช่องว่างระหว่าง Stress cone กับฉนวน XLPE สำหรับผลการทดสอบโดยใช้ขั้วต่อสายที่ออกแบบด้วยหลักการเดิม แสดงให้เห็นว่าการดีสชาร์จเกิดจากการขยายตัวของคาร์บอนแทรค ซึ่งอาจจะเกิดจากสัญญาณรบกวนจากภายนอก เนื่องจากไม่ได้ทดสอบในห้องชิลด์ (Shield room)

4.3.3 การทดสอบหาดีสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิลโดยใช้ขั้วต่อสายที่ออกแบบโดยใช้ Stress cone เปรียบเทียบกับขั้วต่อสายที่ออกแบบด้วยหลักการทฤษฎีมิติที่เหมาะสม

การทดสอบโดยใช้ขั้วต่อสายออกแบบด้วยหลักการทฤษฎีมิติที่เหมาะสม ในรูปที่ 4.12 และผลการทดสอบ PD ดังรูปที่ 4.13 และตารางที่ 4.6 โดยขั้วต่อสายเคเบิลที่ออกแบบด้วยหลักการทฤษฎีมิติที่เหมาะสม [9-11] มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร และมีความยาว 20 เซนติเมตร



รูปที่ 4.12 การทดสอบหา PD ในสายเคเบิลโดยใช้ขั้วต่อสายแบบหลักการทฤษฎีมิติที่เหมาะสม



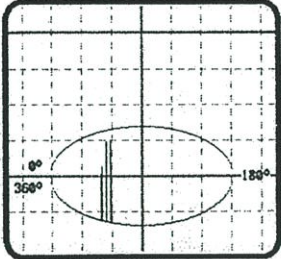
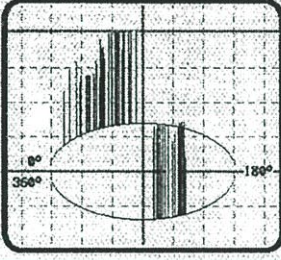
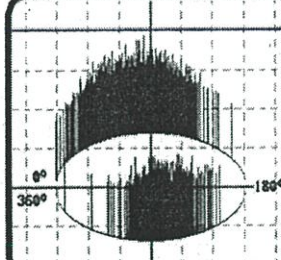
รูปที่ 4.13 ผลการทดสอบหา PD ในสายเคเบิล พิกัด 12/20 (24) kV ขนาด 240 sq.mm ยาว 10 เมตร โดยใช้ขั้วต่อสายที่ออกแบบด้วยหลักการทฤษฎีมิติที่เหมาะสม

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบหา PD ในสายเคเบิล พิกัด 12/20 (24) kV ขนาด 240 sq.mm โดยใช้ขั้วต่อสายที่ออกแบบด้วยหลักการทฤษฎีมิติที่เหมาะสม

Description	Result	
Length of test sample	10	m
Calibration pulse	10	pC
Noise suppression	55	%
Test voltage rise to $2U_0$	24	kV
Test voltage at $1.732U_0$	21.1	kV
The magnitude of the discharge at $2U_0$	7.2	pC

การเปรียบเทียบผลการทดสอบหาดีสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิลใต้ดินแรงดันสูง พิกัด 12/20 (24) kV ขนาด 240 sq.mm โดยเปรียบเทียบระหว่างขั้วต่อสายที่ออกแบบโดยใช้ Stress cone กับขั้วต่อสายที่ออกแบบด้วยหลักการทฤษฎีมิติที่เหมาะสม และขั้วต่อสายเคเบิลที่ออกแบบด้วยหลักการเดิม แสดงดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 เปรียบเทียบผลการทดสอบหา PD ในสายเคเบิล พิกัด 12/20 (24) kV ขนาด 240 sq.mm โดยใช้ขั้วต่อสายแบบ Stress cone ขั้วต่อสายแบบหลักการทฤษฎีมิติที่เหมาะสม และขั้วต่อสายหลักการเดิม ใช้ขั้วต่อปลายสายแบบทรงกระบอก

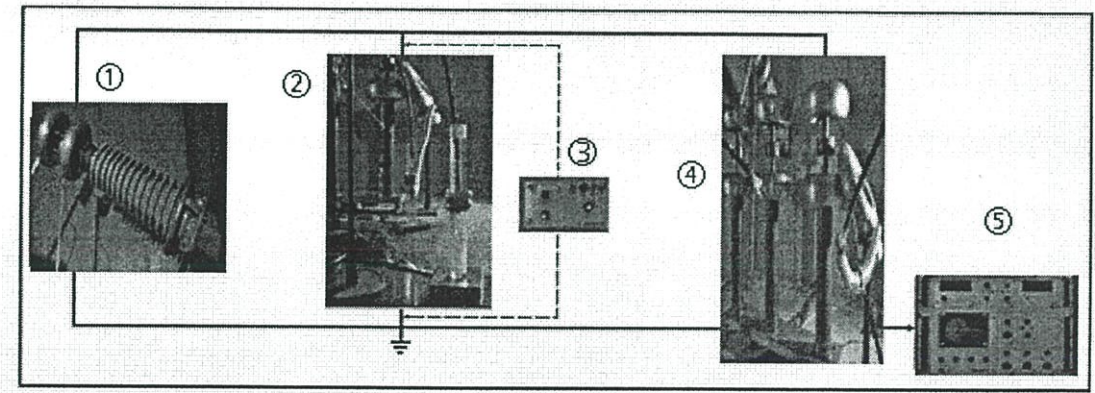
หลักการ ออกแบบ ขั้วต่อสาย	ขนาดความยาว ของขั้วต่อสาย (cm.)	ผลการทดสอบ PD	ค่า PD (pC.)
แบบ Stress cone	12	<p>Routine Measurement</p> <p>PD Level 6.6 pC</p> <p>Voltage 21.0 kV</p> <p>50 Hz</p> <p>PD-Range: 5.0 pC/div Noise Suppression: 38 % Synchronisation: Auto Gain: Auto Bandwidth: 40-400kHz</p> 	6.6
แบบ หลักการ ทฤษฎีมิติที่ เหมาะสม	20	<p>Routine Measurement</p> <p>PD Level 7.2 pC</p> <p>Voltage 21.0 kV</p> <p>50 Hz</p> <p>PD-Range: 5 pC/div Noise Suppression: 55 % Synchronisation: Auto Gain: Auto Bandwidth: 40-500kHz</p> 	7.2
แบบ หลักการ เดิม	100	<p>Routine Measurement</p> <p>PD Level 6.6 pC</p> <p>Voltage 20.6 kV</p> <p>50 Hz</p> <p>PD-Range: 5.0 pC/div Noise Suppression: 50 % Synchronisation: Auto Gain: Auto Bandwidth: 40-400kHz</p> 	6.6

จากผลการทดสอบวัดคิซาร์จบางส่วน สามารถสรุปได้ว่าขั้วต่อสายที่ออกแบบสร้างโดยใช้ Stress cone สามารถใช้ทำการทดสอบคิซาร์จบางส่วนในสายเคเบิลได้ โดยขั้วต่อสายที่ออกแบบสร้างโดยใช้ Stress cone มีค่าคิซาร์จบางส่วนเท่ากับ 6.6 pC. ขั้วต่อสายที่ออกแบบด้วยหลักการทฤษฎีมิติที่เหมาะสม มีค่าคิซาร์จบางส่วนเท่ากับ 7.2 pC. และขั้วต่อสายที่ออกแบบด้วยหลักการเดิม มีค่าคิซาร์จบางส่วนเท่ากับ 6.6 pC. จากผลการทดสอบจะเห็นว่าค่าของ Noise Suppression ไม่เท่ากันนั้นอาจเกิดจากช่วงเวลาที่ทำกรทดลองและสัญญาณรบกวนจากคลื่นวิทยุหรือสัญญาณรบกวนจากภายนอกต่างๆ

เนื่องจากขั้วต่อสายแบบ Stress cone ที่ออกแบบสร้างขึ้นไม่มีมาตรฐานรองรับการทดสอบ จึงต้องมีการทดสอบเปรียบเทียบกับขั้วต่อสายที่ใช้งานในภาคอุตสาหกรรม

4.3.4 การทดสอบหาดีสารรั่วบางส่วนในสายเคเบิลโดยใช้หัวต่อสายที่ออกแบบโดยใช้ Stress cone เปรียบเทียบกับหัวต่อสายที่ใช้ในภาคอุตสาหกรรม

4.3.3.1 การทดสอบหาดีสารรั่วบางส่วนในสายเคเบิล โดยการเปรียบเทียบการทดสอบโดยใช้ฉนวนน้ำมันหม้อแปลง การทดสอบและเปรียบเทียบผลดีสารรั่วบางส่วนของหัวต่อสายเคเบิลแบบ Stress cone เทียบกับหัวต่อสายที่ใช้ในภาคอุตสาหกรรมสายเคเบิลแรงสูง ณ บริษัท จรุงไทยไวร์แอนด์เคเบิล จำกัด (มหาชน) โดยใช้สายเคเบิลเส้นเดียวกันทำการทดสอบและเปรียบเทียบผล ระหว่างหัวต่อสายแบบ Stress cone กับหัวต่อสายที่มีใช้ใน บริษัท จรุงไทยไวร์แอนด์เคเบิล จำกัด (มหาชน) ซึ่งในการทดสอบใช้สายเคเบิลความยาว 10 เมตร วงจรที่ใช้ในการทดสอบเป็นวงจรแบบวิธีตรงตามมาตรฐาน IEC 60270 [21] โดยใช้ Corona Detector Hipotronics Model CDO 77 A แสดงดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 วงจรการทดสอบหาดีสารรั่วบางส่วนในสายเคเบิลแบบวิธีตรงตามมาตรฐาน IEC 60270

รายละเอียดอุปกรณ์ทดสอบ ประกอบด้วย

1. H.V. Series Resonance Test System Reactor Transformer 200 kV 2000 kVA
2. High Voltage Cable 12/20 (24) kV 240 sq.mm. Cable Test Terminators
3. PD Calibrator APEX Instrument CO. , LTD
4. High Voltage Filter Hipotronics 4.0 nF 200 kV 50/60 Hz และ Coupling Capacitor 100 pF 200kV
5. Corona Detector Hipotronics Model CDO 77 A

หม้อแปลงทดสอบที่ใช้ในการทดสอบ พิกัด 200 kV 2000 kVA เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจจะเกิดแก่หม้อแปลงทดสอบ จึงจำเป็นต้องหาความยาวของสายเคเบิลที่จะใช้ในการทดสอบให้เหมาะสมกับพิกัดของหม้อแปลงทดสอบ โดยความจุทางไฟฟ้าหรือค่าเก็บประจุที่เป็นโหลดของหม้อแปลง ประกอบด้วยความจุทางไฟฟ้าของวัสดุทดสอบ อุปกรณ์วัด และสายต่อแรงสูง กำลังไฟฟ้าที่จะต้องใช้ในการทดสอบอาจคำนวณได้จากสมการที่ 4.1

$$S_t = \omega C_t U_t^2$$

โดยที่ S_t คือ พิกัดกำลังของหม้อแปลงทดสอบ

C_t คือ ความจุไฟฟ้ารวมทางด้านโหลดของหม้อแปลงทดสอบ

U_t คือ แรงดันทดสอบ

ฉะนั้น ความจุไฟฟ้ารวมทางด้านโหลดของหม้อแปลงทดสอบ จะได้

$$\begin{aligned} C_t &= \frac{S_t}{\omega U_t^2} \\ &= \frac{(2000 \times 10^3)}{2\pi \times 50 \times (24 \times 10^3)^2} \end{aligned}$$

$$C_t = 11,000,000 \text{ pF}$$

จากค่าความจุไฟฟ้ารวมทางด้านโหลดของหม้อแปลงทดสอบที่ระดับแรงดันทดสอบ จะสามารถหาความยาวของสายเคเบิลที่ใช้ในการทดสอบได้ ดังนี้

$$C_t = C_{HV \text{ cable}} + C_{coupling} + C_{HV \text{ lead}}$$

โดยที่ C_t คือ ค่าความจุไฟฟ้ารวมทางด้านโหลดของหม้อแปลงทดสอบ

$C_{HV \text{ cable}}$ คือ ค่าความจุไฟฟ้าของสายเคเบิลใต้ดินแรงสูงที่ใช้ในการทดสอบ

$C_{coupling}$ คือ ค่าความจุไฟฟ้าของอุปกรณ์คาบเกี่ยว (Coupling Capacitor)

$C_{HV \text{ lead}}$ คือ ค่าความจุไฟฟ้าของสายต่อวงจรแรงสูง

จากสมการที่ 4.2 โดยที่ ค่าความจุไฟฟ้าของอุปกรณ์คาบเกี่ยวประมาณ 100 pF [15] และค่าความจุไฟฟ้าของสายต่อวงจรแรงสูงความยาวประมาณ 10 เมตร จากตารางที่ 4.1 มีความจุไฟฟ้าประมาณ 150 pF ซึ่งสามารถหาความยาวของสายเคเบิลที่ใช้ในการทดสอบได้ ดังนี้

$$\begin{aligned}
 C_{HV\ cable} &= C_t - C_{coupling} - C_{HV\ lead} \\
 &= 11,000,000\text{ pF} - 100\text{ pF} - 150\text{ pF}
 \end{aligned}$$

จะได้

$$C_{HV\ cable} = 10,999,750\text{ pF}$$

จากตารางที่ 4.1 ค่าความจุไฟฟ้าของเคเบิลแรงสูง ประมาณ 300 pF/m ฉะนั้น ความยาวของสายเคเบิลที่ใช้ในการทดสอบ จะเท่ากับ

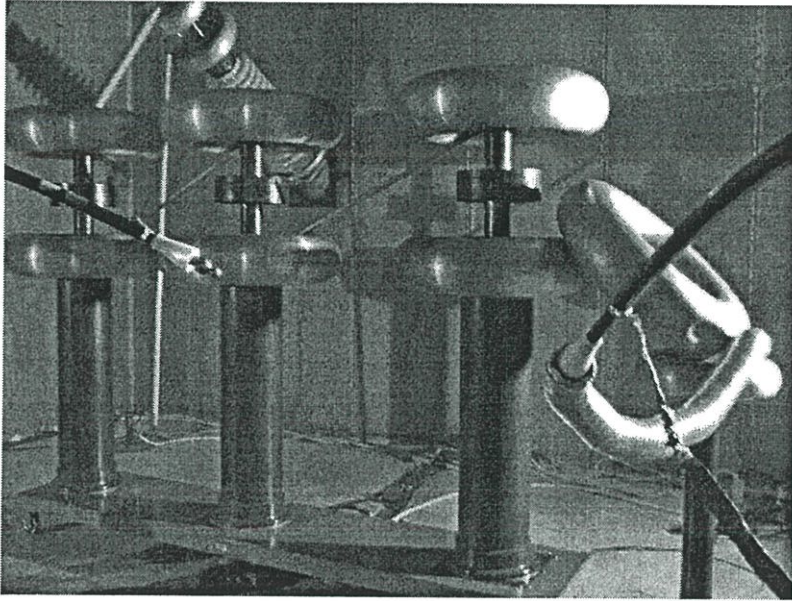
$$\begin{aligned}
 l_{cable} &= \frac{10,999,750\text{ pF}}{300\text{ pF/m}} \\
 &= 36,666\text{ m}
 \end{aligned}$$

จากความยาวของสายเคเบิลที่สามารถใช้ทดสอบด้วยหม้อแปลงทดสอบดังกล่าว ฉะนั้นจะสามารถทำการทดสอบสายเคเบิลที่มีความยาว 10 เมตร ตามมาตรฐาน IEC 60502-2 (type test) ได้โดยไม่เกิดความเสียหายแก่หม้อแปลงทดสอบ ฉะนั้นความจุไฟฟ้ารวมของวงจรทดสอบจะเท่ากับ

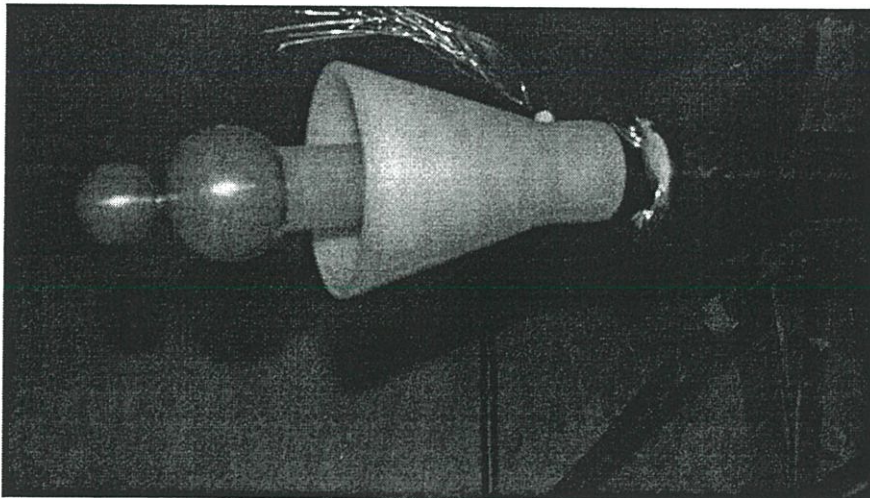
$$C_t = (300\text{ pF} \times 10) + 100\text{ pF} + 150\text{ pF}$$

ฉะนั้นความจุไฟฟ้ารวมของวงจรทดสอบ = 3,250 pF

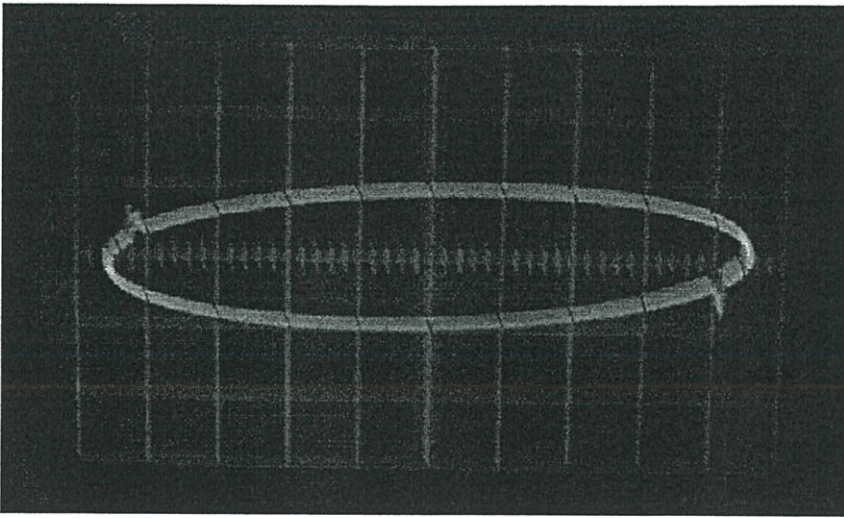
การทดสอบหาคุณสมบัติบางส่วนของสายเคเบิลโดยใช้หัวต่อสายที่ออกแบบโดยใช้ Stress cone โดยใช้หัวต่อปลายสายแบบทรงกลม แสดงดังรูปที่ 4.15 และผลการทดสอบหาคุณสมบัติบางส่วนของสายเคเบิลโดยใช้หัวต่อสายที่ออกแบบโดยใช้ Stress cone แสดงดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.15 การใช้หัวต่อสายแบบ Stress cone เพื่อทดสอบหา PD ในสายเคเบิล



รูปที่ 4.16 การต่อหัวต่อสายแบบ Stress cone เพื่อทดสอบหา PD ในสายเคเบิล



รูปที่ 4.17 ผลการทดสอบหา PD ในสายเคเบิลโดยใช้หัวต่อสายแบบ Stress cone

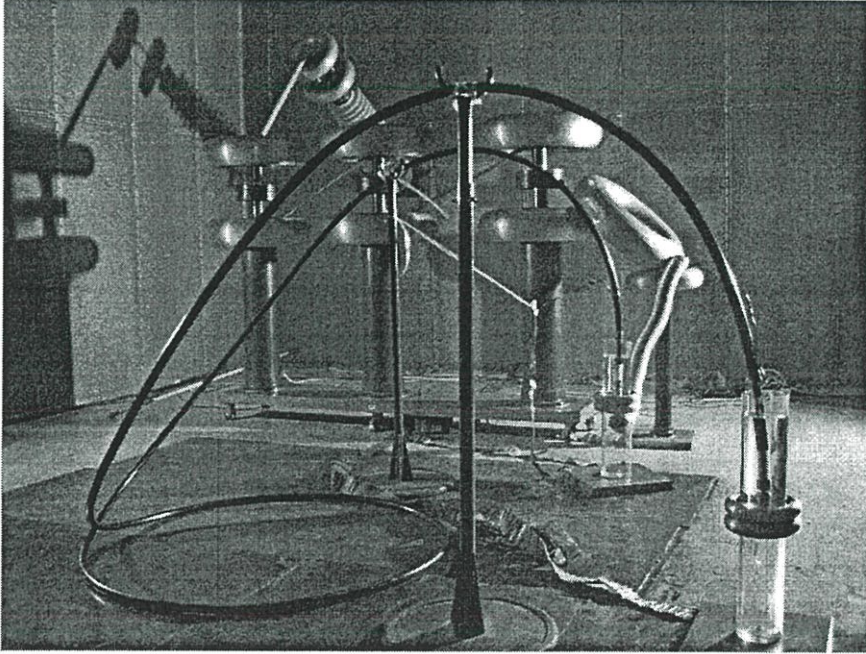
ตารางที่ 4.8 ผลการทดสอบหา PD ในสายเคเบิล พิกัด 12/20 (24) kV ขนาด 240 sq.mm โดยใช้หัวต่อสายแบบ Stress cone

Description	Result	
Length of test sample	10	M
Calibration pulse	5	pC
Test voltage rise to $2U_0$	24	kV
Test voltage at $1.732U_0$	21.1	kV
The magnitude of the discharge at $2U_0$	1.4	pC

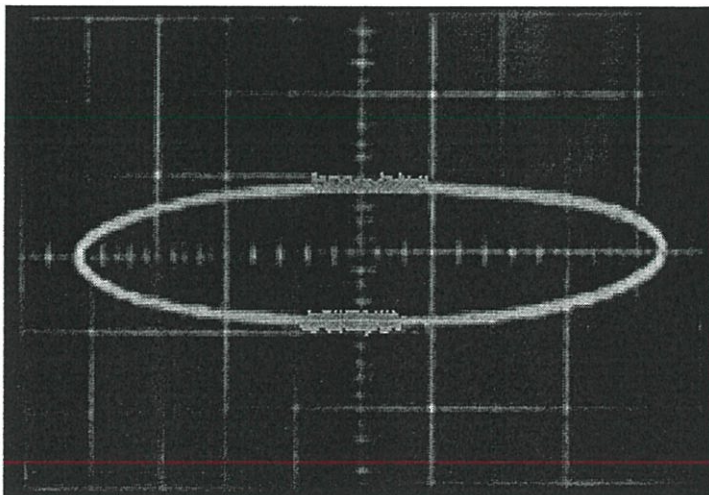
ผลการทดสอบหาดิสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิล พิกัด 12/20 (24) kV ขนาด 240 sq.mm ความยาว 10 เมตร โดยใช้หัวต่อสายที่ออกแบบโดยการใช้ Stress cone จากการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ ในการควบคุมการกระจายของสนามไฟฟ้า ที่ระดับแรงดัน 21.1 kV มีค่า PD 1.4 pC

การทดสอบหาดิสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิลได้ดินแรงดันสูง ฉนวน XLPE พิกัดแรงดัน 12/20 (24 kV) โดยการทดสอบในโรงงานอุตสาหกรรม เพื่อทำการวัดค่าดิสชาร์จบางส่วน ซึ่งในการทดสอบจะต้องมีการ Calibrate ทุกครั้ง โดยการป้อน Range ที่ต้องการวัด ในการทดสอบเริ่มที่ 10 pC และทำการวัด ปรากฏว่าดิสชาร์จบางส่วนที่ได้มีค่าน้อยกว่าค่า Range ที่ตั้งไว้ จึงต้องมีการตั้งค่าใหม่ คือที่ปรับลงมาที่ 5 pC ทำการวัดค่าดิสชาร์จบางส่วน และค่าที่วัดได้อยู่ในช่วงที่ไม่เกิน Range ที่ตั้งไว้

การทดสอบหาทิศทางของส่วนในสายเคเบิลโดยใช้ขั้วต่อสายที่ใช้ในทางอุตสาหกรรม ขั้วต่อสายเคเบิลที่ใช้อยู่ในภาคอุตสาหกรรม มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร ความยาว 40 เซนติเมตร ระยะความยาวปกสาย 9.5 เซนติเมตรทำการทดสอบ ณ บริษัท จรุงไทย ไวร์แอนด์เคเบิล จำกัด แสดงดังรูปที่ 4.18 ผลการทดสอบหาทิศทางของส่วนในสายเคเบิล แสดงดังรูปที่ 4.19 และตารางที่ 4.9



รูปที่ 4.18 การทดสอบหา PD ในสายเคเบิลโดยใช้ขั้วต่อสายที่ใช้อยู่ในภาคอุตสาหกรรม



รูปที่ 4.19 ผลการทดสอบหา PD ในสายเคเบิลโดยใช้ขั้วต่อสายที่ใช้อยู่ในภาคอุตสาหกรรม

ตารางที่ 4.9 ผลการทดสอบหา PD ในสายเคเบิล พิกัด 12/20 (24) kV ขนาด 240 sq.mm โดยใช้
ขั้วต่อสายที่ใช้อยู่ในภาคอุตสาหกรรม

Description	Result	
Length of test sample	10	m
Calibration pulse	5	pC
Test voltage rise to $2U_0$	24	kV
Test voltage at $1.732U_0$	21.1	kV
The magnitude of the discharge at $2U_0$	0.6	pC

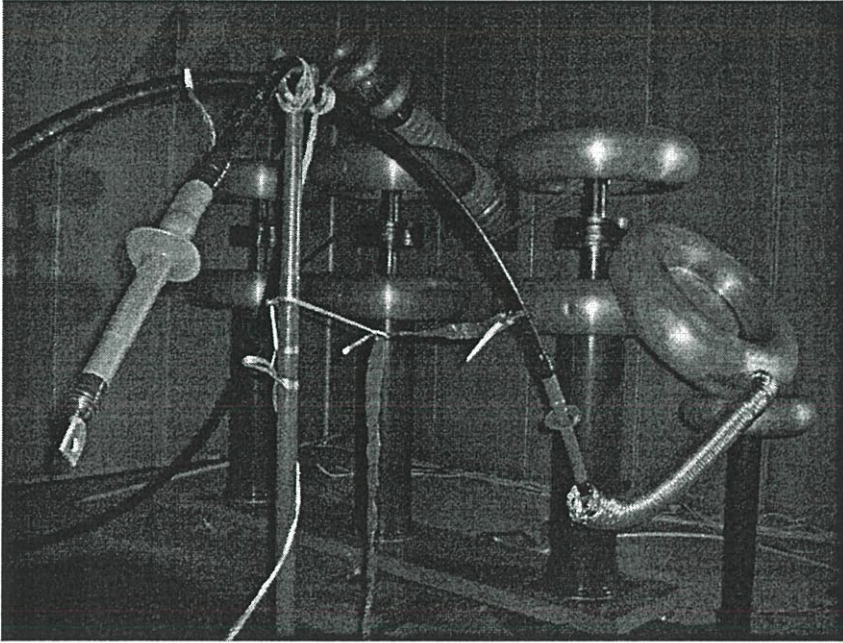
ผลการทดสอบหาคิซาร์จบางส่วนในสายเคเบิล โดยใช้ขั้วต่อสายที่ใช้อยู่ในภาคอุตสาหกรรม ทดสอบที่พิกัด 12/20 (24) kV ขนาด 240 sq.mm ความยาว 10 เมตร ที่ระดับแรงดัน 21.1 kV มีค่า PD 0.6 pC จากฐานเวลารูปอิลิปส์ในรูปที่ 4.19

จากผลการทดสอบหาคิซาร์จบางส่วนในสายเคเบิลโดยใช้ขั้วต่อสายแบบ Stress cone เปรียบเทียบกับขั้วต่อสายที่ใช้อยู่ในภาคอุตสาหกรรม โดยใช้สายเคเบิลเส้นเดียวกัน พิกัด 12/20 (24) kV ขนาด 240 sq.mm. ความยาว 10 เมตร ที่ระดับแรงดัน 21.1 kV พบว่าผลที่ได้จากการทดสอบมีปริมาณคิซาร์จบางส่วนอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานการทดสอบ PD ขั้วต่อสายแบบ Stress cone ที่ทำการออกแบบ มีค่า PD 1.4 pC. ส่วนขั้วต่อสายที่ใช้อยู่ในภาคอุตสาหกรรมมีค่า PD 0.6 pC. ซึ่งจากผลการทดสอบหาคิซาร์จบางส่วนในสายเคเบิลโดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลที่ออกแบบโดยใช้ Stress cone และขั้วต่อสายเคเบิลที่ใช้อยู่ในภาคอุตสาหกรรม ทดสอบโดยใช้สายเคเบิลเส้นเดียวกัน พบว่าไม่เกิดคิซาร์จบางส่วนในฉนวนสายเคเบิล

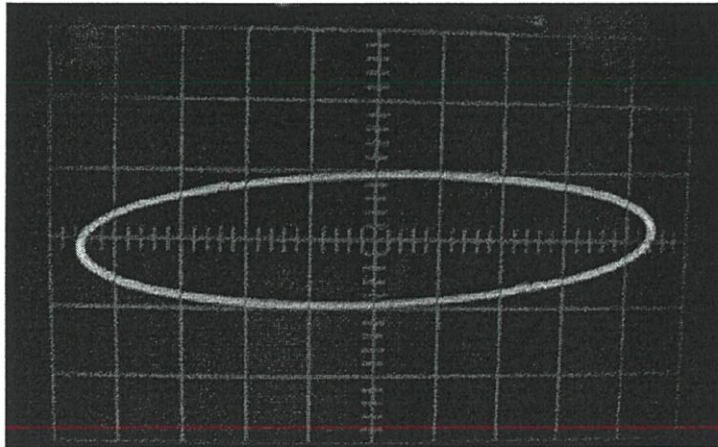
4.3.3.2 การทดสอบหาคิซาร์จบางส่วนในสายเคเบิลโดยการเปรียบเทียบการทดสอบโดยใช้ขั้วต่อสายแบบ Heat shrinkable cable terminations โดยทำการทดสอบ ณ บริษัท จรุงไทยไวร์แอนด์เคเบิล จำกัด (มหาชน) เพื่อเปรียบเทียบผลคิซาร์จบางส่วนของขั้วต่อสายเคเบิลแบบ Stress cone เทียบกับขั้วต่อสายที่ใช้ความร้อนเป่าในการเข้าหัวเคเบิล ซึ่งใช้วัสดุฉนวนอย่างดี และทนต่อแรงดันสูง ในการควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้า ขั้วต่อสายแบบ Heat shrinkable cable terminations ขั้วต่อปลายสายจะใช้หางปลาเชื่อมเข้ากับตัวนำของสายเคเบิลแล้วใช้เทปพันสายที่มีฉนวนหุ้มอย่างดี จากนั้นใช้ความร้อนเป่าอย่างทั่วถึงเพื่อให้เข้ากันสนิทและมีความมั่นคงแข็งแรง ขั้วต่อปลายสายมีไว้สำหรับจับยึดกับอุปกรณ์แรงสูง เมื่อทำการประกอบเสร็จมีขนาดความยาวประมาณ 32 เซนติเมตร ประโยชน์ของ Heat shrinkable cable terminations ใช้ประกอบเป็นหัวเคเบิล หรืออาจนำไปใช้กันระหว่างเฟสของแรงดันสูงได้ เนื่องจากวัสดุที่ใช้ทำ Heat shrinkable cable terminations เป็นวัสดุฉนวนชนิดพิเศษที่สามารถทนต่อแรงดันสูง และในการควบคุม

ความเครียดจะมีฉนวนที่ขึ้นรูปเป็น Stress cone จำนวนที่ใช้จะขึ้นอยู่กับระดับแรงดันที่ใช้งาน แสดงดังรูปที่ 4.20 และผลการทดสอบหาพิสัยของบางส่วนในสายเคเบิลโดยใช้ขั้วต่อสายแบบ Heat shrinkable cable terminations แสดงดังรูปที่ 4.21

การทดสอบหาพิสัยของบางส่วนในสายเคเบิลที่ใช้ในภาคอุตสาหกรรม โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลที่ใช้ความร้อนในการเข้าหัวสาย (Heat shrinkable cable terminations)



รูปที่ 4.20 การทดสอบหา PD ในสายเคเบิลโดยใช้ขั้วต่อสายที่ใช้อยู่ในภาคอุตสาหกรรม (Heat shrinkable cable terminations)



รูปที่ 4.21 ผลการทดสอบหา PD ในสายเคเบิลโดยใช้ขั้วต่อสายที่ใช้อยู่ในภาคอุตสาหกรรม (Heat shrinkable cable terminations)

ตารางที่ 4.10 ผลการทดสอบหา PD ในสายเคเบิล พิกัด 12/20 (24) kV ขนาด 240 sq.mm โดยใช้
 ขั้วต่อสายที่ใช้อยู่ในภาคอุตสาหกรรม (Heat shrinkable cable terminations)

Description	Result	
Length of test sample	10	m
Calibration pulse	5	pC
Test voltage rise to $2U_0$	24	kV
Test voltage at $1.732U_0$	21.1	kV
The magnitude of the discharge at $2U_0$	1.0	pC

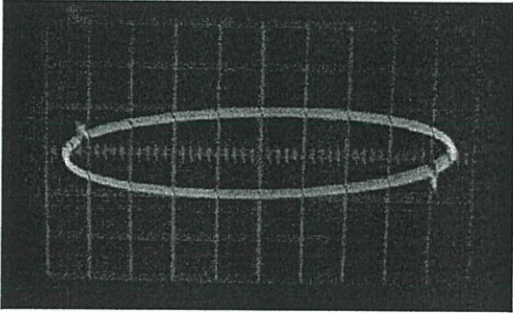
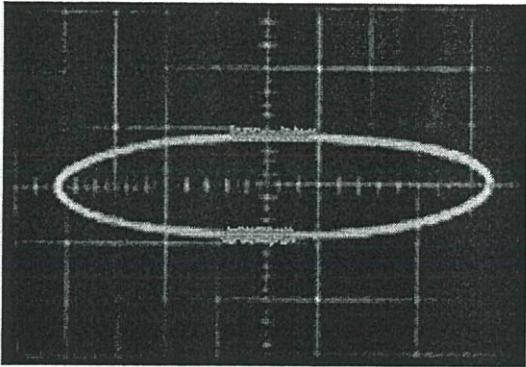
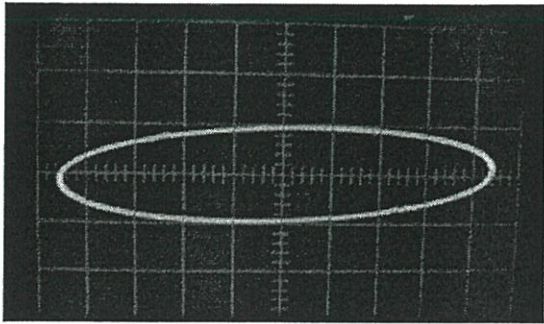
การทดสอบหาดิซชาร์จบางส่วนในสายเคเบิล ที่ใช้ในอุตสาหกรรม ทดสอบ ณ บริษัท จรุงไทยไวร์แอนด์เคเบิล จำกัด ทดสอบโดยทำการปรับ Calibration pulse ที่ 5 pC เนื่องจากในการทดสอบค่าเมื่อค่าแรงดันทดสอบอยู่ที่พิกัด 21.1 kV ทำให้ค่าดิซชาร์จบางส่วนที่อ่านได้มีค่าอยู่ในช่วงของการ Calibration pulse ที่ 5 pC

ผลการทดสอบหาดิซชาร์จบางส่วนในสายเคเบิล โดยใช้ขั้วต่อสายแบบ Stress cone เปรียบเทียบกับขั้วต่อสายที่ใช้อยู่ในภาคอุตสาหกรรม (Heat shrinkable cable terminations) โดยใช้สายเคเบิลเส้นเดียวกัน พิกัด 12/20 (24) kV ขนาด 240 sq.mm. ความยาว 10 เมตร ที่ระดับแรงดัน 21.1 kV พบว่าผลที่ได้จากการทดสอบมีปริมาณดิซชาร์จบางส่วนของขั้วต่อสายที่ใช้อยู่ในภาคอุตสาหกรรม (Heat shrinkable cable terminations) มีค่า PD 1.0 pC. ซึ่งจากผลการทดสอบหาดิซชาร์จบางส่วนในสายเคเบิลโดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลที่ออกแบบโดยใช้ Stress cone และขั้วต่อสายเคเบิลที่ใช้อยู่ในภาคอุตสาหกรรม มีค่าดิซชาร์จบางส่วนใกล้เคียงกัน และผลการทดสอบหาดิซชาร์จบางส่วนในสายเคเบิลได้ค้นแรงดันสูง โดยเปรียบเทียบระหว่างขั้วต่อสายที่ออกแบบโดยใช้ Stress cone กับขั้วต่อสายเคเบิลที่ใช้ในอุตสาหกรรม แสดงดังตารางที่ 4.11

หมายเหตุ:

ในการนำขั้วต่อแบบ Heat shrinkable cable terminations มาเปรียบเทียบกับผลการทดลองไม่ใช่วิธีการที่ถูกต้อง เนื่องจาก Heat shrinkable cable terminations อยู่ในระบบ Transmission Line แต่ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ต้องการศึกษาขั้วต่อสายเคเบิลสำหรับทดสอบหาดิซชาร์จบางส่วน จึงต้องการดูเพียงค่าดิซชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นใน Heat shrinkable cable terminations เท่านั้น

ตารางที่ 4.11 เปรียบเทียบผลการทดสอบหา PD ในสายเคเบิล พิกัด 12/20 (24) kV ขนาด 240 sq.mm โดยขั้วต่อสายที่ออกแบบโดยใช้ Stress cone กับขั้วต่อสายที่ใช้ในอุตสาหกรรม ใช้ขั้วต่อปลายสายแบบทรงกลม

หลักการออกแบบ ขั้วต่อสาย	ขนาดความยาว ของขั้วต่อสาย (cm.)	ผลการทดสอบ PD	ค่า PD (pC)
แบบ Stress cone	12		1.4
ขั้วต่อสายที่ใช้ใน อุตสาหกรรมโดย ใช้ฉนวนน้ำมัน หม้อแปลง	40		0.6
ขั้วต่อสายที่ใช้ใน อุตสาหกรรม ขั้วต่อสายแบบ Heat shrinkable cable terminations	32		1.0

4.4 สรุปผลการทดสอบ

ผลจากการทดสอบเปรียบเทียบหาดีสารจางบางส่วนในสายเคเบิลโดยใช้ขั้วต่อสายที่ออกแบบโดยการใช้ Stress cone ในการควบคุมการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้า เปรียบเทียบกับขั้วต่อสายที่ออกแบบด้วยหลักการเดิม [3-6] เปรียบเทียบกับขั้วต่อสายที่ออกแบบด้วยหลักการทฤษฎีมิติที่เหมาะสม [9-11] และขั้วต่อสายที่ใช้อยู่ในภาคอุตสาหกรรม การทดสอบหาดีสารจางบางส่วนในขั้วต่อสายเคเบิลสามารถสรุปได้ว่า ขั้วต่อสายเคเบิลสำหรับทดสอบหาดีสารจางบางส่วนในสายเคเบิลได้คืนแรงดันสูง ที่ออกแบบโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์อิเลเมนต์ในการจำลองขนาดของ Stress cone สามารถใช้ในการทดสอบหาดีสารจางบางส่วนในสายเคเบิลได้คืนแรงดันสูง ฉนวน XLPE พิกัด 12/20 (24) kV ขนาด 240 sq.mm. ได้ โดยไม่เกิดการเบรกดาวน์ในฉนวนสายเคเบิล และไม่เกิดการวบไฟตามผิวฉนวนขณะทำการทดสอบ สามารถใช้ในการทดสอบหาดีสารจางบางส่วนในสายเคเบิลได้

ขั้วต่อสายที่ออกแบบโดยการควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้าแบบ Capacitive stress control โดยผลที่ได้จากการทดสอบมีปริมาณดีสารจางบางส่วนใกล้เคียงกับการทดสอบหาดีสารจางบางส่วนในสายเคเบิลโดยใช้ขั้วต่อสายที่ออกแบบด้วยหลักการทฤษฎีมิติที่เหมาะสมและขั้วต่อสายที่ใช้อยู่ในภาคอุตสาหกรรม แต่ผลของการทดสอบหาดีสารจางบางส่วนของ Stress cone นั้นมีค่ามากกว่า มีดีสารจางบางส่วนในขั้วต่อสายเคเบิล 1.4 pC ดีสารจางบางส่วนที่เกิดขึ้นจากขั้วต่อสายแบบ Stress cone อาจมีสาเหตุจากการที่มีการทดสอบหลังจากขั้วต่อสายที่ออกแบบด้วยหลักการทฤษฎีมิติที่เหมาะสมและขั้วต่อสายที่ใช้อยู่ในภาคอุตสาหกรรม ซึ่งในการทดสอบจะมีความร้อนจากแรงดันทดสอบ จึงส่งผลทำให้ชั้นกึ่งตัวนำนอกถูกกัดกร่อนจากน้ำมันหม้อแปลง และขั้วต่อสายแบบ Stress cone ที่ทำการออกแบบนั้นจะต้องมีการศึกษาและปรับปรุงการออกแบบขั้วต่อปลายสาย และศึกษาการเลือกใช้ฉนวนต่างๆ ที่นำมาควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้า เพื่อให้ค่าดีสารจางบางส่วนที่วัดได้มีค่าลดลง

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การออกแบบขั้วต่อสายเคเบิลสำหรับทดสอบหาคุณสมบัติของบางส่วนในสายเคเบิลใต้ดินแรงดันสูงฉนวน XLPE พิกัด 12/20 (24) kV 240 sq.mm. จากการศึกษาการออกแบบขั้วต่อสายเคเบิลเพื่อใช้ในการทดสอบหาคุณสมบัติของบางส่วน โดยการใช้วิธีการแก้ไขการกระจายสนามไฟฟ้าแบบ Capacitive stress control สำหรับควบคุมการกระจายสนามไฟฟ้าที่บริเวณชั้นกึ่งตัวนำนอกที่ปกคลุมเพื่อลดความเครียดสนามไฟฟ้าลง เหตุผลในการเลือกการออกแบบด้วยวิธีการควบคุมสนามไฟฟ้าแบบ Capacitive stress control เนื่องจากที่ผ่านมามีส่วนใหญ่นิยมใช้หลักการออกแบบด้วยวิธีการแก้ไขการกระจายสนามไฟฟ้าแบบ Refractive stress control เป็นการใช้น้ำมันเหลวที่นำมาควบคุมการกระจายสนามไฟฟ้า เช่น น้ำมันหม้อแปลง น้ำมันรูปสุทธิ และการใช้ฉนวนก๊าซ เช่น ก๊าซออกซิเจน และการทำสุญญากาศ เนื่องจากวัตถุประสงค์ของการวิจัย เพื่อพัฒนาการออกแบบสร้างขั้วต่อสายสำหรับทดสอบหาคุณสมบัติของบางส่วนในสายเคเบิลใต้ดินแรงดันสูงฉนวน XLPE พิกัด 12/20 (24) kV 240 sq.mm. เพื่อความสะดวกในการนำไปใช้งาน และลดการสิ้นเปลืองในการทดสอบ ขั้วต่อสายแบบ Stress cone ที่ออกแบบเลือกใช้น้ำมันแข็งในการควบคุมการกระจายสนามไฟฟ้า ออกแบบโดยเลือกใช้ซูเปอร์สโตนไนลอนเป็นวัสดุชนิดโพลีเอทิลีน (Polyethylene) ซึ่งมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับฉนวนของสายเคเบิลทดสอบ สำหรับการควบคุมการกระจายสนามไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอ

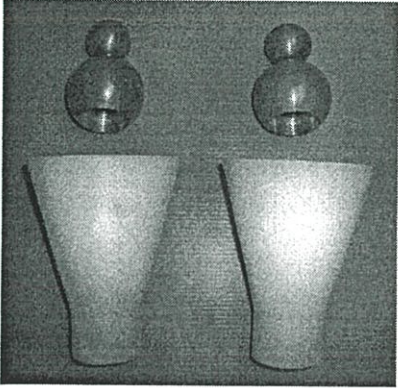
จากผลการทดลองที่ได้ ขั้วต่อสายเคเบิลสำหรับทดสอบหาคุณสมบัติของบางส่วนในสายเคเบิลใต้ดินแรงดันสูง พิกัด 12/20 (24) kV 240 sq.mm. ที่ออกแบบโดยใช้ Stress cone ในการควบคุมการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้า สามารถใช้ทดสอบหาคุณสมบัติของบางส่วน (PD) ได้ ซึ่งการออกแบบ Stress cone ได้จากการจำลองโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ด้วยโปรแกรม FEMLAB [20] มีขนาดมุม 15 องศา ที่สามารถทำให้การกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าลดลง และมีความยาว 12 เซนติเมตร โดยไม่ต้องใช้ฉนวนน้ำมันหม้อแปลงในการควบคุมการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าที่บริเวณการปกคลุม ซึ่งเป็นการควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้าแบบ Capacitive stress control [3, 12] และจากการจำลองทำให้ได้ระยะการปกคลุมสายเคเบิลเพียง 9.5 เซนติเมตร ผลจากการออกแบบเมื่อเปรียบเทียบกับขั้วต่อสายเคเบิลที่ออกแบบโดยใช้เทคนิคเดิม [3-6] และขั้วต่อสายที่ออกแบบโดยใช้ทฤษฎีมิติที่เหมาะสมของทรงกระบอกซ้อนกัน [9-11] ซึ่งใช้ฉนวนน้ำมันหม้อแปลงสำหรับควบคุมการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้า พบว่า ขั้วต่อสายที่ออกแบบ

โดยใช้ Stress cone ในการควบคุมการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้า ทำให้ความยาวของขั้วต่อสายเคเบิลมีขนาดลดลงถึง 40 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับขั้วต่อสายที่ออกแบบโดยใช้ทฤษฎีมิติที่เหมาะสมของทรงกระบอกซ้อนกันแน่น และลดระยะเวลาความยาวการปกสายเคเบิล การเลือกใช้ชุปเปอร์ลีนไนลอนกลึงขึ้นรูปสำหรับควบคุมการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้า เนื่องจากชุปเปอร์ลีนไนลอนเป็นวัสดุที่แข็งเหนียว สามารถกลึงขึ้นรูปได้ง่ายและมีค่าเปอร์มิตติวิตีใกล้เคียงกับฉนวนของสายเคเบิล ช่วยลดความเสี่ยงของฉนวนที่นำมาควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้า และไม่ต้องใช้ฉนวนน้ำมันหม้อแปลงควบคุมการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้า ขั้วต่อสายที่ออกแบบมีขนาดเล็ก ใช้งานง่าย ต้นทุนการสร้างต่ำ ใช้ระยะในการปกสายเคเบิลที่สั้น เป็นการลดความเสี่ยงสายเคเบิล และฉนวนจากการทดสอบ

จากการทดสอบหาคุณสมบัติของวัสดุ (PD) ในสายเคเบิลแรงดันสูง XLPE พิกัด 12/20 (24) kV ขนาด 240 sq.mm. มีความยาว 10 เมตร [19] โดยใช้ขั้วต่อสายที่ออกแบบโดยใช้ Stress cone ในการควบคุมการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้า เปรียบเทียบกับขั้วต่อสายที่ออกแบบด้วยหลักการเดิม เปรียบเทียบกับขั้วต่อสายที่ออกแบบโดยใช้ทฤษฎีมิติที่เหมาะสมของทรงกระบอกซ้อนกันแน่น และขั้วต่อสายที่ใช้อยู่ในภาคอุตสาหกรรม โดยใช้เครื่องตรวจจับปริมาณดิสชาร์จบางส่วนตามมาตรฐาน IEC 60270 [21] พบว่าขั้วต่อสายที่ออกแบบสร้างโดยใช้ Stress cone สามารถใช้ในการทดสอบหาคุณสมบัติของวัสดุในสายเคเบิลได้โดยไม่เกิดการเบรกดาวน์ในฉนวนสายเคเบิล และไม่เกิดการวาวไฟตามผิวฉนวนขณะทำการทดสอบ โดยผลการทดสอบหาคุณสมบัติของวัสดุในสายเคเบิล พบว่าผลที่ได้จากการทดสอบมีปริมาณดิสชาร์จบางส่วนใกล้เคียงกับขั้วต่อสายที่ออกแบบโดยใช้ทฤษฎีมิติที่เหมาะสม และขั้วต่อสายที่ใช้อยู่ในภาคอุตสาหกรรม เปรียบเทียบกับขั้วต่อสายแบบ Heat shrinkable cable terminations ผลการทดสอบหาคุณสมบัติของวัสดุในขั้วต่อสายเคเบิลที่ออกแบบสร้างขึ้นมีปริมาณดิสชาร์จบางส่วน 1.4 pC ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าขั้วต่อสายที่ออกแบบสร้างสามารถใช้ในการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิลได้

อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่าในการออกแบบสร้างขั้วต่อสายเคเบิลโดยใช้การควบคุมการกระจายสนามไฟฟ้าแบบ Capacitive stress control และเลือกใช้ฉนวนแข็งในการทำ Stress cone สามารถใช้ในการทดสอบหาคุณสมบัติของวัสดุในสายเคเบิลได้ แต่ก็ยังมีข้อบกพร่องอยู่เช่นกัน เนื่องจากการใช้ขั้วต่อสายแบบ Stress cone ที่ออกแบบจะต้องสวมเข้าไปในสายเคเบิลระหว่างชั้นกึ่งตัวนำนอก จึงต้องระมัดระวังการเกิดรอยขีดข่วนบนชั้นกึ่งตัวนำนอก และฉนวน XLPE ซึ่งจะส่งผลทำให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าสูงขณะทำการทดสอบอาจส่งผลต่อการเกิดดิสชาร์จบางส่วนได้

ตารางที่ 5.1 คุณสมบัติของขั้วต่อสายแบบ Stress cone สำหรับทดสอบดิสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิลใต้ดินแรงดันสูง พิกัด 12/20 (24) kV ขนาด 240 sq.mm

ขั้วต่อสายแบบ Stress cone	รายละเอียดคุณสมบัติของขั้วต่อสาย	
	พื้นที่หน้าตัดสายเคเบิล (sq.mm)	240
	รัศมีของตัวนำสายเคเบิล (mm.)	8.75
	ค่าเปอร์มิตติวิตีของฉนวน	2.25
	รัศมีต้นของ Stress cone (cm.)	2.025
	รัศมีปลายของ Stress cone (cm.)	4.35
	ความยาวขั้วต่อสายเคเบิล (cm.)	12
	ชนิดวัสดุ	ซูเปอร์ลินไนลอน
	ขั้วต่อปลายสาย	ทองแดงลึงขึ้นรูป
	ลักษณะของการนำไปใช้งาน	สะดวกในการใช้งาน สามารถเคลื่อนย้าย และนำไปใช้งานง่าย ถอดเปลี่ยนได้ง่าย

5.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา

แนวทางการพัฒนา จากการศึกษาเกี่ยวกับทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบขั้วต่อสายสำหรับทดสอบหาดิสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิล พบว่าการใช้ Stress cone ในการควบคุมการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้า ยังไม่มีมาตรฐานรองรับจึงทำให้ขนาดที่ออกแบบสร้างขึ้นยังไม่มีมาตรฐานและมีขนาดที่พอดี จึงควรศึกษาวิธีการออกแบบสร้างขั้วต่อสาย หรืออาจใช้หลักการทฤษฎีมิติที่เหมาะสมช่วยในการวิเคราะห์หามุม และขนาดความยาวที่เหมาะสมของ Stress cone และปรับปรุงช่องว่างที่อาจทำให้เกิดปัญหาขึ้นระหว่างทดสอบ

เอกสารอ้างอิง

- [1] Kreuger F.H. **Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment.** New York : Butterworth & Co. (Publishers) Ltd. 1989.
- [2] Chan J.C., Duffy P., Hiiivala L.J. “Partial Discharge - Part VIII : PD Testing of Solid Dielectric Cable” **IEEE Electrical Insulation Magazine.**, Vol. 7, No.5, Sep./Oct.1991. pp. 9-20.
- [3] พร้อมศักดิ์ อภิตติกุล. “การออกแบบขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงเพื่อใช้ทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วน และพลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกของสายเคเบิล XLPE ขนาดแรงดัน 24 kV.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2545.
- [4] พร้อมศักดิ์ อภิตติกุล จงรักษ์ บุญเส็ง และ กนกพล นาคะวิวัฒน์. “ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูง XLPE สำหรับการทดสอบดิสชาร์จบางส่วน ตอนที่ 1 : การออกแบบและสร้างขั้วต่อสายเคเบิล” **การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 24, 22-23 พฤศจิกายน 2544.** หน้า 77-82.
- [5] Boonseng C., Apiratikul P. and Nakaviwat K. “A High Voltage Cable Terminator for Partial Discharge and Dielectric Loss Measurement” **IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Boston, MA USA, April 7-10, 2002.** pp. 62-65
- [6] กานต์ แสงทอง และ เกรียงไกร ชาคร. “ชุดทดลองการเกิดดิสชาร์จบางส่วนของสาย XLPE 12/20 kV.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล. 2544.
- [7] พร้อมศักดิ์ อภิตติกุล สุภาวดี คัมภีรานนท์ กนกพล นาคะวิวัฒน์ และจงรักษ์ บุญเส็ง. “ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงเพื่อใช้ทดสอบวัดค่าดิสชาร์จบางส่วนของสายเคเบิล XLPE โดยใช้ น้ำบริสุทธิ์เป็นฉนวน” **การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 26, 6 – 7 พฤศจิกายน 2546.** หน้า 396-401.
- [8] จำนาน คำคง และ นที โพธิ์อุไร. “ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงเพื่อทดสอบวัดค่าพหุคูณดิสชาร์จสายเคเบิล XLPE โดยใช้ น้ำบริสุทธิ์เป็นฉนวน” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล. 2546.

- [9] ธนากร น้ำหอมจันทร์ “การออกแบบและสร้างขั้วต่อสายเคเบิลใต้ดินแรงดันสูงสำหรับทดสอบหาดีสชาร์จบางส่วนโดยใช้ทฤษฎีมิติที่เหมาะสมและระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2551.
- [10] ธนากร น้ำหอมจันทร์ และ ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล, “มิติที่เหมาะสมของขั้วต่อสายเคเบิลใต้ดินแรงดันสูงสำหรับทดสอบหาดีสชาร์จบางส่วน พิกัด 12/20(24) kV 240 sq.mm.”, วิศวกรรมสารลาดกระบัง, ปีที่ 23 ฉบับที่ 4 เดือนธันวาคม 2549, หน้า 13-18.
- [11] ธนากร น้ำหอมจันทร์ ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล พร้อมศักดิ์ อภิตติกุล และสุภวุฒิ เนตรโพธิ์แก้ว “การออกแบบและสร้างขั้วต่อสายเคเบิลใต้ดินแรงดันสูงสำหรับทดสอบหาดีสชาร์จบางส่วนโดยใช้ทฤษฎีมิติที่เหมาะสมและระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 29, 9-10 พฤศจิกายน 2549, หน้า 217-220.
- [12] ปฏิภาณ เกิดลาภ ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล ธนากร น้ำหอมจันทร์ พงษ์สวัสดิ์ คชภูมิ และอดิกร เสรีพัฒนานนท์, “การออกแบบสร้างขั้วต่อสายแบบ Stress cone เพื่อใช้ในการทดสอบหาดีสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิลใต้ดินแรงดันสูง”, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 30, 25-26 ตุลาคม 2550, หน้า 257-260.
- [13] นรเศรษฐ พัฒนเดช. วัสดุวิศวกรรมไฟฟ้า เล่ม 1 : ฉนวนและวัสดุฉนวนไฟฟ้า. กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. พ.ศ. 2550.
- [14] ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล. “เอกสารประกอบการสอน Advance High Voltage Engineering.” สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. พ.ศ. 2546.
- [15] ตำรวจ สังข์สะอาด. วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. พ.ศ. 2549.
- [16] Edward Gulski. “Digital Analysis of Partial Discharge.” **IEEE Trans. Dielectric and Electric Insulation**, Vol. 2, No.5, Oct. 1995. pp. 822-837.
- [17] Nattrass David A. “Partial Discharge Measurement and Interpretation.” **IEEE Electrical Insulation Magazine**, Vol. 4, No. 3, May/June 1988. pp.10-23.
- [18] Siemens AG., **Electrical engineering handbook**, 1981.
- [19] **IEC Standard Publication No. 60502-2, 2nd edition**, “Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages from 1 kV ($U_m = 1,2$ kV) up to 30 kV ($U_m = 36$ kV) Part 2: Cables for rated voltages from 6 kV ($U_m = 7,2$ kV) up to 30 kV ($U_m = 36$ kV)” 2005.


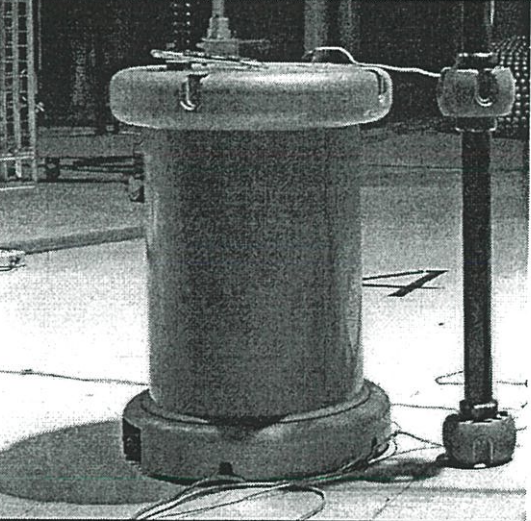
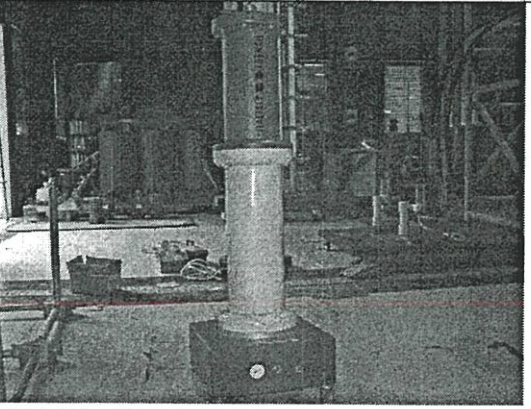
- [20] COMSOL AB. 2004. **FEMLAB 3 Multiphysics Modeling**. [CD ROM] . Los Angeles: COMSOL, Inc.
- [21] **IEC Standard Publication No. 60270, 3rd edition**, “High-voltage test techniques Partial discharge measurements” 2000.

ภาคผนวก

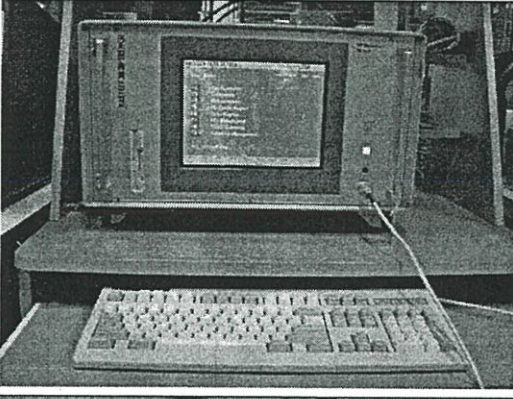
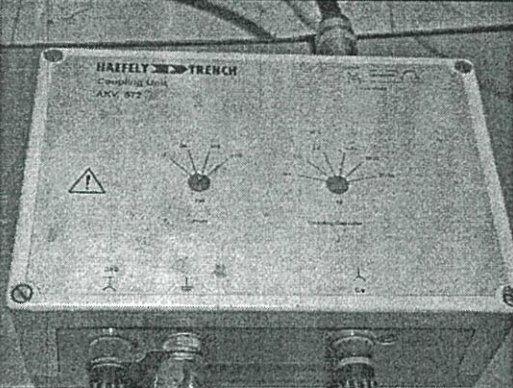
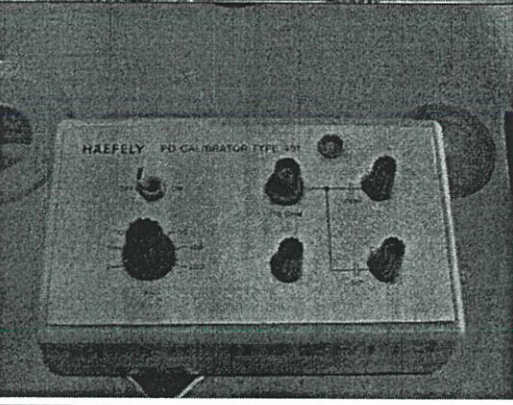
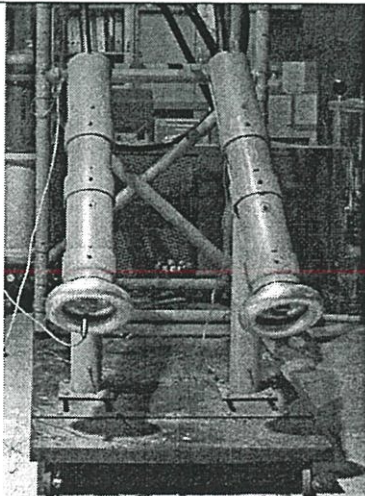
ภาคผนวก ก.

รูปถ่ายอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบ

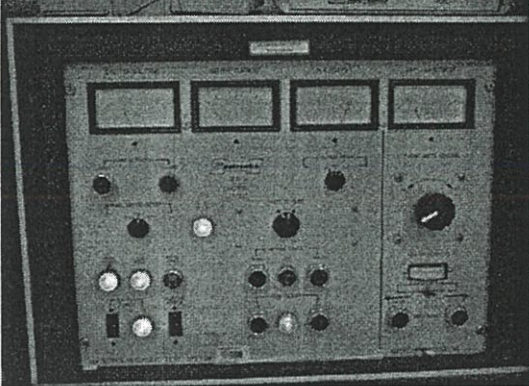
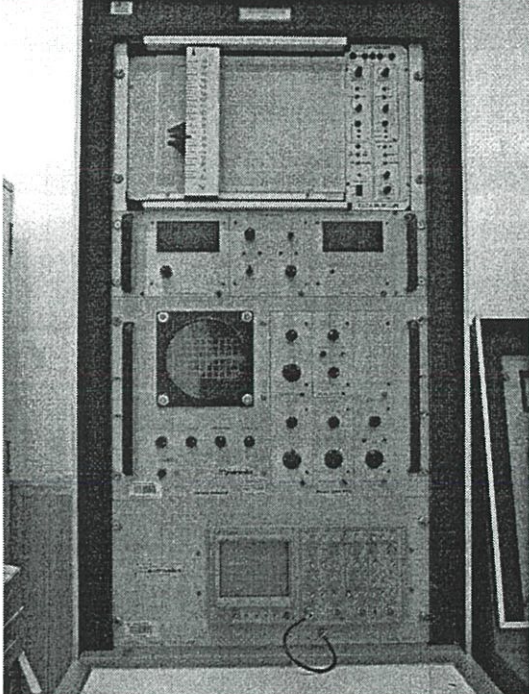
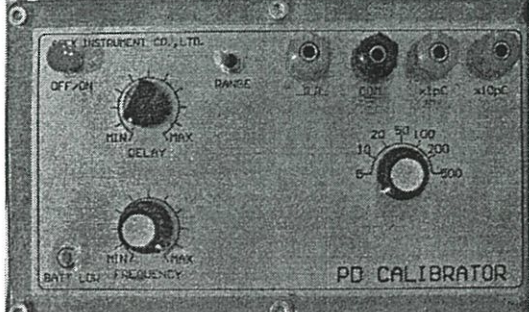
ตารางที่ ก.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

รูปถ่าย	รายละเอียด
	<p>High Voltage Control Unit HAEFELY TRENCH</p>
	<p>AC High Voltage Transformer Rated 100 kV/50 Hz 5 kVA MWB MESSWANDLER – BAU AG TESTING TRANSFORMER</p>
	<p>Standard Capacitor 100 pF 100 kV HAEFELY TRENCH</p>

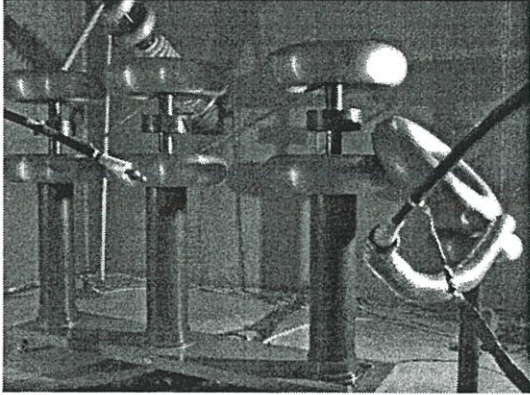
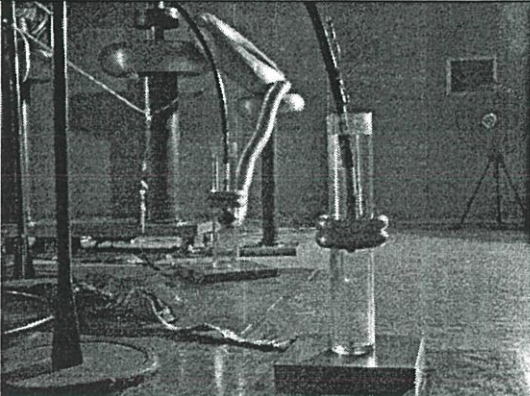
ตารางที่ ก.1 (ต่อ)

รูปถ่าย	รายละเอียด
	<p>Partial Discharge Analyzer TE-571 HAEFELY TRENCH</p>
	<p>Coupling Unit AKV 572 HAEFELY TRENCH</p>
	<p>PD Calibrator Type 451 HAEFELY TRENCH</p>
	<p>Cable Test Terminators 12/20 (24) kV 240 sq.mm.</p>

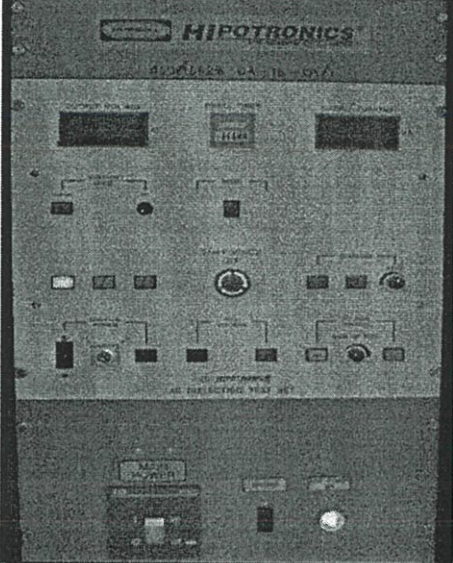
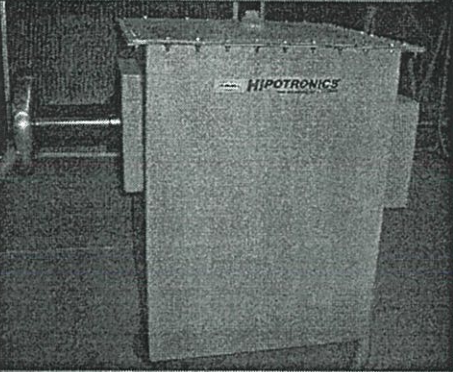

ตารางที่ ก.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ ณ บริษัท จรุงไทยไวร์เอนด์เคเบิล จำกัด

รูปถ่าย	รายละเอียด
	<p>H.V. Series Resonance Test System Hipotronics Model 7200-2000 SR</p>
	<p>Corona Detector Hipotronics Model CDO 77 A</p>
	<p>PD Calibrator APEX Instrument CO. , LTD</p>

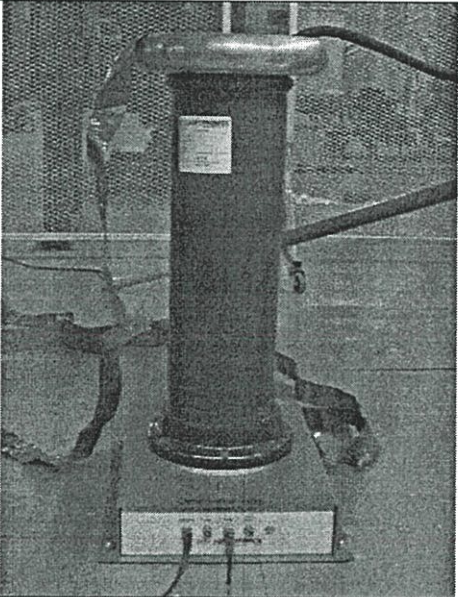
ตารางที่ ก.2 (ต่อ)

รูปถ่าย	รายละเอียด
	<p>High Voltage Filter Hipotronics 4.0 nF 200 kV 50/60 Hz</p>
	<p>Cable Test Terminators 36 kV 800 sq.mm.</p>

ตารางที่ ก.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ ณ ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

รูปถ่าย	รายละเอียด
	<p>H.V. Test System Hipotronics</p>
	<p>High Voltage Test Transformer Rated 75 kV 40 kVA</p>
	<p>PD Calibrator Type 451 HAEFELY TRENCH</p>

ตารางที่ ก.3 (ต่อ)

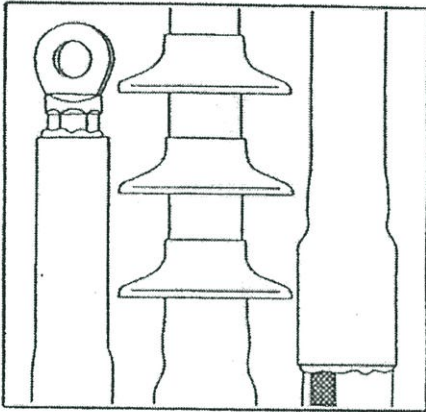
รูปถ่าย	รายละเอียด
	<p>Hipotronics CIC-LV 100 pF</p>
	<p>Coupling Capacitor 1 nF Voltage 100 kV 50/60 Hz</p>
	<p>PD Detector Hipotronics Model DDX - 9101</p>

ภาคผนวก ข.

รายละเอียดข้อต่อสายของ Heat Shrinkable Cable Termination

tyco Electronics

ELECTRICAL
PRODUCTS . DIVISION



Installation Instruction
ESD 1363 9/94

Terminations for
Screened Single Core
Plastic and Rubber
Insulated Cables
7.2 kV to 36 kV
without Armour

Before Starting

Check to ensure that the kit you are going to use fits the cable.

Refer to the kit label and the title of the installation instruction.

It is possible that components or work steps have been improved since you last installed this product.

Carefully read and follow the steps in the installation instruction.

General Instructions

Use a propane (preferred) or butane gas torch.

Adjust the torch to obtain a soft blue flame with a yellow tip. Pencil-like blue flames should be avoided.

Keep the torch aimed in the shrink direction to preheat the material.

Keep the flame moving continuously to avoid scorching the material.

Clean and degrease all parts that will come into contact with adhesive.

If a solvent is used follow the manufacturer's handling instructions.

Tubing should be cut smoothly with a sharp knife leaving no jagged edges.

Start shrinking the tubing at the position recommended in the instruction.

Ensure that the tubing is shrunk smoothly all round before continuing along the cable.

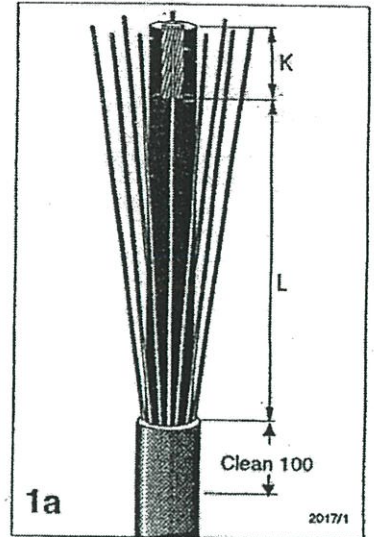
Tubing should be smooth and wrinkle free with inner components clearly defined.

Cable Preparation

A Cable with wire shield

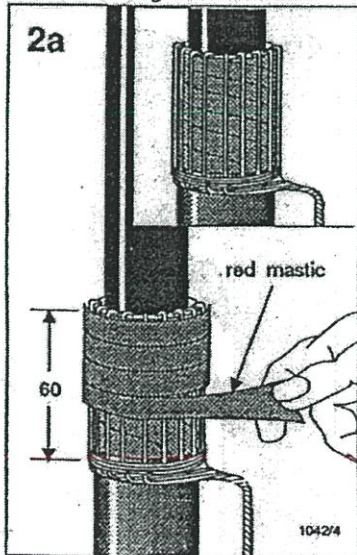
Table 1

Max. system voltage for cable [kV]	L	L	K
	indoor [mm]	outdoor [mm]	
7,2	150	200	according
12/17.5	230	300	to depth of connector
24	270	350	barrel hole + 5 mm
36	370	500	

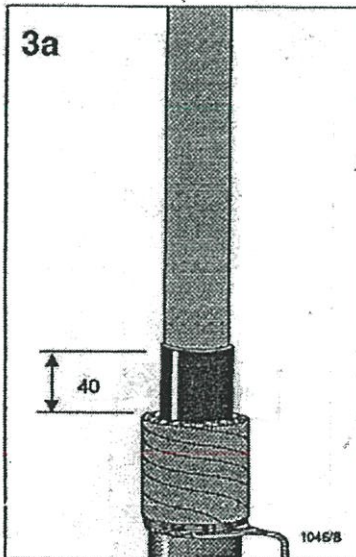


Cut the cable to the required length. Remove the overshoot to the dimension $L + K$ in table 1. Clean and degrease the end of the overshoot for about 100 mm.

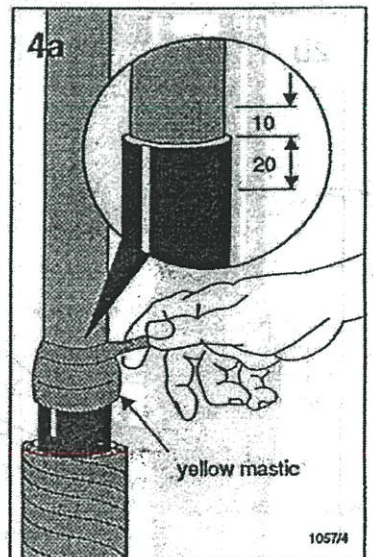
Wrap one layer of mastic (red) over the shielding wires for 60 mm as shown in the drawing. Bend the shielding wires back onto the overshoot. Avoid crossing the individual wires. Fix the wires with a wire binder 60 mm from the end of the overshoot. Gather the shielding wires together to form an earth lead. Wrap a second layer of sealant tape over the shielding wires for 60 mm.



Thoroughly remove the core screen to within 40 mm of the overshoot cut. The surface of the insulation should be free from all traces of conductive material. Smooth out any irregularities. Note: Do not nick the insulation.



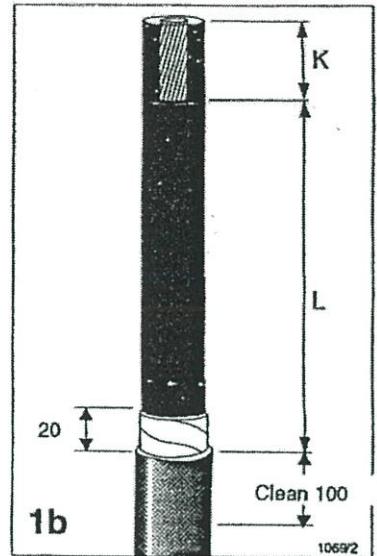
Wrap the mastic strip (yellow) around the end of the core screen. Cover 20 mm of the core screen and continue along the insulation for 10 mm. Stretch the strip to half of its original width to achieve a fine, thin edge onto the insulation.



B Cable with metal tape shield

Table 2

Max. system voltage for cable [kV]	L		K
	indoor [mm]	outdoor [mm]	
7,2	150	200	according
12/17.5	230	300	to depth of connector
24	270	350	barrel hole + 5 mm
36	370	500	

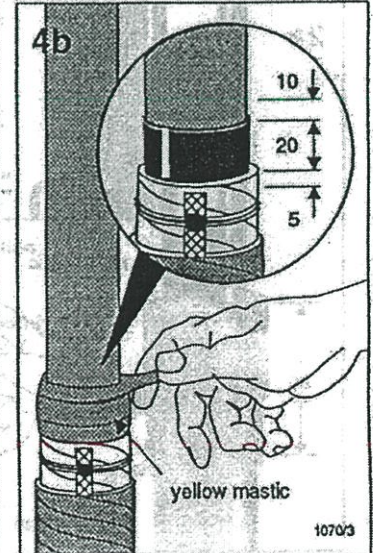
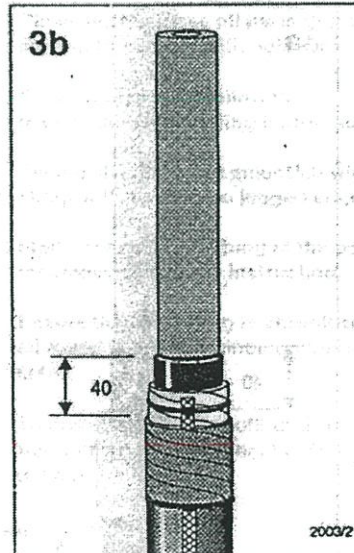
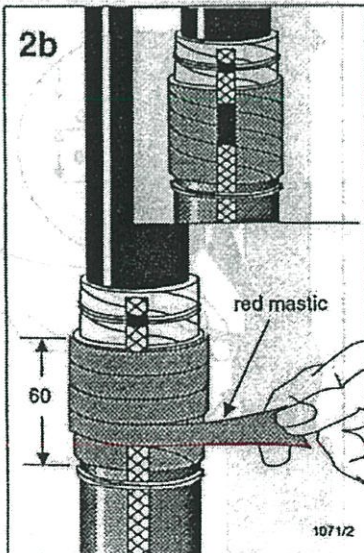


Cut the cable to the required length. Remove the overshath to the dimension $L + K$ in table 2. Remove the metal tape shield to within 20 mm of the overshath cut. Clean and degrease the end of the overshath for about 100 mm.

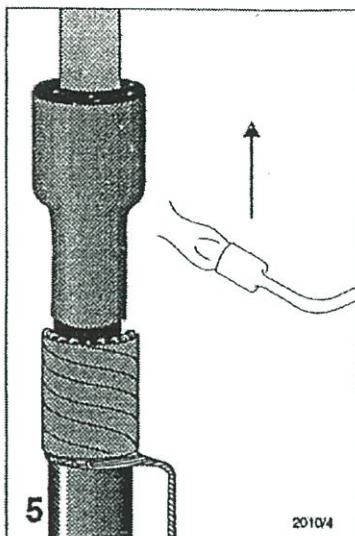
Wrap one layer of mastic (red) over the earth lead and overshath for 60 mm as shown in the drawing. Bind and solder an earth lead to the metal tape shield (or attach the earth lead by any other equivalent method). Fill the braid with solder to form a 30 mm moisture block. Fix the earth braid with a second wire binder 60 mm from the end of the overshath.

Thoroughly remove the core screen to within 40 mm of the overshath cut. The surface of the insulation should be free from all traces of conductive material. Smooth out any irregularities. Note: Do not nick the insulation.

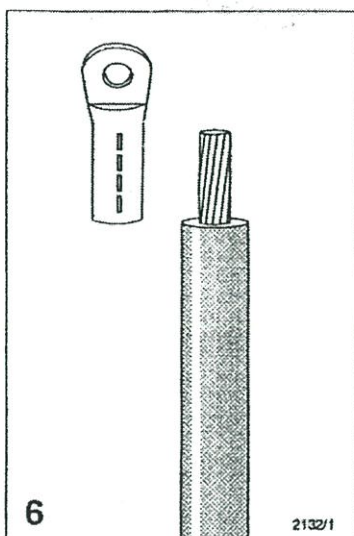
Wrap the mastic strip (yellow) around the end of the tape shield. Cover 5 mm of the tape shield and continue along the insulation for 10 mm. Stretch the strip to half of its original width to achieve a fine, thin edge onto the insulation.



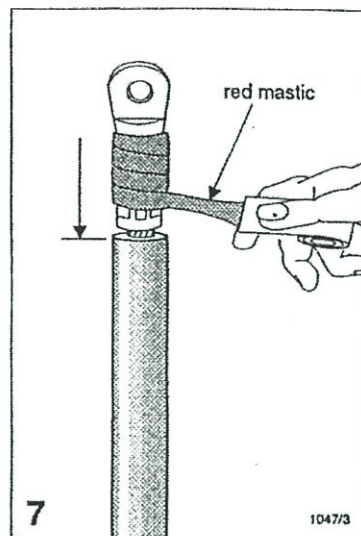
Completion of Termination



5 Place the stress control tubing (black) over the core and position it so that it is level with the oversheath cut. Shrink down starting at the bottom and working towards the core end.



6 Cut back the insulation according to dimension $K = \text{depth of cable lug barrel hole} + 5 \text{ mm}$. Install the cable lug. Clean and degrease the core insulation and the lug.

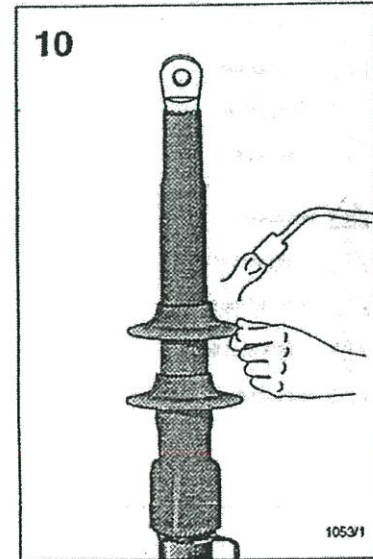
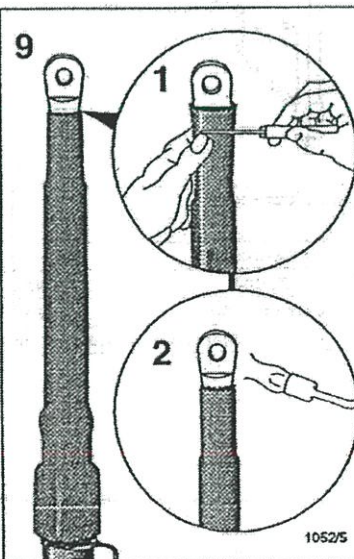
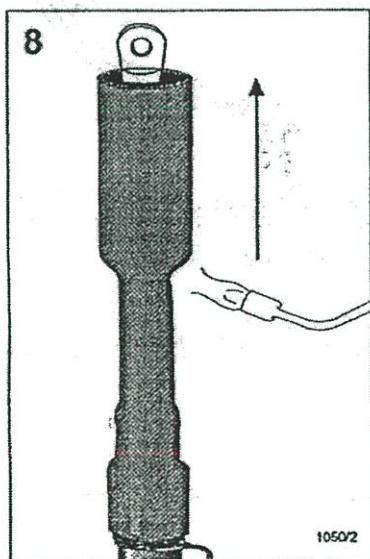


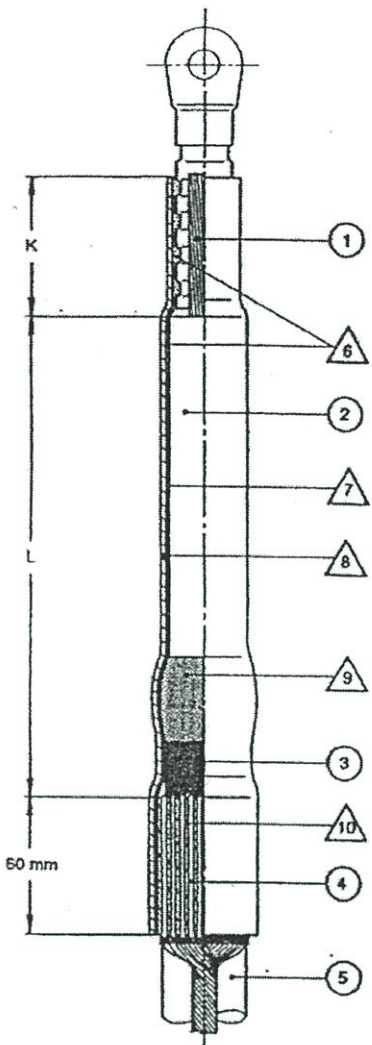
7 Wrap the red mastic around the barrel of the cable lug. Stretch the tape to half of its width and apply with half overlap. Use the remaining sealant (red) to fill in the space between the core insulation and the cable lug to leave a smooth transition.

Slide the tubing (red) over the core, level with the wire binder. Shrink down the tubing starting at the oversheath end working towards the cable lug.

Cut the tubing back onto the cable lug barrel if necessary. Postheat the palm of the cable lug until a bead of mastic is seen around the top of the tubing. Indoor termination up to 17.5 kV completed. Allow the termination to cool before applying any mechanical strain.

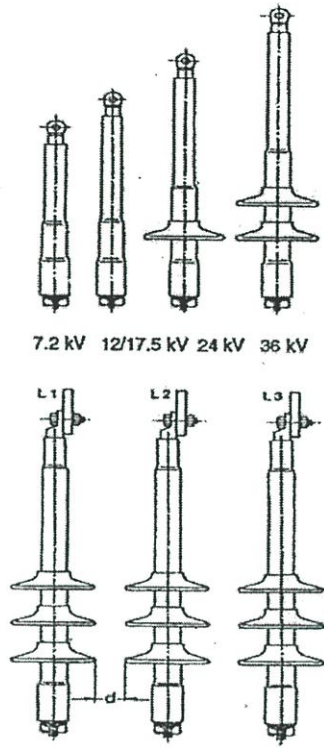
For indoor terminations above 17.5 kV and all outdoor terminations shrink the skirts into place at the positions shown in the drawing on the next page.



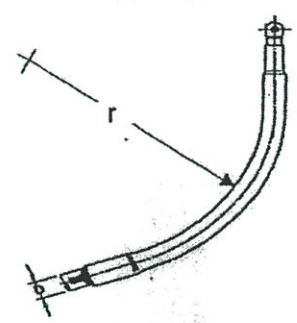
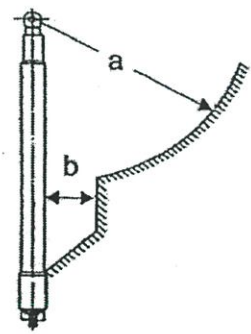
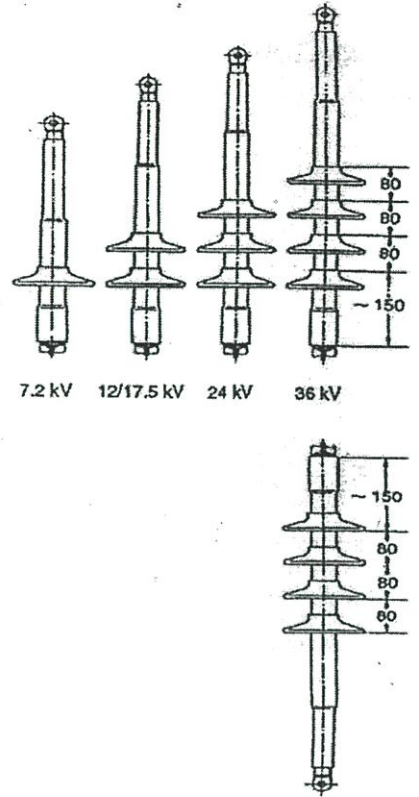


- ① conductor
- ② insulation
- ③ core screen
- ④ metal shield
- ⑤ oversheath
- △6 red mastic
- △7 stress control layer
- △8 non-tracking tubing
- △9 yellow mastic
- △10 red mastic

indoor



outdoor



Min. clearances	Max. system voltage (kV)				
	7,2	12	17,5	24	36
a air clearance	as for local specifications				
b ph/ground [mm]	10	15	20	25	35
d between skirts [mm]	10	10	15	20	25
r min. bending radius = 15xD, before bending heat cable up to approx. 70° C					

ภาคผนวก ก.

ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

ปฐิภาณ เกิดลาภ ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล ธนากร น้ำหอมจันทร์ พงษ์สวัสดิ์ ฤทธิภูมิ และ อติกร เสรีพัฒนานนท์, “การออกแบบสร้างขั้วต่อสายแบบ Stress cone เพื่อใช้ในการทดสอบหาดิซาร์จบางส่วนในสายเคเบิลใต้ดินแรงดันสูง”, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 30, 25-26 ตุลาคม 2550, หน้า 257-260.



The EECON-30 Conference Joins the Eightieth Birthday Anniversary

Celebration of His Majesty the King Bhumibol Adulyadej

30th Electrical Engineering Conference

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 30

หนังสือรวมบทความที่นำเสนอในการประชุม เล่ม 1

- ไฟฟ้ากำลัง (PW)
- อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (PE)
- โฟโตนิกส์ (PH)
- คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ (CP)

Volume I

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
KING MONKUT'S UNIVERSITY OF TECHNOLOGY THONBURI

โดย

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม
ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุมและเครื่องมือวัด ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ณ โรงแรมเฟลิกซ์ ริเวอร์แคว รีสอร์ท กาญจนบุรี

25 - 26 ตุลาคม 2550



FACULTY OF ENGINEERING
KMUTT
EECON - 30



การออกแบบสร้างขั้วต่อสายแบบ Stress cone เพื่อใช้ในการทดสอบหาดีสชาร์จบางส่วน ในสายเคเบิลใต้ดินแรงดันสูง

A Design and Construction of Stress Cone Terminator for Partial Discharge Measurement of High Voltage Underground Cable

ปฏิภาณ เกิดตาก* ศิริวัฒน์ โพธิ์เวชกุล* ชนากกร น้าหอมจันทร์** พงษ์สวัสดิ์ คชภูมิ** อติกร เสร้พัฒนานนท์**

*ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง คลองกรู้ง ลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

**สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย คลอง 5 รังสิต-นครนายก ธัญบุรี ปทุมธานี 12110

โทร. 0-2326-4550, โทรสาร 0-2326-4550, E-mail: patiphan@cau.ac.th, kpsiriwa@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการศึกษาและออกแบบสร้างขั้วต่อสายแบบ stress cone เพื่อใช้ทดสอบหาดีสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิลใต้ดินแรงดันสูง พิกัด 12/20(24) กิโลโวลต์ ขนาด 240 ตารางมิลลิเมตร โดยใช้ซูเปอร์ลีนไนลอนกลึงขึ้นรูปสำหรับควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้า ซึ่งควบคุมแบบ capacitive stress control บริเวณปลายสายเคเบิล โดยนำระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์มาใช้ในการจำลองหาขนาดของ stress cone และการกระจายของสนามไฟฟ้า โดยขั้วต่อสายแบบ stress cone ที่ออกแบบสร้างมีความยาวเพียง 12 เซนติเมตร มีขนาดสั้นกว่าขั้วต่อสายแบบทฤษฎีที่เหมาะสม ถึง 40 เปอร์เซ็นต์ และไม่ต้องใช้ฉนวนควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้า สามารถทดสอบหาดีสชาร์จบางส่วนได้ใกล้เคียงกับขั้วต่อสายแบบทฤษฎีที่เหมาะสม และใช้ในการทดสอบหาดีสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิลได้ตามมาตรฐาน IEC 60270 เนื่องจากขั้วต่อสายมีขนาดเล็ก ใช้งานง่าย ต้นทุนการสร้างต่ำ ใช้ระยะเวลาในการปกสายเคเบิลที่สั้น เป็นการลดความถี่เปลี่ยนสายเคเบิลจากการทดสอบ

คำสำคัญ: ดีสชาร์จบางส่วน, ขั้วต่อสายเคเบิล, สายเคเบิลใต้ดิน

ABSTRACT

This research objective is to study and design the stress cone type terminator in order to test the partial discharge of the high voltage underground cable with the 12/20(24) kV and 240 square millimeters range. The material used in this research is superlene nylon for controlling the electric stress at the end of the cable by Capacitive Stress Control method. The finite element method is applied to simulate the size of stress cone and to analyze the distribution of electric field. The length of the stress cone type terminator is only 12 centimeters which is shorter than the optimized oil tube terminator about 40 %. Moreover, without the insulation to control the electric stress, the testing result is almost the same as the testing result of optimized oil tube terminator. The stress cone type terminator can be used to test for the partial discharge according to IEC 60270. The advantages of this

cable terminator are compact size, easy using, low cost and the shorter time for cable peeling. Therefore, the cost of cable can be decreased.

Keywords: partial discharge, cable terminator, stress cone, underground cable

1. บทนำ

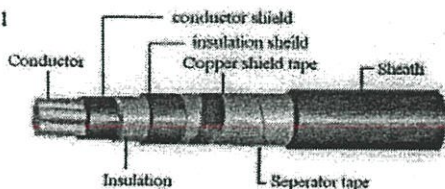
ฉนวนไฟฟ้าได้รับการพัฒนาอย่างรวดเร็วทั้งชนิดและคุณภาพ โดยปัญหาที่พบบ่อยมากที่สุด คือ ปัญหาดีสชาร์จบางส่วน [1] จากปัญหาดังกล่าว พบว่าขั้วต่อสายเคเบิลมีความจำเป็นสำหรับการทดสอบสายเคเบิลเป็นอย่างมาก เนื่องจากขั้วต่อสายจะช่วยควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้า ป้องกันการเกิดการวาวไฟตามผิวฉนวนและป้องกันการเกิดเบรคควาร์ของฉนวนในการทดสอบ [2]

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า มีการออกแบบและสร้างขั้วต่อสายเคเบิลสำหรับทดสอบหาดีสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิลเพื่อทดแทนการนำเข้าจากต่างประเทศมีราคาสูง [3-4] งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ พัฒนาการออกแบบ และสร้างขั้วต่อสายสำหรับทดสอบหาดีสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิล โดยใช้ stress cone ซึ่งใช้วิธีการควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้าแบบ capacitive stress control [2] สำหรับสายเคเบิลใต้ดินแรงดันสูงฉนวน XLPE พิกัด 12/20(24) kV 240 sq.mm. โดยมีวัตถุประสงค์ที่จะให้สะดวกในการใช้งาน ลดความถี่เปลี่ยนฉนวนที่นำมาควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้าในการทดสอบ และมีต้นทุนการสร้างต่ำลง

2. ทฤษฎีและหลักการ

2.1 สายตัวนำในระบบสายใต้ดิน [4]

สายตัวนำที่ใช้ในระบบแรงดัน 12 และ 24 kV ซึ่งเป็นสายทองแดงไม่ฉนวน XLPE ส่วนประกอบของสายเคเบิลใต้ดิน แสดงดังรูปที่ 1

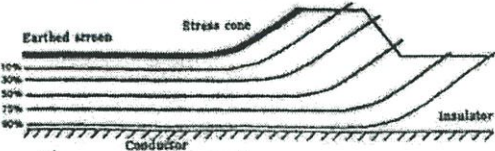


รูปที่ 1 ส่วนประกอบของสายเคเบิลแรงสูงฉนวน XLPE

2.2 การควบคุมสนามไฟฟ้าของสายเคเบิล [3]

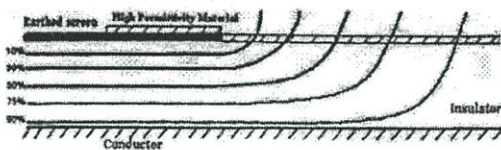
การปกกั้นกึ่งตัวนำออกนอกเพื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างตัวนำ และกราวด์ ส่งผลให้สนามไฟฟ้าที่ขั้วกึ่งตัวนำออกเกิดความไม่สม่ำเสมอสูง จึงต้องควบคุมสนามไฟฟ้าให้มีความไม่สม่ำเสมอที่น้อยที่สุด

ผลของการที่สนามไฟฟ้าเบี่ยงเบนนี้สามารถแก้ไขได้โดยการการทำ stress cone แสดงดังรูปที่ 2 หรืออาจใช้วัสดุฉนวนที่มีค่าเปอร์มิตติวิตีสูงๆ ทำหน้าที่แทนก็ได้ แสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 2 การควบคุมสนามไฟฟ้าแบบ Capacitive stress control

โดยใช้ Stress cone

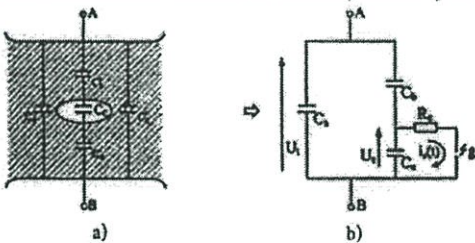


รูปที่ 3 การควบคุมสนามไฟฟ้าแบบ Refractive stress control โดยใช้วัสดุฉนวนที่มีค่าเปอร์มิตติวิตีสูง

2.3 ดิสชาร์จบางส่วน

2.3.1 วงจรสมมูลของดิสชาร์จบางส่วน [5]

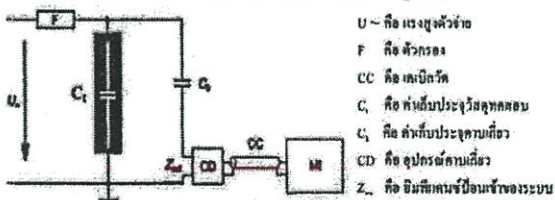
ดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นในเนื้อฉนวนไม่สามารถสังเกตเห็นได้ด้วยตา ฉะนั้น เพื่อให้สามารถวัดค่าดิสชาร์จบางส่วนในฉนวนได้ จึงใช้วงจรสมมูลสำหรับฉนวนที่มีโพรงก๊าซ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์การเกิดและหาปริมาณดิสชาร์จบางส่วนภายใน วงจรสมมูลแสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 วงจรสมมูลของดิสชาร์จบางส่วนภายใน

2.3.2 การต่อวงจรระบบวัด PD ในวงจรแบบวิธีตรง (straight detection circuit) ตามมาตรฐาน IEC 60270 แสดงดังรูปที่ 5

การต่อวงจรระบบวัด PD ในวงจรแบบวิธีตรง (straight detection circuit) ตามมาตรฐาน IEC 60270 แสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 วงจรทดสอบตรวจวัด PD แบบตรง

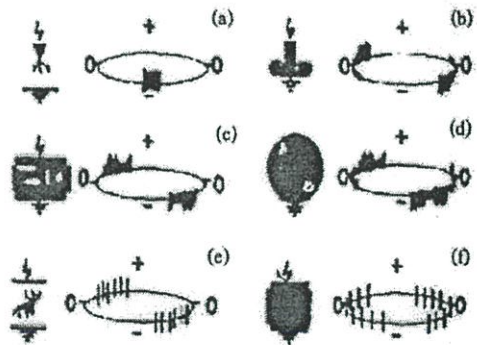
- U - คือ แรงดันสูงจ่าย
- F คือ ตัวกรอง
- CC คือ เกล็ดวัด
- C₁ คือ ค่าเทียบประจุวัสดุทดสอบ
- C₂ คือ ค่าเทียบประจุความถี่สูง
- CD คือ อุปกรณ์ตามเนื้อ
- Z_c คือ อิมพีแดนซ์ป้อนเข้าของระบบ

วงจรในรูปที่ 5 อุปกรณ์ค่าเก็บเกี่ยว CD คืออุปกรณ์กับ C₂ ที่มีศักย์เป็นดิน ซึ่งเป็นแบบที่ใช้กันมากในทางปฏิบัติ เนื่องจากไม่เสี่ยงต่อการเกิดเบรคควาร์ เพราะทราบค่าแรงดันที่กำหนดของ C₂

2.3.3 การจำแนกชนิดของดิสชาร์จบางส่วน [6]

โดยทั่วไปสามารถจำแนกชนิดของดิสชาร์จแบ่งออกเป็น 6 ชนิด และลักษณะสัญญาณของดิสชาร์จบางส่วน แสดงดังรูปที่ 6

- a) Corona Discharge เกิดขึ้นบริเวณปลายแหลมหรือขอบคมที่อยู่บน ฉนวนก๊าซหรือฉนวนเหลว
- b) Surface Discharge เกิดขึ้นที่ผิวของฉนวนที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าตามแนวผิวสูง
- c) Internal Discharge เกิดขึ้นในโพรงหรือฟองก๊าซในเนื้อฉนวน
- d) Electric tree เกิดจากขบคมของตัวนำหรือจากโพรงหรือฟองก๊าซในฉนวนแข็ง
- e) Floating Part เกิดขึ้นในกรณีที่มีโลหะที่อยู่ใกล้ฉนวนทดสอบไม่ให้เกิดการต่อลงกราวด์
- f) Contact noise เกิดขึ้นจากการต่อกราวด์วงจรทดสอบไม่ดี



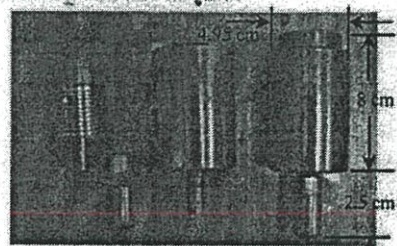
รูปที่ 6 ลักษณะสัญญาณของดิสชาร์จบางส่วนโดยทั่วไป

3. การออกแบบ และการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้า

3.1 ขั้วต่อปลายสาย

การออกแบบขั้วต่อปลายสายต้องคำนึงถึงขนาดของตัวนำ และฉนวนของสายเคเบิลขณะทำการทดสอบ โดยอ้างอิงขนาดของตัวนำ และความหนาของฉนวนของสายเคเบิล ตามมาตรฐาน IEC 60502-2 [7]

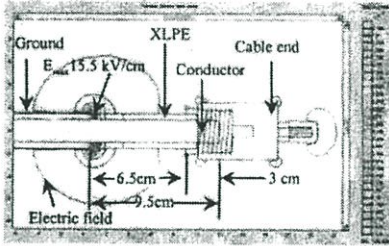
ขั้วต่อปลายสายที่ออกแบบ แสดงดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 ขั้วต่อปลายสาย

3.2 ระยะปกสายเคเบิล

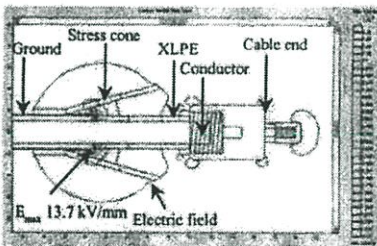
พิจารณาจากแรงดันทดสอบ และระยะห่างระหว่างตัวนำกับกราวด์ โดยแรงดันสูงสุดที่ใช้ทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60502-2 [7] ในระบบสาย 12 kV คือ 2U₀ เท่ากับ 24 kV ส่วนระยะการปกสาย ได้จากการจำลองการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าโดยระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ช่วยในการวิเคราะห์การกระจายความเครียดสนามไฟฟ้า โดยใช้โปรแกรม FEMLAB 3.1 ได้ระยะการปกสายเท่ากับ 6.5 เซนติเมตร โดยพิจารณาความเครียดสนามไฟฟ้าระหว่างปลายสาย และกราวด์ ที่จะทำให้เกิดการเบรกดาวน์ [8] เมื่อพิจารณาร่วมกับขนาดของปลายสาย ดังนั้นระยะการปกสายทั้งหมด เท่ากับ 9.5 เซนติเมตรแสดงดังรูปที่ 8



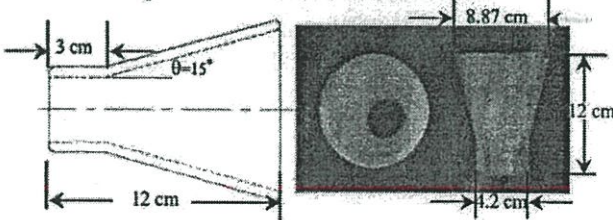
รูปที่ 8 สนามไฟฟ้าบริเวณปลายสายเคเบิล

3.3 ขั้วต่อสายแบบ Stress cone

เนื่องจากการออกแบบขั้วต่อสายแบบ stress cone ไม่มีมาตรฐานรองรับ จึงใช้การจำลองการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าเพื่อหาขนาดของ stress cone ที่ช่วยควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้าได้เหมาะสม ผลการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าและขนาดของขั้วต่อสายแบบ stress cone แสดงดังรูปที่ 9 และ 10 โดยเลือกใช้ซูเปอร์อินโนวอลถึงขึ้นรูปเป็นขั้วต่อสายแบบ stress cone เนื่องจากซูเปอร์อินโนวอลเป็นวัสดุ ที่แข็ง เหนียว สามารถขึ้นรูปได้ง่ายและมีค่าเปอร์นิคิตีต่ำ



รูปที่ 9 ผลการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้า

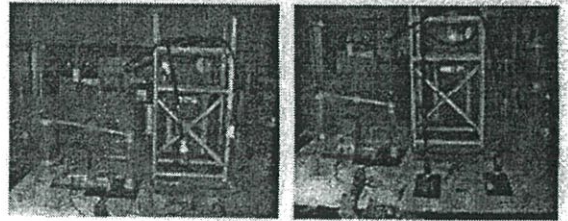


รูปที่ 10 ขนาดของขั้วต่อสายแบบ Stress cone

จากการออกแบบและการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าพบว่าขั้วต่อสายแบบ stress cone ที่ได้ออกแบบสร้างสามารถลดความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณที่ปกสายได้ถึง 1.8 kV/mm และมีความยาวเพียง 12 เซนติเมตร

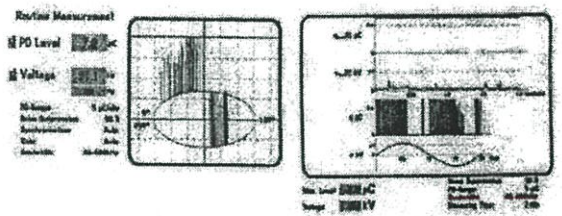
4. ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

ทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิลความยาว 15 เมตร ตามมาตรฐาน IEC 60502-2 [7] โดยป้อนแรงดันทดสอบที่ 2U₀ คือ 24 kV เป็นเวลา 10 วินาที แล้วลดแรงดันลงที่ 1.732U₀ คือ 20.78 kV ทำการตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิล โดยใช้เครื่องวัดดิสชาร์จบางส่วน HAEFELY TRENCH รุ่น TE-S71 ตามมาตรฐาน IEC 60270 [9]

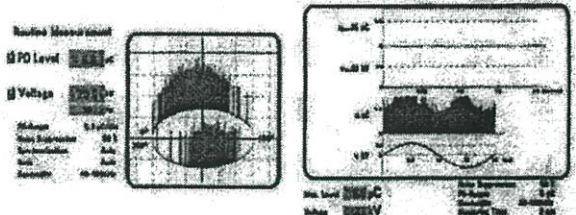


a) ขั้วต่อสายแบบ stress cone b) ขั้วต่อสายแบบ optimize oil tube

รูปที่ 11 การทดสอบตรวจวัด PD



รูปที่ 12 ผลการตรวจวัด PD โดยใช้ขั้วต่อสายแบบ stress cone



รูปที่ 13 ผลการตรวจวัด PD โดยใช้ขั้วต่อสายแบบ optimize oil tube

จากรูปที่ 12 ผลการทดสอบโดยใช้ขั้วต่อสายแบบ stress cone มี PD 7.2 pC โดยเป็นดิสชาร์จบางส่วนภายใน ดังรูปที่ 6 c) และจากรูปที่ 13 ผลการทดสอบโดยใช้ขั้วต่อสายแบบทฤษฎีชนิดที่เหมาะสม (oil tube terminator) [4] มี PD ที่ 6.6 pC โดยเป็นดิสชาร์จบางส่วนภายใน และ โครนาดิสชาร์จ ดังรูปที่ 6 a) และ 6 c) จากการทดสอบพบว่าขั้วต่อสายแบบ stress cone มีค่า PD มากกว่าขั้วต่อสายแบบทฤษฎีชนิดที่เหมาะสม (oil tube terminator) เพียง 0.6 pC. เนื่องจากการดิสชาร์จภายในระหว่างขั้วต่อสายแบบ Stress cone และฉนวนสายเคเบิล

5. สรุป

การออกแบบสร้างขั้วต่อสายแบบ stress cone สำหรับการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิลใต้ดินแรงดันสูงที่กีด 12/20(24) kV ขนาด 240 sq.mm. โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ช่วยในการออกแบบและการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าจะพบว่าขั้วต่อสายแบบ stress cone ที่ได้ออกแบบสร้างมีความยาวเพียง 12 เซนติเมตร ซึ่งมีขนาดที่สั้นกว่าขั้วต่อสายแบบทฤษฎีที่มีที่เหมาะสม (oil tube terminator) [4] ถึง 40 % และไม่ต้องใช้ฉนวนที่นำมาควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้าที่สามารถทดสอบตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วนได้ตามมาตรฐาน IEC 60270 [9] จากการทดสอบเปรียบเทียบระหว่างสายเคเบิลที่ใช้ขั้วต่อสายแบบ stress cone และขั้วต่อสายแบบทฤษฎีที่มีที่เหมาะสม (oil tube terminator) [4] ผลจากการทดสอบเป็นที่ยอมรับได้ โดยขั้วต่อสายแบบ stress cone ที่สร้างขึ้นตรวจวัด PD มากกว่าขั้วต่อสายแบบทฤษฎีที่มีที่เหมาะสม (oil tube terminator) [4] เพียง 8.33 % เนื่องจากอาจมีสาเหตุจากการดิสชาร์จภายในระหว่างขั้วต่อสายแบบ stress cone กับฉนวนสายเคเบิลที่ยังไม่สมบูรณ์ ซึ่งขั้วต่อสายแบบ stress cone สามารถใช้ในการทดสอบตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิลใต้ดินแรงดันสูงได้ทั้งในห้องทดสอบและในสถานที่ติดตั้งได้ เนื่องจากขั้วต่อสายที่สร้างขึ้นมีขนาดเล็กเคลื่อนย้ายสะดวก และใช้ระยะเวลาในการปอกสายเคเบิลที่สั้น เป็นการลดความสิ้นเปลืองสายเคเบิลจากการทดสอบ

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี รวมทั้ง มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทดสอบงานวิจัยนี้เสร็จสุดลงไปได้อย่างดี

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] F.H. Kreuger, "Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment", New York, Butterworth & Co.(Publishers) Ltd,1989.
- [2] R. Bartnikas, K.D.Srivatava, "Power and Communication Cable Theory and Applications", Mc Graw Hill, 1999.
- [3] พร้อมศักดิ์ อภิรติกุล จงรักษ์ บุญแข็ง และ กนกพล นาคะวิวัฒน์, "ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูง XLPE สำหรับการทดสอบดิสชาร์จบางส่วน ตอนที่ 1: การออกแบบและสร้างขั้วต่อสายเคเบิล" การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 24, หน้า 77 - 82, 22 - 23 พฤศจิกายน 2544.
- [4] ธนากร น้าหอมจันทร์ ศิริวิวัฒน์ โทธิเวชกุล พร้อมศักดิ์ อภิรติกุล และศุภวุฒิ เนครโพธิ์แก้ว, "การออกแบบและสร้างขั้วต่อสายเคเบิลใต้ดินแรงดันสูงสำหรับทดสอบหาดิสชาร์จบางส่วนโดยใช้ทฤษฎีที่มีที่เหมาะสมและระเบียบวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์", การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 29, หน้า 217-220, 9-10 พฤศจิกายน 2549.

- [5] ตำรวจ สังข์สะอาด, "วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง", พิมพ์ครั้งที่ 1 (ฉบับปรับปรุง), จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ, พ.ศ. 2547.
- [6] E. Gulski, "Digital Analysis of Partial Discharge." IEEE Trans. Dielectric and Electric Insulation, Vol. 2, No.5, pp. 822-837, Oct. 1995.
- [7] "Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages from 1 kV ($U_m = 1.2$ kV) up to 30 kV ($U_m = 36$ kV) Part 2: Cables for rated voltages from 6 kV ($U_m = 7.2$ kV) up to 30 kV ($U_m = 36$ kV)" IEC Std. 60502-2/2005.
- [8] Siemens AG., "Electrical engineering handbook",1981.
- [9] "High-voltage test techniques Partial discharge measurements" IEC Std. 60270/2000.

ประวัติผู้เขียนบทความ



ปฏิภาน เกิดธาด จบการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย ปัจจุบันกำลังศึกษาต่อในระดับปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



ศิริวิวัฒน์ โทธิเวชกุล จบการศึกษาระดับปริญญาตรีและระดับปริญญาโท จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปัจจุบันดำรงตำแหน่งรองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สนใจงานวิจัยในด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง, ระบบไฟฟ้ากำลัง ด้านพลังงานทดแทน และการใช้ไอโซนเพื่อสิ่งแวดล้อม



ธนากร น้าหอมจันทร์ อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย จบการศึกษาวท.บ. จากมหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย ปัจจุบันกำลังศึกษาต่อในระดับปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



พงษ์สวัสดิ์ กชภูมิ อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย จบการศึกษาวท.บ. สาขาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร และ วท.บ. สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



อติร เสรีพัฒนานนท์ หัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย จบการศึกษาวท.บ. สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร และ วท.บ. สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ประวัติผู้เขียน



ชื่อ-นามสกุล	นายปฏิภาณ เกิดลาภ
วัน เดือน ปีเกิด	17 มกราคม 2522 ที่สุรินทร์
ที่อยู่	227 หมู่ 6 หมู่บ้านจารย์ ตำบลโคกตะเคียน อำเภอกาบเชิง จังหวัดสุรินทร์ 32210 โทร. 08-1697-9441
ประวัติการศึกษา	2545 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย
งานวิจัยที่ได้ตีพิมพ์	ปฏิภาณ เกิดลาภ ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล ธนากร น้ำหอมจันทร์ พงษ์สวัสดิ์ ฤทธิภูมิ และอดิกร เสรีพัฒนานนท์, “การออกแบบสร้างขั้วต่อ สายแบบ Stress cone เพื่อใช้ในการทดสอบหาคุณสมบัติบางส่วนในสาย เคเบิลใต้ดินแรงดันสูง”, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 30, 25 – 26 ตุลาคม 2550, หน้า 257-260.
ประสบการณ์ทำงาน	2545 - ปัจจุบัน อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย
งานวิจัยที่สนใจ	เทคโนโลยีทางวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง และการทดสอบคุณสมบัติบางส่วน ในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง