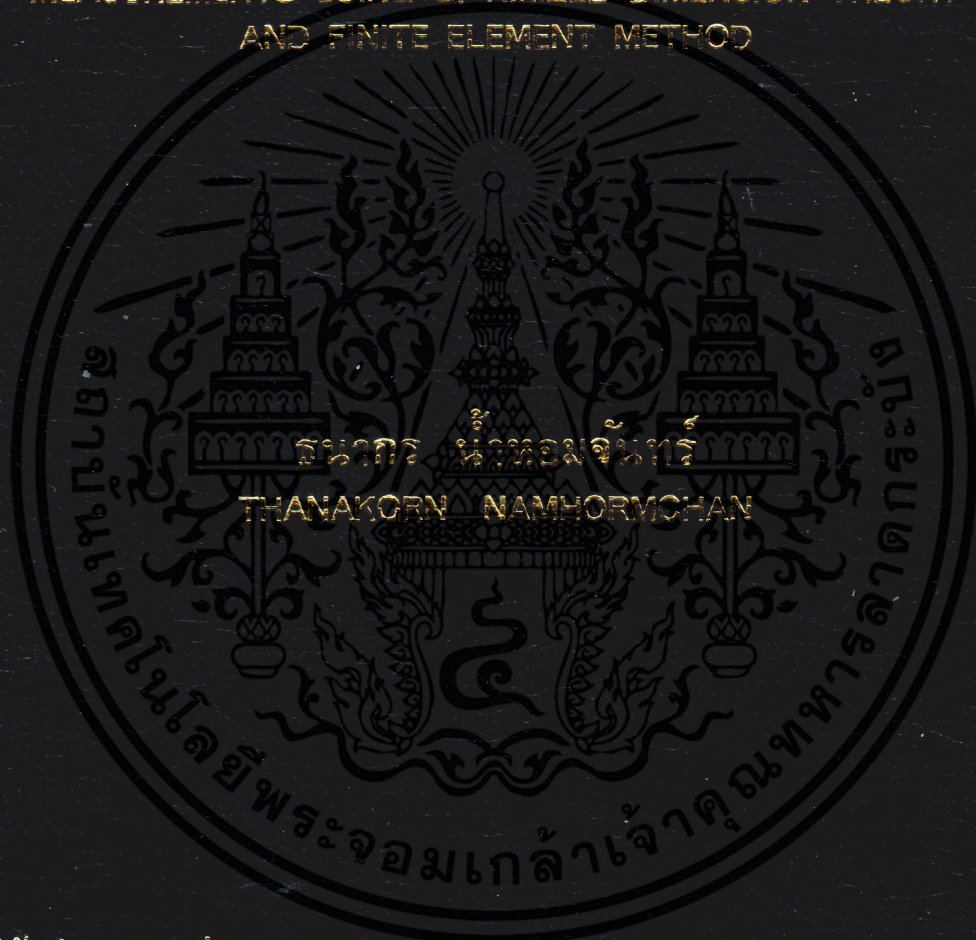


การออกแบบและสร้างหัวต่อสายเคเบิลใต้ดินแรงดันสูง  
สำหรับทดสอบพหุสสารบางส่วนโดยใช้ทฤษฎีมิติที่เหมาะสม  
และระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

DESIGN AND CONSTRUCTION OF HIGH VOLTAGE  
UNDERGROUND CABLE TERMINATORS FOR PARTIAL DISCHARGE  
MEASUREMENTS USING OPTIMIZED DIMENSION THEORY  
AND FINITE ELEMENT METHOD



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2551

KWITL-2008-EN-M-020-017

**สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง**

**การออกแบบและสร้างขั้วต่อสายเคเบิลใต้ดินแรงดันสูง  
สำหรับทดสอบหาดีสชาร์จบางส่วนโดยใช้ทฤษฎีมิติที่เหมาะสม  
และระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์**

**DESIGN AND CONSTRUCTION OF HIGH VOLTAGE  
UNDERGROUND CABLE TERMINATORS FOR PARTIAL DISCHARGE  
MEASUREMENTS USING OPTIMIZED DIMENSION THEORY  
AND FINITE ELEMENT METHOD**



T 0 7 9 8 4 0

ธนากร นำหอมจันทร์

THANAKORN NAMHORMCHAN

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน.....**79840**  
วัน,เดือน,ปี.....**18** ส.ย. 2551

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

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
บัณฑิตวิทยาลัย  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ.2551

**KMITL-2008-EN-M-020-017**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**DESIGN AND CONSTRUCTION OF HIGH VOLTAGE  
UNDERGROUND CABLE TERMINATORS FOR PARTIAL DISCHARGE  
MEASUREMENTS USING OPTIMIZED DIMENSION THEORY  
AND FINITE ELEMENT METHOD**



**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-020-017**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPYRIGHT 2008**

**SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**บัณฑิตวิทยาลัย**  
**สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง**  
**ใบรับรองวิทยานิพนธ์**

---

**หัวข้อวิทยานิพนธ์** การออกแบบและสร้างขั้วต่อสายเคเบิลใต้ดินแรงดันสูงสำหรับทดสอบหาทิศสร้างบางส่วนโดยใช้ทฤษฎีมิติที่เหมาะสมและระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์  
Design and Construction of High Voltage Underground Cable Terminators for Partial Discharge Measurements Using Optimized Dimension Theory and Finite Element Method

**นักศึกษา** นายชนกร น้าหอมจันทร์  
**รหัสประจำตัว** 46060703  
**ปริญญา** วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
**สาขาวิชา** วิศวกรรมไฟฟ้า  
**อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์** รศ.ศิริวัฒน์ โทษิเวชกุล

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.มณฑล	ลีลาจินดาไกรฤกษ์	
รศ.ดร.อานันท์วัฒน์	คุณากร	
ดร.บุญยัง	ปลั่งกลาง	
รศ.จงรักษ์	บุญเส็ง	
รศ.ศิริวัฒน์	โทษิเวชกุล	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ 17 ธันวาคม 2550 เวลา 14.00-16.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 3 ห้องประชุม 2

**บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว**  
  
**(รศ.ดร.รวีวรรณ ชินะตระกูล)**  
รักษาราชการแทนคณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....15.....เดือน.....กุมภาพันธ์.....พ.ศ. 2551.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งมอบไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบและสร้างขั้วต่อสายเคเบิลใต้ดินแรงดันสูง สำหรับทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วน โดยใช้ทฤษฎีมิติที่เหมาะสม และระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
นักศึกษา	นายชนากร น้าหอมจันทร์
รหัสประจำตัว	46060703
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2551
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ. ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสนอการออกแบบ และสร้างขั้วต่อสายเคเบิลใต้ดินแรงดันสูง พิกัด 12/20(24) กิโลโวลต์ ขนาด 240 ตารางมิลลิเมตร เพื่อใช้ในการทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วน โดยการคำนวณหามิติที่เหมาะสมของขั้วต่อสายซึ่งใช้ฉนวนน้ำมันในการควบคุมสนามไฟฟ้าบริเวณปลายสายเคเบิล ในงานวิจัยนี้ได้นำระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาใช้ในการจำลองหาความยาวของขั้วต่อสายและการกระจายของสนามไฟฟ้า โดยขั้วต่อสายเคเบิลที่ทำการออกแบบสร้างมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ยาว 20 เซนติเมตร ขั้วต่อสายเคเบิลที่ได้จากการออกแบบสามารถใช้ในการทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนได้ ตามมาตรฐาน IEC 60502-2 และ IEC 60270 ซึ่งมีต้นทุนการสร้างต่ำ และเคลื่อนย้ายได้สะดวก โดยผลจากการทดสอบขั้วต่อสายที่สร้างขึ้นมีดิสชาร์จบางส่วน 0.4 พิกโคคูลอมป์ ทั้งนี้สามารถนำไปใช้ทดสอบสายเคเบิลทั้งในห้องปฏิบัติการและในสถานที่ติดตั้งได้ในอนาคต

คำสำคัญ : ตรวจสอบดิสชาร์จบางส่วน, ขั้วต่อสายเคเบิล

<b>Thesis Title</b>	Design and Construction of High Voltage Underground Cable Terminators for Partial Discharge Measurements Using Optimized Dimension Theory and Finite Element Method	
<b>Student</b>	Mr. Thanakorn	Namhormchan
<b>Student ID.</b>	46060703	
<b>Degree</b>	Master of Engineering	
<b>Program</b>	Electrical Engineering	
<b>Year</b>	2008	
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc.Prof. Siritwat	Potivejkul

### ABSTRACT

This thesis presents the design and construction of high voltage underground cable terminators with a rated voltage of 12/20(24) kV and a cross section area of 240 sq.mm. for partial discharge measurements. The design is based on the optimum dimension with the mineral oil for electric stress control. The length of terminator and an electric stress distribution are simulated using Finite Element Method (FEM). The terminators have a diameter of 5 cm. and a length of 20 cm. Furthermore, the cable terminator is employed in measuring the partial discharges according to IEC standards, No.60502-2 and No.60270, with low cost and mobility in uses. It is found that the PD level of terminator results obtained form tests is 0.4 pC. In the future, The developed terminator can be applicable for laboratory and on-site test.

Keyword : Partial Discharge Measurement, Cable Terminator

# กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้อย่างดี ด้วยคำแนะนำจาก รศ. ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ข้าพเจ้ารู้สึกทราบบ้างในความอนุเคราะห์จากท่าน และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุก ๆ ท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้กับข้าพเจ้า

ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือ อุปกรณ์ และเอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ บริษัท จรุงไทยไวร์แอนด์เคเบิล จำกัด (มหาชน) ที่เอื้อเฟื้อสายเคเบิล อุปกรณ์ ข้อมูลและสถานที่ทดสอบ รวมทั้งคำแนะนำด้านมาตรฐานการทดสอบ

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่เอื้อเฟื้ออุปกรณ์ และสถานที่ทดสอบ

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณครอบครัวของข้าพเจ้าที่ให้กำลังใจ กำลังทรัพย์ และให้การสนับสนุนในทุกเรื่องๆ ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

ธนากร น้าหอมจันทร์

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	2
1.5 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการแบบพื้นฐาน.....	3
1.6 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.7 ขั้นตอนการศึกษา.....	3
บทที่ 2 ดิสซาร์เจียบางส่วน.....	5
2.1 การตรวจจับดิสซาร์เจียบางส่วน.....	5
2.1.1 ดิสซาร์เจียบางส่วน PD คืออะไร.....	5
2.1.2 ผลกระทบของดิสซาร์เจียบางส่วน.....	6
2.1.3 สื่อสัญญาณที่ใช้ตรวจจับ PD.....	6
2.1.4 วงจรสมมูลของดิสซาร์เจียบางส่วน.....	7
2.1.5 ประจุที่ปรากฏและประจุที่วัดได้.....	9
2.1.6 วงจรพื้นฐานการวัด PD.....	11
2.1.7 การต่อวงจรระบบวัด PD ในวงจรทดสอบ.....	14
2.1.8 คุณลักษณะของระบบวัด.....	15
2.1.9 เครื่องวัด PD.....	15
2.1.10 การเปรียบเทียบเครื่องตรวจจับ PD ในวงจรทดสอบ.....	18
2.1.11 การแสดงผลดิสซาร์เจียบางส่วน.....	19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.1.12 เครื่องตรวจจับ PD แบบใช้คอมพิวเตอร์เป็นฐาน.....	19
2.2 เทคนิคการวัดคิซาร์จบางส่วน.....	21
2.2.1 การวัดคิซาร์จบางส่วนสำหรับวัสดุทดสอบทั่วไป.....	21
2.2.2 การวัดคิซาร์จบางส่วนสำหรับสายเคเบิล.....	23
2.3 เทคนิคการลดสัญญาณรบกวน.....	26
2.3.1 สัญญาณรบกวนที่มีผลกระทบในการวัดคิซาร์จบางส่วน.....	26
2.3.2 การลดสัญญาณรบกวน.....	27
2.4 การจำแนกชนิดของคิซาร์จบางส่วน.....	29
<b>บทที่ 3 ทฤษฎีและการออกแบบสร้างขั้วต่อสายเคเบิลใต้ดินแรงดันสูงสำหรับทดสอบหา</b>	
<b>คิซาร์จบางส่วน.....</b>	<b>35</b>
3.1 บทนำ.....	35
3.2 โครงสร้างของสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวน XLPE.....	35
3.3 การฉนวนเคเบิล.....	38
3.4 ความคงทนของฉนวนทางไฟฟ้า.....	40
3.5 สนามไฟฟ้าในฉนวนเคเบิลแรงสูง.....	41
3.6 มิติที่เหมาะสมของทรงกระบอกซ้อนกัน.....	45
3.7 การควบคุมสนามไฟฟ้าของสายเคเบิล.....	47
3.8 การออกแบบขั้วต่อสายเคเบิลใต้ดินแรงดันสูงสำหรับทดสอบหาคิซาร์จบางส่วน.....	51
3.8.1 การออกแบบเส้นผ่านศูนย์กลางของขั้วต่อสายเคเบิล.....	51
3.8.2 การออกแบบปลายสายและฐานรองรับปลายสาย.....	55
3.8.3 การออกแบบความยาวของขั้วต่อสายเคเบิล.....	59
3.8.4 การออกแบบชุดรองรับขั้วต่อสายเคเบิล.....	62
3.8.5 การจำลองการกระจายสนามไฟฟ้าในขั้วต่อสายเคเบิล.....	64
3.9 สรุปผลการออกแบบ.....	67
<b>บทที่ 4 การทดสอบและการวิเคราะห์ผลการทดสอบ.....</b>	<b>68</b>
4.1 บทนำ.....	68
4.2 การเตรียมการทดสอบหาคิซาร์จบางส่วน.....	68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.1 วงจรทดสอบหาดีสซาร์จบางส่วน.....	69
4.2.2 แรงดันทดสอบ.....	70
4.2.3 พิกัดกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงทดสอบ.....	70
4.3 การทดสอบขั้วต่อสายเคเบิลที่ออกแบบสร้าง.....	71
4.4 การทดสอบเปรียบเทียบขั้วต่อสายเคเบิล.....	77
4.4.1 การทดสอบหาดีสซาร์จบางส่วนในสายเคเบิลโดยใช้ขั้วต่อสายที่ออกแบบด้วย หลักการที่นำเสนอเปรียบเทียบกับขั้วต่อสายที่ออกแบบด้วยหลักการเดิม.....	77
4.4.2 การทดสอบหาดีสซาร์จบางส่วนในสายเคเบิลโดยใช้ขั้วต่อสายที่ออกแบบด้วย หลักการที่นำเสนอเปรียบเทียบกับขั้วต่อสายที่ใช้ในภาคอุตสาหกรรม.....	82
4.5 การทดสอบหาดีสซาร์จบางส่วนในขั้วต่อสายเคเบิล.....	86
4.6 สรุปผลการทดสอบ.....	88
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	89
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	89
5.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา.....	91
5.2.1 ข้อเสนอแนะ.....	91
5.2.2 แนวทางการพัฒนา.....	91
เอกสารอ้างอิง.....	92
ภาคผนวก.....	94
ภาคผนวก ก. อุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบ.....	95
ภาคผนวก ข. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	100
ประวัติผู้เขียน.....	113

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การเปรียบเทียบลักษณะการแสดงผล PD บนฐานเวลาแบบวงรีและรูปแบบการกระจาย $H_n(\phi, q)$ .....	20
4.1 ค่าความจุไฟฟ้าของวัสดุฉนวนและอุปกรณ์ไฟฟ้า.....	71
4.2 ผลการทดสอบหา PD ในสายเคเบิล พิกัด 12/20 (24) kV ขนาด 240 sq.mm โดยใช้ขั้วต่อสาย ที่ออกแบบด้วยหลักการที่นำเสนอ.....	76
4.3 ผลการทดสอบสายเคเบิลเส้นที่ 1 โดยใช้ขั้วต่อสายที่ออกแบบด้วยหลักการที่นำเสนอ.....	79
4.4 ผลการทดสอบสายเคเบิลเส้นที่ 2 โดยใช้ขั้วต่อสายที่ออกแบบด้วยหลักการที่นำเสนอ.....	80
4.5 ผลการทดสอบสายเคเบิล เส้นที่ 1 โดยใช้ขั้วต่อสายที่ออกแบบด้วยหลักการเดิม.....	81
4.6 ผลการทดสอบสายเคเบิลเส้นที่ 2 โดยใช้ขั้วต่อสายที่ออกแบบด้วยหลักการเดิม.....	81
4.7 ผลการทดสอบหา PD ในสายเคเบิล พิกัด 12/20 (24) kV ขนาด 240 sq.mm โดยใช้ขั้วต่อสาย ที่ออกแบบด้วยหลักการที่นำเสนอ.....	84
4.8 ผลการทดสอบหา PD ในสายเคเบิล พิกัด 12/20 (24) kV ขนาด 240 sq.mm โดยใช้ขั้วต่อสาย ที่ใช้อยู่ในภาคอุตสาหกรรม.....	85
4.9 ผลการทดสอบหา PD ในขั้วต่อสายเคเบิล พิกัด 12/20 (24) kV ขนาด 240 sq.mm ที่ออกแบบ ด้วยหลักการที่นำเสนอ.....	87
5.1 เปรียบเทียบการออกแบบที่ใช้หลักการเดิมและหลักการที่นำเสนอ.....	89
5.2 เปรียบเทียบผลการทดสอบหา PD ในสายเคเบิล โดยใช้ขั้วต่อสายที่ออกแบบด้วยหลักการเดิม เปรียบเทียบกับการออกแบบด้วยหลักการที่นำเสนอ.....	90
5.3 เปรียบเทียบผลการทดสอบหา PD ในสายเคเบิล โดยใช้ขั้วต่อสายที่ใช้ในภาคอุตสาหกรรม เปรียบเทียบกับการออกแบบด้วยหลักการที่นำเสนอ.....	90
5.4 รายละเอียดข้อมูลของขั้วต่อสายเคเบิลสำหรับทดสอบหาดีเอสอาร์บางส่วนในสายเคเบิลใต้ดิน แรงดันสูง พิกัด 12/20 (24) kV 240 sq.mm. ....	91

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 รูปแบบของคิซซาร์จบางส่วน (PD).....	6
2.2 วงจรสมมูลของวัสดุที่มีโพรงก๊าซและเกิดคิซซาร์จบางส่วนภายใน.....	8
2.3 PD ในโพรงก๊าซในวัสดุฉนวน.....	9
2.4 ผลของค่าตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว $C_k$ ต่อความไวการวัด $q_m/q$ ซึ่งขึ้นอยู่กับ $C_k/C_f$ .....	11
2.5 วงจรพื้นฐานการวัด PD.....	11
2.6 รูปคลื่นกระแสและแรงดันทดสอบของ PD.....	13
2.7 วงจรทดสอบตรวจจับ PD แบบตรง.....	14
2.8 อิมพีแดนซ์วัดในกล่องต่อคาบเกี่ยว CD ของเครื่องวัด PD แถบกว้าง.....	16
2.9 อิมพีแดนซ์วัดในกล่องต่อคาบเกี่ยว CD ของเครื่องวัด PD แถบแคบ.....	17
2.10 การเปรียบเทียบวงจรทดสอบวัด PD.....	18
2.11 การแสดงผลของ PD.....	19
2.12 เครื่องตรวจจับ PD โดยใช้คอมพิวเตอร์เป็นฐาน.....	20
2.13 วงจรทดสอบคิซซาร์จบางส่วนแบบต่างๆ ตามมาตรฐาน IEC 60270.....	22
2.14 การเกิดคลื่นจรขณะเกิด PD ในเคเบิลยาว.....	23
2.15 การเกิดชุปเปอร์โพสิชันสัญญาณเอาต์พุตของเครื่องตรวจจับ PD แบบต่างๆ.....	24
2.16 วงจรตรวจสอบคุณสมบัติชุปเปอร์โพสิชันของเครื่องตรวจจับ PD.....	25
2.17 ไดอะแกรมพัลส์คู่ของเครื่องตรวจจับ PD แบบต่างๆ.....	26
2.18 ไดอะแกรมพัลส์คู่เมื่อเกิดการสูญเสียในเคเบิล.....	26
2.19 ตัวอย่างสัญญาณรบกวนที่ตำแหน่งต่างๆ.....	27
2.20 ตัวอย่างการลดสัญญาณรบกวน.....	28
2.21 การลดสัญญาณรบกวนด้วยวิธี “หน้าต่างเวลา”.....	29
2.22 ลักษณะสัญญาณคิซซาร์จบางส่วนแบบต่างๆ.....	30
2.23 คิซซาร์จบางส่วนที่เกิดจากโพรงอากาศ.....	30
2.24 คิซซาร์จบางส่วนที่เกิดจากรอยแตก.....	31
2.25 คิซซาร์จบางส่วนที่เกิดจากเศษวัสดุและสิ่งเจือปน.....	32
2.26 คิซซาร์จบางส่วนที่เกิดจากการขยายตัวของคาร์บอนแทรก.....	32
3.1 ส่วนต่างๆของสายเคเบิลแรงสูงฉนวน XLPE.....	35
3.2 วัสดุของสารฉนวนที่นำมาผลิตเป็นฉนวนสายเคเบิล.....	40

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.3 สายเคเบิลทรงกระบอกซ้อนกันแนบร่วม.....	41
3.4 เคเบิลแรงสูงทรงกระบอกซ้อนกันแนบร่วมมีชั้นฉนวนซ้อนหลายชั้น.....	44
3.5 ตัวนำในหุ้มฉนวน.....	45
3.6 $U_b$ และ $E_{r1}$ ในเทอมของ $r_1$ เมื่อกำหนด $r_2$ ให้คงตัวของทรงกระบอกซ้อนกันแนบร่วม.....	47
3.7 ค่าคาปาซิแตนซ์ของสายเคเบิลแรงดันสูง.....	48
3.8 สนามไฟฟ้าที่ไม่มีกระแส.....	48
3.9 การแก้ไขสนามไฟฟ้าแบบ Capacitive stress control.....	49
3.10 การแก้ไขสนามไฟฟ้าแบบ Refractive stress control.....	49
3.11 การกระจายสนามไฟฟ้าบริเวณที่ปกอสาย.....	50
3.12 เปรียบเทียบการมี Stress cone กับไม่มี Stress cone.....	50
3.13 การกระจายสนามไฟฟ้าเมื่อใช้ Stress cone.....	50
3.14 การกระจายสนามไฟฟ้าเมื่อใช้ High Permittivity Material.....	51
3.15 ขนาดของขั้วต่อสายเคเบิล.....	53
3.16 ขนาดของขั้วต่อสายเคเบิลและความเครียดสนามไฟฟ้าในขั้วต่อสาย.....	54
3.17 ขนาดของปลายสายสำหรับสายเคเบิลพิกัด 12/20 (24) kV 240 sq.mm.....	55
3.18 ปลายสายสำหรับสายเคเบิลพิกัด 12/20 (24) kV 240 sq.mm.....	56
3.19 ขนาดของฐานรองรับปลายสายสำหรับสายเคเบิลพิกัด 12/20 (24) kV 240 sq.mm.....	56
3.20 ฐานรองรับปลายสายสำหรับสายเคเบิลพิกัด 12/20 (24) kV 240 sq.mm.....	56
3.21 การประกอบปลายสายและฐานรองรับปลายสาย.....	57
3.22 ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ปลายสายและฐานรองรับปลายสาย.....	58
3.23 ความเครียดสนามไฟฟ้าที่แก้ไขได้โดยใช้อิเล็กโตรดซิลด์.....	58
3.24 ปลายสายและฐานรองรับปลายสายสำหรับสายเคเบิลพิกัด 12/20 (24) kV 240 sq.mm.....	59
3.25 ผลการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณปลายสายเคเบิล.....	60
3.26 ขนาดของขั้วต่อสายสำหรับสายเคเบิลพิกัด 12/20 (24) kV 240 sq.mm.....	61
3.27 ขั้วต่อสายสำหรับสายเคเบิลพิกัด 12/20 (24) kV 240 sq.mm.....	61
3.28 ขั้วต่อสายสำหรับทดสอบดิสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิล 12/20 (24) kV 240 sq.mm.....	62
3.29 ขนาดของชุดรองรับขั้วต่อสายเคเบิล.....	63
3.30 ลักษณะการประกอบขั้วต่อสายเคเบิลกับชุดรองรับขั้วต่อสายเคเบิล.....	63

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.31 การประกอบขั้วต่อสายเคเบิลกับชุดรองรับขั้วต่อสายเคเบิล.....	64
3.32 การกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าภายในขั้วต่อสายเคเบิลบริเวณชั้นกึ่งตัวนำนอก.....	65
3.33 การกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าภายในขั้วต่อสายเคเบิลบริเวณสายเคเบิล.....	65
3.34 การกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าภายในขั้วต่อสายเคเบิลบริเวณฐานรองรับปลายสาย.....	66
3.35 การกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าในส่วนต่างๆ ของขั้วต่อสายเคเบิล.....	66
4.1 วงจรทดสอบตรวจจับ PD วิธีตรง แบบ CD ต่ออนุกรมกับ $C_k$ .....	69
4.2 วงจรทดสอบขั้วต่อสายเคเบิลตามมาตรฐาน IEC 60270.....	72
4.3 การต่อขั้วต่อสายที่ออกแบบด้วยหลักการที่นำเสนอเพื่อทดสอบหา PD ในสายเคเบิล.....	74
4.4 การทดสอบหา PD ในสายเคเบิลโดยใช้ขั้วต่อสายที่ออกแบบด้วยหลักการที่นำเสนอ.....	74
4.5 ผลการทดสอบจาก PD Detector Hipotronics DDX – 9101 (ฐานเวลารูปคลื่นไซน์).....	75
4.6 ผลการทดสอบจากโปรแกรม REMOTE 9101 (ฐานเวลารูปอิลิปส์).....	75
4.7 ผลการทดสอบหา PD ในสายเคเบิลโดยใช้ขั้วต่อสายที่ออกแบบด้วยหลักการที่นำเสนอ (ฐานเวลารูปอิลิปส์).....	75
4.8 ผลการทดสอบหา PD ในสายเคเบิลโดยใช้ขั้วต่อสายที่ออกแบบด้วยหลักการที่นำเสนอ (ฐานเวลารูปคลื่นไซน์).....	76
4.9 วงจรการทดสอบหาดีสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิลแบบวิธีตรงตามมาตรฐาน IEC 60270.....	77
4.10 การทดสอบหา PD ในสายเคเบิลโดยใช้ขั้วต่อสายที่ออกแบบด้วยหลักการที่นำเสนอ.....	78
4.11 ผลการทดสอบสายเคเบิลเส้นที่ 1 โดยใช้ขั้วต่อสายที่ออกแบบด้วยหลักการที่นำเสนอ.....	79
4.12 ผลการทดสอบสายเคเบิลเส้นที่ 2 โดยใช้ขั้วต่อสายที่ออกแบบด้วยหลักการที่นำเสนอ.....	79
4.13 การทดสอบหา PD ในสายเคเบิลโดยใช้ขั้วต่อสายที่ออกแบบด้วยหลักการเดิม.....	80
4.14 ผลการทดสอบสายเคเบิลเส้นที่ 1 โดยใช้ขั้วต่อสายที่ออกแบบด้วยหลักการเดิม.....	80
4.15 ผลการทดสอบสายเคเบิลเส้นที่ 2 โดยใช้ขั้วต่อสายที่ออกแบบด้วยหลักการเดิม.....	81
4.16 การต่อขั้วต่อสายที่ออกแบบด้วยหลักการที่นำเสนอเพื่อทดสอบหา PD ในสายเคเบิล.....	83
4.17 การทดสอบหา PD ในสายเคเบิลโดยใช้ขั้วต่อสายที่ออกแบบด้วยหลักการที่นำเสนอ.....	83
4.18 ผลการทดสอบหา PD ในสายเคเบิลโดยใช้ขั้วต่อสายที่ออกแบบด้วยหลักการที่นำเสนอ.....	83
4.19 การต่อขั้วต่อสายที่ให้อยู่ในภาคอุตสาหกรรมเพื่อทดสอบหา PD ในสายเคเบิล.....	84
4.20 การทดสอบหา PD ในสายเคเบิลโดยใช้ขั้วต่อสายที่ให้อยู่ในภาคอุตสาหกรรม.....	84

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.21 ผลการทดสอบหา PD ในสายเคเบิลโดยใช้ขั้วต่อสายที่ใช้อยู่ในภาคอุตสาหกรรม.....	85
4.22 การต่อขั้วต่อสายเคเบิลที่ออกแบบด้วยหลักการที่นำเสนอเพื่อทดสอบหา PD.....	86
4.23 การทดสอบหา PD ในขั้วต่อสายที่ออกแบบด้วยหลักการที่นำเสนอ.....	87
4.24 ผลการทดสอบหา PD ในขั้วต่อสายที่ออกแบบด้วยหลักการที่นำเสนอ.....	87



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันการไฟฟ้านครหลวงได้ติดตั้ง และจ่ายพลังงานไฟฟ้าในบริเวณที่มีความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าในปริมาณมาก โดยเฉพาะในย่านธุรกิจหนาแน่น โดยใช้สายป้อนระบบใต้ดิน เพื่อเพิ่มความสวยงามของพื้นที่และเพิ่มความมั่นคงให้กับระบบไฟฟ้า ซึ่งสามารถจ่ายพลังงานไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ และช่วยลดปัญหาเกี่ยวกับไฟฟ้าดับในย่านธุรกิจหนาแน่น

สายเคเบิลใต้ดินก่อนที่จะนำมาติดตั้ง จะต้องมีการตรวจสอบให้มีคุณภาพตามที่มาตรฐานกำหนด การทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge : PD) เป็นรายการหนึ่งที่จะต้องมีการตรวจสอบคุณภาพจากผู้ผลิตเสมอ เนื่องจากการเกิดดิสชาร์จบางส่วนแต่ละครั้งจะมีพลังงานถ่ายเทให้กับพื้นผิวฉนวนในลักษณะชนกระแทก เป็นเหตุให้เกิดความร้อนเพิ่มขึ้นเฉพาะจุดส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมี ทำให้ฉนวนเสียเป็นจุดๆ และเกิดความผิพร่องขยายตัวมากขึ้น และอาจนำไปสู่การเกิดเบรกดาวน์อย่างสมบูรณ์ได้ ส่งผลให้อายุการใช้งานของฉนวนจะสั้นลง ดิสชาร์จบางส่วนที่พบมากในสายเคเบิล คือ ดิสชาร์จบางส่วนภายใน (Internal Discharge หรือ Cavity Discharge) หมายถึง ดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นในเนื้อฉนวนแข็งหรือฉนวนเหลว ที่มีโพรงหรือฟองก๊าซ หรือมีสิ่งเจือปนแปลกปลอมที่มีค่าเปอร์มิตติวิตีต่ำกว่าในเนื้อฉนวนหลัก [1] ทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าในโพรงหรือสิ่งเจือปนดังกล่าวมีค่าสูงกว่าฉนวนรอบๆ ซึ่งจะทำให้ฉนวนโดยรอบเสียหาย การฉนวนเสื่อมสภาพ และอาจนำไปสู่การเกิดเบรกดาวน์ได้ในที่สุด

ในการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิล จะทำการป้อนแรงดันทดสอบระหว่างตัวนำและชั้นกึ่งตัวนำนอก โดยป้อนแรงดันสูงเข้าที่ตัวนำและชั้นกึ่งตัวนำนอกจะเป็นกราวด์ การทดสอบสายเคเบิลที่ไม่มีขั้วต่อสาย ในการทดสอบดังกล่าวจะเกิดการวาวไฟตามผิวขึ้น เนื่องจากระยะห่างระหว่างแรงดันสูงกับกราวด์น้อยมาก สามารถแก้ไขได้โดยการเพิ่มระยะห่างระหว่างแรงดันสูงกับกราวด์ โดยการตัดชั้นกึ่งตัวนำนอกบางส่วนออก ส่งผลให้สนามไฟฟ้าที่ขอบของชั้นกึ่งตัวนำนอกจะเกิดความไม่สม่ำเสมอสูง ซึ่งจะนำไปสู่การเกิดเบรกดาวน์ในฉนวนได้ จึงจำเป็นต้องควบคุมสนามไฟฟ้าในบริเวณนั้นให้เกิดความไม่สม่ำเสมอที่น้อยที่สุด [2]

### 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

จากปัญหาที่กล่าวข้างต้น พบว่าขั้วต่อสายเคเบิลมีความจำเป็นสำหรับการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิลเป็นอย่างมาก เนื่องจากขั้วต่อสายจะช่วยควบคุมความเครียด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สนามไฟฟ้าบริเวณปลายสายเคเบิล ป้องกันการเกิดการวาบไฟตามผิวฉนวนและป้องกันการเกิดเบรกดาวน์ของฉนวนในการทดสอบ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ ออกแบบและสร้างขั้วต่อสายสำหรับทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิลให้มีขนาดที่เหมาะสม สำหรับสายเคเบิลใต้ดินแรงดันสูงฉนวน XLPE พิกัด 12/20(24) kV ขนาด 240 sq.mm. เพื่อความสะดวกในการใช้งาน ลดความสูญเสียสายเคเบิลจากการทดสอบ ลดความสิ้นเปลืองฉนวนที่นำมาควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้า และมีต้นทุนการสร้างที่ต่ำลง

### 1.3 สมมติฐานของการศึกษา

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า มีการออกแบบและสร้างขั้วต่อสายเคเบิลสำหรับทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วน เพื่อทดแทนการนำเข้าจากต่างประเทศซึ่งมีราคาสูง [3-8] แต่ยังมีขนาดใหญ่และมีความยาวมาก เป็นการสิ้นเปลืองสายเคเบิลในการทดสอบ และสิ้นเปลืองฉนวนที่นำมาควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้า ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการออกแบบขั้วต่อสายเคเบิลสำหรับทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนโดยใช้ทฤษฎีมิติที่เหมาะสมของทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม และระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อให้ขั้วต่อสายเคเบิลสำหรับทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนมีขนาดที่เหมาะสมมากยิ่งขึ้น และลดขั้นตอนในการออกแบบ

### 1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

จากทฤษฎีมิติที่เหมาะสมของทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม ซึ่งหมายถึง มิติที่เล็กที่สุด แต่สามารถทนต่อแรงดันได้สูงสุด โดยไม่เกิดเบรกดาวน์ และโคโรนา [9-10] เมื่อพิจารณาลักษณะของขั้วต่อสายเคเบิลสำหรับทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วน ซึ่งมีลักษณะเป็นทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม ฉะนั้นสามารถใช้ทฤษฎีมิติที่เหมาะสมของทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม ในการออกแบบเส้นผ่านศูนย์กลางของขั้วต่อสายให้มีขนาดที่เหมาะสมได้ และระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งสามารถนำมาใช้กับปัญหาที่มีรูปร่างลักษณะต่างๆ โดยสามารถจำลองรูปร่างลักษณะที่แท้จริง และสามารถกำหนดเงื่อนไขหรือขอบเขตได้ จึงเกิดแนวคิดที่จะนำระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อช่วยจำลองการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณปลายสายเคเบิล โดยพิจารณาพร้อมกับฉนวนที่ใช้ในการควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้า ซึ่งจะทำได้ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่แท้จริง แทนการทดสอบการวาบไฟตามผิวฉนวน

## 1.5 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการแบบพื้นฐาน

การออกแบบเส้นผ่านศูนย์กลางของขั้วต่อสายเคเบิล โดยใช้ทฤษฎีมิติที่เหมาะสมของทรงกระบอกซ้อนกันจะช่วยให้ได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของขั้วต่อสายที่มีขนาดที่เหมาะสมขึ้น จากเดิมในการออกแบบจะพิจารณาที่แรงดันเบรกคาว์นของฉนวนที่นำมาควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้าที่ปลายสายเคเบิล [3-6] หรือพยายามทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนแต่ละชั้นมีค่าใกล้เคียงกัน [7-8] และใช้ค่า Safety factor สูงๆ เข้ามาช่วยในการออกแบบเพื่อป้องกันการเบรกคาว์นของฉนวนขณะทำการทดสอบ [3-8] ซึ่งทำให้ขั้วต่อสายมีขนาดใหญ่ สิ้นเปลืองฉนวนที่นำมาควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้า

การออกแบบความยาวของขั้วต่อสายเคเบิล โดยจำลองการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณปลายสายเคเบิล ซึ่งพิจารณาร่วมกับฉนวนที่ใช้ในการควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้า โดยระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์จะทำให้ทราบค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่แท้จริงบริเวณปลายสายเคเบิลขณะทำการทดสอบ ซึ่งจะช่วยให้ได้ความยาวของขั้วต่อสายที่สั้นลง จากเดิมจะพิจารณาที่แรงดันวาบไฟตามผิวฉนวนสายเคเบิลและใช้ค่า Safety factor สูงๆ เข้ามาช่วยในการออกแบบเพื่อป้องกันการเกิดการวาบไฟตามผิวฉนวน ซึ่งทำให้ขั้วต่อสายมีความยาวมาก ส่งผลให้ต้องใช้ความยาวในการปกสายมาก เป็นการสิ้นเปลืองสายเคเบิลในการทดสอบ ใช้พื้นที่ในการทดสอบมาก ไม่สะดวกในการใช้งาน และใช้ต้นทุนในการสร้างสูง

## 1.6 ขอบเขตการวิจัย

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอออกแบบและสร้างขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงสำหรับทดสอบหาค่าฉนวนบางส่วนพิกัด 12/20(24) kV ขนาด 240 sq.mm. โดยใช้ทฤษฎีมิติที่เหมาะสมของทรงกระบอกซ้อนกันและระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ ทำการทดสอบหาค่าฉนวนบางส่วนในขั้วต่อสายเคเบิลที่ได้สร้างขึ้น และทดสอบเปรียบเทียบผลการทดสอบหาค่าฉนวนบางส่วนในสายเคเบิลระหว่างขั้วต่อสายที่สร้างขึ้น ขั้วต่อสายที่ออกแบบโดยหลักการเดิมและขั้วต่อสายที่ใช้ในภาคอุตสาหกรรม

## 1.7 ขั้นตอนของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บท ดังนี้

บทที่ 1 กล่าวถึง ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา สมมติฐานของการศึกษา ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย ขอบเขตของการวิจัย และขั้นตอนการศึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2 กล่าวถึง ดิสซาร์จบางส่วน ซึ่งประกอบด้วย ทฤษฎีเบื้องต้นของการเกิดดิสซาร์จบางส่วน หลักการตรวจจับดิสซาร์จบางส่วน เทคนิคการลดสัญญาณรบกวนและการจำแนกชนิดของดิสซาร์จบางส่วนในสายเคเบิล

บทที่ 3 กล่าวถึง ทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการวิจัย การออกแบบขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูง และการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วย การออกแบบเส้นผ่านศูนย์กลางของขั้วต่อสาย การออกแบบปลายสายและฐานรองรับปลายสาย การออกแบบความยาวของขั้วต่อสาย และการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้าในขั้วต่อสายเคเบิล

บทที่ 4 กล่าวถึง การทดสอบและการวิเคราะห์ผลการทดสอบ ซึ่งประกอบด้วย ทดสอบหาค่าดิสซาร์จบางส่วนในขั้วต่อสายเคเบิลที่สร้างขึ้น การทดสอบหาค่าดิสซาร์จบางส่วนในสายเคเบิล โดยใช้ขั้วต่อสายที่ออกแบบด้วยหลักการที่นำเสนอ ขั้วต่อสายที่ออกแบบด้วยหลักการเดิม และขั้วต่อสายของทางภาคอุตสาหกรรม

บทที่ 5 กล่าวถึง สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ



## บทที่ 2

### คิซซาร์จบางส่วน

#### 2.1 การตรวจจับคิซซาร์จบางส่วน (Partial Discharge = PD) [9-10]

การตรวจจับคิซซาร์จบางส่วน จัดเป็นการทดสอบแบบไม่ทำลาย เป็นการตรวจสอบว่ามีคิซซาร์จบางส่วนเกิดขึ้นหรือไม่ ถ้ามีเกิดขึ้นที่แรงดันเท่าใด และเรียกแรงดัน PD เริ่มเกิด คือ  $U_i$

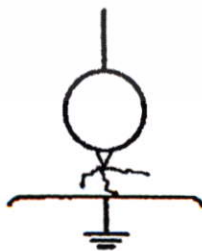
##### 2.1.1 คิซซาร์จบางส่วน PD คืออะไร

คิซซาร์จบางส่วน คือ คิซซาร์จเบรกควาน์ที่ไม่สมบูรณ์ พลังงานที่ทำให้เกิดคิซซาร์จนั้นไม่มากพอที่จะทำให้ฉนวนเปลี่ยนสภาพไปเป็นสภาพนำไฟฟ้าได้ตลอดแนวระหว่างอิเล็กโทรด จึงเรียกว่า คิซซาร์จบางส่วน เพราะฉนวนของอิเล็กโทรดด้านหนึ่ง หรือทั้งสองด้าน อาจเป็นของแข็ง ของเหลว หรือก๊าซ ยังเป็นฉนวนที่สมบูรณ์มั่นคงอยู่ Kreuger ได้ให้คำอธิบายไว้ว่า “คิซซาร์จบางส่วนเป็นคิซซาร์จทางไฟฟ้าที่ไม่เชื่อมโยงถึงกันระหว่างอิเล็กโทรด”

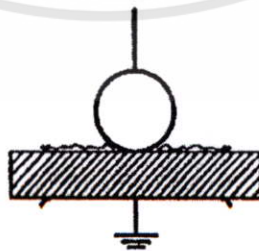
คิซซาร์จบางส่วนจะเกิดขึ้นในระบบฉนวนที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง หรือฉนวนที่มีความไม่สม่ำเสมอ หรือไม่ต่อเนื่องเดียวกัน หรือมีสิ่งเจือปน ซึ่งทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าบางจุดในฉนวนมีค่าสูงกว่าความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤติ แต่ไม่อาจทำให้เกิดเบรกควาน์โดยสมบูรณ์ได้ หากแต่เกิดเพียงบางส่วนเท่านั้น

คิซซาร์จบางส่วนเกิดขึ้นได้ทั้งในสนามไฟฟ้ากระแสสลับ และสนามไฟฟ้ากระแสตรง ภายใต้สนามไฟฟ้ากระแสสลับ คิซซาร์จจะเกิดขึ้นซ้ำๆ ซ้ำๆ ไซเคิลของแรงดัน โดยปกติจะเกิดขึ้นขณะที่แรงดันที่ป้อนเพิ่มขึ้นจากศูนย์ไปสู่ค่ายอด

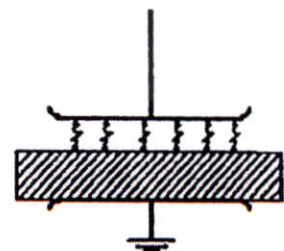
คิซซาร์จบางส่วน อาจแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิดแบบ คือ 1) โคโรนาคิซซาร์จ 2) คิซซาร์จตามผิว และ 3) คิซซาร์จภายใน ในที่นี้จะอธิบายถึงคิซซาร์จบางส่วนแบบภายใน อย่างไรก็ตามเพื่อให้เห็นภาพรวมของ PD ทั้ง 3 รูปแบบ จึงแสดงไว้ดังรูปที่ 2.1



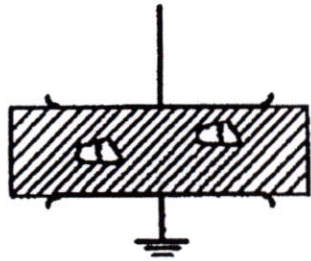
a) โคโรนาคิซซาร์จ



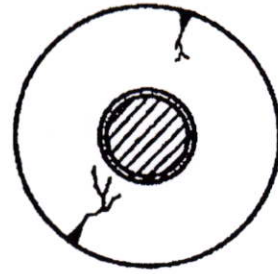
b) คิซซาร์จตามผิว



c) คิซซาร์จภายในรอยต่อ



d) ดิสชาร์จภายในโพรงก๊าซ



e) ดิสชาร์จภายในมีสิ่งแปลกปลอม

รูปที่ 2.1 รูปแบบของดิสชาร์จบางส่วน (PD)

### 2.1.2 ผลกระทบของดิสชาร์จบางส่วน

ดิสชาร์จบางส่วนแต่ละครั้งจะมีพลังงานถ่ายเทให้กับพื้นผิวฉนวน ในลักษณะชนกระแทก เป็นเหตุให้เกิดความร้อนเพิ่มขึ้นเฉพาะจุด เป็นผลให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมี ทำให้ฉนวนเสียเป็นจุดๆ และเกิดผิพร่องขยายตัวมากขึ้น และอาจนำไปสู่การเบรคความน้อยอย่างสมบูรณ์ได้ ทำให้ฉนวนเสียหาย อายุการใช้งานของฉนวนจะสั้นลง

การเกิดดิสชาร์จบางส่วนบนสายส่งแรงสูงแบบชิงอากาศ เรียกว่า โคโรนา ย่อมหมายถึงการเกิดพลังงานสูญเสียตลอดเวลา และยิ่งกว่านั้นการเกิดโคโรนาพัลส์ดิสชาร์จดังกล่าว ทำให้เกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแพร่กระจายออกไปรบกวนระบบสื่อสารย่านความถี่วิทยุ เรียกว่า คลื่นรบกวนวิทยุ

ฉะนั้นเพื่อให้อายุการใช้งานของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงใช้งานได้ยาวนาน ไม่ก่อให้เกิดคลื่นรบกวนวิทยุ การออกแบบฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าจะต้องมีคุณภาพดีพอ ความเครียดสนามไฟฟ้าที่แรงดันใช้งานปกติจะต้องต่ำกว่าความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤติของฉนวน จะต้องไม่มีดิสชาร์จบางส่วน แม้จะมีแรงดันเกินเนื่องจากแรงดันกระเพื่อมเกิดขึ้น อย่างไรก็ตาม การฉนวนอุปกรณ์แรงสูง มีความยุ่งยากซับซ้อน PD อาจเกิดขึ้นโดยมิได้ตั้งใจ หรืออาจมีความบกพร่องในกระบวนการผลิต หรือคุณภาพของฉนวนไม่ได้ตามที่มาตรฐานกำหนด ฉะนั้นเพื่อความมั่นใจในคุณภาพของฉนวนอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง จำเป็นต้องมีการทดสอบตรวจวัดค่า PD วัดค่าแรงดันคลื่นรบกวนวิทยุ (radio interference voltage = RIV) ตามที่มาตรฐานกำหนด

### 2.1.3 สื่อสัญญาณที่ใช้ตรวจจับ PD

การตรวจจับและวัดค่า PD จะอาศัยผลที่เกิดจากดิสชาร์จบางส่วน ซึ่งจะมีผลสืบเนื่องในรูปแบบต่างๆ คือ

- 1) มีกระแสพัลส์ไฟฟ้าเกิดขึ้นขณะเกิดดิสชาร์จบางส่วน
- 2) เกิดกำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก วัดค่า  $tq\delta = f(U)$  ถ้ามี PD เส้นกราฟจะหักมุมเมื่อเริ่มเกิด PD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3) เกิดคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ในย่านความถี่สูง ครอบคลุมระบบสื่อสาร
- 4) เกิดแสงเรือง เนื่องจากเกิดไอออไนเซชันแบบโคโรนา
- 5) เกิดโคโรนาในอากาศ จะมีกลิ่นโอโซน (O<sub>3</sub>) เกิดเสียงฮิสซิ่ง (hissing)
- 6) เกิดความดันก๊าซเพิ่มสูงขึ้น
- 7) เกิดความร้อน
- 8) เกิดปฏิกิริยาทางเคมี

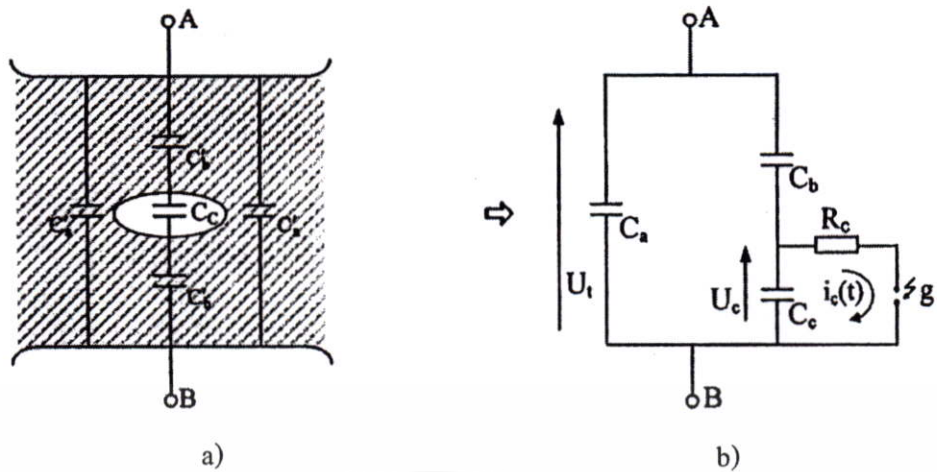
การตรวจจับ PD ส่วนมากอาศัยผลทางไฟฟ้า ซึ่งให้ผลที่มีความถูกต้องดีกว่าวิธีอื่นๆ คือ ดิสชาร์จทำให้เกิดกระแสพัลส์ไหลผ่านวงจรต่ออันดับกับฉนวนทดสอบ จึงสามารถวัดค่าแรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์ที่ต่ออยู่ในวงจรได้ การใช้สื่อสัญญาณอื่น จะมีความไวน้อยกว่า บางอย่างก็ต้องการเกิด PD มากๆ จึงจะตรวจจับได้ การตรวจจับสื่อสัญญาณพัลส์ไฟฟ้าสามารถวิเคราะห์ได้ด้วยวงจรสมมูลที่มี PD

#### 2.1.4 วงจรสมมูลของดิสชาร์จบางส่วน

โดยเหตุที่ดิสชาร์จบางส่วนภายในเกิดขึ้นในเนื้อฉนวน หรือในอุปกรณ์ซึ่งไม่สามารถสังเกตเห็นได้ด้วยตา ฉะนั้น เพื่อให้สามารถตรวจจับหรือวัดค่าดิสชาร์จบางส่วนในฉนวนได้ จึงมีการเขียนวงจรสมมูลของฉนวนที่มีดิสชาร์จบางส่วนขึ้น ไม่ว่าจะเป็ดิสชาร์จบางส่วนชนิดใดก็สามารถเขียนวงจรสมมูลได้ เพื่อให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจ จึงใช้วงจรสมมูลสำหรับฉนวนที่มีโพรงก๊าซ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์การเกิดและหาปริมาณดิสชาร์จบางส่วนภายใน ดังวงจรสมมูลของฉนวนในรูปที่ 2.2

ในรูปที่ 2.2 a) แสดงวัสดุฉนวน มีโพรงก๊าซในเนื้อฉนวน และฉนวนวางอยู่ระหว่างอิเล็กโทรด A-B โพรงก๊าซจะเขียนแทนด้วยความจุไฟฟ้า C<sub>c</sub> ส่วนฉนวนที่ต่ออนุกรมกับโพรงก๊าซหรือ C<sub>c</sub> เขียนแทนด้วยความจุไฟฟ้า C'<sub>c</sub> ส่วนที่ต่ออนุกรมกับ C<sub>c</sub> นี้จะรวมกันได้เป็น C<sub>b</sub> ส่วนฉนวนที่สมมูลคืออยู่โดยรอบของ C<sub>c</sub> จะให้ค่าเป็น C'<sub>c</sub> และรวมกันในส่วนนี้จะได้เป็น C<sub>a</sub> ดังรูปที่ 2.2 b) ซึ่งค่าความจุไฟฟ้าของวัสดุทดสอบ C<sub>t</sub> จะมีค่าโดยประมาณเท่ากับ C<sub>a</sub> ซึ่งมีค่ามากกว่า C<sub>b</sub> มากๆ นั่นคือ

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



รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลของวัสดุที่มีโพรงก๊าซและเกิดดิสชาร์จบางส่วนภายใน

ถ้าป้อนแรงดัน  $U_t$  ที่ขั้ว A-B ทำให้แรงดันตกคร่อมโพรงก๊าซมีค่าสูงกว่าค่าแรงดันเบรกควาน์ของโพรงก๊าซที่แทนด้วย  $C_c$  ก็จะเกิดเบรกควาน์ในโพรงก๊าซ ซึ่งเขียนแทนด้วยแก๊ป  $g$  (แล้วเอาตัวจ่ายแรงดันออก) มีความต้านทาน  $R_c$  ต่ออนุกรมอยู่เป็นตัวจำกัดกระแสดิสชาร์จ  $i_c(t)$  ซึ่งมีลักษณะเป็นพัลส์ช่วงกว้างเป็นนาโนวินาที และทำให้เกิดแรงดันตก  $\delta U_c$  ที่โพรงก๊าซเกิดการปล่อยประจุออกมาเป็น

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

กระแส  $i_c(t)$  นี้ไหลอยู่ภายในที่ไม่สามารถวัดได้ แต่การดิสชาร์จของ  $C_c$  ทำให้เกิดการถ่ายเทประจุของ  $C_b$  และ  $C_a$  ในวงจรสมมูล เป็นผลให้เกิดแรงดันตกที่ขั้ว A-B เท่ากับ  $\delta U_t$  ซึ่งหาได้จากประจุใน  $C_c$  คือ

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

ค่าแรงดันตกนี้ไม่ให้ข้อมูลอะไรเกี่ยวกับ  $\delta q_c$  เลย แต่เป็นสัดส่วนกับ  $C_b \delta U_c$  แต่  $\delta U_t$  นี้วัดได้เป็นพัลส์รูปจัน ขึ้นอยู่กับ  $i_c(t)$

เมื่อแทนค่า

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

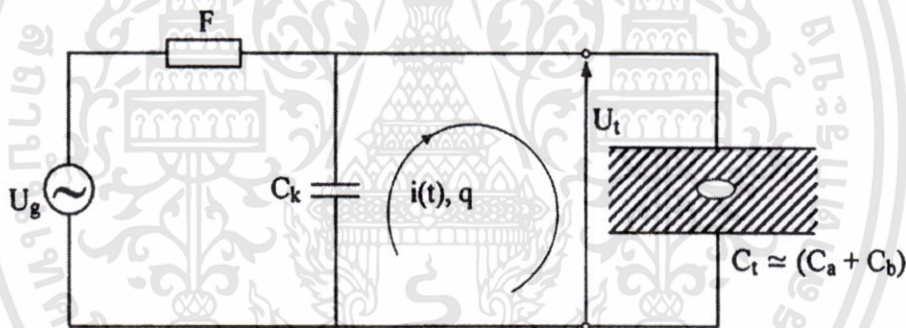
จะได้

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

ค่าของ  $\delta U_t$  มีค่าเพียงเป็นมิลลิโวลต์ถึงโวลต์ ในขณะที่  $\delta U_c$  มีค่าเป็นกิโลโวลต์ แต่โดยที่ไม่ทราบค่า  $C_c$  และ  $C_b$  จึงไม่อาจหาความสัมพันธ์ของ  $\delta U_t$  กับ  $\delta U_c$  และ  $\delta q_c$  ได้ อย่างไรก็ตาม การดิสชาร์จในโพรงก๊าซ  $C_c$  เป็นผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงถ่ายเทประจุ หรือกระแสในวงจรภายนอกที่สามารถตรวจวัดได้

### 2.1.5 ประจุที่ปรากฏและประจุที่วัดได้

ดังที่กล่าวไว้แล้ว ดิสชาร์จบางส่วนภายในเกิดขึ้นภายในฉนวน หรือภายในอุปกรณ์ที่หุ้มห่อมิดชิด ฉะนั้น ประจุหรือกระแสที่เกิดจากประจุดิสชาร์จในโพรงก๊าซนั้นไม่สามารถวัดได้ การดิสชาร์จในโพรงก๊าซ  $C_c$  นั้น มีผลให้เกิดการถ่ายเทประจุ เป็นผลให้เกิดแรงดันตก  $\delta U_t$  ที่ขั้วป้อนแรงดันภายนอก A-B และการเคลื่อนที่ของประจุ และเกิดกระแสไหลวนอันเนื่องมาจากแรงดันตก เป็นค่ากระแสชดเชยที่วัดได้ (measurable current)  $i(t)$  ดังรูปที่ 2.3 แต่มีใช้กระแสหรือประจุที่เกิดขึ้นจริงภายในโพรงก๊าซ



รูปที่ 2.3 PD ในโพรงก๊าซในวัสดุฉนวน

$U_g$  คือ ตัวจ่ายแรงดันป้อนให้กับตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว  $C_k$  และวัสดุทดสอบ  $C_t$

$C_k$  คือ ตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว

$C_t$  คือ ค่าเก็บประจุของวัสดุทดสอบประกอบด้วย  $C_a$ ,  $C_b$  และ  $C_c$  ดังรูปที่ 2.2

$i(t), q$  คือ กระแสพัลส์ PD ที่ถ่ายเทระหว่าง  $C_k$  กับ  $C_t$  เพื่อชดเชยแรงดันที่ตกไป  $\delta U_t$

คร่อม  $C_t \approx (C_a + C_b)$

ค่ากระแสไหลวน  $i(t)$  ที่วัดได้นี้ ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนค่าเก็บประจุ  $C_k / C_t$  เพราะประจุจะเคลื่อนที่จากตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว  $C_k$  ที่ชดเชยแรงดันตก  $\delta U_t$  ในกรณีอุดมคติ  $C_k \gg C_t$  และ  $C_t \approx C_a + C_b$  ประจุ  $q$  จะมีค่ามากที่สุด

ค่า  $C_k \gg C_t$  ค่า  $\delta U_t$  จะได้รับชดเชยสมบูรณ์และประจุที่ถ่ายเท ก็คือกระแส  $i(t)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประจุถ่ายเทหาได้จากสมการ  $q = \int i(t)dt = \left\{ C_a + \frac{C_c \cdot C_b}{C_c + C_b} \right\} \delta U_i$  (2.4)

เพราะว่า  $C_b < C_c$   $q \approx (C_a + C_b) \delta U_i$  (2.5)

เมื่อแทนค่าจาก (2.3) จะได้  $q = \frac{C_b}{C_c} \delta q_c$  (2.6)

ประจุ  $q$  นี้ เรียกว่า ประจุที่ปรากฏของพัลส์ PD เพราะว่าประจุ  $q$  นี้ ไม่เท่ากับประจุที่เกิดจริงใน โพรงก๊าซ  $C_c$  แต่สัมพันธ์กับ  $\delta q_c$  ด้วยอัตราส่วนของ  $C_b / C_c$  และเป็นพื้นฐานของการวัดค่า PD ที่มี ความเป็นจริงมากกว่า  $\delta U_i$  ในสมการ (2.2) โดยที่  $C_c$  เป็นค่าเก็บประจุหลักของ  $C_i$  ซึ่งไม่มีผล เกี่ยวกับค่า PD

ในทางปฏิบัติ เงื่อนไขที่จะทำให้ได้  $C_k \gg C_i$  หมายถึง ค่าเก็บประจุคาบเกี่ยวมีค่า มากๆ นั้นเป็นไปได้ยาก เพราะว่าจะกลายเป็นโหลดให้กับตัวจ่ายแรงดัน และไม่ประหยัด ใดๆก็ตาม ค่าเก็บประจุ  $C_k$  ใหญ่กว่า  $C_i$  ของวัสดุทดสอบเพียงเล็กน้อย จะเป็นผลทำให้ความไวในการ ตรวจจับ หรือตรวจวัด PD นั้นน้อยลง เนื่องจากกระแสชดเชย  $i(t)$  จะมีค่าน้อยลง

เมื่อพิจารณาจากการถ่ายเทของประจุระหว่าง  $C_i$  กับ  $C_k$  จะได้ความสัมพันธ์

$$Q = C_i \delta U_i \quad \text{เมื่อ} \quad C_i \approx (C_a + C_b)$$

นั่นคือ  $q = (C_i + C_k) \delta U_i'$  (2.7)

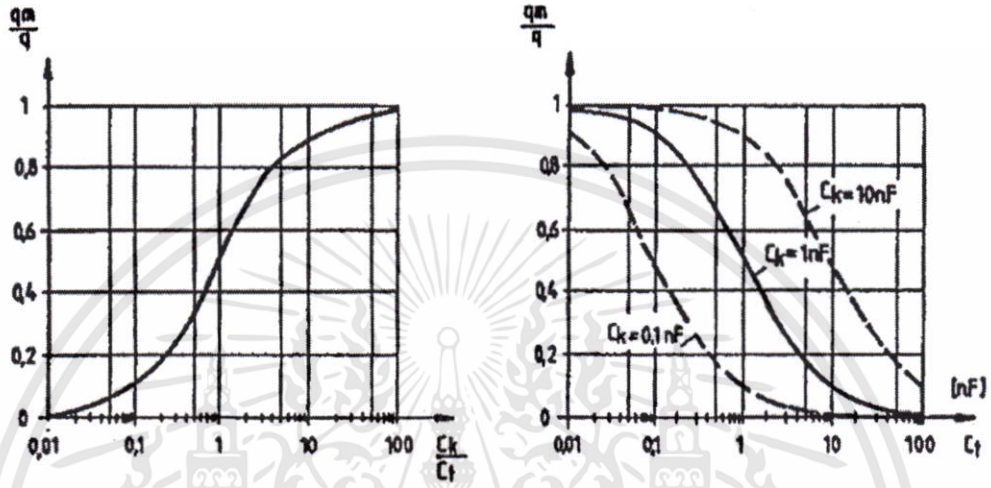
เมื่อ  $\delta U_i'$  คือ แรงดันที่ชั่วหลังจากการถ่ายเทประจุ ประจุที่ปล่อยจากตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว  $C_k$  สามารถวัดได้ และเรียกว่าประจุที่วัดได้  $q_m$  (measurable charge)

$$q_m = C_k \delta U_i' \quad (2.8)$$

ฉะนั้น อัตราส่วนของประจุที่วัดได้ ต่อประจุที่ปรากฏ คือ

$$\frac{q_m}{q} = \frac{C_k}{(C_i + C_k)} \quad (2.9)$$

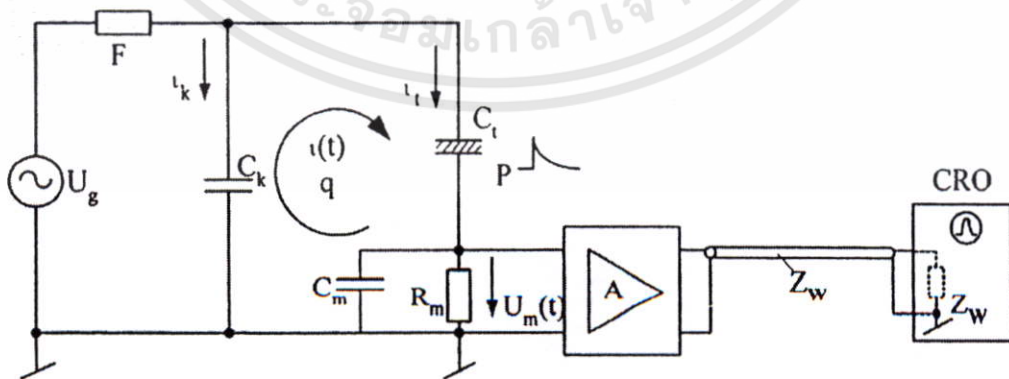
ความสัมพันธ์ของ  $q_m/q$  ในเทอมของ  $C_k/C_t$  ในเทอมของ  $C_t$  ดังแสดงในกราฟ รูปที่ 2.4 ซึ่งจะช่วยให้เลือกค่า  $C_k$  ที่เหมาะสม เพื่อให้ได้ค่าความไวได้ตามที่ต้องการ ถ้าต้องการความไวสูง จะต้องใช้  $C_k$  ให้โตพอ ซึ่งขึ้นอยู่กับ  $C_t$  แพกเตอร์วงจร  $q_m/q$  และความไวการวัดอาจตรวจสอบได้ จึงต้องมีการเปรียบเทียบวงจรทดสอบ โดยการป้อนประจุที่ทราบค่าแน่นอน และถูกต้องที่วัสดุทดสอบ ผลของ  $C_k/C_t$  ต่อความไวการวัด แสดงโดย  $q_m/q$  ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ผลของค่าตัวเก็บประจุภาคเกี่ยวกับ  $C_k$  ต่อความไวการวัด  $q_m/q$  ซึ่งขึ้นอยู่กับ  $C_k/C_t$

2.1.6 วงจรพื้นฐานการวัด PD

วงจรพื้นฐานสำหรับวัดดิซชาร์จบางส่วน PD จะประกอบด้วยตัวจ่ายแรงดันทดสอบ  $U_g$  คือ หม้อแปลงทดสอบป้อนแรงดันให้กับวัสดุทดสอบ และตัวเก็บประจุภาคเกี่ยวกับ  $C_k$  ผ่านตัวกรองความถี่สูง F ดังวงจรในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 วงจรพื้นฐานการวัด PD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ในวงจรรูปที่ 2.5

$U_g$  คือ ตัวจ่ายแรงดันสูงกระแสลับป้อนให้กับตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว  $C_k$  และ วัสดุทดสอบ P

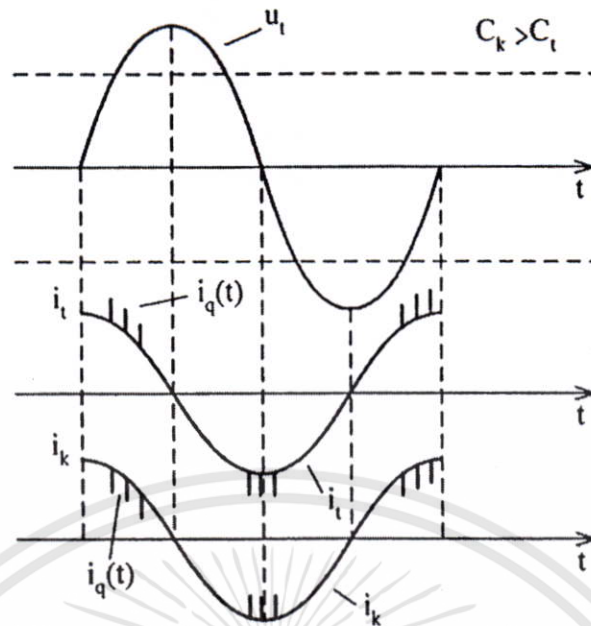
F คือ ตัวกรอง ประกอบด้วยอิมพีแดนซ์ที่มีค่าสูงที่ความถี่สูง นั่นคือ ตัวกรองจะ ทำหน้าที่กั้นมิให้คลื่นรบกวนความถี่สูงจากตัวจ่ายแรงดันเข้าไปรบกวนวงจรทดสอบ แต่ยอมให้ กระแสทดสอบความถี่ต่ำไหลผ่านไปได้ ในเวลาเดียวกัน F จะทำหน้าที่กั้นมิให้สัญญาณคิสซาร์จ บางส่วน (PD) จากวัสดุทดสอบไหลหนีออกไปทางตัวจ่ายแรงดันได้ ตัวกรองนี้ อาจประกอบด้วย ตัวเหนี่ยวนำ L หรือประกอบด้วยตัวเก็บประจุ C เป็นวงจร  $\pi$  ก็ได้

$C_k$  คือ ตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว มีค่าความจุไฟฟ้าประมาณเท่ากับค่าความจุไฟฟ้า ของวัสดุทดสอบ หรือใหญ่กว่า ในเชิงปฏิบัติ  $C_k$  จะมีค่าความจุไฟฟ้าประมาณ 1000 pF เพื่อให้มีค่า อิมพีแดนซ์ต่ำพอที่จะทำให้กระแสคิสซาร์จบางส่วน  $i(t)$  ซึ่งมีค่า  $< 100 \mu A$  และเป็นพัลส์แคบๆ ไหลได้ครบวงจรเป็นกระแสที่วัดได้ ตามที่กล่าวแล้วว่า เมื่อเกิดคิสซาร์จในโพรงก๊าซของฉนวน จะ ทำให้แรงดันที่ขั้วทดสอบ A-B ตกไปเท่ากับ  $\delta U_k$  และเป็นเหตุให้เกิดการถ่ายเทประจุจากตัวเก็บ ประจุ  $C_k$  เข้าไปทดแทน นั่นคือ จะมีกระแสไหลวน  $i(t)$  ที่สามารถตรวจจับ หรือวัดได้ (measurable current) ซึ่งมีลักษณะเป็นพัลส์ ซ้อนอยู่บนรูปคลื่นกระแสที่ป้อนให้กับวัสดุทดสอบ  $i_k$  และตัวเก็บ ประจุคาบเกี่ยว  $i_k (C \, du/dt)$  กระแสทั้งสองจะมีมุมเฟสหน้าหน้าแรงดันที่ป้อนประมาณ  $90^\circ$  ถ้าไม่มีค่า เก็บประจุสเตรย์ขนานกับ  $C_k$  กระแสพัลส์ PD  $i(t)$  ที่ซ้อนบนรูปคลื่นกระแสป้อนนี้จะมีขนาดเท่ากัน แต่ขั้วตรงกันข้าม ดังรูปที่ 2.6

การวัดที่ถูกต้อง ค่าความต้านทานวัด  $R_m$  ดังรูปที่ 2.5 จะต้องสมคู่กัน (match) กับ เคเบิลวัดที่มี  $Z_w$  แรงดันที่วัดที่ CRO หรือเครื่องบันทึกทรานเซียนด์ ก็คือ

$$U_m(t) = (i_i + i)Z_w R_m / (R_m + Z_w) \quad (2.10)$$

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



รูปที่ 2.6 รูปคลื่นกระแสและแรงดันทดสอบของ PD

$u_t$  คือ แรงดันที่ป้อน

$i_t$  คือ กระแสที่ป้อนให้กับวัสดุทดสอบ  $C_t$

$i_k$  คือ กระแสที่จ่ายให้กับตัวเก็บประจุค่าเกี่ยวกับ  $C_k$

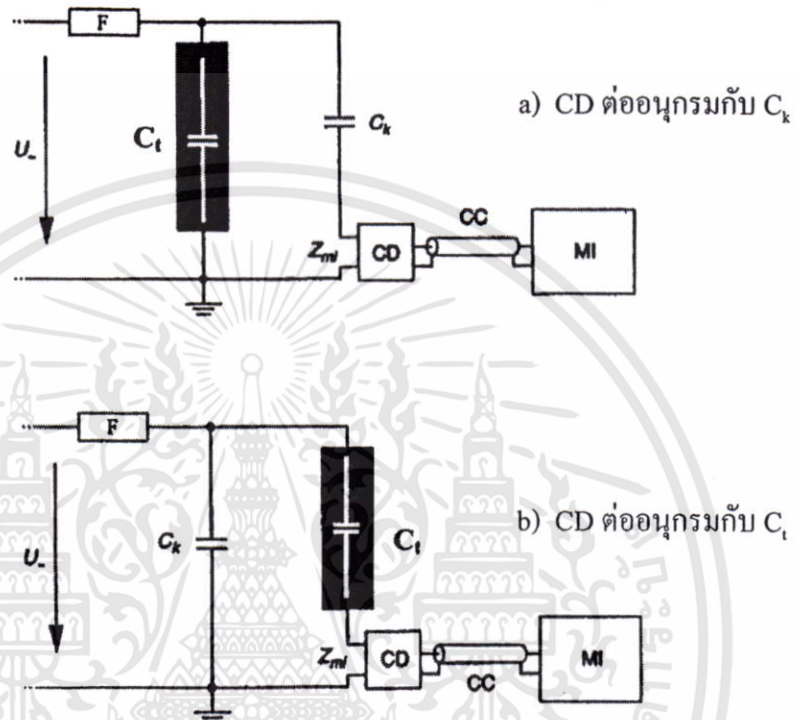
$i_q(t)$  คือ กระแสพัลส์คิสซาร์จบางส่วน (PD) ที่วัดได้

กระแสพัลส์ PD คือ  $i(t)$  ในแต่ละครึ่งไซเคิลของแรงดันที่ป้อน จะมีจำนวนพัลส์มากน้อยขึ้นอยู่กับขนาดแรงดันทดสอบ และลักษณะตำแหน่งของการเกิดผิพร้อง ถ้าวัสดุทดสอบมีจุดผิพร้องหลายแห่ง จำนวนพัลส์ PD จะมีมากขึ้น ซึ่งมีช่วงห่างระหว่างพัลส์เป็น  $\mu s$  หรือเร็วกว่านั้น โดยทั่วไปจะสังเกตเห็นอัตราการเกิดคิสซาร์จ มีค่าสูงมากที่สุดเมื่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน  $dU/dt$  มีค่าสูงสุด ฉะนั้น ขั้วของพัลส์จะไม่ขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลง  $U_t$  แต่ขึ้นอยู่กับเครื่องหมายการเปลี่ยนแปลง  $dU/dt$  ตรงกันข้าม ในกรณีคิสซาร์จโคโรนา ซึ่งเป็นคิสซาร์จบางส่วนเกิดภายนอก จะเกิดที่ขั้วของแรงดันทดสอบ และเครื่องหมายของพัลส์ PD จะสอดคล้องกับเครื่องหมาย (ขั้ว) ของแรงดันทดสอบที่ป้อน (ไม่แสดงในรูป)

ในรูปที่ 2.5 เป็นวงจรที่ใส่แอมพลิฟายเออร์ที่มีแบนด์วิดท์สูงมาก ที่ดินทางเคเบิลวัดจะทำให้เคเบิลวัดสัญญาณไม่ต่อทางไฟฟ้ากับความต้านทาน  $R_m$  เพราะ  $R_m$  มีค่าสูง จะมีผลให้การวัดคลาดเคลื่อน ในการนี้จึงใส่ตัวเก็บประจุ  $C_m$  ประมาณ  $10 \text{ pF}$  ที่ต่อระหว่างปลายล่าง  $C_t$  กับดิน และขนานกับ  $R_m$  จึงเป็นทางเบี่ยงเบนของสัญญาณประกอบที่มีความถี่สูงมากๆ ของ  $i(t)$  ฉะนั้น ถ้า  $i(t)$  เป็นพัลส์สั้นๆ รูปร่างและค่ายอดบิตเป็น  $C_m$  จะทำการอินทิเกรตกระแส และ  $R_m$  ที่ใส่ไว้จะมีผลให้เกิดการหน่วงด้วยเวลาคงตัว  $R_m C_t C_k / (C_t + C_k)$

### 2.1.7 การต่อวงจรระบบวัด PD ในวงจรทดสอบ

การต่อวงจรระบบวัด PD ในวงจรทดสอบ จะมีความแตกต่างตรงที่การต่ออิมพีแดนซ์วัด  $Z_m$  ซึ่งมาตรฐานการวัด PD ฉบับใหม่คือ IEC 60270 เรียกว่าอุปกรณ์คาบเกี่ยว (coupling device) CD ประกอบเป็นอิมพีแดนซ์วัด  $Z_m$  ต่อที่ต้นระบบวัดแบ่งเป็น 2 แบบดังในรูปที่ 2.7 a) และ b) ซึ่งเป็นวงจรตรวจวัด PD วิธีตรง (straight detection circuit)



รูปที่ 2.7 วงจรทดสอบตรวจวัด PD แบบตรง

ในวงจร	$U$	คือ แรงสูงตัวจ่าย
	$F$	คือ ตัวกรอง
	$Z_m$	คือ อิมพีแดนซ์ป้อนเข้าของระบบ
	$CC$	คือ เคเบิลวัด
	$C_t$	คือ ค่าเก็บประจุวัสดุทดสอบ
	$C_k$	คือ ค่าเก็บประจุคาบเกี่ยว
	$CD$	คือ อุปกรณ์คาบเกี่ยว

ความแตกต่างของวงจรแบบ a) และ แบบ b) คือ แบบ a) ตัวคาบเกี่ยว  $CD$  ต่ออนุกรมกับ  $C_k$  ที่มีศักย์เป็นดิน เป็นแบบที่ใช้กันมากในทางปฏิบัติ ไม่เสี่ยงต่อการเกิดเบรกดาวน เพราะทราบค่าแรงดันที่กำหนดของ  $C_k$  แต่ความไวในการวัดจะน้อยกว่าแบบ b) เพราะ PD ที่เกิดขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในวัสดุทดสอบ  $C_t$  แบบ b) จะมีความไวสูงกว่า เพราะตัวคาบเกี่ยว CD ต่ออนุกรมโดยตรงกับวัสดุทดสอบ  $C_t$  ค่าเก็บประจุสเตรย์ทั้งหลายด้านแรงสูงกับดินจะเพิ่มค่า  $C_t$  ทำให้ความไวของวงจรวัด PD สูงขึ้น คุณสมบัติที่ (2.9) แต่มีข้อเสียที่เสี่ยงต่อการเกิดเบรกดาวน์ที่วัสดุทดสอบ จะทำให้เครื่องวัด PD เสียหายได้

### 2.1.8 คุณลักษณะของระบบวัด

คุณลักษณะสำคัญของระบบวัด PD ตามมาตรฐานใหม่ IEC ได้ระบุไว้ดังนี้

1) อิมพีแดนซ์ถ่ายโอน  $Z(f)$  คือ อัตราส่วนของขนาดแรงดันด้านออก ต่อขนาดกระแสป้อนเข้า ในฟังก์ชันความถี่  $f$  เมื่อสัญญาณป้อนเข้าเป็นรูปคลื่นไซน์

2) ความถี่จำกัดล่าง และบน  $f_1$  และ  $f_2$  คือ ความถี่อิมพีแดนซ์ถ่ายโอน  $Z(f)$  ตกไป 6 dB จากค่าขอดแถบผ่าน

3) ความถี่แถบกลาง  $f_m$  และความกว้างแถบ  $\Delta f$  ตามลำดับคือ

$$f_m = (f_1 + f_2)/2$$

$$\Delta f = f_2 - f_1$$

4) เวลาแยกพัลส์ (pulse resolution time)  $T_r$  คือ เวลาที่สั้นที่สุดระหว่าง 2 พัลส์เข้าติดกัน ของพัลส์ที่แคบที่สุด รูปร่างเดียวกัน ขั้วเดียวกัน และขนาดประจุที่ขอดของผลตอบสนองขนาดเปลี่ยนแปลงไม่เกิน 10% ของพัลส์เดี่ยว ซึ่งเป็นตัวชี้บอกถึงความสามารถของเครื่องวัด PD

5) ความผิดพลาดอินทิเกรชันของการวัดประจุปรากฏเกิดขึ้น เมื่อขีดจำกัดความถี่บนของขนาดกระแสพัลส์ PD สเปกตรัมต่ำกว่า ความถี่ตัดบนของระบบวัดแถบกว้าง หรือความถี่แถบกลางของระบบวัดแบบแถบแคบ

ในระบบวัดประจุที่ปรากฏประกอบด้วย อุปกรณ์คาบเกี่ยว CD เคเบิลวัด CC และเครื่องมือวัด MI ดังรูปที่ 2.5 โดยปกติ สายเคเบิลวัดนำส่งสัญญาณออกจาก CD ไปยังด้านป้อนเข้า MI ไม่มีผลต่อลักษณะสมบัติของระบบวัด ถ้าทั้งสองปลายของเคเบิลวัดเมื่อต่อให้สมคู่กัน หรือรับกัน

อิมพีแดนซ์เข้า  $Z_{mi}$  ของ CD หรือระบบวัดมีผลต่อรูปร่างกระแสพัลส์ PD  $i(t)$  ถ้าอิมพีแดนซ์เข้ามีค่าสูงเกินไป จะทำให้ถ่ายโอนประจุระหว่าง  $C_t$  และ  $C_t$  ค่าเข้า อาจกระทบต่อขีดจำกัดความถี่บน  $Z_{mi}$  ในทางปฏิบัติ ประมาณ 100 โอห์มก็สูงพอแล้ว

### 2.1.9 เครื่องวัด PD

เครื่องหรือระบบวัด PD แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ เครื่องวัด PD แถบกว้าง และแถบแคบ

a) เครื่องวัด PD แถบกว้าง (wide band PD instrument) รวมถึงอุปกรณ์คาบเกี่ยว CD ระบุคุณลักษณะอิมพีแดนซ์ถ่ายโอน  $Z(f)$  ที่มีความถี่จำกัดล่าง  $f_1$  และบน  $f_2$  ดังนี้

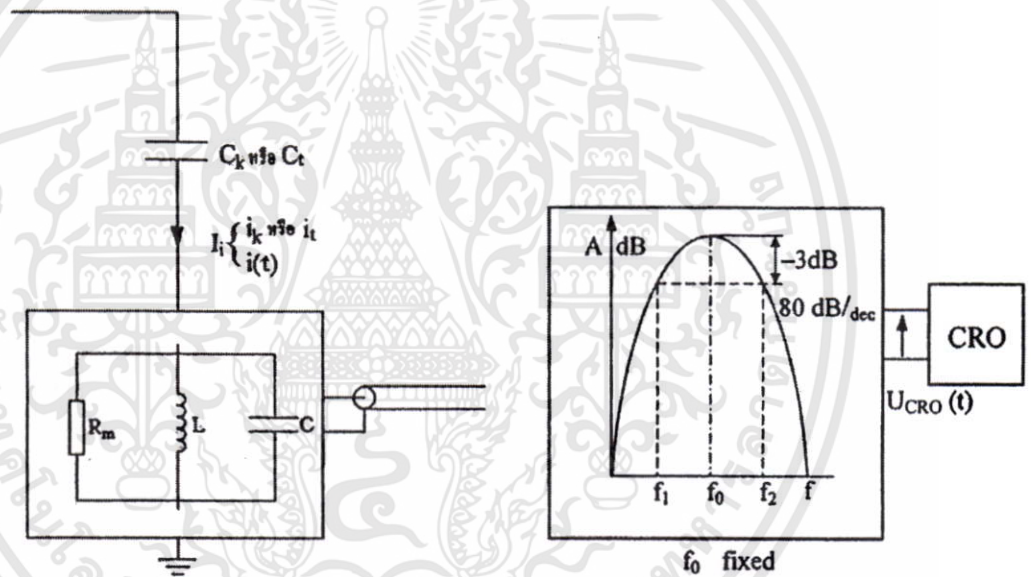
$$30 \text{ kHz} \leq f_1 \leq 100 \text{ kHz}$$

$$f_2 \leq 500 \text{ kHz}$$

$$100 \text{ kHz} \leq \Delta f \leq 400 \text{ kHz}$$

ค่าเวลาแยกชด้น้อย เช่น 5-20  $\mu\text{s}$

ในรูปที่ 2.8 แสดงถึง อุปกรณ์คาบเกี่ยว CD คือ อิมพีแดนซ์ตัววัดที่เป็นแบบความถี่สูงผ่าน ประกอบด้วยวงจรขนาน R-L-C มีแฟกเตอร์ Q ต่ำ ข้อดีที่เป็นตัวกำหนดคุณลักษณะของอุปกรณ์วัด คือ อิมพีแดนซ์ถ่ายโอน  $Z(f) = (U_0 / I_0)$  คำนวณหาได้ และวงจรขนานทำหน้าที่เป็นตัวอินทิเกรตกระแส PD  $i(t)$  เป็นตัวกรองความถี่ผ่านแถบ สมมติกระแส PD  $i(t)$  เป็นพัลส์ช่วงแคบมาก มีประจุปรากฏ  $q$



รูปที่ 2.8 อิมพีแดนซ์ตัววัดในช่องต่อคาบเกี่ยว CD ของเครื่องวัด PD แถบกว้าง

$$Z_m = \frac{U_0}{I} = \frac{R}{\sqrt{1 + Q^2 \left( \frac{f_0}{f} - \frac{f}{f_0} \right)^2}}$$

$$Q = \frac{R}{\sqrt{L/C}}$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L/C}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$C^* = C + C_c + \frac{C_t \times C_k}{C_t + C_k}$$

แรงดันออก  $U_o(t)$  คำนวณได้คือ

$$U_o(t) = \frac{q}{C} e^{-\alpha t} \left[ \cos \beta_0 - \frac{\alpha}{\beta} \sin \beta_1 \right] \quad (2.11)$$

โดยที่  $\alpha = \frac{1}{2RC}$

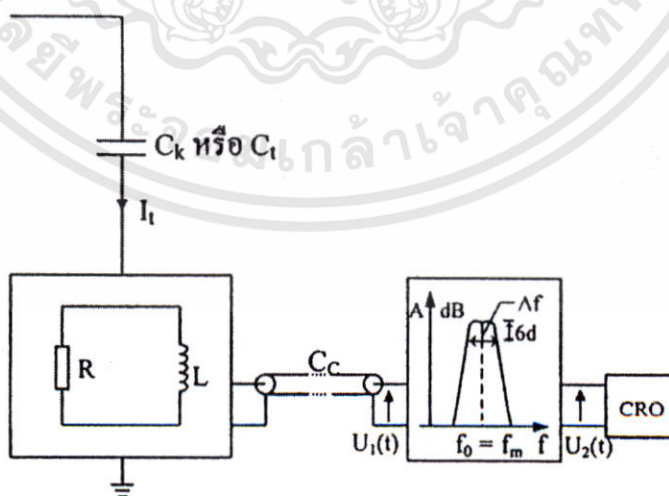
$$\beta = \sqrt{\frac{1}{LC} - \alpha^2} = \omega_0 \sqrt{1 - \alpha^2 LC}$$

แรงดันที่ได้จะเป็นสัดส่วน โดยตรงกับประจุ q

b) เครื่องวัด PD แถบแคบ (narrow band PD instrument)

ในสมัยเริ่มแรกของการวัด PD การตรวจจับกระบวนการคิซาร์จ จะใช้มิเตอร์วัดกระบวนการรบกวน (noise meter) หรือแรงดันรบกวนวิทยุ RIV (radio interference voltage) หรือเรียกว่า  $\mu V$  meter เช่น วัดแรงดันรบกวนวิทยุ ที่มาจากโคโรนาบนสายส่งจ่ายแรงสูง เป็นต้น

เครื่องวัดแถบแคบยุคปัจจุบัน โดยหลักการแล้ว ก็คือ เครื่องรับสัญญาณที่มีความไวสูง ที่สามารถปรับจูนความถี่ได้อย่างต่อเนื่องในย่าน 50 kHz ถึงหลาย MHz ที่เรียกว่า แถบแคบก็เพราะว่าความกว้างแถบของตัวกรองแอมพลิฟายเออร์เพียง 9 kHz (ที่ - 6 dB) หลักการของเครื่องวัด PD แถบแคบแสดงดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 อิมพีแดนซ์วัดในกล่องต่อคาบเกี่ยว CD ของเครื่องวัด PD แถบแคบ

กระแสพัลส์ PD ความถี่สูง  $i(t)$  ในวงจรทดสอบ การตรวจจับด้านอิมพีแดนซ์วัตต์  $Z_{mi}$  ที่เป็นชนิดความถี่ผ่านสูง ประกอบด้วยความเหนี่ยวนำ  $L$  และความต้านทาน  $R$  แต่ไม่มีค่าเก็บประจุ  $C$  ได้แรงดันออก  $U_0(t)$  ที่ทางเข้าแอมพลิฟายเออร์แถบแคบ คือ

$$U_1(t) = U_0 \exp(-t/\tau) \quad (2.12)$$

โดยที่  $\tau = (R // Z_w) \frac{C_i \times C_k}{C_i + C_k}$

$U_0$  คือ ค่าเริ่มต้นที่  $t=0$

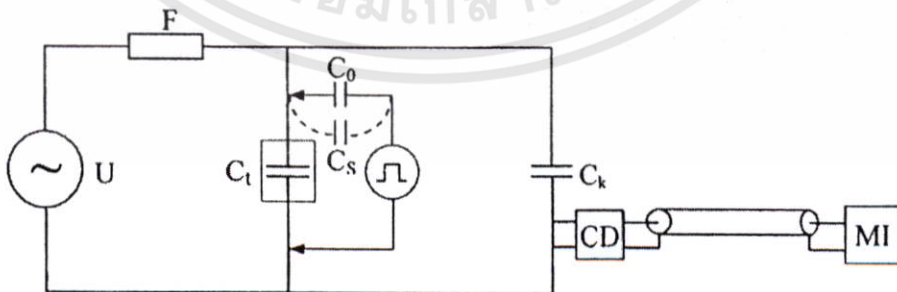
สเปกตรัมความถี่สัญญาณที่ได้  $U_1(\omega) = R i(\omega)$

$$\text{จะได้} \quad U_1(\omega) = \frac{U_0 \tau}{\sqrt{1 + (\omega \tau)^2}} = \frac{Rq}{\sqrt{1 + (\omega \tau)^2}} \quad (2.13)$$

ค่า  $U_0 \tau$  จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับประจุ  $q$

### 2.1.10 การปรับเทียบเครื่องตรวจจับ PD ในวงจรทดสอบ

เนื่องจากสัญญาณ PD ที่เข้าเครื่องวัด จะแปรตามขนาดของตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว  $C_k$  และวัสดุทดสอบ  $C_t$  จึงต้องมีการปรับเทียบด้วย PD มาตรฐานก่อนทำการป้อนแรงดันเข้าวงจรทดสอบ โดยใช้เครื่องคิสซาร์จมาตรฐานที่ทราบค่าประจุไฟฟ้าถูกต้องแน่นอน ซึ่งเป็นการจำลองการเกิด PD ด้วยการส่งกระแสพัลส์ที่มีขนาดประจุมาตรฐาน  $q_0$  ที่ขั้วทั้งสองของวัสดุทดสอบ ดังรูปที่ 2.10 เครื่องปรับเทียบคิสซาร์จมาตรฐานประกอบด้วยแหล่งจ่ายรูปขั้น  $U_0$  ต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุขนาดเล็ก  $C_0$  มาตรฐาน IEC กำหนดให้  $C_0 \leq 0.1 C_k$  ถ้า  $C_0$  เป็นตัวเก็บประจุแรงต่ำ กำหนดช่วงเวลาขึ้นของ  $U_0$  เป็น  $t_r \leq 60 \text{ ns}$

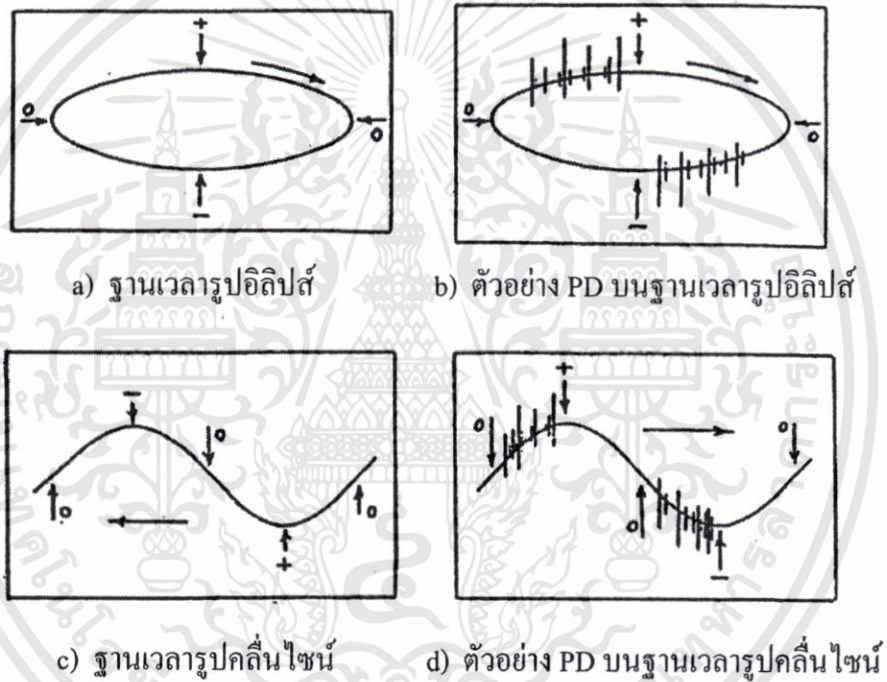


รูปที่ 2.10 การปรับเทียบวงจรทดสอบวัด PD

### 2.1.11 การแสดงผลดิซาร์จบางส่วน

การวัดค่า PD อาจวัดด้วยมิเตอร์ความถี่สูงออกมาเป็น micro-volt ( $\mu\text{V}$ ) picocoulomb (pC) ได้ แต่จะทราบเพียงขนาดของ PD เท่านั้น วิธีที่นิยมแสดงผลวัด PD ในปัจจุบัน คือ การแสดงผลบนจอออสซิลอโคป ซึ่งอาจแสดงได้ 2 แบบ คือ ให้รูปพัลส์ของ PD ปรากฏบนฐานเวลารูปอิลิปส์ ซึ่งมีเครื่องหมายแสดงตำแหน่งขอดบวก ขอดลบ และตำแหน่งศูนย์ของรูปแรงดันทดสอบ ดังรูปที่ 2.11 a, b หรือแสดงให้รูปคลื่นพัลส์ PD ปรากฏบนฐานเวลารูปคลื่นไซน์ ดังรูปที่ 2.11 c, d

การแสดงผล PD บนฐานเวลารูปคลื่นไซน์มีผลดีที่วัดขนาดได้ถูกต้อง และสังเกตตำแหน่งที่เกิดได้แน่นอน การแสดงผลบนฐานเวลารูปอิลิปส์มีข้อดี คือ แยกได้ว่า PD เกิดจากสาเหตุอะไร

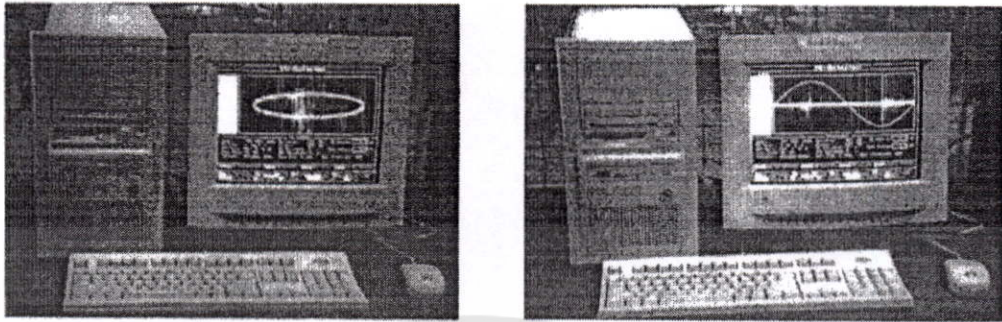


รูปที่ 2.11 การแสดงผลของ PD

### 2.1.12 เครื่องตรวจจับ PD แบบใช้คอมพิวเตอร์เป็นฐาน

ความเจริญก้าวหน้าด้านเทคโนโลยีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น คอมพิวเตอร์ ช่วยให้วิศวกรสามารถพัฒนาเครื่องตรวจจับ PD ได้สะดวกและมีประสิทธิภาพสูง โดยใช้คอมพิวเตอร์เป็นฐาน ช่วยให้สามารถวิเคราะห์สาเหตุ PD ที่เกิดในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงเป็นประเภทใด ง่ายต่อการระบุตำแหน่งที่เกิด PD ในเคเบิล วงจรภาคดิจิทัลทั้งหมดจะโปรแกรมไว้ในชิป FPGA บนแผ่น PCB ที่ติดตั้งภายในคอมพิวเตอร์ เครื่องตรวจจับ PD ดังกล่าว เป็นไปตามมาตรฐาน IEC 60270 ดัง

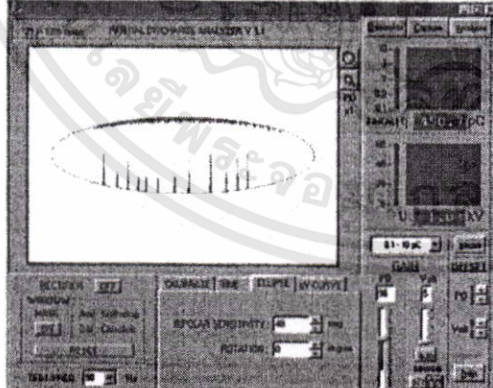
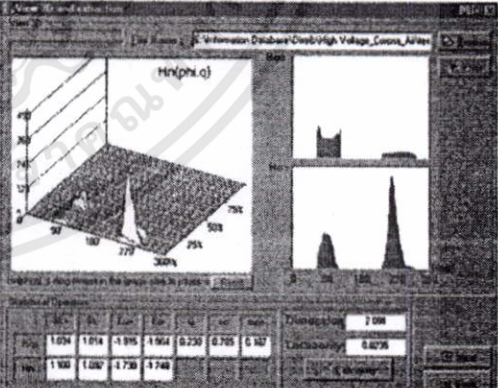
ตัวอย่าง เครื่องตรวจจับ PD ใช้คอมพิวเตอร์เป็นฐาน ที่ติดตั้งใช้ตรวจจับ PD ในกับคักแรงสูง เป็นการทดสอบประจำในโรงงานอุตสาหกรรม ดังรูปที่ 2.12 ซึ่งเป็นผลการพัฒนาเครื่องตรวจจับ PD



รูปที่ 2.12 เครื่องตรวจจับ PD โดยใช้คอมพิวเตอร์เป็นฐาน

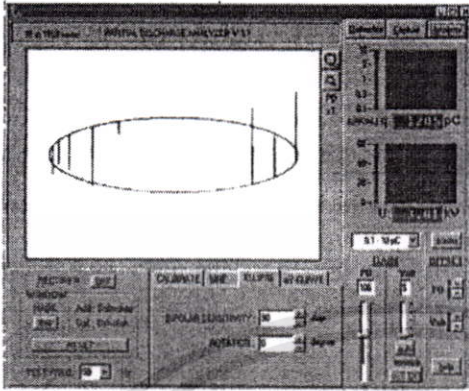
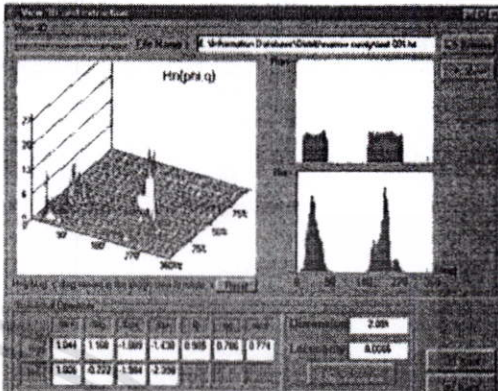
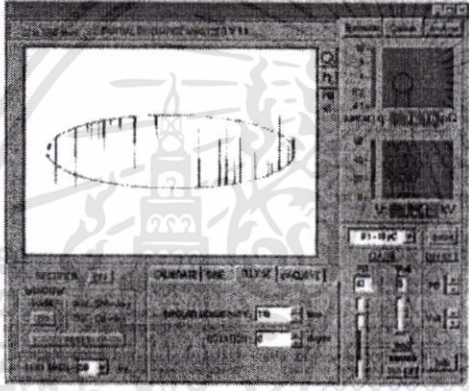
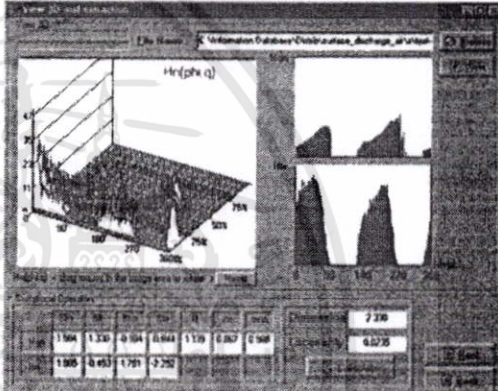
เครื่องตรวจจับ PD ใช้คอมพิวเตอร์เป็นฐาน จะบันทึกข้อมูลลงในไฟล์ กำหนดหาเมตริกซ์กระจาย และแสดงผลแบบ 3 มิติ ตัวอย่างการตรวจจับ PD ทั้ง 3 แบบ แสดงผลแบบวงรีและ 3 มิติ ดังแสดงในตารางที่ 2.1

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 (ต่อ)

ชนิด PD	การแสดงผล PD บนฐานเวลาแบบวงรี	การแสดงผล PD ในรูปแบบการกระจาย $H_n(\phi, q)$
คิตซาร์จภายใน		
คิตซาร์จตามผิว		

- โคอโรนา : แสดงบนฐานเวลารูปวงรี PD จะเกิดที่มุมเฟส  $270^\circ$  ที่ U, เมื่อ U สูงขึ้น PD จะเกิดในช่วง  $90^\circ$  ด้วย
- คิตซาร์จภายใน : แสดงบนฐานเวลารูปวงรี PD จะเกิดที่มุมเฟส  $0 - 90^\circ$  และ  $180 - 270^\circ$
- คิตซาร์จตามผิว : แสดงบนฐานเวลารูปวงรี PD จะเกิดที่มุมเฟสระหว่าง  $0 - 90^\circ$  และ  $180 - 270^\circ$

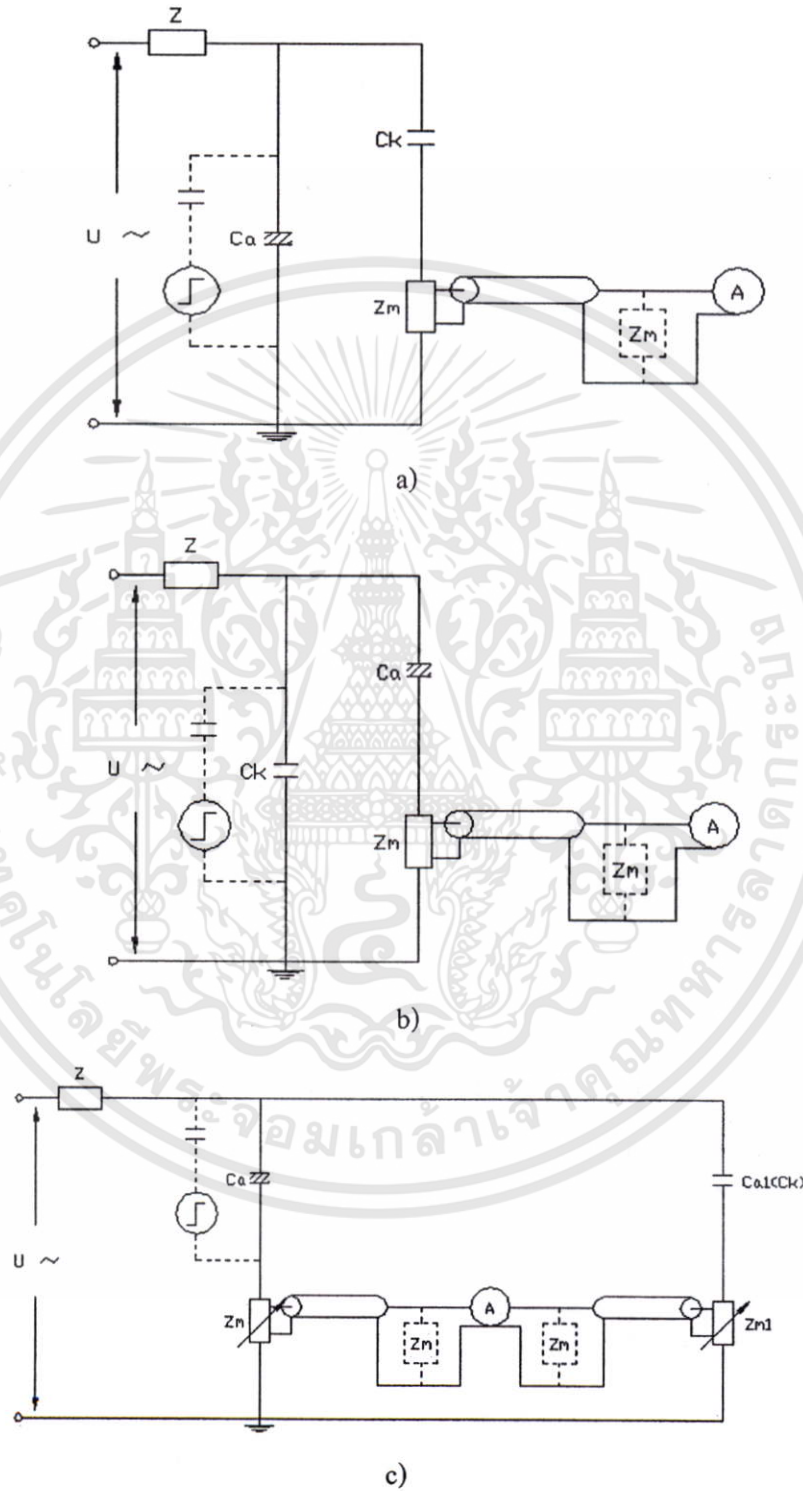
## 2.2 เทคนิคการวัดคิตซาร์จบางส่วน [3]

### 2.2.1 การวัดคิตซาร์จบางส่วนสำหรับวัสดุทดสอบทั่วไป

โดยปกติวัสดุทดสอบทั่วไป อาจแทนได้ด้วยตัวเก็บประจุชนิดองค์ประกอบแบบถั่มปีหรือตัวเก็บประจุธรรมดา วงจรทดสอบ PD ตามมาตรฐานต่างๆ จะมีลักษณะเช่นเดียวกัน ในที่นี้ใช้วงจรทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60270 โดยรูปที่ 2.13 a) และรูปที่ 2.13 b) เป็นวงจรทดสอบแบบวิธีตรง ข้อดีของวงจรรูปที่ 2.13 a) คือขั้วแรงดันต่ำของวัสดุทดสอบต่อลงกราวด์โดยตรง ในกรณีวัสดุทดสอบเกิดการเบรคความอิมพีแดนซ์วัดจะไม่ได้รับความเสียหาย ข้อดีของวงจรในรูปที่ 2.13 b) จะให้ความไวในการวัดสูงกว่าแบบแรกในกรณีวัสดุทดสอบมีขนาดเล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากผลของตัวเก็บประจุแบบสเตรย์จะทำให้ตัวเก็บประจูปลึงมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ในรูปที่ 2.13 c) เป็นวงจรทดสอบแบบสมมูล วงจรแบบนี้จะมีข้อได้เปรียบในเรื่องการลดสัญญาณรบกวนที่เข้ามาจากแหล่งจ่ายหรือสัญญาณแบบ “คอมมอนโหมด” นั่นเอง



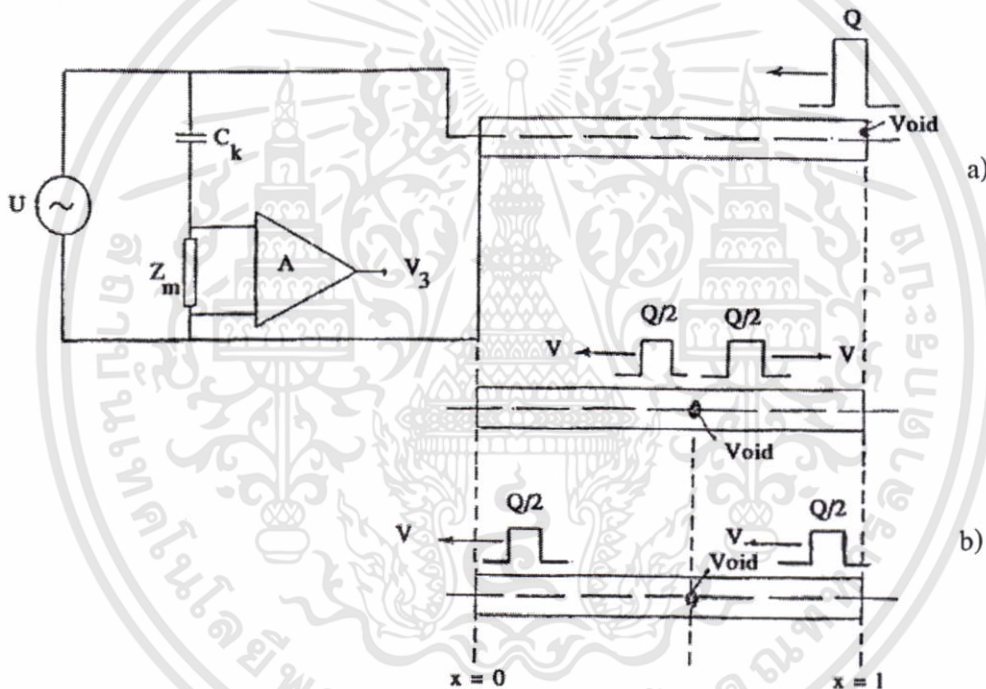
รูปที่ 2.13 วงจรทดสอบดิสซาร์จบางส่วนแบบต่างๆ ตามมาตรฐาน IEC 270

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเปรียบเทียบวงจรทดสอบ โดยปกติจะทำก่อนการป้อนแรงดันเข้าวงจรทดสอบ โดยใช้เครื่องเปรียบเทียบคิซาร์จมาตรฐานในการป้อนกระแสพัลส์สั้นๆ ที่มีประจุ (Pulse Area) ซึ่งทราบค่าที่แน่นอนที่ขั้วทั้งสองของวัสดุทดสอบ (เส้นประ) หลังจากทำการเปรียบเทียบเสร็จแล้วควรเอาเครื่องเปรียบเทียบคิซาร์จมาตรฐานออกก่อนการป้อนแรงดันเข้าวงจรทดสอบ

### 2.2.2 การวัดคิซาร์จบางส่วนสำหรับสายเคเบิล

การวัดคิซาร์จบางส่วนสำหรับเคเบิล ถ้าเป็นเคเบิลสั้น การวัด PD จะทำเช่นเดียวกับข้อ 2.2.1 แต่สำหรับเคเบิลยาวนั้นเราจะพิจารณาเคเบิลยาวเป็นลักษณะสายส่งคือ PD จะทำให้เกิดคลื่นจรเคลื่อนที่ออกไปที่ปลายทั้งสองด้านของเคเบิล วงจรทดสอบแสดงดังรูปที่ 2.14 โดยรูปที่ 2.14 a) แสดงการเกิด PD ที่ปลายด้านไกล ( $x = 1$ ) ของเคเบิล ส่วนในรูปที่ 2.14 b) แสดงการเกิด PD ที่จุดใดๆ ภายในเคเบิล

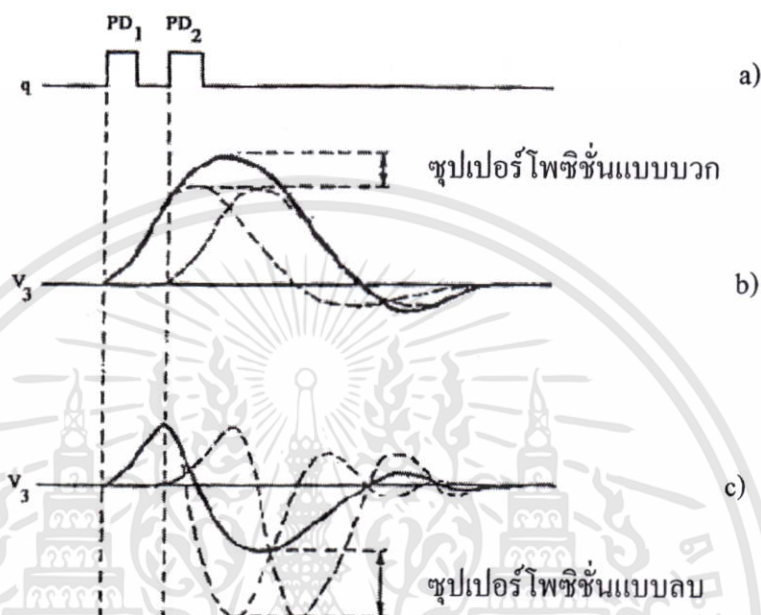


รูปที่ 2.14 การเกิดคลื่นจรขณะเกิด PD ในเคเบิลยาว

ขณะเกิด PD จะทำให้คลื่นจรถูกแรกเคลื่อนที่ไปที่เครื่องตรวจจับ PD โดยตรง ในขณะที่คลื่นจรที่สองจะเคลื่อนที่ไปปลายด้านไกลก่อนแล้วจึงจะสะท้อนกลับมาที่เครื่องตรวจจับ PD ในเวลาใกล้เคียงกัน ผลอันนี้ทำให้เครื่องตรวจจับ PD วัดค่าผิดพลาดเนื่องจากการเกิดชูปเปอร์โพสิชันของคลื่นจรที่เกิดขึ้น ในกรณีที่คลื่นจรเกิดชูปเปอร์โพสิชันแบบบวกจะทำให้ค่าที่อ่านได้มากกว่าค่าที่เกิดขึ้นจริง (ไม่เกิน 2 เท่าของค่าปกติ) ซึ่งเป็นกรณีที่ยอมรับได้ สำหรับกรณีที่คลื่นจรเกิดชูปเปอร์โพสิชันแบบลบจะทำให้ค่า PD ที่อ่านได้น้อยกว่าค่าของ PD ที่เกิดขึ้นจริง กรณีนี้เป็นกรณีที่ยอมรับไม่ได้ การทดสอบ PD ต้องมีการหลีกเลี่ยงผลอันนี้ วิธีการแก้ปัญหานั้น

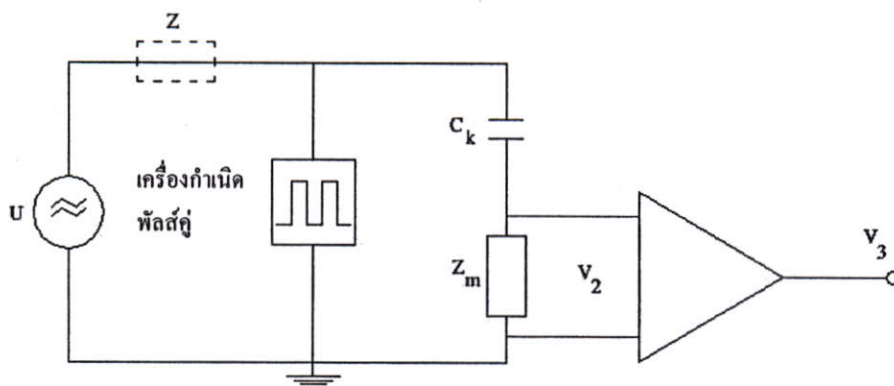
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประหัดและเป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไป ทำให้โดยการใช้เครื่องตรวจจับ PD แบบแถบกว้าง ซึ่งให้เอาต์พุตเป็นแบบ “ $\alpha$ -response” ดังนั้นขณะที่มีการสะท้อนของคลื่นจรจะทำให้เกิดชูปเปอร์โพซิชันแบบบวกเท่านั้น แสดงดังรูปที่ 2.15 a) ส่วนเครื่องตรวจจับ PD แบบอื่นจะให้เอาต์พุตแบบ “ $\beta$ -response” ทำให้มีโอกาสเกิดชูปเปอร์โพซิชันแบบลบได้ แสดงดังรูปที่ 2.15 b) จึงควรหลีกเลี่ยงเครื่องตรวจจับแบบนี้ในการทดสอบสายเคเบิลยาว



รูปที่ 2.15 การเกิดชูปเปอร์โพซิชันสัญญาณเอาต์พุตของเครื่องตรวจจับ PD แบบต่างๆ

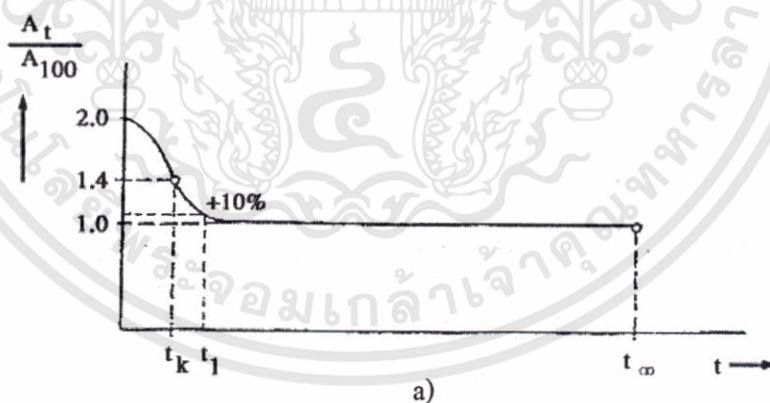
ในการทดสอบสายเคเบิล เช่น NEMA Publ. No. W8-1976 (ICEA Publ. No. 5-68-516) และ IEC Publ. No. 885-3 ได้กำหนดการตรวจสอบคุณสมบัติชูปเปอร์โพซิชันของเครื่องตรวจจับ PD สำหรับใช้ในการทดสอบเคเบิล ซึ่งวงจรทดสอบดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 2.16 โดยใช้เครื่องมือที่เรียกว่า “เครื่องกำเนิดพัลส์คู่” ในการจำลองคลื่นจรลักษณะเดียวกันกับที่เกิดในเคเบิล แต่สามารถปรับระยะเวลาของคลื่นจรทั้งสองที่เวลาต่างๆ ตั้งแต่ 0.2 ถึง 100 ไมโครวินาที แล้วเขียน “ไดอะแกรมพัลส์คู่” เพื่อดูลักษณะการเกิดชูปเปอร์โพซิชันคลื่นจรที่เวลาต่างๆ รูปที่ 2.17 ก) แสดงไดอะแกรมพัลส์คู่ที่ไม่เกิดชูปเปอร์โพซิชันแบบลบ ( $\alpha$ -response) ส่วนในรูปที่ 2.17 ข) แสดงไดอะแกรมพัลส์คู่ที่เกิดชูปเปอร์โพซิชันแบบลบในช่วงเวลา  $t_1$  ถึง  $t_2$  ( $\beta$ -response) อย่างไรก็ตาม IEC Publ. No. 885-3 ยอมให้เกิดชูปเปอร์โพซิชันแบบลบได้ไม่เกิน 10% ส่วน NEMA Publ. No. WC8-1976 ยอมให้เกิดการรวมกันแบบลบได้ไม่เกิน 15% นอกจากนี้ NEMA ยังกำหนดอีกด้วยว่า “เวลาแยกซัด” (Pulse Resolution Time) ของเครื่องตรวจจับ PD ควรมีค่าประมาณ 4 ถึง 6 ไมโครวินาที (เวลาแยกซัดจะคิดที่เวลาที่ทำให้เกิดชูปเปอร์โพซิชันแบบบวกไม่เกิน 10%)



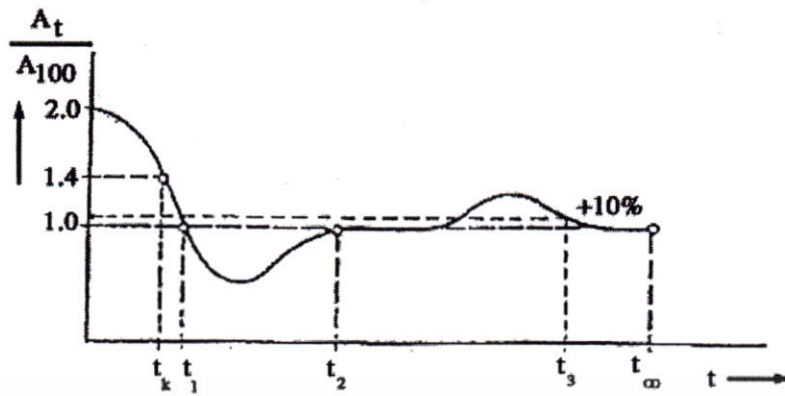
รูปที่ 2.16 วงจรตรวจสอบคุณสมบัติชุปเปอร์โพสิชันของเครื่องตรวจจับ PD

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

ในทางปฏิบัติจะพบว่า ในการทดสอบเคเบิลยาวจะมีผลการสูญเสียพลังงานของคลื่นจรเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย คือขณะที่คลื่นจรเคลื่อนที่ไปจะทำให้มีขนาดลดลงเรื่อยๆ ทำให้ค่าที่อ่านได้ผิดพลาด สำหรับ IEC Publ. No. 885-3 จะยอมให้ค่าที่อ่านได้ในกรณีนี้เมื่อรวมผลของชุปเปอร์โพสิชันเข้าไปจะต้องผิดพลาดน้อยกว่าความเป็นจริงไม่เกิน 30% ในรูปที่ 2.18 แสดงไดอะแกรมพัลส์คู่ เมื่อเกิดการสูญเสียในเคเบิลเข้าไปด้วย

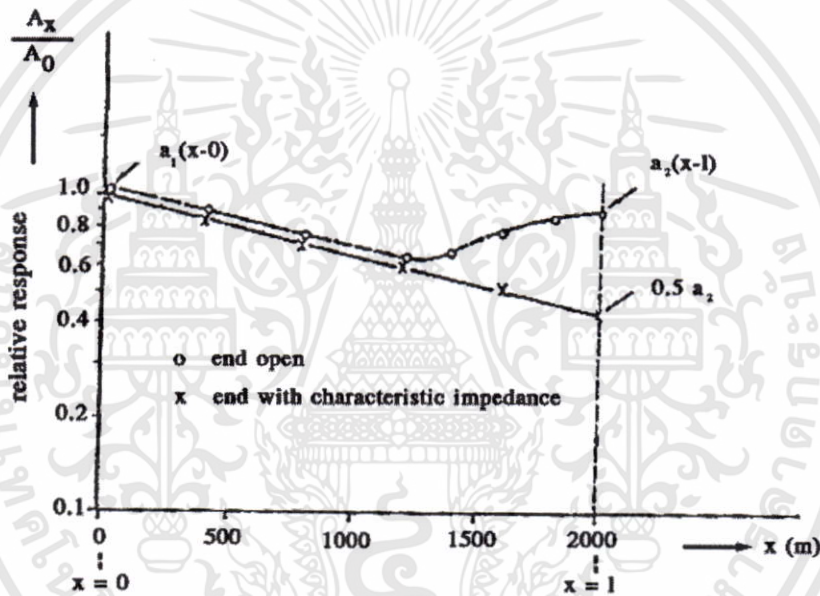


a)



b)

รูปที่ 2.17 ไดอะแกรมพล็อตคู่ของเครื่องตรวจจับ PD แบบต่างๆ

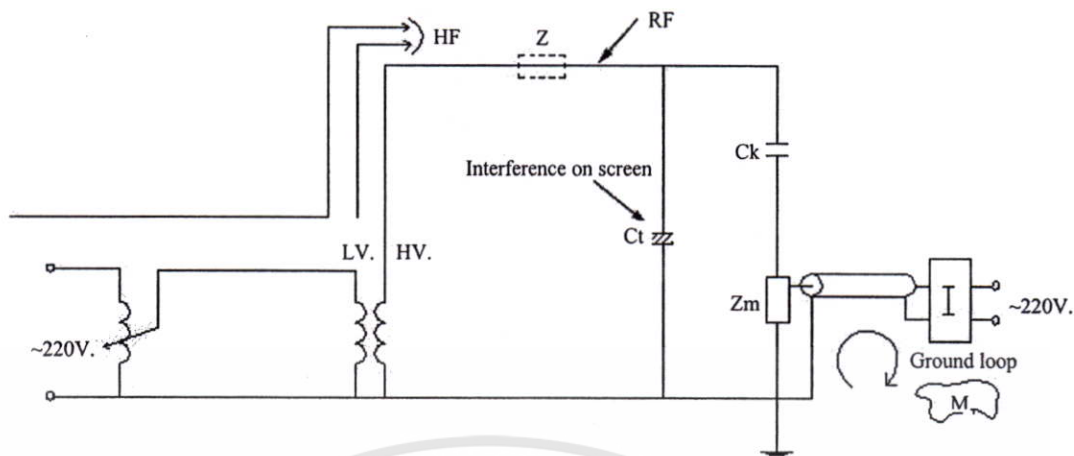


รูปที่ 2.18 ไดอะแกรมพล็อตคู่เมื่อเกิดการสูญเสียในเคเบิล

### 2.3 เทคนิคการลดสัญญาณรบกวน [3]

#### 2.2.1 สัญญาณรบกวนที่มีผลกระทบในการวัดดิซาร์จบางส่วน

สัญญาณรบกวนจะประกอบด้วย สัญญาณรบกวนที่เข้ามาทางอากาศ และทางแหล่งจ่าย นอกจากนี้ยังมีสัญญาณรบกวนเนื่องจากการดิซาร์จของอุปกรณ์ที่เป็นโลหะและวางอยู่ใกล้วงจรทดสอบหรือกราวด์ไม่ดี การเกิดกราวด์ลูป (Ground Loop) และเกิดสัญญาณออสซิลเลตเนื่องจากการเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์ไม่ดี (หลวม) เป็นต้น รายละเอียดแสดงดังรูปที่ 2.19



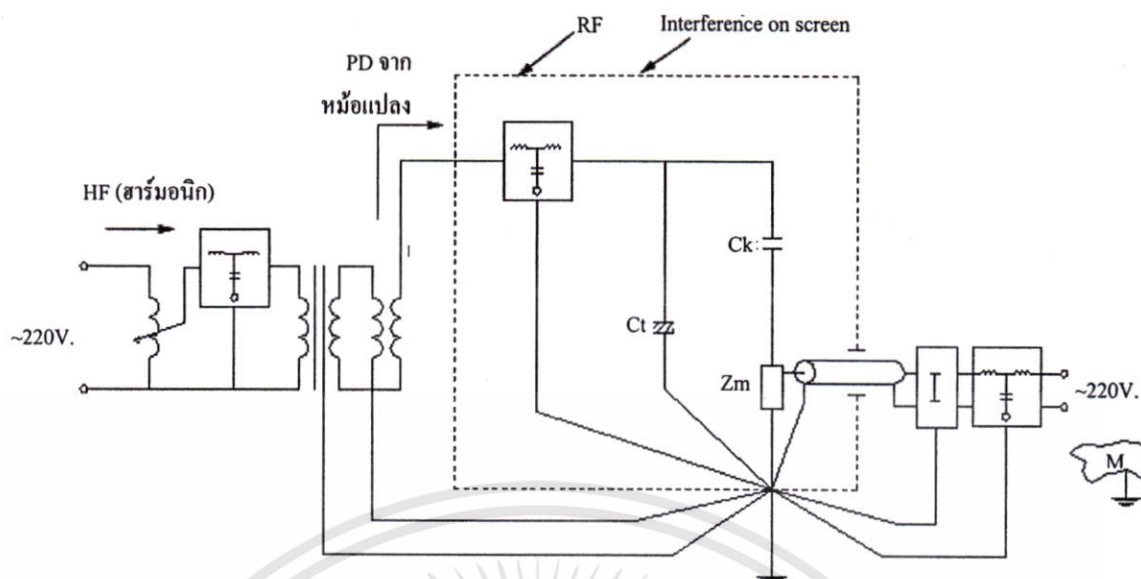
รูปที่ 2.19 ตัวอย่างสัญญาณรบกวนที่ตำแหน่งต่างๆ

- HF คือ สัญญาณรบกวนความถี่สูงที่เข้ามาจากแหล่งจ่ายได้แก่ ฮาร์มอนิกสูงๆ จากเมน โดยตรงจากอุปกรณ์พวก ทรินสเตอร์ และ PD จากหม้อแปลงทดสอบ เป็นต้น
- RF คือ คลื่นรบกวนวิทยุซึ่งอาจจะเป็นคลื่นวิทยุโดยตรง คลื่นรบกวนจากอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง หรือหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่อยู่ใกล้เคียง
- EMP คือ สัญญาณรบกวนจากการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก เนื่องจากการทำงานของ สวิตช์หรือ ทรินสเตอร์
- Interference on screen คือ สัญญาณรบกวนที่สกรีนหรือที่ขั้วแรงดันต่ำของวัสดุทดสอบที่มีสกรีนขนาดใหญ่ เช่น เคเบิล เป็นต้น
- Ground Loop คือ การเกิดกรบวงรอบของสายดิน
- Ungrounded metal (M) คือ การดิซอาร์จของพวกโลหะที่ไม่ได้ต่อลงดินวางอยู่ใกล้วงจรทดสอบ

## 2.2.2 การลดสัญญาณรบกวน

### 1 การลดสัญญาณรบกวนโดยตรง

การลดสัญญาณความถี่สูง เช่น พวกราร์มอนิกสูงๆ จะใช้ตัวกรองแรงดันต่ำ และอาจจะเพิ่มหม้อแปลงขดลวดแยกช่วยด้วยก็ได้ โดยต่อไว้ทางด้านขดลวดแรงดันต่ำของหม้อแปลงทดสอบ ในกรณีที่เกิด PD ในหม้อแปลงทดสอบจะต้องใช้ตัวกรองแรงดันสูงต่อทางด้านขดลวดแรงดันสูงของหม้อแปลงทดสอบ การลดสัญญาณรบกวน RF และ EMP ซึ่งเข้ามาทางอากาศ ทำได้โดยการทดสอบในห้องชีลด์ การแก้ปัญหาเรื่องกราวด์รูปทำได้โดยการต่อกราวด์รวมกันเพียงจุดเดียว ตัวอย่างการแก้ปัญหาสัญญาณรบกวนในข้อ 2.2.1 แสดงในรูปที่ 2.20

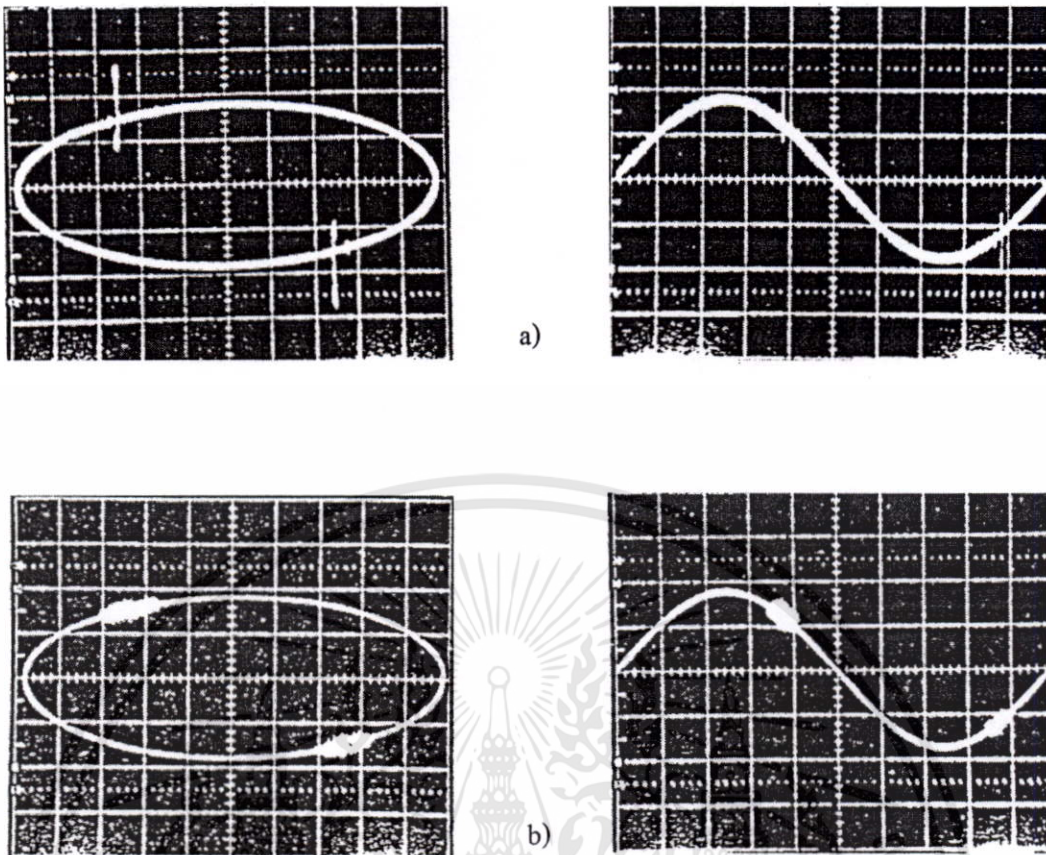


รูปที่ 2.20 ตัวอย่างการทดสอบรบกวน

## 2 การทดสอบรบกวนวิธีอื่นๆ

การทดสอบรบกวนวิธีอื่นมีหลายวิธีด้วยกัน ที่นิยมใช้กันมากคือ

- 1) วงจรทดสอบแบบสมดุล ใช้ทดสอบรบกวนแบบ “คอมมอน โหมด” เช่น สัญญาณรบกวนที่เข้ามาทางแหล่งจ่าย เป็นต้น
- 2) การทดสอบรบกวนโดยวิธี “หน้าต่างเวลา” (Time Window Method) วิธีนี้เป็นที่นิยมกันมากในปัจจุบัน โดยจะทดสอบรบกวนที่ซิงโครไนซ์กับความถี่ของแหล่งจ่ายเท่านั้น เช่น สัญญาณรบกวนเนื่องจากการทำงานของไคริสเตอร์ เป็นต้น ด้วยการสวิตช์ตัดหรือเปิดวงจรตรงตำแหน่งที่มีสัญญาณรบกวน เพื่อไม่ให้ไปปรากฏที่เอาต์พุตของเครื่องจับ PD รูปที่ 2.21 a) แสดงตัวอย่างสัญญาณรบกวนจากไคริสเตอร์ รูปที่ 2.21 b) แสดงการกำจัดสัญญาณรบกวนโดยวิธี “หน้าต่างเวลา” และเพิ่มความสว่างของจอภาพ ณ ตำแหน่งนั้น เพื่อบอกตำแหน่งของ “หน้าต่างเวลา” ให้ทราบ



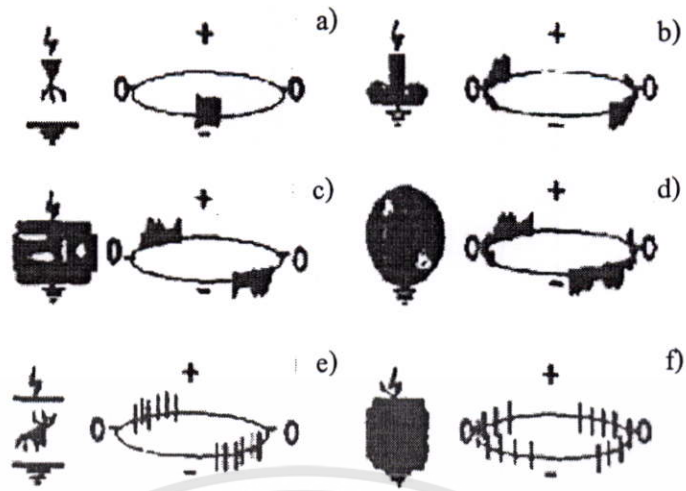
รูปที่ 2.21 การทดสอบสัญญาณรบกวนด้วยวิธี “หน้าต่างเวลา”

#### 2.4 การจำแนกชนิดของดิสชาร์จบางส่วน [11-12]

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 เกิดขึ้นในกรณีที่มีโลหะที่อยู่ใกล้ฉนวนจรทดสอบไม่ได้ทำการต่อลงกราวด์
6. Contact noise เกิดขึ้นจากการต่อกราวด์ในวงจรทดสอบไม่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



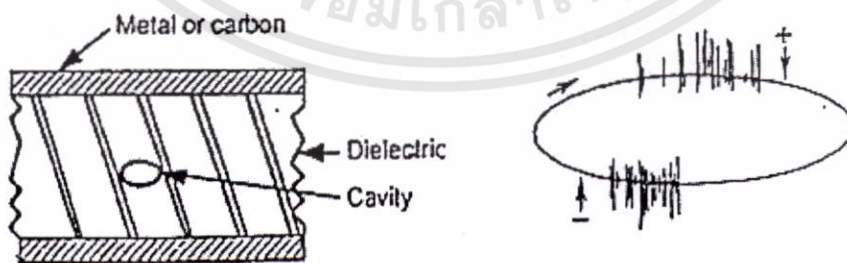
รูปที่ 2.22 ลักษณะสัญญาณคิสซาร์จบางส่วนแบบต่างๆ

โดยทั่วไปคิสซาร์จบางส่วนในฉนวนสายเคเบิล จะหมายถึงคิสซาร์จบางส่วนภายใน [9-10] ซึ่งสามารถแยกออกเป็นชนิดต่างๆ ได้ดังต่อไปนี้ [13]

1) การคิสซาร์จที่เกิดจากโพรงอากาศภายใน ไดอิเล็กตริก

โพรงอากาศชนิดนี้มักจะพบในฉนวนแข็ง มีสาเหตุมาจากกระบวนการผลิต เช่น การหล่อ การหุ้ม คิสซาร์จชนิดนี้จะเกิดขึ้นก่อนค่าแรงดันสูงสุด และจะหยุดคิสซาร์จเมื่อถึงค่าแรงดันสูงสุด เกิดขึ้นทั้งในไซเคิลบวกและไซเคิลลบของแรงดันรูปไซน์

ตำแหน่งของการคิสซาร์จที่แสดงโดยออสซิลโลสโคป มีลักษณะเป็นเส้นตั้งฉากบนรูปวงรีในช่วงที่แสดงผลของการคิสซาร์จบางส่วน ขนาดของการคิสซาร์จนี้จะขึ้นอยู่กับขนาดและจำนวนของโพรงอากาศ คิสซาร์จชนิดนี้มีผลกระทบจากแรงดันและช่วงเวลาน้อยมาก กล่าวคือ เมื่อแรงดันและช่วงเวลาเพิ่มขึ้น ขนาดของการคิสซาร์จบางส่วนจะไม่เปลี่ยนแปลงจากการทดสอบที่แรงดันเริ่มต้นและช่วงเวลาที่กำหนด ( $\cong 10$  นาที)



a) โพรงอากาศที่เกิดขึ้นในไดอิเล็กตริก

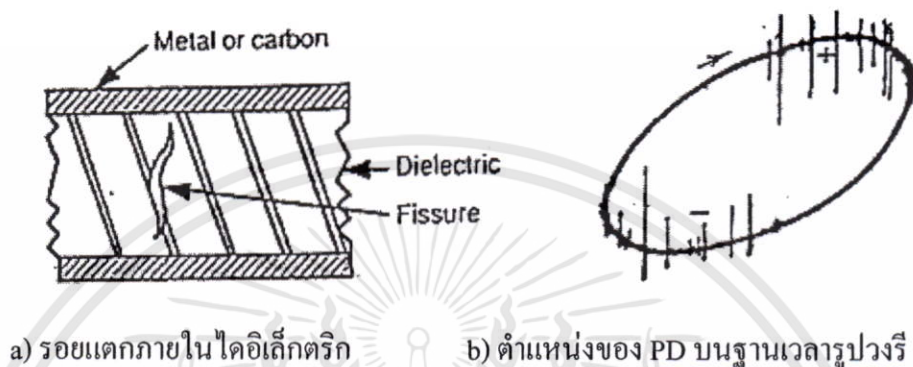
b) ตำแหน่งของ PD บนฐานเวลารูปวงรี

รูปที่ 2.23 คิสซาร์จบางส่วนที่เกิดจากโพรงอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2) การคิสซาร์จที่เกิดจากรอยแตกภายในไดอิเล็กตริก

การคิสซาร์จชนิดนี้โดยมากจะพบมากในไดอิเล็กตริกที่มีความยืดหยุ่น เช่น เทอร์โมพลาสติก รอยแตกที่เกิดขึ้นจะมีทิศทางเดียวกันกับสนามไฟฟ้า สาเหตุโดยทั่วไปจะเกิดจากสิ่งสกปรกที่เกิดขึ้นในไดอิเล็กตริกและฟองหรือโพรงอากาศที่เกิดใกล้ๆ กัน และขยายตัวรวมกัน ปรากฏการณ์นี้จะพบบ่อยในสายเคเบิลที่ใช้งานไประยะหนึ่งแล้ว



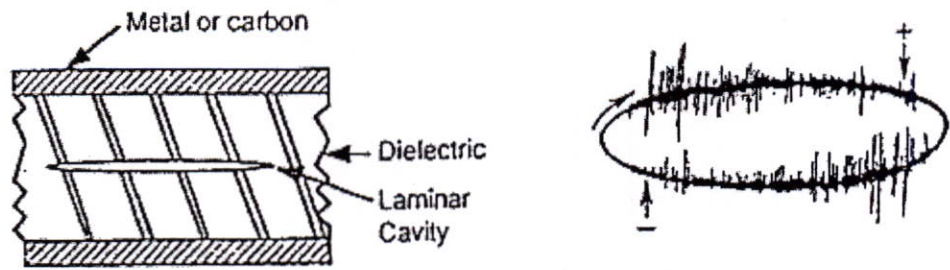
รูปที่ 2.24 คิสซาร์จบางส่วนที่เกิดจากรอยแตก

การคิสซาร์จชนิดนี้จะเกิดขึ้นในระหว่างค่าแรงดันสูงสุด โดยจะเกิดขึ้นก่อนและหลังค่าแรงดันสูงสุดเล็กน้อย ทั้งไซเคิลบวกและลบของแรงดันรูปคลื่นไซน์

ค่าของการคิสซาร์จบางส่วนนอกจากจะขึ้นอยู่กับแรงดันและช่วงเวลาแล้วยังขึ้นอยู่กับขนาดของรอยแตกด้วย ถ้าหากรอยแตกมีขนาดใหญ่ ขนาดของการคิสซาร์จก็จะมีมาก แต่เมื่อแรงดันสูงมากขึ้นในช่วงเวลา  $\approx 30$  นาที ขนาดของการคิสซาร์จจะค่อยๆ ลดลง

## 3) การคิสซาร์จที่เกิดจากเศษวัสดุและสิ่งเจือปนภายในไดอิเล็กตริก

เศษวัสดุและสิ่งเจือปนนี้โดยมากจะมีสาเหตุมาจากกระบวนการผลิต เศษวัสดุ จะหมายถึงเศษวัสดุที่ใช้ทำฉนวนที่เกิดการไหม้และตกค้างจากกระบวนการผลิต เช่น เซมิคอนดักเตอร์ที่ไหม้ หรือเศษใยไฟเบอร์ ส่วนสิ่งเจือปน จะหมายถึงสิ่งเจือปนภายนอก ได้แก่ ฝุ่นละออง เศษผงต่างๆ เศษวัสดุและสิ่งเจือปนจะเข้าไปแทรกอยู่ในไดอิเล็กตริก การคิสซาร์จชนิดนี้ยังรวมไปถึงส่วนที่ขรุขระและตำหนิของไดอิเล็กตริกด้วย



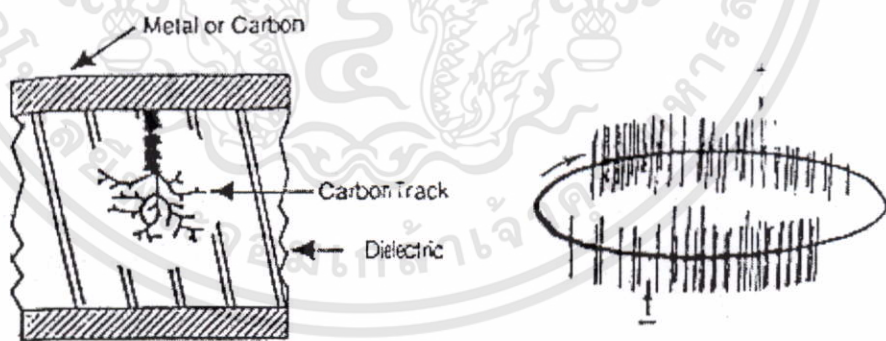
a) เศษวัสดุและสิ่งเจือปนภายในไดอิเล็กตริก      b) ตำแหน่งของ PD บนฐานเวลารูปวงรี

### รูปที่ 2.25 คิสซาร์จบางส่วนที่เกิดจากเศษวัสดุและสิ่งเจือปน

การคิสซาร์จชนิดนี้จะเกิดขึ้นในระหว่างค่าแรงดันสูงสุด คล้ายกับชนิดที่ 2 แต่จะเกิดหลังค่าแรงดันสูงสุด ไปเล็กน้อยจะมีการคิสซาร์จเพิ่มมากขึ้น จะเกิดทั้งไขเคลือบและลบของแรงดันรูปไซน์ โดยก่อนที่จะถึงค่าแรงดันสูงสุดขนาดของการคิสซาร์จจะน้อยกว่าหลังค่าแรงดันสูงสุด

#### 4) การคิสซาร์จที่เกิดจากการขยายตัวของคาร์บอนแทรก

การคิสซาร์จชนิดนี้จะเกิดในสารอินทรีย์ ที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบของวัสดุที่ใช้ทำฉนวน เช่น ทรอสติก โพลีเอทีลีน เอทีลีน และ โพลีเมอร์ต่างๆ สาเหตุโดยทั่วไปเกิดจากการที่ไดอิเล็กตริกมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงมากทำให้เกิดรอยแตกเป็นเส้นเล็กๆ ภายในไดอิเล็กตริก



a) คาร์บอนแทรกภายในไดอิเล็กตริก      b) ตำแหน่งของ PD บนฐานเวลารูปวงรี

### รูปที่ 2.26 คิสซาร์จบางส่วนที่เกิดจากการขยายตัวของคาร์บอนแทรก

การคิสซาร์จชนิดนี้จะเกิดขึ้นที่แรงดันต่ำจนถึงแรงดันสูง โดยเฉพาะก่อนที่จะถึงค่าสูงสุด ขนาดของการคิสซาร์จจะมีปริมาณมาก ทั้งไขเคลือบและลบของแรงดันรูปคลื่นขนาดของ การคิสซาร์จจะขึ้นอยู่กับขนาดของคาร์บอนแทรก โดยทั่วไปการคิสซาร์จ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชนิดนี้จะเกิดขึ้นทุกค่าของแรงดัน ยกเว้นค่าแรงดันเท่ากับศูนย์หรือไม่มีการคิซซารัจ ขนาดของการคิซซารัจจะมีขนาดใหญ่และเกือบจะเท่ากันในทุกๆ ตำแหน่ง แรงดันและช่วงเวลามีผลต่อการขยายตัวของรอยแตกและขนาดของการคิซซารัจ ที่แรงดันสูงมากๆ จะทำให้ขนาดของการคิซซารัจเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยที่ขนาดของการคิซซารัจจะไม่คงที่ การทดสอบที่ซ้ำๆ จะทำให้ขนาดของการบรอนแทรกขยายตัวใหญ่ขึ้น จากการจำแนกชนิดของการคิซซารัจบางส่วน จากความบกพร่องของโคอิเล็คทริกในสายเคเบิลสามารถใช้เป็นพื้นฐานในการตั้งข้อสันนิษฐานเกี่ยวกับการคิซซารัจบางส่วนที่เกิดขึ้นว่ามีสาเหตุมาจากอะไร แต่ในทางปฏิบัติจะพบว่าการแสดงผลของการคิซซารัจบางส่วนจะประกอบไปด้วยสาเหตุหลายชนิดดังที่กล่าวมาแล้วรวมกันทั้งสัญญาณรบกวนจะภายใน ดังนั้นจึงต้องมีวงจรกรองสัญญาณรบกวนเหล่านี้ออก เพื่อที่จะแสดงขนาดของการคิซซารัจบางส่วนได้อย่างถูกต้อง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

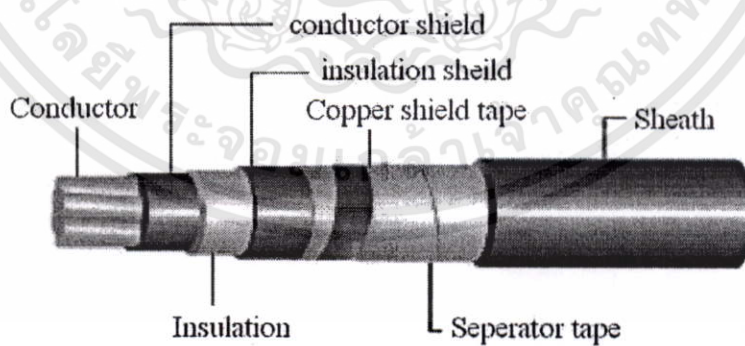
## ทฤษฎีและการออกแบบสร้างขั้วต่อสายเคเบิลใต้ดินแรงดันสูง สำหรับทดสอบหาดีสชาร์จบางส่วน

### 3.1 บทนำ

วิทยานิพนธ์ในบทนี้จะกล่าวถึง ทฤษฎีและการออกแบบสร้างขั้วต่อสายเคเบิลใต้ดินแรงดันสูงสำหรับทดสอบหาดีสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิลใต้ดินแรงดันสูง พิกัด 12/20 (24) กิโลโวลต์ ขนาด 240 ตารางมิลลิเมตร โดยทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการวิจัยจะอธิบายถึง โครงสร้างของสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวน XLPE การฉนวนสายเคเบิล ความคงทนของฉนวนทางไฟฟ้า สนามไฟฟ้าในฉนวนเคเบิลแรงดันสูง มิติที่เหมาะสมของทรงกระบอกซ้อนกัน และการควบคุมสนามไฟฟ้าของสายเคเบิล การออกแบบขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงประกอบด้วย การออกแบบเส้นผ่านศูนย์กลางของขั้วต่อสาย การออกแบบปลายสายและฐานรองรับปลายสาย การออกแบบความยาวของขั้วต่อสาย ชุดรองรับขั้วต่อสายเคเบิลและการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้าในขั้วต่อสายเคเบิล

### 3.2 โครงสร้างของสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวน XLPE [3]

สายตัวนำที่จะกล่าวนี้เป็นสายตัวนำที่ใช้ในระบบแรงดัน 22 kV และ 24 kV ซึ่งเป็นสายทองแดงหุ้มฉนวน XLPE การเลือกใช้ทองแดงเนื่องจากเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี ส่วนประกอบของสายเคเบิลใต้ดินแสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ส่วนต่างๆของสายเคเบิลแรงสูงฉนวน XLPE

### 3.2.1 ตัวนำ (Conductor)

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

### 3.2.2 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 Semi conductor เพื่อป้องกันการเกิด Partial Discharge การเคลือบผิวสายตัวนำนอกและผิวนอกของฉนวน XLPE ด้วย Semiconductor จะกระทำในระหว่างกระบวนการหลอมละลาย (Extruding Process)

### 3.2.3 Insulation

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

3.2.3.1 High Dielectric Strength คือมีค่าความต้านทานสูงต่อแรงดันไฟฟ้า

3.2.3.2 Low Dielectric Constant หรือ Specific Inductive Capacitance ถ้ามีค่าต่ำ จะให้เกิดค่า Capacitance ระหว่างสายตัวนำกับ Shield ต่ำด้วย เนื่องจากถ้า Capacitance มีค่าสูง ค่าสูญเสียก็จะสูงตามไปด้วย

3.2.3.3 Low Power Factor เนื่องจากกระแสสลับจะทำให้เกิดค่า Leakage Current ในฉนวนเป็นผลให้เกิดค่าสูญเสียในรูปของความร้อนซึ่งเรียกว่า Dielectric Loss อัตราของ Dielectric Loss ต่อ Apparent Loss คือ Power Factor เนื่องจากค่า Dielectric Loss เป็นค่าที่ไม่ต้องการให้เกิดขึ้นในระบบ ถ้ามีค่านี้นต่ำจะเป็นผลทำให้ Power factor ต่ำด้วย เราจึงอาจดูค่าของ Dielectric Loss ได้จากค่า Power factor

- 3.2.3.4 Moisture Resistance ต้องมีค่าสูงหรือค่าความต้านทานต่อความชื้นสูง เพราะถ้าความต้านทานต่อความชื้นต่ำ วัสดุก็จะดูดซับความชื้นได้มาก จะเป็นผลให้คุณสมบัติในการเป็นฉนวนไฟฟ้าลดลงและเสื่อมสภาพในที่สุด
- 3.2.3.5 High Resistance to Heat ฉนวนควรทนต่อความร้อนที่อุณหภูมิสูงๆ ได้ เมื่อสายตัวนำมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านจะเกิดความร้อนได้ดังกล่าวแล้วในตอนต้น ถ้าฉนวนทนความร้อนได้สูง สายไฟฟ้านั้นก็จะนำกระแสได้มากด้วย
- 3.2.3.6 High Resistance to Corona Damage ดังที่ได้กล่าวแล้วในตอนต้นว่า ระหว่าง สายตัวนำกับ Shield จะมีลักษณะเป็น Capacitance และจะมีความต่างศักย์ระหว่างสายตัวนำกับ Shield ในกรณีที่เกิดมีช่องอากาศขึ้นในฉนวน (Void) จะเกิดความต่างศักย์ระหว่างผนังของช่องอากาศด้านที่อยู่ใกล้กับ Shield กับด้านที่อยู่ใกล้ตัวนำจะทำให้อากาศใน Void นั้นเกิด Corona Discharge ทำให้เกิดพลังงานไฟฟ้าสูญเสียอีกด้วย ฉนวนบริเวณนั้นจะเกิดความร้อนและไหม้กลายเป็น Carbon และ Void นี้ก็จะโตขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งฉนวนเกิด Breakdown และใช้ไม่ได้อีกต่อไป แต่อาการแบบนี้จะเกิดขึ้นและขยายตัวไปได้ค่อนข้างช้าในระยะแรกๆ ที่ทำการติดตั้งใหม่ๆ จึงไม่เกิดสภาพเช่นนี้ ในการผลิตและการทำงานควรมีการทดสอบค่า Corona Discharge ไม่ให้มีค่ามากจนอาจเกิดอันตรายได้ในช่วงระยะเวลาอายุการใช้งานของสายไฟฟ้า

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

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

### 3.2.5 Copper Shield

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

1. ทำหน้าที่ปล่อย (Drain) กระแส Discharge ต่างๆ ลงดิน และยังทำหน้าที่ปรับระดับความต่างศักย์ของ Insulating Shield ให้เท่ากับดินอีกด้วย
2. ช่วยลดความเสียหายของสายอันเนื่องจาก Surge Voltage

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3. สามารถออกแบบให้นำกระแสอันเนื่องจาก Fault ได้ถ้าต้องการ

#### 3.2.6 Separator Tape หรือเรียกว่า Bedding Type

ปกติทำด้วยวัสดุจำพวกผ้า ทำหน้าที่เพิ่มความแข็งแรงของเปลือกนอกและยังช่วยเพิ่มความถี่ระหว่างเปลือกนอกกับ Metal Tape กรณีที่มีสายตัดโค้งหรืองอ

#### 3.2.7 Sheath หรือเปลือกนอกทำด้วยวัสดุที่เป็นฉนวน

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

### 3.3 การฉนวนเคเบิล [14]

สายหุ้มฉนวน หมายถึงสายไฟที่ทำด้วยทองแดงหรืออลูมิเนียม และหุ้มฉนวนนอกด้วยฉนวนไฟฟ้า สายไฟหุ้มฉนวนนั้นมีหลายชนิดด้วยกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับงานที่จะนำไปใช้ ฉนวนที่หุ้มสายไฟแต่ละชนิดไม่เหมือนกัน บางชนิดเหมาะสำหรับติดตั้งในบ้านพัก บางชนิดเหมาะสำหรับติดตั้งภายนอกอาคาร บางชนิดเหมาะกับการติดตั้งที่อุณหภูมิสูงๆ หรือในที่ที่มีสภาพเปียกชื้น ดังนั้นสายไฟแต่ละชนิดจึงแบ่งตามชนิดของฉนวนที่นำมาหุ้มเพื่อให้เหมาะสมกับงานที่ใช้

ลักษณะคุณสมบัติของการฉนวนเคเบิลขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งาน ฉนวนควรจะยืดหยุ่นได้ดี ทนต่อแรงดึงสูง เหนียว เพื่อให้ทนต่อสภาวะการใช้งาน ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกควรมีค่าต่ำ พาวเวอร์แฟกเตอร์ต่ำ แต่มีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าได้สูงมีความต้านทานการฉนวนสูง ทนต่อความร้อนได้ดีเพื่อใช้งานในกรณีที่โหลดเกิน ทนต่อแสงแดดและปฏิกิริยาทางเคมี ดูซึมความชื้นได้น้อยมาก เมื่อนำไปใช้งานเคเบิลผ่านไอน้ำ (แม่น้ำและทะเล) ถ้าใช้กับอุณหภูมิค่าฉนวนไม่ควรมีสภาพแข็งและเปราะ ควรปราศจากดีเอสอาร์บางส่วน (PD)

ฉนวนที่ใช้สำหรับการฉนวนเคเบิลอุตสาหกรรม คือ กระดาษ ยาง พลาสติก และกาซอัดเคเบิลชนิดฉนวนกระดาษยังคงนิยมใช้อยู่ เพราะเคเบิลชนิดนี้มีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าได้ดี มีพลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกต่ำ อายุการใช้งานยาวนาน การฉนวนเคเบิลแรงต่ำและแรงดันสูงขึ้นต้น คือถึง 3,300 V มักใช้ฉนวนพีวีซี (PVC) พีอี (PE) และพีอีครอสลิง (XLPE) แต่ฉนวนพีวีซีไม่เหมาะสำหรับการฉนวนเคเบิลแรงดันสูง เพราะว่ามีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสูง และพลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกมีค่าสูงด้วย ส่วนฉนวนพีอีจะมีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกต่ำ พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกต่ำทนต่อแรงดันได้สูง ฉะนั้นฉนวนพีอีจึงเหมาะสำหรับการฉนวนสายเคเบิลแรงสูง

### โพลีไวนิลคลอไรด์ (Polyvinyl Chloride = PVC)

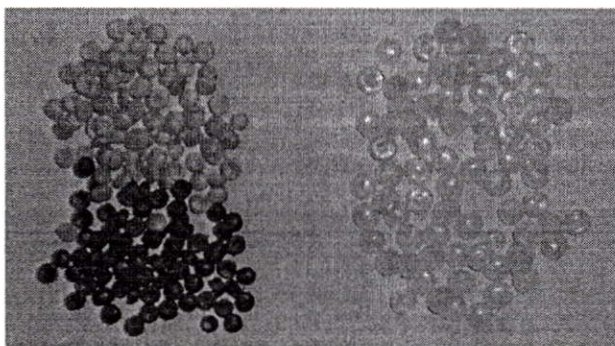
โพลีไวนิลคลอไรด์หรือพีวีซีใช้กันหลายรูปแบบในเชิงการค้า มีแบบที่ไม่เป็นพลาสติก แต่เหนียวทำเป็นรูปต่างๆ ตามต้องการได้ง่าย ทนต่อปฏิกิริยาทางเคมี กรดและด่าง และไม่ละลายน้ำ แอลกอฮอล์และน้ำยาสารละลายอินทรีย์ ชีตจำกัดอุณหภูมิใช้ได้ไม่เกิน  $60^{\circ}\text{C}$  มีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูง ความต้านทานเฉพาะเชิงผิวและปริมาตรมีค่าสูง  $\epsilon_r$  ประมาณ 3.8 – 4.3 ที่ 50 Hz และ  $\text{tg } \delta = 0.012$  ถึง 0.15 ที่ 50 Hz และ 0.006 ถึง 0.1 ที่ 1 MHz ส่วนพีวีซีที่อ่อนตัวเป็นพลาสติกได้ จะใช้สำหรับหุ้มสายไฟ ปลอกฉนวน และเปลือกนอกของเคเบิลนิยมใช้พีวีซีมากกว่ายางเพราะทนต่อแสงแดด ออกซิเจนและไม่ดูดซึมน้ำหรือความชื้น

### โพลีเอทิลีน (Polyethylene = PE)

โพลีเอทิลีน (PE) เป็นสารเทอร์โมพลาสติกที่มีคุณสมบัติพิเศษทางไฟฟ้า ทนต่อความชื้นและปฏิกิริยาทางเคมีได้สูง มีความต้านทานจำเพาะและความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูง แม้แต่ที่ความถี่สูง กระบวนการทำง่ายและราคาไม่แพง ฉะนั้น PE จึงมีที่ใช้งานได้กว้างขวาง โดยเฉพาะใช้ในการฉนวนของสายเคเบิลแกนร่วม (Coaxial Cable) ทั้งงานไฟฟ้ากำลังและงานสื่อสาร โดยเหตุที่กระบวนการผลิต PE มีแตกต่างกัน ซึ่งอาจจะทำขึ้นเพื่อเฉพาะกิจ จึงแบ่งออกเป็นประเภทตามความหนาแน่นมากขึ้น แบบเบา แบบกลาง และแบบหนัก และยังสามารถใช้กรรมวิธีผ่านรังสีกัมมันตภาพเพื่อเพิ่มคุณสมบัติบางประการ อย่างไรก็ตามทุกชนิดมีความต้านทานจำเพาะสูงกว่า  $10^{16}$  โอห์ม-เซนติเมตร  $\epsilon_r$  (50 Hz – 1 MHz) เท่ากับ 2.3 และ  $\text{tg } \delta$  เท่ากับ  $2 \times 10^{-2}$  มีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ 200 ถึง 200 kV/cm ทนอุณหภูมิได้สูงถึง  $90^{\circ}\text{C}$  ถ้าผ่านรังสีกัมมันตภาพมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าเป็น 700 – 1000 kV/cm แต่จะมีค่า  $\text{tg } \delta$  เท่ากับ  $5 \times 10^{-2}$

### พอลิเอทิลีนเชื่อมขวาง (Cross-linked Polyethylene = XLPE)

พอลิเอทิลีนเชื่อมขวาง (XLPE) ผลิตขึ้นจาก Ethylene Gas ซึ่งได้เปลี่ยนแปลงจาก Low Density Polyethylene ทำให้ส่วนเล็กภายใต้แรงกดดันประมาณ 50,000 psi XLPE เป็น Homo Polymer ชนิดหนึ่งที่มีโครงสร้างเป็นส่วนเล็กๆ เชื่อมโยงทางเคมีโดยโมเลกุลคาร์บอนของ Polyethylene โดยค่า 1 โมเลกุลจะมีคาร์บอนอะตอมประมาณ 1,000 – 2,000 อะตอม ทำการเชื่อมโยกันเป็นลูกโซ่ XLPE มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าเหมือน PE ทุกประการ เมื่อทำการ Bonding ระหว่างโมเลกุลของ PE แล้วทำให้ XLPE มีคุณสมบัติทางกล ทางกายภาพและความร้อน มีค่า Tensile Strength ดีกว่า PE เดิม ที่อุณหภูมิสูงฉนวน XLPE จะผลิตขึ้นโดยกระบวนการที่ต่อเนื่องที่รวมทั้งการ Extrusion ฉนวนและ Screening Layer ตั้งแต่ต้นไปจนจบกระบวนการฉนวน XLPE



(ก)

(ข)

รูปที่ 3.2 วัสดุของสารฉนวนที่นำมาผลิตเป็นฉนวนสายเคเบิล

(ก) วัสดุฉนวน PVC

(ข) วัสดุฉนวน XLPE

### 3.4 ความคงทนของฉนวนทางไฟฟ้า (dielectric strength) [9-10]

ฉนวนที่ใช้ในระบบไฟฟ้าแรงสูงมี 3 ชนิด คือ ฉนวนก๊าซ ฉนวนเหลว ฉนวนแข็ง ความคงทนฉนวนไฟฟ้า กำหนดด้วยสภาพการฉนวน เริ่มจะเปลี่ยนไปสู่สภาพนำไฟฟ้าอย่างดี ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อเกิดสปาร์ก หรือวาบไฟ หรือเบรกคาว์นผ่านฉนวน โดยปกติสภาพนำไฟฟ้าอย่างคืบนั้นจะมีแนวแคบๆ ตามเส้นทางที่เกิดเบรกคาว์น ถ้าฉนวนนั้นเป็นก๊าซ ฉนวนเปลี่ยนเป็นสภาพนำไฟฟ้า และคงอยู่ได้ก็ต่อเมื่อแรงดันนั้นสูงพอ ที่ทำให้เกิดกระแสไหลผ่านฉนวนสูงจนเป็นอาร์ก นั่นก็หมายความว่า การเสียดสภาพการฉนวนของก๊าซนั้นเป็นแบบไม่ถาวร คือ เสียดสภาพการฉนวนชั่วขณะที่มีแรงดันป้อนอยู่ ตรงกันข้ามกับการฉนวนที่เป็นของแข็ง หลังจากเกิดเบรกคาว์นแล้ว สภาพการฉนวนจะเสียไปอย่างถาวร ส่วนการฉนวนที่เป็นของเหลว การเสียดสภาพการฉนวนจะกลับคืนสู่สภาพการฉนวนดั้งเดิมหลังจากการเบรกคาว์น หรือสปาร์กได้ผ่านพ้นไปแล้ว ทำนองเดียวกับการฉนวนที่เป็นก๊าซ

ความคงทนของการฉนวนทางไฟฟ้า หมายถึง ค่าความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้า (electric field stress) สูงสุดที่ฉนวนนั้นสามารถทนอยู่ได้ โดยไม่เกิดความเสียหายหรือเกิดเบรกคาว์น หรือทำให้การฉนวนเสื่อมสภาพ ซึ่งมีหน่วยเป็น V/cm หรือ kV/cm คือ มีหน่วยเป็นค่าแรงดันต่อความหนาของฉนวน หรือระยะห่างของอิเล็กโตรด ความเครียดสนามไฟฟ้ากำหนดค่าความคงทนของการฉนวนทางไฟฟ้า โดยทั่วไปจะหาจากสนามไฟฟ้าที่สม่ำเสมอ คือ เป็นสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรดที่มีลักษณะเป็นแผ่นระนาบวางขนานกัน (plate-to-plate)

ความคงทนของการฉนวนต่อความเครียดสนามไฟฟ้า  $E_b$  ขึ้นอยู่กับแฟกเตอร์ต่างๆ หลายประการ ซึ่งพอจะเขียนเป็นเกณฑ์ทั่วไปได้ว่า

$E_b$  = ฟังก์ชัน (ลักษณะสนามไฟฟ้า, ลักษณะสมบัติของฉนวน และเวลา)

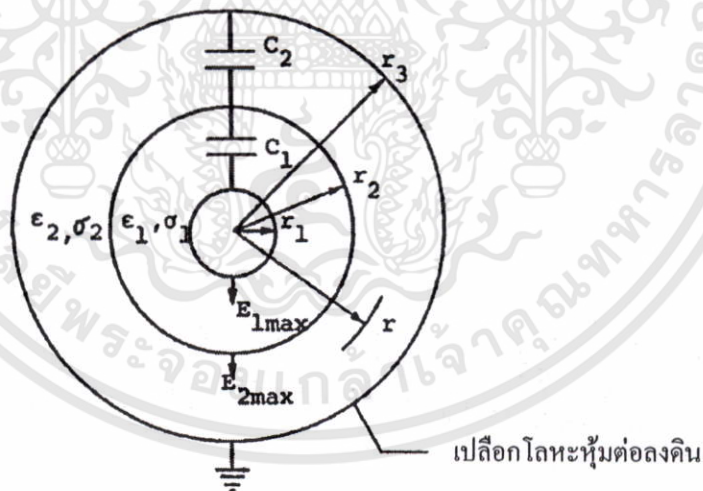
- ลักษณะสนามไฟฟ้า ขึ้นอยู่กับรูปลักษณะของอิเล็กโทรด (electrode configuration)

- ลักษณะสมบัติของฉนวน จะหมายถึงคุณสมบัติทางไฟฟ้า ทางกล ทางความร้อน และทางเคมี

- เวลาในที่นี้หมายถึง ช่วงเวลาที่แรงดันคงอยู่ที่ทำให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าแก่ฉนวน หรือกล่าวในอีกนัยหนึ่งก็คือ ขึ้นอยู่กับรูปแบบรูปคลื่นแรงดันนั่นเอง

### 3.5 สนามไฟฟ้าในฉนวนเคเบิลแรงสูง [9-10]

ฉนวนของเคเบิลอยู่หลายชนิด ซึ่งมีค่าเปอร์มิตติวิตี  $\epsilon$  ต่างกัน ฉนวนที่มี  $\epsilon$  ต่างกัน ไม่เหมาะที่จะนำมาใช้เป็นฉนวนชั้นกันในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ เพราะทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนแต่ละชนิดมีค่าไม่เท่ากัน แต่การใช้ฉนวนที่มี  $\epsilon$  ต่างกัน เหมาะที่จะใช้กับสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ คือ จะช่วยให้ความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนแต่ละชั้นที่มี  $\epsilon$  ต่างกันนั้นมีค่าใกล้เคียงกันได้ เช่น สายเคเบิลแรงสูงทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม และปลอกฉนวนนำ (Bushing) ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 สายเคเบิลทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม

ที่รอยต่อของชั้นฉนวนทั้งสองไม่มีประจุอิสระ กล่าวคือสภาพนำทางไฟฟ้าของฉนวน ( $\sigma$ ) เป็นศูนย์ หรือเป็นแรงดันป้อนกระแสสลับ ฉะนั้นระหว่างตัวนำของสายเคเบิลกับเปลือกโลหะ จะเสมือนว่า มีค่าความจุไฟฟ้าต่อหน่วยความยาวต่ออันดัดกัน คือ  $C_1$  และ  $C_2$  ในฉนวนชั้น 1 และ 2 ตามลำดับ ซึ่งสามารถคำนวณค่าความจุไฟฟ้าต่อหน่วยความยาวได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

ฉะนั้น ความจุไฟฟ้า ผลลัพธ์คือ

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

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

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

โดยที่ตัวเก็บประจุของฉนวนแต่ละชั้นต่อกันแบบอันดับ ประจุของตัวเก็บประจุแต่ละชั้นย่อมเท่ากัน คือ

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

แรงดันกระจายในชั้นฉนวนจึงคิดแบบตัวเก็บประจุต่อกันแบบอันดับ ฉะนั้นที่รัศมี  $r_x$  แรงดันจะเป็น

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

$C'_r$  คือ ความจุไฟฟ้าที่รัศมีจนวนเท่ากับ  $r_x$

$$U_{r_x} = \frac{r\pi\epsilon_1\epsilon_2 U}{C_{r_x} \left( \epsilon_1 \ln \frac{r_3}{r_2} + \epsilon_2 \ln \frac{r_2}{r_1} \right)} \quad (3.1)$$

ความเครียดสนามไฟฟ้าในชั้นจนวนที่รัศมี  $r_x$  คำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$E_{r_x} = \frac{Q}{2\pi\epsilon_x r_x} = \frac{C_{res} U}{2\pi\epsilon_x r_x} \quad (3.2)$$

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

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

$$\frac{E_{r_x}}{E_{r_{x+1}}} = \frac{\epsilon_{x+1} r_{x+1}}{\epsilon_x r_x} \quad (3.3)$$

ฉะนั้น ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดในจนวนแต่ละชั้น จะเกิดขึ้นที่รัศมีน้อยที่สุดของชั้นนั้น ดังแสดงในรูป 3.3 คือ ในจนวนชั้น 1  $E_{\max}$  เกิดขึ้นที่  $r = r_1$ ,  $\epsilon = \epsilon_1$

$$E_{1\max} \Big|_{\substack{r=r_1 \\ \epsilon=\epsilon_1}} = \frac{\epsilon_2 U}{r_1 \left( \epsilon_1 \ln \frac{r_3}{r_2} + \epsilon_2 \ln \frac{r_2}{r_1} \right)} \quad (3.4)$$

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

$$E_{2\max} \Big|_{\substack{r=r_2 \\ \epsilon=\epsilon_2}} = \frac{\epsilon_1 U}{r_2 \left( \epsilon_1 \ln \frac{r_3}{r_2} + \epsilon_2 \ln \frac{r_2}{r_1} \right)} \quad (3.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

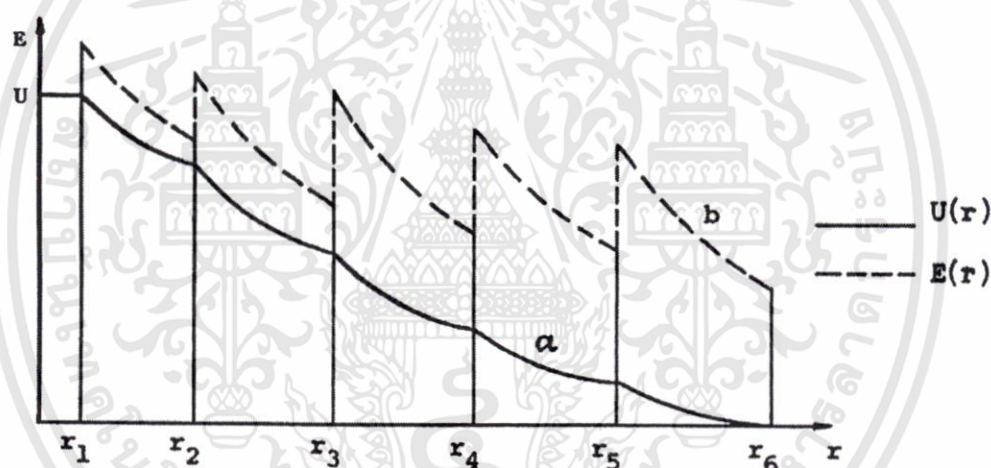
อัตราส่วนของความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด จึงเป็น

$$\frac{E_{1\max}}{E_{2\max}} = \frac{\varepsilon_2 \cdot r_2}{\varepsilon_1 \cdot r_1}$$

นั่นคือ ควรเลือก  $\varepsilon$  ของ  $r$  น้อยๆ ควรให้มากที่สุด ถ้ามีชั้นฉนวน  $n$  ชั้น ซึ่งมีรัศมี  $r_1, r_2, \dots, r_n$  และมีไดอิเล็กตริกคงตัว  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n$  และเพื่อให้  $E_{\max}$  ในชั้นฉนวนแต่ละชั้นมี  $E_{\max}$  เท่ากัน จะทำได้โดยให้

$$\varepsilon_1 r_1 = \varepsilon_2 r_2 = \varepsilon_3 r_3 = \varepsilon_n r_n \quad (3.6)$$

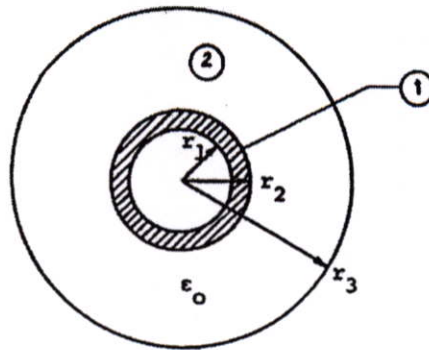
ดังในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 เคเบิลแรงสูงทรงกระบอกซ้อนกันมีชั้นฉนวนซ้อนหลายชั้น

- แรงดันกระจายในชั้นฉนวน
- สนามไฟฟ้ากระจายในชั้นฉนวน

รูปลักษณะในทางภาคปฏิบัติใช้งาน มักจะพบเสมออย่างหนึ่งก็คือ มีชั้นฉนวน 2 ชั้น คือ ที่อิเล็กโตรดใน จะหุ้มด้วยฉนวนมีเปอร์มิตติวิตี  $\varepsilon_1$  ชั้นถัดมากระบอกนอกเป็นอากาศ ( $\varepsilon_0$ ) ดังในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ตัวนำในหุ้มฉนวน

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

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

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

$$\frac{d}{dx} \left[ x \left( \epsilon_1 \ln \frac{r_3}{r_2} + \epsilon_2 \ln \frac{x}{r_1} \right) \right] = 0$$

### 3.6 มิติที่เหมาะสม (optimum dimension) ของทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม [9-10]

การออกแบบให้ได้มิติที่เหมาะสม หมายถึง มิติที่เล็กที่สุด แต่สามารถทนต่อแรงดันได้สูงสุด ตัวอย่างอิเล็กทรอนิกส์ทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม ถ้ากำหนดอิเล็กทรอนิกส์ทรอดันนอกให้ คือ กำหนดรัศมี  $r_2$  ให้ หากอิเล็กทรอนิกส์ทรอดันในมีรัศมีใกล้เคียงกับอิเล็กทรอนิกส์ทรอดันนอก ระยะห่างระหว่างอิเล็กทรอนิกส์ทรอดันนอกกับใน คือ  $d = r_2 - r_1$  จะน้อย ข้อมจะทำให้เกิดเบรกควานได้ง่าย แต่ถ้าลดขนาดรัศมีของอิเล็กทรอนิกส์ทรอดันในให้เล็กลง เพื่อให้ได้ระยะช่องแปกมากขึ้น การลดขนาดเส้นผ่าน

ศูนย์กลางอันในให้เล็กลงมากๆ ย่อมทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิวตัวนำอันในสูงมากขึ้น จนความเครียดสนามไฟฟ้าถึงค่าวิกฤต จะทำให้เกิดโคโรนาได้ง่าย แสดงว่าจำเป็นต้องมีระยะช่องแคบที่เหมาะสมอันหนึ่ง คือ รัศมีระหว่าง 0 กับ  $r_2$  ที่จะทำให้ระบบทนแรงดันเบรกคาวน์ได้สูงสุด โดยไม่เกิดโคโรนาก่อน

ในกรณีของอิเล็กโตรดทรงกระบอกซ้อนกันร่วม แรงดันเบรกคาวน์ คือ

$$U_b = E_b \cdot r_1 \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (3.7)$$

มิติที่เหมาะสมของ  $r_1$  เมื่อกำหนด  $r_2$  ให้จะหาได้โดย

$$\begin{aligned} \left. \frac{dU_b}{dr_1} \right|_{r_2 \text{ const.}} &= 0 \\ \frac{dU_b}{dr_1} &= E_b \left( \ln \frac{r_2}{r_1} - 1 \right) = 0 \\ \text{ทรงกระบอกซ้อนกันร่วมได้} \quad \left( \frac{r_2}{r_1} \right)_{opt} &= e \end{aligned} \quad (3.8)$$

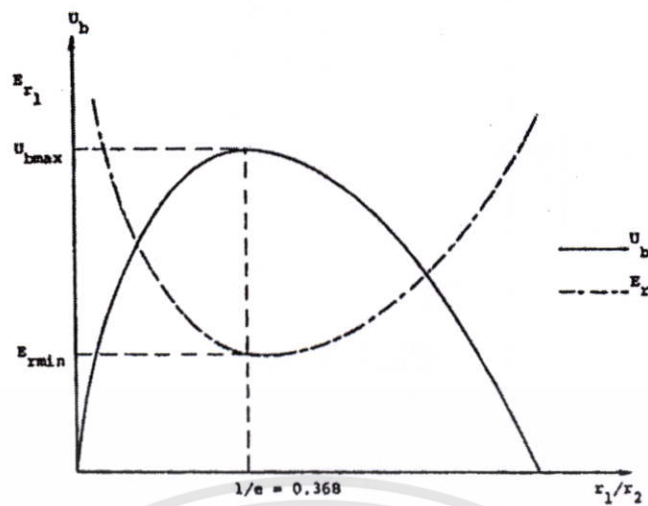
และ

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

นั่นคือ

$$U_{b \max} = E_b r_1 \quad (3.9)$$

ความสัมพันธ์  $U_b$  และ  $E_r$  ในเทอม  $r_1/r_2$  ของทรงกระบอกซ้อนกันร่วม แสดงในรูปที่ 3.6 จะเห็นได้ว่า  $r_1/r_2 = 1/e = 0.368$  จะเป็นค่ามิติที่เหมาะสม คือ จะได้ค่าแรงดันเบรกคาวน์  $U_b$  มีค่าสูงสุด หรือความเครียดสนามไฟฟ้า  $E_r$  จะมีค่าต่ำสุด



รูปที่ 3.6  $U_b$  และ  $E_{r_1}$  ในเทอมของ  $r_1$  เมื่อกำหนด  $r_2$  ให้คงตัวของทรงกระบอกซ้อนกัน

ข้อสังเกตในรูปที่ 3.6 แสดงค่า  $U_b$  และ  $E_{r_1}$  อยู่ในเทอมของ  $r_1/r_2$  โดยสมมติว่า  $E_b$  มีค่าคงตัว แต่ในทางปฏิบัติจริง ค่า  $E_b$  ยังขึ้นอยู่กับ  $r_1$  ด้วย คือ  $E_b$  ของ  $r_1$  เล็กจะมีค่าสูงกว่า  $E_b$  ของ  $r_1$  ที่มีค่าโต ฉะนั้นยอดสูงสุด  $E_b = f(r_1)$  จะเลื่อนไปทาง  $r_1$  ที่เล็กลง

### 3.7 การควบคุมสนามไฟฟ้าของสายเคเบิล [3, 12, 15]

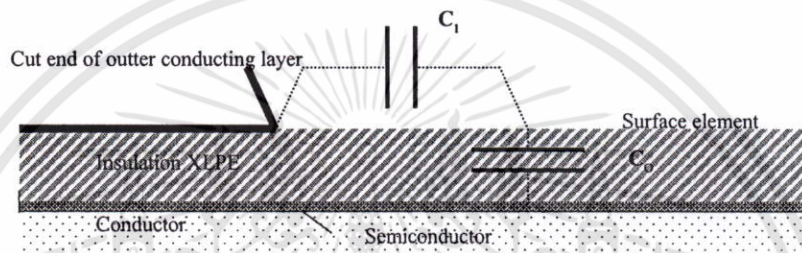
ในการทดสอบฉนวนของสายเคเบิล จะทำการป้อนแรงดันทดสอบระหว่างตัวนำและชั้นกึ่งตัวนำนอก โดยป้อนแรงดันสูงเข้าที่ตัวนำและชั้นกึ่งตัวนำนอกจะเป็นกราวด์ ในการทดสอบสายเคเบิลที่ไม่มีข้อต่อพิเศษ ถ้าทำการทดสอบดังกล่าวจะเกิดการรบกวนไฟตามผิวขึ้น เนื่องจากระยะห่างระหว่างแรงดันสูงกับกราวด์น้อยมาก ปัญหาที่เกิดขึ้นนี้สามารถแก้ไขได้ โดยการเพิ่มระยะห่างระหว่างแรงดันสูงกับกราวด์ โดยการตัดชั้นกึ่งตัวนำนอก (insulation shield) บางส่วนออก แต่ปัญหาที่จะเกิดตามมาคือ สนามไฟฟ้าที่ขอบของชั้นกึ่งตัวนำนอกจะเกิดความไม่สม่ำเสมอสูง ดังรูปที่ 3.8 (ในสายเคเบิลปกติ สนามไฟฟ้าจะกระจายอยู่อย่างสม่ำเสมอในฉนวน ระหว่างตัวนำ และชั้นกึ่งตัวนำนอก) ซึ่งนำไปสู่การเกิดเบรคดาวน์ในฉนวนได้ จึงจำเป็นต้องควบคุมสนามไฟฟ้าในบริเวณนั้น ให้เกิดความไม่สม่ำเสมอให้น้อยที่สุด ในการควบคุมสนามไฟฟ้าจะพิจารณาจากค่า คาปาซิแตนซ์ 2 ตัว คือ

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

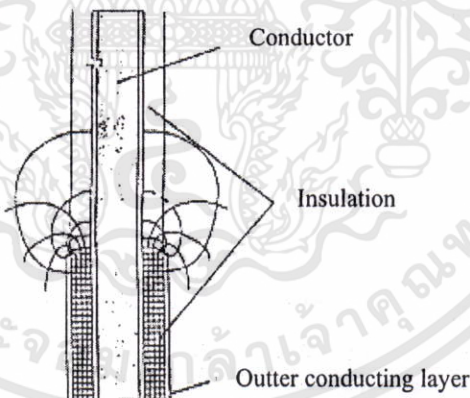
ความสัมพันธ์ระหว่างคาปาซิแตนซ์ กับแรงดันระหว่างฉนวนกับชั้นตัวนำที่ถูกตัดออกเป็นดังนี้

$$U_a \approx E_d \sqrt{\frac{C_1}{C_0}} \quad (3.10)$$

- เมื่อ  $U_a$  คือ แรงดันเริ่มต้นของการเบรคความระหว่างฉนวนกับชั้นตัวนำที่ถูกตัดออก  
 $C_1$  คือ ค่าคาปาซิแตนซ์ระหว่างชั้นตัวนำที่ถูกตัดออกไปกับฉนวน  
 $C_0$  คือ ค่าคาปาซิแตนซ์ระหว่างฉนวนกับตัวนำ  
 $E_d$  คือ ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าเบรคความที่ปลายชั้นของตัวนำที่ถูกตัดออก



รูปที่ 3.7 ค่าคาปาซิแตนซ์ของสายเคเบิลแรงดันสูง



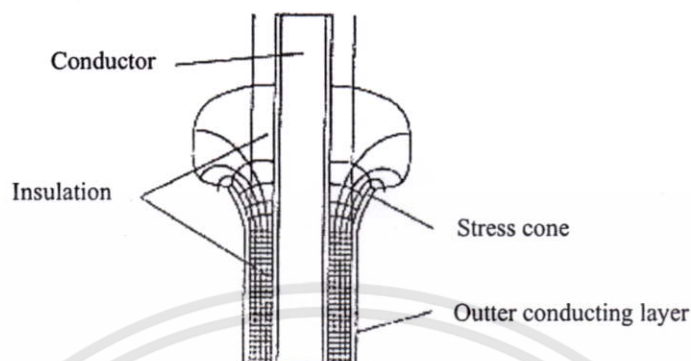
รูปที่ 3.8 สนามไฟฟ้าที่ไม่มีการแก้ไข

ถ้ารอบๆสายเคเบิลเป็นอากาศ ค่า  $C_1$  จะน้อยมากเมื่อเทียบกับ  $C_0$  จะทำให้แรงดันเริ่มต้นของการเบรคความมีค่าต่ำ ทำให้เบรคความได้ง่าย ในการควบคุมจึงต้องทำให้อัตราส่วนระหว่าง  $C_1/C_0$  มีค่ามาก นั่นก็คือทำให้  $C_1$  เพิ่มขึ้นหรือ  $C_0$  ลดลงนั่นเอง

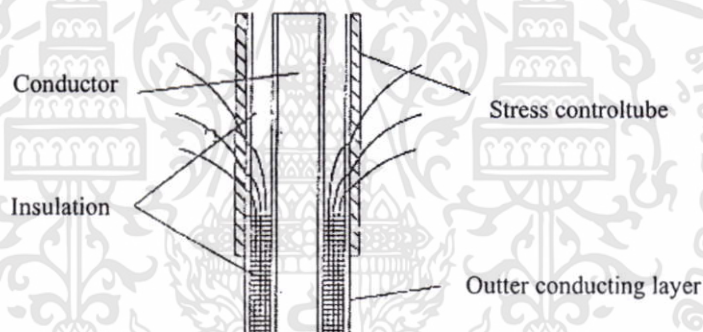
1. Capacitive stress control จะเป็นการลด  $C_0$  ซึ่งสามารถกระทำได้โดย การเพิ่มรัศมีของชั้นตัวนำด้านนอกที่ถูกตัดออก โดยใช้ Stress cone ดังรูปที่ 3.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. Refractive stress control จะเป็นการเพิ่ม  $C_1$  โดยการเติมชั้นฉนวนที่มีค่าไดอิเล็กตริกสูงๆ ไว้รอบสายเคเบิลดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.9 การแก้ไขสนามไฟฟ้าแบบ Capacitive stress control

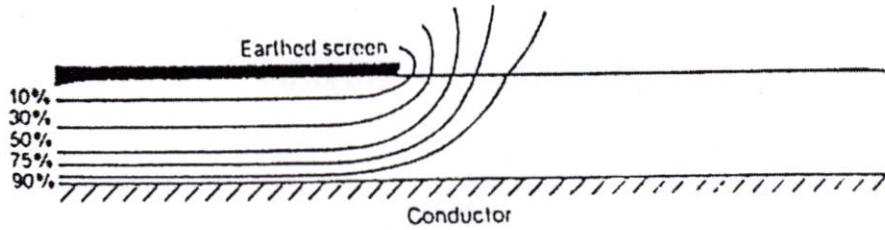


รูปที่ 3.10 การแก้ไขสนามไฟฟ้าแบบ Refractive stress control

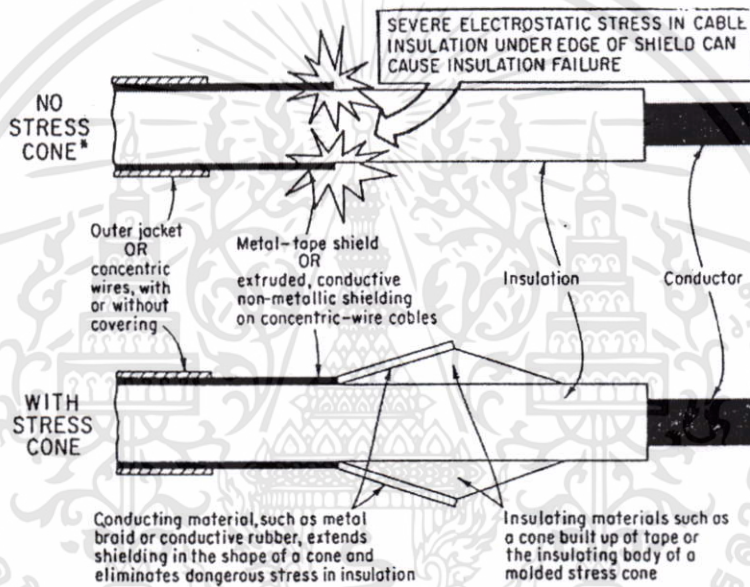
Stress Cone เมื่อทำ Splicing และ Terminating

สายไฟฟ้าเส้นหนึ่งๆจะประกอบด้วยปลายสายอยู่สองข้างด้วยกัน ระหว่างสายตัวนำไฟฟ้ากับ Shield ซึ่งถูกต่อลงดินจะถูกคั่นด้วยฉนวนที่มีความหนาแน่นไม่มากนัก เมื่อป้อนแรงดันให้สายไฟฟ้า จะเกิดความต่างศักย์ระหว่างสายตัวนำกับ Shield ถ้าระยะห่างไม่มากพอก็จะเกิดกระแสไหลข้าม (Flashover) จากสายตัวนำนั้นไปยัง Shield ในกรณีที่ทำการต่อสายหุ้มเข้ากับสายเปลือยหรือระหว่างสายหุ้มด้วยกัน จึงจำเป็นต้องทำให้ Shield ห่างออกจากสายตัวนำ กรณีนี้สนามไฟฟ้าจะไม่ถูกควบคุมด้วย Shield อีกต่อไป (เฉพาะช่วงที่ปก Shield ออก) สนามไฟฟ้าจะเกิดเบี่ยงเบนอย่างกระทันหันตามที่แสดงในรูปที่ 3.11 ผลของสนามไฟฟ้าเบี่ยงเบนจะมีจุดซึ่งมี

สนามไฟฟ้าหนาแน่นและตรงจุดนี้เองจะทำให้ค่าของ Dielectric Strength ลดลง จะเป็นผลให้  
ฉนวนไฟฟ้าตรงจุดนั้นชำรุดได้ง่าย ดังแสดงในรูปที่ 3.12



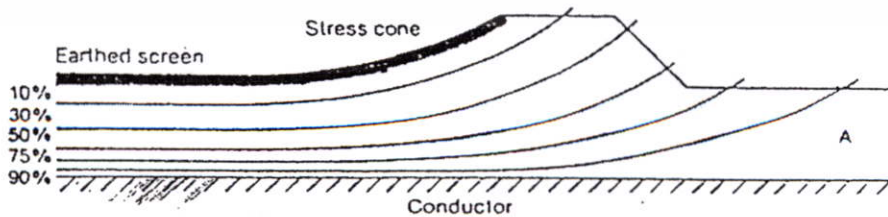
รูปที่ 3.11 การกระจายสนามไฟฟ้าบริเวณที่ปกอสาย



รูปที่ 3.12 เปรียบเทียบการมี Stress cone กับ ไม่มี Stress cone

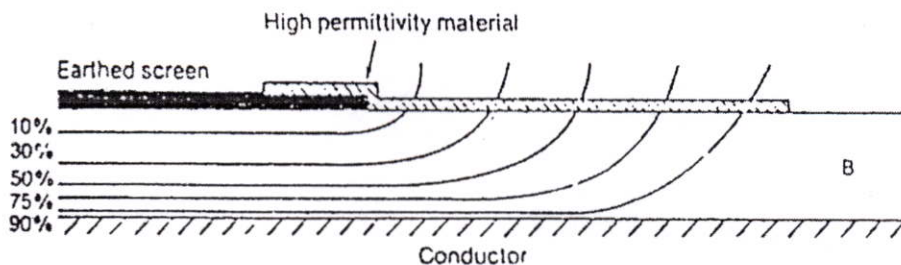
ผลของการที่สนามไฟฟ้าเบี่ยงเบนนี้สามารถแก้ไขได้โดยการทำ Stress cone แสดงดังรูปที่

3.13 หรืออาจใช้ High Permittivity Material ทำหน้าที่แทนก็ได้ แสดงดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.13 การกระจายสนามไฟฟ้าเมื่อใช้ Stress cone

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.14 การกระจายสนามไฟฟ้าเมื่อใช้ High Permittivity Material

### 3.8 การออกแบบขั้วต่อสายเคเบิลใต้ดินแรงดันสูงสำหรับทดสอบหาคิซาร์จบางส่วน

จากการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า ในการออกแบบขั้วต่อสายสำหรับทดสอบหาคิซาร์จบางส่วนในสายเคเบิลใต้ดินแรงดันสูง จะพยายามทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนแต่ละชั้นมีค่าใกล้เคียงกัน แต่ใช้ค่า Safety factor สูงๆ เข้ามาช่วยในการออกแบบเพื่อป้องกันการเกิดการวาวไฟตามผิวฉนวนและป้องกันการเกิดเบรกดาว์นในฉนวนสายเคเบิลขณะทำการทดสอบ ซึ่งทำให้ขั้วต่อสายมีขนาดใหญ่ ต้องใช้ความยาวในการปกสายมาก ซึ่งสิ้นเปลืองสายเคเบิลในการทดสอบ ไม่สะดวกในการใช้งาน และมีราคาสูง [3-8]

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ ออกแบบและสร้างขั้วต่อสายสำหรับทดสอบหาคิซาร์จบางส่วนในสายเคเบิลให้มีขนาดที่เหมาะสม สำหรับสายเคเบิลใต้ดินแรงดันสูงฉนวน XLPE พิกัด 12/20 (24) kV ขนาด 240 sq.mm. เพื่อความสะดวกในการใช้งาน ลดความสูญเสียสายเคเบิลจากการทดสอบ ลดความสิ้นเปลืองฉนวนที่นำมาควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้า และมีต้นทุนการสร้างที่ต่ำลง ในการออกแบบสามารถแบ่งเป็น 5 หัวข้อ ดังนี้

- 1 การออกแบบเส้นผ่านศูนย์กลางของขั้วต่อสายเคเบิล
- 2 การออกแบบปลายสายและฐานรองรับปลายสายเคเบิล
- 3 การออกแบบความยาวของขั้วต่อสายเคเบิล
- 4 การออกแบบชุดรองรับขั้วต่อสายเคเบิล
- 5 การจำลองการกระจายสนามไฟฟ้าของขั้วต่อสายเคเบิล

#### 3.8.1 การออกแบบเส้นผ่านศูนย์กลางของขั้วต่อสายเคเบิล

เดิมในการออกแบบเส้นผ่านศูนย์กลางของขั้วต่อสายเคเบิลสำหรับทดสอบหาคิซาร์จบางส่วน จะพิจารณาที่แรงดันเบรกดาว์นของฉนวนที่นำมาควบคุมสนามไฟฟ้าที่ปลายสายเคเบิลหรือพยายามทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนแต่ละชั้นมีค่าใกล้เคียงกัน แต่ใช้ค่า

Safety factor สูงๆ เข้ามาช่วยในการออกแบบเพื่อป้องกันการเกิดเบรกดาวน์ของฉนวนขณะทำการทดสอบ ซึ่งทำให้ขั้วต่อสายมีขนาดใหญ่ งานวิจัยนี้ได้นำทฤษฎีมิติที่เหมาะสมของทรงกระบอกซ้อนแกนร่วมมาใช้ในการออกแบบ ซึ่งจะทำได้ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางที่มีความเหมาะสมมากยิ่งขึ้น จากหัวข้อที่ 3.6 มิติที่เหมาะสมของทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม ซึ่งหมายถึง มิติที่เล็กที่สุดแต่สามารถทนต่อแรงดันได้สูงสุด โดยไม่เกิดการเบรกดาวน์และโคโรนา เส้นผ่านศูนย์กลางของขั้วต่อสายเคเบิลจะต้องพิจารณาพร้อมกับค่าความคงทนไดอิเล็กตริกของฉนวนที่นำมาควบคุมสนามไฟฟ้า โดยเลือกใช้ฉนวนน้ำมันหม้อแปลง เนื่องจากเป็นฉนวนเหลวที่มีใช้อย่างแพร่หลาย ความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าประมาณ 20 kV/mm. [16] และสามารถใช้ในการควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้าสำหรับการทดสอบดิสชาร์จในสายเคเบิลได้ถึง ระดับแรงดัน 75 kV [2] โดยเส้นผ่านศูนย์กลางที่เหมาะสมของขั้วต่อสายเคเบิลได้ จากสมการที่ (3.8)

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

โดย  $r_1$  คือ รัศมีของตัวนำสายเคเบิลขนาด 240 sq.mm. มีขนาดเท่ากับ 8.74 mm.

$r_2$  คือ รัศมีของขั้วต่อสายเคเบิล

จะได้

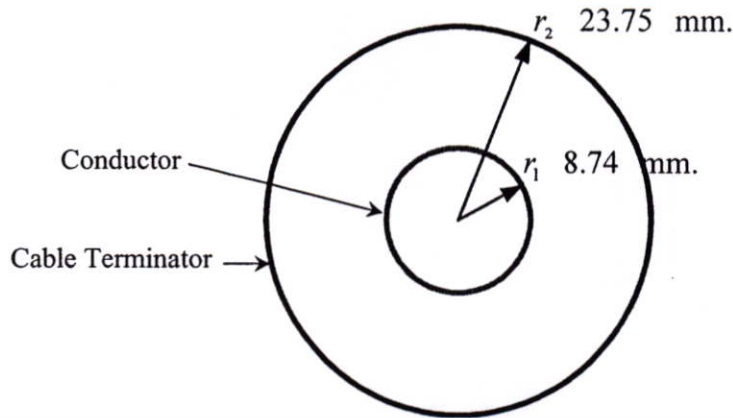
$$r_2 = r_1 \times e$$

เพราะฉะนั้น

$$r_2 = 8.74 \times e$$

$$= 23.75 \text{ mm.}$$

จะได้เส้นผ่านศูนย์กลางของขั้วต่อสายเท่ากับ  $(23.75 \times 2) = 47.5 \text{ mm.}$



รูปที่ 3.15 ขนาดของขั้วต่อสายเคเบิล

ความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนที่รัศมี  $r_x$  คำนวณได้จากสมการที่ (3.2) จะได้

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

- โดยที่  $E_{r_x}$  คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนที่รัศมี  $r_x$  (kV/mm.)  
 $U$  คือ แรงดันไฟฟ้าที่ป้อน (แรงดันทดสอบสูงสุดตามมาตรฐาน IEC 60502-2 [17] เท่ากับ 24 kV)  
 $\epsilon_1$  คือ เปรอริมิตติวิตีของฉนวนชั้นที่ 1 (XLPE มีค่า  $\epsilon_r = 2.3$  [16])  
 $\epsilon_2$  คือ เปรอริมิตติวิตีของฉนวนชั้นที่ 2 (น้ำมันหม้อแปลง มีค่า  $\epsilon_r = 2.2$  [16])  
 $r_1$  คือ รัศมีของตัวนำ (สายเคเบิลขนาด 240 sq.mm. มีรัศมีเท่ากับ 8.74 mm.)  
 $r_2$  คือ รัศมีของฉนวนชั้นที่ 1 (รัศมีของตัวนำรวมกับฉนวน XLPE หนา 5.5 mm. [17] เท่ากับ 14.24 mm.)  
 $r_3$  คือ รัศมีของฉนวนชั้นที่ 2 (รัศมีของขั้วต่อสายเคเบิลเท่ากับ 23.75 mm.)

จากสมการข้างต้น สามารถคำนวณหาความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิวฉนวน XLPE ด้านใน ( $E_{r_1}$ ) ด้านนอก ( $E_{r_2}$ ) และที่ผิวด้านนอกของฉนวนน้ำมันหม้อแปลง ( $E_{r_3}$ ) โดยใช้แรงดันทดสอบสูงสุดตามมาตรฐาน IEC 60502-2 คือ 24 kV [17] และ  $\epsilon_r$  จาก [16] จะได้

$$E_{r_1} = \frac{2.3 \times 2.2 \times 24 \text{ kV}}{8.74 \times 2.3 \left( 2.3 \ln \left( \frac{23.75}{14.24} \right) + 2.2 \ln \left( \frac{14.24}{8.74} \right) \right)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= 2.68 \text{ kV/mm.}$$

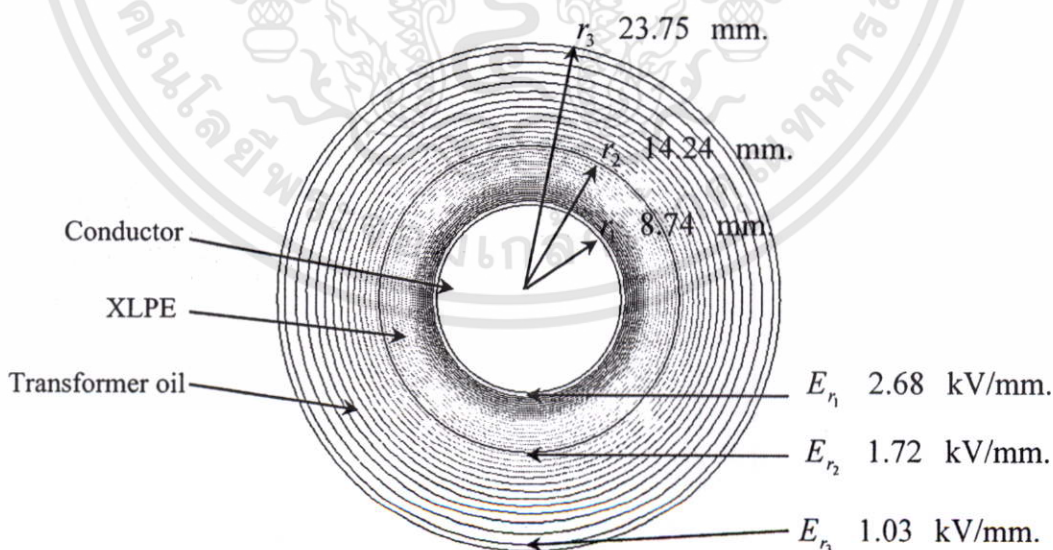
$$E_{r_2} = \frac{2.3 \times 2.2 \times 24 \text{ kV}}{14.24 \times 2.2 \left( 2.3 \ln \left( \frac{23.75}{14.24} \right) + 2.2 \ln \left( \frac{14.24}{8.74} \right) \right)}$$

$$= 1.72 \text{ kV/mm.}$$

$$E_{r_3} = \frac{2.3 \times 2.2 \times 24 \text{ kV}}{23.75 \times 2.2 \left( 2.3 \ln \left( \frac{23.75}{14.24} \right) + 2.2 \ln \left( \frac{14.24}{8.74} \right) \right)}$$

$$= 1.03 \text{ kV/mm.}$$

จากค่าความเครียดสนามไฟฟ้า  $E_{r_1}$ ,  $E_{r_2}$  และ  $E_{r_3}$  พบว่าขนาดของขั้วต่อสายที่ได้ ออกแบบ สามารถใช้ในการทดสอบได้โดยไม่เกิดเบรกควาน์ที่อุณหภูมิ XLPE และในอุณหภูมิ น้ำมัน หม้อแปลง งานวิจัยนี้เลือกใช้อะคริลิกใสเป็นวัสดุฉนวนสำหรับขั้วต่อสาย ซึ่งสามารถทน ความเครียดสนามไฟฟ้าได้ประมาณ 35 kV/mm. [16] โดยเลือกขนาดที่มีขายทั่วไปและมีขนาด ใกล้เคียงกับที่ออกแบบมากที่สุด คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 mm. หนา 5 mm.



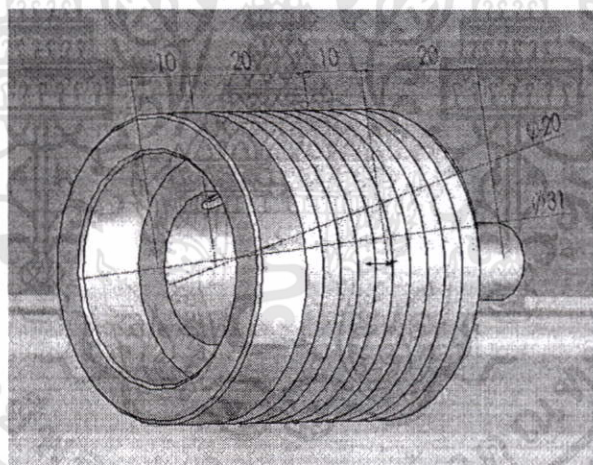
รูปที่ 3.16 ขนาดของขั้วต่อสายเคเบิลและความเครียดสนามไฟฟ้าในขั้วต่อสาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

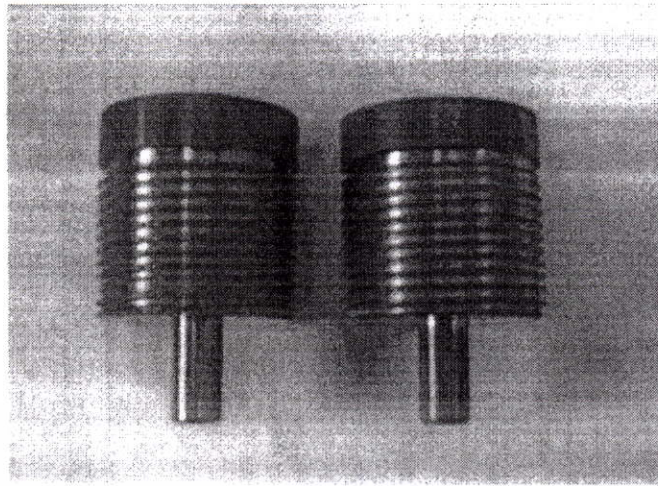
### 3.8.2 การออกแบบปลายสายและฐานรองรับปลายสาย

การออกแบบปลายสาย ต้องคำนึงถึงขนาดของตัวนำและฉนวนของสายเคเบิล โดยงานวิจัยนี้อ้างอิงขนาดตัวนำ และความหนาของฉนวนของสายเคเบิล ตามมาตรฐาน IEC 60502-2 [17] เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำขนาด 240 sq.mm. มีขนาด 17.48 mm. และสายเคเบิลฉนวน XLPE พิกัด 12/20 (24) kV 240 sq.mm. ฉนวนมีความหนา 5.5 mm. ส่วนการออกแบบฐานรองรับปลายสาย ต้องคำนึงถึงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของขั้วต่อสายเคเบิล และขนาดของปลายสายที่ออกแบบ

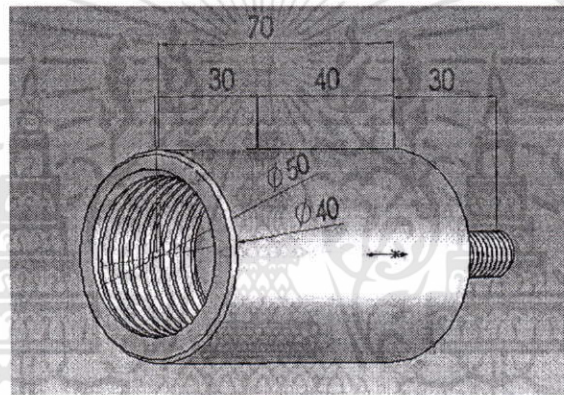
ปลายสายออกแบบโดยใช้ทองแดงลึงขึ้นรูป เนื่องจากเป็นวัสดุชนิดเดียวกับตัวนำไฟฟ้าของสายเคเบิลที่ใช้ในการออกแบบและมีความสามารถนำกระแสไฟฟ้าได้ดี ฐานรองรับปลายสายลึงขึ้นรูปโดยใช้ทองแดงเช่นเดียวกับปลายสาย เพื่อให้ปลายสายและฐานรองรับปลายสายประกอบเข้าด้วยกันเป็นอย่างดีและมีความแข็งแรง เนื่องจากเป็นส่วนที่รับแรงจากการโค้งงอของสายเคเบิล จึงออกแบบให้ทั้ง 2 ส่วนประกอบเข้าด้วยกันโดยใช้เกลียว โดยปลายสายจะออกแบบให้มีเกลียวด้านนอก ส่วนฐานรองรับปลายสายออกแบบให้มีเกลียวด้านใน ขนาดของปลายสายและฐานรองรับปลายสาย แสดงดังรูปที่ 3.17 – 3.20



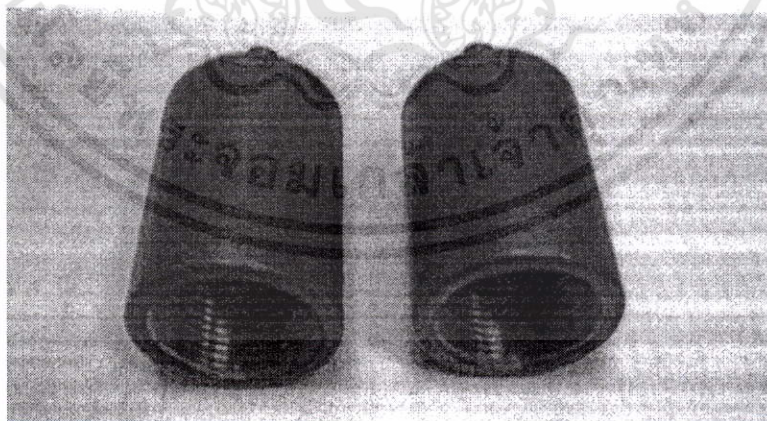
รูปที่ 3.17 ขนาดของปลายสายสำหรับสายเคเบิลพิกัด 12/20 (24) kV 240 sq.mm.



รูปที่ 3.18 ปลายสายสำหรับสายเคเบิลพิกัด 12/20 (24) kV 240 sq.mm.

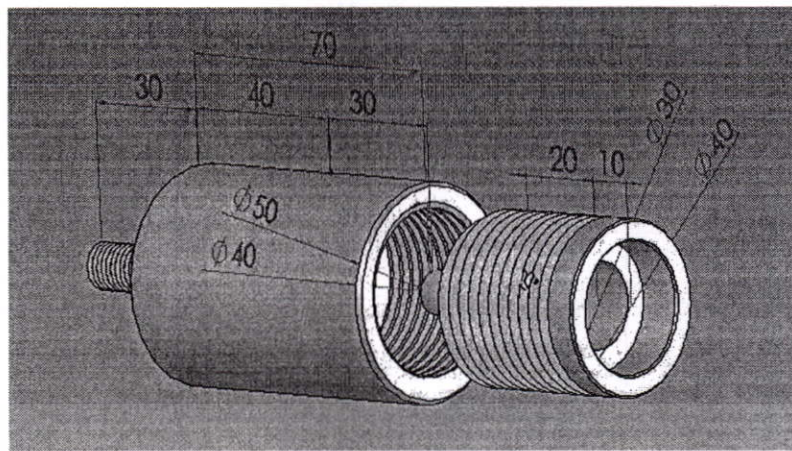


รูปที่ 3.19 ขนาดของฐานรองรับปลายสายสำหรับสายเคเบิลพิกัด 12/20 (24) kV 240 sq.mm.



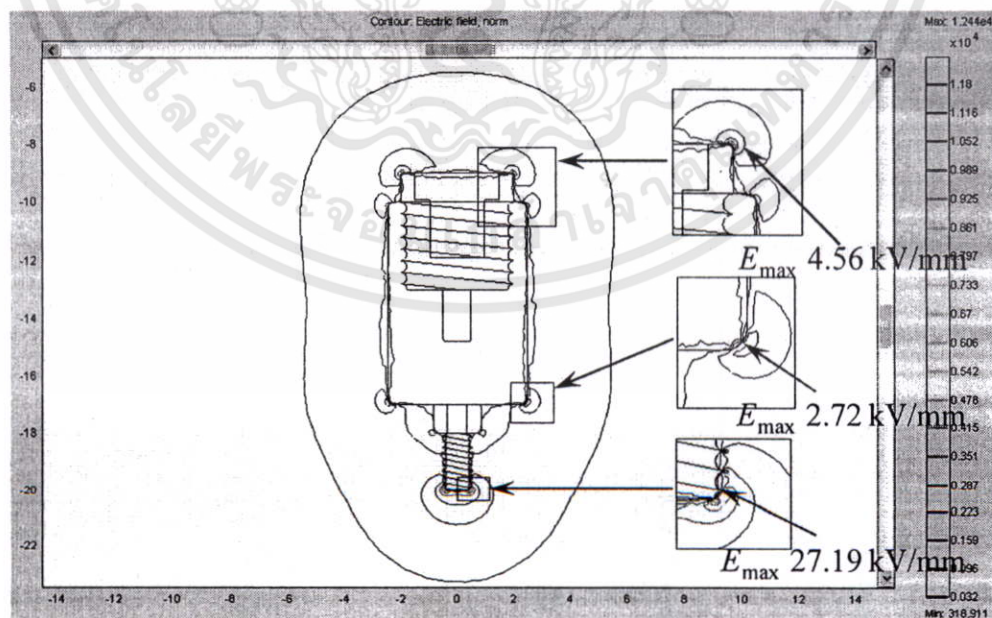
รูปที่ 3.20 ฐานรองรับปลายสายสำหรับสายเคเบิลพิกัด 12/20 (24) kV 240 sq.mm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



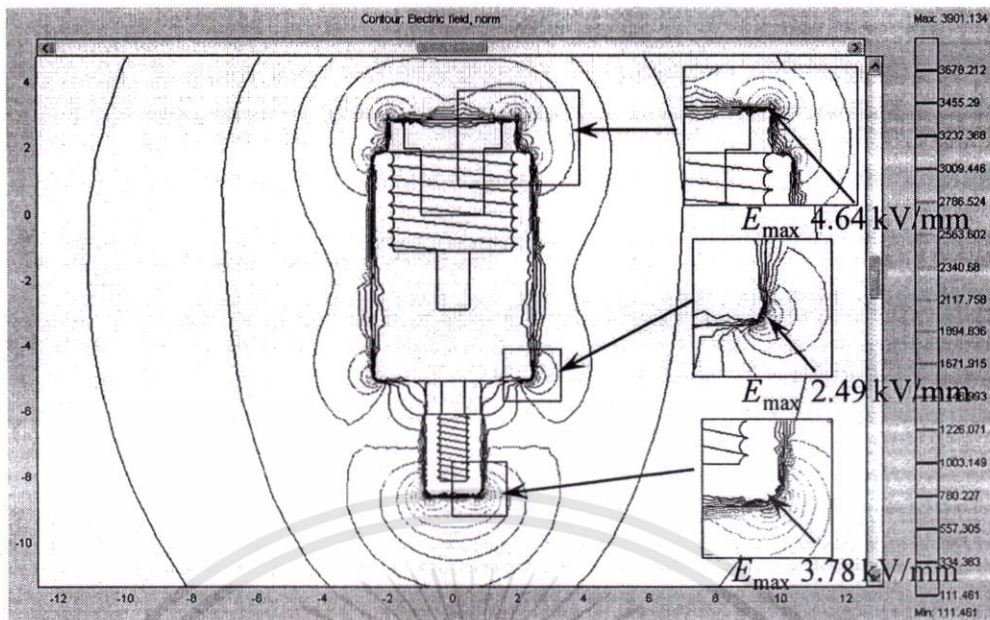
รูปที่ 3.21 การประกอบปลายสายและฐานรองรับปลายสาย

การจำลองการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าที่ปลายสาย และฐานรองรับปลายสายที่ได้ ออกแบบแสดงดังรูปที่ 3.22 จากการจำลองพบว่า มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงถึง 27.19 kV/mm ที่ บริเวณขอบคมของเกลียวน็อต ส่วนบริเวณขอบโค้งของปลายสายและฐานรองรับปลายสายมีค่า ความเครียดสนามไฟฟ้า 4.56 kV/mm และ 2.72 kV/mm ตามลำดับ ความเครียดสนามไฟฟ้าที่สูง มากบริเวณเกลียวน็อตอาจส่งผลให้เกิดโคโรนาดีสชาร์จได้ ซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยใช้ฉนวนโพลีเอทิลีน ลดหรือควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้า ที่ขั้วแรงสูง (high voltage terminal) ไม่ให้เกิดค่า วิกฤต เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดดีสชาร์จ โคโรนา [9-10] บริเวณเกลียวน็อต ซึ่งจะทำความเครียด สนามไฟฟ้าที่บริเวณฉนวนโพลีเอทิลีนมีค่าลดลงเหลือ 3.78 kV/mm แสดงดังรูปที่ 3.23

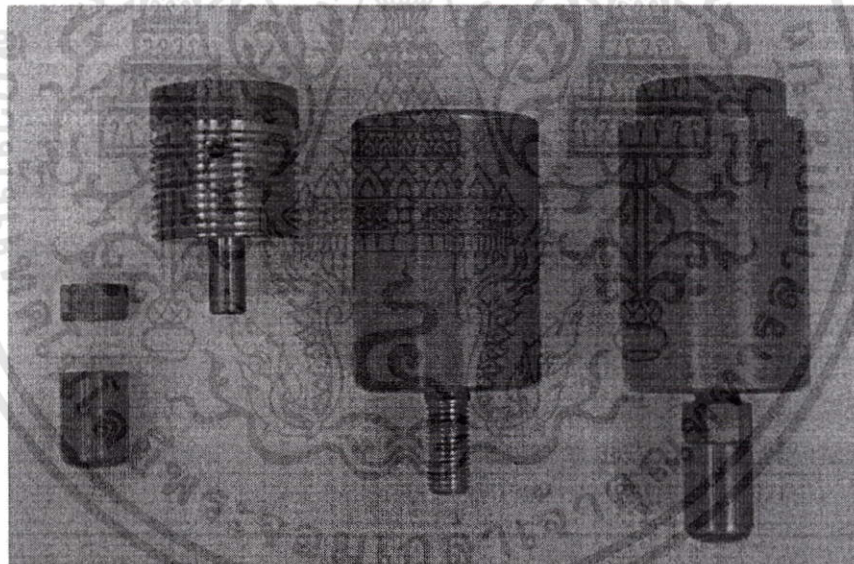


รูปที่ 3.22 ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ปลายสายและฐานรองรับปลายสาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.23 ความเครียดสนามไฟฟ้าที่แก้ไขได้โดยใช้โอเล็ก โตรคซิดด์



รูปที่ 3.24 ปลายสายและฐานรองรับปลายสายสำหรับสายเคเบิลพิกัด 12/20 (24) kV 240 sq.mm.

### 3.8.3 การออกแบบความยาวของขั้วต่อสายเคเบิล

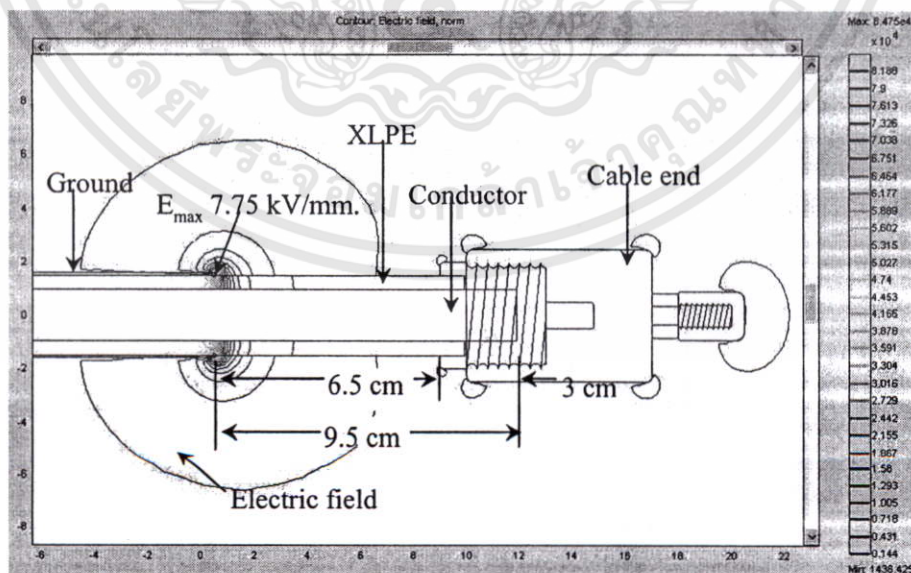
ในการทดสอบฉนวนของสายเคเบิล จะทำการป้อนแรงดันทดสอบระหว่างตัวนำและชั้นกึ่งตัวนำนอก โดยป้อนแรงดันสูงเข้าที่ตัวนำและชั้นกึ่งตัวนำนอกจะเป็นกราวด์ ในการทดสอบสายเคเบิลที่ไม่มีขั้วต่อพิเศษ ถ้าทำการทดสอบดังกล่าวจะเกิดการวาวไฟตามผิวขึ้น เนื่องจากระยะห่างระหว่างแรงดันสูงกับกราวด์น้อยมาก ปัญหาที่เกิดขึ้นนี้สามารถแก้ไขได้ โดยการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพิ่มระยะห่างระหว่างแรงดันสูงกับกราวด์ โดยการตัดชั้นกึ่งตัวนำนอกบางส่วนออก แต่ปัญหาที่จะเกิดตามมาคือ สนามไฟฟ้าที่ขอบของชั้นกึ่งตัวนำนอกจะเกิดความไม่สม่ำเสมอสูง ซึ่งจะนำไปสู่การเกิดเบรคดาวน์ในฉนวนได้ จึงจำเป็นต้องควบคุมสนามไฟฟ้าในบริเวณนั้น ให้เกิดความไม่สม่ำเสมอที่น้อยที่สุด

เดิมในการออกแบบจะทำการทดสอบวาทไฟตามพิกัดและใช้ค่า Safety factor สูงๆ เข้ามาช่วยในการออกแบบเพื่อป้องกันการเกิดกราวด์ไฟตามพิกัด ซึ่งทำให้ขั้วต่อสายมีความยาวมาก ส่งผลให้ต้องใช้ความยาวในการปกอสายเคเบิลมากขึ้น เป็นการสิ้นเปลืองสายเคเบิลในการทดสอบ ในงานวิจัยนี้ใช้การจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณที่ปกอสายเคเบิลด้วยไฟไนต์อีลิเมนต์บนโปรแกรม FEMLAB [18] โดยพิจารณาความยาวการปกอสายจากความเครียดสนามไฟฟ้าที่พิกัดสายเคเบิลร่วมกับพิกัดที่ใช้ในการควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้า ซึ่งจะช่วยให้ทราบความเครียดสนามไฟฟ้าที่พิกัดของสายเคเบิลในขณะที่ทดสอบจริง โดยสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะต้องมีค่าไม่มากเกินไปกว่าที่พิกัดสายเคเบิลจะทนได้

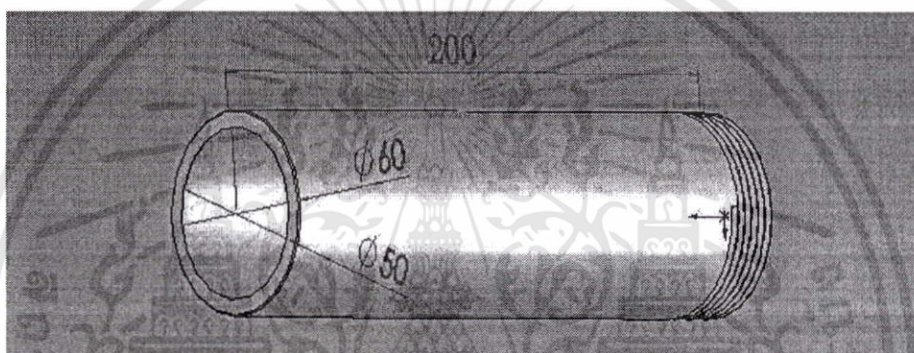
ความยาวของขั้วต่อสายเคเบิลจะพิจารณาจากแรงดันทดสอบและระยะปกอสายระหว่างตัวนำกับกราวด์ โดยแรงดันทดสอบสูงสุดตามมาตรฐาน IEC 60502-2 [17] คือ  $2U_0$  สำหรับสายเคเบิลพิกัด 12/20 (24) kV แรงดันทดสอบจะเท่ากับ 24 kV ส่วนระยะปกอสาย ได้จากการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้า โดยการจำลองการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าเพื่อหาความยาวระยะปกอสายจะจำลองในลักษณะที่สายเคเบิลประกอบเข้ากับปลายสายและฐานรองรับปลายสาย และมีฉนวนน้ำมันหรือแปลงเป็นฉนวนที่ควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้า ซึ่งเป็นการควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้าแบบ Refractive stress control ผลการจำลองสนามไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 3.25



รูปที่ 3.25 ผลการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณปลายสายเคเบิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าในรูปที่ 3.25 มีค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด ( $E_{max}$ ) 7.75 kV/mm บริเวณชั้นกึ่งตัวนำนอกที่ปอกออก ฉนวนของสายเคเบิลคือ XLPE หนา 5.5 mm ตามมาตรฐาน IEC 60502-2 [17] ทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าได้ประมาณ 40 kV/mm [16] และน้ำมันหม้อแปลงทนความเครียดสนามไฟฟ้าได้ 10-25 kV/mm [16] จากค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้นพบว่า สามารถใช้ทดสอบหาคุณสมบัติบางส่วนในสายเคเบิลได้โดยไม่เกิดการเบรกดาวน์ที่ฉนวน XLPE และฉนวนน้ำมันหม้อแปลง เมื่อพิจารณาความยาวจากชั้นกึ่งตัวนำนอกถึงปลายสายและรวมความยาวของตัวนำสายเคเบิลที่อยู่ในปลายสายแล้ว ดังนั้นระยะปอกสายเคเบิลทั้งหมดเท่ากับ 9.5 cm. ฉะนั้น เมื่อรวมความยาวของสายเคเบิลที่ปอกกับความยาวของปลายสายและฐานรองรับปลายสายแล้ว เพื่อให้ฉนวนหม้อแปลงควบคุมการความเครียดสนามไฟฟ้าตลอดระยะที่ปอกสาย จึงเลือกความยาวขั้วต่อสายที่ 20 cm.



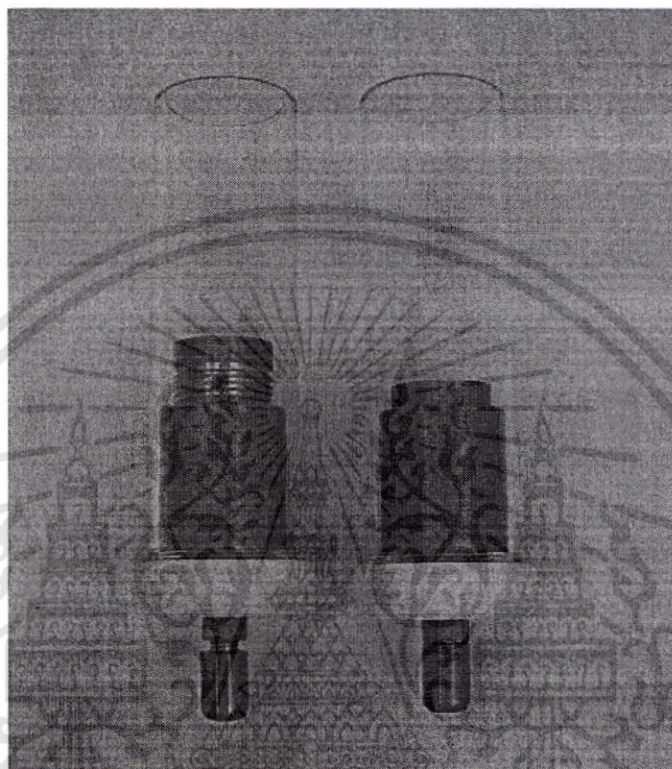
รูปที่ 3.26 ขนาดของขั้วต่อสายสำหรับสายเคเบิลพิกัด 12/20 (24) kV 240 sq.mm.



รูปที่ 3.27 ขั้วต่อสายสำหรับสายเคเบิลพิกัด 12/20 (24) kV 240 sq.mm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

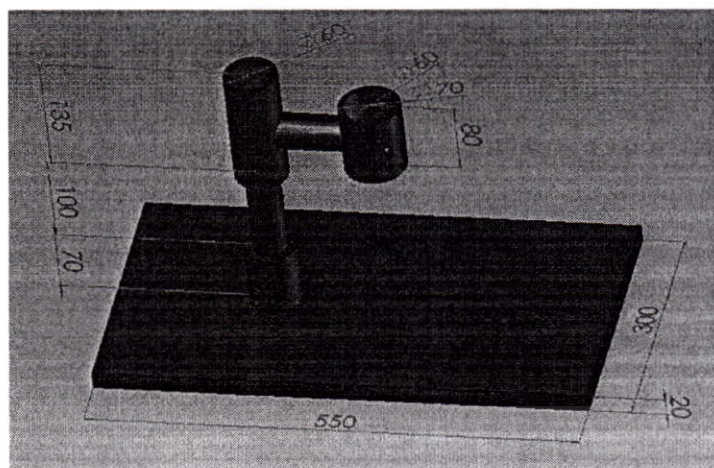
จากขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของขั้วต่อสายเคเบิล ปลายสายและฐานรองรับ ปลายสาย รวมถึงความยาวของขั้วต่อสายเคเบิลที่ได้ออกแบบ จะสามารถนำมาประกอบเข้าด้วยกัน เป็นขั้วต่อสายสำหรับทดสอบดิสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิล พิกัด 12/20 (24) kV ขนาด 240 sq.mm. ได้ ดังรูปที่ 3.28



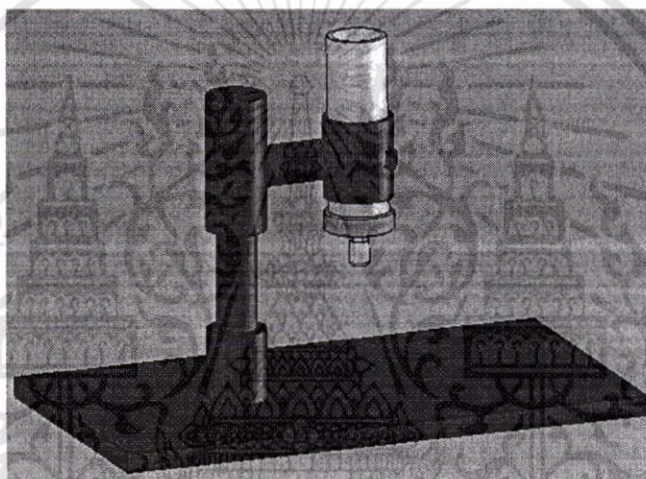
รูปที่ 3.28 ขั้วต่อสายสำหรับทดสอบดิสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิล 12/20 (24) kV 240 sq.mm.

#### 3.8.4 การออกแบบชุดรองรับขั้วต่อสายเคเบิล

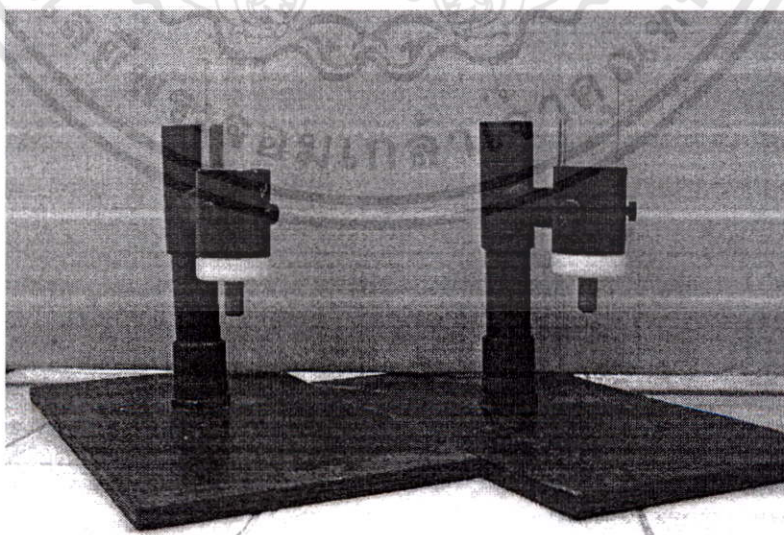
ชุดรองรับขั้วต่อสายเคเบิล เป็นอุปกรณ์ที่ต้องออกแบบให้มีความคงทน แข็งแรง เนื่องจากชุดรองรับขั้วต่อสายเคเบิลจะต้องจับยึดขั้วต่อสายเคเบิล เพื่อให้มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าแรงสูงกับกราวด์ของระบบไม่ให้น้อยจนเกิดการเบรกควาน์ และยังคงรับน้ำหนักของสายเคเบิลที่ใช้ในการทดสอบ จึงเลือกใช้ PVC เป็นอุปกรณ์จับยึดขั้วต่อสาย เนื่องจาก PVC เป็นวัสดุฉนวนที่มีความคงทนแข็งแรง ส่วนฐานรองรับด้านล่างทำจากไม้อัดซึ่งมีความแข็งแรงและเป็นฉนวน โดยไม่ส่งผลต่อการเกิดสัญญาณรบกวน (contact noise) ขณะทดสอบดิสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิล ขนาดของชุดรองรับขั้วต่อสายเคเบิล แสดงดังรูปที่ 3.29 – 3.31



รูปที่ 3.29 ขนาดของชุดรองรับขั้วต่อสายเคเบิล



รูปที่ 3.30 ลักษณะการประกอบขั้วต่อสายเคเบิลกับชุดรองรับขั้วต่อสายเคเบิล

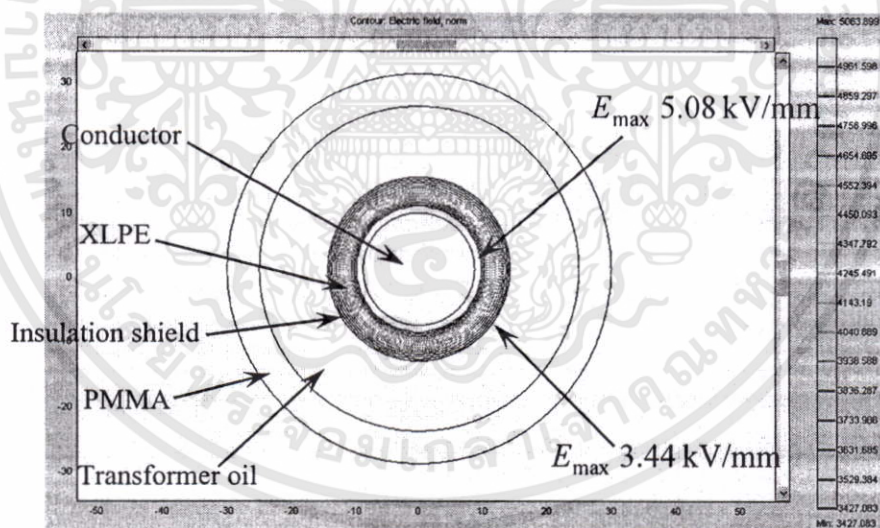


รูปที่ 3.31 การประกอบขั้วต่อสายเคเบิลกับชุดรองรับขั้วต่อสายเคเบิล

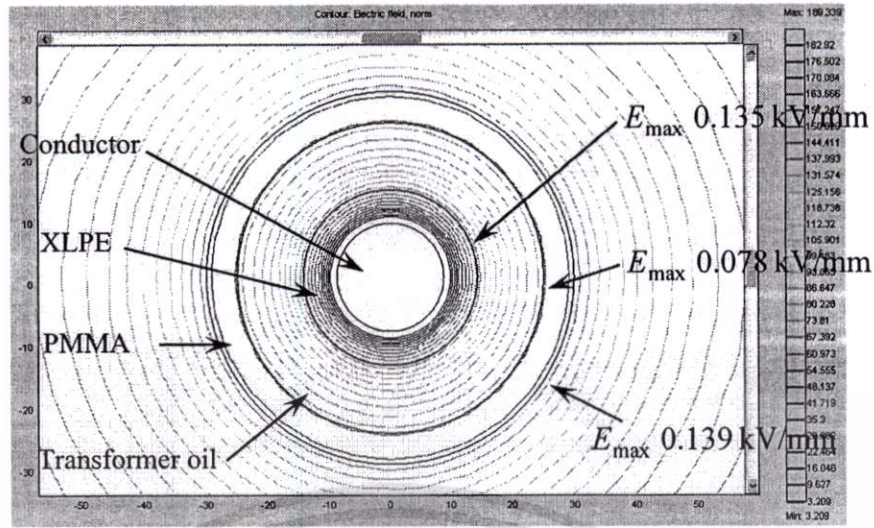
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.8.5 การจำลองการกระจายสนามไฟฟ้าในขั้วต่อสายเคเบิล

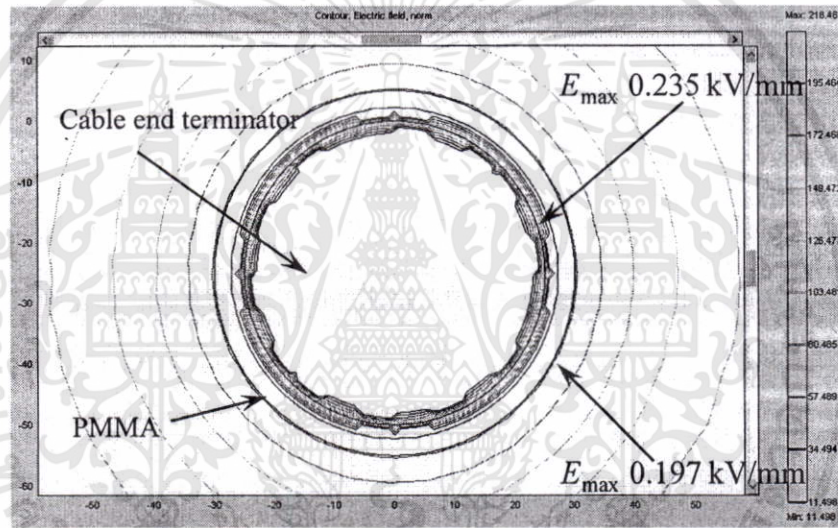
ในปริศณานิพนธ์นี้ได้นำไฟไนต์เอลิเมนต์มาช่วยในการวิเคราะห์การกระจายความเครียดสนามไฟฟ้า ซึ่งวิเคราะห์แบบ 2 มิติ และไม่คำนึงถึงผลของประจุตกค้าง (ที่รอยต่อของชั้นฉนวนทั้งสองไม่มีประจุอิสระ กล่าวคือสภาพนำทางไฟฟ้าของฉนวนเป็นศูนย์ หรือเป็นแรงดันป้อนกระแสสลับ [9-10]) โดยใช้โปรแกรม FEMLAB [18] การจำลองการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าในหัวขั้วก่อนหน้านี้จะทำการจำลองการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าเพื่อช่วยในการออกแบบทั้งการหาค่าความเครียดสนามไฟฟ้าในเนื้อฉนวน การออกแบบรูปลักษณะของปลายสายและฐานรองรับปลายสายที่เหมาะสม รวมไปถึงการออกแบบความยาวของขั้วต่อสายเคเบิล ซึ่งในหัวขั้วนี้จะแสดงถึงการผลการจำลองการกระจายสนามความเครียดไฟฟ้าในส่วนต่างๆ ของขั้วต่อสายที่ได้ออกแบบ ในการจำลองการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าจะกำหนดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยใช้แรงดันทดสอบสูงสุดตามมาตรฐาน IEC 60502-2 คือ 24 kV ค่าเปอร์มิตติวิตี ( $\epsilon_r$ ) ของสารฉนวนจาก [16] และจำลองการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าร่วมกับสภาวะภายนอกของขั้วต่อสายเคเบิล คือ ฉนวนอากาศ ผลการจำลองการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าภายในขั้วต่อสายเคเบิล แสดงดังรูปที่ 3.32, 3.33 และ 3.34 ผลการจำลองการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าในส่วนต่างๆ ของขั้วต่อสายเคเบิล แสดงดังรูปที่ 3.35



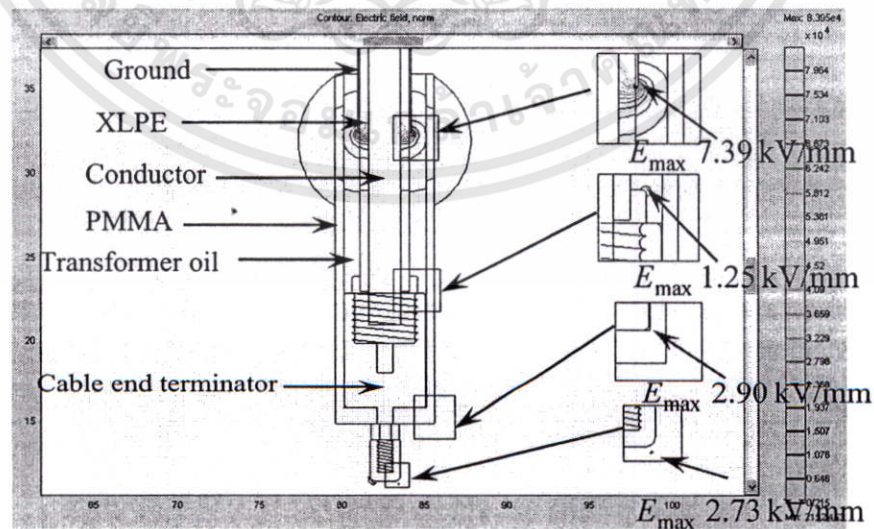
รูปที่ 3.32 การกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าภายในขั้วต่อสายเคเบิลบริเวณชั้นกั้นตัวนำนอก



รูปที่ 3.33 การกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าภายในข้อต่อสายเคเบิลบริเวณสายเคเบิล



รูปที่ 3.34 การกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าภายในข้อต่อสายเคเบิลบริเวณฐานรองรับปลายสาย



รูปที่ 3.35 การกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าในส่วนต่างๆ ของข้อต่อสายเคเบิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการจำลองการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้า ดังรูปที่ 3.32 - 3.35 พบว่าค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด ( $E_{max}$ ) เท่ากับ 5.08 kV/mm ที่ผิวด้านในของฉนวน XLPE บริเวณปลายของชั้นกึ่งตัวนำนอก (insulation shield) ที่ปอกออก และที่ผิวด้านนอกของฉนวน XLPE มีค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด เท่ากับ 3.44 kV/mm บริเวณปลายของชั้นกึ่งตัวนำนอกที่ปอกออกเช่นกัน ซึ่งค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นไม่ทำให้เกิดเบรคความในฉนวน XLPE และไม่เกิดการเกิดการวาวไฟตามผิวฉนวนขณะทำการทดสอบ

### 3.9 สรุปผลการออกแบบ

ขั้วต่อสายสำหรับทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิลใต้ดินแรงดันสูง พิกัด 12/20 (24) kV ขนาด 240 sq.mm. ที่ได้ออกแบบ โดยใช้ใช้ทฤษฎีมิติที่เหมาะสม และระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร และมีความยาว 20 เซนติเมตร ใช้ฉนวนน้ำมันหม้อแปลงสำหรับควบคุมการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณที่ทำการปอกสาย โดยใช้ระยะปอกสายเคเบิลสำหรับการทดสอบเพียง 9.5 เซนติเมตร

ผลจากการออกแบบ โดยใช้ใช้ทฤษฎีมิติที่เหมาะสมและระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เมื่อเปรียบเทียบกับขั้วต่อสายเคเบิลที่ออกแบบโดยใช้เทคนิคเดิม ซึ่งใช้ฉนวนสำหรับควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้าชนิดเดียวกัน [4-6] พบว่า สามารถลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวของขั้วต่อสายเคเบิลที่ออกแบบ ดังนี้ การใช้ทฤษฎีมิติที่เหมาะสมของทรงกระบอกซ้อนกันร่วมในการออกแบบ ทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางของขั้วต่อสายเคเบิลลดลง 50 เปอร์เซ็นต์ และการใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการออกแบบ ทำให้ความยาวของขั้วต่อสายลดลง 80 เปอร์เซ็นต์ การลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางจะช่วยลดความสิ้นเปลืองของฉนวนที่นำมาควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้า และความยาวของขั้วต่อสายเคเบิลที่สั้นลงส่งผลให้ลดความสิ้นเปลืองสายเคเบิลจากการทดสอบ ผลการทดสอบการหาค่าดิสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิลโดยผลการทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิลโดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลที่ออกแบบสร้าง จะแสดงในบทถัดไป

## บทที่ 4

# การทดสอบและการวิเคราะห์ผลการทดสอบ

### 4.1 บทนำ

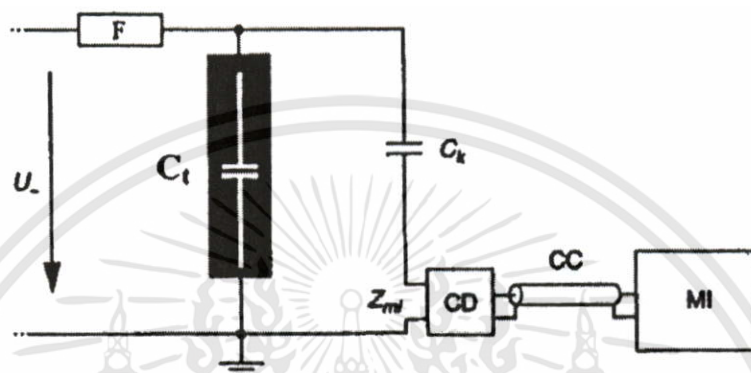
เนื่องด้วยห้องปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง มีศักยภาพในการทดสอบวัสดุและอุปกรณ์ระบบไฟฟ้าแรงสูงตามมาตรฐานให้แก่ภาคอุตสาหกรรม เช่น สายเคเบิลแรงดันสูง สายเคเบิลใต้ดินแรงดันสูง ถูกด้วยฉนวนชนิดต่างๆ เคเบิลสเปเซอร์ เป็นต้น โดย การทดสอบหาปริมาณดิสชาร์จบางส่วนในฉนวนสายเคเบิลเป็นรายการหนึ่งที่ต้องทำการทดสอบ ก่อนที่จะทำการติดตั้งเสมอ ซึ่งการทดสอบหาปริมาณดิสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิลตามมาตรฐาน IEC 60502-2 [17] กำหนดให้ใช้ขั้วต่อสายเคเบิลในทำการทดสอบ โดยขั้วต่อสายเคเบิลที่ใช้จะต้องเป็นขั้วต่อสายเคเบิลที่มีปริมาณดิสชาร์จบางส่วนที่ต่ำ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอถึงการออกแบบสร้างขั้วต่อสายเคเบิลสำหรับทดสอบหาปริมาณดิสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิลใต้ดินแรงดันสูง ซึ่งในบทที่ 3 ได้แสดงถึงวิธีการออกแบบและสร้างขั้วต่อสายเคเบิล โดยวิทยานิพนธ์ในบทนี้กล่าวถึง กระบวนการทดสอบหาปริมาณดิสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิลโดยใช้ขั้วต่อสายที่ได้จากการออกแบบสร้าง รวมถึงผลการทดสอบ และการวิเคราะห์ผลการทดสอบ โดยการทดสอบประกอบด้วย การทดสอบหาปริมาณดิสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิลโดยใช้ขั้วต่อสายที่ออกแบบด้วยหลักการที่นำเสนอเปรียบเทียบกับขั้วต่อสายที่ออกแบบด้วยหลักการเดิม และการทดสอบเปรียบเทียบกับขั้วต่อสายที่ใช้ในภาคอุตสาหกรรม โดยใช้สายเคเบิลแรงดันสูงฉนวน XLPE พิกัด 12/20 (24) kV ขนาด 240sq.mm. และการทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนในขั้วต่อสายเคเบิลที่สร้างขึ้น

### 4.2 การเตรียมการทดสอบหาปริมาณดิสชาร์จบางส่วน

เนื่องจาก ผลของดิสชาร์จบางส่วน คือ ดิสชาร์จบางส่วนแต่ละครั้งจะมีพลังงานถ่ายเทให้กับพื้นผิวฉนวน ในลักษณะชนกระแทก เป็นเหตุให้เกิดความร้อนเพิ่มขึ้นเฉพาะจุด เป็นผลให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมี ทำให้ฉนวนเสียเป็นจุดๆ และเกิดผิวดร้งขยายตัวมากขึ้น ซึ่งอาจนำไปสู่การเบรคควานอย่างสมบูรณ์ได้ ทำให้ฉนวนเสียหาย อายุการใช้งานของฉนวนจะสั้นลง [9-10] จึงจำเป็นต้องมีการทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิลก่อนนำไปใช้งาน โดยหัวข้อนี้จะอธิบายถึง วงจรที่ใช้ในการทดสอบหาปริมาณดิสชาร์จบางส่วน และระดับแรงดันที่ใช้ในการทดสอบ

#### 4.2.1 วงจรทดสอบหาดิซาร์จบางส่วน

การทดสอบจะใช้วงจรทดสอบตรวจจับ PD วิธีตรง (straight detection circuit) ตามมาตรฐาน IEC 60270 [19] แบบ CD ต่ออนุกรมกับ  $C_k$  เป็นแบบที่ใช้กันมากในทางปฏิบัติ เนื่องจากไม่เสี่ยงต่อการเกิดเบรกดาวน์ เพราะทราบค่าแรงดันที่กำหนดของ  $C_k$  ซึ่งเป็นการป้องกันความเสียหายที่อาจจะเกิดแก่เครื่องวัด PD วงจรทดสอบตรวจจับ PD วิธีตรง แบบ CD ต่ออนุกรมกับ  $C_k$  แสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 วงจรทดสอบตรวจจับ PD วิธีตรง แบบ CD ต่ออนุกรมกับ  $C_k$  [19]

- จากรูปที่ 4.1
- $U \sim$  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  $C_p$ ,  $C_k$  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) และฮาร์โมนิกส์ต่างๆ จากแหล่งจ่ายแรงดันทดสอบมิให้เข้าไปที่เครื่องมือวัดได้ ส่วนเครื่องมือวัด MI จะทำหน้าที่สำคัญ 3 ประการ คือ เป็นวงจรขยายสัญญาณ (Amplified) เป็นวงจรกรองสัญญาณชนิดผ่านแถบ เพื่อลดสัญญาณรบกวนความถี่ต่ำที่มาจากแหล่งจ่ายแรงดันทดสอบกับสัญญาณรบกวนความถี่สูงที่มาจากคลื่นวิทยุ และเป็นอุปกรณ์แสดงผล PD

#### 4.2.2 แรงดันทดสอบ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการออกแบบสร้างขั้วต่อสายสำหรับทดสอบหาดีสชาร์จบางส่วนในเคเบิล พิกัด 12/20 (24) kV ขนาด 240 sq.mm. ตามมาตรฐาน IEC 60502-2 [17] กำหนดให้จ่ายแรงดันทดสอบที่  $2U_0$  คงที่เป็นเวลา 10 วินาที แล้วลดระดับแรงดันลงเหลือ  $1.732 U_0$  แล้วทำการทดสอบหาดีสชาร์จบางส่วน ฉะนั้นแรงดันทดสอบสำหรับสายเคเบิลพิกัด 12/20 (24) [ $U_0/U (U_m)$ ] kV คือ จ่ายแรงดันไฟฟ้า 24 kV คงที่เป็นเวลา 10 วินาที แล้วลดระดับแรงดันลงจนเหลือ 20.78 kV แล้วทำการทดสอบหาดีสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิล

#### 4.2.3 พิกัดกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงทดสอบ [9-10]

การทดสอบอุปกรณ์หรือวัสดุฉนวนทางด้านไฟฟ้าแรงสูง อาจถือได้ว่าอุปกรณ์หรือวัสดุฉนวนมีลักษณะเป็นตัวเก็บประจุไฟฟ้า คือ มีค่าเก็บประจุ ฉะนั้น โหลดของหม้อแปลงทดสอบจึงเป็นแบบตัวเก็บประจุ กระแสจึงเป็นแบบเก็บประจุ ฉะนั้น เพื่อไม่ให้เกิดความเสียหายต่อหม้อแปลงทดสอบ พิกัดกำลังไฟฟ้าขณะทดสอบไม่ควรเกินพิกัดกำลังของหม้อแปลงทดสอบ

ความจุทางไฟฟ้าหรือค่าเก็บประจุ ที่เป็นโหลดของหม้อแปลง ประกอบด้วยความจุทางไฟฟ้าของวัสดุทดสอบ อุปกรณ์วัด และสายต่อ รวมทั้งค่าความจุไฟฟ้าสเตรย์ (stray capacitance) ฉะนั้นกำลังไฟฟ้าที่ต้องใช้ในการทดสอบอาจคำนวณได้จากสมการ

$$S_f = \omega C U_f^2 \quad (4.1)$$

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

โดยที่  $C$  คือ ค่าความจุไฟฟ้ารวม เป็น pF  
 $U_f$  คือ แรงดันทดสอบ เป็น  $\text{kV}_{\text{rms}}$   
 $f$  คือ ความถี่ของแรงดัน เป็น Hz

กำลังไฟฟ้าที่กำหนดของหม้อแปลงทดสอบ ควรจะต้องมีค่าสูงกว่ากำลังไฟฟ้าที่ต้องป้อนให้กับโหลด 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

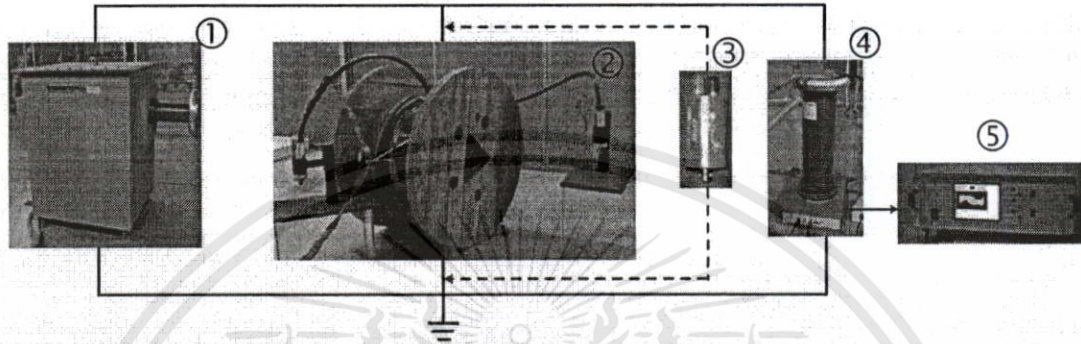
นอกจากนี้ ถ้ามีความจุไฟฟ้าอื่นที่ต่ออยู่ในวงจรทางด้านแรงสูง ก็ถือเป็นโหลดของหม้อแปลงทดสอบ ต้องนำมาคิดด้วย เช่น ตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว หรือคัปปลิง (coupling) ที่ใช้ในกรณีวัดคิซาร์จบางส่วน ปกติมีค่า 100 pF และตัวเก็บประจุของอุปกรณ์วัดแรงดัน เป็นต้น

### 4.3 การทดสอบขั้วต่อสายเคเบิลที่ออกแบบสร้าง

การทดสอบขั้วต่อสายเคเบิลที่ออกแบบสร้างมีวัตถุประสงค์เพื่อทำการทดสอบเบื้องต้น เพื่อให้ทราบว่าขั้วต่อสายเคเบิลที่ออกแบบสร้างขึ้นนั้น สามารถใช้ในการทดสอบหาคิซาร์จ

บางส่วนได้หรือไม่ เกิดการเบรคความถี่ในเนื้อฉนวน หรือเกิดการวบไฟตามผิวฉนวนขณะทำการทดสอบหรือไม่ และเพื่อเป็นแนวทางการใช้ขั้วต่อสายที่ออกแบบสร้างขึ้นในการเรียนการสอน ราชวิทยาลัยวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง การวิจัย และการทดสอบตามมาตรฐานต่อไปในอนาคต

วงจรที่ใช้ในการทดสอบเป็นวงจรแบบวิธีตรงตามมาตรฐาน IEC 60270 [19] โดยใช้ PD DETECTOR DDX – 9101 แสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 วงจรทดสอบขั้วต่อสายเคเบิลตามมาตรฐาน IEC 60270

จากรูปที่ 4.2

- ① คือ High Voltage Test Transformer 460V, 75kV @ 40kVA
- ② คือ Test object (High Voltage Underground Cable with Cable Terminator)
- ③ คือ PD Calibrator 100 pF
- ④ คือ Coupling Capacitors 0.001  $\mu$ F 100kV
- ⑤ คือ PD Detector DDX – 9101

หม้อแปลงทดสอบที่ใช้ในการทดสอบ (High Voltage Test Transformer Hipotronics Model T775-40-460) พิกัด 75 kV 40 kVA เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจจะเกิดแก่หม้อแปลงทดสอบ จึงจำเป็นที่ต้องหาความยาวของสายเคเบิลที่จะใช้ในการทดสอบให้เหมาะสมกับพิกัดของหม้อแปลงทดสอบ โดยความจุทางไฟฟ้าหรือค่าเก็บประจุ ที่เป็นโหลดของหม้อแปลง ประกอบด้วย ความจุทางไฟฟ้าของวัสดุทดสอบ 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฉะนั้น ความจุไฟฟ้ารวมทางด้านโหนดของหม้อแปลงทดสอบ จะได้

$$C_t = \frac{S_t}{\omega U_t^2}$$

$$= \frac{(40 \times 10^3)}{2\pi \times 50 \times (24 \times 10^3)^2}$$

$$C_t = 221,048 \text{ pF}$$

จากค่าความจุไฟฟ้ารวมทางด้านโหนดของหม้อแปลงทดสอบที่ระดับแรงดันทดสอบ จะสามารถหาความยาวของสายเคเบิลที่ใช้ในการทดสอบได้ ดังนี้

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

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

จากสมการที่ 4.2 โดยที่ ค่าความจุไฟฟ้าของอุปกรณ์คาบเกี่ยว 1000 pF และค่าความจุไฟฟ้าของสายต่อวงจรแรงสูงความยาวประมาณ 10 เมตร จากตารางที่ 4.1 มีความจุไฟฟ้าประมาณ 150 pF ซึ่งสามารถหาความยาวของสายเคเบิลที่ใช้ในการทดสอบได้ ดังนี้

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

$$= 221,048 \text{ pF} - 1,000 \text{ pF} - 150 \text{ pF}$$

จะได้

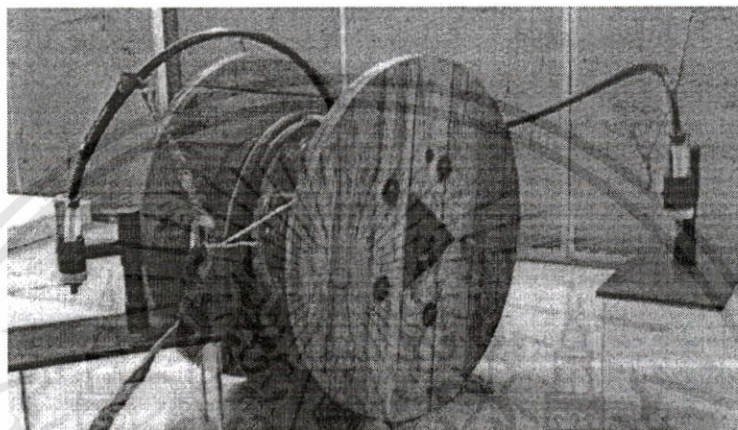
$$C_{HV \text{ cable}} = 219,898 \text{ pF}$$

จากตารางที่ 4.1 ค่าความจุไฟฟ้าของเคเบิลแรงสูง ประมาณ 300 pF/m ฉะนั้น ความยาวของสายเคเบิลที่ใช้ในการทดสอบ จะเท่ากับ

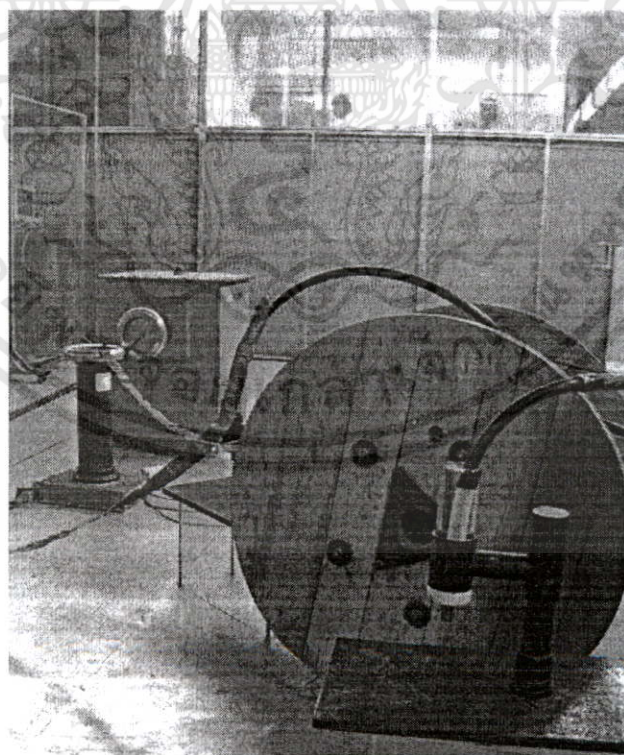
$$l_{cable} = \frac{219,898 \text{ pF}}{300 \text{ pF/m}} = 733 \text{ m}$$

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

$$\begin{aligned} C_t &= (300 \text{ pF} \times 10) + 1,000 \text{ pF} + 150 \text{ pF} \\ &= 4,150 \text{ pF} \end{aligned}$$

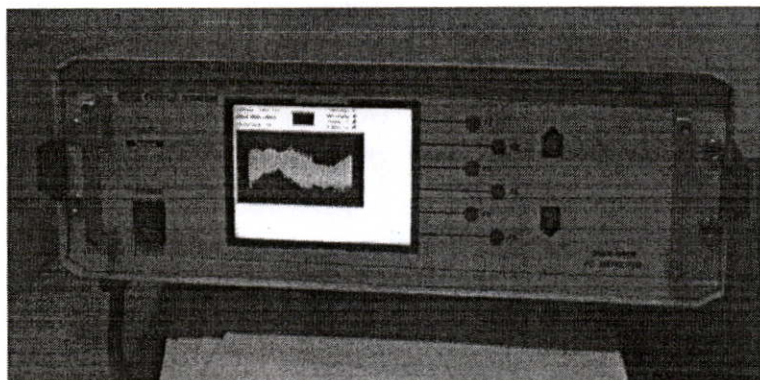


รูปที่ 4.3 การต่อขั้วต่อสายที่ออกแบบด้วยหลักการที่นำเสนอเพื่อทดสอบหา PD ในสายเคเบิล

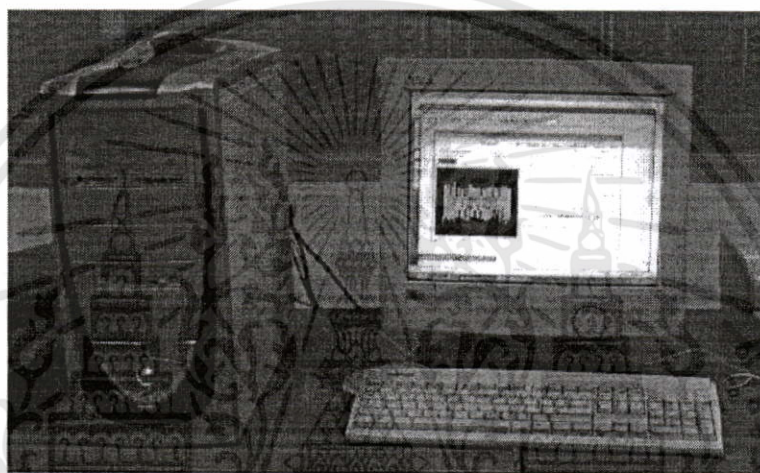


รูปที่ 4.4 การทดสอบหา PD ในสายเคเบิลโดยใช้ขั้วต่อสายที่ออกแบบด้วยหลักการที่นำเสนอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

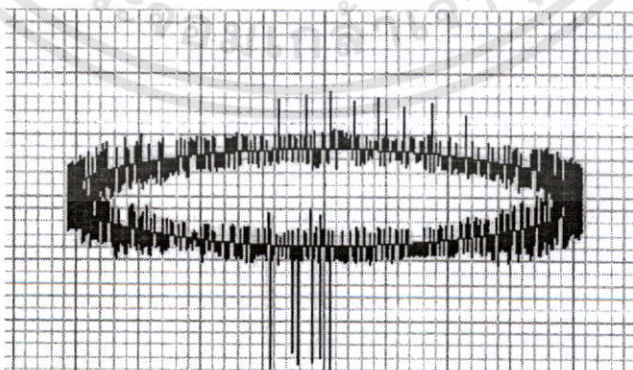


รูปที่ 4.5 ผลการทดสอบจาก PD Detector Hipotronics DDX – 9101 (ฐานเวลารูปคลื่นไซน์)



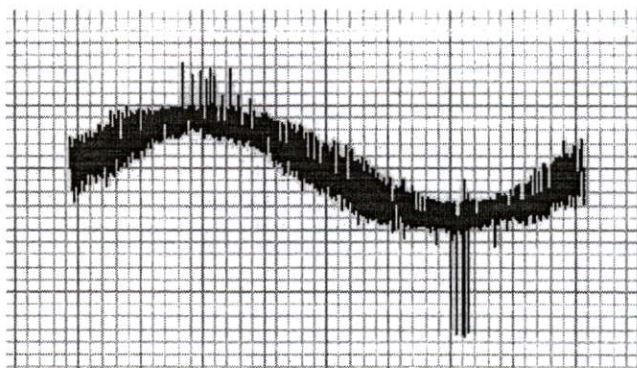
รูปที่ 4.6 ผลการทดสอบจาก โปรแกรม REMOTE 9101 (ฐานเวลารูปอิลิปส์)

จากรูปที่ 4.5 – 4.6 ผลการทดสอบหาดีสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิลใต้ดินแรงดันสูงโดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลที่ออกแบบสร้างในการทดสอบ ซึ่งโปรแกรม REMOTE 9190 สามารถ capture สัญญาณดีสชาร์จบางส่วนได้ทั้งแบบฐานเวลารูปอิลิปส์ และฐานเวลารูปคลื่นไซน์ ดังรูปที่ 4.7 – 4.8



รูปที่ 4.7 ผลการทดสอบหา PD ในสายเคเบิลโดยใช้ขั้วต่อสายที่ออกแบบด้วยหลักการที่นำเสนอ (ฐานเวลารูปอิลิปส์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 ผลการทดสอบหา PD ในสายเคเบิลโดยใช้ขั้วต่อสายที่ออกแบบด้วยหลักการที่นำเสนอ (ฐานเวลารูปคลื่นไซน์)

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบหา PD ในสายเคเบิล พิกัด 12/20 (24) kV ขนาด 240 sq.mm โดยใช้ขั้วต่อสายที่ออกแบบด้วยหลักการที่นำเสนอ

Description	Result	
Length of test sample	10	m
Calibration pulse	100	pC
Test voltage rise to $2U_0$	24	kV
Test voltage at $1.732U_0$	21.0	kV
The magnitude of the discharge at $2U_0$	2.2	pC

ผลการทดสอบหาปริมาณดิสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิล พิกัด 12/20 (24) kV 240 sq.mm ความยาว 10 เมตร โดยใช้ขั้วต่อสายที่ออกแบบด้วยหลักการที่นำเสนอ ที่ระดับแรงดัน 21.0 kV มีปริมาณดิสชาร์จบางส่วน 2.2 pC (background noise 0.8 pC) จากฐานเวลารูปคลื่นในรูปที่ 4.7 และ 4.8 โดยดิสชาร์จบางส่วนเกิดขึ้นที่มุมเฟส  $270^\circ$  และ  $90^\circ$

ในการทดสอบพบว่าไม่เกิดการเบรกดาวน์ในเนื้อฉนวนและไม่เกิดการรบกวนไฟตามฉนวนขณะทำการทดสอบซึ่งไม่สร้างความเสียหายต่ออุปกรณ์การทดสอบ เพื่อเป็นการยืนยันผลการทดสอบขั้วต่อสายเคเบิลที่ออกแบบสร้าง ผู้วิจัยจึงนำขั้วต่อสายเคเบิลที่ออกแบบสร้างไปใช้ทดสอบหาปริมาณดิสชาร์จดิสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิลเปรียบเทียบกับขั้วต่อสายเคเบิลที่ออกแบบด้วยหลักการเดิมและขั้วต่อสายเคเบิลที่ใช้ในภาคอุตสาหกรรม ซึ่งแสดงในหัวข้อถัดไป

#### 4.4 การทดสอบเปรียบเทียบขั้วต่อสายเคเบิล

การทดสอบเปรียบเทียบขั้วต่อสายเคเบิล เพื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบหาคิซาร์จบางส่วนในสายเคเบิลได้ดินแรงสูง พิกัด 12/20 (24) kV 240 sq.mm. โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลที่ออกแบบสร้างขึ้นเปรียบเทียบกับขั้วต่อสายเคเบิลที่ออกแบบด้วยหลักการเดิมและขั้วต่อสายเคเบิลที่ใช้ในภาคอุตสาหกรรม ซึ่งแบ่งเป็น 2 การทดสอบ คือ

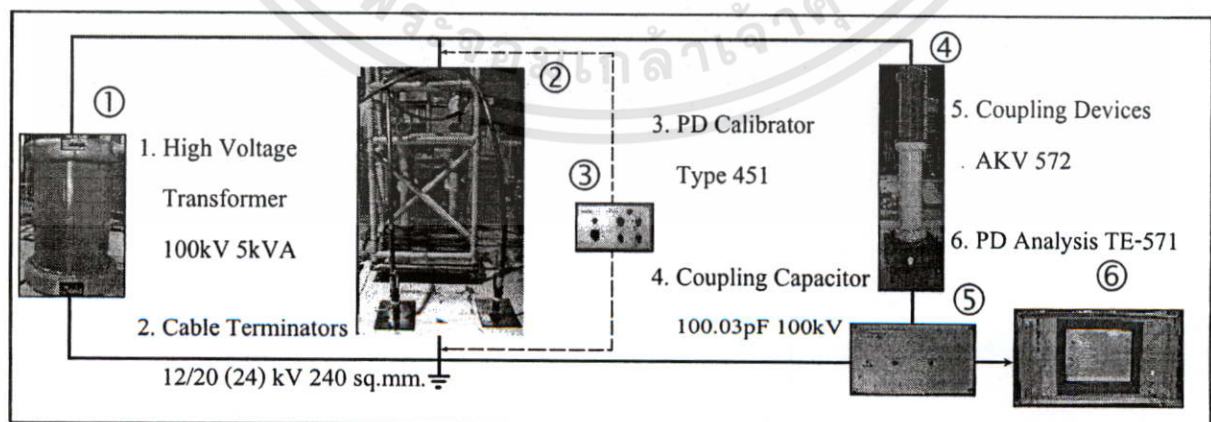
1. ทดสอบหาคิซาร์จบางส่วนในสายเคเบิล โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลที่ออกแบบด้วยหลักการที่นำเสนอเปรียบเทียบกับขั้วต่อสายเคเบิลที่ออกแบบด้วยหลักการเดิม [4-6] เพื่อเป็นการทดสอบเปรียบเทียบปริมาณและตำแหน่งการเกิดขึ้นของคิซาร์จบางส่วนว่ามีลักษณะไปในทิศทางเดียวกันหรือไม่

2. ทดสอบหาคิซาร์จบางส่วนในสายเคเบิล โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลที่ออกแบบด้วยหลักการที่นำเสนอเปรียบเทียบกับขั้วต่อสายเคเบิลที่ใช้ในภาคอุตสาหกรรม เพื่อเป็นการทดสอบการใช้งานจริงในภาคอุตสาหกรรมสายเคเบิลแรงสูงของขั้วต่อสายที่ออกแบบสร้างขึ้น

โดยขั้วต่อสายที่ใช้ในการทดสอบเปรียบเทียบจะเป็นขั้วต่อสายที่ใช้ฉนวนสำหรับควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้าชนิดเดียวกัน คือ ฉนวนน้ำมันหม้อแปลง

##### 4.4.1 การทดสอบหาคิซาร์จบางส่วนในสายเคเบิลโดยใช้ขั้วต่อสายที่ออกแบบด้วยหลักการที่นำเสนอเปรียบเทียบกับขั้วต่อสายเคเบิลที่ออกแบบด้วยหลักการเดิม

ทดสอบหาคิซาร์จบางส่วนในสายเคเบิลโดยใช้ขั้วต่อสายที่ออกแบบด้วยหลักการที่นำเสนอเปรียบเทียบกับขั้วต่อสายที่ออกแบบด้วยหลักการเดิม [4-6] เพื่อเป็นการทดสอบเปรียบเทียบปริมาณและตำแหน่งการเกิดขึ้นของคิซาร์จบางส่วนว่ามีลักษณะไปในทิศทางเดียวกันหรือไม่ วงจรที่ใช้ในการทดสอบเป็นวงจรแบบวิธีตรงตามมาตรฐาน IEC 60270 [19] โดยใช้ PD Analysis TE-571 แสดงดังรูปที่ 4.9



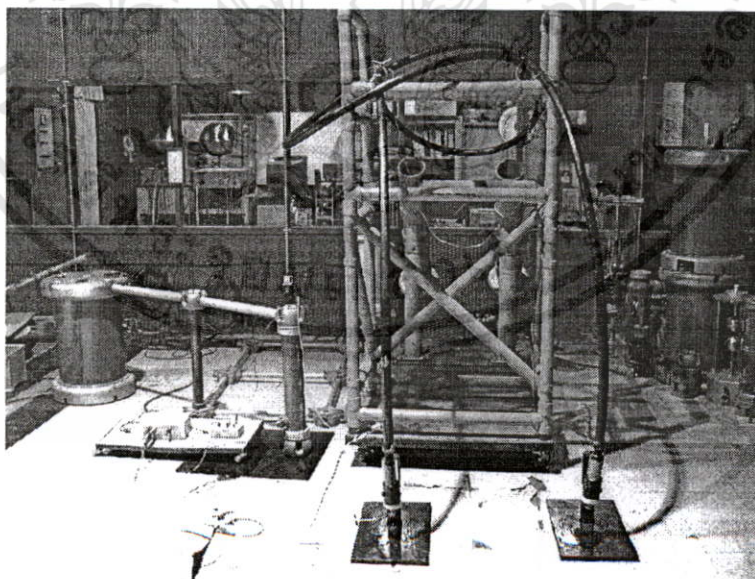
รูปที่ 4.9 วงจรการทดสอบหาคิซาร์จบางส่วนในสายเคเบิลแบบวิธีตรงตามมาตรฐาน IEC 60270

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### จากรูปที่ 4.9 ประกอบด้วย

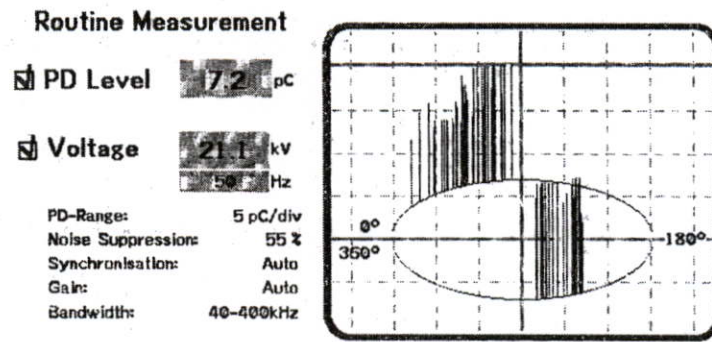
1. High-Voltage Transformer 100kV 5kVA
2. High Voltage Cable 12/20 (24) kV 240 sq.mm. with Terminations Unit
3. PD Calibrator Type 451
4. Coupling Capacitor 100.03pF 100kV
5. Coupling Devices AKV 572
6. PD Analysis TE-571

โดยทำการทดสอบหาปริมาณดิสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิลใต้ดินแรงดันสูง พิกัด 12/20 (24) kV 240 sq.mm. ยาว 10 เมตร จำนวน 2 เส้น ซึ่งเส้นที่ 1 จะเป็นสายเคเบิลที่ถูกจำลองการผิดพร่องของฉนวน โดยใช้ตะปูเจาะเข้าไปในเนื้อฉนวนสายเคเบิล และเส้นที่ 2 เป็นสายเคเบิลที่ได้มาตรฐาน รูปการทดสอบหาปริมาณดิสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิลโดยใช้ขั้วต่อสายที่ออกแบบหลักการที่นำเสนอ แสดงดังรูปที่ 4.10 ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.11 – 4.12 และตารางที่ 4.3 - 4.4 โดยขั้วต่อสายเคเบิลที่ออกแบบด้วยหลักการที่นำเสนอ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 cm. ยาว 20 cm. ใช้ความยาวปอกสาย 9.5 cm. และการทดสอบหาปริมาณดิสชาร์จบางส่วนโดยใช้หลักการเดิม แสดงดังรูปที่ 4.13 ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.14 - 4.15 และตารางที่ 4.5 – 4.6 โดยขั้วต่อสายเคเบิลที่ออกแบบด้วยหลักการเดิม มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm. ยาว 100 cm. ใช้ความยาวปอกสาย 41.62 cm. [4-6]



**รูปที่ 4.10** การทดสอบหา PD ในสายเคเบิลโดยใช้ขั้วต่อสายที่ออกแบบด้วยหลักการที่นำเสนอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

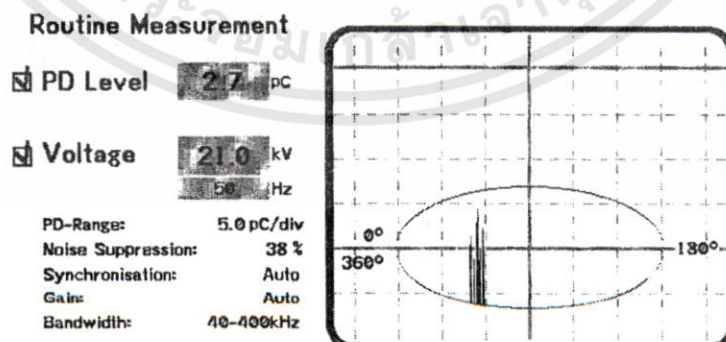


รูปที่ 4.11 ผลการทดสอบสายเคเบิลเส้นที่ 1 โดยใช้ขั้วต่อสายที่ออกแบบด้วยหลักการที่นำเสนอ

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบสายเคเบิลเส้นที่ 1 โดยใช้ขั้วต่อสายที่ออกแบบด้วยหลักการที่นำเสนอ

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

ผลการทดสอบหาคิซาร์จบางส่วนในสายเคเบิล พิกัด 12/20 (24) kV 240 sq.mm ความยาว 10 เมตร เส้นที่ 1 โดยใช้ขั้วต่อสายที่ออกแบบด้วยหลักการที่นำเสนอ ที่แรงดัน 21.1 kV มีปริมาณคิซาร์จบางส่วน 7.2 pC จากฐานเวลารูปอิลิปส์ในรูปที่ 4.11 โดยคิซาร์จบางส่วนเกิดขึ้นที่มุมเฟส  $0 - 90^\circ$  และ  $180 - 270^\circ$



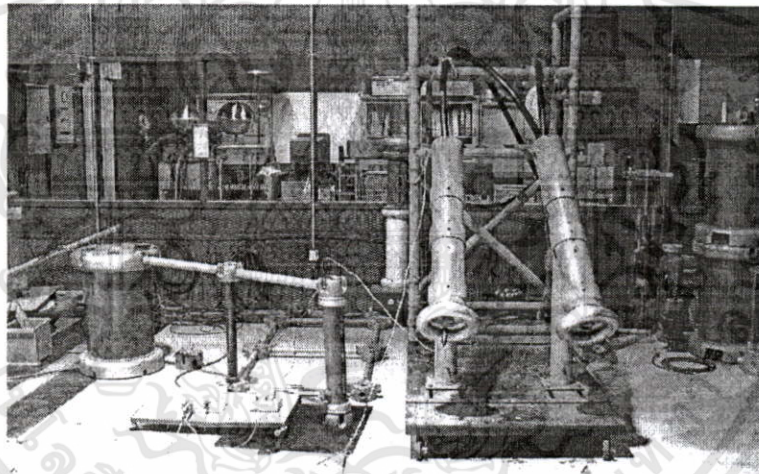
รูปที่ 4.12 ผลการทดสอบสายเคเบิลเส้นที่ 2 โดยใช้ขั้วต่อสายที่ออกแบบด้วยหลักการที่นำเสนอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

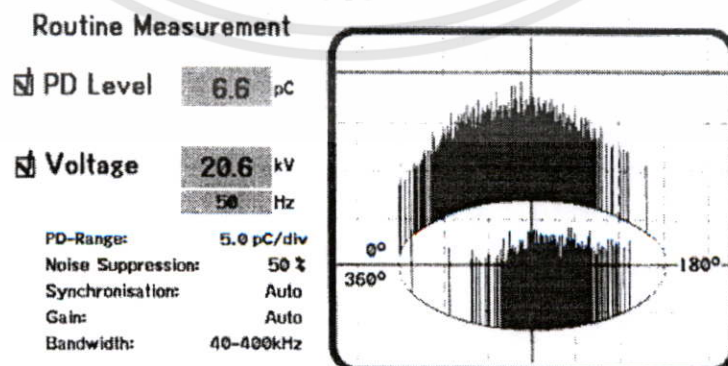
ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบสายเคเบิลเส้นที่ 2 โดยใช้หัวต่อสายที่ออกแบบด้วยหลักการที่นำเสนอ

Description	Result	
	Length of test sample	10
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 $2U_0$	2.7	pC

ผลการทดสอบหาคิซาร์จบางส่วนในสายเคเบิล พิกัด 12/20 (24) kV 240 sq.mm ความยาว 10 เมตร เส้นที่ 2 โดยใช้หัวต่อสายที่ออกแบบด้วยหลักการที่นำเสนอ ที่แรงดัน 21.0 kV มีปริมาณคิซาร์จบางส่วน 2.7 pC จากฐานเวลารูปอิลิปส์ในรูปที่ 4.12 โดยคิซาร์จบางส่วนเกิดขึ้นที่มุมเฟส 270 - 360°



รูปที่ 4.13 การทดสอบหา PD ในสายเคเบิลโดยใช้หัวต่อสายที่ออกแบบด้วยหลักการเดิม [4-6]



รูปที่ 4.14 ผลการทดสอบสายเคเบิลเส้นที่ 1 โดยใช้หัวต่อสายที่ออกแบบด้วยหลักการเดิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบสายเคเบิล เส้นที่ 1 โดยใช้ขั้วต่อสายที่ออกแบบด้วยหลักการเดิม

Description	Result	
	Length of test sample	10
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

ผลการทดสอบหาฉนวนบางส่วนในสายเคเบิล พิกัด 12/20 (24) kV 240 sq.mm ความยาว 10 เมตร เส้นที่ 1 โดยใช้ขั้วต่อสายที่ออกแบบด้วยหลักการเดิม ที่ระดับแรงดัน 20.6 kV มีปริมาณฉนวนบางส่วน 6.6 pC จากฐานเวลารูปคลื่นในรูปที่ 4.14 โดยฉนวนบางส่วนเกิดขึ้นทุกค่าของแรงดัน ยกเว้นค่าแรงดันศูนย์

#### Routine Measurement

PD Level 2.1 pC

Voltage 21.0 kV

5.0 Hz

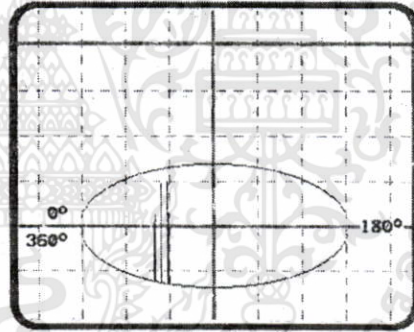
PD-Range: 5.0 pC/div

Noise Suppression: 38 %

Synchronisation: Auto

Gain: Auto

Bandwidth: 40-400kHz



รูปที่ 4.15 ผลการทดสอบสายเคเบิลเส้นที่ 2 โดยใช้ขั้วต่อสายที่ออกแบบด้วยหลักการเดิม

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบสายเคเบิลเส้นที่ 2 โดยใช้ขั้วต่อสายที่ออกแบบด้วยหลักการเดิม

Description	Result	
	Length of test sample	10
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 $2U_0$	2.1	pC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

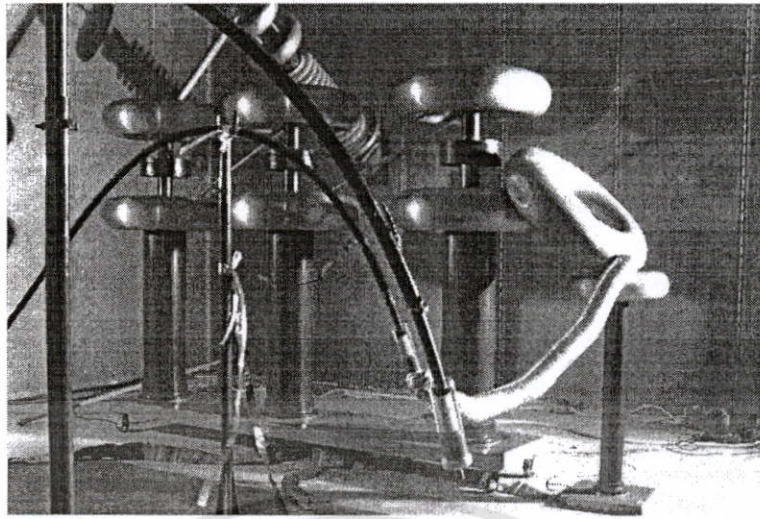
ผลการทดสอบหาคิซหาร์จางส่วนในสายเคเบิล พิกัด 12/20 (24) kV 240 sq.mm ความยาว 10 เมตร เส้นที่ 2 โดยใช้ขั้วต่อสายที่ออกแบบด้วยหลักการเดิม ที่ระดับแรงดัน 21.0 kV มีปริมาณคิซหาร์จางส่วน 6.6 pC จากฐานเวลารูปอิลิปส์ในรูปที่ 4.15 โดยคิซหาร์จางส่วนเกิดขึ้นที่มุมเฟส 270 - 360°

จากผลการทดสอบหาคิซหาร์จางส่วนในสายเคเบิลโดยใช้ขั้วต่อสายที่ออกแบบด้วยหลักการที่นำเสนอเปรียบเทียบกับขั้วต่อสายที่ออกแบบด้วยหลักการเดิม โดยใช้สายเคเบิล พิกัด 12/20 (24) kV ขนาด 240 sq.mm. ยาว 10 เมตร จำนวน 2 เส้น พบว่าผลที่ได้จากการทดสอบมีปริมาณและตำแหน่งบนฐานเวลารูปอิลิปส์ของคิซหาร์จางส่วนใกล้เคียงกับการทดสอบหาคิซหาร์จางส่วนในสายเคเบิลโดยใช้ขั้วต่อสายที่ออกแบบด้วยหลักการเดิม

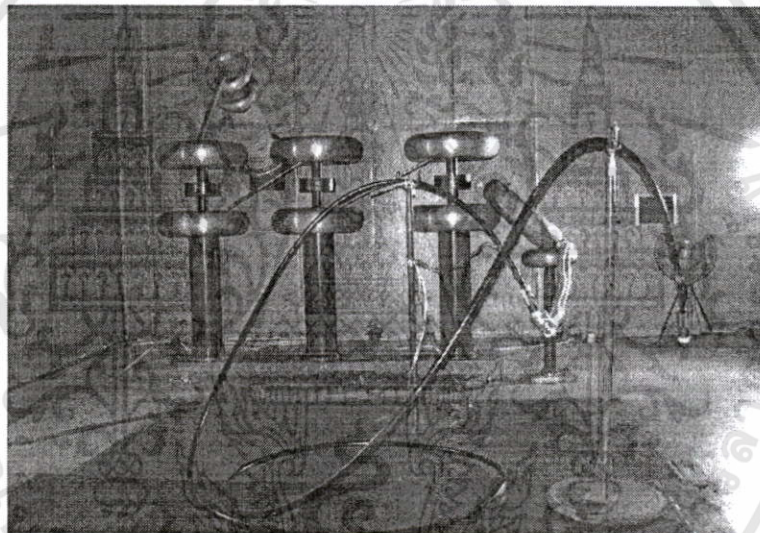
ทั้งนี้เบื้องต้นสามารถสรุปได้ว่าขั้วต่อสายที่ออกแบบสร้างสามารถใช้ในการทดสอบคิซหาร์จางส่วนในสายเคเบิลได้ โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลดลง 50 เปอร์เซ็นต์ ความยาวลดลง 80 เปอร์เซ็นต์ ใช้ความยาวสายที่ปอกออกสั้นลง 77 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับขนาดของขั้วต่อสายที่ออกแบบด้วยหลักการเดิม [4-6] แต่ผลที่ได้จากการทดสอบนั้นยังไม่สามารถสรุปได้ว่าขั้วต่อสายที่ออกแบบสร้างนั้นสามารถนำไปใช้ในภาคอุตสาหกรรมสายเคเบิลแรงสูงได้ จึงจะนำขั้วต่อสายที่ออกแบบสร้างไปทำการทดสอบหาคิซหาร์จางส่วนในสายเคเบิล ณ โรงงานผลิตสายเคเบิลแรงสูง โดยการทดสอบและผลการทดสอบหาคิซหาร์จางส่วนในสายเคเบิลโดยใช้ขั้วต่อสายที่ออกแบบด้วยหลักการที่นำเสนอเปรียบเทียบกับขั้วต่อสายที่ใช้ในภาคอุตสาหกรรมจะแสดงในหัวข้อถัดไป

#### 4.4.2 การทดสอบหาคิซหาร์จางส่วนในสายเคเบิลโดยใช้ขั้วต่อสายที่ออกแบบด้วยหลักการที่นำเสนอเปรียบเทียบกับขั้วต่อสายเคเบิลที่ใช้ในภาคอุตสาหกรรม

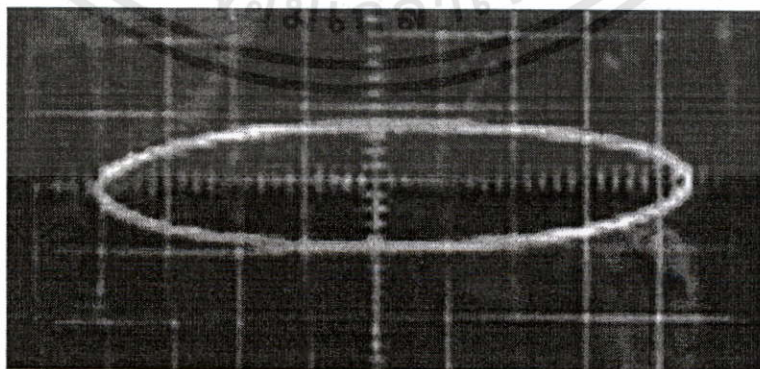
เป็นการทดสอบการใช้งานของขั้วต่อสายที่ออกแบบสร้างขึ้นในภาคอุตสาหกรรมสายเคเบิลแรงสูง ณ บริษัท จรุงไทยไวร์แอนด์เคเบิล จำกัด (มหาชน) โดยจะทำการทดสอบและเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดสอบหาคิซหาร์จางส่วนในสายเคเบิลเส้นเดียวกัน โดยใช้ขั้วต่อสายที่ออกแบบด้วยหลักการที่นำเสนอและขั้วต่อสายเคเบิลที่มีใช้ในบริษัท ความยาวสายเคเบิลที่ใช้ในการทดสอบ 10 เมตร วงจรที่ใช้ในการทดสอบเป็นวงจรแบบวิธีตรงตามมาตรฐาน IEC 60270 [19] โดยใช้ Corona Detector Hipotronics Model CDO 77 A ขั้วต่อสายเคเบิลที่ใช้อยู่ในภาคอุตสาหกรรม มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 cm. ยาว 40 cm. ความยาวปอกสาย 9.5 cm. การทดสอบและผลการทดสอบหาคิซหาร์จางส่วนในสายเคเบิลโดยใช้ขั้วต่อสายที่ออกแบบด้วยหลักการที่นำเสนอเปรียบเทียบกับขั้วต่อสายที่ใช้ในภาคอุตสาหกรรม แสดงดังรูปที่ 4.16 - 4.21 และตารางที่ 4.7 - 4.8



รูปที่ 4.16 การต่อขั้วต่อสายที่ออกแบบด้วยหลักการที่นำเสนอเพื่อทดสอบหา PD ในสายเคเบิล



รูปที่ 4.17 การทดสอบหา PD ในสายเคเบิล โดยใช้ขั้วต่อสายที่ออกแบบด้วยหลักการที่นำเสนอ



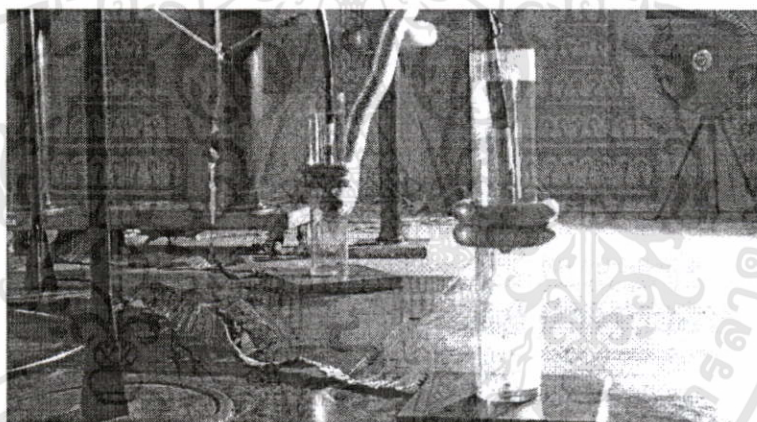
รูปที่ 4.18 ผลการทดสอบหา PD ในสายเคเบิล โดยใช้ขั้วต่อสายที่ออกแบบด้วยหลักการที่นำเสนอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

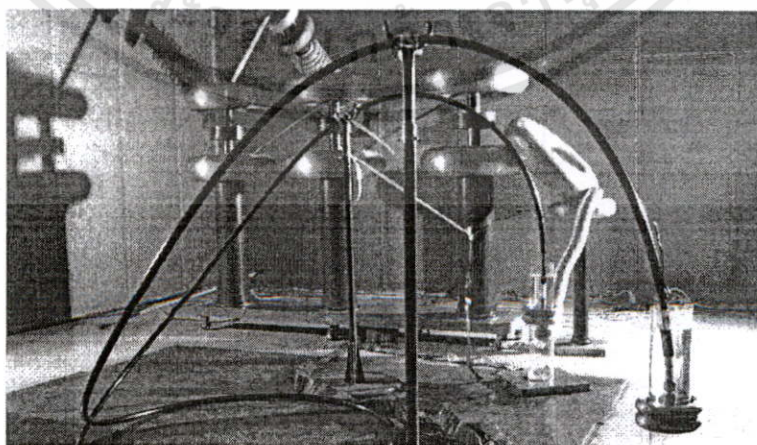
ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบหา PD ในสายเคเบิล พิกัด 12/20 (24) kV ขนาด 240 sq.mm โดยใช้  
 ขั้วต่อสายที่ออกแบบด้วยหลักการที่นำเสนอ

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 $2U_0$	0.9	pC

ผลการทดสอบหาดีสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิล พิกัด 12/20 (24) kV 240 sq.mm ยาว 10 เมตร โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลที่ออกแบบด้วยหลักการที่นำเสนอ ที่ระดับแรงดัน 21.1 kV มีปริมาณดีสชาร์จบางส่วน 0.9 pC จากฐานเวลารูปอิลิปส์ในรูปที่ 4.18 โดยดีสชาร์จบางส่วนเกิดขึ้นที่มุมเฟส  $270^\circ$  และ  $90^\circ$

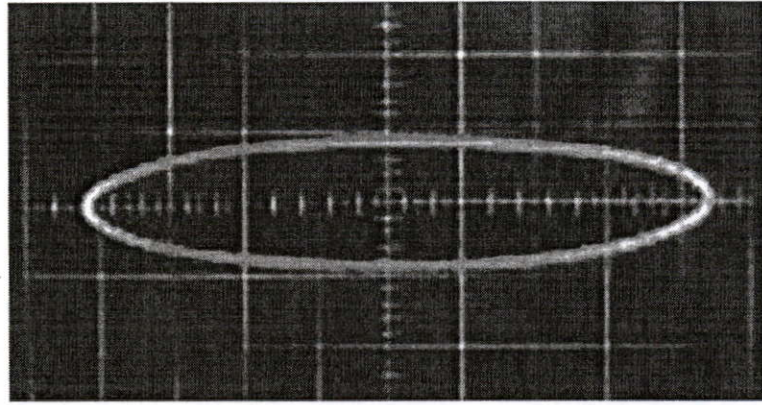


รูปที่ 4.19 การต่อขั้วต่อสายที่ใช้อยู่ในภาคอุตสาหกรรมเพื่อทดสอบหา PD ในสายเคเบิล



รูปที่ 4.20 การทดสอบหา PD ในสายเคเบิลโดยใช้ขั้วต่อสายที่ใช้อยู่ในภาคอุตสาหกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.21 ผลการทดสอบหา PD ในสายเคเบิลโดยใช้ขั้วต่อสายที่ใช้อยู่ในภาคอุตสาหกรรม

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

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 พิกัด 12/20 (24) kV 240 sq.mm ยาว 10 เมตร โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลที่ใช้อยู่ในภาคอุตสาหกรรม ที่ระดับแรงดัน 21.1 kV มีปริมาณคิซาร์จบางส่วน 0.6 pC จากฐานเวลารูปอิลิปส์ในรูปที่ 4.21 โดยคิซาร์จบางส่วนเกิดขึ้นที่มุมเฟส  $270^\circ$

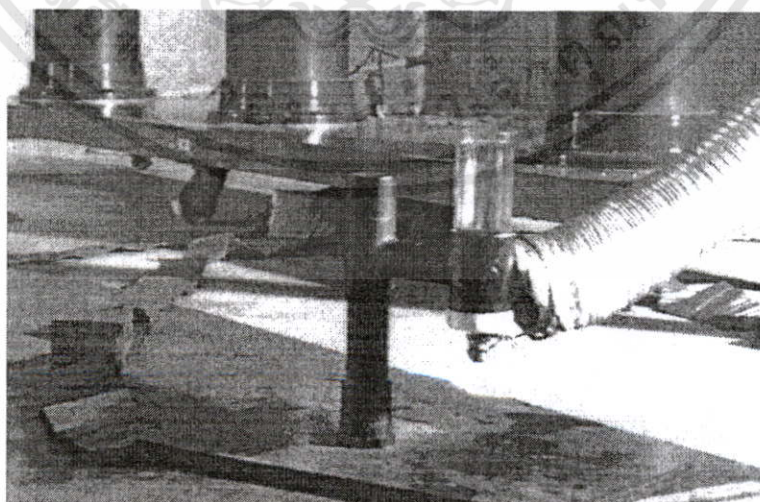
จากผลการทดสอบหาคิซาร์จบางส่วนในสายเคเบิลโดยใช้ขั้วต่อสายที่ออกแบบด้วยหลักการที่นำเสนอเปรียบเทียบกับขั้วต่อสายที่ใช้อยู่ในภาคอุตสาหกรรม โดยใช้สายเคเบิลเส้นเดียวกัน พิกัด 12/20 (24) kV ขนาด 240 sq.mm. ยาว 10 เมตร พบว่าผลที่ได้จากการทดสอบมีปริมาณและตำแหน่งบนฐานเวลารูปอิลิปส์ของคิซาร์จบางส่วนใกล้เคียงกันที่แรงดันทดสอบ ซึ่งผลการทดสอบหาปริมาณคิซาร์จบางส่วนในสายเคเบิลโดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลที่ออกแบบด้วยหลักการที่นำเสนอมีปริมาณคิซาร์จบางส่วน 0.9 pC ส่วนขั้วต่อสายเคเบิลที่ใช้อยู่ในภาคอุตสาหกรรมมีปริมาณคิซาร์จบางส่วน 0.6 pC จากฐานเวลารูปอิลิปส์ในรูปที่ 4.18 และ 4.21

จากผลการทดสอบสามารถสรุปได้ว่าขั้วต่อสายเคเบิลที่ออกแบบสร้างสามารถใช้ในการทดสอบคิซาร์จบางส่วนในสายเคเบิลได้ตามมาตรฐาน โดยมีปริมาณคิซาร์จบางส่วน

ใกล้เคียงกับผลการทดสอบโดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลที่ใช้อยู่ในภาคอุตสาหกรรม แต่ไม่สามารถสรุปได้ว่าขั้วต่อสายเคเบิลที่ออกแบบสร้างขึ้นมีปริมาณดิสชาร์จบางส่วนเท่าใดที่ระดับแรงดันทดสอบ เนื่องจากมาตรฐาน IEC 60502-2 ได้กำหนดปริมาณดิสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิล โดยการทดสอบ Electrical Type Test จะมีดิสชาร์จบางส่วนได้ไม่เกิน 5 pC ซึ่งถ้าขั้วต่อสายเคเบิลที่ใช้ทดสอบมีค่าดิสชาร์จบางส่วนมากเกินไปก็อาจจะทำให้ไม่ทราบค่าดิสชาร์จบางส่วนจริงที่เกิดขึ้นในฉนวนสายเคเบิล ดังนั้นในหัวข้อถัดไปจะแสดงการทดสอบและผลการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนในขั้วต่อสายเคเบิลที่ออกแบบสร้างขึ้น

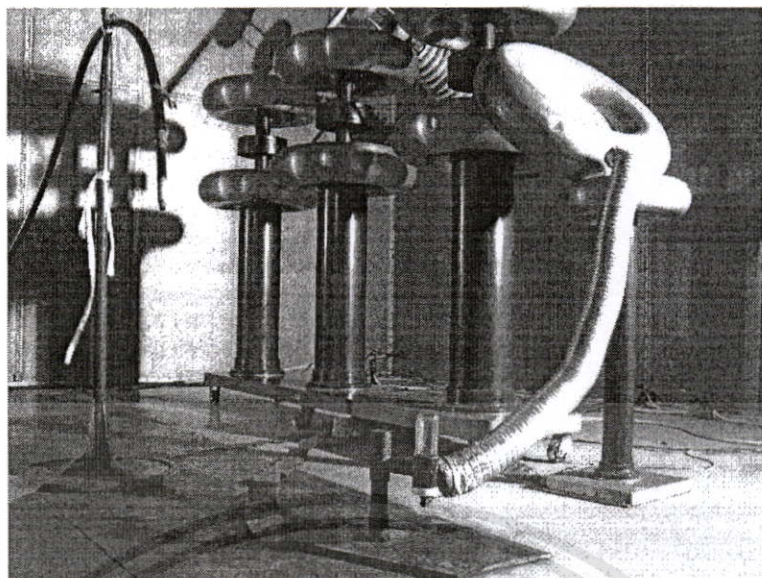
#### 4.5 การทดสอบหาปริมาณดิสชาร์จบางส่วนในขั้วต่อสายเคเบิล

การทดสอบปริมาณดิสชาร์จบางส่วนในขั้วต่อสายเคเบิลที่ออกแบบสร้างขึ้น มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบหาปริมาณดิสชาร์จบางส่วนในขั้วต่อสายเคเบิล เนื่องจากปริมาณดิสชาร์จบางส่วนตามที่มาตรฐานกำหนดนั้นมีปริมาณเพียง 5 pC ซึ่งเป็นปริมาณที่น้อยมาก หากไม่ทราบปริมาณดิสชาร์จบางส่วนในขั้วต่อสายเคเบิลที่ใช้ในการทดสอบอาจส่งผลให้ไม่ทราบว่าปริมาณดิสชาร์จที่เกิดขึ้นเกิดขึ้นภายในฉนวนสายเคเบิลหรือเกิดในขั้วต่อสายเคเบิล และอาจจะส่งผลให้สายเคเบิลที่มีมาตรฐานกลายเป็นสายเคเบิลที่ไม่ได้มาตรฐานได้ วงจรที่ใช้ในการทดสอบเป็นวงจรแบบวิธีตรงตามมาตรฐาน IEC 60270 [19] โดยใช้ Corona Detector Hipotronics Model CDO 77 A ทำการทดสอบ ณ บริษัท จรุงไทยไวร์แอนด์เคเบิล จำกัด (มหาชน) เช่นเดียวกับการทดสอบหาปริมาณดิสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิลโดยใช้ขั้วต่อสายที่ออกแบบด้วยหลักการที่นำเสนอเปรียบเทียบกับขั้วต่อสายที่ใช้ในภาคอุตสาหกรรม การทดสอบหาปริมาณดิสชาร์จบางส่วนในขั้วต่อสายที่ออกแบบด้วยหลักการที่นำเสนอ แสดงดังรูปที่ 4.22 – 4.23 ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.24 และตารางที่ 4.9

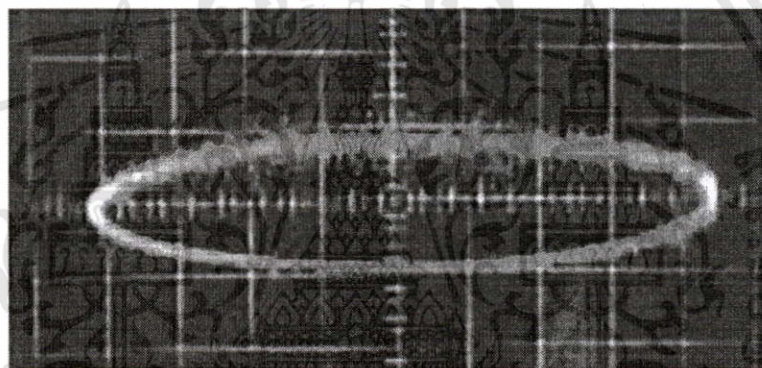


รูปที่ 4.22 การต่อขั้วต่อสายเคเบิลที่ออกแบบด้วยหลักการที่นำเสนอเพื่อทดสอบหา PD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.23 การทดสอบหา PD ในขั้วต่อสายที่ออกแบบด้วยหลักการที่นำเสนอ



รูปที่ 4.24 ผลการทดสอบหา PD ในขั้วต่อสายที่ออกแบบด้วยหลักการที่นำเสนอ

ตารางที่ 4.9 ผลการทดสอบหา PD ในขั้วต่อสายเคเบิล พิกัด 12/20 (24) kV ขนาด 240 sq.mm ที่ออกแบบด้วยหลักการที่นำเสนอ

Description	Result	
Calibration pulse	5	pC
Test voltage at $2U_0$	24	kV
The magnitude of the discharge at $2U_0$	0.4	pC

ผลการทดสอบหาดีสชาร์จบางส่วนในขั้วต่อสายเคเบิล พิกัด 12/20 (24) kV 240 sq.mm ที่ออกแบบด้วยหลักการที่นำเสนอ ที่ระดับแรงดันทดสอบสูงสุดของการทดสอบหาดีสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิล ตามมาตรฐาน IEC 60502-2 คือ 24 kV มีปริมาณดีสชาร์จบางส่วน 0.4 pC จากฐานเวลารูปอิลิปส์ในรูปที่ 4.24 โดยดีสชาร์จบางส่วนเกิดขึ้นที่มุมเฟส  $90^\circ$  และ  $270^\circ$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.6 สรุปผลการทดสอบ

ขั้วต่อสายสำหรับทดสอบหาดีสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิลแรงดันสูง พิกัด 12/20 (24) kV ขนาด 240 sq.mm. ที่ออกแบบ โดยใช้ใช้ทฤษฎีมิติที่เหมาะสม และระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ สามารถใช้ในการทดสอบหาดีสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิลใต้ดินแรงดันสูง พิกัด 12/20 (24) kV ขนาด 240 sq.mm. ได้ตามมาตรฐาน IEC 60502-2 [17] โดยไม่เกิดการเบรกดาวน์ในฉนวนสายเคเบิล และไม่เกิดการวาบไฟตามผิวฉนวนขณะทำการทดสอบ โดยผลที่ได้จากการทดสอบมีปริมาณและตำแหน่งบนฐานเวลารูปอิลิปส์ของดีสชาร์จบางส่วนใกล้เคียงกับการทดสอบหาดีสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิล โดยใช้ขั้วต่อสายเคเบิลที่ออกแบบด้วยหลักการเดิมและขั้วต่อสายเคเบิลที่ใช้อยู่ในภาคอุตสาหกรรม ผลจากการทดสอบหาดีสชาร์จบางส่วนในขั้วต่อสายเคเบิลที่ได้ ออกแบบสร้าง มีปริมาณดีสชาร์จบางส่วนในขั้วต่อสายเคเบิล 0.4 pC

ผลจากการทดสอบเปรียบเทียบขั้วต่อสายเคเบิลที่ออกแบบด้วยหลักการที่นำเสนอ เปรียบเทียบกับขั้วต่อสายเคเบิลที่ออกแบบด้วยหลักการเดิมและขั้วต่อสายเคเบิลที่ใช้อยู่ในภาคอุตสาหกรรม และการทดสอบหาดีสชาร์จบางส่วนในขั้วต่อสายเคเบิลสามารถสรุปได้ว่า ขั้วต่อสายเคเบิลสำหรับทดสอบหาดีสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิลใต้ดินแรงดันสูง ที่ออกแบบโดยใช้ทฤษฎีมิติที่เหมาะสมและระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ สามารถใช้ในการทดสอบหาดีสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิลได้ตามมาตรฐานกำหนด และสามารถใช้ในการเรียนการสอน การวิจัย และการทดสอบตามมาตรฐานได้ในอนาคต

## บทที่ 5

# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการวิจัย

ขั้วต่อสายเคเบิลสำหรับทดสอบหาคิซาร์จบางส่วนในสายเคเบิลใต้ดินแรงดันสูง พิกัด 12/20 (24) kV 240 sq.mm. ที่ออกแบบโดยใช้ใช้ทฤษฎีมิติที่เหมาะสมและระเบียบวิธีไฟไนต์ อิลิเมนต์โดยโปรแกรม FEMLAB [18] มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร และมีความยาว 20 เซนติเมตร ใช้ฉนวนน้ำมันหม้อแปลงสำหรับควบคุมการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณที่ ทำการปกอสาย ซึ่งเป็นการควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้าแบบ Refractive stress control [3] โดย ใช้ระยะปกอสายเคเบิลสำหรับการทดสอบเพียง 9.5 เซนติเมตร ผลจากการออกแบบเมื่อ เปรียบเทียบกับขั้วต่อสายเคเบิลที่ออกแบบด้วยหลักการเดิม ซึ่งใช้ฉนวนสำหรับควบคุมความเครียด สนามไฟฟ้าชนิดเดียวกัน [4-6] พบว่า การใช้ทฤษฎีมิติที่เหมาะสมของทรงกระบอกซ้อนกันรวม ในการออกแบบ ทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางของขั้วต่อสายเคเบิลลดลงถึง 50 เปอร์เซ็นต์ การใช้ ระเบียบวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ช่วยในการออกแบบทำให้ความยาวของขั้วต่อสายเคเบิลลดลงถึง 80 เปอร์เซ็นต์ และลดความยาวการปกอสายเคเบิลได้ถึง 77 เปอร์เซ็นต์ การลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง จะช่วยลดความสิ้นเปลืองของฉนวนที่นำมาควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้า และการลดความยาว ของขั้วต่อสายเคเบิลและความยาวของการปกอสายที่สั้นลงส่งผลให้ลดความสิ้นเปลืองสายเคเบิล จากการทดสอบ

ตารางที่ 5.1 เปรียบเทียบการออกแบบที่ใช้หลักการเดิมและหลักการที่นำเสนอ

การออกแบบ	หลักการเดิม	หลักการที่นำเสนอ
พิกัดสายเคเบิล	12/20 (24) kV 240 sq.mm.	
ชนิดของฉนวนที่ใช้ควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้า	Transformer oil	
ฉนวนของขั้วต่อสายเคเบิล	PMMA	
เส้นผ่านศูนย์กลางของขั้วต่อสายเคเบิล (cm)	5	2.5
ความยาวของขั้วต่อสายเคเบิล (cm)	100	20

จากการทดสอบหาคิซาร์จบางส่วนในสายเคเบิลโดยใช้ขั้วต่อสายที่ออกแบบด้วยหลักการ ที่นำเสนอเปรียบเทียบกับขั้วต่อสายเคเบิลที่ออกแบบด้วยหลักการเดิมและขั้วต่อสายเคเบิลที่ใช้อยู่ ในภาคอุตสาหกรรม โดยใช้สายเคเบิล พิกัด 12/20 (24) kV ขนาด 240 sq.mm. ยาว 10 เมตร[17]

โดยใช้เครื่องตรวจจับปริมาณดิสชาร์จบางส่วนตามมาตรฐาน IEC 60270 [19] พบว่าขั้วต่อสายที่ออกแบบสร้างด้วยหลักการที่นำเสนอ สามารถใช้ในการทดสอบหาดิสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิลได้โดยไม่เกิดการเบรคความถี่ในฉนวนสายเคเบิล และไม่เกิดการวาวไฟตามผิวฉนวนขณะทำการทดสอบ โดยผลการทดสอบหาดิสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิลพบว่าผลที่ได้จากการทดสอบมีปริมาณและตำแหน่งการเกิดดิสชาร์จบางส่วนใกล้เคียงกับขั้วต่อสายเคเบิลที่ออกแบบด้วยหลักการเดิมและขั้วต่อสายเคเบิลที่ใช้อยู่ในภาคอุตสาหกรรม และการทดสอบหาดิสชาร์จบางส่วนในขั้วต่อสายเคเบิลที่ออกแบบสร้างขึ้นมีปริมาณดิสชาร์จบางส่วน 0.4 pC ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าขั้วต่อสายที่ออกแบบสร้างสามารถใช้ในการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิลได้ตามมาตรฐาน IEC 60502-2 [17] และ IEC 60270 [19] ทั้งในด้านการเรียนการสอน การวิจัย และการทดสอบตามมาตรฐานได้ในอนาคต

ตารางที่ 5.2 เปรียบเทียบผลการทดสอบหา PD ในสายเคเบิล โดยใช้ขั้วต่อสายที่ออกแบบด้วยหลักการเดิมเปรียบเทียบกับการออกแบบด้วยหลักการที่นำเสนอ

รายละเอียด	ผลการทดสอบ	
	หลักการเดิม	หลักการที่นำเสนอ
Length of test sample (m)	10	
Calibration pulse (pC)	10	
Noise suppression (%)	50	55
Test voltage rise to $2U_0$ (kV)	24	24
Test voltage at $1.732U_0$ (kV)	20.6	21.1
The magnitude of the discharge at $2U_0$ (pC)	6.6	7.2

ตารางที่ 5.3 เปรียบเทียบผลการทดสอบหา PD ในสายเคเบิล โดยใช้ขั้วต่อสายที่ใช้ในภาคอุตสาหกรรมเปรียบเทียบกับการออกแบบด้วยหลักการที่นำเสนอ

รายละเอียด	ผลการทดสอบ	
	ภาคอุตสาหกรรม	หลักการที่นำเสนอ
Length of test sample (m)	10	
Calibration pulse (pC)	5	
Test voltage rise to $2U_0$ (kV)	24	24
Test voltage at $1.732U_0$ (kV)	21.1	21.1
The magnitude of the discharge at $2U_0$ (pC)	0.6	0.9

**ตารางที่ 5.4** รายละเอียดข้อมูลของขั้วต่อสายเคเบิลสำหรับทดสอบหาดีสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิลใต้ดินแรงดันสูง พิกัด 12/20 (24) kV 240 sq.mm.

Technical Data	
Rated voltage at 50 Hz (kV)	36
PD level at rated voltage (pC)	0.4
Insulation oil volume per termination (ml)	380
Weight (2 unit terminators less oil) (kg)	1.5
Max. cable diameter over insulator (mm)	32
Max. conductor diameter (mm)	20
Terminator Width (mm)	60
Terminator Length (mm)	60
Terminator Height (mm)	210

## 5.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา

### 5.2.1 ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะ จากการทดสอบหาดีสชาร์จบางส่วนในขั้วต่อสายเคเบิล พบว่ามีปริมาณดีสชาร์จบางส่วน 0.4 pC ในขั้วต่อสายเคเบิล ซึ่งเกิดจากขอบคมของปลายสาย สามารถแก้ไขได้โดยออกแบบให้มีส่วนที่มีลักษณะปลายแหลมหรือขอบคมให้น้อยที่สุด เพื่อลดผลของโคโรนาดีสชาร์จที่อาจเกิดขึ้นบริเวณปลายสายหรือบริเวณจุดต่อในส่วนต่างๆ

### 5.2.2 แนวทางการพัฒนา

แนวทางการพัฒนา จากการศึกษาเกี่ยวกับทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบขั้วต่อสายสำหรับทดสอบหาดีสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิล พบว่าการใช้ฉนวนน้ำมันหม้อแปลงเหมาะกับการควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้าได้ถึงระดับแรงดัน 75 kV [2] ดังนั้นหลักการออกแบบตามที่น่าเสนอสามารถออกแบบให้ใช้กับสายเคเบิลที่มีพิกัดสูงกว่านี้ได้ โดยทำการออกแบบที่พิกัดสูงที่สุดที่ต้องการใช้ในการทดสอบ ส่วนสายเคเบิลที่มีขนาดเล็กกว่าควรออกแบบปลายสายให้มีขนาดที่เหมาะสมกับขนาดของฐานรองรับปลายสายที่ออกแบบสำหรับสายที่มีขนาดใหญ่ที่สุด

ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่า ทฤษฎีพื้นฐาน หลักการออกแบบและผลการทดสอบที่แสดงในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะพอเป็นประโยชน์และแนวทางต่อผู้ที่สนใจสามารถนำไปพัฒนาและศึกษาค้นคว้าต่อไป

## 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., Hiivala 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. "การออกแบบขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงเพื่อใช้ทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนและพลังงานสูญเสียเปลวไดอิเล็กตริกของสายเคเบิล 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 ศุภวุฒิ คัมภีรานนท์ กนกพล นาคะวิวัฒน์ และจงรักษ์ บุญเส็ง. "ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงเพื่อใช้ทดสอบวัดค่าดิสชาร์จบางส่วนของสายเคเบิล XLPE โดยใช้น้ำบริสุทธิ์เป็นฉนวน" การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 26, 6 - 7 พฤศจิกายน 2546. หน้า 396-401
- [8] จำนาน คำคง และ นที โพธิ์อุไร. "ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงเพื่อทดสอบวัดค่าพาเซิลดิสชาร์จสายเคเบิล XLPE โดยใช้น้ำบริสุทธิ์เป็นฉนวน" วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล. 2546.
- [9] ตำรวย สังข์สะอาด. **วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง**. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. พ.ศ. 2549.


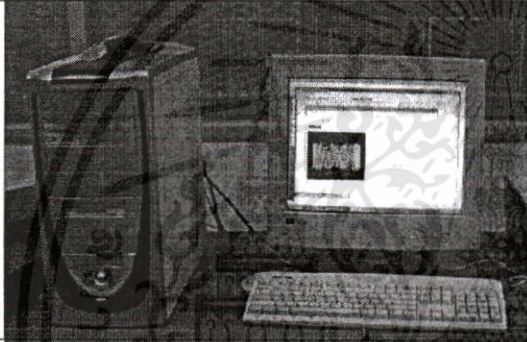

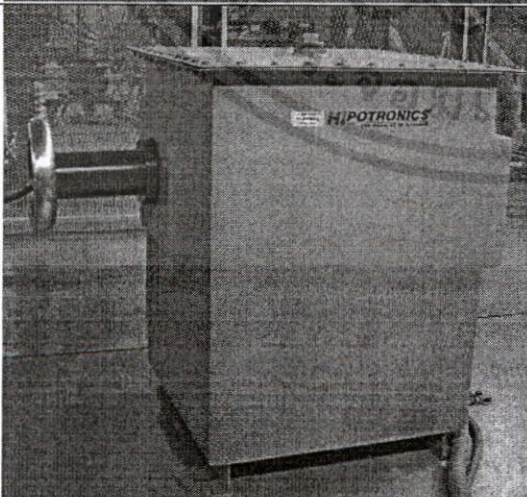
- [10] ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล. เอกสารประกอบการสอนวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง. กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. พ.ศ. 2546.
- [11] Edward Gulski. "Digital Analysis of Partial Discharge." **IEEE Trans. Dielectric and Electric Insulation**, Vol. 2, No.5, Oct. 1995. pp. 822-837
- [12] ธนากร นำหอมจันทร์ และ ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล, "มิติที่เหมาะสมของขั้วต่อสายเคเบิลใต้ดินแรงดันสูงสำหรับทดสอบหาคิซาร์จบางส่วน พิกัด 12/20(24) kV 240 sq.mm.", **วิศวกรรมสารลาดกระบัง**, ปีที่ 23 ฉบับที่ 4 เดือนธันวาคม 2549, หน้า 13-18.
- [13] Nattrass David A. "Partial Discharge Measurement and Interpretation." **IEEE Electrical Insulation Magazine**, Vol. 4, No. 3, May/June 1988. pp.10-23
- [14] รุ่งโรจน์ สมบูรณ์ทรัพย์. "การศึกษาหาค่าเพอร์มิทิตีที่สัมพันธ์ของฉนวนสายเคเบิลโดยใช้เทคนิคของคลื่นเดินทาง" วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2546.
- [15] ธนากร นำหอมจันทร์ ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล พร้อมศักดิ์ อภิตติกุล และศุภวุฒิ เนตรโพธิ์แก้ว "การออกแบบและสร้างขั้วต่อสายเคเบิลใต้ดินแรงดันสูงสำหรับทดสอบหาคิซาร์จบางส่วน โดยใช้ทฤษฎีมิติที่เหมาะสมและระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์" **การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 29**, 9-10 พฤศจิกายน 2549, หน้า 217-220.
- [16] Siemens AG., **Electrical engineering handbook**, 1981.
- [17] **IEC Standard Publication No. 60502-2, 2<sup>nd</sup> 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.
- [18] COMSOL AB. 2004. **FEMLAB 3 Multiphysics Modeling**. [CD ROM] . Los Angeles : COMSOL, Inc.
- [19] **IEC Standard Publication No. 60270, 3<sup>rd</sup> edition**, "High-voltage test techniques Partial discharge measurements" 2000.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

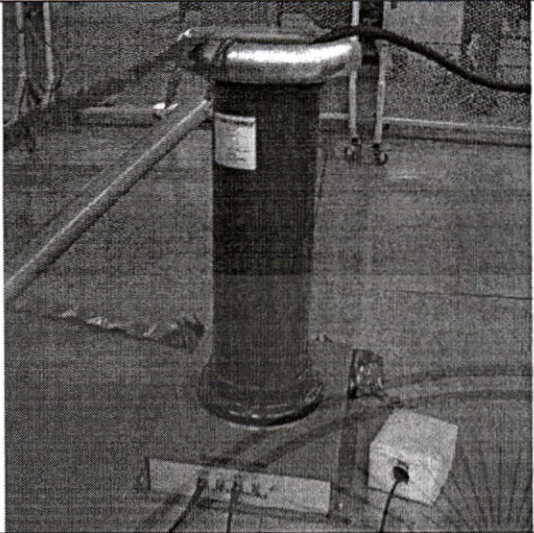
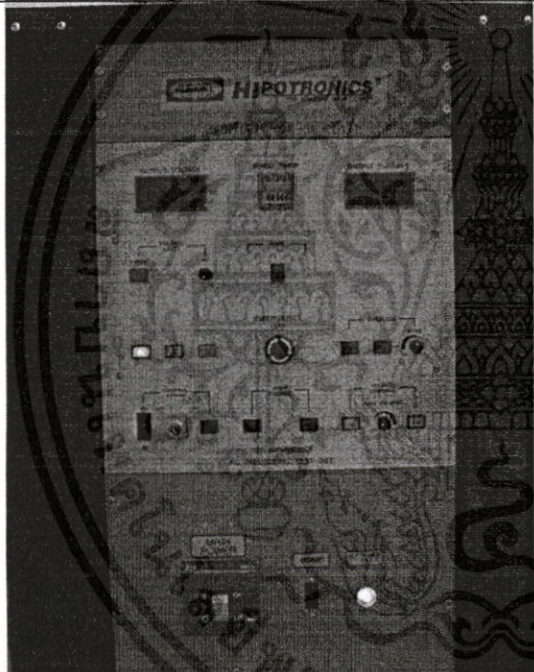
ภาคผนวก ก.  
อุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบ

ตารางที่ ก.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร  
ลาดกระบัง

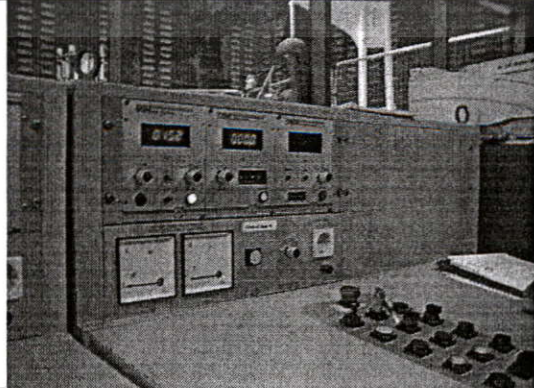
รูปถ่าย	รายละเอียด
	<p>PD Detector Hipotronics Model DDX – 9101</p>
	<p>Personal Computer with REMOTE 9101 Program</p>
	<p>PD Calibrator Hipotronics 100 pF</p>
	<p>High Voltage Test Transformer Hipotronics Model T775-40-460 460V, 75kV @ 40kVA</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1 (ต่อ)

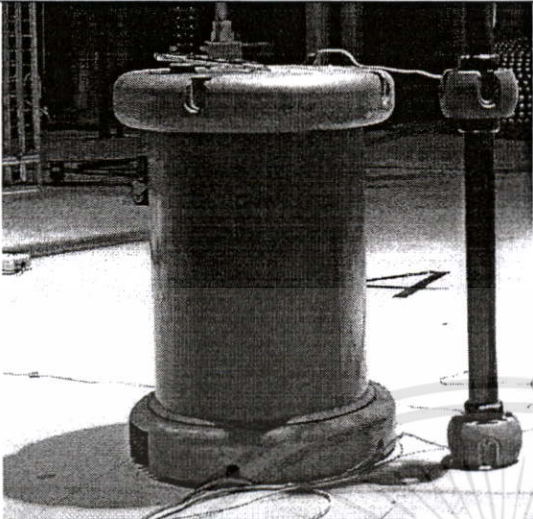
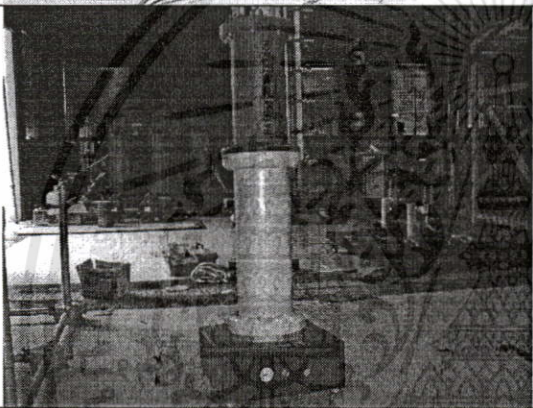

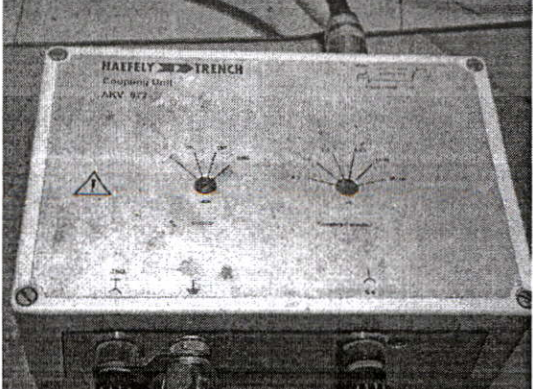
รูปถ่าย	รายละเอียด
	<p>Coupling Capacitors Hipotronics</p> <p>0.001 <math>\mu</math> F 100kV</p>
	<p>AC Dielectric Test Set</p> <p>Hipotronics</p>

ตารางที่ ก.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

รูปถ่าย	รายละเอียด
	<p>High Voltage Control Unit</p> <p>HAEFELY TRENCH</p>

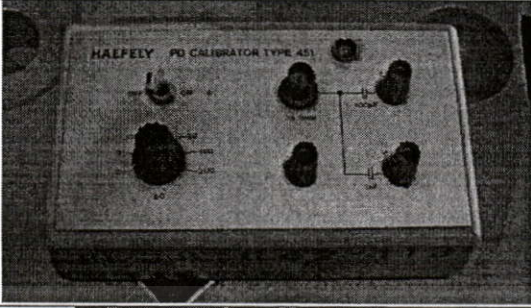
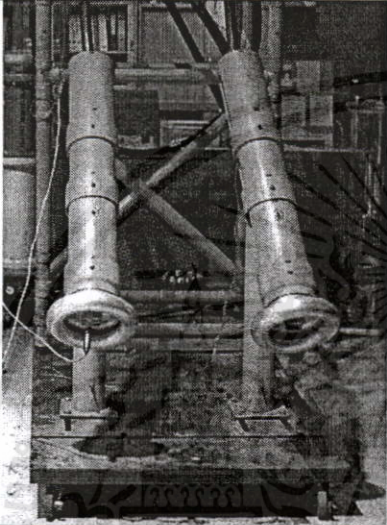
เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษา  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.2 (ต่อ)

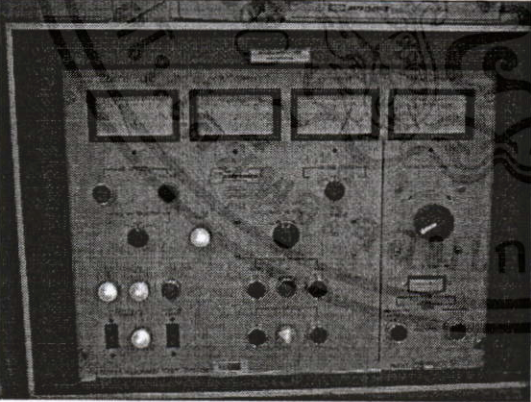
รูปถ่าย	รายละเอียด
	<p>AC High Voltage Transformer            Rated 100 kV/50 Hz 5 kVA            MWB MESSWANDLER – BAU AG            TESTING TRANSFORMER</p>
	<p>Standard Capacitor 100 pF 100 kV            HAEFELY TRENCH</p>
	<p>Partial Discharge Analyzer TE-571            HAEFELY TRENCH</p>
	<p>Coupling Unit AKV 572            HAEFELY TRENCH</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.2 (ต่อ)

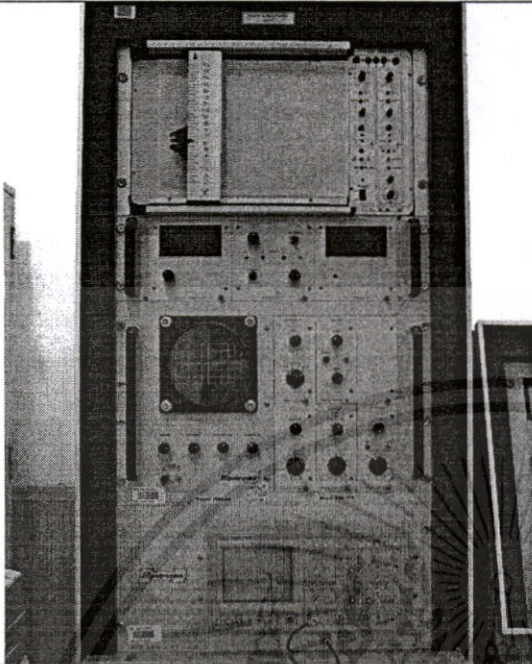

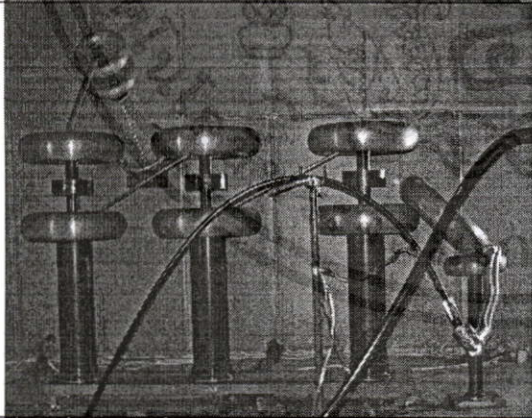
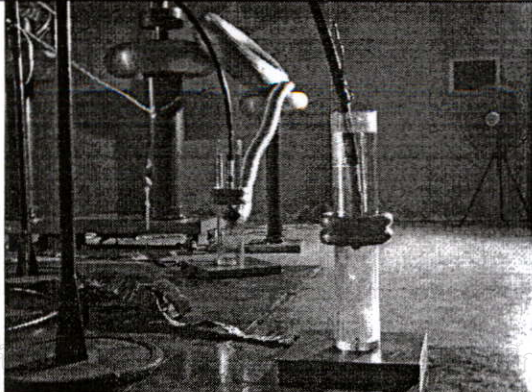
รูปถ่าย	รายละเอียด
	<p>PD Calibrator Type 451 HAEFELY TRENCH</p>
	<p>Cable Test Terminators 12/20 (24) kV 240 sq.mm.</p>

ตารางที่ ก.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ ณ บริษัท จรุงไทยไวร์แอนด์เคเบิล จำกัด

รูปถ่าย	รายละเอียด
	<p>H.V. Series Resonance Test System Hipotronics Model 7200-2000 SR</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ตารางที่ ก.3 (ต่อ)

รูปถ่าย	รายละเอียด
	<p>Corona Detector Hipotronics Model CDO 77 A</p>
	<p>PD Calibrator APEX Instrument CO., LTD</p>
	<p>High Voltage Filter Hipotronics 4.0 nF 200 kV 50/60 Hz</p>
	<p>Cable Test Terminators 36 kV 800 sq.mm.</p>

## ภาคผนวก ข.

## ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

1. ธนากร นำหอมจันทร์ สิริวัฒน์ โทธิเวชกุล พร้อมศักดิ์ อภริติกุล และศุภวุฒิ เนตรโพธิ์แก้ว “การออกแบบและสร้างขั้วต่อสายเคเบิลใต้ดินแรงดันสูงสำหรับทดสอบหาคุณสมบัติของวัสดุบางส่วนโดยใช้ทฤษฎีมิติที่เหมาะสมและระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 29, 9-10 พฤศจิกายน 2549, หน้า 217-220.
2. ธนากร นำหอมจันทร์ และ สิริวัฒน์ โทธิเวชกุล, “มิติที่เหมาะสมของขั้วต่อสายเคเบิลใต้ดินแรงดันสูงสำหรับทดสอบหาคุณสมบัติของวัสดุบางส่วน พิกัด 12/20(24) kV 240 sq.mm.”, วิศวกรรมสารลาดกระบัง, ปีที่ 23 ฉบับที่ 4 เดือนธันวาคม 2549, หน้า 13-18.



The BECON-29 Conference Joins the Sixtieth Anniversary Celebration of His Majesty's Accession to the Throne

# 29<sup>th</sup> Electrical Engineering Conference

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ ๒๙

## Volume I

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

๙-๑๐ พฤศจิกายน ๒๕๕๙  
ณ โรงแรมแอมบาสซาเดอร์ ซิตี้ จอมเทียน พัทยา จังหวัดชลบุรี

Western Digital  
 ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
 Faculty of Engineering, Mahachulalongkornrajavidyalaya University  
 TOT  
 NECTEC  
 a member of NSTDA

ดำเนินการโดย  
 คณะวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์  
 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบและสร้างขั้วต่อสายเคเบิลใต้ดินแรงดันสูงสำหรับทดสอบหาดีสชาร์จบางส่วน  
โดยใช้ทฤษฎีมิติที่เหมาะสมและระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

The Designed Construction of High Voltage Underground Cable Terminator

for Partial Discharge Measurement by Optimize Dimension Theory and Finite Element Method

ธนกร น้าหอมจันทร์ ศิริวิวัฒน์ โพลีเวชกุล พร้อมศักดิ์ ยภิศฤกุล\* ศุภวุฒิ เนตรโพธิ์แก้ว\*

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ด.ล.คลองจั่น เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

\*ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ต.คลองหก อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110

โทร. 0-2577-1028 คอ 452 โทรสาร 0-2577-1023 E-mail: thanakorn@cau.ac.th, kpsiriwa@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบ และสร้างขั้วต่อสายเคเบิลใต้ดินแรงดันสูง ทิศัก 12/20(24) kV ขนาด 240 sq.mm. เพื่อใช้ในการทดสอบหาค่าดีสชาร์จบางส่วน โดยการคำนวณหามิติที่เหมาะสมของขั้วต่อสายซึ่งใช้น้ำมันหม้อแปลงในการควบคุมสนามไฟฟ้าบริเวณปลายสายเคเบิล ในงานวิจัยนี้ได้นำระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาใช้ในการจำลองหาความยาวของขั้วต่อสายและการกระจายของสนามไฟฟ้าที่ขั้วต่อสายเคเบิลที่ได้จากการออกแบบสามารถใช้ในการทดสอบหาค่าดีสชาร์จบางส่วนได้ตามมาตรฐาน IEC 60270 ซึ่งมีต้นทุนการสร้างต่ำและเคลื่อนย้ายได้สะดวก โดยผลจากการทดสอบขั้วต่อสายที่สร้างขึ้นมี PD น้อยกว่า 1 pC. ทั้งนี้สามารถนำไปใช้ทดสอบสายเคเบิลในสถานที่ติดตั้งได้ในอนาคตได้

คำสำคัญ: ตรวจสอบดีสชาร์จบางส่วน, ขั้วต่อสายเคเบิล

ABSTRACT

This paper presents the designed construction of high voltage underground cable terminators which has a rated voltage at 12/20(24) kV 240 sq.mm. to partial discharge measurement. The designed is based on the optimum dimension using the mineral oil for stress control line. The length of terminator and an electric stress distribution are simulated on the basis of Finite Element Method (FEM). Furthermore, the cable terminators designed can be able to measure a partial discharge according to IEC standards. No.60270. those are low cost of production and easy to mobility. It's found that the PD level of terminator results obtained form tested is less than 1 pC. In the future it's can use for on-site test

Keyword : Partial Discharge Measurement, Cable Terminator

1. บทนำ

สายเคเบิลใต้ดินจะต้องมีการตรวจสอบให้มีคุณภาพตามมาตรฐานกำหนด การทดสอบหาค่าดีสชาร์จบางส่วน เป็นรายการหนึ่งที่จะต้องมีการทดสอบจากผู้ผลิตเสมอ เนื่องจากเกิดการดีสชาร์จบางส่วนอาจนำไปสู่การเบรคความถี่อย่างสมบูรณ์ได้

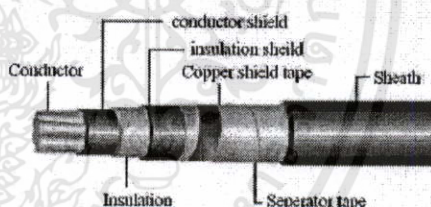
จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า ในการออกแบบจะพยายามทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าในจำนวนแต่ละชั้นมีค่าใกล้เคียงกัน แต่ใช้ค่า Safety factor สูงๆ ซึ่งทำให้ขั้วต่อสายมีขนาดใหญ่มาก ต้องใช้ความยาวในการปกปิดสายมาก ซึ่งสิ้นเปลืองสายเคเบิลในการทดสอบ ไม่สะดวกในการใช้งาน และมีราคาสูง [1-2]

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ คือการที่จะออกแบบและสร้างขั้วต่อสายสำหรับทดสอบหาค่าดีสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิลที่มีขนาดเล็ก เพื่อความสะดวกในการใช้งาน ลดความสูงของสายเคเบิลจากการปกปิดสาย มีต้นทุนการสร้างที่ต่ำลง และสามารถนำไปทดสอบในสถานที่ติดตั้งได้ในอนาคต

2. ทฤษฎี

2.1 สายเคเบิลแรงดันสูงฉนวน XLPE [1]

ส่วนประกอบของสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวน XLPE ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ส่วนประกอบของสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวน XLPE

2.2 ความคงทนของการฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้า [3]

คือ ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดที่ฉนวนสามารถทนอยู่ได้ โดยไม่เกิดความเสียหายหรือเสียสภาพการเป็นฉนวน โดยทั่วไปหาได้จากสนามไฟฟ้าที่สม่ำเสมอ คำนวณได้จากสมการที่ 1

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

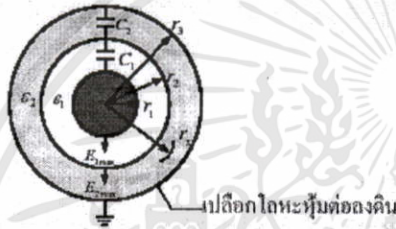
โดยที่	$E_{\max}$	คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด (kV/mm.)
	$U$	คือ แรงดันไฟฟ้า (kV)
	$d$	คือ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด (mm.)
	$\eta^*$	คือ แฟกเตอร์สนามไฟฟ้า

2.3 สนามไฟฟ้าในฉนวนเคเบิลแรงสูง [3]

การใช้ฉนวนที่มีค่า  $\epsilon$ , ต่างกันเหมาะที่จะใช้กับสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ ซึ่งจะช่วยให้ความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนแต่ละชั้นที่มีค่า  $\epsilon$ , ต่างกันให้มีค่าใกล้เคียงกัน ความเครียดสนามไฟฟ้าในเนื้อฉนวนที่รัศมีใดๆ คำนวณได้จากสมการที่ 2

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

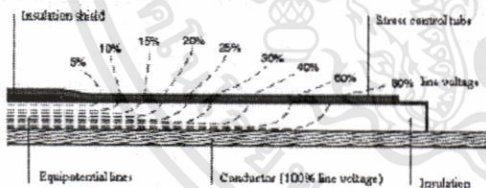
- โดยที่  $E_{rx}$  คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนที่รัศมี  $r_x$  (kV/mm.)
- $U$  คือ แรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว (kV)
- $\epsilon_1, \epsilon_2$  คือ เปรอริมิคิตีวี่ของฉนวนชั้นที่ 1 และ 2
- $r_1$  คือ รัศมีของตัวนำ (mm.)
- $r_2, r_3$  คือ รัศมีของฉนวนชั้นที่ 1 และ 2 (mm.)



รูปที่ 2 สายเคเบิลทรงกระบอกซ้อนกัน

2.4 การควบคุมสนามไฟฟ้าของสายเคเบิล [1]

ในการปกกันกึ่งตัวนำออกนอกเพื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างตัวนำและกราวด์ จะส่งผลให้สนามไฟฟ้าที่ชั้นกึ่งตัวนำออกเกิดความไม่สม่ำเสมอสูง จึงต้องควบคุมสนามไฟฟ้าในบริเวณนั้น ให้เกิดความไม่สม่ำเสมอน้อยที่สุด โดยการนำฉนวนที่มีค่าเปอร์มิคิตีวี่สูง มาควบคุมการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้า



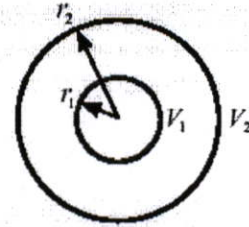
รูปที่ 3 การควบคุมกระจายของสนามไฟฟ้าที่สายเคเบิล

2.5 มิติที่เหมาะสมของทรงกระบอกซ้อนกัน [3]

คือ มิติที่เล็กที่สุดที่สามารถทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ได้สูงสุดและไม่เกิดโคโรนา แรงดันเบรกดาวน์ของอิเล็กโตรดทรงกระบอกซ้อนกันหาได้จาก  $U_b = E_{r1} \ln(r_2/r_1)$  และมิติที่เหมาะสมของทรงกระบอกซ้อนกันสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3

$$(r_2/r_1)_{opt} = e \quad (3)$$

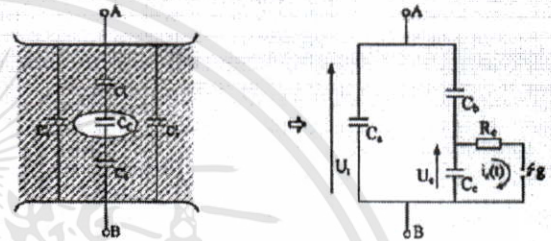
โดยที่  $r_1$  และ  $r_2$  คือ รัศมีของอิเล็กโตรดใน และนอก ตามลำดับ



รูปที่ 4 อิเล็กโตรดทรงกระบอกซ้อนกัน

2.6 วงจรสมมูลคิซาร์ของภายใน [2]

คือ วงจรสมมูลสำหรับฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงขณะเกิด PD สามารถแทนด้วยตัวเก็บประจุ  $C_1, C_2, C_3$  และแก๊ส  $g$  ตามลำดับ ดังรูปที่ 5 ซึ่งในทางปฏิบัติจะพบว่า  $C_2 \gg C_1 \gg C_3$



รูปที่ 5 วงจรสมมูลของการเกิดคิซาร์ของฉนวน

2.7 หลักการตรวจจบบคิซาร์บางส่วน [4]

ส่วนมากอาศัยผลทางไฟฟ้า คือ คิซาร์ทำให้เกิดกระแสไหลผ่านวงจรต่ออันดับกับฉนวนทดสอบ จึงสามารถวัดค่าแรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์ที่ต่ออยู่ในวงจรได้ ซึ่งวงจรนี้มีความเกี่ยวข้องกับ (Coupling Device (CD)) ต่ออนุกรมกับ  $C_2$  ที่มีคิซาร์เป็นกราวด์ เป็นวงจรที่ใช้กันมากในทางปฏิบัติ เนื่องจากไม่เสี่ยงต่อการเกิดเบรกดาวน์ เพราะทรบค่าแรงดันของ  $C_2$  แสดงดังรูปที่ 10

3. การออกแบบ และการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้า

3.1 เส้นผ่านศูนย์กลางของขั้วต่อสายเคเบิล

จากรูปที่ 4 สามารถหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของขั้วต่อสายเคเบิลได้จากสมการที่ 3 โดย  $r_1$  คือ รัศมีของตัวนำ มีค่าเท่ากับ 8.47 mm. และ  $r_2$  คือ รัศมีของขั้วต่อสาย จะได้

$$r_2 = r_1 \times e = 8.74 \times e = 23.75 \text{ mm.}$$

ดังนั้น เส้นผ่านศูนย์กลางของขั้วต่อสายเท่ากับ  $2 \times r_2 = 47.5 \text{ mm.}$

บทความนี้ เลือกใช้น้ำมันหม้อแปลง เพื่อควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้า ซึ่งทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าประมาณ 20 kV/mm.[5] จากสมการที่ 2 สามารถคำนวณหาความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิว XLPE ( $E_{r2}$ ) และที่ผิวของน้ำมันหม้อแปลง ( $E_{r3}$ ) โดยใช้แรงดันทดสอบสูงสุดตามมาตรฐาน IEC 60502-2 คือ 24 kV และ  $\epsilon_r$  จาก [5] จะได้

PW55

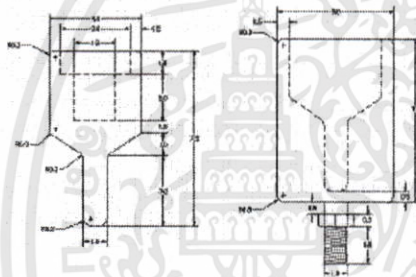
$$E_{r_2} = \frac{2.3 \times 2.2 \times 24 \text{ kV}}{14.25 \times 2.2 \left( 2.3 \ln \left( \frac{23.75}{14.25} \right) + 2.2 \ln \left( \frac{14.25}{8.74} \right) \right)} = 1.72 \text{ kV/mm.}$$

$$E_{r_3} = \frac{2.3 \times 2.2 \times 24 \text{ kV}}{23.75 \times 2.2 \left( 2.3 \ln \left( \frac{23.75}{14.25} \right) + 2.2 \ln \left( \frac{14.25}{8.74} \right) \right)} = 1.03 \text{ kV/mm.}$$

จากค่าความเครียดสนามไฟฟ้า  $E_{r_2}$  และ  $E_{r_3}$  พบว่าสามารถใช้ในการทดสอบได้ โดยไม่เกิดเบรคดาวน์ในน้ำมันหม้อแปลง และไม่เกิดโคโรนา ในบทความนี้เลือกใช้จะควิลิกโอสเป็นวัสดุฉนวนสำหรับขั้วต่อสาย ซึ่งทนความเครียดสนามไฟฟ้าได้ประมาณ 35 kV/mm. [5] โดยเลือกเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 mm. และความหนา 5 mm.

**3.2 ปลายสาย และฐานรองรับปลายสาย**

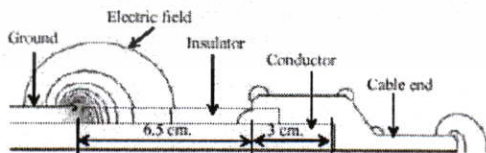
การออกแบบต้องคำนึงถึงขนาดของตัวนำ และจำนวนของสายเคเบิล โดยอ้างอิงขนาดตัวนำ และความหนาของฉนวนของสายเคเบิลตามมาตรฐาน IEC 60502-2 ขนาดของปลายสาย และฐานรองรับปลายสายที่ออกแบบ ดังแสดง ในรูปที่ 6



รูปที่ 6 ขนาดของปลายสายและฐานรองรับปลายสาย

**3.3 ความยาวของขั้วต่อสายเคเบิล**

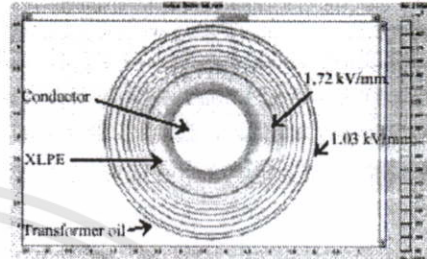
พิจารณาจากแรงดันทดสอบ และระยะปอกสายระหว่างตัวนำกับกราวด์ โดยแรงดันสูงสุดที่ใช้ทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60502-2 คือ  $2U_0$  เท่ากับ 24 kV ส่วนระยะการปอกสาย จากการจำลองการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้า จะได้ระยะการปอกสายเท่ากับ 6.5 cm. ดังแสดงรูปที่ 7 โดยพิจารณาจาก contour ของสนามไฟฟ้าระหว่างปลายสาย และกราวด์ เมื่อพิจารณาพร้อมกับขนาดของปลายสาย ดังนั้นระยะการปอกสายทั้งหมด เท่ากับ 9.5 cm. และเพื่อให้มีน้ำมันหม้อแปลงควบคุมการกระจายสนามไฟฟ้าตลอดระยะที่ปอกสาย จึงเลือกความยาวขั้วต่อสายที่ 20 cm.



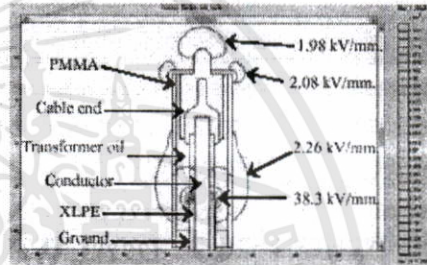
รูปที่ 7 contour ของสนามไฟฟ้าบริเวณปลายสายเคเบิล

**3.4 การจำลองการกระจายสนามไฟฟ้าของส่วนประกอบ**

บทความนี้ได้นำระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาช่วยในการวิเคราะห์การกระจายความเครียดสนามไฟฟ้า ทำการวิเคราะห์แบบ 2 มิติ และไม่คำนึงถึงผลของประจุลึกลับ โดยใช้โปรแกรม FEMLAB ซึ่งใช้แรงดันสูงสุดในการทดสอบ คือ 24 kV และใช้ค่า  $\epsilon_r$  จาก [5] ผลการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้าในส่วนต่างๆ ของขั้วต่อสายที่ได้ออกแบบดังแสดงในรูปที่ 8



ก) ภาพตัดขวางบริเวณสายเคเบิล

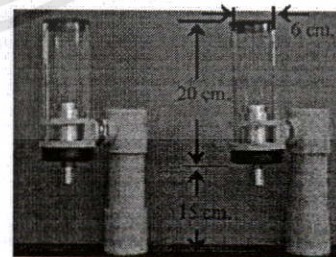


ข) ภาพตัดตามแนวยาวของขั้วต่อสาย

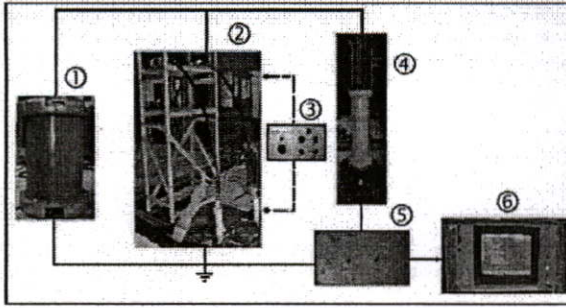
รูปที่ 8 การกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าในส่วนต่างๆ ของขั้วต่อสาย

**4 การทดสอบขั้วต่อสายเคเบิล**

ทดสอบหาค่าลีสซาร์จบางส่วนในสายเคเบิล และในขั้วต่อสายเคเบิล ตามมาตรฐาน IEC 60270 [4] โดยใช้เครื่องวัดลีสซาร์จบางส่วน HAEFELY TRENCH รุ่น TE-571 จากการทดสอบหาค่าลีสซาร์จบางส่วนในสายเคเบิลที่ไม่มีขั้วต่อสาย จะพบว่ามี corona effect มากเกินกว่าที่จะวินิจฉัยได้ว่ามีลีสซาร์จบางส่วนในสายเคเบิล ดังรูปที่ 11 ส่วนการทดสอบในสายเคเบิลที่มีขั้วต่อสาย พบว่าจะสามารถวินิจฉัยได้ว่ามีลีสซาร์จบางส่วนภายในโพรงฉนวนสายเคเบิล แต่จะมีสัญญาณรบกวนเนื่องจากขั้วต่อสายไม่แน่น ดังรูปที่ 12



รูปที่ 9 ขั้วต่อสายเคเบิลพิกัด I2/20(24) kV ขนาด 240 sq.mm.



รูปที่ 10 วงจรทดสอบตรวจจับ PD แบบตรง ตามมาตรฐาน IEC 60270

โดยที่ ① คือ High Voltage Transformer 100kV 5kVA (U)

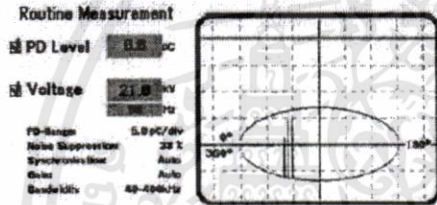
② คือ Cable Terminators 12/20 (24) kV 240 sq.mm. (C)

③ คือ PD Calibrator Type 451

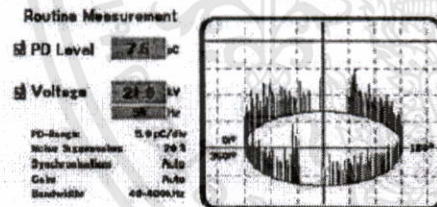
④ คือ Coupling Capacitor 100.03pF 100kV (C<sub>1</sub>)

⑤ คือ Coupling Devices AKV 572 (CD)

⑥ คือ PD Analysis TE-571 (MI)



รูปที่ 11 ผลการทดสอบหาดีเอสอาร์บางส่วนในสายเคเบิลที่ไม่มีขั้วต่อสาย มีค่า PD 6.6 pC เนื่องจาก corona effect ที่ปลายสายเคเบิล



รูปที่ 12 ผลการทดสอบหาดีเอสอาร์บางส่วนในสายเคเบิลที่มีขั้วต่อสาย มีค่า PD 7.6 pC ภายในโพรงจนวนสายเคเบิล

### 5 สรุปและวิเคราะห์ผล

จากการใช้ทฤษฎีมิติที่เหมาะสมของทรงกระบอกซ้อนกัน ร่วมในการออกแบบทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางลดลง 61.14 และ 80.94 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ [1-2] และการใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ในการออกแบบ ทำให้ความยาวของขั้วต่อสายลดลง 66.66 และ 86.39 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ [1-2] โดยขั้วต่อสายที่สร้างขึ้นสามารถทดสอบหาดีเอสอาร์บางส่วนในสายเคเบิลที่ 12/20(24) kV ขนาด 240 sq.mm.

ได้ตามมาตรฐาน IEC 60270 [3] จากการทดสอบเปรียบเทียบระหว่างสายเคเบิลที่ไม่มีขั้วต่อสาย กับสายเคเบิลที่มีขั้วต่อสาย ซึ่งผลการทดสอบเป็นที่น่าพอใจ โดยขั้วต่อสายที่สร้างขึ้นมีค่า PD น้อยกว่า 1 pC. ทั้งนี้สามารถใช้ในการทดสอบในสถานที่ติดตั้งได้ในอนาคต เนื่องจากขั้วต่อสายที่สร้างขึ้นมีขนาดเล็ก เคลื่อนย้ายสะดวก และใช้ระยะเวลาในการประกอบสายเคเบิลที่สั้น เป็นการลดความเสี่ยงเปลืองสายเคเบิลจากการทดสอบ

### กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอัสสัมชัญที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำงานวิจัย และภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทดสอบ

### เอกสารอ้างอิง

- [1] หรือศักดิ์ อภิรติกุล จงรัมย์ บุญเส็ง และ กนกพล นาคะวิวัฒน์ "ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูง XLPE สำหรับการทดสอบดีเอสอาร์ของบางส่วน ตอนที่ 1: การออกแบบและสร้างขั้วต่อสายเคเบิล" EECON 24, 22 - 23 พฤศจิกายน 2544, หน้า 77 - 82.
- [2] หรือศักดิ์ อภิรติกุล ทุกวุฒิ คัมภีรฉัตร กนกพล นาคะวิวัฒน์ และจงรัมย์ บุญเส็ง "ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูงเพื่อใช้ทดสอบวัดค่าดีเอสอาร์ของบางส่วนของสายเคเบิล XLPE โดยใช้ไม้รูปทูลเป็นต้นแบบ" EECON 26, 6 - 7 พฤศจิกายน 2546, หน้า 396-401.
- [3] ดำรง สัจจะอดุล, "วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง", จุดประกายมหาวิทยาลัย, 2547
- [4] IEC Standard Publication No. 60270, Third edition, "High-voltage test techniques Partial discharge measurements" 2000.
- [5] SIEMENS Technical Table 1982 Edition

### ประวัติผู้เขียนบทความ



ชน เกรว น้าหมอนฉินทร์ จบการศึกษามหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยอัสสัมชัญ ปริญญาโทศึกษาค้นคว้าก่อนในระดับปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



ทิววัฒน์ โทนิชวกุล จบการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปริญญาโทศึกษาค้นคว้าก่อนในระดับปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สนใจงานวิจัยในด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง, การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง และระบบอัตโนมัติ มีผลงานตีพิมพ์ทั้งในประเทศและนานาชาติหลายบทความ



หรือศักดิ์ อภิรติกุล จบการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า และ วท.ม. จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี



ทุกวุฒิ กนทรโพธิ์แก้ว จบการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า และ วท.ม. จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

PW55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ISSN 0125-1724

# วิศวกรรม ลาดกระบัง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

## LADKRABANG ENGINEERING JOURNAL

ปีที่ 23 ฉบับที่ 4

ธันวาคม 2549

1. การศึกษาผลกระทบของแรงดันอิมพัลส์กับหม้อแปลงไฟฟ้าในกรณีที่เกิดความผิดปกติ  
พิสิฐ ศักดิ์จิรวัฒน์ ศิริวัฒน์ โทธิวีระกุล นรเศรษฐ์ หัสนนเดธ 1
2. การพยากรณ์ความต้องการพลังงานไฟฟ้าระยะปานกลางของ กฟน. โดยใช้วิธีเอกซ์โพเนนเชียล  
สมุทตั้งและวิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ 7  
พิทพัฒน์ บำรุงกาญจน์ สมชาติ จีรวิภากร
3. มิติที่เหมาะสมของขั้วต่อสายเคเบิลใต้ดินแรงดันสูงสำหรับทดสอบหาดีสารจำบางพ่น  
พิทัด 12/20 (24) kV 240 sq.mm. 13  
ธนากร น้าหอมจันทร์ ศิริวัฒน์ โทธิวีระกุล
4. การพยากรณ์โหลดระยะสั้นของระบบจำหน่ายโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม  
นฤมล อึ้งเอิบตระกูล สมชาติ จีรวิภากร 19
5. การถ่ายเทความร้อนและความเค้นตึงของการไหลแบบราบเรียบในช่องขนานที่มีการเจาะช่อง  
ดุสิต บุรณโชคไพศาล พงษ์เจต พรหมวงศ์ 25
6. การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนโดยการไหลแบบราบเรียบในช่องขนานที่มีคาน  
ศรัณย์ พิพัฒน์ศาสตร์ พงษ์เจต พรหมวงศ์ 31
7. วงจรควบคุมกฎเกณฑ์ใช้แหล่งจ่ายแรงดันต่ำ 1 แหล่ง  
อิทธิพงษ์ รัชสายพันธ์ 37
8. การปลูกและการวิเคราะห์ฟิล์มบาง Cds ที่ปลูกโดยวิธีออบสารละลายเคมี  
สุธีชัย รัชสิทธิ์ศักดิ์ 42
9. การศึกษาการข้อมลพิษลิเมอร์ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต  
จักรวิหระ แสงวิจิตรพันธุ์ วิฑิตพล หัสนนเดธ ศิริวัฒน์ เรืองมนตรีธวัชวาท สุวัฒน์ อารีวัฒน์ 48
10. การขยายกราฟเฟสโดยใช้พีซีซีเพื่อสร้างระบบตรวจจัดการกฎ  
ธรรนกร คงโคกาท เอื้อน ปิ่นเงิน 54
11. การบอกทิศทางโดยใช้สัญญาณกะเนมื่อ  
ทรงภูมิ ภูงศ์ สนั่น ศรีสุข สุเจนร์ จันทร์พงษ์ 60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# มิตินี้เหมาะสมของขั้วต่อสายเคเบิลใต้ดินแรงดันสูงสำหรับ ทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วน พิกัด 12/20(24) kV 240 sq.mm. Optimization of Cable Terminator for PD Measurement Rated 12/20(24) kV 240 sq.mm.

ธนากร น้าหอมจันทร์      ศิริวิวัฒน์ โพธิ์ราชกุล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

## บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบและสร้างขั้วต่อสายเคเบิลใต้ดินแรงดันสูง พิกัด 12/20(24) kV ขนาด 240 sq.mm. เพื่อใช้ในการทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วน โดยการคำนวณหามิติที่เหมาะสมของขั้วต่อสายซึ่งใช้น้ำมันหม้อแปลงในการควบคุมสนามไฟฟ้าบริเวณปลายสายเคเบิล ในงานวิจัยนี้ได้วิเคราะห์วิธีไฟไนต์อีลิเมนต์มาใช้ในการจำลองหาความยาวของขั้วต่อสายและการกระจายของสนามไฟฟ้า ขั้วต่อสายเคเบิลที่ได้จากการออกแบบสามารถใช้ในการทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วนได้ตามมาตรฐาน IEC 60270 ซึ่งมีต้นทุนการสร้างต่ำและเคลื่อนย้ายได้สะดวก ทั้งนี้สามารถนำไปใช้ทดสอบสายเคเบิลในสถานที่ติดตั้งได้ในอนาคต

## Abstract

This paper presents the designed construction of high voltage underground cable terminators which has a rated voltage at 12/20(24) kV 240 sq.mm. to partial discharge measurement. The designed is based on the optimum dimension using the mineral oil for stress control line. The length of terminator and an electric stress distribution are simulated on the basis of Finite Element Method (FEM). Furthermore, the cable terminators designed can be able to measure a partial discharge according to IEC standards. No.60270. those are low cost of production and easy to mobility. In the future it's can use for on-site test

## 1. บทนำ

สายเคเบิลใต้ดินก่อนที่จะนำมาติดตั้งจะต้องมีการตรวจสอบให้มีคุณภาพตามที่มาตรฐานกำหนด การทดสอบหาค่าดิสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge; PD) เป็นรายการหนึ่งที่จะต้องมีการตรวจสอบคุณภาพจากผู้ผลิตเสมอ เนื่องจากการเกิดดิสชาร์จบางส่วนแต่ละครั้งจะมีพลังงานถ่ายเทให้กับพื้นผิวฉนวนในลักษณะ

กระแทก ทำให้ฉนวนเสียหายเป็นจุดๆ และเกิดความผิดปกติของสายตัวมากขึ้น และอาจนำไปสู่การเกิดเบรคความถี่อย่างสมบูรณ์ได้ ส่งผลให้ฉนวนเสียหาย อาศัยการทำงานของฉนวนจะสั้นลง

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า ในการออกแบบจะพยายามทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด ( $E_{max}$ ) ในฉนวนแต่ละชั้นมีค่าใกล้เคียงกัน แต่ใช้ค่า Safety

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

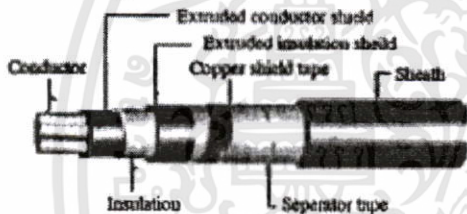
factor สูง ซึ่งทำให้จิวต์สายมีขนาดใหญ่ และต้องใช้ความยาวในการปกกสายมาก ซึ่งสิ้นเปลืองสายเคเบิลในการทดสอบ ไม่สะดวกในการใช้งาน [1-2]

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ ออกแบบและสร้างจิวต์สายสำหรับทดสอบหาค่าคิตซาร์จบางส่วนในสายเคเบิลให้มีขนาดที่เหมาะสม เพื่อความสะดวกในการใช้งาน ลดความสูญเสียสายเคเบิลจากการปกกสาย และสามารถนำไปทดสอบในสถานที่ติดตั้งได้ในอนาคต

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 โครงสร้างของสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวน XLPE

ส่วนประกอบของสายเคเบิลแรงดันสูงฉนวน XLPE แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 สายเคเบิลแรงดันสูงฉนวน XLPE

2.2 ความคงทนของฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้า [3]

คือค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดที่ฉนวนสามารถทนอยู่ได้ โดยไม่เกิดเบรคควาน์ โดยทั่วไปหาได้จากสนามไฟฟ้าที่สม่ำเสมอ (uniform field)

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

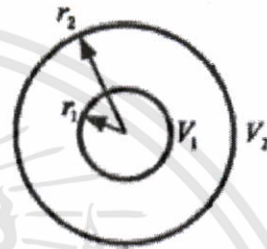
- เมื่อ  $E_{max}$  คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด
- $U$  คือ แรงดันไฟฟ้า
- $d$  คือ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด
- $\eta$  คือ แฟคเตอร์สนามไฟฟ้า

2.3 มิติที่เหมาะสมของทรงกระบอกซ้อนกันแน่น [3]

คือ มิติที่เล็กที่สุดที่สามารถทนต่อแรงดันเบรคควาน์ได้สูงสุด และไม่เกิดโคโรนา แรงดันเบรคควาน์ของอิเล็กโทรดทรงกระบอกซ้อนกันแน่นหาได้จาก  $U_0 = E_0 r_1 \ln(r_2/r_1)$  และมิติที่เหมาะสมของทรงกระบอก

$$\left(\frac{r_2}{r_1}\right)_{opt} = e \quad (2)$$

โดยที่  $r_1$  คือ รัศมีของอิเล็กโทรดใน  
 $r_2$  คือ รัศมีของอิเล็กโทรดนอก



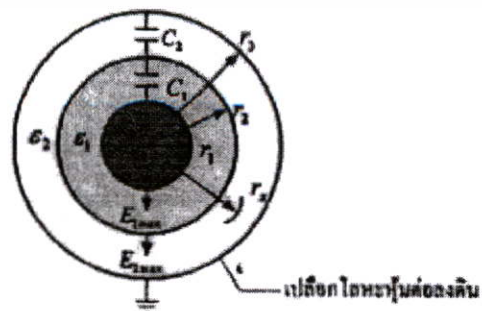
รูปที่ 2 อิเล็กโทรดทรงกระบอกซ้อนกันแน่น

2.4 สนามไฟฟ้าในฉนวนเคเบิลแรงดันสูง [3]

การใช้ฉนวนที่มีค่า  $\epsilon$  ต่างกันเหมาะที่จะใช้กับสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ ซึ่งจะช่วยให้ความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนแต่ละชั้นที่มีค่า  $\epsilon$  ต่างกันให้มีค่าใกล้เคียงกัน ความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนที่มีรัศมีใดๆ คำนวณได้จากสมการที่ 3

$$E_{ix} = \frac{\epsilon_1 \epsilon_2 U}{r_1 \epsilon_1 \left( \epsilon_1 \ln \frac{r_2}{r_1} + \epsilon_2 \ln \frac{r_2}{r_1} \right)} \quad (3)$$

โดยที่  $\epsilon_1$  คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนที่มีรัศมี  $r_1$   
 $U$  คือ แรงดันไฟฟ้าที่ขียน  
 $\epsilon_1, \epsilon_2$  คือ เปรอริมิคคิตวีของฉนวนชั้นที่ 1 และ 2  
 $r_1$  คือ รัศมีของตัวนำ  
 $r_2, r_3$  คือ รัศมีของฉนวนชั้นที่ 1 และ 2

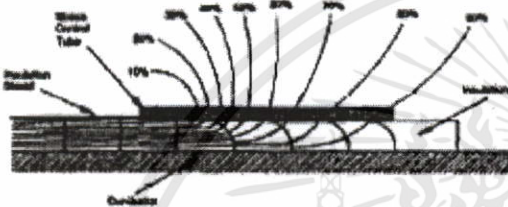


รูปที่ 3 สายเคเบิลทรงกระบอกซ้อนกันแน่น

เอกสารฉบับนี้จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาวิจัยและการค้นคว้าวิจัยด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 การควบคุมสนามไฟฟ้าของสายเคเบิล

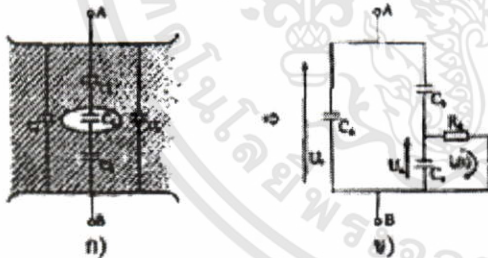
การปกป้องกันตัวนำนอกออกเพื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างตัวนำและกราวด์ ส่งผลให้สนามไฟฟ้าที่ขึ้นกับตัวนำนอกเกิดความไม่สม่ำเสมอสูง จึงต้องควบคุมสนามไฟฟ้าให้เกิดความไม่สม่ำเสมอที่น้อยที่สุด โดยนำฉนวนที่มีค่าเปอร์มิตติวิตีสูงมาควบคุมการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้า[4]



รูปที่ 4 การควบคุมกระจายของสนามไฟฟ้าที่สายเคเบิล

2.6 วงจรสมมูลคิซาร์จภายใน [3]

คือ วงจรสมมูลสำหรับจำนวนของอุปกรณไฟฟ้าแรงสูงขณะเกิด PD สามารถแทนด้วยตัวเก็บประจุ  $C_1, C_2, C_3$  และแกป  $g$  ตามลำดับ ดังรูปที่ 5 ซึ่งในทางปฏิบัติจะพบว่า  $C_1 \gg C_2 \gg C_3$



รูปที่ 5 วงจรสมมูลของการเกิดคิซาร์จบางส่วนทั่วไป

2.7 การจำแนกชนิดของคิซาร์จบางส่วน

คิซาร์จบางส่วน โดยทั่วไปแบ่งออกได้เป็น 6 ชนิด คือ

1. Corona Discharge เกิดขึ้นบริเวณปลายอิเล็กโตรดแหลมหรือขอบคมที่อยู่ในฉนวนก๊าซหรือฉนวนเหลว
2. Surface Discharge เกิดขึ้นที่ผิวของฉนวนที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าตามแนวผิวสูง
3. Internal Discharge เกิดขึ้นในโพรงหรือโพรงก๊าซในเนื้อฉนวน

4. Electric tree เกิดขึ้นจากขอบคมของตัวนำหรือจากโพรงหรือโพรงก๊าซในฉนวนแข็ง

5. Floating Part discharges เกิดขึ้นในกรณีที่ต่อกราวด์ในวงจรแรงสูงไม่ถี่

6. Contact noise เกิดขึ้นจากการต่อกราวด์ในวงจรทดสอบไม่ถี่



รูปที่ 6 ลักษณะของคิซาร์จบางส่วนแบบต่างๆ [5]

3. การออกแบบ และการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้า

3.1 เส้นผ่านศูนย์กลางของขั้วต่อสายเคเบิล

จากรูปที่ 2 สามารถหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของขั้วต่อสายเคเบิลได้ จากสมการที่ 2 โดย  $r_1$  คือ รัศมีของตัวนำ มีค่าเท่ากับ 8.47 mm.[7] และ  $r_2$  คือ รัศมีของขั้วต่อสาย จะได้

$$r_2 = r_1 \times e = 8.47 \times e = 23.75 \text{ mm.}$$

ดังนั้น เส้นผ่านศูนย์กลางของขั้วต่อสายเท่ากับ

$$2 \times r_2 = 47.5 \text{ mm.}$$

บทความนี้ เลือกลงใช้น้ำมันหม้อแปลง เพื่อควบคุมความเครียดสนามไฟฟ้า ซึ่งทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าประมาณ 20 kV/mm[6] จากสมการที่ 3 สามารถคำนวณหาความเครียดสนามไฟฟ้าที่ผิว XLPE ( $E_s$ ) และที่ผิวของน้ำมันหม้อแปลง ( $E_o$ ) โดยใช้แรงดันทดสอบสูงสุดตามมาตรฐาน IEC 60502-2 [7] คือ 24 kV และ  $e$  จาก [6] จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_{r_2} = \frac{2.3 \times 2.2 \times 24 \text{ kV}}{14.25 \times 2.2 \left( 2.3 \ln \left( \frac{23.75}{14.25} \right) + 2.2 \ln \left( \frac{14.25}{8.74} \right) \right)}$$

= 1.72 kV/mm.

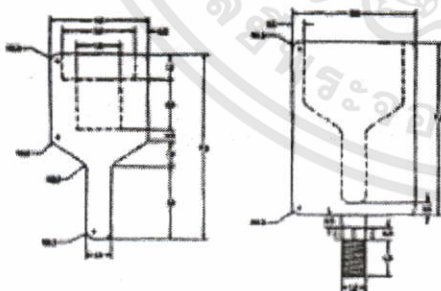
$$E_{r_1} = \frac{2.3 \times 2.2 \times 24 \text{ kV}}{23.75 \times 2.2 \left( 2.3 \ln \left( \frac{23.75}{14.25} \right) + 2.2 \ln \left( \frac{14.25}{8.74} \right) \right)}$$

= 1.03 kV/mm.

จากค่าความเครียดสนามไฟฟ้า  $E_r$  และ  $E_g$  พบว่าสามารถใช้ในการทดสอบได้ โดยไม่เกิดเบรคควาร์ในบทความนี้เลือกใช้ชนิดคริสตอลเป็นวัสดุฉนวนสำหรับขั้วต่อสาย ซึ่งทนความเครียดสนามไฟฟ้าได้ประมาณ 35 kV/mm. [6] โดยเลือกเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 mm. และความหนา 5 mm.

3.2 ปลายสาย และฐานรองรับปลายสาย

การออกแบบต้องคำนึงถึงขนาดของตัวนำ และจำนวนของสายเคเบิลโดยอ้างอิงขนาดตัวนำและความหนาของฉนวนของสายเคเบิล ตามมาตรฐาน IEC 60502-2 [7] ขนาดของปลายสาย และฐานรองรับปลายสายที่ออกแบบ ดังแสดงในรูปที่ 7

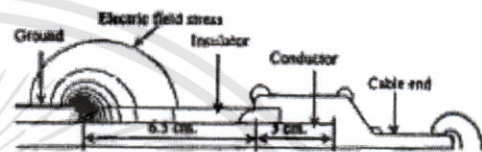


รูปที่ 7 ขนาดของปลายสายและฐานรองรับปลายสาย

3.3 ความยาวของขั้วต่อสายเคเบิล

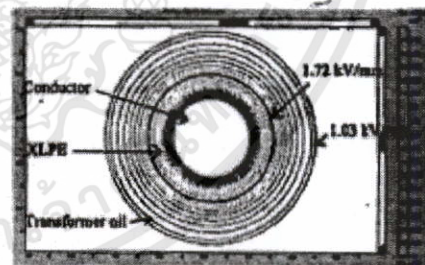
พิจารณาจากแรงดันทดสอบ และระยะปกกสายระหว่างตัวนำกับกราวด์ โดยแรงดันสูงสุดที่ใช้ทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60502-2 [7] คือ  $2U_0$  เท่ากับ 24 kV ส่วนระยะการปกกสาย จากการจำลองการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้า จะได้ระยะการปกกสายเท่ากับ

6.5 cm. แสดงดังรูปที่ 7 โดยพิจารณาจาก contour ของสนามไฟฟ้าระหว่างปลายสาย และกราวด์ เมื่อพิจารณา ร่วมกับขนาดของปลายสาย ดังนั้นระยะการปกกสายทั้งหมด เท่ากับ 9.5 cm. และเพื่อให้ น้ำมันหม้อแปลงควบคุมการกระจายสนามไฟฟ้าตลอดระยะที่ปกกสาย จึงเลือกความยาวขั้วต่อสายที่ 20 cm.

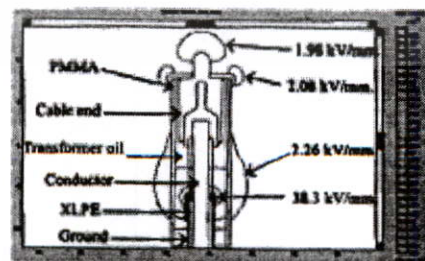


รูปที่ 8 การกระจายสนามไฟฟ้าบริเวณปลายสายเคเบิล

3.4 การจำลองการกระจายสนามไฟฟ้าของส่วนประกอบบทความนี้ได้มีการเบิบบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาช่วยในการวิเคราะห์การกระจายความเครียดสนามไฟฟ้า ทำการวิเคราะห์แบบ 2 มิติ และ ไม่คำนึงถึงผลของประจุตกค้าง โดยใช้โปรแกรม FEMLAB ซึ่งใช้แรงดันสูงสุดในการทดสอบ คือ 24 kV และใช้ค่า  $\epsilon_r$  จาก [6] ผลการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้าในส่วนต่างๆ ของขั้วต่อสายที่ได้ออกแบบ ดังแสดงในรูปที่ 8



ก) ภาพตัดขวางบริเวณสายเคเบิล

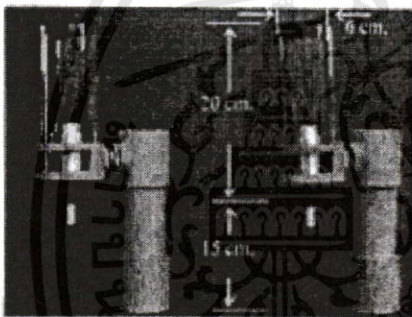


ข) ภาพตัดตามแนวรูของขั้วต่อสาย

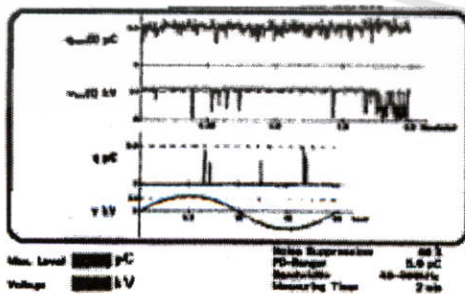
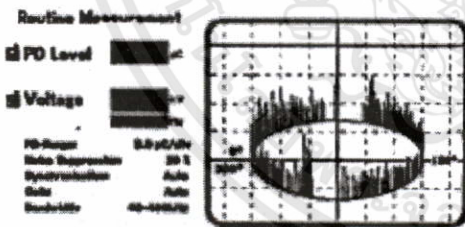
รูปที่ 9 การกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าในส่วนต่างๆ ของขั้วต่อสาย

4. การทดสอบขั้วต่อสายเคเบิล

ทดสอบหาค่าคิสร่างบางส่วนในสายเคเบิล และในขั้วต่อสายเคเบิล ตามมาตรฐาน IEC 60270 [8] โดยใช้เครื่องวัดคิสร่างบางส่วน HAEFELY TRENCH รุ่น TE-571 วงจรทดสอบแสดงในภาคผนวก จากการทดสอบหาคิสร่างบางส่วนในสายเคเบิลที่ไม่มีขั้วต่อสาย จะพบว่ามี corona effect มากเกินกว่าที่จะวินิจฉัยได้ว่ามี คิสร่างบางส่วนในสายเคเบิล ส่วนการทดสอบในสาย เคเบิลที่มีขั้วต่อสาย พบว่าจะสามารถวินิจฉัยได้ว่ามี คิสร่างบางส่วนภายในฉนวน (Internal Discharge) ของ สายเคเบิล แต่จะมีสัญญาณรบกวนเนื่องจากค็อกการวดีใน วงจรทดสอบไม่คิ (Contact noise) ดังรูปที่ 11



รูปที่ 10 ขั้วต่อสายเคเบิลทึกคิ 12/20(24) kV 240 sq.mm.



รูปที่ 11 ผลการทดสอบหาคิสร่างบางส่วนในสายเคเบิล มีค่า PD 7.6 pC. ภายในโพรงฉนวนสายเคเบิลและมี Contact noise

Problem	50	75	100	150
FLLOATING PART	0	0	0	0
CONTACT NOISE; HV electrode	16	0	0	0
CAVITIES; LV electrode-bounded	13	0	0	0
CAVITY; fissure, HV electrode	9	0	0	0
no PD	0	0	0	0
PD between TOUCHING INSULATORS	0	0	0	0
background noise	0	0	0	0
CORONA; multiple, LV electrode	0	0	0	0
CORONA; multiple, HV electrode	0	0	0	0
SURFACE PD; HV electrode	0	0	0	0
SURFACE PD; LV electrode	0	0	0	0
CORONA; single, LV electrode	0	0	0	0
SURFACE PD; dielectric surface	0	0	0	0
CAVITIES; dielectric-bounded	0	0	0	0
CAVITY; LV electrode-bounded	0	0	0	0

รูปที่ 12 การจำแนกชนิดของคิสร่างบางส่วนที่เกิดขึ้น ในการทดสอบ

5. สรุป

จากการใช้ทฤษฎีมิติที่เหมาะสมของ ทรงกระบอกซ้อนกันร่วมในการออกแบบทำให้เส้นผ่าน ศูนย์กลางลดลง 61.14 เปอร์เซ็นต์ (1) และการใช้ระเบียบ วิธีไฟในคิอิมเมนต์ในการออกแบบ ทำให้ความยาวของ ขั้วต่อสายลดลง 66.66 เปอร์เซ็นต์ (1) โดยขั้วต่อสายที่ สร้างขึ้นสามารถทดสอบหาคิสร่างบางส่วนในสาย เคเบิลทึกคิ 12/20(24) kV ขนาด 240 sq.mm. ได้ตาม มาตรฐาน IEC 60270 [8] ทั้งนี้สามารถใช้ในการทดสอบ ในสถานที่ติดตั้งได้ในอนาคต เนื่องจากขั้วต่อสายที่สร้าง ขึ้นมีขนาดเล็ก เคลื่อนย้ายสะดวก และใช้ความยาวในการ ปอกสายเคเบิลที่สั้น เป็นการลดความสิ้นเปลืองสายเคเบิล จากการทดสอบ

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย อีตเทิร์นเอเซีย ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำงานวิจัย และ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่เอื้อเฟื้อ สถานที่ในการทดสอบ

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] พรหมศักดิ์ อภิรัตน์กุล จงรักษ์ บุญเส็ง และ กนกพล นากระวีวัฒน์ "ขั้วต่อสายเคเบิลแรงดันสูง XLPE สำหรับทดสอบคิสร่างบางส่วน ตอนที่ 1: การ ออก แบบและสร้างขั้วต่อสายเคเบิล" EECON 24, หน้า 77 - 82, 2544.



## ประวัติผู้เขียน



- ชื่อ-นามสกุล** นายชนากร น้ำหอมจันทร์
- วัน เดือน ปีเกิด** 10 พฤษภาคม 2523 กรุงเทพมหานคร
- ที่อยู่** 62/82 หมู่บ้านพรธิดา 6 ถนนรังสิต-นครนายก คลอง 7  
ตำบลบึงบอน อำเภอหนองเสือ ปทุมธานี 12170 โทร. 08-1720-7044
- ประวัติการศึกษา** 2546 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย  
2549 รัฐประศาสนศาสตรบัณฑิต วิชาเอกรัฐประศาสนศาสตร์  
มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมราช  
2551 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- งานวิจัยที่ได้ตีพิมพ์**
- ชนากร น้ำหอมจันทร์ ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล พร้อมศักดิ์ อภิรติกุล และ ศุภวุฒิ เนตรโพธิ์แก้ว, “การออกแบบและสร้างขั้วต่อสายเคเบิลได้ดินแรงดันสูงสำหรับทดสอบหาคิซาร์จบางส่วนโดยใช้ทฤษฎีมิติที่เหมาะสมและระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์”, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 29, 9 – 10 พฤศจิกายน 2549, หน้า 217-220
  - ชนากร น้ำหอมจันทร์ และ ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล, “มิติที่เหมาะสมของขั้วต่อสายเคเบิลได้ดินแรงดัน สูงสำหรับทดสอบหาคิซาร์จบางส่วน พิกัด 12/20(24) kV 240 sq.mm.”, วิศวกรรมสารลาดกระบัง, ปีที่ 23 ฉบับที่ 4 เดือนธันวาคม 2549
- ประสบการณ์ทำงาน** 2546 - ปัจจุบัน อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย
- งานวิจัยที่สนใจ** เทคโนโลยีทางวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง และการทดสอบคิซาร์จบางส่วน  
ในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้