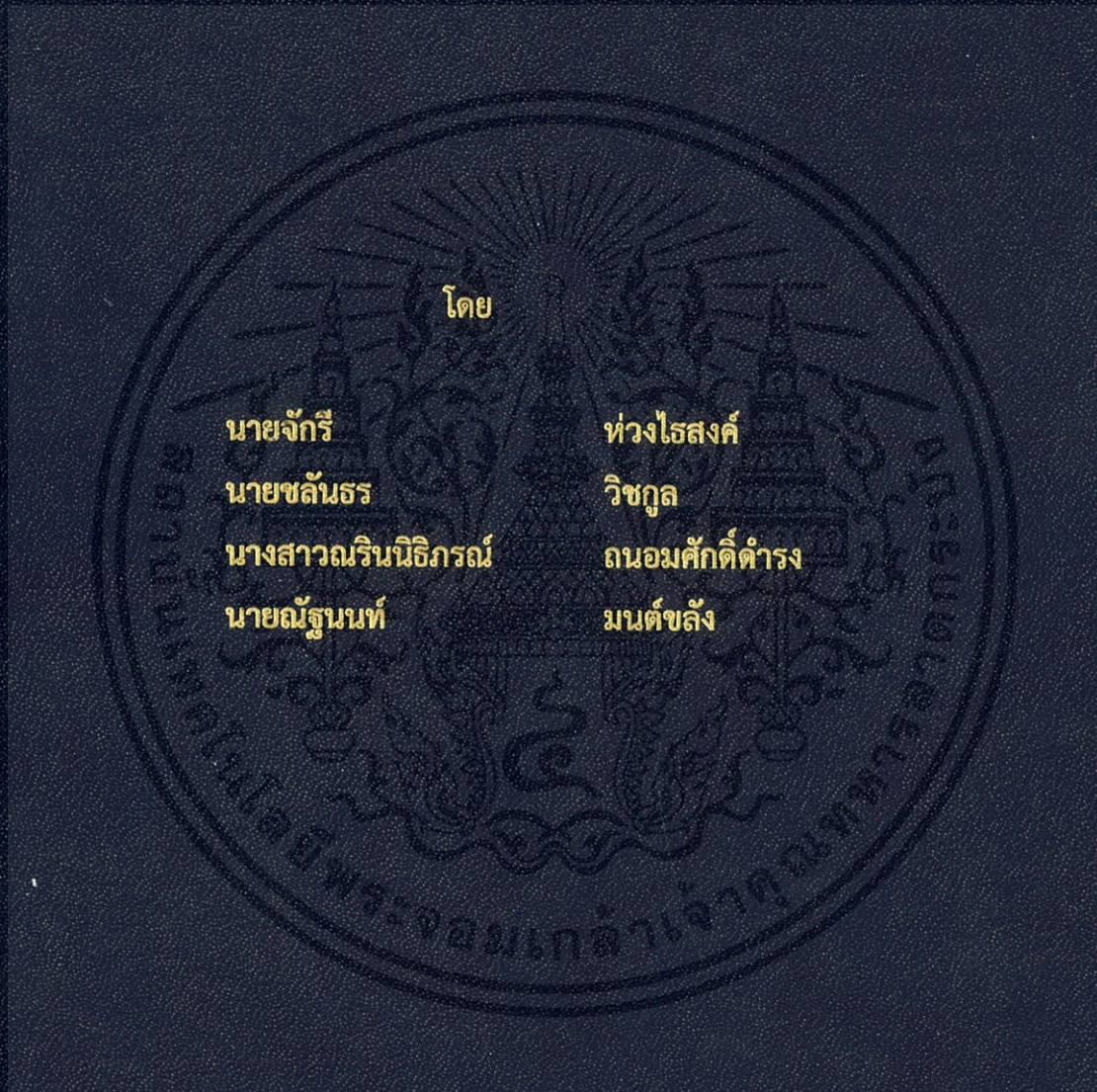


การศึกษาการเกิดดิสชาร์จบางส่วนใน GIL
THE STUDY OF PARTIAL DISCHARGE MEASUREMENT IN
GAS INSULATED LINE



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2561

การศึกษาการเกิดดิสชาร์จบางส่วนใน GIL
THE STUDY OF PARTIAL DISCHARGE MEASUREMENT IN
GAS INSULATED LINE

โดย



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THE STUDY OF PARTIAL DISCHARGE MEASUREMENT IN
GAS INSULATED LINE



THIS PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT
FOR THE BACHELOR DEGREE IN ELECTRICAL ENGINEERING
DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2018

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาการเกิดดิสชาร์จบางส่วนใน GIL
THE STUDY OF PARTIAL DISCHARGE MEASUREMENT IN
GAS INSULATED LINE

โดย

นายจักรี

ห้วงไธสงค์

นายชลันธร

วิชกุล

นางสาวณรินนิธิภรณ์

ถนนอมศักดิ์ดีดำรง

นายณัฐนนท์

มนต์ขลัง

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร. นรเศรษฐ พัฒนเดช

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2561

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาการเกิดดิสชาร์จบางส่วนใน GIL

ผู้จัดทำ

1. นายจักรี ห่วงไธสงค์
2. นายชลันธร วิชกุล
3. นางสาวณรินนิธิภรณ์ ถนอมศักดิ์ดำรง
4. นายณัฐนนท์ มนต์ขลัง



..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์ ดร.นรเศรษฐ พัฒนเดช)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาการเกิดดิสชาร์จบางส่วนใน GIL

นายจักรี	ห้วงไธสงค์
นายชลันธร	วิชกุล
นางสาวณรินนิธิภรณ์	ถนอมศักดิ์ดำรง
นายณัฐนนท์	มนต์ชลัง
รศ.ดร. นรเศรษฐ	พัฒนเดช อาจารย์ที่ปรึกษา

บทคัดย่อ

การวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วน เป็นหนึ่งในการวินิจฉัยฉนวนสำหรับการทดสอบ เพื่อการบำรุงรักษาอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง โดยจะเกิดดิสชาร์จบางส่วนเมื่อสิ่งบกพร่องในระบบฉนวนเกิดสนามไฟฟ้าสูงพอ โครงการนี้เป็นการศึกษาและตรวจวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนภายในระบบการส่งกำลังไฟฟ้าด้วย GIL (gas-insulated transmission line) ด้วยวิธี การวัดการเกิดดิสชาร์จแบบดั้งเดิม ทำการทดลองด้วย GIL หนึ่งเฟส พิกัดแรงดัน 230 kV พิกัดกระแส 2,000 A ความยาว 2.5 เมตร การทดลองจะเป็นการจำลองการเกิดดิสชาร์จบางส่วนเนื่องจากสิ่งบกพร่อง อนุภาคโลหะและ วัตถุโลหะยื่น ซึ่งเป็นสิ่งบกพร่องที่พบได้บ่อยในระบบการส่งกำลังไฟฟ้าด้วย GIL การทดลองแบ่งออกเป็น 5 กรณี โดยมีการเปลี่ยนแปลงขนาดและจุดติดตั้งสิ่งบกพร่อง ผลการทดลองแสดงด้วยรูปแบบ PRPD (Phase Resolved Partial Discharge)

THE STUDY OF PARTIAL DISCHARGE MEASUREMENT IN GAS INSULATED LINE

Chakkri	Houngtaisong
Chalantorn	Wichakul
Narinnitiporn	Thanormsakdomrong
Natthanon	Monklang
Assoc.Prof.Dr. techn. Norasage Pattanadech	Advisor

Abstract

Partial discharge (PD) measurement is one of the insulation diagnosis tools applied for testing and maintenance of high voltage apparatus. Generally, a PD emerges, when a defect in the insulation system has enough high electric field stress. This research focused on the conventional PD measurement for gas-insulated transmission line (GIL). A 230 kV, 2500 A, single phase, GIL with 2.5 m length was used for experiments. In this research, PD was generated from the simulated defect, i.e., metallic particles and metallic protrusions. The experiments were divided into 5 cases according to the dimension and the position of the simulated defect. The results were demonstrated with Phase Resolved Partial Discharge (PRPD) patterns.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยการช่วยจากหลายท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ต้องขอขอบคุณรองศาสตราจารย์ ดร.นรเศรษฐ พัฒนเดช อาจารย์ที่ปรึกษาโครงงาน รวมไปถึงพี่เพทาย นิมสนองและรุ่นพี่ ป.โท ที่อยู่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สจล. ทุกท่านที่ได้กรุณาให้คำแนะนำในการจัดทำและส่งบทความทางวิชาการในงานประชุมวิชาการต่าง ๆ รวมถึงคอยตรวจสอบความถูกต้องของปริญญานิพนธ์นี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้โดยสมบูรณ์ คณะผู้จัดทำ ขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบคุณบริษัท Meidensha Corporation ที่ให้การสนับสนุนมอบทุนสำหรับวิจัยให้กับโครงงานปริญญานิพนธ์นี้ ทำให้ปริญญานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้

นอกจากนี้ ขอขอบพระคุณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และคณาจารย์ทุกท่านที่คอยถ่ายทอดวิชาความรู้จนปรากฏออกมาเป็นปริญญานิพนธ์นี้

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา รวมถึงสมาชิกท่านอื่น ๆ ในครอบครัว ตลอดจนผู้เกี่ยวข้องทุกท่านที่ไม่ได้กล่าวนามไว้ ณ ที่นี้ ที่มีส่วนช่วยเหลือทั้งในด้านกำลังใจและทุนทรัพย์ ให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

คณะผู้จัดทำ

สารบัญ

บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูปภาพ	VII
สารบัญตาราง	X
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	2
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ	2
1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงการ	2
1.5 แผนการดำเนินโครงการ	3
1.6 ผลที่คาดว่าจะได้จากโครงการ	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 สถานีไฟฟ้าย่อย	5
2.1.1 สถานีไฟฟ้าแรงสูงแบบใช้ฉนวนอากาศ (Air Insulated Substation : AIS)	5
2.1.2 สถานีไฟฟ้าแรงสูงแบบใช้ฉนวนแก๊ส (Gas Insulated Substation : GIS)	6
2.2 สถานีไฟฟ้าแรงสูงแบบใช้ฉนวนแก๊ส	7
2.2.1 ตู้ฉนวน (Enclosure)	8
2.2.2 โคน (Insulating Cone)	9
2.2.3 ตัวนำ (Conductor)	9
2.2.4 เซอร์กิตเบรกเกอร์ (Circuit breaker)	10
2.2.5 ไบมีดกราวด์ (Ground Switch)	11

สารบัญ (ต่อ)

2.2.6	ใบมีดตัดตอน (Disconnected Switch)	12
2.2.7	หม้อแปลงวัดกระแส (Current Transformer)	13
2.2.8	หม้อแปลงวัดแรงดัน (Voltage Transformer)	13
2.2.9	อุปกรณ์ขยาย (Expansion bellows)	14
2.2.10	อุปกรณ์ระบายแรงดันเกิน (Pressure relief)	14
2.2.11	External connection	15
2.2.12	Metal-Enclosed Surge Arresters	15
2.3	Gas Insulated Transmission Line (GIL)	16
2.3.1	ส่วนประกอบของ GIL	16
2.3.2	ข้อมูลพื้นฐานของ GIL เมื่อเปรียบเทียบกับระบบ OHL กับ XLPE	17
2.3.3	ปัญหาเกี่ยวกับการปล่อยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของ GIL	18
2.3.4	กระแสเหนี่ยวนำทิศทางตรงข้ามที่ตัวถัง GIL	19
2.4	แก๊สซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ (SF ₆)	20
2.4.1	คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพ	20
2.4.2	คุณสมบัติทางไฟฟ้า	21
2.5	สนามไฟฟ้าและการเกิดดิสชาร์จบางส่วน	22
2.6	การดิสชาร์จบางส่วนใน GIS และ GIL	23
2.6.1	วิธีการตรวจวัดดิสชาร์จที่นิยมใช้ในระบบ GIS และ GIL	24
2.6.2	การเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของการวัดดิสชาร์จแบบต่าง ๆ	26
บทที่ 3	การออกแบบชุดทดสอบและประกอบสร้างชุดทดสอบ	27
3.1	โมเดลในการทดสอบ	27
3.2	การจำลองสนามไฟฟ้าภายใน Gas Insulated Transmission Line ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์	29

สารบัญ (ต่อ)

3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ	34
3.3.1 วาริแอกสำหรับปรับแรงดันไฟฟ้า	44
3.3.2 หม้อแปลงแรงดันสูงกระแสสลับ 100 kV 50 mA	44
3.3.3 โวลเตจดีไวเดอร์ พิกัด 100 kV บรรจุแก๊ส SF ₆	45
3.3.4 ตัวต้านทานน้ำ	45
3.3.5 มัลติมิเตอร์	46
3.3.6 ตัวเก็บประจุคัปปลิง (Coupling Capacitor)	46
3.3.7 คัปปลิงดีไวซ์ (Coupling Device)	47
บทที่ 4 การทดสอบและผลการทดสอบ	49
4.1 ขนาดและพิกัดของ GIL ที่ใช้ทำการทดสอบ	48
4.2 วงจรการทดลอง	50
4.3 ขั้นตอนในการทดลอง	51
4.3.1 ขั้นตอนในการวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนแบบ Conventional	51
4.4 ผลการทดลอง	53
4.4.1 ผลการทดลองการวัดดิสชาร์จบางส่วนแบบ Conventional	53
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	60
5.1 สรุป	60
5.2 ข้อเสนอแนะ	60

สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 2.1	สถานีไฟฟ้าแรงสูงแบบใช้ฉนวนอากาศ (AIS)	5
รูปที่ 2.2	สถานีไฟฟ้าแรงสูงแบบใช้ฉนวนแก๊ส (GIS)	6
รูปที่ 2.3	เปรียบเทียบขนาดระหว่างสถานีแบบ AIS และ GIS	6
รูปที่ 2.4	ส่วนประกอบภายในของสถานีไฟฟ้าย่อยแรงสูงฉนวนแก๊ส	8
รูปที่ 2.5	Enclosure	8
รูปที่ 2.6	Insulating Cone	9
รูปที่ 2.7	Conductor	9
รูปที่ 2.8	ส่วนประกอบภายใน Circuit breaker	10
รูปที่ 2.9	แสดงหลักการทำงานของ Circuit breaker	11
รูปที่ 2.10	ส่วนประกอบของใบมีดกราวด์	12
รูปที่ 2.11	ส่วนประกอบของใบมีดตัดตอน	12
รูปที่ 2.12	ส่วนประกอบของหม้อแปลงวัดกระแส	13
รูปที่ 2.13	ส่วนประกอบของหม้อแปลงวัดแรงดัน	13
รูปที่ 2.14	แสดงส่วนประกอบของอุปกรณ์ขยาย	14
รูปที่ 2.15	แสดงส่วนประกอบของอุปกรณ์ระบายแรงดันเกิน	14
รูปที่ 2.16	แสดงส่วนประกอบของ External connection	15
รูปที่ 2.17	โครงสร้างภายในของ GIL	16
รูปที่ 2.18	การเปรียบเทียบความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กในระบบ OHL, Cable, และ GIL	18
รูปที่ 2.19	ระบบการต่อสะพานกราวด์ของระบบ GIL 3 เฟส	19
รูปที่ 2.20	โครงสร้างของซิลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์	20
รูปที่ 2.21	รูปแบบของการดีสชาร์จบางส่วน	23
รูปที่ 2.22	วงจรการวัดดีสชาร์จบางส่วน ตาม IEC 60270	25
รูปที่ 2.23	กราฟการเปรียบเทียบการวัดดีสชาร์จบางส่วน	26
รูปที่ 3.1	โมเดลของวัตถุทดสอบ	28
รูปที่ 3.2	แบบหัวต่อสายไฟ	28
รูปที่ 3.3	ผลการจำลองสนามไฟฟ้าภายใน GIL ปกติ	29
รูปที่ 3.4	ผลการจำลองสนามไฟฟ้าภายใน GIL กรณีมีวัตถุอื่น	30
รูปที่ 3.5	โมเดลที่ใช้ในการจำลองกรณีวัตถุอื่น	31
รูปที่ 3.6	ผลการจำลองสนามไฟฟ้าในกรณีวัตถุอื่นขนาด 1 ซม.	32
รูปที่ 3.7	เส้นกราฟของสนามไฟฟ้าในกรณีวัตถุอื่นขนาด 1 ซม.	32
รูปที่ 3.8	ผลการจำลองสนามไฟฟ้าในกรณีวัตถุอื่นขนาด 2 ซม.	32

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่ 3.9	เส้นกราฟของสนามไฟฟ้าในกรณีวัตถุเย็นขนาด 2 ซ.ม.	33
รูปที่ 3.10	ผลการจำลองสนามไฟฟ้าในกรณีวัตถุเย็นขนาด 3 ซ.ม.	33
รูปที่ 3.11	เส้นกราฟของสนามไฟฟ้าในกรณีวัตถุเย็นขนาด 3 ซ.ม.	33
รูปที่ 3.12	โมเดลที่ใช้ในการจำลองกรณีวัตถุเย็นบนตัวถัง	34
รูปที่ 3.13	ผลการจำลองสนามไฟฟ้าในกรณีวัตถุเย็นบนตัวถังขนาด 1 ซ.ม.	35
รูปที่ 3.14	เส้นกราฟของสนามไฟฟ้าในกรณีวัตถุเย็นบนตัวถังขนาด 1 ซ.ม.	35
รูปที่ 3.15	ผลการจำลองสนามไฟฟ้าในกรณีวัตถุเย็นบนตัวถังขนาด 2 ซ.ม.	35
รูปที่ 3.16	เส้นกราฟของสนามไฟฟ้าในกรณีวัตถุเย็นบนตัวถังขนาด 2 ซ.ม.	36
รูปที่ 3.17	ผลการจำลองสนามไฟฟ้าในกรณีวัตถุเย็นบนตัวถังขนาด 3 ซ.ม.	36
รูปที่ 3.18	เส้นกราฟของสนามไฟฟ้าในกรณีวัตถุเย็นบนตัวถังขนาด 3 ซ.ม.	36
รูปที่ 3.19	โมเดลที่ใช้ในการจำลองกรณีวัตถุเย็น	37
รูปที่ 3.20	ผลการจำลองสนามไฟฟ้าในกรณีวัตถุเย็นภายใต้ฉนวนแข็งขนาด 1 ซ.ม.	38
รูปที่ 3.21	เส้นกราฟของสนามไฟฟ้าในกรณีวัตถุเย็นภายใต้ฉนวนแข็งขนาด 1 ซ.ม.	38
รูปที่ 3.22	ผลการจำลองสนามไฟฟ้าในกรณีวัตถุเย็นภายใต้ฉนวนแข็งขนาด 2 ซ.ม.	38
รูปที่ 3.23	เส้นกราฟของสนามไฟฟ้าในกรณีวัตถุเย็นภายใต้ฉนวนแข็งขนาด 2 ซ.ม.	39
รูปที่ 3.24	ผลการจำลองสนามไฟฟ้าในกรณีวัตถุเย็นภายใต้ฉนวนแข็งขนาด 3 ซ.ม.	39
รูปที่ 3.25	เส้นกราฟของสนามไฟฟ้าในกรณีวัตถุเย็นภายใต้ฉนวนแข็งขนาด 3 ซ.ม.	39
รูปที่ 3.26	โมเดลที่ใช้ในการจำลองกรณีวัตถุเย็นบนตัวถัง	40
รูปที่ 3.27	ผลการจำลองสนามไฟฟ้าในกรณีวัตถุเย็นบนตัวนำมีขนาด 1 ซ.ม.และวัตถุเย็นบนตัวถัง 4 ซ.ม.	41
รูปที่ 3.28	เส้นกราฟของสนามไฟฟ้าในกรณีวัตถุเย็นบนตัวนำมีขนาด 1 ซ.ม.และวัตถุเย็นบนตัวถัง 4 ซ.ม.	41
รูปที่ 3.29	ผลการจำลองสนามไฟฟ้าในกรณีวัตถุเย็นบนตัวนำมีขนาด 2 ซ.ม.และวัตถุเย็นบนตัวถัง 5 ซ.ม.	42
รูปที่ 3.30	เส้นกราฟของสนามไฟฟ้าในกรณีวัตถุเย็นบนตัวนำมีขนาด 2 ซ.ม.และวัตถุเย็นบนตัวถัง 5 ซ.ม.	42
รูปที่ 3.31	ผลการจำลองสนามไฟฟ้าในกรณีวัตถุเย็นบนตัวนำมีขนาด 3 ซ.ม.และวัตถุเย็นบนตัวถัง 6 ซ.ม.	43

สารบัญรูปรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่ 3.32 เส้นกราฟของสนามไฟฟ้าในกรณีวัตถุเย็นบนตัวนำมีขนาด 3 ซ.ม.และวัตถุเย็นบนตัวถัง 6 ซ.ม.	43
รูปที่ 3.33 วาริแอกสำหรับปรับแรงดันไฟฟ้า	44
รูปที่ 3.34 หม้อแปลงแรงดันสูงกระแสสลับ	44
รูปที่ 3.35 โวลเตจดีไวเดอร์	45
รูปที่ 3.36 ตัวต้านทานน้ำ	45
รูปที่ 3.37 มัลติมิเตอร์	46
รูปที่ 3.38 ตัวเก็บประจุคัปปลิง	46
รูปที่ 3.39 คัปปลิงดีไวซ์	47
รูปที่ 4.1 แสดงโครงสร้างภายนอกของท่อ GIL	48
รูปที่ 4.2 วงจรในการทดลองการเกิดดิสชาร์จบางส่วนแบบ Conventional	50
รูปที่ 4.3 วงจรในการทดลองการเกิดดิสชาร์จบางส่วนแบบ set up	50
รูปที่ 4.4 การติดตั้งสิ่งบกพร่องจำลอง	52
รูปที่ 4.5 ผลการวัด Background Noise	53
รูปที่ 4.6 ผลการวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนกรณีวัตถุเย็นฝั่งตัวนำขนาด 1 ซ.ม.	53
รูปที่ 4.7 ผลการวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนกรณีวัตถุเย็นฝั่งตัวนำขนาด 2 ซ.ม.	54
รูปที่ 4.8 ผลการวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วน กรณีวัตถุเย็นฝั่งตัวนำขนาด 3 ซ.ม.	54
รูปที่ 4.9 ผลการวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนกรณีวัตถุเย็นฝั่งตัวถังขนาด 1 ซ.ม.	55
รูปที่ 4.10 ผลการวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนกรณีวัตถุเย็นฝั่งตัวถังขนาด 2 ซ.ม.	55
รูปที่ 4.11 ผลการวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนกรณีวัตถุเย็นฝั่งตัวถังขนาด 3 ซ.ม.	56
รูปที่ 4.12 ผลการวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนกรณีวัตถุเย็นฝั่งตัวนำขนาด 1 ซ.ม. ภายใต้แผ่นฉนวนไมล้า	56
รูปที่ 4.13 ผลการวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนกรณีวัตถุเย็นฝั่งตัวนำขนาด 2 ซ.ม. ภายใต้แผ่นฉนวนไมล้า	57
รูปที่ 4.14 ผลการวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนกรณีวัตถุเย็นฝั่งตัวนำขนาด 3 ซ.ม. ภายใต้แผ่นฉนวนไมล้า	57
รูปที่ 4.15 ผลการวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนกรณีวัตถุเย็นขนาด 1 ซ.ม. บนตัวนำพร้อมกับการติดตั้งวัตถุเย็นขนาด 4 ซ.ม. บนตัวถัง	58
รูปที่ 4.16 ผลการวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนกรณีวัตถุเย็นขนาด 2 ซ.ม. บนตัวนำพร้อมกับการติดตั้งวัตถุเย็นขนาด 5 ซ.ม. บนตัวถัง	58
รูปที่ 4.17 ผลการวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนกรณีวัตถุเย็นขนาด 3 ซ.ม. บนตัวนำพร้อมกับการติดตั้งวัตถุเย็นขนาด 6 ซ.ม. บนตัวถัง	59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ 1.1	แผนการดำเนินงาน	3
ตารางที่ 2.1	ตารางเปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสียของสถานี AIS และ GIS	7
ตารางที่ 2.2	ตารางเปรียบเทียบ GIL, OHL และ XLPE cable	17
ตารางที่ 2.3	คุณสมบัติของแก๊สซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์	21
ตารางที่ 3.1	พารามิเตอร์ที่ถูกกำหนด	31
ตารางที่ 3.2	พารามิเตอร์ที่ถูกกำหนด	34
ตารางที่ 3.3	พารามิเตอร์ที่ถูกกำหนด	37
ตารางที่ 3.4	พารามิเตอร์ที่ถูกกำหนด	40
ตารางที่ 4.1	แสดงข้อมูลจำเพาะของ GIL	49
ตารางที่ 4.2	แสดงพิกัดของวัตถุทดสอบท่อ GIL	51



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากประเทศไทยในปัจจุบันมีการเจริญเติบโตของเศรษฐกิจ ภาคเกษตรกรรม และภาคอุตสาหกรรมเพิ่มสูงขึ้นในทุก ๆ ปี เช่น ห้างสรรพสินค้า ธุรกิจการท่องเที่ยว การผลิตสินค้าต่าง ๆ ฯลฯ เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง แน่นนอนว่าการที่มีผู้ใช้ไฟฟ้าจำนวนมากขึ้น การใช้ไฟฟ้าในประเทศมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้น จึงต้องจัดหาแหล่งผลิตไฟฟ้าตลอดจนขยายระบบส่งเพิ่มขึ้นเพื่อให้ส่งจ่ายไฟฟ้าได้ตามความต้องการของผู้ใช้ไฟฟ้าและมีคุณภาพตามมาตรฐานสากล

การเพิ่มหรือการขยาย สถานีไฟฟ้าแรงสูงในเขตตัวเมืองนั้นเป็นไปได้ยากเพราะที่ดินมีราคาสูง ซึ่งในปัจจุบันได้มีการแก้ปัญหา การใช้สถานีส่งจ่ายไฟฟ้าฉนวนอากาศ (Air Insulation Substation : AIS) ไปสร้างสถานีไฟฟ้าย่อยฉนวนแก๊ส (Gas Insulation Substation : GIS) แทน

สถานีไฟฟ้าย่อยฉนวนแก๊ส (GIS) นั้นได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในการแก้ไขปัญหาเรื่องข้อจำกัดทางด้านพื้นที่ในเขตตัวเมือง ข้อดีของสถานีไฟฟ้าชนิดนี้ คือเป็นสถานีไฟฟ้าย่อยแบบปิดซึ่งใช้พื้นที่ลดลงจากแบบเดิม (AIS) ถึง 90 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้ช่วยขจัดปัญหาขัดข้องอันเนื่องมาจากสัตว์ ตลอดจนลดผลกระทบจากธรรมชาติและปัญหาสิ่งแวดล้อม เช่น มลภาวะจากภายนอกที่เพิ่มมากขึ้นทุกวัน

อย่างไรก็ตามสถานีไฟฟ้าฉนวนแก๊สยังถือเป็นความรู้ที่ค่อนข้างใหม่สำหรับประเทศไทย แน่นนอนว่าหลายอย่างยังมีปัญหาติดขัดอยู่ ด้วยความที่เป็นสถานีไฟฟ้าย่อยฉนวนแก๊สถือเป็นอุปกรณ์ที่ไม่จำเป็นต้องทำการบำรุงรักษาบ่อยครั้ง เนื่องจากมีแก๊ส SF₆ ซึ่งมีค่าความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์สูงและในการบำรุงรักษาแต่ละครั้งค่อนข้างยากเพราะเป็นระบบปิด ซึ่งในความเป็นจริงแล้วตำแหน่งภายในของสถานีไฟฟ้าย่อยฉนวนแก๊ส มักจะพบปัญหาบริเวณ T Position ของ Disconnecting Switch หรือ Cable Termination End ซึ่งเกิดจากปรากฏการณ์ภายในต่าง ๆ เช่น การดิสชาร์จบางส่วน จะเข้าไปกระตุ้นทำให้เกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเกิดกระแสพัลส์ไหลเวียนอยู่ภายในทำให้นำไปสู่การเบรกดาวน์โดยสมบูรณ์ ดังนั้นจึงต้องอาศัยเครื่องมือเพิ่มเติมในการตรวจจับปรากฏการณ์ภายในต่าง ๆ โดยในที่นี้จะทำการตรวจจับปรากฏการณ์ภายในต่าง ๆ โดยใช้วิธี Conventional Methods เป็นการ

ตรวจวัดการเกิดความผิดปกติแบบออฟไลน์ซึ่งทำให้เกิดความแม่นยำสูงและมีสัญญาณรบกวนที่ต่ำเป็นการวัดในระบบปิดซึ่งจะสามารถควบคุมสัญญาณรบกวนต่าง ๆ ได้ดี

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. ศึกษาหลักการและขั้นตอนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ภายในสถานีไฟฟ้าย่อยฉนวนแก๊ส (GIS) และระบบส่งจ่ายฉนวนแก๊ส (GIL)
2. ศึกษาทฤษฎีการเบรกดาวน์ของแก๊ส SF₆ และอากาศในระบบการฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง
3. ศึกษาและทดสอบการเกิดจุดบกพร่องทางไฟฟ้าภายในท่อ GIL และตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนด้วยวิธี Conventional Methods

1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ

1. ศึกษาคุณสมบัติของฉนวนแก๊ส SF₆ และปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการใช้งานฉนวนแก๊ส SF₆
2. ศึกษาส่วนประกอบและทำความเข้าใจการทำงานในระบบสถานีไฟฟ้าย่อยฉนวนแก๊ส (GIS) และระบบส่งจ่ายฉนวนแก๊ส (GIL)
3. ศึกษาและทำความเข้าใจชนิดของจุดบกพร่องและรูปแบบผลการเกิดดิสชาร์จบางส่วน

1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงการ

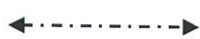
1. ศึกษาข้อมูล งานวิจัย ทฤษฎีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับสถานีไฟฟ้าย่อยฉนวนแก๊ส (GIS) และระบบส่งจ่ายฉนวนแก๊ส (GIL)
2. ศึกษาวิธีการใช้เครื่องมือที่ใช้ทำการทดสอบ รวมถึงศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการทดสอบรวมถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
3. วิเคราะห์สนามไฟฟ้าที่เกิดจากการทดสอบ
4. สรุปผลและจัดทำรูปเล่มปริยฐานิพนธ์

1.5 แผนการดำเนินงานโครงการ

ทางผู้จัดทำได้ทำการศึกษาค้นคว้าข้อมูล จากทฤษฎี และงานวิจัยต่าง ๆ ทั้งภายในประเทศ และต่างประเทศพร้อมทั้งดำเนินงานในส่วนของการใช้โปรแกรมจำลองสนามไฟฟ้า และการจัดเตรียม ทำอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ โดยระยะเวลาที่ใช้ในการดำเนินงานนั้น ครอบคลุมตั้งแต่เดือนสิงหาคม พ.ศ. 2561 ถึงเดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2562 โดยมีแผนการดำเนินงานดังตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงาน

การดำเนินงาน	ปีการศึกษา 2561									
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
1. ศึกษาข้อมูล งานวิจัย ทฤษฎีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับ สถานีไฟฟ้าย่อยฉนวนแก๊ส และระบบส่งจ่ายฉนวนแก๊ส										
2. ศึกษาวิธีการทดสอบ แบบ Conventional Methods และ Non-conventional Methods										
3. จัดเตรียมอุปกรณ์ที่ใช้ทำการทดสอบ รวมถึงศึกษา วิธีการใช้เครื่องมือต่าง ๆ										
4. ทำการทดสอบ และ วิเคราะห์ผลที่ได้จากการ ทดสอบ										
5. สรุปผลและจัดทำรูปเล่ม ปริญญานิพนธ์										



วางแผน



ปฏิบัติจริง

1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการ

1. นำความรู้เกี่ยวกับการเบรกดาวน์ของฉนวนแก๊สในสภาวะต่าง ๆ มาประยุกต์ใช้กับระบบไฟฟ้าแรงสูง
2. รวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับสถานีไฟฟ้าย่อยฉนวนแก๊สและหลักการซ่อมบำรุงรักษาเพื่อนำมาเป็นองค์ความรู้ในการศึกษาใช้ฉนวนแก๊ส SF₆ ในระบบไฟฟ้าแรงสูง
3. นำความรู้เกี่ยวกับคุณสมบัติของฉนวนแก๊สเพื่อนำเอาไปใช้ในการตรวจสอบและป้องกันปัญหาที่พบในสถานีไฟฟ้าย่อยฉนวนแก๊ส (GIS) และระบบส่งจ่ายฉนวนแก๊ส (GIL)



บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

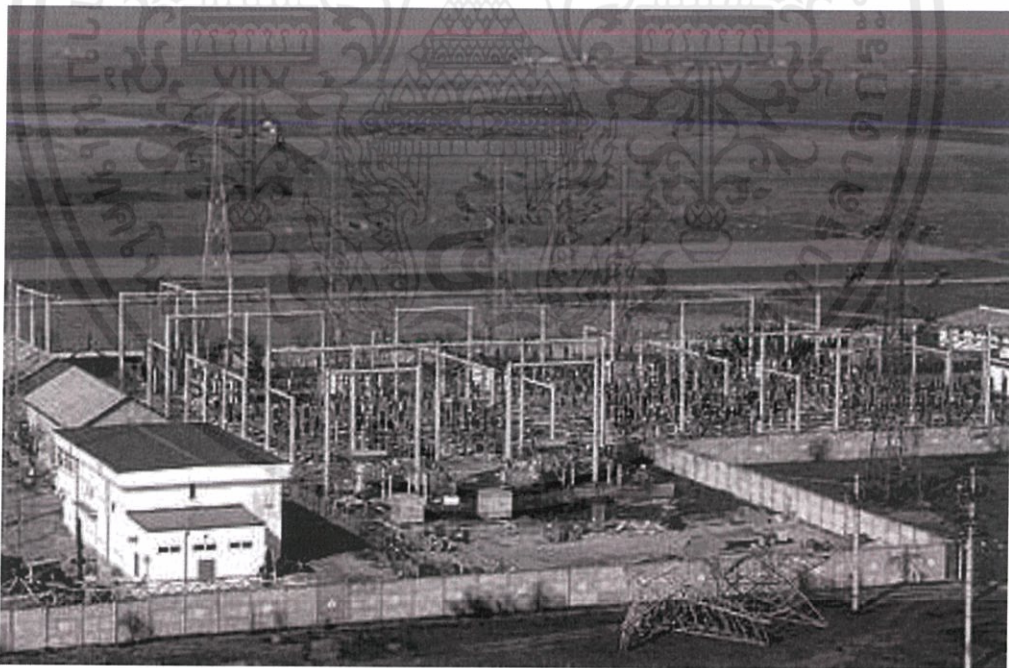
ในส่วนนี้จะกล่าวถึงความรู้พื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับระบบสถานีไฟฟ้าฉนวนแก๊ส รวมถึงข้อดี-ข้อเสีย หลักการทำงาน ส่วนประกอบ ปัญหาที่พบไม่ว่าจะเป็นเรื่องการเบรกดาวนหรือการดิสชาร์จบางส่วน จวบจนความรู้พื้นฐานใช้ในการตรวจจัดการเกิดดิสชาร์จ

2.1 สถานีไฟฟ้าย่อย [1]

สถานีไฟฟ้าย่อย (Electrical Substation) เป็นส่วนหนึ่งของระบบจำหน่ายไฟฟ้า ที่มีหน้าที่หลัก คือ การรับกำลังไฟฟ้าจากระบบสายส่ง ปรับลดระดับแรงดันลง แล้วส่งต่อไฟฟ้าสู่ระบบสายส่งย่อยต่อไป โดยหากแบ่งสถานีไฟฟ้าย่อยออกโดยใช้ชนิดของฉนวนที่ใช้ในการดับอาร์คเป็นเกณฑ์แล้วจะสามารถแบ่งได้ 2 ชนิด คือ

2.1.1 สถานีไฟฟ้าแรงสูงแบบใช้ฉนวนอากาศ (Air Insulated Substation : AIS)[1]

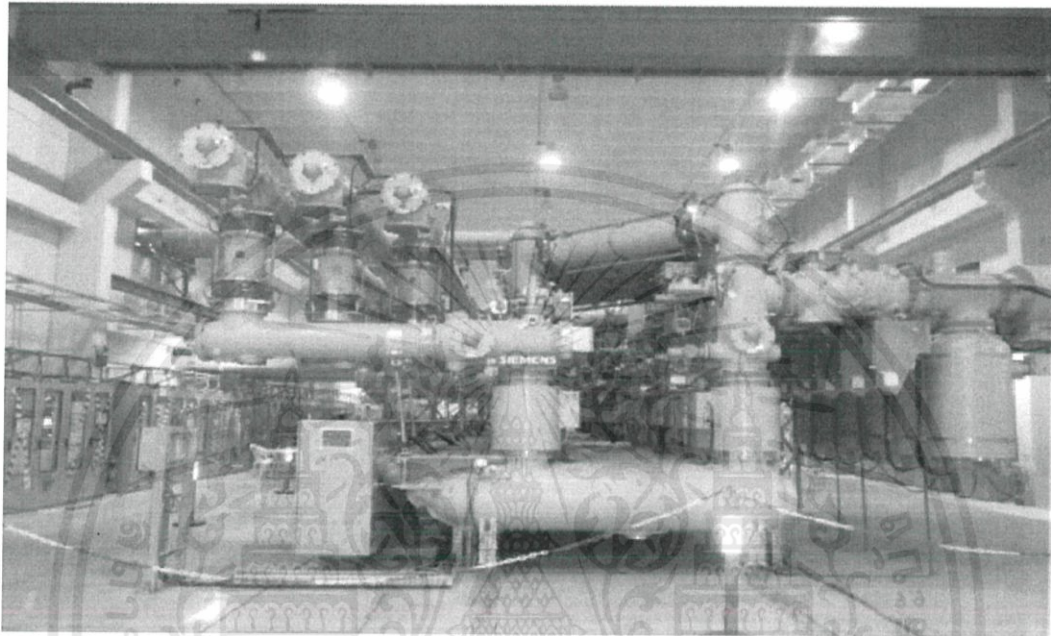
เป็นสถานีชนิดที่นิยมใช้กันตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน เนื่องจากมีราคาค่าก่อสร้างที่ถูก โดยอุปกรณ์หลัก ๆ ในสถานีไฟฟ้านั้นจะติดตั้งอยู่บนโครงสร้างเหล็กเพื่อให้ค่าก่อสร้างสถานีแบบนี้ถูก จึงเป็นการที่ต้องใช้พื้นที่กว้างใหญ่ในการสร้าง



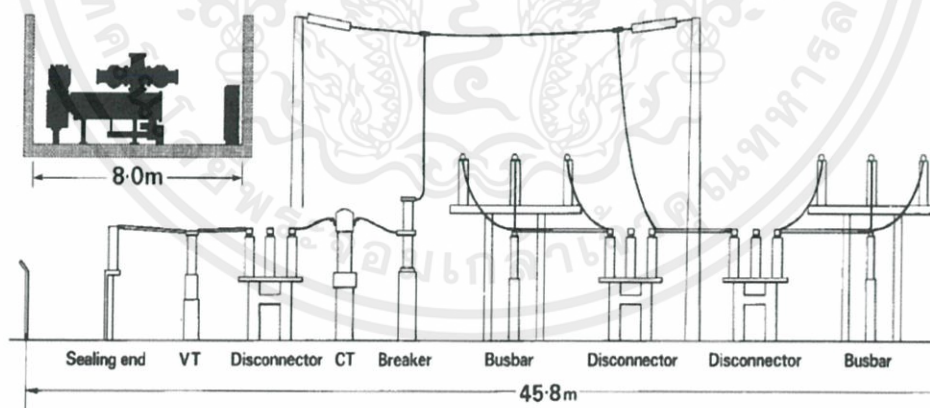
รูปที่ 2.1 สถานีไฟฟ้าแรงสูงแบบใช้ฉนวนอากาศ (AIS)

2.1.2 สถานีไฟฟ้าแรงสูงแบบใช้ฉนวนแก๊ส (Gas Insulated Substation : GIS)[2]

เป็นสถานีที่เปลี่ยนจากการใช้อากาศเป็นแก๊ส SF₆ เปลี่ยนจากการติดตั้งบนโครงเหล็กมาติดตั้งในท่อ เนื่องจากแก๊ส SF₆ นั้นสามารถทนแรงดันเบรกดาวน์ได้ดีกว่าอากาศ จึงสามารถลดระยะในการติดตั้งอุปกรณ์ต่าง ๆ ลงมาได้ ส่งผลให้ขนาดของสถานีเล็กลง ใช้พื้นที่น้อยลงเกือบ 80 % ซึ่งสถานีไฟฟ้าแรงสูงประเภทนี้มีข้อเสียในเรื่องของราคาค่าก่อสร้าง ค่าท่อ ค่าแก๊สต่าง ๆ นั้นต้องเพิ่มขึ้นแทน



รูปที่ 2.2 สถานีไฟฟ้าแรงสูงแบบใช้ฉนวนแก๊ส (GIS)[2]



รูปที่ 2.3 เปรียบเทียบขนาดระหว่างสถานีแบบ AIS และ GIS

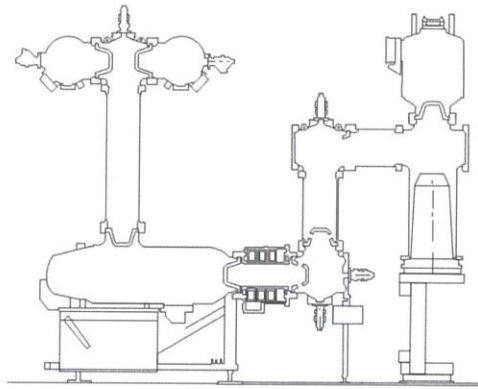
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 ตารางเปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสียของสถานี AIS และ GIS[2]

สถานีไฟฟ้า AIS ข้อดี	สถานีไฟฟ้า GIS ข้อเสีย
อุปกรณ์มีราคาถูกและหาเปลี่ยนได้ง่าย เมื่อเกิดความเสียหายสามารถซื้อมาทดแทนได้ง่าย	อุปกรณ์มีราคาแพงกว่า สามารถหาซื้อได้ยาก
ขยายระบบได้ง่ายกว่า ไม่จำเป็นต้องปิดระบบ เมื่อมีการขยายระบบ	มีการขยายระบบที่ยาก หลังจากที่ย้ายระบบ ต้องมีการดับไฟเพื่อตรวจสอบ Dielectric
เวลาที่มีปัญหาจะเข้าไปแก้ไขได้ง่ายและรวดเร็วกว่า	อุปกรณ์อยู่ภายในท่อ เมื่อเวลาเกิดปัญหาจะใช้เวลาในการแก้ไขที่นานกว่า
ข้อเสีย	ข้อดี
ใช้พื้นที่มาก จึงไม่เหมาะกับการติดตั้งในตัวเมือง หรือในพื้นที่ ที่มีราคาแพง	ใช้พื้นที่ในการติดตั้งน้อย เหมาะกับทุกสถานที่
ความปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติงานต่ำ และได้รับผลกระทบจากสภาพแวดล้อมสูง	มีความปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติงานสูง และได้รับผลกระทบจากสภาพแวดล้อมต่ำ
ใช้เวลาในการติดตั้งนาน	ใช้เวลาในการติดตั้งรวดเร็ว

2.2 สถานีไฟฟ้าแรงสูงแบบใช้ฉนวนแก๊ส [2]

ด้วยความที่เป็นสถานีไฟฟ้าแรงสูงที่มีการใช้พื้นที่ของสถานีน้อย และเป็นสถานีแบบปิด จึงเหมาะกับการติดตั้งใช้งานในทุกสภาพแวดล้อม ปลอดภัยจากสิ่งรบกวนภายนอก มีความน่าเชื่อถือสูง ซึ่งหากเปรียบเทียบกับสถานีไฟฟ้าแบบใช้ฉนวนอากาศจะพบว่า อุปกรณ์ส่วนใหญ่เหมือนกัน แต่จะต่างที่ขนาดและรูปร่างในการเชื่อมต่อคือ สถานีไฟฟ้าแบบใช้ฉนวนอากาศจะมีการเชื่อมต่อกันผ่านโครงเหล็ก แต่ในชนิดแก๊สนี้ อุปกรณ์ต่าง ๆ จะถูกบรรจุภายในตัวถัง (Enclosure) และมีการเชื่อมต่อกันผ่านท่อตัวนำ

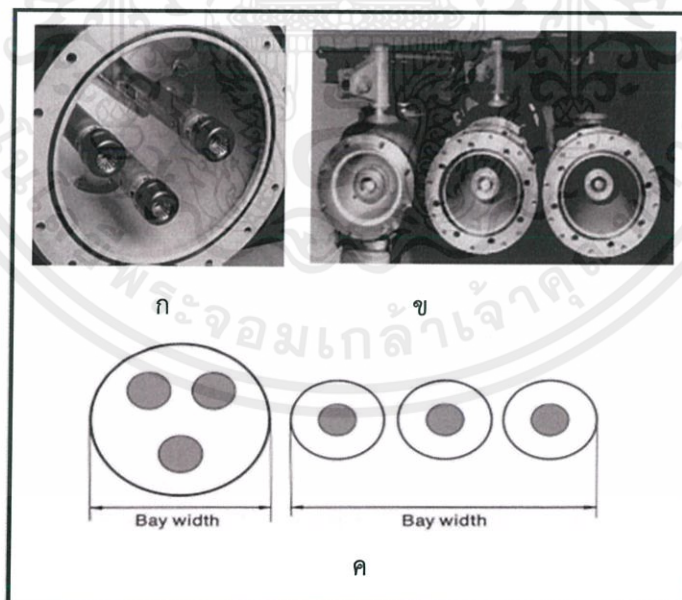


รูปที่ 2.4 ส่วนประกอบภายในของสถานีไฟฟ้าย่อยแรงสูงฉนวนแก๊ส

2.2.1 ตัวถัง (Enclosure)

อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ห่อหุ้มส่วนต่าง ๆ ของ GIS โดยทำจากอลูมิเนียมผสม (Aluminum alloy) หรือเหล็ก (Steel) บริเวณช่องว่างภายในบรรจุแก๊ส SF₆ ไว้ เวลาใช้งานจะมีกระแสเหนี่ยวนำเกิดขึ้น 80-100% ของกระแสที่ไหลในตัวถัง เพราะฉะนั้นตัวถังทั้งหมดจะต้องลงดิน

ตัวถังโลหะของ GIS แบ่งตามลักษณะโครงสร้างได้ เป็น 2 ประเภท คือ แบบที่บรรจุสับบาร์หรืออุปกรณ์ทั้ง 3 เฟส อยู่ในตัวถังเดียวกัน เรียกว่า ตัวถังชนิด 3 เฟส (Three Phase Enclosure) ส่วนอีกประเภทหนึ่งคือ แต่ละท่อหรือตัวถังจะบรรจุอุปกรณ์เพียงเฟสเดียวเท่านั้น เรียกว่า ตัวถังชนิดเฟสเดียว (Single Phase Enclosure)



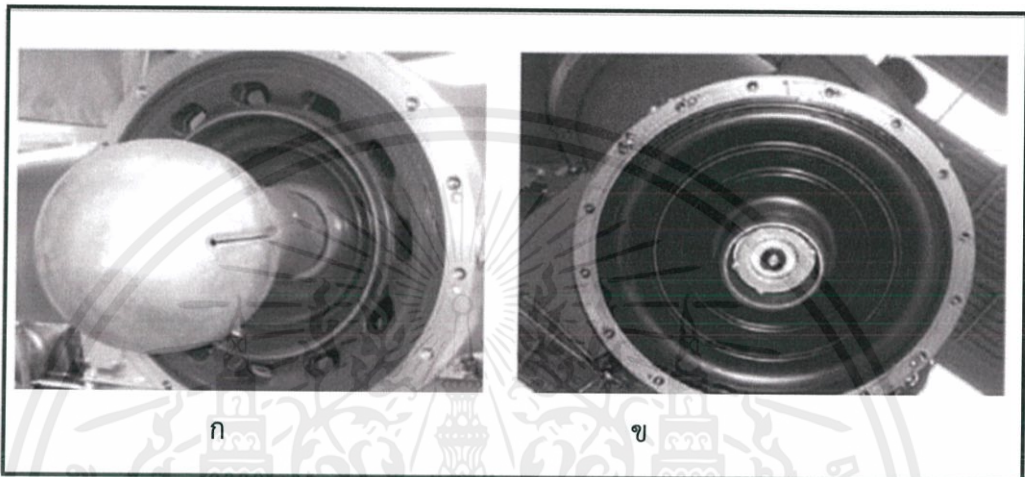
รูปที่ 2.5 Enclosure

เมื่อ ก) ตัวถังแบบ 3 เฟส ข) ตัวถังแบบ 1 เฟส ค) เป็นการเปรียบเทียบ Diameter

2.2.2 โคน (Insulating Cone)

ทำจาก Epoxy resin วัสดุที่มีความเป็นฉนวนสูง ทนทานต่ออากาศ ความร้อน และปราศจากโพรงอากาศภายใน โดยโคนนั้นจะแบ่งหน้าที่การใช้งานออกเป็น 2 ชนิด

- แบบเปิด (Open Cone) ทำหน้าที่รองรับอุปกรณ์ต่าง ๆ ภายใน GIS เช่น ตัวนำ
- แบบปิด (Closed Cone) นอกจากทำหน้าที่รองรับอุปกรณ์ภายในแล้วยังสามารถเป็นตัวแบ่งส่วน แก๊สภายใน GIS ด้วย

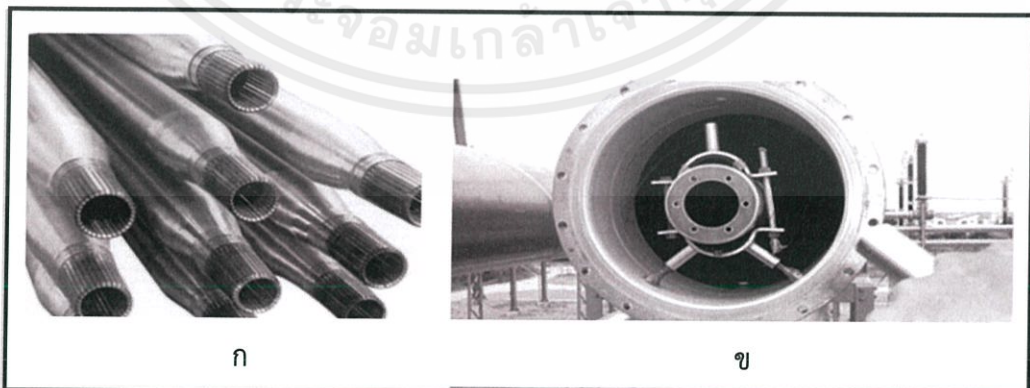


รูปที่ 2.6 Insulating Cone

เมื่อ ก) เป็นชนิด Open Cone ข) เป็นชนิด Closed Cone

2.2.3 ตัวนำ (Conductor)

มีหน้าที่นำกระแสไฟฟ้าภายใน GIS โดยทั่วไปจะทำมาจากอลูมิเนียม การออกแบบจะมีขนาดตามพิกัดกระแสต่อเนื่อง โดยตัวนำที่ปลายนั้นมักเคลือบด้วย Silver หรือ Chromium Copper เพื่อเพิ่มความนำไฟฟ้าบริเวณรอยต่อ การต่อกับอุปกรณ์มีทั้งแบบยึดกันด้วย bolt และ แบบเสียบ (plug-in)



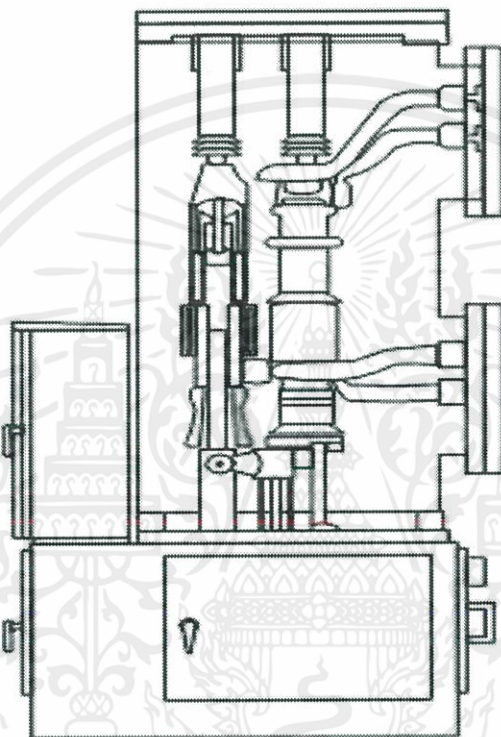
รูปที่ 2.7 Conductor

เมื่อ ก) ตัวนำแบบเสียบ ข) ตัวนำแบบยึดด้วย Bolts

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

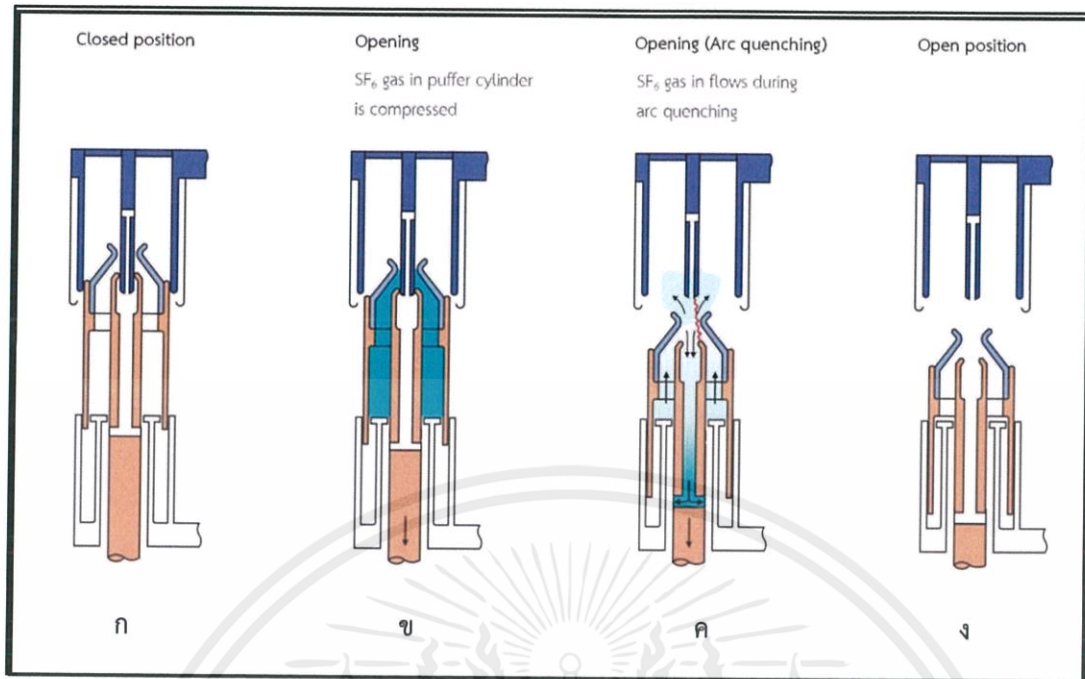
2.2.4 เซอร์กิตเบรกเกอร์ (Circuit breaker)

ทำหน้าที่เป็นฉนวนกลาง ช่วยดับอาร์ค โดยปกติแล้ว compartment ของเซอร์กิตเบรกเกอร์ จะใช้แรงดันแก๊สสูงกว่า compartment อื่น ๆ (0.7 MPa to 0.8 MPa) เซอร์กิตเบรกเกอร์ที่ใช้ใน GIS นั้นจะเป็นชนิดเดียวกับถังแบบไม่มีไฟ (dead tank) โดยทั่วไปจะใช้ SF₆ เป็นทั้งตัวฉนวนและดับอาร์ค ดังนั้นตรงส่วนนี้ จึงมีค่าความดันของ SF₆ มากกว่าส่วนอื่นซึ่งเซอร์กิตเบรกเกอร์จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือหน้าสัมผัสที่เคลื่อนที่ได้ (Moving Contact) และ หน้าสัมผัสที่ไม่เคลื่อนที่ (Fixed Contact)



รูปที่ 2.8 ส่วนประกอบภายใน Circuit breaker

หลักการทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์ คือ ปกติส่วน Moving Contact จะติดกับ Fixed Contact แต่เมื่อต้องการตัดกระแสจะใช้ชุด Moving Contact เพื่อยืดล้าอาร์คออก จากนั้นใช้ SF₆ เป็นตัวดับล้าอาร์คเพื่อตัดกระแส



รูปที่ 2.9 แสดงหลักการทำงานของ Circuit breaker

เมื่อ ก) เซอร์คิตเบรกเกอร์อยู่ในตำแหน่ง Closed

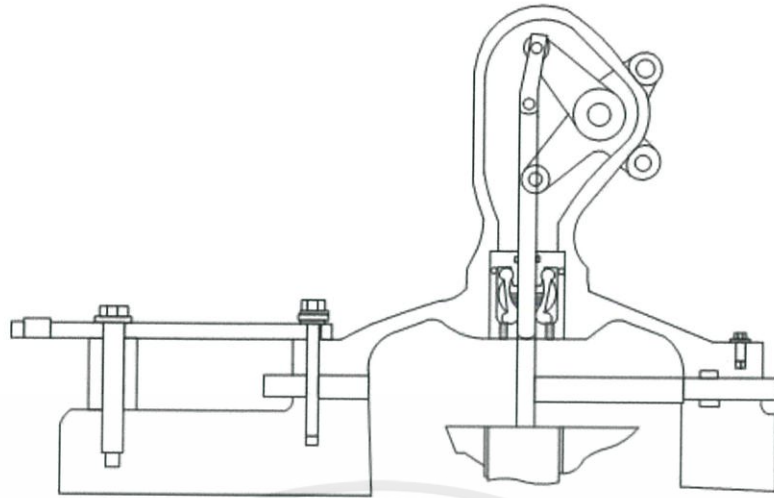
ข) เซอร์คิตเบรกเกอร์กำลังเปิด และ มีการบีบอัดแก๊ส SF₆

ค) เซอร์คิตเบรกเกอร์กำลังเปิด SF₆ เป็นตัวดับล้าอาร์ค

ง) เซอร์คิตเบรกเกอร์กลับมาอยู่ในตำแหน่งเปิด

2.2.5 ไบมีดกราวด์ (Ground Switch)

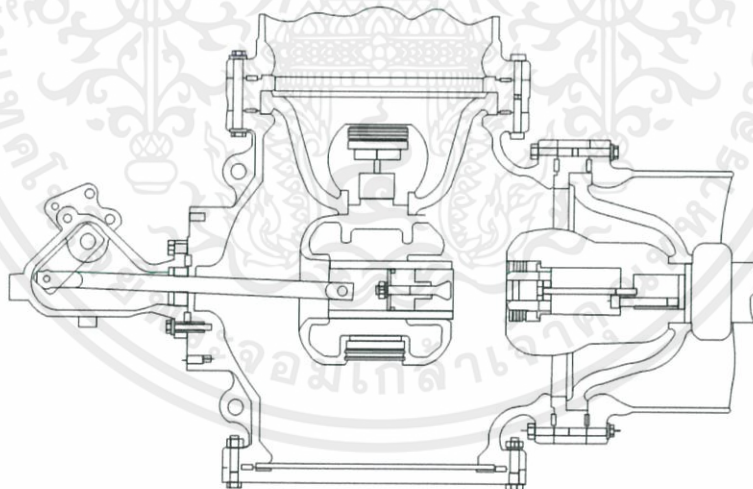
เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับงานบำรุงรักษา มีจุดประสงค์เพื่อลดประจุค้างอยู่ หรือแรงดันเหนี่ยวนำ เพื่อเพิ่มความปลอดภัยของผู้ปฏิบัติงาน โดยไบมีดกราวด์มี 2 ชนิด แบบธรรมดาและแบบความเร็วสูง โดยทั้ง 2 แบบจะเปิดด้วยความเร็วเท่ากัน แต่แบบความเร็วสูงจะมีกลไกชาร์จ ทำให้ปิดได้รวดเร็วกว่า โดยทั่วไปจะติดตั้งแบบความเร็วสูงเฉพาะส่วนปลายเบย์ที่ต่อออกไปยังสายส่งเท่านั้น



รูปที่ 2.10 ส่วนประกอบของใบมีดกราวด์

2.2.6 ใบมีดตัดตอน (Disconnected Switch)

ใช้สำหรับงานบำรุงรักษา โดยเมื่อใช้งานจะทำการแยกเซอร์กิตเบรกเกอร์ ตัวนำ หรือสายส่ง ออกจากระบบ แม้ใบมีดตัดตอนจะถูกใช้งานขณะที่ไม่มีกระแสไหลอยู่แต่ตัวใบมีดตัดตอนนั้น ตัดตอนกระแสที่เกิดจากการชาร์จประจุที่เกิดจากค่าคาร์ปาซิแตนซ์ได้ด้วย

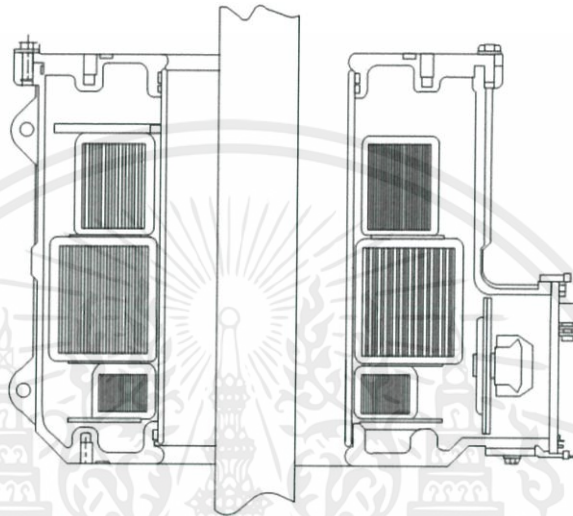


รูปที่ 2.11 ส่วนประกอบของใบมีดตัดตอน

2.2.7 หม้อแปลงวัดกระแส (Current Transformer)

อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ลดระดับกระแสฝั่งปฐมภูมิให้น้อยลงเพื่อใช้กับเครื่องมือวัด และใช้กับระบบป้องกัน โดยทั่วไปสอดท่อตัวนำ ซึ่งถือเป็นขดลวดปฐมภูมิ 1 รอบ ลอดผ่านแกนเหล็กของหม้อแปลงวัดกระแสชนิด Ring Type หากแบ่งประเภทโดยใช้รูปแบบเป็นแกนจะแบ่งได้เป็น 2 ชนิด

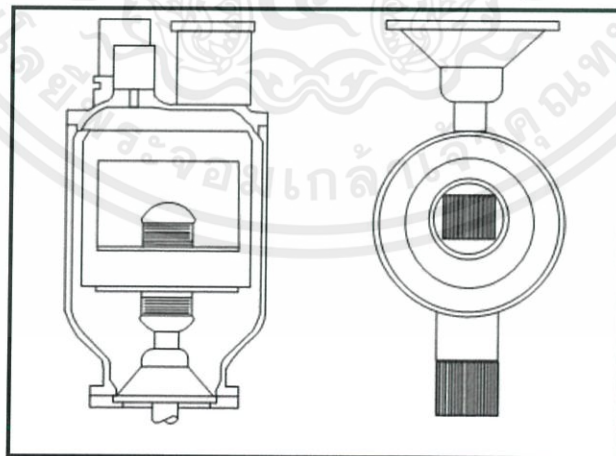
- หากติดตั้งภายในตัวถัง จะสามารถใช้ได้กับท่อทั้งแบบ 1 เฟส และ 3 เฟส
- ติดตั้งภายนอกตัวถังชนิดนี้ใช้ได้กับท่อเฉพาะ 1 เฟส



รูปที่ 2.12 ส่วนประกอบของหม้อแปลงวัดกระแส

2.2.8 หม้อแปลงวัดแรงดัน (Voltage Transformer)

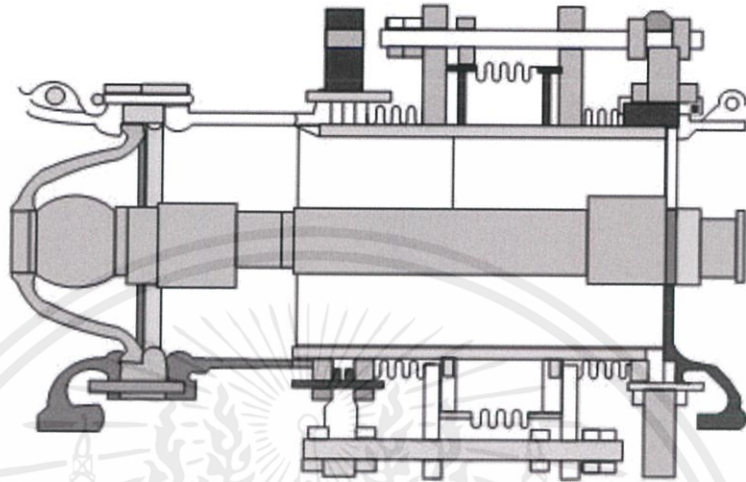
หม้อแปลงวัดแรงดันนั้นมีความคล้ายคลึงกับโวลต์เทจตีไวเดอร์ในสถานีแบบ AIS โดยตัวหม้อแปลงวัดแรงดันนั้นต่างจากหม้อแปลงวัดกระแส คือมีเฉพาะชนิดบรรจุในตัวถัง



รูปที่ 2.13 ส่วนประกอบของหม้อแปลงวัดแรงดัน

2.2.9 อุปกรณ์ขยาย (Expansion bellows)

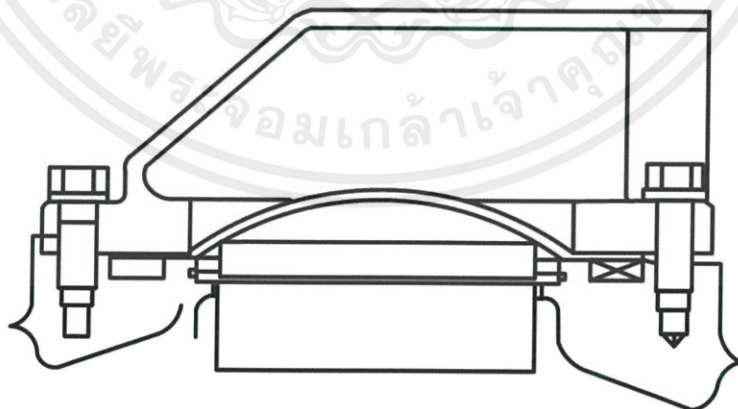
อุปกรณ์ป้องกันความเสียหายจากการขยายตัวเนื่องจากความร้อน ทำจาก Stainless ทำงานเมื่อได้รับความร้อนอุปกรณ์จะขยายตัวเพื่อลดแรงที่กระทำต่อส่วนต่าง ๆ ทำให้ท่อส่วนอื่นไม่ขยายตัวจนปริออกมาเมื่อได้รับความร้อน



รูปที่ 2.14 แสดงส่วนประกอบของอุปกรณ์ขยาย

2.2.10 อุปกรณ์ระบายแรงดันเกิน (Pressure relief)

ทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้อุปกรณ์เกิดการระเบิดเนื่องจากแรงดันเกินของแก๊ส 2 ส่วนคือ ส่วนควบคุมทิศทาง และ Rupture disc มีหลักการทำงานคือ เมื่อมีแก๊สแรงดันสูงขึ้น ก่อนตัวถังจะระเบิด Rupture disc จะพังก่อนเพื่อระบายแรงดันออกไปตามส่วนควบคุมทิศทาง โดยทั่วไปนั้นอุปกรณ์ระบายแรงดันเกินจะติดตั้งในทุก Compartment

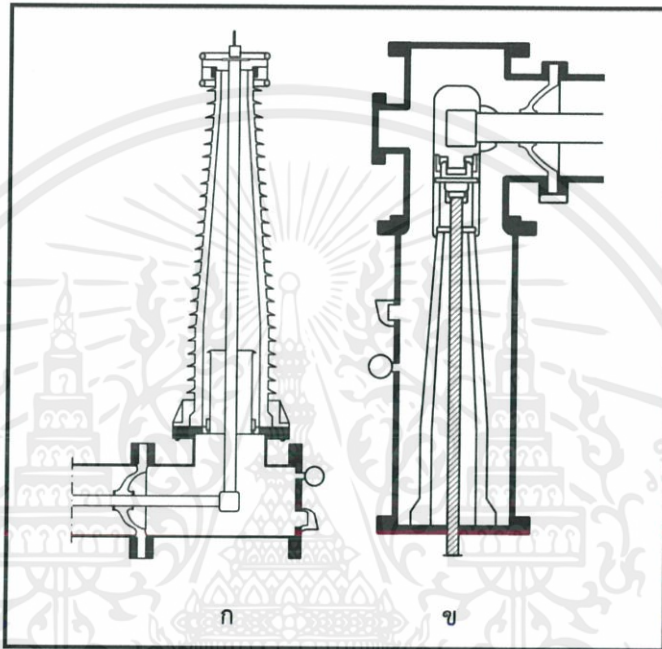


รูปที่ 2.15 แสดงส่วนประกอบของอุปกรณ์ระบายแรงดันเกิน

2.2.11 External connection

เนื่องจาก GIS นั้นเป็นศูนย์กลางของการสวิชชิงต่าง ๆ ดังนั้นจึงต้องมีหัวต่อเพื่อรองรับการใช้งาน SF_6 ไปใช้กับอุปกรณ์ต่าง ๆ ด้วยเช่น

- SF_6 / Air Bushing เป็นช่วงเปลี่ยนผ่านระหว่างฉนวน SF_6 กับฉนวนอากาศมีไว้สำหรับการต่อบูชชิงต่าง ๆ
- Cable Terminator เป็นช่วงเปลี่ยนผ่านระหว่างฉนวน SF_6 กับ XLPE หรือฉนวนน้ำมัน เพื่อใช้กับการต่อสายเคเบิลต่าง ๆ



รูปที่ 2.16 แสดงส่วนประกอบของ External connection
เมื่อ ก) SF_6 /Air Bushing ข) Cable terminator

2.2.12 Metal-Enclosed Surge Arresters

ชนิดของ Arrester ที่ใช้จะเป็นแบบซิงค์ออกไซด์ซึ่งเหมาะสมเมื่อถูกห่อหุ้มโดย SF_6 แรงดันเกินจากฟ้าผ่าสามารถเข้ามาโดยผ่านทาง SF_6 gas-to-air bushing ซึ่งเป็นส่วนที่ต่อกับอุปกรณ์ที่ใช้ฉนวนอากาศ การติดตั้งจะติดตั้งขนานกับ SF_6 gas-air bushing เพื่อป้องกันแรงดันเกิน นอกจากนี้ surge arrester ยังสามารถใช้ป้องกันเคเบิลใต้ดินโดยการนำไปติดตั้งที่ SF_6 cable sealing end

2.3 Gas Insulated Transmission Line (GIL) [2]

ปัจจุบันระบบส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงนั้น สามารถส่งพลังงานได้เป็น 3 รูปแบบหลัก ๆ คือ

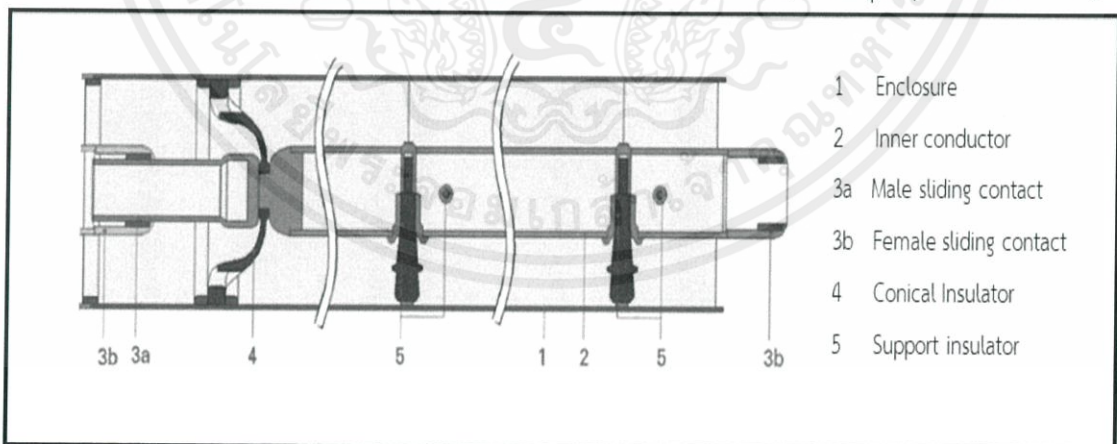
- Overhead Line (OHL)
- Cable
- Gas-Insulate Transmission Line (GIL)

โดยส่วนมากระบบส่งจ่ายที่มีระยะทางไกล ๆ จะใช้ OHL ส่งจ่ายเนื่องด้วยเหตุผลทางด้านต้นทุนในการสร้างที่ต่ำที่สุด แต่จะมีข้อเสียในเรื่องของความน่าเชื่อถือ ของระบบไฟฟ้ากำลังที่มีความน่าเชื่อถือต่ำที่สุด ส่วน Cable ส่วนใหญ่จะใช้กับระบบส่งจ่ายในเมือง แต่ปัจจุบัน GIL เริ่มเข้ามามีบทบาท และถูกนำเอามาใช้ในระบบไฟฟ้ากำลังมากขึ้น

2.3.1 ส่วนประกอบของ GIL [2]

ส่วนประกอบของ GIL นั้นมีความคล้ายคลึงกับ GIS อย่างมาก แต่ถ้าหากเปรียบเทียบกันแล้วนั้น GIL มีความซับซ้อนน้อยกว่า โดยที่ GIL จะมีรูปร่างคล้ายกับส่วนที่เป็นบัสบาร์ของ GIS คือมีตัวนำแรงดันสูงมีฉนวนโค่น มี Enclosure ที่ต่อลงดิน มีส่วนของ Sliding contact และที่สำคัญพื้นที่ภายในจะมีแก๊ส SF₆ เต็มเต็มในพื้นที่ว่างภายในทำหน้าที่เป็นฉนวนเหมือน GIS

- Insulator ใน GIL นั้นมี 2 ชนิดคือ Conical insulator กับ Support insulator โดยทั้ง 2 ทำหน้าที่เหมือน Closed cone กับ Open cone ใน GIS ตามลำดับ
- Enclosure ทำจาก Aluminum alloy และ steel ทำหน้าที่ห่อหุ้มอุปกรณ์ มีปัญหาจากกระแสเหนี่ยวนำ จึงต้องต่อลงดิน เหมือน GIS
- Sliding contract ทำหน้าที่เหมือนส่วน Expansion bellows ใน GIS คือทำหน้าที่ลดความเสียหายจากการขยายตัวของท่อเนื่องจากความร้อน (ติดในทุก ๆ ช่วง 100 เมตร)



รูปที่ 2.17 โครงสร้างภายในของ GIL [1]

2.3.2 ข้อมูลพื้นฐานของ GIL เมื่อเปรียบเทียบกับระบบ OHL กับ XLPE

- ค่าความสูญเสียทางไฟฟ้าโดยรวมนั้น ต่ำกว่า OHL
- GIL นั้นไม่มีนัยสำคัญของการสูญเสียไดอิเล็กทริก
- GIL สามารถนำมาใช้งานได้กับทุกสภาพแวดล้อมเช่น สามารถนำ GIL ฝังดินโดยตรงปราศจากการใช้ cooling ได้ถึงพิกัด 2000 MVA หรือมากกว่าที่ 550 kV
- แม้ว่า GIL จะมีค่าคาปาซิแตนซ์มากกว่า OHL หลายเท่า แต่ยังคงน้อยกว่า XLPE
- สภาพแวดล้อมภายนอก เช่น ฝน หิมะ หรือมลภาวะในอากาศจะไม่ส่งผลกระทบต่อส่วนประกอบภายในของ GIL และยังมีโอกาสเสี่ยงที่จะเกิดการไฟไหม้ต่ำ เพราะส่วนประกอบต่าง ๆ ใน GIL นั้นไม่ติดไฟ
- GIL มีความยืดหยุ่นสูงมากสามารถต่อได้ในทุกมุมทุกองศา
- GIL มีการปล่อยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าน้อย
- เมื่อเทียบกับ OHL และ XLPE ทำให้ GIL มีความน่าเชื่อถือในระบบส่งจ่ายสูงกว่า

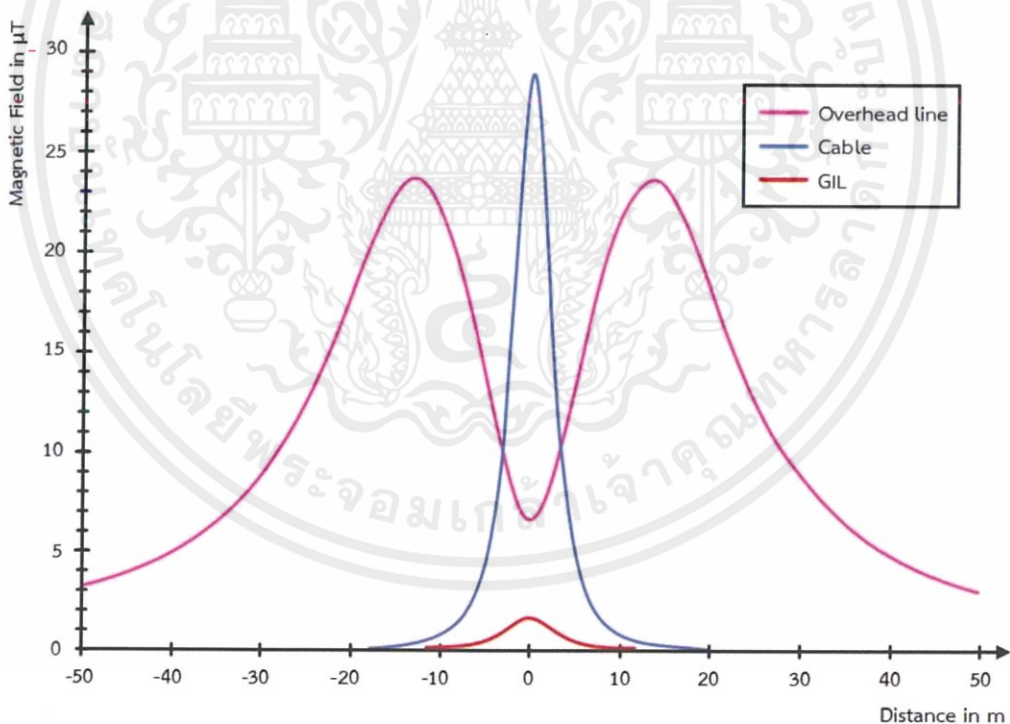
ตารางที่ 2.2 ตารางเปรียบเทียบ GIL, OHL และ XLPE cable [2]

ข้อมูลต่าง ๆ	GIL	OHL	XLPE cable (2/phase)
พิกัดกระแส	3000	3000	3000
การสูญเสียในสายส่ง (W/m) ที่ 3000 A	180	540	166
การสูญเสียไดอิเล็กทริก (W/m)	-	24	15
การสูญเสียทั้งหมด (W/m)	180	542.4	181
ความต้านทาน AC ($\mu\Omega/m$)	6.7	20	6.0
ความเหนี่ยวนำ (nH/m)	162	892	189
ความจุไฟฟ้า (pF/m)	68.6	13	426
กับดักเสิร์จ (Ω)	48.6	263	21

2.3.3 ปัญหาเกี่ยวกับการปล่อยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของ GIL[2]

สนามแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นปรากฏการณ์พื้นฐานที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง และมีความจำเป็นต้องมีการจัดการให้ผลกระทบของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีผลต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง เพื่อให้มีความน่าเชื่อถือ และช่วยรักษาอายุการใช้งานของอุปกรณ์แรงสูงนั้น ๆ ซึ่งผลกระทบของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทได้แก่

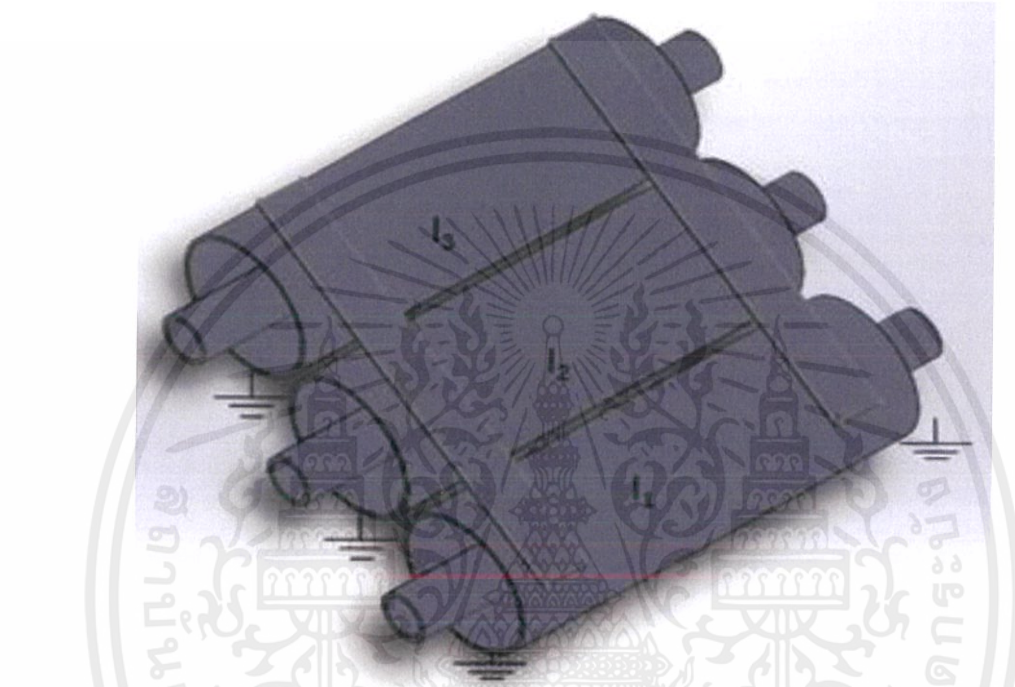
- ผลกระทบต่ออุปกรณ์ จะใช้ EMC (Electromagnetic Compatibility) บอกความสามารถของอุปกรณ์ที่สามารถทำงานได้โดยที่ไม่ก่อให้เกิดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า และในขณะเดียวกันต้องสามารถทนต่อการถูกรบกวนจากปรากฏการณ์ทางแม่เหล็กไฟฟ้าจากภายนอก
- ผลกระทบต่อมนุษย์ โดยทั่วไปสนามแม่เหล็กของโลกที่มีอยู่ในธรรมชาติเป็นค่าคงที่ที่เกิดจากผลของขั้วเหนือและขั้วใต้ของโลก มีค่าอยู่ที่ 40 μT ส่วนค่าสนามไฟฟ้าที่มีอยู่ในธรรมชาติจะ ขึ้นอยู่กับสภาพอากาศโดยมีค่าเท่า 20 kV/cm ถ้าหากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของอุปกรณ์มีค่ามากกว่านี้ก็จะทำให้เกิดอันตรายแก่ผู้ปฏิบัติงานได้



รูปที่ 2.18 การเปรียบเทียบความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กในระบบ OHL, Cable, และ GIL [2]

2.3.4 กระแสเหนี่ยวนำทิศทางตรงข้ามที่ตัวถัง GIL [2]

ในปัจจุบันมีเทคโนโลยีที่มีความก้าวหน้า จึงมีการออกแบบให้ผลของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้ากำลังมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด ซึ่งมีการออกแบบให้มีการเหนี่ยวนำเกิดขึ้นที่ตัวถังของ GIL เพื่อสร้างกระแสเหนี่ยวนำในทิศทางตรงข้ามกับกระแสในตัวนำภายในท่อ GIL โดยวิธีการนี้จะช่วยลดความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กที่จะออกไปภายนอกของตัวถัง GIL ได้นั่นเอง

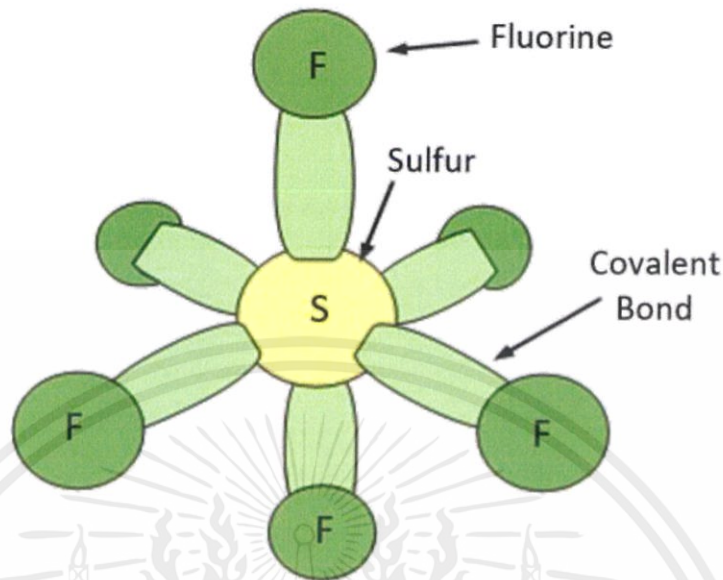


รูปที่ 2.19 ระบบการต่อสะพานกราวด์ของระบบ GIL 3 เฟส [2]

เนื่องจากมีกระแสเหนี่ยวนำที่มีทิศทางตรงข้ามกับกระแสภายในตัวนำเกิดขึ้นที่ตัวถัง จึงมีการต่อสะพานกราวด์ทั้ง 3 เฟส ทั้งหัวและท้ายทั้ง 2 ด้าน เพื่อให้กระแสรวมสุทธิที่ตัวถังเป็นศูนย์จากการรวมกันทางเวกเตอร์ของกระแสทั้ง 3 เฟส ที่มีมุมเฟสห่างกันเฟสละ 120° ระยะเวลาต่อระบบกราวด์หัวท้ายจะเป็นระยะที่เหมาะสมและเป็นระบบต่อลงดินโดยตรงเพื่อให้สนามไฟฟ้ามีค่าเท่ากับศูนย์ โดยปกติแล้วกระแสเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจะมีค่าเท่ากับ 80-85 เปอร์เซ็นต์ของกระแสในตัวนำ

2.4 แก๊สซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ (SF₆)

2.4.1 คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพ[3]



รูปที่ 2.20 โครงสร้างของซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์

การจัดเรียงอิเล็กตรอนและโครงสร้างของแก๊ส SF₆ ทำให้มีเสถียรภาพทางเคมีและความร้อนสูง โครงสร้างของแก๊สนี้สามารถทนต่ออุณหภูมิโดยไม่เกิดการสลายตัวของแก๊สได้ถึง 500 องศาเซลเซียส ติดไฟยาก ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่เป็นพิษ ไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำ (H₂O) และคลอไรด์ (Cl) อีกทั้งไม่ทำปฏิกิริยากับกรดด้วยแก๊ส SF₆ เป็นหนึ่งในแก๊สที่หนักที่สุด ความหนาแน่น ณ อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ความดัน 1 bar คือประมาณ 6.139 kg / m³ มากกว่าอากาศที่สภาวะเดียวกันประมาณ 5 เท่า น้ำหนักโมเลกุลของแก๊สนี้ คือ 146.06 มีอุณหภูมิใช้งานในช่วงระหว่าง -25 ถึง +50 องศาเซลเซียส การนำความร้อนของแก๊สนี้ต่ำกว่าอากาศแต่ยังคงเหมาะสำหรับการระบายความร้อนในเซอร์กิตเบรกเกอร์ซึ่งเป็นเพราะในระหว่างการแยกออกจากกันของโมเลกุล SF₆ ในขณะเกิดอาร์คโมเลกุลนี้ได้ดูดซับความร้อนจำนวนมากซึ่งความร้อนนี้จะถูกปล่อยออกมาเมื่อโมเลกุลมีการรวมตัวกันที่รอบนอกของล่ออาร์คโดยกระบวนการนี้จะช่วยให้แก๊สนี้ระบายความร้อนได้อย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิสูงถึงแม้ว่าการนำความร้อนของ SF₆ จะไม่สูงมาก

2.4.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้า[3]

แก๊ส SF₆ เป็นแก๊สที่เป็นประจุไฟฟ้าลบ มีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีสูง ทำให้สามารถดูดซับอิเล็กตรอนอิสระที่เกิดจาก ไอออนไนเซชันได้จึงเท่ากับเป็นการระงับการเกิดเบรกดาวน์ไม่ให้เกิดขึ้น หากจะทำให้เกิดเบรกดาวน์ได้ก็ต้องมีสนามไฟฟ้าสูงกว่าปกติเพื่อที่จะปลดปล่อยอิเล็กตรอนที่เกาะอยู่นั้นให้หลุดออกมาสร้างอะวาลานซ์ไปตามกระบวนการเกิดเบรกดาวน์ กล่าวคือ แก๊สไฟฟ้าลบบจะมี ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าแก๊สธรรมชาติที่โมเลกุลไม่สามารถจับอิเล็กตรอนได้ ในวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงจึงใช้คุณสมบัติของแก๊สประเภทนี้ไปใช้ประโยชน์ในการฉนวนอุปกรณ์และระบบต่าง ๆ ซึ่งในปัจจุบันแก๊สที่นิยมใช้ในอุปกรณ์และระบบไฟฟ้าแรงสูงก็คือแก๊ส SF₆ นี้เอง เพราะมีคุณสมบัติฉนวนที่ดี (สูงกว่าอากาศประมาณ 2.5 เท่า ที่ความดัน 1 บาร์) มีแรงดันเบรกดาวน์สูง และสามารถลดระยะปลอดภัยในระบบได้ ทำให้ประหยัดพื้นที่

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติของแก๊สซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์[3]

Density at 20°C	6.14 kg/m ³
Color of Gas	colourless
Molecular Weight	146.06
Thermal Conductivity	0.0136 w/mK
Critical Temperature	45.55°C
Critical Density	730 Kg/m ³
Critical Pressure	3.78 MPa
Sound Velocity in SF ₆	136 m/s. It is 3 times less than that in air
Refractive Index	1.000783
Formation Heat	-1221.66 Kg/mol
Specific Heat	96.6 j/mole K
Breakdown Field Relative to Pressure	89 V/m Pa
Relative Dielectric Constant at 25°C and 1 bar absolute	1.00204
Dissipation Factor or tan δ at 25°C and 1 bar absolute	<2 × 10 ⁻⁷

2.5 สนามไฟฟ้าและการเกิดดิสชาร์จบางส่วน [4]

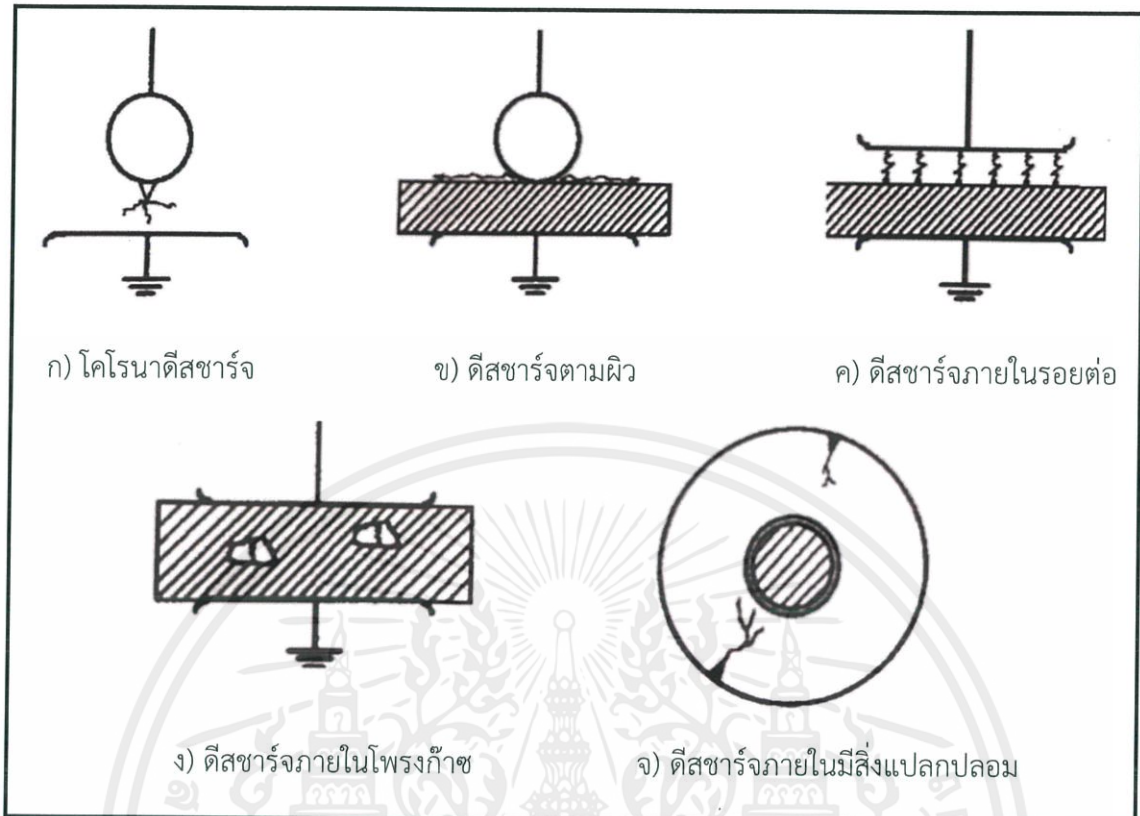
สนามไฟฟ้า (Electric Field; E) หมายถึง บริเวณโดยรอบประจุไฟฟ้า สามารถทดสอบได้โดยการนำประจุเข้าไปวางในระบบ ถ้าบริเวณนั้นมีสนามไฟฟ้าจะมีแรงกระทำกับประจุทดสอบ ซึ่งมีความเข้มของสนามไฟฟ้าต่างกัน จุดที่อยู่ใกล้ประจุไฟฟ้าจะมีความเข้มของสนามไฟฟ้าสูงกว่าจุดที่อยู่ห่างไกลออกไป ซึ่งถ้าสนามไฟฟ้ามีความไม่สม่ำเสมอสูง ทำให้เกิดความเครียดของสนามไฟฟ้าสูง และเมื่อค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงเกินกว่าที่ตัวกลางจะแบกรับได้ จะเกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่าการดิสชาร์จ ซึ่งแบ่งเป็นประเภทดังต่อไปนี้

การดิสชาร์จแบบสมบูรณ และดิสชาร์จบางส่วน โดยการดิสชาร์จแบบสมบูรณเกิดขึ้นเมื่อมีแนวเส้นใด ๆ ที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงเกินที่ตัวกลางจะแบกรับได้ ลากตัดผ่านทั้งตัวกลางนั้น ซึ่งเรียกระดับแรงดันที่ทำให้เกิดการดิสชาร์จแบบสมบูรณนี้ว่า แรงดันเบรกดาวน ส่วนการดิสชาร์จบางส่วนจะเกิดขึ้นเมื่อความเครียดสนามไฟฟ้าบางส่วนสูงกว่าจุดอื่น ๆ บนตัวกลางนั้น

ดิสชาร์จบางส่วนจะเกิดขึ้นในระบบฉนวนที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ หรือฉนวนที่มีความไม่สม่ำเสมอ หรือไม่เนื้อเดียวกัน หรือมีสิ่งเจือปน ซึ่งทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าบางจุดในฉนวนมีค่าความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤต

ดิสชาร์จบางส่วน อาจแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด คือ

- 1) โครนาดีสชาร์จ คือ การดิสชาร์จในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงรอบปลายอิเล็กโตรดแหลมหรือขอบคมที่อยู่ในอากาศ จะเริ่มเกิดขึ้นเมื่อความเครียดสนามไฟฟ้าเกินค่าสนามไฟฟ้าวิกฤตในอากาศ
- 2) ดิสชาร์จตามผิว จะเกิดขึ้นเมื่อความเครียดสนามไฟฟ้าตามผิวฉนวนมีค่าสูงถึงค่าวิกฤต
- 3) ดิสชาร์จภายใน จะเกิดขึ้นภายในฉนวนแข็งหรือฉนวนเหลว ซึ่งมีฟองก๊าซอยู่ภายใน ความเครียดสนามไฟฟ้าของฉนวนที่เกิดการดิสชาร์จภายใน จะขึ้นอยู่กับความเครียดสนามไฟฟ้าของก๊าซที่แฝงอยู่ภายในฉนวนนั้น



รูปที่ 2.21 รูปแบบของการดีสชาร์จบางส่วน[4]

2.6 การดีสชาร์จบางส่วนใน GIS และ GIL[5]

ดีสชาร์จบางส่วน (PD) คือการเกิดดีสชาร์จขนาดเล็ก ๆ ซึ่งเกิดขึ้นในระบบฉนวน ในบางกรณี เช่นในกรณีที่เป็นส่วนประกอบหลาย ๆ ส่วนที่ซับซ้อนการมีดีสชาร์จบางส่วนที่ระดับต่ำจะเป็นสิ่งที่เกิดขึ้นปกติเช่นในฉนวนบางชนิดของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบหมุน อย่างไรก็ตามในหลายกรณีการดีสชาร์จบางส่วนเป็นอาการบ่งชี้ของฉนวนและเป็นการบ่งชี้ถึงความเสื่อมสภาพของฉนวนอีกด้วย โดยจะมีชนิดของจุดบกพร่องใน GIS และ GIL ดังต่อไปนี้

- อนุภาคโลหะ (Metallic Particles) เป็นชนิดความบกพร่องที่พบมากที่สุด ใน GIS อนุภาคโลหะจะเคลื่อนที่อย่างอิสระและถูกตรวจจับได้ง่ายการเคลื่อนที่จะเกิดจากสนามไฟฟ้าซึ่งทำให้เกิดการดีสชาร์จ (bounce) ของอนุภาคตลอดตัวถัง (enclosure) โดยจะทำให้เกิดทั้งเสียงและสัญญาณไฟฟ้า อย่างไรก็ตามอนุภาคที่ไปเกาะกับผิวของฉนวนแข็งจะอันตรายเป็นอย่างมากเพราะอนุภาคจะเป็นตัวทำให้เกิดรอยบนผิวของฉนวนแข็งและนำไปสู่การล้มเหลวของระบบ

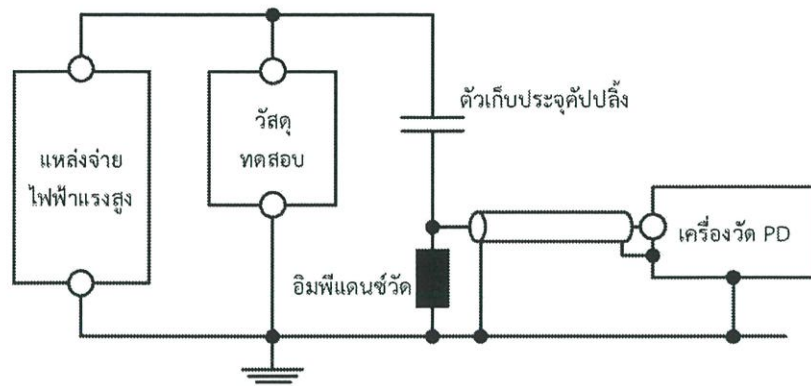
- วัตถุลอย (Floating Components) ในการออกแบบ GIS จะมีซิลด์เพื่อป้องกันในบริเวณที่มีความเครียดสูงโดยซิลด์จะต่อกับตัวนำที่รู้ความต่างศักย์ซึ่งก็คือตัวนำที่ป้อนด้วยแรงดันสูงหรือตัวถังที่มีกราวด์ ในบางกรณีหน้าสัมผัสจะเชื่อมด้วยสปริงหรือคลิบ ซึ่งหากหน้าสัมผัสไม่เพียงพอต่อทางเดินของไฟฟ้าจากความเสียหายหรือการปนเปื้อนจะทำให้ไม่มีการเชื่อมต่อกันทางไฟฟ้า ทำให้ซิลด์กลายเป็นวัตถุลอยซึ่งการดิสชาร์จบางส่วนมักเกิดบริเวณระหว่างวัตถุลอยกับตัวนำในช่วงแรก การดิสชาร์จบางส่วนจะเล็กมากและไม่ต่อเนื่องอย่างไรก็ตามเมื่อสามารถตรวจพบการดิสชาร์จจากวัตถุลอยจะพบว่ามีความเสียหาย ตรวจจับได้ง่ายทั้งแบบไฟฟ้า และเสียงเมื่อเกิดดิสชาร์จจากวัตถุลอยอย่างสมบูรณ์จะเป็นสิ่งอันตราย ทำให้เกิดการล้มเหลวของระบบในเวลา สั้น ๆ (นาที่ถึงวินาที) การดิสชาร์จที่คงที่สามารถทำให้ SF₆ สลายตัวได้ซึ่งผลิตภัณฑ์จะไปทำลายฉนวนแข็งซึ่งทำให้ระบบล้มเหลวในกรณีที่รุนแรงคือการดิสชาร์จจะสร้างอนุภาคที่นำไฟฟ้าและไม่นำไฟฟ้าเนื่องจากอุปกรณ์ถูกกัดกร่อน

- จุดบกพร่องที่ฉนวนแข็งมักจะเกิดการดิสชาร์จภายในเนื้อฉนวน จุดบกพร่องจะมาจากกระบวนการผลิตที่ไม่ดีเช่นมีโพรงอากาศหรือมีโลหะเจือปนอยู่ซึ่งพบได้ยาก และเป็นไปได้ยากที่จะตรวจจับความบกพร่องประเภทนี้ ซึ่งพบได้ยากในปัจจุบันแต่ถ้าฉนวนแข็งโดนทำลายจากแรงภายนอกหรือความเครียดจากอุณหภูมิจะสามารถตรวจพบได้

2.6.1 วิธีการตรวจวัดดิสชาร์จที่นิยมใช้ในระบบ GIS และ GIL[8]

การตรวจสอบและวินิจฉัยสนามไฟฟ้า เป็นสิ่งสำคัญในการบำรุงรักษาระบบไฟฟ้าแรงสูง การที่เราได้มีการตรวจสอบสนามไฟฟ้าอย่างสม่ำเสมอ ทำให้เราพบถึงปัญหาข้อบกพร่องก่อนที่อุปกรณ์จะเกิดความเสียหายขึ้น โดยในปัจจุบันวิธีการที่ได้รับความนิยมและมีศักยภาพสูงสุดในการตรวจสอบฉนวน คือการตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วน

- วิธีการตรวจจับดิสชาร์จบางส่วนทางไฟฟ้า เป็นวิธีตามมาตรฐาน IEC 60270 (ช่วงความถี่ 10 HZ-1MHz) เป็นการวัดประจุที่เกิดจากการดิสชาร์จ ไม่นิยมเนื่องจากมีปัญหาเรื่องสัญญาณรบกวนเมื่อทดสอบแบบ on-site test



รูปที่ 2.22 วงจรการวัดดิสชาร์จบางส่วน ตาม IEC 60270[8]

- การตรวจจับวัดดิสชาร์จบางส่วนจากแสง (Light Output) ในการเกิดดิสชาร์จแต่ละครั้ง จะเกิดแสงจากการสปาร์คขึ้น โดยเราจะใช้หลอดแสงที่วิคูมเพื่อตรวจสอบว่ามีการเกิดดิสชาร์จขึ้นหรือไม่ ข้อดีคือง่ายและรวดเร็ว ข้อเสียคือเราไม่สามารถบอกตำแหน่งที่เกิดการดิสชาร์จได้

- วิธีการตรวจจับดิสชาร์จบางส่วนทางเสียง (Acoustic Emission) การเกิดดิสชาร์จจะสร้างคลื่นอุลตราโซนิคกระจายไปรอบ ๆ แหล่งกำเนิดจากนั้นเมื่อคลื่นกระทบกับตัวถังของ GIS หรือ GIL แล้วจะเคลื่อนที่ไปตามตัวถังโดยเซ็นเซอร์ตรวจจับเสียง (acoustic emission sensor) ที่สามารถตรวจจับคลื่นความถี่ (20-100kHz) โดยวิธีนี้สามารถระบุตำแหน่งของการดิสชาร์จบางส่วนได้อย่างแม่นยำ

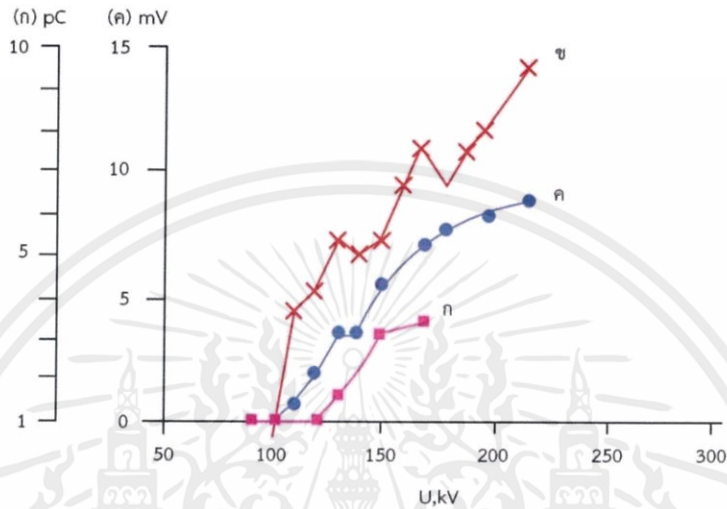
- วิธีการตรวจจับดิสชาร์จบางส่วนทางเคมี เมื่อเกิดดิสชาร์จบางส่วนจะทำให้ SF_6 สลายตัวและเกิดผลพลอยได้จากปฏิกิริยาเคมี (by-product) โดยสามารถตรวจจับสารเหล่านี้ได้เพื่อเป็นการยืนยันการเกิดดิสชาร์จบางส่วน สารที่เกิดขึ้นเมื่อ SF_6 สลายตัวบางครั้งอาจซับซ้อนโดยทั่วไปจะพิจารณาจากสารเหล่านี้คือ

- ไทโอซิลฟลูออไรด์ (SOF_2)
- ซัลฟูริลฟลูออไรด์ (SO_2F_2)
- ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2)

- วิธีการตรวจจับดิสชาร์จบางส่วนด้วย UHF (Ultra High Frequency) เป็นการตรวจจับคลื่นในช่วง UHF (300 MHz-3GHz) ที่เกิดขึ้นจากการเกิดดิสชาร์จบางส่วน จากการที่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากโคโรน่าจะหนาแน่นในช่วงต่ำกว่าช่วง 300 MHz วิธีการตรวจจับด้วย UHF จะสามารถหลีกเลี่ยงสิ่งรบกวนได้ จากคุณสมบัติของสเปกตรัม UHF จะสามารถระบุชนิดของการดิสชาร์จบางส่วนได้ เวลาที่ต่างกันระหว่างการรับสัญญาณของเซ็นเซอร์จะใช้เพื่อระบุตำแหน่งของการเกิดดิสชาร์จบางส่วนได้[6]

2.6.2 การเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของการวัดดิสชาร์จแบบต่าง ๆ [7]

เป็นการยากที่จะเปรียบเทียบเทคนิคที่ต่างกันในสภาพการทดลองที่ต่างกัน ดังนั้น CIGRE Working Group จึงทดสอบโดยใช้ห้อง Chamber ยาว 6 เมตร ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของระบบ GIS 420 kV โดยตรวจสอบข้อบกพร่องจาก อนุภาคโลหะอิสระ และอนุภาคที่ติดอยู่กับพื้นผิวของสิ่งกีดขวาง



รูปที่ 2.23 กราฟการเปรียบเทียบการวัดดิสชาร์จบางส่วน[7]

ชุดทดลองข้างต้นได้รับการขึ้นแรงดันอย่างช้า ๆ จนกระทั่งเกิดการเบรกดาวน์ จากหม้อแปลงทดสอบ Metal Clad 0-510 kV โดยระหว่างขึ้นแรงดันนั้นใช้เครื่องมือวินิจฉัยดังนี้

- ก. วิธีการวัดดิสชาร์จบางส่วนตามมาตรฐาน IEC60270 และใช้เครื่องมือตรวจจับที่มาตรฐาน 1 MHz
 - ข. UHF ใช้ Internal coupler ที่มีความถี่ 1500 MHz
 - ค. Acoustic ใช้ External acoustic emission ที่ความถี่ 34 kHz
 - ง. Chemical ใช้ Detector tube เทคนิคนี้ไม่สามารถตอบสนองได้ในช่วงจำกัดนี้
- จากผลการทดสอบได้ข้อสรุปดังนี้

- วิธีการวัดด้วย Acoustic, การวัดดิสชาร์จบางส่วนตามมาตรฐาน IEC60270, และ UHF มีความไวในการตรวจจับ
- วิธีการวัดด้วย Acoustic ไม่ก่อความรบกวนต่อระบบ สามารถใช้ได้เกือบทุกระบบของ GIS แต่สัญญาณที่ได้นั้นถูกลดทอนลงจากสิ่งกีดขวางและผนัง Chamber[8]
- การวัดดิสชาร์จบางส่วนตามมาตรฐาน IEC60270 ต้องใช้ External coupling capacitor และไม่สามารถวัดได้ขณะที่ GIS ทำงานอยู่
- การตรวจจับด้วย UHF จึงเหมาะสมที่สุดในการตรวจจับดิสชาร์จบางส่วน ในขณะที่ GIS ทำงานอยู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

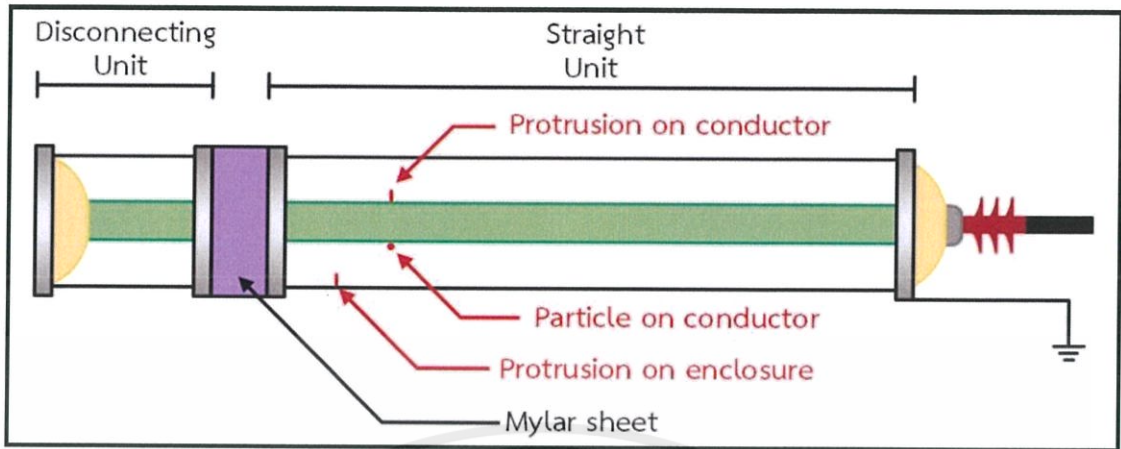
การออกแบบชุดทดสอบและประกอบสร้างชุดทดสอบ

ในปัจจุบันประเทศไทยได้มีการใช้งาน Gas Insulated Transmission Line (GIL) เพิ่มมากขึ้น เพราะฉะนั้นเมื่อระบบเกิดความผิดปกติขึ้นจำเป็นต้องทราบตำแหน่งที่ผิดปกติและแก้ไขโดยเร็วที่สุด เพื่อไม่ให้ระบบเกิดความเสียหาย ดังนั้นการตรวจพบปัญหาเป็นสิ่งสำคัญ จึงต้องมีการดูแลและตรวจสอบความผิดปกติของระบบ รวมไปถึงการวินิจฉัยซึ่งจะเป็นสิ่งสำคัญมาก โดยในบทที่ 2 ได้กล่าวถึงปัญหาที่พบใน GIL ซึ่งจากหัวข้อดังกล่าวผู้จัดทำมีการศึกษาปัญหาที่เกิดมาจากวัตถุยื่นมาจากตัวนำที่บ่อนไฟฟ้าแรงสูง (Protrusion) และ อนุภาค (Particle) ซึ่งสามารถตรวจจับได้ในรูปแบบของการดิสชาร์จบางส่วน โดยการตรวจจับและวัดการดิสชาร์จบางส่วนตามทฤษฎี แบบ Conventional โดยการบ่อนไฟฟ้าแรงสูงไปที่วัสดุทดสอบที่มีการจำลองสิ่งบกพร่องเพื่อให้เกิดการดิสชาร์จบางส่วน และวัดประจุที่เกิดขึ้น จากนั้นวิเคราะห์ชนิดของการเกิดดิสชาร์จบางส่วนจากการวิเคราะห์ PRPD pattern

ก่อนทำการทดสอบนั้นมีการออกแบบและประกอบสร้างชุดทดสอบให้ได้มาตรฐานและถูกหลักทางวิศวกรรมเพื่อความปลอดภัยต่อผู้ทดสอบ ซึ่งผู้จัดทำมีการจำลองและทำโมเดลผ่านระบบคอมพิวเตอร์ก่อน จากนั้นจึงทำการประกอบสร้างและทดสอบในลำดับต่อไป

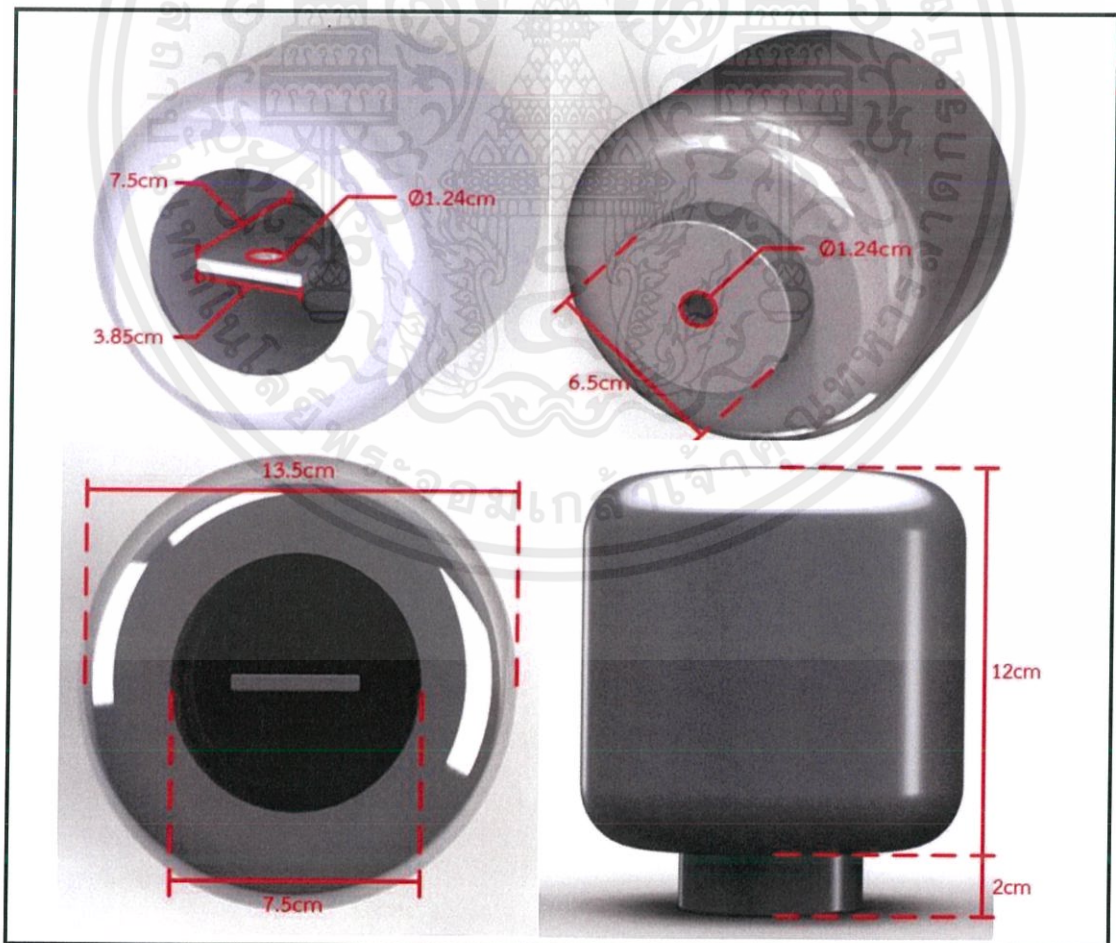
3.1 โมเดลในการทดสอบ

แบบจำลองนี้เป็นแบบจำลองเฉพาะส่วนของวัสดุทดสอบโดยในโมเดลจะประกอบไปด้วย Gas Insulated Transmission Line (GIL) โดยเป็นส่วนที่เป็น Straight Unit และ Disconnecting Unit ส่วนช่องว่างระหว่าง Straight Unit และ Disconnecting Unit จะใช้แผ่นไมลาร์ (Mylar) เนื่องจากมีคุณสมบัติเป็นฉนวน การบ่อนแรงดันทดสอบนั้นเนื่องจากไม่มีในส่วนของบุชซึ่งจึงต้องมีการออกแบบหัวต่อสายไฟเพื่อทำการบ่อนแรงดันเข้ามาเพิ่มเติมโดยค่าแรงดันที่ใช้ในการทดลองจะไม่เกิน 35 kV ซึ่งได้มาจากการทดสอบแรงดันเบรกดาวน์ของ GIL ที่มีการจำลองการดิสชาร์จบางส่วนแล้วไม่เกิดเบรกดาวน์ การจำลองการดิสชาร์จบางส่วนจะแบ่งเป็น 2 กรณีคือแบบอนุภาคโลหะ และ วัตถุยื่น โดยจะมีการเปลี่ยนขนาดเพื่อสังเกตรูปแบบของ PRPD Pattern



รูปที่ 3.1 โมเดลของวัตถุทดสอบ

เนื่องจากอุปกรณ์ของ GIL ที่มีในตอนแรกนั้น ยังไม่สามารถป้อนแรงดันเข้าไปเพื่อทดสอบได้ จึงต้องทำการออกแบบหัวต่อสายไฟใหม่ โดยต้องมีส่วนที่สามารถต่อกับหางปลาของสายไฟ เพื่อให้สามารถป้อนแรงดันเพื่อทดสอบได้ ซึ่งมีการออกแบบดังรูปที่ 3.2



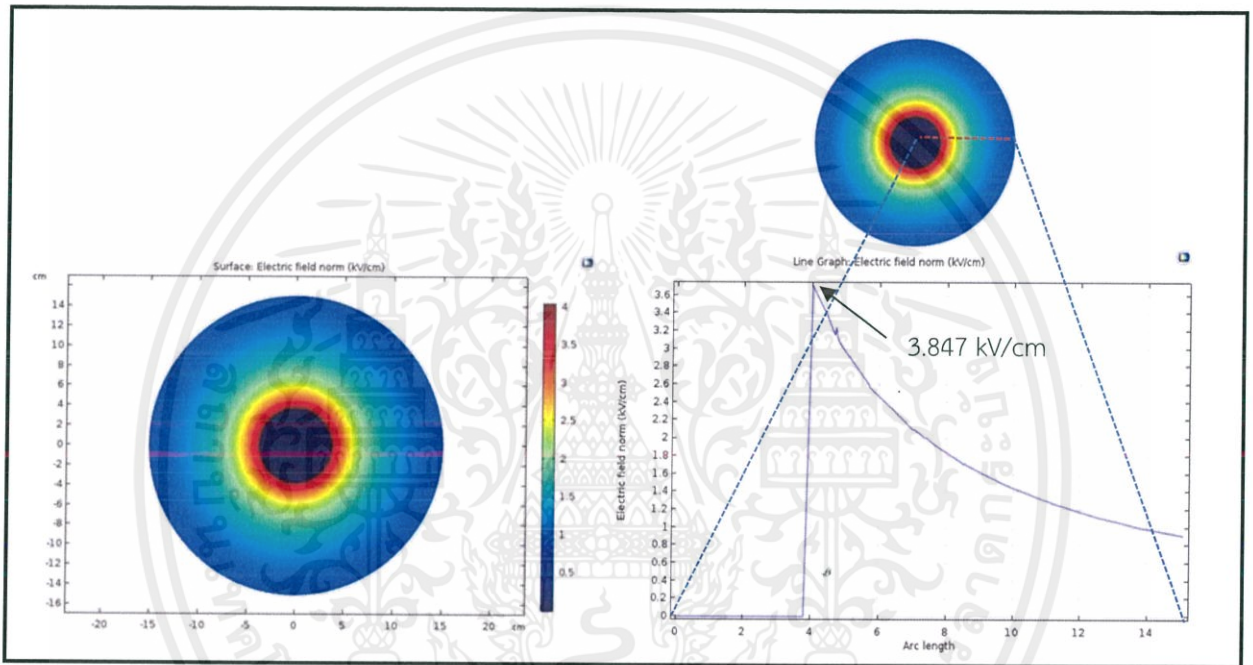
รูปที่ 3.2 แบบหัวต่อสายไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การจำลองสนามไฟฟ้าภายใน Gas Insulated Transmission Line ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ผลการจำลองสนามไฟฟ้าภายใน GIL ในกรณีปกติ (ไม่มีวัตถุอื่น) ดังรูปที่ 3.3

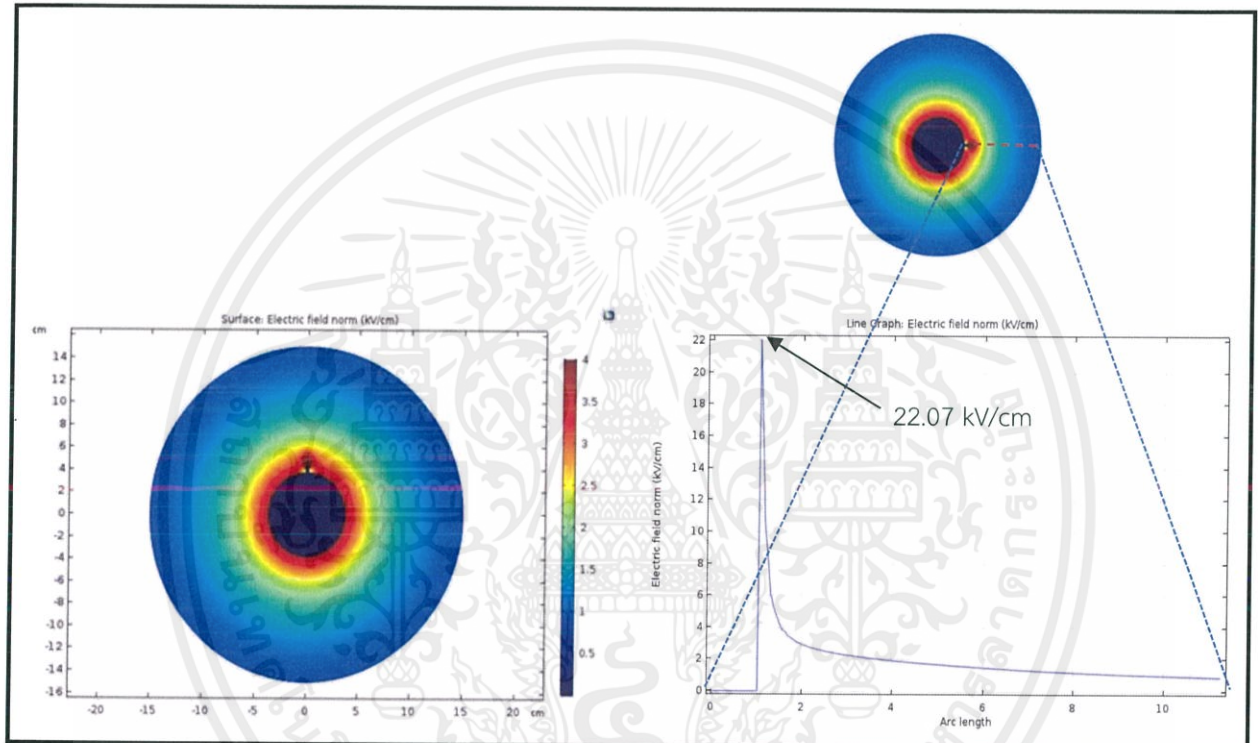
เงื่อนไขในการจำลอง :	แรงดันที่ป้อน	20 kV
	เส้นผ่าศูนย์กลางกลางของตัวนำ	7.5 ซม.
	เส้นผ่าศูนย์กลางกลางของตัวถัง	30 ซม.
	ϵ_r ของอากาศ	1.0



รูปที่ 3.3 ผลการจำลองสนามไฟฟ้าภายใน GIL ปกติ

ผลการจำลองสนามไฟฟ้าภายใน GIL ในกรณีที่มีวัตถุอื่นเป็นกรณีศึกษา ดังรูปที่ 3.4

เงื่อนไขการจำลอง :	แรงดันที่ป้อน	20 kV
	เส้นผ่าศูนย์กลางกลางของตัวนำ	7.5 ซม.
	เส้นผ่าศูนย์กลางกลางของตัวถัง	30 ซม.
	เส้นผ่าศูนย์กลางกลางของวัตถุอื่น	0.2 ซม.
	ความสูงของวัตถุอื่น	1.0 ซม.
	ϵ_r ของอากาศ	1.0



รูปที่ 3.4 ผลการจำลองสนามไฟฟ้าภายใน GIL กรณีมีวัตถุอื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การจำลองสนามไฟฟ้าภายใน GIL

กรณีที่ 1 วัตถุยื่นบนตัวนำ

ในกรณีวัตถุยื่นภายใต้ฉนวนแข็งนั้นเนื่องจากฉนวนแข็งไม่ได้ต่อลงกราวด์ทำให้การกระจายของสนามไฟฟ้าเปลี่ยนไปได้



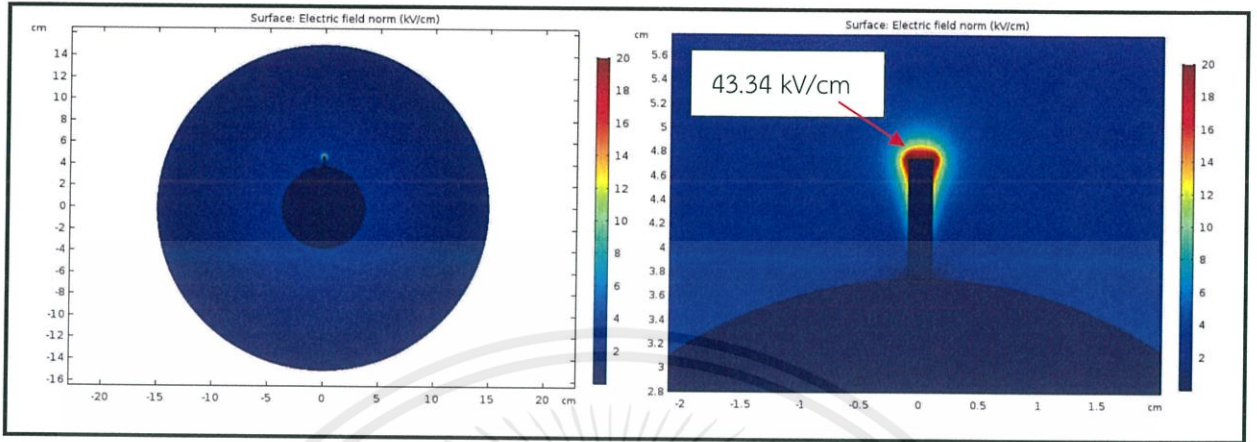
รูปที่ 3.5 โมเดลที่ใช้ในการจำลองกรณีวัตถุยื่น

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ที่ถูกกำหนด

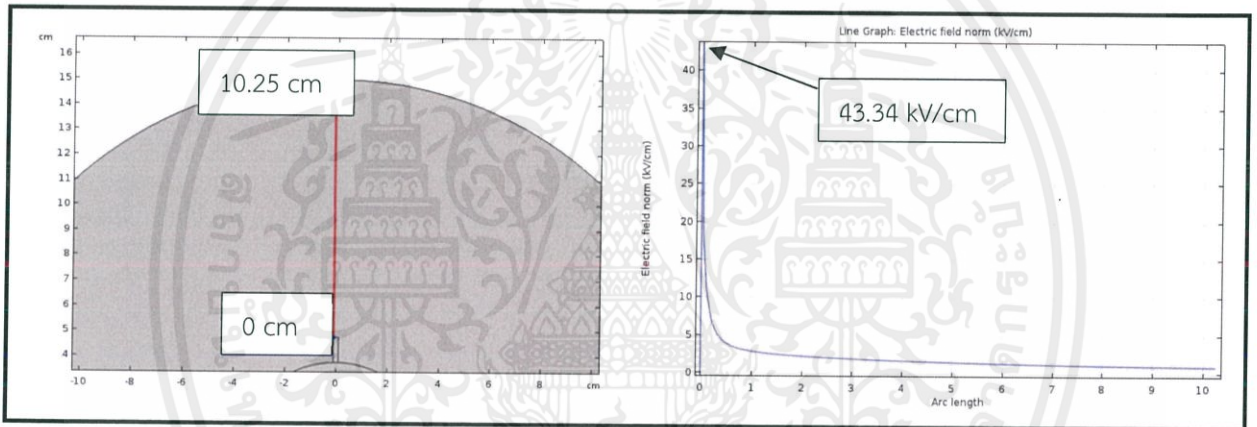
Parameter	Value
Diameter of conductor	7.5 cm
Diameter of enclosure	30 cm
Relative permittivity of air	1.0
Relative permittivity of spacer	3.6
Applied voltage at conductor	20 kV
Length of protrusion	1-3 cm

ผลการจำลอง

- เมื่อวัตถุยื่นมีขนาด 1 ซม. จะได้ผลการจำลองสนามไฟฟ้าดังรูปต่อไปนี้

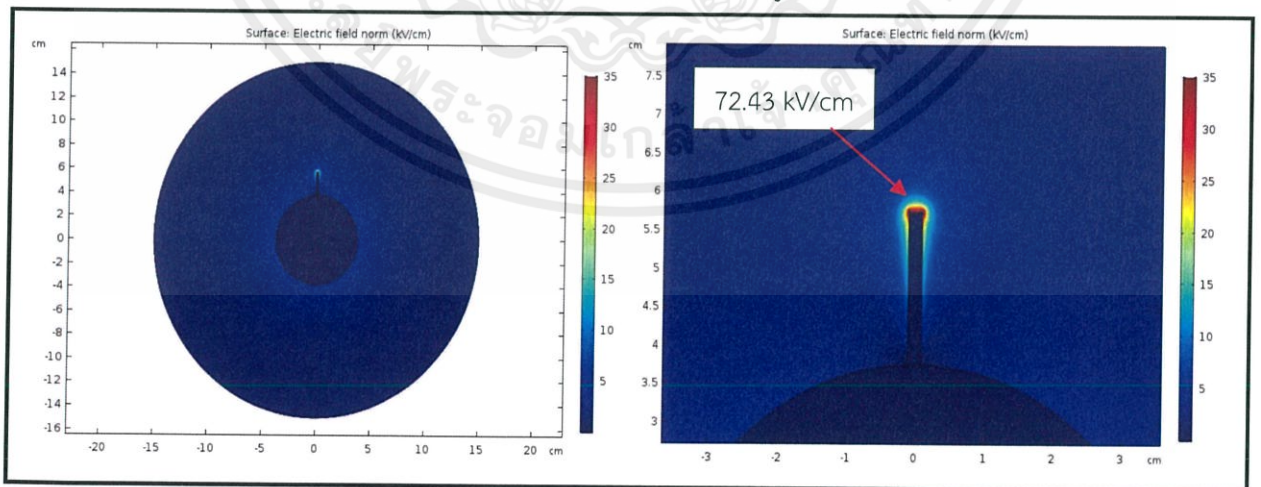


รูปที่ 3.6 ผลการจำลองสนามไฟฟ้าในกรณีวัตถุยื่นขนาด 1 ซม.



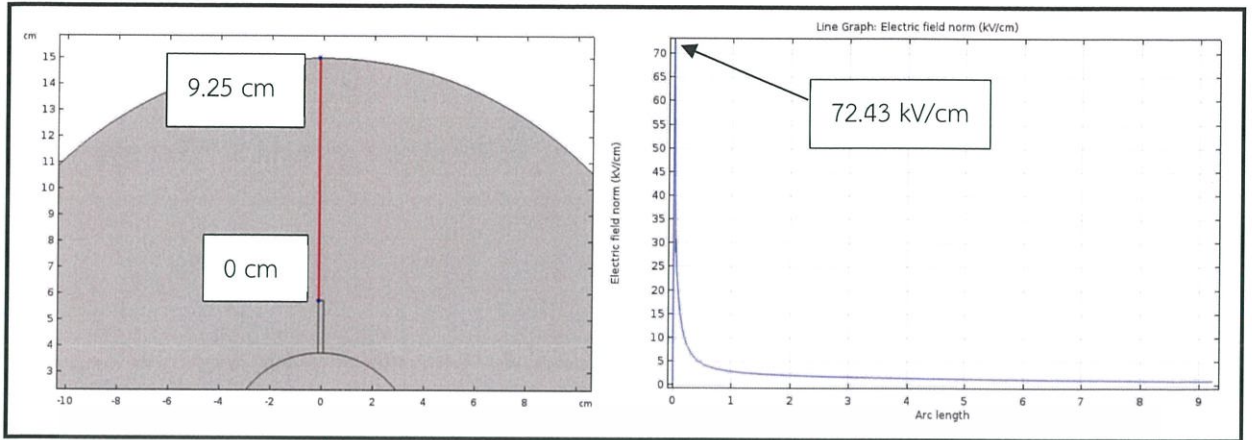
รูปที่ 3.7 เส้นกราฟของสนามไฟฟ้าในกรณีวัตถุยื่นขนาด 1 ซม.

- เมื่อวัตถุยื่นมีขนาด 2 ซม. จะได้ผลการจำลองสนามไฟฟ้าดังรูปต่อไปนี้



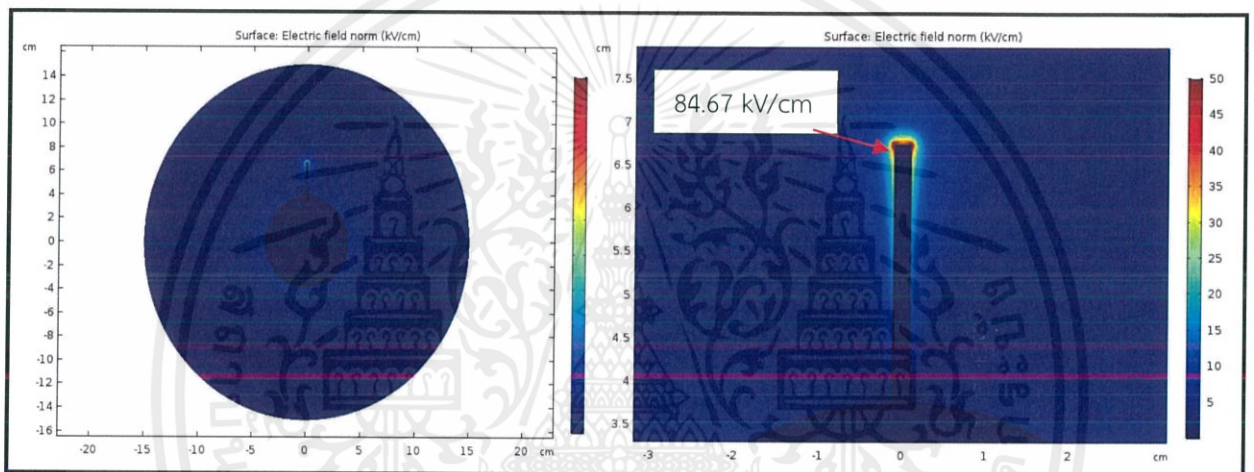
รูปที่ 3.8 ผลการจำลองสนามไฟฟ้าในกรณีวัตถุยื่นขนาด 2 ซม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

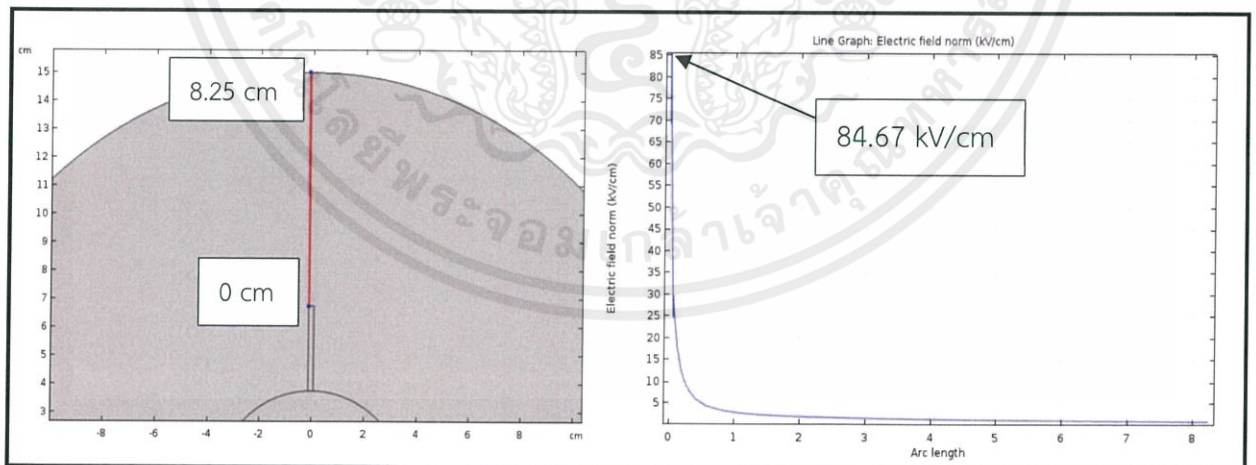


รูปที่ 3.9 เส้นกราฟของสนามไฟฟ้าในกรณีวัตถุเย็นขนาด 2 ซม.

- เมื่อวัตถุเย็นมีขนาด 3 ซม. จะได้ผลการจำลองสนามไฟฟ้าดังรูปต่อไปนี้



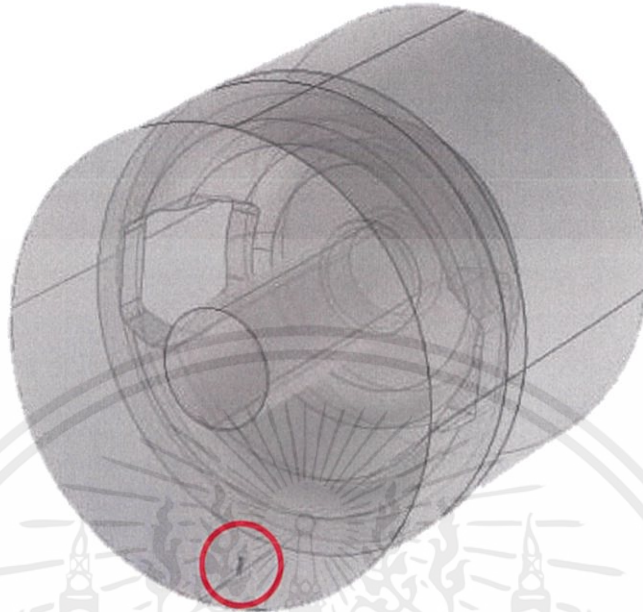
รูปที่ 3.10 ผลการจำลองสนามไฟฟ้าในกรณีวัตถุเย็นขนาด 3 ซม.



รูปที่ 3.11 เส้นกราฟของสนามไฟฟ้าในกรณีวัตถุเย็นขนาด 3 ซม.

กรณีที่ 2 วัตถุยื่นบนตัวถัง

ในกรณีวัตถุยื่นบนตัวถังนั้นจะมีโมเดลและค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังนี้



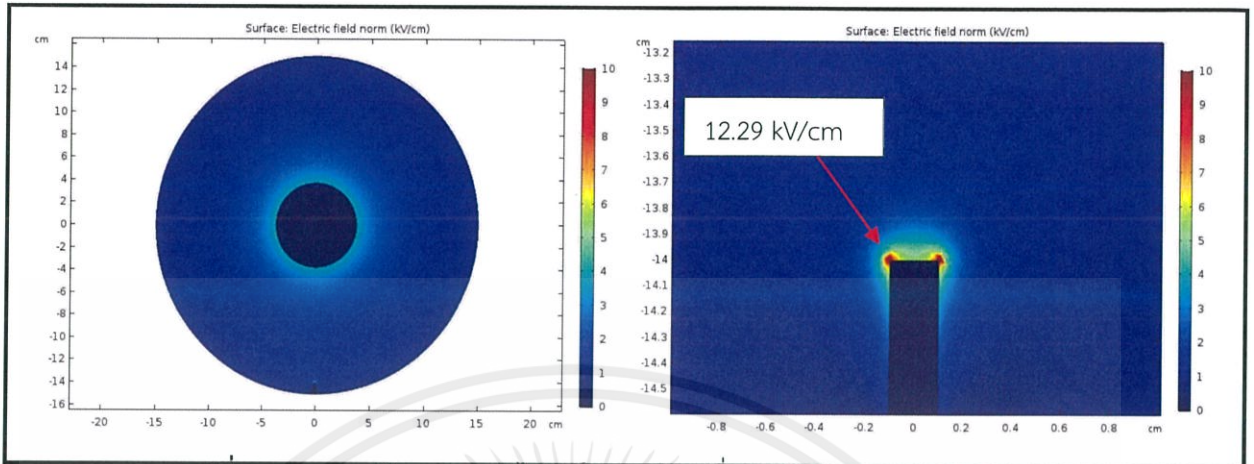
รูปที่ 3.12 โมเดลที่ใช้ในการจำลองกรณีวัตถุยื่นบนตัวถัง

ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์ที่ถูกกำหนด

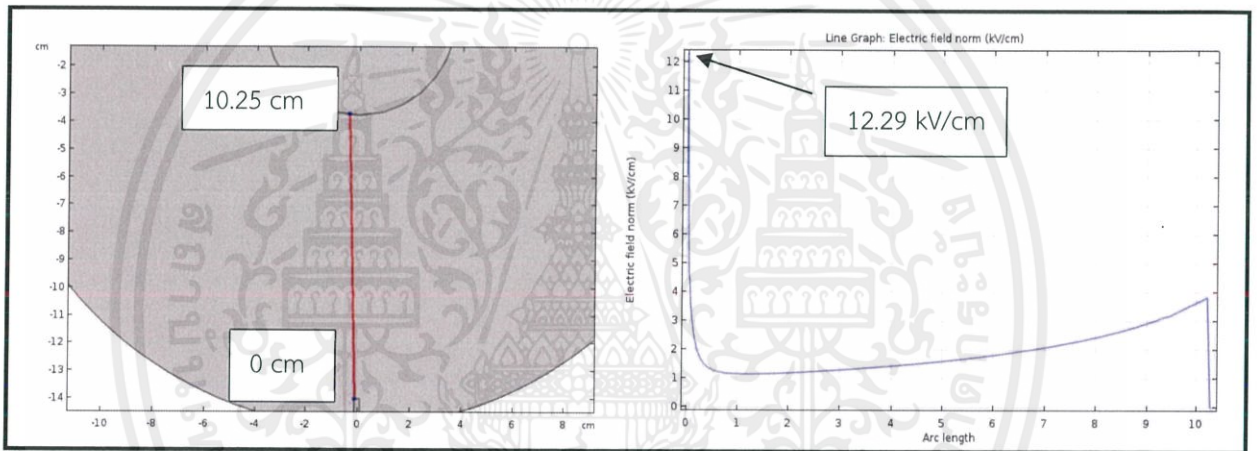
Parameter	Value
Diameter of conductor	7.5 cm
Diameter of enclosure	30 cm
Relative permittivity of air	1.0
Relative permittivity of spacer	3.6
Applied voltage at conductor	20 kV
Length of protrusion	1-3 cm

ผลการจำลอง

- เมื่อวัดด้วยขนาด 1 ซม. จะได้ผลการจำลองสนามไฟฟ้าดังรูปต่อไปนี้

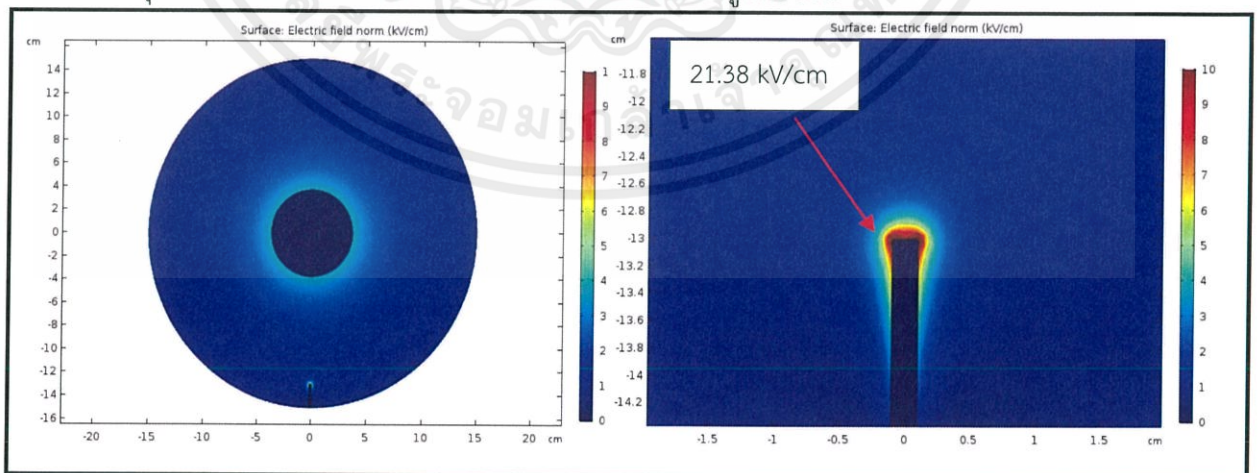


รูปที่ 3.13 ผลการจำลองสนามไฟฟ้าในกรณีวัดด้วยขนาด 1 ซม.



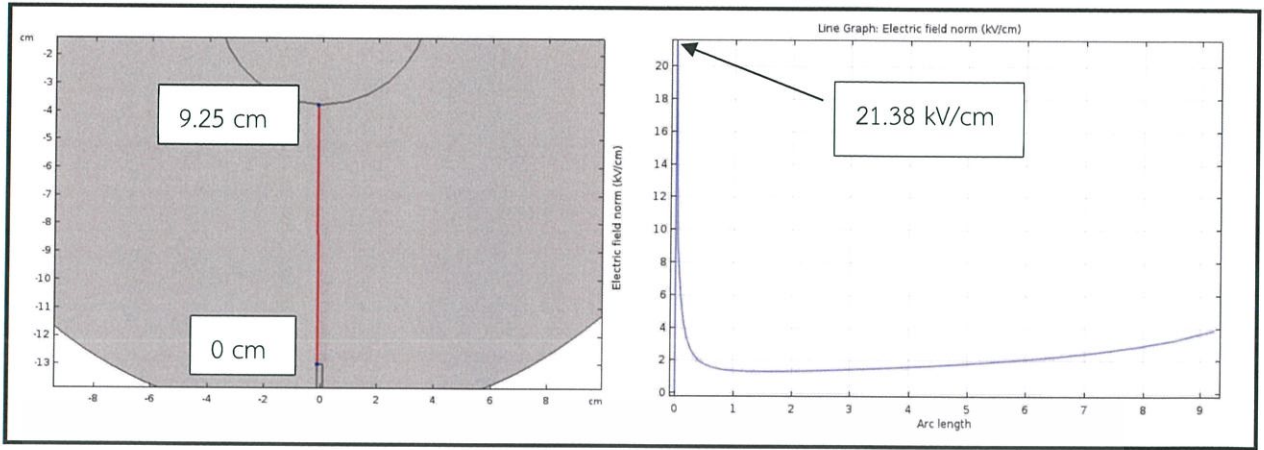
รูปที่ 3.14 เส้นกราฟของสนามไฟฟ้าในกรณีวัดด้วยขนาด 1 ซม.

- เมื่อวัดด้วยขนาด 2 ซม. จะได้ผลการจำลองสนามไฟฟ้าดังรูปต่อไปนี้



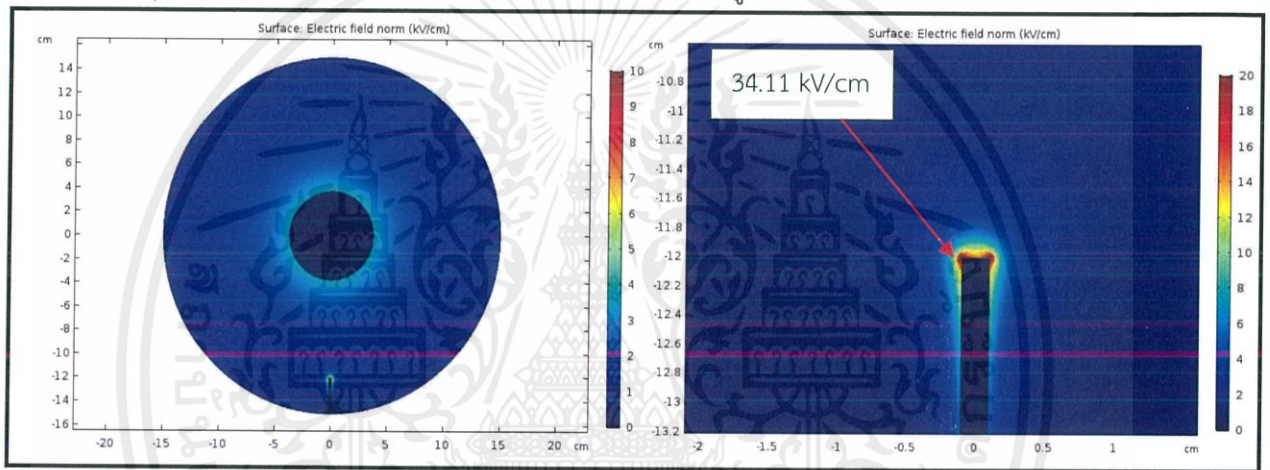
รูปที่ 3.15 ผลการจำลองสนามไฟฟ้าในกรณีวัดด้วยขนาด 2 ซม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

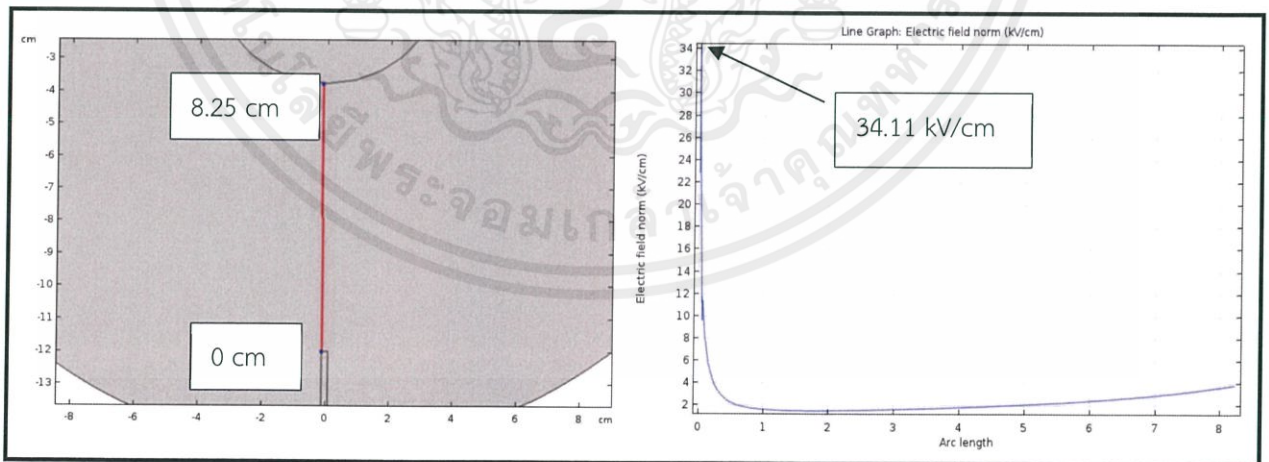


รูปที่ 3.16 เส้นกราฟของสนามไฟฟ้าในกรณีวัตถุยืนบนตัวถังขนาด 2 ซม.

- เมื่อวัตถุยืนมีขนาด 3 ซม. จะได้ผลการจำลองสนามไฟฟ้าดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 3.17 ผลการจำลองสนามไฟฟ้าในกรณีวัตถุยืนบนตัวถังขนาด 3 ซม.



รูปที่ 3.18 เส้นกราฟของสนามไฟฟ้าในกรณีวัตถุยืนบนตัวถังขนาด 3 ซม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีศึกษาที่ 3 วัตถุยื่นบนตัวนำภายใต้ฉนวนแข็ง

ในกรณีวัตถุยื่นบนตัวนำภายใต้ฉนวนแข็งนั้นเนื่องมาจากฉนวนแข็งไม่ได้ต่อลงกราวด์ทำให้การกระจายของสนามไฟฟ้าเปลี่ยนไปได้



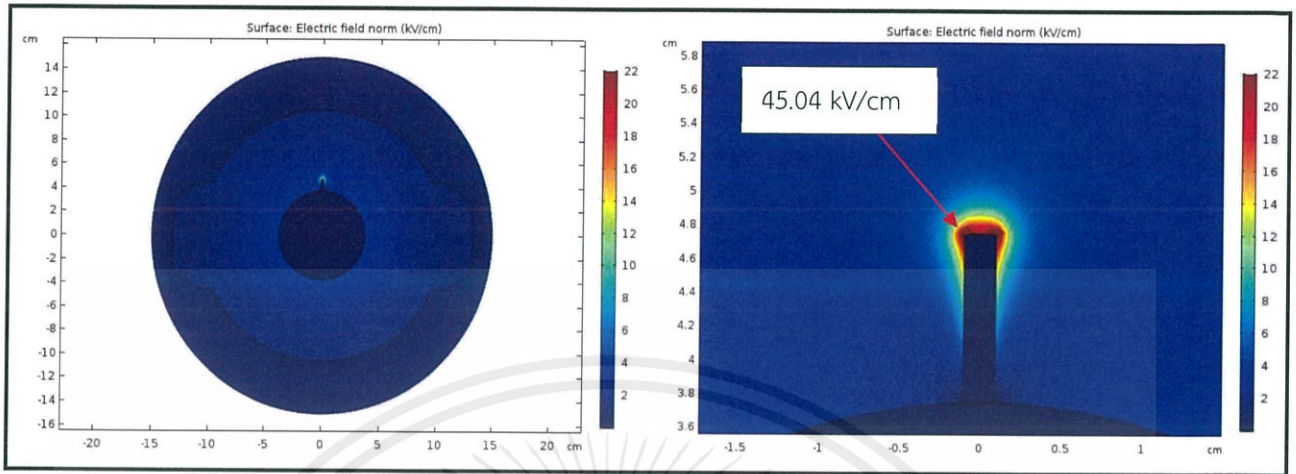
รูปที่ 3.19 โมเดลที่ใช้ในการจำลองกรณีวัตถุยื่น

ตารางที่ 3.3 พารามิเตอร์ที่ถูกกำหนด

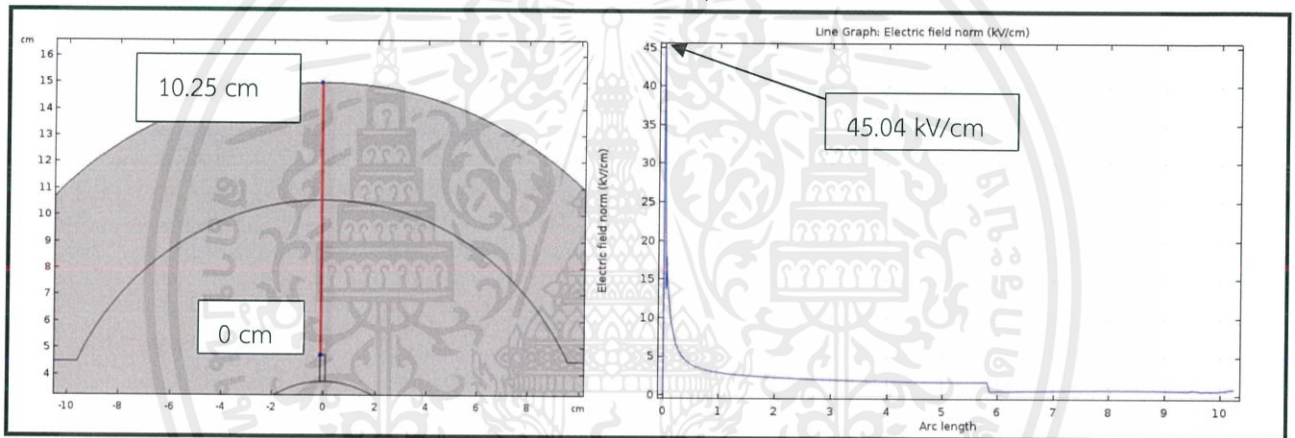
Parameter	Value
Diameter of conductor	7.5 cm
Diameter of enclosure	30 cm
Relative permittivity of air	1.0
Relative permittivity of spacer	3.6
Applied voltage at conductor	20 kV
Length of protrusion	1-3 cm

ผลการจำลอง

- เมื่อวัดถู่ย่นมีขนาด 1 ซม. จะได้ผลการจำลองสนามไฟฟ้าดังรูปต่อไปนี้

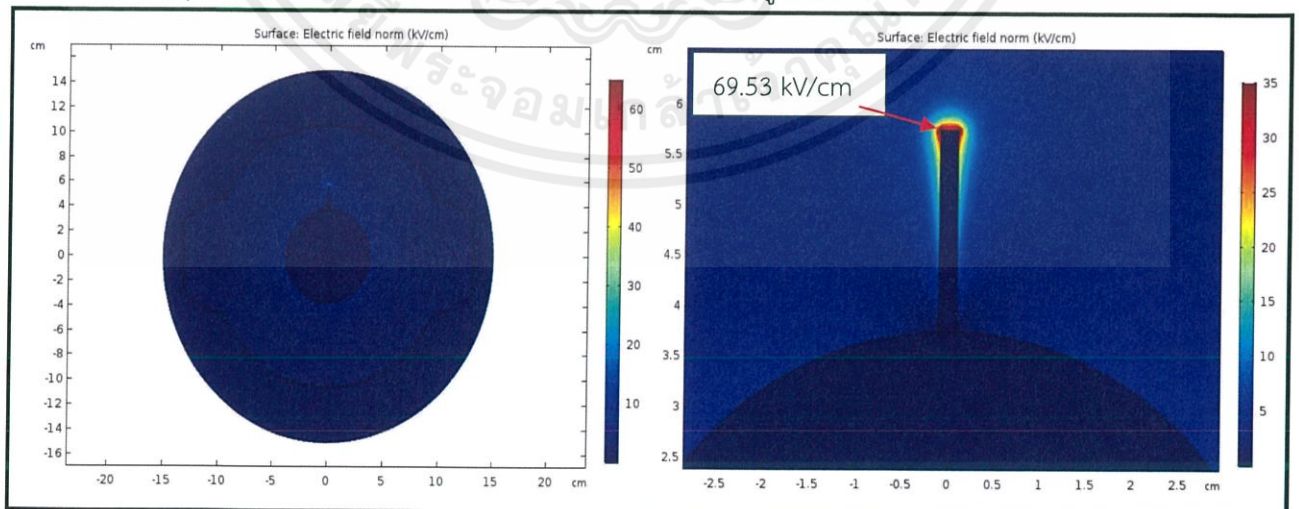


รูปที่ 3.20 ผลการจำลองสนามไฟฟ้าในกรณีวัดถู่ย่นภายใต้ฉนวนแข็งขนาด 1 ซม.



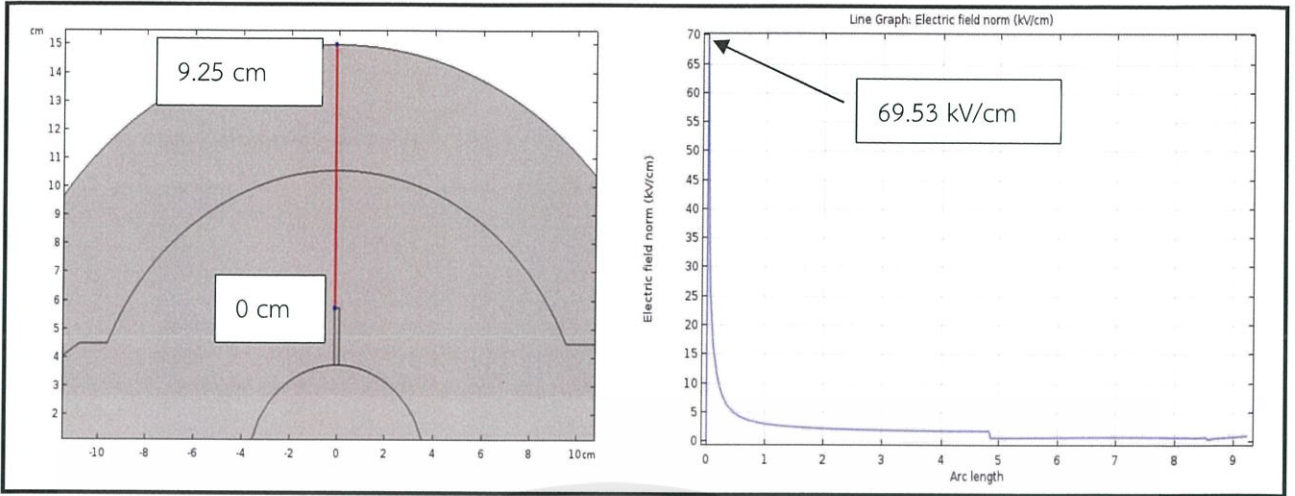
รูปที่ 3.21 เส้นกราฟของสนามไฟฟ้าในกรณีวัดถู่ย่นภายใต้ฉนวนแข็งขนาด 1 ซม.

- เมื่อวัดถู่ย่นมีขนาด 2 ซม. จะได้ผลการจำลองสนามไฟฟ้าดังรูปต่อไปนี้



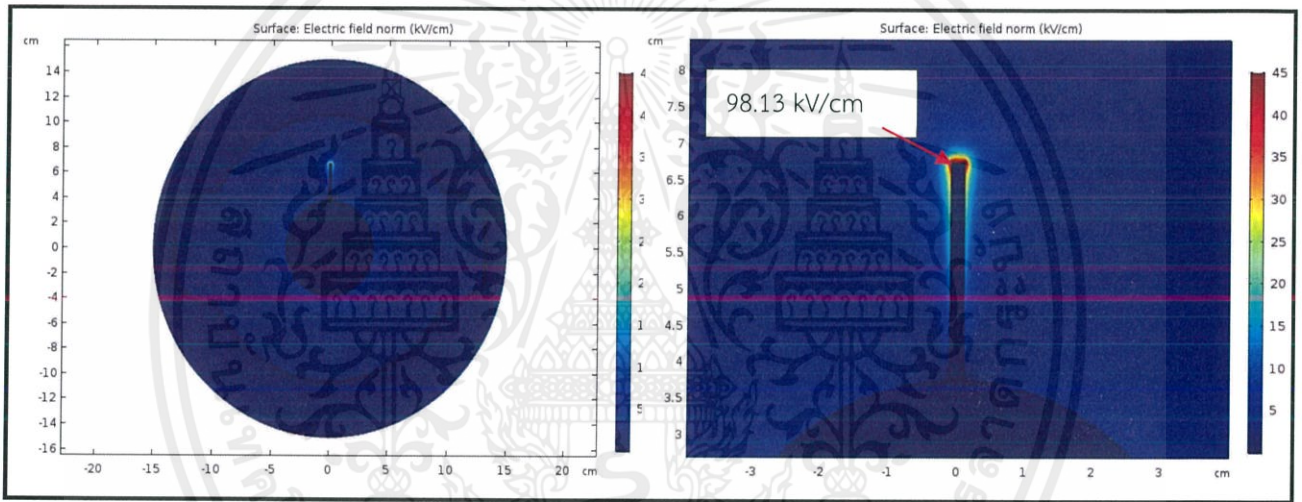
รูปที่ 3.22 ผลการจำลองสนามไฟฟ้าในกรณีวัดถู่ย่นภายใต้ฉนวนแข็งขนาด 2 ซม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

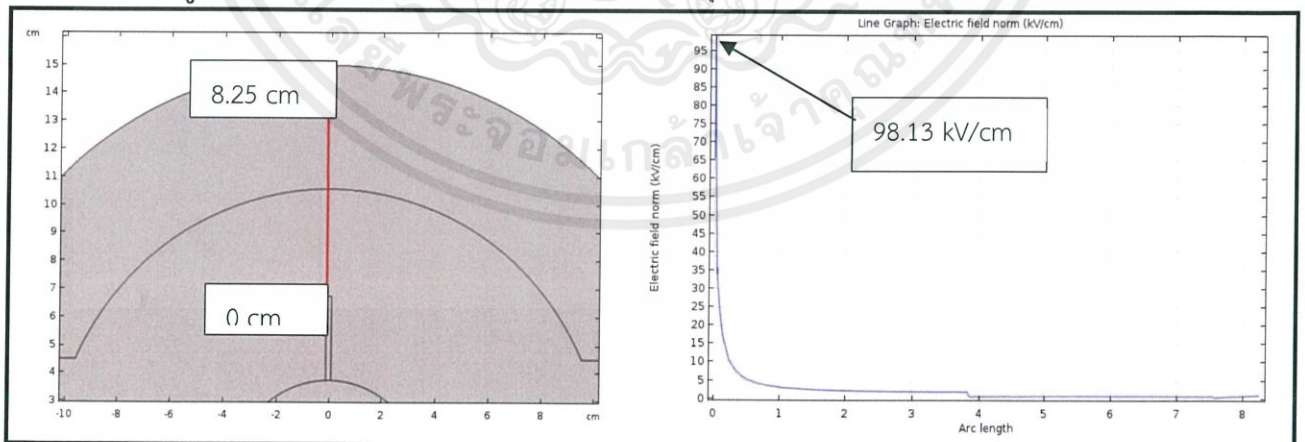


รูปที่ 3.23 เส้นกราฟของสนามไฟฟ้าในกรณีวัตต์อยู่ที่ขนาด 2 ซม.

- เมื่อวัตต์อยู่ที่ขนาด 3 ซม. จะได้ผลการจำลองสนามไฟฟ้าดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 3.24 ผลการจำลองสนามไฟฟ้าในกรณีวัตต์อยู่ที่ขนาด 3 ซม.

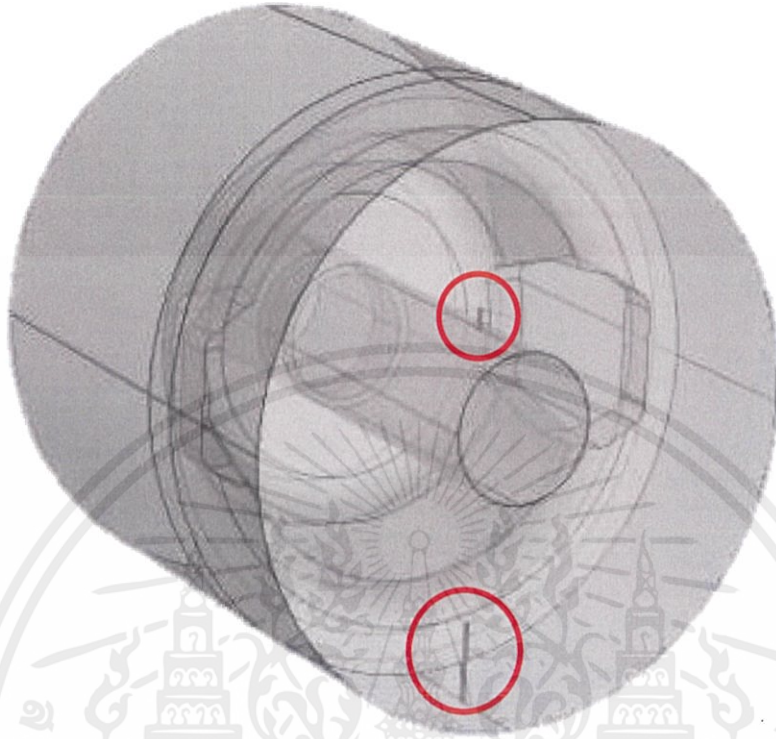


รูปที่ 3.25 เส้นกราฟของสนามไฟฟ้าในกรณีวัตต์อยู่ที่ขนาด 3 ซม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีที่ 4 วัตถุยื่นบนตัวนำและตัวถัง

ในกรณีวัตถุยื่นบนตัวนำและตัวถังนั้นจะมีโมเดลและค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังนี้



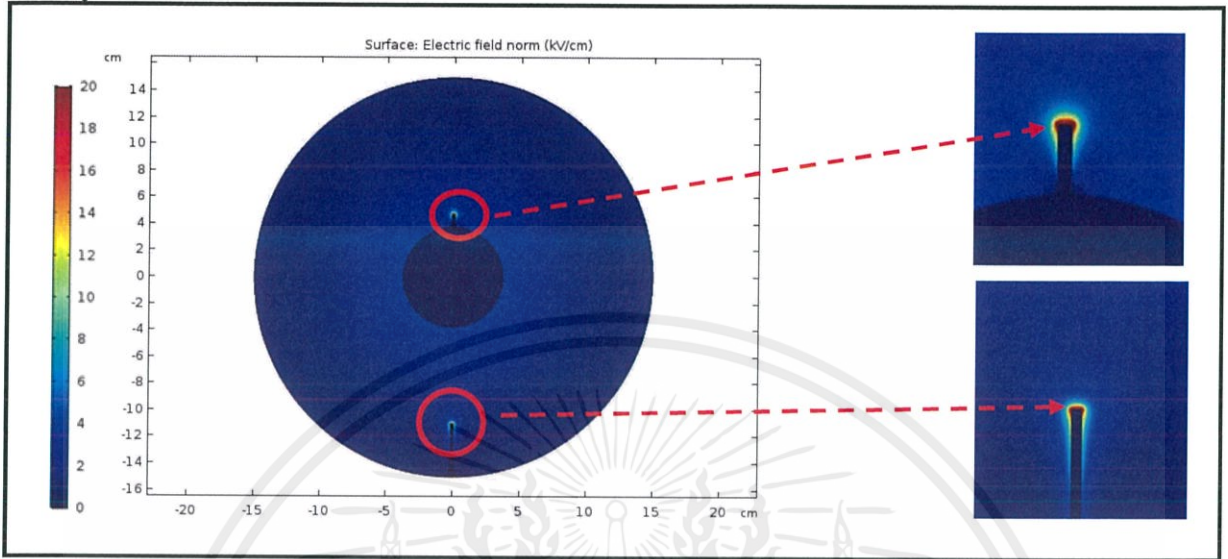
รูปที่ 3.26 โมเดลที่ใช้ในการจำลองกรณีวัตถุยื่นบนตัวถัง

ตารางที่ 3.4 พารามิเตอร์ที่ถูกกำหนด

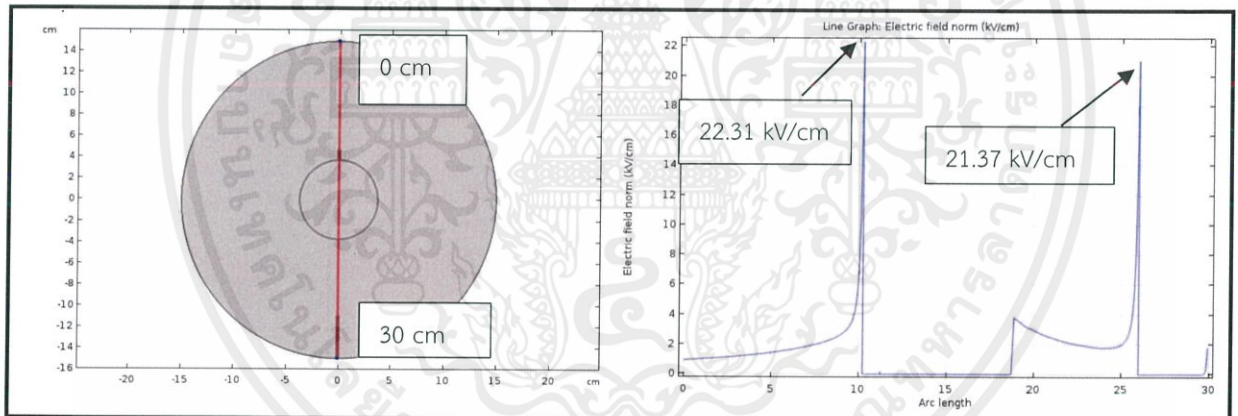
Parameter	Value
Diameter of conductor	7.5 cm
Diameter of enclosure	30 cm
Relative permittivity of air	1.0
Relative permittivity of spacer	3.6
Applied voltage at conductor	20 kV
Length of protrusion on conductor	1-3 cm
Length of protrusion on enclosure	4-6 cm

ผลการจำลอง

- เมื่อวัตถุยื่นบนตัวนำมีขนาด 1 ซม. และวัตถุยื่นบนตัวถัง 4 ซม. จะได้ผลการจำลองสนามไฟฟ้าดังรูปต่อไปนี้

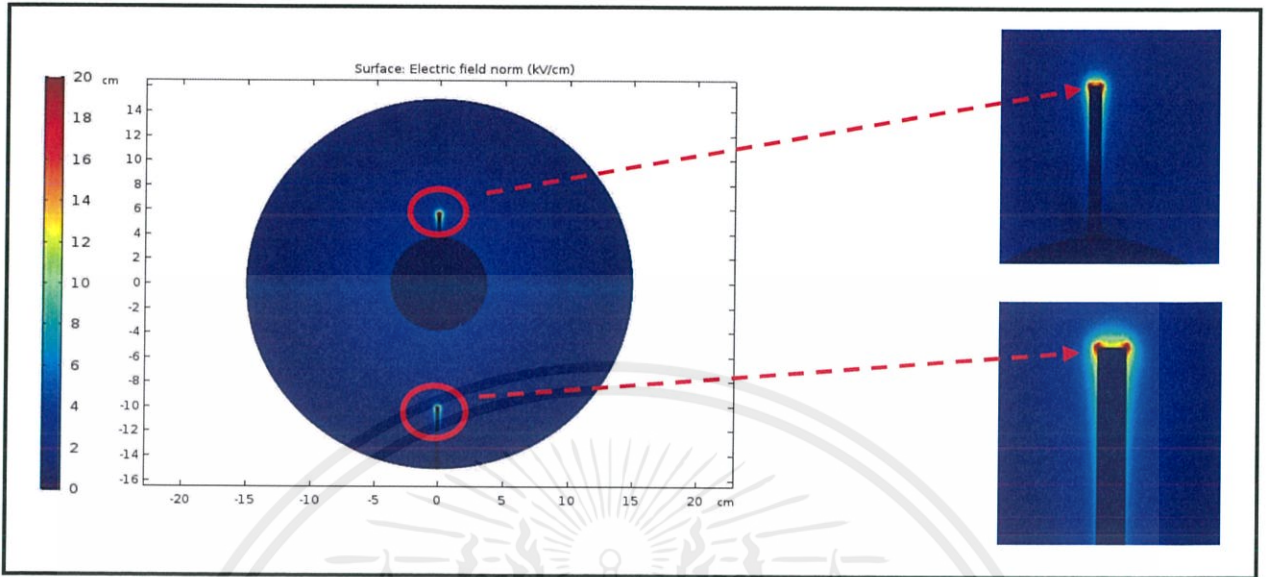


รูปที่ 3.27 ผลการจำลองสนามไฟฟ้าในกรณีวัตถุยื่นบนตัวนำมีขนาด 1 ซม. และวัตถุยื่นบนตัวถัง 4 ซม.

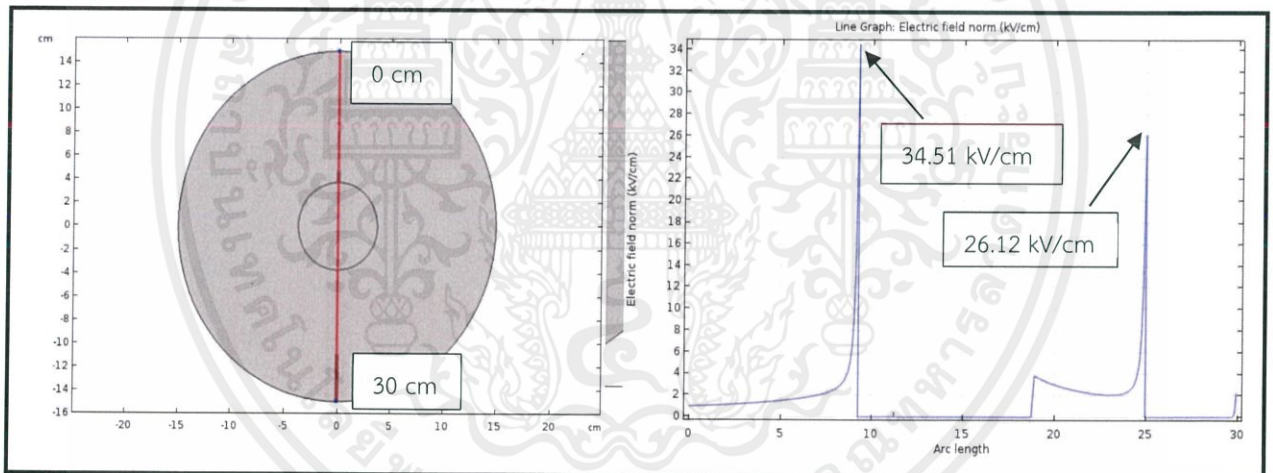


รูปที่ 3.28 เส้นกราฟของสนามไฟฟ้าในกรณีวัตถุยื่นบนตัวนำมีขนาด 1 ซม. และวัตถุยื่นบนตัวถัง 4 ซม.

- เมื่อวัตถุยื่นบนตัวนำมีขนาด 2 ซม. และวัตถุยื่นบนตัวถึง 5 ซม. จะได้ผลการจำลองสนามไฟฟ้าดังรูปต่อไปนี้



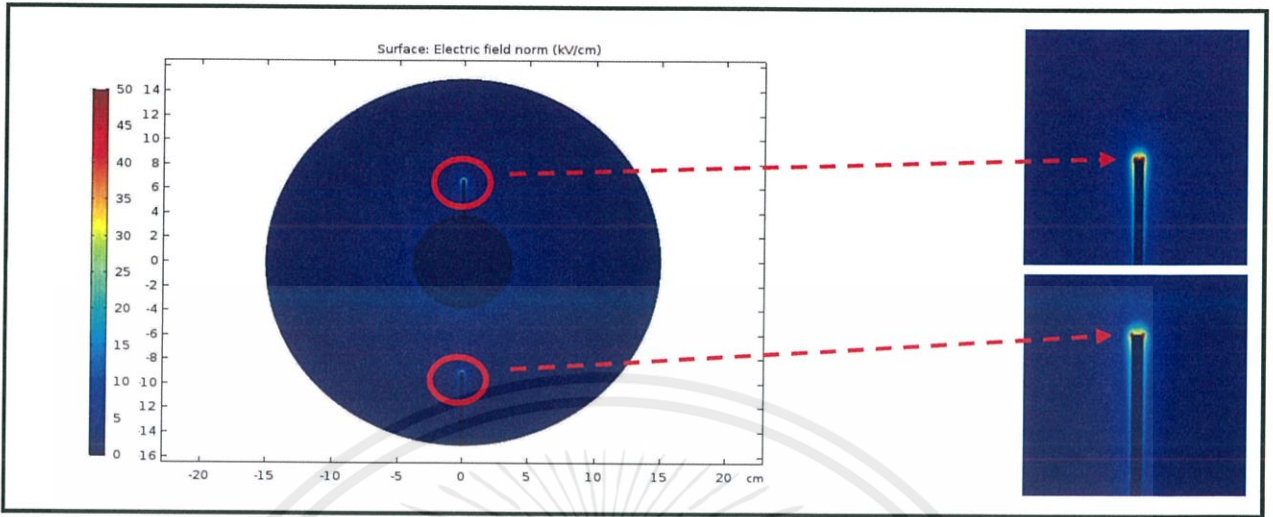
รูปที่ 3.29 ผลการจำลองสนามไฟฟ้าในกรณีวัตถุยื่นบนตัวนำมีขนาด 2 ซม. และวัตถุยื่นบนตัวถึง 5 ซม.



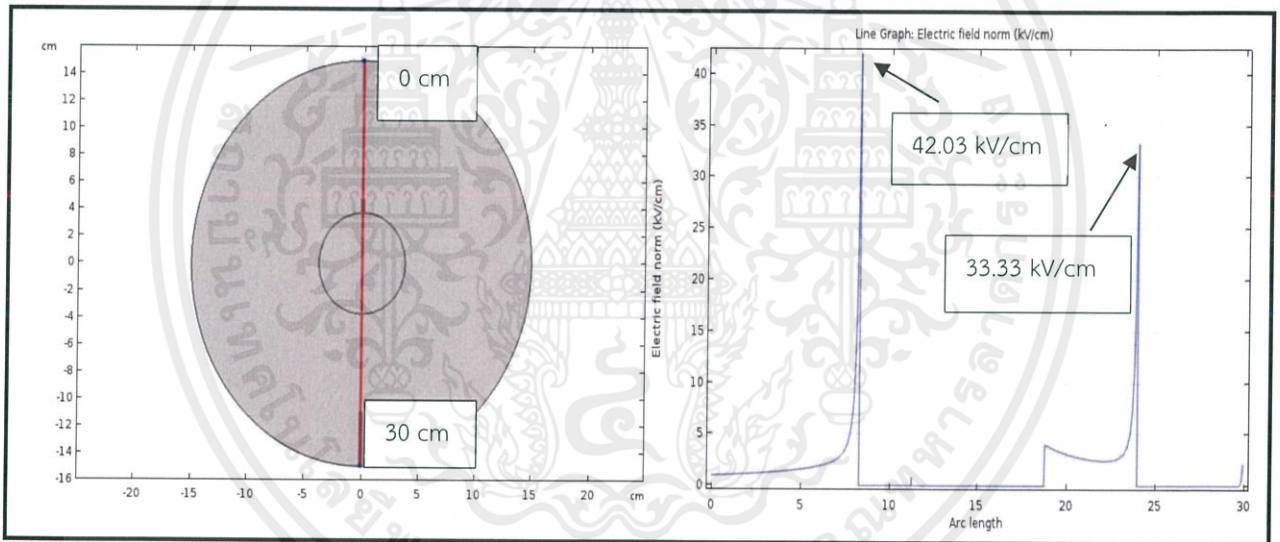
รูปที่ 3.30 เส้นกราฟของสนามไฟฟ้าในกรณีวัตถุยื่นบนตัวนำมีขนาด 2 ซม. และวัตถุยื่นบนตัวถึง 5 ซม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เมื่อวัตถุยื่นบนตัวนำมีขนาด 3 ซม. และวัตถุยื่นบนตัวถึง 6 ซม. จะได้ผลการจำลองสนามไฟฟ้าดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 3.31 ผลการจำลองสนามไฟฟ้าในกรณีวัตถุยื่นบนตัวนำมีขนาด 3 ซม. และวัตถุยื่นบนตัวถึง 6 ซม.

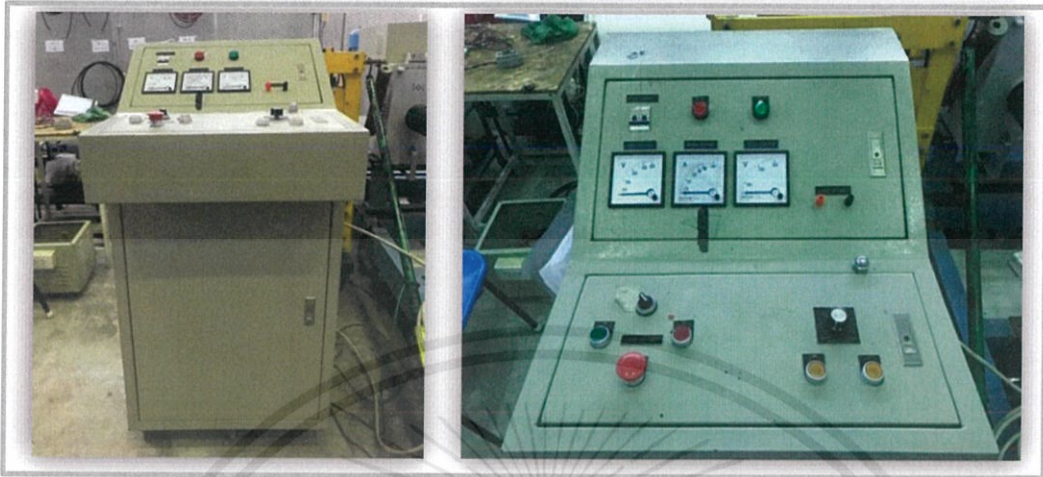


รูปที่ 3.32 เส้นกราฟของสนามไฟฟ้าในกรณีวัตถุยื่นบนตัวนำมีขนาด 3 ซม. และวัตถุยื่นบนตัวถึง 6 ซม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

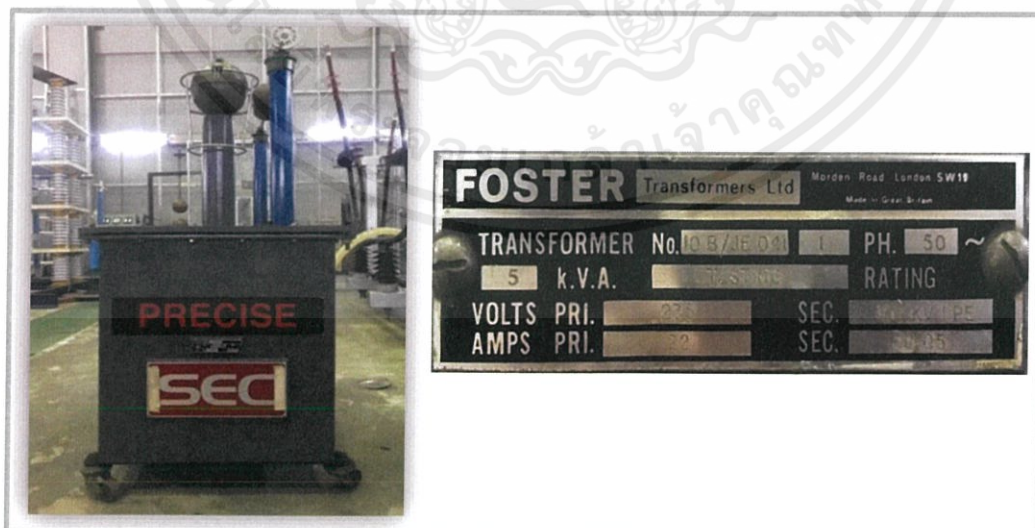
3.3.1 วาริแอกสำหรับปรับแรงดันไฟฟ้า



รูปที่ 3.33 วาริแอกสำหรับปรับแรงดันไฟฟ้า

3.3.2 หม้อแปลงแรงดันสูงกระแสสลับ 100 kV 50 mA

- Rated Power 5 kVA
- Input Voltage Max. 300 V 50 Hz
- Output Voltage 100 kV 1 P
- Output current 50 mA
- Frequency 50 Hz



รูปที่ 3.34 หม้อแปลงแรงดันสูงกระแสสลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 โวลต์เตจดีไวเดอร์ พิกัด 100 kV บรรจุแก๊ส SF₆

- Rated Voltage AC/DC / Impulse 100kV
- Rated Ratio AC 980:1 / DC 985:1 / Impulse 993:1
- Rated Capacitance (High) 110 pF
- Rated Capacitance (Low) 110 nF
- Rated Resistance (High) 250 MΩ
- Rated Resistance (Low) 250 Ω
- Frequency 50 Hz



รูปที่ 3.35 โวลต์เตจดีไวเดอร์

3.3.4 ตัวต้านทานน้ำ



รูปที่ 3.36 ตัวต้านทานน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.5 มัลติมิเตอร์



รูปที่ 3.37 มัลติมิเตอร์

3.3.6 ตัวเก็บประจุคัปปลิง (Coupling Capacitor)

- Capacitance 1 nF
- Voltage 100 kV
- Frequency 50/60 Hz



รูปที่ 3.38 ตัวเก็บประจุคัปปลิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.7 คัปปลิงดีไวซ์ (Coupling Device)



รูปที่ 3.39 คัปปลิงดีไวซ์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดสอบและผลการทดสอบ

จากการศึกษาโครงสร้างและระบบการทำงานในส่วนต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้าสถานีย่อยฉนวนแก๊ส (Gas Insulated Substation : GIS) และระบบส่งจ่ายฉนวนแก๊ส (Gas Insulated Transmission Line : GIL) พบว่าปัญหาส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นภายในระบบนั้น เกิดจากการเกิดดิสชาร์จบางส่วนภายในจากสิ่งบกพร่องซึ่งชนิดสิ่งบกพร่องที่พบส่วนมากนั้นประกอบด้วย 1) อนุภาคโลหะ (metallic particle) 2) วัตถุยื่น (protrusion) 3) โพรงในฉนวนแข็ง (void) 4) วัตถุลอย (floating electrode) โดยในปฏิญานพันธฉบับนี้จะเน้นการตรวจจับของสิ่งบกพร่องชนิดอนุภาคโลหะและวัตถุยื่น เนื่องจากเป็นสิ่งบกพร่องที่พบได้บ่อยที่สุด เมื่อมีสิ่งบกพร่องหลุดเข้าไปภายในระบบ ซึ่งสิ่งบกพร่องเหล่านี้จะก่อให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าลดลงนำไปสู่การเกิดดิสชาร์จบางส่วน และรวมถึงการเกิดเบรกดาว์นทางไฟฟ้า ตามลำดับ ดังนั้นในปฏิญานพันธฉบับนี้จึงมุ่งเน้นไปที่การทดสอบและตรวจจับสิ่งบกพร่องโดยใช้การทดสอบแบบ Conventional เนื่องจากเป็นวิธีพื้นฐานและเป็นที่ยอมรับใช้ภายในห้องทดสอบโดยเฉพาะ

4.1 ขนาดและพิกัดของ GIL ที่ใช้ทำการทดสอบ

เพื่อศึกษาคุณลักษณะและรูปแบบการเกิดดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดจากสิ่งบกพร่อง การทดสอบถูกจัดขึ้นใน GIL 1 เฟส พิกัดแรงดัน 230kV พิกัดกระแส 2500A ความยาว 2.5 เมตร โดยใช้อากาศเป็นฉนวนระหว่างตัวนำและตัวถัง ภายใน GIL ประกอบด้วยตัวนำซึ่งอยู่กึ่งกลางของ GIL ซึ่งถูกยึดด้วยโคนเปิดที่ปลายของ GIL ที่ระหว่าง Disconnecting Unit และ Straight Unit จะใช้แผ่นไมล่าซึ่งเป็นฉนวนเพื่อจำลองบริเวณฉนวนแข็งที่ใช้คั่นระหว่าง GIL (Barrier insulator) ที่ปลายของ GIL จะป้อนแรงดันด้วยหม้อแปลงไฟฟ้ากระแสสลับพิกัด 100kV 50mA โดยรายละเอียดเพิ่มเติมของ GIL จะแสดงในตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แสดงโครงสร้างภายนอกของท่อ GIL

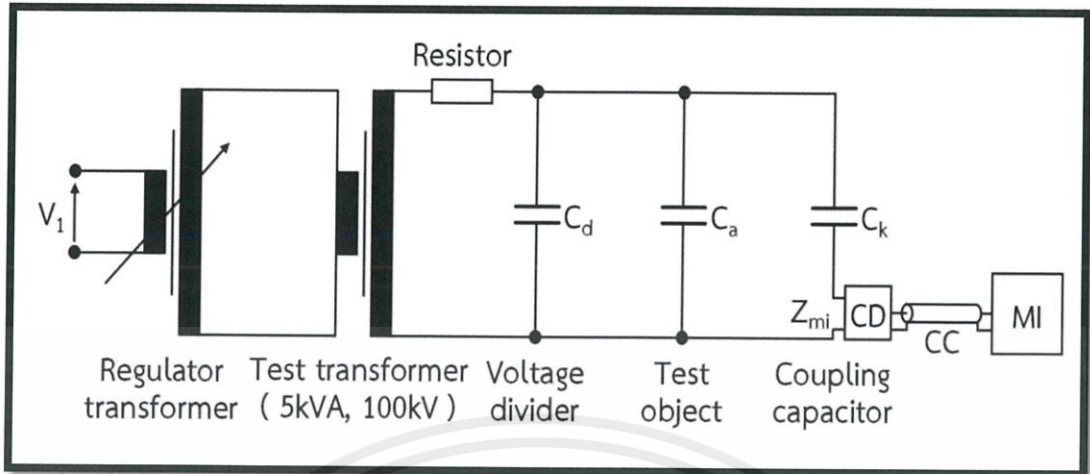
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 แสดงข้อมูลจำเพาะของ GIL

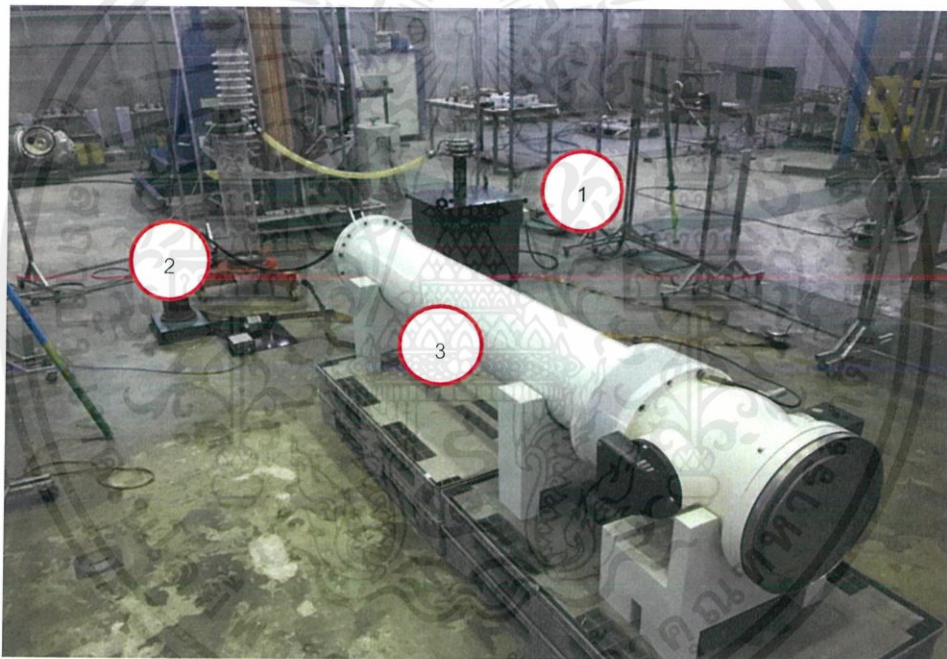
Item	Particulars
1. Rated Current at 42degree Celsius	2500 A
2. Neutral arrangement	Solidly Earthed
3. Nominal voltage	230 kV rms
4. Highest voltage for equipment	245 kV rms
5. Frequency	50 Hz
6. Enclosure inside diameter	350 mm
7. Enclosure outside diameter	366 mm
8. Conductor outside diameter	92 mm
9. Capacitance per phase per meter	42pF/m
10. Inductance per phase per meter	0.27 μ H/m
11. Length	2.5 m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 วงจรการทดลอง



รูปที่ 4.2 วงจรในการทดลองการเกิดดิสชาร์จบางส่วนแบบ Conventional

รูปที่ 4.3 วงจรในการทดลองการเกิดดิสชาร์จบางส่วนแบบ set up
เมื่อ 1. หม้อแปลงทดสอบ 2. ตัวเก็บประจุคัปปลิง 3. GIL

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ขั้นตอนในการทดลอง

4.3.1 ขั้นตอนในการวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนแบบ Conventional

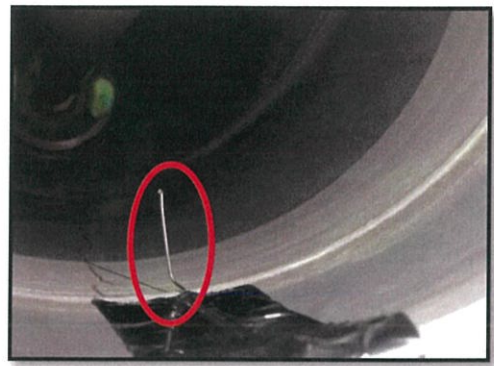
1. ทำการต่อวงจรดังรูปที่ 4.2 และ 4.3
2. เมื่อต่อวงจรเสร็จทำการสอบเทียบค่าประจุของการเกิดดิสชาร์จบางส่วน และค่าแรงดันที่อ่านได้
3. ในการทดลองทำการติดตั้งสิ่งบกพร่องจำลองทั้งหมด 5 กรณี โดยขนาดที่ติดตั้งดังตารางที่ 4.2 และจุดติดตั้งดังรูปที่ 4.4
4. ทำการขึ้นแรงดันจนพบการเกิดดิสชาร์จบางส่วน
5. ทำการบันทึกผลการทดลอง

ตารางที่ 4.2 แสดงพิกัดของวัตถุทดสอบต่อ GIL

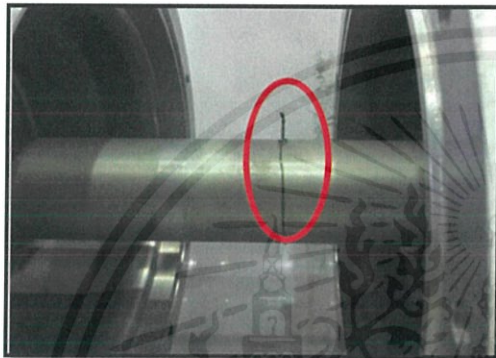
PD measurement of protrusion on conductor		
Length (cm)	1	
	2	
	3	
PD measurement of protrusion on enclosure		
Length (cm)	1	
	2	
	3	
PD measurement of protrusion on conductor below the mylar sheet		
Length (cm)	1	
	2	
	3	
PD measurement of protrusion on conductor with protrusion on enclosure		
Length (cm)	Conductor	Enclosure
	1	4
	2	5
	3	6
PD measurement of metallic particle on conductor		
Diameter (cm)	0.3	
	0.4	
	0.5	



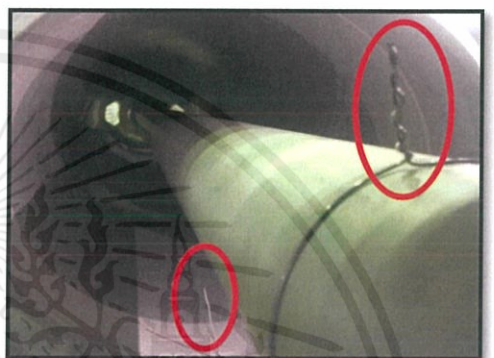
ก.



ข.



ค.



ง.



จ.

รูปที่ 4.4 การติดตั้งสิ่งบกพร่องจำลอง

เมื่อ ก. แสดงวัตถุยื่นจากฝั่งตัวนำ

ข. แสดงวัตถุยื่นจากฝั่งตัวถ้ง

ค. แสดงวัตถุยื่นจากฝั่งตัวนำภายใต้ฉนวนไมล่า

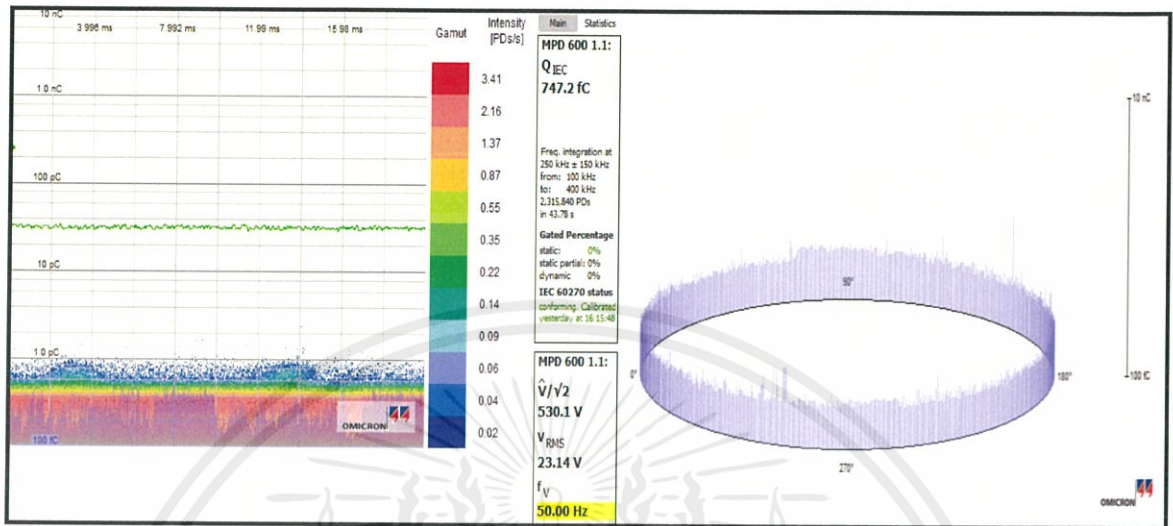
ง. แสดงวัตถุยื่นจากฝั่งตัวนำและฝั่งตัวถ้ง

จ. แสดงอนุภาคโลหะจากฝั่งตัวนำ

4.4 ผลการทดลอง

4.4.1 ผลการทดลองการวัดดิสชาร์จบางส่วนแบบ Conventional ดังรูปที่ 4.5

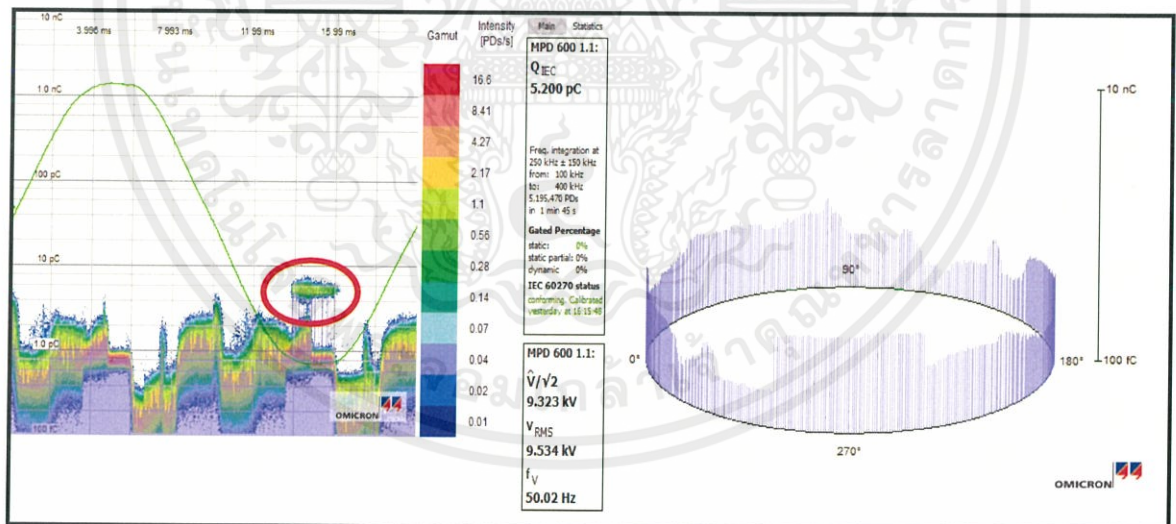
- ผลการวัด Background Noise



รูปที่ 4.5 ผลการวัด Background Noise

ผลการทดลองกรณีที่ 1 ทำการติดตั้งสิ่งบกพร่องจำลองชนิดวัตถุยื่นขนาด 1 ซม., 2 ซม. และ 3 ซม. โดยทำการติดตั้งบนตัวนำ ดังรูปต่อไปนี้

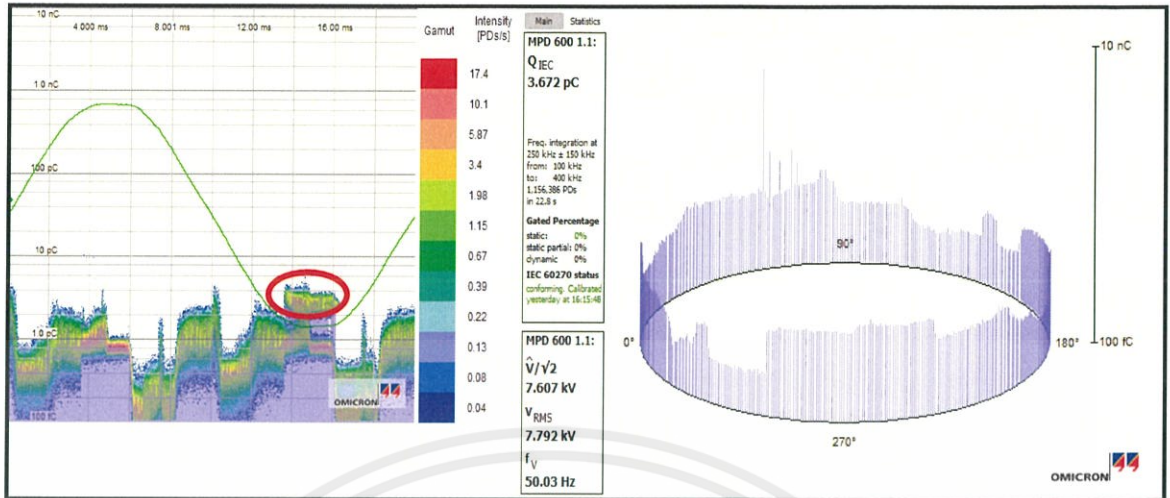
- ผลการวัดดิสชาร์จบางส่วนกรณี วัตถุยื่นฝั่งตัวนำขนาด 1 ซม.



รูปที่ 4.6 ผลการวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนกรณีวัตถุยื่นฝั่งตัวนำขนาด 1 ซม.

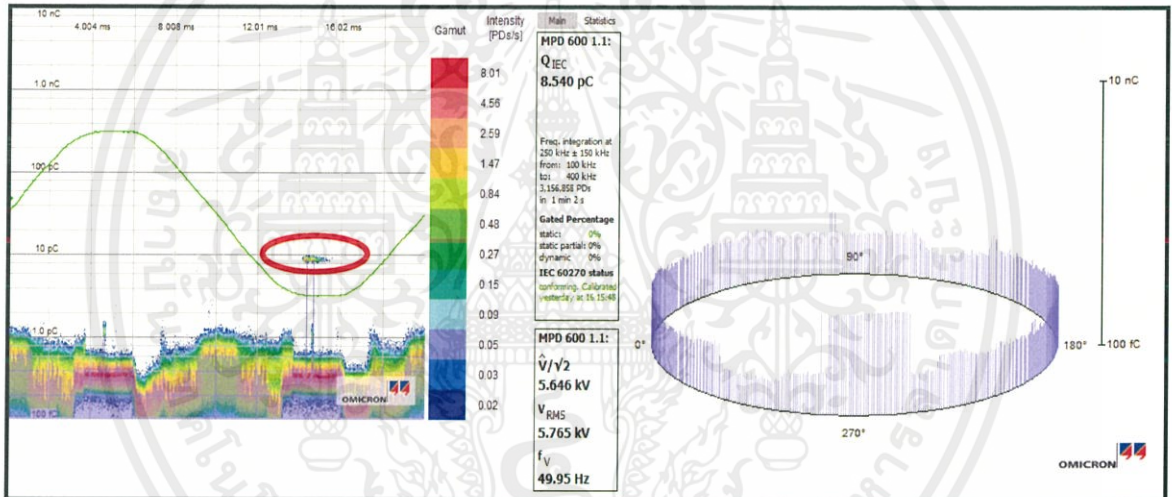
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ผลการวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนกรณี วัตถุยื่นฝั่งตัวนำขนาด 2 ซม.



รูปที่ 4.7 ผลการวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนกรณีวัตถุยื่นฝั่งตัวนำขนาด 2 ซม.

- ผลการวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนกรณี วัตถุยื่นฝั่งตัวนำขนาด 3 ซม.

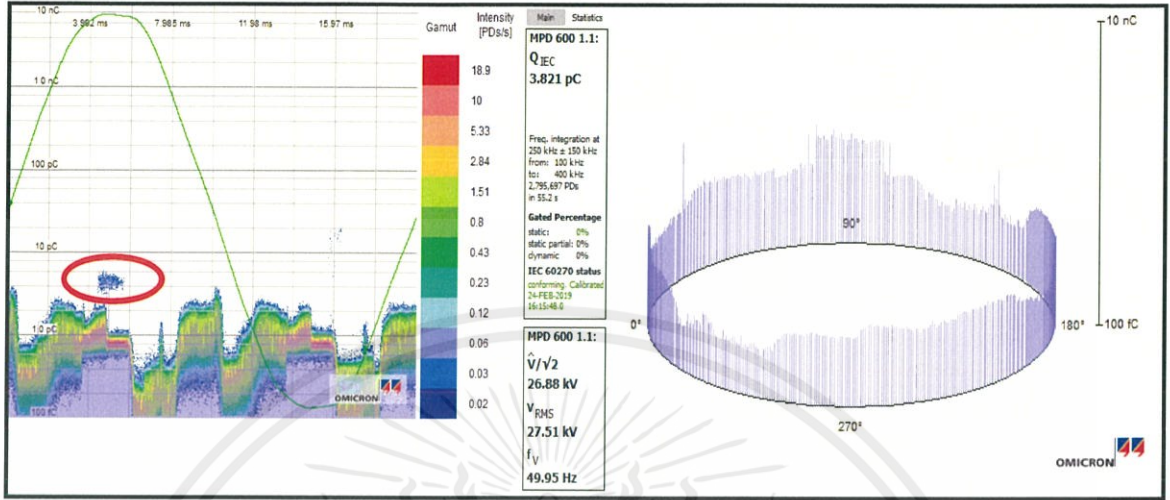


รูปที่ 4.8 ผลการวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วน กรณีวัตถุยื่นฝั่งตัวนำขนาด 3 ซม.

จากผลการทดลองในกรณีวัตถุยื่นจากฝั่งตัวนำที่มีขนาด 1 ซม. , 2 ซม. และ 3 ซม. จะพบว่ารูปแบบของ PRPD Pattern จะเหมือนกับการเกิดโคโรน่าน้ำแข็งแรงดันสูงและค่าแรงดัน PDIV จะน้อยลงเมื่อขนาดของวัตถุยื่นเพิ่มขึ้น

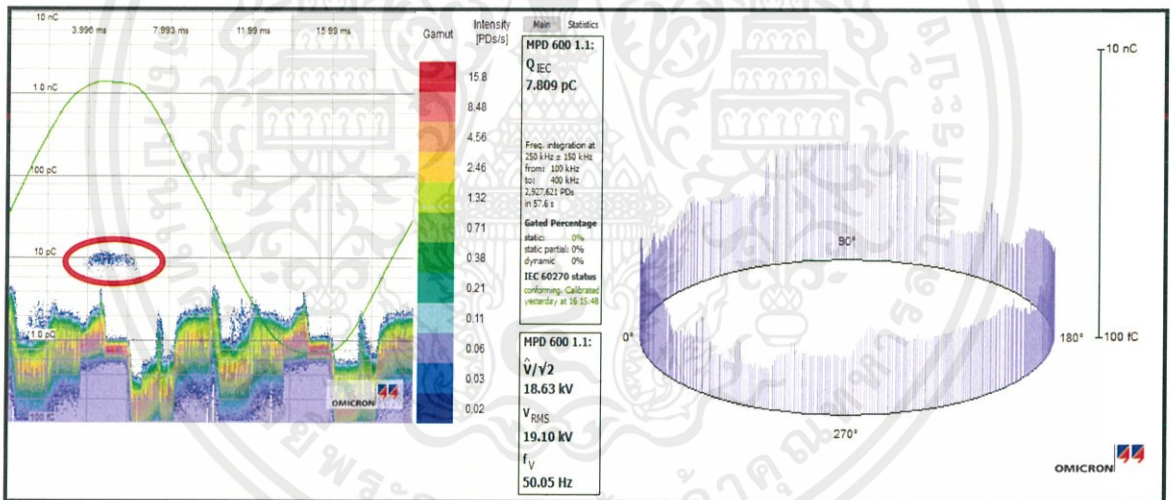
ผลการทดลองกรณีที่ 2 ทำการติดตั้งสิ่งบกพร่องจำลองชนิดวัตถุยื่นขนาด 1 ซม., 2 ซม. และ 3 ซม. โดยทำการติดตั้งที่ตัวถัง ดังรูปต่อไปนี้

- ผลการวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนกรณี วัตถุยื่นฝั่งตัวถังขนาด 1 ซม.



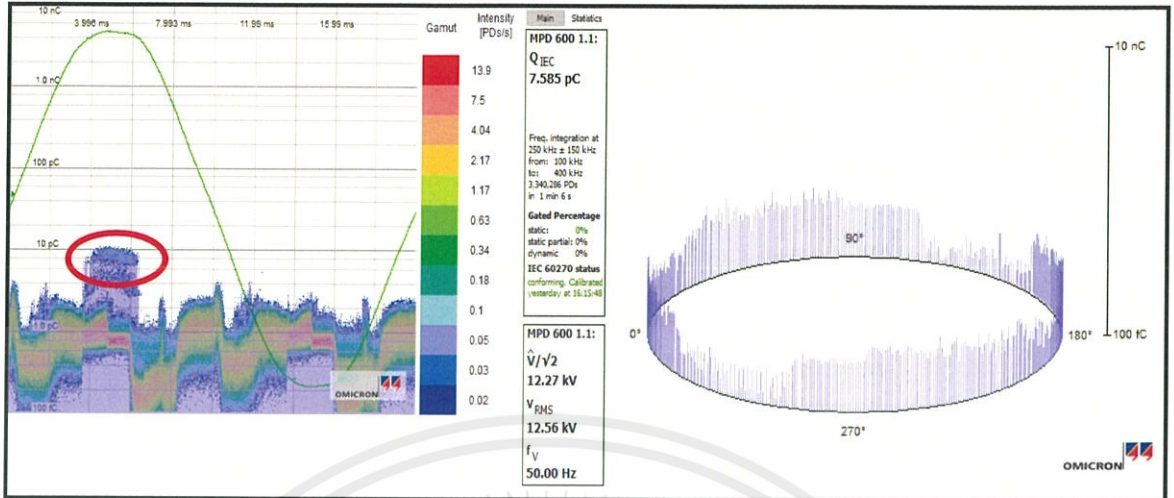
รูปที่ 4.9 ผลการวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนกรณีวัตถุยื่นฝั่งตัวถังขนาด 1 ซม.

- ผลการวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนกรณี วัตถุยื่นฝั่งตัวถังขนาด 2 ซม.



รูปที่ 4.10 ผลการวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนกรณีวัตถุยื่นฝั่งตัวถังขนาด 2 ซม.

- ผลการวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนกรณี วัตถุยื่นฝิ่งตัวถึงขนาด 3 ซม.

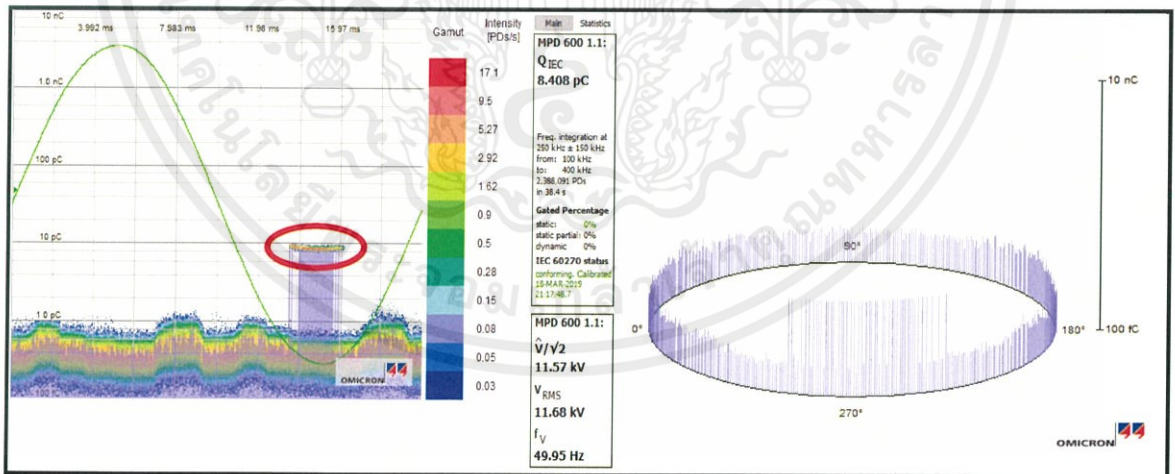


รูปที่ 4.11 ผลการวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนกรณีวัตถุยื่นฝิ่งตัวถึงขนาด 3 ซม.

จากผลการทดลองในกรณีวัตถุยื่นจากฝิ่งตัวถึงที่มีขนาด 1 ซม. , 2 ซม. และ 3 ซม. จะพบว่ารูปแบบของ PRPD Pattern จะเหมือนกับการเกิดโคโรน่าฝิ่งแรงดันต่ำและค่าแรงดัน PDIV จะน้อยลงเมื่อขนาดของวัตถุยื่นเพิ่มขึ้น

ผลการทดลองกรณีที่ 3 ทำการติดตั้งสิ่งบกพร่องจำลองชนิดวัตถุยื่นขนาด 1 ซม. , 2 ซม. และ 3 ซม. โดยทำการติดตั้งบนตัวนำ ภายใต้แผ่นฉนวนไมลา ดังรูปต่อไปนี้

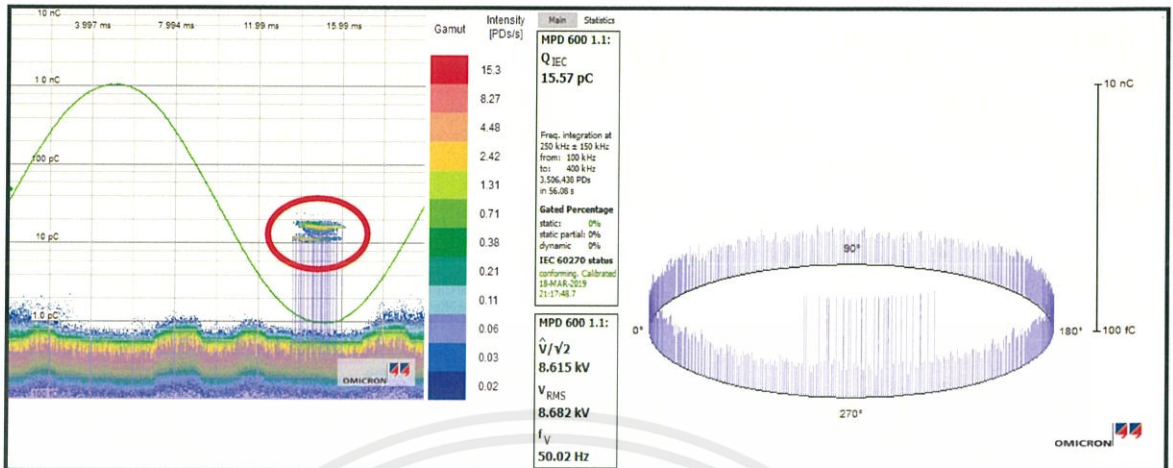
- ผลการวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนกรณี วัตถุยื่นฝิ่งตัวนำขนาด 1 ซม. ภายใต้แผ่นฉนวนไมลา



รูปที่ 4.12 ผลการวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนกรณีวัตถุยื่นฝิ่งตัวนำขนาด 1 ซม.

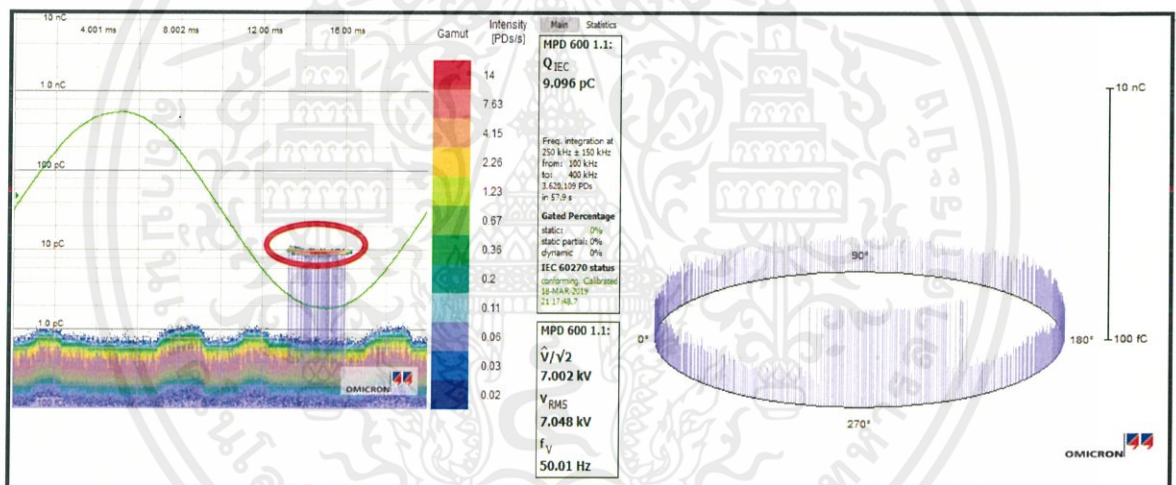
ภายใต้แผ่นฉนวนไมลา

- ผลการวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนกรณี วัตต์ยูเอ็นฝิ่งตัวนำขนาด 2 ซม. ภายใต้แผ่นฉนวนไมล่ำ



รูปที่ 4.13 ผลการวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนกรณีวัตต์ยูเอ็นฝิ่งตัวนำขนาด 2 ซม. ภายใต้แผ่นฉนวนไมล่ำ

- ผลการวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนกรณี วัตต์ยูเอ็นฝิ่งตัวนำขนาด 3 ซม. ภายใต้แผ่นฉนวนไมล่ำ

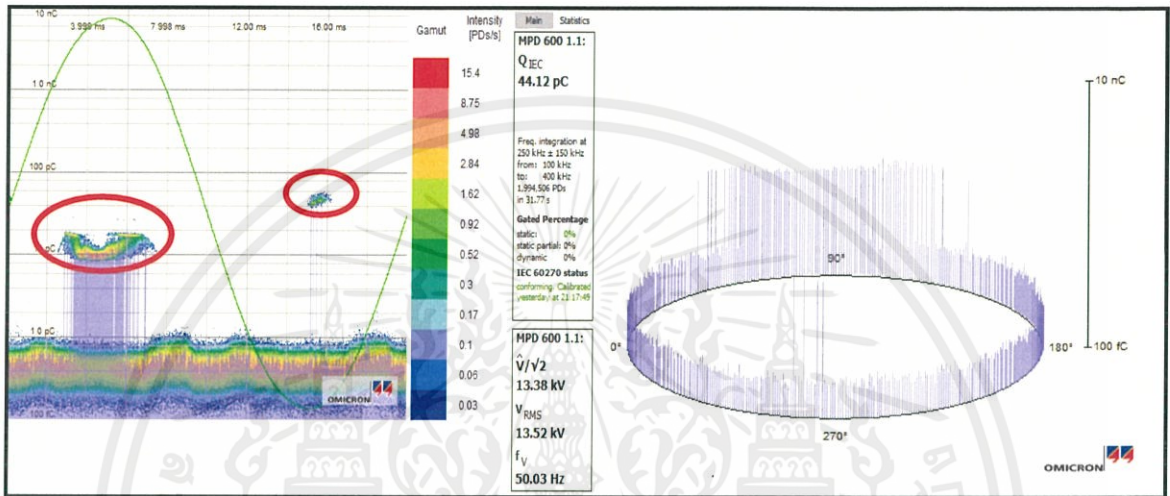


รูปที่ 4.14 ผลการวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนกรณีวัตต์ยูเอ็นฝิ่งตัวนำขนาด 3 ซม. ภายใต้แผ่นฉนวนไมล่ำ

จากผลการทดลองในกรณีวัตต์ยูเอ็นฝิ่งตัวนำภายใต้ฉนวนไมล่ำพบว่าเนื่องจากแผ่นฉนวนไมล่ำไม่ได้มีการต่อกับกราวด์ของตัวถังของ GIL ทำให้แรงดัน PDIV สูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีวัตต์ยูเอ็นฝิ่งตัวนำพลัสของการเกิดดิสชาร์จบางส่วน มีความหนา ส่วน PRPD pattern เหมือนกับโคโรนาฝิ่งแรงดันสูง

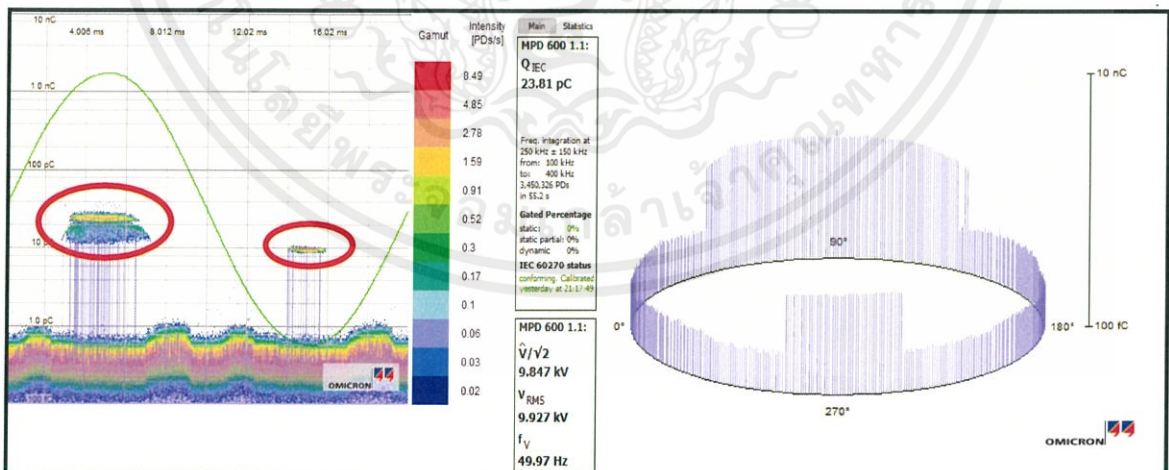
ผลการทดลองกรณีที่ 4 ทำการติดตั้งสิ่งบกพร่องจำลองชนิดวัตถุเย็นขนาด 1 ซม. บนตัวนำพร้อมกับติดตั้งวัตถุเย็นขนาด 4 ซม. บนตัวถัง, วัตถุเย็นขนาด 2 ซม. บนตัวนำพร้อมกับติดตั้งวัตถุเย็นขนาด 5 ซม. บนตัวถัง, และวัตถุเย็นขนาด 3 ซม. บนตัวนำพร้อมกับติดตั้งวัตถุเย็นขนาด 6 ซม. บนตัวถัง ดังรูปต่อไปนี้

- ผลการวัด การเกิดดิสชาร์จบางส่วนกรณีทำการติดตั้งสิ่งบกพร่องจำลองชนิดวัตถุเย็นขนาด 1 ซม. บนตัวนำพร้อมกับติดตั้งวัตถุเย็นขนาด 4 ซม. บนตัวถัง



รูปที่ 4.15 ผลการวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนกรณีวัตถุเย็นขนาด 1 ซม. บนตัวนำ พร้อมกับติดตั้งวัตถุเย็นขนาด 4 ซม. บนตัวถัง

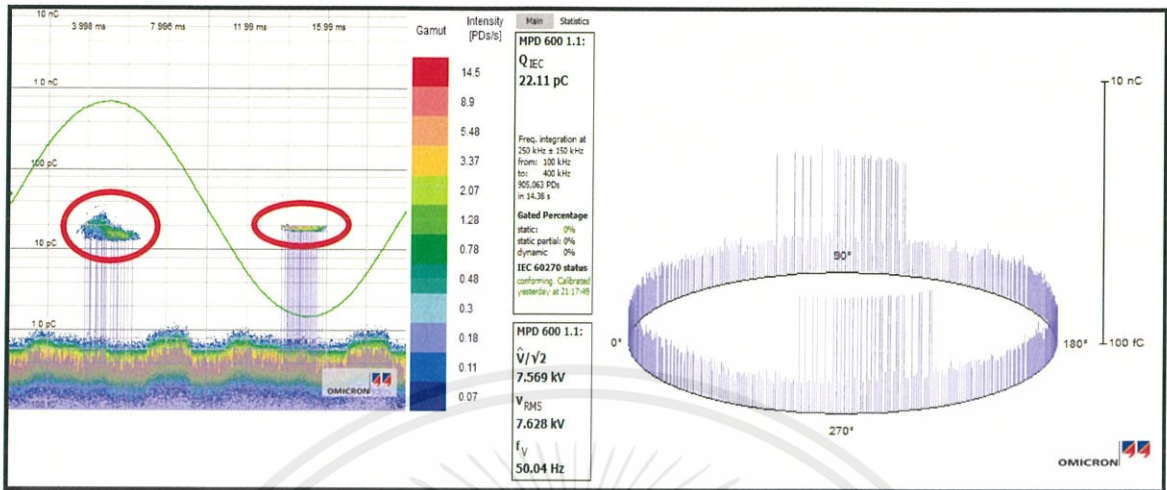
- ผลการวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนกรณีทำการติดตั้งสิ่งบกพร่องจำลองชนิดวัตถุเย็นขนาด 2 ซม. บนตัวนำพร้อมกับติดตั้งวัตถุเย็นขนาด 5 ซม. บนตัวถัง



รูปที่ 4.16 ผลการวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนกรณีวัตถุเย็นขนาด 2 ซม. บนตัวนำ พร้อมกับติดตั้งวัตถุเย็นขนาด 5 ซม. บนตัวถัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ผลการวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนกรณีทำการติดตั้งสิ่งบกพร่องจำลองชนิดวัตถุเย็นขนาด 3 ซม. บนตัวนำพร้อมกับติดตั้งวัตถุเย็นขนาด 6 ซม. บนตัวถัง



รูปที่ 4.17 ผลการวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนกรณีวัตถุเย็นขนาด 3 ซม. บนตัวนำ พร้อมกับติดตั้งวัตถุเย็นขนาด 6 ซม. บนตัวถัง

จากผลการทดลองในกรณีติดตั้งสิ่งบกพร่องจำลองชนิดวัตถุเย็นขนาด 1 ซม. บนตัวนำพร้อมกับติดตั้งวัตถุเย็นขนาด 4 ซม. บนตัวถัง, วัตถุเย็นขนาด 2 ซม. บนตัวนำพร้อมกับติดตั้งวัตถุเย็นขนาด 5 ซม. บนตัวถัง, และวัตถุเย็นขนาด 3 ซม. บนตัวนำพร้อมกับติดตั้งวัตถุเย็นขนาด 6 ซม. บนตัวถัง จะพบว่ากรณีวัตถุเย็นขนาด 3 ซม. จะพบว่ารูปแบบของ PRPD Pattern จะเกิดโคโรน่าฝั่งแรงดันสูงก่อนโคโรน่าฝั่งแรงต่ำ ส่วนวัตถุเย็นขนาด 1 ซม. บนตัวนำพร้อมกับติดตั้งวัตถุเย็นขนาด 4 ซม. บนตัวถัง และวัตถุเย็นขนาด 2 ซม. บนตัวนำพร้อมกับติดตั้งวัตถุเย็นขนาด 5 ซม. บนตัวถัง จะเกิดโคโรน่าด้านฝั่งแรงต่ำก่อนโคโรน่าฝั่งแรงสูง เมื่อเปรียบเทียบทั้ง 3 ขนาดที่ได้ทำการทดลองในกรณีที่ 4 พบว่าความหนาแน่นของการเกิดดิสชาร์จบางส่วนที่มุม 90 องศาจะลดลงเมื่อขนาดของวัตถุเย็นเพิ่มขึ้นและความหนาแน่นของการเกิดดิสชาร์จบางส่วน ที่มุม 270 องศาจะลดลงเมื่อขนาดวัตถุเย็นลดลง ผลการทดลองกรณีที่ 5 ทำการติดตั้งสิ่งบกพร่องจำลองชนิดอนุภาคโลหะขนาด 3 ซม., 4 ซม. และ 5 ซม. โดยทำการติดตั้งบนตัวนำ

ไม่พบ PRPD pattern ในกรณีนี้เนื่องจากแรงดันที่ป้อนให้กับ GIL ถูกจำกัดอยู่ที่ 30 kV เพราะหม้อแปลงทดสอบจะเกิดการเกิดดิสชาร์จบางส่วน เมื่อป้อนแรงดันเกิน 30 kV ขึ้นไปรวมถึงการที่วัตถุที่ใช้จำลองอนุภาคโลหะเป็นทรงกลมที่มีขนาดเล็กมาก ๆ เมื่อเทียบกับตัวนำของ GIL ทำให้จะต้องใช้แรงดันเพิ่มขึ้นในการทดสอบ

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป

1. PRPD patterns ที่ได้จากการทดลองจากกรณีศึกษาที่ 1-4 จะเหมือนกับ PRPD pattern ของโคโรนาดีสชาร์จ
2. เมื่อระยะของวัตถุยื่นเพิ่มขึ้น ค่าPDIVจะลดลงเนื่องจากการลดระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดด้านแรงดันสูงกับอิเล็กโทรดด้านแรงดันต่ำ
3. เมื่อแหล่งกำเนิด PD จำลองถูกห่อด้วยแผ่นไมลาร์จะทำให้ค่า PDIV เพิ่มขึ้น และความหนาของกลุ่ม PD หนาขึ้น
4. จากผลการทดลองกรณีศึกษาที่ 5 ไม่พบการเกิดดีสชาร์จบางส่วนเนื่องจากเมื่อแรงดันเกิน 30 kV จะมีการเกิดดีสชาร์จบางส่วนจากหม้อแปลงทดสอบทำให้ไม่สามารถเพิ่มระดับแรงดันได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากการทดลองใช้อากาศเป็นฉนวนทำให้เกิดความไม่สมจริงเพราะความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวนของอากาศน้อยกว่า SF₆
2. ควรเพิ่มวิธีการวัด PD ด้วยวิธี UHF ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมในการทดสอบแบบออนไลน์
3. ควรใช้หม้อแปลงทดสอบที่ไม่เกิดดีสชาร์จบางส่วนเพื่อให้ขึ้นแรงดันได้มากขึ้น

บรรณานุกรม

- [1] Hermann, Koch, *Gas-Insulated Substations (GIS)*, John Wiley & Sons, 2014.
- [2] Hermann, Koch, *Gas-Insulated Transmission lines (GIL)*, 1st ed, John Wiley & Sons, 2012.
- [3] S. Sangsa- *High-Voltage Engineering*, Bangkok, Thailand: 2547, ch. 5, pp. 7 17.
- [4] สำรวย สัจข์สะอาด, *วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง* , พิมพ์ครั้งที่ 3, 2549.
- [5] IEC 62478, Ed. 1.0, “High voltage test techniques – Measurement of partial discharges by electromagnetic and acoustic methods”, 2016.
- [6] CIGRE 654, “UHF partial discharge detection system for GIS: Application guide for sensitivity verification,” April 2016.
- [7] CIGRE Working Group D1.37: *Guidelines for partial discharge detection using conventional (IEC 60270) and unconventional method*, CIGRE Technical Brochure No. 662, 2016.
- [8] IEC 62478, Ed. 1.0, “High voltage test techniques – Measurement of partial discharges by electromagnetic and acoustic methods”, 2016.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The Study of Conventional Partial Discharge Measurement for Gas Insulated Line

NorasagePattanadech
Electrical Engineering Dept.,
Faculty of Engineering,
King Mongkut's Institute of
Technology Ladkrabang
Bangkok, Thailand
norasage@yahoo.com

Chakkri Houngraisong
Electrical Engineering Dept.,
Faculty of Engineering,
King Mongkut's Institute of
Technology Ladkrabang
Bangkok, Thailand
guyhoungr8@gmail.com

Chalantorn Wichakul
Electrical Engineering Dept.,
Faculty of Engineering,
King Mongkut's Institute of
Technology Ladkrabang
Bangkok, Thailand
chalantorn_w@outlook.com

Narinnitiporn Thanornsakdomrong
Electrical Engineering Dept.,
Faculty of Engineering,
King Mongkut's Institute of
Technology Ladkrabang
Bangkok, Thailand
narinnitiporn.th@gmail.com

Nathanon Monklang
Electrical Engineering Dept.,
Faculty of Engineering,
King Mongkut's Institute of
Technology Ladkrabang
Bangkok, Thailand
nattnmk@hotmail.com

Tritod Nganpitak
Electrical Engineering Dept.,
Faculty of Engineering,
King Mongkut's Institute of
Technology Ladkrabang
Bangkok, Thailand
Ng.tritod@gmail.com

Abstract—Partial discharge (PD) measurement is one of the insulation diagnosis tools used for diagnosis the condition of the high voltage apparatus. Generally, PD is generated at the highly electric field stress site in the insulation system. This research focuses on PD measurement in a gas-insulated line (GIL) by using the conventional PD measurement. The 230kV, 2500A, single phase, GIL with 2.5m length was setup and used for experiments. In this paper, the experiments were divided into 4 cases, according to the types of artificial protrusions, i.e. 1) a protrusion on the high voltage conductor 2) a protrusion on the enclosure and 3) two protrusions on both conductor and enclosure. 4) a protrusion on the conductor covered by insulation compartment. The lengths of protrusions were varied. The results of experiment were presented with the phase resolved partial discharge patterns.

Keywords—Partial Discharge, Gas-insulated line, Phase resolved partial discharge

INTRODUCTION

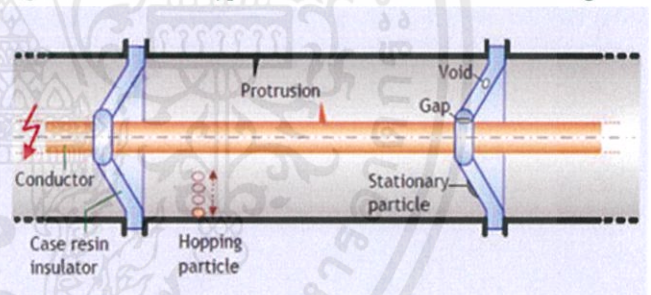
The Gas-insulated line (GIL) are widely used in electrical power system because of its advantages; which are the compact structure, small size, and high reliability [1]. Although, the GIL is good at high reliability, during GIL operation, the failure may occur due to an insulation defect, e.g. protrusions, particles and voids in the spacers.

Partial discharge (PD) may occur, when the insulation defect exists in the insulation system of the high voltage apparatus. This PD can be detected by using the conventional method [2] and/or the nonconventional method. The conventional method is the better way to detect PD in laboratory. However, the conventional method might be difficult to perform onsite because the capacitance of gas-insulated apparatus is very high. Therefore, it is not worth to find and displace the coupling capacitor, which has capacitance higher than the GIL [2].

In this paper, a 230kV, 2500A, single phase GIL was setup for using in the experiment. The artificial defects were prepared. The phase resolved partial discharges (PRPD) were detected and analyzed.

TYPICAL DEFECTS IN GIS AND GIL

Generally, there are several types of defects occurring inside the gas-insulated high voltage apparatus. When PD occurs, it may lead to a failure of the insulation system. In case of gas-insulated substation (GIS) and GIL, the typical defects frequency found are 1) metallic particle 2) protrusion 3) void in spacer, and 4) floating electrode which are shown in Fig.1. The different types of defect cause different damages. In



order to obtain the useful information for condition assessment, it is necessary to identify the defect types.

Fig. 1. Typical defects in gas-insulated high voltage apparatus

Protrusions

Among the defects in gas-insulated high voltage apparatus, the protrusion at conductor is a common defect which can be occurred by polishing the conductor unqualifiedly during an assembly process [3].

When electric field is applied, the protrusion causes a highly increasing in electric field stress. The protrusion tip which has the highest electric field stress causes corona discharge when the electric field stress on that tip exceeds a critical value [4].

This protrusion problem can lead to surface discharge and the electrical breakdown respectively. Therefore, when the protrusion is detected, it has to be removed immediately. However, during PD measurement, the PD level from the protrusion problem is very low and close to the background noise; it is quite difficult to detect the protrusion by using the conventional method [4].

Particles

The metallic particle is a defect most found inside the GIL. Due to lack of human circumspection, this defects usually include to the system during the assembly process [5].

Free metallic particles can be moved along the enclosure and may reach the HV conductor, depending on their size, weight and the electrostatic forces acting on them [4].

Metallic particles in GIS and/or GIL can be charged inside the compartment by acquired voltage. When the value of acquired voltage exceeds the specified value, the metallic particle jumps and moves along the enclosure [6]. Moreover, the moving particle has potential to develop into the other types of defects, i.e. particle on insulator and protrusion. For detecting the metallic particle, some experts prefer lightning impulses test than AC withstand test, due to more sensitive to PD, which emitted from particles [4].

EXPERIMENTAL SETUP

The experiments were performed with a 230kV,2500A, single-phase GIL consists of straight unit and disconnecting unit. The other specifications of GIL, using in experiments, are summarized in table I. The artificial defects were set and placed on different locations. Then, the conventional PD measurements were performed according to IEC60270 [7] for measuring PRPD patterns. The test circuit diagram and test circuit arrangement using in the experiments are showed in Fig.2 and Fig.3 respectively.

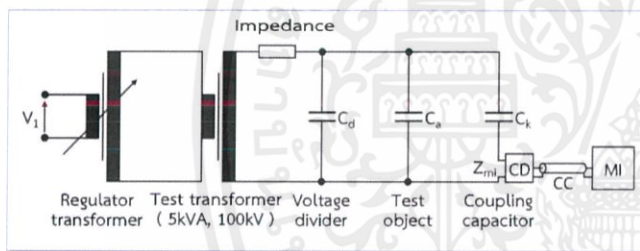


Fig.2 Test circuit diagram used for conventional PD measurement

TABLE I. GIL SPECIFICATION

Item	Particulars
1. Rated Current at 42 degree Celsius	2500 A
2. Neutral arrangement	Solidly Earthed
3. Nominal voltage	230 kV rms
4. Highest voltage for equipment	245 kV rms
5. Frequency	50 Hz
6. Enclosure inside diameter	350 mm
7. Enclosure outside diameter	366 mm
8. Conductor outside diameter	92 mm
9. Capacitance per phase per meter	40.11 pF/m
10. Gaseous insulation	Air
11. Length	2.5m

In this paper, experiments were divided into 4 cases. The positions of artificial protrusions in each case are shown in Fig. 4.

Case 1: The Protrusion on The GIL Conductor

The aluminum wires were used as artificial protrusions with lengths of 1 cm, 2 cm and 3 cm respectively. The location of the artificial protrusions was on the GIL conductor.

Case 2: The Protrusion on the GIL Enclosure

The aluminum wires were used as artificial protrusions with lengths of 1 cm, 2 cm and 3 cm respectively. The location of the artificial protrusions is on the GIL enclosure.

Case 3: The Protrusion on Both GIL Conductor and Enclosure

The aluminum wires were used as artificial protrusions in three cases: 1) the protrusion with the length of 1 cm on the GIL conductor and of 4 cm on the GIL enclosure, 2) the protrusion with the length of 2 cm on the GIL conductor and of 5 cm on the GIL enclosure, 3) the protrusion with the length of 3 cm on the GIL conductor and of 6 cm on the GIL enclosure.

Case 4: The Protrusion on the GIL Conductor Covered by Insulation Compartment

To simulate protrusions near the barrier insulator, the aluminum wires were used with lengths of 1 cm, 2 cm and 3 cm respectively on the GIL conductor, which were covered by the insulation compartment.

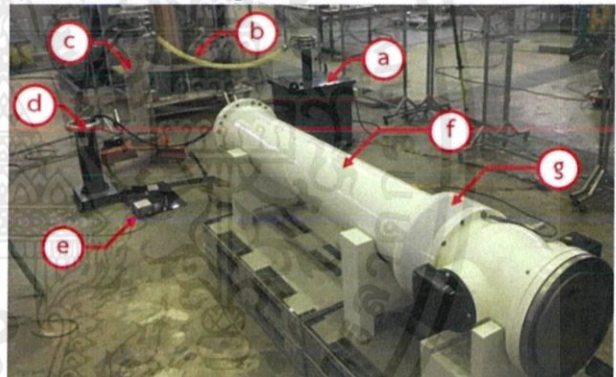


Fig. 3. Test circuit arrangement used for conventional PD measurement (a)Test transformer (b) Water resistor (c) Voltage divider (d) Coupling capacitor (e) Coupling device (f) Compartment of GIL (g) Insulation compartment

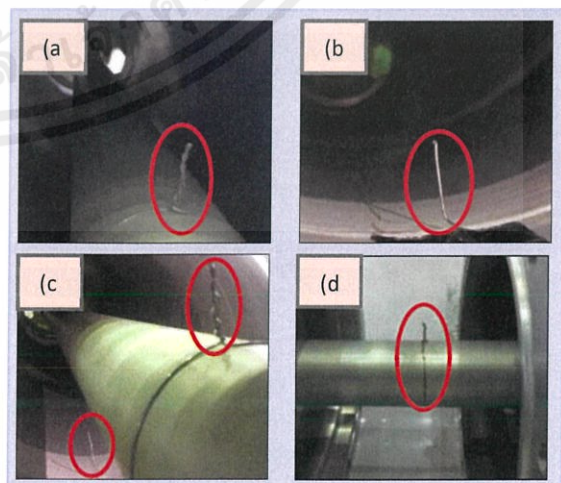


Fig. 4. The locations of the artificial protrusions inside the GIL (a) The protrusion installed on the GIL conductor (case 1)

- (b) The protrusion installed on the GIL enclosure (case 2)
 (c) Protrusions installed on both GIL conductor and enclosure (case 3)
 (d) The protrusion on installed on the GIL conductor, which was covered by insulation compartment (case 4)

RESULTS AND DISCUSSION

The PRPD patterns measured from experiments are shown in Fig. 5 – 16 below.

Case 1: The Protrusion on the GIL Conductor

In this case, PD cluster appeared at 270 degree, which was similar to the typical PD pattern of corona discharge at high voltage electrode. Test results show that increasing the length of artificial protrusion causes decrease in partial discharge inception voltage (PDIV). The PRPD patterns are shown in Fig. 5-7.

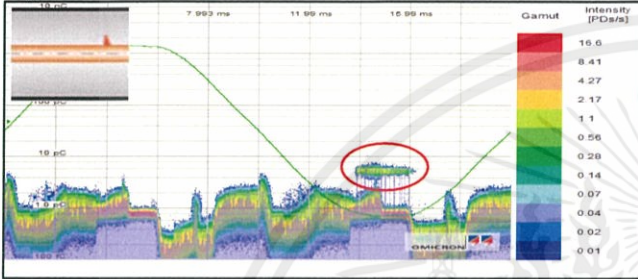


Fig.5. PRPD pattern at 9.53 kV caused by the 1 cm protrusion on the GIL conductor, $Q_{IEC} = 5.20\text{pC}$

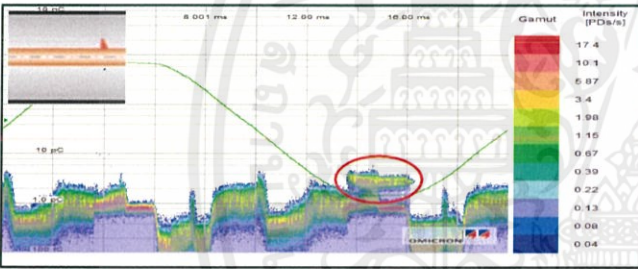


Fig.6. PRPD pattern at 7.61 kV caused by the 2 cm protrusion on the GIL conductor, $Q_{IEC} = 3.672\text{pC}$

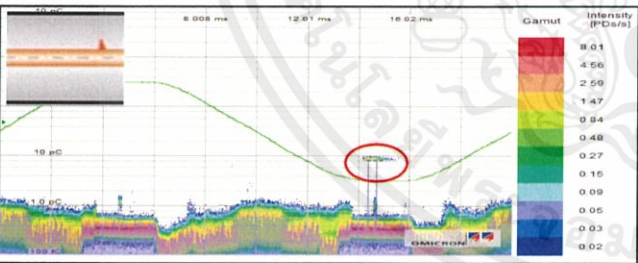


Fig.7. PRPD pattern at 5.77 kV caused by the 3 cm protrusion on the GIL conductor, $Q_{IEC} = 8.540\text{pC}$

B. Case 2 :The Protrusion on the GIL Enclosure

In this case, PD cluster appeared at 90 degree, which was similar to the typical PD pattern of corona discharge at low voltage electrode. Test results show that PDIV decreased with an increase in the length of artificial protrusion. The PRPD patterns obtained from case 2 experiment are illustrated in Fig. 8-10.

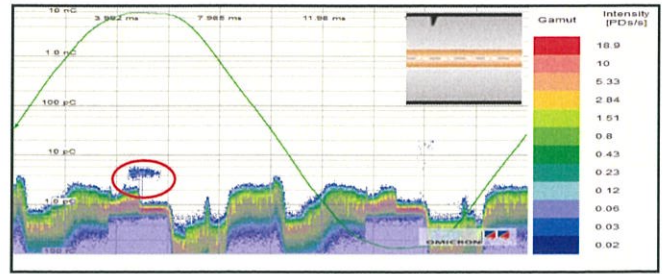


Fig.8. PRPD pattern at 27.51 kV caused by the 1 cm protrusion on the GIL enclosure, $Q_{IEC} = 3.821\text{pC}$

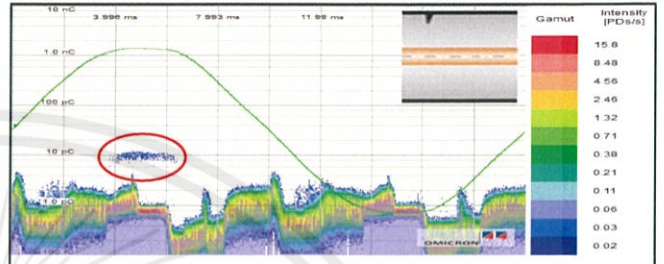


Fig.9. PRPD pattern at 19.10 kV caused by the 2 cm protrusion on the GIL enclosure, $Q_{IEC} = 7.809\text{pC}$

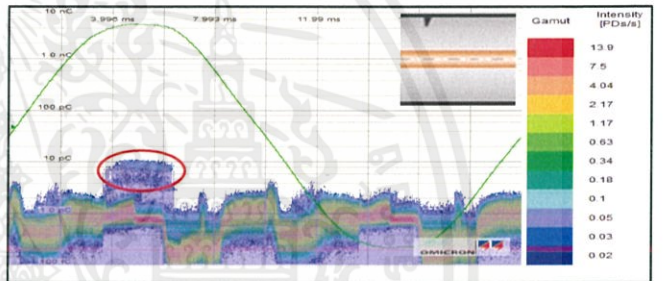


Fig.10. PRPD pattern at 12.56 kV caused by the 3cm protrusion on the GIL enclosure, $Q_{IEC} = 7.585\text{pC}$

C. Case3: Protrusion on both GIL Conductor and Enclosure

In this case, the result from experiment clearly shown the PRPD patterns consisting of 2 PD clusters caused by the, protrusion on the GIL conductor (first case) and the protrusion on the GIL enclosure (second case).

- Fig.11(a), 12(a) and 13(a) show the PD clusters at 90 degree, which were generated from the protrusion on the GIL enclosure.
- Fig.11(b), 12(b) and 13(b) show both PD clusters at 90 degree and 270 degree, which were generated from the protrusion on both GIL conductor and enclosure.

When the length of protrusion on the GIL conductor and/or on the GIL enclosure increased, the PDIV was decreased.

However, in case of PD cluster width, at 270 degree, the PD cluster width increases when the length of protrusion on the GIL conductor increases; in contrast with the PD cluster width at 90 degree, it decreases when the length of protrusion on the GIL enclosure increases.

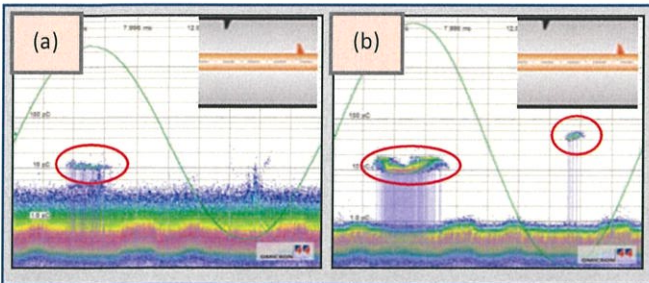


Fig.11. PRPD patterns caused by the 1 cm protrusion on the GIL conductor and the 4 cm protrusion on the GIL enclosure
(a) PRPD pattern at 10.82kV, $Q_{IEC}= 3.621\text{pC}$
(b) PRPD pattern at 13.52kV, $Q_{IEC}= 44.12\text{pC}$

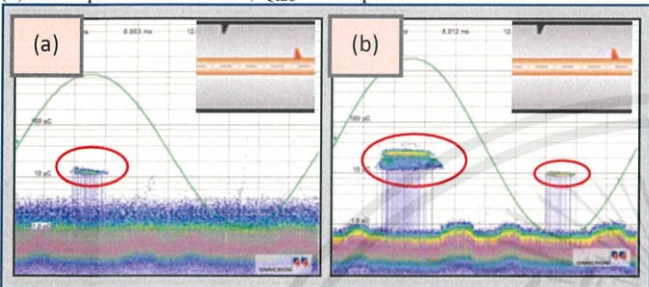


Fig.12. PRPD patterns caused by the 2 cm protrusion on the GIL conductor and the 5 cm protrusion on the GIL enclosure
(a) PRPD pattern at 8.235kV, $Q_{IEC}= 11.62\text{pC}$
(b) PRPD pattern at 9.927kV, $Q_{IEC}= 23.81\text{pC}$

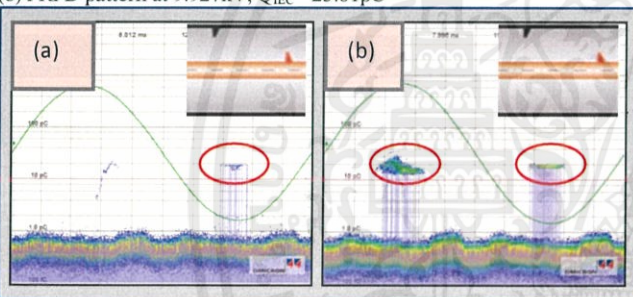


Fig.13. PRPD patterns caused by the 3 cm protrusion on the GIL conductor and the 6 cm protrusion on the GIL enclosure
(a) PRPD pattern at 7.025kV, $Q_{IEC}= 7.636\text{pC}$
(b) PRPD pattern at 7.628kV, $Q_{IEC}= 22.11\text{pC}$

D. Case 4 : The Protrusion on the GIL Conductor Covered by Insulation Compartment

In this case, PD cluster appeared at 270 degree, was similar to the typical PD pattern of corona discharge at high voltage electrode. PDIV decreased when the length of artificial protrusion increased. When compared to first case, the PD cluster width of this case was thicker, and the value of PDIV was higher than first case. The PRPD patterns obtained from case 4 experiment are depicted in Fig. 14-16.

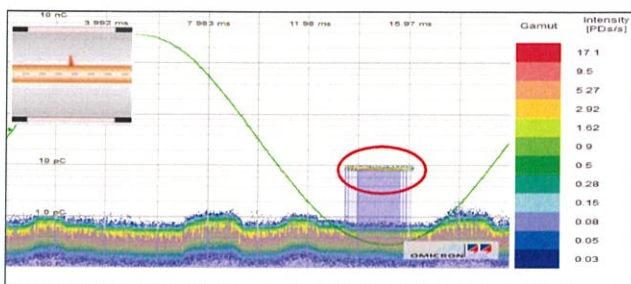


Fig.14. PRPD pattern caused by the 1 cm protrusion on the GIL conductor covered by the insulation compartment (PRPD pattern at 11.68 kV, $Q_{IEC}= 8.408\text{pC}$)

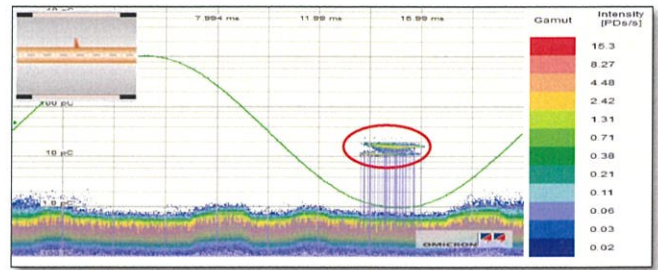


Fig.15. PRPD pattern caused by the 2 cm protrusion on the GIL conductor covered by the insulation compartment (PRPD pattern at 8.682 kV, $Q_{IEC}= 15.57\text{pC}$)

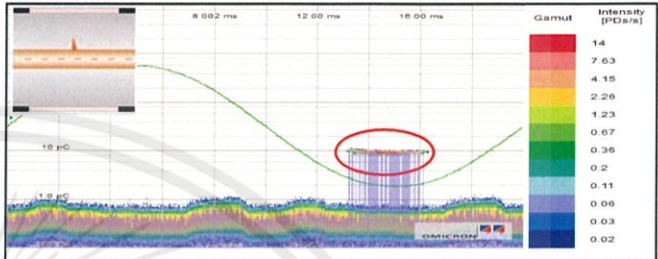


Fig.16. PRPD pattern caused by the 3 cm protrusion on the GIL conductor covered by the insulation compartment (PRPD pattern at 7.048 kV, $Q_{IEC}= 9.096\text{pC}$)

CONCLUSION

The results of the experiment can be summarized as follows:

- PRPD patterns obtained from every case study were similar to the typical PD pattern of corona discharge.
- When the length of the protrusion increased, the PDIV decreased accordingly because the gap distance between tip of the protrusion and the grounded enclosure was smaller.
- When the PD source covered by insulation compartment, the insulation compartment causes increasing in PDIV and the thicker of the PD cluster width.

REFERENCES

- [1] Zhumao Lu, Tianzheng Wang, Hua Yu, Jichong Liang, Yutong Chen, Dongdong Yang and Yanpeng Li, "Diagnosis and Analysis for A Typical Defect of Partial Discharge in GIS," Preprints of the 5th International conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies., pp. 1612-1616, Nov. 2015.
- [2] Toshihiro Hoshino, Hiroshi Koyama, Shiro Maruyama, and Masahiro Hanai, "Comparison of Sensitivity Between UHF Method and IEC 60270 for Onsite Calibration in Various GIS," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 21, no. 4, pp. 1948-1953, Oct. 2006.
- [3] Mengchen Hu, Xutao Han, Qiuyang Li, Shengfu Wang, Yao Chen, and Li lunha, "Research on Partial Discharge Characteristics of Protrusion defect in GIS Under Oscillating Lightning Impulse Voltage," International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, pp. 920-923, 2016.
- [4] CIGRE WG D1.03 (TF 09), "Risk Assessment on Defects in GIS Based on PD Diagnostics," IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 20, no. 6, pp.2167-2168, December 2013.
- [5] "IEEE Guide for Application and User Guide for Gas-Insulated Transmission Lines Rated 72.5 kV and Above", IEEE Std C37.122.4-2016, pp.21-23, May 2017.
- [6] Xiuwei Li, Hemeizi Tang, Shiyou Mu, Ke Song, Ran Liu, Guangke Xu and Qingquan Li, "Partial Discharge Monitoring System for PD Characteristics of Typical Defects in GIS Using UHF Method," International Conference on High Voltage Engineering and Application, pp.625-628, September 2012
- [7] IEC 60270, "High voltage test techniques – Partial discharge Measurement", 2000

ประวัติผู้เขียน



ชื่อ-สกุล จักกรี ห่วงไธสงค์ (กาย)
 วัน เดือน ปีเกิด 6 เมษายน 2540
 ที่อยู่ 1370 ม.3 ต.บางพูน อ.เมือง จ.ปทุมธานี 12000
 ประวัติ ระดับประถมศึกษา โรงเรียนพระหฤทัยนนทบุรี
 ระดับมัธยมศึกษา โรงเรียนมัธยมสาธิตวัดพระศรีมหาธาตุมหาวิทยาลัยราชภัฏ
 พระนคร
 ระดับปริญญาตรี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 E-mail guyyhong8@gmail.com



ชื่อ-สกุล ชลันธร วิชกุล (ไก่อด์)
 วัน เดือน ปีเกิด 13 มกราคม พ.ศ. 2540
 ที่อยู่ 39/81 หมู่ 5 ต.บ้านปึก อ.เมืองชลบุรี จ.ชลบุรี 20130
 ประวัติ ระดับประถมศึกษา โรงเรียนอนุบาลชลบุรี จ.ชลบุรี
 ระดับมัธยมศึกษา โรงเรียนชลราษฎรอำรุง จ.ชลบุรี
 ระดับปริญญาตรี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 E-mail chalantorn_w@outlook.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ชื่อ-สกุล ณรินนิธิภรณ์ ฌอนอมศักดิ์ดำรง (เกิ้ล)
 วัน เดือน ปีเกิด 30 มกราคม พ.ศ.2540
 ที่อยู่ 657/19 ต.บ้านโคก อ.พิพิธ อ.เมือง จ.ชลบุรี 20000
 ประวัติ ระดับประถมศึกษา โรงเรียนอนุบาลชลบุรี จ.ชลบุรี
 ระดับมัธยมศึกษา โรงเรียนชลบุรีสุขบท จ.ชลบุรี
 ระดับปริญญาตรี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 E-mail narinnitiporn.th@gmail.com



ชื่อ-สกุล ณัฐนนท์ มนต์ขลัง (ไทย)
 วัน เดือน ปีเกิด 22 กรกฎาคม พ.ศ.2539
 ที่อยู่ 90/1 ต.ลุมพุก อ.คำเขื่อนแก้ว จ.ยโสธร 35110
 ประวัติ ระดับประถมศึกษา โรงเรียนอนุบาลลุมพุก(วันครู2503)
 ระดับมัธยมศึกษา โรงเรียนคำเขื่อนแก้วชนูปถัมภ์
 ระดับปริญญาตรี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 E-mail nattnmk@hotmail.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้